

# WMEM

## 世界制造技术与装备市场

World Manufacturing Engineering & Market

No.5 2022  
2022年10月  
October 2022

主管: 中国机械工业联合会  
主办: 中国机床工具工业协会  
地址: 北京市西城区莲花池东路102号  
天莲大厦16层  
邮政编码: 100055  
电话: (010) 63345259  
电子邮箱: wmem@cmtba.org.cn

出版: 中国机床工具工业协会  
《组合机床与自动化加工技术》杂志社

主任: 毛子锋  
副主任: 王黎明 郭长城 王旭  
编委:

于成廷 吴柏林 张志刚 李忠波 何敏佳 张世顺  
蔚飞 严鉴铂 黄正华 刘德永 陈焱 张波  
冷志斌 陈虎 汪爱清 王焕卫 芦华 吴强  
唐毅 陈吉红 杜琢玉 王本善 赵延军 王社权  
姜华 商宏谟 安丰收 邓家科 穆东辉 于建华

特邀编委(各分会秘书长26人):

吴俊勇 邹春生 刘春时 房小艳 周慧 胡春美  
陈瑞雷 李升 王珏 卢智良 刘庆乐 查国兵  
陈鹏 崔瑞奇 边海燕 王兴麟 何培彦 张新龙  
肖明 叶永生 武平 陈远东 孙兆达 李鸿基  
王丽娜 陈长江

总编辑: 李华翔  
责任编辑: 梅峰  
国际标准代号: ISSN 1015-4809  
国内统一刊号: CN 11-5137/TH  
国内发行: 北京报刊发行局  
订阅处: 全国各地邮局  
邮发代号: 80-121

广告代理: 中国台湾总代理-京久实业有限公司  
地址: 台湾省台中市南屯区文心路一段540号11F-B  
电话: +886 4 23251784  
传真: +886 4 23252967  
电子邮箱: Jessie@acw.com.tw  
广告负责人: 吴佩青(Jessie)

承印: 北京久佳印刷有限责任公司

零售价: 中国内地RMB10.-  
中国香港HK\$70.-  
其他地区US\$10.-



《中国期刊网》、《中国学术期刊(光盘版)》(理工C辑)、《中文科技期刊数据库(全文版)》全文收录期刊、万方数据-数字化期刊群之中国核心期刊数据库引文期刊。

## 目录 CONTENTS

2022年第5期(总第182期)

# WMEM世界制造技术与装备市场

## 资讯 News

- 10 蔡司加大对华投资,购地自建项目在苏州工业园区正式启动等5则消息  
The project of Zeiss Company purchased land for self-built project in Suzhou Industrial Park officially launched etc. 5 news

## 企业零距离 Enterprise Report

- 12 初心未改 非凡依旧  
——访迪恩机床(中国)有限公司金治雨总经理 李华翔  
Interview with Jin Zhiyu, General manager of DN Machine Tool (China) Co., LTD

## 研发与应用 Research & Application

- 15 直接驱动技术在螺旋锥齿轮机床群的应用 刘胜勇  
Application of direct drive technology in spiral bevel gear machine cluster
- 20 一种高速精密数控车磨复合加工机床的研发 李云飞等  
Research and development of a high speed precision CNC compound machine tool for turning and grinding
- 26 大型烘缸数控多功能加工机床的研发与应用 董全宏 王芳  
Development and application of CNC multi-functional machine tool for large drying cylinder
- 28 小批量汽车冲压模具技术的研究与应用 潘远安等  
The research and application of small batch auto stamping die technology
- 31 轻型动台龙门数控机床的设计探讨 赵旭靖  
Discussion on the design of light movable Gantry CNC machine tool

## 产销市场 Production & Market

- 35 2021年机床工具行业上市公司运行概况 协会信息统计部  
Overview of the operation of listed companies in the machine tool industry sector in 2021

## 专题综述 Topical Review

- 38 新技术在机床领域应用概况 吴晓健  
The application of new technology in machine tool field
- 41 基于专利视角的国内外机床技术分析 牛江蓉等  
Analysis of machine tool technology at home and abroad based on patent perspective
- 45 我国机床产业集群发展的剖析与思考 胡端阳等  
Analysis and consideration of the development of China's machine tool industry cluster

# WMEM

## 世界制造技术与装备市场

World Manufacturing Engineering & Market

### 编者的话

实体经济是我国经济的命脉所在。党的二十大报告指出，建设现代化产业体系，坚持把发展经济的着力点放在实体经济上，推进新型工业化，加快建设制造强国、质量强国、航天强国、交通强国、网络强国、数字中国。作为制造业的基础产业以及推动工业数字化转型发展的主战场，未来机床工具行业无疑将发挥越来越大的作用。

进入二十一世纪以来，机床在提高加工精度、效率、降低成本的目标上，出现了一系列新技术和新手段，数字化、智能化、复合化、绿色制造等新技术和新理念深度融入机床制造及使用过程中。在这一发展进程中，一批国内机床工具行业企业，瞄准国外先进水平，通过对外交流与合作，以及自身不懈的努力，市场竞争力得到明显提升，展现了良好的发展前景。

与此同时，我们也应清醒地意识到，面对当前日益复杂的经济大环境，以及全球产业链和供应链的正在重构的态势，未来国内行业企业还有许多困难和障碍需要去克服。

中国机床工具工业协会发布的2022年1-8月重点联系企业统计数据反映：机床工具行业正在逐步企稳回升，但仍存在市场需求和投资偏弱，疫情影响难以预料等困难和问题，这些都给年内行业运行带来较大压力。

未来之路，任重而道远。我们需要及早摒弃“拿来主义”、“弯道超车”等不切实际的幻想，加快补强在主要功能部件、软件开发、基础材料等方面的短板，不断提升企业自主创新能力，促进行业整体持续健康发展。

本刊编辑部

版权所有，未经本刊书面许可，不得转载。

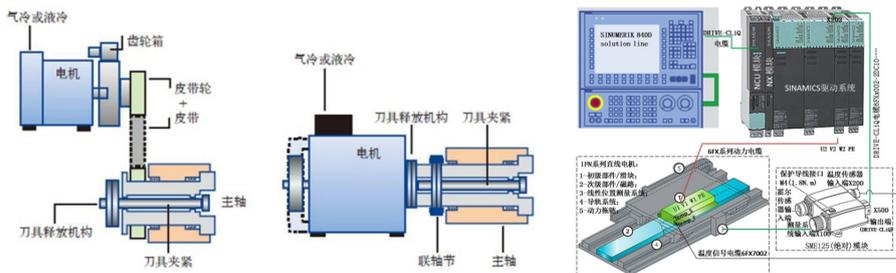
本刊已许可中国学术期刊（光盘版）电子杂志社在中国知网及其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。该社著作权使用费与本刊稿酬一并支付。作者向本刊提交文章发表的行为即视为同意上述声明。

### 内容导读

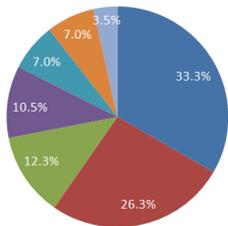
#### 12 企业零距离 | 初心不改 非凡依旧 ——访迪恩机床（中国）有限公司金治雨总经理



#### 15 直接驱动技术在螺旋锥齿轮机床群的应用



#### 35 2021年机床工具行业上市公司运行概况



- 金属切削机床
- 磨料磨具
- 工量具
- 数控装置
- 金属成形机床
- 机床附件及功能部件
- 木工机械

行业名称	资产总计 亿元			负债合计 亿元			资产负债率 %		
	本期	同期	同比 %	本期	同期	同比 %	本期	同期	同比 百分点
金属切削机床	955.0	833.7	14.6	535.5	467.2	14.6	56.1	56.0	0.0
金属成形机床	95.6	83.3	14.8	43.0	32.1	34.0	45.0	38.5	6.4
工量具	119.8	90.2	32.9	34.9	32.2	8.3	29.1	35.7	-6.6
机床附件及功能部件	84.2	60.2	40.0	26.6	22.1	20.2	31.6	36.8	-5.2
磨料磨具	715.8	653.5	9.5	329.1	286.4	14.9	46.0	43.8	2.1
木工机械	69.0	51.0	35.3	23.4	12.4	89.2	33.9	24.2	9.7
数控装置	350.7	300.5	16.7	195.6	158.3	23.5	55.8	52.7	3.1
机床工具合计	2390.1	2072.3	15.3	1188.0	1010.7	17.5	49.7	48.8	0.9

#### 38 新技术在机床领域应用概况



# WMEM

## 世界制造技术与装备市场

### World Manufacturing Engineering & Market

Competent Authority: China Machinery Industry Federation

Sponsor: China Machine Tool & Tool Builders' Association

Add: 16/F., Tianlian Mansion,  
102 Lianhuachi East Road,  
Xicheng District, Beijing,  
100055 P.R. China

Tel: (010) 63345259

E-mail: wmem@cmtba.org.cn

Publisher: CMTBA  
Modular Machine Tool & Automatic  
Manufacturing Technique

President of E-C: MAO Yu-feng

Vice President of E-C: WANG Li-ming

GUO Chang-cheng WANG Xu

Committeemen:

YU Cheng-ting, WU Bai-lin, ZHANG Zhi-gang,  
LI Zhong-bo, HE Min-jia, ZHANG Shi-shun, YU Fei,  
YAN Jian-bo, HUANG Zheng-hua, LIU De-yong,  
CHEN Yan, ZHANG Bo, LENG Zhi-bin, CHEN Hu,  
WANG Ai-qing, WANG Huan-wei, LU Hua, WU Qiang,  
TANG Yi, ZHEN Ji-hong, DU Zhuo-yu, WANG Ben-shan,  
ZHAO Yan-jun, WANG She-quan, JIANG Hua,  
SHANG Hong-mo, AN Feng-shou, DENG Jia-ke,  
MU Dong-hui, YU Jian-hua

Specially invited Committeemen:

WU Jun-yong, ZOU Chun-shen, LIU Chun-shi,  
FANG Xiao-yan, ZHOU Hui, HU Chun-mei,  
CHEN Rui-lei, LI Sheng, WANG Yu, LU Zhi-liang,  
LIU Qing-le, ZHA Gua-bin, CHEN Peng, CUI Rui-qi,  
BIAN Hai-yan, WANG Xing-lin, HE Pei-liu,  
ZHANG Xin-long, XIAO Ming, YE Yong-sheng,  
WU Ping, CHEN Yuan-dong, SUN Zhao-da,  
LI Hong-ji, WANG Li-na, CHEN Chang-jiang

Chief-Editor: Li Huaxiang

Executive Editor: Mei Feng

ISSN 1015-4809

CN 11-5137/TH

Post Distribution Code: 80-121

Advertising agency:

WORLDWIDE SERVICES CO.,LTD

Add: 11F-B, No.540, Sec.1, Wen Hsin Rd., Taichung, Taiwan

Tel: +886 4 23251784

Fax: +886 4 23252967

E-mail: Jessie@acw.com.tw

Contact: Jessie



WMEM官方网站

## 目录 CONTENTS

2022年第5期 (总第182期)

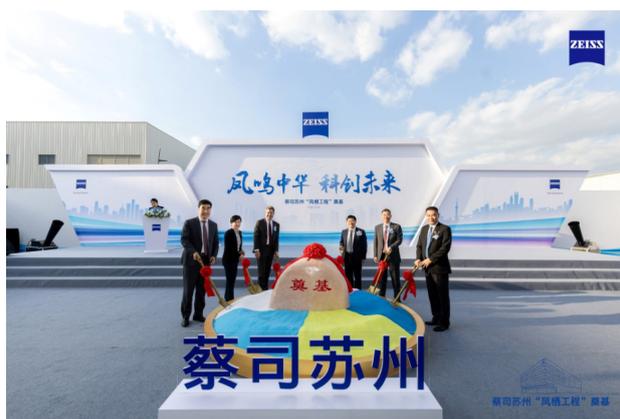
### 产品与技术 Products & Technology

- 48 在机测量技术在机匣精密尺寸加工中的应用 胡志星等  
Application of real-time measurement technology in precision machining of receiver
- 52 基于高速电主轴的实时振动监测技术应用 吴慧敏等  
Research on Chip Breaking in Turning Thread Based on Vibration Principle
- 56 新型“数字万用表”助力机床装配水平的提高 周汉辉 孙常建  
Application of new "digital multimeter" in machine tool assembly technology
- 62 对置式镗铣加工中心关键技术及应用 何发诚等  
The key technology and application of opposite boring and milling machining center
- 64 高速电主轴的热态性能分析与计算 陈凯等  
Thermal performance analysis and calculation of high speed motorized spindle
- 68 弹射套筒及活塞加工方法研究应用 臧元甲等  
Research and application of machining method for sleeve and piston of ejection launcher
- 73 细长轴的切削加工 赵有正  
Cutting process of slender shaft
- 77 镍基高温合金铣削刀具的使用技巧 邹峰 张甜甜  
Use of milling tools for nickel-based superalloy machining
- 80 增材制造复杂曲面结构零件的表面光整研究 蒋松山等  
Study on surface finishing process for complex curved structure parts in additive manufacturing
- 83 四轴高效加工应用 张永洁  
Practical application of high efficiency four-axis machining
- 88 一种进口磨齿机磨削液冷却喷淋电机自动控制装置的设计 张学斌等  
Design of grinding liquid cooling spray of automatic motor control device in a imported gear grinding machine
- 91 浅析高硅铝壳体精密加工过程关键技术质量控制 翟凌等  
Quality control of key technology in precision machining process of high silicon aluminum shell
- 94 汽轮机可倾瓦的工装设计与加工技术 董礼涛等  
Tooling design and machining technology of tilting tile in steam turbine
- 96 大型多工位压力机立柱连接梁装置的研制 傅岩等  
Design and manufacture of column connecting beam device for large multi-station press
- 99 动臂镗孔快速装夹工装的制造与应用 安宝峰 赵忠刚  
Development and application of fast clamping tool for movable arm boring
- 102 电机转子导条涨型工艺研究 薛金良等  
Study on expansion technology of motor rotor guide strip
- 105 基于振动原理的螺纹车削断屑问题的研究 孙雪娜  
Research on cutting chip of thread turning based on vibration principle

消息 (34、37、55、61、98)

## 蔡司加大对华投资，购地自建项目在苏州工业园区正式启动

10月18日，蔡司集团在中国国内的首次购地自建项目——苏州“凤栖”工程奠基启动，蔡司中国本土化进程再进一步。“凤栖”工程建成后，蔡司苏州将为其工业质量、研究显微镜、手术显微镜、眼科设备等多业务部门提供本地化研发和生产服务。



蔡司大中华区总裁兼首席执行官福斯特表示，新工程落成后将有助于蔡司利用苏州深厚的制造业、人才及产业链优势，在长三角地区打造更具韧性、更可持续的产业生态圈。未来，蔡司将继续加大对中国市场的投资，进一步深化本土化创新战略，助力“中国制造”升级。

## 西班牙创新商业团体支持计划积极促进中小企业数字化转型



由西班牙工业、商业和旅游部召集的创新商业团体支持计划(AEI)于7月26日结束，该计划总预算为4960万欧元，得到了企业的广泛参与。其目标是通过支持AEI

制定的创新和商业竞争力战略来提高中小企业的竞争力。

西班牙机床制造商协会 (AFM, Advanced Manufacturing Technologies) 与相关公司合作管理了9个项目，参与工厂的数字化转型和工业4.0，并设法筹集了超过550万欧元资金。这些项目中的大多数是按照数字技术项目的行动路线制定的，因为它们寻求实施新技术以实现生产过程逐步自动化的项目。

参与项目的AFM集群相关公司包括: CORREA、ETXETAR、GEMINIS、IBARMIA、IZADI、ONA、SARIKI、SAVVY、SMARTPM、TALLERES PARAMIO、TECNALIA、ZAYER和ZITU等。

## 日本大隈开发出“兼顾高精度和低碳”的5轴控制加工中心

针对低碳/工序集约化需求较高的欧美市场，大隈株式会社开发出“兼顾高精度和节能”、紧凑且便于操作的5轴加工中心“GENOS M560V-5AX”，通过一次装夹即可实现多面高精度加工的工序集约化，有助于提高客户的生产率与收益性。

该机床标配自行稳定保持高精度的智能化技术“Thermo-Friendly Concept”以及应用亲和概念的节能技术“ECO suite plus”和实现5轴加工精度稳定的“5-Axis Auto Tuning System”，可大幅缩短暖机运转或尺寸补偿所需的时间，降低了功耗，可自动、高效地回收切削液中所含的淤泥，回收率达到96%（被切削材料为铝时的实测值），实现3年不用清扫冷却液箱，3年不用更换冷却液的目标。





该机床进一步减少了占地面积（与原来机型相比减少25%），可进行 $\phi 700\text{mm}$ 直径工件的5轴加工，X轴行程1,050 mm，Y轴行程560 mm，Z轴行程460mm，占地面积仅为 $8.2\text{m}^2$ 。采用高刚性的龙门式结构，标配的强力主轴最高转速15,000 r/min，最大切削量 $672\text{cm}^3/\text{min}$ （钢材S45C、立铣加工），两端配有高刚性耳轴的工作台，承重可达400 kg，适应重切削。机床具有良好的接近性，前沿钣金与工作台中心之间的距离为495mm，操作者可以以舒适的身体姿势进行工件更换作业。

## 尼得科机床向市场推出新研发的齿轮 切削倒角机“CF26A”和专用工具 “EdgeCut”

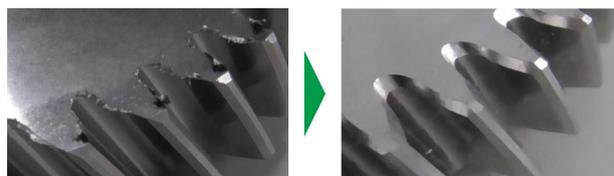
为了实现齿轮的高精度精加工，尼得科机床株式会社从9月29日起开始发售用于切削去除齿轮倒角部（角部）的切削倒角机“CF26A”以及专用工具“EdgeCut”。



CF26A本机床用于高速、高精度地加工电动车（EV）用的高精度齿轮的倒角部，旨在满足市场上对降低噪音和提高传动效率的需求。此外，尼得科机床还新研发出了用于设计倒角形状的工具设计模拟，实现了机床及工具、模拟“三位一体”的高精度、高效率的加工。

该机床采用了可使用高效进行切削加工量产的展成法。以往的主流倒角加工法——分节加工法存在齿面和端面方向上残留凸棱和毛刺等问题，而CF26A采用切削加工的方式去除倒角部，因此可以弥补分节加工法的不足，确保齿面和端面的高品质。此外，可以避免分节加工之后再

次出现毛刺，还能去除前一工序的滚齿加工中产生的端面毛刺，并且还能对应以往分节加工中较难的齿底部分的倒角和1mm以上的较大倒角宽度。



加工前

加工后

此次开发的专用工具EdgeCut通过使用最新的工具设计模拟，在实际加工时，可确保倒角形状符合要求。由于该专用工具使用寿命长、工具更换频率较少，因此可以重新研磨或重新涂层，有效控制了工具的维护成本。

## 思看科技参加IMTS2022美国机床展

9月12日至17日，由美国机械制造技术协会(AMT)主办的IMTS2022美国国际机械制造技术展览会在芝加哥举办。本届展会面积约11.24万平方米，展商1815家，其中，77%为美国展商，德国66家、日本9家、中国17家展商参展，约90000专业人士参观展会。

作为全球最早研发生产手持式三维视觉测量产品的高科技型企业之一的思看科技（杭州）股份有限公司携旗下明星产品亮相IMTS2022。

展会上，公司重点展示了AutoScan-T自动化三维检测系统、AM-DESK系列全能型自动化测量平台、KSCAN系列复合式三维扫描仪、SIMSCAN系列手持式三维扫描仪、TrackScan系列跟踪式三维扫描仪、iReal彩色三维扫描仪等产品，力求在现场为观众展示全行业场景融入的3D数字化解决方案。



# 初心未改 非凡依旧

## ——访迪恩机床（中国）有限公司金治雨总经理

中国机床工具工业协会传媒部 李华翔

当下，受新冠疫情冲击、经济放缓、用工成本等诸多因素影响，全球范围内的产业链、供应链重构与再平衡正在发生。一些资金实力雄厚的大公司，依据自身发展战略，选准时机，兼并或收购相关优质资产，借此扩大企业规模和经营领域。

今年1月，韩国汽车部品制造商DN AUTOMOTIVE从MBK投资公司手中正式全资收购斗山机床，并在6月将其更名为“DN SOLUTIONS(下同)(迪恩机床)”。7月7日，斗山机床（中国）有限公司正式更名迪恩机床（中国）有限公司。

熟悉斗山机床的人都知道，从最早的“大宇机床”到“斗山机床”，再到现在的“迪恩机床”，随着母公司的更迭，迪恩机床已数易其名。然而这次公司更名，却少了以往的时间过渡期，毫无疑问，这对于公司如何维系以往客户的信任度、保证业务的延续性提出了更大挑战。

8月10日，迪恩机床（中国）有限公司在烟台工厂召开媒体见面会，新任总经理金治雨接受多家行业媒体的联合采访，介绍公司最新情况以及未来发展规划，并就媒体关心的问题同记者进行了坦诚交流。

### 一、放眼全球，服务中国，与客户携手共进

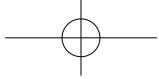
DN Solutions(迪恩机床)的历史可以追溯到上世纪70年代中期。近半个世纪以来，伴随着世界经济全球化的不断深入，以及数控机床产业的快速发展，迪恩机床凭借勇于挑战和不断创新的精神持续成长壮大。

据金治雨总经理介绍，迪恩机床现有3家工厂（韩国



南山工厂、韩国圣柱工厂、中国烟台工厂）。在全球66个国家拥有155个销售网点。除韩国总部以外，拥有4个海外法人（美国、中国、德国、印度）。公司销售排名目前居全球前三，在多个欧美地区市场占有率都位居第一，在中国排名第四。截止2021年年底，迪恩机床全球累计销售25万台，市场占比达7%，中国市场的销售占比接近30%，是除韩国、美洲市场之外，又一大主力市场。这其中，迪恩机床（中国）有限公司烟台工厂无疑扮演了重要的角色。

早在2003年，迪恩机床（中国）有限公司的前身



原“大宇机床”在烟台建厂，迈出了开拓中国市场的第一步。2005年公司更名“斗山机床”。工厂占地面积77,866m<sup>2</sup>（其中，建筑面积44,100m<sup>2</sup>）。烟台工厂建成19年来，依托韩国总部研发中心强大的技术支持，产品本土化进程不断加快，目前针对中国市场已推出了两大类74款机型(其中，车削中心42款；加工中心32款)。

截止今年上半年，公司累计销量已经突破了3万多台。目前，公司产能达6,000台/年，员工人数550余名，在全国范围内形成了包括5个分公司、4个办事处、1个技术中心、4个服务中心、44家代理商在内的完善销售网络。用户主要分布在汽车、通用机械、能源、航空/医疗、IT行业等领域。



凭借着过硬的产品质量和良好的服务，迪恩机床（中国）有限公司经营业绩一直保持平稳增长态势，2019年至2021年成绩更加亮眼，即使受到新冠疫情的影响，三年间平均年销售收入增长率仍高达29%。2021年迪恩机床（中国）有限公司在华销售收入高达29亿元人民币（其中，70%来自烟台工厂，30%来自韩国工厂），占整个集团公司销售总额的9%。

此外，随着近几年产业链的调整变化，迪恩机床（中国）有限公司在深耕中国市场的同时，也开始将目光扩展到海外市场。据介绍，自2020年年初起，公司开始向海外出口中国产设备。虽然受到疫情和海运货舱价格暴涨的影响，但目前已成功向3个国家(俄罗斯/马来西亚/墨西哥)销售了设备。今年10月，公司还将向墨西哥出口30多台设备，并提供中国技术人员的服务支持。

## 二、多样化、高性价比，为用户提供值得信赖的产品

“迪恩机床向来以多样化和高性价比而著称。”金

治雨总经理告诉记者，位于韩国总部的迪恩机床研发中心在高速主轴、高刚性导轨、热位移优化、智能化操作和监控等核心技术领域有着很强的创新实力，并不断开发新产品、新技术、新应用。

为保证产品品质，迪恩机床的所有产品在新产品开发阶段全部经过严格质量管理，主要零件要通过MTPAP（机床零件批准程序），以确保其质量和可靠性。作为ISO17025（国际认可校准机构）认可机构，迪恩机床使用各种测量仪器进行严格的自校准和操作来保证产品的高精度。在中国，公司每年还会进行ISO9001审核，以此来确保每个部门严格的操作流程。

记者在烟台工厂的生产现场看到，组装车间内的工人们正在认真调试每台设备。作为重要生产监控环节，迪恩机床自主开发的iDoo control系统在加工车间正在平稳运行，该系统将所有的加工机床连接后进行统一监控，实现了更为高效直观的管理，最大限度地发挥了每台机床的效能。在检测工序环节，机床床身、托板等主要铸件在加工完成后全部要经过三坐标严格的尺寸检测。



在零部件配套环节，烟台工厂生产的所有机床，其主要功能部件采购、重点零件加工，均采用进口与本地化相结合的方式，从而有效地确保了机床产品质量。

科学的生产管理流程和严格质量管理手段，保证了烟台工厂生产的机床品质，也最终赢得了客户的信任。

## 三、推陈出新，及时响应市场需求变化

多年来，用户需求变化不断加速，机床企业能否及时应对，是其核心竞争力的重要体现，金治雨总经理对此充满信心。他表示，凭借过硬的研发实力，加上遍布全球的营销服务网络，迪恩机床能够准确把握各行业的需求变化，扩大产品阵容，及时推出适销对路的新产品。

近几年，中国市场对于高速、精密、大型机床的需求逐步增多。为满足未来市场对大型机床的需求，烟台工厂在韩国总部的技术支持下，加大相关机型的研发和引进力度。2021年底，烟台工厂新建了专门用于大型机生产的新车间，主要生产部分型号的大型立式和卧式车削中心、大型镗床、5面龙门加工中心等产品（总的月产能500台，其中大型机月产能大约在60台左右）。



针对新能源汽车“零部件形状的复杂化”、“零部件、材料的轻量化”的特点，迪恩机床通过开发5轴或多轴加工设备，以应对电动汽车的长、大零件的高效加工需求。迪恩机床针对中国市场开发了集成一体式桁架自动化，可有效提高零部件加工效率的新一代双主轴卧式车削中心PUMA TW2605-GL。迪恩机床韩国总部从R&D/AE/CS/生产等各个部门抽调了在5轴设备方面最有经验的人员，专门成立了15人以上的5轴加工机床的研发团队，全力推进相关5轴加工机床的研发进程。

在半导体、太阳能发电、二次电池、固体燃料电池、航空用引擎零部件、人工关节及人工牙齿等零部件的制造方面，陶瓷材料的用途越来越广泛，市场对具备超微加工、特殊材料高速高精加工技术的切削设备的需求也越来越大。为此，迪恩机床强化相关产业的定制化应对实力，不断推出能够满足半导体产业的各种客户需求的产品阵容。代表性的半导体、陶瓷加工设备包括：石英环研磨加工机XG 600和XG 800等。

在自动化机床方面，作为未来重要的战略领域之一，迪恩机床自主研发了LPS柔性线，可满足客户多种类、小批量的生产需求，大幅提高生产效率、降低人力成本，从而实现无人化的自动加工。

#### 四、新起点，再出发，续写非凡

作为全球最大的机床生产和消费市场，中国市场的情

况自然备受关注。对于中国市场的需求变化和营商环境，新任总经理金治雨先生有着亲身的感受和深刻的理解。他告诉记者：“我从2008年2月首次赴任中国工厂至今已有12年，期间担任过几乎各个部门的部长，在这12年中我亲身经历了公司的成长，能在公司重新整装待发之际担任总经理，我深感荣幸。”

当前，国内新冠疫情仍然反复，市场下行压力加大，未来市场竞争将更加激烈。对此，金治雨总经理坦言，今明两年市场需求不会有太大的涨幅，但用户企业的设备升级换代所带来的商机还是不少的。迪恩机床将在维持现有市场的基础上，向高品质、高端机型方向发展，逐步改变公司产品结构比例，同时加快拓展新的市场领域。同时，为了更好地服务中国用户，迪恩机床正在讨论规划2023年在长三角区域投资设立技术研发中心，主要用于5轴、复合加工机床的展示及培训，以及提供自动化解决方案等服务。

为减少公司更名带来的影响，保证用户的信任度和在中国业务的顺利开展，金治雨总经理将亲自带领团队拜访老客户，同时通过组织线上、线下会议，与经销商、VIP客户进行深入交流。

谈到更名所带来的影响，金治雨总经理告诉记者：“我们只是变更了公司名称，公司的运营方式没有变化。这次我们虽然以‘迪恩机床’重新开始，但依然以‘客户满意’、‘应对市场的快捷性、灵活性’以及‘遵守作业标准和原则’作为公司的核心战略，且不再仅仅局限于机床设备制造，而是扩张至更广阔的领域，为客户提供不同行业类别的最优解决方案。”



展望未来，金治雨总经理表示：“我们对于即将共同开启的新征程满怀期待和信心。我们将继续坚持Machine Greatness的理念，发扬匠人精神，为客户提供优质的产品，提供超越市场预期的产品和技术。我坚信我们会成为经销商、合作伙伴和客户的骄傲。” □

# 直接驱动技术在螺旋锥齿轮机床群的应用

重汽（济南）车桥有限公司 刘胜勇

【摘要】通过直接驱动系统的机理分析与螺旋锥齿轮机床群性能需求的调研，以案例形式给出直接驱动技术中旋转电机和直线电机的具体应用。本文对齿轮机床的制造及直驱电机的应用具有显著意义。

承担弧齿锥齿轮和准双曲面齿轮减材切削的现代螺旋锥齿轮机床群与素有“工业母机”美誉的其他高端数控装备一样，为能实现3D曲面的高精度、高速度和高稳定性加工<sup>[1]</sup>，除选用性能卓越的智慧大脑——硬件和软件组成的CNC系统外，还得配装零传动环节的具有高刚度快响应、高效低耗无润滑特性的直接驱动系统（Direct Drive System，简写DDS）。

## 一、直接驱动系统的机理分析

直接驱动系统是以直驱电机为载体，区别于常规驱动系统的一种驱动技术的创新形式，现被越来越多地应用到各行业中。

### 1. 两种驱动系统的特性对比

在常规驱动系统的负载（工作台或主轴等机械本体）与电机之间，制造商通常增设滚珠丝杠螺母副、蜗轮蜗杆副、齿轮齿条副、齿轮箱、皮带/皮带轮、联轴节、链条等机械传动

环节（见图1），用以大幅度提升负载终端的驱动转矩。然而，这些中间环节既会引起齿隙/间隙、机械损失与运行噪音，也增加了数控装备的体积重量与运维复杂程度，还降低了整机性能（负载惯量不超过电机惯量的5~10倍）。

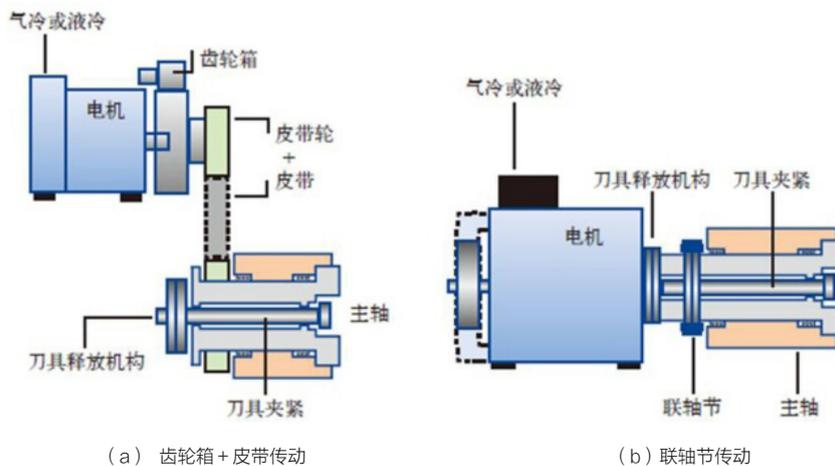


图1 常规驱动系统示意

在图2所示的直接驱动系统中，制造商将DDR（Direct Drive Rotary）电机或DDL（Direct Drive Linear）电机直接耦合/联接至从动负载上，经由驱动装置中数字化电信号<sup>[2]</sup>的滤波、整流、放大与脉宽调制等控制，实现负载的直接驱动。这种驱动方式通过剔除很多的中间组件和传动部件，使得传动链缩短为零，也使得整机制造简单、结构简化紧凑、位置保持能力提高60倍以上（DDR分度精度近乎1弧分及重复定位精度小于1弧秒）、工作效率提高1倍以上、恒速特性非常好（DDL速度波动小于±0.01%及速度1 μm/s下平稳运动），甚至不再考虑负载与电机的惯量匹配要求（二者惯量比超过11000:1）。

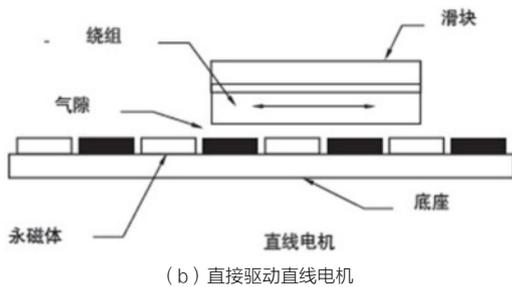
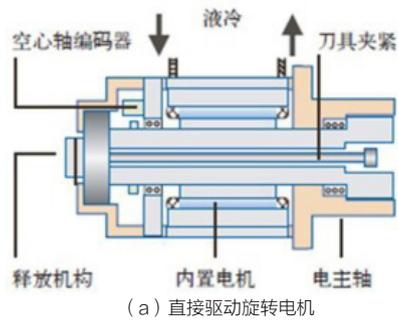


图2 直接驱动系统示意

## 2. 直接驱动旋转电机

又被称为直驱转矩电机的DDR电机由同步伺服电机演化而来，通常具有较多的磁极对数和较高的功率密度，可在低转速下提供超大的输出转矩。DDR电机细分为有框、无框和模块化三类，见表1。

表1 直接驱动旋转电机分类与构成

电机类型	DDR电机结构	图形示意
有框DDR电机	较常见的一种带外壳（框架）的DDR电机，主要由框架、定子、磁铁、精密轴承和高分辨率反馈元件组成，用在旋转分度和速率转台上，用作柔性分度器等，如科尔摩根RBEH电机	
无框DDR电机	结构最紧凑且最轻的一种无框架的DDR电机，仅有的分离式转子组件和定子组件被一体化集成至机床主轴等从动负载上，如西门子1FE1与1FE2电机、FANUC的DiS-B电机等	
模块化DDR电机	将无框DDR技术的节约空间和性能优势与全框架电机便于安装的特点结合设计的一种有框无轴承电机，其转子经由新式压缩联轴器连接至机床旋转轴上，如科尔摩根C(H)电机	

## 3. 直接驱动直线电机

DDL电机类似平铺结构的无刷旋转电机，即其原理相当于中心剖开后平铺摆放的同步伺服电机，一次侧是将基本部件的初级端定子绕组平铺为线圈组件（也称滑块），二次侧是将基本部件的次级端转子永磁体平铺为磁体轨道（也称磁路），如图2b所示。DDL电机细分为有铁芯结构和无铁芯结构两类，见表2。

表2 直接驱动直线电机分类与构成

电机类型	DDL电机结构	图形示意
有铁芯DDL电机	一次侧是在电机铁芯上绕线成滑块后覆盖模制树脂，二次侧是将磁路装至底座（支架）后覆盖模制树脂或不锈钢保护罩。其单位体积推力大，气隙0.8mm，适宜高加速和重载场合。如科尔摩根IC(D)滑块与MC(D)磁路、WEISS的HG电机	
无铁芯DDL电机	没有铁芯，齿槽效应为零，滑块和磁路之间没有任何吸引力。其运动超平滑，气隙0.5mm，适宜轻载高速场合。如FANUC的LiS-B电机、WEISS的HL电机	

## 二、螺旋锥齿轮机床群的性能需求

在轨道、汽车、风电、冶金矿山、工程机械、减速机等行业，两个相交轴之间的传动元件绝大多数采用格里森圆弧收缩齿制或奥林康摆线等高齿制的螺旋锥齿轮。由于用户对重载齿轮传动强度高、噪声低、承载有力、生产高效、绿色环保、成本最佳等特性的刚需，包括切齿机、研齿机、配对机、磨刀机、装刀机、测量机等数控机床在内的集设计、制造和检测一体的智能制造闭环系统的需求量迅猛激增。

(1) 锥齿轮切齿机在SINUMERIK 840Dsl等系统及与之配套驱动系统（如SINAMICS S120）提供的数字化逻辑电信号驱动下，通过6个坐标轴（见图3）的联动，载着条形硬质合金刀条组成的尖齿刀盘，沿预定程序轨迹进行干式持续分度切削，获得用户所需的弧齿锥齿轮或准双面齿轮。工件主轴A、刀具主轴B和基角轴C为直接驱动的高刚性电主轴，DDR电机采用西门子1FW6230等系列。铣削深度轴X、刀具定位轴Y、工件定位轴Z为闭环伺服直线运动，DDL电机采用SIMOTICS L等系列。高精度的角度编

码器和直线光栅尺满足产品精度DIN/ISO 4级甚至更高，如海德汉ERA4800C。CNC系统内嵌齿制加工控制软件，如奥林康COP32、中大创远HCS等。

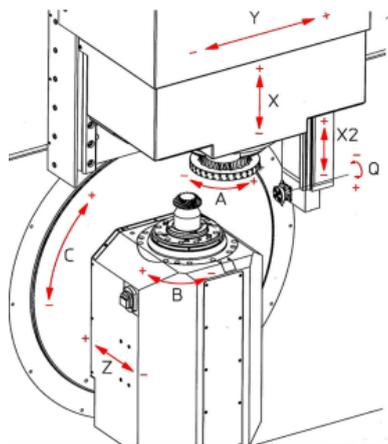


图3 锥齿轮切齿机的坐标轴

(2) 锥齿轮研齿机在FANUC FS160i-M等系统及与之配套驱动系统（如FANUC  $\alpha$ iSP+SV）提供的数字化逻辑电信号驱动下，通过5个坐标轴（见图4）的联动及4区位研齿法，沿预编程的研齿轨迹进行V、H、J轴的振荡研磨，获得用户所需良好啮合区的锥齿轮副。主动轮轴B、从动轮轴C为直接驱动的高刚性电主轴，DDR电机采用发那科DiS-B等系列。从动轮头架垂直轴X（V）、主动轮头架水平轴Y（H）、主动轮头架插入式间隙调整轴Z（J）为闭环伺服直线运动，DDL电机采用发那科LiS-B等系列。高精度的角度编码器和直线光栅尺满足产品精度DIN/ISO 4级甚至更高，如海德汉LC193F。CNC系统内嵌研齿控制软件，如中大创远HLS等。

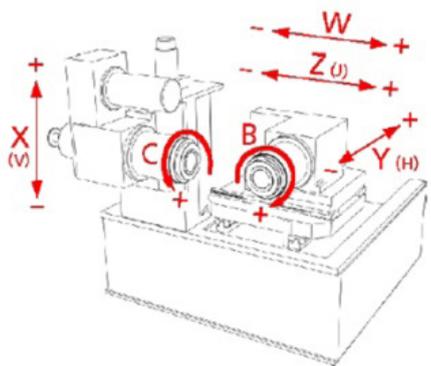


图4 锥齿轮研齿机的坐标轴

(3) 刀条刃磨机（又称磨刀机）在MITSUBISHI M800等系统及与之配套驱动系统（如三菱MDS系列）提供的数字化逻辑电信号驱动下，通过5个坐标轴（见图5）的联动，载着钝化的条形三面刃尖齿刀条，借助电镀

金刚石砂轮进行双工磨削处理——摆动方式粗磨削和展成方式精磨削。旋转轴C、摆动轴A与砂轮主轴为直接驱动的高刚性电主轴，DDR电机采用科尔摩根D（H）等系列。磨削台面往复轴X、垂直磨削周Y、水平磨削轴Z以及装卸站轴B、U、V、W为闭环伺服直线运动，DDL电机采用三菱LM等系列等。高精度的角度编码器和直线光栅尺满足产品精度DIN/ISO 4级甚至更高，如海德汉RCN2390F。CNC系统内嵌刀条磨削控制软件，如TWINCAT BGS等。

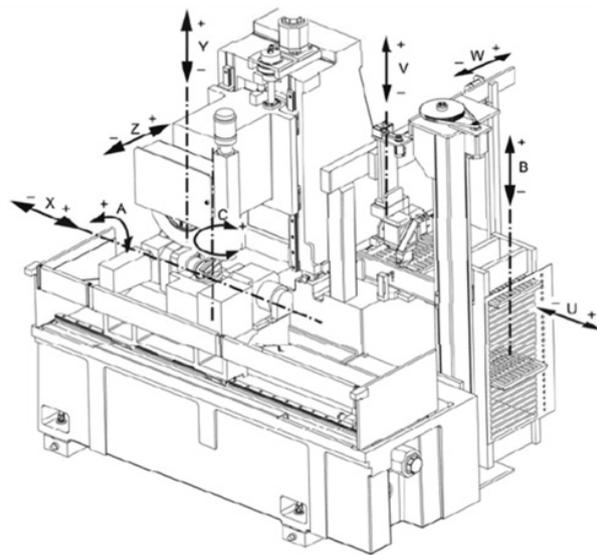


图5 刀条刃磨机的坐标轴

### 三、直接驱动技术的应用

数控装备的综合精度不仅取决于CNC系统、驱动系统与测量系统的动态匹配和最小分辨率，也离不开执行部件的精心装配和最优调整。

#### 1. DDR电机1FW6230在切齿机的应用

DDR电机作为一种高转矩输出的同步传动技术，现已成为数控装备旋转传动必不可少的利器，被广泛用于车床、加工中心、磨床等数控装备以及新能源汽车等场合，如配置SINUMERIK 840Dsl PCU50.5-C系统和SINAMICS S120驱动系统的C50锥齿轮切齿机（下称C50）的刀具主轴A和工件主轴B装用西门子DDR电机1FW6230-0wX15-0QC2。图6为电机1FW6230在C50刀具主轴A的结构示意，其装配调试步骤如下：

(1) 装配转子永磁体与转台轴承等零部件。结合图样核查电机尺寸 $\phi 418H8$ 、 $\phi 4630 -1$ 、 $\phi 576h8$ →用兆欧表校验电机三相对地绝缘电阻不少于 $10M\Omega$ →清理主轴体、法兰盘、转子法兰等零件（去毛刺、擦拭干净）→安装转子法兰于主轴体上并经30条 $M8 \times 55$ 内六角螺钉紧固→将1

件尺寸395×5的O形圈NBR70套入转子法兰盘的凹槽内→将定子永磁体装至主轴体并经24条M8×25内六角螺钉在19N·m转矩下紧固→将1组德国FEY公司双叠片金属密封环FK6 ASD 337/10/3套入主轴体的已涂抹润滑脂的下环槽处→装入法兰盘→装配推力向心转台轴承YRTS260至主轴体→经34条M8×60内六角螺钉紧固YRTS260内圈于主轴体并经36条M8×30内六角螺钉紧固外圈于法兰盘上→将1件德国FEY公司单片密封环FK3 AS 255套入主轴体的已涂抹润滑脂的上环槽处→安装顶部密封盖并经8条M8×30内六角螺钉紧固于法兰盘上。

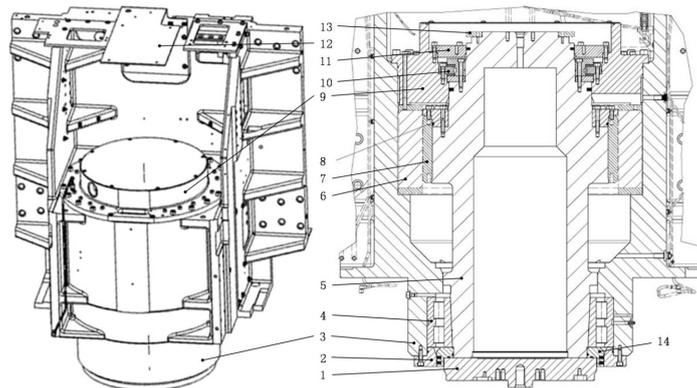


图6 电机1FW6230在C50刀具主轴A的结构示意

- 1.刀盘安装座 2.外压环 3.鞍座 4.NNU4964圆柱滚子轴承 5.主轴体 6.定子(线圈)  
7.转子(永磁体) 8.内六角螺钉M8\*55 9.法兰盘 10.YRTS260推力向心转台轴承  
11.密封盖 12.中继盒支架 13.光栅鼓ERA4800C 14.内压环

(2) 主轴体调头安装定子线圈。将主轴体上下端颠倒并固定于专用台架上→经3件M5×10内六角螺钉紧固冷却管路适配器于定子线圈上→置定子线圈的出线端在底部并禁止弯折电缆、碰伤冷却管路适配器→定子线圈的顶部加装防吊装变形的定子加强环→转子永磁体外侧包裹1圈厚0.5宽200的尼龙垫条→三点水平吊装定子线圈及定子加强环缓慢套入转子永磁体并时刻保持尼龙垫条的竖直完好性以及定子与转子的间隙均匀→在法兰盘底部穿入23条M8×130内六角螺钉并在19N·m转矩下紧固于法兰盘上→自定子线圈上拆掉定子加强环并移至主轴体外侧→辅助杠杆作用力抽出尼龙垫条→徒手转动主轴体轻盈无阻滞。

(3) 主轴体调头至顶部密封盖朝上后装入鞍座孔中。清理鞍座孔(去

毛刺、擦拭干净)→经1件吊环螺钉和2件U形吊环垂直吊起主轴体放入鞍座孔内→待法兰盘底部外圆面与鞍座孔即将进入配合时改用4件M12×500的丝杆对称拴接完成两者的装配→拆掉丝杆后经18条M12×40内六角螺钉紧固法兰盘于鞍座上→将2件φ12×1.5水管连接至冷却管路适配器并配装2件M40×1.5的过线螺母。



(a) 轴向跳动 (b) 径向跳动

图7 刀具主轴A的轴向跳动和径向跳动

(4) 鞍座孔内装入NNU4964轴承。清理NNU4964轴承及主轴体配合面、鞍座孔→经4件M12×250丝杆和外压环将NNU4964轴承装配至主轴体配合面与鞍座孔内→1件尺寸330×4的O形圈NBR700和1组双叠片金属密封环FK6 ASD 395/10/3装至内压环对应凹槽处→自鞍座上拆掉4件丝杆和外压环→内压环与外压环配合后经4件丝杆装至鞍座上并用18条M12×40内六角螺钉紧固→经6条M16×60内六角螺钉紧固刀盘安装座于主轴体上。紧固安装座时,务必使用磁座千分表测量刀具主轴A的轴向跳动和径向跳动(见图7),边测量边调整刀盘安装座,使这两个公差均不超4μm。

(5) 安装海德汉光栅鼓和读数头。清理法兰盘和主轴体上端→棉花球蘸无水酒精擦拭光栅鼓ERA4880C→经6条M5×20内六角螺钉紧固光栅鼓于主轴体上并保证定向环的径向跳动不超10μm→经2条M6×30内六角螺钉和平垫圈紧固支座于顶部密封盖上→经3条M3×25内六角螺钉紧固读数头于支座上→借助PWT18快调仪调测光栅鼓与读数头的间隙 $0.15 \pm 0.01$ 确保栅格幅值 $1+0.1-0.1V_{ss}$ 以及原点信号的黑条两端时刻处于2个方括号内→拆掉PWT18并经6条M5×20内六角螺钉紧固防尘罩于法兰盘上。

(6) 将鞍座固定于试验台上,连接好电气线路与冷却管路。随后在空载与加载下,分别进行跑合、温升测试。数据合格后,刀具主轴A整部件装机待用。

## 2. DDL电机1FN3在磨刀机的应用

DDL电机作为一种直线输出的同步传动技术,高速时拥有高精度和高重复定位精度,低速甚至静止时也能产生大推力。它被广泛用于过程控制、测试/控制设备、冲压/

激光切割、医疗器械等场合，如配置SINUMERIK 840DsI NCU720.3B PN系统和SINAMICS S120驱动系统的B27刀条刃磨机（下称B27）的X/Y/Z轴装用SIMOTICS 1FN3直线电机。图8为1FN3直线电机与SINAMICS S120连接示意，其驱动调试流程如下：

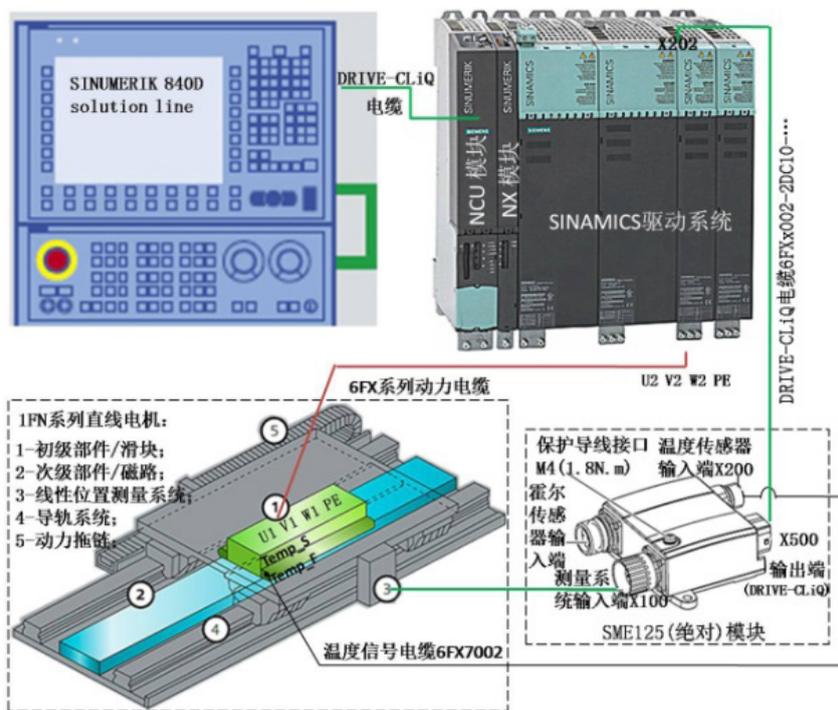


图8 1FN3电机与SINAMICS S120连接示意

(1) DDL电机与S120的连接。DDL电机相对于标准电机与驱动系统的连接相比，添加1个SME125模块，它的速度、位置检测系统仅有1个外接的测量系统。为有效降低调试中飞车风险，测量系统选用绝对值光栅尺LC185。

(2) DDL电机调测的有效条件。DDL电机的相关参数不能被CNC系统自动识别，只能进行手动设定。此前需要完成电机调测的有效条件。例如：机械限位硬挡块、硬件限位开关及急停按钮均有效，电机制动机构、热保护的温度传感器及冷却系统均正常，机械安装尺寸正常，通电前电机能否推动，位置反馈计数、驱动正方向（相序）、反馈正方向（极性）均正确，磁极位置辨识设为基于电流饱和（p1980=1、p1982=1），电机温度报警阈值设定（p0604=65、p0605=75）...

(3) DDL电机驱动配置。第1次使能前，务必经驱动参数p0640限定电机最大电流为缺省值的1/10或更小；磁极位置识别后，修改p0640为原值。通电后，配置DDL电机：[配置-电机]界面选择“输入电机数据”，电机类型选择“直线同步电机”；单击[下一步]进入[配置-其他电机数据]界面，电机温度传感器类型选择“通过多个温度通道分析SME12x”；单击[下一步]进入[配置-电机数据]界面1，将对应参数填入系统（见图9左上）；单击[下一步]进入[配置-电机数据]界面2，将对应参数填入系统（见图9右下）；单击[下一步]进入[配置-BICO连接]界面，此后设定与标准电机的调试配置相同。配置完毕后，验看电机运动方向与测量系统是否相同，相反时设定参数p410=3。



图9 1FN3电机驱动配置画面

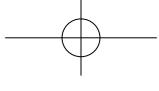
(4) 经SINUMERIK Operate进行驱动优化，借助电子滤波器来消除波特图寻找到的共振点。对电流环进行手动优化，测试电流环频率响应，做到不超调。对速度环、位置环进行自动优化，经阶跃响应和扰动响应寻求适合的比例增益和匹配的时间常数，获得最优的产品表面光洁度。

#### 四、结束语

工信部联规〔2021〕207号《‘十四五’智能制造发展规划》通过一个融合、三个能力提升及三化持续推进，给出制造业五年内深入实施智能制造工程的纲领性要求。未来的螺旋锥齿轮机床的制造应大量采用直接驱动技术在内的新工艺、新手段，广泛采取节能环保新措施，有效控制CO<sub>2</sub>排放量，成为绿色低碳智能制造系统必不可少的装备主力军。□

#### 【参考文献】

[1] 刘胜勇. 模具行业国产数控装备发展对策[J]. 金属加工(冷加工), 2017, 784(11): 8+1-3.  
 [2] 刘胜勇. 网络互连互通下数控装备的发展及应用[J]. 金属加工(冷加工), 2020, 829(8): 9-12.  
 [3] 刘胜勇. 图解数控机床维修必备技能与实践速成[M]. 北京: 机械工业出版社, 2018.  
 [4] 刘胜勇. 实用数控加工手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015.



# 一种高速精密数控车磨复合加工机床的研发

北京工研精机股份有限公司 李云飞 高红 李晓会 孙娜 刘春雨

【摘要】本文阐述了该设备的整机设计理念及结构，采用整机主体结构的优化设计实现高动态刚性和最小热变形，并应用了高精度工件主轴及夹具、内圆、锥面高速磨削主轴、在线测量模块、在线磨削监控及动平衡系统、金刚石CBN修整主轴等国内外先进科技手段，通过多种先进加工技术耦合最终实现了该设备的功能。为用户提供了包含了在线测量、硬车、内圆磨削、锥面磨削、球道磨削及三个磨削工位砂轮的修整的过程监测系统的成套精密磨削解决方案。

复合加工技术是20世纪末兴起的一门新颖的制造工艺流程，复合加工机床最突出的优点是大大缩短零件的生产周期、提高零件的加工精度<sup>[1]</sup>。它所具备的高速、高精、高效、复合和环保代表着时代发展中机床技术发展的方向和追求的目标。

国外，德国、日本、美国等国家不断地设计制造出各种形式与功能的复合加工设备，如日本MAZAK、德国INDEX、德国EMAG等。瑞士Magerle公司的MGC-RT Grinders系列机床，工作台内置转台，且砂轮架配有多种主轴，一次装夹可以进行车、磨、铣、钻等各种加工。德国Emag的VG系列组合了硬车粗加工，内圆和端面磨削工艺，一次装夹完成外圆直径从 $\phi 6\text{ mm}$ 至 $\phi 40\text{ mm}$ 工件的高精度加工。以VSC 400 DS型倒置式车磨中心为例，该车磨中心在一次装夹后，可完成硬度为30~62 HRC的工件外圆、内圆和端面的车削和精磨<sup>[2]</sup>。

在国内，也有一些厂家在设计制造车磨复合机床，但从精度、效率、稳定性方面，与国外机床还存在差距。国内很多用户还主要以进口机床作为零部件精密加工的首选。进口机床也以其精度高、可靠性好、效率高稳占国内市场。但进口机床价格高、运行成本高，维护费用高，所以也一直制约着国内企业的发展。

本文所阐述的机床，是针对某汽车行业用户的实际需

求而专门研发的复合机床，用于实际生产中以代替进口机床。本机床是针对汽车CVT无级变速器内的关键零件的加工而专门研发的，在此之前，用户一直应用的是德国的设备，由于高昂的产品造价及运行、维护费用，一直制约着企业的发展，成为企业降低生产成本的瓶颈。本机床研发成功后，在用户单位得到很好的应用。这里我们特意将一些设计思路和经验总结出来，与大家分享。

## 一、机床的加工对象

汽车CVT无级变速器的关键零部件包括带轮、带轮轴和金属传送带。本机床就是针对带轮的加工专门研发的机床。

带轮材料：20CrMnTiH。

热处理：毛坯经渗碳处理后表层硬度可达58~63 HRC。

加工工序包括：

- (1) 3个 $120^\circ$ 分布的 $\phi 6$ 的球道的磨削。
- (2) 外圆锥面的硬车削。
- (3) 外圆锥面的高速磨削。
- (4)  $\phi 42$ 和 $\phi 35$ 的内孔圆柱面及其组成的端面磨削。

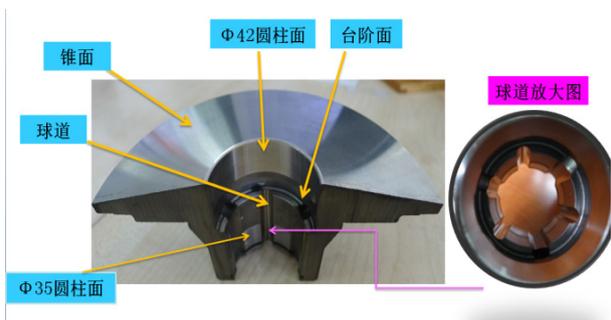


图1 带轮剖视图

加工难点分析:

(1) 工件形状较复杂, 热处理变形大, 精加工前的加工余量在0.2~0.4mm之间, 极易产生较多的切削热, 影响加工精度及效率。

(2) 4个独立的加工工序, 外加分度在线检测, 而且砂轮需要修整, 对效率的要求非常高。

(3) 在精度上: 工件尺寸要求 $Cpk > 1.67$ , 这对机床的整体性能提出了很高的要求, 如: 机床伺服轴的重复定位精度、夹具的重复夹紧精度、机床的热变形、主轴刚度、夹具、刀架刚度、机床动态刚度和整体减震性能等。

(4) 以改善工件微表面为目的的锥面磨削, 不但对磨削轴和工件主轴的动平衡技术提出了较高要求, 还要求运动部件有很高分辨率的进给能力。

(5) 内球道的磨削加工, 由于长径比大, 要求加工的位置度及尺寸形状精度高, 一直是国内CVT变速器制造企业迫切急需解决的难题。

## 二、机床的核心技术

整个设计采用现代机械设计理论和方法, 多种先进加工技术耦合, 把机床建立一个独立的加工场, 对温度、动刚度、振动的抑制、旋转件的动平衡加以充分的考虑; 面对机床的造价还要充分考虑经济性, 人机结合能力。而且对机床的拓展应用不应只局限于这种工件, 应充分考虑其通用性原则。

通过本项目的实施, 开发了用于加工 CVT 关键零件带轮的高速、精密数控车磨复合加工机床 (ZL 2012 1 0397283.9), 掌握了关键核心技术, 形成一系列配套核心技术。主要体现在下面七个方面。



图2 高速、精密数控车磨复合加工机床

## 1.建立了满足批量高效生产要求的高性能复合加工制造系统

针对淬火后高硬度材料零件, 开发了专利产品, 可在一次装夹中对工件的外圆、锥面、内孔及内沟槽的高精、高效连续车削和磨削工序, 以及在线检测和砂轮修整, 满足了批量加工中精度稳定性要求。

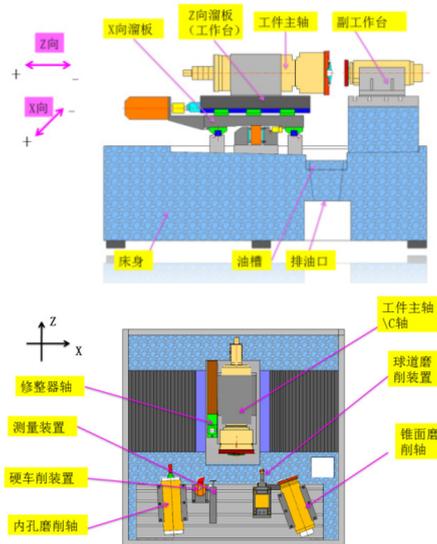


图3 机床总体构型图

机床采用人造矿物铸件床身, 床身上布置十字溜板和副工作台。工件主轴固定在十字溜板上, 副工作台上依次安装着内孔磨削轴、硬车削装置、测量装置、沟槽磨削装置、锥面磨削轴等。X轴采用直线电机+滚动导轨的方式, Z轴采用伺服电机+滚珠丝杠+滚动导轨的方式。工件主轴的卡盘上安装着大修整轮, 大修整轮与工件主轴同轴旋转; 工件主轴箱侧安装着修整器轴, 修整器轴端安装小修整轮。

人造矿物铸件的整体式床身, 使该机床具有出色的减震性能和热稳定性。采用预埋金属件的结构形式, 在床身内部预埋了各种功能部件的安装面, 使各功能部件的相对独立, 增强了机床的精度稳定性。人造矿物铸件在大幅动态载荷下表现出良好的效果, 据资料表明: 人造矿物铸件减振的能力比铸铁和钢快10倍, 比花岗岩快4倍。人造矿物铸件与铸铁相比较, 生产过程无污染, 属绿色制造。

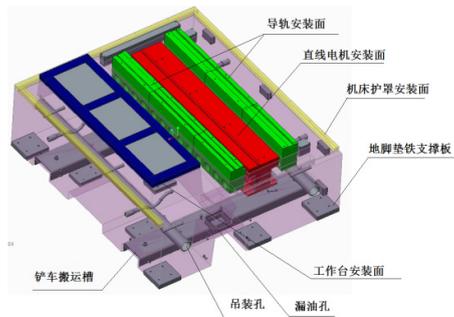


图4 人造矿物铸件床身结构图

在床身支撑的优化方面，机床床身采用隔振支座支撑，底座支撑的减少会导致床身静变形增大，从而使机床的误差增大。以下为两种不同支撑的变形云图。

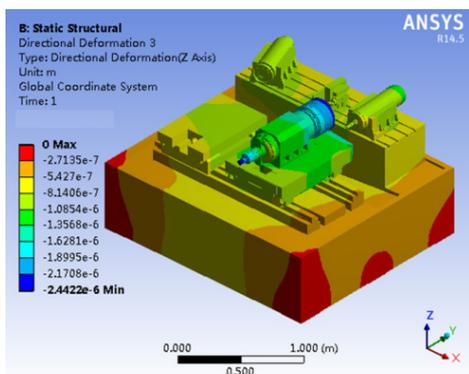


图5 采用11个隔振支座支撑变形云图

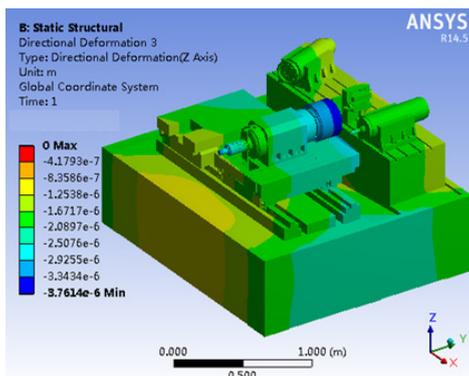


图6 采用4个隔振支座支撑变形云图

结论：将自重引起的变形除去外，由于支座的影响产生的变形为：11个支座支撑时：0.00044mm；4个支座支撑时：0.00176mm。

显然，当支座数减少时变形明显增大，4个支座的变形为11个支座变形的4倍。在高速加工时，由于自重以及支撑的变形产生离心力使转子颤振，影响机构的传动精度，因此，采用多点支撑，有利于机床加工时主轴的高速运转。

## 2. 高分辨率、高刚度运动部件设计

X轴采用对称式直线电机驱动方式，最高速度可达80m/min, 0.1 μm的分辨率，Z轴采用了伺服电机+滚珠丝杠的驱动方式，并采用了带阻尼的滚动复合导轨副技术，实现了微量进给。

在精密机床中，驱动电机的发热带来的机床的热变形是必需消除的。齿槽效应和线圈与磁铁之间的相互吸引力是直线电机所固有的特性，从控制上或通过外部手段是难以消除的<sup>[3]</sup>。驱动单元的对称布局的结构实现了大跨距溜板的双驱动，大大改变了运动状态的不稳定性。

综合测试结果：对溜板定位精度和运动部件微量进给能力进行了测试。X溜板和Z溜板的双向重复定位精度实测

值0.8~1.07 μm,经补偿，定位精度1~3 μm。

测量仪器为雷尼绍的高精度双频激光测量仪。

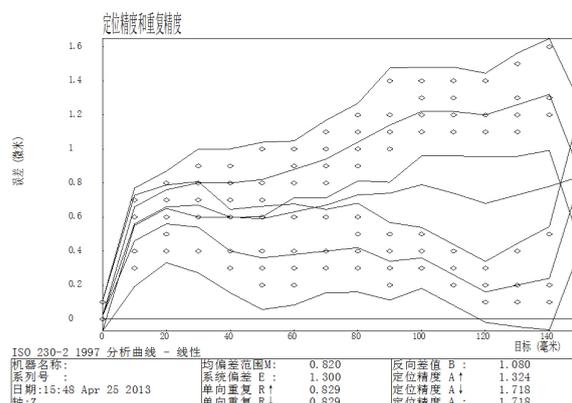


图7 机床Z向定位精度实测曲线

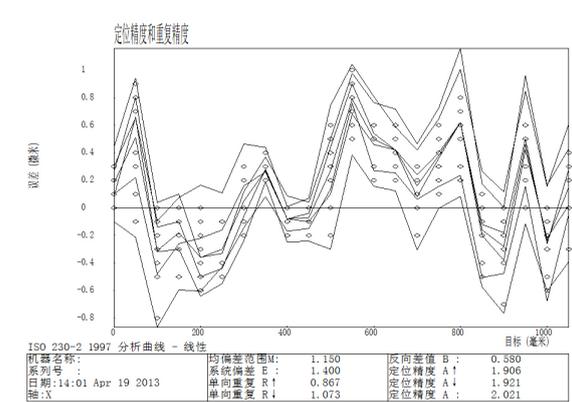


图8 机床X向定位精度实测曲线

除了定位精度以外，还进行了机床的微进给能力的测试，模拟了溜板在实际加工中的状态，经测试没有明显的迟滞现象。

迟滞现象在溜板运动副中的原因是由于摩擦表面之间的动静摩擦系数的差异，迟滞现象不仅严重影响运动的高分辨率实现，同时也影响机床溜板的运动定位精度和重复定位的精度，影响精密零件的加工形状精度以及表面粗糙度。

在测试中，机床以0.2 μm步进，从测试结果验证了机床微进给能力。

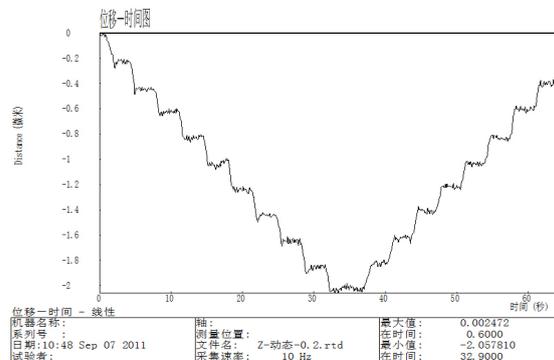
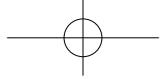


图9 机床微进给能力实测曲线



### 3.高精度工件主轴及五爪弹性气动夹紧装置的设计

采用先进的内置式动态平衡主轴设计制造技术，开发了高刚度、高精度主轴。主轴选用了高精度主轴轴承，通过精密装配实现 $1\mu\text{m}$ 的跳动误差，主轴最高转速 $3000\text{r}/\text{min}$ ，具备C轴功能。用标准球法检测静态回转精度，主轴静态回转精度： $<0.5\mu\text{m}$ ，主轴旋转件整体动平衡，在 $3000\text{r}/\text{min}$ 内不平衡量小于G0.1级。

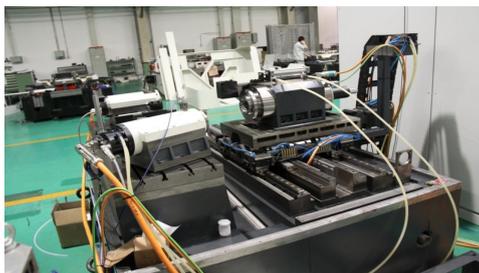


图10 机床主轴

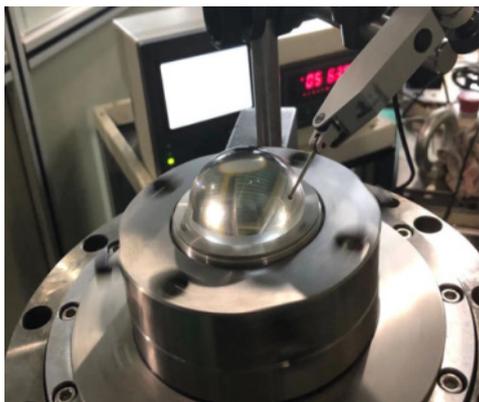


图11 主轴静态回转精度检测

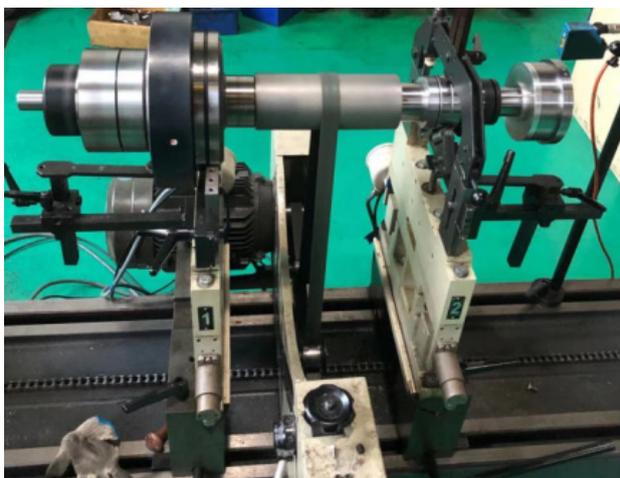


图12 主轴动态回转精度检测

五爪弹性气动夹紧装置（发明专利 ZL 2020 1 0449520.6）采用多爪滑动式结构，气动夹紧方式，可通过气压调节夹紧力。夹具为中空结构，主轴中心内冷可通过夹具中心，保证了磨削时工件内孔的大流量切削液。



图13 五爪弹性气动夹紧装置

### 4.内沟槽磨削装置（发明专利ZL201210396746.X）

汽车CVT自动变速箱关键零件带轮的內沟槽磨削，由于內孔直径小，沟槽长度大，沟槽尺寸及形状公差要求高，磨削工艺性差，在砂轮的高速运转下，切削液不易到达球道加工区，所以在磨削中球道內表面极易烧伤。所以加工难度很大，一直是国内汽车CVT制造厂家的难题。本发明研制了一款专用于加工內沟槽的装置，解决了这一难题。

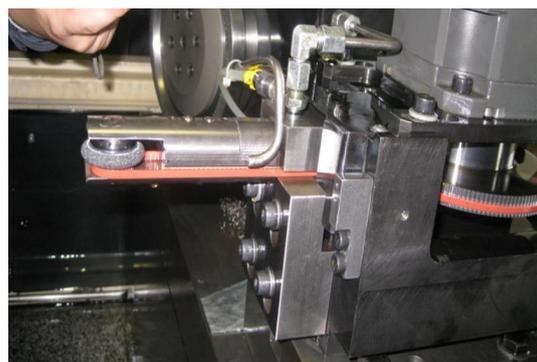


图14 球道剖切图装置

沟槽磨削装置主要由伺服电机、大同步带轮、小同步带轮、同步带、砂轮轴系、底座、砂轮架等组成，增速比为4:1，砂轮的最高转速可达到 $36000\text{r}/\text{min}$ 。轴承的冷却和润滑采用油气润滑方式。砂轮架采用38CrMoAl材料经锻造而成，有效提高了砂轮架的刚度，减小了磨削颤振。

本装置刚性好，非常适应加工长径比大的沟槽，加工的沟槽直线性好，效率高、表面质量好，满足高速切削及批量生产应用。在大切削量 $0.2\text{mm}/\text{min}$ 的进给下，沟槽表面粗糙度达 $\text{Ra}0.2\sim 0.3\mu\text{m}$ ，直线度 $<2\mu\text{m}$ 。本项目开发的沟槽磨削装置也可应用于內齿轮加工，解决了国内齿轮加工机床的“卡脖子”问题。

### 5.建立了流体控制系统，保证了整体系统的高精度稳定性（专利ZL 2012 2 0687187.3）

从机床整体结构布局中，采用整体式封闭冷却装置和大流量喷淋式冷却相结合，抑制加工区域的大梯度温差热场的形成，并尽可能地控制了加工过程中机床整体的热变

形；切削液压力高速磨削时，因砂轮高速回转时，其周围形成一股高速气流，阻碍冷却液送进磨削区。为解决这一问题，有各种措施<sup>[4]</sup>，其中公认的是用高压供应冷却液效果最好。喷淋冷却液和切削液为同种介质，一起通过回油口回收，通过多级切屑磨屑的分离过滤，可实现循环使用；机床内部的喷淋产生的油雾和加工所产生的雾化物通过负压吸入，分离过滤，实现切削喷淋用的冷却液的回收再利用。

### 6. 突破了高精度硬车削工艺技术替代传统磨削技术

高精度硬车削技术是一项现代工艺技术，是指对于58~62HRC的淬硬性材料，降低硬车削振动的影响，从机床设计制造的角度主要是：通过提高关键部件的静态、动态刚度，提高运动部件的刚度质量比和主要结合面刚度等，提高机床动刚度；在保证刚度的情况下提高关键环节的阻尼，并隔绝其他振源如电机、液压系统、外界振动等对加工的影响。这其中除去刀具及刀具夹持、主轴及夹具等直接影响加工系统刚度的环节，最重要的是设计有利于淬硬加工机床布局结构，降低运动及切削中产生的颤振。本项目开发的机床，实现了高精度硬车削的功能，在工艺技术方面取得了重大突破。

对硬车削技术进行实验验证，相关数据如下：

切削参数：进给量 $f$  0.05mm/rev，切深为0.04 mm，主轴切削恒线速度为115m/min，PCBN刀具圆角为0.35mm。采用“干切削”方式加工圆柱面。检验结果：圆度 $0.5\mu\text{m}$ ， $R_z$ 890nm， $R_a$ 为168nm，波纹度 $W_z$ 小于58nm。检测仪器：Taylor Hobson白光干涉仪。

上面的加工数据在表面质量、工件圆度方面均优于传统磨削加工设备，同时由于“干切削”方式加工过程中避免了切削液的使用，非常有利于环保，是一种高效绿色的现代加工工艺。该工艺技术通过实际应用，取得了良好的效果，是一种非常有前景的加工方式。

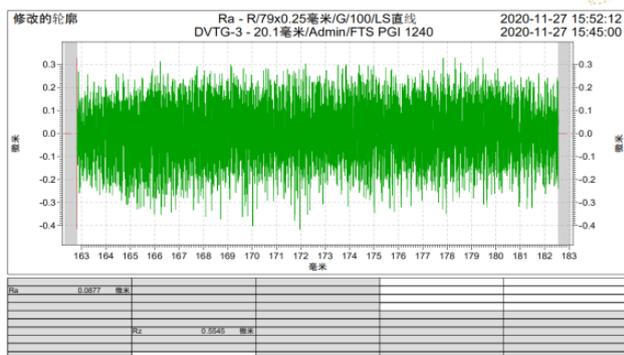


图15粗糙度 $R_z$ 均 $\leq 0.001\text{mm}$

### 7. 磨削主轴的设计

锥面磨削的线速度不低于110m/s。设计中要有效控制住主轴和砂轮系统的自激振动，提高系统的动平衡能力，使整个砂轮法兰安装面的跳动 $<2\mu\text{m}$ 。在主轴前端内置了自动平衡装置来提高系统的动平衡能力，并配置了AE声发射系统协助磨削和砂轮修整。在主轴转速11000r/min时，依然能把主轴内部的不平衡量控制到最小。

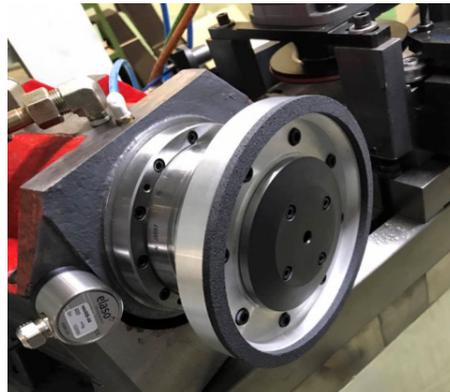


图16 锥面磨削轴

## 三、机床加工工艺

机床加工工艺集成了工件的精确定位、工件球道磨削、工件锥面硬车削、工件的锥面磨削、工件内孔磨削、砂轮的修整等工序，实现工件在一次装夹中可全部加工的要求，确保了各加工表面的相对位置精度。

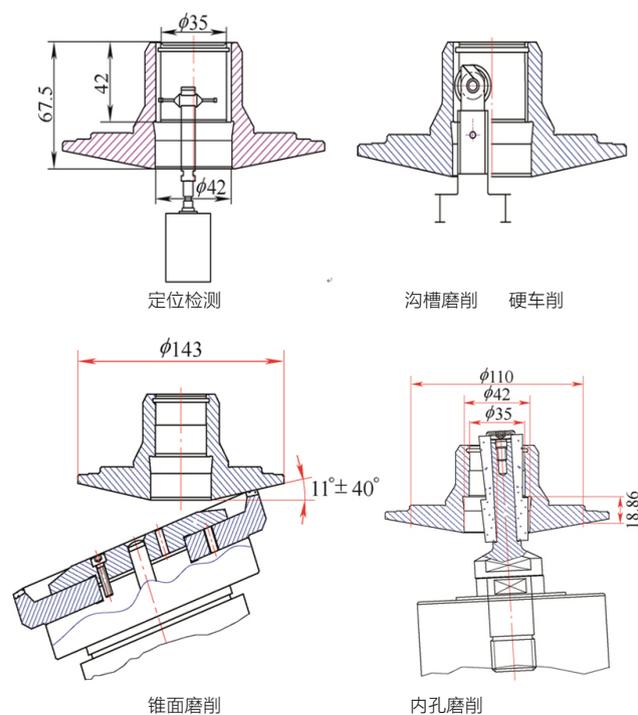


图17 机床加工工序

在高速磨削中，影响砂轮磨削表面质量的因素包括砂轮本身的特性<sup>[1]</sup>，比如砂轮的粒度、硬度、结合剂的强度，还包括砂轮的表面形貌。为了实现砂轮的精密磨削，确保磨削过程中能够实现较高的金属磨除率、较低的表面粗糙度及避免磨削烧伤现象，必须对砂轮表面形貌进行修整。砂轮表面磨粒平坦光滑，切刃边缘锋利，则磨削能力较强，材料的切除率提高。此外，容屑间距和磨粒突出高度对磨削过程也会产生影响，引发工件表面烧伤，以及磨削振动。

本机床选用了德国Dr.KAISER公司的精密修整主轴和修整滚轮，通过试验完善修整工艺。

#### 四、机床实施效果

本机床实施以来，我们主要开展了关于该类设备制造的关键技术的研究，主要包括：机床高刚性、高稳定性的结构技术；高速轴的平稳运行控制技术；直线电机的高速控制技术；机床的加工精度一致性保证技术；高速高精的磨削工艺技术；CBN砂轮的精密修整技术；超硬材料的硬车削技术；轴向内孔球道磨削工艺技术；在线测量技术等。测试结果显示，多项技术指标优于国外同类机床水平，达到世界领先水平。

该车磨复合加工机床经过几年来的用户现场应用验证，机床在批生产尺寸精度一致性方面、球道磨削砂轮的寿命等方面的性能超过了进口同类设备，CPK>2,节拍220秒/件。在每日两班连续作业的运行工况下，精度一直稳定可靠，深得用户的好评。目前机床已实现了批量生产应用。



图18 CVT带轮（成品）

机床主要技术参数：（样本参数）

- a. 最大车削直径  $\phi 200$  mm；
- b. 最大磨削内孔径  $\phi 50$ mm；
- c. 最大磨削锥面直径  $\phi 200$ mm；
- d. 内沟槽独立磨削单元轴向磨削长度  $\geq 45$ mm；

- e. X、Z 轴快移速度分别  $\geq 80$ m/min、30 m/min；
- f. 重复定位精度X:<0.002mm、z:<0.003mm；
- g. 工件轴分度精度  $\pm 5''$ ；
- h. 工件轴最高转速3000 r/min；
- i. 内孔磨头最高转速40000 r/min；
- j. 沟槽磨头最高转速36000 r/min；
- k. 锥面磨头最高转速15000 r/min。

#### 五、应用前景

随着全球对于碳排放碳中和要求日益重视，越来越多的汽车企业都在发展新能源汽车，像丰田、本田、现代、日产、大众、比亚迪、吉利等，全都匹配了CVT变速器，只有CVT变速器，才能更好地将发动机和电动机进行恰到好处的啮合及分配，所以CVT是今后的发展大势。随着新能源汽车的不断发展，CVT的数量是逐年猛增的，所以该机床具有广阔的市场前景。

作为项目机床的技术拓展应用，项目开发单位后期又开发了外球道磨削机床，用于CVT带轮轴的生产。为江苏太平洋精锻科技股份有限公司开发立式数控车磨复合加工机床，用于汽车差速器半轴齿轮的加工，为无锡油泵油嘴研究所研制了亚微米精度零部件数控硬车削机床。为航空航天、工程物理及高校生产了系列高精度数控车床。

为满足市场需求，本公司将继续增强研发能力，加快成果推广进度，继续提升产品性能及可靠性，深入探索更符合实际需求的产品。对标国际一流的机床产品，进一步提升性能指标，通过实现标准运动部件和机床整机的模块化设计与制造，积极参与设计制造标准的建立，实现复合机床快速标准化的生产制造，为提升我国制造领域的核心竞争力做出更大贡献。□

#### 【参考文献】

- [1] 丁雪生.金切机床复合化技术的发展[J],制造技术与机床 2004(2)
- [2] 孙锡娜,韩秋实,杨占玺.车磨复合机床的发展现状及关键技术[J].精密制造与自动化 2008(1),4-6
- [3] 贺大兴 盛伯浩等, 实现机床溜板1 nm分辨率运动的相关理论及关键技术研究
- [4] 《Metalworking Production》, 英国机床工业研究协会, 1974年
- [5] 胡中辉, 袁哲俊.《CBN砂轮修整方法及其对磨削表面完整性的影响.磨料磨具与磨削》, 1992, 3(69):2-7

# 大型烘缸数控多功能加工机床的研发与应用

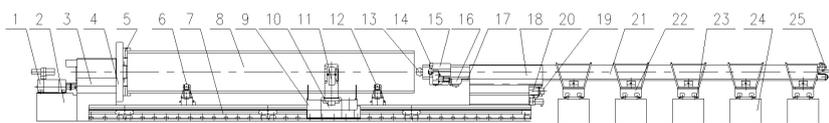
天水星火机床有限责任公司 董全宏 王芳

随着造纸设备高速化的发展,出现了造纸机烘缸越来越长的问题。烘缸直径一般在2000mm以上,长度12000mm,重量一般在32T以上,想要保证造纸机设备的良好生产效率,就需要确保烘缸的品质与稳定,才能让造纸机有更好的生产效率和更高的生产品质。所以对加工超大、超长回转直径的烘缸数控重型卧式机床提出了急迫的大量需求。

加工超大、超长回转直径的烘缸数控重型卧式车镗床,从某种意义上说,反映了一个国家的造纸技术发展实力。另外,该设备同时对一个国家的航空、航天、军事、科研、电站、起重、轧钢设备等行业,也有着举足轻重的影响力。

## 1. 机床总布局

图1中所示CCKT61250大型烘缸数控多功能加工机床,由下列部件组成:



1. 主电机 2. 电机底座 3. 主轴箱 4. 卡盘装置 5. 卡爪 6. 托辊 7. 床身 8. 加工零件烘缸 9. 床鞍走台  
10. 床鞍 11. 刀架 12. 托辊 13. 镗杆小主轴 14. 刀盘 15. 刀盘驱动箱 16. 辅助支撑装置 17. 蜗母条  
18. 尾座体 19. 尾座驱动装置 20. 镗杆驱动装置 21. 镗杆装置 22. 镗杆静支撑 23. 调整垫铁 24. 镗杆静  
支撑水泥台 25. 拖链装置

图1 大型烘缸数控多功能加工机床

## 2. 机床性能特点

CCKT61250大型烘缸数控多功能加工机床,可加工烘缸尺寸为:外圆直径 $\phi 2500\text{mm}$ ,内孔直径 $\phi 1000\text{mm} \sim \phi 2000\text{mm}$ ,烘缸长12000mm。

该机床是为造纸机行业加工烘缸的外圆及内孔设计的专用设备,是目前加工重型烘缸等缸体、筒类零件同规格直径内孔最长的设备。通过该设备解决了对超大、超长回转直径的烘缸装夹后,工件不需调头,一次完成外圆及内孔的所有车、镗、钻削等加工,确保深孔镗削的高效率、高精度、高可靠性。填补了国内、外空白,提高了生产效率,降低我国大型烘缸生产成本。

## 3. 机床加工原理

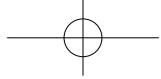
加工烘缸外表面时,退回镗杆装置21,使镗杆装置21放置在镗杆静支撑22上,给镗杆装置小主轴13内装上顶尖,通过顶尖顶紧工件,实现了数控重型卧式车床的尾座功能,就可以加工零件烘缸8的外表面了。

在深孔镗削加工时,先将工件落在托辊12上,通过调整托辊12来找正烘缸8的加工位置,并旋转丝杆,使卡爪向内移动,夹紧工件,然后镗杆驱动装置20通过蜗母条17使镗杆向主轴箱移动,在镗杆的前端配有与机床主轴相连的小主轴装置13,通过辅助支撑装置16的滚轮在加工零件烘缸8内壁的滚动支撑,使镗杆装置21的小主轴装置13插入主轴,直至镗杆上的小主轴与机床主轴接触产生一定的顶紧力后(顶紧力可控制在8~12KN之间),然后锁紧镗杆导轨,同时镗杆通过尾座体18锁紧在床身上。通过镗杆驱动装置20带动刀盘14在镗杆21上移动来完成深孔镗削。

## 4. 关键技术

### (1) 尾座及镗孔装置

本机床尾座(如图2所示)的设计充分考虑了刚性、承载能力和使用的宜人性。机床尾座由上下两部分组成,尾座上体上安装有镗杆及镗孔装置,并在其头部安装有顶尖,用于顶持工件,尾座体的移动由电动机—蜗轮蜗杆—齿轮齿条传动,使其在工件床身上移动,到位后由一排碟形弹簧卡紧在床身上,卡紧方式为机械卡紧,液压放松,蜗轮蜗杆具有止退作用。尾座上体为镗杆的移置导轨,镗杆沿尾座上体导轨移动,并设有镗杆驱动箱,镗杆刀架进给箱。尾座下体后端装有一手压油泵,供尾座内



全部机构润滑油。

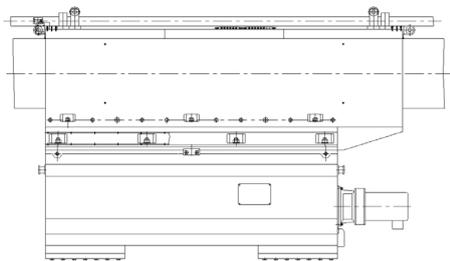


图2 尾座及镗孔装置外观图

### (2) 镗杆装置

镗杆装置如图3所示, 镗杆结构采用的是矩形截面, 通过无缝焊接技术, 保证镗杆的刚性。沿镗杆纵向分别装有刀盘移动用蜗条, 内装有测力传感器, 在镗杆的前端配有与机床主轴相连的小主轴装置, 用来保证镗杆中心与机床主轴中心的同轴度。

在深孔镗削加工时, 镗杆一端通过镗杆尾座锁紧在床身上, 另一端插进主轴孔中, 依靠镗削刀盘在镗杆上移动来完成深孔镗削, 通过优化深孔镗杆和镗削刀盘的传动机构及制造精度, 保证了加工精度、加工稳定性、镗削刀盘移动的定位精度。



图3 镗杆装置外观图

### (3) 镗杆驱动箱

镗杆驱动箱是驱动镗杆前后移动实现镗削的一种驱动装置, 它是由电机驱动锥齿轮, 蜗轮-蜗杆和降速齿轮, 从而带动蜗轮和镗杆上的蜗条转动, 使镗杆前后移动实现加工的要求。本机构结构简单、操作方便; 还配有手动装置, 要进行微量移动可以通过手动装置进行调节, 从而达到移动的目的。

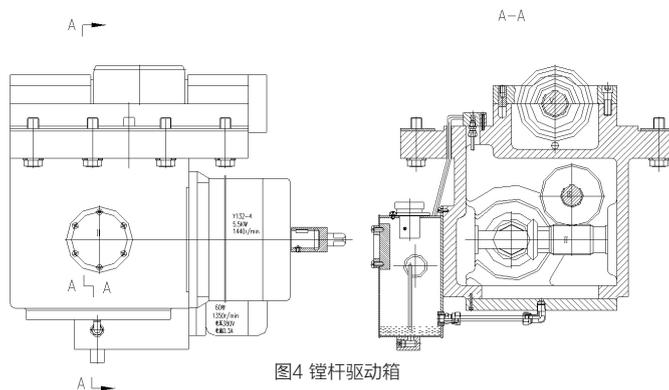


图4 镗杆驱动箱

### (4) 超长重型镗杆液压支撑装置

镗杆自重20T, 总长17000mm, 在镗杆沿床身向卡盘方向移动时, 由于镗杆悬伸过长会产生低头现象, 无法准确插进主轴孔中, 并会造成镗杆弯曲变形(见图5), 影响镗孔的加工精度。长镗杆液压支撑装置是通过液压系统控制油缸伸缩, 通过油缸上的滚轮在烘缸内壁滚动进行支撑, 克服镗杆的自身挠度, 待镗杆插入主轴孔内并预紧时, 油缸收起滚轮。很好的解决了超长重型镗杆的使用问题。

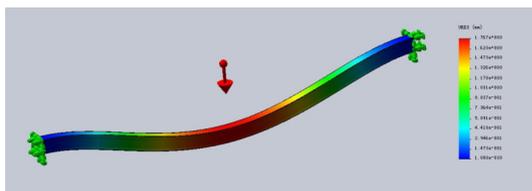


图5 镗杆自重受力分析位移图

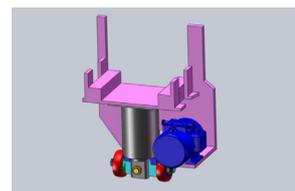


图6 超长重型镗杆液压支撑装置

### (5) 卡盘反压爪

在使用标准卡盘工件另一端无尾座顶紧时, 超大、超长的重型烘缸工件在加工过程中就会从卡盘上掉下来, 造成重大事故, 为了解决这一问题, 在原有标准卡盘的基础上增加四个辅助反压爪装置, 满足了筒类零件在另一端无尾座顶紧时的切削, 这样提高了机床的利用率, 扩展了使用空间。

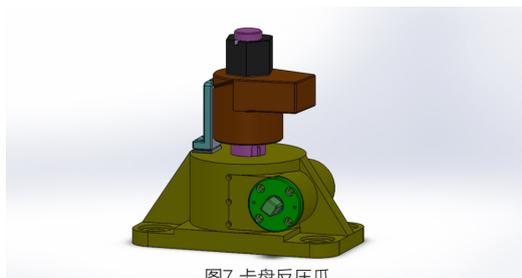
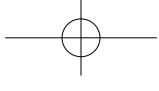


图7 卡盘反压爪

## 5. 结语

2017年12月, CCKT61250大型烘缸数控多功能加工机床通过了甘肃省工业和信息化厅新产品鉴定, 其各项技术指标和性能达到国际先进水平, 并在甘肃省科技厅进行科技成果登记。在用户使用过程中受到一致好评。该设备解决了超大、超长回转直径的烘缸装夹后, 工件不需调头, 一次可完成外圆及内孔的所有车、镗、钻削等加工, 确保深孔镗削的高效率, 高精度, 是国内率先研发的加工重型烘缸等缸体、筒类零件同规格直径内孔最长的设备之一。□



# 小批量汽车冲压模具技术的研究及应用

长春汽车工业高等专科学校机械工程学院 潘远安 冯玉涛  
中国第一汽车集团有限公司 马望 闫彦

随着社会不断发展，人们的生活方式也在发生着改变，一成不变的生活节奏已不能满足人们的日常需求，私人定制的个性化生活已经开始被越来越多的人所接受。据统计，美国有85%的汽车消费者会选择定制化汽车，而日本也有将近80%的消费者会选择个性化汽车定制<sup>[1-2]</sup>。

汽车定制化可大致分为3个级别：第一个级别就是对车身颜色、轮辋样式及内饰选材等方面进行固有化的装配；第二个级别为大规模定制化，就是汽车供应商进行模块化生产，用户可以根据个人需求对车辆的动力及车身材料等进行自主选择；第三个级别为分散个性化生产，这是汽车定制服务的最高级别，其抛弃了流水线和模块化生产的固有模式，可完全按照用户的需求进行个性化生产<sup>[2-3]</sup>，比如劳斯莱斯车型，就是完全按照用户的需求进行装配，真正做到了纯手工定制化生产，并保证每台劳斯莱斯车型都是独一无二的<sup>[4-6]</sup>。

我们依据以上几种定制化级别，应用到汽车车身外观，就是对车身冲压件的变更。传统的冲压模具开发周期长、成本高，已不适合开发周期短、批量相对较小的定制化生产的开发特性，这就需要寻求一种适应多产品、小批量的冲压模具技术及标准。根据以上思路，我们参照汽车产量的不同，结合不同的模具开发模式，细化研究小批量汽车的模具生产方式，不仅起到了降低生产成本和提高产品质量的目的，也促进了定制化汽车的应用。

## 一、基于小批量技术研究

### 1. 规划与工艺

小批量模具根据生产总纲领，可大致分为试制工装

(如图1所示)、半工装(节约修冲模具)、全工装模具(如图2所示)等，半工装模具根据产量的不同，又可对模具结构进行不同等级的划分，达到节约工装成本的目的。

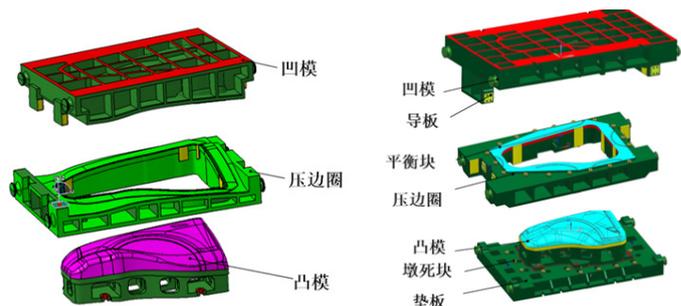


图1 试制工装

图2 全工装

首先，确认半工装与全工装模具的平衡点。根据实际生产经验，车型总生产纲领在5000台份以上，建议采用全工装批量模具的开发方式；对于总纲领低于5000台份，根据车型的实际规划纲领，进一步进行分解，对于总纲领低于100台的，建议采用纯试制工艺及试制工装的形式进行模具设计制造；总纲领在100-5000台之间，建议按照量产工艺进行模具设计制造，而此纲领区间的模具结构及工装形式，根据零件的复杂程度和重要程度进行差异化区分，采用半工装与全工装相结合的方式，而且模具结构在大批量模具的基础上进行减配优化。

将以上讨论进行整理，详见表1：

表1 车型规划与工艺工装关系表

总纲领(N)	冲压工艺	工装形式
$N \leq 100$	试制工艺	试制工装 + 激光切割
$100 < N \leq 1000$	简易工艺	半工装 + 激光切割
$1000 < N \leq 5000$	正式工艺	全工装

## 2. 模具技术标准

综合考虑产品的重要程度和难易程度，可分为三大类：外覆盖件、高强钢零件和其它零件。外覆盖件表面质量要求较高，工艺设计和模具结构尽可能分析充分，从而保证产品质量，将返修工时控制在合理范围之内。高强钢零件因其屈服强度较高，材料成型时的流动会导致模具磨损严重，因此批量大的话，要适当提高工作部位材质强度，必要时需要对模具局部进行淬火。其它零件可依据行业标准进行设计开发。

### (1) 模具材质

一般分为铸造模具及钢板模具，铸造模具需要制作泡沫实型，然后铁水浇铸而成，钢板模具是在采购型材的基础上进行加工。铸造模具的模座选用材料为HT300，钢板模座选用材料为45#钢。对于模具工作部位的材质，试制模具因批量小，一般材料采用HT300和45#钢，若生产纲领较大，需要提升模具材质，一般材料选用MoCr铸铁或Cr12MoV。

### (2) 导向结构

模具导向方式大致分为导板或导柱两种方式（见图3），批量较小的模具利用模具本体加工面进行导向，不需要安装导板或导柱等导向。批量较大的车型可根据实际情况增加导板或导柱。通常根据零件的重要程度和复杂程度去判断是否增加导向，其目的是保证零件尺寸的稳定性和一致性。

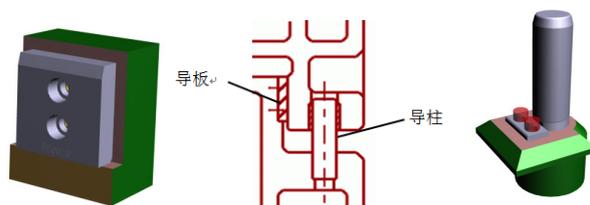


图3 导板导柱示意图

### (3) 侧翻结构（CAM）

侧翻结构可分为斜楔翻边和侧翻机构翻边。侧翻机构较为简单，在小批量模具中，负角翻边的零件通常采用侧翻机构。侧翻机构与传统的批量模具的斜楔结构不同（见下图4），它一般实现水平方向翻边，导向面与工作台平行。用斜楔机构翻边的时候，要将零件旋转到合理的角度，以满足斜楔翻边需求，尽量避免成型类翻边。

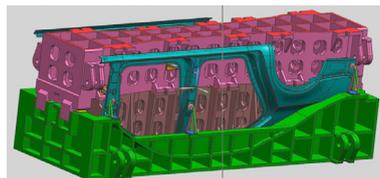


图4 侧翻机构

### (4) 加强筋参数

正常量产模具对寿命、强度要求较高，因此型面、主筋、副筋参数较大。小批量模具因其生产数量少，模具寿命要求没有批量模具那么高，因此降低模具结构参数标准是可行的。

综合以上因素，总结归类具体参数，模具技术标准详见表2：

表2 模具技术标准表

序号	总生产纲领	分类	模具类型	模具材料			模具部件	
				上下模座	工作部位材质	导向类	CAM类	
1	N ≤ 100	-	铸造模	-	HT300	无标准件	活动式通用侧翻机构	
			钢板模	-	45#			
2	100 < N ≤ 1000	发罩外板/门外板/顶盖外板或 $\delta_s < 440\text{MPa}$ 或 $t < 1.2\text{mm}$ 的内板件	铸造模	HT300（仅外表面及匹配内板件）	HT300	导滑面导滑	固定式专用侧翻机构	
			钢板模	45#	45#			
		其它外板或 $\delta_s \geq 440\text{MPa}$ 或 $t \geq 1.2\text{mm}$ 的内板件或拉延深度较深的内板	铸造模	HT300（仅外表面及匹配内板件）	MoCr/TGC600			
			钢板模	45#	Cr12MoV			
3	1000 < N ≤ 5000	$\delta_s \leq 280\text{MPa}$ 或 $t \leq 1.0\text{mm}$ 的内板件	铸造模	HT300	HT300	导板	固定式专用侧翻机构	
			钢板模	45#	45#			导柱
		外表面件或 $280\text{MPa} < \delta_s < 440\text{MPa}$ 或 $1.0 < t < 1.8\text{mm}$ 的内板件或拉延深度较深的内板	铸造模	HT300	MoCr/TGC600	导板		
			钢板模	45#	45#	导柱		
		$\delta_s \geq 440\text{MPa}$ 或 $t \geq 1.8\text{mm}$	铸造模	HT300	Cr12MoV	导板		
			钢板模	45#	Cr12MoV	导柱		

## 3. 支架/胎具的激光切割技术

小批量零件在生产规划时，修边冲孔多数采用激光切割加工工艺，应用定位支架/胎具的结构来实现切割时的定位。为规避以往的激光切割定位支架/胎具重复定位精度低、制作效率低、成本高、不易存放等缺点，可以从设计

技术、结构开发、制作工艺三方面来进行优化。

### (1) 设计技术

①基准统一。定位工装对零件的定位基准要与零件的RPS（定位点系统）文件保持一致。RPS文件中标明了零件的定位孔和定位面，在整车的加工制造、检测及模具、检

具、夹具设计制造中都应按照RPS文件确定的定位系统确定基准点，因此在激光切割定位设计时也要遵循这个标准，保持定位系统的一致性（如图5所示）。



图5 激光切割支架示意图

②回弹校型。由于车身钣金件型面比较平缓，局部强度低，尤其是外覆盖件，零件本身形状固化强度不足，冲压完成后，零件型面或多或少会出现回弹或塌陷问题。为保证零件在切割过程中与检测和装配状态下一致，需在零件切割部位增加局部回弹校型结构。

③支撑面选取原则。支撑截面应考虑定位的稳定可靠，以及支架/胎具的刚性和强度。选取原则是尽量靠近工序件的边缘、避免和修边线重叠或靠近、避免选取在过度圆弧区域等（如图6所示）。



图6 支撑面选择

### (2) 结构开发

激光切割定位支架/胎具采用薄钢材插装结构（如图7所示），薄钢材厚度为1.5mm，材料为Q235。断面上以50mm为增量，每隔100--200mm设计一个插脚，底板上也相应地设计插槽。整个结构先进、合理、紧凑。对于型面特殊的大型定位支架/胎具可以考虑设计若干个卡板来增强支架的强度和刚性。



图7 激光切割插装结构图

### (3) 制作工艺

激光切割定位支架/胎具完全采用CAD/CAM一体化制造技术，使得复杂的三维零件定位问题转化成了较简单的二维数控编程问题，降低技术门槛。整个加工可实现单工序加工，使用激光切割机就可以完成全部的加工。激光切割支架三维图如图8所示。

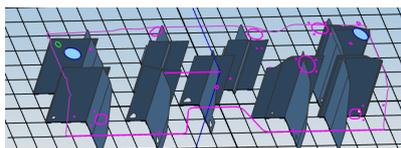


图8 激光切割支架三维图

## 二、典型件示例

以某车型侧围外板零件的生产工艺为例，介绍上述标准的应用。侧围外板总纲领为200台，采用试制工艺，规划八工序，一序板料处理，用激光切割对板料进行成形前预处理；二序拉伸成形，用简易拉伸模具对板料进行成形压件；三序激光加工，采用激光切割支架定位，对拉伸工序件进行初修；四序手工处理，使用通用垫铁对工序件指定区域折弯；五序翻边整形，用简易模具对折弯工序件进行翻边整形处理；六序翻边，使用专用翻边机构对工序件摆放特定角度进行翻边处理；七序激光加工，采用激光切割支架对工序件进行精修；八序手工处理，对前序翻边工艺豁口进行补焊修复处理。简易模具材质采用HT300，局部工作部分进行表面处理，此案例选用本技术标准即可满足车型纲领规划，又可减少生产准备周期，同时能达到降低工装成本的要求。工序简图详见图9。

工序	10	20	30	40
内容	板料处理	冲压加工-拉伸	激光加工	手工处理-折弯
工序	50	60	70	80
内容	冲压加工-整形	冲压加工-翻边	激光加工	手工处理-焊接

图9 侧围外板工序简图

## 三、结论

本文通过对多款小批量汽车冲压模具的研究，得出适用于总纲领小于5000辆份的模具技术标准，按

此标准既能体现传统冲压生产的经济性，又保证了产品的质量及稳定性，对汽车定制化的模具开发模式起到指导作用。□

### 【参考文献】

- [1] 锻压手册 第2卷, 冲压/中国机械工程学会塑性工程学会编 3版 北京 机械工业出版社 2013.7:986
- [2] 张瑜. 某轿车车门外板滑移线问题分析与解决[J]. 汽车工程师, 2019.(12): 21-25+30
- [3] 王同领, 杨杨. 车门内板褶皱问题的解决[J]. 汽车工程师, 2014.(01): 58-59
- [4] 王同领, 黄毅钢, 张宗乐等. 冲压成本控制[J]. 汽车工程师, 2012.(02): 56-59
- [5] 王同领, 陈峰, 苑雪雷. 冲压件开裂问题的解决方法[J]. 汽车工程师, 2013.(09): 56-58
- [6] 魏国旗. 车身冲压件调试结论[J]. 锻造与冲压, 2020.(10): 70-72

# 轻型动台式龙门数控机床的设计探讨

通用技术集团沈阳机床有限责任公司 赵旭靖

【摘要】我国经济在经过高速增长和快速发展后，机床用户的技术水平在不断提升，用户对机床的精度、刚度、稳定性等方面更加看重，因此对动台式龙门数控机床的设计要求也更高。动台式龙门数控机床工作台前后移动为X轴，滑鞍左右移动为Y轴，滑枕上下移动为Z轴。本文就轻型动台式龙门数控机床的设计进行探讨。

## 一、市场现状分析

随着近年来国家基础设施建设的逐步深入以及汽车、军工等行业的火爆，龙门机床产品越来越受到用户的青睐。传统的低精度龙门机床已经不能满足当前工业领域各大行业需求，无法满足用户高效率、高精度切削要求。国内目前能生产高精度龙门加工中心的厂家不多，国内市场对高端产品的需求主要依赖于进口，需求部门大多是国民经济的重点行业和国防军工部门，如航空航天、内燃机、模具、汽车等重点领域，我国每年都以比较昂贵的价格从国外发达国家进口该类机床。

因此攻克高精度龙门机床技术，开发高速、高精龙门加工中心，并尽快形成产业化规模，对我国装备制造业的发展具有重大意义。为此，国内新开发的动台式龙门数控机床，必须稳定性强，性价比高，国际先进。在当前的机床市场，特别是模具、军工、航空航天等行业对精密机床的需求十分迫切，研发市场更易接受的新型龙门式数控机床，并且做到量产，使之精度、稳定性更能满足用户的需求，同时有更多的自主知识产权，更高的国产化率，避免将来的主导产品被人仿冒，避免主导技术受制于人，使我们完全拥有自己的品牌，也具有十分重要的战略意义。

## 二、国内外技术水平及发展趋势

当前轻型动台式龙门机床产品与中国台湾地区的机床

几乎相差无几。国内的代表机床厂家是中捷机床和海天机床，中国台湾地区的代表机床厂家是友嘉、威力、高明、协鸿、亚威等厂家生产的龙门机床。中捷机床的GMC-RV系列产品，海天机床的GLU龙门系列产品，台湾友嘉的FV龙门系列产品，台湾威力的LB龙门系列产品均是这些厂家的轻型龙门加工中心的主导产品。

与中国台湾地区机床相比，国内机床在主轴最高转速、主电机功率和扭矩、机床精度等参数方面势均力敌，部分项目略占优势；但机床的稳定性、精度保持性方面还有一些差距，但差距不大。随着国内产品多年来质量的不断改进，机床的问题在逐渐减少，用户的满意度在逐渐提高，市场的占有率逐渐增加，产品也赢得更多的用户的青睐。但是国内小型动台式龙门机床产品与日本、德国等西方国家生产的小型动台龙门产品相比，在机床加工效率、加工精度、稳定性有较大差距。

国外机床各轴快移速度和主轴转速均优于国产产品，其加工效率更高。国外机床的各轴直线度、定位精度等方面高出国内水平，主要原因是国外产品发展历史悠久，结构成熟可靠，导致两者的加工精度差别较大。在功能部件方面，国外产品功能部件性能强大，品类齐全，国产产品在行业专用铣头、高性能变速箱、大容量刀库、集成式防护等方面与其有较大差距。国外机床厂商对于软硬件集成有丰富经验，对于用户特殊要求，如内冷压力可编程控制，大容量刀具管理，防护系统与主机的安全控制等方面，国内还有很长的路要走。新开发动台式龙门数控机床

的厂家，必须要有相应的产品及技术积累，完善的工艺及加工设备，丰富的数控龙门式数控镗铣床的研发及生产经验，具备生产机床的相应检验计量设备和检测手段，如三坐标检测仪、激光干涉仪、球杆仪及常规计量器，满足对机床的主要件和整机精度、性能、功能进行检测的需要。

### 三、轻型动台式龙门数控机床的设计

#### 1. 主传动形式设计

轻型动台式龙门机床的主传动设计主要有以下几种形式：

##### (1) 主电机+自制齿轮箱+金属传动轴

中国台湾地区机床及海天机床主轴传动形式均采用此种形式，此种传动优势是变速箱自制，出现故障可维护，主轴运转速度和扭矩可控；劣势是主电机位于主轴箱前侧靠上或者居中位置（无传动轴），主电机偏置，主轴箱受力不均衡，通过金属传动轴传动，转动惯量大，加工难度高，装配时不易保证同轴，影响转速提升。

##### (2) 主电机+进口减速箱+皮带传动

此种主轴传动形式由于皮带的缺陷已逐渐被淘汰。此种主传动劣势是主电机位于主轴箱前侧靠下位置，热量直接传递到主轴，引起主轴箱热变形，影响机床加工精度；主电机偏置，主轴箱受力不均衡；皮带磨损快，效率低，噪音大，易打滑，需经常更换。

##### (3) 主电机直连（高速无减速箱）

高速龙门机床均采用此种传动形式。此种传动优势是主轴转速高，传动件少，故障率低；劣势是主电机位于主轴箱内部，无法散热，导致主轴箱热变形严重，不易安装，又因为是电机直联，扭矩无法提升，导致主轴扭矩小。

##### (4) 主电机+进口减速箱+碳纤维联轴器

中捷、纽威等机床生产厂商采用此种传动形式（见图1）。此种传动形式的优势是主电机通过进口变速箱、碳纤维联轴器将动力传递到主轴组，碳纤维联轴器可有效抵偿侧偏、轴偏和角偏，避免背隙、应力集中和微位移等问题；劣势是进口变速箱传动比恒定，主轴输出最高转速和最大扭矩不可改变，变速箱维修需要生产商维修，无法自行维修，维护费用成本高。

以上四种主传动形式是轻型动台式龙门机床主传动的主要形式，设计者可根据自身需求、成本、使用方向进行选择。

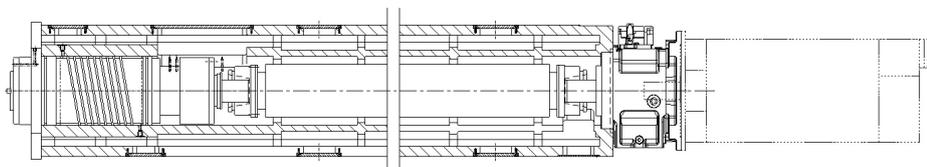


图1

#### 2. 机床基础结构件的设计

动台式龙门数控机床总体布局为左右立柱和横梁组成的龙门框架固定，工作台在床身上作前后移动的布局形式。工作台沿床身导轨作纵向运动为X轴，滑鞍沿横梁导轨作横向运动为Y轴，滑枕沿滑鞍作上下运动为Z轴。

动台式龙门数控机床由床身、左右立柱、横梁、滑鞍、滑枕等主要基础结

构件组成，其结构简图如图2所示。机床基础结构件的材料可根据机床设计主轴扭矩、切削力等参数确定，一般为铸铁和高强度钢两种。重型加工机床的基础结构件一般采用高强度铸铁材料，配合树脂砂工艺铸造，通过完善的热处理工艺消除残余应力，各铸件布置足够的加强筋板，保证整机具有很高的强度、刚性和稳定性。轻型加工机床一般采用高强度钢材料，基础结构件需要轻量化，以便提升各个伺服轴的移动速度。

机床性能是由多个零部件共同影响的结果，机床的刚度也是由多个部件共同影响的，因此需要采用有限元分析等方法，对机床主要基础结构件进行静力学和动力学分析，研究壁厚、筋的布置、各类阻尼结构对大件的影响，以此建立各个大件优化结构的数据库，使机床大件达到国外同类同规格机床的高刚度、大阻尼水平。同时，也需要运用计算辅助分析（CAE）和计算机辅助设计（CAD）等手段优化机床结构。在保证机床性能的前提下尽可能轻量化各主要结构件，降低移动部件质量，提升整机动态特性。

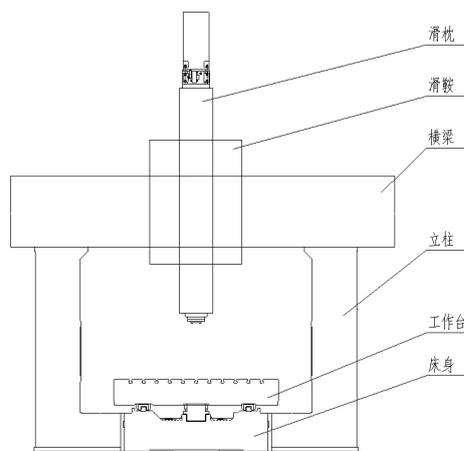


图2

#### 3. 伺服轴驱动的设计

##### (1) 伺服轴驱动介绍

轻型动台式龙门数控机床的各个伺服轴的传动有两种方式：一是采用

交流伺服电机作为动力源,滚珠丝杠作为传动部件,滚珠丝杠两端设计固定支撑,采用专用精密轴承组支撑并进行双向预拉伸,确保丝杠进给刚度和寿命;二是采用双齿轮齿条,电预紧主从电机结构,此方式可有效消除传动间隙,提高机床定位精度和重复定位精度。由于轻型动台式龙门数控机床各轴行程都比较小,因此大部分机床生产厂商都采用单电机驱动、丝杠传动方式。主从电机驱动方式需要两套电机、减速机等驱动部件,电气模块较大,机床相对成本高,目前只有德国西斯部分机床采用此种驱动方式。X、Y两轴都是水平传动,Z轴是竖直传动,所以Z轴可选择辅助平衡系统,减小电机模块。

本文对Z轴进行着重介绍。Z轴电机必须带有自动抱闸功能,在断电的情况下,自动抱闸将电机轴抱紧,使之不能转动。目前,国内外龙门产品Z轴驱动主要有三种方式:一是由电机减速机通过丝杠直接带动滑枕,这种方式的好处是滑枕直接由丝杠带着移动,无其他辅助支撑,运行平稳,精度高、节省空间,缺点是由于电机需要带动整个滑枕移动,需要承受滑枕及其上移动部件的全部重量,所以电机、减速机、丝杠选型时需要选择比较大的型号,价格昂贵,并且滑枕仅靠丝杠支撑,会造成滑枕前倾,影响精度;二是Z轴驱动采用双电机齿轮齿条驱动结构,优点是可有效消除传动间隙,提高机床定位精度和重复定位精度,缺点是成本高,价格昂贵;三是电机减速机通过丝杠带动滑枕移动并且由平衡油缸辅助支撑,这种结构的优点是平衡油缸平衡掉滑枕及其上面部件的大部分重量,所以电机、减速机、丝杠的负载小,可以选择型号偏小的,节省成本,缺点是平衡油缸无论与滑鞍哪个位置接触,都会占用一定的空间,会

影响滑鞍大小,平衡油缸与丝杠共同作用在滑枕上,同步移动非常重要,一旦平衡油缸的液压控制不好,会造成平衡油缸和电机不同步,影响机床精度。由于科技的突飞猛进,现在各种电磁阀及油泵的性能有了飞跃的发展,使平衡油缸与电机的同步技术越来越成熟。目前国内的轻型龙门产品大部分都采用第三种形式。

(2) 实际计算举例

以Y轴电机选型为例,以下参数为已知条件。假设拖动重量  $W=5t$ ,快移速度  $V_{max}=20m/min$ ,进给速度  $V_{进给}=10m/min$ ,切削抗力  $F=10000N$ ,丝杠直径  $d=63mm$ ,丝杠导程  $s=20mm$ ,丝杠长度  $L=3000mm$ ,加速时间  $T=0.2s$ ,导轨摩擦系数  $f=0.015$ ,减速机的减速比  $i=3$ 。

对于进给电机而言,其速度低、受力小,进给电机所消耗的功率也很小,可以不做计算。所以只需对该电机的惯量和扭矩进行匹配即可。

惯量的计算:

$$J_{丝杠} = 0.78 \times D^4 \times L \times 10^{-6} = 368.62 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$$

负载折算到丝杠上的惯量

$$J_{负载} = \left(\frac{s}{2\pi}\right)^2 \times \frac{w}{g} = 51.75 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$$

$$J_{总} = J_{丝杠} + J_{负载} = 368.62 + 51.75 = 420.37 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$$

$$\text{折算到电机上的负载惯量 } J_{负载} = \frac{J_{总}}{i^2} = \frac{420.37}{3^2} = 46.7 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$$

扭矩的计算:

$$\text{丝杠的转速 } n = \frac{v}{s} = \frac{20m/min}{20mm} = 1000r/min$$

$$\text{电机的额定转速 } n_0 = n \times i = 1000r/min \times 3 = 3000r/min$$

$$\text{空载时电机的加速力矩 } M_a = \frac{J_{负载} n_0}{9.67} \times 10^{-2} \times 9.8 = 7.15N \cdot m$$

$$\text{负载的摩擦力矩 } M_f = \frac{W \cdot f \cdot s}{2\pi\eta i} \times 10^{-2} \times 9.8 = 7.17N \cdot m$$

式中,导轨的摩擦系数  $f=0.015$ ,传动链的总效率  $\eta=0.9$

丝杠预紧引起的附加摩擦力矩:

$$M_0 = \frac{P_0 \cdot S}{2\pi\eta i} \times (1 - \eta_0^2) \times 10^{-2} \times 9.8 = 0.88N \cdot m$$

式中,  $P_0$ : 滚珠丝杠预加载荷 (kgf),  $P_0=500kgf$ ;

$\eta_0$ : 滚珠丝杠未预紧时的效率,取  $\eta_0=0.92$ ;

$$\text{电机空载启动力矩 } M = M_a + M_f + M_0 = 15.55N \cdot m$$

对轻型动台式龙门数控机床而言,因为动态性能要求较高,所以电机力矩主要是用来产生加速度的,而负载力矩占的比重较小,一般都小于马达力矩的10~30%。因此按空载启动扭矩选择电机,要使空载启动力矩小于电机的最大扭矩,即  $M \leq M_{max}$ 。

$$\text{切削时折算到电机轴上的加速力矩 } M_{at} = \frac{J n_t}{9.67} \times 10^{-2} \times 9.8 = 3.57N \cdot m$$

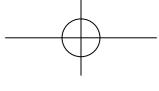
式中  $n_t$ : 切削时电机转速,取1500r/min,切削速度为10m/min

$$\text{折算到电机轴上的切削负载力矩 } M_t = \frac{P_t S}{2\pi\eta i} \times 10^{-2} \times 9.8 = 11.55N \cdot m$$

式中:  $P_t$ : 进给方向的最大切削力,已知  $P_t=1000kgf$

$$\text{切削时额定力矩 } M = M_{at} + M_f + M_0 + M_t = 23.17N \cdot m$$

由于快速进给力矩  $M=M_f+M_0$ ,数值相对比较小,所以选择电机时可以不考



虑这项。

综上所述, 查询西门子电机样本, 可选择西门子核心型1FK7101 (额定转矩10N·m, 额定转速3000r/min, 转动惯量99 kg·cm<sup>2</sup>) 及以上规格电机。

#### 4. 电气系统的设计

机床电气系统要符合国家电气标准, 动力回路均有过流、短路保护, 相关动作都应该有相应互锁, 保障设备和人身安全。电气系统需要具有自诊断功能, 操作及维修人员可根据指示灯及显示器观察机床各部运行状态。主要电气元件选用合适型号, 确保机床的可靠性。机床的电箱可采用封闭式电箱, 配置空调器进行散热, 确保电气设备正常工作。电箱内元件布置要整齐、美观, 便于维修。电箱内需要配有内部照明、调试用插座, 并预留一定空间以便于扩展功能。机床要具有报警装置及紧急停止按钮, 可防止各种突发故障给机床造成损坏。软件要合理设计, 报警可通过显示器显示文字及报警号。

#### 5. 机床的防护设计

轻型动台式龙门数控机床的防护一般为整体式防护 (见图3), 不仅要求外观美观、结构稳定, 还必须保证不跑冒滴漏, 密封性好。机床钣金类防护设计需要注意以下问题: 机床钣金类防护设计中不可盲目加大零件材料厚度来提高零件强度或刚度, 应首先考虑用增加零件折边或加大其折边尺寸的办法; 其次可以考虑增加相应的筋板或“几字形”加强槽钢的办法, 这样零件的强度或刚度可以提高很多, 而重量却不会增加太多; 对于可以直接折弯成形的零件, 切不可人为再拆成分件进行拼焊, 设计时应将零件是否能够直接折弯成形搞清楚, 避免过度拆分零件; 除配做孔外, 对于零件上的各种孔, 在拆成分件时, 均应在分件上给出, 以便在进行板料加工时由数控激光切割机或数控转塔冲机床直接加工完成, 避免和减少人为手工配做孔; 必要和适当地改变零件结构, 可极大地提高材料利用率。以某立板零件用数控激光切割机自动排样下料

为例进行对比验证, 虽加工时间有所增加, 但节约的成本远高于所增加的费用。

机床钣金零件的基础构造及其工艺受机床外观、设备加工能力以及加工工艺等多方面的影响。钣金防护在设计阶段就要对其结构的影响因素加以充分的考虑, 使得零件设计具有可加工性。设计者在实际的工作中要善于总结问题, 积极分析, 找到解决方案, 不断的对钣金类零件的加工进行优化, 使得机床钣金零件的结构和工艺不断完善, 创造更高的价值。

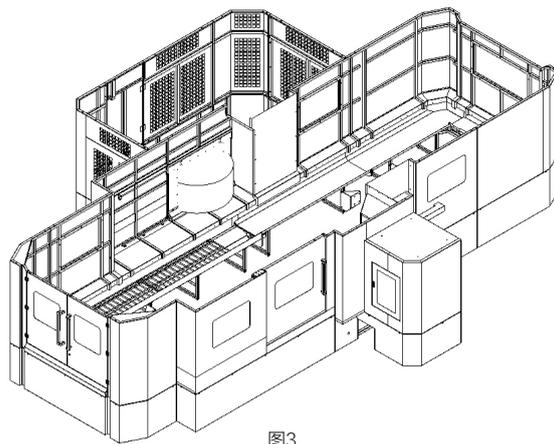


图3

## 四、结束语

轻型动台式龙门数控机床产品应用范围广, 加工能力强, 具有高精度、高速度、高柔性、环保性等特点。新设计的轻型动台式龙门数控机床性能指标和精度指标要完全符合国家标准, 产品经过模块化设计, 可以按市场需求进行产品系列化和客户化制造, 其良好的性价比将是国内外客户的最佳选择。现阶段市场对轻型动台式龙门数控机床产品的需求量很大, 市场前景十分宽广。设计一款性能优异的轻型动台式龙门数控机床, 对龙门机床产品占领市场具有积极意义, 在促进我国装备制造业发展, 替代小型高精龙门装备进口方面也可作出较大的贡献。□

## 资讯

### 法孚机床卧式翻板加工中心获得新订单

近日, 凭借法孚机床Powermill Ti型卧式翻板加工中心, 法孚集团获得了中航工业核心客户新订单。

Powermill Ti是全球唯一的超大型的钛合金卧式翻板加工中心, 在钛合金加工领域具备卓越的设备刚性和加工效率, 尤其适合于航空钛合金大尺寸和超大尺寸构件铣削加工, 可显著提高钛合金模锻件整体加

工效率。该产品在数字化领域也达到了前所未有的高度, 其大量应用“经验证的新技术”, 将在性能和可靠性上达到最佳平衡。该机型主要面向民机零部件制造市场, 对象既包含了大量波音737和空客A320的转包制造部件, 更囊括和覆盖了中国自主民机的几乎所有型号相关零部件。

# 2021年机床工具行业上市公司运行概况

中国机床工具工业协会信息统计部

2021年，机床工具行业整体延续了2020年下半年以来的恢复性增长态势，市场需求持续改善，行业运行继续保持向好趋势。机床工具行业上市公司，作为行业内的优质企业和典型企业，可从一个侧面展现行业的运行状态。本文从各上市公司2021年年报入手，汇总分析重点监测的行业上市公司的运行情况。

从行业上市公司的细分行业分布来看，金属切削机床行业居首，占33.3%；磨料磨具行业其次，占26.3%；工量具行业第三，占12.3%；数控装置行业第四，占10.5%；金属成形机床行业第五，占7%。机床附件及功能部件行业也占7%。具体行业分布情况如图2所示

## 一、概况

根据本行业产品特征，我们对国内上市公司的机床工具产品收入在总收入中的占比情况进行了梳理分析，甄选了行业特征比较突出的57家企业作为行业上市公司的重点监测和分析的对象。2021年较2020年增加6家（其中4家为2021年度新上市，1家为2022年初新上市，一家为主营业务回归）。这57家上市公司中，深交所主板23家，创业板20家；上交所主板6家，科创板8家。

从行业上市公司的地区分布来看，华东地区居首，占35.1%；华中地区其次，占28.1%；华南地区第三，为17.5%。具体分布情况如图1所示。

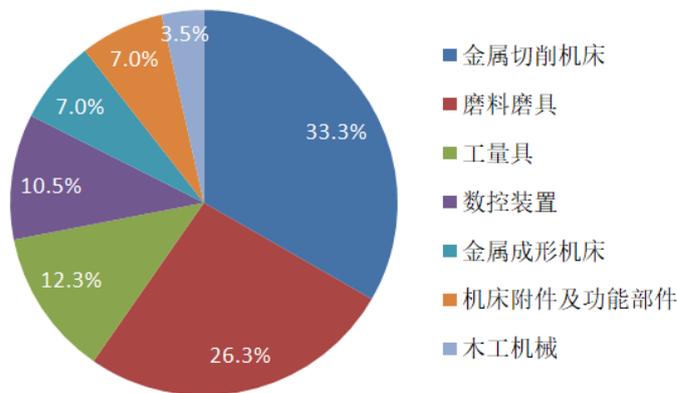


图2 行业上市公司细分行业分布情况

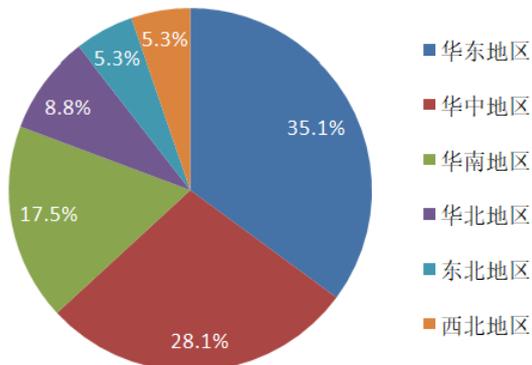


图1 行业上市公司地区分布情况

## 二、行业上市公司主要财务指标情况

### 1、资产负债情况

截至2021年末，重点监测上市公司的资产总计为2390.1亿元，同比增长15.3%。

负债合计为1188亿元，同比增长17.5%。资产负债率为49.7%，同比增长0.9个百分点，同比增长的企业占66.7%，同比下降的企业占33.3%。

各分行业的资产负债情况见表1。

表1 各分行业资产负债情况表

行业名称	资产总计 亿元			负债合计 亿元			资产负债率 %		
	本期	同期	同比 %	本期	同期	同比 %	本期	同期	同比 百分点
金属切削机床	955.0	833.7	14.6	535.5	467.2	14.6	56.1	56.0	0.0
金属成形机床	95.6	83.3	14.8	43.0	32.1	34.0	45.0	38.5	6.4
工量具	119.8	90.2	32.9	34.9	32.2	8.3	29.1	35.7	-6.6
机床附件及功能部件	84.2	60.2	40.0	26.6	22.1	20.2	31.6	36.8	-5.2
磨料磨具	715.8	653.5	9.5	329.1	286.4	14.9	46.0	43.8	2.1
木工机械	69.0	51.0	35.3	23.4	12.4	89.2	33.9	24.2	9.7
数控装置	350.7	300.5	16.7	195.6	158.3	23.5	55.8	52.7	3.1
机床工具合计	2390.1	2072.3	15.3	1188.0	1010.7	17.5	49.7	48.8	0.9

从分布情况看，资产负债率在40%以下的企业占比为45.6%，同比下降14个百分点；介于40%–60%之间的企业占比为38.6%，同比增长17.5个百分点；高于60%的企业占比为15.8%，同比下降3.5个百分点，其中有两家企业超过100%。整体呈现出两头收窄、中间扩展的明显变化。资产负债率的整体分布情况见图3。

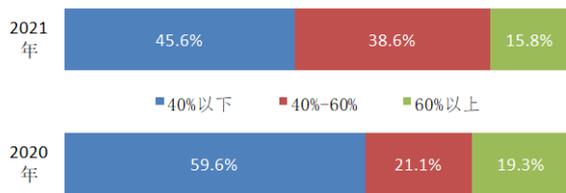


图3 资产负债率分布情况

## 2、收益情况

2021年，重点监测的上市公司实现营业收入1171.9亿元，同比增长33%，仅1家企业同比下降。

实现利润总额93.9亿元，同比增长187.3%，有13家企业同比下降。

2021年末的亏损面为15.8%，同比保持持平。

各分行业的收益情况见表2。

表2 各分行业收益情况表

行业名称	营业收入 亿元			利润总额 亿元			亏损面 %		
	本期	同期	同比 %	本期	同期	同比 %	本期	同期	同比 百分点
金属切削机床	521.9	367.9	41.9	37.5	15.6	139.4	21.1	21.1	0.0
金属成形机床	42.2	32.9	28.2	4.2	3.6	17.0	0.0	0.0	0.0
工量具	63.8	44.2	44.3	16.2	-3.5	562.0	0.0	14.3	-14.3
机床附件及功能部件	34.2	27.8	22.9	6.4	5.3	20.9	0.0	0.0	0.0
磨料磨具	299.1	235.7	26.9	20.7	-0.6	3488.9	26.7	20.0	6.7
木工机械	51.5	38.2	34.7	9.5	7.2	31.2	0.0	0.0	0.0
数控装置	159.2	134.1	18.7	-0.5	5.0	-109.7	16.7	16.7	0.0
机床工具合计	1171.9	880.9	33.0	93.9	32.7	187.3	15.8	15.8	0.0

## 3、效益情况

2021年，重点监测上市公司的利润率（利润率=利润总额/营业收入）为8%，同比增长4.3个百分点，同比增长的企业占57.9%。

各分行业的利润率情况见表3。

表3 各分行业效益情况表

行业名称	利润率 %			毛利率 %		
	本期	同期	同比 百分点	本期	同期	同比 百分点
金属切削机床	7.2	4.3	2.9	27.6	28.5	-0.9
金属成形机床	9.9	10.9	-1.0	30.5	31.5	-1.0
工量具	25.4	-7.9	33.3	31.5	32.3	-0.8
机床附件及功能部件	18.8	19.1	-0.3	38.3	40.8	-2.6
磨料磨具	6.9	-0.3	7.2	24.6	22.5	2.1
木工机械	18.4	18.9	-0.5	27.9	28.6	-0.7
数控装置	-0.3	3.8	-4.1	22.7	30.9	-8.1
机床工具合计	8.0	3.7	4.3	26.8	27.9	-1.1

从利润率的分布来看，2021年度利润率在0%以下的企业占比为15.8%，与上年同期保持持平；位于0%–10%之间的占比为28.1%，同比下降1.8个百分点；位于10%–15%之间的占比为8.8%，同比下降5.3个百分点；位于15%以上的占比为47.4%，同比上升7个百分点。整体分布略往15%以上区域集中。利润率的整体分布情况见图4。

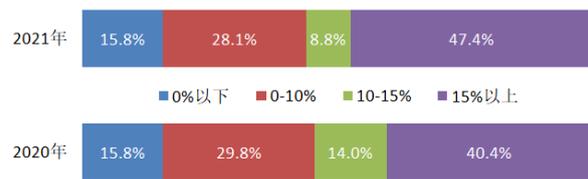


图4 行业上市公司利润率分布情况

2021年，加权平均净资产收益同比实现增长的企业占比为54.4%。从其分布来看，0%以下的企业占比为15.8%，同比上升1.8个百分点；位于0%–10%之间的占比为31.6%，同比下降17.5个百分点；位于10%–15%之间的占比为29.8%，同比上升10.5个百分点；位于15%以上的占比为22.8%，同比上升5.3个百分点。整体明显往右侧偏移，且分布更为均匀。加权平均净资产收益的整体分布情况见图5。



图5 加权净资产收益率分布情况

## 4、现金流情况

2021年，重点监测的上市公司经营活动产生的现金流表现为净流入，流入净额为119.1亿元；投资活动产生的现金流表现为净流出，流出净额为163.1亿元；筹资活动产生的现金流表现为净流入，流入净额为46.5亿元。

各分行业的净现金情况见表4。

表4 各分行业净现金流情况表

行业名称	净现金流 亿元		其中：(亿元)					
			经营净现金流		投资净现金流		筹资净现金流	
	本期	同期	本期	同期	本期	同期	本期	同期
金属切削机床	2.1	18.4	41.0	35.9	-58.0	-35.3	19.1	17.7
金属成形机床	-6.2	11.9	4.4	5.3	-10.1	1.8	-0.5	4.8
工量具	-1.4	11.8	12.4	8.8	-16.7	-0.1	2.9	3.1
机床附件及功能部件	3.8	-1.8	5.5	6.1	-15.7	-12.6	14.0	4.7
磨料磨具	-5.4	36.6	42.4	42.1	-42.2	-16.6	-5.7	11.1
木工机械	3.7	4.4	8.3	8.9	-10.2	-2.7	5.6	-1.7
数控装置	5.9	4.7	4.9	19.4	-10.2	-12.7	11.2	-2.0
机床工具合计	2.5	86.0	119.1	126.5	-163.1	-78.2	46.5	37.7

### 三、部分上市公司2021年运行情况

以下我们选择部分关注度较高的行业上市公司，介绍一下主要指标情况。

表5 部分上市公司主要经济指标

证券代码	证券简称	营业收入 亿元		利润总额 亿元		加权平均净资产收益率%	
		本期	同比 %	本期	同比 %	本期	同比 百分点
000410.SZ	ST 沈机	16.99	26.5	-9.35	-28.1	--	--
000837.SZ	秦川机床	50.52	23.4	3.52	38.1	11.26	4.1
000988.SZ	华工科技	101.67	65.6	8.25	30.4	10.87	2.3
002008.SZ	大族激光	163.32	36.8	23.07	116.4	18.66	8.1
002026.SZ	山东威达	33.10	52.9	4.43	51.4	13.25	2.9
002046.SZ	国机精工	33.28	41.3	1.59	42.9	4.50	2.2
002520.SZ	日发精机	21.85	14.1	0.85	-41.9	1.63	-2.1
002559.SZ	亚威股份	19.99	22.0	1.08	-24.9	7.47	-0.9
002747.SZ	埃斯顿	30.20	20.3	1.66	4.8	5.75	-1.4
002843.SZ	泰嘉股份	5.27	30.6	0.80	56.8	13.15	5.8
002903.SZ	宇环数控	4.38	44.1	0.83	74.3	10.67	3.8
300083.SZ	创世纪	52.62	53.6	6.19	197.6	18.95	47.8
300161.SZ	华中数控	16.34	23.6	0.40	-11.8	2.17	-0.2
300488.SZ	恒锋工具	5.09	31.5	1.77	81.8	13.65	5.7
300503.SZ	昊志机电	11.40	30.4	1.85	105.8	13.26	5.2
300508.SZ	维宏股份	4.13	97.6	0.64	84.9	10.07	4.8
300580.SZ	贝斯特	10.57	13.5	2.26	11.6	10.51	-0.5
300809.SZ	华辰装备	4.09	77.5	0.90	139.8	5.40	3.0
300990.SZ	同飞股份	8.29	35.5	1.37	-5.3	10.09	-20.5
301200.SZ	大族数控	40.81	84.6	7.94	129.4	33.75	14.1
600172.SH	黄河旋风	26.52	8.2	-0.20	98.0	1.33	27.8
601882.SH	海天精工	27.30	67.3	4.12	170.6	24.71	14.4
603011.SH	合锻智能	12.06	44.0	0.66	171.3	3.73	2.2
688028.SH	沃尔德	3.26	34.7	0.62	9.0	6.38	0.6
688305.SH	科德数控	2.54	28.0	0.83	112.7	10.97	4.3
688308.SH	欧科亿	9.90	41.0	2.55	106.6	15.89	1.1
688558.SH	国盛智科	11.37	54.5	2.27	64.2	15.31	2.1
688559.SH	海目星	19.84	50.3	1.12	36.4	7.61	-1.4
688577.SH	浙海德曼	5.41	31.7	0.82	35.9	9.28	-2.5
688697.SH	纽威数控	17.13	47.1	1.89	59.2	23.19	-0.2

(数据来源：各上市公司2021年度报告)

### 四、2021年上市公司总体运行情况评价

2021年重点监测的行业上市公司的运行情况与机床工具行业整体基本一致，营业收入、利润总额和利润率等各项主要经济指标和效益指标同比增长，且增幅均明显高于行业平均水平。部分企业利润增幅超过100%。其主要原因有：特定用户领域需求旺盛，在产品应用场景方面进行了深度开发，提升了核心竞争力、进口替代加快，以及上年基数较低等。总体看，上市公司确实是行业企业中的优质群体。

重点监测的行业上市公司营业收入同比有较大幅度增长，但整体毛利率有所下降，存货及其中原材料和产成品都明显增长，原材料增幅尤为突出。同时存货周转率提升，合同负债同比大幅增长。虽然从一个侧面体现出市场需求旺盛，但受新冠疫情对产业链、供应链冲击，以及原材料大幅涨价等因素影响，行业上市公司同样面临较大运营压力。□

#### 资讯

### DMG MORI公司面向中国市场推出一款新型卧式加工中心

近日，由DMG MORI天津工厂制造的一款新型卧式加工中心 - NHC 5500 正式亮相中国市场。该产品采用三点支撑机构，标配高刚性、高耐用的BT50 主轴，旨在以精炼的结构实现高质量的重切削加工；可根据客户不同的需求，配置最多可达330刀位的刀库，以满足客户多品种生产的需求；同时附带有专利申请保护的零铁屑回收装置，以减少切屑干扰，实现更高机床作业率；适用于机械制造、汽车、液压、工程机械等产业，可针对各种单元部件进行高效率的量产加工。

# 新技术在机床领域应用概况

中国机床工具工业协会行业发展工作委员会 吴晓健

进入二十一世纪以来，机床在提高加工精度、效率、降低成本的目标上，出现了一系列新技术、新手段，数字化、智能化、复合化、绿色制造等新技术和新理念深度融入机床制造及使用过程中。下面就这些方面的一些新的发展趋势加以概述，供业界同行参考。

## 一、数字化



数字化是一个系统性的执行概念，是把有关机床设计、调试、运行中的所有状态实现数字化，把机床制造、使用过程中的各种状态在计算机中完整、精确体现出来，形成机床物理系统与计算机中数字化仿真系统建立完全一一对应关系。以数据分析作为切入点，通过数据发现问题、分析问题、解决问题，打破传统经验驱动决策方式，实现科学决策、数据说话，实现了从制造、使用过程的全生命周期数字化管理，主要体现在以下几个方面。

### 1. 设计方案与计算机辅助工程CAE (Computer Aided Engineering) 紧密结合

通过结构静力学、结构动力学、声学分析、机构运动、复合材料、电磁耦

合等，实现线性有限元分析、非线性有限元分析、边界元技术、多体动力学、疲劳仿真、热分析、计算流体动力学仿真等，实现结构设计、系统设计中的快速仿真、评价与优化迭代。设计软件中的设计模块与分析模块紧密集成，实现设计模型与分析模型联动，快速仿真验证。设计修改后的几何模型，一键更新即可再次进行仿真分析，完成一轮设计迭代。特别需要说明的是，CAE提供了大量结构件、功能部件仿真模块，是数字孪生仿真的关键。

### 2. 联机装配调试

借助机电一体化设计，通过数控系统驱动三维模型运行，实现机床虚拟调试，可以发现机床运行中的干涉、PLC错误、数控参数设置不当、导轨润滑流量不够等问题，从而及时修改调整，减少了实体机床调试中碰到的问题。替代了原型机制造中的调试过程，新产品开发时间缩短30%以上，大幅减少交付用户新产品时间。

### 3. 加工运行

针对加工工件，调用加工专家库参数或迁移参数，实现机床加工的数字孪生。设置不同补偿参数等，检验

机床加工中加工件干涉碰撞现象，实现优化高效的刀具路径，各加工参数优化等。

#### 4. 售后服务

通过工业互联网，机床制造厂与用户处的机床联接，可提供远程诊断判别故障、维修保养管理和故障管理建议。

#### 5. 机床的互联互通

通过工业互联网，用户能够实时检测机床，掌握机床状态，分析机床利用率和非计划停机，并可随时访问状态历史、班次日历和机床日志，提高了生产透明度。如果发生非计划停机，生产管理者可收到自动推送的通知，从而快速响应和提高机床利用率；机床操作者可以直接从ERP系统将任务单数据导入到“任务管理器”中，在机床上获得全部重要任务单数据；用“应用连接器”可连接多种应用系统，例如ERP、数控系统和生产数据管理系统，机床操作员可直接在机床上调用其数据。



目前欧洲机床制造企业不同程度地实施了机床数字化制造应用。在设计中主要进行干涉、刚性、加速度仿真，对NC代码、PLC代码和操作顺序进行验证；在产品装配中实现机电一体化的虚拟调试；在使用中实现互联互通，与各种管理软件打通，大幅提高生产效率、降低成本、缩短交货周期。

## 二、智能化

智能化是在数字化感知机床运行中参数和状态变化的基础上，通过模型化决策机制（算法），指挥执行单元自动运行。传感器+算法判断+动态控制成为机床智能化的典型特征，并形成多种应用。随着对影响加工精度、效率等原因研究的不断深入，机床将引入更多的传感器来获知机床参数、状态的变化，决策后自动调整，促进加工精度、效率的不断提高。

数控机床引入智能化控制技术是一场新技术革命。把影响机床加工精度、效率等诸多因素实现智能化应对调整，获得更优效果。目前应用场景主要表现在以下两方面。

#### 1. 机床的智能化功能

普通数控机床是按照G指令和M指令驱动机床部件，实现刀具与工件的相对运动，通过传感器对位置、速度反馈确认，保证加工精度。实际上机床加工零件过程中，加工精度、效率受到动态的多因素影响。在切削力、惯性力、摩擦力、内部和环境热载荷的作用下，机床产生变形和振动，导致刀具的实际路径偏离理论路径。同时被加工件受到刀具的作用产生振动、变形也影响加工精度、表面质量和生产效率。普通数控机床对这些因素影响并无感知和调整控制，机床智能化的核心在于借助温度、加速度、位移和振动等多种传感器监测机床工作状态和环境的变化，构建相对应的基于模型算法，得出实时动态优化的结果，调节切削参数，补偿热变形，抑制或消除振动，消除机床运行中的干扰，从而达到提高机床性能、精度、缩短加工时间，提高刀具寿命等目的。其典型应用有以下几方面。

##### (1) 热位移控制

机床工作温度变化、环境温度变化对丝杆进给量造成偏差，而工件加工热等因素也对定位精度造成偏离。通过温度传感器感知这些变化，根据机床结构热变形特点、被加工件结构受温度变化特征，建立温度变化补偿算法，实现机床加工中的自主判断，驱动丝杠进行相应调整，把温度变化影响最小化。通过热误差补偿方法可以大幅度减少受热造成的精度影响，仅为无热补偿误差值的1/8-1/10。

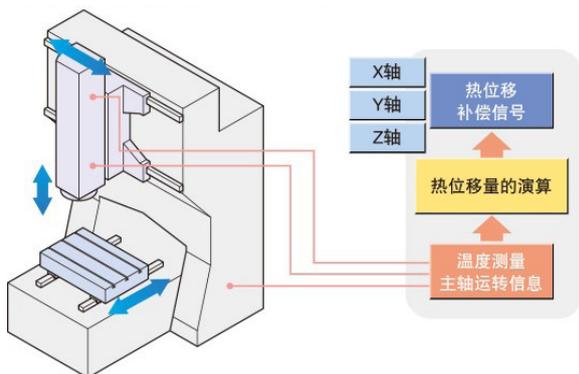
##### (2) 自动优化伺服控制

通过自动优化伺服控制，提高加工效率，提高加工精度及表面质量，并可长时间保持高精度、稳定运行。例如传统加工中心的工作台不论装载工件、夹具重量多少，其进给加速度相同。采用自动优化伺服控制技术的机床，通过测算工作台上工件、夹具的重量，自动设定包括加速度的优化伺服参数，在保持加工精度的前提下，缩短加工时间12%以上；又如车削中心变换夹具或工件，其转动惯量（惯性质量）会改变，导致位置误差相应变大。应用自动优化伺服控制技术，通过加速转矩测算夹具、工件的惯性，自动设定优化伺服参数，达到维持高精度的稳定运行。

##### (3) 加工参数优化

机床工件、刀具主轴运行从低速区域到高速区域分布着各种不同的加工振刀特征，加工时进刀量不同也产生振

刀。通过安装在机床上的传感器测定振刀，根据算法计算出优化的主轴或工件轴转速，或是确定主轴在特定转速范围内保持连续变化量，驱动主轴转速调整，达到消除振刀。整个过程是自动、动态实现的。



#### (4) 智能化数控系统和各种应用APP

智能化数控系统具有智能化各种应用，如：状态监控、任务管理、加工过程仿真、加工工艺参数计算、数据传输、设备互联、道具管理、维保管理、FAM托盘管理、MT Connect、5轴自动校准初始位置、防碰撞、云管理等。同时智能化数控机床可以安装相应的第三方APP应用。APP是机床智能化功能的拓展（包括与功能部件配套的APP），主要有：机械手控制、远程诊断、生产日程管理、测量、卡盘夹紧力控制、天气环境与机床使用条件报警、机床报警邮件和短信推送、数控显示屏信息保护、操作程序分级管理等。目前已有数百种不同APP在不同机床上得到应用，形成硬件与软件智能化的融合，逐步形成智能化生态。

## 2. 机床的互联互通

搭建用户使用机床与工厂上位机（或工业云）的网络连接，实现机床之间、车间管理系统的相互通信，进行生产制造中的设备匹配优化。通过数控机床中的传感器、数控系统、PLC等信号，上位机随时获知机床状态和加工过程的各种信息状态。根据算法要求，自主进行生产调度，实现资源优化配置，提高生产系统效率；在加工过程中通过机器学习，对加工工艺和参数进行优化；根据生产线故障模型，预警可能出现的故障问题，保证机床开机率。

## 三、复合加工

复合加工技术体现在一台机床上能完成车、铣、磨、钻、镗、攻丝、铰孔及扩孔、电加工、激光加工、热处理等不同组合加工要求。复合加工机床有以下优点：

(1) 提高工序集中度，减少多工序加工中零件的上下

料装卸时间。

(2) 避免或减少了工件在不同机床间进行工序转换而增加的工序间输送和等待时间，从而大幅缩短零件加工周期和减少在制品储存量。

(3) 减少工件安装次数，避免安装误差，有利于保证加工精度的稳定性；减少占地面积。



目前机床“复合”程度也在不断提高。从“加工工序复合”发展到“以完成整个零件加工为目的的复合”，一台机床成为一个“车间”，一个零件在一台机床上完成全部加工；几台机床成为一个产品的“制造工厂”。

复合机床已有车铣、车磨、车铣激光、铣磨、磨电火花等不同组合。由于复合机床加工过程的多工序、多工艺、多刀具的特点，除了提供多种加工手段硬件外，为用户提供加工工艺和解决方案尤为重要，提供深度内嵌加工工艺的加工软件成为必须，因此复合机床通常提供防碰撞检验、图形语言编程、加工专家库系统等。

## 四、绿色制造

绿色制造又称环境意识制造和清洁制造等，源于上世纪30年代，90年代以来，绿色制造技术得到了迅速的发展和应用。绿色制造是一个综合考虑环境影响和资源效率的现代制造模式，其目标是使产品从设计、制造、包装、运输、使用到报废处理的整个产品生命周期中，对环境的影响(负作用)最小，资源效率最高。

坚持可持续性发展，保护环境的理念不断深化，绿色制造已成为机床竞争力的一个重要指标。目前在机床行业中，实现节能低排放比较成熟措施有：数控系统中反映能耗数据，提醒使用者关注机床能耗情况；对液压泵电机频率调节，根据工作载荷需要，调整转速高低；按需提供密封空气；可加冷却水的冷却单元；夹紧油缸漏油报警；LED加工区照明；高能效的电气柜冷却；回收制动能量方法等。通过以上措施节能可达30%左右。近年来不用或少用冷却液、实现干切削、半干切削节能环保的机床不断出现，提倡少切削、无切削加工工艺等不断增加，对环境保护的效果显著增加。□

# 基于专利视角的国内外机床技术分析

机械工业信息研究院 牛江蓉 胡端阳 李芳慧 杜 激

机床是工业生产中最重要工具之一，在整个工业体系中处于基石的地位。经过多年发展，我国已成为机床世界第一生产、消费大国，在中高端市场所占份额在不断提升。但与此同时，我国机床发展外部环境愈加严峻，近几年国外相关企业在华专利申请大幅增加，在我国抢注专利，对我国机床类产品形成专利包围圈，构筑专利壁垒，从而达到限制我国技术发展的目的。后疫情时代，我们仍需坚定不移地加强机床产业知识产权保护，为研发和创新创造更好的条件，摆脱疫情以及国内外形势带来的不利影响，实现我国机床产业高质量发展。

## 一、国外机床产业专利申请现状与趋势

### 1. 国外机床专利申请发展呈不断下降的态势

2011-2020年，国外机床的专利申请量累计达到12.5万项（不包括中国专利），年复合增长率为-4.2%。2020年当年国外机床专利申请量为10396项，同比增长10.6%。如图1所示，国外机床专利申请量从2011年的12887项下滑至2020年的6618项。其中，2013年专利申请增速降幅最大的，同比增长速度降至-16.6%。（由于专利公布具有滞后性的特点，2020年数据相对不准确）。



图1 2011-2020年全球机床专利申请发展趋势

### 2. 美韩日德是全球机床产业技术研发与市场竞争的重点区域

美国、韩国、日本、德国是全球机床产业技术研发与市场竞争的重点区域。如图2所示，除中国外，美国、日本、韩国、德国是国外机床产业创新最活跃的地区，机床专利申请量均超过2.0万项，远超俄罗斯、印度等国家。其中，美国机床专利申请量为4.4万项，位居第一位，韩国、日本分别以3.3万和3.2万项的申请量分列第二、三位。

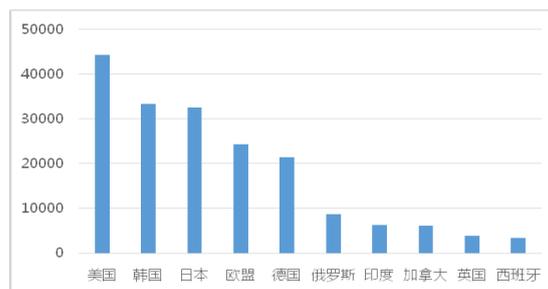


图2 2011-2020年国外机床专利技术来源国分布

2011-2020年，国外机床产业前十位技术专利申请人中，有5位是韩国申请人，德国和日本的申请人各有2位，美国申请人有1位。其中，德国罗伯特博世、日本DISCO和韩国现代重工居于前三位，专利申请量分别为1247项、1239项和1143项（见图3）。这十位申请人掌握了全球机床7%的专利技术。

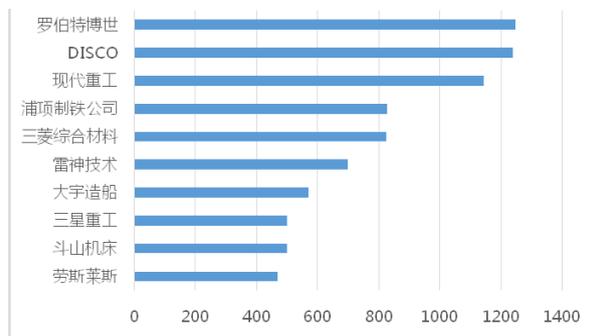


图3 2011-2020年国外机床产业前十位申请人

### 3. 美日德机床专利技术领域与布局分析

从2011-2020年世界机床产业专利申请的技术热点看，磨床以及相关附件、除尘装置、传动装置等的专利申请数量不断提高，成为行业关注的重点领域。同时，保持机床稳定工作的冷却、润滑等相关控制技术是机床行业长期发展的重点。

#### (1) 美国

2011-2020年，美国机床产业领域共申请专利4.4万项，其中有效专利占比达到84.9%。如图4所示，在排名前十位的申请人中有包括雷神、GE等在内的6家美国企业，此外日本和德国企业各有2家。这前十位申请人拥有美国12%的机床产业专利技术。

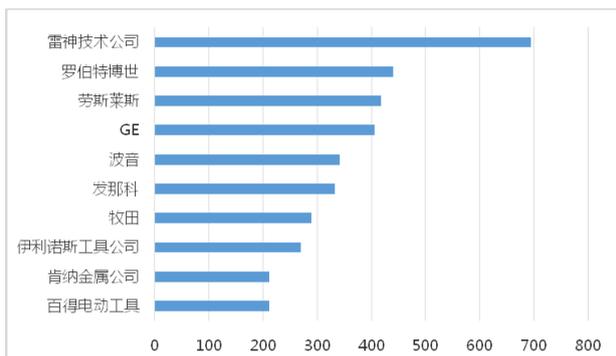


图4 2011-2020年美国机床产业前十位专利申请人

美国机床在高效自动化机床、自动生产线、NC机床、FMS等机床技术及工业生产上拥有世界领先的优势。近年来，美国机床领域专利申请主要聚焦在高精度、高可靠性的金属切削机床，以及相关的工具附件、刀具、齿轮等领域（见表1）。

表1 2011-2020年美国机床专利申请技术领域分布情况

IPC号	技术分类	数量
B23P11/00	用不包含在其他类目中金属加工方法连接或拆开金属部件或金属物品	1976
B25F5/00	与执行操作无特殊关联的和其他类目不包括的轻便机动工具的零件或部件	1198
B23Q11/00	适用于保持刀具或机床部件良好的工作状态或者适用于工件冷却的安装在机床附件	1195
B23P19/04	用于装配或拆卸部件的	1085
B23P19/00	用于把金属零件或制品或金属零件与非金属零件的简单装配或拆卸的机械	1057
H01L21/67	专门适用于在制造或处理过程中处理半导体或电固体器件的装置	945
B23P6/00	物品的修复或修理	912
H01L21/304	机械处理，例如研磨、抛光、切割	872
B22F3/105	利用电流、激光辐射或等离子体烧结或压实的专用设备	853
B23B27/14	刀头或刀片为特种材料的刀具	828

美国重点在世界主要机床市场进行了专利布局。如图5所示，美国在本土的机床市场专利申请量所占比例最大，这是由于在美国市场，雷神、GE虽然是龙头企业，但依然面临日本发那科、牧田，德国罗伯特博世等企业的激烈竞争，在美国进行大量专利布局对于巩固美国市场优势地位发挥着重大作用。其次，美国在欧盟、德国、英国等欧洲国家以及中国进行专利布局，以在欧亚市场形成有效竞争，保护本国机床产业在海外市场的优势地位。

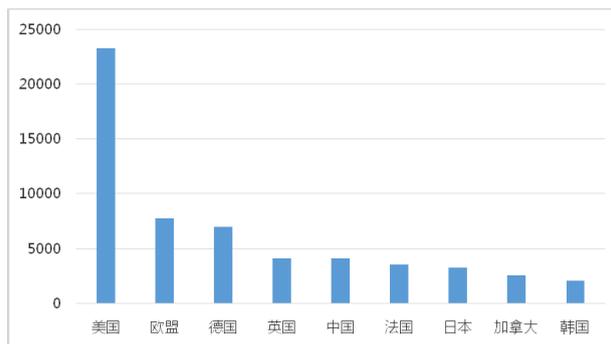


图5 2011-2020年美国机床产业专利布局

#### (2) 日本

2011-2020年，日本机床产业共申请专利3.2万项，其中有效专利占比达到88.8%。从图6中可以看出，排名前十位的申请人全部为日本企业，其中日本DISCO公司的专利申请量为910项，数量远超其他申请人。日本机床专利申请集中度较高，前十位申请人拥有日本21%的机床产业专利。

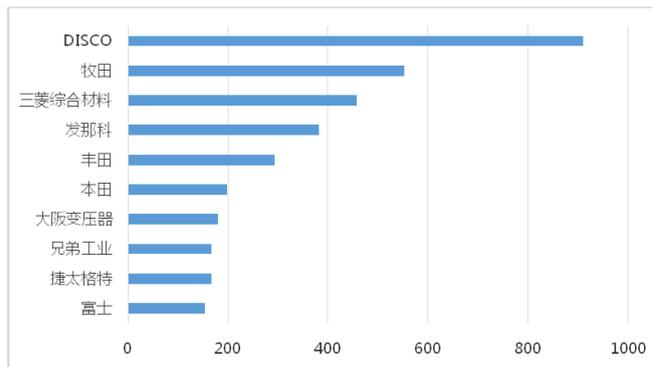


图6 2011-2020年日本机床产业前十位专利申请人

日本在机床研发和制造方面处在世界领先地位，素以高精、高速、高可靠性闻名于世，其专利技术主要聚焦在刀具、夹具、机床附件、磨床、测量装置等技术领域（见表2）。特别是在半导体制造和精密加工工具方面，如在切割锯、磨床、抛光机、砂轮等领域日本申请了较多专利，在申请量前十的IPC技术中所占的比重达到35.0%。

表2 2011-2020年日本机床专利申请技术领域分布情况

IPC号	技术分类	数量
H01L21/304	研磨、抛光、切割	1059
B23Q11/00	适用于保持刀具或机床部件良好的工作状态或者适用于工件冷却的安装在机床附件	957
B23B27/14	刀头或刀片为特种材料的刀具	855
H01L21/67	专门适用于在制造或处理过程中处理半导体或电固体器件的装置	797
B25F5/00	与执行操作无特殊关联的和其他类目不包括的轻便机动工具的零件或部件	590
B23Q17/00	机床上的指示或测量装置	580
B23B51/00	用于钻床的刀具	564
H01L21/683	用于支承或夹紧的装置	563
B23C5/20	有可拆卸的刀片或刀齿	477
B23B27/16	有可换刀头,如能夹紧的刀具	462

日本机床产业重点布局中国、美国和德国市场。在中国的专利申请量占7.4%，在美国的申请量占6.8%，在德国的申请量占5.0%（见图7）。由于专利布局的地域与目标市场直接关联，因此也从一定程度反映出日本在机床方面的市场定位。日本对美欧市场尤为重视，是由于美欧长期处于工业自动化的领导地位；而中国是近年来增长最强劲的用户市场，因此日本也不断加强在中国的专利布局。

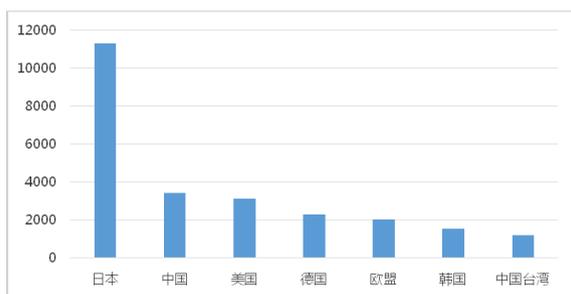


图7 2011-2020年日本机床产业专利布局情况

### (3) 德国

2011-2020年，德国机床产业领域共申请专利2.1万项，其中有效专利占比为78.9%。如图8所示，排名前十位的专利申请人中有8个为德国申请人。其中，罗伯特博世以1247项的专利申请量遥遥领先于其他申请人，其次是劳斯莱斯和戴姆勒公司；前十位申请人中有2位为日本申请人，分别是发那科和牧田。德国机床产业专利集中度世界领先，前十位申请人拥有德国24%的机床产业专利，高于美国和日本。

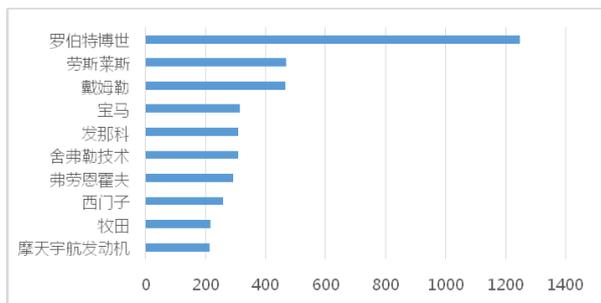


图8 2011-2020年德国机床产业前十位专利申请人

德国十分重视机床的重要战略地位，在大型、重型、精密数控机床领域具有明显优势。德国机床领域专利技术主要聚焦在机床主机与功能部件、测量装置、刀具等技术领域。其中，机床功能部件与零部件的专利申请在前十位IPC技术分类中占有主要份额，所占比重达到40.6%（见表3）。

表3 德国专利申请技术领域分布情况

IPC号	技术分类	数量
B25F5/00	与执行操作无特殊关联的和其他类目不包括的轻便机动工具的零件或部件	1320
B23Q11/00	适用于保持刀具或机床部件良好的工作状态或者适用于工件冷却的安装在机床附件	1168
B23Q17/00	机床上的指示或测量装置	740
B25B11/00	工件夹持装置或定位装置	438
B23Q3/06	工件夹紧装置	427
B23B27/16	有可换刀头刀具	418
B24B23/02	有旋转磨具轻便磨床	417
B23P13/00	制造金属物品主要用机械加工	411
B23Q3/155	使刀具自动插入或卸除的装置	398
B23B31/02	卡盘	379

德国机床产业专利重点布局欧美市场。德国机床订单最主要来自欧洲，其次是美国和中国，因此德国对欧洲市场进行了重点布局，专利申请数量占德国机床专利申请量的比重超过四分之一；其次是美国，专利申请数量占比为9.7%；在中国的专利申请数量占比达到6.0%（见图9）。

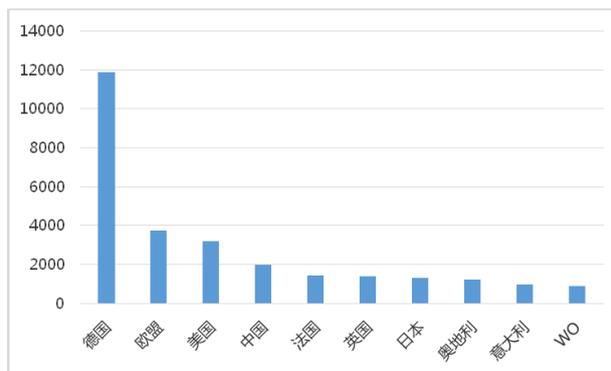


图9 2011-2020年德国机床产业专利布局情况

## 二、国内机床产业专利申请现状与趋势

### 1. 我国机床发明专利比重不断提高

2005年以来，随着市场需求旺盛和我国对知识产权的日益重视，特别是2006年提出了建设创新型国家战略和2008年实施国家知识产权战略后，国家和地方政府出台多项政策支持企业创新。在此国内外形势下，我国机床行业专利数量大幅度增长。

2011-2020年，我国机床行业专利申请数量达到74.5万项，年复合增长率为23.8%。其中，发明专利申请数量达到20.6万项，年复合增长率19.1%，发明专利占专利申

请总量的27.6%（见图10）。近几年来，我国机床企业通过对引进技术的消化吸收和自主开发，产业技术发展迅速；同时企业自主知识产权意识不断提高，开始重视专利保护对行业技术发展的重要性。机床发明专利占比不断提高，2012-2018年连续6年发明专利数量占总量的比重超过了30%。今后，随着我国强国战略等国家战略的深入实施，促进企业自主创新能力不断提升，将有效提高机床专利质量水平。

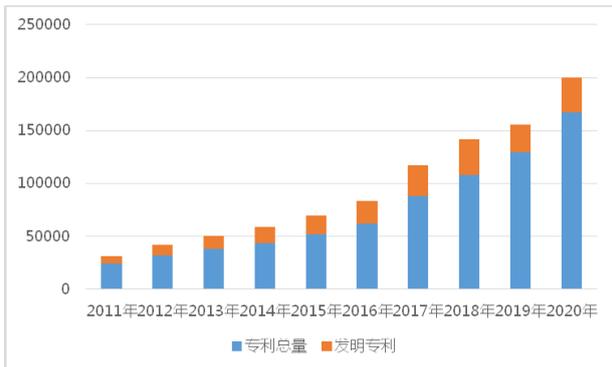


图10 2011-2020年我国机床产业专利申请趋势

## 2. 我国机床行业专利密度较国外有较大差距

2011-2020年，我国机床产业排名前十位的申请人中有7个中国申请人，2个日本申请人，1个德国申请人。其中，发那科、格力电器的专利申请量超过1000项（见图11），数量远超其他申请人。我国机床产业专利前十位申请人的专利拥有量仅占全部专利的0.8%，专利集中度较美日德等发达国家有较大的差距。

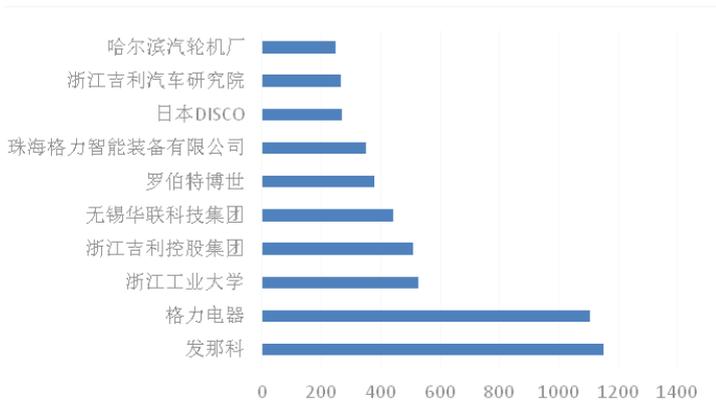


图11 2011-2020年中国机床产业前十位专利申请人

## 3. 国外在华机床专利保持平稳发展

随着我国机床行业的技术进步和专利保护工作的积极开展，各国均十分重视在华的专利布局。2011-2020年，机床行业国外在华专利申请量为1.4万项，年平均申请量在1300项专利左右，但由于我国国内机床专利申请量的快速增长，在华专利申请占全部专利的比重逐渐下滑。2015

年，机床行业在华专利申请占专利申请总量的2.6%，到2020年这一比重下降至0.6%。其中，日本、美国、德国在华专利申请量占在华专利申请总量的二分之一强。

2011-2020年，美日德三国在华机床专利申请总体呈现较为稳定的发展态势。日本每年申请量保持在300-400项左右，美国在200-300项左右，德国在100-200项左右（见图12）。日本的机床专利申请量累计达到4282项，专利申请数量远远高出美国和德国。

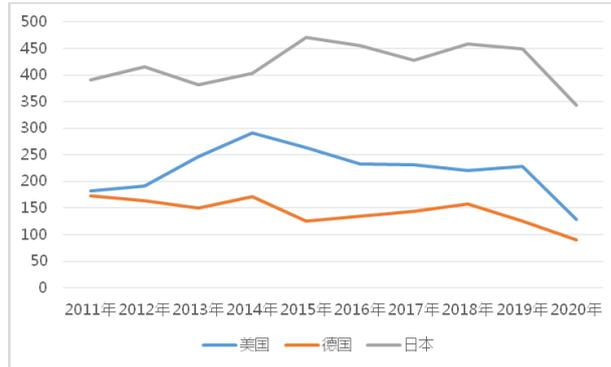


图12 2011-2020年美日德在华机床专利申请趋势

## 4. 磨床技术为近年来机床专利申请的重点领域

2011-2020年，中国机床专利前十位技术中有3个方向一直为产业关注的焦点，分别为：夹具，定位、支撑装置；机床附件；镗床、钻床及其相关设备。通过对比前后两个时间段的技术热点可以发现，磨削机床及其相关设备（B24B41）领域的专利技术在2016年以前未列入前十，而2016年后前十位的专利技术中有一半以上涉及磨床技术（见表4与表5），从一定程度说明其重要性大幅上升。此外，机床运送装置、上下料装置也是研发的重点领域。

表4 2011-2020年中国机床专利申请热点对比

2011-2015年	数量	2016-2020年	数量
B23Q3/06	2918	B24B41/06	6716
B23Q11/00	2588	B23Q3/06	4589
B23Q3/00	2116	B23Q11/00	4558
B23P11/00	2030	B24B41/00	3720
B23B41/06	1935	B24B47/12	3350
B23P19/00	1847	B24B27/00	3303
B23Q3/08	1529	B24B55/06	3143
B25F5/00	1433	B23P19/00	3052
B23P19/04	1405	B23Q3/08	2060
B23P21/00	1170	B23Q7/00	2035

（下转第82页）

# 我国机床产业集群发展的剖析与思考

机械工业信息研究院 胡端阳 牛江蓉 司建楠 李芳慧

经过多年发展，我国机床产业形成了以台州地区、广深地区、滕州地区为代表的产业集群，各个集群发展特色迥异，区域特点鲜明。本文重点阐述我国三大机床产业集群的发展现状，并在此基础上思考我国机床产业集聚发展存在的问题及发展路径。

## 一、台州地区——专精特新差异化发展

台州地区目前共有机床工具企业2000多家，初步形成了以温岭、玉环为主的中档数控机床产业集群，以温岭镇为主的工量具产业集群，以椒江、黄岩、路桥三区为主的机床附件产业集群的发展格局，围绕机床装备的完整产业链条已初步形成，机床产量占全国1/3，工量具占全国3/5以上，形涌现出以玉环市浙江海德曼智能装备股份有限公司、温岭市大众精密机械有限公司、台州市东部数控设备有限公司、台州北平机床有限公司为代表的机床制造企业，以浙江上优刀具有限公司、浙江甬岭数控刀具有限公司、台州市锐安硬质合金工具有限公司为代表的量具制造企业，以温岭市三和数控机床设备有限公司、温岭市华驰机械有限公司、温岭市宇海机电有限公司为代表的机床附件制造企业。

### 1. 坚持“专精特新”发展，形成特色优势。

经过多年发展，台州机床工具产业专业化特征已逐步形成，域内企业长期专注并深耕于产业链中某个环节或某类产品，能为大企业、大项目提供定制化产品，以及专业生产的成套产品，部分企业主导产品在国内细分行业中拥有较高的市场份额。如浙江海德曼提出“车床世家，车床

专家”发展战略，高端系列产品个别指标已实现对标德日；北平机床深耕磨床领域，在高端磨床制造领域自主创新取得较好成绩，已有超过2000台数控磨床服务于国内外刀具加工、机械制造、航空工业、IT等领域，并已成为山特维克集团（SANDVIK）、住友电气工业株式会社（SUMITUBE）、富士康科技集团（FOXCONN）、中国航空工业集团有限公司（AVIC）、株洲钻石切削刀具股份有限公司等著名企业的磨削设备和技术解决方案提供商；巨鑫机床有限公司专注于专用数控机床的研发制造，铣端面钻中心孔机床技术水平及市场占有率处在国内领先地位，成为西门子、德国SEW传动设备公司、日本精工株式会社（NSK）、中国第一汽车集团有限公司、东风汽车集团有限公司、上海汽车集团股份有限公司、广西玉柴动力股份有限公司、安徽江淮汽车集团股份有限公司等企业供应商。

### 2. 依托市场拉动，打造产业生态

台州是长三角地区先进制造业基地，是浙江制造的重要板块，拥有20多个产值超百亿元的产业集群，台州正在重点打造汽车及零部件、通用航空、模具与塑料、医药医化、智能马桶、缝制设备、泵与电机等七大千亿产业集群，为台州市机床工具产业的发展提供了巨大的市场运作空间。坚持“主动优选”，积极对接新能源汽车、航空航天、军民融合等战略性新兴产业，成功签约引进了重庆理想智造汽车有限公司、热刺激光产业项目、美戈利高端金属加工刀具项目等一批本地产业关联度高、带动力强的大企业、大项目，打造上下游配套拉动的产业生态。

### 3. 注重品牌塑造，提升产品品质

以入选工信部产业集群区域品牌建设试点为契机，积极开展区域品牌培育建设工作，制定品牌培育相关规划、方案，全面贯彻“企业技术创新→制定联盟标准→提升产品质量→实施贯标检测→使用集体商标→区域品牌价值提升”的品牌建设思路，组织企业申报工信部品牌培育示范企业，开展企业品牌培育系列培训；以温岭市机床工具行业协会为主导，联合机床工具企业制定高于国家标准和机械行业标准的温岭市机床装备标准和工量刀具标准联盟标准，全面提升该行业重点产品标准质量水平。

### 4. 构建创新平台，推动高质量发展

构建政产学研用联合攻关体系，建成台州温岭机电工程师协同创新中心、玉环机床研究设计院、温岭市高端机电及智能装备企业创新联盟、浙江工量刀具创新综合体和浙江省数控机床产业技术联盟等公共服务平台，集中攻克行业的一些关键共性技术。鼓励产业链上下游企业和清华大学、浙江大学、中国工程院、华中科技大学等高校及科研院所开展合作攻关，实现高层次人才和高成长性项目的同步孵化。

## 二、广深地区——全产业链协同发展

目前，广东省规模以上数控机床企业60多家，年产值约140亿元，形成了以广州为龙头，深圳、佛山（顺德）、中山、江门共同发展的数控机床重要生产基地。广深地区数控机床及其上下游产业链企业众多，由于区域经济发展相对超前，产业链上的企业大都极具活力，在数控系统、电主轴、导轨等关键核心部件以及机床整机方面，涌现出一批隐形冠军和领军企业，如广州数控设备有限公司、广州市昊志机电股份有限公司、广州市敏嘉制造技术有限公司、广东凯特精密机械有限公司等。

### 1. 紧贴市场，产品与用户紧密联系

珠三角拥有巨大的应用市场优势，包括电子信息、汽车、家电等一批万亿产业集群，机床需求旺盛，广东成为全国最大、竞争最激烈的机床市场，以敏嘉制造、广州数控、昊志机电、凯特精机等为代表的一批细分领域隐形冠军应运而生。广深地区数控机床领域基本都是民营企业，市场敏感度高，贴近用户需求，进而催生新产品、新技术。

### 2. 依托区域优势，提升产业竞争能力

广东省毗邻港澳，是我国改革开放的先行地，中国经

济实力最雄厚、市场化程度最高、开放型经济最活跃的地区之一，为广深地区机床发展所需的高端功能部件、元器件以及技术引进的提供了便利条件；得益于香港、新加坡等的中转优势，以及电子、家电等行业的发展，广深地区逐步成为中国数控系统发展最好的区域之一；广深地区是主轴、丝杠、导轨、刀架等需求最大的省份之一，产生了凯特精机、深圳爱贝科科技有限公司等一批优秀的企业；美国、欧洲、日本、韩国大量机械零部件在广深地区采购，遵照欧美标准和要求优化生产，提升了产品品质和企业竞争能力，培养了大批高素质人才；拥有大湾区工业博览会、深圳国际机械制造业展览会，吸引全球高端机床制造企业参展，同时吸收内地机床用户企业，形成了广深地区机床产业技术交流、交易平台。

### 3. 坚持创新，推动关键技术协同攻关

广东数控机床产业起步晚，缺乏核心技术积累。从全球来看，长期落后于发达国家，关键核心技术“卡脖子”问题仍然突出；从国内来看，受计划经济时期国内产业布局影响，早期国产机床“十八罗汉”无一落户广东，产业基础较为薄弱。以广州数控为代表的一批企业凭借自主创新逐步发展起来，1999年广州数控就成功研发GSK交流伺服驱动，填补了国内空白。在广东地方政府的大力支持下，广州数控、敏嘉制造、凯特精机等10家行业龙头企业作为发起单位，联合广东工业大学、华南理工大学等高等院校共同组建成立了广东高档数控机床及关键功能部件创新中心，面向行业创新发展重大共性需求、致力于推动产业链上下游企业协同研发及产业化转化。

### 4. 政策联动，政府大力支持产业发展

广东省成立专项，积极配套高档数控机床与机床制造装备专项。发布《广东省首台（套）重大技术装备推广应用指导目录》，数控机床产品明确在列，以加快推进首台（套）重大技术装备推广应用。出台《广东省培育高端装备制造战略性新兴产业集群行动计划（2021-2025年）》中，高档数控机床被列为重点培育的六大工程之首，明确面向汽车、电子信息、航空、家电、新能源等领域，重点推动机床整机及关键零部件研发及产业化，打造全国高档数控机床重要基地。

## 三、滕州地区——中小企业集聚发展

滕州机床产业起步于20世纪50年代，依托鲁南机床厂、鲁南水泵厂和滕州农机修造厂等企业，经过60多年的

发展,集聚了良好的产业基础及技术、人员和市场优势。滕州市是我国中小机床最大的集聚地,被评为全国唯一的“中国中小机床之都”。目前,滕州机床生产企业300多家,其中中小企业占比90%以上,从业人员近4万人。滕州机床涵盖金切、锻压等10大类、600余个品种,钻铣床产量占全国的80%以上,年产数控车床、数控钻铣床、车铣复合加工中心、数控锻压设备、柔性制造单元等各类机床10万余台(套),产值数控化率超过45%。

(1) 突出首位培育,打造区域大品牌。滕州市是我国中小机床最大的集聚地,市委市政府把培育以机床产业为主导的高端装备产业列为八大产业振兴首位产业进行重点扶持,提出了打造千亿元产业集群的发展目标,明确了建设高端中小数控机床基地的定位,编制了《滕州市装备制造(高端突破)产业发展规划》,规划建设了8平方公里的机械制造工业园和5.58平方公里墨子科创园,建成了全国唯一设在县级市的国家机床质量监督检验中心,先后被评为全国机床产业集群区域品牌建设试点地区、国家火炬计划中小机床特色产业基地、国家新型工业化产业示范基地(装备制造·机床)、全国机床工业引领高质量发展创新集聚区。

(2) 突出创新驱动,激活转型新动能。滕州设有国家中小企业公共服务示范平台,建成了滕州人才创新驱动中心;与北京航空航天大学、北京理工大学、华中科技大学、山东大学等国内20余家科研院所进行战略合作,成立了枣庄北航机床创新研究院、北理工鲁南研究院、国家高端制造装备协同创新中心滕州分中心、滕州华数智能制造研究院、山东枣科智能装备研究院等创新平台。目前,全产业已拥有高新技术企业22家、院士工作站4个,机床企业中建有省级技术中心11个、行业技术中心1个、设计中心2个、研究中心1个、工程实验室1个,全力打造国内领先的精密机床全链条研发及产业化基地。

(3) 突出配套完善,扩展发展新空间。目前,全市拥有机床底座、工作台、刀库、主轴等机床零部件配套企业50余家,基本做到不出滕州就能把所有的钻铣床、摇臂钻床零部件配齐;建成了威拓绿色高端耐磨铸造基地,补全数控机床基础件的关键短板,为滕州机床企业与国外先进企业同台竞技打下坚实基础。借助“好品山东”网络平台,建成线上“中国(滕州)机械机床产业集群馆”,为机床企业构建了线上展示平台。

#### 四、思考及启示

我国机床产业集群除广东广州、浙江台州、山东滕州

外,还有江浙宁波模具、江苏泰州特种机床、安徽博望刀具等,这些产业集群都是以民营企业为主,基于市场主导自然形成的,具有区域性、专业性的特点,但总体来说还处于起步阶段。

(1) 产业集群产生高端化萌芽,中低端锁定仍未破除。从产业组织结构上来说,我国机床产业集群仍以中低端通用型机床为主,存在过度重复、分散的现象,专业化分工、社会协作、系统配套、平台支撑长期锁定在低端,企业间竞争大于合作,在国际上缺乏话语权。无论是区域的产业基础、政产学研用的协同创新体系以及以“市场+政府+中介组织”通力合作的集群治理架构都在建立和完善过程中,政府、企业、科研院所、行业协会、投资机构等各类主体基于政策、资金、机制、平台等形成的完善的运行机制尚未完全建立。

(2) 把握产业集群形成机制,以及机床行业的发展特点和规律,切勿“好大喜功”和“拔苗助长”。机床产品作为加工工具,并不是以量取胜的产品,在成熟的机床市场,代表企业的特点是“专、精、特”,典型知名机床企业规模都不大,主流是小而精的企业。区域政府在培育和发展机床产业集群时,要根植于本区域的技术、人才、市场等要素资源,充分把握机床产业自身特点和发展规律,从专业化分工和市场细分中寻找机遇,避免单纯依靠“低价卖地”等措施来实现快速“筑巢引凤”“做大摊子”。

(3) 充分发挥龙头企业的带动效应,引导龙头企业整合重组制造资源。通过联合、并购、控股等方式,打造以龙头企业为中心的稳定的供应、生产、销售、服务等协作配套关系。依托龙头企业的实力将配套中小企业纳入供应链管理、质量管理、标准管理、合作研发等体系,从而提升整个产业集群的协作配套实力。

(4) 完善创新生态系统建设,加强支撑要素的培育。着眼产业新变化、新规律、新需求,强化研发力量、配套厂商聚集,主动融入现代新型机床产业链、创新链、生态链;打破科研高校、政府部门、企业组织、金融机构之间的信息壁垒,优化营商环境,强化政策引导,积极推动产学研一体化和产业成果转化,形成以市场为导向、以企业为根本性创新中心的有机体系,培育产业共性关键技术的研发、转化应用基地,加快形成转型提升发展的新动能,培育具有全球竞争力的机床产业创新、研发、制造、孵化、服务产业集群。□

# 在机测量技术在机匣精密尺寸加工中的应用

中国航发南方工业有限公司 胡志星 邓元山 冷红标 刘跃雄 叶才铭

【摘要】本文针对机匣结构复杂易变形，尺寸精度要求高，加工过程人为干预较多，质量不够稳定的加工难点，应用了数控卧式五轴车铣复合加工中心的在机测量技术，实时校准机床由热变形引起的几何误差，并将误差自动补偿至机匣的工件坐标系和刀补数据中，在精加工前自动测量更新机匣加工坐标系，减少加工精密尺寸时的影响因子；并应用在机测量技术测量机匣的精密尺寸实际值，系统自动计算测量的尺寸实际值与理论值偏差，根据偏差值设计自动补偿加工的程序，机床主轴刀具按偏差值对精密尺寸进行补偿加工，直至尺寸合格。在机测量技术的应用，提高了精密尺寸的加工稳定性和加工效率，为实现自动加工奠定基础。

## 一、概述

航空发动机生产具有多品种、小批量的特点，其机匣结构复杂，尺寸精度要求高，加工工序一般分散至相对简单的数控车、数控铣设备上，加工过程中精密尺寸难控制，加工过程中主要依靠操作人员手动测量判断其是否合格，根据测量结果在数控系统中输入刀具补偿值进行补偿加工，这种方式往往由于测量不准、或者刀补值输入错误等问题，造成尺寸加工不合格，质量风险大。如图1所示，机匣精密尺寸 $\phi 278.85^{+0.035}_{-0.01}$ 等公差较小，加工难度较大。

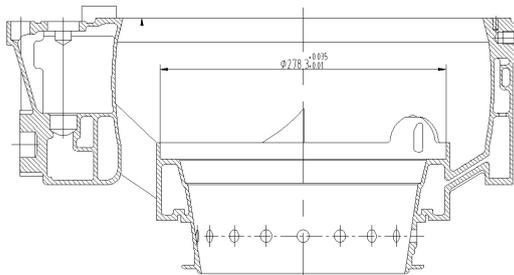


图1 机匣加工尺寸

随着五轴铣车复合加工中心的推广应用，机匣的加工工艺由原来的分散加工工艺向集中的加工工艺转变，精密尺寸的加工更加集中于某道工序一次加工完成，增大了精密尺寸的控制难度。如何用好这种先进设备具有的在机测量技术，实现对机匣尺寸和位置特征的测量，通过自动加工、

自动测量、自动补偿、再加工方式来有效的控制、提高精密尺寸的加工稳定性，减少加工过程中人为干预，是航空发动机制造技术实现自动化、智能化加工的关键基础技术，将为自动化、智能化产线的建设提供技术支撑<sup>1)</sup>。

## 二、在机测量的工作原理

以某数控卧式五轴铣车复合加工中心为应用研究的设备，该设备带有A、B旋转轴和车削功能，控制系统为SIEMENS 840D SL系统。设备自带在机测量系统，由测量软件和硬件装置组成，其工作原理如图2所示。

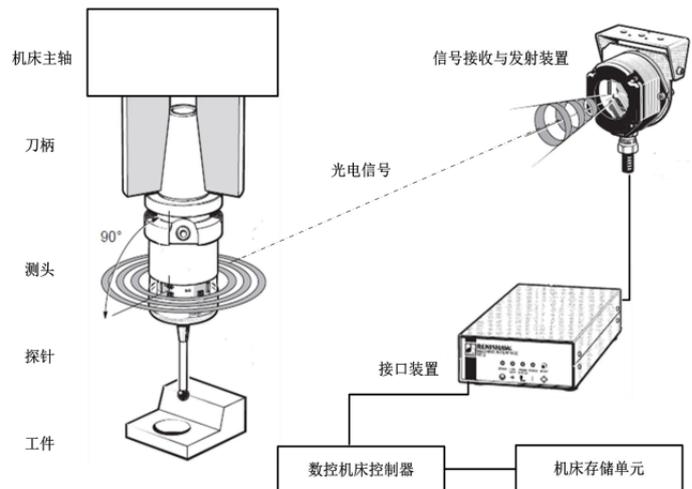


图2 在机测量的工作原理

在线测量系统硬件组成主要包括测头、探针、信号收发装置和接口单元等，还包括机床的整个本体、运动控制单元、存储单元等，软件包括测量循环程序和机床操作系统。数控系统控制器读取存储单元中的测量代码，驱动机床主轴运动，当测头移动到测量程序指定的范围内，开始调用测量循环，测头缓慢向工件表面移动，探针尖端的测球与工件表面碰撞接触，当测杆发生的位移值或者接触力达到设定值，测头内部的机械装置或者力传感器被触发，测头通过红外线、无线电或者电缆连接的电信号传给信号收发装置，并转给接口装置，中转装置将信号传给机床控制器，机床迅速停止进给，记录坐标信息并保存在机床存储单元，测头离开工件表面，进行下一个点的测量。

### 三、在机测量技术应用的方案

影响精密尺寸加工精度的影响因子较多，包括机床精度、找正精度、加工测量的精度等，只有不断的减少或消除影响因子对精密尺寸加工的影响，才能保证精密尺寸加工的稳定性。首先利用在机测量功能编制机床热误差自动补偿程序，来消除由于机床热误差引起对精密尺寸加工的影响；精密尺寸加工前应确保零件工件坐标系设置准确，因此，精密尺寸加工前，需利用在机测量系统找正校准零件的工件坐标系。在保证实时监测、调整机床精度和零件加工坐标位置精度的前提下，开展对精密尺寸在机测量自动补偿加工。

#### 1. 基于在机测量的机床误差校准

数控机床由于受自身结构与工作温度、环境温度影响，其几何精度存在细微变化，在工作中早晚8小时内由于机床床身温度和环境稳定的变化，机床的几何精度一般可产生0.02mm-0.04mm的热变形误差，主要影响Y轴位置精度，这种变形量对精密尺寸加工的控制影响较大。

建立基于在机测量误差补偿消除机床由于温度而引起的Y轴方向误差，设计自动测量补偿程序，基本流程如下图3所示：在零件每道加工工序的夹具上设置一个可测量的参考基准平面，先测量出基准面的实际值Y值，当加工到精密尺寸前，在线测量系统先将测头进行精度校准，再测量夹具基准支靠面的实际值，预先设置好基准平面Y值的允许变化误差值范围，一般设置为 $\pm 0.02\text{mm}$ ，当超过此范围，测量数据存在异常，需要停机进行分析原因。如果误差差值在预先设定的范围内，说明测量数据无异常，将精加工前测量的Y值自动补偿加工坐标系，消除Y轴误差。

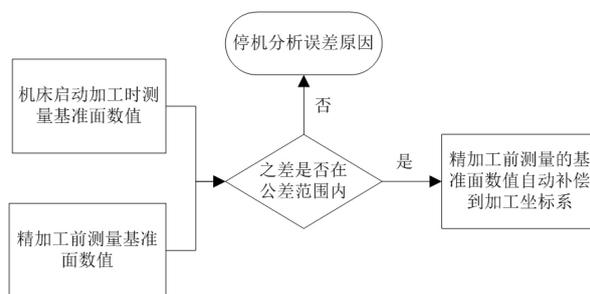


图3 机床误差校准流程图

#### 2. 基于在机测量机匣加工找正

机匣精密尺寸加工一般分为粗、半精、精加工工步，粗加工去除大余量，机匣受到的切削力较大，易发生细微位置移动，因此，在精加工前需要重新校准工件坐标系。

机匣加工坐标系的找正流程如图4所示，粗加工前利用在线测量系统找正零件角向、中心和支靠面并设置机匣加工工件坐标系；粗加工完成后，自动冲洗干净零件和夹具，再利用在线测量系统重新找正校准零件角向、中心和支靠面，并设置粗加工测量坐标值与精加工坐标值的允许变化范围值，当超过设定公差值时，系统会自动报警，以此提示测量数据可能存在异常，需进一步分析确认测量数据，方可继续加工。如在误差范围内，精加工在机测量加工坐标系值替换粗加工在机测量的加工坐标系。

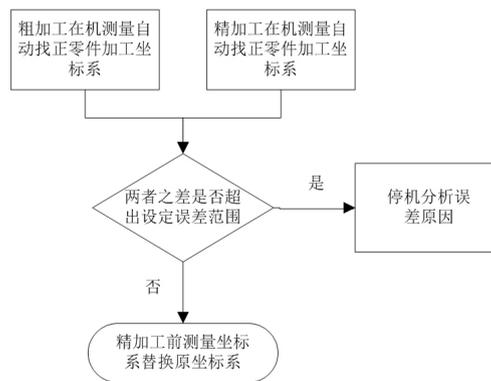


图4 机匣加工坐标系找正流程图

#### 3. 精密尺寸的在机测量自动补偿控制方案

精密尺寸的在机自动测量补偿方案的流程如图5所示，先编制在机测量的自动测量补偿的子程序，机床自动执行测量子程序，先校准测头，再对机匣进行留余量精加工后利用在机测量功能直接测量留余量的精加工尺寸，并根据目标理论值和实际偏差值的差异进行自动补偿调整刀补值，再将零件精加工到尺寸；完成加工后，测头再测量机匣尺寸，自动判断尺寸是否加工合格，如果不合格，测量系统自动补偿再加工，直至尺寸加工合格；每次测量结果，可通过编制程序设置在操作界面窗口上显示测量的实

际值和相关信息，便于操作者观察，也可以用文本方式保存在机床存储器中，便于后续查看、分析、汇总。

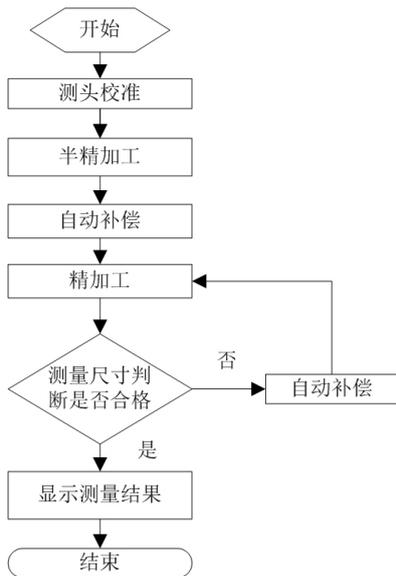


图5 自动补偿流程图

#### 四、基于在机测量在机匣精密尺寸加工中的应用

选择机匣精密尺寸  $\phi 278.85^{+0.035}_{+0.01}$ ，为在机测量补偿加工的应用点，机匣精加工前需要消除Y轴方向的热误差，对夹具支靠面进行测量，如图6所示，以夹具支靠面为Y方向基准，测量前先对测头进行校准，选择测头校准的子程序CALIB\_TAST指令，系统

对其自动校准，再测量图示中夹具支靠面。

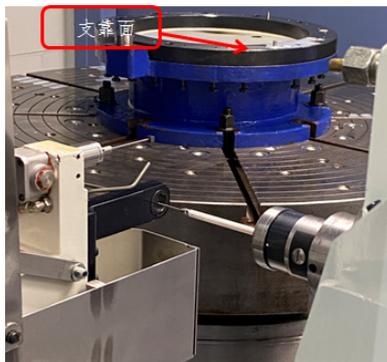


图6 夹具支靠面测量

机匣加工前测量支靠面Y值，存入机床存储器中，精加工前，再使用测量系统测量支靠面的Y方向值，存入机床存储器中，在系统中设置基准Y方向加工前后两次测量的差值在  $\pm 0.02\text{mm}$  范围内。如果差值在  $\pm 0.02\text{mm}$  的范围内，说明机匣加工坐标系的误差在正常范围内，则将精加工前测量支靠面的Y值写入加工坐标系，更新Y值。如果超过  $\pm 0.02\text{mm}$ ，机床自动暂停，检查核对机匣加工是否出现异常问题。

在机床热误差消除后，机匣精加工前还需要重新找正零件中心、角向坐标，先校准测头，使用测头测量零件中心坐标 (X,Z方向数值)，并重新测量机匣的角向，如图7所示，在

系统中设置粗加工前和精加工前找正的中心坐标差值、角向坐标差值不大于0.05，如果差值在范围内，则将第二次测量的坐标值写入坐标系，更新坐标值；如果差值大于0.05，机床自动暂停，需要检查核对加工过程是否符合要求。



图7 机匣中心和角向测量

由于  $\phi 278.85^{+0.035}_{+0.01}$  尺寸公差小，直接车削到尺寸公差范围内，容易超差，超差后使用测量补偿已经没有作用，因此，精加工该尺寸前直径方向预留0.1mm的加工余量进行半精加工，半精加工完成后，测量系统对内孔进行测量，按照在机测量的技术方案，编制在机测量自动补偿程序，如附表所示。

#### 测量补偿程序

```

;(T9999 TAST)
N01 T9999    测头调用
N03 M6
N05 MCM_MILL
N07 STOPRE
N09 CALIB_TAST ;测头校准
N11 STOPRE
N13 G57D1
N15 G0 A-90 B=DC(0)
N17 TRAORI(2)
N19 FFWON
N21 CYCLE800(0,"TC1",220000,54,0,0,0,0,-90,0,0,0,0,0,,1)
N23 STOPRE
N25 G00G90G57G64X0B0S10M3
N27 G0Z100
N29 Y0
N31 G01Z-7F3000
N33 CYCLE150(11,1001,"LJ136750CL_RESULTT.TXT") 测量结果保存与显示
  
```

```

N35 CYCLE977(101,4,,1,77,,10,1,0,1,1,,1,,"",,0,1.01,1.01,-1.01,0.34,1,0,,1,1) 工件中心找正校准
N37 STOPRE
N39 G0X0Y0
N41 Z200
N43 SAVE_DR(4)读取工件中心数据写入更新零点设置子程序
N45 STOPRE
N47 R330=0 R331=0 R332=0 R333=0 R334=0 R335=0 R336=0 机床R参数变量数值清零
N49 STOPRE
N51 G0G57Z200
N53 G0X-71Y0
N55 G0Z10
N57 G01Z-14.2F1000
N59 CYCLE979(1002,,1,101.835,10,0.5,0,0,181,60,1,,"",,0,1.01,,,,,1,1)孔径测量
N61 STOPRE
N63 R330=ROUND(_OVR[16]*10000)/10000 孔径实际偏差值写入R参数
N65 R331=R330/2 转换为半径偏差值
N67 STOPRE
N69 M01
N71 M62
;( T1 D1 LFINISH OD ROUGH RIGHT - 80 DEG. )
N73 T506 车刀
N75 M6
N77 T23
N79 STOPRE
N81 M01
;#END#*NCG;*RO*;*HD*
N83 STOPRE
N85 STOPRE
N87 G55
N89 MCM_TURN(1,-90,0)
N91 R332=$TC_DP12[30000,1] ;(Z)读取原有长度磨损值
N93 R333=$TC_DP13[30000,1]+R331 ;(X)原有半径磨损值+测量实际偏差值
N95 STOPRE
N97 MODIF_D(R332,R333,0)建立新的刀补偿, 确保加工尺寸
N99 STOPRE

```

在测量精密尺寸  $\phi 278.85^{+0.035}_{+0.01}$  前, 先对测头进行标定校准, 校准完成后, 测头按程序自动对尺寸  $\phi 278.85^{+0.035}_{+0.01}$  进行测量, 测量的内孔实际偏差值存至程序设置的机床系统变量中。由于测量得到的是内孔的直径值, 系统按程序设置并将偏差值转换为半径的偏差值写入另一变量中。再根据偏差值建立新的刀具刀补偿, 原长度方向刀补偿不变, 直径方向的刀补偿如下公式计算得到:

直径方向的刀补偿=原半径磨损值+测量实际半径偏差值。

最新的西门子系统中的测量补偿功能可以直接在CYCLE979指令中自动进行补偿, 不需要通过测量直径转换成新的直径方向的刀补偿。系统自动按照新刀补偿更新刀补偿

息, 刀具自动按照内孔测量的剩余余量进行精加工, 将孔径加工到合格尺寸范围内, 加工完测头自动对孔径进行测量, 系统自动判断测量值是否在精密尺寸  $\phi 278.85^{+0.035}_{+0.01}$  范围内, 如不在该精密尺寸的公差范围内, 再循环进行自动补偿加工直至合格, 如在此公差范围内, 机床再自动执行后续程序。

## 五、总结

通过在机匣精密尺寸加工过程中应用在机测量技术, 消除机床运行过程中Y向误差、系统自动找正并更新机匣加工坐标系, 自动测量补偿精密尺寸, 提高了精密尺寸加工质量稳定和加工效率, 具体表现在以下方面:

(1) 机匣精密尺寸一次加工合

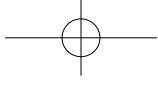
格率由原来的92%达100%。

(2) 加工效率显著提高, 传统用杠杆千分表找正和手工测量调整加工需2小时以上, 利用机内测量自动补偿加工仅需20分钟, 效率提高5倍以上, 同时省去零件原粗加工后计量等待、调整加工的时间。

(3) 有效避免了人为对加工坐标值与刀补数据的调整、计算、输入错误等低级性质量问题的发生。

(4) 使用测头自动找正替代手工找正, 有效预防零件磕碰伤, 减少了零件的装夹次数。

在机测量技术在机匣加工中的实际应用, 减少了加工过程中的人为干预, 提高了加工稳定性, 为自动化技术的发展奠定了基础, 使数控加工进入了一个新的发展阶段。□



# 基于高速电主轴的实时振动监测技术应用

通用技术集团大连机床有限责任公司 吴慧敏 周吉贞 董建军

【摘要】针对高速电主轴开发过程中存在的振动问题，开发了实时振动监测系统。通过对高速电主轴进行瞬态响应测试对比、以及切削工况试验验证，有效地证明了该振动测试模块的准确性，可以应用于实际加工监测，为后续智能化高速电主轴的批量生产提供了技术支持。

高速精密机床的核心部件为高速电主轴，高速电主轴的技术参数很大程度上影响着工件的加工精度。因此保证高速电主轴持续稳定的运行是非常必要的。

振动是高速电主轴的重要动态参数，根据资料显示，即使是精度极高、经过良好静平衡的主轴，也会存在制造、磨损、负载冲击、工件装夹等多种原因破坏原有平衡。一般情况下，电主轴故障的90%可以从振动测量中检测出来，因此具备高精度的振动监测技术是电主轴设计、制造及使用的关键。

高速电主轴的振动监测模块可以在主轴正常运行过程中，实时监测转子振动，排查结构故障，还可以设定报警加速度值，监测到速度超差后直接停止运转，保护电主轴结构件由于振动引起的损坏。

## 一、高速电主轴振动故障信号分析

### 1. 振动信号幅域RMS值分析

在实际工程应用中的机械振动信号，常由周期信号和随机信号混杂而成。因此，在进行机械振动检测和故障诊断分析时，合理选择随机信号参数是不可或缺的部分。有效值即均方根值（RMS）直接反应振动信号的能量大小、稳定性及重复性，是鉴别电主轴运转状态是否正常的重要指标，通过比较AMS机械健康分析仪测得的测点振动速度RMS值，可判断电主轴是否适合正常工作运转，如果较差

则需要进行后续的故障诊断。

### 2. 振动信号时域分析

时域波形是最便捷、最直观、最利于理解的振动信号表现形式，是最原始的振动信息源，包含了丰富的信息。对于某些故障信号，时域波形具有明显的特征，可直接观察其周期信号、谐波信号、短脉冲等信号，就能对设备运行状态做出初步判断。诸如电主轴转子严重不平衡时，时域波形中有明显的以旋转频率为特征的周期成分；若波形中出现“削顶现象”，表示铣头主轴可能存在碰磨故障等。但对于某些复杂关联故障形式，波形紊乱，周期性差，难以与故障特征信号建立对应关系，需将时域信号转化至频域信号，对铣头电主轴的故障进行准确性分析。

### 3. 振动信号频域分析

频域分析是基于频谱分析方法，把复杂的时域信号经快速傅里叶变换（FFT）分解为若干单一的谐波分量叠加，同时体现出各频率分量的幅值、相位、功率及能量与频率的关系，能对电主轴的运行状态做出评价，并准确而有效地诊断故障和对故障进行准确定位，是机械设备振动故障监测与诊断中最常用和最适用的分析方法。

## 二、振动监测模块技术原理

振动监测模块系统是智能化电主轴的核心，搭载振动监测模块的试验平台原理框图如图1所示。

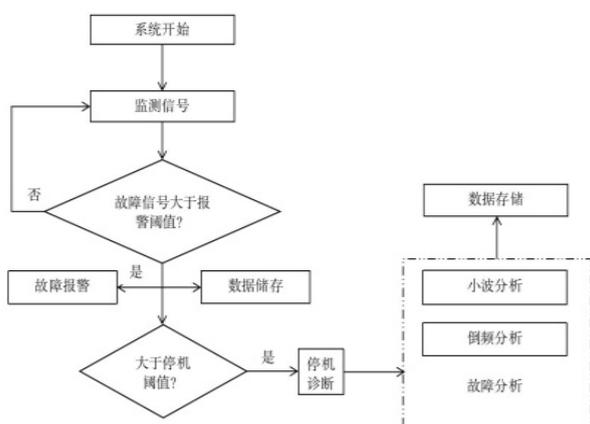


图1 搭载振动监测模块的系统程序框图

通过在电主轴壳体中前轴承附近安装一个加速度传感器，基于MEMS技术的三维加速度计通过该传感器可以记录所有三个移动轴（X,Y,Z）的加速度值，从而能够有针对性地改进加工过程。所有的故障时间，特别是主轴发生损毁时可以再现主轴的工况，以便进行分析并找出原因。

同时，在过程监控系统中可由用户设定一个g极限值，当振动超过此值时，系统报警和自动停机。系统还可以将某一时段的振动记录下来，以便进一步分析。定期记录的数据包括：日期、时间、g值、g极限值、主轴转速、刀具号、进给速率、数控程序块号和程序名。可记录程序块的容量为18000条，如果取时间间隔为2.5s，可记录加工过程状态长达12.5h。

### 三、振动监测模块测试验证

#### 1. 振动瞬态响应试验目的

将试验电主轴固定在试验平台上，通过在电主轴壳体中前轴承附近安装一个加速度传感器，基于MEMS技术的三维加速度计通过该传感器可以记录所有三个移动轴（X,Y,Z）的加速度值，从而能够有针对性地改进加工过程。所有的故障时间，特别是主轴发生损毁时可以再现主轴的工况，以便进行分析并找出原因。

同时，在过程监控系统中可由用户设定一个g极限值，当振动超过此值时，系统报警和自动停机。下面进行测试。按模态试验测量的20000r/min数据进行该模块的测试验证。

#### 2. 振动瞬态响应试验方法

瞬态响应试验以模态试验为基础。模态试验是为了确定振动系统的模态参数所进行的振动试验，包括系统固有频率、阻尼比和振型等。通过对给定激励的系统进行测量，得到响应信号，再利用模态参数辨识方法得到系统的

模态参数。

本次试验装置有：高速电主轴、高弹性聚能锤、力传感器、加速度传感器、DASP十六通道并行数据采集仪、INV信号调理器，多线束。

该次试验采用多点激励多点响应法，即MIMO法。测点位置均匀分布，避开重要模态的振型节点。根据电主轴结构计算得到，可以在电主轴的圆柱面上均匀布置16个响应点。结合实际采用分步测量方法，每次布置两个三向加速度传感器，每个点敲击3次，获得响应后再继续敲击其他各点。

试验仪器与试验台如图2所示。

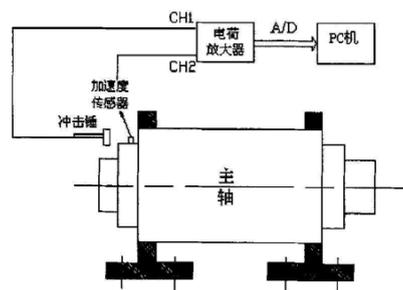


图2 高速电主轴瞬态响应试验系统

### 3. 振动模态试验验证结果对比

在实际测量时，由于电主轴转速是由变频器控制的，因此电主轴转速和频率成正比关系，为 $n=60f/P$ ，其中n为电主轴同步转速，f为变频器输出频率，P为驱动电极对数。被测电主轴的电极对数为1，可知20000r/min的电主轴单元工作频率约为334Hz，下面通过振动模态试验验证。

测试系统搭建完毕后进行电主轴的瞬态响应测试，结果如图3所示。以20000r/min为研究对象，得到如图4、图5所示的双向功率谱。

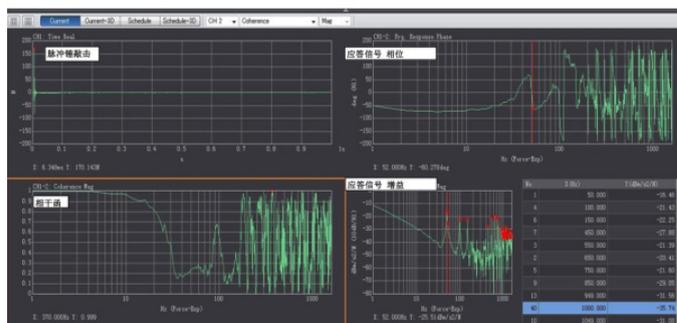


图3 主轴瞬态响应试验结果

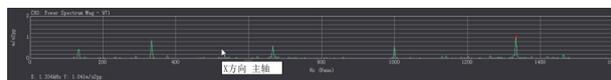


图4 X方向功率谱



图5 Y方向功率谱

根据瞬态响应测试结果可知该电主轴Y向在20000r/min转速下存在振动幅值较大，符合预期的分析。

电主轴转速20000r/min时，系统监测图如图6所示。与瞬态实验效果图Y方向功率谱对比，可见基本一致，验证了该振动监测模块实时采集的准确性。说明根据此监测系统可以在电主轴运行时进行故障监测。

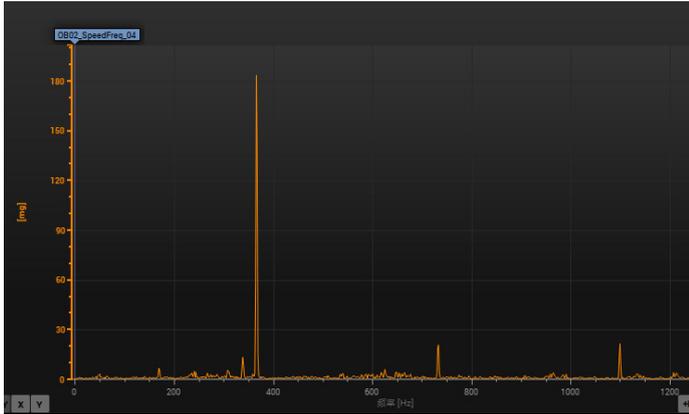
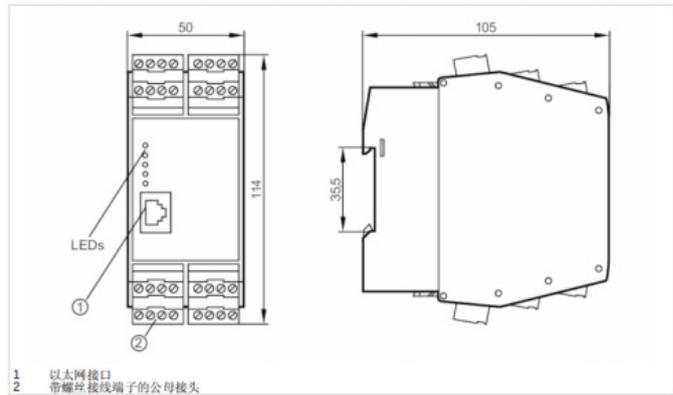


图6 加速度为0.8g时20000r/min监测图像



产品特征	
频率范围	[Hz] 0..12000
应用	
设计	通过PC软件参数设定 VES004
应用	计数器功能
电气数据	
工作电压公差	[%] 20
工作电压	[V] 24 DC; (如果使用IEPE输入: 24 V + 20%; IEPE = 集成电子压电)
电流损耗	[mA] 200; (24 V)
防护等级	III
总的输入/输出	
输入和输出总数	8; (可配置)
输入和输出总数	数字输入数: 8; 模拟量输入数: 2; 数字输出数量: 2; 模拟输出数量: 1

图8 振动监测模块接口及技术参数

## 四、切削试验应用验证

### 1. 振动监测模块应用机床

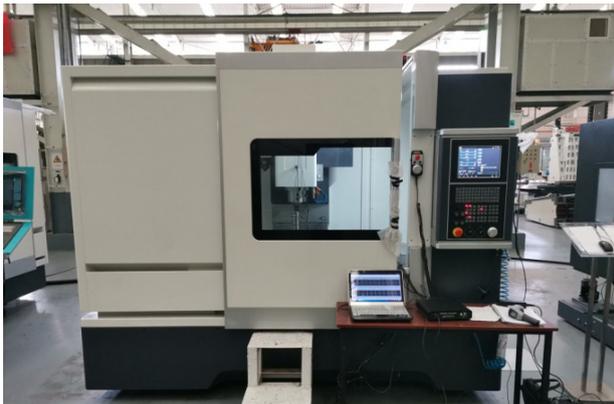


图7 高速电主轴应用机床

将配置该模块的高速电主轴应用于某型号机床见图7，电主轴技术参数见表1。振动监测模块相关参数见图8。

表1 高速电主轴技术参数

项目	单位	规格参数
主轴最高转速	r/min	20000
主轴锥孔		BT40
主轴轴承润滑方式		高速润滑脂
主轴功率（额定/最大）	kW	11/15
主轴输出扭矩（额定/最大）	N·m	70/94.5

### 2. 切削应用验证

在机床主轴恒功率调速范围内，选择一适当的主轴转速，使用铣削的方式进行试验。改变进给速度或切削深度，使机床达到主电机的最大功率。试验时机床各部分工作应正常、可靠，无明显颤振现象。

下面对开发的振动监测模块进行测试验证。将极限值设置为0.5g时，由于设置值非常小，因此系统自动报警，机床系统停机，开机后报警信息如图9所示。说明该功能可正常使用。

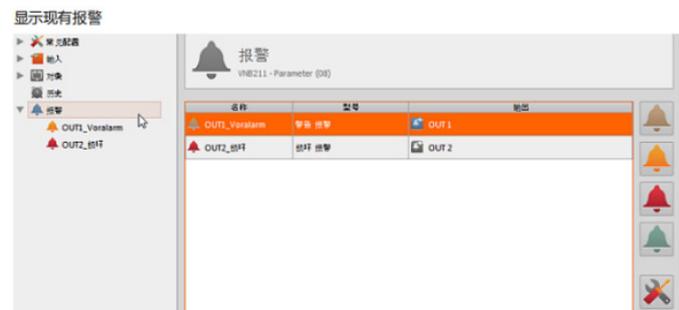


图9 加速度为0.5g时系统报警正常

下面将报警极限值设置0.8g，进行切削试验。测试监测功能是否能正常按照需求进行。选用 $\phi 12$ 铣刀进行合金钢件切削对比。切削参数为主轴转速2100r/min，进给速度2000 mm/min。第一次外圆切削，开启振动监测模块，可以监测到切削过程的加速度值。切削时监测到进给速度为2000mm/min时的加速度变化趋势见图10。

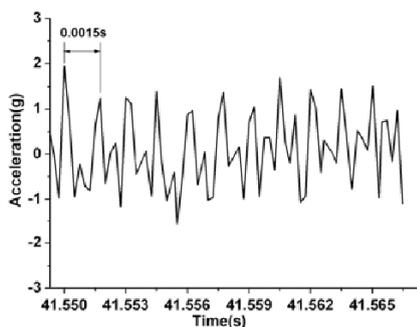
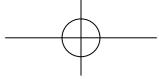


图10 进给速度为2000mm/min的加速度变化趋势

可以看到，由于加工过程中的振动主要由铣刀铣削时的铣削力引起的，而且加工过程中的振动主要是受迫振动，所以加速度的变化具有以下规律：高峰-低峰-高峰-低峰。而且经过分析，相邻两加速度高峰之间的时间间隔约为1.5ms，这与计算得到的刀齿通过周期（ $\tau = 60/(N*n) = 0.0015s$ ）一致，说明振动监测模块正常运行。

经过切削，首次切削样件如图11所示，振动纹路明显，由于电主轴振动监测结果正常，故对机床系统做了进一步相关参数的优化，再次切削样件如图12所示，各象限点目测接刀痕非常不明显，无触感。拍照已经拍不出来。加工效果对比之前很好。



图11 优化前样件示意图

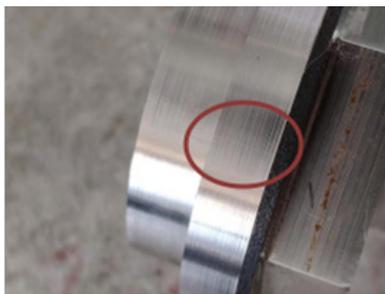


图12 优化后样件示意图

根据切削验证试验可以看出，振动监测模块的双重作用。一是可以设定故障加速度值，有效预防和减少机床电主轴故障的发生。只要加速度超过限制值，就进行报警停机，保护机床性能。二是高速切削时，若存在切削振动现象，可以进行适当调节机床系统加速度相关参数，以保证良好的加工效果。

## 五、小结

高速铣削加工过程中的振动会降低工件加工表面的质量，影响加工的精度，并缩短刀具乃至机床的使用寿命。振动的大小会随着切削参数改变而改变。由于电主轴的结构及零部件设计加工、安装调试、维护检修等方面的原因和运行操作方面的失误，使得电主轴在运行过程中会引起振动。其振动类型可分为径向振动、轴向振动和扭转振动，其中过大的径向振动往往是造成电主轴损坏的主要原因，也是状态监测的主要参数和进行故障诊断的主要依据。

通过瞬态响应试验、功率谱试验及切削验证试验对比，验证了本公司开发的振动监测模块的准确性。应用该模块不仅可以有效快速进行高速电主轴运行工况的监测和故障分析与预测，同时可以在高速高精密切削工况下，调整加速度值或优化相关伺服参数，减小振动，保证加工工件的质量。因此此项技术是可以推广的，为后续智能化高速电主轴批量生产提供了技术支持。□

## 资讯

### 沃尔德欧洲子公司正式成立

经过紧锣密鼓的筹备，沃尔德首个海外子公司——Worldia Europe GmbH（沃尔德欧洲有限公司），已于今年上半年入驻办公地点。



沃尔德欧洲子公司位于德国斯图加特附近的黑伦贝格，以德国为中心，辐射欧洲其他国家及地区，围绕超硬刀具为业务核心，开展营销推广活动和本地化技术服务；同时，还建立有仓储中心，便于快速响应客户需求，提供及时、高效的服务。

公司分别聘任业内知名的德国专家和高管加入团队。未来，沃尔德欧洲有限公司会继续扩大沃尔德刀具业务在欧洲市场的份额，进一步拓宽沃尔德的海外业务与盈利空间，更进一步的贴近客户需求，为海外客户提供更优质的服务，实现沃尔德全球化的快速发展目标。

# 新型“数字万分表”助力机床装配水平的提高

雷尼绍公司 周汉辉 孙常建

【摘要】随着数字制造技术的不断普及，机器装配阶段的升级换代也自然提到当今制造业管理者的议事日程。雷尼绍XK10激光校准仪的推出，就是为满足机床行业发展的现实需要。俗称“数字万分表”的XK10激光校准仪，通过非接触的激光测量技术，读数分辨率达到万分之一毫米，一套设备完美取代传统的千分表、平尺方箱、自准直仪和各种芯棒等实物测量基准等多种装备，使用方便快捷，解决了长久以来传统机器装配工艺中主要依赖人工操作记录数据的问题，实现可溯源的装配工艺，数据报告可以自动生成并可存储归档。

## 1.背景

传统的机器导轨装配采用的基准大致分为两大类，一是如百分表+平尺或角尺等直接测量法，另一类如水平仪或自准直仪等通过测量角度及其对应桥板来计算转换得到直线度的间接测量法。

(1) 直接测量法的优点主要体现在读数比较直观，对导轨全长各测量点间测量步距不必过多追求完全准确，手工装调导轨时直线度读数与步距关联性不大；但随着装配机器精度的提高，需装配的机器导轨长度也不断加长，由于大尺寸高精度大理石或金属平尺制造困难，使用搬运及日常精度维护也是一个痛点，采用百分表/千分表+大理石方案的缺点逐步成为高精度大行程机器装配的掣肘。当需要将导轨精度或分辨率调试到亚微米水平时，这类实物基准就不够用了。

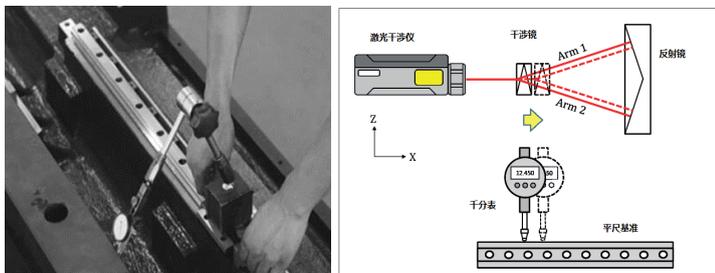


图1 传统百分表+大理石及激光干涉仪测量直线度

而采用传统单光束激光干涉仪时，测量过程中光路不

得遮挡，测量前需要对三个部件进行光路准直，而且水平面直线度和垂直面直线度需要分别测量。

(2) 间接测量法是采用沿被测导轨逐步移动装有角度仪器的桥板来分步测量角度，必须等整个导轨都测量完成后，再通过测量每步桥板的角度及桥板长度来计算每步桥板的首尾高度差。

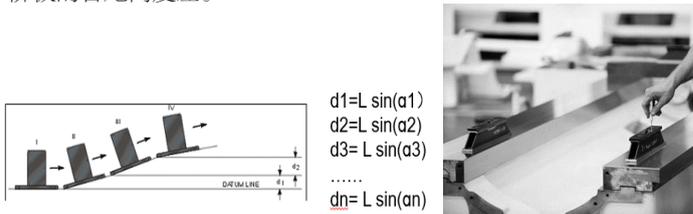


图2 角度测量转直线度原理示意图

该类方法由于直接测量的是角度，如果出现相邻两步正好处于接缝，在接缝两端有高低差，但接缝两端角度相似，角度换算成直线度相同而反映不出该接缝问题。

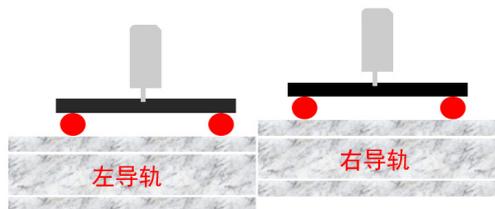


图3 角度测量转直线度方法无法测量导轨接缝变化的示意图

又如当间接测量时所推桥板没有首尾搭接时，测量角度转换成的直线度在某些场合与真实的导轨直线度有较大

的不同。

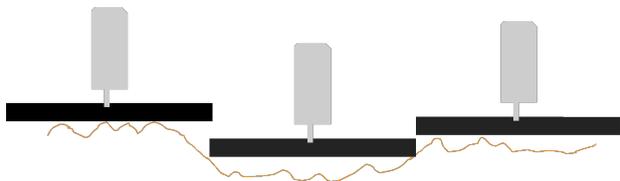


图4 角度转直线度的间接测量方法，在某些操作下有可能反映不出真实的直线度误差

角度测量转直线度时，如果桥板与导轨接触不是按步距在首尾端接触，某些情况下桥板中间部位与导轨接触，在相邻测量点角度变化反映不出来，直线度误差也就被掩盖了。

当直接采用滑块作为桥板时，由于滑块中心的滚珠与导轨都是接触的，用滑块作为桥板来逐步测量直线度时，许多场合会出现图3所示的情况，非滑块首尾与导轨相接触。相邻滑块一般也无搭接，当相邻步距角度相同时，角度转直线度无法体现真实的直线度平移。

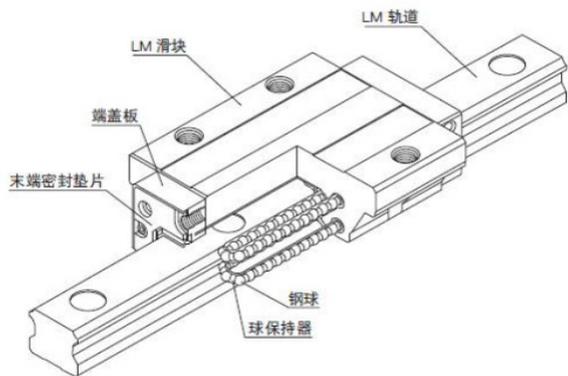


图5 滑块中心是滚珠与导轨保持接触示意图

如果还想采用滑块作为桥板通过准直仪或水平仪等间接测量原理来得到准确测量结果，则建议将相邻两滑块用一铁板拧在一起作为一个整体桥板并按两滑块间距作为测量步距来完成测量。如图5所示就可以。

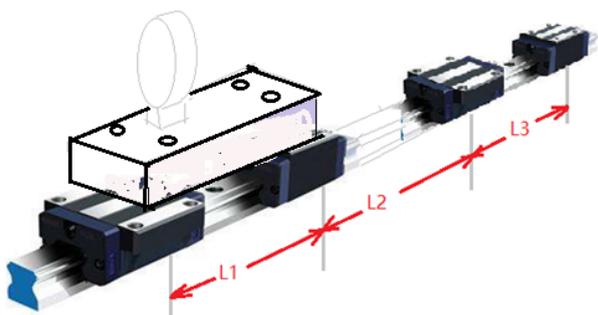


图6 两相邻滑块作为桥板示意图

(3) 本文介绍的新型“数字万分表”的方法是采用激光束作为基准配合激光接收器作为“数字万分表”来弥补

传统方法分辨率不够高、测量长度受到实物基准不够长的限制的问题；属于直接测量法中的一种，它既解决了间接测量法在许多场合的精度得不到保证的问题，同时具有特殊意义的是采用“数字万分表”可以存储并给出装配过程中检测报告，将装配现场的传统人工读数改变为自动数字记录并给出计量报告。

XK10主要应用对象涵盖以下领域：平台部件加工厂，大型铸件加工厂，机床组装生产厂，机床用户及直线导轨安装现场，

## 2.XK10数字万分表工作原理及功能

全新XK10激光校准仪，用于在机床装配与校直过程中取代实物标准器。XK10可以安装在直线导轨上，确保导轨的直线度、垂直度、平面度和机器调平，以及评估机器旋转部件的主轴方向和同轴度。借助XK10的实时显示功能，用户在机器装配过程中便可对这些误差进行测量和校直。XK10还是一款功能强大的诊断工具，用于在发生碰撞后或者对机器进行定期维护期间识别误差源。

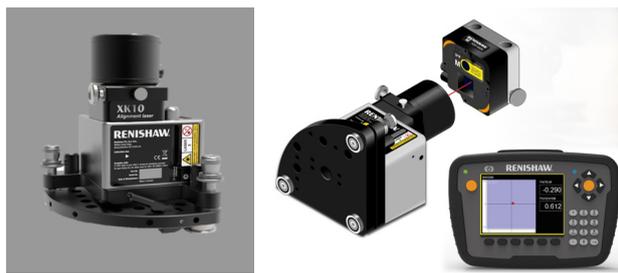


图7 作为数字万分表的XK10激光校准仪

该激光校准仪采用的是高分辨率、高精度的PSD位移传感器，在测量间隔中是允许激光光路被阻挡；激光光路准直是激光发射器和接收器两点间准直，操作简单、快捷。

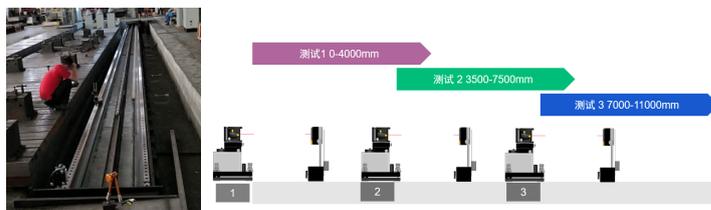


图8 分段测试拼接数据功能

全新配套软件具备直线度长距离分段测量再拼接成整体数据的功能，该拼接功能可以应用在某些长导轨直线度测试上，因环境（空气扰动或机械振动）造成长距离读数稳定性较差时，可分成几段读数均为稳定的情况下测试几段数据，最后拼接成整体的长导轨直线度数据。经过多次现场实际验证，在正确操作的情况下，拼接数据结果与一次性直接测量的结果相差大约在2%~5%，但成功解决了

大型机床长距离直线度无法测量的问题。

主要功能解释如下：

(1) 直线度测量

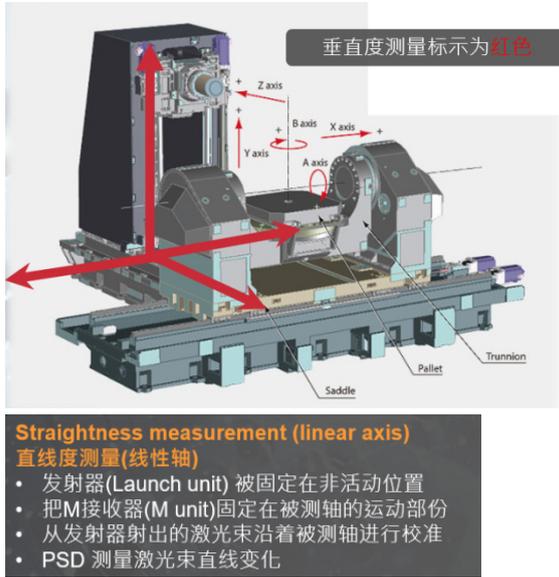


图9 直线度应用示意图及测量步骤简要说明



图10 直线度测量时XK10的部件安装示意及测量现场实例照片

XK10的测量范围长达30m, 可测量和校正机器部件的几何量误差以及旋转部件的轴心准直误差。由于替代了诸如花岗岩方箱和测试棒等标准器的功能, XK10在提升测试范围的同时, 还显著降低了标准器送检及携带外出的运输成本。这一模块化系统(XK10) 可以方便地安装在机器导轨上, 加快了对机器的设定和测量速度。

XK10的软件界面设计直观, 操作人员很快就能熟练使用。XK10可电子化记录机器装配阶段的数据, 生成溯源至国际标准的测量报告, 允许用户将测量数据和报告导出或直接在显示器上查看。

(2) 垂直度测量

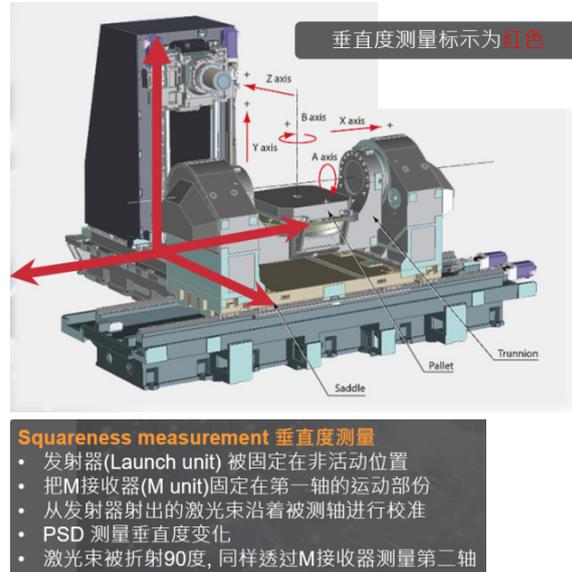


图11 垂直度应用示意图及测量步骤简要说明

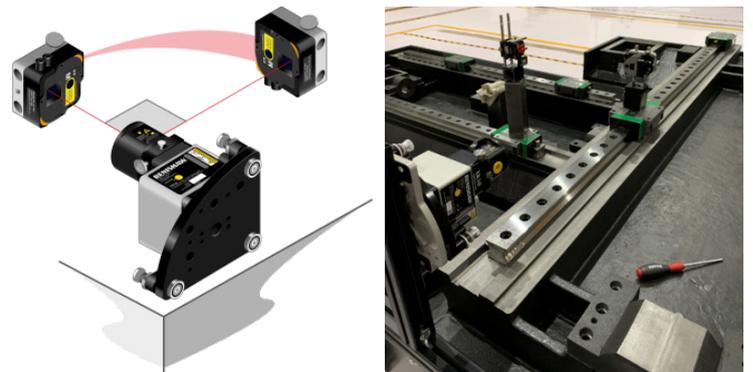


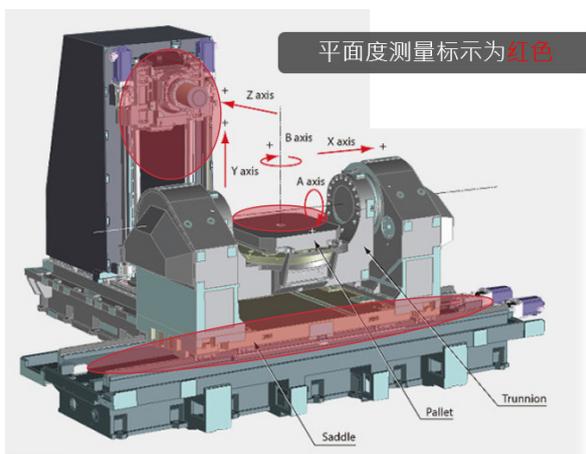
图12 垂直度测量时XK10的部件安装示意及测量现场实例照片

XK10激光校准仪的激光发射器本体自带90度五棱镜, 只需手动切换按钮, 就可以在自成90度的两个方向改变出光方向, 从而极大方便激光操作并节省激光调整时间。

另外, 采用多点法测量垂直度, 可以在测量完垂直度后, 直接出具两轴的直线度检测报告, 节省机器全面几何精度的校准时间。

对于选用了90度转向五棱镜的用户, 软件也支持使用经过校准后得到校准系数, 来提高精度的测量结果。

(3) 平面度测量(多导轨上面的共面性)



平面度测量标示为红色

**Flatness measurement 平面度测量**

- 发射器(Launch unit) 被固定在非活动位置
- 把M接收器(M unit)固定在测量平面
- 从发射器射出的激光束沿着被测轴进行校准
- M接收器和激光束在平面不同的位置进行校准
- 测量垂直轴变化以取得平面度误差

图13 平面度应用示意图及测量步骤简要说明

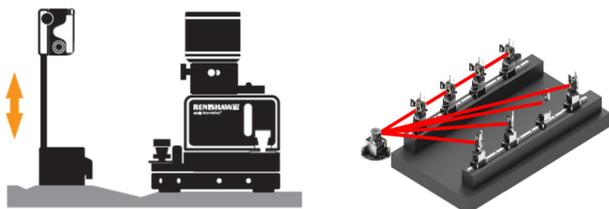
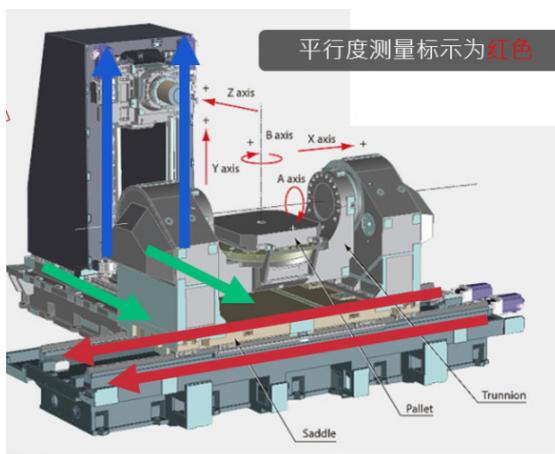


图14 平面度测量时XK10的部件安装示意及测量现场实例照片

长期以来，机器平面度的校准多数都是采用水平仪来完成，但对于两直线导轨上面的共面性（平面度），一直都没有一个高效准确快捷的解决方案。随着XK10的推出，直线导轨上表面的共面性的测量得以解决。该项应用还可以推广到工作台面的平面度检测、龙门机床双立柱上面的等高检测等。

(4) 平行度测量



平行度测量标示为红色

**Parallelism measurement 平行度测量**

- 发射器(Launch unit) 被固定在非活动位置
- 透过M接收器(M unit)测量第一轴(导轨)作为基准
- 从发射器射出的激光束被调整并投射到五菱镜
- 透过M接收器测量第二轴

图15 平行度应用示意图及测量步骤简要说明

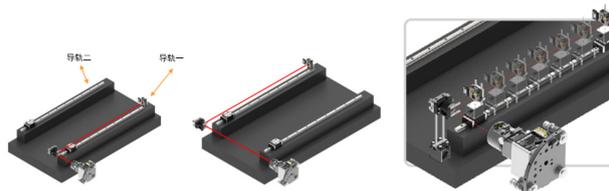
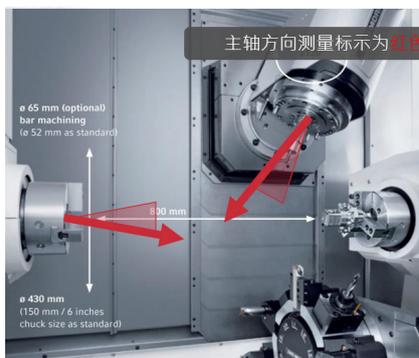


图16 平行度测量时XK10的部件安装示意及测量分步仿真图片

两导轨或多导轨间的平行度校准对于大型龙门机床或三坐标测量机来说，一直都是难以解决的问题，借助于新型XK10激光校准仪，导轨间的平行度已经不是问题。如以前令人头疼的大跨距龙门机床的装配调试，在用户现场无需长途托运如大理石平尺、角尺、自准直仪及芯棒等各种几何量具，采用XK10不仅可完成两大跨距长导轨间夹角测量，还能提供两名义上平行的导轨间在水平面内的相互距离差，方便将辅助导轨按已经调好的主导轨来逐点调整导轨平行度精度。

(5) 主轴指向性测量



主轴方向测量标示为红色

**Spindle pointing measurement 主轴指向测量**

- S接收器(S unit)被固定在机床上
- M接收器(M unit)被固定在主轴上
- 主轴在远近范围之间旋转

图17 主轴指向性应用示意图及测量步骤简要说明



图18 主轴指向性测量时XK10的部件安装示意及测量图片



图19 主轴指向性测量后在平板电脑上显示的XK10的测量结果

主轴指向性测量不仅可应用于各种主轴部件与直线轴间的平行关系，也能用于5轴机床回转轴装配中心与直线轴的平行关系。

#### (6) 同轴度测量

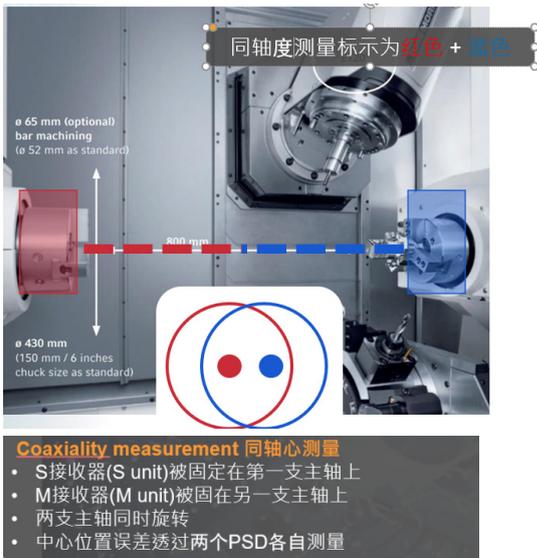


图20 同轴度测量应用示意图及测量步骤简要说明



图21 同轴度测量时XK10的部件安装示意及测量分步仿真图片

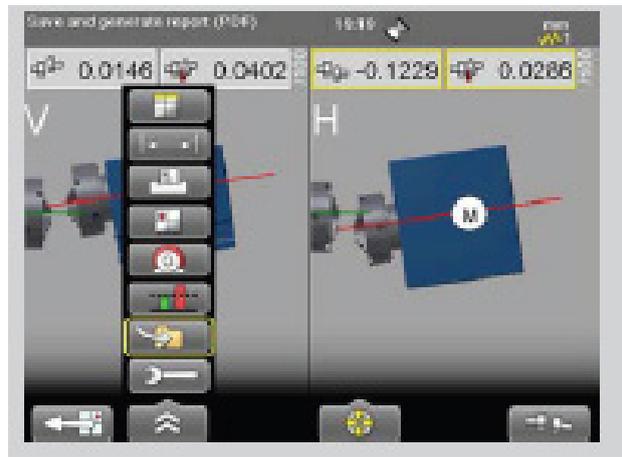


图22 同轴度测量后在平板电脑上显示的XK10的测量结果

同轴度不仅可以测试出两相对主轴间回转中心在水平方向和垂直方向的不同心偏差，还能给出两端回转部件旋转中心在水平面内或垂直面内的夹角。特别是其实时显示的同心功能，方便在装配现场对机器的安装调试。

### 3.XK10 “数字万分表”在五轴机器装配中的应用举例

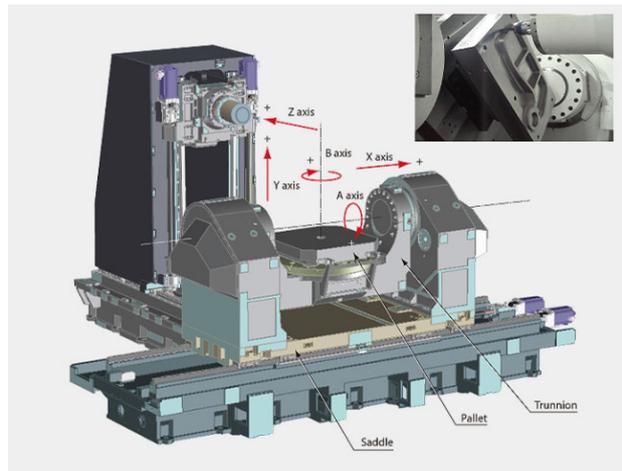


图23 卧式五轴机器的结构

五轴机床数字装配过程举例，体现出该套设备的强大功能及使用的方便性。

步骤一：进行装配前基础件加工精度的验证，用数字化方法在装配前确保基础件的精度：

- (1) 利用XK10的机器调平功能，对机器床身进行调平；
- (2) 利用XK10的垂直度功能，验证铸件上Z轴与X轴导轨安装基面的垂直度处于合格范围内；
- (3) 用XK10直线度功能确保铸件导轨X轴、Y轴及Z轴直线度在合格范围内；
- (4) 用XK10平面度功能确保铸件导轨X轴、Y轴及Z轴共面性在合格范围内；

步骤二：分部件安装调试导轨及滑块，确保基础移动

部件的精度与顺滑，避免整体装配应力：

(5) 分别为各直线轴上主导轨及滑块，借助XK10调整各轴滑块直线度在合格范围内；

(6) 为各直线轴装上辅导轨及滑块，借助XK10调整各轴主辅导轨平行度在合格范围内；

(7) 在机器床身上安装立柱部件及主轴部件，并用XK10验证Y轴及Z轴直线度；

步骤三：A、B回转轴部件的装配与调试，用数字化工具辅助调整回转轴与直线轴间的关系：

(8) 在X轴滑块上安装基板，并用XK10验证X轴直线度；

(9) 在X轴基板上安装A轴主支撑部件；

(10) 用XK10的主轴指向性安装A轴主支撑，调整A轴回转中心相对于X轴的平行；

(11) 用XK10的同轴度功能辅助安装调整A轴辅支撑；

(12) 在A轴主辅支撑间装上B轴工作台部件；

(13) 用XK10的主轴指向性安装调整处于工作台中心的B轴，使其相对于Z轴平行；

步骤四：机械装配完成通电后的几何精度验证：

(14) 在机器通电后，按相关机床标准用“数字万分表”综合测量验证各项几何精度，如直线轴的直线度、各直线轴间的垂直度、回转轴的回转中心与直线轴的平行关系等。

上述装配调试过程，在各阶段分不同情况采用XK10“数字万分表”的不同功能，充分发挥“数字万分表”的优点，配合验证及调试机器装配精度，实现有数字记录的装配工程，对机器最终的装配结果留下可溯源的记录。

录。借用已经使用过该设备的某机床用户的话说，有了XK10“数字千分表”，结合雷尼绍提供的如XM-60多光束激光干涉仪、XR20无线转台及QC20球杆仪等其它可以进行误差分析、精度补偿的先进数字化检测仪器，将五轴机器的制造过程的问题充分暴露出来并指明解决问题的方向，机器的装配质量好坏与装配人员的个人技术的关联性得到极大地缓解。

#### 4. 结语

众所周知，工件加工质量取决于机器性能。如果不了解机器的误差形貌，就无法在制造期间确保工件符合技术规格，在数控机床类设备的装配制造过程中，使用传统的花岗岩方尺、千分表、自准直仪、水平仪，标准芯棒及其它计量标准器等，虽然历史悠久，但是其多数已经不能满足现代精密制造装配检测的需要，其弱项是检测手段功能单一，检测工序、数据记录和计算多以手工处理，效率低，误差源过多，精度较低或无法溯源。XK10激光校准仪是一款高效、功能全面、测量便捷、精度可溯源的现代激光类测量仪器，在其多年积累的生产经验和客户服务体验的背景下，XK10激光校准仪其设计紧凑外观精致，并配有多功能模块和通用夹具，完全实现了客户在数控机床类设备的装配过程从不能测量到能够测量，能够测量到高效测量，较低精度到高精度测量的实现。大大的提高了客户的生产效率和产品良品率。

“数字万分表”符合现代装备制造业现场装配和测试过程的应用所需，是对机床行业传统测量手段的一次大跨越的升级换代。□

## 资讯

### 2022年1~8月机床工具行业经济运行简讯

2022年1~8月，中国机床工具工业协会重点联系企业统计数据反映行业整体运行低位回升，重回正增长区间。从2022年1~8月数据看，重点联系企业营业收入同比增长0.4%，1~7月为同比下降0.5%。利润总额同比增长32.2%，较1~7月增幅回落1.2个百分点。金属加工机床新增订单同比下降6.2%，较上月加深0.3个百分点，在手订单同比增长3.3%，回落2.6个百分点。

根据中国海关数据，2022年1~7月，机床工具进出口总额195.2亿美元，同比增长5.3%，较1~6月增幅扩

大1.8个百分点。机床工具进口总额74.7亿美元，同比下降7.5%，较1~6月降幅收窄1.6个百分点。出口总额120.4亿美元，同比增长15.2%，较1~6月增幅扩大1.7个百分点。

目前，我国的经济恢复能力在持续增强，机床工具行业也正在逐步企稳回升，但仍存在市场需求和投资偏弱，疫情影响难以预料等困难和问题，这些都给年内行业运行带来较大压力。

(来源：协会信息统计部)

# 对置式镗铣加工中心关键技术及应用

武汉重型机床集团有限公司 何发诚 陈映 李岩

【摘要】针对特种车体前桥同轴孔系、两侧倾斜孔及端面的加工面临的技术和装备难题，对对置式镗铣加工中心镗杆自动对中技术、可倾角高速主轴箱技术、测控一体化加工技术等关键技术进行了研究。本文对关键技术的原理、结构、特点及应用作了详细的论述。成果应用于D-THQ6913对置式镗铣加工中心，特种车体加工的精度、效率、自动化及智能化水平显著提升。

特种车体是特种战车的大型关键零部件，特种战车的动力系统、变速系统、行走系统、武器系统等都集成在特种车体上。其为大型焊接结构件，结构复杂、加工部位多、精度要求高，特别是其前桥同轴孔系的加工、两侧孔及端面的倾斜加工，是国内外一直未能很好解决的难题。为此，武重研究了镗杆自动对中技术、可倾角高速主轴箱技术、测控一体化加工技术等对置式镗铣加工中心关键技术，成功应用于D-THQ6913对置式镗铣加工中心，上述难题迎刃而解，提升了特种车体加工技术及装备水平。

## 一、关键技术

### 1. 镗杆自动对中技术

特种车体一般前桥有6个孔，3个一组分布在车体两侧，要从两侧分别进行镗孔加工，6个孔同轴度要求高。采用对置式镗铣加工中心加工，通常的镗杆对中方式，由于没有校正环节，长时间运行累积误差增大，两镗杆对中精度会越来越低，而造成加工精度超差。本技术包括镗杆对中装置和对中控制软件，采用基准块校正策略，两镗杆每次对中前对中心进行一次自动校准，对中精度高，且长期能保持稳定。

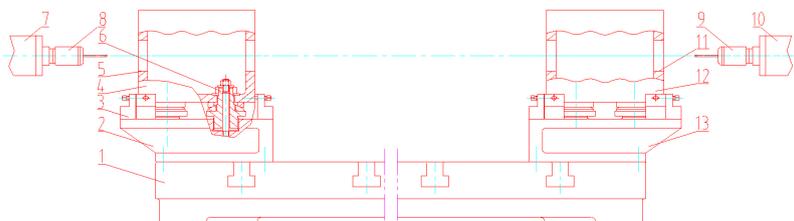


图1 镗杆对中装置结构简图

1. 平台 2. 左基座 3. 侧顶装置 4. 左基准块 5. 左基准孔 6. 水平调整装置 7. 左镗杆 8. 左无线测头 9. 右无线测头 10. 右镗杆 11. 右基准孔 12. 右基准块 13. 右基座

图1是镗杆对中装置结构简图。在平台1的两端分别安装了左基座2和右基座13，左基准块4和右基准块12分别安装在左、右基座上。水平调整装置6和侧顶装置3分别用于两基准块的调平和调正。

基准块采用HT250铸铁材料，多次焯火处理充分消除内应力和加工应力，经精密加工和人工刮研而成。基准块的两相邻顶面和侧面的平面度和垂直度均控制在0.003mm以内。两基准块的基准孔中心到顶面和侧面尺寸，经精密三坐标测量仪测量记录存档，供镗杆中对调试时修正使用。

本技术是利用两基准块的基准孔作为基准来实现镗杆精确对中。两基准块顶面和侧面调平和调正，最后调整到顶面和侧面分别各在一个平面上。首先用平尺和镗杆粗调，使两基准块的顶面共面，侧面共面，并且与镗杆轴线平行。然后用高精度电子水平仪精确校正。顶面共面平面度为0.005mm，水平为0.005/3000mm。侧面共面，平面度为0.005mm。镗杆上装千分表检测，在300mm长度侧面上两端点千

分表的变化为零。校准后将两基准块固定。

两基准块校准后，采用自主研发的镗杆对中软件进行自动对中控制。用两镗杆上的无线测头分别测量各自基准块的基准孔，测量数据经软件处理后，传至数控系统，自动校正其中一主机的X、Y轴位置，实现两根镗杆自动高精度对中。两基准孔中心至基准块上平面和侧平面的实际尺寸数据，在调试时输入到软件中进行修正。

## 2. 可倾角高速主轴箱技术

可倾角高速主轴箱是对置式镗铣加工中心的关键部件，在该部件上设计了一个数控A轴。镗杆在A轴上，通过A轴回转定位，则可加工特种车体上的倾斜面及上面的斜孔，不需两轴插补来实现。这种方式加工精度高、效率高，尤其是倾斜孔的钻孔、攻丝更加可靠。主轴箱主轴最高转速达到了3500r/min，体现了当今高速高精切削加工的发展趋势。

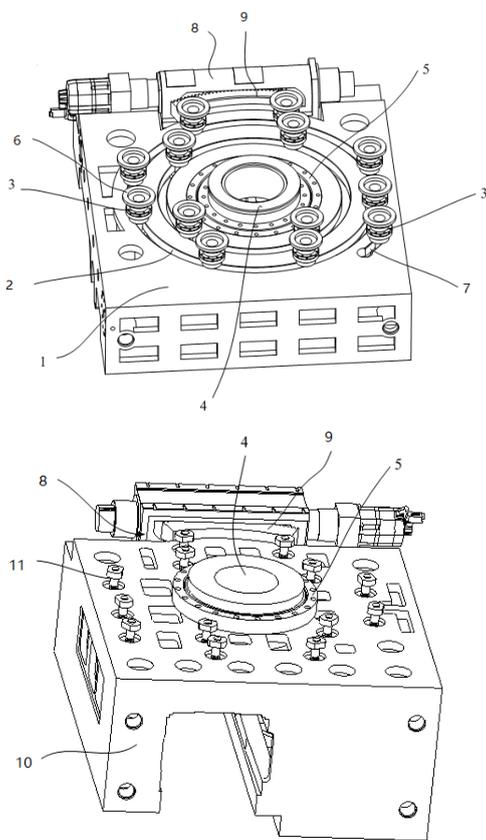


图2 主轴箱A轴结构图

1.静压滑板 2.T型槽 3.夹紧油缸 4.定心轴 5.交叉圆柱滚子转盘轴承 6.调整压盖 7.T型槽 8.蜗杆及蜗杆座 9.扇形涡轮板 10.主轴箱体 11.T型螺栓

图2是主轴箱A轴结构图，A轴包括驱动系统、回转支撑、卡紧系统三大部分。驱动系统由伺服电机、蜗杆及蜗杆座8、扇形涡轮板9组成。定心轴4、交叉圆柱滚子转盘轴承5、主轴箱体10、静压滑板1构成回转支撑。卡紧系统

则由T型槽2、T型螺栓11、夹紧油缸3及高压泵站组成。

在静压滑板和主轴箱体之间的支撑，采用结构紧凑的单交叉圆柱滚子转盘轴承加定心轴的结构形式。交叉圆柱滚子转盘轴承的内圈通过过渡配合安装在定心轴上，外圈安装在静压滑板的内孔里，用圆柱头内六角螺钉进行固定连接。定心轴插入主轴箱体内的沉孔内，定心轴的端面通过圆柱头内六角螺钉与主轴箱体固定连接。此结构回转主轴可对主轴箱体进行可靠的支撑。

静压滑板与主轴箱体之间的夹紧，采用多个碟形弹簧夹紧、油压松开形式的夹紧油缸来实现。为保证静压滑板静压面的完整性，将夹紧油缸固定于主轴箱体（回转头）上，从而避免了破坏静压滑板（支撑体）的静压导轨面。在静压滑板上设计了T型环槽，在主轴箱体上布置有安装夹紧油缸的沉孔。通过压力油推动夹紧油缸上的T型螺栓，实现主轴箱体回转前的放松。卸掉压力油后，通过油缸内的碟形弹簧使油缸上的T型螺栓与静压滑板上的T型槽拉紧，实现静压滑板与主轴箱体的夹紧，以保证联结刚度。

主轴箱A轴回转驱动，采用蜗杆-扇形蜗轮板结构。交流伺服电机经减速机带动蜗杆驱动固定在主轴箱体上的扇形蜗轮板回转，实现主轴箱体的可倾角分度运动。由于涡轮-蜗杆传动具有自锁的特点，且主轴箱体自重产生的偏心力使扇形蜗轮板齿面始终与蜗杆齿面接触构成无间隙传动，A轴分度精度高。在蜗杆尾端装有角度编码器，用来反馈蜗杆的回转数据，进一步保证了A轴的分度精度。

## 3. 测控一体化加工技术

特种车体测控一体化加工，就是在车体加工前用高精度测头对零件的加工基准和控制点进行测量，结合加工要求，测控一体化软件对测量数据和加工数据进行处理，最后通过数控系统控制机床加工。在加工完成后进行自动测量，且对加工结果进行评价。

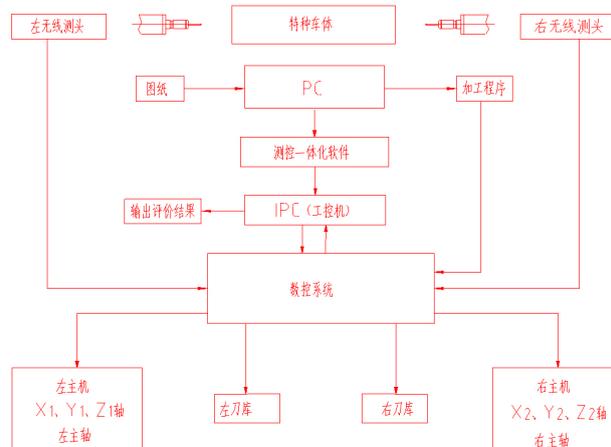


图3 特种车体测控一体化加工原理框图

(下转第72页)

# 高速电主轴的热态性能分析与计算

通用技术集团大连机床有限责任公司 陈凯 周吉贞 荆立萍

**【摘要】**电主轴是高档数控设备的核心功能部件之一，为了分析电主轴在高速运行过程中的热态性能，本文以通用技术集团大连机床有限责任公司自主研发的UF200系列电主轴作为研究对象，对电主轴高速运行过程中的电机产热、轴承产热以及电主轴内部的热量分布进行了计算和仿真分析，并通过试验验证了仿真分析结果的准确性，为进行电主轴系统的热变形计算和补偿提供了一定的参考。

制造业是我国发展过程中的重要角色，进入21世纪以来，随着制造业对于加工设备的要求越来越严格，高速加工技术逐渐进入人们的视野范围内，高速加工技术被称为史上的又一次工业革命，且这次革命被称为最为关键的一次革命，而高速高质量数控机床是本次革命的“主力军”。高转速在工业制造领域意味着更高生产效率，更高的加工精度，更小的加工成本，因此此项技术受到国内外各企业的争相追捧，随着市场需求的多元化和复杂化，高速加工技术已经成为21世纪最为热门的研究方向之一<sup>[1]</sup>。

高速主轴是实现高速加工技术的关键功能部件，主轴的刚度、热态特性、疲劳寿命等性能参数均影响产品的加工质量和加工精度<sup>[2]</sup>。日、德、意大利、瑞士等国家的数控设备多采用电主轴，相较于传统的主轴，电主轴具备结构紧凑、回转精度高、动态特性好等特点，是实现高速加工的核心部件。而电主轴由于采用电机主轴一体化的设计，会导致主轴内部温度的升高，过高的温度会影响主轴的加工精度，严重者会使轴承失效，造成主轴的损坏，影响生产的进行<sup>[3]</sup>。因此有必要对电主轴的热态特性进行深入研究。

针对电主轴系统的热态特性，国内外的许多学者都对其进行了深入研究，陈鹏满等<sup>[4]</sup>对不同结构的主轴电机冷却流道的冷却效果进行了仿真分析，张丽秀等<sup>[5]</sup>对冷却液流速对于电主轴电机温升的影响进行了计算分析，马丙辉等<sup>[6]</sup>采用不同轴承支撑结构的电主轴进行了摩擦功率计

算，BOSSMANN等<sup>[7]</sup>对电主轴的传热机制进行了计算和试验，CREIGHTON等<sup>[8]</sup>针对因电主轴温升造成的热变形，提出了一种补偿方法。本文针对电主轴的热态特性，采用有限元的方法，对电主轴内部的温度分布进行了仿真分析，此举有益于电主轴的稳定运行，也可以为电主轴热变形的计算和补偿提供理论基础和有益参考。

## 1. 电主轴热源分析

电主轴在高速运行过程中的主要热源分别是：高速轴承和内置电机，因此有必要对电机和轴承进行冷却设计，而在冷却过程中，电主轴所处工况、电主轴的转速、电机和轴承冷却结构的设计、冷却液温度控制、冷却液流速、轴承游隙、轴承润滑形式等均是影响电主轴冷却效果的重要因素，电主轴系统的热源、生热量的影响因素以及热量对电主轴系统的影响关系如图1所示。

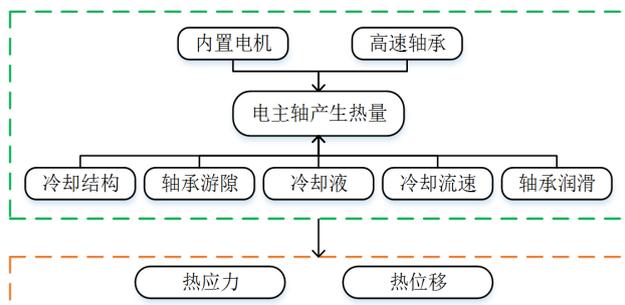


图1 电主轴系统热量分布图

电主轴内部结构复杂，如果产生的热量未能得到抑制，或者未能及时的排掉，会使电主轴系统产生热应力和热位移，进而会导致机床的加工精度降低，使用寿命下降，严重时会导致轴承失效使主轴出现损坏。对电主轴系统的热态性能进行研究有益于了解电主轴内部的热量分布，可以为电主轴热变形的计算和补偿提供理论基础，有利于提高电主轴转速，促进主轴技术的发展。

## 2. 电主轴系统的发热计算

本文以通用技术集团大连机床有限责任公司自主研发的UF200系列电主轴作为研究对象，此款电主轴的最高转速可达30000rpm，端面跳动小于0.001mm。首先对电主轴系统的生热量和电主轴系统内部的传热系数进行计算，为进行电主轴仿真分析提供参数。

### (1) 电机发热计算

对于整个电主轴的而言，内置电机是最为主要的热量来源。其中电机定子的生热量约占电机总生热量的2/3，电机转子生热量约占电机总生热量的1/3，并且在电主轴实际的工作过程中，转子所产生热量中的大部分会传入定子，因此在电主轴系统的温度分布中，温度最高的零件是定子<sup>[9]</sup>。通过公式(1)、(2)可对电机定子和转子产生的热量进行计算。

$$Q_1 = P \cdot 1/3 \cdot \alpha \quad (1)$$

$$Q_2 = P \cdot 2/3 \cdot \alpha \quad (2)$$

式中：Q1、Q2分别表示电机转子和定子产生的热量，kW；

P表示电机的额定功率，kW；

$\alpha$ 表示电机损耗，一般取值0.05。

本文所深入研究的电主轴采用的是E+A电机，电机额定功率56kW，电机的基本尺寸参数如表1所示。

表1 电机的基本参数

	转子	定子
内径	47.5mm	37mm
外径	74.85mm	46.35mm
长度	228mm	189mm

根据电机的基本尺寸信息，通过公式3、4可以求解出电机定、转子的生热率 $q_1$ 、 $q_2$ 。

$$q_1 = \frac{Q_1}{V_1} = \frac{Q_1}{\frac{\pi}{4}(D_{m1}^2 - D_{m2}^2)l_1} \quad (3)$$

$$q_2 = \frac{Q_2}{V_2} = \frac{Q_2}{\frac{\pi}{4}(D_{n1}^2 - D_{n2}^2)l_2} \quad (4)$$

式中： $q_1$ 为转子生热率， $w/m^3$ ；

$q_2$ 为定子生热率， $w/m^3$ ；

$Dm_1$ 为转子外径，m；

$Dm_2$ 为转子内径，m；

$Dn_1$ 为定子外径，m；

$Dn_2$ 为定子内径，m；

$l_1$ 为转子长度，m；

$l_2$ 为定子长度，m。

### (2) 轴承发热计算

在电主轴高速运行过程中影响轴承生热的因素有很多，分别包括主轴转速、润滑形式、轴承滚动体材料、轴承游隙等。本文所涉及的轴承产品选用FAG的角接触球轴承，共计4组。根据兰州理工大学王保民教授<sup>[10]</sup>和南京航空航天大学杨阳教授<sup>[11]</sup>研究可知，可采用Palmgren公式对角接触球轴承发热情况进行计算求解。

$$H_f = 1.047M \cdot n \quad (5)$$

式中： $M$ 为轴承的摩擦转矩， $N \cdot mm$ ；

$n$ 为电主轴转速， $r/min$ 。

其中轴承的摩擦转矩是由两部分构成，计算公式如式6所示。

$$\begin{cases} M = M_0 + M_1 \\ M_0 = 10^{-7} f_0 (vn)^{2/3} d_m^3 & vn \geq 2000 \\ M_0 = 1.6 \times 10^{-5} f_0 \cdot d_m^3 & vn < 2000 \\ M_1 = f_1 \cdot P_1 \cdot d_m \end{cases} \quad (6)$$

式中： $M_0$ 为与轴承、转速和润滑油性质有关的力矩参数， $N \cdot mm$ ；

$M_1$ 为与轴承所受载荷有关的力矩， $N \cdot mm$ ；

$f_0$ 为和电主轴系统轴承设计和润滑系统有关的系数，对于高速角接触球轴承而言，当采用油气润滑时，取值 $f_0=1$ ；

$v$ 为润滑油的黏度， $mm^2/s$ ；

$d_m$ 表示轴承的节圆直径，mm；

$f_1$ 为与轴承结构和载荷有关的系数，对于高速角接触球轴承而言，取值 $f_1=0.001$ ；

$P_1$ 为轴承的当量载荷，N。

### (3) 换热系数的确定

为建立准确的电主轴热力学分析模型，需要计算出电主轴内部以及主轴机体与外界空气各种传热状态下的热边界条件，即换热系数。电主轴系统的换热系数主要包括轴承与润滑系统的换热系数、电机与冷却系统的换热系数、轴承与冷却系统的换热系数、电主轴系统与外界空气的换热系数，电机定子转子间的换热系数，现对传热系数进行

计算。

①轴承与润滑系统的换热系数:

轴承与润滑系统的换热过程较为复杂,此过程的换热系数通常采用经验公式进行计算。

$$h_a = 0.332 \lambda_1 \cdot Pr \cdot [u / (vx)]^{1/2} \quad (7)$$

式中:  $\lambda_1$ 为所选用润滑油的导热系数,  $W / (m \cdot K)$ ;

$Pr$ 为普朗特数;

$u$ 为对流速度,  $m/s$ ;

$v$ 为润滑油的运动黏度,  $mm^2/s$ ;

$x$ 为特征长度,  $m$ ;

②电机与冷却系统的换热系数:

电机冷却在是整个电主轴系统最为重要的结构,电机冷却液与电主轴机体之间的换热过程属于管内流体强迫对流换热<sup>[12]</sup>。根据传热学的计算方法,对电主轴电机与冷却系统的换热系数进行计算,由于冷却液在冷却槽内流动,冷却液不同的流态有着不同的散热能力,采用的求解公式也不相同,所以需要先对雷诺系数 $Re$ 进行求解,确定冷却液的流态,然后再进行求解。

$$\begin{cases} v = \frac{Q_w}{A} \\ Re = \frac{v \cdot D}{\nu_f} \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $v$ 为冷却液流速,  $m/s$ ;

$Q_w$ 为冷却液流量,  $L/min$ ;

$A$ 为冷却套冷却管道截面面积,计算可得截面面积为  $3 \times 10^{-5} m^2$ ;

$\nu_f$ 为冷却液的运动粘度,  $mm^2/s$ ;

$D$ 为冷却套的水流直径,  $m$ 。

经计算雷诺系数可知,电机冷却系统属于湍流状态,冷却液处于湍流状态下的冷却效果要强于层流状态下的冷却效果,因此在进行电主轴冷却系统设计时,多采用增大冷却液流量,以保证冷却液的为湍流状态<sup>[13]</sup>。湍流状态下的努塞尔数计算公式如式(9)所示。

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (9)$$

式中:  $Nu$ 为努塞尔数;

$Pr$ 为冷却液的普朗特数,水的普朗特数约为7。

$$h_w = Nu \cdot \lambda_w / D \quad (10)$$

式中:  $\lambda_w$ 为冷却液的导热系数,  $W / (m \cdot K)$ ;

$D$ 为循环冷却槽的尺寸,  $m$ 。

③轴承与冷却系统的换热系数:

UF200系列电主轴前后轴承均为角接触球轴承,轴承采用中度预紧,采用油气润滑。在前后轴承座增加轴承循环冷却槽,循环冷却可以有效抑制轴承的温升,保证轴承

的正常运转,轴承循环冷却的换热系数的计算方式与电机冷却的计算方式相同,先确定冷却液的流态,再进行换热系数求解。

④电主轴系统与外界空气的换热系数:

电主轴系统与空气之间的换热过程属于复合传热,根据机床热态特性学基础,取传热系数 $h_s=9.7W / (m^2 \cdot K)$ <sup>[14]</sup>。

⑤电机定子转子间的换热系数:

电主轴电机的定子和转子之间存在气隙,气隙可以视为两个套在一起的空心套之间的环形间隙,在电主轴高速运转的过程中进行定转子间的热量传递<sup>[15]</sup>。电机定转子间的换热系数计算与电机冷却换热系数的计算过程相同,首先计算雷诺系数 $Re$ ,判断气隙间的气体的流态,其次计算努塞尔数 $Nu$ ,最后计算定转子间的换热系数。

### 3. 电主轴系统的稳态热分析

为了计算的简便,现对电主轴模型进行部分简化,取消无相对运动零件间的螺钉连接,采用bond连接,取消电主轴拉刀机构以及通气、通油孔等细小结构。由于此款电主轴是对称结构而且为了更好的观察仿真结果,现取电主轴剖面进行仿真计算。

仿真条件的确定:

(1)电主轴转速设置:本文所仿真的电主轴的额定转速为8000r/min,最高转速可达30000 r/min,因此需要对8000 r/min和30000 r/min进行仿真计算,为了增加仿真准确性,增加两组仿真试验,主轴转速取值12000 r/min和20000 r/min。

(2)环境温度设置:电主轴进行试验的场所是在恒温净化车间,车间恒定温度 $20 \pm 1^\circ C$ ,因此仿真计算时取环境温度 $20^\circ C$ 。

(3)轴承油气润滑系统,设定温度为 $20^\circ C$ ,压缩空气压力0.4Pa,冷却系统,冷却液入口温度设定 $20^\circ C$ ,出口温度设定 $30^\circ C$ ,冷却槽截面前轴承设置为 $30 \times 5mm$ ,电机冷却设置为 $15 \times 2mm$ 循环冷却,后轴承冷却设置为 $26 \times 6mm$ 。

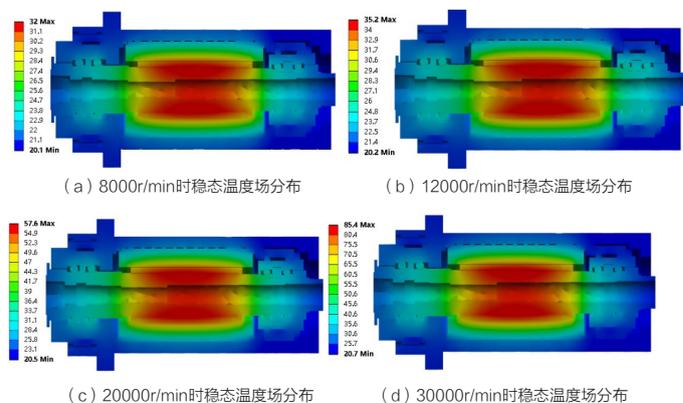


图2 主轴稳态温度场分布

根据图2主轴稳态温度场分布可知,当电主轴的转速为8000r/min时,整个电主轴系统的最高温度约32℃,前轴承温度约23.8℃,后轴承温度约22.9℃;当电主轴的转速为12000r/min时,整个电主轴系统的最高温度约35.2℃,前轴承温度约24.8℃,后轴承温度约24.8℃;当电主轴的转速为20000r/min时,整个电主轴系统的最高温度约57.6℃,前轴承温度约31.1℃,后轴承温度约28.4℃;当电主轴的转速为30000r/min时,整个电主轴系统的最高温度约85.4℃,前轴承温度约40.6℃,后轴承温度约35.6℃;在电主轴运行过程中,内部最高温度位于内部电机定子处,温度以定子为中心向电主轴前后两端逐渐降低,符合电主轴系统的热量散发规律。

#### 4. 电主轴高速运行试验测试

为了验证仿真结果的准确程度,对电主轴进行试验测试,由于温度传感器的放置会影响测量的准确性,若测量电机定子温度,传感器难以确定放置位置,也无法保证测量的准确,所以采用对电主轴前后轴承进行温度测量,本次测量选用的是德国isotemp温度传感器,电主轴综合测试试验台如图3所示。

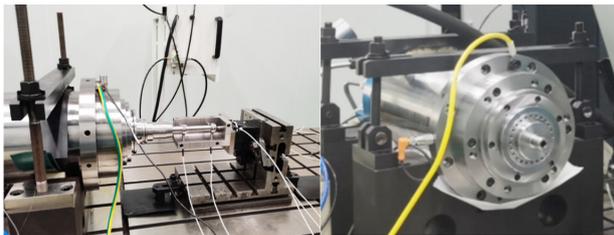


图3 电主轴综合测试试验台

通过综合性能测试平台测得电主轴在不同转速下的前后轴承温度,在电主轴转速达到8000转时,前轴承的最高温度为22℃,后轴承最高温度为23℃;在电主轴转速达到12000转时,前轴承的最高温度为23℃,后轴承最高温度为24℃;在电主轴转速达到20000转时,前轴承的最高温度为29℃,后轴承最高温度为29℃;在电主轴转速达到30000转时,前轴承的最高温度为39℃,后轴承最高温度为39℃。

根据公式(11)对电主轴不同转速下轴承的温度误差进行计算。

$$\mu = \frac{A-E}{E} \times 100\% \quad (11)$$

式中: A为仿真值;

E为实测值。

计算得当电主轴转速为8000r/min时,前轴承误差为8.2%,后轴承误差为-0.4%;当电主轴转速为12000r/min时,前轴承误差为7.8%,后轴承误差为3.3%;当电主轴

转速为20000r/min时,前轴承误差为7.2%,后轴承误差为-2.1%;当电主轴转速为30000r/min时,前轴承误差为4.1%,后轴承误差为9.0%,电主轴轴承稳态温度仿真误差在±10%以内,可以认定仿真结果准确。

#### 5. 总结

本文对高速电主轴运行过程中的热量来源和散热过程中的换热系数进行了分析和计算,对电主轴系统不同转速下的温度场分布进行了仿真分析,并通过试验对电主轴仿真结果进行了验证,通过本文的研究可以为电主轴系统的热变形计算提供有益参考。□

#### 【参考文献】

- [1]陈燕林,段志善,熊万里.高速电主轴技术的研究现状与发展[J].机械研究与应用,2004(04):10-11.
- [2]李松生,杨柳欣,吴梅英.数控机床用高速电主轴技术的现状与发展趋势[J].世界制造技术与装备市场,2003(05):14-16+10.
- [3]姜本刚,雷群,杜建军.高速滚珠轴承电主轴热态特性分析[J].润滑与密封,2017,42(02):6-12+18.
- [4]陈鹏满.KX-1主轴电机冷却流道结构设计与仿真分析[J].机电工程技术,2021,50(06):88-92.
- [5]张丽秀,刘腾,李超群.冷却水流速对电主轴电机温升的影响分析[J].组合机床与自动化加工技术,2015(08):36-38+42. DOI:10.13462/j.cnki.mmtamt.2015.08.009.
- [6]马丙辉,卢泽生.基于电主轴的高速轴承及其热分析[J].机械设计与制造,2008(11):1-3.
- [7] Bossmanns B, Tu J F. A thermal model for high speed motorized spindles[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 1999, 39(9):1345-1366.
- [8] Creighton E, Honegger A, Tulsian A, et al. Analysis of thermal errors in a high-speed micro-milling spindle[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2010, 50(4):386-393.
- [9]李炎臻.电主轴系统热—机耦合动力学建模与分析[D].东北大学,2017.
- [10]王保民,胡赤兵,孙建仁,刘洪芹.高速电主轴热态特性的ANSYS仿真分析[J].兰州理工大学学报,2009,35(01):28-31.
- [11]杨阳,朱如鹏,李苗苗,覃文凯,解培.基于ANSYS Workbench的角接触球轴承温度场分析[J].机械制造与自动化,2019,48(02):67-69+122.
- [12]李超.高速铣削电主轴动态热态特性分析及实验研究[D].哈尔滨工业大学,2013.
- [13]许庆鹏.基于240-XDJ24Y型高速电主轴的热态分析和冷却系统的研究[D].兰州理工大学,2012.
- [14]陈兆年,陈子辰.机床热态特性学基础[M].北京:机械工业出版社,1989.
- [15]何天经,芮执元,刘军.高速加工中心电主轴热态特性研究[J].机械制造,2012,50(05):19-21.

# 弹射套筒及活塞加工方法研究应用

郑州飞机装备有限责任公司 臧元甲 范存辉 魏伟

弹射发射装置为我公司研制的主要产品，其弹射过程由套筒、活塞等零件完成。零件几何精度高，常规的磨削加工方法致使零件尺寸、质量均不稳定，加工效率低。利用高精密数控车床进行加工，采用合理的加工方式，加工后零件可以满足图纸要求，加工效率提高93.3%；采用多台设备“流水式”作业，进一步提高了加工效率。

## 一、背景简介

弹射挂弹钩系列产品为我公司研制生产的主要产品之一。其关键的活塞式作动弹射过程由套筒、活塞等零件完成，多型号产品均采用了该结构。

套筒、活塞类零件的作用方式决定了其零件几何精度要求（如图1、图2所示）较高，配合位置尺寸公差基本在IT7、IT8，表面粗糙度均为Ra0.8甚至Ra0.4，形位公差在0.02mm左右。其材料一般为牌号14Cr17Ni2、00Cr13Ni8Mo2TiNbAl等的马氏体不锈钢或沉淀硬化不锈钢，抗拉强度一般为 $\sigma_b=1175\sim 1280\text{MPa}$ ，表面经钝化处理。套筒类零件整体为内外圆同轴的回转体结构，外圆直径 $\phi 22\sim \phi 70\text{mm}$ ，总长80~150mm，局部多有台阶、密封圈槽、端面槽、内外螺纹、漏气孔等特征。常规的加工方法为保证该类零件的几何精度要求，高精度的内孔、外圆采用了多道工序磨削加工的方式。

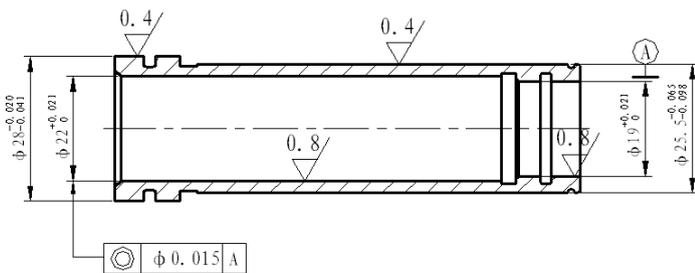


图1 典型活塞零件工程图

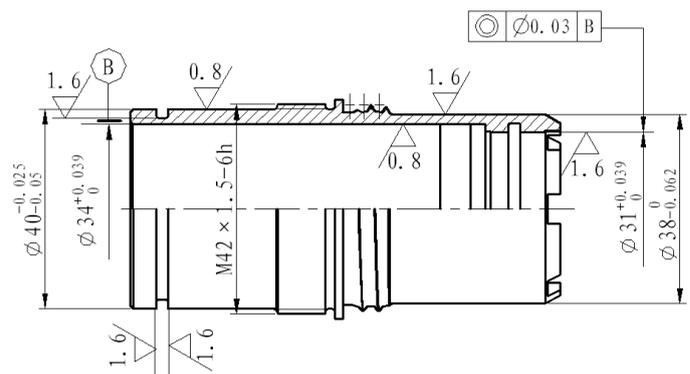


图2 典型套筒零件工程图

因该类零件每年的需求量较大，粗略统计后，每年需求量在20000件左右（见表1）。采用磨削的加工方式，单件零件的加工时间在30min左右，加工效率极低，严重拖慢了生产节奏。

表1 部分活塞、套筒零件明细

序号	零组件号	零件名称	序号	零组件号	零件名称
1	XXX-Ⅱ1/0410	导套组件	15	XXX-Ⅱ5D/1004	内活塞
2	XXX-Ⅱ1/4004	弹射筒	16	XXX-Ⅲ2/2006	弹射筒
3	XXX-Ⅱ1A/401	弹射筒	17	XXX-Ⅲ2/5101	套筒
4	XXX-Ⅱ4A/1404	筒体	18	XXX-Ⅲ3/7100A-01	套筒
5	XXX-Ⅱ4A/4002	外活塞	19	XXX-Ⅲ3/7000A-01	外活塞
6	XXX-Ⅱ4A/4003	中间活塞	20	XXX-Ⅲ3/7000A-02	内活塞
7	XXX-Ⅱ4A/4005	内活塞	21	XXX-Ⅳ1/4201	弹射筒
8	XXX-Ⅱ4A/4101	套筒	22	XXX-Ⅳ2A/7101	套筒
9	XXX-Ⅱ5/3002	外活塞	23	XXX-Ⅳ2A/7001	外弹射活塞
10	XXX-Ⅱ5/3003	内活塞	24	XXX-Ⅳ2A/7002	内弹射活塞
11	XXX-Ⅱ5/3101	套筒	25	J/XXX-Ⅱ19A/1000-02	外活塞
12	XXX-Ⅱ5D/1101	套筒	26	J/XXX-Ⅱ19A/1000-04	中活塞
13	XXX-Ⅱ5D/1001	外活塞	27	J/XXX-Ⅱ19A/1000-06	内活塞
14	XXX-Ⅱ5D/1002	中间活塞	...	...	...

## 二、改进思路

(1) 针对原加工方法加工效率低的问题，借助先进高精度数控设备，替代老旧手动磨床设备，通过调整加工方

法,合理选用刀具、参数使零件加工满足图样要求,对部分加工内容进行优化,提高单工序加工效率;

(2) 针对该类零件改变原生产组织模式,将该类零件进行加工工序拆分,使每道工序加工时间基本一致,采用多台数控车设备“流水式”的加工模式,通过积累经验数据,固化加工中使用的刀具、切削参数、装夹定位方式,提高了零件整体加工效率。

### 三、加工方法研究

#### 1. 原工艺方案概述

套筒、活塞类零件一般以实心棒材为毛坯。传统加工方案分粗加工,半精加工和精加工三个阶段,棒料先行固溶热处理后进行粗加工,之后进行时效热处理,再进行半精加工、精加工。粗加工阶段主要是去除表面硬皮,以及大部分加工余量;半精加工主要是建立精加工基准,消除热处理形变,并完成台阶圆、密封圆槽、横槽、内外螺纹、漏气孔等特征的加工;精加工主要是进一步提高配合表面的尺寸、形位精度和降低表面粗糙度以达到设计最终要求。

粗加工阶段使用普通数控车床加工即可满足加工要求,半精加工阶段一般使用较高精度的数控车床进行加工,精加工一般使用磨削方法达到加工要求。传统工艺方案具备加工成本低的优点,但缺点是工序较长,生产周期长,生产效率低,过程控制弱。

#### 2. 高精密车削方法研究

针对公司内部磨削设备加工效率低,设备精度丧失的问题,预利用厂内现存的高精度数控车床进行试加工,加工设备型号为Hardinge T42超高精度数控车削中心与Hardinge EU42精密数控车床。

在加工试验中,一部分活塞零件壁厚较薄,其外圆尺寸多集中在 $\phi 50 \sim \phi 70 \text{mm}$ ,内孔尺寸集中在 $\phi 40 \sim \phi 60 \text{mm}$ 不等,内孔及外圆均为8级公差,并且内部多处孔之间要求同轴度不大于0.015,多出外圆之间同轴度同样要求不大于0.015,且零件大部分壁厚在2~2.5mm之间,经常出现零件变形及镗孔内部存在振纹的情况发生。

对此我们进行了进一步的原因分析:

##### (1) 变形因素

在薄壁类零件车加工过程中,通常会受夹紧力、工件刚性、材料内应力及毛坯几何精度等因素影响,致使加工后的产品几何精度达不到要求。包含以下几种加工变形:

① 夹紧力变形。该类变形由于夹具夹紧力作用在加工

工件上导致的变形,这种变形往往与装夹方式和夹紧力的方向有关系,零件的变形量随夹紧力的变化而变化,两者具有线性规律。

② 材料应力引起的变形。因为零件加工余量不均匀或材料内部应力不均匀,经过切削加工去除材料后,材料内部的应力会重新寻找平衡。加工中不均匀去除材料,材料内部应力释放不均匀,工件也会出现变形误差。

③ 零件让刀变形。在零件刚性较差,例如细长轴类零件,若夹具设置辅助支撑不足,则会导致加工出的零件在精度较差的位置出现变形。

##### (2) 变形因素的识别方法

薄壁零件结构刚性差,加工过程中夹紧力、切削力及工件变形等因素往往是互相作用和影响的,可通过对比打表测量加工后工件所处的不同状态来分析和识别这三个因素的影响。首先在工件释放夹紧力前通过打表测量加工后的形状精度(图6),来识别是否存在工件让刀变形,再打表检测夹紧力释放后的形状精度,两者对比来识别是否存在夹紧力变形;在将该工件自由状态下存放一段时间后再次检测尺寸形状精度,对比刚刚卸下时的数据,来识别材料内应力释放导致的变形量影响。薄壁零件加工过程中由于夹紧力、切削力的相互作用会形成振动,不仅会影响加工面的尺寸和形状精度,还会降低加工表面粗糙度。因此,加工该类零件时,针对零件的结构特点正确的使用装夹方式,编排合理的加工工艺顺序,选择合理的刀具、切削参数及冷却液,控制好加工环境的温度波动和工件的温度变化,都成为保证该类工件加工精度必不可少的关键环节。

##### (3) 变形原因确定

通过数据收集,零件的变形主要存在于后续精加工内孔的过程中,因经过前期的粗加工及半精加工零件的余量基本去除,精车外圆采用两顶尖的形式定位装夹,对零件内、外圆不施加夹紧力,且零件长径比较小,精车外圆时振动可被忽略。

但精加工内孔时,零件单边只有0.1mm的余量,且零件装夹只能采用夹头或软爪夹持零件外圆,夹紧力及加工应力对零件的变形影响较大。

为避免零件在加工过程中因材料去除应力而产生变形,我们设计了一种多点夹持的软爪,将零件的夹持力由之前三爪卡盘的三个方向加持力分解成六个方向的夹持力,经过试验测算,使用六爪夹持加工后的零件,相比于三爪卡盘变形量减小97.3%。(图7为夹持点数量与零件变形量关系图)。

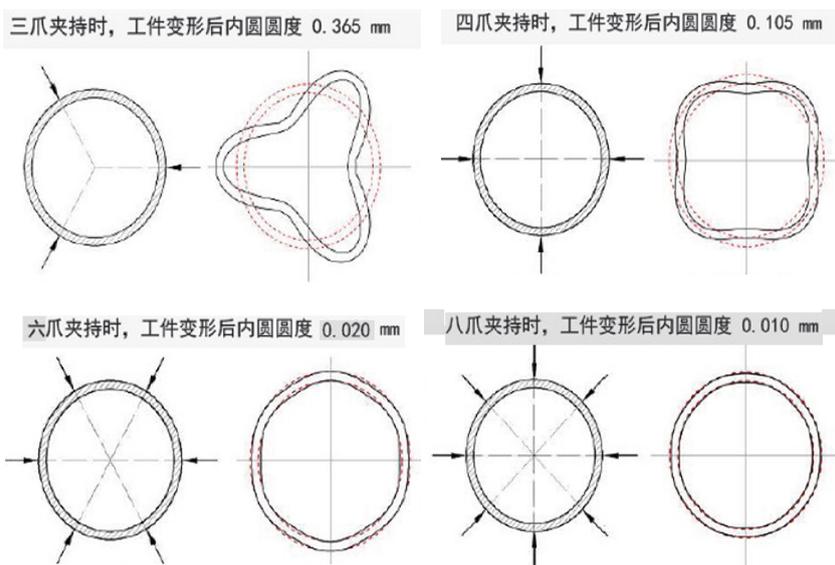


图3

并针对该类零件的高精密部分进行加工试验，经过几轮反复试验，调整加工参数及刀具型号，最终加工的零件尺寸、形位公差及表面粗糙度满足了零件设计要求。

(4) 加工刀具及参数设置

针对精加工，我们选择了Sandvik Coromant D DCMT070204-MM 1125的55° 镗孔刀片、DCMX11T304-WF 1125、DCMX11T308-WF 1125的80° 外圆刀片。

加工参数见表2：

表2 精加工参数表

	外圆		内孔	
	粗车外圆	精车外圆	粗镗内孔	精镗内孔
Vc/S	116	1200	80	80
F	0.06	0.06	0.15	0.12
ap	0.14	0.14	0.05	0.03

(5) 单工序加工效果

经过一段时间的加工试验，合理的选用切削刀片、切削参数及定位装夹方法，针对某一零件外圆两处粗糙度分别要求为 $\leq Ra0.8$ 及 $\leq Ra1.6$ ，磨削加工方式加工后的外圆表面粗糙度经计量分别为 $Ra0.713$ 和 $Ra1.339$ （计量报告见图4）。



图4

经过高精密车削，同样零件的相同位置计量后外圆表面粗糙度分别为 $Ra0.697$ 和 $Ra0.393$ 。工艺中要求零件内孔粗糙度为 $Ra0.8$ ，原内磨后内孔粗糙度在 $Ra0.6\sim Ra0.7$ 之间，经计量车削加工后内孔粗糙度稳定在 $Ra0.2\sim Ra0.4$ 之

间（计量结果见图5）。



图5

XXX-II4A/4003工艺中要求外圆粗糙度 $Ra0.4$ ，内孔粗糙度 $Ra0.8$ ，同样在优化加工后外圆粗糙度可稳定在 $Ra0.2\sim Ra0.3$ 之间，内孔粗糙度稳定在 $Ra0.5\sim Ra0.6$ 之间，表面质量均比之前磨削加工方式得到了显著提高。

原磨削设备加工零件内、外圆每件零件所需时间均在30min左右，利用高精度数控车“以车代磨”的加工方式，单件零件内、外圆加工时间在2min左右，加工效率相比之前提高了93.3%。

## 四、工艺方案制定

经过前期的工艺试验后，完全可以实现“以车代磨”的方式完成零件加工。我们又对零件后续加工进行了规划，零件经过初始热处理后强度、硬度的提高增加了机加的难度，刀具的性能也需相应提高。可采取的办法：一是提高工件定位装夹的刚性，二是使用防振镗刀、优钻、带涂层硬

质合金刀片。

据以上分析,套筒类零件典型工艺方案可分为如下几个步骤:

\*5工序:下料

毛坯全部以冷拉棒料为主。单件或双件下料,每件留适量夹持加长。

\*10工序:热处理

淬火或固溶时效,达到最终抗拉强度要求。

\*15工序:粗车(按需)

留量粗车内孔、外圆。设备:CTX系列数控车床

(1)卡盘夹持棒料,粗车外圆、切断;

(2)卡盘夹持外圆,两端钻孔。

\*20工序:半精车

留高精度表面精车余量,其余加工到位。设备:CTX系列数控车床

(1)车外圆、台阶、螺纹及退刀槽,IT9级精度以上外圆及密封槽留0.3mm余量,圆柱度随尺寸公差,表面粗糙度Ra3.2。

(2)钻镗内孔结构,IT9级精度以上外圆及密封槽留0.3-0.5mm余量,与外圆同轴度0.1mm,表面粗糙度Ra3.2,螺纹、退刀槽加工到位。

(3)掉头,车另一端。

\*25工序:精车

精车各高精度、高粗糙度表面。

设备:EU42或T42

(1)软爪或夹头夹持外圆,车端面→退刀槽→密封槽→螺纹→配合孔→槽边倒角圆弧→孔口倒角或圆角,精度到位,Ra0.8表面粗糙度到位。

另:按需抛光Ra0.8表面。

(2)芯轴定位,精车外圆,密封槽、倒角、倒圆、抛光毛刺加工到位,精度到位,Ra0.4、Ra0.8表面粗糙度到位。

另:按需抛光Ra0.4、Ra0.8表面。

\*30工序:铣削、线切割

加工其余附属结构(漏气孔、端面槽、六方孔等)。

\*35工序:锉修、校丝、去毛刺。

\*40工序:检验。机加过程结束。

按上述分析活塞类零件应以简化工艺路线,提高数控加工能力为主要优化方向,其次改变传统加工检验流程。一方面通过提高数控车加工能力,取消磨削加工工序,工艺方案规划流程图如图6所示。

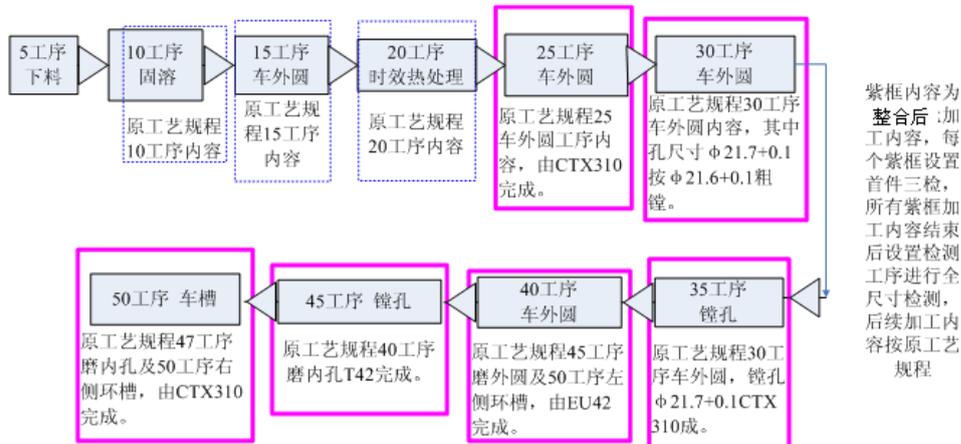


图6 XXX-114A/4003中间活塞工艺流程

套筒类零件以车削加工为主,取消磨削加工工序,需要内外圆精密车削能力的支持,既要保证尺寸精度与表面粗糙度,还要获得加工质量稳定性,经过分析对该类零件进行如图7所示的工艺规划。

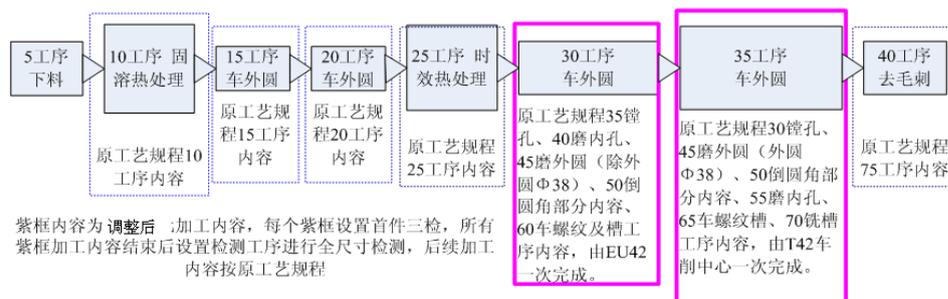


图7 XXX-114A/4101套筒工艺流程

## 五、生产单元的组建

根据以上分析,将套筒、活塞两种零件按工艺方案进行拆分组合,由多台车削设备组成生产单元,生产单元内、外加工内容根据零件具体节拍、流程进行有效组合,附属结构加工工序根据零件具体节拍可单元内完成或集中放置在生产单元全部加工完成后进行。

根据每年公司该类零件的种类、数量及零件的工艺流程,我们规划了如图8所示的设备排布图。

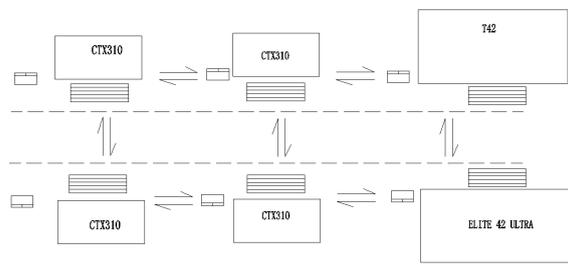
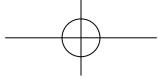


图8

## 六、效果验证



图9

针对前期对公司内两型活塞共400件零件的加工情况统计,在单班工作制的情况下,平均产量为80件/工作日。传统生产组织形式完成单件零件热处理后所有机加内容所需时间为71min,现零件在热处理后进入生产单元加工,最长节拍为3min。

针对某种套筒零件由常规加工方式每件零件在热处理后完成所有机加内容需73.5min,优化加工方式后完成时效热处理后所有机加内容需12min,由EU42与T42配合加工单班制日产量50件,若由两台CTX310配合EU42与T42共四台设备加工,产量可保持在80件/工作日。

经数据对比后,之前生产模式加工一批总数100件左右的该类零件,加工周期大概在4~5个月;目前优化生产模式加工一批总数200件左右的该类零件,加工周期在8~10天。

该项目不仅为现有套筒、活塞零件生产加工提供了保障,并可推广应用的该系列产品的研制生产中,具有显著的经济价值,同时也为后续新研产品的生产提供了加工及工艺技术保障,具有较高的军事及社会价值。□

### 上接第63页

图3是特种车体测控一体化加工原理框图。各种型号特种车体加工图纸经PC机处理后,形成加工子程序库,并传输到数控系统。在PC机上开发的测控一体化软件传输到IPC工控机。测控一体化软件在工控机上运行,进行数据处理形成数控指令传输到数控系统,控制各数控轴和主轴运行及刀库换刀。工控机与数控系统间能进行双向数据传输,实现加工子程序的调用、测量数据的传输、运行指令的下达等。加工检测数据经工控机处理后形成报告,可在打印机上打印,也可与车间MES系统连接。

测控一体化软件,是根据加工中心加工特种车体的加工工艺进行二次开发而形成。通过研究特种车体装卡、测量、加工、数据存储相互之间的关系,建立数学模型及逻辑关系,设计出加工过程中每一环节人机交互

界面,在工控机上使用C#编程语言工具设计底层程序代码,建立数据处理方法,使开发的人机交互界面有机地与数控系统连接成一体,构成测控一体化加工系统。在测控一体化软件界面上显示、编辑各项加工参数,从而实现特种车体自动测量、自动加工及自动输出加工评价结果。

## 二、关键技术应用

对置式镗铣加工中心关键技术,成功应用于新产品D-THQ6913对置式镗铣加工中心。两镗杆实现了自动对中,对中精度达到了0.015mm。主轴箱A轴回转精度高,并实现了可靠卡紧,重切及高速加工稳定可靠。特种车体倾斜面及倾斜孔的加工精度、表面粗糙度明显提升,解决了与倾斜面垂直螺孔的自动钻孔、攻丝难

题。测控一体化加工技术在特种车体上应用,采用无线测头自动测量,并使检测和控制融为一体,相互协同,提高了装备的加工效率和安全性,特种车体的加工质量及使用性能显著提高。这些关键技术的应用实现了特种车体高精、高效、自动加工。

## 三、结束语

本文阐述了对置式镗铣加工中心关键技术,并对应用情况做了总结。对对置式镗铣加工中心镗杆对中策略、主轴箱自动扳角度原理及结构、测控一体化加工方法等做了初步探索,取得了一些创新性成果。成果的成功应用显著提升了特种车体加工精度、效率及自动化、智能化水平,促进了特种车体加工技术及装备的发展。□

# 细长轴的切削加工

山东蓬翔汽车有限公司 赵有正

【摘要】细长轴类零件因其长径比大、刚性差，在车削加工中容易发生振动、变形，影响加工质量，针对影响加工细长轴精度等因素，分析了如何提高细长轴零件的加工精度，给出解决问题的具体方法。

轴类零件在各种机械设备中应用比较广泛，主要起到支撑及传动的的作用，往往是核心零件。其大多在高温、高速的环境下运行，因此对该类零件的各种技术要求很高，以确保装配的工件具有一定的回转精度。在车削加工中，细长轴类工件是比较难加工的种类之一，由于细长轴工件的长度 $L$ 与直径 $d$ 之比大于或等于25，工件细长、刚性差，车削时由于切削力、重力、切削热等的影响，切削时很容易使细长轴产生弯曲变形，从而产生振动，影响加工精度和工件表面粗糙度，很难保证加工精度，容易使轴件报废，甚至无法加工。

针对细长轴类工件车削中可能出现的问题，为了保证工件的尺寸精度、形位精度和表面粗糙度，符合图样技术要求，笔者从实践中体会到，需要解决多方面问题，才能克服和解决车削中遇到的问题。

## 一、车削引起细长轴变形的原因

在进行轴类零件加工时，往往会应用到支撑传递扭矩要承受结构本身的载荷力，在使用轴类零件时要进行回转操作，在实际加工时要特别注意强度和尺寸方面要求，满足相关标准。另外还需要在结构方面保证零件定位能够具备准确和可靠性的特征，从而方便后续拆卸和调修工作的有序进行。在进行加工时要结合以往的工作经验，来防止出现较为严重的弯曲变形问题，从而使得实际生产模式能够具备精准性的特点，为后续使用提供重要的方向。从整体上看，除了由于运输或储存不当等原因而使毛坯产生的弯曲以外，细长轴车削加工中弯曲变形的原因主要分为以

下两个方面。

### 1. 切削力导致的变形

在切削过程中，产生的切削力可以分解成轴向切削力 $P_X$ ，径向切削力 $P_Y$ 和切向切削力 $P_Z$ 。不同的切削力对切细长轴时所产生的弯曲变形的影响是不同的。

#### (1) 轴向切削力 $P_X$ 的影响

轴向切削力是平行作用在细长轴的轴线方向的，对工件的弯曲变形影响并不大，可以忽略。但是由于细长轴的刚性较差，其稳定性很难符合相关的标准、要求，因此在实际实施时，切削力往往会大于定向的数值而造成弯曲的问题（如图1所示）。

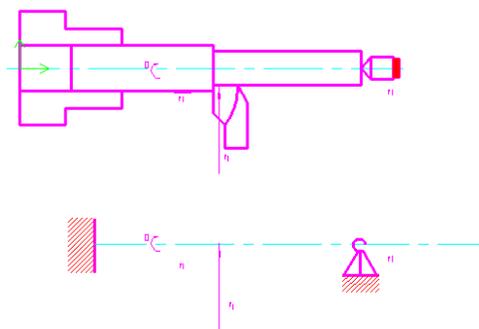


图1 轴向切削力的影响及受力分析

#### (2) 径向切削力的影响

对于径向切削力而言，它最主要的作用即发出垂直型的力，该力会直接通过细长轴进而作用在轴线的水平内，因为细长轴的刚性相对较弱，所以径向力会使得其产生弯曲变形，从而导致处于水平面之内的细长轴发生不同程度

的损坏。相较于其它因素，径向切削力所导致的细长轴弯曲变形问题较为显著（如图2所示）。

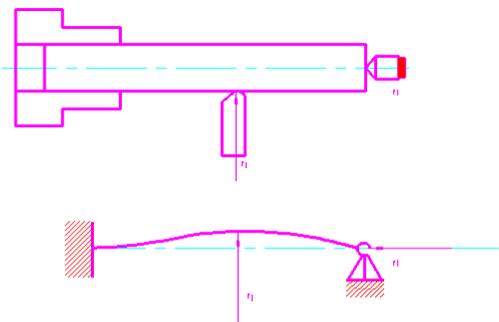


图2 径向切削力的影响及受力分析

## 2. 切削热产生的影响

在加工作业时往往会出现切削热，这也是影响细长轴车削加工形变的原因。在实际加工时一些工件加工完成之后会出现变形伸长的问题，导致卡盘被固定无法正常的移动，并且两者之间的距离也处于恒定不变的状态中，细长轴由于受热而形成轴向伸长的距离等限制因素，导致细长轴由于轴向挤压而出现不同程度的弯曲变形问题。另外在后续操作时，如果相关操作人员并没有加强对现场温度的有效控制的话，那么也会加大出现变形的几率以及程度，其后果非常恶劣，因此要加强对这些问题的重视程度。

## 二、提高细长轴加工精度的措施

### 1. 细长轴加工前的准备

#### (1) 加工前首先对机床进行调整

细长轴的加工过程需要使用床身导轨的全部或大部分，因此机床本身的精度对加工效率、质量有着相当重要的影响。由于机床导轨面磨损程度不同，因此首先要对机床做适当的调整。调整尾座中心，使之与车床主轴中心同轴，调整好床鞍、滑板相应的间隙，使之松紧适当（如图3所示）。

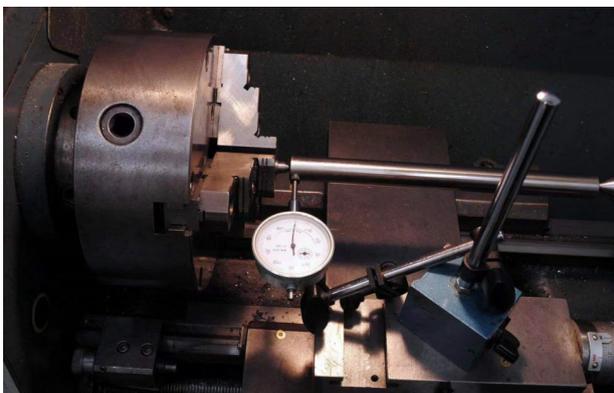


图3 调整主轴与尾座同轴度

#### (2) 对工件坯料要先进行校直和热处理

工件坯料在全长上的弯曲量超过0.1mm时应进行校直。坯料直径大时，应采用热校直；坯料直径较小时，可采用冷校直。对弯曲棒料应校直，校直的棒料不仅可使车削余量均匀，避免或减少加工振动，还可以减少切削后的表面残余应力，避免产生较大变形，校直后还要进行时效处理，以消除应力。

## 2. 选择好的辅助工具和冷却液

#### (1) 尾座顶尖选用弹性回转顶尖支承

车床用弹性回转顶尖（如图4所示）是一种可以沿轴线方向产生弹性变形的活动顶尖。由于切削中产生切削热，会出现热膨胀而导致工件长度增加，首先可以借助弹性回转顶尖的方式对热形变伸长进行补偿。通过实践证明，借助弹性回转顶尖的方式对细长轴进行加工，可以有效补偿工件热形变伸长，由于此类方式加工的零件很难发生弯曲，因此车削加工进行得相对顺畅。

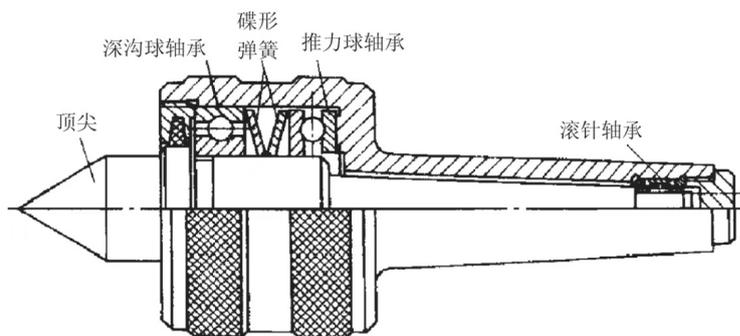


图4 弹性回转顶尖结构图

#### (2) 选择好切削液

金属切削的过程中，刀具与金属材料的摩擦会导致表面温度升高，所以切削件变形弯曲也是常见的问题，因此切削液的使用可以减少此类事情发生，因为切削液可以起到润滑刀具冷却金属的作用。切削液在切削过程中的润滑作用还可以减少前刀面与切屑，后刀面与已加工表面间的摩擦，形成部分润滑膜，从而减少切削力、摩擦和功率消耗，降低刀具与工件摩擦部位的表面温度和刀具磨损，改善工件材料的切削加工性能。

目前绝大多数车床采用的一般是粘度比较小的合成及半合成的水基切削液（如图5所示），主要有以下原因：①不易变质腐败，不产生油泥，清洗起来比较方便。②属于弱碱性对机床伤害比较小。③不容易阻塞供液的油路管。④清澈比较容易看清楚加工的工件。

## 绿色防锈切削液

兑水比例1:15-20



图5 合成水基切削液

车削中要加注充分的切削液，这样可以有效减少工件所吸收的热量，减小工件因热度变形伸长，同时降低刀尖切削温度，延长刀具寿命。

### 3. 工件装夹和车削方法

#### (1) 工件装夹

在车床上车削细长轴采用的传统装夹方式主要有两种：一夹一顶安装；另一种是：两顶尖装夹。这里主要分析一夹一顶的方式（如图6所示）。其主要特点：①装夹比较安全、可靠，能承受较大的轴向切削力；②安装刚性好，轴向定位正确；③增强较长工件端部的刚性，有利于提高加工精度和表面质量；④较长轴类零件，中间刚性较差，需增加中心架或跟刀架。一夹一顶车削，最好要求用轴向限位支撑或利用工件的阶合作限位，否则在轴向切削力的作用下，工件容易产生轴向位移，如不采用轴向限位支撑，加工者必须随时要注意后顶尖顶的松紧情况，并及时进行调整，以防发生事故，为了防止由于进给力的作用而使工件轴向位移，可以在主轴前端锥孔内安装一个限位支撑，也可以利用工件的台阶进行限位，用这种方法装夹较安全、可靠，能承受较大进给量，因此应用广泛。

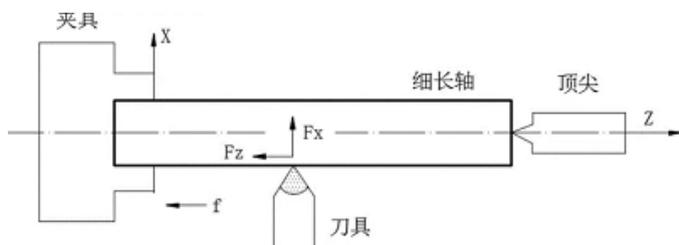


图6 一夹一顶装夹

#### (2) 车削方法

借助反向进给的方式进行细长轴车削加工（如图7所示），可以有效预防弯曲变形，反向进给即刀具以卡盘向尾架的方向当作切削的运动方向，一般的切削方向同尾架顶尖轴向力以及切削的轴向力的方向保持一致，从而进一步加剧了原本细长轴工件弯曲的程度。通常情况下，反向

进给力的方向会指向尾架，与工件温升的伸长量方向保持一致，一同向弹性顶尖进行压缩。反向车削细长轴中，对切削用量有特殊要求，要求最大的进给量 $f$ ，以增加工件轴向拉应力，防止工件大幅度振动。总之，要想取得一个较为理想的效果，最好将反向进给与弹性活顶尖进行搭配使用。

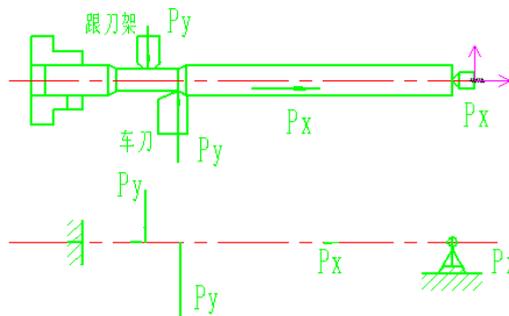


图7 反向走刀车削法

### 4. 合理选择车刀的几何角度和车削时的切削用量

车刀的几何形状对减小作用在工件上的切削力，减小工件弯曲变形和振动，减小切削热的产生均有较大的影响。选择车刀与车刀的几何角度主要考虑以下几点：

#### (1) 粗车刀

采用粗车进行加工时，由于加工量比较大，其切削力也比较大，导致细长轴在加工过程中，也容易受到振动、弯曲变形等影响，因此在粗加工过程中，刀具选用硬度、耐磨性好的刀片材料，如YT15、YT30、YW1等，刀具须仔细刃磨，表面粗糙度值 $Ra$ 要小，并保持锋利。

#### (2) 精车刀

精车时刀具结构采用弹性刀杆，起到消振作用，改善切削条件，装刀时要使刀尖低于轴件中心 $0.1\text{mm}$ 。刀刃较宽，修光刀刃 $8\sim 10\text{mm}$ ，可保持车刀与轴件有一定接触面积，刀刃顶着轴件进行车削，可防止车削力变化时引起啃刀的弊病，主偏角很小，以形成薄的变形小的切屑，刀刃锋利，切削轻快，能获得较小的表面粗糙度值。

#### (3) 粗车刀的几何角度(如图8所示)

a) 为了减小径向切削分力，减小细长轴弯曲变形，主偏角采用 $80^\circ \sim 93^\circ$ 。

b) 为了降低切削力，减少切削热，选择大前角 $\alpha=15^\circ \sim 30^\circ$ 。

c) 车刀前面应磨出 $R1.5\text{mm} \sim R3\text{mm}$ 的断屑槽，以利于切屑卷曲后折断。

d) 采用正刃倾角 $\lambda_s=3^\circ \sim 10^\circ$ ，以使切屑流向待加工表面。

e) 刀尖圆弧半径 $a_r$ 应小于 $0.3\text{mm}$ ，切削刃的倒棱宽度要选得较小，约为进给量的一半（ $0.5f$ ），以减小切削时

的振动。

f) 车刀主后角 $\alpha=8^\circ$ ，倒棱 $0.1\sim 0.3\text{mm}$ ，棱后角为 $-12^\circ$ ，这样就增加了车刀后隙面支持在工件上的接触面积，可以防止由于工件材料内部组织不均匀而产生的啃刀现象。

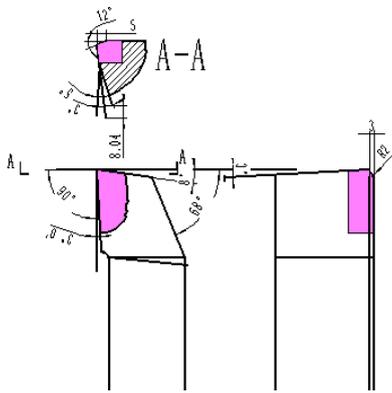


图8 粗车刀几何角度

#### (4) 精车刀的几何角度

采用精车进行加工时，由于加工量比较少，其径向力 $f_p$ 也比较小，因此，在加工过程中，需要对工件表面粗糙度进行考虑，精车主偏角 $k_r$ 要小，一般要控制在 $3^\circ\sim 5^\circ$ ，由于刀刃比较锋利，能产生很薄的切削层，因此，满足工件表面粗糙度要求。精车的刃磨大前角 $\gamma_o$ 要控制在 $25^\circ\sim 30^\circ$ ，后角 $\alpha_o$ 要控制在 $10^\circ\sim 15^\circ$ ，前刀面断屑槽需要控制在 $110^\circ\sim 115^\circ$ ，倒棱 $1\sim 3\text{mm}$ ，棱后角为 $0^\circ\sim 4^\circ$ ，采用宽刀刃，刀刃宽为 $30\sim 40\text{mm}$ ，刃磨时可用工具磨床进行刃磨，以保证刀刃光洁且平直，这样不仅能为切削排屑提供方便，还能为已完成加工表面的安全提供保障，确保工件表面粗糙度符合相关要求。

#### (5) 切削用量的选择

反向车削粗车时采取较大的进给量 $f$ ，以增加工件轴向拉应力，防止工件产生振动。切削用量选择次序为：先取最大的进给量，其次取最大的背吃刀量 $a_p$ ，最后取最大的切削速度 $V_c$ 。粗车时，切削速度 $V_c=50\sim 60\text{m/min}$ ，进给量 $f=0.3\sim 0.4\text{mm/r}$ ，切削深度 $a_p=1.5\sim 2\text{mm}$ ；精加工时切削速度 $V_c=60\sim 100\text{m/min}$ ，进给量 $f=0.08\sim 0.12\text{mm/r}$ ，切削深度 $a_p=0.5\sim 1\text{mm}$ 。

### 5. 正确使用跟刀架

跟刀架固定在床鞍上，一般有两个支撑爪，跟刀架可以随车刀移动，抵消径向切削时可以增加工件的刚度，减少变形，从而提高细长轴的形状精度和减少表面粗糙度。从跟刀架的设计原理来看，只需两只支撑爪就可以了，因车刀给工件的切削抗力后，使工件贴在跟刀架的两个支撑爪上。但实际使用时，工件本身有一个向下重力，以及工

件不可避免的弯曲，因此当车削时，工件往往因离心力瞬时离开支撑爪、接触支撑爪而产生振动。如果使用三只支撑爪的跟刀架支撑工件一面由车刀抵住，使工件上下、左右都不能移动，车削时稳定，不易产生振动。因此车细长轴时一个非常关键的问题是要应用三个爪跟刀架（如图9所示）。

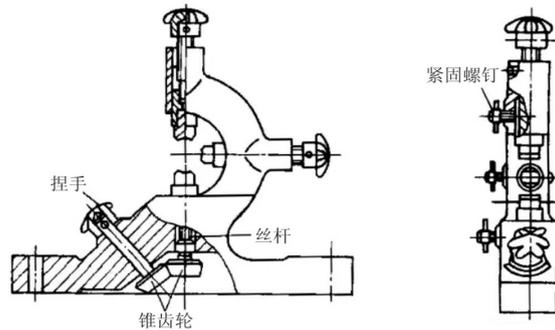


图9 三爪跟刀架结构图

跟刀架的使用还应注意以下几个方面：

- (1) 跟刀架支撑爪的材质要选取耐磨性较好的耐磨铸铁。
- (2) 支撑爪接触面要先进行修正与研磨，使支撑爪弧面与已加工表面全部接触，至少保证90%以上。
- (3) 注意跟刀架支撑爪的调整，使之与工件接触适当，避免接触过紧或过松现象。
- (4) 车削过程中要随时对跟刀架各支撑爪与工件的接触情况进行跟踪、监视和检查，发现情况要及时防治和修正，并且加注充分的冷却液，使冷却液起到润滑和冷却作用。

### 三、其他注意事项

- (1) 在车刀安装时，可使车刀刀尖略高于工件轴线，以增加切削的平稳性，避免产生“扎刀”现象。
- (2) 在工件装夹和车削时，尾座顶尖与中心孔不要顶得过紧，防止切削时产生弯曲。
- (3) 车刀磨损后，要及时刃磨刀刃，保持刀刃锋利。
- (4) 消除内应力，校正中心孔。

### 四、结论

细长轴车削加工属于当下比较广泛的加工方式，但是由于细长轴本身的刚性较差，在进行车削加工时经常会由于力和热量的影响而出现不同程度程度的变形问题，无法满足质量的标准和要求。因此，在实际工作中需要加强对变形问题的有效了解和认识，通过采用合适的装夹方式和先进的加工方法，选择合理的刀具角度和切削用量等措施，可以保证细长轴的加工质量要求，保证实际生产效率的提高。□

# 镍基高温合金铣削刀具的使用技巧

湖北三江航天红林探控有限公司 邹峰  
湖北三江航天红峰控制设备有限公司 张甜甜

**【摘要】**以航天飞行器产品中结构复杂、加工精度要求高的测试转接阀体为例，通过对整体硬质合金铣刀材质、涂层的合理选择，反复切削试验，确定刀具的几何角度和切削参数，使工件加工质量完全符合设计要求，且加工效率提高60%，产品合格率提高30%，刀具配置数量减少30%。

随着航天飞行器技术更新换代速度的加快，通过改变零件材料来提高航天飞行器性能已成为业界共识。镍基高温合金GH4169以它在近1000℃的高温条件下仍能保持良好的抗氧化能力、热稳定性以及良好的物理力学性能，而被航天航空、石油化工、核工程等环境条件恶劣、技术条件要求严苛的应用领域所大量使用。但由于其材料加工时硬点多，导热系数小，加工硬化严重，切削过程中容易形成锯齿状切屑，切削力波动大，刀具磨损快，加工效率很低，其切削规律与其它黑色金属材料有很大的区别，这些特性使镍基高温合金GH4169成为机械加工中最难加工的材料之一。

在研究镍基高温合金材料加工方法时发现，选择合适的刀具是加工镍基高温合金材料最关键一步，在优化工艺方案、合理进行刀具配置的同时，必须要根据加工零件的形状特点和材料特性进行正确的刀具选择，才能取得最佳的加工效果。本文以航天飞行器产品中结构复杂、加工精度要求高的测试转接阀体为例，描述如何利用铣车复合数控设备，通过进行正确的刀具选择，结合合理的工艺方案，通过反复的切削试验，最终使得工件加工质量完全符合设计要求。

## 一、零件加工难点分析

### 1. 零件的材料特性

以航天飞行器发动机上的测试转接阀体加工为例，该

零件采用的是镍基高温合金GH4169材料，材料成份及性能特点如表1和表2所示：

表1 GH4169主要化学成份（质量分数）

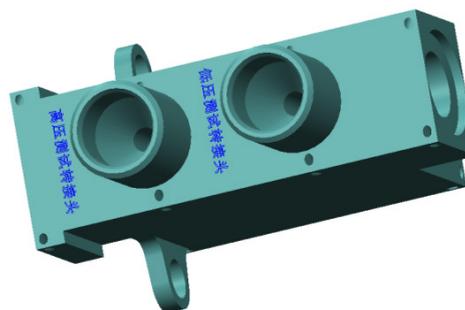
化学成分 质量比	Ni	Cr	Mo	Ti	Nb	Al	Fe
	51.96	17.98	3.07	0.95	4.82	0.45	20.77

表2 GH4169的力学性能

性能指标	室温20℃时的指标
硬度HBW	348
高倍晶粒度（级）	6
抗拉强度 $\sigma$ （MPa）	1290
0.2%屈服强度 $\sigma_{0.2}$ （MPa）	1040
伸长率（%）	15
收缩率 $\phi$ （%）	16

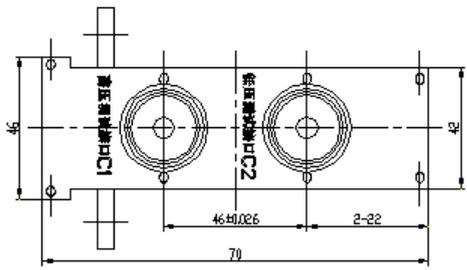
## 2. 零件的形状特性

该零件由多型腔结构组成，加工难点多，如图1所示。

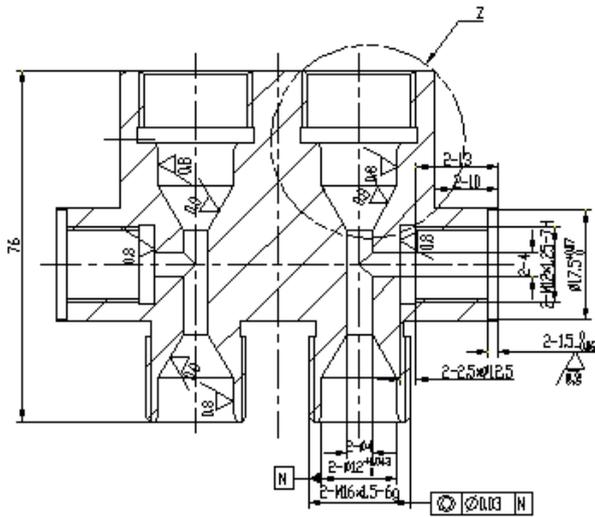


(a)

其余 $\sqrt{32}$

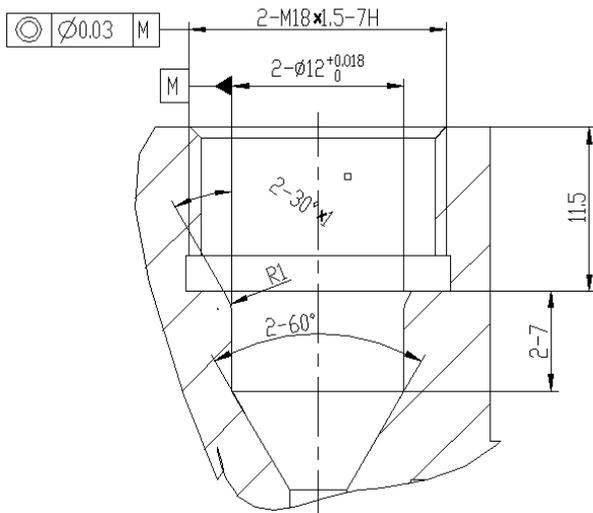


(b)



(c)

$\frac{Z}{3:1}$



(d)

图1

### 3. 零件的工艺难点分析

(1) 零件毛坯为GH4169镍基高温合金实心棒材，加工余量大。

(2) 内形中测试气压的密封面要求表面粗糙度值

为 $0.8\mu\text{m}$ ，内孔的尺寸精度为 $12_0^{+0.018}\text{mm}$ ，同轴度为 $\phi 0.03\text{mm}$ 。

(3) 零件上由6个互通的内部形状复杂、粗糙度要求高的大小不一的孔组成，相对位置尺寸精度为 $46\pm 0.026\text{mm}$ 。

(4) 镍基高温合金有以下特性：切削温度高、加工硬化现象严重、刀具易磨损、零件尺寸精度和表面粗糙度不易保证。

由于镍基高温合金材料存在以上诸多加工难点，使用常规的加工工艺方法和通用刀具，零件加工效率极低，刀具磨损快，即使采用“刀海”战术，也无法保证零件加工质量和零件合格率，因此只能依据零件结构和材料特性，通过铣削刀具的正确选择，才能解决采用“刀海”战术浪费严重、质量无法保证等一系列问题。

## 二、镍基高温合金铣削刀具的合理选择和使用技巧

### 1. 镍基高温合金铣削刀具需要具备的特性

(1) 刀具的耐热性要高：耐热性是指刀具材料在高温条件下保持一定的硬度、耐磨性、强度和韧性的性能，是加工镍基高温合金的重要参数，在相同条件下，镍基高温合金的切削温度是钢材的2倍。

(2) 刀具锋利且有足够高的硬度和耐磨性：镍基高温合金有大量合金元素和硬质点，加工硬化现象严重，塑性变形大，镍基高温合金的切削抗力大，是钢材的2倍，表面硬化程度可达本身材料的2倍。

(3) 刀具材料与镍基高温合金的亲合力要差。

(4) 刀具几何参数、断屑槽形和涂层类型选择要合理：镍基高温合金车削、铣削时应采用正前角刀具，取较大的后角，但要保证有足够的刀尖强度、韧性和耐磨性，涂层应选用PVD涂层，避免切屑锤击刀具时造成崩刃现象。铣削易采用 $45^\circ$ 螺旋角、不等齿距、变刃倾角进行铣削。

### 2. 镍基高温合金铣削刀具选择时的技术要求

该零件共需要 $\phi 6$ 、 $\phi 8$ 、 $\phi 12$ 三种直径的铣削刀具，合理选择铣刀时应综合考量以下要点：

(1) 铣刀刀齿的强度是第一优先等级，选择刀齿强度高，不易崩刃的铣刀。

(2) 铣刀切削时应尽量减小切屑长度，有效控制切屑状态，可以适当选择齿数多的铣刀，以减小切削力。

(3) 选择适合加工镍基高温合金的螺旋角，可以减小

切削力及有效排屑。

(4) 选择合适的整体硬质合金基体材料及涂层。

铣削刀具的示意图如图2所示 (L1为刀具标准长度, L2为避空长度, L3为刀具整体长度, 均采用国际公认的标准长度)。

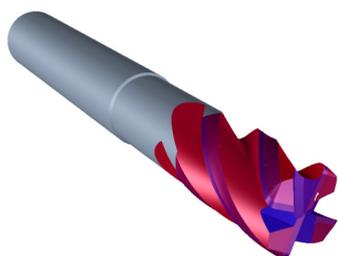
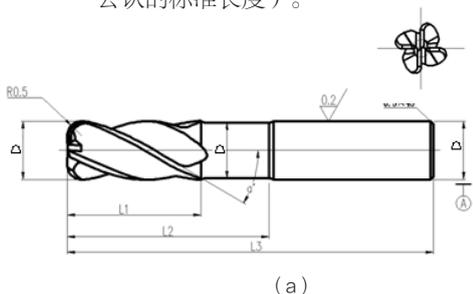


图2

### 3. $\phi 6$ 、 $\phi 8$ 铣刀使用技巧

$\phi 6$ 、 $\phi 8$ 铣刀针对的是零件内部封闭的内孔加工, 加工过程中需采用螺旋插补方式进行铣削。整体硬质合金立铣刀通常的使用方式是侧铣与端铣, 都是开放式加工, 对铁屑形状和排屑并没有特殊和太高的要求, 但封闭的内孔加工对排屑要求高, 铁屑形状、排屑是加工中影响加工质量和刀具寿命的主要因素, 因而需要在整体硬质合金铣刀选择时进行合理的优化选择, 以适合于封闭的内孔加工。

(1) 通过对铁屑形状与铣刀槽形的反复对比切削试验, 结合镍基高温合金的铣削特点, 最终确定铣刀槽形选择为锥形变槽深式容屑槽, 其切削力、切削温度、铁屑形状 (C形屑), 相比其它标准整体硬质合金铣刀都得到了极大改善。

(2) 通过对  $45^\circ$ 、 $38^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $25^\circ$ 、 $20^\circ$  螺旋角的铣刀进行

大量的切削试验, 最后确定选择  $35^\circ$  与  $40^\circ$  的双不等螺旋角, 其排削性能最好。

(3) 采用不等距齿和变刃倾角结构的铣刀, 改善了切削性能和铣削平稳性。

### 4. $\phi 12$ 铣刀使用技巧

$\phi 12$ 铣刀是针对零件外部形面加工设计的, 因在加工中需要采用摆线加工的铣削方式加工零件外部型面, 使用整体硬质合金铣刀加工零件时, 刀具寿命短, 加工硬化严重, 切削力大, 零件尺寸和表面粗糙度不易保证, 故需要对整体硬质合金刀具的几何角度进行合理的优化选择。

(1) 刀具几何角度选择背宽  $0.8\sim 0.9\text{mm}$ , 前角  $6^\circ\sim 8^\circ$ , 螺旋角  $45^\circ$ , 刃倾角  $-3^\circ$ , 采用圆弧后角, 可以保证刀具刃口有足够的强度。

(2) 外部形面加工属于开放加工模式, 排屑可不受零件形状约束, 故可适当选择齿数为五到七齿以上的铣刀, 以有效利用切削刃数量, 提高刀具使用寿命和加工效率。

(3)  $\phi 12$ 铣刀的切削刃和底刃选择采用经过超精细金刚石砂轮磨削的精磨铣刀, 以提高铣刀表面粗糙度, 使排屑更加顺畅, 能最大限度发挥机床切削功率的使用效率, 提高金属铣削的去除率。

## 三、镍基高温合金铣削刀具几何参数和切削参数选择

### 1. 铣削刀具的参数

依据镍基高温合金加工用铣削刀具的特性, 最终选择的铣削刀具、刀片见表3, 铣刀几何参数见表4, 切削参数见表5。

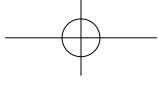
表3 铣削刀杆及刀片

加工部位	刀杆名称	刀片名称	要素分析
面铣刀	A490.40.R.05.09	SDNT09T308 ER-M31 CTC5235	盘铣刀基体为全钢制刀体, 刚性良好且主偏角为 $90^\circ$ , 前角为 $3^\circ$ , 可承受较大切削力; 刀片为硬质合金基体, 前角为 $10^\circ$
螺纹铣刀 (M12 $\times$ 1-7H、 M18 $\times$ 1.5、 M16 $\times$ 1.5、)	50821 080 50821 10		整体硬质合金 (内冷), 物理涂层 (PVD)
内孔铣刀 $\phi 6$ 、 $\phi 8$	依据加工部位、 加工特性、加工 方式, 进行优选		整体硬质合金非标铣刀 (内冷), 物理涂层 (PVD), 德国KONRAD K55F材料, 适合加工镍基高温合金材料, 采用螺旋插补铣削方式。
型面铣刀 $\phi 12$	依据加工部位、 加工特性、加工 方式, 进行优选		整体硬质合金非标铣刀 (内冷), 物理涂层 (PVD), 德国KONRAD K55F材料, 适合加工镍基高温合金材料, 采用摆线铣削方式。

表4 铣削刀具几何参数

刀具名称	刀尖半径	螺旋角	前角	后角
面铣刀	0.8	$90^\circ$	$3^\circ$	$15^\circ$
内孔铣刀 $\phi 6$	0.4	$45^\circ$	$6^\circ$	$13^\circ$
内孔铣刀 $\phi 8$	0.4	$45^\circ$	$6^\circ$	$13^\circ$
型面铣刀 $\phi 12$	0.4	$43^\circ$	$6^\circ$	$15^\circ$

(下转第93页)



# 增材制造复杂曲面结构零件的表面光整研究

中国航发动力股份有限公司 蒋松山 任小凤 吴晓锋

## 一、引言

先进航空发动机的高性能需求使得零部件向着一体化、复杂化结构发展，给零部件制造成形技术提出了新的挑战。近年来，发展迅速的增材制造技术以其无模具、快速自由成形、成形效率高等特点，成为解决航空发动机复杂结构零件制造难题的有效方法。其中，激光选区熔化（Selective Laser Melting, SLM）技术具有成形精度高、表面质量好等优势，成为航空发动机领域应用最为广泛的增材制造技术。该技术为了确保增材制造成形质量及控制成形过程中的零件变形，通常需要在激光选区成形零件的成形过程中添加支撑，零件成形后需要去除支撑。同时，其“分层制造，逐层叠加”的技术特点，使得增材制造件表面有明显的纹理特征，激光选区成形的金属增材制造零件表面粗糙度 $Ra \geq 6.3 \mu\text{m}$ ，难以满足航空发动机零件高表面质量的要求。因此，需要对异形曲面薄壁增材制造零件进行支撑去除、表面光整加工等后处理<sup>[1, 2]</sup>。

目前，薄壁异形曲面增材制造零件的支撑去除主要以人工去除为主，去除效率低，去除效果与工人的经验和熟练程度有很大关系，对于零件几何形状与尺寸精度的稳定性有很大影响。目前，在减材加工中广泛采用的

五轴联动加工中心具有高效率、高精度的特点，可以快速高效地完成异形曲面结构的加工，缩短加工时间，被加工零件几何特征的一致性高。因此，本研究拟选择五轴联动加工中心去除异形曲面薄壁增材制造件的支撑，以期提高支撑去除的稳定性及去除效率。

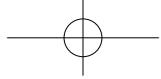
虽然改进金属粉末质量、优化堆叠成形方向、优化增材制造成形工艺能在一定程度上改善增材制造零件的表面质量，但是仍然无法完全解决增材制造零件表面粗糙的问题。粗糙的表面易产生应力集中，进而生出微裂纹，大大降低零件的疲劳性能，因此，有必要对其进行后续的光整加工处理。近年来，国内外学者研究了不同类型的光整加工方法对增材制造零件的抛光效果，包括机器人抛光、化学抛光、电化学抛光、磨粒流抛光、电解质等离子抛光等<sup>[3-5]</sup>。其中，工业机器人编程操作方便，可以实现复杂的空间曲线运动，在清理打磨工序中可以有效降低生产成本，提高零件打磨效率和质量。针对薄壁异形曲面增材制造件的结构及不同光整加工方法的特点，本研究选择机器人抛光技术进行后续的光整加工。

结合上述分析，本研究拟利用五轴加工中心去除分流环支撑，提高支撑去除效率，减少人为因素对成形件结构的影响；同时，打通增材制造薄

壁异形曲面零件的光整加工技术路线，减少光整加工所需工序，克服人工抛光引起的零件表面质量的不均匀性，确保增材制造异形曲面件表面粗糙度的一致性及其加工精度；最大程度去人工化，提高效率，降低成本，最大限度确保增材制造零件的尺寸和结构精度。

## 二、试验方法

本研究以具有异形曲面结构特征的分流环为对象，材料牌号为GH4169，成形方式为激光选区熔化技术，设备型号为BLT-S310。利用UG7.5绘制分流环三维模型，利用Magics和BP软件进行支撑添加，三维数据向二维数据的剖分，成形参数的设置等。打印过程为单向铺粉。分流环成形后进行固溶、时效热处理，固溶处理参数：950~1050℃，保温1h-3h，氩气冷却。时效处理参数：720~750℃，保温6~10h，2h炉冷到600~650℃；600~650℃，保温6~10h，真空充氩气冷却。利用DK7740叶盘线切割机进行基板与零件的分割。支撑去除采用簪子、榔头、磨头、旋转锉、定位工装及五轴加工设备KMC800-UMT，内型面抛光采用磨头、砂纸，外型面抛光借助抛光夹具（5B374/K-23106）及机器人抛光单元（ABB IRB 4600）。



### 三、研究结果及讨论

#### 1. 分流环模型建立及成形程序优化

首先，依据分流环的二维图纸，使用UG软件绘制其三维模型，如图1所示。然后运用Magics软件对分流环添加支撑（如图2所示），并进行剖分，将三维数据分解为二维数据，根据增材制造所用镍基高温合金（GH4169），选择前期优化的成形参数，借助BP软件设置分流环的成形参数，最终输出分流环增材制造成形文件。

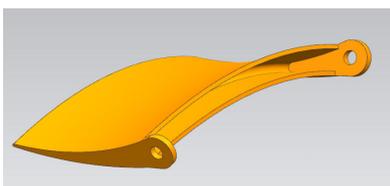


图1 分流环的三维图形

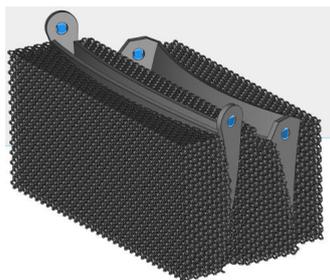


图2 分流环支撑添加示意图

#### 2. 增材制造件与基板分离

待分流环增材制造件成形后，将其从成形室中取出并清理支撑中残留的金属粉料。然后进行真空固溶及时效热处理从而改善其微观组织及力学性能，同时，以尽可能消除成形过程中的残余应力，减少零件变形。

分流环进行固溶及时效热处理后，将其固定在线切割设备上分割分流环增材制造件与基板。由于增材制造件底部与基本之间有高度约为2mm的支撑，为避免线切割过程中切割到零件或者基板，线切割用的钼丝应在距离基板1.5mm左右处进行切割。

在线切割分离基板与分流环增材

制造件的过程中，发现支撑结构设计不合理会显著影响其内部残留粉末的清理，从而使得在线切割过程中冷却液无法有效冲洗残留粉末，导致短路，使切割无法顺利进行。此外，增材制造件表面的氧化层也会造成短路，影响正常切割。基于此，采取了如下改善措施：

(1) 设计支撑时，结合零件结构，合理增加出粉孔，或采用易清粉的支撑网格。

(2) 如条件允许，手工清粉后，增加超声波清洗，必要时在超声波清洗过程中添加清洗液或用压缩空气冲刷，确保支撑中粉末清理干净。

(3) 清理粉末后，目视检查外，复杂结构零件增加内窥镜检查，确保无大量残留。

(4) 调整线切割路线设置，采用局部门正反多次切割，增大切割间隙，提升冷却液冲刷效果。

(5) 增加冷却液更换频率或增加过滤装置，保证冷却液纯净度，减少冷却液中金属粉或电腐蚀屑等杂质。

(6) 增加冷却液管路，依据零件支撑结构，对常规线切割设备冷却液冲刷效果不能有效覆盖或效果较差时，采取多管路冷却液结构，对不同位置按需增加冷却液，确保冷却液有效覆盖。

采取上述改善措施，顺利解决了分流环增材制造件与基板分离过程中遇到的短路等问题，获得了去除基板后的带有支撑的分流环增材制造件。

#### 3. 分流环增材制造件支撑去除

分流环增材制造件与基板分离后，开展分流环试验件的支撑去除试验，首先采用五轴加工设备直接去除支撑的方案，结合支撑和零件特征设计五轴加工去支撑的初步工序，加工程序如图3所示。然而，支撑与零件成形过程中采用的是相同的材料，且两者间为冶金结合，结合强度较大，且每个连续表面上的支撑相互连接，采用五轴加工直接去除时，会导致整个曲面受到不均匀的外力，使薄壁零件变形严重，去除后零件的几何精度不能满足要求。

```

1 BEGIN PGM 05-35 MM-
2 * - OPERATION: VARIABLE_CONTOUR_35 - TOOL: T0 BALL_MILL_10-
3 PLANE RESET STAY-
4 M5-
5 M140 MB MAX-
6 L A+0.0 C+0.0 FMAX-
7 TOOL CALL 0 Z 50-
8 M3 MB-
9 CYCL DEF 7.0-
10 CYCL DEF 7.1 X0-
11 CYCL DEF 7.2 Y0-
12 CYCL DEF 7.3 Z0-
13 L M126-
14 L A-62.461 C166.438 FMAX-
15 L M128 F1000-
16 L X-91.4 Y-42.109 Z116.775 A-62.461 C166.438 FMAX M3-
17 L X-85.437 Y-17.388 Z103.514 FMAX-
18 L X-85.146 Y-16.571 Z103.057 F250-
.....
7976 L X89.62 Y-23.428 Z27.384-
7977 L X90.545 Y-23.33 Z27.69-
7978 L X91.416 Y-23.346 Z28.141-
7979 L X92.197 Y-23.475 Z28.719-
7980 L X92.859 Y-23.713 Z29.401-
7981 L X93.377 Y-24.051 Z30.162-
7982 L X93.73 Y-24.475 Z30.972-
7983 L X93.906 Y-24.969 Z31.8-
7984 L X96.716 Y-42.109 Z58.917 FMAX-
7985 PLANE RESET STAY-
7986 M129-
7987 M5-
7988 M140 MB MAX-
7989 L A+0.0 C+0.0 FMAX-
7990 M9-
7991 M30-
7992 END PGM 05-35 MM-
    
```

(a)

```

1 BEGIN PGM 0501 MM-
2 * - OPERATION: VARIABLE_CONTOUR - TOOL: T0 BALL_MILL_10-
3 PLANE RESET STAY-
4 M5-
5 M140 MB MAX-
6 L A+0.0 C+0.0 FMAX-
7 TOOL CALL 0 Z 50-
8 M3 MB-
9 CYCL DEF 7.0-
10 CYCL DEF 7.1 X0-
11 CYCL DEF 7.2 Y0-
12 CYCL DEF 7.3 Z0-
13 L M126-
14 L A-42.547 C108.807 FMAX-
15 L M128 F1000-
16 L X-87.908 Y-29.83 Z117.337 A-42.547 C108.807 FMAX M3-
17 L X-85.446 Y-17.385 Z103.515 FMAX-
18 L X-85.229 Y-16.762 Z102.79 F250-
19 L X-84.835 Y-16.214 Z102.079-
.....
7976 L X90.097 Y-24.929 Z26.737-
7977 L X90.995 Y-24.744 Z27.081-
7978 L X91.822 Y-24.618 Z27.593-
7979 L X92.544 Y-24.557 Z28.252-
7980 L X93.134 Y-24.562 Z28.035-
7981 L X93.57 Y-24.635 Z29.91-
7982 L X93.835 Y-24.771 Z30.844-
7983 L X93.918 Y-24.966 Z31.801-
7984 L X93.164 Y-42.109 Z105.664 FMAX-
7985 PLANE RESET STAY-
7986 M129-
7987 M5-
7988 M140 MB MAX-
7989 L A+0.0 C+0.0 FMAX-
7990 M9-
7991 M30-
7992 END PGM 0501 MM-
    
```

(b)

图3 分流环增材制造件五轴加工去除支撑程序

鉴于直接采用五轴加工去除支撑时对零件变形造成的影响，经过分析，将支撑去除分为两个阶段：第一个阶段为支撑粗加工，利用人工方式先将支撑的主体去除，在分流环增材制造件表面仅残留零件与支撑的结合部位，即支撑根部，避免零件的严重变形；第二个阶段为支撑精加工，由于支撑主体已去除，零件表面上残留的支撑根部是相互孤立的，利用五轴加工进行去除时可显著降低零件承受的外力，将薄壁零件的变形降至最低。

通过开展支撑去除试验，总结并确定了薄壁异形曲面结构增材制造件高效去除支撑的方法，具体如下：

(1) 支撑结构设计时，考虑支撑去除工艺，对薄壁、凹角、尖边等位置，原则上不采用支撑，必须采用支撑时，减少支撑量或采取易去除结构支撑。

(2) 首先用手工方式去除分流环支撑的大部分，只残留有支撑根部，然后用五轴机床加工残留的支撑根部，或者用砂轮和砂带打磨去除。

(3) 除个别只能用手工去除支撑的部位，其他部位也可采取电加工、激光加工等加工过程中应力较小的加工工艺直接去除支撑。

其中，采用手工方式或其他低应力加工方式去除薄壁异形曲面增材制造件的支撑主体，然后采用五轴联动加工中心去除增材件表面残留的支撑根部，既可以避免分流环因支撑去除引起的明显变形，又可以确保支撑去除的一致性，为后续机器人打磨的顺利开展奠定基础。

#### 4. 分流环增材制造件机器人抛光

针对薄壁异形曲面增材制造零件连续自由曲面抛光困难、精度一致性差等问题，结合机器人抛光设备的特点，并借鉴铣削加工中刀轨生成方

法，对分流环增材制造件连续异形曲面进行抛光研究，首先根据零件结构特征，设计初步的离线抛光程序，经过多次优化，不断完善，最终使得分流环外表面粗糙度及几何尺寸符合要求，抛光流程如图4所示，并归纳总结相应的技术文件。

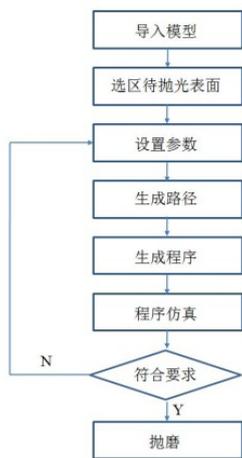


图4 机器人打磨基本流程

#### 四、结语

本文研究了分流环增材制造件后

处理过程，尤其是涉及支撑去除与连续曲面抛光的表面光整过程，试验结果表明支撑结构设计影响分流环增材制造成形件从成形仓取出后内部金属粉料的清理，成形件内部金属粉料清理不完全，极易在线切割去除基板过程中出现短路问题，从而增加基板去除的难度，影响试验进度。

研究表明，对于薄壁异形曲面零件的支撑去除，为尽可能减少成形件变形程度，将支撑去除分为粗加工与精加工两步进行：首先，手工或者特种加工等低应力去除支撑主体，残留相互孤立的支撑根部；然后，借助五轴加工去除残留的支撑根部。支撑去除后，采用机器人抛光技术对异形曲面表面进行精加工，去除五轴加工残留的刀痕等缺陷，获得高表面质量的薄壁异形曲面零件，提高其可靠性与服役寿命。该研究为具有相同结构特征的增材制造件的高效精密后处理奠定了基础。□

上接第44页

表5 主要IPC分类号说明

IPC分类号	说明
B23Q3/06	工件夹紧装置
B23Q11/00	适用于保持刀具或机床部件良好的工作状态或者适用于工件冷却的安装在机床附件
B23Q3/00	工件或刀具的夹固，支承，定位装置
B23P11/00	用不包含在其他类目中金属加工方法连接或拆开金属部件或金属物品
B23B41/06	专门适用于特殊工件的镗床或钻床或镗钻设备
B23P19/00	用于把金属零件或制品或金属零件与非金属零件的简单装配或拆卸的机械
B23Q3/08	非机动的工件加紧装置
B25F5/00	与执行操作无特殊关联的和其他类目不包括的轻便机动工具的零件或部件
B23P19/04	用于装配或拆卸部件的机械
B23P21/00	用于将多种不同的部件装配成为组合单元的机械
B24B41/06	工件支架，如可调中心架
B24B41/00	磨削机床或装置的部件
B24B47/12	用机械传动或电力
B24B27/00	其他磨床或装置
B24B55/06	在磨床或抛光机上排除粉尘的装置
B23Q7/00	专门组合于，或配置于，或专门适用于，机床有关的工件操纵装置，如用于运送，加料，定位，卸下，分级的

对比前10位技术重点，可以看出，发达国家的专利布局侧重于具有高速度、高精度、高附加值特征的金属加工机床、半导体制造装备、磨床等先进制造工艺和装备。而我国机床行业床身结构、零件的装卸机械等传统领域仍是企业重要的研发方向，与国外尚有一定差距。□

# 四轴高效加工应用

常州宝菱重工机械有限公司 张永洁

【摘要】本文提出的四轴加工是以三轴加工为核心提出的新型加工技术，产品在加工时，只需要进行一次装夹，就能在旋转轴旋转中，达到零件多面定向加工与绕轴旋转联动加工，这样不仅能减少工件装夹的次数，且有助于提升零件加工处理的精确性，以此提升零件加工的工作效率和质量。

## 1. 前言

本文以铝合金结晶器部件小面本体加工为例，传统加工工艺路线是四面加工完成后，再上工装加工，水孔和密封部位尺寸偏小（1.6mm，如图1所示），容易造成工件报废，为了减少加工成本，提高加工精度及效率，确定通过四轴加工来避免不要的损失，通过对零件的加工工艺制定、四轴工装设计、刀具选择及ATC联动、数控程序编制等方法，并完成零件的批量生产。

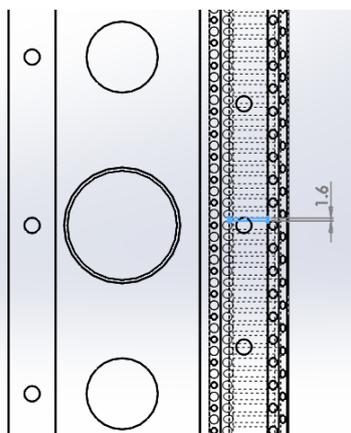


图1

## 2. 零件材料的分析

此零件材料为6061-T651，其主要化学成分为：

Cu0.15-0.4-，Si0.4-0.8，Fe0.7-，Mn0.15-，Mg0.8-1.2-，Zn0.25-，Cr0.04-0.35-，Ti0.15。材料密度：2.70g/cm<sup>3</sup>，属Al-Mg-Si系合金，具有良好的塑性和优良的耐腐蚀性。同时具有加工性能极佳、良好的抗腐蚀性、韧性高及加工后不变形、氧化效果极佳等优良特点，可用于载重汽车、船舶、航天装置、卡车、电车、模具、电子、家具、抗腐蚀性结构件等。

## 3. 零件的加工工艺制定

此零件为小批量零件，由于是铝材，切削相对容易，但加工面较多，工序多，加工使用的刀具也比较多，零件整体光洁度Ra1.6，特别是斜面上两排斜孔要求比较高，深度相对比较深，对刀具选型及切削参数制定都有较高要求，如果按传统加工方法工序多，相对位置公差难以控制，还需要

上夹具在很小斜面上加工两排水孔。本文主要介绍在四轴上5个面的加工（见图2、图3）。

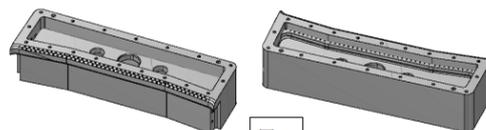


图2

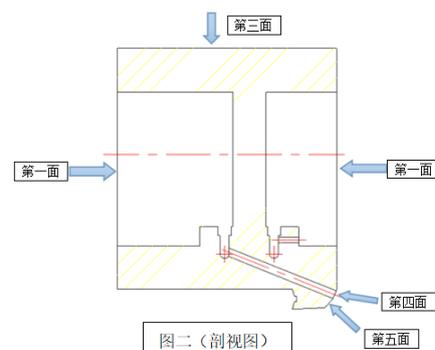


图3

## 4. 零件装配关系

从图4装配关系可看出，此零件上下面为装配面，也是基准面，因此上下两个面平面度要求高，使用四轴定位翻面加工更能保证。

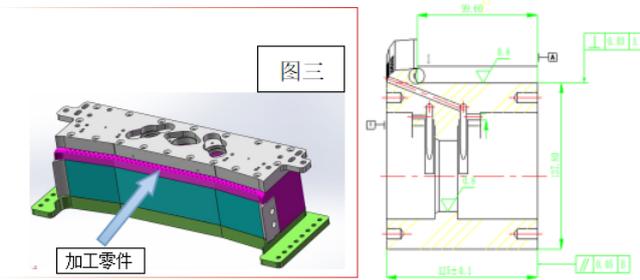


图4

### 5. 零件的四轴定位块

零件绕着A轴旋转时需工装固定，因此需在工件两端留工艺定位块（见图5），此工艺定位块中心也在A轴中心，对于工件原点坐标设置也很方便，刀具对刀也只需首次加工面上对刀完成，其它面无需对刀，提高加工效率。

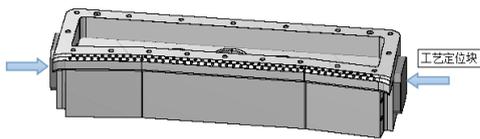


图5

### 6. 加工工艺确定

由于产品是整块板材，加工过程中会有变形，为了避免产品变形对重要装配尺寸产生影响，工艺放量及加工顺序进行了多次优化和调整，粗铣加工后，部分有公差要求的部位半精加工，其余直接精加工至成品，省去大部分半精加工工序，工序也大大缩短，大部分工序也集中在四轴加工上，将平面、外形、钻孔、镗孔、曲面等在一道工序加工完成，省去工件周转时间，减少多次装夹造成的累积误差，能有效的保证产品质量稳定性，下面表1为工艺流程：

表1

工序号	设备和工种	工序（工步）内容
10		按图要求备料
20		毛坯检验
30	HTM63/80H	按小面本体工艺块附图加工各档
40	VMC1300	上四轴，铣外形各档留单边余量1，外形2-R8处钻至φ16，平底钻深度至成
50	VMC1300	放置三天去应力
60	VMC1300	1.半精加工各档两端大平面及型腔留单边余量0.5 2.T型刀铣槽至成品，槽两处水孔至成品
70	VMC1300	精加工各档至成(各处光孔及钢丝套底孔等)，按附图钻吊装孔2-M10底孔
80	VMC1300	铣总长至成品，并铣斜面至成品
90	VMC1300	上工装，钻斜面上水孔至成品
100	HTM63/80H	钻总长两端斜台阶面上钢丝套孔底孔至成品
110	钳工	修去毛刺，棱边倒钝，攻螺纹（包括两处吊装孔2-M10）
120		按图要求检验各要素
130	外协	所有表面进行阳极氧化处理 颜色：本色 氧化厚度：10-20um 硬度：200-300 HV
140		检验，入库

### 7. 四轴工装设计

工装在四轴加工中是不可缺少的重要组成部分，设计合理的工装可以减少工人劳动强度、简化工艺工序、方便编程人员快速编制程序，缩短辅助时间，提高劳动生产效率，降低加工成本，设计合理的工装可以保证加工精度，稳定加工质量。根据图中的工件余留的定位块，再结合四轴三爪卡盘装夹状态设计简单快速有效的工装（见图6），工装图中A基准和四轴卡盘配合，上下工件方便快捷，80H7尺寸和工件两侧定位块配合，2-M8孔为固定工装与工件螺孔，防止工件移位。

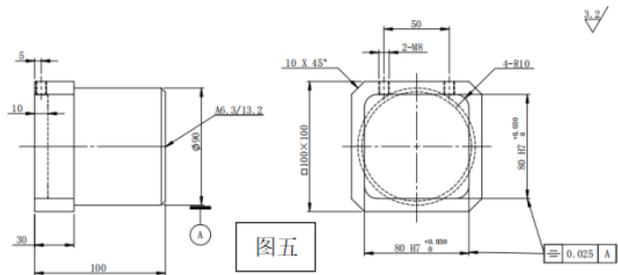


图6

图7为工件与工装配合图：图8为工件、工装和四轴三爪卡盘实际装配加工图。

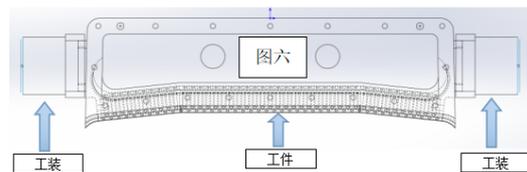


图7

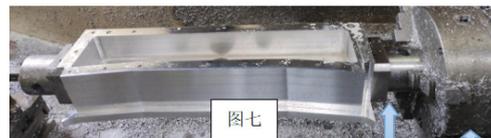


图8

### 8. 刀具选择

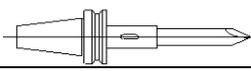
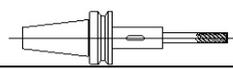
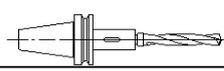
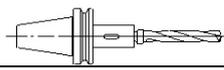
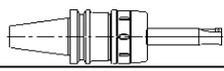
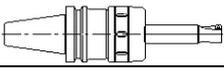
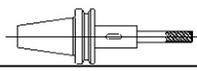
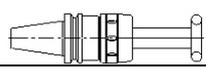
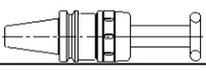
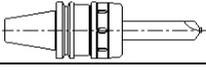
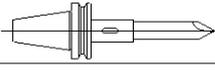
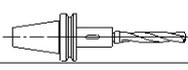
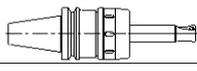
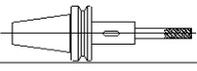
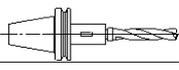
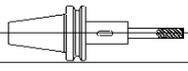
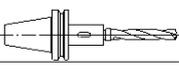
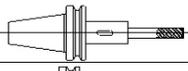
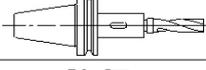
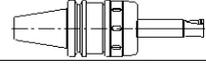
该零件为6061-T651系列铝合金，与黑色金属相比，铝合金材料在切割过程中产生的切割力相对较小，可以采用较大的切割速度，但容易形成积屑瘤。铝合金的导热系数很高，所以零件本身的温升较快，容易引起变形。因此，选择合适的刀具材料，选择合理的刀具角度，提高刀具表面粗糙度，对降低切削力和切削热非常有效，因此根据粗、半精、精加工工序区分，刀具也有所不同：

(1) 粗加工面时选择φ80~φ160mm装有铝合金专用刀片的铣刀盘，内腔加工及曲面加工时可选择R铣刀盘。

(2) 半精加工时可选择较小 ( $\phi 16\sim\phi 50\text{mm}$ ) 装有铝合金专用刀片的刀盘。

(3) 精加工时选择不带涂层切削刃锋利, 具有大的正前角, 刀具前后面表面粗糙度高的硬质合金螺旋立铣刀及专用的成型刀具来保证表面粗糙度及图纸公差要求。

表2 刀具清单

序号	刀号	刀具名称	刀号	推荐线速度 V(m/min)	刀具简图
1	T2	中心钻	2	20	
2	T3	$\Phi 25$ 硬质合金立铣刀	3	150	
3	T4	$\Phi 4.8$ 硬质合金钻头	4	30	
4	T5	$\Phi 8.2$ 硬质合金钻头	5	30	
5	T6	$\Phi 50$ 刀盘	6	200	
6	T7	$\Phi 40$ 刀盘	7	200	
7	T8	精镗刀	8	20	
8	T9	$\Phi 4$ 硬质合金立铣刀	9	100	
9	T10	$\Phi 50*6$ T型刀	10	50	
10	T11	$\Phi 67*R2.5$ T型刀	11	50	
11	T12	$140^\circ \Phi 11.2$ 硬质合金成型刀	13	50	
12	T14	$\Phi 20*30^\circ$ 倒角刀	14	30	
13	T15	$\Phi 3.2$ 硬质合金钻头	15	20	
14	T16	$\Phi 25R6$ 刀盘	16	150	
15	T17	$2.16^\circ$ 倒角刀	17	60	
16	T18	$\Phi 4.2$ 硬质合金钻头	18	20	
17	T19	$\Phi 12$ 硬质合金立铣刀	21	100	
18	T20	$\Phi 3$ 硬质合金钻头	20	20	
19	T21	$\Phi 18$ 硬质合金立铣刀	21	100	
20	T22	$\Phi 12$ 键槽刀	22	30	
21	T24	$\Phi 20$ 刀盘	24	120	

## 9. ATC刀具联动

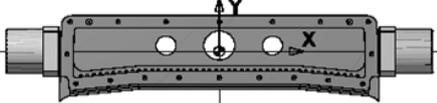
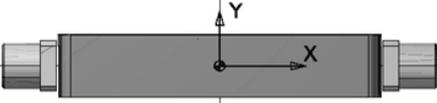
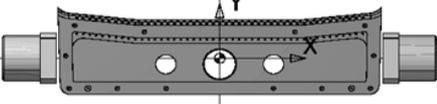
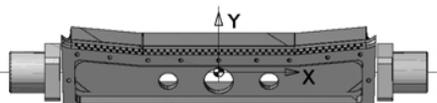
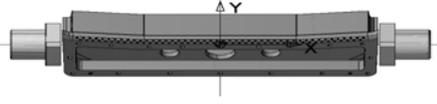
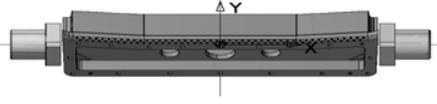
该零件在四轴上加工共需要21把刀具(见表2), 如果按照传统加工方法, 做完一个工序后再换另外一把刀具会大大影

响工件加工连续性，操作者也疲于做准备工作，效率难以提升，使用ATC自动换刀，可实现一人多台连续化加工，通过长度及半径补偿可控制局部高公差要求，满足图纸要求，提高加工效率。

### 10. 数控加工作业指导书

为了规范现场操作，保证质量，统一作业流程，使操作人员快速准确加工，结合工艺流程，提高自动化数控加工，特制作数控加工作业指导书（见表3）。

表3

作业指导书												
设备名称	数控加工中心	项目名称		工件名称	小面本体	材料		日期		版本		
设备编码	P597	工令号		图号		热处理		编制		审核		
加工条件							附图（座标系、座标原点及特殊说明）					
序号	加工内容			主程序	子程序	刀号	刀具名	备注				
1	以精加工尺寸设坐标（铣反面 A180） X以总长中心，YZ以四轴中心设原点（图一）			05711				 <p>图一</p>				
2	铣反面平行度检测				N200 0	T6	Φ50刀盘					
3	铣正面 A0（图一） X以总长中心，YZ以四轴中心设原点											
4	铣正面平行度检测				N200 0	T6	Φ50刀盘					
5	铣正面平面，余量0.5				N200 1	T6	Φ50刀盘					L=70
6	铣凹槽底面，余量0.5				N200 3	T6	Φ50刀盘	L=70	 <p>图二</p>			
13	铣下侧两端外形留0.5mm				N201 3N20	T3	Φ25硬质合金立铣刀	L=110				
14	铣下侧中间外形留0.5mm				N201 7	T3	Φ25硬质合金立铣刀	L=110				
15	铣侧面，A90（图二） X以总长中心，YZ以四轴中心设原点											
16	铣侧面平面，余量0.3				N202 5	T6	Φ50刀盘					
17	铣反面 A180（图三） X以总长中心，YZ以四轴中心设原点							 <p>图三</p>				
18	铣反面平面，余量0.5				N203 1	T6	Φ50刀盘					L=70
19	铣凹槽底面，余量0.5				N203 3	T6	Φ50刀盘					L=70
20	凹槽上侧清角				N203 5N20	T21	Φ18硬质合金立铣刀					L=75
21	凹槽下侧清角				N203 9N20	T21	Φ18硬质合金立铣刀					L=75
22	铣凹槽台阶上部，侧面余量0.3(有刀补)				N208 1	T21	Φ18硬质合金立铣刀	L=75	 <p>图四</p>			
23	铣凹槽台阶下部，侧面余量0.3(有刀补)				N208 3	T21	Φ18硬质合金立铣刀	L=75				
24	铣7.6MM直T型槽					T10	Φ50*6 T型刀	L=75				
25	铣R2.5圆弧T型槽					T11	Φ67*R2.5 T型刀	L=75				
53	下侧外形清角，留0.2(有刀补)					T3	Φ25硬质合金立铣刀	有刀补				
54	铣下侧两端外形留0.3mm					T3	Φ25硬质合金立铣刀					
55	铣下侧外形R8至成(有刀补)				N205 5	T19	Φ12硬质合金立铣刀	L=105				
56	铣下侧两侧外形至成(有刀补)				N205 5N20	T3	Φ25硬质合金立铣刀	有刀补				
57	铣下侧外形至成(有刀补)				N205 9	T3	Φ25硬质合金立铣刀	有刀补				
58	铣下侧140°斜面留0.1MM(有刀补)				N206 1	T12	140° Φ11.2硬质合金成型刀		 <p>图五</p>			
59	铣下侧140°斜面至成			N206 1	T12	140° Φ11.2硬质合金成型刀						
60	精光下侧外形(有刀补)			N205 9	T3	Φ25硬质合金立铣刀	有刀补					
61	铣22°斜面 A202（图四） X以总长中心，YZ以四轴中心设原点											
62	点22°斜面上Φ4.8孔				T2	中心钻						
63	钻22°斜面上Φ4.8孔至成				T4	Φ4.8钻头	L=80	 <p>图五</p>				
64	铣45°斜面 A225（图五） X以总长中心，YZ以四轴中心设原点											
65	点45°斜面上Φ4.2孔				T2	中心钻						
66	钻45°斜面上Φ4.2孔至成				T18	Φ4.2钻头	L=60					

## 11. 数控程序编制

数控程序编制方法有手工编制和CAM自动编制两种。手工编程是根据零件图纸分析编制顺序，数据计算，编写程序段等各步骤，主要通过人工完成编制，适用于形状简单没有曲面的零件，优点现场改写方便，容易检查编程对错，但对于几何形状复杂的零件，由于编程时计算数值多，工作量大，容易出错，程序效验也较困难，用手工编程就难以完成，因此需采用CAM自动编程。自动编程即数控程序由计算机完成，但现场操作人员难以发现问题，这对编程人员要求比较高，但这也是数控编程未来发展趋势。

该零件采用手工编程和自动编程相结合的方式编制，对于图纸上简单且标注明确的尺寸采用手工编制，这种编程的好处是可根据毛坯来料情况方便现场程序调试，避免因来料余量不一造成刀具或机床损坏，对于内部复杂部位采用自动编程减少编程人员劳动，提高劳动效率。

针对内腔圆倒角的加工（见图9），采用手工编程程序；对于顶部曲面的加工（见图10），采用软件编程程序。具体编制的程序此处省略。

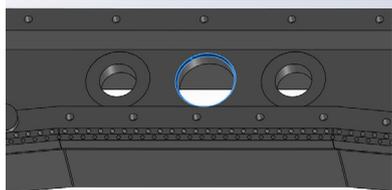


图 9



图 10

## 12. 加工中碰到的难点和解决办法

(1) 精加工内腔T型槽，切深为不规则形状，需先局部清角，避免第一刀加工时由于切深过大使刀具或工件损坏，如图11所示。

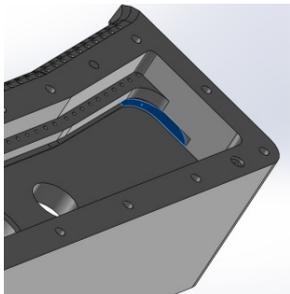


图 11

(2) 加工 $\phi 3$ 通孔，使用 $\phi 2.9$ 钻头两头钻通，如图12所示。

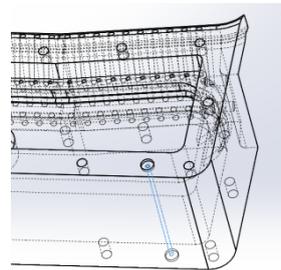


图12

(3) 石墨安装面粗加工时需侧边预留0.2mm处预钻12孔，精加工前把两侧清角加工，减少震动及干涉，如图13所示。

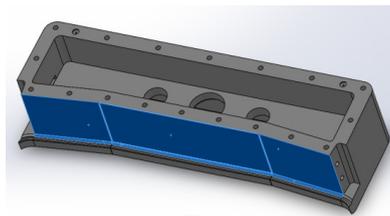


图13

(4) 注意 $\phi 38$ 孔上光出 $\phi 66$ 司必克但平面度要求高，如图14所示。

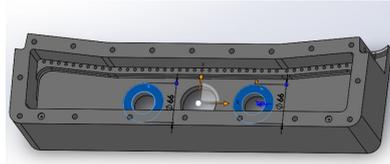


图14

(5) 加工石墨安装面成品之后加工 $140^\circ$ 凹槽，注意刀路确保表面粗糙度，如图15所示。

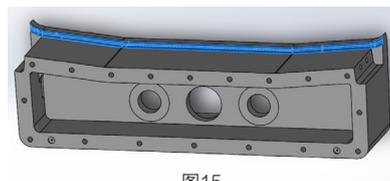


图15

## 13. 结语

在实际生产中，特别是批量性零件的加工，对于零件的加工工艺制定、工装设计、刀具选择及ATC联动、数控程序编制等都会有较高的要求，通过扩展数控系统功能，提升四轴加工的应用水平，合理的刀具使用，灵活的数控程序编制，对于效率提升都有很大的帮助。此次加工工件有8个面需加工，按常规做法需翻转2次，其它6次需万能角铣头扳角度加工，工件在翻转过程中容易产生累计误差，每次找正角度也比较费时间，而放在四轴上面加工由于四个面都以四轴中心为原点，可以保证形位公差，可以减少5次万能角铣头找正时间，一次装夹，多面一次加工完成，提高加工精度，提升加工效率。□

# 一种进口磨齿机磨削液冷却喷淋电机自动控制装置的设计

中车戚墅堰机车车辆工艺研究所有限公司 张学斌 伏宇璐 丁伟文

【摘要】NILES磨齿机是德国进口的高精尖设备，是齿轮磨齿精加工的重要设备，整个公司一共有14台进口NILES磨齿机，由于设备使用年限较长，设备使用性能下降，冷却不充分等问题，导致出现加工波纹、齿面烧伤等现象，这也是此类进口设备面临的共同难题，因此对此类问题的快速解决是我们维修人员面临的巨大挑战，成为高精度齿轮加工精度的瓶颈。

磨齿机是一种利用砂轮作为磨具对齿轮进行磨削加工的设备，其可以提高齿轮加工精度，消除热处理变形。为改善砂轮磨损以及磨削质量，在磨削加工过程中通常使用磨削液，磨削液具有润滑、冷却、渗透与清洗、防锈等作用。磨削液的润滑作用体现为，其在工件与砂轮间形成润滑膜，在维持正常磨削的同时，使得磨削力减小、磨削热和砂轮损耗降低；冷却作用体现为，磨削液能够迅速地将磨削时产生的热量快速吸收，使工件的温度下降，维持工件的加工精度；渗透与清洗体现为：磨削液可以渗透到砂轮与工件表面，增加润滑作用，同时冲洗掉砂轮气孔中的切屑，防止砂轮被堵塞；磨削液的防锈作用体现为，磨削液喷淋到工件表面并浸润机床，可保证二者不产生锈蚀现象。因此，磨削液的足量供应以及循环管路的通畅对于磨齿加工设备来说至关重要。公司磨齿加工车间具有14台Neils磨齿机，其磨削液喷淋油泵电机为西门子一体式变频电机，因变频器质量稳定性较差，频繁发生故障，且该型号电机已停产，难以维保更换，因此，本发明提供了一种模块化的Neils磨齿机磨削液喷淋油泵控制装置，以用于其磨削液喷淋油泵电机控制。

## 1. 设计方案制定

本方案的工作原理具体参照图1、图2、图3、图4所示

的示意图进行描述。

图1为该磨齿机磨削液喷淋油泵电机控制装置的应用场景图，如图所示，磨削液喷淋油泵电机控制装置安装在磨削液过滤装置上，其通过控制线路与一体式变频油泵电机以及机床控制电柜相连接，一体式变频油泵电机安装在磨削液过滤装置上，且位于磨削液过滤装置的磨削液储存油箱上方。

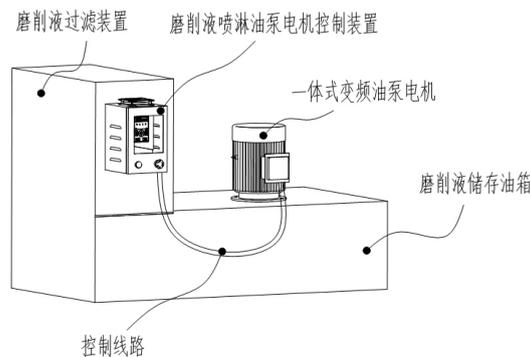


图1 磨齿机磨削液喷淋油泵电机控制装置应用场景图

图2为该磨齿机磨削液喷淋油泵电机控制装置的外观图，该控制装置为壳体式结构，变频器放置于壳体内部，在壳体的正面设置有透明观察窗、绿色指示灯、急停按钮，透明观察窗用于观察变频器运行状况及实时参数，绿

色指示灯用于指示该控制装置运行状态，当该磨齿机磨削液喷淋油泵电机控制装置运行状况正常时，指示灯常亮，当指示灯熄灭时，表示该装置断电。急停按钮用于该装置及机床的急停，当发现磨削液喷淋油泵电机或磨削液喷淋油泵电机控制装置运转异常时，按下急停按钮，则该按钮控制信息反馈至机床控制系统，并由机床控制系统识别为急停信息，使得机床立即停止动作，以防止因磨削液供应不充分导致加工产品报废等问题。在该装置壳体两侧设置有百叶窗，且在顶部设置有散热风扇，当该控制装置开始工作时，散热风扇一直处于开启状态，通过散热风扇与百叶窗的搭配使用，可将壳体内温度有效地保持在室温条件。

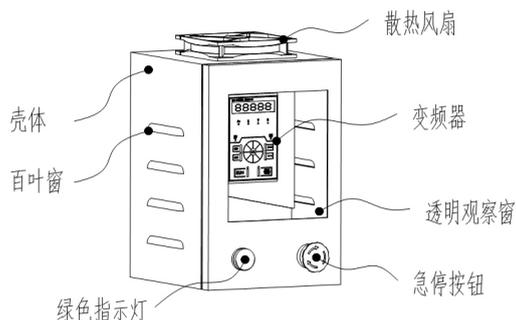


图2 磨齿机磨削液喷淋油泵电机控制装置外观图

图3为该磨齿机磨削液喷淋油泵电机控制装置的电气原理图，该装置的核心控制元件为变频器，在变频器的输入端分别接有380v电源、机床控制面板控制信号、油压检测器反馈信号、急停按钮；变频器输出端分别接有油泵电机、绿色指示灯、风扇。380V电源用于给变频器供电及驱动相关元器件，机床控制面板的控制信号用于作为油泵电机的启停控制信号，油压检测器反馈信号作为控制系统的反馈信号，变频器依据油压检测器反馈数据自行调节频率，进而调节油泵电机转速，维持喷淋管路的压力恒定。

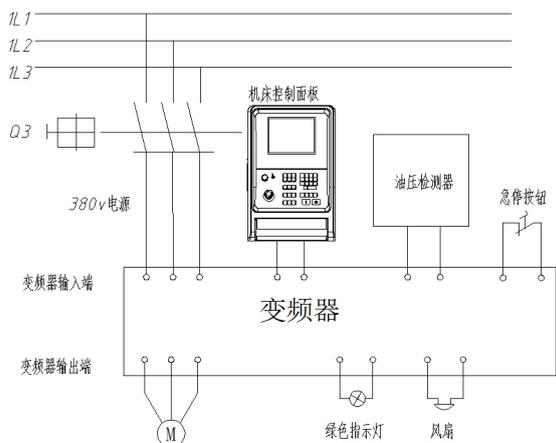


图3 磨齿机磨削液喷淋油泵电机控制装置电气原理图

图4为该磨齿机磨削液循环管路图，油泵电机通过带动油泵将过滤后的磨削液抽送至喷淋管路中，油压检测器则放置在喷淋管路中，直接对管路中的液体压力进行检测，检测压力信号则作为判断喷淋管路中磨削液供应量的参考依据。

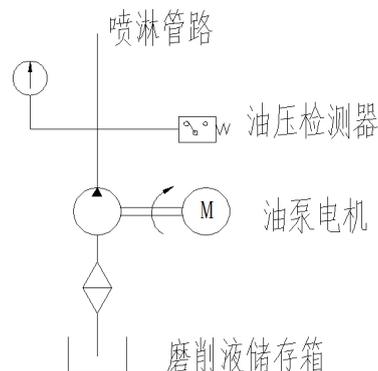


图4 磨齿机磨削液循环管路图

## 2. 设计前后对比

原先初始控制方式如图5所示，电机、油泵、变频控制装置互为一体，互为一体就带来了以下缺点：

- (1) 不方便维修和检修工作，电机或冷却泵体损坏后，需要先对变频器进行拆卸分解，才能进行电机和泵体的修理，十分不便。
- (2) 冷却流量的大小无法调节，导致有时流量偏小，冷却不充分，工件加工精度误差大。
- (3) 维修费用及进口配件采用费用昂贵。
- (4) 变频器损坏后容易引起多重故障的发生。
- (5) 使用年限到达后，变频器的损坏频率很高，根据数据统计，近三年，总计变频器损坏维修以及因变频器导致的故障一共发生20多起。



图5 设计前结构图

在长期使用过程中发生损坏、内部板路短路等各种不可控故障，一年平均就发生3起冷却电机变频器损坏维修故障，修理费用为：约2.4万元/台。而且维修难度大、修复率只有10%。而且厂家已经不生产此种变频器，只能购买升级款，货期需要20周。然后还要通过厂家对设备进行重新改进，费用极其昂贵。通过咨询德国厂家，获悉一台需要20万元的改造升级费用。通过自主研究、设计，发明一种可以独立控制的装置（见图6），实现冷却电机及泵的有效运行，有效解决电机冷却流量无法控制、费用昂贵、技术垄断等一些问题。



图6 设计后结构图

采用此设计后，截止目前，据数据统计，近三年，每年变频器控制装置损坏率为0，设备停机率为0，维修费用为0，因冷却油流量不稳定引起的精度误差事故为0。主要优点如下：

(1) 本设计的磨齿机冷却油泵电机控制装置为模块化装置，便于拆装，对于机床原结构改动小，不影响主体设备外观及结构。

(2) 可接入机床控制系统，具备较好的协调控制性

能，对机床控制系统进行操作即可控制该装置，操作便捷。

(3) 具备良好的散热性，使得该装置具有很好的使用稳定性。

(4) 结构简单、响应迅速，可对冷却流量实时调节，有效地保证了磨削液的充分供应。

(5) 保护机制完善，该装置具有急停机制，并接入设备控制系统，异常状态下即可立即停止主体设备，同时，若该控制装置异常，未能成功开启，机床立即报警，停止加工操作，防止因改造设备不稳定对主体设备造成损坏。

(6) 控制装置具有两种工作模式，可依据反馈信号自行调节电机转速，也可依据实际需求，手动设定电机转速，可适应于多种工作场景。

### 3. 实施步骤及工作原理

第一步，将该控制装置安装完毕，并将控制线路接入磨齿机控制系统，完成各项电气接线，此时，开启机床，该磨齿机磨削液喷淋油泵电机控制装置得电，并处于待机状态，绿色指示灯亮起，风扇开启。

第二步，当机床开始执行齿轮磨削动作时，操作人员点击机床操作面板上磨削液喷淋按钮，变频器开始工作，驱动电机带动油泵将过滤后的磨削液泵送至喷淋管路，油压检测器实时将管路中压力信号反馈至变频器，变频器依据压力反馈信号自动调节电机转速。当遇到某些特殊工况需改变磨削液喷淋量时，也可将该装置切换为手动模式，手动设定变频器参数以改变电机转速。

第三步，当遇到突发情况时，拍下该装置上的急停按钮或机床上的急停按钮，即可实现该控制装置以及机床主体停机。此外，由于该装置接入了机床控制系统，当该控制装置发生故障时，反馈信号异常，机床立即停止加工并报警。

第四步，加工操作结束后，操作人员点击机床操作面板上的磨削液关闭按钮，该装置停止工作，并处于待机状态，绿色指示灯常亮，风扇常开。

### 4. 总结

通过本文的设计彻底解决了NILES进口磨齿机加工波纹、齿面烧伤等问题的产生原因，经过长期使用检验后，彻底消除故障，设备故障率降为0，机床运行平稳可靠。目前此类进口磨齿机设备重大疑难故障都可以参考这次自主设计改造方案进行修理，对于进口设备的核心技术掌控具有重大意义。突破了厂家的技术垄断壁垒，完全实现自主设计研制与调试修复。同时据数据统计，预计每个维修周期可节约维修成本6.5万元，缩短设备90%的停机时间。□

# 浅析高硅铝壳体精密加工过程关键技术 质量控制

中国电科集团第38研究所 瞿凌 许业林 郑杰

【摘要】作为一种新型的电子封装壳体材料，高硅铝材料具有高导热、低密度、膨胀系数较低等优良性能，得到国内外相关领域的关注，高硅铝合金作为封装壳体材料已在航空航天领域内的多个项目中得到应用。本文介绍一种典型的高硅铝材料壳体的精密加工过程及关键技术的质量控制方法，对该类壳体的加工有一定的指导意义。

## 一、概述

高硅铝材料虽然具有优良热物性能，但该类材料制备工艺难度较大、原材料成本高。其切削性能同传统的金属材料相比存在明显差异：由于增强体的作用，材料具有较高的硬度和耐磨性且脆性大，采用传统切削加工时易产生崩边、微裂纹和表面粗糙度大等表面质量缺陷，且刀具磨损严重，精密加工过程一致是行业加工的难题。本文即针对典型的铝硅封装壳体的精密加工过程的关键技术质量控制展开详述。

## 二、加工结构分析

本文以图1所示的一种典型封装壳体为例进行分析说明。

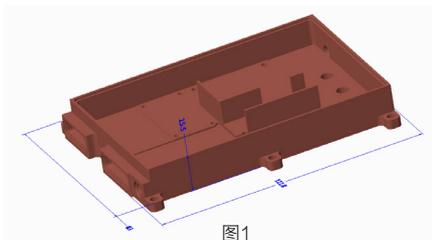


图1 该高铝硅壳体采用CELL11，

50Si-50Al，外形尺寸15.5mm×80mm×110mm，四周外形壁厚1mm，六处宽度6mm×6mm安装支耳，支耳中心通孔；正面有一处3mm×3.2mm×60mm、4-R1.5凹腔，五种不同深度及大小的台阶；三处宽为1mm、深为11mm、长度不同的筋，其中一处筋为L型，一处筋长度为5.4mm、一处长度为31.1mm；台阶面上，有4-M2和4-M2.5的螺纹不通孔。左侧面是两处不通宽度的长方形凸台及方孔，一φ6.6台阶孔、一φ5<sup>+0.05</sup>孔；右侧面是2-φ8.6圆形凸台和2-φ5<sup>+0.05</sup>通孔。

该壳体为典型的封装壳体零件，具有薄壁、深腔、多相交线、多台阶、多螺纹孔等特点，封盖处壁厚仅为0.8 mm，作为航天封装件，后续将进行封焊，完成组装后还需进行振动、高低温冲击、盐雾等严苛的环境试验，这就需要在精密加工过程中，不能产生哪怕是0.05mm缺口或者裂纹，因此对该零件的加工过程的质量控制要求较高。

## 三、精密加工过程关键技术质量控制

该零件加工整体工艺路线如图2所示。

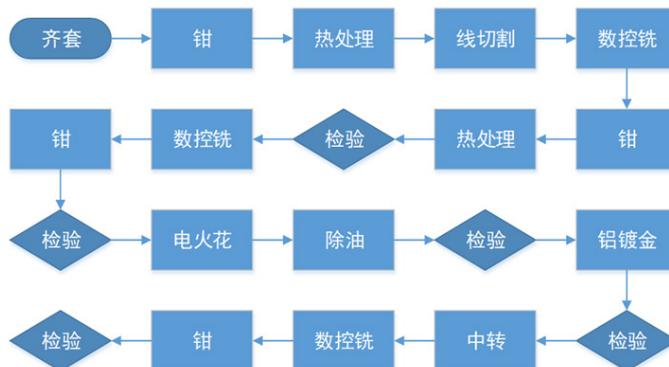


图2

### 1. 毛坯外形粗加工余量控制

高硅铝合金由于其价格昂贵, 原材料尺寸相对普通铝合金材料小很多。通常情况下高硅铝合金封装壳体 and 盖板会配套加工, 为有效提高原材料利用率以及减少毛坯加工时的刀具的损耗, 一般工艺设计时会统筹考虑壳体和盖板的综合下料方案, 通常会采用电加工的方式, 如线切割加工。线切割加工能有效地利用原材料的厚度方向, 充分利用毛坯厚度方向切割厚度较小的盖板零件, 利用原材料长度、宽度方向的切割壳体零件四周外形。

此外在毛坯外形及内腔粗加工的余量控制也较为关键, 余量过大会造成后续精加工刀具磨损过快, 导致零件崩边及缺口的产生; 余量尺寸过小在进行热加工后, 又可能会进一步影响零件造成局部变形较大, 加工余量不足的情况。综合相关实验分析, 针对采用线切割外形及厚度方向采用单边最少尺寸0.5mm的每增加50mm递增0.15mm加工余量的方案; 针对采用数控铣加工的内腔, 采用单边最少0.3mm的每增加50mm递增0.1mm加工余量的方式。

### 2. 刀具选用控制

由于高硅铝材料对刀具磨损大, 先后采用过普通硬质合金刀具、钛合金刀具、金刚石涂层刀具等。这些刀具基本只能加工2件甚至更少, 刀具容易磨损, 磨损后如不能及时发现即会造成加工粗糙度过大, 微细缺口产生, 甚至断刀, 加工质量不稳定, 效率非常低。后续采用金刚石立铣刀片进行加工及参数摸索, 刀具磨损快的问题基本得到控制。

采用 $\phi 8$ 金刚石立铣刀进行粗铣, 考虑到材料的耐磨性, 为保险起见, 将加工参数转速提高到6000 r/min, 进给量1000mm/min。加工一件后观

察, 刀具几乎无磨损, 刀具加工30h以后, 出现轻度磨损但仍能用于切削, 由于无法保持精度, 不适用精加工, 可用于粗加工。接下来用 $\phi 4$ 金刚石立铣刀进行清角和正面加工, 在此过程中对加工参数进行了调整。当转速达到6500 r/min, 刀具磨损急剧增加, 刀尖在加工首件就出现崩边, 需要换刀。转速降低到6000 r/min, 进给量400mm/min时, 加工30h后基本无变化。

序号	刀具规格	转速 (S)	X、Y进给量 (F)
1	$\phi 8$ 金刚石立铣刀	5000~6000	800~1000
2	$\phi 4$ 金刚石立铣刀	400/5000~6000	100~1000
5	$\phi 2$ 金刚石立铣刀	6000	400~500

在加工过程中需要时刻关注刀具及加工后零件的状态, 针对关键刀具的加工特征, 在临近换刀界限时, 可在显微镜下观察零件加工状态的方法, 进一步判断刀具的磨损情况, 以便于更好地进行质量状态控制。

### 3. 螺纹加工控制

高硅铝合金螺纹加工经常出现的问题是螺纹崩边, 烂牙, 螺纹底面鼓包等现象。产生问题的原因很多, 加工参数、刀具路径使用选择不当, 以及刀具磨损等都会产生此类问题。经过大量的试验验证合理的工艺方案是加工的关键。

在结果螺纹烂牙的问题上认为在攻丝加工方案的选择上采用柔性攻丝及无应力攻丝是一个很好的方向。对机攻、手工攻丝、电火花加工进行了加工验证, 发现传统的手工攻丝在螺纹加工时展现良好的效果, 且成本较低。加工效果如图3所示。

螺纹加工方式	牙型	效率/深5mm	成本	遗留问题	选择
机攻	烂牙	30s	10元	/	×
手工	符合	2.5min	1元	操作要求高, 磨损快	√



图3

针对螺纹加工崩边、破边鼓包的一系列问题, 认为适当的加工余量及加工的顺序是加工的关键, 可以采用先进行螺纹加工在去除余量的方法在一定程度上可有效地缓解降低崩边及螺纹破损的产生。该零件螺纹孔深度为3mm、底孔深度为3.5mm, 螺纹孔处的壁厚为4mm, 余量仅0.5mm, 如箱体壁厚加工到位后再攻丝, 会产生鼓包风险。故在加工时, 我们在箱体正面精加工后, 先由钳工攻4-M2和4-M2.5螺纹, 再铣反面, 未出现鼓包现象。加工改进前后的效果如图4所示。

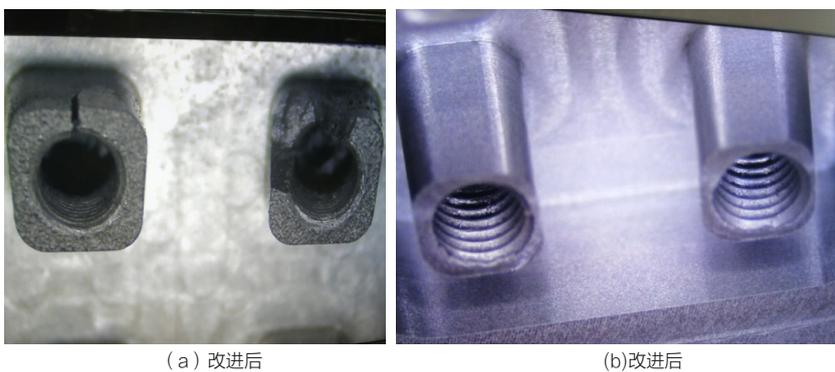
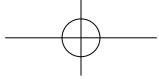


图4

#### 4. 薄壁加工控制

该壳体外形尺寸较大，内腔深，壁薄，内腔多三处隔筋，内腔中间的三处筋宽高比为1:11，加工时需防止崩边；为防止三处筋崩边，程序上采取先用 $\phi 8$ 金刚石的刀具粗铣内腔，三处筋的宽度单边各留1.5mm余量，再用 $\phi 2$ 金刚石刀具，按0.15mm一刀的铣销量一层层铣到尺寸，经验证未出现崩边现象，在显微镜下加工状态良好。

#### 5. 通孔加工控制

该壳体外形四周有6处支耳，分别各有一处 $\phi 3.5$ 安装孔位，该安装孔作为结构受力点，有较高的强度要求，不允许有丝毫裂纹的产生，但此处以往加

工中容易出现崩边现象。经进一步分析，可能是利用钻头直接钻孔的方式，导致局部受力过大，支耳侧边余量不足与材料脆性的叠加，导致孔加工后产生裂纹。本次将4- $\phi 3.5$ 孔位精加工改为立铣刀铣孔的方式避免支耳处4- $\phi 3.5$ 加工时出现的崩边现象。

#### 四、小结

高硅铝材料由于其厂家、牌号及批次的不同，在一定程度上表现出不同的力学性能及切削性能。本文对一种典型的高硅铝材料加工的技术难点进行了详细的分析，对各个关键质量控制点及加工方案进行说明，重点分析了刀具的使用、状态控制及典型的零件特征的加工技巧和参数设置，对解决类似高硅铝材料的加工提供了一定的借鉴和参考。□

上接第79页

表5 铣削刀具切削参数选择

加工部位	刀具型号	切深 (ap) (精--粗) /mm	进给量 (Z) (刀尖 圆弧0.2-0.8) /mm	线速度 (V) /m · min <sup>-1</sup>
面铣刀	A490.40.R.05.09	2.	0.15	50
螺纹铣刀 (M12×1-7H、 M18×1.5、 M16×1.5、)	50821 080 50821 10	1-1.5	0.08	30
内孔铣刀 $\phi 6$	优选刀具	2	0.1	40
内孔铣刀 $\phi 8$	优选刀具	2	0.1	40
型面铣刀 $\phi 12$	优选刀具	3	0.15	40

#### 2. 铣削刀具对加工设备要求

由于铣削时主轴切削扭矩达到了200N/m以上，加工设备必须要具备较高的动力和刚性，刀柄以热胀或高精度强力刀柄为佳，因此选用综合性能皆佳的铣车复合机床，既方便一次装夹，又可完成多个工序内容的加工。

#### 3. 铣削刀具走刀方式的选择

镍基高温合金铣削时应采用摆线铣削方式，切削时切屑宽度不断变化，断屑效果好，切削时产生的切削热低，有利于提高进给速度，减少刀具磨损。同时为提高金属去除率，切削时适合采用小切深、大进给的方式。

#### 4. 铣削刀具加工时的冷却要求

镍基高温合金铣削刀具必须采用内冷方式进行冷却，切削液应采用水溶性

的极压乳化液，以确保冷却充分。

#### 四、结束语

在优化工艺方案、合理配置刀具的基础上，经过系统考量机床选用、刀具材料、涂层、几何角度、工件的装夹方式、冷却液等诸要素，以合理选择铣削刀具，优化切削方式和切削参数为主要突破口，工件内孔粗糙度达到了Ra0.8，内孔同轴度分别为0.02mm、0.03mm，完全符合设计要求，一次交验合格率达98%，加工效率提高5倍，有效解决了镍基高温合金多型腔内孔零件加工中易产生积屑瘤和振纹，表面粗糙度差、尺寸公差不易保证、刀具磨损快、易折断等一系列技术难关，使镍基高温合金类零件加工不再成为困扰加工者的难题。□

# 汽轮机可倾瓦的工装设计与加工技术

哈电集团哈尔滨汽轮机厂有限责任公司 董礼涛 孙兆亮 郭凤桐 王世宇

【摘要】汽轮机是将蒸气的热能转化为机械功的旋转机械，广泛应用于大型动力装备中，而可倾瓦作为汽轮机里的重要关键部件，根据其特点设计一套便于定位的定位装置，同时完成可倾瓦的铣削加工。

汽轮机也称蒸汽透平发动机，是一种旋转式蒸汽动力装置，高温高压蒸汽穿过固定喷嘴成为加速的气流后喷射到叶片上，使装有叶片排的转子旋转，同时对外做功。汽轮机是现代火力发电厂的主要设备，也用于冶金工业、化学工业等动力装置中。

汽轮机组中的可倾瓦是可倾瓦轴承上的一个重要的零部件，可倾瓦轴承已经成为汽轮机中的成熟的产品。可倾瓦支持轴承通常由 3 ~ 5 个或更多个能在支点上自由倾斜的弧形瓦块组成，所以又叫活动多瓦块支持轴承，也叫摆动轴瓦式轴承。可倾瓦轴承与固定瓦轴承相比，其具有很多优点，首先每个瓦块作用在轴颈上的油膜力总是通过瓦块支点和轴颈中心，能够避免产生轴颈涡流，因此具有非常强的抗失稳能力，能适应很大的承载变化范围；还具有支承柔性大、吸收振动能量好、承载能力大、耗功小和适应正反方向转动等特点，并可延迟润滑油从层流向紊流转变。<sup>[1]</sup>

为解决某项工程中超超临界汽轮机椭圆轴承相对振动大和承载能力较

低的问题，将传统轴承改为可倾瓦式轴承，可倾瓦的加工质量直接影响日后汽轮机组的稳定性和振动性。由于要加工处圆弧与内弧不在一个圆心处，即可倾瓦的显著特点表现为内孔与外圆形成双心，即内孔与外圆存在一定的偏心距 $e$ 。所以零件没有办法在车床上独自完成加工，在加工位置处还有要求平行度为 $0.01\text{mm}$ ，所以常规定位加工方式成为加工可倾瓦无法实现的难点。

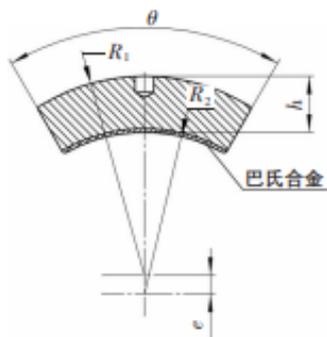


图1 可倾瓦结构

## 1. 加工设备的要求

由于可倾瓦的平行度要求极高，导致加工起来十分困难，对机床的精度也有很高要求，这样可以保证可

倾瓦的加工精度，根据实际的操作经验，机床精度一般要求为公差的三分之一，所以要求该零件加工的机床加工精度要在 $0.003\text{mm}$ 以内，所以传统的常规机床均无法达到该精度，所以加工可倾瓦我们将采用五轴加工中心机床，该类机床能够满足精度要求。

## 2. 可倾瓦内圆专用工装加工方法

### 2.1 内圆专用工装设计

根据可倾瓦的结构特点，在加工过程中，首先着重考虑其装夹问题，该零件采用常规夹具并不便于装夹，所以根据零件特点，选择其内圆面为定位面设计专用夹具，同时还需要考虑其便于测量问题，应做出一定宽度槽便于测量。根据以上特点设计出可倾瓦内圆专用工装，如图2所示。

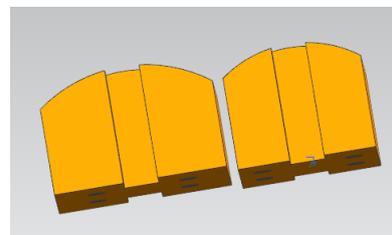
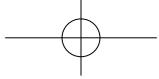


图2 可倾瓦内圆专用工装



该工装设计思路：该零件没有办法直接装夹，采用五轴加工中心进行加工，加工过程中需要稳固的装夹方式，同时需要保证装夹加工完成后与松开装夹装置后不产生变形，根据可倾瓦内圆半径所给出的数值，我们在其下方做出与其圆弧一致的工装，使可倾瓦内圆能够与工装充分接触，如图3所示。

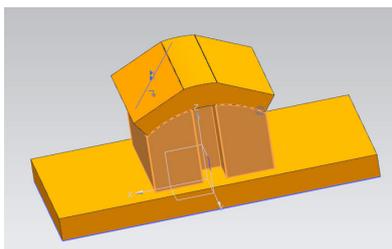


图3 可倾瓦与设计工装配合

可倾瓦固定在内圆专用工装后，还需要考虑便于测量，所以在支承工装上开有便于测量的槽，即：垫块做出两个宽槽，这样可倾瓦在固定后，通过其工装垫块槽来测量可倾瓦的加工厚度尺寸，如图4所示。

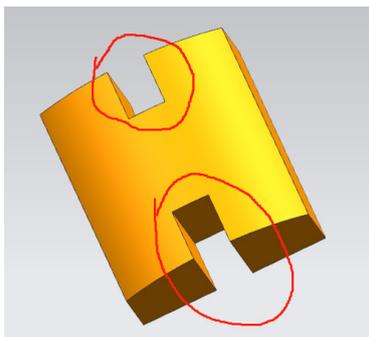


图4 工装设计--垫块槽

### 2.2内圆工装的拆分设计

可倾瓦轴承根据汽轮机尺寸的不同会有不同尺寸的内外径，为了节约成本，减少工装设计成本，实现工装的重复利用，将可倾瓦工装做成可拆分式，根据需要加工不同瓦块尺寸，更换瓦块下垫块就可以实现加工。

### 2.3垫块的固定设计

在试验中发现压板在斜面上向下压时，存在分力，容易让待加工零件向一侧移动。如下图5所示，用螺母将垫块压紧，让其固定在相应位置上。

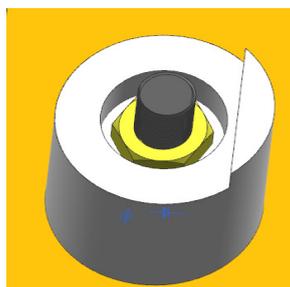


图5 垫块固定

### 2.4压板的固定设计

在固定过程中，需要将可倾瓦与垫块压紧，这样才能保证他们在加工过程中的相互位置关系，压板后端与固定后的垫块接触，使压紧压板时，不会向后发生窜动，如图所示6。

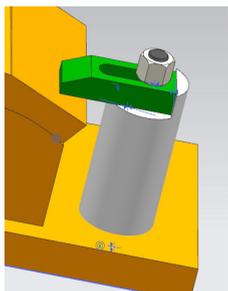


图6 压板的固定设计

根据内圆专用工装设计流程图，最终完成可倾瓦定位，如图7所示。

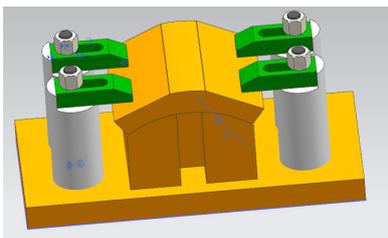


图7 可倾瓦工装图

### 3.可倾瓦的加工工艺

在机械加工工艺过程中，针对工件的结构特点和技术要求，要采用不同的加工方法和装备，按照一定的顺序依次进行加工才能完成由毛坯到零件的过程。工件的机械加工有许多方法，加工的目的是要使工件获得一定的加工精度和表面质量，工件加工精度包括尺寸精度、形状精度和表面相互位置精度。拟定可倾瓦加工路线过程中需要考虑以下几个方面：

(1) 先粗后精。在安排加工顺

序时应将各表面的粗加工集中在一起首先进行，主要目的是切除各表面上的大部分余量，及时发现毛坯缺陷，提高生产效率；然后再依次集中进行各表面的半精加工和精加工，保证各主要表面达到图样要求。

(2) 先主后次。工件的加工应先安排加工主要表面，后加工次要表面，因为主要表面往往要求精度较高，加工面积较大，容易出废品，应放在前阶段进行加工，以减少工时浪费，次要表面精度要求较低，又与主要表面有位置要求，应在主要表面加工后进行加工。

(3) 减少工件装夹次数，保证工件表面间的位置精度。<sup>[2]</sup>

由于不同机床的加工状态，同一机床上不同的工装装夹位置及机床的状态均有可能影响到零件的精度，如何消除加工外的积累误差。

为了消除积累误差，安装工件前，需要将工装上圆弧面进行一次加工，并测量工装平行度是否达标，然后在相同条件下，加工可倾瓦，保证了加工条件的一致性。

### 4.结语

无论使用哪种专用工装，工装本身制作精度要求都很高，每块瓦块装配精度要求也非常高，控制好这些并注意文中提出的加工中的几个问题才能很好地完成可倾瓦块偏心外圆的加工。通过生产实践的广泛应用，加工可倾瓦块外圆时，设计并应用有效的专用工装，能解决可倾瓦块偏心外圆加工时的装夹和测量难点问题，降低加工难度，提高生产效率。<sup>[3]</sup> □

#### 参考文献

- [1] 杨晓伟.660 MW 亚临界汽轮机可倾瓦轴承碾瓦事故分析[J].发电设备,2016年5月:188-193;
- [2] 程萍.可倾轴瓦块的加工和测量技术研究[J].制造技术与机床,2015年3月:118-121;
- [3] 南飞艳.可倾瓦块加工方法的研究[J].机械工程师,2013年第10期:176-177;

# 大型多工位压力机立柱连接梁装置的研制

通用技术齐齐哈尔二机床有限责任公司 傅岩 周胜德 刘洪成 张长亮 江崇民

【摘要】大型多工位压力机立柱连接梁装置用于解决多工位压力机在承受偏载力工作时，立柱框架产生的不均匀变形问题，从而改善多工位压力机冲压精度稳定的保持性。

## 一、项目研制背景

多工位自动冲压生产线用于钣金件和结构件的冲压生产，特别适用于汽车覆盖件高速多工序冲压加工，包括纵梁在内的重型结构件也可在大吨位的多工位压力机上生产。随着新能源汽车和新车型的不断升级换代，汽车制造企业为提高产能，降低人工成本，急需适应小批量、多品种的高速高效冲压设备，原有的单一大批量冲压生产，正在向多样小批量型转化。为节约换模调模时间，高速高效的大型多工位自动冲压生产线正在不断进行优化设计改进，以提高其广泛的冲压工序适应性和生产实用性。

多工位自动冲压生产线每分钟生产次数最高可达25~30次，生产效率是自动化线的2~3倍，具有智能化、高速化、复合化、节能环保很多优势。

多工位自动冲压生产线是以多工位压力机主机与周边系统组成的全自动生产线设备，能够实现自动上料、工位间传送、冲压生产及下料的功能。由自动化上料系统、多工位压力机主机、三坐标传送系统和下料系统组成。整线构成见图1。

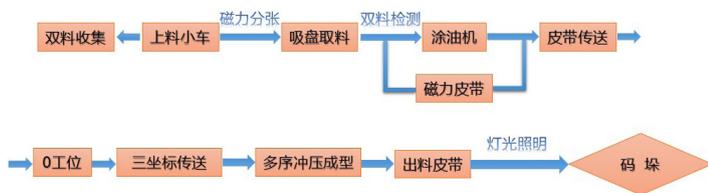


图1 多工位自动化冲压生产线构成图

其中物流方向如图1所示，从图中左侧开始上料系统（包括上料小车、涂油机等）中，真空吸盘，将已经在磁

力分张器作用下分离开的料片逐一抓取，放置在磁力皮带上，依次通过涂油机进行涂油工序，再次经过皮带传送进入到工作区域，通过O工位之后，利用三坐标传送在各工序间依次沿物流方向进行传送，经过出料皮带后码垛运送。这就是多工位自动冲压生产线的物料传送结构。

多工位生产线中的多工位压力机主机由上横梁、立柱、滑块、工作台、底座经预紧形成封闭框架，其中包含4根立柱，用于连接上横梁和底座，形成封闭框架，保证整机在承受冲击载荷时的具有足够的刚度。立柱本体为箱型焊接结构件，上下端经八组十六个定位键分别与上横梁、底座按设定位置定位，再由4根拉紧螺杆自上而下穿过上横梁、立柱、底座，按规定数值预紧螺母，从而组合为闭式框架成为压力机的刚性机身。

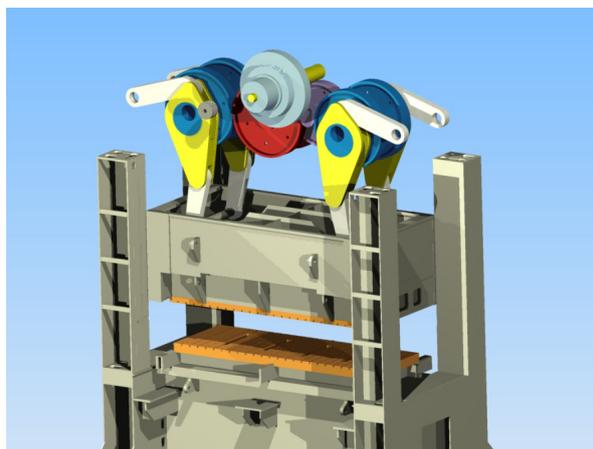
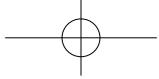


图2 多工位压力机传动系统

滑块沿着立柱上导轨做上下往复运动，这个运动距离即为滑块行程。由于多工位压力机的工作特点是按物流方



向布置4~6套模具进行拉伸、切断等冲压加工，每一工位受力并不相同，决定4根立柱的受力情况不均衡，在偏载冲压加工条件下，立柱会发生形变，影响滑块的运动精度，进而影响冲压件成形质量。

## 二、技术方案

2021年，齐二机床自行研制具有30spm高速工作节拍的TDL-4 1600型多工位自动冲压生产线。该机设有5工位，在第一、第二工位设有数控液压，配备卷料和垛料三合一上料系统，并可通过切换，进行钢板和铝板的上料冲压加工。在满负荷结构设计、高速生产节拍、制件质量高且稳定、整线自动化控制、配备远程运维系统等方面具有独特优势，拥有完全自主知识产权，经专家鉴定，其核心关键技术具有国际先进水平。



图3 通用技术齐二机床TDL-4 1600型多工位自动冲压生产线

在机械压力机行业中，按照设计标准定义，机身刚度1/8000属于特指数值，意义为按照要求折算，在8000mm范围内的滑块下台板与工作台上台板分别产生的最大变形数值不超过1mm，视为刚度合格。在冲压加工中，机身变形对于冲压精度和模具寿命影响较大，并且直接影响成型件质量。而机身变形主要反映为框架结构的变形，其中立柱变形是非常重要的部分。为解决现有多工位压力机冲压加工时立柱变形的问题，本设备创新设计了适用于大型多工位压力机的立柱连接梁装置。该装置有效减少了立柱在多工位压力机偏载式冲压加工时的变形问题，保证立柱导轨精度，进而提高冲压件成型质量，并且具有安装简单、维修维护方便的特点。

大型多工位压力机立柱连接梁装置，由立柱左连接梁、立柱右连接梁、定位键和螺栓组成。立柱左连接梁安装在左前立柱与左后立柱中间，立柱右连接梁安装在右前

立柱与右后立柱中间，采用键定位，螺栓固定。具体结构见图4。

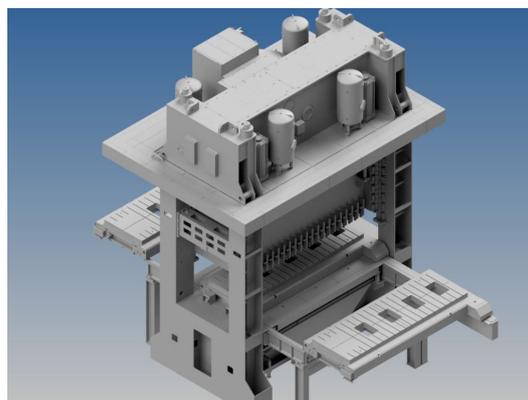


图4 多工位压力机主机三维设计图

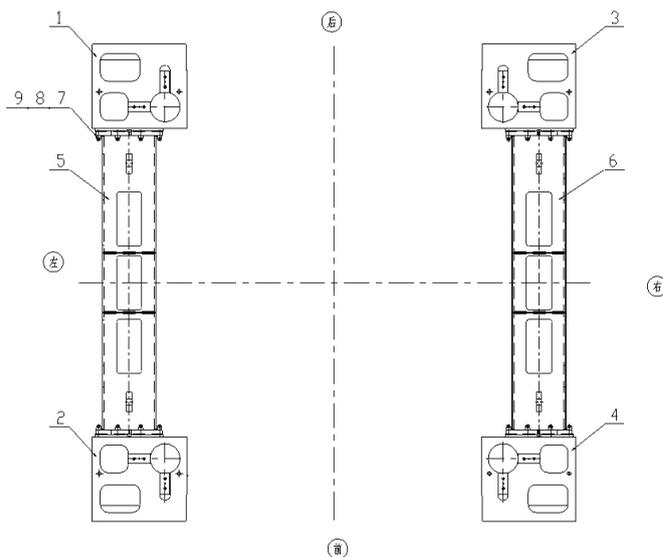


图5 立柱连接梁的安装示意图

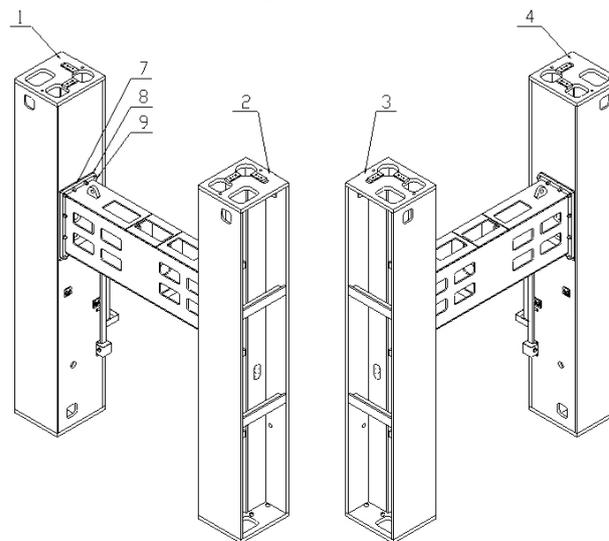


图6 立柱连接梁的安装示意图

1-左后立柱，2-左前立柱，3-右前立柱，4-右后立柱，5-立柱左连接梁，6-立柱右连接梁，7-定位键，8-调整垫，9-螺栓

由图5、图6安装示意图所示，大型多工位压力机立柱连接梁装置，包括立柱左连接梁（5）、立柱右连接梁（6）、定位键（7）、调整垫（8）和螺栓（9）。在安装现场，首先将上横梁、立柱、底座、工作台、滑块安装到位，四根立柱上下端经八组十六个定位键分别与上横梁、底座按设定位置定位，再由四根拉紧螺杆上下贯通，按规定数值预紧螺母，组合为闭式框架成为压力机的刚性机身。在左前立柱（2）与右后立柱（1）中间安装立柱左连接梁（5），按照现场实际数值测量间隙，磨削调整垫（8），使立柱左连接梁（5）与两侧立柱紧密结合，以定位键（7）进行定位，最后拧紧螺栓（9）固定。再继续安装立柱右连接梁（6），安装在右前立柱（3）与右后立柱（4）之间，调整和固定方式与左侧相同，调整垫（8）调整合适后，以定位键（7）进行定位，最后拧紧螺栓（9）固定。在多工位压力机整体安装完成后，根据实测数值，调整立柱导轨与滑块导轨的间隙，保证间隙符合设计要求，本装置放置的两处立柱连接梁能够很好的保证立柱导轨精度，在不增加立柱钢板用料的前提下，提高立柱刚度，减小立柱在多工位压力机工作时的变形量，特别是解决了在多工位压力机偏载式冲压加工时的立柱变形问题，有效保证立柱导轨精度，进而提高冲压件成型质量。

经过有限元分析计算，结合长期100%满负荷做功和1/8000的刚度要求，进行多次优化，建立力学模型，进行压力机主机结构强度、刚度和抗偏载能力的有限元分析

计算，采取上述方案能够有效提高立柱在承受加工时的刚度，减少立柱导轨的变形量，使立柱导轨与滑块导轨的间隙保持在稳定状态。

### 三、机加及装配工艺

立柱和连接梁采用Q235-A钢板焊接，在筋板上预留若干方孔用于减重及电气线路的布置施工。采用XK2860数控龙门镗铣床及TK6926数控落地镗铣进行加工，制定专用工艺规范，保证立柱上下结合面和连接梁结合面的形位公差要求。

装配过程中，在4根立柱拉杆按预紧力要求预紧后，使框架形成预紧力，立柱与连接梁中间预先设计保留单侧约5mm间隙，经过实际测量数据，配磨两组共10件调整垫，使立柱连接梁与立柱结合面紧密结合，达到支撑的效果。

### 四、实际使用效果验证

通过实际使用的检测和验证，在已经投入使用的TDL-4 3200型、TDL-4 2500型、TDL-4 1600型多工位压力机的实际工作中，主机整机刚度达到1/8000的设计要求，在不大幅增加钢材用量的条件下，通过本装置有效减小了立柱变形，提高立柱导轨精度保持度，确保滑块运动导轨间隙更趋于理想状态，有效保证了钣金件的冲压质量。□

## 资讯

### 烟台环球举办第十五个师傅节系列活动

9月9日下午，烟台环球机床装备股份有限公司第十五强企业师傅节表彰大会暨第四节“工匠大讲堂”在公司多功能会议室召开。



表彰大会上，参会领导向一年来获得区级以上各种荣誉称号的优秀员工、公司第二届“环球工匠”、在公司第23届

技能大赛中取得优异成绩，以及在2021-2022年度技术革新项目中获得奖项的员工、优秀师徒颁发了荣誉证书和奖金。三名获奖员工分别发言，四对新结对师徒签订拜师协议。

为了努力提高员工的技能水平，公司自上世纪末开始每年举行一次员工技能竞赛，自2008年以来又设立了企业的“师傅节”，让立足平凡岗位为企业发展做出过突出贡献的师傅们同人民教师一样享受鲜花和掌声的祝福；2019年开始在企业内部评选“环球工匠”，实行三年动态管理，与市级、省级劳模形成三级工匠管理体系，带动员工自主创新创效活动不断取得新成绩。

目前公司现有省级首席技师2人，技术能手3人，山东省数字技术行业大工匠1名；市级产业领军人才1名，大工匠2名，工匠1名，首席技师8名，技术能手17名；企业“环球工匠”1名，员工创新工作室拥有专利16项。

（烟台环球 供稿）

# 动臂镗孔快速装夹工装的制造与应用

泰安嘉和重工机械有限公司 安宝峰 赵忠刚

【摘要】本文简述了以往的动臂镗削装夹及找正的方法与存在的不利因素，阐述了镗削动臂的新式专用工装夹具的主要构成机构及关键机构的设计原理和制造要点，并叙述了该工装的应用方法与注意事项。该工装夹具设计新颖、制做简单、操作简捷、校正高效、定位准确、装夹可靠；在提高镗削动臂工效的同时，更好地保证了动臂的加工位置度的尺寸精度，开辟了镗削动臂类产品装夹定位的新方向。

动臂（如图1所示）是挖掘机工作装置的主要结构件之一，其后轴套孔及两端面、上耳板孔、下耳板孔和前端头孔及其内档均需镗削加工。由于其外形复杂，下料件尺寸存在差异，导致其组队间隙难以实现一致，使其整体尺寸在焊接完成后会有不同程度的变化，致使其在镗削时的定位基准不够稳定，使得每件动臂在镗削装夹前都要经过对其前端头、后轴套和上、下耳板的装夹位置进行繁琐的借料校正，需花费较多的时间，使镗床的待机时间较长；且对镗工的技术水平要求较高。虽然现在业内有些单位也设计了大同小异的装夹工装，但由于其设计粗糙、制做简陋，只能作为一种基本稳件的辅助装夹定位装置，存在着校正费时、操作复杂，且无法实现自动借料、无法快速定位等不足之处，长期以来一直制约着该类产品的加工效率和借料精度。通过近阶段对该类产品加工工艺及操作现场的持续跟踪研究，本人发明了一套新型的镗削动臂的装夹校正工装，可以实现对动臂的快速装夹定位（如图2所示），使动臂的装夹、校正过程实现了快速、准确、可靠、简捷的理想目标，且降低了对操作者的技能要求，较好地提高了动臂类的镗削校正和装夹工效。现以镗削08动臂为例将该类工装的设计和应用介绍如下。

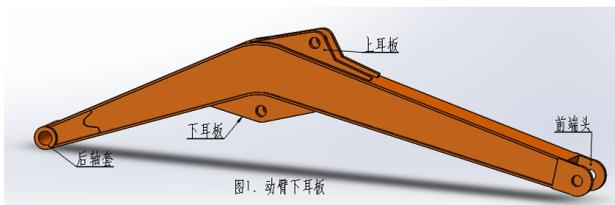


图1 动臂下耳板

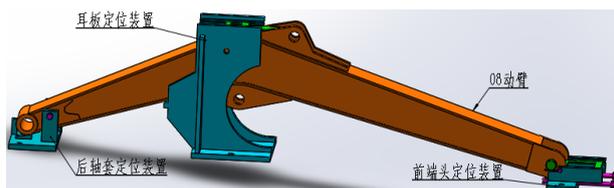


图2 动臂装夹全景

## 1. 动臂的加工要求及焊接变形现状和镗削定位装夹分析

后轴套、上耳板、下耳板和前端头各孔径均有5mm加工量，且后轴套两端面和上耳板、下耳板、前端头的内档均单面均有1mm加工量，加工完成后，除各孔直径及其各加工面均须符合图纸的粗糙度及尺寸精度外，其各部位的纵向垂直中心面还必须与动臂的纵向垂直中心面尽量重合，偏差不得大于1mm。

由于动臂存在着焊接变形，各内档的余量不够稳定，有时会增大到2.5mm，且还有偏离动臂纵向垂直中心面的情况；另外，焊接变形导致其各部位的孔位也不够完全一致，08动臂的偏差通常在2mm左右。为此，动臂在装夹完成后，镗孔时，在保证孔心距的条件下，尚需依其原始孔作为该孔的校正基准；由于各耳板和前端头组队间隙的不一致性，纵然加上了撑拉筋，该部位的焊接变形依然存在。

通过上述分析，动臂的定位工装必须在保证前端头内档和后轴套两端面的纵向垂直中心面均与动臂的纵向垂直中心面共面，且后轴套须定位稳定；由于动臂焊后变形量

的误差存在2mm的跳动值，因此，必须将前端头的定位装置在动臂的纵向上保持浮动的可调性，在左右和上下方向上保持稳定性。对于上耳板、下耳板的内档定位机构必须是能够实现同步借料的结构才可，两个定位结构均需要采取有可调性能的锥形结构。上耳板和下耳板的内档单侧预留加工量是1mm，耳板内档沿动臂纵向的垂直中心面与前端头内档及后轴套的两端面沿动臂纵向的垂直中心面（即动臂的纵向垂直中心面）的共面误差最大允许值为1mm。因此，上耳板和下耳板的内档定位板在定位动臂后，其与耳板内档的间隙侧的最大间隙不得大于1mm，否则，需要对耳板进行整形处理，这也实现了对动臂的镗前检测。这里，上耳板和下耳板内档的定位插板均设为两侧锥形式，前端宽度比对应内档毛坯尺寸小2mm，插板的中间至后端的导向段比其定位的对应内档尺寸大2mm；使用时，上、下耳板内档的定位插板插入内档的长度要目测一致，使有间隙侧的间隙大小基本统一，以达到均衡借料。另外，为便于加工，前端头和后轴套的孔中心高度在装夹后上也要保持一致，在加工过程中可以在镗削完成前端头后，直接移动工作台而不移动主轴箱高度，开至后轴套孔轴心处，只是简单校正一下水平方向的左右等态，即便开始镗削。

## 2. 各定位装置的简介

根据上述对该型动臂的加工要求及焊接变形现状和镗削定位装夹分析，为实现动臂的各部位加工尺寸符合图纸要求，其前端头定位装置、后轴套定位装置及耳板定位装置具体设计如下。

### (1) 前端头定位装置

前端头定位装置的其整体组成内容如图3所示，其中的前端头耳板

孔定位芯轴采用45钢，对其进行调质260~300HB处理，外圆面进行淬火处理45~50HRC并磨削，其直径比动臂前端头侧板的耳板毛孔尺寸小0.03~0.05mm即可，这样的间隙配合状态既能使工件达到定位准确，又能使定位紧固工件后对芯轴快速取出。垫板用厚度3mm的Q235材质的钢板制做即可，在装夹动臂过程中，右旋螺栓锥形销，使其锥面顶起托板，当动臂的前端头被托板托起0.03mm左右时，芯轴必然与垫板存在了间隙，均衡地顶紧两侧的顶丝，使工件处于被夹紧的状态；此时抽出芯轴、取下垫板。垫板起着防止底座立板被芯轴磕伤的作用。托板须采用45钢制做，且须淬火处理45~50HRC，保证足够的刚性，使用过程中，螺栓锥形销右旋时，其锥形面会将垫板顶起，并托起前端头。下次装夹工件时，先左旋螺栓锥形销，使托板与垫板的前端头回归到初始状态。

前端头内档定位插板在底座的导向板条之间可以人为地抽拉移动，其与动臂前端头接触的那一段为锥形状态，前端宽度比动臂前端头的毛面内档小2mm，后端导向段的宽度比动臂前端头的毛面内档大2mm，因为动臂前端头的毛面内档的整体加工余量为2mm。

它的底座结构较为复杂，属于焊合件，具体结构如图4所示，它由一个底板、两个立板、两个挡块和四个导向板条组焊而成。其中导向板条是在立板内档加工后组焊上的，立板的安置垫板的那一段也是要在焊后加工的，当然，立板和底板焊后是要先加工底板底面的。两立板间的加工宽度比前端头内档定位插板的宽度大于0.03~0.6mm，其加工深度满足组焊导向板条的范围即可。

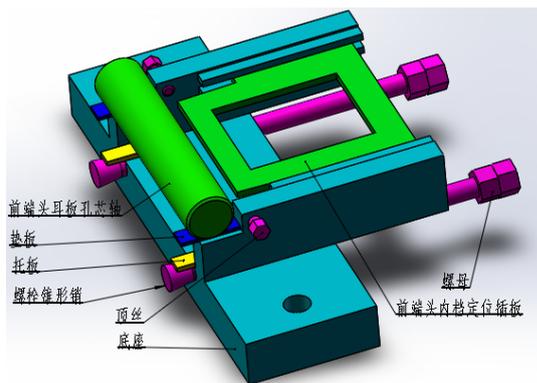


图3 前端头定位装置

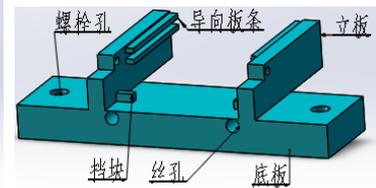
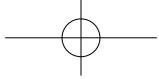


图4 底座

### (2) 后轴套定位装置

后轴套定位装置具体组成如图5所示，其中立板、挡块和垫块是组焊在底板上的，两立板垂直组焊在底板上，且以底板中心面对称布置，其之间的宽度比动臂主体的厚度大20mm即可；挡块和垫块也是垂直组焊于底板上的，挡块位于底板的中间位置，垫块也是以底板的中心面对称布置的，且两侧面距离比动臂的后轴套的镗前长度小4mm，即后轴套毛坯端面比垫块的侧面超出2mm，操作者可目测感知其后轴套的定位状态；为使动臂在装夹时，其后轴套可靠地与挡块接触，垫块的上面采取如图5所示的斜面状态。

为便于加工动臂，保证动臂后轴套中心高度和前端头耳板孔中心高度一致是必须的。若使动臂后轴套中心高度与其前端头耳板孔中心高度一致，其中后轴套定位装置中的垫块的斜面尺寸是至关重要的，这需要进行一番推导，具体可参照图6进行，在CAD中，先将前端头定位装置和前端头耳板孔芯轴、后轴套



定位装置（垫块暂不绘制）及动臂后轴套绘出，并使动臂后轴套中心高度和前端头耳板孔芯轴中心高度均为H；然后再绘制垫块即可，使其斜面与动臂后轴套外圆 $\phi D$ 相切，至于其斜面与与挡块的立面夹角是 $14^\circ$ 还是 $16^\circ$ 都不是太重要；最后结合具体情况，绘制垫块长度尺寸即可。关键点：保证动臂后轴套和前端头耳板孔芯轴的中心高均为H。

垫块的外侧面必须距底板的对应侧面距离一致，且垫块的外侧面距离是比动臂后轴套加工完成的长度尺寸小2mm的，即其外侧面与动臂后轴套的加工温差距离是1mm；底板上的两个孔必须距垫块侧面的中心距一致。

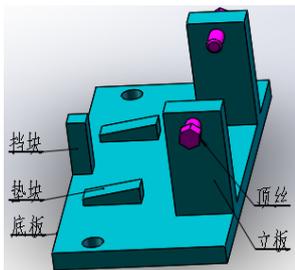


图5 后轴套定位装置

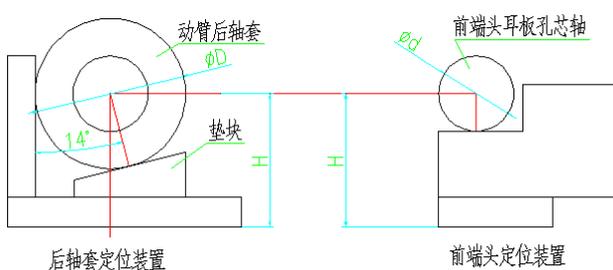


图6 后轴套垫块尺寸推导示意图

### (3) 耳板定位装置

耳板定位装置如图7所示，它主要由底板、立板、加强筋和拉筋组焊而成，并有上耳板插板和下耳板插板如前端头内档定位插板一样也在立板的导向板条组焊的定位槽中前后移动，以实现动臂上、下耳板的借料和定位，它配合前端头定位装置和后轴套定位装置共同对动臂的纵向垂直中心面实现了定位作用，也类似于三点定面的用意；此时，再旋拧两侧的顶丝对动臂夹紧。

注意：该定位装置的整体刚性必须足够，防止在定位过程中因镗削工件而发生弹性或塑性变形，确保定位稳定可靠；另外，其上耳板插板和下耳板插板均是对其对应耳板的贴套内档进行定位的，由于贴套边缘距动臂耳板的边缘有较大的边距，为使工装结构紧凑，这里的两个定位插板均设计为图8的结构样式。

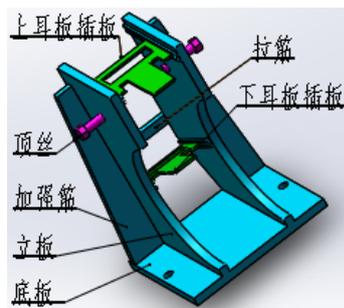


图7 耳板定位装置



图8 上耳板和下耳板插板结构示意图

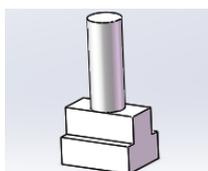


图9 T型螺栓销示意图

值得补充的是：三个定位装置的底板的孔距均与镗床工作台的T型槽距一致，且三个定位装置的紧固孔均采取了D9的公差，它们均是采用图9所示的T型螺栓定位销将其紧固在工作台上的，T型螺栓定位销对其既有定位的作用，又有紧固的作用。

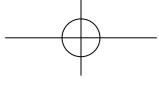
### 3. 工装的应用

该工装的应用非常简便，首先，按照08动臂的前端头、后轴套及上、下耳板的纵向中心距，在镗床工作台上简单标记一下各定位装置的大体位置；其

次，将图9所示的T型螺栓销安置在镗床工作台上所标记的位置的T型槽内，并将各个定位装置的底板孔套在T型螺栓销上，紧固后轴套定位座；再次，将动臂按照图9的方式吊装在定位装置上，使其后轴套靠实后轴套定位装置后，将耳板定位装置和前端头定位装置的位置调整到与动臂耳板和前端头分别对应的部位，全部紧固在镗床工作台上；然后，调整后轴套定位装置的顶丝，使动臂后轴套的两端面与后轴套定位装置上的垫块侧面的距离一致（均约2mm），并分别将前端头定位装置的插板插入动臂前端头的内档，使动臂前端头和后轴套的在动臂纵向的垂直中心面上实现中心面的共面，再将耳板定位装置的上、下插板分别插入到对应的耳板内档中（注意：两插板的插入长度应大体一致，并分别是靠贴左、右侧面的，因为动臂的上、下耳板的内档中心面在焊后是不可能共面的）；最后，将各定位装置的两侧的顶丝均衡地拧紧，把动臂稳妥地加紧在三个定位装置上，开始对其镗削即可。

### 4. 结尾语

该工装设计新颖，使用简单，对操作者的技术水平要求不高，在提高工效的同时，确保了工件的加工质量。制做该工装时必须确保各元件的刚性，确保其对工件加持的可靠性、稳定性和牢固性。虽然动臂的内孔直径加工余量仅有5mm，其内档和后轴套的端面加工量只有1mm，但在镗削过程中还是有较大的切削力的，顶丝必须采用M16的螺栓或大于M16的螺栓，且属于8.8级以上的；若采用Tr型的丝杆更好，使用寿命更长，且需要在各个定位装置的立板上开孔并组焊Tr螺母。该工装开辟了镗削动臂类工件的新方向。□



# 电机转子导条涨型工艺研究

中车永济电机有限公司 薛金良 张永平 陈宝庆 梅虎 张忠 陈建军

【摘要】针对现有导条手持式冲机涨紧和机械冲压涨紧存在的缺点，研制“电机转子导条滚压机”，设置相应的程序，通过滚轮滚压的方式实现对导条涨紧。

## 1. 现状

交流异步电机广泛应用于高速动车组、城际、市域及地铁等领域。鼠笼转子以其结构简单、坚固耐用、运行可靠、效率较高、维护方便、价格低廉等优点，成为交流异步电机的主型结构。鼠笼转子由转子铁心、导条、端环等部件组成，结构简单，导条作为笼条，采用挤压变形原理将其涨紧在铁芯中，避免在高速运行中出现松动、位移。现有涨紧方案主要有两种，分别为手持式冲机涨紧（见图1）和机械冲压涨紧（见图2），均存在不同程度的缺点。

（1）手动涨紧的特点：

- ① 涨紧方式多样，适用于多元化的产品；
- ② 劳动强度大。冲撞机质量大，操作员工每涨形完成一台转子需要休息20分钟；
- ③ 噪音大。对导条进行涨紧操作时，现场噪音高达110分贝，超过噪音允许的极限值80分贝，影响操作者身体健康；
- ④ 涨紧精度差。冲击力量的大小和进给速度的快慢存在差异，人为因素使导条装配一致性差，质量稳定

性不高，涨紧深度靠操作者技能，不容易控制。

（2）机械冲压涨紧的特点：

- ① 冲压效率较手持式冲机涨紧高；
- ② 劳动强度低；
- ③ 冲涨头易损坏。机械冲压自动涨紧时冲击力大，涨紧时除了现场噪音更高以外，冲涨头易折断。为降低冲涨头折断频率，每冲涨25台更换一次冲涨头；
- ④ 现场噪音大。对导条进行涨紧操作时，现场噪音高达120分贝，超过噪音允许的极限值80分贝，影响操作者身体健康。



图1 手持冲机手工涨紧

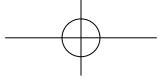


图2 机械冲压自动涨紧

## 2. 目标

本项目主要为解决转子导条涨紧现阶段存在的主要问题，研制出一台适用于多种涨紧槽形、涨紧深度的自动式转子导条滚压涨紧机。预期达到如下目标：

- （1）涨紧自动化、数字化。通过程序控制，实现转子检测对中、自动分度、旋转、滚轮压入、滚压涨紧等，实现转子滚压涨紧自动化，预留网端接口，为数字化车间建设鉴定基础。
- （2）降低工作噪音。项目完成后，确保工作噪声控制在85分贝以下。
- （3）提高涨型精度。转子导条的涨型精度由0.2mm提高到0.06mm。
- （4）能实现任意槽数铁芯导条的涨紧。项目完成后，通过预先设定



程序，确保能够适应一定直径范围内任意槽数铁芯导条的涨紧。

(5) 提高工作效率。项目完成后，提高涨紧效率40%，确保某型转子涨紧时间由手持冲机冲槽方式的115min、机械冲压冲槽方式的50min，降低到40min。

### 3. 工作原理及结构

该滚压涨型机由程序控制，可以精密分度，通过带有可以伸缩的滚轮对电机转子导条进行滚压，实现对电机转子导条的涨紧。团队成员对结构方案进行了5次优化改进，形成最优结构方案，以保证高质量完成该项目。研制历程如图3所示。

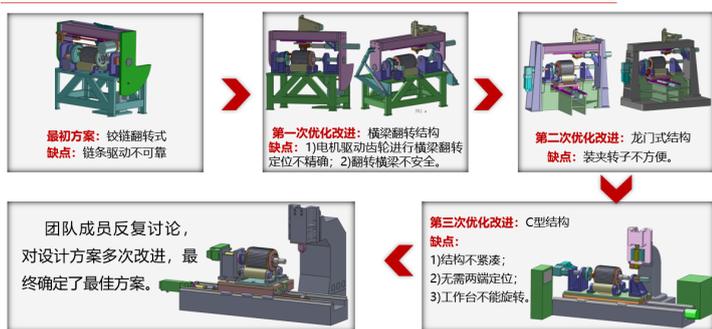


图3 研制历程图

滚压涨型机由滚压系统、工作台、床身三大部件组成，如图4所示。滚压系统由滚轮、小导轨、液压油缸和铰链等组成；工作台由支架、大垫板、支架垫板、分度轮、伺服电机、顶尖等组成；机床主体通过滑动导轨实现对工作台的支撑。滚压涨型时，电机转子通过工作台上的支撑滚轮对转子进行定位。滚轮通过液压和铰链机构实现升降，电机转子通过伺服电机进行分度，工作台通过机床主体上的滚珠丝杠实现往复运动，来实现滚轮在转子导条上的滚压。机床的先后运动顺序通过电气元件预先设定的程序来实现。

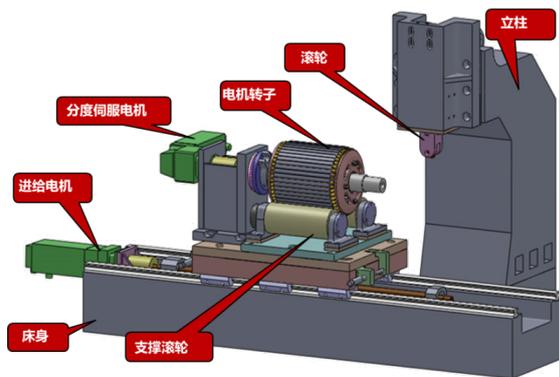


图4 转子导条滚压机结构示意图

### 4. 创新点

转子导条滚压涨型机在研制中，我们通过以下创新

点，解决了刀具易变形断裂、冲片变形断裂、涨紧力控制要求高等技术难点。

#### (1) 采用滚轮滚压涨紧方式

将传统冲撞式涨紧改为滚轮滚压式涨紧，主要体现在刀头形式和刀头材料的创新。

刀头形式由传统的冲撞刀头，改为滚刀，如图5和6所示。



图5 冲撞刀头

图6 滚刀

当刀头形式更改为滚刀式，现有的刀具材料已不足以满足使用要求，因此对刀头材料进行研制和优化，制作图7所示的试验工装，在铣床上进行了多次滚压试验，最终确定了滚刀材料和最佳热处理方案。



图7 试验工装

#### (2) 支持多工艺的滚压涨型

通过研制滚轮快速伸缩机构、支撑轮联动锁死机制、冲槽顺序可控软件，达到支持多种工艺滚压涨型的目的。

(1) 油缸驱动铰链机构，使滚轮实现快速伸缩，提升转子导条滚压机工作效率，并可实现多种滚压深度加工的切换（见图8）。

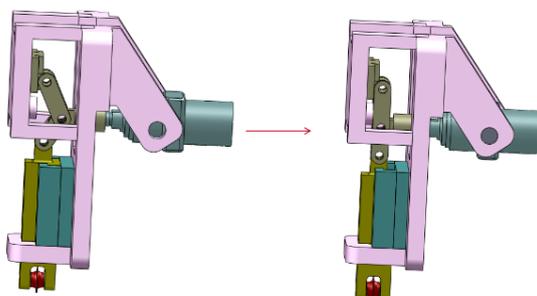


图8 铰链机构工作示意图

(2) 伺服电机分度完毕后，支撑滚轮通过摩擦片锁死，确保滚压涨型时，齿轮间隙不会对转子造成不利影

响。夹紧装置可实现多种形式端面装夹，可以装夹非传动端的圆柱面，也可以装夹传动端的锥面（如图9、图10所示）。

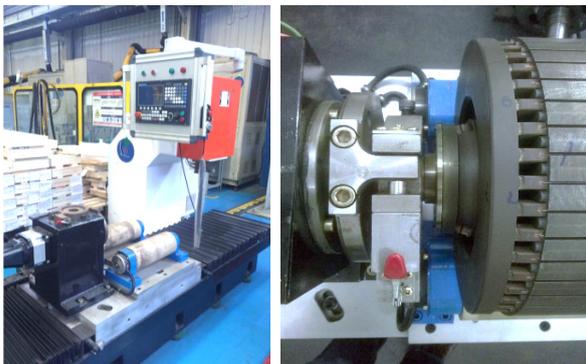


图9 支撑轮锁紧联动机构示意图

图10 夹紧装置示意图

(3) 传统涨紧方式由于设备及人员等客观因素限制，多采用顺序涨紧，该方式使转子槽变形存在积累误差，造成转子槽宽窄分布不均匀，首末槽宽度相差很大。本设备可轻松实现隔槽涨紧、对称涨紧等多种涨紧顺序，有效降低累计误差，提升产品可靠性。对加工后的产品进行磁粉探伤和万工显检测，无缺陷（见图11、图12）。



图11 磁粉探伤图



图12 万工显检测图

### (3) 滚压涨紧变形实现精准控制

通过内置变成控制、检测机构、微量旋转工作台，实现转子滚压涨紧的精准控制。

(1) 预先编好程序，控制伺服电机实现精准分度（见图13）。

(2) 滚压系统上的检测头对转子槽两端分别进行检测并将信号传递至分度伺服电机，保证滚压头在转子槽的中心，避免造成产品报废（见图14）。

(3) 工作台可以微量旋转，确保工作台运动轨迹与转子槽长度方向平行，避免转子叠压误差槽型与转子轴线不平行，而造成涨紧时转子报废。



图13 编程控制示意图



图14 检测装置示意图

## 5. 试验验证

转子导条滚压涨紧机研制完成后，针对其特性和功能，在某型产品上进行了涨紧直线度、噪声和效率验证，结果达到预期目标。

### (1) 涨紧直线度

涨紧后槽底的直线度及稳定性决定了涨紧质量，共进行了3种深度的直线度测试，分别是0.8mm、1.1mm、3mm，涨紧长度600mm，每次涨紧1台转子的46个槽，测出每根导条的槽底直线度，如图15所示。

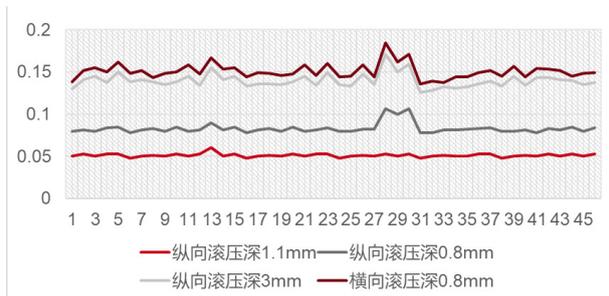


图15 直线度检测数据图

0.8mm深度测试时，46根导条的直线度都在0.03mm附近，且每根导条的深度差不超过0.015mm；极限深度试验3mm测试时，46根导条的直线度都在0.06mm附近，且每根导条的深度差不超过0.02mm。

结果表明：转子导条的涨紧精度比现有水平提升了70%，由0.2mm提高到0.06mm以上。

### (2) 噪音检测

原有技术工作噪声高达110~120分贝，远超工作环境标准要求的85分贝。采用手工冲机、机械冲压冲槽方式、转子导条滚压机三种设备，如图16、图17所示，选取相同的工作样本，冲制同等槽形，为期六天，检测工作噪声。检测结果见图18。



图16 机械冲压涨紧噪声检测



图17 转子导条滚压涨紧机噪声检测

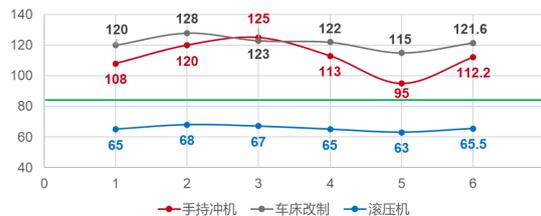


图18 噪声检测值

(下转第108页)

# 基于振动原理的螺纹车削断屑问题的研究

通用技术集团沈阳机床有限责任公司 孙雪娜

【摘要】螺纹车削缠屑的问题，一直以来都是自动线加工中的难点，特别是粘性材料，一旦出现不断屑的问题，必将导致废品率高，甚至无法实现自动化的生产。本文将振动的原理应用到了螺纹车削中，很好的解决了这个难题。实践证明，这种方法不但可以有效提升加工效率，而且还可减少废品率。

切屑不易折断的问题是自动化生产中的难解决的问题之一。加工钢类等塑性或韧性材料时容易产生锋利、狭长的带状切屑，如果不能及时解决断屑的问题，过长的切屑就会缠绕在刀具、机床部件甚至是回转的工件上。这样不但会在那里积聚大量的热量，产生热变形，影响加工质量，降低刀具耐用度，而且会严重妨碍机床正常工作，甚至会危害操作人员与设备的安全。相对于普通车削、切断及切槽，螺纹车削难以断屑的问题是最难解决的。如图1所示，螺纹切削时出现不断屑的问题。<sup>[1]</sup>



图1 螺纹车削缠屑问题

## 一、难点分析

### 1. 径向进刀的问题分析

径向进刀的螺纹车削方式中最常

用的方法，也是老式非数控车床可以采用的唯一方法。该种方式，刀具沿直径的方向进刀，进行螺纹车削。该种方式，由于刀片的两侧同时切削，极易生成难弯曲的“V”型切屑，这样以来，刀片上的断屑槽就很难起到作用，并且刀尖易产生高温，使切屑变软，进一步加剧断屑难的问题。相关实例如图2及图3所示。

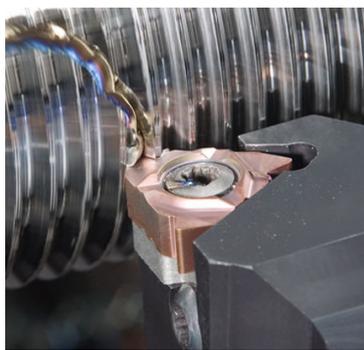


图2 径向进刀螺纹车削

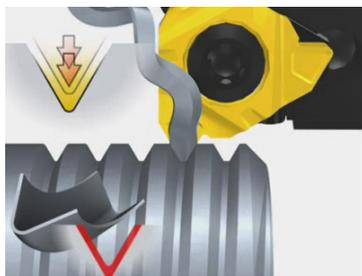


图3 径向式进刀切屑

### 2. 交替式进刀的难点分析

交替式进刀（见图4）是指刀具螺纹车削中，进刀时，第一刀类似径向进刀，此时的刀片两侧切削，切屑的形状如图5所示；接下来第二刀，进刀时刀尖向左侧进刀，此时的切屑流向左方，如图6所示；然后第三刀，进刀时刀尖向右侧进刀，此时的切屑流向右方，如图7所示；此后，刀片左右交替依次进刀，切屑也同样依次流向左右，直到完成螺纹切削。

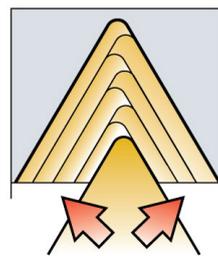


图4 交替式进刀

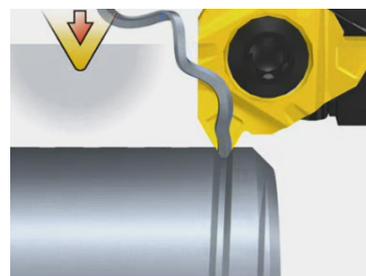


图5 交替式第一刀



图6 交替式第二刀

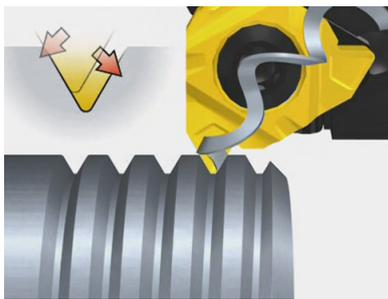


图7 交替式第三刀

通常加工大螺纹距的螺纹,但是此方式形成的切屑不但狭长,而且会左右摆动,在两个方向引导切屑,使其难以控制切屑,极易导致零件表面刮伤。

### 3. 侧向式进刀的难点分析

侧向式进刀是螺纹车削时刀片的进刀路径在螺纹牙形中的一边进刀,如图8所示。大多数数控机床都可通过编程来实现这种进刀方式,切屑类似于传统车削产生的切屑,能够容易地成形和引导。

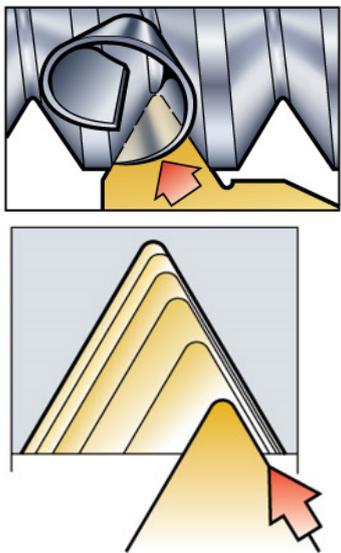


图8 侧向进刀

特别是改进式侧向进刀加工方式,该种进刀是指:螺纹车削时刀片的进刀路径在螺纹牙形角一侧形成 $1^{\circ} \sim 5^{\circ}$ 的角度方式,根据不同的刀片槽形,进刀的角度也有所不同,通常应用通用槽形(A槽形)和锋利槽形(F槽型)时,使用 $3^{\circ} \sim 5^{\circ}$ 进给角,断屑形(C槽形)的刀片,只有改进式侧向进刀才是最合适的进刀方式,并且使用 $1^{\circ}$ 的进给角(见图9)。

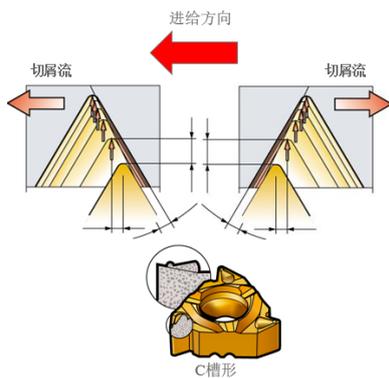


图9 改进式侧向进刀。

这种方式切屑更厚,但是只和刀片的一个侧面接触,传递到刀片的热量更少,可以得到更好的刀具寿命,因此该方式是大多数螺纹切削工序的首选。同时,这种方式可以得到更好的表面质量,特别是可以得到更好的切屑流向的控制。比如内孔螺纹车削时,可以通过进刀的角度,让不通孔的切削向孔口处排出。

但是,对于大螺距螺纹切削时,由于刀片的接触面积过大,从而导致有可能产生振动的趋势,同时一侧刀片的接触,也不如交替换进刀片两侧均匀磨损。

对粘性材料,比如:Q235、Q345、S类材料,以及非圆柱工件的车削实现断屑就显得特别困难。

## 二、解决方案

### 1. 机床与工件

本次使用的机床为沈阳机床第一机床厂车床CQ700,其优点在于:采

用双动力主轴,双刀架加工,智能托料架控制,是专门用于加工汽车车桥的专用机床,具有加工车桥效率更高、精度更高、操作更方便等优势。

本次研究所测试的零件是某大型汽车零件生产公司所做项目验收的轴头(零件名称),其材质为20MC5(法国标准)。

### 2. 刀具的选择

刀片切削时,在进给方向上始终有轴向力。而在走刀接近结束时,当刀片的切削刃仍然与工件接触时,在进给方向的反方向上也会有轴向力。如图10所示,刀具进出工件时,过大的切削力变化极易引起刀片窜动。

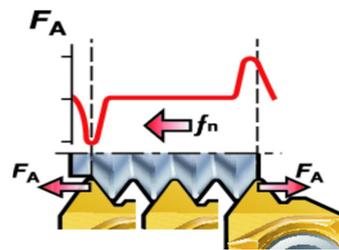


图10 在进给方向和相反方向的切削力

为了克服刀片的窜动趋势,我们选用了具有I-lock定位键、可保持高刚性的可转位刀片刀具。刀片被锁紧在刀垫的导轨上,可获得高稳定性和高刚性,从而实现精密、一致和高重复性的螺纹加工,并且在进给和相反方向刀片移动接近零。具有I-lock技术的刀杆如图11所示。

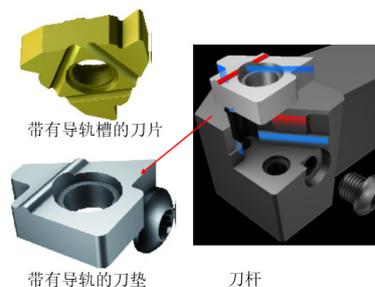


图11 具有I-lock技术的刀杆

### 三、加工方案

#### 1. 刀具的安装

倒置安装车刀如图12所示,这

样可以使切屑远离被加工的零件，从而尽可能避免了螺纹表面被划伤的风险，同时也可以使切屑远离了刀尖所在位置，这样也更有利于切屑排出。

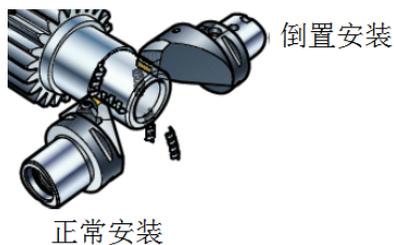


图12 车削刀具正、倒置安装对比图

## 2. 螺纹振动车削解决方案

在主轴同步旋转的同时，在X轴方向上进行有规律的振荡往复的运动方式，从而使得刀具会周期性地切入和离开工件，进而控制切屑形成。其在垂直于Z轴的平面内的切削轨迹类似椭圆形（见图13）。

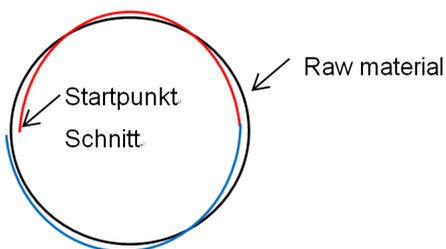


图13 垂直于Z轴平面内的切削轨迹

如图14所示，由于C槽型且1°进刀角的侧向进刀方式断屑效果最明显，因此我们在选用此种进刀方式的基础上，引入振动式的加工策略，这样形成的Z向走刀路径就从原来的直线，变成了波形线。同时，不同振动起点的波形会形成叠加，波形叠加的部分就成了强制断掉的切屑区域。

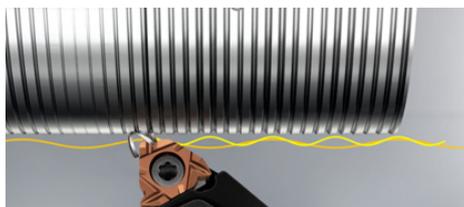


图14 振动学车削方式

总之，根据我们对切屑的成形的不同要求，我们也可以采用不同的振动频率，调整不同的振幅大小，以及振动波形不同的起始点等方式，来方便地控制切屑长度。

## 四、宏程序的使用

### 1. 宏程序的定义

宏程序是采用变量组合方式而形成的加工程序，它可

以通过灵活运用各种算术和逻辑运算、转移和循环等命令，实现对程序段流向的控制，只需变更变量的不同赋值即可完成不同零件的加工。特别适合抛物线、椭圆、双曲线等没有插补指令的数控车床的手工编程。

### 2. 异形螺纹粗精加工的宏程序

针对项目零件的要求，此次研究的项目，我们编写螺纹2.625"-16UN-2A的数控车削程序，其中：螺纹长为60mm，切削参数为线速度140m，对应的转速的660r/min，详细的程序内容如表1所示。

表1 宏程序

T0101	调用1号刀具，使用01号刀具补偿
G0X100.	刀具安全位置
Z30.	
S660 M03	主轴正转660rpm
#1=3.	
N10 #1=#1-6.	
X67.71 Z3.	
G32 Z#1 W0.31 F1.588	振动车削第1刀
#1=#1-6.	
G32 Z#1 W-0.31 F1.588	
IF[#1GE-60.]GOTO10	
G0X100	
Z10.	
#1=2.85	
N20#2=#1-3.	
X67.18 Z2.85	
G32 Z#1 W0.31 F1.588	振动车削第2刀
#1=#1-3.	
G32 Z#1.W-0.31 F1.588	
IF[#1GE-60.]GOTO20	
G0X100	
Z10.	
#1=2.74	
N30 #1=#1-6.	
X66.76 Z2.74	
G32 Z#1 W0.31 F1.588	振动车削第3刀
#1=#1-6.	
G32 Z#1 W-0.31F1.588	
IF[#1GE-60.]GOTO30	
G0X100.	
Z10.	
#1=2.69	
N40 X66.6 Z2.69	
#1=#1-3.	
G32 Z#1 W0.31 F1.588	振动车削第4刀
#1=#1-3.	
G32 Z#2 W-0.31 F1.588	
IF[#1GE-60.]GOTO40	
G0X100	
Z10.	
X66.6 Z2.69	
G32 Z-60.	最后1刀正常直线车削，削除前4刀的波形余量
G0X100	
Z10.	
M30	程序结束

此程序对应的加工的仿真刀路轨迹如图15所示。

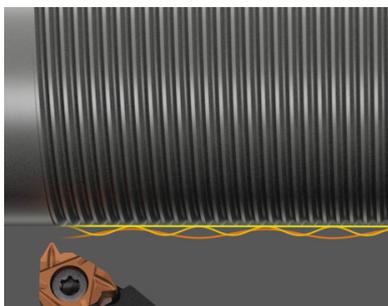


图15 加工时的走刀路线

### 3. 切屑效果对比

原方案使用传统的径向进刀的螺纹车削方式,产生的切屑狭长,很容易损坏机床的排屑器,划伤工件,并且由于缠屑严重,使用自动化的生产无法实现。第一次优化,使用了改进式侧向进刀,切屑虽有改善,但是依然很难满足自动线生产的要求。第二次采用的振动学原理的螺纹车削方式,很好地解决了断屑难的问题。螺纹车断屑情况分析如图16所示。



图16 螺纹车断屑情况分析

## 五、结论

本文采用振动式的螺纹车削方式,这种方式在自动线加工的优点主

要体现在以下几点。

(1) 减少了手动处理那些缠绕刀具、零件或堵塞排屑器的长条切屑的工作。

(2) 减少了计划外机床停机,从而提高了生产率并实现更好的自动化。

(3) 消除长切屑刮伤零件的现象,提高了零件表面质量。

(4) 这种方法可以提高零件的表面质量,并控制振动。

(5) 可以提高切削速度,主要用于较大的螺纹直径,从而提高生产率。

(6) 减小振动,从而增加刀具的悬伸量。

同时宏程序的使用,很大程度解决了螺纹车削起始阶段程序调整困难等问题。

实践证明,该方法对工厂同类产品加工有较高的借鉴价值。□

上接第104页

结果表明:滚压机的工作噪音在65dB,满足了现有工作环境标准要求。比机械冲压涨紧方式,噪音降低了46.1%,比手持冲机涨紧方式噪音降低了41.6%。

### (3) 效率验证

分别以不同涨紧方式测试了3台某型号转子铁芯的涨紧时间。手工涨紧用时115min,机械冲压涨紧用时50min,转子导条滚压涨紧用时30min(见图19)。

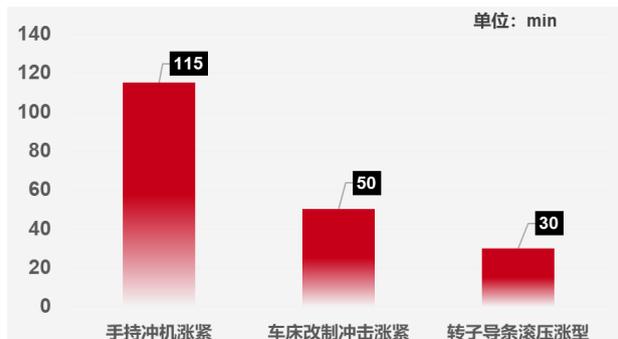


图19 涨紧工作时间

结果表明:转子导条滚压机完成一台转子涨紧工作时间比机械冲压涨紧方式,效率提高了40%,比手持冲机涨紧方式效率提高了74%。

## 6. 应用推广效果

电机转子导条涨紧工艺是电机制造中的重要环节,涨紧质量的好坏直接关系到电机的性能。本项目通过滚压涨紧替代传统冲击涨紧工艺,已成功应用于永济电机公司的某型号产品的转子铁芯导条的涨紧工序,工作噪音由120分贝降低到65分贝,导条涨紧深度所能达到的公差由0.2提高到0.06mm,涨紧深度和涨紧松紧一致性大幅度提高,操作人员劳动强度降低,电机整机质量有很大提升。截止2021年3月,已滚压涨紧某型电机转子6600余台,产生直接经济效益1000余万元,年均创造价值220万元。该项技术推广运用于永济公司风电产品后,将每年创造价值800万元。□