

WMEM

世界制造技术与装备市场

World Manufacturing
Engineering & Market

No.3 2020
2020年6月
June 2020

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

顾问: 吴柏林 于成廷
主任: 毛予锋
副主任: 王黎明 郭长城
编委:

龙兴元 张志刚 杜琢玉 何敏佳 王旭 王俊峰
王焕卫 闫宁 关锡友 芦华 李屏 李金泉
李保民 杨平 吴日 吴国兴 冷志斌 张明智
张波 陈吉红 姜华 黄正华 商宏谟 蔚飞
魏华亮

特邀编委:

刘宇凌 李先广 姜怀胜 李维谦 于德海 刘春时
李宪凯 邹春生 张自凯 崔瑞奇 徐刚 张新龙
赵博 李志宏 桂林 汪爱清 王跃宏 张国斌
初福春 王明远 刘庆乐 王兴麟 边海燕 董华根
胡红兵 武平 肖明 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: 台湾总代理-宗久实业有限公司

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

2020年第3期(总第168期)

WMEM世界制造技术与装备市场

资讯 News

10 CIMT2021招展工作全面启动等5则消息

The work of invitation of CIMT2021 full start, etc. 5 news

特别报道 Special Report

12 2020机床工具CEO在线论坛

——聚焦产业链及基础制造能力

兰海侠

The report of Machine Tool CEO Online Forum of the year 2020

专题综述 Topical Review

18 航空发动机加工设备的性能需求与验收关键技术

于建华 等

Performance requirements and acceptance key technologies of aircraft engine processing equipment

产销市场 Production & Market

31 2019年全球机床行业概况

王黎明 编译

Overview of the global machine tool industry in 2019

33 2020年一季度机床工具行业经济运行情况分析

机床协会

Analysis on the economic operation of machine tool industry in the first quarter of 2020

研发与应用 Research & Application

39 压力机顶料杆智能化生产线的研发与应用

张同兵

Research and development and application of intelligent production line of press ejector rod

42 DKX095发动机曲柄加工智能制造生产线

陈涛等

The intelligent manufacturing line for DKX095 engine crankshaft machining

45 H124数控深孔内圆磨床的研发与应用

上海机床

Development and application of H124 NC deep hole internal grinder

49 GMCu系列桥式五轴加工中心的研发与应用

白旭 姜楠

Development and application of GMCu series bridge type five-axis machine center

53 i5M8智能五轴立式加工中心的研发与应用

沈阳机床

Development and application of i5M8 intelligent five-axis vertical machining center

WMEM

世界制造技术 与装备市场

World Manufacturing
Engineering & Market

编者的话

当前，新冠疫情还未结束，未来经济充满了众多的不确定性。

疫情给全球经济和机床工具行业带来的巨大冲击，加上国际贸易、地缘政治等冲突的不断升级，必然推动全球供应链、产业链的重新布局。机床工具行业作为制造业的重要基础产业，如何应对未来的挑战，最终求得生存与发展，是当前企业家们不得不思考的重要议题。

不久前，中国机床工具工业协会组织了线上CEO论坛（详细报道见P12-P17）。论坛围绕着机床工具行业产业链的情况及基础制造能力这个主题，深入探讨如何提升我国机床工具产业基础能力，同时分析了我国机床产业的短板和弱项，并提出了如何改进和提升的一些建议。

众所周知，机床工具行业属于传统的重要基础产业，其核心技术需要长期的积累和不断创新，除此之外无任何捷径可走。目前，机床工具企业在关注产业链、供应链的同时，更应着手加快解决我们过去在产品可靠性不高、核心功能部件长期过于依赖进口等老问题，从而不断提升企业的核心竞争力。

近几年，在机床工具行业艰难转型过程中，一批企业脱颖而出，他们瞄准世界先进水平，适应市场需求，不断推出适销对路的机床产品，取得了良好的经营业绩。由中国机床工具工业协会每年定期评选的十佳企业就是他们其中的部分代表。

今年特殊疫情时期，为落实“表彰先进、树立典型，促进行业健康发展”的评选活动宗旨，中国机床工具工业协会传媒部和行业展联合征稿，从十佳和春燕奖评选所提交的产品中，挑选部分产品加强宣传。

本期我们在“研发与应用”专栏中，刊登了部分申报产品的宣传稿件，希望能为推动这些产品的市场应用和推广尽媒体的一份力量。

本刊编辑部

版权所有，未经本刊书面许可，不得转载。

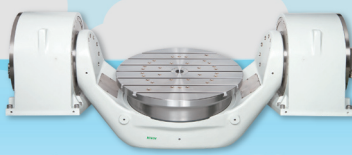
本刊已许可中国学术期刊（光盘版）电子杂志社在中国知网及其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。该社著作权使用费与本刊稿酬一并支付。作者向本刊提交文章发表的行为即视为同意上述声明。



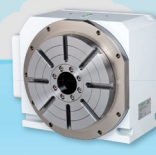
HIWIN® 上银®

工业4.0 优质伙伴

2019年荣获「日经亚洲评论」亚洲300强 第16名
2016年荣获日经Business评选为「全球上市企业综合成长力」第5名
2015年荣获福布斯(Forbes)全球创新成长百大企业第37名
入选美国NASDAQ股市机器人指数型基金(ROBO-STOX)权重排名TOP 10



Torque Motor回转工作台
RAB系列



Torque Motor回转工作台
RCV系列



2001~2020 HIWIN连续20年荣获台湾精品金质奖



滚珠丝杠
Ballscrew
滚珠花键
Ball Spline



直线导轨
Linear Guideway



单轴机器人
Single-Axis Robot



关节式机器人手臂
Articulated Robot



晶圆机器人
Wafer Robot



谐波减速机
DA10RKE®
Robot Reducer



直线电机平台
Linear Motor Stage



力矩电机
Torque Motor



直驱电机
Direct Drive Motor



运动控制器
Motion Controller
驱动器与伺服电机
Drive & Servo Motor

上银科技(中国)有限公司
HIWIN TECHNOLOGIES (CHINA) CORP.
江苏省苏州市苏州工业园区夏庄路2号
Tel: (0512) 8068-5599
Fax: (0512) 8068-9858
www.hiwin.cn
business@hiwin.cn



扫一扫
关注上银

全球营运总部

上银科技股份有限公司
HIWIN TECHNOLOGIES CORP.
www.hiwin.tw
business@hiwin.tw

关系企业

大银微系统股份有限公司
HIWIN MIKROSYSTEM CORP.
www.hiwinmikro.tw
business@hiwinmikro.tw

HIWIN中国专属经销商

天津龙创恒盛实业有限公司
Tel: (022) 2742-0909

江苏台银机电股份有限公司
Tel: (021) 5480-7108

上海诺银机电科技有限公司
Tel: (021) 5588-2303

深圳海威机电有限公司
Tel: (0755) 8211-2558

上海玖钰机械设备有限公司
Tel: (021) 5978-9980

厦门聚锐机电科技有限公司
Tel: (0592) 202-1296

昆明万辰科技有限公司
Tel: (0871) 6830-1918

乐为传动科技(苏州)有限公司
Tel: (0512) 6667-0809

HIWIN海外厂

德国
www.hiwin.de

日本
www.hiwin.co.jp

美国
www.hiwin.com

意大利
www.hiwin.it

瑞士
www.hiwin.ch

捷克
www.hiwin.cz

新加坡
www.hiwin.sg

韩国
www.hiwin.kr

以色列
www.mega-fabs.com

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

Edit-Committee Consultants: WU Bai-lin, YU Cheng-ting

President of E-C: MAO Yu-feng

Vice President of E-C: WANG Li-ming,
GUO Chang-cheng

Committeemen:

LONG Xing-yuan, ZHANG Zhi-gang, DU Zhuo-yu,
HE Min-jia, WANG Xu, WANG Jun-feng, WANG
Huan-wei, YAN Ning, GUAN Xi-you, LU Hua, LI Ping,
LI Jin-quan, LI Bao-min, YANG Ping, WU Ri, WU
Guo-xing, LENG Zhi-bin, ZHANG Ming-zhi, ZHANG
Bo, CHEN Ji-hong, JIANG Hua, HUANG Zheng-
hua, SHANG Hong-mo, YU Fei, WEI Hua-liang

Specially Invited Committeemen:

LIU Yu-ling, LI Xian-guang, JIANG Huan-sheng, LI
Wei-qian, YU De-hai, LIU Chun-shi, LI Xian-kai, ZOU
Chun-shen, ZHANG Zi-kai, CUI Rui-qi, XU Gang,
ZHANG Xin-long, ZHAO Bo, LI Zhi-hong, GUI Lin,
WANG Ai-qing, WANG Yue-hong, ZHANG Guo-
bin, CHU Fu-chun, WANG Ming-yuan, LIU Qing-le,
WANG Xing-lin, BIAN Hai-yan, DONG Hua-gen, HU
Hong-bing, WU Ping, XIAO Ming, 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

- 56 XK9734型重型轮槽铣床的研发与应用 周锐
Development and application of XK9734 heavy wheel groove milling machine
- 59 VH80 C80X1400VE阻尼减振车刀的研发与应用 松德刀具
Development and application of VH80 C80X1400VE damping and vibration reducing turning tool

产品与技术 Products & Technology

- 63 ZEISS CONTURA系统: 将质保水平提升到新的高度 卡尔蔡司
ZEISS CONTURA System: Takes the quality assurance level to a new level
- 65 浅谈3D打印与切削混合制造技术的原理与应用 林郁等
A brief discussion on the principle and application of 3D printing and cutting mixed manufacturing technology
- 68 DMU70E加工中心双刀链刀库的维修与调整 林超青
Maintenance and adjustment of double knife chain knife store in DMU70E machining center
- 71 多面体偏心孔工件加工方法研究 易肖昆等
Research on machining method of eccentric hole in polyhedral work piece
- 73 汽车发动机曲轴生产工艺探讨 张文龙等
Discussion on the production technology of automobile engine Crankshaft
- 76 FIDIA 数控系统三种精度误差补偿功能及应用方法 胡辉
Three precision error compensation functions and application methods in FIDIA NC system

海外市场 Overseas Market

- 79 智能技术驱动未来生产
——来自EMO2019的报道(上) 穆东辉 娄晓钟
The comprehensive report from EMO2019
- 100 广告索引 Advertisers Index
消息(78)

CIMT2021招展工作全面启动

由中国机床工具工业协会主办并与中国国际展览中心集团公司共同承办的“第十七届中国国际机床展览会（CIMT2021）”，将于2021年4月12-17日在北京中国国际展览中心（新馆）举办，预计展览总面积14.2万平方米。

目前，展会的招展工作已全面启动。请有意向参展的企业于7月10日后登录展会官网www.cimtshow.com 进行在线申报。有关展会组织工作进展情况，敬请关注展会官网、协会官网、协会微信公众号、《中国机床工具》报、《世界制造技术与装备市场（WMEM）》杂志发布的信息。

“数控机床互联互通协议标准与试验验证”项目验收会成功举行

2020年5月12日，“数控机床互联互通协议标准与试验验证项目”验收会在武汉召开，并通过现场和各参与单位远程视频连线的方式成功举行。



本次验收会议的专家由国家智能制造综合标准化专家咨询组专家、大学、研究院教授、重点企业用户专家组成，湖北省经济和信息化厅、财政厅等领导参加会议，中国机床工具工业协会执行副理事长郭长城、行业发展工作委员会副主任委员姜晓钟作为项目联合单位远程视频连线参会并做汇报，项目相关参与单位四川普什宁江机床有限公司、武汉华工激光工程有限责任公司等23位代表参加本次会议。

武汉华中数控股份有限公司董事长陈吉红致欢迎词并介绍了“互联互通协议”项目立项的相关背景。数控机床互联互通协议标准（NC-Link）是由中国机床工具工业协

会组织行业企业开展的《数控机床互联互通协议标准与试验验证》智能制造专项课题研究成果，该标准的研制将为我我国数控机床互联互通建立一套统一的标准，必将对我国智能工厂、智能车间的建设、智能生产的推进带来巨大促进作用。

课题技术负责人华中科技大学路松峰教授向专家组详细汇报了项目的验收总结报告，中国机床工具工业协会和嘉泰数控科技股份有限公司作为项目联合单位汇报了项目研究工作情况。

专家组成员经过资料审查、现场考察、财务审查、现场质询、核查等方式全面考察了项目的执行情况，并进行了专家评议评分。

最后，由专家组形成项目验收结论意见通过验收。

中航国际工程能力中心联合Fastems为西飞建立高端机加柔性生产线

日前，全球领先的柔性自动化解决方案供应商Fastems（芬发自动化）宣布，已与中航国际航空工程能力提升中心（以下简称“工程能力中心”）就航空工业西安飞机工业（集团）有限责任公司（以下简称“西飞”）柔性生产线改造项目正式达成合作。根据协议，Fastems将作为柔性自动化供应商与工程能力中心携手为西飞打造一条高端机加柔性生产线，用于实现多种类型的结构件从毛坯直接到成品的自动化生产。该生产线具备深度集成化、高度定制化、初步智能化等特性，是中国航空制造业进行技术革新、产业升级的一次有益尝试，有望成为航空业结构件柔性生产领域的典型应用。

航空零件的制造流程复杂，具有多品种、小批量特性，相较普通零件，航空零件实现自动化生产的难度就高出了许多。为了更好地应对挑战，实现设备利用率最大化、高度灵活生产的目标，在与工程能力中心技术团队共同研究探讨后，西飞最终确认选用Fastems旗舰版定制型柔性自动化系统——MLS。在集成6台机加设备的同时，MLS系统与自动化去毛刺单元、机内检测、视觉系统、打印机、集中切屑处理系统、中央冷却系统等一系列生产辅

助设备有机互联在一起，并搭配上2500公斤承重的高效堆垛机、其货叉间距可调，从而实现可以同时对接物料托盘和加工托盘。这条深度集成的柔性线将实现全过程自动化生产，在大大提升生产效率的同时，确保产品的一致性，降低报废率。

以航空制造为代表的一批高端行业，由于市场体量有限以及全球范围内不同用户的需求与使用工况各不相同，其产品大多具有批量小、种类多、难加工的特点。而柔性制造正是以众多“不变”核心元素—托盘交互、夹具、托盘和工件的集中存放、模块化的机械与电气设计以及智能工业软件等，成为应对“变化”市场及客户需求的关键决胜点，受到越来越多现代制造企业的关注与青睐。

国产数控系统功能测评技术研究与应用课题通过验收

2020年5月28日，国家机床质量监督检验中心（简称“国检中心”）牵头承担的“国产数控系统功能测评技术研究与应用”课题在北京顺利通过由工信部产业发展促进中心组织的专家验收。课题验收专家组组长由工业和信息化部装备工业司王建宇原副巡视员担任。



课题开展了国产数控系统功能综合技术评价方法和测试标准体系、测试支撑环境和测评技术等关键技术研究，建设了2个数控系统功能测试支撑环境，构建了数控系统功能综合测试标准体系，研制了3项数控系统功能测试规范行

业标准，创建了“集成测试—功能分解—量化评价”的数控系统功能测评体系，实现了数控系统功能的全面测评。

通过该课题的实施，形成了直观、快速、规范的标准方法来对国产数控系统的功能做出综合技术水平评价，建立的数控系统功能测评体系和行业系列标准，为用户和主机厂评价国产数控系统功能提供依据，对指导国产数控系统研发具有重要意义。

课题取得重要成果之一，获批立项了我国数控系统技术领域首项国际标准ISO 23218《机床数控系统技术要求》，并以主席国身份牵头组建了ISO/TC184/SC1/WG10“机床数控系统”国际标准化组织，实现了我国该技术领域国际标准“从0到1”的突破，提升了我国在数控系统国际标准方面的话语权，增强了国际影响力。

根据专家组绩效评价评审结论，课题最终顺利通过验收。

日本5月机床订单额同比减少52.8%

受新冠病毒疫情影响，日本机床产业设备投资环境进一步趋冷。据日本经济新闻报道称，日本机床工业协会6月9日发布的数据显示，日本5月机床订单额（快报值）同比减少52.8%，降至512亿日元，降幅高于4月（48.3%），连续20个月同比低于上年。

外需减少是订单下滑的主因。日媒表示，占订单总额6成的外需减少49.8%，降至330亿日元。对欧洲出口等持续低迷，降幅较4月（46.3%）扩大。关于中国地区，日本大隈机床表示，“目前来自液压设备的需求比较坚挺，来自工程机械的需求似乎也在增加”。中国市场的复苏也未能完全弥补日本机床外需的整体下滑。

同时，日本地区的内部需求也在减少。日媒表示，内需减少57.4%，降至182亿日元。降幅与4月的51.4%相比进一步扩大。芝浦机械表示，“来自工程机械和重型机电设备的需求全无。来自工业机械、精密加工机械和机床的需求也在下滑”。此外，在汽车行业具有优势的捷太格特（JTEKT）的负责人也表示，“很多客户改变了计划，订单正在减少”。

（来源：日本经济新闻）

2020机床工具CEO在线论坛

——聚焦产业链及基础制造能力

中国机床工具工业协会传媒部 兰海侠



2020年经历了一个不寻常的开端，一场突如其来的新冠疫情打乱了大家工作和生活的节奏，给全球的经济和机床工具行业都带来了很大的冲击和影响，国际形势和各领域的需求也都出现了很多新的变化，带来了许多的不确定性。针对行业的热点问题，中国机床工具工业协会每年都组织行业的CEO论坛，今年受疫情影响，6月18日，中国机床工具工业协会组织了线上CEO论坛，论坛围绕着机床工具行业产

业链的情况及基础制造能力这个主题深入探讨如何提升我国机床工具产业基础能力，分析我国机床产业链有哪些短板，有什么弱项，并提出如何改进和提升的一些建议。

论坛由中国机床工具工业协会王黎明秘书长主持，论坛对话嘉宾分别是中国机床工具工业协会常务副理事长毛予锋，武汉重型机床集团有限公司总经理张文桥，北京发那科机电有限公司总经理景喜瑞，江苏亚威机床股份有限

公司董事长、总经理、党委书记冷志斌，秦川机床集团有限公司副总裁刘耀，瑞士托纳斯大中华区总经理单锡林。此次在线论坛受到行业人士的广泛关注，直播在线听众达到2.3万以上，听众积极参与互动，点评分析对话嘉宾的精彩观点，为行业发展建言献策。

王黎明秘书长在总结发言中表示，眼下行业发展面临一些困难，很多行业，特别是制造业领域也都面临着同样的困难。但在困难中我们要看到成绩，看到光明，既不可妄自尊大，也不可妄自菲薄。中国还是全球第一大机床消费国和进口国，第一大机床生产国，有着相当强的自我循环能力，工业体系也非常完整。行业同仁要共同努力，要坚定信心，为行业可持续发展创出一片天地。

下面我们概括梳理了本次CEO线上论坛各位对话嘉宾的精彩发言，并凝练其主要观点，以飨读者。



中国机床工具工业协会
常务副理事长

毛予锋

关于机床产业基础能力和产业链问题的研讨，已成为当下中国制造业的热门话题，从政府官员到企业家、产业精英、从业人员、媒体人都极为关注此问题，这说明某些领域和环节可能遇到了问题，或者是外部环境发生了改变。有一个事实必须面对，突发的疫情事件将对全球范围内的经济和社会生活都会产生重大影响，对制造业带来冲击将是大概率事件。

市场需求变化凸显产业基础能力和产业链安全的重要性

目前中国机床行业面临的一个重大变化因素是需求变化，机床行业的产业属性和需求是密切相关的。

26年前，美国兰德公司曾对美国机床工业下滑的原因做过反思，其中一个最重要的发现就是：美国国内机床消费量从1981-1983年高位急剧下降，并且此后从未完全恢复。那么，此后美国机床工业为什么没有抓住全球机床市场需求激增的机会呢？兰德公司给出了根本原因，即机床工业竞争优势的基础已经发生了两个趋势性变化：一是机床技术的快速变化；二是向全球化竞争转变。机床产业的一个属性就是市场容量有限，技术变化快，现在这个问题又被提出来，这也是老生常谈的问题。

中国经济随着全球化一跃成为第二大经济体，在此过程中，中国机床工具产业也获得了规模性的增长，享受了中国制造业快速发展的红利，与自身相比取得了长足的进步。但是，目前我国机床工具产业面临着需求的重大变化。而需求是产业调整 and 发展的根本动力。

具体表现：一是需求总量缩小；二是需求结构变化明显，且呈现需求升级趋势。下面分享最近的统计数据（仅指金属加工机床）：中国2019年机床消费额223亿美元，同比下降25.3%；全球占比从2018年的31.4%降为27.2%。但仍为机床消费、生产和进口第一大国。机床消费额从2011年一直下降，而且占比也在下降，这一点值得注意。2019年进口机床72.9亿美元，占消费额33%。其中：金切机床57.6亿美元，占金切机床消费额的41%；成形机床15.2亿美元，占成形机床消费额的19%。

美国加纳德公司预测：全球机床市场需求出现下行周期。在需求下降的趋势下，全球机床行业的竞争会加剧，加之新冠疫情叠加，更凸显产业基础能力和产业链安全的重要性。需求存在是产业升级的基础，此前如此大的需求并没有缩小我国金切机床分行业中高档产品与世界机床强国的差距，问题何在？如何破解？

2019年8月26日召开了中央财经委员会第五次会议，会议强调了发挥优势提升产业基础能力和产业链水平的重要性。会议指出，要充分发挥集中力量办大事的制度优势和超大规模的市场优势，并提出几个方向：以夯实产业基础能力为根本，以自主可控、安全高效为目标，以企业 and 企业家为主体，以政策协同为保障。坚持应用牵引，问题导向，坚持政府引导和市场机制相结合，坚持独立自主和开放合作相促进，打好产业基础高级化、产业链现代化的攻坚战。会议强调，要实施产业基础再造工程，增强自主能力。要打造具有战略性和全局性的产业链，增强产业链韧性，提升产业链水平，在开放合作中形成更强创新力、更高附加值的产业链。

此次新冠疫情突发导致部分物流、交通和供应链中断，使我们再次认识到供应链、产业链的重要性，认识到哪些产业是必须保留的，哪些基础的制造能力是不完全以效率为导向，而又是必要的且必须予以战略投资的。机床工具产业是整个制造业链条中的一个重要基础，其自身的产业基础和供应链水平对制造业整体升级、实现自主可控意义重大。

产业基础与产业链构建机床工具产业生态圈

关于产业基础，针对机床产业可从两个层面去思考。

一是机床产业与制造业的关系：在制造层面，机床产业是制造业的产业基础，是制造业供应链中的关键环节，是制

造业转型升级的基石，是高端装备中的“卡脖子”产品。

二是机床产业自身的基础能力包括以下几方面：一是“四基”+工业软件；二是创新能力，包括研发投入，机制体制等；三是人才；四是知识产权保护；五是营商环境，包括资本投入、要素市场、税收制度、产业政策等。这几方面既有企业自身层面的，也有行业和社会层面、政府层面的，从这几个层面构建机床工具行业的产业基础，其核心就是技术和人才。

关于对产业链的认识，毛予锋认为，产业链是多重供应链条的复合体，供应链的连接往往是产业链生成的基础。了解机床的产业链应从供应链入手，关注三个方面：一是供应链是否畅通、运转是否有效和高效；二是供应链是否有合理的布局，如区域性布局或国内国外布局；三是供应链是否可控，是否存在“卡脖子”产品和“堵点、断点”等环节。机床产业链“卡脖子”产品和环节主要体现在以下几方面：高档产品，关键零部件，检测、在线测量装置，工业软件等。

产业基础与供应链、产业链有内在联系，只是在不同的维度体现出所关注角度不同。说到供应链，不能不提价值链和创新链。价值链是效益导向的，为客户创造更高的价值。供应链是效率导向的，为制造降低成本；同时，价值链是内部导向的，关注外部的资源向组织的流进。供应链是外部导向的，关注资源在组织内外之间的流进及流出。实际上，价值链与供应链是相互结合的。目前阶段，我国机床行业的痛点是被锁定在价值链的低端，无法取得很好的利润，无法在研发上投入，或企业自身在研发上的投资能力和投资强度的持续性无法保证，很难吸引到急需的人才和高技能的产业工人，在价格战恶性竞争的死循环中不能自拔，无能为力。这也是机床产业生态圈建设的问题，我们迫切需要改变这种局面。作为行业组织，我们愿与大家一起守望行业，一起为机床行业的发展鼓与呼，切实找到解决问题的根本之策。



秦川机床集团有限公司
副总裁
刘耀

从产业链上游着手，强化正向设计能力

提高正向设计水平，从上游入手，包括材料、功能部件，如滚珠丝杠、直线导轨、主轴、轴承、数控系统等。

秦川机床针对新能源汽车自动变速器齿轮（箱）的数字化加工装配检测，打造了包含精密复杂刀具、工装夹具、金刚滚轮、高效高精度齿轮加工机床（YKS7225）、齿轮测量仪器在内的汽车自动变速器齿轮（箱）数字制造工艺装备链。宝鸡机床中高档数控机床研发生产基地项目，对标国外高端产品，研发的BMC-500TV五轴车铣加工中心、CK7670LE数控轮毂车床、柔性生产线等产品，也已相继进入新能源轿车等新兴领域。秦川机床针对“三航两机”领域成功开发了系列航空发动机、燃气轮机机匣、涡轮盘、叶轮盘、叶片，飞机填充用复合材料，高速导弹弹舱等的专用加工设备。这些都是通过以用户需求为引领，深入研究用户工艺，针对用户典型零件，完成正向研发形成的典型成果。

用户牵头，发展新型产学研用模式

机床作为加工装备，与用户工艺紧密相关，其技术水平需要通过下游用户的使用来验证和提升。要实现用户牵头、主机导向、发展新型的产学研用模式，“用”要摆在第一位，以用户工艺为先导，“用”是越来越重要的关键环节。秦川集团积极探索科技创新模式，通过不断完善科技创新体系建设，广泛开展“产学研用合作”，加大科研经费投入，加强科技人才队伍建设，加速公司科技成果快速转化，提升公司综合竞争实力。2019年研发投入3亿多，占产品销售收入12.32%。

具体做法：一是以科研项目为纽带，实现创新资源互补。公司紧盯国家战略性行业需求，结合公司在精密复杂工艺装备领域多年来的技术积淀，致力于国家重大战略产品研发，以航空、航天、军工及新能源汽车领域高端工艺装备为主攻方向持续创新。二是共建创新平台、提升产学研合作广度。三是通过资本合作，加大产学研合作力度。

充分发挥新型举国体制的作用

在关键领域上，用户要能够充分介入，发挥政府在顶层设计、战略规划、政策制定和市场引导等方面的重要作用，在事关国家长远发展、重大利益和安全的必争领域组织实施重大计划和工程，在重点关键领域组建一批国家实验室，组织一批大科学计划和工程，实施一批重大关键核心技术攻关专项，按产业链部署创新链，促进各类创新资源集聚，充分发挥集中力量办大事的制度优势。行业协会要致力于采取有力措施引导行业在国家、社会、企业等多层面形成健康生态圈，使行业能够得到健康发展。健康生态最重要的一点是行业内的企业要有自律精神，不能通过价格战来谋取一时的利益，最终危害整个行业的发展基础。



提升产业基础能力，技术和人才是核心

2013年，习近平总书记来武重视察，鼓励武重自力更生，自主研发，自主创新，形成核心竞争力。武重坚决贯彻落实总书记的指示，坚持新发展理念，实施创新驱动发展战略，面向高端装备、短板装备、自动化装备的需求，坚持机床与专机并重，打造相关产业链，向高端产品转型，向维保工程总承包即制造服务转型，并积极利用互联网平台，提供平台服务，向产品的数字化、网络化、智能化发展。

通过几年的实践，武重实现了转型升级和高质量发展，从根本上说是加大了关键核心技术的攻关创新。武重坚持完善技术研发体系，聚焦基础共性技术、关键核心技术和关键工艺，在一些领域实现了突破。比如，船舶用加工中心实现了工作台自动交换，五轴联动；开发了大型海上风电系列专机；开发了大飞机装配用的龙门移动多单元数控机床，等等。在进行关键核心技术研究的同时，武重也在加快产品研发体系的构建，坚持探索一代、研发一代、生产一代、改进一代的发展思路，对标国际先进水平，推动公司产品向高端化转型。

在人才发展方面，坚持人才是第一资源，建设高素质的人才队伍。畅通技术人员发展通道，设有科技骨干、科技带头人、兵器科技带头人、兵器首席专家四个通道；对技能人才设有工匠、技能带头人、兵器技能带头人和兵器首席技师四个通道，打造工匠精神。武重新品研发实施项目制管理，每年项目奖励金额高达百万元，最大一个项目奖励230万元。多种途径多种方式激励技术人员持续创新，自主创新，加快加强核心技术的研究，提升产业技术能力。

抓住全球产业链重构机遇

后疫情时代如何抢抓发展机遇？行业尽管面临一些困难，但是国内经济中长期向好没有改变，疫情带来挑战，但也为我们赢得了参与全球产业链重构的机会，我们要坚定信心，攻坚克难，抢抓后疫情时代经济恢复性增长带来的市场机遇。

一是服务国家战略，贴近用户需求，瞄准国防军工、航空航天、新能源等重点领域。紧跟轨道交通、工业互联

网等新基建的需求，大力发展高端装备、智能装备。二是发展线上经济、云端服务，推动转型，加强现有产品与工业互联网、大数据、区块链等智能技术的融合发展，推动数字化转型和服务型制造的深度融合，主要是打造武重高端装备与制造的服务平台，致力于机床维修服务，向制造服务转型。三是抓住全球产业链重构的重要战略窗口期，用好用准国家和地方政府出台的支持政策，包括中央支持湖北的一揽子政策，有效聚集各种资源，加强核心关键技术的研究，解决行业的“卡脖子”问题，实现自主可控，抓重点，补短板，夯实产业能力，实现产业基础再造，推动机床产业的高质量发展。武重和华中科技大学、湖南大学分别开展了国家级的数字化设计、数字化制造创新中心的建设。

围绕需求减少、需求变化和 demand 结构升级，武重今年在航空航天、新能源、轨道交通领域订单都有增长。



市场需求发生根本性变化

中国机床需求量和结构变化具体表现为市场总量的蛋糕变小，结构变化，竞争加剧。一个根本原因，中国改革开放的40年也是中国实现工业化的40年，之后进入后工业化时代，按照规律整体资本投入和社会投入需求应该是下降的，但因为金融危机，全球的刺激政策又持续了10年。工业化到后工业化的一个特征就是增量变成存量，蛋糕变小，总体概括就是过剩，几乎没有什么行业不过剩，这也是现在和未来的一个基本面。机床行业的过剩是数量上的，结构上还有空间，以金切机床为例，还有40%的进口。

与下游头部客户实现目标和利益捆绑

对于机床工具行业发展的瓶颈，从国家到行业层面都组织了很多攻关项目，比如通过各种专项项目，在很多细分领域都取得很大提升，但是行业上升的空间依然很大，差距也并没有缩小。造成这种局面的原因，一方面是产业基础的短板；另一方面就是应用工艺的短板。对不同细分行业的下游用户应用层面的真正理解，是帮助我们做好机床的必要条件。对于这两个短板的基本解决路径，在过去

这些年，从政府到行业到企业做过很多梳理，梳理出的关键词都是正确的，比如“四基”的提出非常正确。现在需要讨论的问题是没有落地，没有突破的根本原因是什么，如何才能真正实现突破，真正落地？

没有真正落地的一个根本原因就是持续，不持续中的关键又是团队的不持续和不稳定，这是大环境、大氛围，体系、机制的问题，具体一个企业无法解决，制造业下游的头部企业要和我们一起来共同面对，共同解决。具体建议是，针对应用层面的必要性，我们不能闭门造车，每个行业都有细分领域，机制上要实现产业链条上下游企业之间真正的目标捆绑和利益捆绑。比如，一些创新中心虽然发挥了很大作用，但没有实现真正的突破，因为上下游企业之间没有实现共同的目标和利益捆绑。如果针对某个机型或功能部件的开发，由下游头部客户来牵头，这种用户持续驱动的方式要更有效，政府层面可以创造氛围，建立机制。机床工具行业的发展要依靠长期经验和积淀，这是行业的规律和属性，要尊重它，敬畏它，不能违背它。行业要沉淀，要积累，就要保持团队的持续。除了链条的持续，企业内部核心的持续需要回到企业自身，不能只怪环境，简单的等靠要。

企业个体要先聚焦再创新

这两年的贸易战和疫情给我们造成很多影响，也给了我们新的机会。世界面临百年大变局，行业也面临一些根本的变化。之前30多年机床行业呈线性发展态势，保持增量状态。过去企业发展更多从点上去思考，市场不好就降低成本，提效率，熬一熬就能过去，现在企业战略需要从面上去思考，大变局很多，要从根本上、顶层上、结构上进行梳理和定位，要从战略上尊重根本，尊重规律。行业资源是有限的，产业链条上的事情要靠机制体制去解决，作为企业个体，还是要先聚焦再扩大，聚焦就是解决要做什么事情，聚焦后就要创新，外部在急剧变化，只能靠持续的、方方面面的创新去解决。产业链条上的企业要共同面对，形成合力，协同共生。



如何改进提升机床行业的竞争力？行业整体处在下行周期，面对一些共同的困难，竞争形势比较严峻，但要看

到行业经过多年进步，已经能够满足相关重点领域的需求，比如在船舶制造、航空航天等领域都有所突破，在成形机床领域，以济南二机床为代表，国产汽车冲压线已经迈入世界先进水平。我们要坚定发展的信心，坚定自主创新的信心，按照国家的战略规划，机床行业要实现高精尖的战略目标，在实现这个目标的过程中，肯定有很多的困难，有创新的难题、人才的难题、生态的难题等，需要我们认真分析研究，保持清醒的头脑，变压力为动力。

尊重和遵循产业发展规律，做好顶层设计和系统规划

机床工具行业是具有高技术含量的基础工业，大部分产品都是单件小批量，而不是批量、自动化流水线生产，针对这样一个行业特点，提升行业竞争力无法短期实现，单纯依靠资本投入更是行不通的。机床工具行业提升竞争力是一个长期的工作，需要政府、行业组织从宏观层面统筹协调，整合资源，按照经济发展规律制定行业提升能力的时间表和发展路线图，一些重点工程要分类去实施。对不同的机床工具产品要分类施策，对于中低端的产品，可以采用市场机制，要更多地发挥市场作用，更多地发挥企业的主体作用。对于一些高端机床领域，国家和行业组织要更多地发挥产业政策支持的作用。对不同层面要区别对待，这是机床工具行业的产业规律，不仅中国要这么做，发达国家也是这么走过来的。

建设新型技术研发体系，合理配置行业有限科技资源

通过行业几十年的发展，行业的研发体系，从改革开放前有相对专业的分工，到目前基本没有专业化分工的状态，全部是市场化竞争的格局，有利有弊。在新的历史阶段，必须要研究行业科技研发的生态建设，未来应该以企业 and 专业研发机构为主体，建立产学研用相结合的研发体系，这里面既要突出企业自主创新能力的建设，也要强调一些与企业高度协同的专业研发机构的专业能力建设，以支撑支持企业的发展。这个体系需要分工协作，比如机床的发展离不开基础研究，一些基础零部件也离不开整机的整体设计制造，因此不同领域的机构可以形成一种系统的布局，形成专业互补。在研发创新的过程中，企业要适应新的时代，充分利用工业互联网、智能制造技术，提升产品的技术水平，适应下游客户对产品的一些新的需求。提升自主创新能力不仅是喊口号，企业要实实在在进行持续的投入，亚威股份多年来一直坚持技术领先战略，10几年来在研发创新方面的投入保持占销售收入5%以上，这两年基本达到7%，把生产一代、研发一代、规划一代落到实处，不断推出一些有市场竞争力的

新产品,支撑企业规模增长、效益增长,企业经营指标多年保持了8%-10%的净利率。

需求牵引,呼吁需求侧相关的支持政策

行业未来发展要处理好两个关系,就是市场的决定作用和更好发挥政府宏观调控作用的关系。中低端产品要发挥市场机制,一些高端产品要适度发挥政府的作用,因为高端产品最终是用出来的,是需要不断的实践当中打磨,得以改善提升,否则难以实现有效突破。我们一定要采取必要措施,打通创新产品应用最后一公里,政府、行业组织要更多地发挥积极作用。一方面要鼓励机床制造企业和用户单位合作,共同改进改善自主创新的高端产品的性能。首台套政策就是以用户需求为导向,从需求侧进行扶持的政策,称得上行之有效。首台套不一定单指第一台产品,是泛指第一阶段的某个产品。另一方面,相关必要的补贴政策也是行之有效的,包括增值税减免政策。发展到今天,机床工具行业的作用虽然重要,但在国民经济中竞争力不够强,规模体量也不够大,16%的增值税属于第一层级,是否合适。对行业税收政策的支持既要有针对性,又要有普惠性,有利于提升行业整体竞争力。不同国家在不同产业发展阶段,对装备的需求是不同的。我国机床需求进入一个下行周期,也是产业发展的一个必然。在做好国内市场的同时,要做好国际市场的开拓,为未来的可持续发展奠定必要的基础。

概括而言,一是要加强行业指导和组织,二是要加强技术创新的投入,三是加强对市场端的支持。三个方面结合起来,将国家出台的一些支持机床产业发展的政策落到实处,确确实实提升行业竞争力。



瑞士托纳斯大中华区总经理
单锡林

对标国际一流水平,追踪细分市场

产业基础能力和产业链的建设,要对标世界一流的工厂,比如德国、日本、瑞士,看到我们与世界先进水平的差距在哪里。现在中国机床市场已经是世界级舞台上的竞争,几乎所有的外资公司都把中国当作是第一大竞争市场。中国已经保持世界第一机床工具制造大国和消费国很多年,2019年我国进口机床在下降,国产机床消费在下降,但进口机床比例甚至还有所上升。有两个主要原因,

第一,去年宏观形势的影响,全球经济都在下降;第二,支撑机床制造业的第一大行业——汽车行业在下滑。其他行业怎么样?航空航天属于高端市场,近年不少国有企业在涉足,但是整体占比少,总量不大。总量比较大的热点市场有哪些呢?第一个热点是电子行业5G市场,这个领域的产品要求高速化、自动化,日本企业在这个领域占有垄断性的市场份额;第二个热点是医疗器械领域,这个市场空间很大,但也以进口机床为主导。中国机床市场已经从粗放型向集约型转变,国内企业要精准施策,找到国产机床市场的空白点。

行业将迎来新一轮重组

分析我们的差距,从产业链开始,要考虑我们的原材料、功能部件、控制系统、测量工具等环节是否过关;还有人才,一流外企都是全球招聘,人才都是国际化的,没有一流的人才就没有创新,人才培养是根本,要打开胸怀,把世界人才吸引进来。

如何提升?第一,要具有国际化的视野,紧盯世界前沿的技术。第二,要由专业的人做专业的事,供应商、机床制造商、用户单位要结成有机统一的发展路径,真正满足市场需求。第三,针对中国机床行业全球最大的市场、健全的行业体系、举国体制等几大特色,首先要对市场需求有信心;其次要发挥制度优势,我们的产业链还处于转型阶段,要从国家层面把顶层设计的优势发挥出来,要精心打造合适的环境和平台,组织协调攻关;最终行业需要步入国际化、市场化、法制化的轨道。第四,要充分发挥市场的调节机制,利用市场淘汰落后产能,进行有效整合。2008年金融危机及之前一段时间,欧洲、美国、日本的世界知名机床企业都进行过重组,以目前的形势看,很快下一轮的重组也会到来,包括国外企业和国内企业。

最后,王黎明秘书长又针对行业共同关注的CCMT2020(第十一届中国数控机床展览会)停办事宜向业界进行了简要说明。指出,在新冠疫情蔓延之初,协会及时做出了展会延期的决定。之后,随着疫情缓解、各行各业复工复产,上海虹桥展馆虽有档期可以使用,但对各方面组织管理工作要求很高,特别是考虑到疫情仍存在的不确定性,经过认真评估和充分论证,为了切实维护境内外参展商、观众和合作单位的利益,保障相关人员的身体健康和安全,最终决定停止举办CCMT2020展会。同时,协会决定将全力以赴筹办好即将于2021年4月12-17在北京中国国际展览中心(新馆)举办的CMT2021展会(第十七届中国国际机床展览会),并希望继续得到政府部门、合作伙伴、参展商和广大用户的大力支持和积极参与。□

航空发动机加工装备的性能需求与验收关键技术

中国航发商用航空发动机有限责任公司
西北工业大学
北京航空航天大学

于建华 陆涛 何艳丽 陈亚林 王杰 雷力明 张渝
梁永收
李勋

航空发动机零部件加工不断挑战数控装备的高速度、高精度、高可靠性、高可达性、多功能等性能与功能极限，对加工设备有很多特殊和极端要求，但是目前设备研制和工艺需求还存在匹配性不够的问题。本文在分析航空发动机零部件结构与材料特点的基础上，详细阐述了其加工制造对数控装备的共性技术需求、常用的典型金切设备和短板设备的具体性能要求，并对设备验收的流程内容及关键技术做了具体阐述；指出了航空发动机加工装备的发展方向，研制满足航空发动机加工需求的设备可以更好地推动机床工具与装备水平的进步，能够研制和提供该类机床装备的研究者和企业代表着行业最高水平。

航空发动机是由多种类型零部件组成，可以在高温、高压、高转速和不断变换工作状态的恶劣环境中工作的高度复杂和精密的热力机械^[1]，追求更轻量化、更大推力、更高可靠性、更长寿命、更低油耗、更低成本是提升航空发动机性能的永恒主题，这也促使发动机结构越来越集成、设计越来越复杂。现代航空发动机设计采用了许多新技术、新材料、新结构来满足苛刻的性能要求，高温和承力结构件多采用整体结构，零件结构复杂、加工精度高，表面粗糙度及表面质量要求高，其先进制造技术对相应的加工机床与装备需求十分迫切。

目前，世界主要大国在航空制造业方面的竞争极为激烈，封锁与摩擦不断，我国大飞机项目和“两机”专项的上马促进了航空发动机产业的发

展，也为机床装备的发展带来了新的机遇和挑战。数控机床的研制和应用首先起源于航空制造业，并伴随着航空制造业的发展而发展^[2]。通过相关项目支持，研发出了五轴叶片铣削与磨削加工中心、叶片抛磨机床、机匣五轴铣车复合加工中心等设备，工信部与中国机床工具工业协会也组织了多次航空发动机企业与机床企业对接会，推动“两机”专项与数控机床专项建立长效对接机制，创新协同模式，加速成果转化，实现产学研用深度融合^[3,4]。我国的高档数控机床基本实现了由不能做到能做的升级和跨越^[5]，但整个机床行业正向设计能力、针对用户需求的定制工艺研究及相应的机床设计能力还不足^[6]，航空发动机制造对数控装备的性能需求有其特殊的地方，机床装备企业如未吃

透用户的具体需求就仓促研发设备，其应用推广效应势必受到影响。

针对上述问题，本文系统分析了航空发动机零件的特点及所需设备，进而提出了航空发动机制造业对数控设备的性能要求，并指出了目前我国航空发动机制造领域的设备短板。最后，分析了当前设备的验收现状与不足，阐述了航空发动机制造设备验收的关键技术。

一、航空发动机零部件加工特点与装备分析

1. 航空发动机零部件特点

新一代航空发动机总共有3万多个零件，涉及230多种不同标准的材料，与加工制造相关的特点具体如下：

(1) 零部件种类繁多

航空发动机主要零件有叶片、带榫槽轮盘、整体叶盘、轴、环形与鼓筒件、喷嘴组件、齿轮、轴承、紧固件、导管等10大类。如图1所示，叶片分为风扇叶片、压气机叶片、涡轮叶片以及与之对应的静子整流叶片，机匣有风扇包容机匣、压气机机匣、燃烧室机匣、涡轮机匣以及分布在它们之间的级间机匣，有的整流叶片还与机匣整体成形，各类转子叶片都通过榫接结构连接在转子盘上。为了减重增效、提高推重比，压气机前段越来越多采用整体叶盘结构。

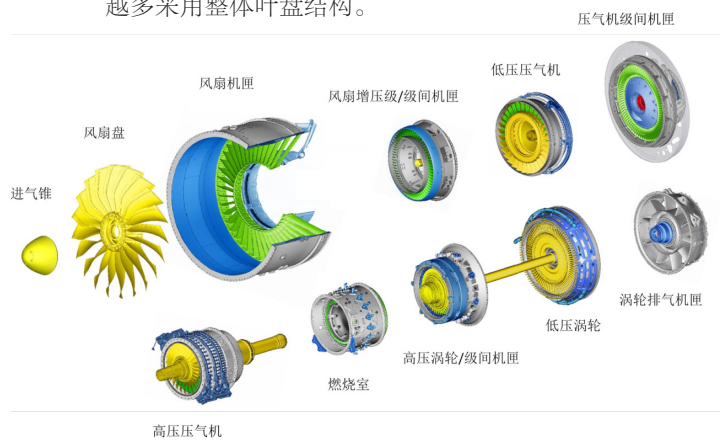


图1 航空发动机结构爆炸图

(2) 难加工材料多

航空发动机大量采用高温合金、钛合金、高强度钢材料，复合材料、工程陶瓷材料等新材料也越来越多地应用到高性能航空发动机上。这些材料的加工性极差，对工艺装备的刚性和切削刀具的要求极其苛刻，还需要大量的特种工艺装备。

(3) 零组件结构复杂

风扇/压气机/整体叶盘叶片属于典型的自由曲面零件，结构复杂、刚性差，加工过程易变形，需要高性能多轴数控加工设备；风扇/压气机/燃烧室/涡轮/中介机匣需要高精度多轴坐标镗、高精度立式车/磨数控装备、电解或线切割装备；压气机转子组合后叶尖高速磨削和机匣组件高精度立式磨削设备；盘类零件辐板、周向榫槽、轴向深孔形状复杂需采用车铣磨复合、拉削、成形磨削等特殊设备或新工艺装备；燃油喷嘴杆芯/活门安装座/外壳油路和冷却型腔复杂，需要增材制造设备，其活门组件很多小微零件的形位公差甚至到亚微米级，需要车铣磨一体复合加工设备；整体叶盘修复需要线性摩擦焊设备，而高压涡轮盘轴组件、高压压气机转子、风扇盘所需要的惯性摩擦焊设备，对发动机减重和提高耐高温性至关重要。

(4) 零件加工精度高

发动机零件要保证在高温、高速、恶劣环境下可靠工作，需要零件具有良好的配合质量和互换性，一方面对零

件的加工精度要求极高，很多零件的精度要求都在微米/次微米级，非配合表面粗糙度要在Ra1.6以下，配合表面粗糙度在Ra0.8以下；另外一方面，对设备的加工精度及精度保持性要求很高，还要配套相应的精密检测设备，甚至需要多轴多功能复合加工与检测一体的设备来完成。

(5) 多种冷却小孔

航空发动机涡轮叶片、燃烧室、火焰筒等零组件的冷却小孔每台份多达数十万个，而且是异形精密群孔，尺寸在 $\phi 0.1 \sim \phi 0.3\text{mm}$ ，孔的位置呈空间多向分布，其外壁还有涂层。孔的形位精度和孔壁表面质量要求高，常规的钻孔、冲孔方法难以满足要求，需要激光、电子束、电火花等特种加工技术和装备。

(6) 零件表面特种工艺要求多

为了提高发动机零件的耐磨、防腐蚀、抗疲劳性能，需要采用表面强化、喷涂、喷丸、渗镀等表面处理技术与装备。涡轮导向叶片、燃烧室采用的陶瓷热障涂层，尤其是涡轮叶片表面高温防腐蚀涂层，其工艺及装备始终制约航空发动机的性能。

2. 大型客机航空发动机对装备行程需求分析

市场占有率较大的三类大型客机主要零件尺寸如表1所示，其设备行程应该分别覆盖其最大零件加工尺寸。

表1 典型大型客机发动机

窄体单通道中 短程客机	宽体双通道中 远程客机	宽体双通道 超远程客机
空客A320， 波音737，C919	空客A330， 波音787，CRJ929	空客A350， 波音777
大涵道比涡扇 发动机	大涵道比涡扇 发动机	超大涵道比涡扇 发动机
V2500、Leap-1	Trent700、 Trent1000、GEnx	Trent800、GE9X
风扇机匣直径约 2.2m，对开机匣约 0.6m，涡轮机匣约 1.4m	风扇机匣直径约 3.2m，对开机匣约 0.8m，涡轮机匣约 1.7m	风扇机匣直径约 3.6m，对开机匣约 1m，涡轮机匣约 2m

二、航空发动机制造所需装备的性能需求

我国航空发动机制造业从引进斯贝发动机开始，并随着上世纪90年代投入了一些型号攻关项目，逐步引进了一些精铸、精锻方面的全套设备，各类金属切削机床，焊接和热处理设备，计量仪器和理化测试仪器等^[7]，尤其是后

来承担了大量RR、GE、PW的外贸转包业务,引进了大量的高档数控设备,学习到了很多发动机先进制造技术。经过三十多年的学习和自主攻关发展,在数控加工、缓进磨削、拉削、电子束焊、等离子喷镀和各种无损探伤检验等方面的技术和装备都通过反复实践而得到巩固和发展,GE一台发动机80%~90%的零件都可以在中国完成加工。但是这些零件大部分都是在国外机床上加工制造的,这类机床主要集中在高档五轴立/卧式加工中心、数控坐标镗加工中心、数控坐标磨削加工中心、立式车磨复合加工中心、高速叶尖磨机床、高精度数控拉床以及各类多功能复合的专用金属切削设备。但是,外贸加工主要集中在冷加工领域,零件和组件加工的特种工艺还受制于设备及相应的工艺水平,例如涡轮叶片涂层设备、压气机和高压涡轮转子组件摩擦焊设备、涡轮叶片和火焰筒小微群孔打孔设备等方面。目前,特种工艺国产机床设备的市场占有率不高,而这些特种工艺恰恰是利润率最高的工序之一,这不利于降低我国航空发动机制造业的综合成本、提高国产航空发动机的市场竞争力。

1. 设备的共性技术分析

(1) 高刚性、高效率

航空发动机零件大多采用难加工材料,高效加工常采用强力切削方法,因此对数控机床的刚性要求较高。

床身和进给系统:一般要求机床基座和床身结构是整体经过动力学仿真与验证的最佳结构,具有 $\pm 2\mu\text{m}$ 的平面精度,机床直线轴、旋转轴热稳定性好。

切削主轴:钛合金切削的最佳线速度在200m/min左右,高温合金切削最佳线速度在120m/min,但是航空零件的多特征需要不同直径的刀具,不同阶段的加工需要设定

不同的切削深度。这就要求切削主轴可以在较宽的切削速度范围内具备较大的恒扭矩输出能力,并且高速下主轴刚性要好。对主轴的结构设计、线圈缠绕工艺、冷却润滑系统、密封、轴承及支撑方式等都提出了很高要求,如采用动静压轴承(陶瓷球)保障最低磨损状态下实现高主轴转速,提高刚性,带有顶级的槽口润滑,防漏端面迷宫密封接头可提供良好的空气密封。

(2) 高精度、高动态响应

航空发动机零件的尺寸精度、几何元素的形位精度要求高,特别是薄壁零件刚性差、加工过程易变形,加工后尺寸和位置度等难以检查,需要一次成形,并采用在机方式进行测量,对数控机床的加工精度要求较高。机床动态性能不足引起的动态误差是高速高精运动过程中影响加工精度的最主要因素^[9]。通过选择带有光栅尺的全闭环反馈系统和稳定的静压导轨,以保证数控机床具有较高的定位精度和重复定位精度,伺服进给具有高加速性和较短的定位及启动时间,对主轴振动、漂移和温度实时监控并调整,并具有较好的精度保持性,具有在机检测功能。同时要求一机兼备粗加工和精加工能力,可以提供粗加工、预加工、快速加工、精加工和超精加工多种功能的最佳配置,以保证工件的高质量和高精度加工要求。

(3) 高可靠性、高精度保持性

机床的可靠性涉及因素很多,是一个系统问题。从用户角度看,像Starrag(斯达拉格)等精度保持性比较好的机床,其结构设计的各个环节都有合理分配承载力和切削力分散的机构或装置。例如,为避免切削扭力集中,摆动头采用伞齿轮和蜗轮蜗杆结构,并增加多齿接触和增大接触面的设计,有效分散切削承载力,从而减缓磨损;主轴和立柱箱有中空减震和水冷设计,可以衰减振动并减

小重载切削变形;工作台和进给轴等装有过载切削保护传感器,在崩刃等突发情况下可以保护机床不受损。采用的主轴静压轴承(陶瓷球)可以在最低磨损状态下实现高主轴转速和高刚性。此外,控制主轴精度、基础件几何精度和各轴的运动精度,可以有效降低非正常磨损造成机床精度衰退^[9]。总体上,可靠性比较好的机床主轴头、主轴、回转摆动工作台及机床整体采用稳定的热对称结构,关键部件提供连续水冷功能,可以保持机床长期的高可靠性。

(4) 强大的冷却与绿色的加工环境

航空难加工材料加工过程中会产生大量的切削热,从而降低刀具的使用寿命,还会使零件产生较大的加工应力,在加工后甚至在使用过程中产生较大的变形,影响发动机零件使用的可靠性。因此需要机床具有良好的切削冷却功能,如内冷和水基油基方便切换的高压外冷,带有油雾润滑、液氮冷却、干切削吸尘等功能。

(5) 操作便捷且易于维护

航空发动机零件装夹复杂且易出现异常切削现象,因此要求机床上下料装夹和找正操作可达性好,大尺寸车门和观察窗,窗口工位姿态舒适。排屑器有宽大的排屑口且没有死角区域,带工件喷淋功能的综合清洗系统,能够适用于湿式或干式加工。

所有需要定期维护的组件均易于操作,如过滤器、刮水器等更换零件均易于操作,为维护人员提供安全工作区域,例如平台和固定点。配置有状态监控机器可预测组件的潜在故障。

(6) 功能强大的控制系统

数控机床的加工运动是通过控制系统的指令实现的,因此一个稳定的、功能强大的控制系统是数控机床充分发挥作用的可靠保证,否则数控机床无异于普通机床。功能强大的控

制系统可根据加工工况,对各运动部位的传动参数实时调节,对控制行为和数控路径规划进行详细的开发和优化,以实现几何精度、表面质量和生产率的完美结合。

(7) 专机化、智能化

整体叶盘、涡轮叶片、喷嘴组件、涡轮盘、机匣等零件产品附加值非常高,数十个零件的价格就可以抵一台机床的价值,但这类零件的加工质量要求高、加工难度很大,而且机械加工往往是最后一道工序,一旦超差将造成整个零件报废,因此针对这类典型零件的复杂结构与表面特征开发专机设备非常必要。

针对典型零件提供全面综合解决方案,除了传统的数控加工工艺方案和切削方法外,还包括专门开发CAM系统,加工系统到过程监控系统的集成;提供个性化的夹具,设计有单独的适配器方案,夹爪可针对复杂表面和预加工面进行灵活操作,不同夹具之间的基准转换几何偏差可在系统中进行自动偏置补偿,并可以兼容多种夹具,自动托盘交换装置夹具更换就像刀具更换一样方便;通过预见性特征和动态预选提高高速加工时的轮廓精确度;甚至针对零件的系列化刀具方案。

航空发动机零件加工对智能化需求的难点和亮点主要体现在工艺过程中,如加工过程的自适应控制、工艺参数自动推荐与生成系统,简化编程、操作智能编程系统,集成装/卸单元中的精密定位托盘(3R、Mecatool和Yerly等),智能监控、智能诊断及维修等^[10]。

2.典型的金属切削设备

(1) 叶片加工设备

叶片毛坯目前越来越趋向于近净成形,主要集中在叶身和进排气边复杂曲面的小余量精密成形,其加工余量比较小,因此叶片加工需要采用精密五坐标加工中心。

以Starrag LX系列(见图2a)为代表的B轴回转中心与刀具主轴的回转中心成45°,刀具主轴重心在其摆动中心上,摆动时比较平衡,机械设计比较简单,但B轴转动角度依靠X、Z轴插补实现易产生误差,适用于扭曲较小的静子叶片,国内秦川机床QMK系列叶片磨削机床(见图2b)也属于此类结构。

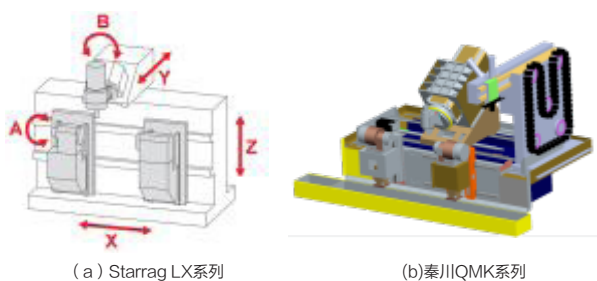


图2 五轴叶片加工机床(45°摆头)

以C.B.Ferrari(C.B.法拉利)A系列、Liechti(利吉特)为代表的B轴回转中心与刀具主轴的回转中心成90°(见图3),其中B轴回转中心基本与刀具主轴的重心重合的机型摆动时比较平衡,但B轴每转一个角度都需要通过X、Z轴插补调整刀尖工作位置;其中B轴回转中心偏离刀具主轴重心,而与刀尖部位基本重合,B轴摆动时不需要插补或者插补量非常小^[11],有利于在前后缘等曲率变化剧烈的部位加工时提供更高的机床加速度。

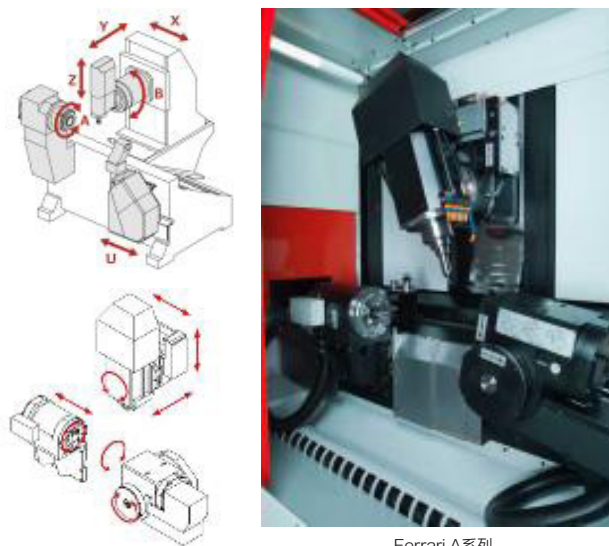


图3 五轴叶片加工机床(90°摆头)

Liechti XL系列可以 $1g$ ($10m/s^2$)的加速度准确地进行三维加工,实现叶片前、后缘的大曲率突变复杂曲面高精度加工,弧形导轨引导机构可平衡刀具主轴摆动产生的偏心力矩,立柱前倾20°角,有利于排屑和切削液回流。国内北京机电院的XKH系列也属于B轴回转中心与刀具主轴的回转中心成90°的机床(见图4)。此外,由于叶片生产量大,国内外也竞相开发了一些多主轴、多工位的机床,可以同时加工两个以上的叶片;还有用于精锻叶片进排气边、叶根和阻尼台加工的自适应砂带磨削设备等。



图4 五轴叶片加工机床(90°摆头、带倾角)

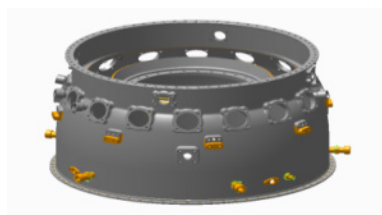
这些设备可以有效提高精密成形的压气机叶片加工效率和加工精度，有利于发展精密成形技术、提升压气机性能。目前叶片加工的精度已大幅提升，未来的研究主要集中在降本增效方面。此外，叶片加工由于基准远离叶身，频繁转换基准，因此需要系列化的统一接口夹具加工多种类型叶片，实现叶片零件高效换装（见图5）。



图5 叶片加工夹具

(2) 机匣加工设备

机匣种类与结构如图6所示。机匣加工主要包括环形锻件毛坯的余量去除、两端安装止口、周向多特征岛屿、凸台以及孔加工。机匣壳体外型面通常采用四、五坐标加工中心铣加工；内腔T形槽和前后安装边采用数控立车加工；前后安装边孔和外型面安装座、探视孔采用数控钻镗床或四、五坐标加工中心铣加工；对开机匣水平安装边螺栓联接孔采用四坐标精密镗加工^[12]。尺寸小的机匣适用于立式加工中心，尺寸大的机匣适用于卧式加工中心。此外，以某型航空发动机为例，机匣和蜂窝组合件还需要Z向行程在1200mm以上的立式车磨复合加工中心完成蜂窝和涂层修磨。



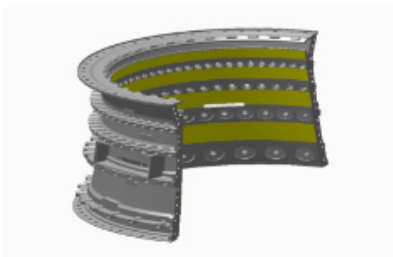
a. 环形机匣一



b. 环形机匣二



c. 环形机匣三

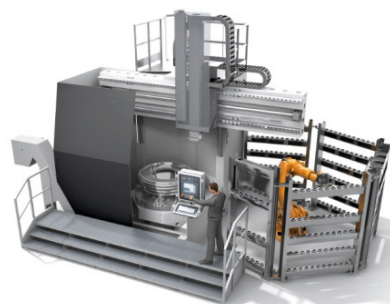


d. 对开机匣

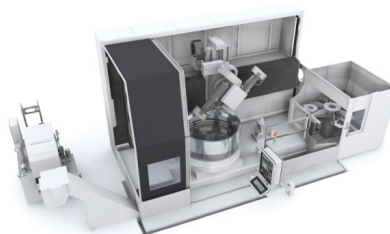
图6 机匣种类与结构

立式车削/磨削设备（见图7）：上述立式车磨复合加工中心需配备三个以上功率45kW以上的水冷磨削主轴，最高转速可大于16000 r/min以上，以满足不同机匣止口和端面以及蜂窝磨削，主轴轴承布置有温度传感器，可实现热补偿和运行中的振动监测；需配置修整单元、砂轮自动更换装置以及工件测量装置，可在无中断的情况下完成单件和组件整体加工；由于机匣零件和组件的安装和工位调整较为复杂，且易变形，还需有硬质合金镗削和工件测量的附加选项，使机床加工工序尽量集中，同时扩大应用范围，提高单台设备的价值；工

作台应安装静压推力轴承，回转驱动由力矩电动机驱动，确保减振扭转刚度；配置工件触头监控、过程监控、用于工件测量的自动或部分自动动态平衡。机床床身整体式铸造，机床各进给轴应配置光纤距离测量系统实现高定位精度、满足高同轴度和轴向跳动精度；机匣车削余量较大，止口精度要求高，控制系统和CAM应该具备数控路径粗加工、预加工、快速加工、精加工和超精加工规划详细开发和优化功能，各进给和回转轴及主轴应具备大扭矩提供能力；如果是车/磨复合机床，应带有轴向联锁，用于在车削过程中锁定主轴。



(a) 立式车削加工中心



(b) 立式磨削加工中心

图7 立式车/磨设备

立/卧式加工中心（见图8）：具有优良的静态和动态特性，并配有紧凑设计大扭矩双摆头，双摆头（A轴）滑枕安装在双滚柱轴承丝杠上，并配置光纤测量系统实现高定位精度和高刚度；整体床身与进给轴和回转轴都有专门的高精度保持性设计考虑；切削主轴具有最佳的钛合金/高温合金切削速度/扭矩特征曲线，主轴直通冷却系统可以提供水基或油液的高压冷却（压力最大为10MPa，

尽可能接近于切削区)提高刀具寿命并进而提高零件的一致性;可提供定制化的机匣液压或真空耦合装夹系统,适用于高效粗加工和无变形精加工,可选装升降旋转系统进行快速托盘交换,大幅度控制加工变形并缩短装夹和找正等辅助加工时间;高效的排屑器和带工件喷淋功能的综合清洗系统,保证机匣加工多余物控制;水冷式直驱工作转台配置了适合高负载甚至车削作业的耐磨轴承,可实现B轴工作姿态液压夹紧,提高切削刚性和精度。链式刀库和可容纳60~80把刀具,满足机匣加工多种刀具需求,刀具最大直径为325mm(T型刀具可达500mm)且长度达800mm,换刀时间短。

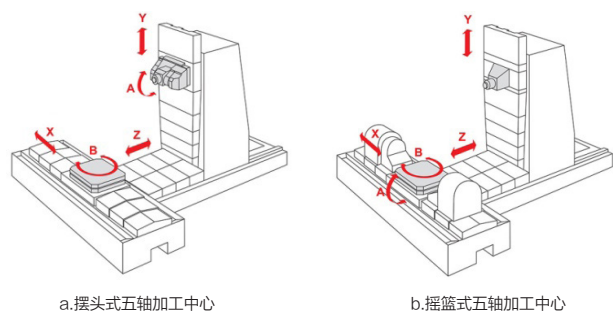


图8 五轴立/卧加工中心

五轴铣车复合加工中心(见图9):各运动部位带水冷却系统与高刚性、高精度机床结构相结合,为使用陶瓷刀具高效车削提供了可能;紧凑设计的高扭矩万能双摆头可以更好地到达机匣各岛屿凸台腔、槽、空加工位置;多个不同切削范围的电主轴可快速更换,方便粗/精加工、车/铣加工都能提供最佳切削参数;工作台为带静压推力轴承的力矩电机直驱转台,可提供车削时的高转速,同时又能满足铣削加工时的回转精度。

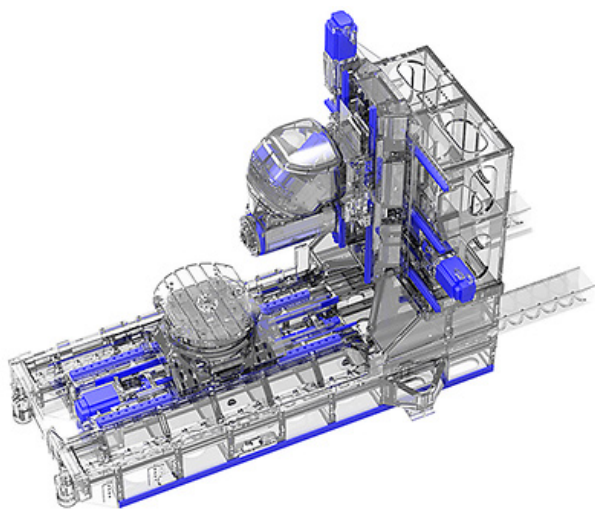


图9 五轴铣车复合加工中心

DMG duoBLOCK系列高稳定性结构的五轴加工中心,扭矩达1800 N·m的主轴提供高性能、高精度的工件加工能力、机床精度达4 μm、进给速度达60,000 mm/min的高动态性能,使难切削材料零件的表面质量大幅提高。其提供的燃烧室机匣加工解决方案,可以将中间去应力热处理工序之外的所有工序在一台机床上完成,而且将九道工序缩减到六道,大幅缩短辅助加工时间,燃烧室外机匣总加工时间可以在60h内完成。

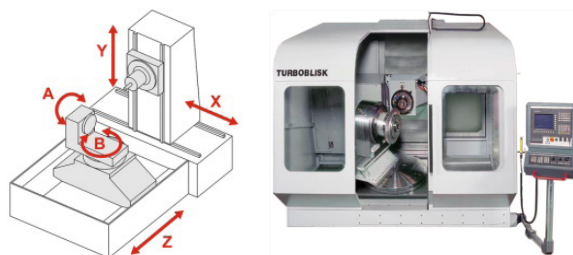
(3) 整体叶盘加工设备

整体叶盘叶片之间的流道开敞性差,叶片型面为空间自由曲面,叶身型面加工精度要求高,且材料为钛合金或高温合金,导致其加工难度大。整体叶盘加工示意如图10所示。

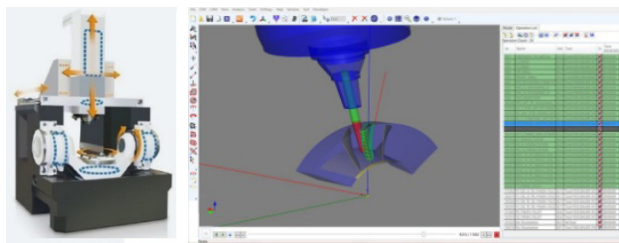


图10 整体叶盘加工示意

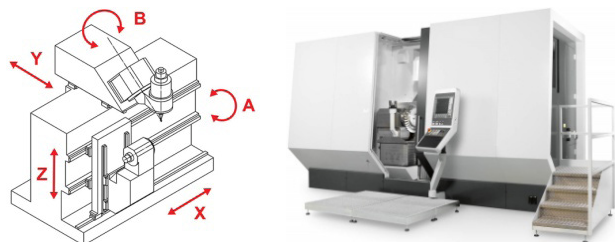
五轴联动数控铣削/磨削是整体叶盘加工所广泛采用的有效手段,但能够高效高精度加工整体叶盘的机床并不多,图11为整体叶盘加工常用的机床结构。在整体叶盘加工方面具有独到优势的Liechti机床,各伺服进给和转台进给可提供1g(10 m/s²)的加速度,主轴转速15000r/min、扭矩120N·m,与双驱动摇篮A轴协同工作可提供整体叶盘加工所需功率和性能;所提供的TURBOSOFT plus CAM软件,以及日益扩充的复杂曲面制造工艺数据库使其机床性能越来越强大;尤其是可以提供进排气边加工时剧烈曲率突变所需的高加速度和高刚性,满足了对气动性能有重要影响的进排气边加工精度要求。



(a) 工作台单驱摆动五轴机床



(b) 摇篮式五轴机床及CAM软件



(c) 摆头式五轴机床

图11 整体叶盘加工机床结构

整体叶盘加工机床在结构原理上应考虑回转运动部件质量的最小化与运动平衡设计,以及载荷分散设计,所有基架组件均采用可实现最大刚度的 FEM 分析进行设计,使设备具有良好的加工刚度和加速度,从而实现加工参数突变时的稳定切削。

(4) 喷嘴加工设备

如图12所示,航空发动机燃油喷嘴主要由外壳、杆芯、活门组件、旋流芯组件等组成。喷嘴杆芯内部油路和冷却回路错综复杂,内腔区空间狭小、长径比大且形位公差要求严格,加工中需要对异形特征精确定位并基准转换;活门壳体类零件体积小且包含大量异形型面和岛屿,还要求与回转基体之间有很高的形位公差,活门杆、活门缸等小微零件对于同轴度、轮廓度和表面光洁度要求非常高;旋流芯与杆芯上包含大量微孔与微槽类特征在加工中极易超差;此外还有很多小微孔需要电火花和激光打孔设备完成。传统的加工都是在车床、三轴加工中心、四轴/五轴加工中心上分别加工,中间检验还要拆卸后再次装夹找正。



图12 燃油喷嘴结构

随着机床工具的进步,具备七个进给轴和三个切削主轴的五轴联动加工中心(见图13),可对喷嘴系列零件进行车削、铣削和研磨的集成加工,可以一次性完成燃油喷嘴零件的大部分机械加工,效率和质量提升效果十分显著。

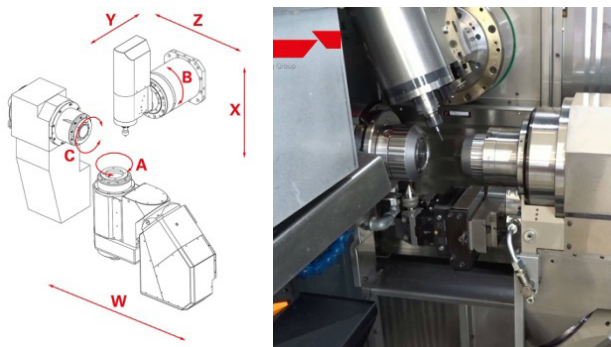


图13 小微零件加工多轴复合机床结构

燃油喷嘴壳体和杆芯是结构非常复杂的六面体都有加工特征的部件,各进给轴配置直线电机(220~400N·m)可在加工部件时确保最大精度以及可靠的重复率。通过配置高精度测量系统(分辨率1/100 μm)、快速直线电机(加速度1.1 g;速度50 m/min),以及易热部位充分的冷却回路,可实现高精、高效的加工能力;配置扭矩大且适应切削转速范围广的恒扭矩高速主轴(150,000 r/min),能够车削和铣削高温合金部件,而且通过不同的研磨盘(尺寸0.5~80mm)还可以进行干式研磨;配置换刀装置,配置丰富的夹紧系统。

主轴联锁机构确保了车削时非旋转刀具准确的机械分度,将铣磨主轴的动静压轴承分离,分散了通过主轴箱的加工振动和负载。

配置在机检测探头、主轴探头,车削主轴对面夹紧系统提供台钳、筒夹系统或尾座,夹紧装置中大部分都可以在主轴和对面夹紧系统之间进行互换,而且排屑装置流畅,铸铁机床基座和行程柱有效消除了振动。这些都有助于保证燃油喷嘴复杂结构零件和小微活门零件加工的高精度和一致性,以及更好的表面光洁度。大幅缩减了转序、装夹找正、中间检验的辅助加工时间。

(5) 涡轮盘加工设备

如图14所示,涡轮盘的榫槽、轮缘、辐板、内孔、安装空、安装止口与花边等大量复杂特征需要机械加工完成,而且涡轮盘材料多为粉末冶金材料或变形高温合金材料,面临加工变形问题突出、加工效率极低、表面完整性不易保证等重要难题,尤其粉末冶金材料对应变速率非常敏感,在高应变速率条件下加工容易出现裂纹。粉末涡轮盘加工机床应该重点关注加工效率的提升,加工精度的保证,以避免加工缺陷。

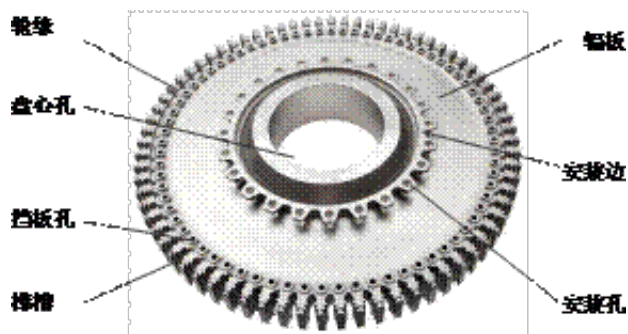
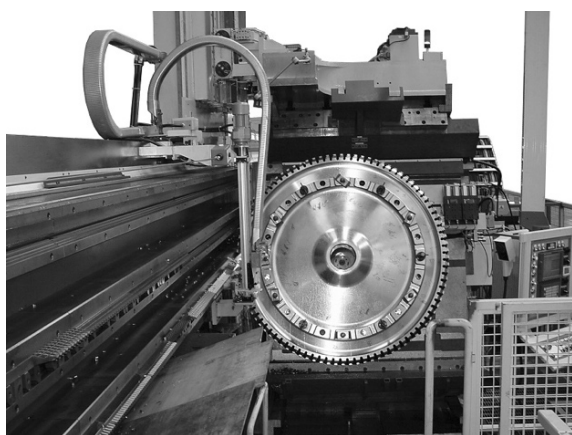
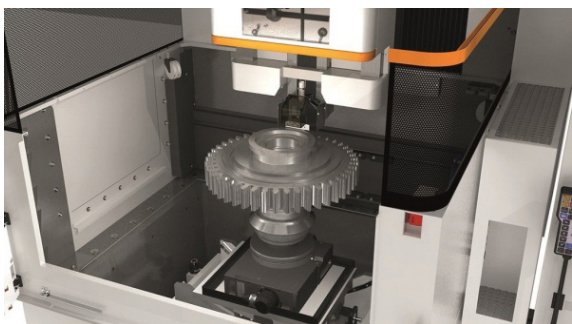


图14 涡轮盘结构

涡轮盘辐板、轮缘、安装边及孔加工需要高刚性的车削加工中心或车磨复合加工中心，涡轮盘榫槽加工需要高刚性高速拉削机床。近年来开发出多层包套镀镍线丝减小放电切割工艺重铸层的影响的线切割机床，提高了线切割加工高温合金榫槽的可行性（如图15所示）。近年来，高刚性的多轴磨床性能大大提高，电镀金刚石超硬磨料砂轮的研制取得巨大进步，能够以超过50000 r/min的转速稳定回转，保证了小直径的异形磨料砂轮可以获得理想的切触点线速度^[13]。使得“线切割+磨削”榫槽加工成为可能，尤为重要，超硬磨料磨粒砂轮的价格非常便宜，而且便于定制，如果大批量生产，其综合成本是拉刀和铣刀成本的千分之几。



a. 拉削设备



b. 线切割设备

图15 涡轮盘榫槽加工设备

3. 特种设备短板与性能

(1) 摩擦焊设备

惯性摩擦焊是适用于粉末高温合金零件焊接的唯一可行手段，其焊接接头质量优异、尺寸与形位精度高，生产效率高且能耗低。GE公司焊接TF39航空发动机大截面薄壁（ $\phi 610\text{mm}$ ，壁厚3.8mm）零件的试件仅用3s。如图16所示，采用摩擦焊工艺的风扇盘、高压压气机鼓筒、高压涡轮转子组件省去了大量螺栓连接紧固件，并且减少了转子在螺栓孔处的截面尺寸。这可以有效消除应力集中、提高转子刚性和平衡性、增加各级盘间的断裂裕度、减轻发动机转子重量、提高推重比，显著提高发动机性能。



图16 采用摩擦焊工艺的转子组件

但是国内尚未开展大惯量（ $\geq 24000\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ）、高转速（ $\geq 2000\text{r/min}$ ），大顶锻力（ $\geq 1000\text{t}$ ）的惯性摩擦焊设备研制和焊接工艺研究。国际上比较知名的摩擦焊设备和工艺提供商是美国的MTI公司，2014年制造出全球最先进的自动化惯性摩擦焊设备（见图17），2016年研制出全球最大的惯性摩擦焊。摩擦焊是典型的设备和工艺紧密结合的工艺技术，发动机的转子设计结构与摩擦焊工艺参数紧密相关，要求设备具有极高的轴向位置和跳动精度、专用的主轴和尾座工装夹具、精确随动的工件位置调整控制系统与机构、高精度的主轴与尾座同步定心旋转隔离机构，并能根据转子结构对设备专用主轴和尾座工装夹具等不断优化调整。此外，摩擦焊设备工作中各运动部位和液压执行机构承受载荷和冲击很大，损耗严重，因此设备的耐用度和精度保持性十分关键。



图17 MTI全自动化惯性摩擦焊

(2) 电子束物理气相沉积设备

高压涡轮叶片的型面和缘板等部位需要涂覆热障涂层系统,以降低叶片表面温度,提升其服役寿命。电子束物理气相沉积是一种视线沉积方法,其在高真空中利用高能电子束汇聚熔化并蒸发陶瓷靶材,蒸汽在零件表面上方达到最大密度并在基体表面沉积为固态,形成垂直于基体表面的柱状涂层。陶瓷涂层对缺陷和边缘效应较为敏感,在实际服役过程中,往往较小的飞溅点和边缘不规则即可引发热障涂层的大面积剥落。此外,随着涡轮前温度提升,叶片缘板不易沉积柱状结构涂层的问题凸显。总体而言,涡轮叶片表面陶瓷面层应当具有均匀的厚度、稳定的柱状晶结构、良好的界面结合力和较低的表面粗糙度。

面向涡轮叶片热障涂层在实际服役中的问题,根据电子束物理气相沉积技术特点,其设备应当重点关注:①电子束对靶材熔池的精确扫描控制;②多维度且与蒸汽云匹配的零件旋转机构;③零组件基体的均匀预热;④高能电子枪的稳定性。

近年来,随着涡轮叶片热障涂层在各型号航空发动机中的普遍应用,电子束物理气相沉积设备得到了较快发展。一方面,通过设置多自由度旋转机构,在一定程度上降低了叶片的遮挡效应,优化了缘板表面涂层结构;另一方面,通过电子束蒸发仿真研究,在传统设备中引入双电子枪,既能预热零件基体至900~1000℃,又可加热陶瓷靶材,涂层整体性能得到了一定程度提升。图18为涡轮叶片涂层设备原理及喷涂热障涂层工艺过程及涂层后的涡轮叶片。

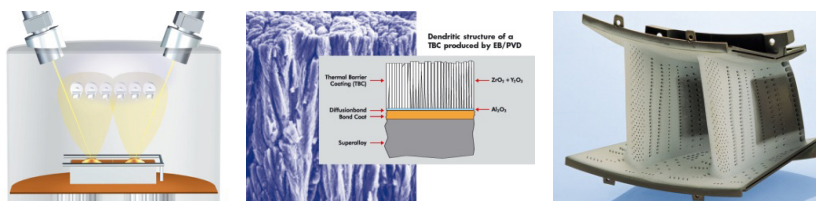


图18 涡轮叶片及涂层设备

(3) 复材零件切削加工设备

广泛使用复合材料是新一代航空发动机先进性的重要标志之一,碳纤维增强树脂基复合材料可用于制备更大、更轻的风扇叶片,轻质高强树脂基复合材料可用于制备风扇包容机匣^[14],甚至在进气机匣、风扇静子叶片、压气机静子叶片都采用树脂基复合材料实现减重目标。GENx发动机应用陶瓷基复合材料的燃烧室、高压涡轮、低压涡轮和喷管,实现叶片减重2/3,耐温性提高20%,对耗油率改善的贡献达30%。应用钛基复合材料的压气机整体叶环、低压轴,应用铝基复合材料的低压压气机和外涵部件替换铝合金可以显著提高发动机减重效果。

复合材料零件的连接处、边缘等位置还需要经过钻孔或者切削加工成形。由于复合材料的比强度、比弹性模量比金属高许多倍,它的导热系数为金属的几十、几百分之一,含有 SiO_2 、碳化硅、碳化硼及陶瓷等高硬度的纤维或颗粒。因此切削过程粉尘污染大,刀具磨损快,适宜高速、轻载、锋利切削。要求切削机床主轴能够提供足够高的转速,主轴密封性能好且不能有任何滴油滴液现象,最好在切削位置配置吸尘装置;切削环境全封闭密封,丝杠、导轨、主轴、工作台运动部位有专门的密封设计,防止粉尘对机床运动位置配合面造成污染,降低机床的损耗与故障率;由于复材零件多为已成形的薄壁结构件,

工作台应配置有自启动或液压夹具接口功能,最好能提供专用的环形件或复杂曲面薄壁件自适应装夹夹具。

(4) 增材制造设备

航空发动机中不少零部件采用高性能、高可靠、轻量化整体结构,使得零件结构趋向复杂化和功能结构一体化,传统加工方式不能满足设计快速迭代需求,而增材制造具备制造周期短、小批量生产成本低的特点,较好地解决了发动机研制阶段快速响应的难题。

现阶段,铺粉式增材制造设备在航空发动机中应用更为广泛,发展重点有以下几点:

首先,出于对工艺开发的需求,设备应具备更高的开放水平,参数可调性更高,例如严重制约成形件尺寸极限的激光光斑直径若能控制在0.05mm或者更小,才能更好成形小于0.1mm的壁厚结构。

其次,大尺寸、多激光束铺粉成形设备无论是在降低单件成本还是成形大尺寸零件层面都具有优势,但需注重成形仓风场和氧含量控制,以及一定的加热保温能力(降低成形过程热应力开裂风险)。

再者,设备智能流水化是降低成本、提高生产效率的最有效手段,各部分的模块化不仅会减少零件收取、成形准备等的待机时间,极大提高设备利用率,同时可减少操作人员与粉末的接触;设备的智能化将具备更完善的成形过程监控功能,不仅仅是现阶段单纯的拍摄记录成形过程,还应具备异常情况报警提示甚至简单问题自主处理能力。

最后,增材制造设备的大批量采用,必须建立在设备稳定可靠的基础上,减少各设备间差异才能更好控制成形件质量稳定性,主要监控方面是激光器的光斑大小、出光功率、聚焦能力的稳定性,成形空间的一致

性。此外,复杂零件内部结构无法有效进行表面处理,鉴于现阶段成形精度和粗糙度的限制,增减材复合制造也是一个发展方向,但重点需解决加工带来的变形、金属屑污染粉末材料,以及影响铺粉质量、粉末利用率低等问题。

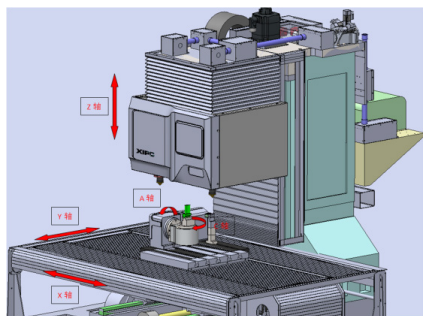
(5) 微孔精密加工设备(见图19)

航空发动机热端零件,诸如涡轮叶片、燃烧室、涡轮外环等曲面、复杂型面高精度零组件表面分布有数量众多的超精细微小气膜冷却孔,以降低其表面温度。传统的微孔加工方法包括机械钻削加工、电火花穿孔加工、电液束射流加工以及相关的复合加工方法,或在冶金质量、或在加工精度、或在加工效率上,愈发难以满足高精度气膜孔加工技术要求。此外,此类热端零组件表面通常涂覆有热障涂层,以隔绝高温燃气,进一步降低表面温度。先进工艺方法通常选择先涂层后制孔方案,以避免涂覆热障涂层工艺过程中造成的锁孔和堵孔现象。目前,激光加工技术由于对材料去除无选择性、加工精度及可靠性高等优点,应用范围不断扩大。常见的激光加工技术包括长脉冲激光加工、超快激光加工和水导激光加工。

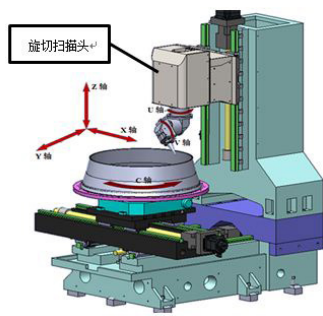
火焰筒等薄壁环形锻件通常使用长脉冲激光加工,加工过程中由于激光能量高会引起薄壁零件局部变形。高压涡轮叶片等复杂曲面精铸件通常使用超快激光或水导激光加工,但由于铸造误差,在气膜孔定位和解析过程中造成加工位置度偏移等问题,且由于零件存在极狭窄空腔,易发生激光击伤零件内腔的现象,尤其是异形角度微孔加工难度很大。以上问题往往一方面需要设备和加工程序在加工过程中予以自适应修正,另一方面需要通过智能检测系统进行激光控制。

综合考虑热端零组件的气膜孔加工技术指标,激光加工技术及设备应当重点关注:①长脉冲高能量激光器的稳定性;②超快激光和水导激光器的稳定性和功率;③配置六点定位和自适应加工模块;④设备的高定位精度和重复定位精度;⑤配置高灵敏度的激光穿透检测系统。

近年来,超快激光器的研制得到显著提升,功率从数瓦提升至数十瓦乃至数百瓦,使其加工效率大幅提升,工艺装备也在航空发动机涡轮叶片中得到应用。此外,长脉冲激光加工装备和超快激光加工装备均集成了穿透监测模块、功率监测模块、终端监测模块、三维自适应定位模块、高精度激光测距模块等,使得其既能有效应对铸造和加工带来的零件尺寸偏差,又可在一定程度上避免激光加工易发生的对壁击伤等问题。



a. 五轴超快激光制孔设备



b. 六轴长脉冲激光制孔设备

图19 微孔精密加工设备

4. 数控系统与CAM系统的需求分析

航空发动机零件的特征多样性和复杂性要求机床数控系统在功能选择方面

会更加多样化。叶盘进排气边、喷嘴小微活门组件、盘类榫槽以及难加工材料的高效和高表面质量等都要求机床能在极限性能状况下稳定运行,这就需要数控系统提供强大的功能支撑。由于长期在极限性能的恶劣工况下工作,机床就容易发生故障。好的数控系统在极限切削过程中能保持更加稳定的加工性能,在遇到各类机械故障时能及时预防并采取相应的应急措施,也能比较容易恢复正常。对机床用户来说,数控系统的使用流畅性、稳定性和可靠性至为关键。人性化的交互式界面设计、丰富的功能配置和支持多种接口与标准的兼容性,更容易提高操作者的使用粘性。航空发动机零件的复杂特征对编程要求很高,好的数控系统与专用的CAM软件集成在一起更容易获得用户认可。

智能化的CAM功能,内置典型特征参数推荐和动态功能,确保高速加工时的轮廓精确度;可根据加工参数实时调节传动参数;对于整体叶盘、叶片、喷嘴组件等复杂型面零件,控制系统与曲面建模工具完美结合,能够自动配置优化数控路径规划,进行样条拟合、包封、修补和边缘拟合,以实现最佳几何精度、表面质量和生产率;根据余量分布自动匹配粗加工策略,自动推荐精加工中型面搭接参数,避免出现接刀痕,能够自动检查参数突变区域,避免啃刀、咬边等加工缺陷;配置有集成式后处理程序。

三、航空发动机设备验收现状与关键技术

1. 验收流程

①设备选型:这个阶段是设备厂商了解用户需求的重要阶段,是保证设备满足后期使用要求的前提。机床企业的设计代表和航空用户的工艺代

表应进行多轮次的技术交流,将设备的功能、性能、配置、数控系统、精度、使用便捷性、可靠性等逐项落实。如果是重要设备,要专门设计样件进行试切加工,对功能和性能可行性进行验证,最终形成指导设备选型的《技术规格书》。对于新研制设备,探索机床企业与航空用户企业关键技术人员交叉任职、较长时期交流办公等深度融合的工作机制,有利于推动高端机床与航空发动机制造的匹配发展。

②招标投标:由设备厂商的销售代表和航空用户的商务代表依据《技术规格书》和招标投标法规完成。

③技术协议:对设备的用途、功能、结构形式、主要技术指标、安装要求、关键部件配置、验收执行标准、供货范围及其他特殊要求做出约定,形成《技术协议》。

④合同签订:由设备厂商的销售代表和航空用户的商务代表依据《技术协议》和合同法完成。

⑤设备预验收:这是至关重要的一环,尤其对于有特殊要求的设备,应该将特殊的性能要求充分进行加工验证,如有必要甚至可以创新性地设计新的验收标准。预验收主要检查、验证所购置的机床能否满足自身产品的加工质量及生产效率要求,提供的资料、备附件等是否齐全,具体内容根据《技术协议》中的要求。需要注意的是:机床通过正常运行试加工并经整体检验合格后,购置方才能进行预验收工作,预验收通过后该机床可向用户厂家发运。

⑥设备终验收:主要包括到货后开箱验收、安装过程验收、安装后总体验收。对于分体运输的大型设备或机床设备,在用户场地对于经过长途运输后的各部件安装组合精度进行恢复调试,更有利于机床的精度保证和运输隐患排查。机床验收时的所有验

收记录都应有签字确认,并交由用户设备主管部门保管存档。

2. 验收内容

航空发动机数控机床与装备的验收是指利用高精度仪器对机床本身的机械、电路、液压和气动装置等各系统进行综合使用性能、单项使用性能和静态及动态精度检测的过程,最后给出本机床性能的综合评估。验收的项目主要有以下五部分内容。

(1) 机床外观功能检测

主机及各零部件有无磕碰损伤、锈蚀等现象;各系统的动作试验、空载/负荷运转试验。

(2) 机床几何精度检测

各运动轴相对工作台移动的直线度、平行度、垂直度、平面度、跳动等,对于机床的几何精度和定位精度检测要打开后台补偿,查阅机床精度补偿量,对于补偿较大应要求进行硬件调整或更换。

(3) 机床位置精度检测

机床各驱动轴在数控系统控制下的定位精度、重复定位精度、反向差值、原点的复位精度、位置偏差及定位系统偏差等。一般推荐采用VDI/DGQ 3441, GB/T17421.2, ISO 230 - 2等标准。

(4) 机床工作精度检测

对于车削机床、四轴以下机床的工作精度检测一般推荐NAS试件,如果切削难加工材料或者有其它特殊要求,可适当增加未来需加工的典型特征试件;对于五轴机床除了NAS试件外,应针对性设计可检测外圆与内孔同轴度、圆度、倾斜角度、钻/镗孔精度及各尺寸精度等的试件;对于航空发动机难加工材料所用机床,主轴的扭矩、功率、转速要设计符合加工工况的扭矩/功率/转速曲线图,不能单个指标去衡量切削性能;尤其是对于工作刚度和动态性能要有针对性的验收措施。

(5) 机床综合性能检测

机床软件程序导入导出及后处理匹配性;机床负载一定周期下的可靠性与精度保持性;装夹找正、上下料、维护保养操作便捷性。

3. 存在问题与关键技术

新出厂的数控机床与装备在检验时,仅把机床本身的几何与位置精度、加工精度作为考核测试的标准是远远不够的,必须对机床综合精度和动态响应特性、连续运转时间、系统稳定性及机床温升等各项指标做出全面的检测。只有这样做才能够保证高速切削数控机床今后加工性能的稳定性^[15]。美国航空航天局于1969年发布了NAS 979标准,这也是此前唯一被行业公认的试件标准。然而大量的实践表明,NAS五坐标锥台检测试件加工时始终处于开角加工区域,不能准确反映机床的综合精度。传统精度检测仪器如激光干涉仪、双球杆仪、激光跟踪仪等对多轴联动误差和动态误差检验的局限性逐步显现。

近年来,S型试件、RTCP检验方法逐渐获得行业的推广和应用,有效弥补了五轴机床加工航空难加工材料时工作性能检测的短板。此外航空发动机企业对于专用或者复杂的机床装备还要设计专门样件,进行样件加工,它是对机床从设计到制造再到安装调试的质量,特别机床性能的总体检验,其直接关系到机床装备的功能、加工精度和综合加工能力的可靠性。

(1) S型试件检测

NAS试件主要对机床的几何精度敏感,而对动态精度不敏感,按照此标准验收的五轴机床在加工飞机结构零件复杂曲面时,大量出现过切、欠切、表面严重波纹等情况。为此,由中国主持修订、由中航工业成都飞机工业(集团)有限责任公司基于航空制造经验及多年自主研究成果

提出的“ISO10791-7: 2020《加工中心检验条件第7部分：精加工试件精度检验》国际标准”，获国际标准化组织（ISO）批准正式发布，成为国际标准^[17]。如图20所示，试件由S形走向的扭曲曲面形成的等厚度的缘条和矩形底座组成。S型缘条由上下两个平面上的四条S形曲线相互交

叉构成。由于缘条与底平面的夹角连续变化，在连续加工S型曲面缘条两侧时，可实现检查五轴数控机床连续变轴加工零件表面时的粗糙度、厚度、轮廓误差等目的，检验机床开、闭角转换时的性能，更好地反映多轴加工中各运动部件的综合精度和动态响应特性，更能体现航空薄壁件的机

床加工性能。在图20中，直纹面A由两条准均匀三次B样条曲线定义，这两条B样条曲线分别由两组控制点即 $M_i(i=0\sim11)$ 和 $N_i(i=0\sim11)$ 定义。与直纹面A相似，直纹面B也由两条准均匀三次B样条曲线进行定义，两条样条线分别由两组控制点 $P_i(i=0\sim11)$ 和 $Q_i(i=0\sim11)$ 定义^[18]。

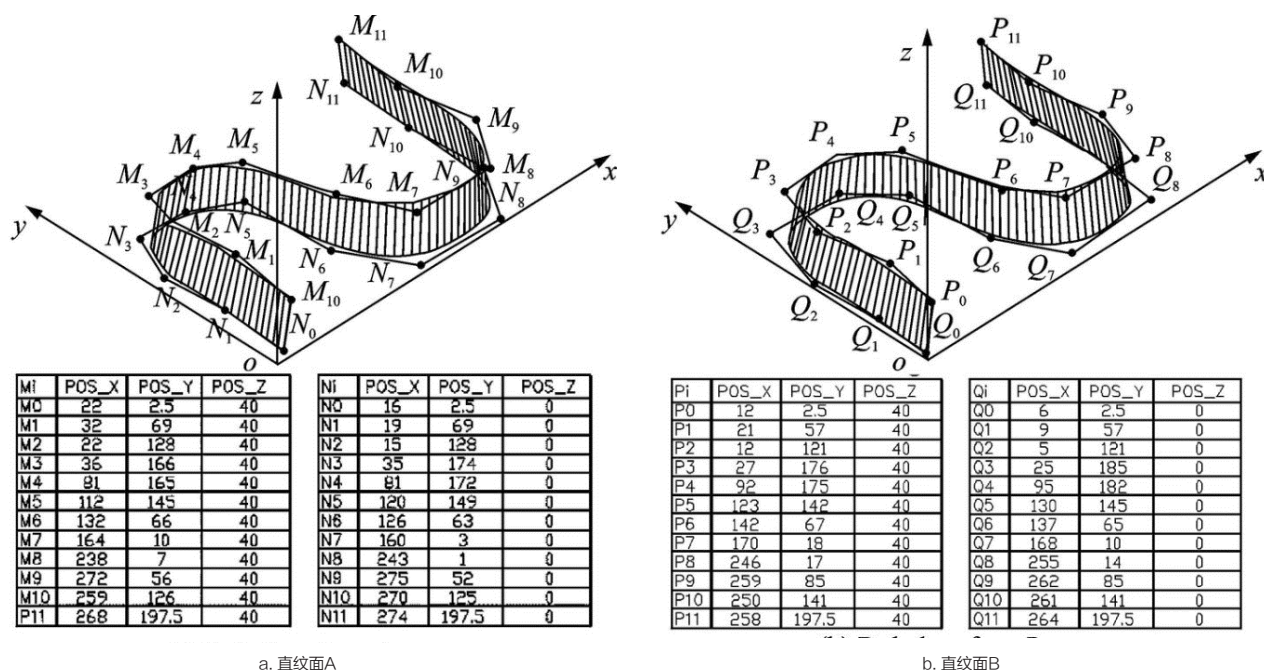


图20 S型试件

(2) RTCP精度检验

随着用于检测刀具中心点空间位置误差的R-test测量仪的研究成熟，可通过三个位移传感器测量球头空间位置配合机床刀具跟随功能（Rotation Tool Centre Point, RTCP），快速检测多轴联动时的刀具中心点空间运动误差。R-test测量装置的性能主要取决于测量范围和测量敏感度，应该选择较大测量半径和较高测量敏感度的测量仪^[19]。目前，ISO10791-6 国际标准中针对双摆头五轴机床的RTCP检测（见图21）用AK4轨迹操作简单，无须编写检测数控代码，但无法反映出航空发动机零件曲面突变加工时所

需的机床动态性能，在 RTCP 检测轨迹的规划过程中，应采用更加复杂的函数或通过选取点位进行样条拟合的方式生成检测轨迹（如S型轨迹），以提升检测性能^[20]。



图21 RTCP精度检测

(3) 样件设计与检测

航空发动机零件对于机床的刚

度、特殊工位行程可达性、难加工材料切削性、使用便捷性等苛刻要求。设计与真实零件特征相似的样件，观察样件加工过程后置处理、刀具路径规划、路径光顺、误差检测与补偿、原位测量与自适应补偿的各功能的运行状况^[21]，检测加工样件的精度可以有效评价机床的使用性能。

综上，对于航空发动机零件加工的关键设备，用传统检测仪器进行几何精度和位置精度检测；对于多轴机床要进行S形试件加工和RTCP精度检查工作精度；对于精加工或难加工材料切削机床要设计专门样件进行工作精度检查。

4. 验收项目与流程

重要的机床与设备采购验收主要经过以下九大环节才能完成验收（见图22）。机床设计人员应该在设备选型伊始就充分参与进来，并与机床使用的工艺人员充分交流，摸透用户需求；在机床使用前工艺人员要选择合适的验收标准，对机床所需的性能能够充分加以检验。

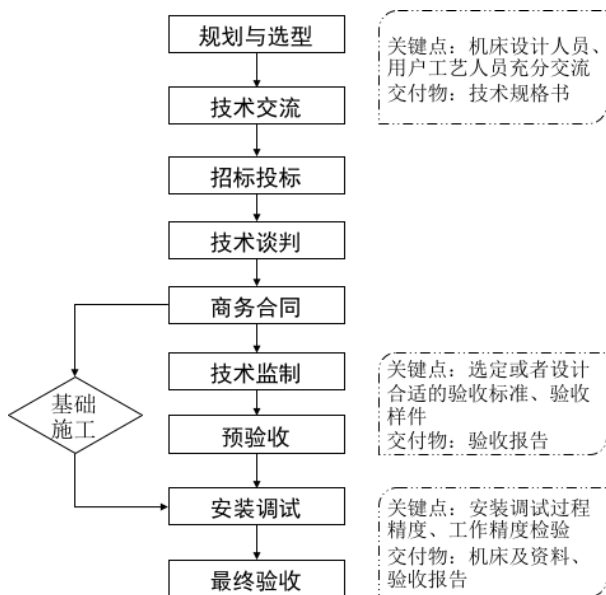


图22 验收流程逻辑图

四、结论

综上所述，本文根据航空发动机零件结构的复杂特点和加工中的特殊要求，对所需的关键短板装备性能特点进行分析。通过总结航空发动机的设备选型、性能提升改造、验收与使用经验，得到以下结论：

（1）对于航空发动机所需的关键与瓶颈装备，应充分发挥“用、产、学、研”机制，由用户牵头，设备企业、高校和研究机构参与，研制之初就吃透工艺需求，共同攻关。新开发的机床应经过大量机床测试，通过几轮迭代创造出符合先进航空发动机工艺需求的新装备。

（2）航空发动机研制生产准备周期长，需要的工艺装备品种多，要求高。而且发动机还需要不断更新换代，具有典型的多品种小批量特征，尤其是特种加工设备，批量不大。对于这些难度高、投资大、批量小的工艺装备需要国家项目大力支持。

（3）机床设计应重点关注结构功能一体化、多种工艺复合机床的研制，关注本文提出的共性技术性能提升。同时，机床设计者和机床使用者应该大胆创新，敢

于提出新标准，与行业 and 标准协会共同推动高端机床，建立中国标准。

（4）对于粉末冶金难加工材料高效切削、复合材料切削加工、复杂型面（如涡轮盘榫槽等）电加工和磨削加工、激光打孔（单晶叶片气膜孔）、增材制造等设备和验收标准还有待进一步开发和研究。□

参考文献

- [1] 航空制造工程手册-发动机机械加工[M].北京:航空工业出版社,2016(08).
- [2] 汤立民,宋智勇.航空数控加工机床发展方向及其关键技术[J].航空制造技术,2010(10):45-48.
- [3] "两机"专项和数控机床专项现场对接会在北京召开[J].世界制造技术与装备市场,2018(2):17-19.
- [4] 工信部产业发展促进中心.数控机床成果在航空发动机领域应用推广会在株洲召开[EB/OL].(2018-12-17).<http://idpc.org.cn/xwdt/zxdt/1252.htm>.
- [5] 刘峰,高长才.展望未来机床 服务航空工业[J].航空制造技术,2014(11):56-59.
- [6] 王磊,卢秉恒.中国工作母机产业发展研究[J/OL].中国工程科学:1-9[2020-04-27].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4421.G3.20200403.1716.007.html>.
- [7] 华润熙.斯贝发动机项目的回忆和思考[J].航空工业经济研究,2000(5):10-13.
- [8] 赵万华,张俊,刘辉,杨晓君.数控机床精度评价新方法[J].中国工程科学,2013,15(01):93-98.
- [9] 马军旭,赵万华,张根保.国产数控机床精度保持性分析及研究现状[J].中国机械工程,2015,26(22):3108-3115.
- [10] 叶洪涛,贺芳,李培阳.航空产品与机床设备发展的相互影响[J].航空制造技术,2015(05):42-45.
- [11] 颜克辉,孔详志,刘春时,罗志久,徐吉存.五轴联动叶片加工中心发展现状及其结构特点[J].世界制造技术与装备市场,2016(01):70-72+79.
- [12] 马艳玲.航空发动机零件高效加工对机床工具的要求[J].金属加工(冷加工),2011(03):19-23.
- [13] 于建华,张渝.粉末冶金涡轮盘精密加工技术研究现状[J].航空制造技术,2018,61(15):28-36.
- [14] 航发科普.航空发动机上典型复合材料的应用[EB/OL].(2019-01-15).<http://www.cannews.com.cn/2019/0115/188156.shtml>
- [15] 张劲英.高速切削数控机床的验收[J].科技创新与应用,2014(36):111-112.
- [16] 牟文平.掌握五轴联动数控机床加工精度技术检测的世界标准[N].中国航空报,2015-11-14(S03).
- [17] 中国"S试件"五轴机床检测方法正式成为国际标准.<http://www.cmtba.org.cn/level3.jsp?id=4216>.
- [18] 陈耿祥,李迎光,郝小忠,刘长青.S试件几何形状定义与特性分析[J].南京航空航天大学学报,2017,49(06):793-797.
- [19] 刘大伟,郭志平,宋智勇.一种R-test球头球心检测装置结构优化设计方法[J].机械工程学报,2013,49(23):161-166.
- [20] 丁启程,王伟,姜忠,张靖,杜丽,王立平.五轴机床RTCP检测的轨迹生成与性能比较[J].机械工程学报,2019,55(20):116-127.
- [21] 毕庆贞.复杂曲面零件数控加工的关键问题——解读《复杂曲面零件五轴数控加工理论与技术》[J].中国机械工程,2018,29(14):1758-1763.

2019年全球机床行业概况

中国机床工具工业协会 王黎明 编译

美国Gardner Intelligence公司是一家多年从事全球机床行业统计分析的专业公司，近期发布了2019年世界机床行业统计调查报告，笔者就其中的概况进行了编译，供行业参考。报告中所述机床包括金属切削机床和金属成形机床，有关中国的统计数据由中国机床工具工业协会提供。

美国Gardner Intelligence公司对世界机床行业统计调查显示，在2017和2018年，世界机床消费排名前15的国家和地区中的12个机床消费出现了增长，这种连续两年出现正增长的情况在近两年来是相当罕见的。

2017和2018年这次世界范围内的机床行业上行，以及机床市场周期性很强的特点，都对2019年机床消费走势早已做出了重要的提示，那就是随之而来的世界性市场下行走势。

最新的调查结果已经对外公布，全球机床消费在2019年下降了131亿美元，同比下降13.8%，为821亿美元。由此看出，2019年是自2010年世界开始从全球经济大衰退中恢复以来机床消费市场的最低水平。前15个机床消费国家和地区中大约12个机床消费出现了下降。

尽管2017和2018年有所恢复，但自2011年以来全球机床市场总体上看实质是处于收缩的趋势。2019年中国机床消费223亿美元，下降了64亿美元，同比下降25.3%（编者注：Gardner公司应该是根据其阶梯汇率变化统计模型计算，如剔除汇率变化因素，按中国机床工具工业协会提供的数据计算为同比下降22.2%。），因此中国机床消费下降额在全球机床下降额中占比在一半左右。除其他行业外，中国汽车工业在2019年底发展已经开始放缓（编者注：数据显示，中国汽车工业2018年首次出现年度同比下滑。）。而且受新冠疫情的影响，中国经济面临更加严峻的考验。其结果可能导致中国机床消费在2020年进一步下降，降幅或为15%~25%，大约50亿美元左右（编者注：此为Gardner公司早些时候统计调研的判断，近两个月新冠疫情已经在全球蔓延，其他国家和地区机床消费同样会受到较大影响。）。

2019年中国机床消费占全球机床市场的27.2%，这是

自2008年以来中国机床消费在全球机床消费中占比首次低于30%。

此外，2020年中国在全球机床消费中的占比可能进一步下降，产业可能向着受疫情冲击不太严重的东南亚国家转移，或者向墨西哥转移。墨西哥一直宣称要在全球制造业中展现出更多的存在感。2019年墨西哥机床消费25亿美元，这是该国连续8年机床消费超过20亿美元中排位第三的高点，其2019年机床消费比2018年增加了9.1%。在全球前15个机床消费国家和地区中，墨西哥成为第二个增长幅度最大的国家（仅低于巴西），在世界增长速度最快的国家和地区排名中位列第五位。值得关注的是：增长最快的前三位都是较小的国家，这些国家的高增长率比较容易实现。2019年墨西哥机床消费维持在世界第八位，而其机床消费在全球所占份额由2.4%提高到了3.1%。2019年成为墨西哥在全球机床消费所占份额中历史上最高的一年。

美国作为世界第二大机床消费国，2019年消费了97亿美元的机床产品，与2018年相比下降了1.6%，也使得2019年成为美国自1998年以来机床消费位列第三高点的年份。

机床消费前15个国家和地区有12个出现下降，其中美国下降是最少的，从而使美国在全球机床消费市场所占的份额明显的增加，2019年美国消费了世界11.9%的机床产品，这是自2001年以来美国所占全球机床消费份额最高的一年。重要的是因为2001年正是美国制造业大规模离岸外包的开始，原因是美联储人为地设立了低利率，以帮助美国从互联网泡沫中恢复过来。

自2009年末或2010年初经济大衰退结束以来，随着制造业向北回归，更具体地说是向美国和墨西哥回归，钟摆开始回摆，在此期间，美国和墨西哥在全球机床消费中所占的份额总的看普遍在上升。

新冠疫情使得一些国家相当一部分人口处于限制流动的状态，这导致经济活动明显减少。由此，大概率会导致2020年全球机床消费下降15%或更多。如果全球机床消费降低15%的话，那么这将是自2009年经济大衰退以来首次出现全球机床消费跌落到700亿美元以下。

全球机床生产与消费类似，2019年全球机床生产842亿美元，下降了129亿美元，同比降低13.3%。和全球消费一样，全球机床生产下落到2010年以来的最低水平，2019年在前15个机床生产的国家和地区当中只有巴西、法国和加拿大生产是正增长的。

中国作为世界第一大机床生产国，生产下降46亿美元，同比下降23.1%（编者注：Gardner公司应该是根据其阶梯汇率变化统计模型计算，如剔除汇率变化因素，按中国机床工具工业协会提供的数据计算中国机床生产应下降40.4亿美

元，同比下降为17.2%。），中国的机床生产在过去的8年中有6年出现了负增长，下落到2009以来的最低点。

2019年中国在全球机床生产中的份额占23.1%，这是中国自2008年以来在全球机床生产中所占份额最低的一年，2008年仅占16.4%。

在机床生产排名前10位的国家和地区当中，巴西是唯一出现正增长的国家，同比增长了12.6%，达到16亿美元，除巴西外，排名前10位的其他国家和地区机床生产均为负增长。其中，德国和美国降幅在10%以内，这使得德国和美国在全球机床生产的份额有所增加。其它机床生产排名前15位的国家和地区，在全球机床生产所占份额增长的国家还有意大利、法国、英国和加拿大。调查结果显示出了全球机床生产重心从亚洲向欧洲转移的苗头，很值得关注。□

附表1：2019年全球机床生产前10位的国家和地区

中国	194.2 亿美元
德国	140 亿美元
日本	129.9 亿美元
意大利	65.1 亿美元
美国	60 亿美元
韩国	44.7 亿美元
中国台湾	39.5 亿美元
瑞士	32.1 亿美元
巴西	16.2 亿美元
西班牙	12.3 亿美元

附表3：2019年全球机床出口前10位的国家和地区

德国	91.9 亿美元
日本	79.4 亿美元
中国	44.2 亿美元
意大利	37.5 亿美元
中国台湾	30.7 亿美元
瑞士	27 亿美元
美国	24.1 亿美元
韩国	23.2 亿美元
比利时	12.8 亿美元
西班牙	10.3 亿美元

附表2：2019年全球机床消费前10位的国家和地区

中国	223 亿美元
美国	97 亿美元
德国	79 亿美元
日本	60 亿美元
意大利	44 亿美元
韩国	32 亿美元
印度	26 亿美元
墨西哥	25 亿美元
巴西	20 亿美元
俄罗斯	18 亿美元

附表4：2019年全球机床进口前10位的国家和地区

中国	72.9 亿美元
美国	61.2 亿美元
德国	30.8 亿美元
墨西哥	25 亿美元
意大利	16 亿美元
印度	15 亿美元
俄罗斯	12.2 亿美元
法国	12 亿美元
越南	11.9 亿美元
比利时	11.9 亿美元

2020年一季度机床工具行业经济运行情况分析

中国机床工具工业协会

突发的新冠肺炎疫情给我国经济社会发展带来前所未有的冲击,也给机床工具行业的运行带来严重影响。自1月下旬后疫情防控最紧张的一段时间里全国经济活动和工业生产基本暂停。因此,2020年一季度机床工具行业运行的主要特点是,经济运行下行,亏损额扩大,主要经济指标下降。但1~3月同比降幅均比1~2月同比降幅明显收窄,表明行业运行正在逐步恢复。

3月以后,随着国内疫情得到有效控制、复工复产有序推进和国家“六稳”、“六保”等各项政策措施的实施,经济正在加速恢复,机床工具行业也在同步恢复。但疫情带来的外部环境变化,对未来行业格局将产生深远影响。

截至2020年3月,我国机床工具行业实现营业收入2000万元以上的“规模以上企业”(下称“规上企业”)共5562家,与上年底相比,企业数量减少148家,占总数的2.6%。这5562家企业在八个分行业的分布是:金属切削机床808家(占14.5%),比上年底减少8家;金属成形机床524家(占9.4%),比上年底减少26家;工量具及量仪728家(占13.1%),比上年底增加13家;磨料磨具1922家(占34.6%),比上年底减少25家;机床功能部件及附件347家(占6.2%),比上年底减少35家;铸造机械472家(占8.5%),比上年底减少49家;木竹材加工机械127家(占2.3%),比上年底减少21家;其它金属加工机械634家(占11.4%),比上年底增加3家。

一、主要经济指标完成情况

1. 营业收入

根据国统局规上企业统计数据,机床工具行业2020年

1~3月累计完成营业收入同比降低20.8%,降幅较1~2月同比降幅(-25.4%)收窄4.6个百分点。其中金属切削机床行业1~3月累计完成营业收入同比降低33.3%,降幅较1~2月同比降幅(-37.0%)收窄3.7个百分点。金属成形机床行业1~3月累计完成营业收入同比降低30.2%,降幅较1~2月同比降幅(-30.9%)收窄0.7个百分点。工量具及量仪行业1~3月累计完成营业收入同比降低21.4%,降幅较1~2月同比降幅(-30.6%)收窄9.2个百分点。磨料磨具行业1~3月累计完成营业收入同比降低9.4%,降幅较1~2月同比降幅(-14.4%)收窄5个百分点。

在这次疫情防控过程中,大约有30余家机床工具企业接受当地政府任务,研发生产口罩机、测温仪等抗疫急需的设备,有的生产量还比较大。在1~3月的营业收入中也包含这部分产品的收入。

2020年1~3月机床工具行业营业收入完成及同比变动情况详见图1。

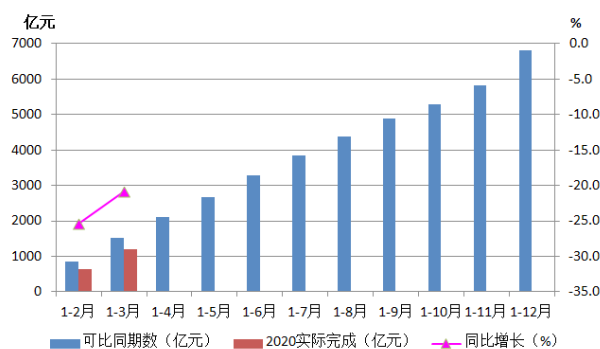


图1 机床工具行业营业收入完成及同比变动情况（国统局）

图2为2020年1~3月份营业收入同比变化与2019年及

2018年主营业务收入同比变化的对比。由图可见,2018年4月份达到14.6%的高点之后波动下行,但全年仍保持了8.3%的同比增长,2019年除1~3月、1~4月为累计同比增长之外,其余各月均为同比降低。2020年1~3月营业收入同比变化曲线又有大幅下探。

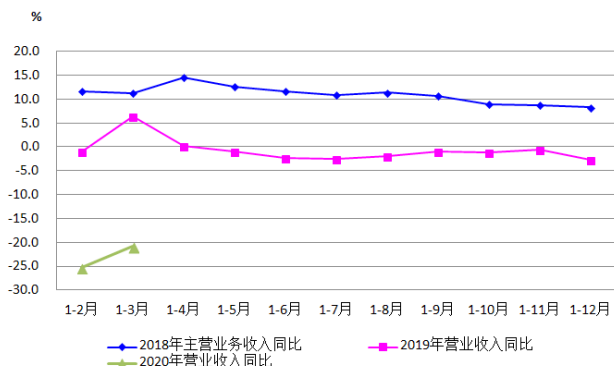


图2 机床工具行业营业收入增速同比变化（国统局）

图注：2018年前国统局采用“主营业务收入”指标，2019年后变更为“营业收入”

协会重点联系企业2020年1~3月累计完成营业收入同比降低29.9%，降幅较1~2月同比降幅（-25.2%）扩大4.7个百分点。其中，金属切削机床行业累计完成营业收入同比降低32.4%，降幅较1~2月同比降幅（-34.2%）收窄1.8个百分点；金属成形机床行业累计完成营业收入同比降低36.9%，降幅较1~2月同比降幅（-31.9%）扩大5个百分点；工量具行业累计完成营业收入同比降低29.8%，1~2月为同比增长14.3%；磨料磨具行业累计完成营业收入同比降低23.5%，降幅较1~2月同比降幅（-23.1%）扩大0.4个百分点。

协会重点联系企业与国统局数据相比，同比降幅更大，且较1~2月同比降幅有所扩大。工量具行业由1~2月同比降幅增长转为同比降低，值得关注。

2. 利润总额

根据国统局规上企业统计数据，机床工具行业2020年1~3月累计实现利润总额同比降低31.3%，降幅较1~2月同比降幅（-42.7%）收窄11.4个百分点。其中金属切削机床行业1~3月累计亏损0.7亿元，同期为盈利9.2亿元。金属成形机床行业1~3月累计实现利润总额同比降低71.9%，降幅较1~2月同比降幅（-92.9%）收窄21.0个百分点。工量具及量仪行业1~3月累计实现利润总额同比降低16.2%，降幅较1~2月同比降幅（-44.2%）收窄28.0个百分点。磨料磨具行业1~3月累计实现利润总额同比增长1.5%，1~2月同比降幅为同比降低1.8%。2020年1~3月机床工具行业利润总额实现及同比增长情况详见图3。

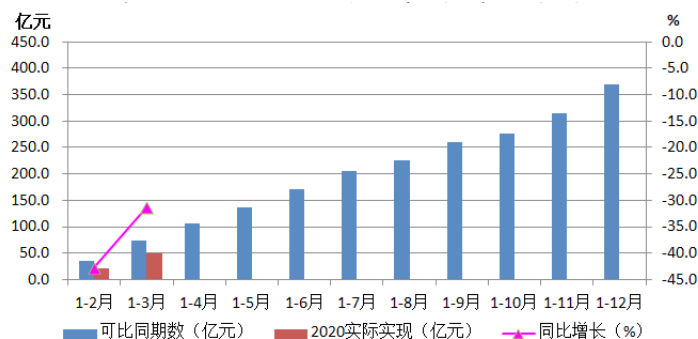


图3 机床工具行业利润总额实现及同比变动情况（国统局）

图4为2020年1~3月份机床工具行业利润总额同比变化与2019、2018两年利润总额同比变化的对比。由图可见，2018年1~4月累计利润总额同比增长达到峰值，其后逐月下行，但全年各月利润总额累计同比始终保持增长。2019年各月利润总额累计同比均为降低。2020年1~3月份又有进一步下探。

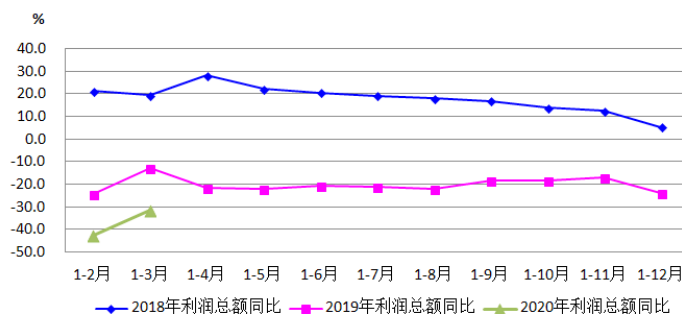


图4 机床工具行业利润总额增速同比变化（国统局）

2020年1~3月，重点联系企业累计实现利润总额同比降低96.6%。其中金属切削机床行业为亏损3.37亿元，比上年同期多亏损1.87亿元。金属成形机床行业累计实现利润总额同比降低81.3%，工量具行业累计实现利润总额同比增长0.1%，磨料磨具行业累计实现利润总额同比降低25.6%。

协会重点联系企业和国统局的利润总额同比变动趋势大体相同。

3. 亏损企业比例

根据国统局规上企业统计数据，2020年1~3月机床工具行业亏损企业占比为34.8%，较1~2月同比降幅（38.3%）收窄3.5个百分点。其中金属切削机床行业亏损面最大，为49.9%，较1~2月同比降幅（57.9%）收窄8个百分点；金属成形机床行业为41.8%，较1~2月同比降幅（45.6%）收窄3.8个百分点。工量具及量仪行业为30.9%，较1~2月同比

降幅（37.9%）收窄7个百分点。磨料磨具行业为28.0%，较1~2月同比降幅（27.8%）扩大0.2个百分点。

2020年1~3月，重点联系企业中亏损企业占比为41.4%，较1~2月同比降幅收窄21.5个百分点。其中金属切削机床行业为50.0%，较1~2月同比降幅收窄21.2个百分点；金属成形机床行业为30.8%，较1~2月同比降幅收窄27.6个百分点；工量具行业亏损企业占比为38.2%，较1~2月同比降幅收窄25.4个百分点；磨料磨具行业为22.7%，较1~2月同比降幅（27.3%）收窄4.6个百分点。

国统局数据和协会重点联系企业数据均表明，3月份行业企业经营状况有所改善，亏损面缩小。

4. 金属切削机床和金属成形机床产量

根据国统局规模以上企业统计数据，机床工具行业1~3月累计，金属切削机床产量同比降低29.6%，其中数控金属切削机床产量同比降低36.0%。金属成形机床产量同比降低25.8%，其中数控金属成形机床产量同比降低32.3%。以上各项指标1~3月同比降幅均比1~2月同比降低幅度明显收窄。图5为国统局机床工具行业金属加工机床产量及同比变动情况。

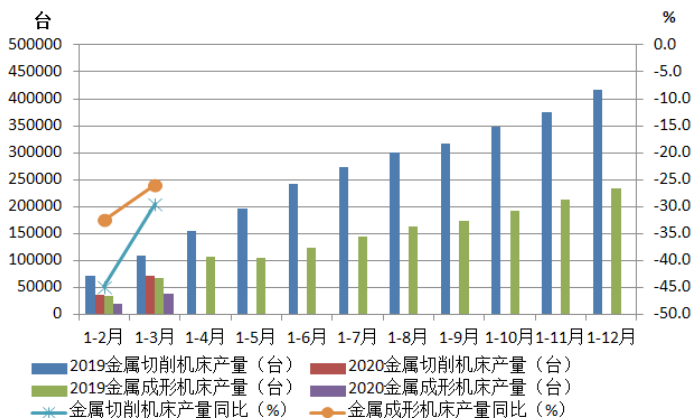


图5 机床工具行业金属加工机床产量及同比变动情况（国统局）

图6和图7分别为2020年1~3月份机床工具行业金属切削机床和金属成形机床累计产量同比变化与2019、2018两年累计产量同比变化的对比。由图可见，2018年金属切削机床产量累计同比自1~5月达到峰值后逐月下行，但全年始终为同比增长。而2019年除1~3月累计同比增长外，其他各月累计同比均为降低，且降低幅度呈逐月加大趋势。2018年金属成形机床产量累计同比自1~3月后就已经进入下行区间，2019年延续了上年下行趋势。不论金属切削机床还是金属成形机床，2020年1~3月份产量同比下降幅度均进一步加大。

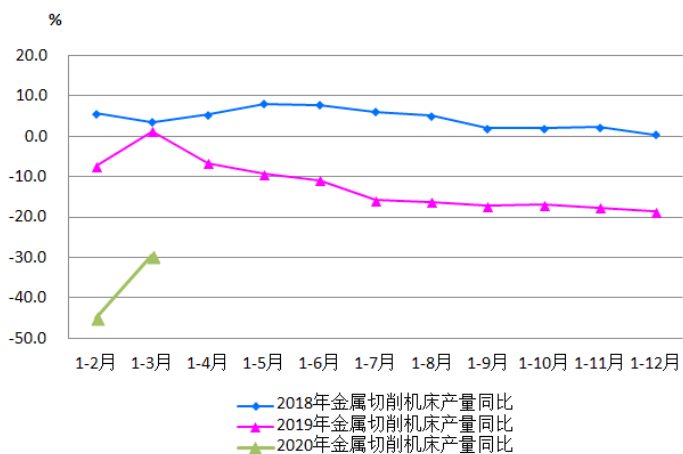


图6 机床工具行业金属切削机床产量增速同比变化（国统局）

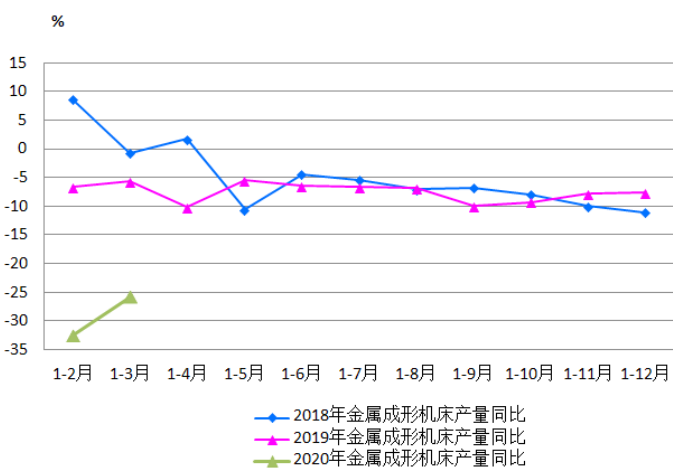


图7 机床工具行业金属成形机床产量增速同比变化（国统局）

协会重点联系企业2020年1~3月累计，金属切削机床产量同比下降29.8%；金属成形机床产量同比下降37.4%。与国统局数据基本吻合。

5. 金属加工机床订单情况

根据协会对金属加工机床订单情况的统计，协会重点联系企业2020年1~3月金属加工机床新增订单同比下降4.0%，降幅较1~2月同比降幅收窄13.7个百分点，在手订单同比下降8.5%，降幅较1~2月同比降幅收窄7.4个百分点。其中，金属切削机床新增订单同比下降2.8%，降幅较1~2月同比降幅收窄32个百分点。在手订单同比增长4.4%，1~2月为同比下降5.6%；金属成形机床新增订单同比下降6.5%，1~2月为同比增长14.4%。在手订单同比下降30.2%，较1~2月同比降幅收窄1.2个百分点。由此可见，除金属成形机床的新增订单外，相对1~2月同比均有改善。

6. 产成品存货

根据国统局规上企业统计数据,机床工具行业2020年3月末产成品存货同比增长6.2%。其中,金属切削机床行业产成品存货同比增长0.9%,金属成形机床行业产成品存货同比增长6.9%,工量具及量仪行业产成品存货同比增长0.4%,磨料磨具行业产成品存货同比增长22.6%。

协会重点联系企业2020年3月末产成品同比增长9.5%。其中,金属切削机床同比增长11.0%,金属成形机床同比增长7.6%。工量具产成品存货同比下降2.3%。磨料磨具行业产成品存货同比增长19.1%。

国统局和协会重点联系企业产成品存货同比变化趋势相同。相比之下,协会重点联系企业的产成品存货同比增长幅度更大。存货的增加与疫情发生、销售受阻有密切关系。

二、进出口情况

1. 总体情况

受新冠疫情影响,2020年一季度机床工具进出口同比均呈大幅下降。2020年1~3月,机床工具商品进出口总额56.0亿美元,同比下降16.0%。其中,进口26.7亿美元,同比下降21.3%;出口29.3亿美元,同比下降10.6%。虽然进出口均为下降,但出口同比下降的幅度不到进口的一半。与2020年1~2月份相比,进、出口下降的幅度分别收窄12.1和8.7个百分点。2020年1~3月份机床工具产品进口和出口情况见图8、图9。

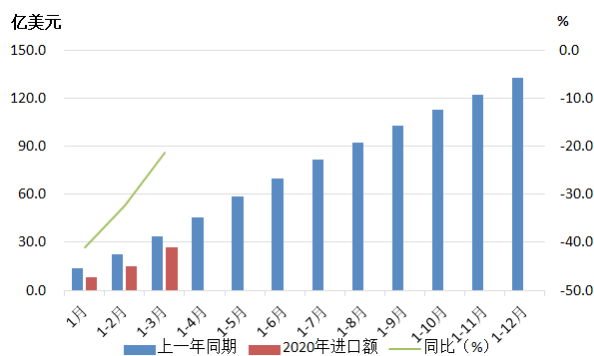


图8 机床工具产品进口额（累计值）

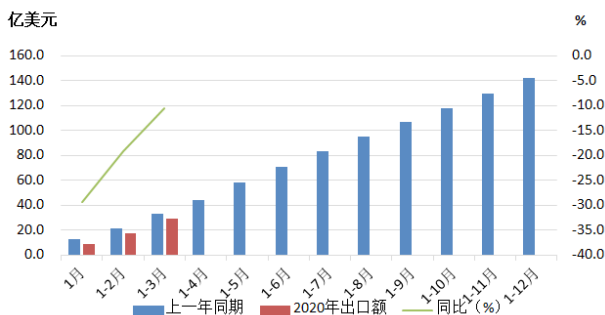


图9 机床工具产品出口额（累计值）

2020年1~3月机床工具进出口保持了自2019年6月以来的顺差态势,贸易顺差为2.6亿美元。2020年1~3月年呈现贸易顺差的有金属成形机床(0.3亿)、木工机床(2.8亿美元)、切削刀具(2.3亿美元)、磨具磨料(3.8亿美元)铸造机(0.1亿美元)五个商品领域。行业及主要产品类别进出口情况详见表1。

表1 2020年1~3月机床工具行业及主要产品类别进出口情况

序号	项 目	进口金额 (亿美元)	同比 (%)	出口金额 (亿美元)	同比 (%)
1	机床工具总计	26.7	-21.3	29.3	-10.6
2	金属切削机床	10.7	-27.4	5.4	-20.5
3	金属成形机床	2.3	-48.5	2.6	-29.0
4	数控装置*	5.0	46.1	4.2	56.5
5	切削刀具	3.3	-18.1	5.5	-15.8
6	量具量仪	0.3	-25.5	0.3	-26.5
7	磨料磨具	1.4	-4.7	5.3	-6.6

*需说明的是,2020年1~3月份数控装置复进口额很大,剔除此因素后,进口金额同比为-6.8%,这一因素也对应影响出口金额及其同比。

2. 金属加工机床进出口情况

2020年1~3月份金属加工机床进口呈较大幅度下降趋势,但降幅比1~2月份明显收窄。金属加工机床进口额13.0亿美元,同比下降32.3%,较1~2月同比降幅(-37.9%)收窄5.6个百分点;其中,金属切削机床进口额10.7亿美元,同比下降27.4%,较1~2月同比降幅(-33.8)收窄6.4个百分点;金属成形机床进口额2.3亿美

元,同比下降48.5%,较1~2月同比降幅(-52.0)收窄3.5个百分点。

2020年1~3月份金属加工机床出口也呈较大幅度下降趋势,但降幅比1~2月份明显收窄。金属加工机床出口额8.0亿美元,同比下降23.5%,较1~2月同比降幅(-28.8%)收窄5.3个百分点;其中,金属切削机床出口额5.4亿美元,同比下降20.5%,较1~2月同比降幅

(-25.7%) 收窄5.2个百分点; 金属成形机床出口额2.6亿美元, 同比下降29.0%, 较1-2月同比降幅(-34.1%) 收窄5.1个百分点。

1~3月同比降幅较1~2月明显收窄, 体现了新冠疫情得到控制后外贸和工业生产的恢复。

(1) 金属加工机床进口来源前三位的国家和地区

2020年1~3月金属加工机床进口来源国家和地区中, 与2019年全年一样, 日本、德国和中国台湾仍依次占居前三位, 三者金额合计占比高达70%以上。从这三个国家和地区进口的金额同比都明显降低, 其中德国降低幅度最大, 达42.5%, 中国台湾降幅也高达34.5%。(详见表2)

表2 2020年1~3月金属加工机床进口来源前三位的国家和地区

排序	国别(地区)	进口金额(亿美元)	同比(%)	占比(%)
1	日本	4.4	-18.1	33.8
2	德国	3.6	-42.5	27.3
3	中国台湾	1.2	-34.5	9.4

(2) 金属加工机床出口去向前三位的国家和地区

2020年1~3月金属加工机床出口去向国中, 与2019年全年一样, 越南、印度和美国仍依次占居前三位。出口这三个国家的金额及占比差距不大, 三者占比合计为25.4%。其中对印度出口降低幅度最大, 达38.0%。(详见表3)

表3 2020年1~3月金属加工机床出口去向前三位的国家和地区

排序	国别(地区)	出口金额(亿美元)	同比(%)	占比(%)
1	越南	0.8	-8.1	9.7
2	印度	0.7	-38.0	9.1
3	美国	0.5	-19.5	6.6

(3) 进口金额排前五位的金属加工机床品种

2020年1~3月进口前五位品种合计金额占比达到70%以上, 其中加工中心占比最大(27.0%)。各品种均同比下降, 其中加工中心和车床下降超过30%。(详见表4)

表4 2020年1~3月进口金额排前五位的金属加工机床品种

排序	金属加工机床品种	进口金额(亿美元)	同比(%)	占比(%)
1	加工中心	3.5	-32.7	27.0
2	磨床	2.2	-21.4	17.1
3	特种加工机床	1.8	-11.3	13.8
4	车床	1.1	-33.7	8.6
5	齿轮加工机床	0.7	-24.7	5.2

(4) 出口金额排前五位的金属加工机床品种

2020年1~3月出口前五位的品种合计金额占比达60%以上, 其中特种加工机床占比最大(29.7%)。各品种均同比下降, 其中车床和其他成形机床下降幅度超过30%。(详见表5)

表5 2020年1~3月出口金额排前五位的金属加工机床品种

排序	金属加工机床品种	出口金额(亿美元)	同比(%)	占比(%)
1	特种加工机床	2.4	-8.0	29.7
2	车床	0.9	-32.3	10.9
3	成形折弯机	0.6	-18.6	8.0
4	其他成形机床	0.5	-39.2	6.3
5	加工中心	0.4	-18.5	5.5

三、近期行业形势研判

1. 有利因素

(1) 我国拥有超大市场规模优势和内部潜力, 经济长期向好的基本面没有改变

我国拥有14亿人口, 市场规模超大, 制造业体系完整, 经济韧性强, 疫情的冲击是短期的和阶段性的。3月份宏观经济运行情况比前两个月已经得到明显改善。宏观经济改善的态势将为机床工具行业运行情况的改善提供良好基础。针对中国制造面临的严峻挑战, 国家正采取有力措施予以应对, 有可能成为一次新的发展机会。

(2) 各级政府密集实施系列经济振兴政策

在政策层面, 从中央到地方各级政府在加大“六稳”工作力度基础上, 大力推进“六保”各项任务的落实, 全方位密集出台了多项拉动市场需求、减轻企业负担等促进经济社会发展的政策措施, 力度之大前所未有的。在积极财政政策作用下, 传统基建和新基建领域已经传递出市场需求的明确信息。

(3) 制造业景气指数保持在荣枯线以上

2020年3月的采购经理人指数PMI 重回荣枯线以上, 为 52.0%, 4月的 PMI 为 50.8%, 虽比3月回落1.2个百分点, 但仍在荣枯线以上。这表明虽然当前经济下行, 但企业家对未来前景仍普遍持谨慎乐观态度。

(4) 机床工具企业基本实现复工复产

据中国机床工具工业协会抽样调查, 3月底机床工具行业企业复工率达到94.46%, 复工员工比例达85.64%; 4月底机床工具行业企业复工率达到97.4%, 复工员工比例达

91.7%。其中，部分承接口罩机、测温仪等抗疫设备订单的企业生产任务还相当饱满。

2. 不利因素

(1) 疫情对经济活动的冲击较大

一季度我国GDP同比下降6.8%，为我国开展GDP核算以来的首次下降。新冠疫情对我国经济社会生活带来巨大冲击，当前经济发展面临的挑战前所未有。目前国外疫情此起彼伏，蔓延全球，国际贸易和技术、人员交流交往中断，需求下降，对机床工具产业的影响很大且短期内难以恢复。

(2) 主要市场需求陷入低谷

作为机床工具行业最大市场的汽车制造业一季度下滑严重，1~3月汽车产销同比分别下降45.2%和42.4%。随着疫情在全球范围的快速蔓延，已有多家跨国车企和零部件供应商陷入停产或半停产状态。

(3) 供应链中断或受阻

疫情下不少配套企业陷入经营困难，以及复工复产的不同步等因素，造成机床工具的供应链中断或受阻现象比较普遍。国际疫情加剧对依赖进口的高端关键配套件如数控系统、光栅尺、编码器、精密轴承等形成较大冲击，严重影响主机产品交货，直接影响国产高档数控机床发展。同时存在因国际政治因素造成高端配套件供应受阻的风险。

(4) 固定资产投资同比下降，投资动力不足

1~3月全社会固定资产投资同比下降16.1%，降幅较1~2月同比降幅收窄8.4个百分点。其中制造业投资同比下降25.2%，降幅较1~2月同比降幅收窄6.3个百分点。与机床工具

行业关联度最大的汽车制造业投资同比下降27.2%，降幅较1~2月同比降幅收窄13.8个百分点。

(5) 全球机床产业处于下行通道

据美国加德纳公司发布的《2019年全球机床调查》，全球机床消费总额是821亿美元，比2018年降低13.8%。在15个主要机床生产国或地区中有12个同比下降。中国2019年的机床消费额为223亿美元，降幅为25.3%，全球占比从2018年的31.4%降为27.2%。但中国仍然是机床消费、生产和进口第一大国，出口居第四位。该报告预计，2020年全球机床市场消费额可能比2019年再下降15%左右，其中中国比2019年同比降低15%-25%。

美国机械制造技术协会(AMT)发布的《美国制造技术订单》报告显示，2020年美国第一季度总订单额为8.63亿美元，比去年同期下降26.1%。

根据德国机床制造商协会(VDW)的报告，2019年德国机床订单总计下降了22%，德国国内预订下降21%，出口订单下降了22%。而2020全年德国机床产量恐将同比下降18%。

日本机床工业协会(JMTBA)的数据显示，3月日本机床订单总额(快报值)同比减少40.8%，降至773亿日元，连续18个月低于上年。其中，日本国内订单减少36.5%，降至342亿日元；海外订单减少43.8%，降至431亿日元。

从上述全球和主要机床生产国情况看，今年一季度普遍延续了上年下行趋势，并受新冠疫情影响，下行程度有所加剧。

3. 需关注的几个问题

(1) 疫情的走向和防控常态化对机床工具产业格局的影响较大

由于新冠疫情对全球经济的严重冲击，最近联合国下调对今年世界经济的预测为同比下降3.2%。目前我国国内疫情防控已取得战略性成果，病毒传播已基本阻断。但国外疫情还在不断蔓延。外防输入，内防反弹，疫情防控进入常态化阶段。在这种情况下，疫情对我国对机床工具产业格局的影响肯定是相当深刻的，影响的时间和程度目前也难以准确预计。

(2) 产业链供应链的完全恢复畅通很难在短期内解决

产业链、供应链是长时间形成和不断完善的。疫情之下产业链、供应链在短期内出现多处中断，重新修复需要相当长的时间。

(3) 口罩及口罩机生产可能已产能过剩需及早应对

新冠疫情防控初期，为解决口罩紧缺问题，各地政府紧急动员一批企业投入口罩机的研制生产。据了解，有30多家机床工具企业参与其中。目前口罩紧缺问题已基本缓解，产能过剩问题则开始显现，有关企业应密切关注市场变化，及早采取调整措施。

综上所述，我们预计2020年上半年机床工具市场需求难有根本好转，行业主要经济指标仍处于同比下行区间。下半年随着各项政策措施逐步显效，行业发展态势虽有一定改观，但下半年行业运行可能仍呈下行态势，降幅有望收窄。

希望行业企业树立必胜信心，善于化危为机，充分利用好各项扶持政策，积极应对疫情带来的冲击和影响，克服当前困难，保持企业平稳运行。□

压力机顶料杆智能化生产线的研发和应用

宝鸡机床集团有限公司 张同兵

一、概述

我国制造业面临资源环境压力加大、劳动力成本上升、出口增长乏力等诸多影响，智能化转型升级的任务十分紧迫。制造业数字化、智能化是工业化和信息化深度融合的必然结果，已成为各国占领制造技术制高点的关键领域，成为我国制造业由“大”到“大而强”的强大驱动力量。

压力机顶料杆作为压力机中关键的零件，其生产加工属于典型的多品种、小批量生产模式。现有的生产模式（多机台分序加工）无法实现信息化与制造现场的有效融合，生产管理信息、加工作业信息、质量信息、设备状态等信息无法实时掌控，无法满足市场需求对关键零部件加工的需求。生产、物流、质量管理的复杂性日益提高，管理人员忙于日常生产管理，信息流通滞后、不畅等管理瓶颈，很大程度上制约了生产效率，增加了压力机产品的生产成本，降低了产品质量。

压力机顶料杆智能化生产线，是在对顶料杆零件加工工艺优化的基础上，建成集自动化仓储单元、自动化机加工单元、自动化清洗打标单元、自动化覆膜包装单元、智能控制系统的智能化生产线，通过建立互联互通

网络，实现数据采集和应用，以及制造过程可控、可视，满足压力机对关键零部件的需求，使离散型加工企业优质、高效、低耗、清洁、灵活的生产成为可能。

二、生产线简介

压力机顶料杆智能化生产线是针对压力机顶料杆零件（见图1）离散型制造的特点，以产品的加工工艺为基础，以设备的生产能力为条件而设计开发的一条智能化生产线。此条生产线力求作业人员便捷的操作与维护，使设备的性价比达到最高。生产线中的各设备以经济性、安全性、良好的操作性、可靠性作为设计准则，并把各设备的可靠性与高柔性作为首要追求目标，同时更加注重选用设备的合理性，以及智能加工生产线更长的使用寿命。

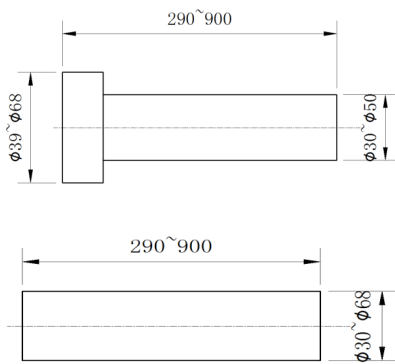


图1

针对压力机顶料杆零件的特点和加工工艺要求，本柔性自动生产线由自动化仓储单元、自动化机加工单元、自动化清洗打标单元、自动化覆膜包装单元及智能控制系统组成。

（1）自动化仓储单元：共包括两套智能化料仓，分别由两套单独控制的码垛机器人控制。每个料仓共有5个仓位，每个仓位可放置料盘6层，实现长度在200~900mm长度范围的顶料杆零件毛坯、半成品和成品的物料存储。

（2）自动化机加工单元：结合顶料杆零件热前加工与热后加工的特点，由一套双竖梁桁架机器人、一台数控铣打机、两台数控车床、一台磨床组成。实现 $\phi 30 \sim \phi 68$ mm直径，长度290~900mm的顶料杆零件热处理前后的自动化加工。

（3）自动化清洗打标单元：由1台六关节机器人服务一台清洗、涂油、打标机，实现从自动仓储单元的下料和上料动作。机器人手爪采用专有的大行程夹持装置，实现直径尺寸 $\phi 30 \sim \phi 68$ mm的零件自动夹持和智能识别。

（4）自动化覆膜包装单元：由1台关节机器人服务一台覆膜包装机，实现成品顶料杆零件从清洗单元到成品的包装自动流程。机器人采用带压力智能感应的双顶尖夹持方式，在保

证不破坏油膜的同时，又满足不同长度零件的自动抓取和包装。

(5) 智能化控制系统：各单元间通过总控系统实现互联互通，通过对生产管理系统、设备管理系统、质量管理系统信息的采集，实现智能生产的目的。

压力机顶料杆智能化生产线针对顶料杆零件的工艺特点，工艺流程，整体布局紧凑（如图1、图2、图3所示）。

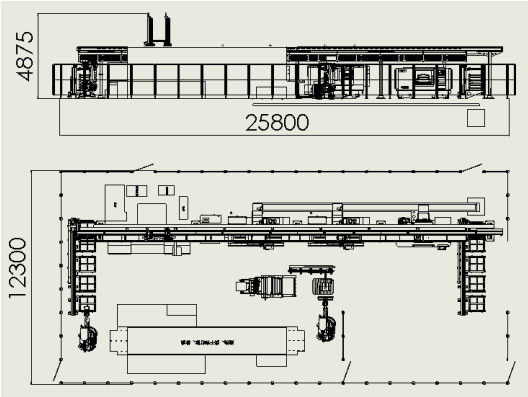


图1 生产线平面布局

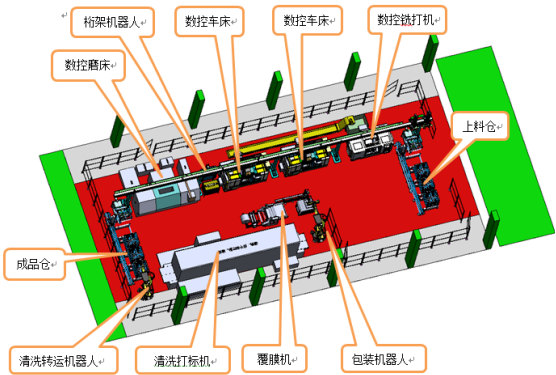


图2 生产线平面布局



图3 生产线现场实景

三、主要技术参数

生产线主要技术参数如表1所示。顶料杆毛坯状态如表2所示。

表1

加工顶料杆材料	45钢、42CrMo
重量(成品)	2~17kg
最大毛坯重量	30kg
800件长度公差	0.025mm
顶料杆端面与轴线垂直度、两端面间平行度平行	0.02mm
顶料杆直线度	0.05mm
顶料杆零件年产量	18000件

表2 顶料杆毛坯状态

1	圆钢下料调质后	外圆误差：±0.5mm 长度误差：3~10mm	参见GB/T 702-2008
2	热前加工淬火后	校直误差：≤0.3mm 长度误差：3~4mm	

四、智能生产线特点

1. 具有智能感知的工件夹持系统

桁架机器人采用带位置感应的全行程自动调节夹持卡爪，实现 $\phi 30 \sim \phi 68\text{mm}$ 直径，长度290~900mm压力机零件自动可靠夹持（见图4）。机械加工设备为保证轴向定位的准确，采用气电感应轴向往定位夹持系统。在成品包装阶段，为保证外观油膜的完整性，采用直线驱动两顶尖，力控感应开关检测的机器人自动夹持装置（见图5）。

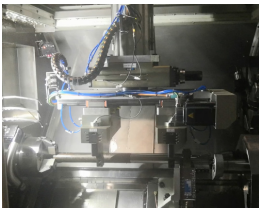


图4 桁架智能感应手爪

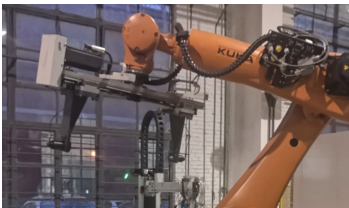


图5 关节机器人感应手爪

2. 智能识别纠错系统

在加工设备中，顶料杆零件夹持范围大，采用人机交互的方式实现快速夹具更换。一一对应的夹具与系统系列，热处理后人工入线后的零件台阶智能识别系统，实现了生产过程人工参与时的错误识别和纠错。

3. 实现不同功能的智能仓储系统

针对压力机顶料杆零件的加工工艺，通过智能排产，实现毛坯料仓、热前产品料仓、热后毛坯料仓的完美融合，以及热后机加工成品料仓和清洗单元毛坯料仓的功能融合。

4. 工序匹配，实现热处理前后零件共线生产

研究零件的加工工艺，优化工艺流程，合理分配工序能力，做到设备共用，实现热处理前后零件共线生产，使整条自动生产线的机床发挥最大效能，有效提高机床利用率。

5. 在线自动测量系统

机械加工设备采用在线自动检测系统,实时检测加工零件的质量,反馈系统及时修订,提升生产线关键工序能力指数保障水平。

6. 智能化管理平台

通过采集硬件的状态信息,通过DNC网络反馈给生产线服务器,实现数据的采集与存储。实现了生产管理、质量管理和设备管理多层监控,涵盖了工艺参数优化、健康保障和工艺能力提升评估、机床状态监控等,提升了生产线关键工序能力指数保障能力,从而达到智能化生产的目的(见图6)。



图6 智能化管理平台

硬件设备状态信息主要包含机床设备状态信息、机器人的运行状态信息,以及数控系统状态信息。生产线智能化管理平台对象包括:数控铣打机、数控磨床、数控车床、机器人、清洗设备、包装设备等。整个网络硬件拓补图如图7所示。

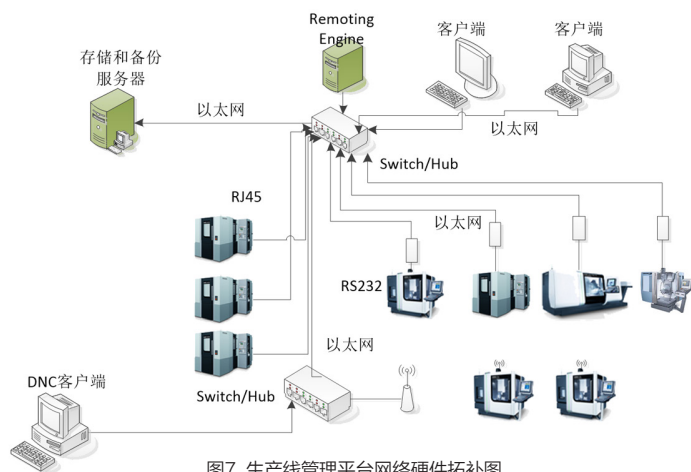


图7 生产线管理平台网络硬件拓补图

7. 生产过程可视化平台

针对顶料杆零件的生产过程,该智能生产线建立了生产过程可视化平台(涵盖部分ERP、工艺排程和优化等),通过生产线底层各种传感器和物联网,实时采集并上传数控机床、机器人等各种设备数据、物料数据、生产状态数据等

各种数据,在本地云服务器上建立工厂的“数字双胞胎”,通过轻量化的三维仿真软件系统,实时监控、管理、操作生产线设备;上层各种设计、管理软件系统通过网络下发生产与物料指令、工艺数据、质检标准等给生产线设备,实现了工厂各种数据流的双向流通,建立了生产过程可视化平台(见图8)。



图8 生产过程可视化平台

五、应用情况

该智能线是我公司为济南二机床开发应用的,是宝鸡机床在坚持自主创新,推进中高档数控机床和生产线集成产业化应用的道路上迈出的坚实一步。该智能线实现了压力机顶料杆零件的多品种、多工序混流生产,不同产品快速切换。设计通用料盘和夹具,满足产品快速换线需求;使用智能排程系统,实现多品种混流生产排程,多目标协同优化。通过车间底层各种传感器和物联网,实时采集并上传各种数据,实现了生产线各种数据流的双向流通,保证了生产过程的可视化、透明化。

项目所有设备数控化率达到100%,生产效率达到年产18000件顶料杆的目标,产品制造精度和稳定性稳步提高。这条智能线的实施对济二集团的数字化转型升级具有重要的意义,也使宝鸡机床具备了数字化车间整体解决方案和系统集成应用的能力,实现了由单一设备制造商向高技术服务和系统集成应用商的转变。□

DKX095发动机曲柄加工智能制造生产线

通用技术集团大连机床有限责任公司技术中心 陈涛 董万智 赵宏安 李文龙

文章介绍了DKX095发动机曲柄加工智能制造生产线的研制。首先简述了曲柄制造行业国内外现状，其次分析了曲柄工件的结构特点及加工工艺，介绍了生产线组成、实施原则、关键技术和创新点及质量控制、研发与应用情况。通过用户的正常使用，证明了该生产线可靠性和先进性，对我国智能化生产线的研制具有示范意义。

一、引言

随着我国汽车、纺织机械、石化机械、起重机械、风机、港口、船舶、铁路机车等行业的发展，发动机曲柄配套件需求快速增长，我国已成长为曲柄制造大国，但国内曲柄企业依然在技术、产品、管理等方面与国外知名曲柄企业相比存在不小差距，究其原因是多方面的，其中最主要的问题体现在工艺水平、装备水平落后^[1]。一些企业先后引进了五十铃轻型、重型车系列传动轴、德国奔驰重型车、斯太尔重型车传动轴等技术，通过消化吸收日本小松公司、美国卡特彼勒公司、日本川崎公司等先进技术，使产品档次、工艺水平得到较大提高。然而，曲柄加工设备依然采用普通机床，一人一机的流水线生产方式，工人劳动强度大，车间环境差，加工质量稳定性不高，因而提高国内曲柄制造业装备水平，已成为我国机床行业和曲柄制造行业亟待解决的问题。

DKX095发动机曲柄加工智能制造生产线采用自动化控制、信息化管理，实现智能制造。改变目前曲柄加工中单机、开环加工的现状，降低工人劳动强度，改善车间环境，提高加工质量稳定性，实现产业的智能化升级。

二、项目概况

1. 曲柄工件

被加工零件为某系列发动机左、右曲柄，产品外形如图1、图2所示。锻造毛坯件，材料为40Cr，调质硬度

17~25HRC。主要组成结构有两端面、内扇面、曲柄销孔、杆身轴颈、半圆键槽、外螺纹、外花键。

关键工序加工精度：曲柄销孔，孔径公差0.017 mm，粗糙度 R_y10 ，圆度0.01 mm，圆柱度0.02 mm，与曲柄两端中心孔连线平行度0.04/100。



图1 右曲柄成品



图2 左曲柄成品

2. 工艺分析

自动线加工工艺（冷、热加工共线）：铣小头端面、打两端面中心孔→粗车、半精车和精车杆身轴颈、内扇面→搓花键、搓螺纹（左曲柄仅滚螺纹）→钻深油孔（仅右曲柄）→局部高频淬火、回火→钻曲柄孔、钻斜油孔（仅右曲柄）→键槽口端铣扁、铣半圆键槽→粗、精磨杆身轴颈、内扇面→精车小平面、镗曲柄销孔。

自动线加工工艺遵循高精、高效的设计理念，首创从曲柄毛坯上线到成品下线制造模式，提高了产品质量，降低工序间中转成本。

3. 生产线组成

生产线为直线排列，占地面积为：60m（长）×17m

(宽)×5.5m(高),具体形式如图3所示。该线具备“高精度、高效率、高可靠性、低成本”的特点,全线采用自动化控制、信息化管理,实现智能制造。被加工零件依次经过钻、铣、车、冷搓、淬火、磨削、镗削等典型冷、热加工工序,完成从毛坯到成品的全部工艺过程,实现该类产品冷、热加工共线的新制造模式。该线涵盖工业视觉机器人、桁架自动线、在线测量反馈、总线控制、刀具管理、集尘除雾、高压断屑等技术,达到了当代国际先进水平,颠覆了目前曲柄加工行业单机、开环加工的传统模式,实现了产业的智能化升级。



图3 曲柄自动加工生产线

生产线实施的总体目标

序号	项目	目标值
1	设计产能	1500件/班
2	生产节拍	35秒/件
3	工序能力指数 ^[2]	$C_{pk} \geq 1.33$
4	用人数量	整线5~6人/班

生产线实施的总体原则:

- (1) 机床性能: 稳定可靠、故障率低。
- (2) 机床精度: 精度稳定, 工序能力指数 $C_{pk} \geq 1.33$ 。
- (3) 刀具选择: 优先考虑刀具寿命。
- (4) 制造工艺: 实现被加工件从毛坯到成品在线一次完成。
- (5) 物流形式: 稳定可靠、维护方便、考虑自动料仓、桁架机械手、机器人等多种形式相结合。
- (6) 智能制造: 满足工厂自动化控制、信息化管理的要求, 实现智能化升级。
- (7) 生产管理: 显著改善生产环境、降低劳动强度、降低企业用工成本。

三、关键技术和创新点

1. 车削高压冷却断屑^[3]

刀杆和刀片选择特殊产品,通过机床的高压泵打出的

高压冷却液对铁屑喷打,使铁屑折断,达到断屑的目的(见图4)。



图4 高压冷却断屑形式

2. 工业视觉机器人自动调整工件姿态

由于热处理、冷搓加工工序需要工件自由旋转,导致工件的角向位置随机,而钻孔、镗孔等工序又需要工件位置固定,为解决这一难题,我们应用了机器人视觉^[4]技术自动调整工件姿态到指定位置。

3. 信息采集、分析、反馈、集成控制技术

在关键工序设置在线自动测量装置,对加工质量进行实时监控,并将补偿数据通过总线传送反馈给主机,进行补偿加工,对检测不合格产品自动下线处理。

实现了随机抽检、连续抽检、间隔抽检等的动态综合补偿技术,借鉴国内外先进补偿技术,采用高精度检测设备,通过网络的数据反馈对加工工件的品质进行实时监控和优化处理。自动线的实时交互数据准确无误、不丢帧,尤其针对自动线内含有热处理工序等的干扰处理,双向“握手”,对于并联结构的部分会准确做出优先级别的自适应判断,确保补偿在实时加工中的可靠性。

自动线内配备的测量仪器精度可以达到 $0.1\mu\text{m}$,测量前对工件测量部位进行吹气清洁。采用电感测头对工件杆身直径、跳动进行测量,并将测量结果反馈给加工设备。通过Profibus^[5]方式和生产线总线通信,反馈各动作位置信号,外径测量数值及跳动OK/NG信号,设备运行状态。测量数据以CSV格式储存在CF卡中,能够保存200万件工件的数据,可以通过EXCEL打开编辑,能够进行SPC^[6]控制。

4. 绿色环保

整线设备全防护带有积尘除雾装置,极大地改善了车间的环境,彻底改变了传统意义上人们对机加工车间脏乱差的印象,营造出了绿色制造的产业氛围。

5. 多种工艺方法，冷、热加工共线

零件从毛坯上线直到成品下线，依次经过钻、铣、车、冷搓、淬火、磨削、镗削等典型冷、热加工工序，全部工序在线一次完成。

6. 多种物流运输形式

整线物流涵盖移动料仓、旋转料仓、固定料台、敏捷桁架机械手、工业机器人（含视觉机器人）等多种物流运输形式。

7. 数字化控制方式

全线采用国际流行的总线控制技术，该技术很好地处理了单机设备与总线的信号通信，是一个全数字化、全开放和可互操作的生产过程自动控制系统。通过总线技术把工业机器人、数控桁架机械手、数控车床、立式加工中心、数控磨床、数控热处理机、滚齿机、自动检测及补偿设备连接起来，建立信息流系统，实现了智能制造，具有组织简单、设计安装方便、易于维护和扩展，可以节约软硬件投资等特点。

电气部分采用双向三级网络通讯，最终并入MES网络，实现最终用户全域的生产信息化管理。自动线自身的第一级网络是总控与各从属单元之间的通讯，采用Profibus DP点对点映射的总线模式，Master主站部分的控制处理系统采用的是单路径多主程序同时运行的执行机制，属于国内首次应用，相较于多路径、多通道系统，此类应用更具技术优势，它交换数据时的并行处理更简洁直观、处理器信息交换速度更快，性价比更优，Slave从站部分包括机器人制造岛、量仪、各加工单元、输送辅机等。第二级网络是衔接基层PLC和总线网络之间的中间环节，譬如机器人制造岛，其机器人系统实现了既做主站又做从站的目的，鉴于机器人背景程序的运行机制有别于数控系统的开机实时扫描，可以通过自动线远程主站直接操控，避免了人工干预，增加了时效性。第三级网络是生产执行层的信息数据通过输入输出模块的处理完成信息收集、分析和指令加工的过程，采用了多种型号的PLC处理器，方便各类设备基本维持原状，以方便大规模、全方位的集成和模块化，令复杂的控制更加灵活、更加通用。

四、技术水平分析

1. 国外现状

据曲柄制造企业去国外调研后介绍，在国外还没有一条曲柄加工从毛坯上线到成品清洗后下线完整的柔性加

工生产线，而是大多采用由高速、高精数控车床及精密磨床、高效加工中心等组成的柔性制造岛，热处理工序离线单独作业，成品清洗后人工抽检。

2. 国内现状

国内曲柄加工行业基本是采用单机流水线作业，工序多达13~16道，24~27台主机，按二班制需配备操作、维修、管理人员50余人，且大多采用台钻、数控车床、专用铣床等自动化水平较低的装备，人工劳动强度高，生产环境油雾大，产品利润低。

3. 该生产线情况

该线是国内外第一条从毛坯上线到成品清洗后下线完整的曲柄自动加工生产线。整线采用数控化设备、总线控制方式，自动上下料，应用在线自动测量、刀具管理、高压断屑、工件自动清理、自动排屑、单元全防护、油雾收集等技术，不仅提高了产品质量，而且改善了劳动条件，缩减了设备占地面积，降低了生产成本。

五、企业围绕着该产品开展的技术创新工作

彻底改变传统营销模式，由大连机床牵头成立了由200多家上下游企业参加的大连机床产业联盟，整合机床制造的产业链，价值链，协同开发，利益同享，为客户提供成套装备和完整解决方案；同时产业联盟也有效地促进了企业技术创新工作的开展。“发动机曲柄加工智能制造生产线”，正是由大连机床与机床工业联盟内的8家成员单位共同研制，并联合大连理工大学软件学院进行系统控制的研究，实现了全线选用数字化操控方法，实现在无人参与的情况下选用全智能操作，零件加工从毛坯上线直到制品下线，营造绿色制造环境创新、创造的历史飞跃。在这一过程中，以企业为主体，产学研用的创新体制在本项目中发挥出了举足轻重的重要作用。

六、应用领域、应用效果

该线能满足工厂控制自动化、管理信息化的要求，实现产业智能升级，极大地提高企业的经济效益，显著改善劳动条件和生产环境；同时还显著降低了企业的用工成本，提高了用户产品的市场竞争力；带动和促进了市场对高端装备需求的积极性和实际行动。曲柄零部件生产企业为降低成本，会以更加积极、包容的心态，来对待或采购该类设备中国内自主创新的优秀产品。

（下转第58页）

H124数控深孔内圆磨床的研发与应用

上海机床厂有限公司

一、概述

起落架是大飞机的核心部件，此领域的供应商主要有法国Safran公司、美国GoodRich公司和德国Liebherr公司。起落架中长径比零件的内孔精密磨削设备长期以来一直被国外垄断，且进口价格昂贵。由于起落架可靠度对于国产大飞机整体性能和使用安全具有重要影响，关系着国家重要战略目标国产大飞机成功研制目标的实现。

飞机起落架是飞机起飞和着陆的主要承力构件，在飞机着陆及滑行过程中它吸收和耗散与地面形成的冲击能量。现代大型飞机起落架主要由前、主起落架活塞杆、外筒、轮轴等大长径比深孔零件组成，其内径和孔深之比可达1:10，且材料多为超高强度钢或钛合金整体锻造，内孔表面经过HVOF涂层处理。为了提升飞机的整体性能，这些零件均需要进行深孔精密加工，如果最后的加工工序采用传统的车削、镗孔技术来完成，则存在很大的困难，尺寸精度、表面粗糙度（特别是过渡圆角和转接R处）等方面得不到保证，需要增加精密磨削加工工序，以此来保证零件的加工质量和确保内孔加工表面的完整性。

研制具有自主知识产权、满足大型飞机起落架等大长径比深孔零件精密加工要求的数控深孔内圆磨床，对

于提高大型飞机关键部件的国内自主配套能力，发展我国民用大型客机和军用大型运输机有着显著的经济效益和社会效益，对于我国航空航天事业建设具有十分重要的战略意义。

目前国内从事数控深孔内圆磨床研发和生产的单位仅有上海机床厂有限公司一家，国外制造该种机床的企业有西班牙DANOBAT、意大利AZ Spa、意大利MORARA、日本NISSIN等。其主要加工范围如表1所示：

表 1

国家及厂家名称	设备型号	内径磨削范围	最大磨削深度
西班牙DANOBAT	DANUNI 4100		2550mm
意大利AZ Spa	GSB 600	Φ 40~Φ 350mm	3000mm
意大利MORARA	GRA.2 2500	Φ 10~Φ 420mm	2500mm
日本 NISSIN	GRI-1000N II -M3	Φ 30~Φ 300mm	1200mm

H124数控深孔内圆磨床，是上海机床厂有限公司为满足国内航空航天、轨道交通等领域的发展需求，在我公司早期开发的手动深孔内圆磨床的基础上，持续进行多项技术创新，自主研发制造的新成果。该成果应用了多项发明和实用新型专利，其主要技术指标保持国内领先，达到国际先进水平。该项目的研制成功，不仅提升了我国此类数控高端装备的水平，也打破了国外对该机床的垄断和封锁，为企业开拓了新的产品市场，同时取得了良好的经济效益和社会效益。



图1 H124数控深孔内圆磨床外观图

二、产品性能介绍

H124数控深孔内圆磨床集成了高刚性深孔磨头设计与制造技术、薄壁深孔内圆磨削技术、大型薄壁回转体装夹技术、超高强度涂层钢高效磨削工艺、深孔内圆加工在线测量控制技术、超长磨具高精制造装配工艺、超长磨具高精度动平衡技术等多技术领域研究成果，是一种典型的高档数控机床装备。其主要特点包括：

（1）结构布局合理：机床采用卧式布局。工作作纵向往复运动、砂轮架作横向进给运动，垫板、砂轮架、内圆磨具等横跨在工作台床身导轨的右上方；床身采用高强度铸铁，导轨结合面手工刮研，工件床身与磨头床身为一体，呈T型结构；工作台采用上下双层结构，可进行回转微调，纵向运动由伺服电机驱动，通过滚珠丝杆传动；运动导轨为平、V滑动导轨，压力油润滑；头架主轴采用一滚一滑轴系支承，刚性好，回转精度高，由交流变频器实现工件无级传动；工件由四爪卡盘夹持，闭式中心架支承；垫板导轨采用高刚性直线滚动导轨。

（2）高精度：飞机起落架外筒实际加工圆度0.003mm，圆柱度0.004mm/1000mm，表面光洁度Ra0.4μm。

（3）高刚性：机床搭载上海机床厂有限公司研发的新结构偏心内圆磨杆。通过优化设计，静态、动态刚性好，工作转速远离共振区。

（4）高柔性：机床砂轮架配有标准接口，可更换多种内圆磨具，包括皮带传动式磨具和电主轴式磨具，可满足不同直径、不同深度内孔加工需求。

（5）人性化：搭载上海机床厂自主开发的磨削应用软件，采用图形化界面，数据显示直观，参数修

改方便。

该产品采用了“卧轴超长径比深孔内圆磨削装置”（200520046922.2）、“内圆磨床工件在线自动测量装置”（201110425127.4）、“数控内圆复合磨床”（201130487447.3）、“适用于工件与头架中心线的对齐装置”（201822228338.9）、“深孔内圆磨具的密封结构”（201911080526.4）等发明和实用新型专利技术。H124数控深孔内圆磨床产品实现了大长径比深孔高精度数控加工零的突破，开创了国产大型飞机起落架高精加工的新篇章。

该机床产品实现了显著的应用效果，其加工精度、加工范围等均达到了国际先进水平，该产品主要技术参数如表2所示：

表 2

主要技术指标	单位	实际检测结果
最大磨削深度	mm	2000
内径磨削范围	mm	Φ40~Φ630
最大加工长径比		1:12
最大工件长度	mm	4000
最大工件直径	mm	900
工件圆度	mm	0.003
工件圆柱度	mm/mm	0.004/1000
工件表面粗糙度	μm	Ra0.4

三、新技术研发及应用

1.高刚度高精度深孔内圆磨具研发与应用

（1）深孔内圆磨具试验模态分析

上海机床厂有限公司传统内圆磨具存在磨削精度不高、工件表面易出现振纹、刚性不足导致大进刀量磨削时磨杆跳动严重等问题，满足不了越来越苛刻的现代化产业配套需求。在此情况下，需要摒弃以往设计时采用的经验法、类比法，引入动态设计、虚拟样机、实验分析等高级分析与仿真手段对新设计进行指导。上机公司首先通过实验振动分析技术，获得原有内圆磨具工作时的声学信号并提取出振动模态信息。

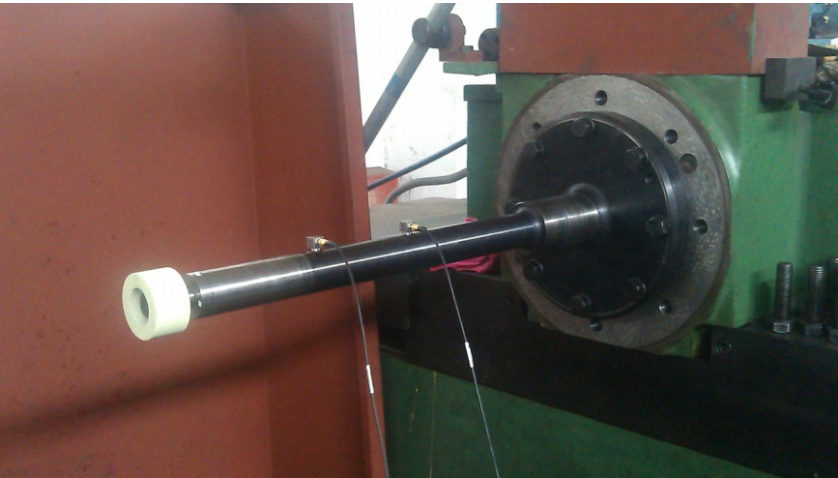


图2 内圆磨具试验模态测试

选取多个典型内圆磨具，采用响应点移动-激励点固定的锤击法对磨具进行模态测试，测量磨杆X、Y、Z三个方向的振动响应。通过消除激励和响应信号

的噪声干扰,对处理后的信号做模态参数辨识,提取分析带宽内所关心的固有频率和模态阻尼比,并且由传感器所测位置的加速度时域响应得出RMS以表征振动能量密度,由加速度两次积分得出X、Z向(切向和法向,对磨削精度影响较大)的合位移,即随转速变化的振动偏心距。

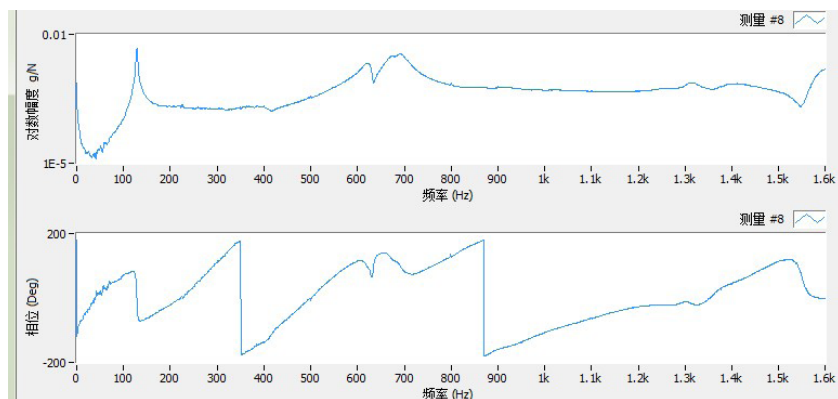


图3 一组磨具的频响函数(FRF)

(2) 深孔内圆磨具静态、动态优化设计

上海机床厂有限公司在实验分析的基础上,在新结构深孔内圆磨具的设计过程中引入有限元方法的静力学分析、模态分析、谐响应分析及正交优化,结合先前数据检验CAE分析的合理性,最终得出新结构磨具的工程设计和同类型磨具的仿真优化方法。

内圆磨具静刚度反映磨具抵抗自重和静态外载荷的能力,与负荷能力和抗振性能密切相关,长悬伸量磨杆的首要参数为磨杆的弯曲刚度。通过材料力学方法将磨杆近似简化为一个悬臂梁,得出磨杆静置时最大挠度和静刚度,并利用有限元分析方法得出最大位移。

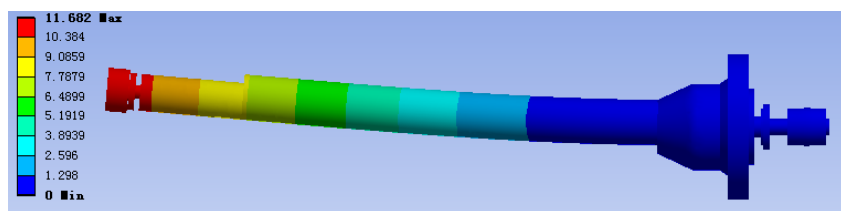


图4 一型内圆磨具一阶模态振型

内圆磨具动态特性是影响内圆磨床加工质量和磨削能力的最主要参数,内圆磨具的动刚度是其抵抗受迫和自激振动的能力。利用有限元法将连续体问题转化为有限弹性体单自由度振动的叠加问题,计算零件线性接触条件下内圆磨具前10阶模态振型及共振频率。采用谐响应分析确定低阶共振频率下由主要激振力(磨削力)引起的峰值响应和响应范围。

在静态、动态仿真的基础上,设置磨杆偏心套筒的长度为优化变量,使用正交优化方式取得以静态、动态最小变形量为目标的最优偏心套筒长度。

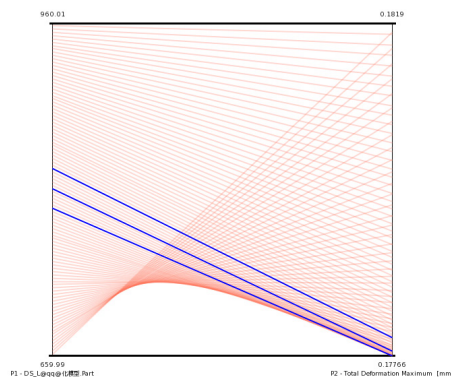


图5 正交法优化偏心套筒长度

(3) 深孔内圆磨具中新型阻尼材料的应用

基于模态分析得出,磨具动刚度对比静刚度有大幅下降,动态特性是影响磨具工作精度的主要因素。因此,在对结构作出优化的同时,选用了多种振动抑制新技术吸收运转过程中激发的振动能量,达到提高主轴动态性能的效果。

主轴前端法兰盘原材料为45钢,考虑砂轮磨削工件过程中引起的再生颤振波会沿此零件传递,需要增大阻尼抑制振动,上海机床厂采用了高锰基阻尼合金(Mn73Cu20Ni5Fe2)这一新型材料进行替代。高锰基阻尼合金是一种具有独特减振效果的孪生双晶型阻尼合金,在合金通过热处理的高温缓冷过程中,因尼尔转变和马氏体相变而产生大量高密度孪晶亚结构。当有外力作用时,由于显微孪晶界的移动和磁矩的偏转而吸收外部能量,从而使应力衰减,起到很好的减振效应,同时具有良好的力学性能和切削性能,是一种很适合精密刚性连接的减振材料。上海机床厂首次将高锰基阻尼合金应用到了磨床磨具中,经过实测,改进后的前端法兰盘有效抑制了砂轮的再生颤振。

(4) 基于热力学分析的电主轴式深孔内圆磨具开发

电主轴式内圆磨具省去了皮带、联轴器等传动环节,将主轴传动链长度缩短至零,因此回转精度高,稳定性好,省去了长轴传动,更易使结构动刚度增加减少振动。但电主轴在高速运转时电机定子损耗会产生大量的热,由于内圆磨具空间狭小热量不易排出,加上轴承及磨削发热,过量的热量会直接影响电主轴磨具的工作精度,因此有必要对电主轴式内圆磨具的热特性和冷却方式加以优化。

上海机床厂有限公司基于CAE分析技术,确定了主轴电机定子的发

热、主轴轴承的发热以及电机发热引起轴承热变形对内圆磨具回转精度的影响。通过分析结果指导设计,优化了电主轴后端冷却水通流流路和电机定子冷却水套结构形状,实现同等空间内大幅减小了冷却水在磨具内部的沿程水头损失,增大了换热效率。同时采取在套筒偏心侧加装冷却,在不改变磨削最小孔径的同时具备了两路冷却同时对磨削位置喷射磨削液,提高了被磨工件的表面加工质量。

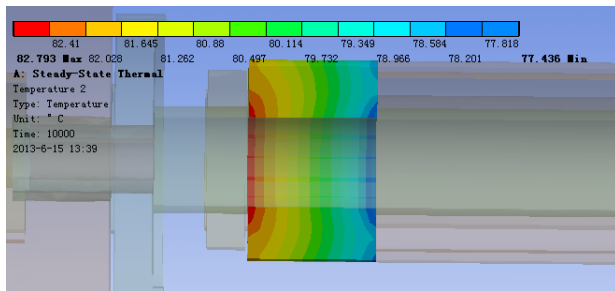


图6 前端轴承温度云图

(5) 深孔内圆磨具的高性能密封结构

深孔加工时磨具工作环境恶劣,尤其在加工不通孔时,磨削过程中产生的脱落磨粒、金属粉末以及高压磨削液容易进入主轴轴系,影响内圆磨具的使用寿命和磨削精度。

为了解决上述问题,上海机床厂有限公司研发了交错式迷宫密封和端部气密封一体式密封结构。砂轮法兰盘内表面设置的环形腔和端盖形成径向带角度迷宫密封,起到阻止杂质进入轴系的第一道密封;同时在砂轮法兰盘和端盖迷宫密封中间设置气密封,气体通过套筒上设置的径向气密封接头管螺纹和端盖上的通孔形成气体通道,向砂轮法兰盘内表面设置的环形腔供气,起到防止冷却液和杂质进入轴系的第二道密封;主轴上锁紧螺母外突起与端盖内突起形成台阶式迷宫密封,迷宫式密封的轴向间隙控制在0.5~0.8 mm之内,直径间隙控制在0.25~0.5 mm之内。它们是防止冷却液和杂质进入轴系的第三道密封;端盖和套筒之间设置O型圈密封,是防止冷却液进入轴系的第四道密封。这种新结构保证了在空间位置受限的内圆磨具端部设置多种形式复合密封,大大延长了深孔内圆磨具的使用寿命。

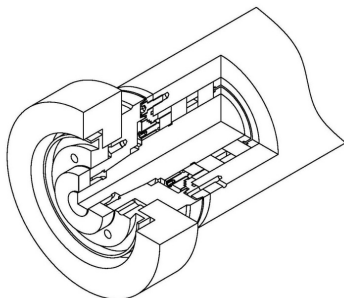


图7 深孔内圆磨具密封结构

2. 机床结构设计

H124数控深孔内圆磨床在布局上考虑了飞机起落架、轨道车轮、高精度机床主轴等典型工件工艺要求,整机通过静、动态分析优化床身和砂轮架结构,减少结构环中运动部件质量和结合部数目,加强传动链刚性。综合考虑后机床采用卧式马鞍布局,工作台作纵向往复运动、砂轮架作横向进给运动,垫板、砂轮架、内圆磨具等横跨在工作台床身导轨的右上方;工件床身与磨头床身为一体,呈T型结构;工作台采用上下双层结构,可进行回转微调,纵向运动由伺服电机驱动,通过滚珠丝杆传动;运动导轨为平、V滑动导轨;工件由四爪卡盘夹持,闭式中心架支承;垫板导轨采用高刚性直线滚动导轨。

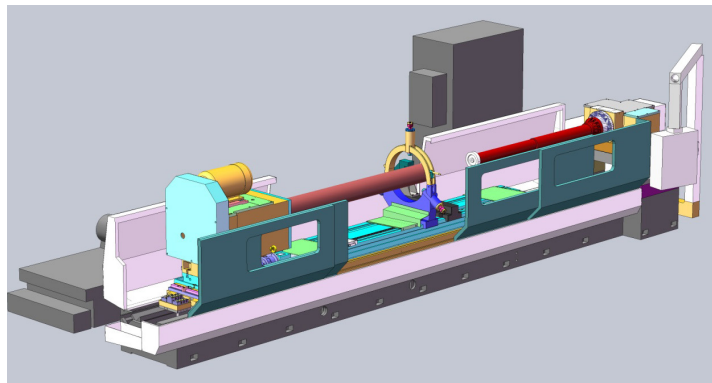


图8 H124机床三维机械本体模型

四、成果应用及推广情况

H124数控深孔内圆磨床已在国内多家用户企业得到了广泛应用,得到了一致认可,整机性能达到国外一流品牌同类磨床水平,在同规格工件磨削深度方面已超出国外磨床品牌水平。这些用户企业均为国内飞机起落架生产的龙头企业,负责生产多型军用及民用飞机起落架。随着国产航空航天事业进一步高端化、规模化,国产大型客机配套产业的逐渐起步,H124机床在未来拥有广阔的市场前景,填补了国内高精度深孔磨削技术的空白,提升了我国高档数控磨床的竞争力,全面替代进口,促进航空工业及机床制造行业的同步发展具有重要的意义。该类深孔内圆磨床,目前国外的同类产品价格昂贵,H124数控深孔内圆磨床拥有性价比高等综合性能,因此在国内市场有着很强的竞争能力。□

GMCu系列桥式五轴加工中心的研发与应用

沈阳机床集团沈阳中捷航空航天机床有限公司 白旭 姜楠

一、概述

近年来,我国航空航天事业发展迅猛,但受加工装备的限制,部分核心关键零部件仍需依赖进口,而提高基础加工装备水平是减小进口依赖的关键环节。航空航天行业最新的发展趋势是采用先进的整体结构件和大型复材结构件设计,相关结构件具有尺寸大、壁薄、易变形,零件精度高,切削中刀路线复杂、协调面、交点孔多等工艺特点,对机床的加工范围、加工效率、动态性能都提出极高的要求。因此,必须采用五轴联动加工,尤其大行程高精度五轴联动加工,用以满足对航空航天结构件高效、高精的加工需求。桥式五轴加工中心以其独具的结构特性,在众多五轴机床中脱颖而出,桥式加工中心具有优异的动态响应能力,在保证高加速、高进给的同时,机床精度也能够严格控制,因此桥式五轴加工中心成为广泛应用于高精尖航空航天大型结构件加工的行业重器。

我公司针对航空航天大型复杂结构件的加工需求,开发了GMCu系列桥式五轴加工中心,解决了客户最大加工宽度5.5m,最大长度22m的结构件加工难题。GMCu系列产品机型种类齐备,采用模块化设计,便于组织生产和缩短供货周期。产品可根据客

户需求做选配定制,可选配超大行程、高性能配置、护顶吸尘、配套组线等。可替代国外同类别进口产品。GMCu系列桥式五轴加工中心对口航空航天、复材加工、轨道交通等行业,彻底打破了国外设备在此类领域的垄断地位,为国产机床占领高端机床市场、掌握制造核心技术做出了贡献。

二、GMCu系列桥式五轴加工中心介绍

1. 机床简介

GMCu系列桥式五轴加工中心桥梁(见图1)采用采用高架桥式框架结构,主轴箱侧挂布局。设备床身,工作台固定,横梁在床身上沿水平方向前后移动(X轴),滑板在横梁上沿水平方向左右移动(Y轴),滑枕沿滑板上下移动(Z轴)。铣头为叉式结构,能绕X轴摆动(A轴)、绕Z轴转动(C轴),实现五轴联动。



图1

机床整体结构对称布局,受力均匀,赋予机床更高的稳定性和抗载能力,驱动部件重量与刚性匹配合理,机床基础件(桥梁\工作台)全部采用优质铸铁,强度高且吸震效果好,横梁及主轴箱移动采用双电机驱动,精度高加速度

大。滑枕两侧布置双平衡油缸，与蓄能器相连接，平衡比例90%，惯量匹配可达到1，加速度达到 3m/s^2 ，动

态响应极高。机床布置温控系统，包括各向丝杠的轴承座的控温、丝母座控温、A/C轴电机的冷却和电主轴的

冷却，温控系统控制集成在数控系统内，由可调温的水冷机控制机床所有关键部件温度在合理变化范围。

2.机床技术参数（见附表）

单位		GMC20U系列 GMC20V系列	GMC25U系列 GMC25V系列	GMC30U系列 GMC30V系列	GMC40U系列 GMC40V系列	GMC50U系列 GMC50V系列
工作台						
宽度	mm	2000	2500	3000	4000	5000
长度	mm	4000/6000	4000/6000/8000	2000N (N≥3)	2000N (N≥4)	2000N (N≥5)
承重	kg/m²	5000	5000	5000	5000	5000
加工范围						
龙门宽度	mm	3000	3500	4000	5000	6000
龙门框架行程X轴	mm	4000/6000	4000/6000/8000	2000N (N≥3)	2000N (N≥4)	2000N (N≥5)
滑板行程Y轴	mm	2200	2700	3200	4200	5200
滑枕行程Z轴	mm	1000	1000	1000	1000	1000
切削进给						
X轴	mm/min	1-20000	1-20000	1-20000	1-20000	1-20000
Y轴	mm/min	1-20000	1-20000	1-20000	1-20000	1-20000
Z轴	mm/min	1-20000	1-20000	1-20000	1-20000	1-20000
A轴	rpm	60	60	60	60	60
C轴	rpm	60	60	60	60	60
快速移动						
X轴	m/min	25	25	25	25	25
Y轴	m/min	25	25	25	25	25
Z轴	m/min	25	25	25	25	25
A轴	rpm	60	60	60	60	60
C轴	rpm	60	60	60	60	60
定位精度						
执行标准	X轴	mm	0.015/0.02	0.015/0.02/0.025	0.015+0.005* (N-2)	0.015+0.005* (N-2)
VDI/DGQ3441	Y轴	mm	0.015	0.015	0.015	0.02
	Z轴	mm	0.01	0.01	0.01	0.01
	A/C轴	°	8	8	8	8
重复定位精度						
执行标准	X轴	mm	0.008	0.008	0.008	0.008
VDI/DGQ3441	Y轴	mm	0.008	0.008	0.008	0.008
	Z轴	mm	0.008	0.008	0.008	0.008
	A/C轴	°	5	5	5	5
标准配置		选择配置				
数控系统SIEMENS 840D sl		数控系统i5				
X、Y导轨防护		刀库				
X、Y、Z三轴光栅尺检测		台湾链式20/30/40把 (HSK-A63/A100) 刀库				
防护间		加长滑枕				
主轴锥孔吹扫清洁功能		Z=1400mm				
滑枕平衡机构		刀具检测				
水冷机		Renishaw/HEXAGON				
链式排屑器		工件检测				
		Renishaw/HEXAGON/HEIDENHAIN				
		主轴中心出水				
		20bar				
		德国双摆头				
		主轴转速 (rpm)				
		7000-30000				
		主轴扭矩 (Nm)				
		38-318				
		功率 (kW)				
		43-60				
		电主轴 (高速三轴)				
		主轴转速 (rpm)				
		7000-30000				
		主轴扭矩 (Nm)				
		67-500				
		功率 (kW)				
		14-60				
		超声辅助加工				

沈阳中捷航空航天机床有限公司

三、机床先进技术与应用情况

1. 桥式横梁挠度补偿的研究

随着机床跨距的增加, 横梁部件的挠度变形愈加突出, 直接关系到零件加工质量及可靠性, 尤其是加工航空航天领域结构件时, 由于零件的尺寸大且壁薄, 横梁的变形会对零件加工质量的影响无限放大, 横梁的挠曲变形很可能导致零件成为废品。为此, 有必要着力对横梁进行仿形研究, 评估其变形曲线, 进而选择合适的材质、最优的结构布局、合理的温度控制、反向仿形加工以及系统补偿等措施尽可能地消除横梁的自身变形, 保证整机加工时横梁的可靠性。在确定材质结构等条件后可通过对比横梁虚拟仿真计算和实际检测结果, 得出与变形曲线趋势相反的实际导轨加工曲线, 以实现抵抗横梁自重及负载变形, 即通过预先计算好的加工“变形量”抵抗其承载作用变形; 通过实测数据, 对虚拟计算模型进行了反复的修改, 并最终保障计算模型的准确性和通用性。最终在优化仿真过程中得到横梁最优的筋型布局, 图2为横梁有限元分析示例。

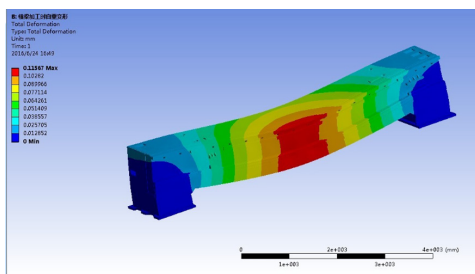


图2 横梁分析

2. 整机的热稳定性研究

由于数控机床各组成部件的材料不同, 热膨胀系数不同, 因此在环境变化的过程中升温就不同, 产生的热膨胀量也就不同; 由温度变化所引起的机床零部件热变形导致机床精度受

到影响, 这一直是大型数控机床所面临的难题。大型桥式五轴加工中心热变形补偿技术的难点之一在于数控机床热变形分析: 在加工零部件的过程中, 需要认真分析机床在运行过程中产生的热变形, 例如: 轴承高速运转过程中的热量传递到丝杠, 电机高速运转产生的热量传递到丝杠, 丝杠与滚珠直接摩擦所产生的热量, 都会导致丝杠受热变形, 从而影响丝杠传动精度, 导致加工精度偏差; 难点之二在于热变形位移数据的采集: 机床热变形引起的加工误差不能直接测量获得, 需要将传感器放置机床各结构件随温度变化的敏感处, 将获得数据录入材料库以方便对数据进行收集对比; 难点之三在于热变形量的补偿: 需要采用将热变形误差补偿到系统中, 通过补偿平台的搭建, 根据机床的实际情况, 反复试验测定过的温度差与机械的形变值关系, 利用系统将机床运行坐标定位精准, 使加工精度得以保证。

整机的热稳定性研究的主要包括影响整机热源分析、机床大型零部件热变形分析、各部件温度采集分析、整机热变形误差补偿技术研究等内容; 整机的热稳定性研究涵盖整机热源、传导、变形效果采集的全过程, 进一步对数据进行分析, 最终通过热变形误差补偿技术消弱整机受热变形的影响, 进而提高整机精度性能指标。

3. 护顶防护及吸尘装置的研究

加工复合材料时, 会产生大量飞末及粉尘, 影响零件加工精度, 破坏车间环境, 同时对机床性能及稳定性产生不利影响。这就要求复合材料加工时配备完备的密封系统及除尘系统。相对密闭的防护间、全程除尘, 防油处理等是复合材料数控加工的装备的关键点。国际上, 加工复合材料的设备大多来自德国和美国, 而国内企业进口此类尖端设备往往受到技术

限制。GMCu系列复合材料桥式五轴加工中心采用桥式框架结构, 配置超大跨距护顶防护, 护顶拉罩选择先进的防静电材料防止粉尘吸附, 护顶配置自动吸合随动开闭机构, 做到完全自动化。开发摆头随动吸尘、正压密封、随动监控等新技术, 解决了复合材料加工的“痛点”。示例如图3所示护顶示意。

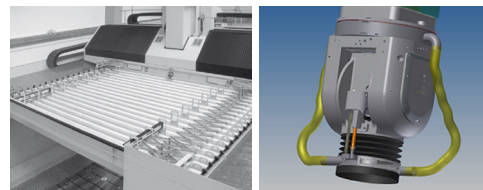
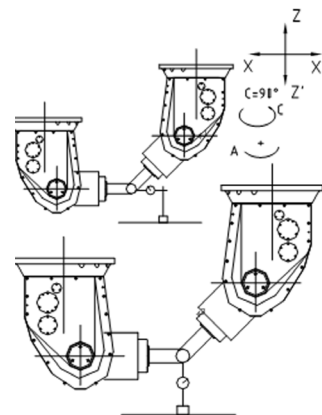


图3

4. 桥式五轴空间综合误差补偿研究

高精度桥式五轴加工中心包含X、Y、Z三个直线轴和A/C两个旋转轴（见图4），存在多达数十项几何误差，根据其各项误差值，计算并反映出运行时刀具中心点（TCP）的空间总误差。在机床运行时，根据补偿范围对应的各个已知的几何偏差，将各独立位置的偏差数值进行统计汇总，运用数控系统计算出运行时刀具中心点（TCP）的总误差。根据总误差的数值，通过数控系统更改要临近的设定坐标，补偿计算出的偏差，使刀具中心点尽可能精确地到达数控程序中预设的设定位置，从而能够大幅提升机床及加工的精度。



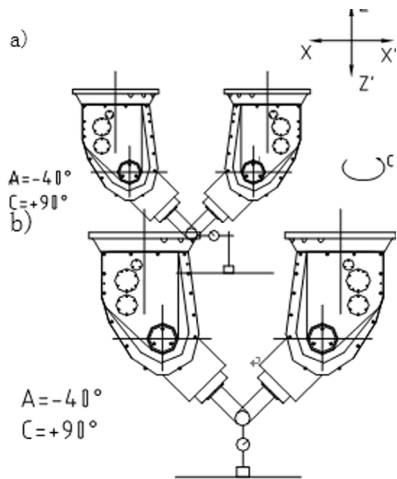


图4 刀具误差测量

5. 动刚度优化与抑振技术

衡量机床结构抗振能力的常用主要指标是动刚度。动刚度在数值上等于机床结构产生单位振幅所需的激振力，动刚度越大，则机床结构在一定激振力作用下，产生的振幅越小，其抗振能力越好；反之，抗振能力越差。实际设计中在提高结构的动刚度的同时，还应获得经济合理的结构，通过找出结构刚度过高而造成浪费的部分和刚度不足而限制机床工作能力的部分，使其动刚度得到合理的分配，从而达到抑振的目的。首先，合理设计结构的断面形状和尺寸，主要受扭矩的构件应使截面形状为圆形或接近正方形，在设计横梁、滑枕外壳及滑枕时，采用增加截面轮廓尺寸而不增加壁厚，使之在相同重量下具有较高的刚度和固有频率的方式，结合有限元分析对比多种截面形式，根据分析结论，采用变形量最小，机构形式最优的的截面形式来增加机床定刚度（见图5）。其次，调整振源频率，避免激振力产生的频率与机床系统的固有频率接近而产生共振。通过改变电机的极对数和电源频率来改变电动机的转速，并通过改变机床中主轴的转速等措施，使其避开共振区，此外减小电机转动引起的振动，将机

床的电机与驱动部件进行柔性联接，隔离电机本身振动。之后，通过预拉伸的方法消除丝杠间隙，采用双电机消除的方法，消除齿轮齿条的间隙，来提升系统的刚度和固有频率，防止共振的产生，减小受迫振动。

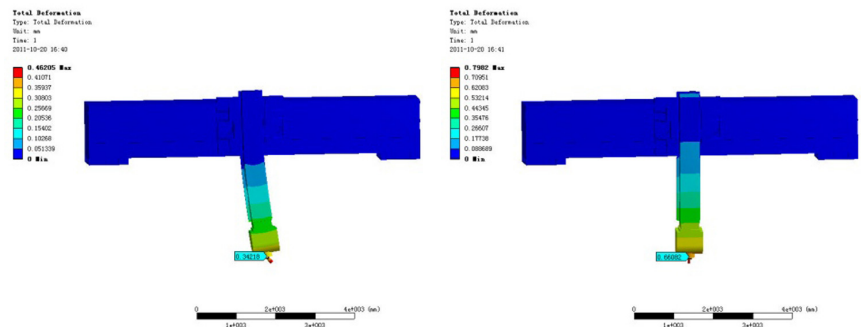


图5

6. 碰撞保护的技术

主要采用“负载检测”和“传感器检测”两类技术手段。采用“异常负载检测功能”实现碰撞保护时，不但在编程和操作错误时对机床进行保护，同时对加工过程中因刀具磨损和工件振动产生的异常负载也能起到保护作用，有效地避免了机床加工过程中不可预料错误的发生，降低了机床维修成本，提高了机床精度。异常负载检测防碰撞调试主要针对伺服轴和主轴两部分来进行，伺服系统的高速采样周期对施加到电机上的外力干扰负载扭矩进行实时地观测和计算，机床发生碰撞的时候，电机承受的外力扭矩突然增大，伺服系统将此时电机承受的外力扭矩与在系统内部设置的碰撞发生时机床能够承受的外力扭矩的最大值相比较。如果小于设置的外力扭矩的最大值，系统正常运行。如果大于设置的外力扭矩的最大值，伺服系统产生报警，同时伺服系统向伺服电机发出指令，使伺服电机向相反的方向运动，机械系统与工件碰撞面脱离，从而对机床起到保护作用。另一种方式是采用“传感器信号”采集频率、振幅和加速度等，将传感器布置在主轴端及驱动轴硬限位附近，通过传感器生成的模拟量信号分析当前机床的运动状态。从而得出机床是否发生碰撞，通过控制系统及时作出反馈，使伺服轴向相反的方向运动，机械系统与工件碰撞面脱离，从而对机床起到保护作用。

四、成果应用及推广情况

经过多年的经验积累与技术革新，目前我公司GMCu系列桥式五轴产品已在我国多个核心领域有成熟应用。在航空领域应用于我国多家飞机制造企业的生产，主要针对飞机框架类结构件、壁板类结构件等航空铝材料的高精度高效五轴加工；在复材加工领域与我国多家科研院所合作，用于玻璃纤维材料、碳纤维材料的复杂曲面加工；在航天领域应用于高精度火箭储箱加工及结构件加工；在轨道交通领域应用于车辆制造厂，针对于高铁箱体结构件、板梁类零件的加工。

总之，从各方面需求来看，我国都需要更加优秀的国产高档大型五轴数控加工设备来解决国内产能有限以及外国技术封锁难题。我公司愿同机床行业同仁一道，为国家重点领域建设和国防工业提供更有力的技术保障与装备支持，为祖国的工业发展贡献力量。□

i5M8智能五轴立式加工中心的研发与应用

沈阳机床股份有限公司

一、研发背景

机床作为机械制造业的主要加工设备，在某种意义上代表了一个国家的机械制造业水平。机床设备不但关系着国家的航空航天、军工、精密器械等行业的战略安全，而且还与人们的日常生活密不可分。如果没有制造业的支撑，国家就很难真正的实现现代化的建设。五轴联动数控机床是目前世界上最先进的机床设备，人们在设计、制造复杂曲面遇到无法解决的难题时，就会首先想到五轴联动数控机床。由于其特殊的地位，西方发达国家一直把五轴数控机床和数控系统作为战略物资实行出口许可证制度。

进入21世纪，世界机床技术快速向前发展，在精度、效率、自动化、智能化、网络化、集成化方面，都出现了新的飞跃。随着“工业4.0”概念的提出，中国政府提出了“中国制造2025”，但是高档数控系统和高档五轴数控机床一直是制约我国制造业发展的瓶颈，基于此，沈阳机床i5M8智能五轴立式加工中心应运而生。

二、产品简介

i5M8智能五轴立式加工中心是沈阳机床最具独特性的一款产品。其解构主义设计理念的工业设计，搭载沈阳机床自主研发的，具有自主知识产权的i5智能数控系统，是一款平台型

智能五轴加工中心。i5M8机床在航天军工、汽车、新能源、医疗等高品质复合加工领域能发挥最佳性能。



图1 i5M8外观

三、产品特点

1. 产品的结构特点

i5M8智能五轴立式加工中心整机采用龙门动横梁式结构，统一的床身、立柱、横梁、主轴箱等铸件框架，采用高速直驱电主轴，直线轴采用电机直联，具有高速度、高加速度和高刚性的特点。A/C轴转台采用先进的直驱力矩电机，具有很高的位置精度和动态性能。它不仅具有在单位时间内实现高速切削的能力，而且可使被加工零件获得高精度和低表面粗糙度。

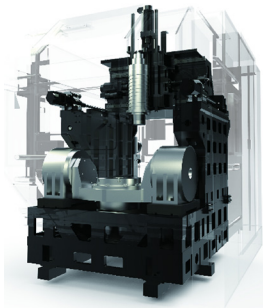


图2 机床主体结构

(1) 外观设计

i5M8整机结构极为紧凑，占地面积相对较小，可以最大限度地提高客户现场的土地使用率。同时前门配有大玻璃的安全门，可以方便操作者观察加工区域的状况。“一”字型前门拉手设计让客户开关防护门更为方便。前门打开之后操作者可以自由接近加工区域，方便操作者上下料，符合人机工程学的设计。机床的气动、润滑、液压系统置于全封闭防护内，在相应位置都留有拉门及观察视窗。i5M8产品的外观设计是工业设计领域的一个成功案例。

(2) 动梁龙门结构

整体结构优化排水和防水设计，X/Y/Z三轴的拖动机构在加工区域上方，有效避免加工时切屑和切削液对丝杠、导轨的侵染。Y轴双电机驱动，响应速度更快、运动更平稳、加工精度更高。三轴拥有600×680×450mm的超大行程，空间更大，操作更灵活。

(3) 高速铣削电主轴

i5M8的铣削电主轴标配最高转速12000r/min，最大功率15kW，最大扭矩96N·m，BT40接口。该款主轴内置异步伺服定子，采用油脂润滑，水冷却，锥孔径向跳动≤0.003mm，主轴带有气密封、刀具冷却、主轴温度监控等功能，可长时间保持对客户零件的高精度加工。同时，也可根据客户的不同需求，选配

18000r/min、24000r/min等不同转速电主轴。

(4) A/C轴摇篮转台

A/C轴摇篮转台采用力矩电机作为动力源, 搭载YRT轴承实现直接驱动, 减少中间环节, 提高动态响应速度及运动精度。A/C轴最高转速可达50r/min, A/C轴转动范围 $\pm 120^\circ$ / $\pm 360^\circ$ 。A/C轴定位精度 $10''$, 重复定位精度 $6''$, 配备海德汉编码器。独有的多层密封设计, 能有效提高摇篮转台的防水性能, 支持 $\phi 500\text{mm}$ 直径工作台, 工件最大回转直径 $\phi 600\text{mm}$ 。

通过研究两轴转台在运动过程中的特性, 提出使用整体铸铝结构, 从而减轻摆架重量, 提高摆架重心, 减小在摆动运动中产生的转动惯量, 降低对力矩电机的负载要求, 达到提高动态响应及摆动加速度的目的。摆架重量由205kg减轻为75kg。轻量化设计之后A轴角加速度由铸铁摆架的 12rad/s^2 提升到铸铝摆架的 18rad/s^2 。

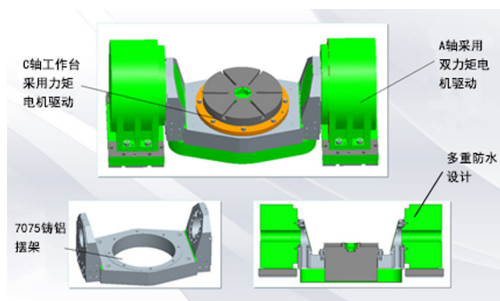


图3 两轴转台设计结构示意图

(5) 伞式伺服刀库

i5M8配备平置式伞形刀库, 可装载20把刀具, 伺服电机驱动转位, 采用主轴抓刀的方式进行换刀, 换刀过程快速准确。还可选配32把链式刀库, 满足客户更多的需求。



图4 20把平置式伞形刀库

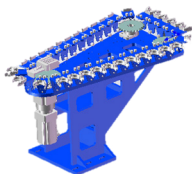


图5 32把平置链式刀库

2.i5数控系统特点

i5数控系统是沈阳机床攻克了CNC运动控制技术、数字伺服驱动技术、实时数字总线技术等运动控制领域的核心底层技术, 推出的具有网络智能功能的数控系统。该系统突破了世界机床行业最顶级的五轴五联动控制技术, 摘下了工业软件皇冠上的明珠。其具有特征编程、三维模拟仿真、远程诊断、工业互联等多种智能技术。



图6 第四代i5系统

第四代i5数控系统, 采用i5OS内核。标准五轴联动控制、车铣复合、在机测量、工单管理等系统功能以工业APP的形式植入数控系统, 可以随着i5M8产品的不断更新迭代开发新的工业APP, 从而形成机床产品的独特性。

四、产品亮点

1.可重构平台型设计

i5M8是一款可重构平台型智能机床。主体采用由床身、立柱、横梁、主轴箱等组成的统一的机械平台, 外围单元如液压、气动、润滑等采用模块化设计。统一的机械平台通过搭配固定式工作台、单轴直驱转台、双轴直驱转台、铣车电主轴等不同功能模

块, 从而实现3轴、3+1轴、3+2轴、5轴联动、铣车复合等具有不同功能的加工中心, 可以高效地满足不同行业、不同类型客户的零件加工需求。机床的工作台模块可实现快速灵活的换装, 短时间内实现机床功能的转换, i5数控系统则通过软件模块选择就能轻松实现控制, 由于具备多种切削能力, 这种设计理念的机床可以帮助客户实现零件的定制化生产和应对市场的需求变化。

2.核心功能部件国产化

i5M8智能五轴立式加工中心的数控系统、电主轴、A/C轴力矩电机、排屑器、水冷机等功能部件均采用国产品牌。通过功能部件的国产化, 一方面实现了机床整体制造成本的下降, 降低了终端用户的采购成本; 另一方面通过i5M8的不断提升和进步, 对这些关键零部件也提出了更高的要求, 从而推动国产功能部件不断的提升设计和制造水平。

3.铣车复合功能

结合市场需求, i5M8研发了五轴联动加工中心的铣车复合功能。该功能通过数控系统、铣车复合电主轴、高速C轴之间的配合来实现, 使机床可以在铣削模式与车削模式两种状态下自由切换。铣削模式状态下可以实现对零件的五轴联动、3+2多轴铣削加工, 车削模式状态下可以实现对工件的外圆、内孔、端面等进行立式车削、卧式车削以及A轴联动车削加工。从而进一步提升了M8产品集成加工的能力, 尤其适合外形复杂、加工特征多样的零件, 可以将零件的车削特征、铣削特征一次性加工完成。

五、质量控制

沈阳机床股份有限公司是一家通过ISO9001质量管理体系以及ISO10012测量管理体系认证的企

业。i5M8智能五轴加工中心的研发制造检测过程遵循以上两项管理体系的要求。

机床的几何精度指标优于国家标准GB/T34880.2-2017《五轴联动加工中心检验条件》的要求；机床的切削精度指标符合国际标准ISO10791-7《Test conditions for machining centers》第七部分《Accuracy of finished test pieces》中的NAS试件以及S试件的加工精度要求。

在制造过程中的质量保证上主要采用检测设备保证以及过程管控保证：

(1) 检测设备保证：公司拥有雷尼绍XL-80激光干涉仪、QC20-W球杆仪、回转轴校准装置XR10、海克斯康GLOBAL performance7107三坐标测量机、schenck HS20BU动平衡机等关键测量设备，用以检测机床的定位精度、加工试件精度以及高速电主轴动平衡。

(2) 过程管控保证：①具有完善的过程控制文件及配套的质量记录文件20余种；②建立机床档案，每台i5M8产品从产品设计、BOM编制、加工装配过程、客户安装使用的全过程，可实现质量责任追溯；③通过客户反馈、QC立项等方式，以PDCA原则，不断提升产品质量；④开展培训及岗位轮换活动，不断提升员工业务水平。

六、产品研发与应用

经过为期两年的产品研发，联合沈机（上海）智能系统研发设计有限公司以及国内功能部件厂商，陆续攻克了五轴联动数控系统铣车复合控制功能、两轴摇篮高速C轴转台以及铣车复合高速电主轴功能部件。采用系统功能与关键功能部件的有效集成，研发出i5M8.4铣车复合五轴联动加工

中心。该产品搭载最新的第四代i5OS智能数控系统，19寸触摸屏，是一台具有互联网基因的大数据终端。i5OS系统提供标准运动控制API接口与开发环境，使机床与系统共同进步。系统功能上拥有对加工零件的高级仿真、倾斜面坐标快速变换、手轮引导、铣车模式切换、五轴断点返回等功能，让操作更方便。



图7 i5M8.4铣车复合五轴联动加工中心

该产品配备的铣车复合电主轴，铣削模式下最高转速可达12000r/min，采用HSK63A刀柄；车削模式下通过主轴鼻端三联牙盘定向，刀尖定位准确可靠。A/C轴摇篮转台采用国际领先的直驱式力矩马达，无反向间隙，角度定位准确。直线轴与旋转轴的高精度配置可以保证五轴联动时零件加工尺寸的准确性。C轴最高转速可以达到1200r/min，用以满足车削模式下的切削线速度要求。

目前i5M8.4铣车复合五轴联动加工中心主要应用于新能源电机壳、高端汽车轮毂、航空发动机叶盘等行业零件。通过i5M8.4的铣车复合功能可以实现一次装夹完成车削、铣削、钻孔攻丝等加工，减少了传统加工方式中的多次装夹所造成的定位误差，减少了重复上下料的辅助时间，降低了多序加工时候的设备采购成本和工装夹具的采购成本，提高了产品的加工精度和加工效率。

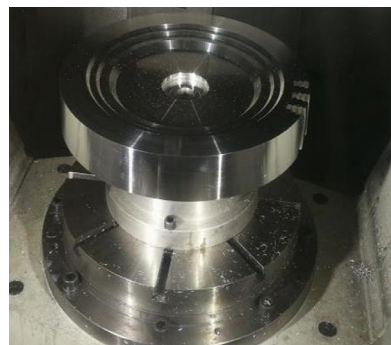
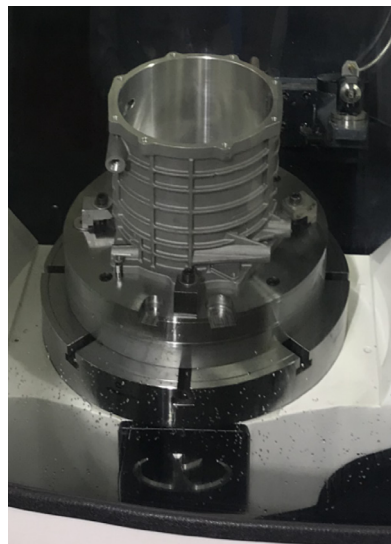


图8 典型加工零件

七、结束语

随着现代零件设计越来越自由，加工特征越来越复杂，对五轴机床的需求日益增长。i5M8将继续不断迭代、不断创新、不断前行，引领我国五轴机床走向高端自主，更好地服务和应用于航空航天、军工、模具、汽车、医疗等行业，为加快实现“中国制造2025”做出应有的贡献。□

XK9734型重型轮槽铣床的研发与应用

齐齐哈尔二机床（集团）有限责任公司 周 锐

一、概述

作为一种以蒸汽为动力,并将蒸汽的热能转化为机械功的旋转机械,汽轮机在各种能源转换机械中,有着不可替代的作用,它是现代火力发电厂中应用最广泛的原动机。汽轮机的复杂苛刻工况导致对其复杂零部件的机械加工制造质量有着极高的要求。汽轮机转子是一种典型的复杂成型表面,其加工涉及高温合金难加工材料、高成形精度和高表面完整性等特殊要求。由于汽轮机转子的加工质量直接影响到最终的发电机组发电效率和使用寿命,对转子加工机床进行深入研究,一直是难加工材料切削领域的重要研究课题。

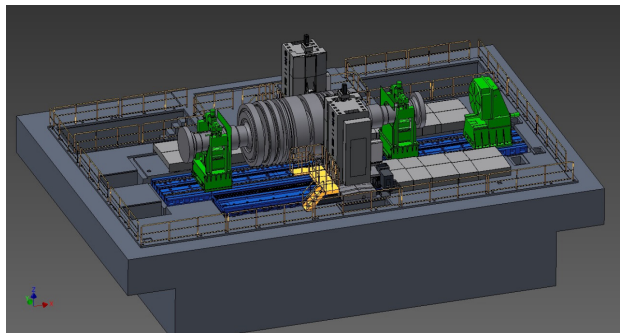
随着电能的需求越来越大,发电机组的需求越来越多,汽轮机转子需求量越来越大,而且趋向于大型化和高精度,因此转子加工设备也越来越受到重视。为打破国外技术垄断,提升国产能源装备制造水平,满足国内能源行业市场对重型、高精度、轴控制百万千瓦级数控转子槽铣床的迫切需求,我公司研制了具有自主知识产权的XK9734型重型轮槽铣床。该产品主要解决大尺寸、大功率、高精度汽轮机转子的加工难题。



XK9734型重型轮槽铣床外观图

二、产品性能介绍

该机床主要由三部分组成:两边各对称分布一台独立控制的四轴联动机床,中间是转子加工装置部分。



XK9734型重型轮槽铣床三维图

转子加工装置包括:固定工作平台、分度装置、静压中心支架、中间支撑支架、同步检测支架、左右叶轮夹紧装置。

1. 固定工件平台

平台为铸铁件,可满足300吨重型转子的承重要求。平台上面安装分度装置、两个静压中心架、中间支撑、检测尾架的基准平面。在平台上安装有中心支架行走的齿条和导向导轨,以及两侧电缆走线槽,走线槽内有拖链。平台上有两个接油盒,用来回流加工时的切削油回流顺畅。

2. 分度装置

分度装置由床身、滑座、支撑分度转台的支座及分度转台四个部分组成。床身固定在平台上,滑座在床身上移动,滑座上面固定支座,分度转台连接在支座侧面。

分度装置的核心部分是分度转台,分度转台为进口外购件,品牌为日研产品。

分度转台上的花盘与转子通过螺栓连接,用于驱动转子回转。

滑座由电动/手动方式结合调整。梯形丝杠沿床身移动，行程500mm，便于花盘与工件法兰联接。滑座采用碟形弹簧夹紧，杠杆与油缸组合松开的夹紧方式。具有小体积的油缸去除大夹紧力的特点。

在分度装置的分度转台的尾端装有海德汉圆光栅，与圆光栅支架上的圆光栅一起实现转子（工件）高精度分度定位(A1轴)。两个圆光栅的位置值做比较，差值过大时，系统报警，停止铣头加工。

转台上的用于连接工件（转子）的T型槽是过转台中心的。

3. 静压中心支架

两端支架分为左中心支架和右中心支架两部分，是支撑着转子主要重量的两个支架。在加工时支撑和夹紧转子；在转子分度时作为静压轴承，减少回转阻力，同时静压支撑转子。其工作过程为：转子分度时，球面轴瓦静压支撑转子，此时油缸夹紧松开；分度完成后，球面轴瓦静压消失，夹紧油缸V面和球面轴瓦共同夹紧转子。

本机床配置2套中心架，支撑范围 $\phi 500\text{mm} \sim \phi 900\text{mm}$ ，每套承重180t。中心架上液压夹紧系统配置蓄

能器、压力继电器和保压阀等，夹紧压力工作范围9~12MPa。

4. 中间支撑支架

中间支撑在转子槽加工过程中支撑工件，减小切削颤动引起的加工误差；转子分度时，松开转子，V形铁脱离转子。

底座用压板固定在平台上，平台上有导向导轨，保证支架的中心位置窜动误差；底座设置底座抬升装置和手动齿轮，抬升机构抬起底座后，通过手动齿轮与平台上的齿条传动，实现底座的移动，满足不同支撑距离的调整；底座内的上下调整机构为一个油缸驱动楔铁，安装在两个静压导轨面中间，通过调整楔铁调整V型铁的中心高度，调整量为3mm。油缸上设置行程开关，检测活塞实际位置，为电气系统提供检测信号。

中间支承座支承面无静压，适应中间辅助支撑 $\phi 1000 \sim \phi 1500\text{mm}$ 的直径范围。通过更换中间支架，调整高度。

控制方式：与两个静压中心架动作相反。

5. 同步检测支架

此装置用来检测转子分度的同步

性，防止转子与分度装置滑动引起的误差。由底座、底座固定机构、和圆光栅调整机构、圆光栅支架构成。栅支架为焊接件，装有海德汉圆光栅，作为反馈装置与分度装置的圆光栅（主反馈装置）同时闭环到数控系统中，实现工件的分度定位(A轴)，并在超出分度误差范围时自动报警。该支架具有满足移动和调整便捷等特点。

6. 左右叶轮夹紧装置

此装置用来防止转子轴向窜动，以及切削加工时在切削力作用下转子的转动。

转子轮槽加工设备在国外发展较早，技术成熟，产品涵盖汽轮机转子和电机转子的加工设备，几乎垄断了此类设备的市场。世界上主要的制造商有美国的INGERSOLL公司和意大利的INNSEBERARDI公司。国外设备虽然技术成熟，但价格昂贵，这样限制了很多用户的购买意愿，进而转向选择国内制造。

我公司生产的XK9734型重型轮槽铣床加工的最大转子达到300吨，转子最大直径3400mm，是目前我国最重的转子。该产品与国外同规格产品主要技术参数对比如下：

产品与国外机床厂家参数对照表

机床参数	厂家 型号 单位	美国INGERSOLL	意大利INNSE	中国齐二机床
		XK9734	XK9734	XK9734
主轴转速	r/min	5~90	1~80	1~1500
分度头花盘直径	mm	1200	1600	1600
托架轴颈范围	mm	$\phi 300 \sim \phi 600$	$\phi 300 \sim \phi 700$	$\phi 500 \sim \phi 900$
工件回转直径	mm	$\phi 900 \sim \phi 1250$	$\phi 700 \sim \phi 1900$	$\phi 1600 \sim \phi 3400$
镗铣主轴直径	mm	$\phi 160$	$\phi 160$	$\phi 270$
镗床主轴内锥孔		ISO 50	ISO 60	ISO 50
主轴转速范围（无级）	r/min	55~2000	4~2000	2~1250
行程：X/Y/Z/W/Z1轴	mm	15000/15000/1000/1500/0/850	22000/22000/1500/1250/800/1000	10000/10000/
500/500/1200/1200				
定位精度：X/Y轴	mm	$\leq 0.03/2000$	$\leq 0.03/2000$	$\leq 0.025/2000$
重复定位精度：X/Y轴	mm	≤ 0.02	≤ 0.02	≤ 0.015
定位精度：Z/	mm	$\leq 0.03/1000$	$\leq 0.03/1000$	$\leq 0.03/1000$
重复定位精度：Z/W轴	mm	≤ 0.02	≤ 0.02	≤ 0.02
分度头分度精度	"	± 5	± 6	± 3

XK9734重型轮槽铣床相关技术专利授权2项，其中发明专利1项为《一种重型数控落地铣镗床X轴移动直线度补偿装置及方法》（授权号：201410641177.X）；实用新型专利1项《一种调整机床导轨精度的镶条结构》（授权号：201521064504.6）。

三、新技术应用情况

（1）差动检测技术。为解决夹紧装置出现滑动、刚性不足的问题，创新研制了差动检测技术，可以避免

此类现象的出现。

（2）叶轮自动夹紧技术。防止转子加工轮槽过程中切削力对转子产生转动的影响，创新研制了叶轮自动夹紧技术。

（3）控制程序优化及开发。针对对置式主机、两个操作者同时加工的特点，设置主辅机可以同步启动、暂停双方的程序运行，便于查看两侧机床的故障状态。

四、成果应用及推广情况

XK9734重型轮槽铣床在哈尔滨

汽轮机厂有限责任公司等单位得到应用，其加工产品精度、加工效率均达到并超过美国和意大利等同类进口机床，已完全替代进口。

XK9734重型轮槽铣床的研制成功，提升了我国大功率、大重型汽轮机转子的加工水平，打破了国外对该项目的垄断和封锁。对于提高汽轮机关键零部件的国产化、提高我国能源机械的国内自主配套能力有着显著的经济效益和社会效益，对加强我国的能源安全也具有十分重要的战略意义。□

上接第44页

如此的良性循环，将激发起大连机床研发、制造、装配等各个环节员工的创新、创造的积极性；加快和持续推进设备的国产化的步伐；服从国家战略，解决“卡脖子”、替代进口问题；打破发达国家对我们的禁售、技术封锁等各种禁令；为推进中国装备制造业的智能化升级，起到引领和示范的作用。

该线适合在发动机零部件行业进行推广。国务院于2010年将新能源汽车列为战略性新兴产业之一，随着新能源汽车行业的发展，发动机零部件加工自动线的前景将更加广阔；同时对制造装备也提出了更高、更新的要求。目前该线已交付用户（江苏罡阳股份公司），该用户为其行业中的知名企业，对行业发展有示范作用。

七、结束语

该自动化生产线的研制成功及用户的正常使用，标志着我国生产线研制能力和水平已有了很大提高。这条具有自主知识产权的生产线，不仅填补了我国自行研制曲柄加工生产线的空白，更重要的是我们已经掌握了相关方面的

先进技术，替代了进口设备，为用户企业减少支出1000万元，产品质量稳定性提高25%以上，有效地提高了用户企业市场竞争力。□

参考文献

- [1] 刘涛. 2013-2017年中国曲柄轴市场研究及未来发展趋势报告[R]. 北京:智研咨询集团, 2013.
- [2] 于善奇. 工序能力指数的新定义及其应用[J]. 标准科学, 2007(1): 53-54.
- [3] 沈亚丽. 用于自动车床断屑的高压冷却系统[J]. 柴油机设计与制造, 1994(2): 42-45.
- [4] 唐彬, 刘杰. 机器人视觉传感系统与数控机床的组合应用研究[J]. 机械管理开发, 2016(11): 46-47.
- [5] Carvalho J, Carvalho A, Portugal P. PERFORMABILITY EVALUATION OF PROFIBUS-DP MULTI-MASTER NETWORKS IN INDUSTRIAL RELEVANT SCENARIOS[J]. Ifac Proceedings Volumes, 2007, 40(22):95-102.
- [6] Guh R S, Tannock J D T, O'Brien C. IntelliSPC: a hybrid intelligent tool for on-line economical statistical process control[J]. Expert Systems with Applications, 1999, 17(3):195-212.

VH80 C80X1400VE阻尼减振车刀的 研发与应用

松德刀具（长兴）科技有限公司

一、概述

机械加工过程中孔加工所占比例较大，约占整个加工工作量的1/4，而深孔加工又是内孔加工中尤为重要的一部分。深孔加工配套刀具目前基本上由SANDVIK国外巨头垄断。虽然我国制造业量约占世界市场份额的28%，但数控刀具依赖需要大量国外进口，尤其在深孔加工领域。

阻尼减振刀具是机械加工行业一颗璀璨的明星，可有效解决长悬伸刀具切削振颤问题，特别是在深孔加工中的减振镗刀的应用最为广泛。一直以来，减振镗刀被国外刀具品牌所垄断。松德刀具一直致力于打造民族镗刀第一品牌，而对于减振刀具研发将是一个必须逾越的鸿沟。松德研发团队坚持不懈地致力于减振系统的研究，终于攻克了这一难题。

在研发过程中，我们充分研究了动力减振技术和阻尼减振技术，结合专业知识和经验，设计开发出了独特的有阻尼减振系统及其结构形式，有助于精确地将刀具振动的振幅快速减至最低；同时研究了切削振颤控制技术，便于准确地确定不同领域的振动类型，有效地控制这些振动。对于一般的刀杆，在长径比超过4倍时刀具本身将产生振颤，使得加工无法进行。随着悬伸越来越长，刀具刚性会越来越低，切削力会对切削刀具振动的振幅影响也会越来越大。在刀具切削加工中，振动不可能完全被消除，但是，减振刀具完全可将其降低至最低水平，使其对加工过程和结果不会造成不良的影响。采用先进的模拟方法、测量设备及系统，通过优化刀具结构及各零部件参数，在正常的切削区域内，减振刀具的减振系统完全可以大大减少切削力作用在刀具上产生的振

动，从而消除对切削过程的不利影响。

VH80 C80X1400VE阻尼减振刀具（见图1），是为满足国内某客户深孔加工的需求，而开发的14倍径加长型阻尼减振刀具。该产品是我公司在已开发的阻尼减振刀具上，持续进行多项技术创新，自主研发制造的新成果。该成果应用了多项发明专利和一项外观著作权。其主要技术指标保持国内领先、国际先进水平。该项目的研制成功，不仅提升了我国此类刀具的水平，也打破了国外对该阻尼减振刀具的垄断，为企业开拓了新的产品市场，同时取得了良好的经济效益和社会效益。

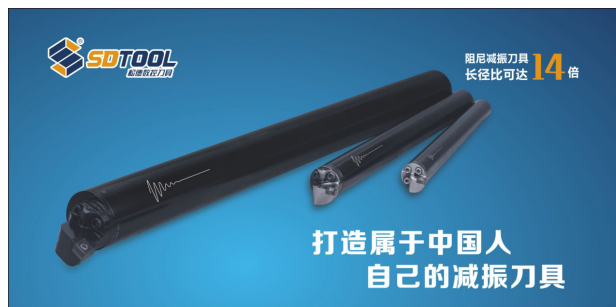


图1 阻尼减振刀具外观图

二、产品性能介绍

松德刀具为内孔的深孔/深腔加工提供特殊的阻尼减振系列产品，刀杆内置有“实时响应”的阻尼器模块，作为深腔解决方案。这一独特的模块式阻尼机构，有高密度抗振阻尼材料及支撑橡胶弹簧组成（见图2），该橡胶弹簧由阻尼油包裹，把振动能转化成热能传出去。这项独特的刀具设计理念，填补了国内阻尼减振刀具的空白，在深

孔/深腔加工领域，打破了原欧洲品牌的垄断。此系列刀具已在军工行业、工程机械等用户领域为减小乃至消除振动提供了高效解决方案。

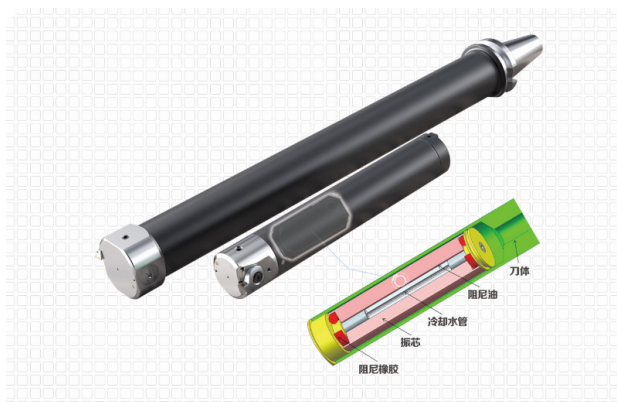


图2 阻尼减振刀具结构示意图

产品主要特点：

- (1) 阻尼减振刀具悬伸长径比可达14倍。
- (2) 使用简单，无需在线调整。
- (3) 性能稳定，不同的切削环境均能达到有效减振防振的效果。
- (4) 加工效率高（比普通刀具效率提高2~10倍）。
- (5) 加工表面质量高，表面粗糙度可达到 $Ra0.4 \sim 0.8 \mu m$ 。
- (6) 提高刀片寿命。

三、成果应用及推广情况

机械加工过程中经常会遇到深腔、深孔、深槽或各种干涉等难加工工况，这些工况对于刀具的要求悬伸很长（刀具伸长与刀杆直径比达到6倍以上，更有甚者需要达到10倍、12倍、14倍或者更长，才能满足零件图纸加工要求）。这时候工程师们在编制工艺技术文件时，如果选用常规刀具标配短制刀杆去加工，很难达到零件的加工技术要求，特别是要想在这种工况下达到高质、高效加工更是难上加难，有些工件甚至都加工不出来，更谈不上什么效率，成本问题。针对此类长悬伸刀具，可以选用阻尼减振刀具，来解决这一难啃的问题。我们从镗、车及铣三方面来例举此类刀具的使用与效果。

1. 阻尼减振刀具之减振镗刀

孔加工在许多零件中起到至关重要的作用，通常都会有比较严格的孔径公差及形位公差，孔质量好坏也事关终端交付产品整体组装的质量。在加工过程中精加工内孔也一般都在比较靠后工序，加工完基本可以交付入

库了，如果在这道工序出现意外发生废品，造成的损失也是不容小觑的。例如一客户轴承座零件做的整体交钥匙方案，其中一个孔精加工，粗加工采用标准镗刀对头镗方式。工件加工要求： $\phi 150H8$ ，深730，通孔；材质：球铁；机床：立式加工中心，BT50柄（如图3所示）。加工难点：长径比过大，按标准镗D150孔镗刀刀柄D80刀杆粗计算，长径比已经达到9.2倍，近10倍。通常镗孔类刀具6倍径刀具刚性已经比较差了，已经不推荐刀片用 $Ra0.4 \mu m$ 圆角加工，用 $Ra0.2 \mu m$ 刀片小圆角低切削力勉强可以加工，但每齿进给 F_z 只能控制在 $0.05 \sim 0.08 mm$ 之间。刀具方案一：选用标准镗刀+接长杆一节一节的接显然是不可能的实现加工的，由于刀具过长，模块连接过多，加工振动无法消除。方案二：做专用非标整体式镗刀柄或一体式镗刀，也是没有一点把握。方案三：做整体硬质合金杆镗刀，硬质合金材料及成本接受不了，而且效果也并不一定理想，这么大的硬质合金材料没有地方做或者交期很长。方案四：采用非标定制专用整体阻尼减振镗刀来应对这一个零件的加工要求。当然既然是非标量身定制，对于这把阻尼减振刀具也从标准设计中进行了较多优化改进，如内部减振振芯选用优质材料、精镗头选用专用轻质镗头等（见图4）。

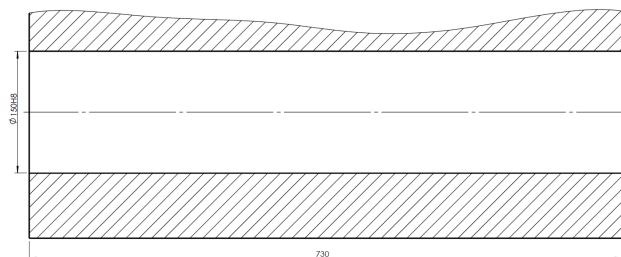


图3

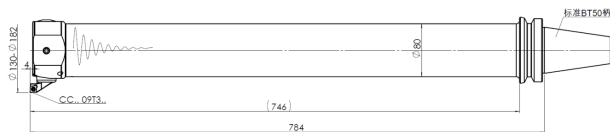


图4

从图4可以看到，整把刀具有效长达到784mm，悬伸746mm，刀具自身重量达30kg以上，前端图纸振幅曲线位置即为阻尼减振系统所在位置。图5为刀具客户现场验收图片。表1为切削参数，由于此类刀具特殊，未有对比刀具参照效率要求，客户在保证加工质量的前提下无时间要求，所以表格中未列其他刀具对比效率，客户现场验收顺利通过，完成此次阻尼减振刀具的私人定制。



图5

表 1

序号	具体信息	精镗孔
1	刀具	阻尼减振镗杆
2	刀片	CCMT 09T304-TM SC3020
3	N (r/min)	220
4	V_c (m/min)	103
5	D_m (mm)	150
6	L_m (mm)	730
7	F_z (mm/z)	0.1
8	F_n (mm/r)	0.1
9	A_p (mm)	0.15
10	镗孔时间 (min)	33

以下零件采用刀具为D20杆整体式10倍径镗杆，工件孔径D25H7，深190mm；机床：DIN69871 50柄卧式加工中心。图6为刀具示意图，图7为刀具试切图，切削参数如表2所示。

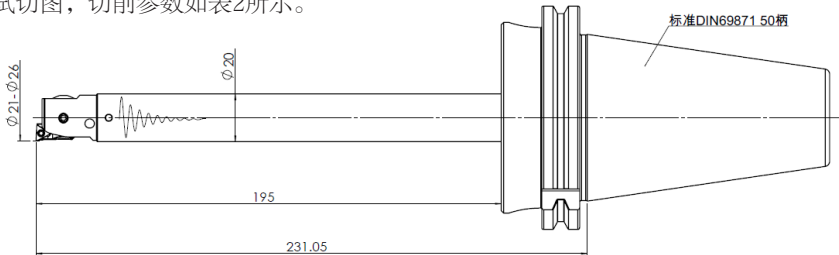


图6



图7

表 2

序号	具体信息	精镗孔
1	刀具	阻尼减振镗杆
2	刀片	TBGT 060104L-TP SC4025
3	N (r/min)	1500
4	V_c (m/min)	117
5	D_m (mm)	25
6	L_m (mm)	190
7	F_z (mm/z)	0.1
8	F_n (mm/r)	0.1
9	A_p (mm)	0.15
10	镗孔时间 (min)	1.3

2. 阻尼减振刀具之减振车刀

车床零件中深孔、深槽及深腔加工减振车刀应用也是非常广泛的。以下为针对一薄壁零件客户内孔系列加工的刀具应用，图8为工件示意图。工件材质：钛合金，机床：数控车床。结合客户实际要求采用标准VT50 C50X668V刀杆+非标车刀头+专用机床夹紧座来完成加工。图9为刀具示意图。

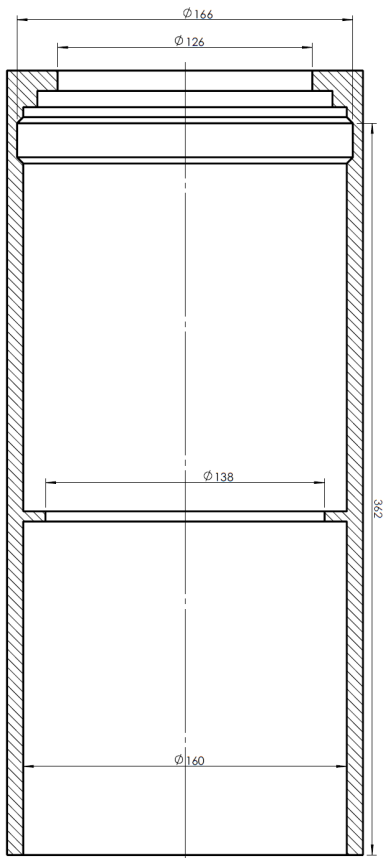


图8

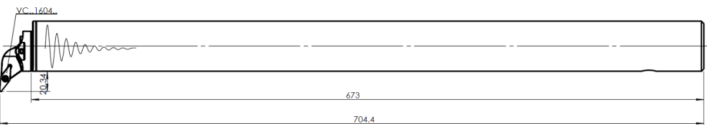


图9

客户原计划采用非标整硬刀具加工，车刀杆做成整体硬质合金至D100，成本、周期及风险综合性评估后决定选用阻尼减振车刀，且减振车刀交货期也较快。图10、图11为现场加工示意图。图12、图13为加工后的表面质量。表3为切削参数表。整体加工后的表面质量及加工效率令客户比较满意。



图10



图11

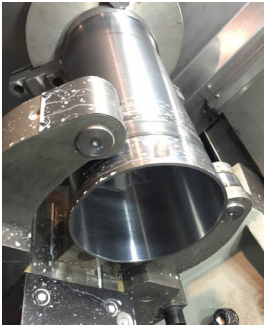


图12

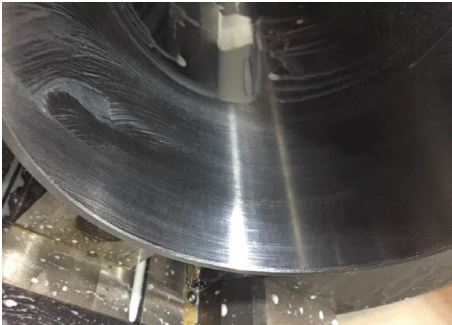


图13

表3

序号	具体信息	精镗孔
1	刀具	阻尼减振镗杆
2	刀片	VCMT 160408F-MP SC2010
3	N (r/min)	300
4	V_c (m/min)	150
5	D_m (mm)	160
6	L_m (mm)	400
7	F_z (mm/z)	0.13
8	F_n (mm/r)	0.13
9	A_p (mm)	1
10	车削时间 (min)	10

3.阻尼减振刀具之减振铣刀柄

面铣刀加长减振铣刀柄广泛用于深腔铣削加工，也可以使用SEM面铣刀接口作为模块式接口使用，通过更换刀头实现铣、镗等各种加工要求。刀具图14为我司已顺利交付客户用于模具仿形铣削的阻尼减振刀柄，安装D63圆刀片标准刀盘。如图所示刀柄悬长472mm+刀盘厚度4mm总悬伸512mm，长径比已经达到10.3倍，有效长达550mm。同样刀具设计在标准减振刀柄基础上也进行了优化，振芯同样使用优质材料，最终验收效果良好。

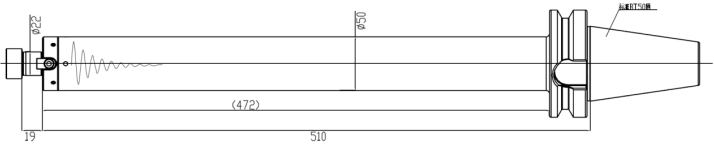


图14

刀具图15所示为客户订购刀柄，通过使用SEM面铣刀接口更换不同的刀具刀头，来实现镗铣等多功能加工。客户已使用并重复采购。

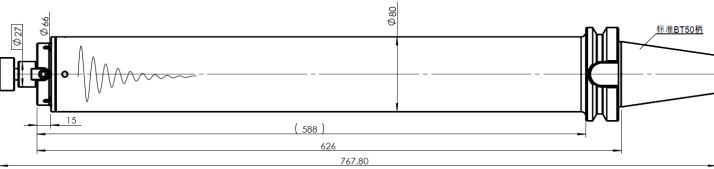


图15

四、结束语

减振刀具已广泛应用于通用工程、发电、航空航天、能源、汽车等各行业。减振刀具不仅仅是解决标准刀具加工不了的问题，还可以使用替换标准刀具来提高加工效率，可大幅降低加工时间，降低成本。如短制7倍径车刀杆，6倍孔径镗刀的使用等。以往遇到这些客户提效要求或者解决这类特殊工况所需刀具都是用进口的，现在国产刀具也敢于同进口刀具进行竞争试切，从目前对比的结果来看效果还是不错的，当然还是要坚持不断的再改进、研发，争取能够在这一领域不管是从质还是量上能够取得突破，最终替代进口刀具。 □

ZEISS CONTURA系统：将质保水平提升到新的高度

卡尔蔡司（上海）管理有限公司

市场瞬息万变，三坐标测量机对客户的重要性与日俱增。客户对三坐标测量机的期望与要求是：灵活，经济实惠，能够与高精密制造系统的精准度相匹配，并配备完全集成的光学测头。为了满足市场和客户的需求，蔡司推出了面向未来的ZEISS CONTURA，将质保水平提升到新的高度。

购买三坐标测量机（CMM）时，必须做出一些决策，以确定公司未来几年的测量策略。即使传统的接触式测头足以应付当前的测量工作，但可能不久就会有客户订购需要光学测量等其它检测技术的新工件。有了新一代的ZEISS CONTURA系统，就无需再预测该产品领域的未来可能会发生什么。

购买了三坐标测量机之后，用户可以观察VAST测头是否满足需求，或者是否需要配备光学测头的旋转测座系统。新型ZEISS CONTURA基于MASS(多测头技术)技术，可以快速方便地在不同的测头技术之间进行切换，使用户能保留其所有测量方案。



轻松应对各种测量任务

ZEISS CONTURA是蔡司产品系列中比较畅销的系统。许多中小型公司都依赖于该系统集精度、可比性、灵活性和生产力于一身的优势。但客户不断对供应商提出更高的期望。ZEISS CONTURA产品经理Andreas Bucher说：“为此，我们决定将CONTURA技术与PRISMO 机器所具备的功能结合起来。”

于是，一种全新的设计诞生了，将蔡司的成熟解决方案与创新技术相融合，可满足诸多应用的需求。

这种多测头系统配备创新的光学测头，可执行多种测量作业，包括检测塑料、医用植入物以及电池和柔性细销等电机部件。

该系统配备创新的ZEISS DotScan色阶共聚焦白光测头（也是CONTURA系列的一项新功能），甚至可以测量透明的厚涂层。

此外，成熟的VAST扫描技术可以在三坐标测量机上实现多种不同的形状和位置公差选项。这样，操作人

员就无需在专门的系统上进行耗时的形状测量，从而降低了检测成本，缩短了交货时间。而且，该系统现在还可以测量粗糙度，其按照同一测量序列的标准，将粗糙度测量功能完整地集成在三坐标测量机上，从而为手动测量粗糙度提供了高精度的替代方法。蔡司通过这种方式开创了中距离三坐标测量技术的未来，并将其提升到全新的高度。Bucher：“我们通过与客户沟通，深入了解了他们的需求，我们相信自己做出了正确的决策。”



现在可提供转台

公司在购买三坐标测量机很长一段时间后，可以考虑增加一些附件。其中包括本系列首次提供的转台，用于测量旋转对称组件。由于该轴用作扫描轴，转台可以作为三坐标测量机的第四个轴。Bucher说：“现在，客户可以采用完全集成的四轴模式进行多种不同应用的测量，以适应特定的生产需求。” FlyMode是该系列的另一项新功能。它使测头能够在从A到B的有效路径上运行，从而缩短测量时间并保护机械部件。

该系统的内部也有一些微小但令人印象深刻的改进：蔡司的新型空气轴承，基于ZEISS PRISMO的驱动技术，玻璃陶瓷光栅尺，减少空气消耗的AirSaver技术，以及提供更大脚部空间的人体工程学底座。ZEISS CONTURA还可配备HTG宽温配件，用于更宽的温度范围。这样，客户可以在较高温度下使用机器时拥有更大的灵活性。这不仅能节约成本，还有助于保护环境。



量程范围大，占地面积小

ZEISS CONTURA深受中小企业的欢迎。这些公司经常把邻近的小房间改造成高质量的实验室，空间有限，三坐标测量机几乎无法进门。他们的福音来了：新一代ZEISS CONTURA可提供同样的量程范围，而需要的占地面积则减少了10%~15%。蔡司还提供了新型ProMax E，这是一种自动探针库位架，旨在确保在更换期间能进行完整范围的测量。

需要时，库位架自动移动到量程范围并切换探针系统，以确保可靠性和重复精度。根据量程范围的大小，与固定安装的探针库位架相比，用户可增加最多46%的范围。或者，客户可以在不增加系统占地面积的情况下选择更大的机器。ZEISS CONTURA提供六种不同的尺寸，可测量长达2400毫米的工件。

适合广大客户

很多公司会喜欢这个新款测量机。他们可以期待更多增强功能，包括创新的新型光学测头。为了确保客户满意，蔡司服务部门在全球范围内快速响应客户并提供专业技术服务。

新一代ZEISS CONTURA可提供同样的量程范围，但占地空间减少了10%~15%。

为此，我们决定将CONTURA技术与ACCURA和PRISMO 机器具备的功能结合起来。 □

浅谈3D打印与切削混合制造工艺的原理与应用

龙口矿业集团有限公司 林郁
山东理工大学机械工程学院 李阳 高希坤 程祥

3D打印技术作为一项比较成熟的成型技术，在很多方面都得到了应用，然而由于其成型表面质量相对较差，不满足零部件使用要求。因此，将3D打印技术与数控切削技术相结合，对成型表面进行二次加工，可以大大提高表面质量。增减材混合制造技术将3D打印技术与数控切削技术进行了有机的结合，从原理上提高了生产效率、降低了生产成本。因此，这种混合制造技术逐渐被广泛应用。

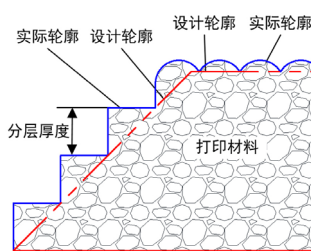
1. 引言

3D打印增材制造成形的最大特点是分层制造，从原理上就使得采用3D打印所制作工件的几何尺寸精度和表面质量比着传统减材制造的工件较差。如图1(a)所示，可以直观地看到3D打印成型表面微观结构表面的粗糙度在不同的特征上差异较大，如图1(b)所示，采用激光或电子束3D打印成型的工件，由肉眼可清晰观察到3D打印工件的表面纹路^[1]。

目前，应用SLM技术3D打印的零件尺寸精度为 $20 \sim 50 \mu\text{m}$ ，表面粗糙度为 $5 \sim 50 \mu\text{m}$ ^[2]。因此，由3D打印制造的零件，还需要根据具体要求进行整形、切削（磨削）、抛光或喷丸等后续处理。

如果仅考虑工件的外形几何尺寸和外表面质量，可以将3D打印完毕的工件进行数控切削加工，以获得满足要求的零件。但是，对于同时具有较高精度要求内外几何特征的零件，典型的如随形模具，则以上工艺难以实现。因此，为了同时获得3D打印高效制造的能力

与减材制造的高精度，有必要研究与开发各种形式的增减材混合制造技术。



(a) 3D打印成型表面微观示意图



(b) 3D打印表面

图1 3D打印表面质量

2. 增减材混合制造原理

增减材混合制造的工作原理是将3D打印技术与数控切削技术相结合，在同一台机床上实现加法和减法的制造。增减材混合制造一般采取将3D打印装置安装在数控切削机床上，实现工件的快速3D打印，并在同一台机床上进行数控切削加工，工件表面粗糙度可以达到纳米级，如图2所示^[3]。增减材混合制造不仅避免了原本在3D打印机床与数控切削机床转换时时工件的夹持和取放所带来的定位误差，提高制造精度与生产效率，而且也节省设备的占地面积，降低制造成本。

考虑到数控铣削加工的灵活性，切削机床多采用数控铣削机床，也有采用磨削或其他类型的机床。增减材混合制造的工作原理如图3所示。

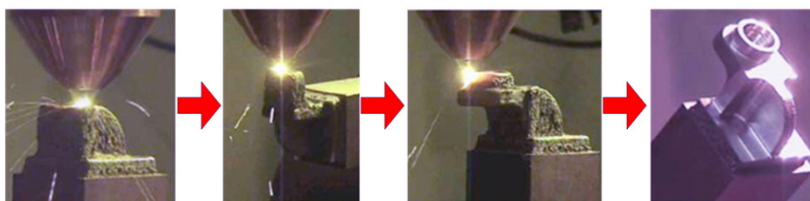


图2 5轴联动增减材混合制造

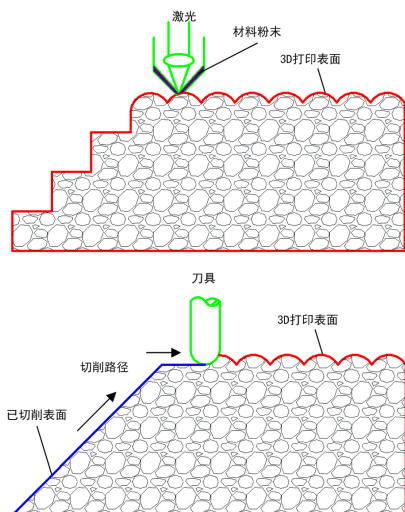


图3 增减材混合制造的工作原理

根据具体的工件要求,可以采取少层3D打印+切削、多层3D打印+切削、3D打印完毕+切削等增减材混合制造的方式。其中,少层或多层3D打印+切削的方式如图4所示^[4],主要用于制造含有复杂内外型面特征的零件,使得3D打印完毕之后难以切削的工件特征得以精密切削,获得高尺寸精度和高表面质量的全工件特征。3D打印完毕+切削等增减材混合制造的方式适合于没有复杂内外型面特征的零件制造,这一方式与3D打印完毕之后再进行切削加工类似,但是由于工件不用二次装夹,有效减少定位误差,提高制造效率和制造精度。基于目前的技术,从生产成本上看,采用少层或多层3D打印+切削的方式,在机床内反复进行3D打印造型与切削的复合加工,生产成本最高。采用3D打印完毕+切削等增减材混合制造的方式,3D打印造型后在机床内做一次性切削精加工,生产成本适中。不具备增减材混合制造机床条件下,对于精度要求一般的工件,3D打印造型后,在其他机床上做切削精加工,生产成本最低。应该指出的是,虽然各种制造方式的生产成本差异较大,但是,从制造质量上看,费用较高的制造方式,质量也比较高。

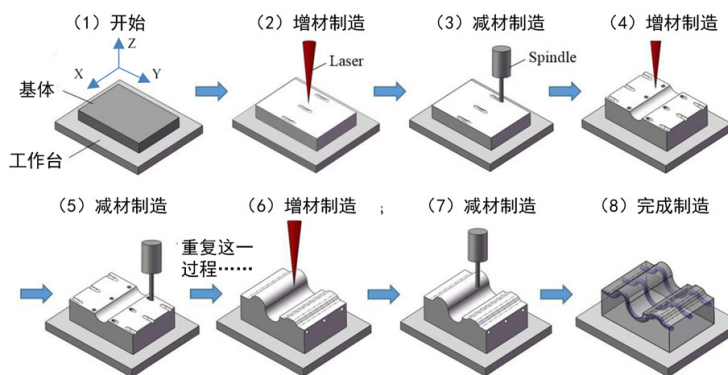


图4 少层或多层3D打印+铣削的增减材混合制造方式



图5 增减材混合制造的用途

3.增减材混合制造应用

增减材混合制造的用途非常广,理论上讲,3D打印制造的应用领域,也就是增减材混合制造的应用领域,只不过根据不同的3D打印方式制作,所采用的具体减材制造的工艺和工装会是多种多样的。采用各种不同3D打印方式制作的零件,均可以采用增减材混合制造的方式来提高尺寸精度和表面质量。以DMG-MORI公司的增减材混合机床制造为例,如图5所示,可以用作零件修复、零件加工和零件直接制造。

带有随形冷却水道的模具组件制造是增减材混合制造的一个重要应用领域。冷却水道在模具中的形状不是直线型,而是随着注塑制品的外形变化。注塑模具冷却的常用办法是在模具内开设冷却水通道,利用循环流动的冷却水带走模具的热量。传统的模具组件是采用交叉钻孔等工艺技术来制造注塑模具的冷却水路,而随形冷却水路通道是自由弯曲的,能够与注塑零件的几何形状紧密贴合,使得注塑过程中能够更加快速的带走热量,显著缩短冷却时间。带有随形冷却水路的模具组件使得注塑模具的循环时间减少10%至40%,在制造塑料部件时能够增加30%~50%的产量,大幅度降低注塑生产的成本,同时,由于采用了随形冷却水道,注塑生产的零件整体质量得以提高,并大幅度减少了翘曲变形。采用传统制造工艺,随形冷却水路难以采用和制作,采用3D打印技术,则完全没有技术障碍。

但是,单纯采用3D打印技术并不能够保证模具的质量,而且随形流道在3D打印完成之后,没有工艺可以采用以有效地进行精密加工,流道的表面质量不可控,尤其是一些细微直径尺度的流道,长时间通冷却水之后会造成流道的堵塞,有可能会提前使得模具报废。而采用增减材混合制造技术,这一问题迎刃而解,可以获得具有同样精度和表面质量的内表面和外表面,完全满足所需设计要求。

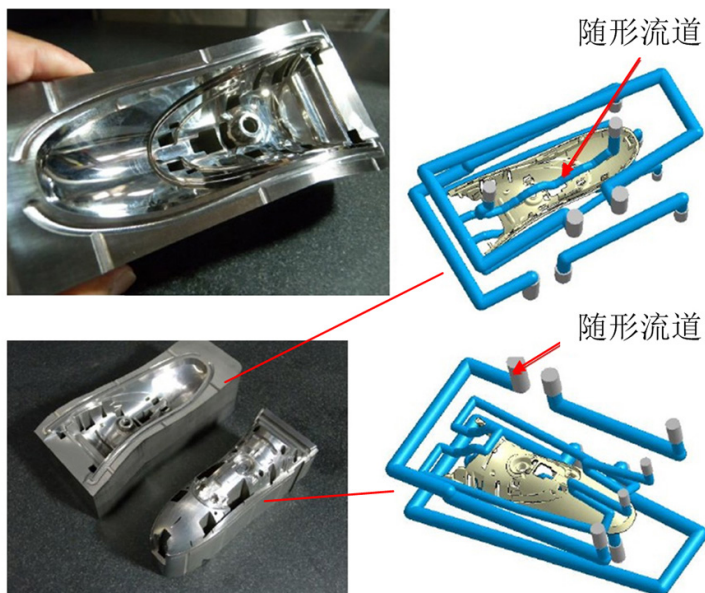


图6 增减材混合制造的带有随形冷却水路的剃须刀模具(沙迪克)



图7 增减材混合制造船用螺旋桨(荷兰Damen)

增减材混合制造的带有随形冷却水路的剃须刀模具如图6所示,应用该模具,在剃须刀零件制造过程中,冷却时间减少了36%,表面质量达到了镜面级,完全满足实用要求。

船舶用零部件制造是增减材混合制造的另外一个重要应用领域。由于船舶配套零部件批量小,较多的属于非标产品,如螺旋桨、螺旋销、箱式热交换器等,特别适合增减材混合制造。另外,采用增减材混合制造工艺,为船舶用零部件的维修服务带来极大的便利。

增减材混合制造的船用螺旋桨如图7所示,直径为1.35m,重量为400kg,材料为镍铝青铜合金,这种螺旋桨已经通过了船级社认可和批准使用。

根据3D打印方式的不同,增减材混合制造的类型有多种,主要材料有热塑

性塑料、金属、石膏、陶瓷等,材料类型主要有粉末和线材,所用造型方式有激光、电子束、热熔等。根据减材方式的不同,主要有3D打印与车削、铣削、磨削等的增减材混合制造方式^[5]。

4.结语

增减材混合制造技术将3D打印技术与数控切削技术有机的集成在一起,从原理上提高了生产效率、降低了生产成本、拓宽了产品原材料的加工范围,并有利于减少原材料消耗和切削液的使用,有利于环境保护,对于3D打印技术起着强有力的补充和提升作用,大力推动着3D打印技术在多个领域的实用化发展进程。因此,增减材混合制造具有广阔的应用前景,必将得到越来越广泛的应用。□

参考文献

- [1] K.P. Karunakaran, S. Suryakumar, V. Pushpa, S. Akula, Low cost integration of additive and subtractive processes for hybrid layer manufacturing[J], Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2010, 26: 490-499.
- [2] 王昌飞, 门正兴, 杜清泉等, 激光选区熔化成形件表面粗糙度控制[J], 大型铸锻件, 2018,6:41-43.
- [3] L. Ren, T. Sparks, J.Z. Ruan, F. Liou, Integrated process planning for a multiaxis hybrid manufacturing system[J], Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2010, 132: 1-7.
- [4] W. Du, Q. Bai, B. Zhang, A novel method for additive/subtractive hybrid manufacturing of metallic parts[J], Procedia Manufacturing, 2016, 5: 1018-1030.
- [5] 吕福顺, 熔融增材与铣削减材复合加工研究[D], 山东理工大学, 硕士论文, 2018.

DMU70E加工中心双刀链刀库的维修与调整

昌河飞机工业（集团）有限责任公司 林超青

刀库是数控加工中心的重要组成部分，由于数控机床自动换刀动作步骤多，涉及的传感器也多，过程复杂，因此容易发生故障，刀库的故障发生率较高。本文以DMU70E加工中心为例对DMG机床的双刀链刀库维修与调整方法进行一些探讨。

1. 刀库故障

DMU70E加工中心的刀库采用双刀架链式结构，有刀架1、刀架2两个链式刀架，控制系统采用欧姆龙PLC+变频器控制。

公司一台DMU70E加工中心在自动换刀过程中主轴与刀架2发生碰撞，导致刀架倾斜，刀架的刀爪损坏，刀库在后来重新换刀时，电机1、2均出现过载报警，两个刀架都无法旋转（见图1）。



图1 双刀架链式刀库

2. 故障原因分析及处理

DMU70E加工中心的刀库是双刀架链式结构，刀架1和刀架2在机

械机构上并排独立，相互没有干涉和联接，刀架1和刀架2的动作由欧姆龙PLC与NC进行通讯控制，刀架制动由变频电机控制。

DMU70E加工中心在自动换刀时主轴与刀架2碰撞后，刀架1和刀架2旋转时均出现电机过载报警，刀链无法旋转。由于刀架1、刀架2相互独立，刀架2发生撞击在机械结构上不会影响刀架1，但刀架1、刀架2同时发生电机过载报警，因此故障是刀架1、2共用部分或因素导致。根据故障现象、刀库结构及控制方式，问题可能发生在数控系统、PLC与变频驱动、机械结构上，或几方面都有问题。

（1）机床数控系统故障导致DMU70E加工中心刀库故障

DMU70E加工中心的刀库驱动主要由欧姆龙PLC+变频器控制，欧姆龙PLC与数控系统，以及驱动之间是通过数据总线进行数据传输和控制的，如果数控系统与PLC的通讯发生故障或数控系统本身发生故障，刀库动作就会发生异常，发生碰撞或故障。

DMU70E加工中心的数控系统是海德汉ITNC530系统，数控系统与欧

姆龙PLC通过profibus总线进行通讯。如果数据总线出现故障或接触不良，数据传输受到干扰，就有可能在链路上传输的数据一个或多个帧出现数据丢失或出错，导致刀库动作混乱。因此对profibus总线进行测试，结果发现，该总线正常，能够正常通讯，刀库故障不是由profibus总线导致。

该机床如果不进行刀库自动换刀而对主轴采用手动换刀，能正常运行和加工，无任何报警，因此数控系统原因导致刀库故障的可能性不大，对该机床进行数控系统GOSHT备份数据恢复也发现，备份数据恢复后开机测试，故障现象依然存在，没有发生变化，所以刀库故障由数控系统导致的可能性可以排除。

（2）欧姆龙PLC和变频器出现故障的可能性

DMU70E加工中心的刀库采用欧姆龙PLC与变频器驱动控制，如果欧姆龙PLC出现故障，就会导致刀架运动逻辑错误，定位不准，主轴与刀架发生碰撞；如果变频器输出功率下降或电机本身特性下降，则电机旋转时也会出现过载或过流。

为测试主轴与刀架碰撞以及刀架

无法旋转是否由PLC逻辑错误引起, 可以把刀架1和刀架2的驱动电机从刀架上脱开、分离, 使电机处于空载状态进行测试。电机脱开后, 对刀库进行运行测试, 测试结果发现, 两个刀库电机能够正常运转, 没有发生过载或过流报警, 但是重新把电机安装到刀架上后, 又发生过载报警, 两个刀架都无法旋转。因此刀库故障不是由PLC逻辑导致。

电机空载能够运行, 带载后出现过流报警, 可能的原因有变频器、电机故障或刀链机械磨损、卡死导致。如果变频器本身存在故障, IGBT性能下降, 内阻增大, 那么变频器能够进行逆变, 输出电流, 但是由于内阻变大, 输出电流将变小, 输出扭矩变小, 电机就无法进行正常带载。

对变频器、电机进行测试发现, 变频器、电机阻值正常, 没有发现明显的问题。为确认主轴与刀架碰撞以及刀架无法旋转是否由变频器、电机的故障或性能下降导致, 更换全新的变频器和电机进行测试。测试结果发现, 更换全新的变频器和电机后, 刀库运行过载的报警仍然没有消除, 因此主轴与刀架碰撞以及刀架无法旋转由变频器、电机的故障或性能下降导致的可能性可以排除。

(3) 刀链机械故障导致刀库运行出现过载报警

当脱开电机与气源及锁紧装置后, 刀架的刀链就处于自由状态, 手动旋转刀链应该能使刀链运动。但手动旋转刀链后, 发现刀链卡死无法运行, 因此可以认为主轴与刀架碰撞以及刀架无法旋转是由刀链卡死, 机械运动不灵活导致。

把刀架分解后发现, 刀链托架、刀链、旋转轴承、传感器等全部被油泥腻死(见图2、图3), 刀链无法正常运行。由于刀链托架、刀链、旋转轴承、传感器等被油泥腻死失效,

所以刀库刀链运转不顺畅, 刀爪定位不准确, 导致主轴与刀架碰撞, 电机运动过载。造成刀链托架、刀链、旋转轴承、传感器等被油泥腻死的原因主要是该机床为高速加工设备, 主轴最大转速24000r/min, 在这个转速下, 切削液雾化, 油雾通过缝隙发散, 然后粘附在机床表面上, 如果清理保养不当, 就会导致机械部件运转不灵活, 出现故障。

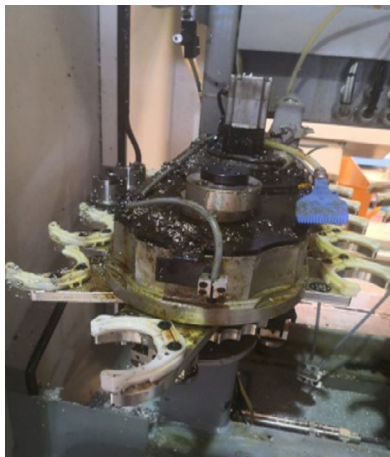


图2 刀架油泥



图3 轴承油泥

把刀链托架、刀链、旋转轴承、刀爪等机械部件用清洗浸泡, 去除油腻污垢, 并重新组装, 机械部件组装, 更换失效的传感器。机械部件及传感器安装完成后, 手动旋转刀链, 结果表明, 刀链运转灵活正常。

3.DMU70E加工中心双刀链刀库的调整

DMU70E加工中心双刀链刀库运转由欧姆龙PLC及变频驱动控制, 刀

爪位置的确定方式是每个刀架由一个零位传感器确定起始计数位置, 确定零位位置后, 电机带动刀架及刀爪旋转, 电机尾端有电机编码器, 根据电机的转数确定刀爪的具体位置。如果刀架、刀链、电机、零位传感器有拆装、分解及重新组装后, 就需要对换刀位置进行精确调整和定位, 如果位置不准确, 就会发生碰撞等问题。

DMU70E加工中心双刀链刀库换刀位置的调整分为初定位调整和精确定位调整两步。初定位调整是对刀架刀链上的刀爪与主轴换刀位置初步定位, 确定刀爪中心与主轴中心的基本坐标位置。初定位是通过调整零位传感器和刀爪的中心位置来实现的。精确定位是确定换刀时主轴与刀爪中心的精确坐标位置, 这一步是在基本换刀位置确定后, 通过移动X、Y、Z坐标, 确定精确坐标位置后修改换刀坐标位置参数来实现。

(1) DMU70E加工中心双刀链刀库换刀位置初定位调整

DMU70E加工中心刀库换刀位置初定位调整可以通过欧姆龙PLC或DMG公司的OMRON刀库(OMRON tool magazines)专用调试软件SERVICE TOOL来实现, 也可以使用欧姆龙PLC来进行调整。使用欧姆龙PLC时需要用电脑与机床上的欧姆龙PLC进行在线通讯, 读取PLC后修改参数, 使刀爪的中心位置与主轴中心位置在换刀位置的坐标基本一致。

SERVICE TOOL是DMG公司开发的一个OMRON刀库(OMRON tool magazines)专用调试软件, 界面简单友好, 不需要下载机床的PLC软件。使用SERVICE TOOL进行刀库调试时, 要首先把SERVICE TOOL软件安装到电脑上, 然后用RS232电缆与机床刀库侧的欧姆龙PLC的RS232接口进行联接。连接完成后, 启动servicetool.exe软件, 进

入调试界面后就可以进行调试了。调试界面如图4所示。

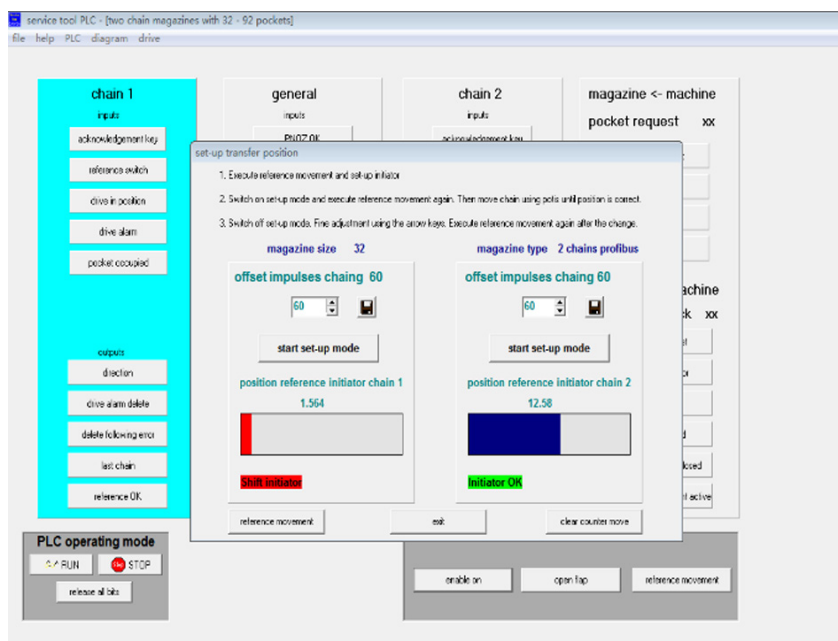


图4 SERVICE TOOL调试

选择相应的刀架后，选择换刀，使相应的刀爪定位到换刀位置，然后检查刀爪的中心位置与主轴中心位置的偏差。如果位置偏差较大就在图4界面的offsetimpuls kettle窗口框中输入相应的补偿脉冲，使电机正转或反转；然后反复测试，使刀爪的中心位置与主轴中心坐标位置基本一致，X、Y的坐标位置不能超过5mm。因为该刀库机械结构限制，主轴在换刀位置时X、Y坐标的移动和调整余量非常小，如果偏差超过一定值，主轴就会与刀库的防护罩发生碰撞。

(2) DMU70E加工中心双刀链刀库换刀位置精确定位调整

DMU70E加工中心双刀链刀库换刀坐标位置初定位完成后，下一步就要进行换刀位置的精确定位。精确定位时，把主轴移动到换刀位置，在主轴上安装一个千分表，千分表的表针压到刀柄的外圈，然后手动旋转主轴，相应的千分表指针就绕着刀柄外圈旋转（见图5），此时主轴与刀爪中心位置的偏差就反应在千分表上。

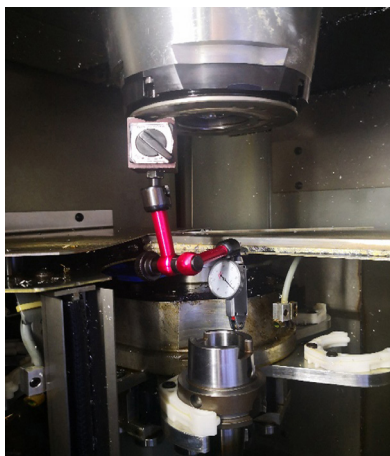


图5 千分表指针绕刀柄外圈旋转

如果主轴与刀爪中心位置的偏差过大，就要相应移动X、Y的坐标，缩小主轴与刀爪的中心位置的偏差，直到主轴与刀爪的中心位置偏差小于0.003mm，同时相应调整主轴与刀柄的换刀高度（即Z值），并把相应的X、Y、Z坐标值输入数控系统的换刀参数中（见图6），刀库换刀位置精确定位调整就完成了。

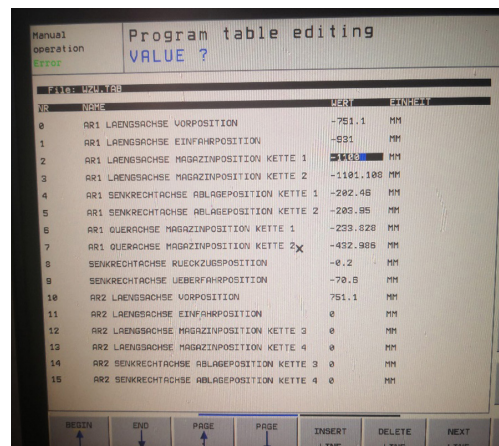


图6 数控系统换刀参数

通过刀库换刀位置初定位和精确定位后，DMU70E加工中心双刀链刀库换刀位置定位调整就全部完成，机床刀库就可以进行自动换刀测试了。

4.结束语

数控机床自动换刀动作步骤、传感器多，过程复杂，因此容易发生故障，刀库故障率较高，必须了解机床刀库的机械结构及控制方式，才能进行刀库的维修与调整，最终找到故障原因，排除故障。同时要做好日常的维护保养，降低周边环境对刀库的不利影响，保持刀库的干净整洁，才能降低刀库自动换刀的故障率，取得比较好的使用效果。□

参考文献

- [1] 周济, 周艳红. 数控加工技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- [2] 成大先. 机械设计手册-第5卷(第六版)[M]. 北京: 化学工业出版社, 2016.
- [3] 机械工程师手册编委会. 机械工程师手册(第3版)[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.

多面体偏心孔工件加工方法研究

中船重工集团公司第七二二研究所 易肖昆 徐家品 黎碧 曾建

本文通过分析多面体偏心孔工件的加工特点，从工装设计、加工步骤、切削参数、装夹与找正方式、刀具等方面着手，较为详细地介绍了接头座工件外形面上多处偏心孔及端面槽的完整制造工艺和加工方法。

偏心孔工件就是零件的外形与内孔的轴线平行而不相重合，偏一个距离的工件。这两条平行轴线之间的距离称为偏心距。在机械加工生产当中，偏心孔可谓是众多零部件加工的难点之一，随着使用要求的提高，其加工精度要求也越来越高。偏心零件在机械设备上应用非常广泛，但是偏心零件的加工工艺是比较复杂的，主要是比较难把握好偏心距，找正困难，难以达到相应的公差要求。

偏心孔工件是机械生产企业日常生产中经常遇到的生产器件，但是简单实用的偏心夹具截至目前仍然不多，因此我们有必要在工作中对偏心孔零件在普通车床上的加工方法进行研究，制造出一批操作简单、使用方便且能够加工出高精度偏心零件的加工装备。本文就普通车床加工多面体偏心孔工件——接头座的方法做了简单的阐述，以供同行工作参考。

一、接头座结构分析

图1所示工件即为我所某型拖曳天线鼓轮装置中的接头座工件。该工件有4个平面和1个30°斜面上均有

位置精度和形位公差要求高的偏心孔需要加工，且有4个面还需要加工内螺纹。各个偏心孔的内部结构较为复杂，其中4处内螺纹中心线与所在外表面的垂直度要求控制在0.04mm以内；主视图面上4个端面密封槽的位置精度和形位公差要求均比较严，不仅要求深度一致，公差范围在0~0.05mm，而且要求其槽底平面与所在外表面的平行度要求不得超出0.05mm，密封槽整个表面粗糙度Ra值也不得超出1.6μm。

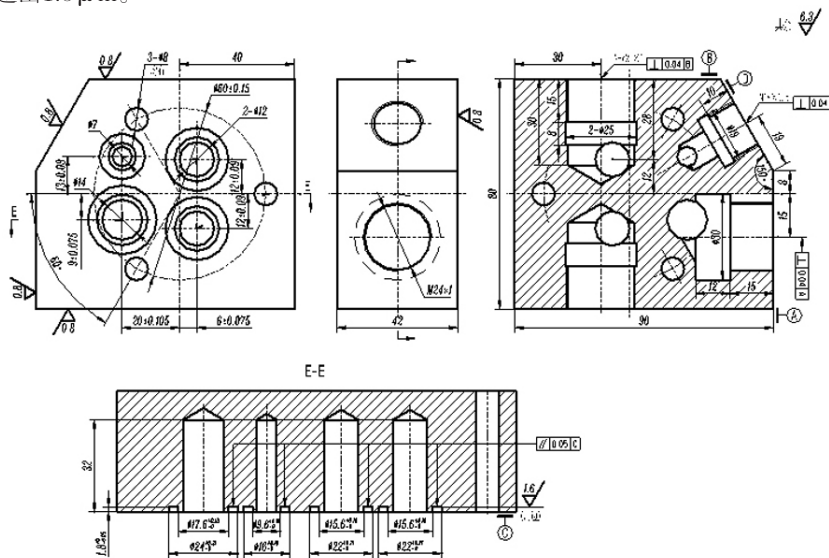


图1 接头座结构图

对于该偏心工件，传统的加工方法为：先通过刨床或铣床加工周边和平面，然后在划孔位置线上预先置放角度为30°的钻头，最后利用铣床进行加工。这种加工方法虽然在一定程度上保证了偏心零件的加工精度，但因其工作效率低、废品率高而成为制约和影响偏心零件加工的主要原因。

因此，寻求新的加工方法，高效率、高品质地完成接头座工件5个面上偏心孔的加工就成了我们目前一个亟待解决的问题。

二、工装结构和加工方法

1. 工装设计

通过对图纸分析,该零件有1个 30° 斜面上针对位置精度和形位公差要求高的偏心孔需要加工。如果采用传统方法直接用四爪卡盘夹紧的方法加工,其中有两个卡爪无法夹紧固定,加工时受切削力的作用而发生位置变化或引起振动,破坏了原来的准确定位无法保证图纸的加工要求。因此,设计并制作如图2所示的专用组合工装,使用该工装装夹,工件在夹具中可迅速而准确地定位和夹紧。

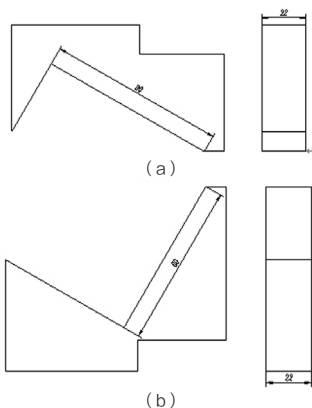


图2 组合工装示意图

在工件的平面外形加工完成后,将工件固定在组合工装的矩形内腔中,当选择普通车床进行加工时,仅需实施一次装夹并通过偏心距的调整即可完成多面偏心孔的加工。这种加工方法的应用非常简单、方便,可以根据该面多孔多偏心不同偏心距来进行调整,从而完成整个面的加工,在保证加工精度的同时也能够有效地提高加工效率。

这种工装方法的应用是利用零件的结构和四爪卡盘工作原理上,通过调整卡盘来带动偏心零件夹具进行上下移动,从而达到随时调整偏心距离的工作目的。这种工装结构的加工中,偏心距离的调整可以利用纵向标尺来进行,并且按照标有刻度的加工盘来对角度进行调整。而横向标尺主

要是用来调整偏心零件的偏心距离,并且在调整完成之后可以采用卡爪将工件进行定位固定,然后用螺母拧紧,进而开始加工。

2. 加工方法

(1) 确定加工步骤和切削参数

通过对工件结构的分析以及对加工精度和表面粗糙度的了解,结合已有的加工经验和技巧,对接头座工件各孔进行加工步骤安排(各孔加工选用的切削参数大体相同):①加工定位中心孔,利用中心钻钻定位孔;②利用钻头在车床上钻孔至深度尺寸要求, $Ra=6.3\mu m$;③利用高速工具钢磨制的专用镗刀对各螺纹底孔进行粗镗→半精镗→精镗加工。根据接头座工件材料1Cr18Ni9Ti不锈钢和刀具材料(高速工具钢)的特性,加工时,主轴转速 V 确定为 $300r/min$,粗镗进给量为 $0.12\sim 0.2mm/r$,半精镗进给量为 $0.08\sim 0.12mm/r$,精镗进给量采用 $0.03\sim 0.05mm/r$ 。

采用以上工艺方法和切削参数,加工出的内孔加工精度等级为IT7~8,加工表面粗糙度 $Ra1.6\mu m\sim 3.2\mu m$,因此完全可以达到要求。

(2) 确定装夹、找正方式

接头座工件5个面上偏心孔的车削加工主要在于装夹。只要工件在装夹时,使偏心轴的轴心线与车床主轴的回转中心重合,就可以用外圆车削法车出偏心轴。车削开始时注意车刀要远离工件启动主轴,然后刀尖从工件的最外一点逐步切入,车出偏心轴。

该工件偏心孔的偏心距大小不同、形状短而复杂,且尺寸数量较多、公差小、要求高。加工前,先按偏心工件划线的方法将工件划线,把划好线的工件装夹在四爪卡盘上,在四爪卡盘上车偏心工件,卡盘上车偏心工件划线盘;然后通过划针找正偏

心轴圆周线,也就是通过划线盘的划针找正偏心轴的圆周线,如图3所示。调整四爪卡盘四个爪的位置,直至工件转一圈,划针的轨迹与划线偏心圆的圆周重合,则偏心轴轴线与车床主轴回转中心线重合,然后通过工件外圆上的水平线校正轴线的平直度,即可加工出偏心工件。

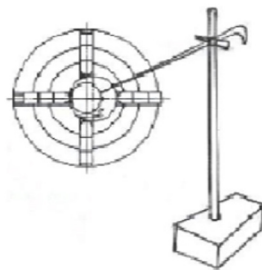


图3 划针找正示意图

(3) 端面槽的加工

端面槽刀具的选择:在端面上车直槽时,车槽刀有两个刀尖,一个刀尖相当于车内孔,另一个刀尖相当于车外圆。为了避免车刀与工件圆弧相碰,刀尖的副后刀面必须按端面槽圆弧的大小磨成圆弧形,并保证一定的副后角。端面槽刀的形状如图4所示。

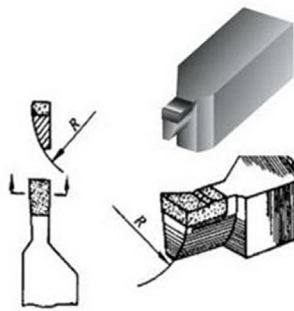


图4 端面槽刀

端面槽刀槽刀位置的控制:槽刀位置的控制方式如图5所示,若工件外圆直径为 D ,沟槽内孔直径为 d ,则刀头外侧与工件外径之间的距离 $L=D-d/2$ 。加工时,车刀轻碰工件外圆,然后使车刀向右移动离开工件 $3\sim 5mm$,接着径向移动 L 加刀宽的距离,就是槽的起始位置。

(下转第75页)

汽车发动机曲轴生产工艺探讨

上汽通用五菱汽车股份有限公司青岛分公司张文龙 黄永辉 王刚

本文介绍了当前汽车领域发动机工厂曲轴线生产工艺，介绍了曲轴的结构组成及在发动机装配过程中的重要作用，并对曲轴生产过程中重要工位工艺进行分析探讨。

曲轴是发动机最重要的部件之一，它与连杆配合将作用在活塞上的气体压力变为旋转的动力，传给底盘的传动机构；同时，驱动配气机构和其他辅助装置，如风扇、水泵、发电机等。工作时，曲轴承受连杆传来的力，并由此造成绕其本身轴线的力矩，受力大而且受力复杂，并且承受交变负荷的冲击作用。同时，曲轴又是高速旋转件，受到旋转质量的离心力，使其承受弯曲和扭转载荷。因此，为保证工作可靠，要求曲轴具有足够的刚度和强度，具有良好的承受冲击载荷的能力，各工作面要耐磨且润滑良好。

本文重在介绍曲轴生产线的工艺布局，并分析了曲轴的基本组成以及在发动机装配过程中的重要作用，最后对曲轴生产线关键工艺进行分析探讨。

1. 曲轴的构造及其作用

(1) 曲轴的构造

曲轴一般由主轴颈、连杆颈、曲拐、平衡块、油孔、芯轴端和法兰等组成，如图1所示。其中，一个连杆轴颈和两端曲拐及主轴颈构成一个曲拐（直列式发动机曲轴的曲拐数等于气缸数；V型发动机曲轴的曲拐数等于气缸数的一半）。曲轴的小头端也叫芯轴端，其中芯轴上有键槽，用于安装链轮和皮带轮，通过正时链轮与凸轮轴相连，最终控制着进排气门的开启与闭合。大头端也叫法兰端，法兰端安装飞轮，飞轮可以将做功行程中输入于曲轴的能量贮存一部分，用于克服阻力，带动曲柄连杆机构越过上/下止点，保证曲轴输出的旋转角速度和转矩尽可能均匀。

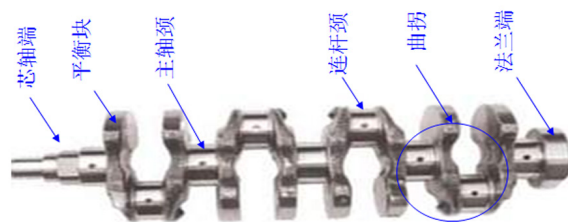


图1 曲轴结构图

(2) 曲轴在装配中的作用

主轴颈被安装到缸体上，主要用于支承曲轴。对于全支承曲轴，主轴颈数目比气缸数目多一个，即每一个连杆轴颈两边都有一个主轴颈。连杆颈与连杆大头孔进行连接，连杆小头孔与气缸活塞连接，形成一个典型的曲柄滑块机构。并将活塞的上下往复运动的转换为曲轴的旋转运动，如图2所示。

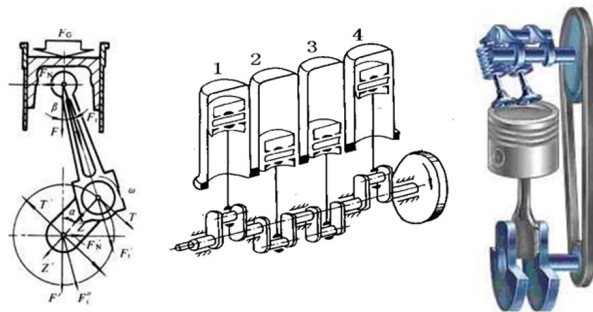


图2 曲轴装配

全支承曲轴的主轴颈数比气缸数目多一个，即每一个连杆轴颈两边都有一个主轴颈，如图3所示。如四缸发动机全支承曲轴有5个主轴颈。这种支承，曲轴的强度和刚性都比较好，并且减轻了主轴承载荷，减小了磨损。缺点是加

工面多, 主轴承增加, 使机体加长。柴油机和大部分汽油机多采用这种形式。

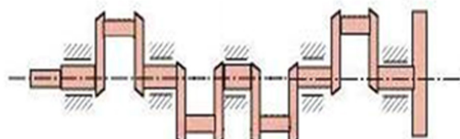


图3 全支承曲轴

非全支承曲轴的主轴颈数比气缸数目少或与气缸数目相等, 这种支承方式叫非全支承曲轴, 如图4所示, 虽然这种支承的主轴承载荷较大, 但缩短了曲轴的总长度, 使发动机的总体长度有所减小。有些汽油机, 承受载荷较小可以采用这种曲轴型式。

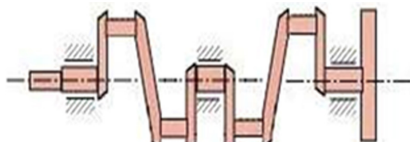


图4 非全支承曲轴

油孔与各个轴瓦相通, 发动机运转以后靠机油泵提供压力供油进行润滑、降温。直油孔分别贯穿第一至第四主轴颈。为保证充分润滑, 同时不磨损轴瓦, 要求所有油孔必须贯通, 并且油孔倒角光滑无毛刺。

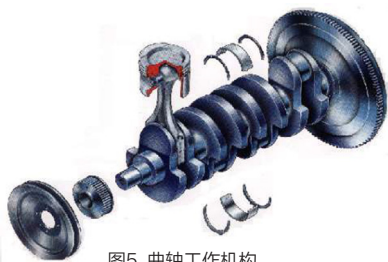


图5 曲轴工作机构

平衡块通常位于连杆颈的反方向, 用于平衡离心惯性和力矩, 使发动机平稳运转, 减小轴承载荷 (如图6所示)。同时, 还可以通过在平衡块中心钻孔的方式减小不平衡量, 保证曲轴几何中心与质量中心重合。要求所有动平衡孔必须在配重块中心, 不允许有破壁现象, 因为破壁可能导致在发动机运转过程中有薄壁铁屑脱落, 划伤轴瓦和轴颈面。

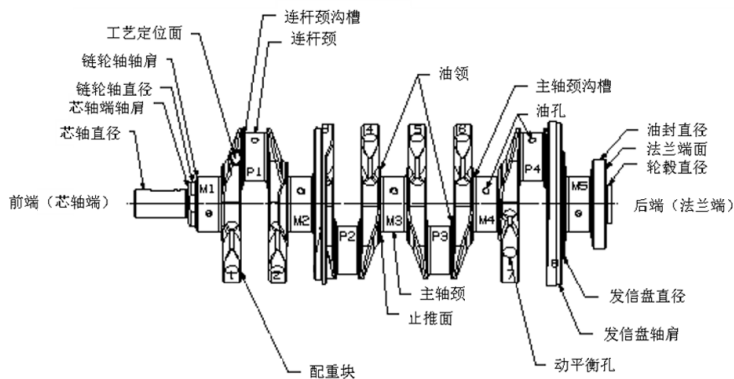


图6 曲轴全尺寸结构

2. 曲轴加工工艺分析

目前, 国内外发动机工厂曲轴生产线大部分采用国外进口大型设备进行加工, 机床种类涵盖了加工中心、车床、磨床、滚压、热处理及抛光等设备。曲轴加工工艺当前也较为成熟, 各主机工厂曲轴线生产工艺不尽相同, 但也有细微差异。下面以某发动机工厂曲轴生产线进行分析说明, 如图7所示。

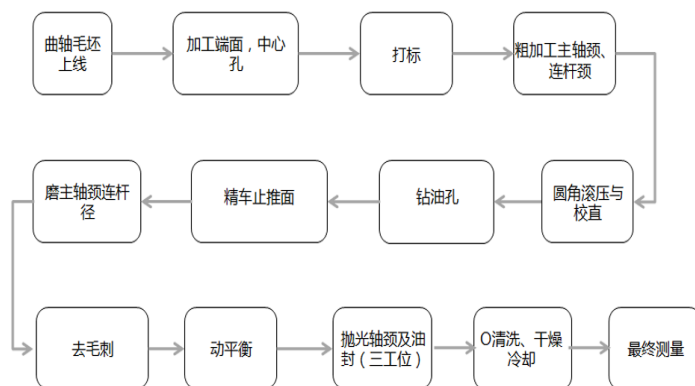


图7 曲轴加工布局

该工艺布局为典型的直排四缸发动机曲轴生产线工艺, 其优点在于工位间排布紧密, 每个工位可以实现多内容的加工。OP10-OP30工位为曲轴的粗加工工位, 主要粗加工曲轴两端面及各轴颈; OP40-OP70为半精加工, 主要是加工曲轴油孔及滚压校直; OP90-OP150为精加工工位, 通过磨削抛光来实现曲轴的加工精度及表面粗糙度。下面将针对曲轴生产工艺的几个关键工位进行分析说明。

深滚压工艺对曲轴的寿命有着重要的影响。OP40为德国Hegenscheidt的滚压较直机, 通过在曲轴旋转过程中对各个沟槽施加以一定角度和数值的力对各个轴颈进行滚压较直, 达到增加主轴颈和连杆颈圆角半径处的残余压应力和圆弧表面粗糙度的作用, 进而实现提高曲轴在交变应力下的强度。机床及加工后零件状态如图8所示。



图8 曲轴滚压机

深滚压工艺仅需要对轴颈和沟槽完成车拉或车削加工即可, 不需要进行磨削操作, 加上铸件材料, 可达到

成本低廉的组合。同时,该机床还有对各个主轴颈进行较直的作用。较直后,轴颈的跳动度减小了,可以更好地提高抗疲劳强度,并减小后续磨削余量。滚压过程示意如图9所示。

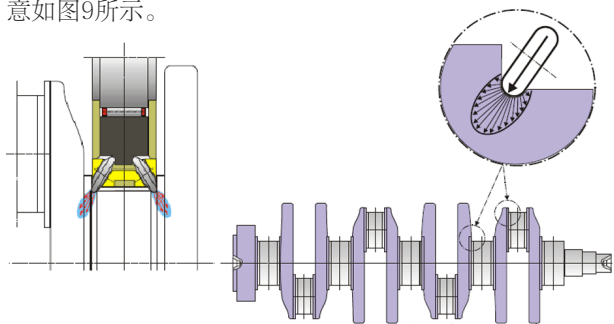


图9 曲轴滚压机工作示意图

磨削工艺是曲轴生产线的另一重要加工工位。OP80为美国Landis的磨床,共4台设备。左右两个砂轮同时对各个主轴颈和连杆颈以及芯轴进行加工,尺寸的控制同样采用机床内的测头在线测量控制。产品的轴颈直径、直线度、圆度、跳动度以及连杆颈相位角等尺寸,故对于该工位的加工过程控制比较严格,对于机床顶尖的跳动度,中

心支架的挑起度和推出度也同样有着较高的要求。

OP90为美国Landis的角磨床,共1台设备。砂轮形状如图10所示,可实现同时对油封轴颈和法兰端面进行加工。同样有Marposs对加工前的油封直径和法兰端面轴向尺寸进行测量。



图10 曲轴角磨机及角磨砂轮

3.结束语

燃油车的心脏在于发动机,而一台发动机运行稳定性的关键又在于曲轴。本文介绍的曲轴的工作原理及加工工艺,并对曲轴生产线的关键工位进行了分析探讨,与大家交流共勉。□

上接第72页

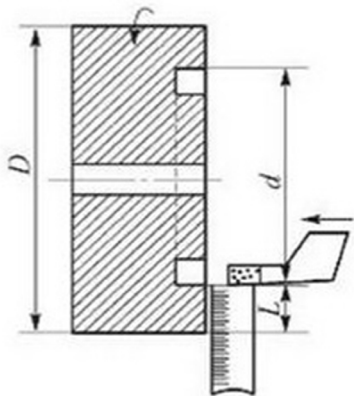


图5 槽刀位置的控制

切削加工:该工件密封槽要求较高,要求所有密封槽的深度一致,而且公差小,粗糙度要求高,因此加工难度较大。偏心车削时,切削速度不宜过高,否则粗糙度难以达到要求。加工时用中托盘来回切削,中托盘刻度较小,经多次切削才能保证尺寸。到达密封槽底部时,刀具用中托盘前后移动并停留,这样既可以保证密封槽底没有台阶,粗糙度也能达到要求。

(4) 内螺纹孔的加工

选用合适的螺纹刀:由于不锈钢在切削过程中偏心速度低、容易出现粘刀现象而产生积屑瘤,导致加工刀具磨损加速,最终影响螺纹两侧的表面粗糙度达不到要求。同时,接头座内螺纹孔径比较小,螺纹刀也只能选用小直径刀杆,而小直径刀杆刚性不够,切削时容易产生振动,当中滑板和丝杆螺母间隙增大时容易产生扎刀而导致内螺纹尺寸难以保证。根据接头座内螺纹孔径及深度尺寸要求,自制螺纹车刀。手磨螺纹刀刀杆部分,在保证加工过程中“不撞刀”的前提下尽量增加刀杆的截面积,并尽量减小刀杆的伸出长度。

切削加工:对于接头座上的小孔径内螺纹,其切削加工分“粗加工→精加工”来进行,精加工余量为单边0.15~0.2mm。粗加工时,采用低切削速度,加切削液进行切削,并减小螺纹车刀的纵向前角,通过调整中滑板和丝杆螺母间隙,左右

切削螺纹。精加工时,同样加切削液进行切削,但采用高速切削,单边切削深度控制在0.05mm,以保证螺纹的表面粗糙度。

三、结束语

通过设计制作和使用专用的组合工装,大大缩短了装夹找正时间,提高了生产加工效率;充分利用该专用组合工装完成零件装夹定位,定位精度高且夹紧可靠,还可以减少操作者的劳动强度、降低对操作者技能水平的要求。同时,通过探索新的制造工艺和加工方法,完成了接头座外形面上所有偏心孔和端面槽的加工,而且在保证加工精度的同时也有效地提高了加工效率,也为类似偏心工件的生产加工积累了相关经验。□

参考文献

[1] 戴起勋.金属材料学(第二版)[M].北京:化学工业出版社,2012.

FIDIA数控系统三种精度误差补偿功能及应用方法

昌河飞机工业（集团）有限责任公司 胡 辉

为满足加工产品精度日益提升的要求，数控机床的精度要求随之越来越高，依靠传统的机械刮研和精密装配工艺，时间成本和经济成本非常高，仅适用于少量的高精度数控机床生产，无法大面积推广。在保证数控机床基本机械精度的前提下，为提升机床整体加工精度，数控系统提供了大量的精度误差补偿功能。本文以意大利FIDIA数控系统为例，简单介绍一下三种精度误差补偿功能及应用方法。

数控机床的精度包括定位精度和几何精度，在机床的实际制造过程中，由于制造、装配技术和成本限制，无法保证机床的精度在完美的状态。随着数控系统和计算机技术的发展，数控系统提供越来越多的软件补偿功能，尽可能提升数控机床的精度。以下就以意大利FIDIA数控系统为例，简单介绍一下三种精度误差补偿功能：螺距误差补偿、垂度误差补偿以及空间误差补偿。

1. 螺距误差补偿功能

螺距误差补偿功能用来提升数控机床定位精度，一般借助激光干涉仪，测量出机床轴的实际移动位置误差，将误差值补偿入数控系统内。FIDIA数控系统的螺距误差补偿功能使用起来简单、灵活，在AXVCAL.SET文件中输入补偿坐标点以及对应的补偿值，其中补偿坐标点间隔可以根据需要灵活定义，每个点对应的补偿值包括定位误差值和反向误差值，因此该功能同时可实现双向补偿。补

偿文件AXVCAL.SET位于C:\FIDIA\CUSTOM目录下，可通过记事本或写字板打开进行编辑修改，文件具体格式及内容如下：

```
G102; 固定格式，以G102开头
G71; 公制：单位mm，如果G70，则是英制：单位inch
X0 E0.01 R0.01; X轴=0mm坐标时，定位误差补偿0.01mm，反向误差补偿0.01mm
X10 E0.02 R0.02; X轴=10mm坐标时，定位误差补偿0.02mm，反向误差补偿0.02mm
X20 E0.03 R0.03
X30 E0.04 R0.04
.....
Y0 E0.01 R0.01; 对Y轴进行补偿
Y10 E0.02 R0.02
.....
Z0 E0.04 R0.04; 对Z轴进行补偿
Z10 E0.05 R0.05
.....
G100; 固定格式，以G100结束
```

需要注意的是，每个轴的补偿坐标点数不能超过500个。编辑修改完AXVCAL.SET文件后，可以通过系统重新加载或者在SERVICE区域里面的AXIS CALIBRAT界面，点击ACTIVATE软按钮，即可立即生效该补偿文件。另外，只有在机床机械精度合格的条件下，数控系统螺距误差补偿功能才能起到很好的效果。关于激光干涉仪检测方法，与其它数控系统类似，这里就不再赘述。

2. 垂度误差补偿功能

垂度误差补偿功能用来补偿某个轴由于另外一个轴位置变化而发生的位置变化。比如一台FIDIA K199五轴立式加工中心，在Y轴向外移动时，由于Y轴自重的原因Z方向会下垂，并且伸出越长下垂越大（如图1所示），因此需要使用垂度补偿对下垂的距离进行补偿。

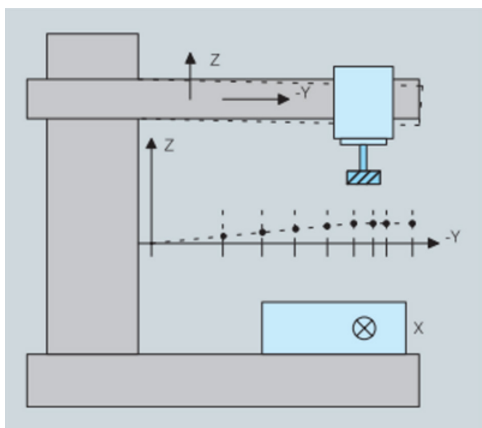


图1 垂直误差补偿原理

垂直补偿需使用百分表或千分表和大理石平尺，通过百分表或千分表测出Y轴移动时，在Z轴方向产生的误差值。同样，在AXVCAL.SET文件中输入补偿坐标点以及对应的补偿值，补偿坐标点间隔可以根据需要灵活定义，编辑修改完后补偿文件生效方法与螺距误差补偿功能一样，补偿文件具体格式及内容如下：

```
G102 Z; 固定格式，以G102开头，补偿Z轴
Y 0 E0.01; Y轴=0坐标时，Z轴坐标补偿0.01mm
Y50. E0.02; Y轴=50mm坐标时，Z轴坐标补偿0.02mm
Y100. E0.03; Y轴=100mm坐标时，Z轴坐标补偿0.03mm
.....
G100; 固定格式，以G100结束
```

3. 空间误差补偿功能

以上两个系统补偿功能只能满足基本需求。对于数控机床来说，由于几何精度误差，导致机床在空间内移动时，各轴出现水平度、直角度、倾斜度、偏摆角、滚动角、垂直度、及直线定位的误差。以一台三轴加工中心为例，会产生共21项误差（如图2所示）。针对整个数控机床加工区域的三维精度补偿，FIDIA数控系统提供空间误差补偿功能（VAC选项功能），进一步提升数控机床加工精度。

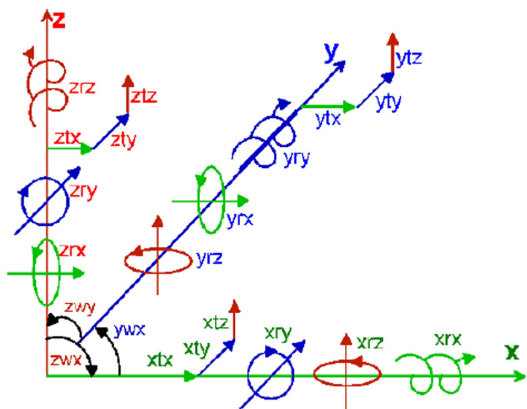


图2 三轴加工中心21项几何精度误差

几何精度误差符号标识说明表

序号	符号标识	几何精度误差类型
1	XTX	X 轴定位误差
2	XTY	X 轴直线度误差（在 Y 轴方向）
3	XTZ	X 轴直线度误差（在 Z 轴方向）
4	RRX	X 轴滚动角误差
5	RRY	X 轴倾斜度误差
6	RRZ	X 轴偏摆角误差
7	YWX	X-Y 轴垂直度误差
8	XWZ	X-Z 轴垂直度误差
9	YWZ	Y-Z 轴垂直度误差

单根轴（以X轴为例）共有6项几何精度误差（表中序号1~6项），三根轴（X，Y，Z轴）共有18项，再加上三项垂直度误差（表中序号7~9项），共有21项误差。

测量和评估出21项几何精度误差，需要借助专业激光跟踪仪（含激光干涉仪）和分析软件（如美国API、德国AFM、德国ETALON等公司产品）。以3轴机床为例（如图3所示），在测量时将机床的整个行程构成的空间分成若干个小的栅格，通过一个放置在工作台上的跟踪机构，激光跟踪仪中的激光干涉仪可以自动跟踪固定在机床主轴上刀具安装处的反射镜。

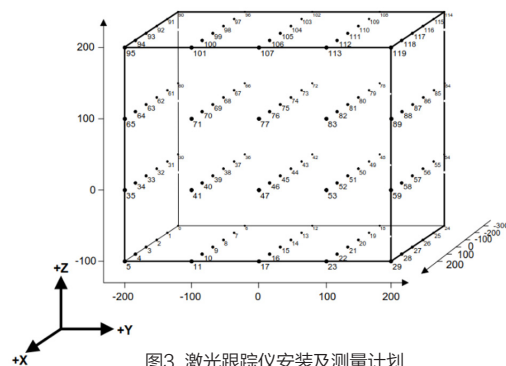
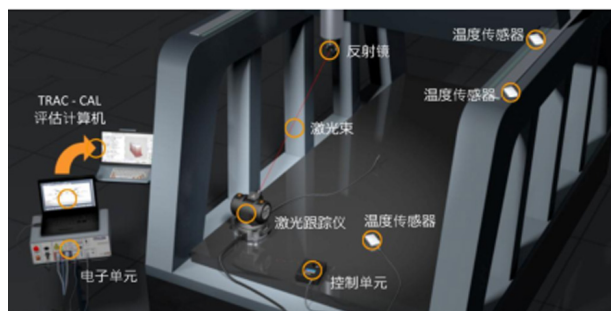


图3 激光跟踪仪安装及测量计划

当机床间歇地逐点沿空间栅格移动时，激光干涉仪自动记录栅格每一点的长度测量值。通过跟踪仪固定在数控机床工作台上的最少4个不同点（高度和位置），反射镜固定在主轴上，进行每一个固定点的多次长度测量，利用软件中的数学分析功能可以分析出机床3个直线轴所有系统误差，包括：定位误差、直线度误差、转角误差以及所

有正交轴互相之间的垂直度误差。

同样在AXVCAL.SET文件中，将补偿坐标点以及软件分析出来的几何精度误差值，分类进行补偿，G118指令：补偿定位误差及直线误差，G113指令：补偿转角误差，G114指令：补偿垂直度误差。补偿文件具体格式及内容如下：

```
G118; XTX: 补偿X轴定位误差
X0. E0.01; X轴=0mm坐标时，定位误差补偿0.01mm
X10. E0.02; X轴=10mm坐标时，定位误差补偿0.02mm
X20. E0.03
.....
G118 Z; YTZ: Y轴直线度误差（在Z轴方向）
Y0. E0.01; Y轴=0mm坐标时，Z轴误差补偿0.01mm
Y10. E0.02; Y轴=10mm坐标时，Z轴误差补偿0.02mm
.....
G113; G113指令后面不跟轴名，则说明是 XRX: X轴滚动角误差
X0. E0.001
X10. E0.002
X20. E0.003
.....
G113 Y; XRY: X轴倾斜度误差
X0. E0.001
X10. E0.002
X20. E0.003
```

.....

G113 Z; XRZ: X轴偏摆角误差

X0. E0.001

X10. E0.002

X20. E0.003

.....

G114; 补偿垂直度误差

X.000 E0.012; YWZ: Y-Z轴垂直度误差

Y.000 E0.023; XWZ: X-Z轴垂直度误差

Z.000 E0.034; XWY: X-Y轴垂直度误差

G100

空间误差补偿数据确认生效后，需再次进行空间误差测量，检测补偿后的机床精度是否满足要求。以上例子，仅仅只是针对三个线性轴进行空间精度的补偿，对于A、B、C三根旋转轴，同样存在21项几何误差，也可使用同样的方法进行检测和补偿。

4. 结束语

意大利FIDIA数控系统提供的以上三种精度误差补偿功能，可以同时使用和生效。灵活使用这些功能，尤其对于一些大型龙门或落地镗机床，机械几何精度调整难度较大，通过使用空间误差补偿功能，可大幅提升机床的整体加工精度。□

资讯

机床工具行业“十四五”规划编制工作稳步推进

2020年5月13日，机械工业“十四五”规划编制工作交流会在中机联召开，中国机床工具工业协会常务副理事长毛予锋等代表机床协会编写组参加会议。会议由中机联会长王瑞祥主持。



会上，中机联副会长陈斌详细介绍了机械工业“十四五”规划编制工

作进展情况，来自中国机床工具工业协会、中国汽车工业协会、中国工程机械工业协会、中国机器人产业联盟、中国轴承工业协会、中国内燃机工业协会、中机联科技工作部的有关同志分别介绍各专业专题规划的编制情况及主要内容。

协会行业发展工作委员会副主任委员杜智强代表机床工具协会介绍了机床工具行业“十四五”发展规划纲要编制工作进展情况、工作重点和内容要点。机床工具行业是基础性、战略性新兴产业。由于受内外部多种因素共同影响，当前机床工具中高端产品领域存在不同程度的市场机制失灵情况。同时，机床工具行业及上下游企业已由国有、民营、外资等多种经济

成分构成，市场化程度很高。因此，机床工具行业发展规划需要从市场化和产业政策两个方面协调发力。值此“十三五”收官与“十四五”将启之时，从中国国情和产业实际出发，按照目标导向和问题导向的思路，对标国际一流，找差距、补短板，提出一揽子促进机床工具行业创新发展的战略规划纲要，以期能形成行业内外的共识与合力，共同推动机床工具领域产业基础高级化和产业链现代化的工作开展和目标实现。目前，行业“十四五”规划纲要的编制工作已完成初稿讨论和修改，下一步将在行业内部进行充分的研讨和征求意见，期望在今年下半年形成定稿，并及时向行业发布。（杜智强 供稿）

智能技术驱动未来生产

——来自EMO2019的报道（上）

中国机床工具工业协会考察团组 穆东辉 姜晓钟 执笔

2019年9月16~21日，EMO2019在德国汉诺威如期举办。中国机床工具工业协会考察团组考察了德国汉诺威EMO2019展会，并成功举办了新闻发布会，还同部分国际协会组织进行了工作交流。

一、展会概况

据展会主办方统计，EMO2019展会共有来自全球44个国家和地区的2226家企业参展。展会共占据17个展馆，净展览面积达181768平方米，展品涉及当前及未来生产过程的各个要素，具体类型包括：

（1）金属切削机床、金属成形机床：车床、钻床、镗床、铣床、磨床、锯床、冲床、焊接及气体切割机床等。

（2）工具：量具、刀具、成型工具、磨具、模具及配件、工装夹具等。

（3）机床附件及零部件：数控系统、液压件、气压件、机床电器及电子设备、控制及驱动系统、润滑剂及冷却剂、废物处理设备、安全及环保设备等。

（4）检测和自动化技术及设备：测量和检测技术及设备（传感器）、图象数据处理技术、质量控制技术及软件、计算机辅助设计、集成制造系统和灵活的自动化组件、自动化设备、工业机器人、物流及仓储技术等。

（5）工业4.0相关应用技术：umati技术、NC-Link技术、工业物



联网技术、数字孪生技术、机器学习技术、人工智能（AI）、边缘计算、云计算、智能监测与诊断技术等。

（6）其他：柔性加工、安装技术、操作技术、焊接设备、热处理设

备、精密仪器、激光和水射流切割加工设备等。

随着全球新一轮工业革命如火如荼的进行，“智能制造”的理念已经渗透到各种生产过程涉及的各

个领域。机床行业对智能制造的研究持续深入,“智能制造”技术在机床领域应用的最新成果也成为近年来各大机床展览会关注的焦点。在此背景下,备受全球机械制造业瞩目的EMO2019展会将主题定为“智能技术驱动未来生产”(Smart technologies driving tomorrow's production),本届展会主办方致力于展示机床领域的新技术、IT解决方案,应对不断变化的工作环境给生产带来的挑战,突显新一代机床装备的生产能力、效率和灵活性。作为上届EMO2017主题“用于智能制造的互联系统(Connecting Systems for intelligent production)”的延伸和提升,EMO2019展会广泛展示了工业物联网(IIOT)、数字双胞胎(digital twins)、云计算、边缘计算、机器学习等新兴智能制造技术的应用,以此向参观者和用户传达智能科技在未来制造业中的重要驱动作用。

EMO2019展会致力于当前及未来生产中面临的各种技术挑战提供创新解决方案的展示和交流平台。

从展会来看,上届EMO2017展会中孕育的有关工业4.0和物联网(IoT)的理念和方案,在本届EMO2019得到了进一步的延续和发展:工业4.0概念已渗透进入机器、零部件、控制、测量系统和物料流程等各个生产要素。数字化和智能工厂联网还推动过程监控或预测性维护等新功能的发展,并与基于数据和数据分析的机器自主学习相辅相成。充分凸显了智能技术的应用对未来生产的驱动作用——不仅可以提高生产效率,还为产生新的生产组织模式、新的商业模式奠定了基础。

EMO2019展会所展现的技术特点可以归纳为:

(1)持续关注智能制造技术的

发展及其在机床上的应用。本次展会为“工业4.0”、“工业物联网”、“增材制造”分别设立展区,展示增材工艺、机器学习、人工智能、umati通讯协议及应用、NC-Link标准及接口技术、预测性维护、智能数据和数据分析等智能化新兴技术,对数字化、网络化、智能化方面的新技术与机床产品的融合予以重点关注,并通过展会予以助力推进。

(2)多轴加工技术应用和机床产品依然群星闪耀。各大展商纷纷展出具有多轴、复合加工技术的各类机床产品,展示了机床单机具有更多工序的加工能力的发展方向。应用于航空、新能源汽车、模具等不同用户领域的各种形式、规格的五轴加工中心依然是主导展品。

(3)主要机床产品和技术在追求精度和效率的方向上持续提升,围绕用户需求提升机床工艺能力、提供强大功能和方便操作依然是行业不变的追求。

(4)数控机床向着复合化、智能化的发展趋势愈发明显,围绕机床和部件精度、工艺、稳定性等主要技术性能的智能化技术研究不断深入,虚拟与仿真技术在实际生产中应用的常态化,基于网络的服务能力不断扩展。

(5)柔性、自动化、网络化、成套成线装备大量展出,高效、便捷的自动化物流装备与主机、制造系统的模块化深度集成;随着信息、通信等新技术在机床产品上应用的不断深入、扩展,制造技术即将向着智能化方向迎来深刻的变革。

下面通过对各展商典型展品的介绍,进一步分析本次展会的技术特点。EMO2019展会集中了几乎所有的世界一流机床装备企业参与,特别是得天独厚的地域优势,使得欧洲众多的优秀机床制造企业广泛参展,优

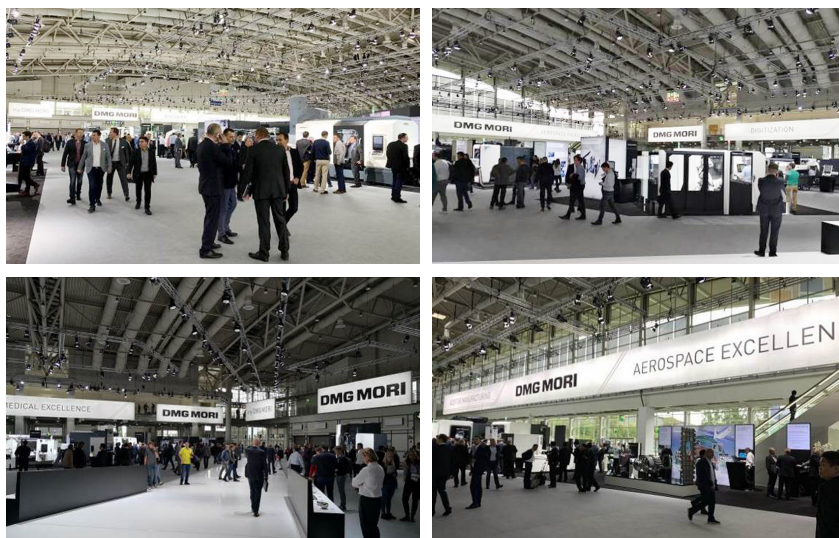
秀的产品和技术众多。由于篇幅所限,本文从主要机床集团、主要机床产品、主要技术应用、系统、附件等其他产品四个方面介绍参展情况。

一、主要机床集团参展情况

为了在全球市场竞争中保持领先地位,以欧洲、日本、美国等机床产业发达地区为主的主要企业几经整合、重组,逐渐形成了一批国际化的机床集团。本文选取部分主要的机床集团参展情况进行介绍,这些企业集团具有较强综合实力,而且展位面积较大、展品多,一直致力于成为全球机床行业创新发展的领导者。产品、技术一般都横跨多个领域,产品种类多、规格全,技术创新能力强,经常在全球主要机床展览会上推出了大量的创新产品和创新技术,既是全球机床市场关注的重点,也是机床展览会的主要看点。

1. 德马吉 森精机(DMG MORI)

德马吉 森精机(DMG MORI)是由德国德马吉(DMG)公司和日本森精机公司(MORI)两家著名的机床制造商整合而成,产品种类涵盖了车、铣、磨、超声波、激光、增材制造等,在五轴加工、复合加工、自动化、数字化等技术领域都有领先的技术应用,全球14个生产工厂、100多个销售和服务中心,为79个国家42个行业的10万多客户提供服务。DMG MORI致力于成为制造业可持续发展的全球创新者,在航空航天、汽车、模具和医疗等主要领域建立卓越技术中心,从客户项目开发的初期便参与研发,注重于完整的工艺解决方案,为客户提供合适的刀具、工装夹具和自动化解决方案,确保打造卓越的生产系统。



在本次展会上，DMG MORI依然以盛大的规模占据了整个2号展馆，共展示了包括车铣磨复合加工中心、铣车复合加工中心、五轴加工中心、卧式加工中心、LASERTEC 65 3D hybrid 送粉式金属增材复合加工中心等共45台机床产品，为此次展会最大规模的展商。DMG MORI此次展会主要突出展示自动化系统、综合数字化解决方案、增材制造最新技术以及卓越技术中心四个方面的成果，全面展示其为未来生产全新开发的开创性技术，DMG MORI卓越技术中心主要在航空航天、汽车、模具和医疗器械重点行业开展技术应用研究。

下面就对DMG MORI的展示的主要产品和新技术进行介绍：

(1) 全面数字化、网络化平台

DMG MORI在这次展会最重要的主题就是“互联互通”，这也是对本届展会主题的一个呼应。互联互通是数字化和自动化的基本要求，也是面向未来产品和技术发展的基础，这包括了全部机床、信息交换协议、数据平台和产品作业的互联互通。DMG MORI共展出30多款数字化创新产品展品，主要包括最新版CELOS、自动化解决方案、模块式和基于机器人支持的工件运送以及托盘解决方案，以及全新客户门户网站 my DMG MORI。DMG MORI互联互通模块为客户提供安全的网络连接环境，不仅适用于机床产品，对于选择了该解决方案的第三方机床也适用。在EMO展会上亮相的全部45台机床都为网络化机床，自EMO2019展会起，DMG MORI机床将全部标配互联互通解决方案而且免费提供给用户。

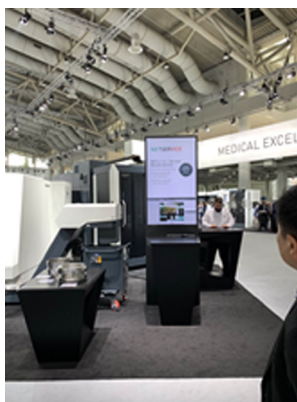
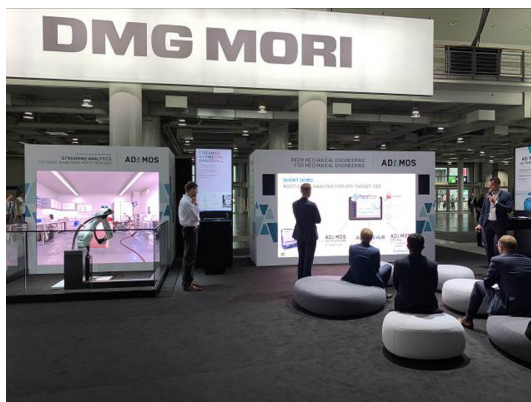


2019版的CELOS提供两大主要创新。借助全新应用连接器，客户可直接在配CELOS系统的机床上使用自己的应用程序，例如ERP和MES系统，甚至

自己的数控系统和生产数据管理系统。也可以访问互联网或内联网信息。例如，机床操作员直接访问内联网，立即查看换班和假期计划或有关有害物信息及重要链接。共可设置多达20个与CELOS系统的连接，将每一个连接设置为一个独立的“APP应用程序”。



DMG MORI2013年推出了基于APP应用程序的CELOS操作系统，提供11款APP应用程序，主要用于简化机床操作。此后不断增加APP应用程序的功能，每年增加大约50项新功能，显著增强CELOS的功能，2019年已首次可开放地集成定制系统。CELOS客户还能独立于PLC，执行CELOS更新，将CELOS更新到2019版，安全地迁移数据并全面提供PLC支持的功能。监测状态的新版DMG MORI在线显示系统现在为第三方软件提供接口，用于在生产中通过DMG MORI互联互通解决方案接入网络中的全部机床和设备。此外，在机床上现场演示DMG MORI NETservice，直接为客户提供远程协助，缩短停机时间。



DMG MORI的互联互通是数字化工厂的核心特点之一，模块化“智能工厂”持续的将整个生产过程数字化，从生产计划和任务准备到实际生产和监测及服务。只有开放式的界面接口和标准化的信息交换协议才能确保机床与工艺间进行面向未来的端到端集成工作和互操作。DMG MORI将通过新款CELOS App应用程序来体现全面的互联互通。如全新的“应用程序连接器（APPLICATION CONNECTOR）”App允许直接在CELOS内操作全部基于网页的应用程序。所以当需要连接客户的专有程序时，可直接与其MES或ERP系统互动。全新“任务导入（JOB IMPORT）”功能可直接将MES或ERP系统中的任务单导入到“CELOS任务管理器（CELOS JOB MANAGER）”中。为此，未来DMG MORI将在不产生任何附加费用的条件下，做到所有新机床符合“互联互通”的要求。全新IIoT接口支持MQTT标准和MTconnect协议，也支持基于OPC UA的newumati（通用型机床接口）子标准。

全新的数字化客户网站myDMG MORI以客户利益最大化为核心。DMG MORI通过构建这一平台，把“综合性数字化”、“质量第一”和“客户至上”的理念融合在一起。目标是将此平台打造成为

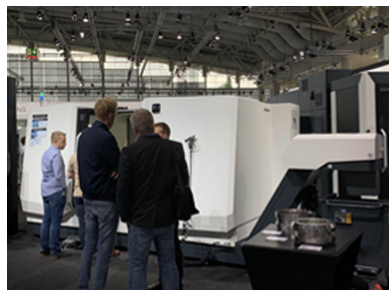
DMG MORI与其客户之间互动合作的专属门户网站。同时可提供现场照片或视频，而“跟踪和追踪”功能确保全部服务过程与流程透明。即使是备件订单，其跟踪精度能达到分钟级。

总之，DMG MORI正在将自己定位于端到端的数字化和自动化合作伙伴。

（2）机床产品和技术

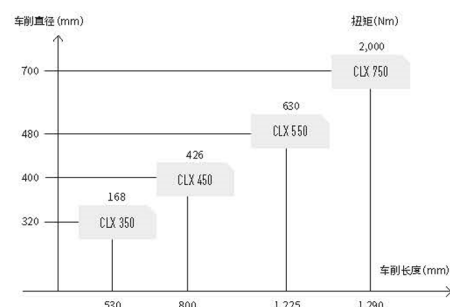
作为持续创新的领先代表，DMG MORI在此次展会上推出了多款全球首秀产品和技术，还有大量新产品、新应用，为用户提供了更多更好的服务选项。

①CLX 750万能车削中心：



DMG MORI在EMO2019全球首发了全新的CLX 750万能车削中心，该产品主推2000 N·m大扭矩和最大工件重量达600 kg的大规格优势，其实CLX 750是DMG MORI在CLX万能车削中心系列产品向大规格的一个延伸产品。因此CLX 750基于模块化设计理念，秉承了CLX系列的结构、精度和性能优势，扩展了车削加工范围，满足更多的用户需求。

模块化 –
DMG MORI高性能的CLX系列机床



CLX 750万能车削中心的主要技术指标和配置：

工件直径 $\leq 700\text{ mm}$ ，长度 $\leq 1290\text{ mm}$ ；卡盘尺寸 $\leq 500\text{ mm}$ ，棒料直径 $\leq 127\text{ mm}$ ；主轴转速 $\leq 2000\text{ r/min}$ ，主轴扭矩 $\leq 2000\text{ N}\cdot\text{m}$ ，额定驱动功率(100% DC) $\leq 37\text{ kW(AC)}$ ；12位VDI50刀塔； $\pm 80\text{ mm}$ 的Y轴，可实现偏心加工；中心架允许的直径 $\leq 430\text{ mm}$ 。

机床配副主轴和Y轴，可完整地加工复杂工件。电主轴的副主轴ISM 76功率达32 kW，扭矩达360 N·m和最高转速达4000 r/min，允许背面加工；Y轴运动行程达 $\pm 80\text{ mm}$ ，超高铣削性能，例如完整地加工横向表面，提高加工精度和工艺可靠性。



在配置上，新增了标配高可靠性的MAGNETSCALE直接测量系统，确保更高准确性和精确性。同时配置特有的DMG MORI技术循

环,如Multi-threading 2.0;标配DMG MORI IoT connector,满足数字化和互联的生产工艺要求;特有的19" SLIMline触控控制面板配西门子或发那科数控系统,预装DMG MORI NETservice和在线显示系统,VERTICO风格设计的标准自动化和量身定制的自动化解决方案等。

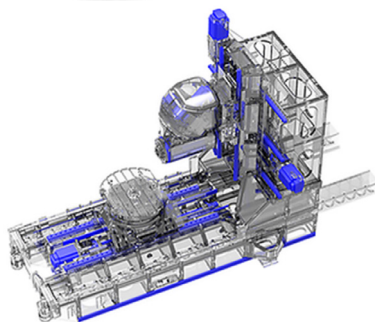
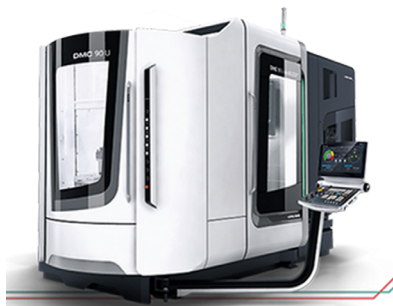
②DMC 90 U duoBLOCK五轴万能加工中心:



DMG MORI的另一款全球首秀的机床产品是DMC 90 U duoBLOCK五轴万能加工中心,重点推出了市场、服务方面的一系列的优惠措施,主要包括价格优惠、压缩交货期到<5个月,同时明确机床配置的speedMASTER主轴(20000r/min)的保修期为36个月。

DMC 90 U duoBLOCK 五轴万能加工中心是DMG MORI的第四代DMC duoBLOCK系列中规格最小的产品,为大量零件的加工应用提供优越的加工条件,从航空航天领域的难切削材料到模具制造的最高表面质量零件。与同系列的DMC 80 U duoBLOCK相比,该机床的主要规格、结构是一样的,但是DMC 80 U相当于本系列 $\phi 800\text{mm}$ (630mm宽)工作台的基础型,DMC 90 U的配置选项相对固定,配置选项很少。比如DMC 80 U标配的主轴转速是15000r/min,可以选配30000r/min,而DMC 90 U只有20000r/min的标配;DMC 80 U刀库最多可以安装363把刀,DMC 90 U刀库配置是180个刀

位。总的来说,DMG MORI针对重点用户需求,通过集中DMC 90 U机床的配置选项,保持该系列五轴机床核心性能的前提下,缩短交付周期,降低成本,为用户提供更好的服务。



DMC 90 U duoBLOCK 五轴万能加工中心采用高刚性、高稳定性的duoBLOCK结构,B轴和C轴采用大直径的YRT轴承,标配内冷滚珠丝杠 $\phi 50\text{mm}$ 、55 mm宽幅直线导轨,工作台承重高达1400 kg。采用高性能电主轴speedMASTER主轴最高转速20000r/min,最大扭矩达430N·m,功率达52 kW,粗加工套件提高切削能力达50%。为了提高机床精度,采用全面水冷的进给驱动、SGS主轴热膨胀传感器,补偿主轴热膨胀,增强机床的热刚度,实现机床位置精度达 $4\mu\text{m}$ 、进给速度达60m/min的高动态性能、高精度的工件加工能力。

该机床配备完善的DMG MORI技术循环,通过标准化的操作循环、测量循环、加工循环、监测循环,对话式编程最大限度减少错误,缩短编程时间达60%,指导用户正确、高效使

用机床,充分发挥5轴联动加工解决方案的效能。

③inlineMASTER电主轴(36个月质保期承诺):

除了展示整机产品和整套自动化解决方案,DMG MORI还展示很多新技术和新的技术服务。



DMG MORI在此次展会上推出了最新的inlineMASTER电主轴,并对该主轴系做出了36个月的质保期且无工作时间限制的质保期承诺,这充分反映了DMG MORI对MASTER系列电主轴产品质量和精度稳定性的信心。

inlineMASTER电主轴配置在DMG MORI的CMX V系列立式加工中心和CMX U系列五轴加工中心产品上,从EMO 2019展会开始交付。在主要参数上可选配转速12000r/min、扭矩83N·m、功率13 kW或转速15000r/min、扭矩121N·m功率20 kW两种。

MASTER系列电主轴是DMG MORI的自制部件,是机床的核心部件。DMG MORI介绍,从主轴的精度、刚度、热变形、动载荷等方面做了优化和提升,不仅性能优异,而且质量稳定,失效率低于1%。这样的产品性能和质量保证政策对于抓住用户的关键需求非常重要,对市场支撑作用非常强。

DMG MORI展示了磨削加工技术在车削、铣削机床上的复合加工应用。

多轴、复合加工技术一直是DMG MORI产品发展的一个主要特征，在拥有完整五轴车铣、铣车复合加工机床产品线的基础上，DMG MORI一直在研究将磨削工艺与车削、铣削工艺融合，形成完整的复合加工能力，最大限度地提升单台机床的工艺能力。



DMG MORI可以把磨削技术分别与车削中心和铣削中心进行结合，采用对话式编程的砂轮修磨和磨削循环程序，适用于内圆、外圆、平面磨削以及端面磨削，同时具有在机测量、声发射传感器、冷却过滤、安全保护等功能，实现更准确的形状和更高表面质量。根据相关材料介绍，在车削中心上进行磨削加工，可实现 $1\mu\text{m}$ 圆度、表面质量 $Ra0.1\mu\text{m}$ ；在铣削加工中心上，可实现 $5\mu\text{m}$ 圆度、表面质量 $Ra0.4\mu\text{m}$ 。

应用以上磨削工艺的车削中心主要包括CTX TC系列和NTX 2000 / 2500 / 3000系列，配西门子数控系统。具有使用平行砂轮、斜边砂轮或杯形砂轮的修磨和加工循环，可以进行外圆柱和内圆柱磨削和平面磨削，新增磨削偏心、椭圆、多边形功能。

应用以上磨削工艺的车削中心主要包括monoBLOCK、duoBLOCK和Portal系列加工中心。具有平面和圆柱面磨削修磨和加工循环，自动更换砂轮，最大直径达400 mm；可配备固定点式或动力式砂轮修整器，含床身声发射检测（AE）；配光学测头，可测量直径并可用刀库换测头，提供安全速度监测功能。

在EMO2019展会上，同时展示了一台DMC 80 FD duoBLOCK车铣磨复合加工中心，下面一并简要介绍一下。

④DMC 80 FD duoBLOCK车铣磨复合加工中心：

DMC 80 FD duoBLOCK车铣磨复合加工中心在五轴铣床的基础上将铣削和车削技术统一到一台机床上，同时可以复合磨削技术，非常重要的是通过大功率直驱转台实现了功能扩展，转台可以达到1200r/min转速，扭矩最大达6200N，具有广泛的应用范围。机床采用duoBLOCK结构并保持了高刚度、高稳定性的特点，用直接驱动技术和电子动平衡循环技术在一次夹紧中进行车/铣削，通过车/铣削复合工作台和标配的数控B轴实现5轴联动铣削，A轴的5X torque MASTER扭矩高达1100N·m，配备快速立式链式刀库、液压卡盘等。



DMG MORI不仅拥有将磨削与车、铣工艺复合的技术，其旗下的TAIYO KOKI（太阳工机）公司也是立式磨床的专业制造商，这次展会上也推出了展品和相关介绍。

⑤CVG系列数控多功能立式磨床：



CVG系列数控多功能立式磨床是TAIYO KOKI系列磨床产品中功能配置较为丰富的，同时兼顾了高精度的特点。现场展出的应该是该系列中规格最小的CVG6产品，该机床具有高精度、多功能和易操作性，标准化的自动托盘交换系统（APC）进一步提高该系列磨床的生产能力，缩短非磨削时间和显著提升效率。机床为了实现高精度磨削加工，X轴配直线光栅尺（Z轴选配）进行闭环控制，可配置内圆、外圆和端面测头。同时，砂轮主轴可选配B轴功能，标配为转塔有3个分度位置 $0^\circ/22.5^\circ/180^\circ$ ，选配连续分度的转塔，最小分度单位 0.0001° ，内圆主轴的回转范围为 $\pm 30^\circ$ ，外圆主轴的回转范围为 $\pm 45^\circ$ ；工作台主轴可选配C轴，选配直驱电机的驱动回转，实现连续分度功能和最小分度单位 0.0001° ，提供连续圆锥以及任意曲面磨削的能力，例如端面弧齿和凸轮等复杂结构。

（3）自动化解决方案

DMG MORI在展出的大量机床、自动化装备基础上，重点突出其自动化系统的全套解决方案给用户提供的附加值。DMG MORI发挥在市场竞争中的比较优势，从设备、工艺、自动化物流、信息连接和处理等方面进行系统设计和交付具有全面的能力，其于2017年成立了DMG MORI HEITEC公司专门从事提供自动化解决方案业务。DMG MORI在此次展会有29台机床配备了整套自动化解决方案，其丰富多样的自动化物流系统得到充分展示，其中包括WH系列、GX系列和RPS系列等。在展出的众多自动化解决方案中，一大亮点展示是DMU 65 monoBLOCK立式加工中心配备全新的PH-AGV50（自动引导车），AGV50是一款独立的托盘自动化交换系统。这

套新解决方案提供灵活的自动化系统布局,作业时可自由接近机床,并配备传感器提供人机协作的智能安全系统。整个物流系统采用模块化布局,与机床完美衔接,可以无限地接近机床。



AGV 50配机床托盘、零点夹紧系统或物料托盘,可以运输500mm×500mm(150kg)托盘,最大工件尺寸:840×500mm(600kg)。托盘库搁架可以自选数量和位置,也可临时存放,缩短换盘时间。配备的回转式安装站可自由定位。整套系统采用DMG MORI MCC-LPS IV计算机控制系统进行管理。

此外,WH3 Cell大容量自动化系统、WH FLEX模块化自动化系统、RPS回转托盘库系统、Robo2Go机器人自动化系统等解决方案也纷纷进行了展示。

(4) 增材制造:开放的工艺链

DMG MORI在增材制造(3D打印)领域拥有粉床(铺粉)式和喷粉式增材制造技术及产品,喷粉式增减材机床已经多次展示。LASERTEC SLM系列粉床式增材制造机床适用于高效生产复杂工件,高精度的选择性激光熔融技术可成形传统方式无法实现的复杂几何结构,该系列包括成功的第二代LASERTEC 30 SLM(成形区300mm×300mm×300mm)、LASERTEC 12 SLM(光斑直径仅35μm)。re PLUG粉料模块允许快速换粉,换粉时间只需不超过2小

时。OPTOMET软件自动计算全部工艺参数,只需数天时间而非数月,并可自由地计算层厚,因此可实现更快、更高效的成形加工。

喷粉式增材制造机床主要用于大型工件,工件尺寸可达Φ500×400mm,重量可达600kg。EMO2019展会上DMG MORI展出了LASERTEC 65 3D hybrid增减材五轴复合机床,将激光堆焊技术与五轴联动加工技术全部集中在一台机床上,激光头位于主轴箱中,提供更大的堆焊体积和更高增材性能。同时,由同轴喷嘴进行5轴激光堆焊,均匀地分配粉料,与激光堆焊方向无关。该复合技术可成形极其复杂的几何结构工件并达到成品质量,也可使用多种材质加工。该机床配有系列监测和校准传感器,用热成像摄像头观察整个加工区,自适应工艺控制功能和持续监测加工距离,可有效提高工艺可靠性并进一步提高增材制造工件质量。DMG MORI提供原型件、小批量工件、维修和喷涂专用的增材制造解决方案,同时带有自动化概念的模具修复技术。



Siemens NX软件融合的CAD/CAM-增材与减材加工的编程模块,提供完整工艺链的软件包(设计,增材制造,减材加工,精加工),全面集成PLM软件,缩短上市时间。

独有的LASERTEC堆焊技术--全集成的CAD/CAM软件,包括避免

碰撞的机床和运动的3D仿真,“增材制造评估器”直观地用数字化的3D模型和时间顺序显示相关工艺参数(例如熔池大小,粉流),粉料送粉速度传感器和自动化的粉料校准,完成冷却效果更好的内冷道工件制造。

2. 哈挺(HARDINGE)

美国哈挺(HARDINGE)公司诞生于1890年,是一个在世界机床工具行业中居主导地位的供应商,特别是在精密加工领域拥有雄厚的技术实力。HARDINGE公司的高精度、高可靠性的金属切削机床及相关的工具附件,在世界市场上赢得了100余年的声誉。哈挺公司通过不断并购精密机床领域的知名企业,规模和产品种类快速发展,已成为在欧亚地区拥有多家企业的跨国公司。这些公司或品牌主要包括:哈挺(HARDINGE)、克林伯格(KELLENBERGER)、桥堡(Bridgeport)、福马德(Voumard)、豪泽(HAUSER)、钟思敏(Jones & Shipman)、TRIPET、丘丁(TSCHUDIN)、优萨克(Usach)等。

哈挺公司的产品主要包括精密车床、立式和卧式加工中心、各种磨削机床。百余年来,哈挺以精密车削技术、硬车技术的独特的优势占领了美国 and 欧洲的中小型超精密车削加工的市场。2004年收购了英国的桥堡(Bridgeport),扩展了哈挺公司的加工中心产品线。

2014年年底,随着哈挺公司旗下的瑞士磨削专家克林伯格集团在对瑞士Voumard磨床公司的收购,并将其久经考验的内孔磨削技术融合在了自己全面的产品范围内,现在哈挺磨床集团的技术范围更加广泛了,从钟思敏(Jones & Shipman)磨床到克林伯格(Kellenberger)、福马德(Voumard)的高精度内外圆磨

床、豪泽（Hauser）的精密坐标磨床、Tschudin和USACH的模块化专机解决方案。现在哈挺磨床集团可以交付适合几乎各种磨削要求的产品，包括通用磨床、系统化解决方案和大批量生产用专机解决方案。

哈挺公司在本次EMO展览会上展出了车床、加工中心、磨床三类产品，虽然展览规模不是很大，但展出的产品还是非常有特色。

其中车床展出了T51和TALENT GT42产品，这也是哈挺的两款重点产品，曾连续三年被美国通用汽车（GM）授予质量、价格、服务最佳供应商。



（1）T51高精度车削中心和TALENT GT42双主轴数控车床

T51高精度车削中心是哈挺公司主推的重点产品，在展会是多次展出，在此就不再展开详细介绍了。但作为代表哈挺公司卓越车削技术的两个特征：高精度和硬车削，还是值得关注的。根据哈挺公司的介绍，其T系列数控车床产品传承了SUPER-PRECISION[®]超精密车削及硬车削技术，高精度的C轴主轴结构，主轴功率20kW，转速 $\leq 5000\text{r/min}$ ，主轴跳动 $\leq 0.001\text{mm}$ ；X轴定位精度可达 $2\mu\text{m}$ ，加工精度最高可以达到圆度 $0.25\mu\text{m}$ 、圆柱度 $0.5\mu\text{m}$ ；进行硬车削的工件硬度达到65HRC。T51机床采用 45° 斜床身的布局形式，保证良好的精度、刚度、热稳定性以及良好的排屑等需要。CNC数控系统配置FANUC 31i，配备MARPOSS对刀仪，可配备12刀位的BMT-55动力刀塔。



哈挺还展示了一台TALENT GT42紧凑型双主轴数控车床，哈挺的TALENT系列数控车床是被设计用于多种不同类型的工件夹持系统，在紧凑的设计中提供更好的特性组合，从而实现精确性、灵活性和耐用性。其独特的可直接使用夹头的主轴和副主轴设计提高了零件精度，并改善了表面光洁度。

（2）BRIDGEPORT V1320立式加工中心

哈挺展出的Bridgeport V1320立式加工中心是一款新产品，是在其Bridgeport V系列立式加工中心系列基础上向更大规格的扩展产品。

Bridgeport V1320的工作台尺寸是 $1400\text{mm} \times 600\text{mm}$ ，对系列中Bridgeport V1000工作台的 $1200\text{mm} \times 600\text{mm}$ 进行了扩展。该产品定位于航空航天、汽车、能源等市场领域。机床采用一体式铸铁床身、重型直线导轨和滚珠丝杆，Y轴上采用双 $\phi 40\text{mm}$ 滚珠丝杆结构，有效提升进给系统刚性，改善加工表面质量和精度，降低振动，增加刀具使用寿命。机床采用主轴转速 12000r/min ，采用Big Plus、40锥度结构，同时主轴轴承布局角接触球轴承和滚柱轴承组合，具有优异的热稳定性、径向刚度和高精度，可具有900 kgf的强力切削性能。



（3）KELLENBERGER 1000和KELLENBERGER 100高精度磨床

哈挺公司收购的瑞士克林贝格、丘丁（TSCHUDIN）、钟思敏（Jones & Shipman）都是外圆磨床领域具有悠久历史和先进技术的企业，包括福马德（Voumard）也有深厚的外圆磨削技术。通过持续的努力，哈挺公司的磨床产品线已经重新梳理，并推向市场。在此次EMO2019展会上，哈挺再次展示了KELLENBERGER 1000和KELLENBERGER 100两款高精度外圆磨床，产品源于瑞士克林贝格公司的数控万能磨床（CNC UNIVERSAL GRINDING MACHINE）。其中，KELLENBERGER 1000是克林贝格卓越磨削技术水平的代表产品，也

是具有成熟技术的产品。该系列磨床的中心高为200/250/300mm，顶尖距为1000/1600mm，各导轨采用静压技术，砂轮架回转B轴采用闭式静压轴承，实现高精度的磨削要求。头架可配置标准型、卡盘型和直驱型，头架轴承采用高精度滚子轴承，卡磨工件圆度为 $0.4\mu\text{m}$ ，可选配 $0.2\mu\text{m}$ ，C轴直接驱动，配海德汉圆光栅。

B轴转塔结构的砂轮架具有多种形式的磨头配置方案，包括通用型、对角型、前后排列型和批量生产型，B轴为力矩电机直驱，分辨率达到 0.00001° ，可无变形锁紧，砂轮自动测量系统测量并存储砂轮尺寸。内圆磨头采用高频电主轴，转速最高60000r/min。

机床采用海德汉GRINDplus 640或FANUC 31i数控系统，X轴和C轴插补可实现非圆磨削/螺纹磨削/坐标磨削/沟槽磨削，X轴和Z轴插补可实现锥度磨削/轮廓磨削/砂轮修整，X轴、Z轴、B轴插补可实现带B轴的轮廓磨削和随动功能的成型轮廓磨削，同时静压导轨的使用确保800mm长度上直线性 0.0015mm ，1200mm长度上直线性 0.002mm 。



KELLENBERGER 100也是带有B轴转塔砂轮架结构的高精度外圆磨床，相比较KELLENBERGER 1000产品定位于高性能和经济性，是哈挺磨床产品系列中的“经济型”产品。但是KELLENBERGER 100保留了KELLENBERGER 1000的主要规格和主要结构，因此其主要加工精度和加工能力都保持了最高水平。

KELLENBERGER 100的中心高是200mm，顶尖距包括600mm和1000mm两个规格，覆盖了外圆磨削的主要市场需求。作为万能磨床的核心，其B轴转塔砂轮架提供了10种内外圆砂轮主轴的布局选项，B轴分辨率 0.00002° ，工件头架、尾架也保留了高精度的结构和指标，保障了机床的总体精度水平，其中工件磨削圆度为 $0.4\mu\text{m}$ ，可选择提高到 $0.2\mu\text{m}$ 。机床的导轨是这个新机型变化较大的部分，X轴横向进给导轨采用了直线导轨结构，Z轴纵向导轨采用了滑动导轨结构，两个方向的进给的分辨率都可以达到 $0.1\mu\text{m}$ 。

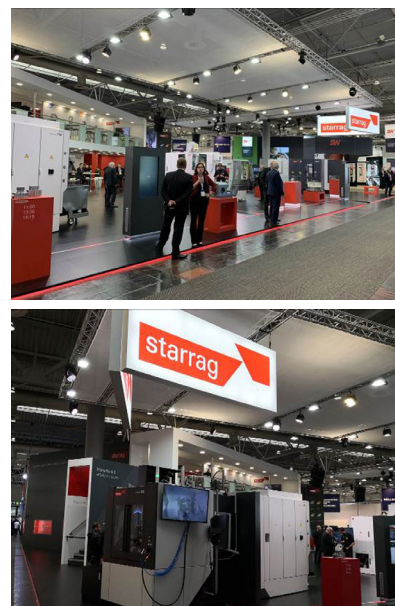
3. 斯达拉格 (Starrag)

斯达拉格 (Starrag) 集团是制造高精度机床的全球技术领导者，产品主要用于对金属、复合材料及陶瓷材料工件进行铣削、车削、镗削和磨削加工。主要客户分布在航空航天、能源、运输、医疗和其他工业领域。除了机床系列，斯达拉格集团还提供集成的技术和维护服务，显著提高了客户生产率。

斯达拉格 (Starrag) 集团是高端制造领域的一支重要力量。斯达拉格在瑞士的历史可追溯到1897年，从上个世纪末开始陆续并购了德国的Heckert公司、Dorries Scharmann公司等世界知名品牌，旗下拥有Starrag (四轴或五轴加工中心、专用叶片加工设备)、Heckert (卧式加工中心)、SIP (高精精密坐

标镗床)、Dörries (立式车床)、Droop + Rein (龙门加工中心)、Scharmann (卧式加工中心、镗铣床)、Berthiez (车床和磨床)、Ecospeed (航空用龙门铣床)等一系列的知名品牌和产品。

经过不断整合，产品以斯达拉格品牌进行销售，并保留这些制造业知名品牌的产品标签。斯达拉格集团总部位于瑞士罗尔沙赫，在瑞士、德国、法国、英国和印度设有生产基地，同时在全世界许多地方建立了销售和服务网络。



在EMO2019展会上，斯特拉格主要展出了涵盖航空航天、交通运输、精密机械等多个领域的产品系列，专注于提供全方位及个性化的交钥匙解决方案。下面对主要展品作简要介绍：

(1) Starrag NB 151五轴整体叶盘加工中心

在EMO2019展会上，斯特拉格主要展出了涵盖航空航天、交通运输、精密机械等多个领域的产品系列，专注于提供全方位及个性化的交钥匙解决方案。下面对主要展品作简要介绍：

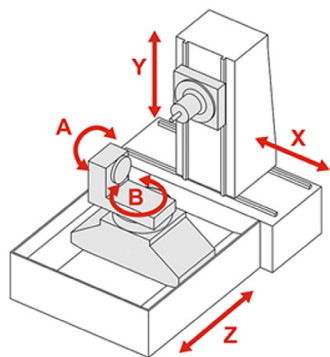
(1) Starrag NB 151五轴整体

叶盘加工中心

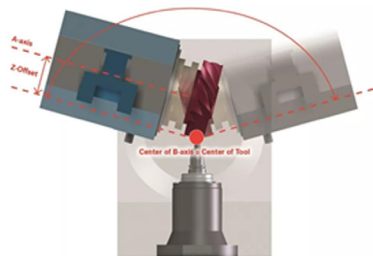
斯达拉格NB 151五轴整体叶盘加工中心是2019年推出的新产品，NB系列基于斯达拉格成熟的LX系列在涡轮叶片高精度、高效的5轴加工的技术基础，延伸了在五轴加工机床结构、CAM系统和专用刀具的专业理念和技术，在一次装夹中快速、可靠地加工叶盘和叶轮，可以达到省时又经济的目的。机床针对航空航天和能源领域，尤其适合钛合金、高温合金以及不锈钢叶轮、叶盘的加工。斯达拉格为所有必要的加工操作提供了行业基准：毛坯件的高效粗加工、摩擦焊叶盘的自适应加工、翼型的点接触高动态精加工，提供全面稳定的工艺解决方案。Starrag NB 151在展会上展示了钛合金、高温合金和叶片钢的加工过程。



斯达拉格NB 151是NB系列中最小规格的机型，可以加工零件的回转直径最大为600 mm、高度290mm，重量最大300 kg。



NB 151的机床布局设计无疑是该产品的一大亮点，是专门针对叶盘零件的结构特征和工艺需求而开发的。斯达拉格最大程度优化了直驱转台旋转轴在多叶片应用场合中的性能，采用A、B摇篮转台竖立布局，叶盘零件装卡在A轴转台上，由A、B、Z轴完成工件三个自由度运动，与主轴的X、Y两轴直线运动共同完成五轴加工。其布局经过精心设计，加工区域在B轴回转中心附近，将直线轴的补偿运动降至最低。采用五轴联动加工叶盘的一个关键因素是工件的可接近性，NB 151的B轴摆动范围为300°，A轴也极其紧凑，为加工过程提供了开阔的工作区域。同时，优化的机床轮廓不仅有效避免了与主轴的碰撞，而且能够极大地减少刀具悬伸，提高工艺系统刚性，保障了切削稳定性，保证了最短的粗加工时间和精加工的完美表面质量。



同时值得关注的是NB 151机床的主轴箱体结构布局借鉴了海科特小型卧式加工中心的成熟经验，主轴采用水平布局，高刚性的箱体结构和运动分配保障了机床的刚性、抗振性和

灵活性。采用矿物铸件床身，具有极佳的减振性能和超高刚性，加上紧凑型的设计以及主轴和夹具的智能定位功能大幅提高了进刀能力。极佳的刚性和抗振性可实现更高切削能力，降低刀具磨损。斯达拉格的高质量电主轴也确保了高去除率，电主轴功率28 kW、181 N·m，最高转速18000r/min，主轴锥孔HSK-A63。直线轴最大速度62 m/min，定位精度6 μm，重复定位精度2.4 μm；转台回转轴定位精度6 角秒，重复定位精度4 角秒。



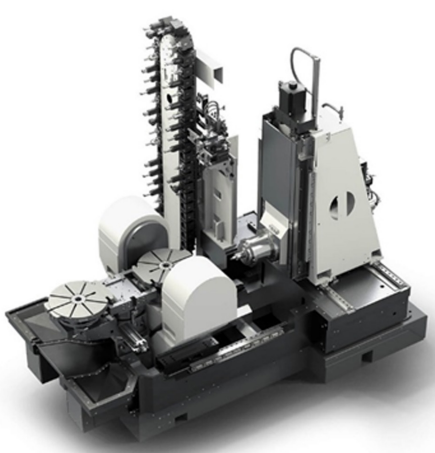
同时，集成的传感器和检测系统针对机床的各种要素，例如主轴，将对其振动、变形和温度波动持续监测，进行相应的自动补偿，以确保机床精度和工艺稳定性，可以有效缩短加工时间。

NB 151的套测量装置与专用软件系统配合，实现叶盘的自适应加工。可以实现自动测量毛坯上的每一个涡轮叶片，并自动生成叶片几何模型，进而生成对应的数控程序并在机床上执行。机床基于对加工零件形状特征对动态特性参数进行预调整，确保了摩擦焊叶片和轮毂间的完美过渡，保障了五轴高速加工的轮廓度。

(2) Heckert T45五轴卧式加工中心

Heckert T45是斯达拉格近两年推出的卧式加工中心新产品，产品开发主要基于卧式五轴加工和紧凑型的概念。其关键设计是将摇篮转台、交换工作台紧密集成到机床上，使机床具有从铣削和车削到齿轮铣削等复

杂工序的加工能力。T45将在大型HEC中心得到验证的A轴系统移植到紧凑型机床上，同时B轴转台最高转速达到900r/min、工作台回转直径 $\phi 500\text{mm}$ ，可以轻松掌握高质量的车削操作。



Heckert T45的X、Y、Z轴行程分别为700mm、750mm、750mm，快速进给速度80m/min，加速度分别为 8 m/s^2 、 11 m/s^2 、 8 m/s^2 ，屑-屑换刀时间（Chip-to-chip time）3.8s，交换工作台更换时间12.5s。机床主轴采用高刚性HSK-T100锥柄，保障高高效的切削性能。

在EMO2019展会上，Heckert T45展示了针对行星齿轮架的多种工艺特征，所提供的高效并节省空间的加工方案。

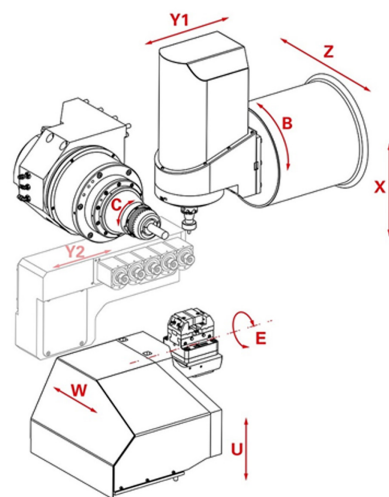
斯达拉格这次展会上还展示了宝美s181五轴车铣复合加工中心、Sprint Z3并联主轴头等产品及应用方案，以下仅做简要介绍。

（3）Bumotec s181五轴车铣复合加工中心

斯达拉格展示了Bumotec s181 与Scanflash ESPI联合现场直播加工全过程，在Bumotec s181车铣复合加工中心上进行脊柱手术专用的椎弓根钩的加工演示，同时通过Scanflash进行实时监控。



监测是生产力提高的必要环节。虽然Bumotec产品以其出色的生产稳定性而闻名，但同时监控生产零件的精度仍是必要的。ESPI开发了用于在线生产监控的Scanflash产品，可直接将校正数值传送回机床，可自动对生产参数或刀具校正进行即时调整而不会中断生产。



Bumotec s181以前曾经在国内展出过，其精巧高超的设计和高品质制造反映了瑞士精密加工技术的创新水平。机床有两组工位，上面一组工位具有五轴铣车复合功能，主动力头主轴转速30000r/min（选配40000r/min）；下面一组工位具有四轴控制的铣削功能，有5个铣削刀具主轴，主轴转速8000r/min；两组工位可以同时分别工作，也可以协同工作。机床配备高可用性的自动刀库，刀库容量30/60/90可选配，换刀时间1.1s；配备自动化的棒料库，棒料最大直径32mm。机床选用矿物质床身，部分坐标轴采用直线电机驱动，保证了不受影响的热稳定性和性能。直线轴快速进给速度40m/min，加速度为 8 m/s^2 ，分辨率为 $0.0125\mu\text{m}$ ；车铣工件主轴C轴和主动力主轴B轴的分辨率为 0.0001° 。

Bumotec s181适用于手表、手术器械、医疗植入物和复杂的微型机械部件等精密制造领域。

（4）Sprint Z3并联摆头

Sprint Z3并联摆头是一款明星产品，其创新结构应用在斯达拉格Ecospeed系列高速卧式加工中心产品上，用于航空航天等重点领域不同规格工件的加工，特别适合加工铝合金壁板类结构件。Sprint Z3采用 120° 均布的三个直线伺服轴与连杆

机构配合，通过运动合成形成虚拟回转轴的效果，与机床的三个直线轴的运动协同，完成对复杂结构的五轴联动加工。由于结构和运动原理上的优势，在机床加工的实际应用上带来快速移动、高加速度、主轴结构优化、明显缩短辅助时间等优点。



4. 马扎克 (MAZAK)

2019年适逢马扎克 (MAZAK) 公司成立百年诞辰，马扎克以公司有史以来规模最大的展台出现在EMO Hannover上。马扎克公司拥有完整的机床产品线，包括复合加工机床、数控车削中心、立式和卧式加工中心、数控激光切割机、柔性制造系统 (FMS)、CAD/CAM产品和工厂管理软件。

马扎克在EMO 2019的展览主题为“用Mazak发现更多 (discover more with Mazak)”，展出了其有史以来数量最多的机床和自动化解决方案。展品主要包括27台机床产品 (比EMO 2017多2台)、新一代MAZATROL Smooth Ai CNC系统、MAZA CARE 4.0、CAM软件等产品和15个集成自动化解决方案。在展会上，马扎克为Integrax i-H 系列、CV5-500紧凑型五轴立式加工中心、VARIAXIS C-600五轴立式加工中心、Integrax

e-1250V/8 AG 等7台机床进行全球首发、2台欧洲首发。



马扎克将3000平米的展台分为七个独立的展区——Integrax多任务、混合加工、五轴、激光、垂直加工、车削和水平加工，所有27台机床在展会期间都将进行现场切削演示。马扎克展台还展示了工业4.0解决方案，包括Mazak iSMART Factory、MAZATROL TWINS和SMOOTH技术等。与EMO2019展会主题相呼应，马扎克将综合自动化作为一个展示的重点。马扎克针对不同加工场景展示了多种不同的解决方案，包括AUTO FLEX CELL、PALLETECH和多托盘池 (MPP)、龙门装载机和AWC自动工作转换器。此外，Mazak machines还展示了与一些第三方自动化供应商集成，包括机器维护和棒料输送解决方案。



下面介绍一下马扎克公司的主要产品：

(1) MAZATROL SmoothAi CNC系统



马扎克最新版的MAZATROL SmoothAi CNC系统在EMO 2019首次亮相，并在机床产品上安装展示。马扎克MAZATROL数控系统的研发继续针对提升机床的速度、精度、操作方便、加工性能，同时强化了产品的网络化、智能化功能。Smooth Ai CNC采用图形用户界面增强功能、可选的第二显示器和操作面板增强功能，用来支撑新的Smooth技术解决方案，包括：Smooth Ai主轴、Solid MAZATROL 和Ai热补偿，SmoothAi CNC还将包括Smooth CAM Ai、MAZATROL TWINS和Smooth项目管理等新产品。Smooth Ai控制以自动化为理念，还包括人工智能驱动的加工功能、Smooth机器人单元控制器和Smooth机器人教学辅助，这将使将广泛的数字技术集成到零件生产操作中，支持物联网时代的智能化平台需求，实现智能化工厂变得比以往任何时候都更容易。

MAZATROL SmoothAi数控技术和相关软件包提供强大的数字增强功能，借助人工智能、机器学习和先进的数据管理技术，在整个加工过

程中提高效率和价值。MAZATROL SmoothAi集成了多种高级编程功能,使其能够提供完全的易用性,并确保高速、高精度的加工性能。主要包括以下功能:

①Solid MAZATROL功能利用3D CAD数据和人工智能增强的加工工艺选择,提供优化的MAZATROL程序。

②SMOOTH Ai主轴功能运用Ai技术,通过自动主轴振动检测功能优化切削条件和表面质量。

③Ai Thermal Shield功能通过机器学习增强的热位移补偿确保稳定的加工精度。

④MAZATROL TWINS提供完整的机器模拟,使程序员能够访问其办公室中的虚拟机。

⑤SMOOTH CAM Ai使操作人员能够模拟和分析多台机器的数据,并实时优化加工参数。

⑥SMOOTH Robot Cell Controller简化了编程,并使用带有专用管理软件的机器人进行高混合/低批量生产。

⑦SMOOTH Project Manager允许用户在整个制造设施(包括使用MAZATROL TWINS创建的虚拟机)中同步与加工程序相关的数据。



人体工程学在这个控制的功能中也扮演着重要的角色。一个19英寸的大显示屏在一个页面上显示所有关键机器数据,而倾斜控制面板允许根据操作员高度进行最佳定位。对于附加功能,可选的第二个屏幕可以提供来自SMOOTH Ai主轴、SMOOTH PMC和SMOOTH RCC的数据。一个直观的多触摸屏,使快速和顺利的编程操作。SD卡允许CNC存储高达32GB的数据。

(2) Integrex e-1250V/8 AG复合加工中心



马扎克的多任务复合加工中心是其产品的一大特色。马扎克也许是在多任务复合加工领域研究最为深入、产品最多的公司,“Done-in-One”的加工理念不断的体现在新产品研发当中,还将激光加工、焊接、增材制造工艺等不断复合进来,将多任务处理推向了一个全新的水平。

马扎克的 Integrex AG 系列将多任务加工中心已有的车、铣、钻、镗等工艺与滚齿、铣齿、刮齿、去毛刺等工艺集成,具有齿轮在机测量(Renishaw)功能的一体式加工。因此,这种工艺集成实现了高精度的齿轮加工和缩短加工时间。

马扎克在EMO2019展会上展出了Integrex e-1250V/8 AG多任务复合加工中心,这是与JIMTOF2018日本展会上展出的Integrex e-1250V/8s AG机床的同系列产品,在加工范围、产品配置上略有差异。该产品将五轴铣削、强大的车削和托盘更换与平滑齿轮切削软件包相结合,可高效加工直径达1450mm、高度为1600mm的复杂零件和齿轮,可以实现ISO5~8级精度齿轮批量生产。

人体工程学在这个控制的功能中也扮演着重要的角色。一个19英寸的大显示屏在一个页面上显示所有关键机器数据,而倾斜控制面板允许根据操作员高度进行最佳定位。对于附加功能,可选的第二个屏幕可以提供来自SMOOTH Ai主轴、SMOOTH PMC和SMOOTH RCC的数据。一个直观的多触摸屏,使快速和顺利的编程操作。SD卡允许CNC存储高达32GB的数据。

该机床采用10000r/min、37kW铣削主轴,B轴摆动范围为-30°~120°,可精确进行5轴操作。其500r/min、40kW直驱C轴转台可在重型切割操作中实现高精度旋转。还提供高速和高扭矩铣削主轴规格,因此该机器能够成功满足涉及钛、铝和钢等材料的广泛应用要求。机床配置齿轮加工专用软件,采用会话式齿轮加工编程方式,根据输入的齿轮数据,自动生成切削路径。SMOOTH GEAR Check也采用会话式编程,实现齿轮在机自动检测。机床可以实现包括内外直齿轮、斜齿轮、花键的加工和检测。

马扎克在这次EMO2019展出了很多专门针对欧洲市场开发的新产品，一方面是由于展览会的地域因素，另一方面也是其重视欧洲市场开发，充分发挥其在欧洲多个研发机构的作用，提升整个产品线的技术水平。目前，欧洲市场占马扎克全球销售额的30%以上，目前是其最大、表现最好的市场。马扎克对于欧洲市场专注于交钥匙的自动化、入门级机床（如新的 CV5-500）和人工智能，在展会上吸引了用户的关注。

（3）CV5-500紧凑型五轴立式加工中心

CV5-500五轴立式加工中心完全是马扎克欧洲制造厂设计和制造的，专门为从事或渴望从事五轴加工的用户设计和制造的。该产品的开发重点关注精度、极其紧凑的加工解决方案和极具竞争力的价格。



CV5-500具有高刚性立柱结构和完全支撑的摇篮转台，配备了一个新的通用主轴，转速为12000r/min（可选配18000r/min），能够达到18.5kW和119.4N·m的峰值性能，适合各种材料零件的加工。机床占地面积小，非常适合小型的加工车间，而且还可以通过侧门和机器人接口衔接，轻松实现自动上下料。CV5-500配备了SmoothX数控系统，配备了马扎克专业5轴版的SMOOTH技术软件包。

在EMO2019展会上，马扎克还同时推出了增加Y轴行程的Integrex i-200H 和Integrex i-450H系列铣车复合机床、VARIAXIS C-600五轴立式加工中心，这些机床都配置了马扎克最新的MAZATROL SmoothAi CNC系统。

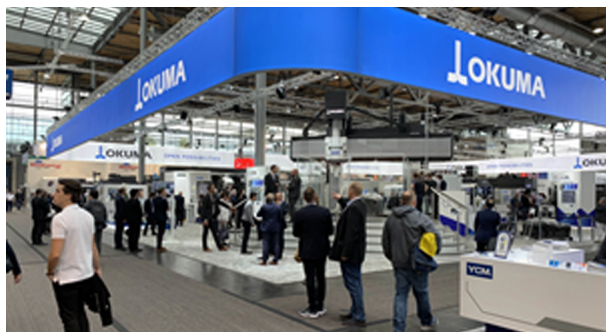
5. 大隈（OKUMA）

大隈（OKUMA）是一家全球知名的日本机床制造商，至今已有120多年的历史。其产品主要包括数控车床、加工中心、多任务机床、数控磨床、数控系统、工厂自动化（FA）产品、伺服电机和其他通用机械，以刚性好、效率高、精度稳定、寿命长、操作方便而著称，而自动化、数字化、网络化和加工领域的融合创新也成为大隈新的产品发展方向。

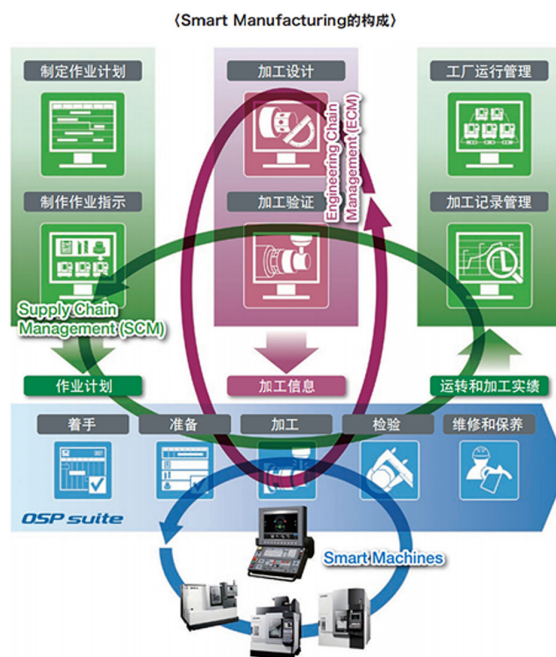
在EMO2019展会上，大隈在1500平方米的展位上，展出了最新的20台套高品质的数控机床和自动化解决方案，其中13个产品为欧洲首秀。大隈展示了机床、数控系

统、机器人、智能技术等产品丰富的新技术组合，使参观者可以体验最新的机床设计理念、控制技术、自动化技术和工业4.0 解决方案。

概括起来看，大隈的展示内容主要包括：智能工厂技术应用、最新的数控机床产品和模具制造领域的应用、自动化解决方案的最新研究成果三个方面。由于很多展品、技术和理念在近两年的各大展会上已经展出过，下面的介绍对这些内容就不再展开复述了，重点介绍一些新产品、新技术、新进展。



（1）智能工厂技术应用



在EMO展会上，大隈展示了可视化智能工厂方案，通过将现场每一台机床的数据连接到Connect Plan，来举例说明工业4.0应用如何改进加工工艺。Connect Plan的可视化仪表板界面上可以显示每台机床的状态信息，还能提供操作历史记录、报警历史记录和维护计划等重要信息。这些信息可供进行深入的数据分析，从而全面优化制造流程，还支持预测性维护。同时，也支持制造商将数据上传到 Okuma 云、使用第三方软件分析数据、提供自动电子邮件通知等其他功能。

大隈不仅可以提供自有技术的OSP-suite数控系统、Connect Plan系统、CAM、数控机床等软硬件产品，还有智能工厂的整体流程规划、连接和生产分析解决方案。大隈从2013年开始已经陆续建设了三个基于物联网（IOT）技术的“梦工厂”，进一步扩展了智能工厂的知识（know-how）。其智能工厂概念依赖于最新的技术应用实践，结合了大数据、人工智能和智能生产流程等新技术的发展。大隈对于统一数据模型及其在所有流程中的应用有着深刻的理解和成功的实践，其虚拟监视器直接依赖于3D实体数据模型，从实际加工发生之前就开始引入并应用。大隈也充分发挥其拥有自主数控系统及软件的优势，最新的OSP-P300A数控系统可以实现共享数据库可确保提高效率。使用户能够避免不必要的输入，并且设置时间被缩短。大隈的Connect Plan系统将每台机床的制造数据和的测量结果通过唯一的ID进行标识，对制造数据进行精准管理，从而能够以更高的质量和安全性进行生产。过程数据还可用于预测性维护，以便规划和预测维护间隔。这些智能工厂解决方案与 Okuma 机床相结合，具有巨大的附加值，是迈向全面自动化的重要一步。



大隈在EMO2019上展示了近两年研制的20台最新的数控机床产品，包括其在模具制造领域的解决方案，这些是这次展会的主要展示内容。机床产品主要包括MULTUS U3000、4000智能化复合加工中心、GENOS

L3000E和LU7000EX卧式数控车床、MU-6300V LASER EX复合加工中心、MA-600H II 卧式加工中心、MB 5000H II 卧式加工中心、GI-20N II 数控内圆磨床等。



很多机型在近几年展会上都有展示，就不做介绍了，下面介绍几款特色产品。

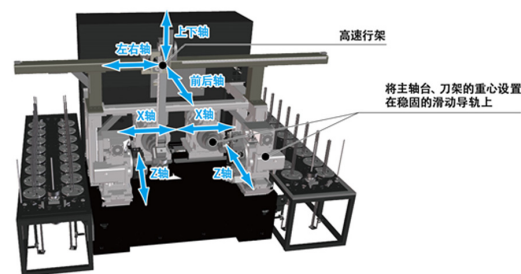
（2）2SP-2500H卧式并列主轴数控车床

此次展出的2SP-2500H卧式并列主轴数控车床是一款结构布局很有特色的新产品，机床将强力加工和高速工件装卸结合，最大化的缩短工作时间。机床创新的采用了前向双工件主轴的结构，同时分别配有两套刀塔，具有车、铣功能，

组成了机床加工单元的核心布局。在外围两侧分别配置两套料仓和高速桁架式机械手，实现两套主轴加工零件的自动上下料功能。在大规模生产中可以提供高水平的生产能力，特别是汽车盘类零件。



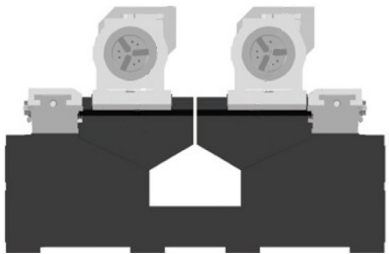
2SP-2500H相当于将两台车床集成为一个制造单元，用于连续的高效加工。两套高速上下料装置使长期稳定的无人值守生产成为可能。由于机床的独特的结构布局设计，两套主轴前面空间可以方便机械手进行操作，而不受刀塔位置的影响。工件装卸时间缩短至4s，实现了生产节拍最小化。



机床还将主轴箱体、刀架的重心设置在滑动导轨上，保持移动部件运动稳定，机床构造适合批量加工，可实现强力且高精度的加工。

采用大隈独有的“热亲和”（Thermo-Friendly Concept）智能化技术，即使长时间连续运转、批量加工，仍能保持高水平的尺寸精度稳定性。机床的床身集中了两套车床的箱体结构，虽然增加了结构刚性，但考虑到多个振源的因素，采用独有的分割结构。通过分割左右箱体，抑制切削时的振动传递，最大限度地阻断

振动耦合效应，可以有效提升加工零件的表面质量。



旋转刀具主轴功率为7.1kW，比原有机型扭矩增大1.25倍，铣削加工能力升级至65cm³/min，支持铣削加工的工序集约。采用内置式电机驱动，实现高速、高精度。

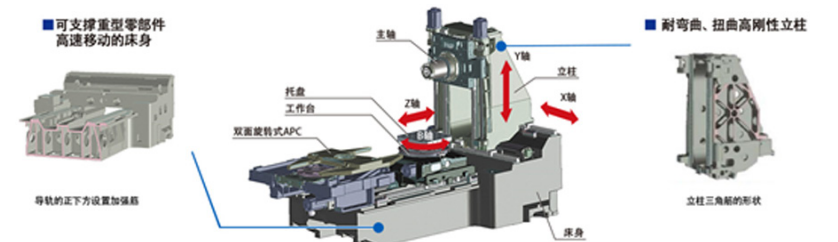
该车床的主轴转速最大5000r/min、C轴控制角度0.001°，是同类机床中速度最快的。同时，机床宽度只有2200mm，提供最优的空间配置。

(3) MA-600H II 卧式加工中心
大隈还展示了一台MA-600H II 卧式加工中心，兼具高速进给和高刚性的机床结构两大优势。机床工作台规格为630 mm×630mm，最大承重为1200kg（可选1400kg），工作台通过齿牙盘进行分度实现工作台的高精度分度，标配为1°分度，可选配0.001°分度。APC采用圆锥销定位，实现高精度定位和高耐久性。



机床从箱体和立柱结构设计、冷却等方面着手，提高刚性和热稳定性。X、Y、Z轴滚珠丝杠两端的支架，经强化一体化适应高精度驱动和定位。采用X、Z轴滚珠丝杠冷却，Y轴电机座冷却，确保高运转率下的精

度稳定。应用“热亲和”（Thermo-Friendly Concept）智能化技术，准确控制规则的热位移，实现了在室温变化时保持尺寸的高稳定性，而且也实现了机床不同加工状态下的尺寸高稳定性。



机床全面提升各项动作的运动速度，减少非切削辅助时间。X、Y、Z直线轴的快速进给速度为60m/min，加速度为0.7g；刀具更换时间：2.0s（T-T），4.4s（C-C）；工作台分度时间为2.0s；APC交换时间：12s。

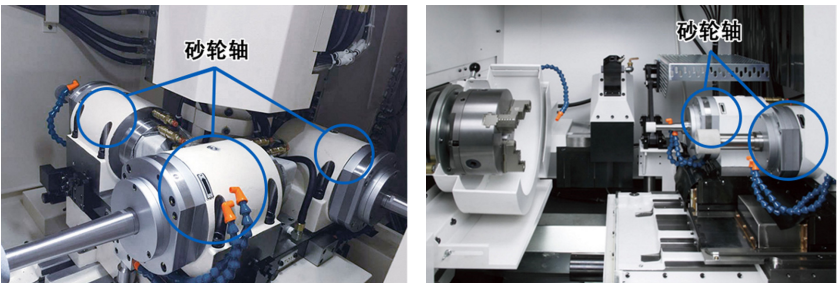
MA-600H II 主轴采用No.50刀柄，电机根据高速和重切削不同需求有多种配置选项。主轴转速标配6000r/min，可选配12000r/min、20000r/min。大扭矩主轴电机功率37kW，主轴的切削量达到1081cm³/min，实验数据如下：

切削刀具	主轴转速 r/min	切削速度 m/min	进给速度 mm/min	切削宽度 mm	切削深度 mm	切削量 cm ³ /min
φ200面铣刀 10刃 (金属陶瓷)	330	207	1,404	140	5.5	1081

(4) GI-20N II 数控内圆磨床
作为大隈磨削技术的代表，此次EMO上大隈展出了一台GI-20N II 数控内圆磨床。大隈的GI系列磨床采用Okuma专有的控制及驱动技术、智能化技术和软硬件系统，实现了整个机床的高精度、高效率的磨削能力，产品应用在从轴承到发动机等多领域的精密加工。

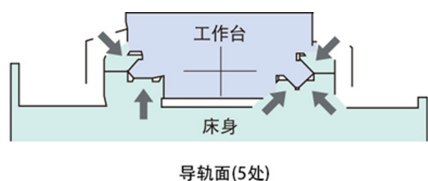


GI-20N II 从配置到功能上属于以内圆磨削为主的数控万能磨床，即通过多砂轮主轴配置，可以实现内圆、外圆、端面、锥面等多种零件型面的磨削。GI-20N II 主要包括双砂轮轴规格（2WS）和4砂轮轴规格（4WS）两种配置。



GI-20N II 磨削内孔最大直径 $\phi 200\text{mm}$ ，工件最大重量150kg。采用金刚板式修整器，也可以为CBN砂轮提供滚轮修整器。具有摆动（抖动）磨削功能，最高可达到335次/min。

机床同样应用“热亲和”（Thermo-Friendly Concept）智能化技术，提升精度和稳定性。该机床进给导轨都采用了传统的OKUMA式5面静压导轨面技术，形成工作台进给的高精度、高灵敏性静压支撑，同时具有更好的减振性能，是实现高品质磨削的重要保障。



（5）模具制造领域的应用

大隈仍然将其机床及自动化解决方案作为EMO2019展会的一个主要亮点进行展示，包括新开发的MCR-S龙门加工中心、GENOS M460V-5AX五轴加工中心、GENOS M660-V-E立式加工中心和各种应用软件解决方案、智能控制技术。这些产品、技术在近两年的展会上都有展示，在此不再赘述。

（6）新一代机器人系统“ROID系列”的新成果展示

大隈从2018年开发新一代机器人系统ARMROID和STANDROID以来，不断发展新机型并更新其功能/性能。从JIMTOF2018（日本国际机床展览会）开始推出ROID系列，明确了省空间、易导入的自动化系统特征。此次EMO2019大隈扩展了ROID系列在更多机床产品上的应用，面向各个行业的广泛用户，提供容易导入的多样化自动化系统解决方案。除了继续展出LB3000EX II ARMROID，还展出了MULTUS

B250 II ARMROID和MB-46VAE STANDROID。



大隈将新型机器人ARMROID的开发融入到复合加工中心中，实现了与复合加工中心“MULTUS B250 II”的融合，强化了可动范围和负载能力的规格，工件负载能力10kg，最大工件尺寸 $\phi 80\text{mm} \times L480\text{mm}$ 。还能够处理法兰形状工件，兼容可自动连续运行约5小时的料仓，可以存放50个直径为 $\phi 150\text{mm}$ 且厚度为30mm的工件。

同时，大隈也将STANDROID的应用进行了扩展，目前已经应用到MB-46V、MB-56V、GENOS M460-VE、GENOS M560-V四种立式加工中心和MU-S600V、MU-4000V、MU-4000V-L三种五轴立式加工中心产品上。可以构建一个满足用户需求的自动化系统，进一步促进了自动化。

6. 牧野 (MAKINO)

牧野 (MAKINO) 是一家拥有80多年历史的日本机床制造商，专业生产立式/卧式加工中心、电加工机床等产品，并提供专用软件、自动化解决方案等服务。牧野的产品追求高精度和稳定性，产品在精密模具、医疗、航空等领域取得了不俗的成绩。

在EMO2019展会上，牧野在1200平方米展位上展出了其产品、技术的最新研究成果和在精密模具领域的应用方案，包括：a500Z五轴卧式加工中心、a51nx四轴卧式加工中

心、D200Z和DA300五轴立式加工中心、iQ500超精密立式加工中心等机床产品；数字化、智能化技术应用；精密模具领域应用的电加工解决方案；自动化生产线。



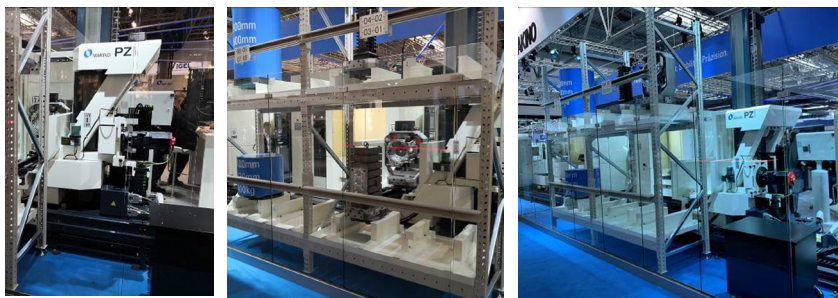
与EMO2019展会主题相呼应，牧野以用户需求为导向展示其最新的数字化、智能化技术解决方案，通过机床产品和Athena、MPmax、

MHmax等软件，实现自动化生产、机床监控、预测性维护、语音控制、增强现实等功能。牧野努力通过具体产品、案例，展示其在数字化（Digital Twin）领域的研究成果和应用经验。这也成为牧野在EMO2019展会的一个特点。

牧野展出的自动化解决方案包括Makino PZ1托盘转移系统和Makino机床与Erowa、Midaco等专业公司合作的产品展示。牧野在这次展会上把PZ1托盘转移系统首次向全球推出，并以PZ1托盘转移系统、a51nx四轴卧式加工中心、a500Z五轴卧式加工中心组成一条自动生产线，与应用5G通讯、iAssist机器人的工具室连接构成一个具有生产、维护功能的智能制造单元，成为此次展会的一个热点项目。

（1）PZ1托盘转移系统

PZ1托盘转移系统是牧野推出最新自动化产品，设计定位为紧凑的模块化的物流系统，安装非常流畅、快速。



为了满足用户生产自动化的需要，PZ1托盘搬运系统提供了一个紧凑的自动化方案。比如展会现场展示的自动生产线，由PZ1托盘转移系统和双层料仓，将一台a51nx四轴卧式加工中心和一台a500Z五轴卧式加工中心联系起来，共同组成一条紧凑的制造单元。PZ1系统最多可连接60个托盘和4台机器，由Makino的MAS-A5软件管理。系统搬运小车的最高移动速度达到120m/min，使用Makino的智能路线规划功能来确定最便捷、最快速的运行路径。系统会根据托盘装载物料的重量进行计算，重新设定搬运小车安全行驶的最快速度。操作者可以通过全新的MAS-A5系统仪表盘检查设备状态，了解和管理PZ1托盘搬运系统的利用率和设备综合效率OEE。

（2）iAssist - 通过5G连接的

牧野在PZ1产出线末端搭建了一个的新型车间工具室，这个工具室中的iAssist应该是本届EMO展会唯一的应用5G通讯技术的展品。

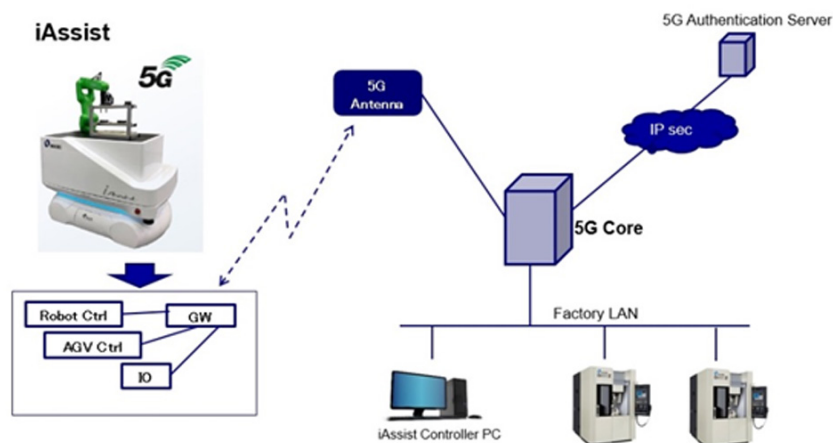
iAssist是牧野于2017年首次向全球推出的一款移动自动化产品，主要针对全世界（特别是欧洲）工厂缺乏劳动力的现状，设计开发的一种可以在生产现场从事辅助工作的智能设备。该设备集成了AGV（自动引导车）和Cobot（关节臂式协作机器人），具有运输和拾取工件等操作功能。从牧野现场展示看，其AGV上主要是配备FANUC的协作机器人产品，载重设计目标是500kg。在产品推出后，通过应用验证发现iAssist在Wi-Fi网络环境工作还不能充分发挥作用，比如在大量的数据传输、更好的时延等方面。由于iAssist不能快速做出反应，会影响工作效果，带来安全风险。随着5G通讯技术的迅速发展，其优越的技术性能给iAssist的数据传输带来了更好的解决方案。2019年牧野与爱立信、弗劳恩霍夫合作，推出了新版的iAssist产品，首次真正为5G技术的工业应用案例。



在EMO2019展会现场布置了无人工具室的应用场景，工具室内有三丰MITUTOYO三维测量仪、ZOLLER自动对刀仪等设备，还布置了工具、刀具的存储架或刀库。工具室与生产线的一端连接，有两个自动交换窗口，可以拾取生产线上移送过来的刀具等物品。iAssist可以通过5G网络与控制服务器进行数据交互，根据控制端发来的指令要求执行各种操作。从现场演示看，iAssist可以执行从刀库拾取刀具、运输、送到检测仪器上、取回刀具、送回刀库，也可以与生产线进行交换。在这样的操作过程中，iAssist通过激光测距仪检测现场的空间位置，数据传输到服务器上与工具室的数据进行对比，重新规划最优的路径，避开人和障碍物；除了运输功能，iAssist在机床、检测仪器、刀库等位置进行操作时，在AGV粗定位后，再通过Cobot协作机器人关节臂末端的摄像头读取设备预设标记，进一步定位后再确定机器人关节臂的运动路径，保证操作的准确执行和安全。



在这个生产管理系统中，所有的动作、路径都是以数字方式进行模拟，制定最合适的生产计划，同时也考虑了整个生产线的加工状态。当计划确定时，在生产管理系统的指导下，通过5G网络将机床、iAssist等设备连接到服务器的数字孪生软件系统，按照系统统一发出的指令工作，保证任务的有效执行。



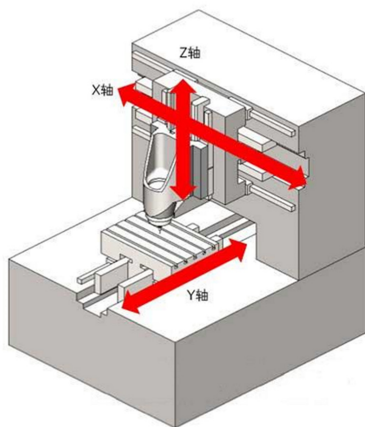
上图是此次展览中使用的本地5G结构示意图，在展览中，iAssists和多个设备在本地5G网络上运行。

使用本地5G控制iAssist的三个优势：在许多设备密集的环境中，也可以进行稳定的控制而不会受到干扰；同步和控制无线连接的iAssist和与有线局域网连接的设备；本地5G与公共5G无缝连接，保证 iAssist可以在工厂车间之间移动。这些都是5G 技术相对于Wi-Fi的巨大优势。

(3) iQ500精密立式加工中心

在EMO2019展出的iQ500精密立式加工中心是牧野新推出的一款重要立加产品，主要应用于光学部件模具、镜面加工和其它高精度加工应用生产，从亚微米级加工精度和可靠性到常规的加工应用，该设备具有广泛的应用范围。

iQ500的一个重要特征是X/Y/Z三个直线轴都采用了直线电机直接驱动的设计，并采用0.005微米级光栅尺反馈和元器件温度控制技术。这种“闭环+直驱+温控”的设计可以提供精确的、可预测的机床精度，避免了由于运动部件定位误差和热变形引起的相关的工艺参数调整。在机床主体结构设计和运动安排上进行了优化，使切削位置紧邻靠近进给轴导轨面，保证高刚性和运动平稳性。因为移动部件的误差更易控制，可以得到更加平滑的加工表面质量。



iQ500采用了摩擦系数低、刚性高的滚动导轨，最大可加工重达300kg的工件。同时，对导轨的滚子的圆度、圆柱度、直径严格控制，保证一致性，提高直线导轨的精度，因此床身和工作台运动的精度高、平稳性好。NC程序的最小指令单位为10nm，分辨率为1.25nm，对于加工移动量变化小、平缓的曲面（斜面）等特别有效。全行程的定位精度与重复定位精度为 $\pm 1.0 \mu\text{m}$ 。

该机床主轴采用高刚性滚动轴承，在抑制热位移的同时，提高了旋转精度。主轴转速最高45000r/min，主轴锥柄为HSK-E32，配有轴芯冷却、轴承内压润滑、主轴温度控制系统，将温控精度从过去的 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 提高到了 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 。几乎消除了热伸长、偏摆、震动，即使在长时间的高速加工过程中也可以保持稳定，热位移产生的纹波量降低到了 $0.1 \mu\text{m}$ ，可以满足逐渐向大型化发展的车用光学部件模具的精密加工需求。

为了确保使用不同刀具到达不同的加工表面质量的匹配性，iQ500机床集成了专有的混合自动刀具长度测量系统（HyATLM），可以有效地测量刀具长度，达到亚微米级别的精度和重复测量精度，为各种切削刀具、主轴速度和加工深度提供简单的可预测性。

人性化的牧野专家6控制器采用牧野专有的新一代超级几何智能控制（SGL5）系统，SGL5是专门开发用于复杂的三维模型中微小程序段的处理加工，确保加工运行速度比标准数控系统更快，同时保证更高的精度。

在这次展会上，牧野还展示了AR技术在产品上的应用。展位上提高智能终端（iPad），通过扫描识别在每一台机床上的标识，可以显示机床的内部结构，采用三维数据模型可以方便、清楚的展示。此功能可以

用于用户培训、设备维护、维修等环节。不仅展示效果新颖，而且具有很好的实用价值。



7. 达诺巴特 (DANOBAT)

达诺巴特集团成立于1954年，是西班牙最大的机床制造商，是欧洲最主要的机床集团之一。多年来达诺巴特陆续并购了全球多个机床企业，工厂分布世界各地，产品多样化、专业化，产品包括磨削、镗削、铣削、车削、钻削、冲削等工艺以及自动化、数字化解决方案，覆盖航空航天、汽车、轨道交通、能源等领域。

从达诺巴特的发展历程可以看到，随着与其他企业不断的合并，其品牌、产品、技术也在不断的丰富和整合。集团旗下品牌包括Danobat、Soraluce、Lealde、Estarta、Overbeck、Dano Rail等。近年来，达诺巴特集团的品牌主要以Danobat和Soraluce为主，在Danobat品牌下主要包括磨床、车床等产品，在Soraluce品牌下主推铣床、立式车床等大型产品。原有的其他品牌的产品基本已经融合到这两个品牌中，也有像Overbeck、Estarta分别在圆磨床、无心磨床上以各种形式保留了子品牌，充分发挥原有品牌的技术和市场影响力。在EMO2019展会的第二天，达诺巴特宣布收购荷兰精密硬车削技术领导者汉布雷格 (Hamburg) 公司，将形成双方硬车削技术和磨削技术的整合。

因此综合的看，达诺巴特此次

展会的安排主要分为三个部分，分别是达诺巴特集团展区、索拉露丝 (Soraluce) 展区和汉布雷格 (Hamburg) 展区。

(1) 达诺巴特集团展区

达诺巴特集团展区在11号展厅磨床企业集中区域，拥有700平方米的展览空间。在“携手超越挑战” (Together beyond Challenges) 的口号下，达诺巴特展示了8台具有高技术价值的新一代机床产品，其中3台机床采用完全自动化的物流系统配置进行展示。达诺巴特通过这些展品重点展示了其在高精度车削和磨削工艺领域的技术成果，同时还展示了其数字化解决方案和“MyDanobat”先进服务平台。这些产品和技术将充分适应客户的加工需求，保证在更高要求的应用中实现最大的可靠性和生产率。



达诺巴特集团展台主要包括：LG-1000外圆磨床、ESTARTA-650无心磨床、VG-800立式磨床、HG-72大型万能外圆磨床、IRD-400内圆磨床 (Overbeck)、ILD-400内圆磨床 (Overbeck)、Mikroturn 100LS精密车床 (Hamburg) 等8台机床产品。其中汉布雷格的Mikroturn 100LS精密车床在达诺巴特集团展区联合展出，该机床是汉布雷格最具代表性的产品之一，这是汉布雷格在高精度硬车削技术领域最先进的技术。Mikroturn 100LS的采用静压技术，头架主轴回转误差 $\leq 0.1 \mu\text{m}$ ，X、Z轴重复定位精度 $\pm 0.1 \mu\text{m}$ ，床身采用天然花岗岩材料，具有极高的精度和稳定性。



达诺巴特的展品覆盖了万能外圆磨床、内圆磨床、无心磨床、立式磨床，展示了达诺巴特在磨削领域具有丰富的产品线和全能的技术实力。此外，达诺巴特在航空领域的发动机、起落架活塞杆等零件磨削方面也有成熟的解决方案。下面以LG-1000外圆磨床为例，介绍一下达诺巴特磨削产品的技术特点。

(2) LG-1000外圆磨床

达诺巴特的LG-1000是其LG系列磨床中规格最大的一款产品，磨削工件最大直径290mm、最大长度1000 mm。该机床开发用于高精度复杂工件的加工，如刀具、液压件和汽车用精密零部件等。同时也可以磨削螺纹、凸轮轴等其它偏心、非圆工件，适用精密液压偶件配磨加工。



LG-1000机床采用天然花岗岩床身，从而确保最好的热稳定性。同时，X、Z轴均采用直线电机驱动并安装线性光栅尺进行闭环运动控制，保证重复精度及定位精度高并易于维护。

机床采用伺服B轴砖塔结构，实现多主轴配置，可同时配置常规磨削砂轮和高速磨削砂轮。砂轮配置具有多样性和灵活性，为客户的不同需求提供了更加完善的解决方案。机床工件主轴、砂轮主轴、B轴转台均采用电主轴直接驱动。砂轮主轴采用水冷冷却式电主轴，砂轮最大线速度达到140m/s，能够在保持最大扭矩的条件下兼顾常规磨削（60m/s）和高速磨削（140 m/s）。机床配置完备的工件磨削测量解决方案。LG-1000可以配置随动中心架，保证细长工件最佳磨削圆度。



此外，LG-1000机床在设计上考虑到面向用户的自动化要求，机床内置龙门架结构，可以安装集成定制化的达诺巴特自动上下料系统，采用包括龙门式或机械手式上下料装置，

满足全自动生产的需要，保证最短的上下料时间。根据具体应用，上下料时间在2~6s之间。该技术拥有极大的灵活性（能够生产多达180种不同的产品）和高生产力。

（3）索拉露丝（Soraluce）展区
索拉露丝（Soraluce）展区位于13号展厅大型/重型机床企业集中区域，如果仅从展品数量看，索拉露斯应该是这个区域最活跃的展商。索拉露斯的产品主要包括大型铣床、龙门镗铣床、立式车床、多任务解决方案、自动化生产线。近年来开发的龙门系列、车铣磨复合机床和一系列智能技术是其在展会上重点展示的内容。

在此次EMO展会上，索拉露斯展出了三台机床，分别是PMG多功能龙门镗铣加工中心、TR-M 35车铣磨复合加工中心、FP8000落地式镗铣床。

（4）PMG多功能龙门镗铣加工中心



索拉露斯PMG多功能龙门镗铣加工中心是一种多功能龙门式机床，横梁固定，在加工大型工件方面具有高水平的多用性和生产能力。机床设计用于工件一次装夹完成全部加工，应用于机械制造、能源、船舶、矿业和关键零部件等领域。

现场展出的PMG机床的X、

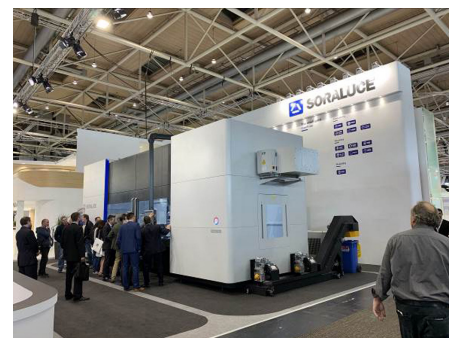
Y、Z轴的行程分别为14000 mm、5500 mm、2000 mm；X、Y轴采用齿轮箱驱动结构，最大速度为35m/min，配有抗磨损的反向间隙变速器；配有一个万能连续分度头，分度为0.001°、转数5000r/min、功率为37kW，扭矩为900N·m；配置可容纳80个刀具、完全可视的刀库；数控系统可以选配Heidenhain TNC 640或Siemens 840 D SL；配置70bar内部冷却系统。

机床采用线性导轨，通过采用惯性阻尼减震垫及索拉露斯独有的DAS®系统等主动控制技术，将导轨技术与被动减震系统相结合，从而打造在加工过程中具有高动态性和稳定性高精度机床。

（5）TR-M 35车铣磨复合加工中心

索拉露斯展出了一款全新的TR-M 35车铣磨复合加工中心，这种复合的加工解决方案将不同工艺操作整合在一台机床上，可大大缩短工件装载、卸载和对中时间，提高效率，从而缩短加工周期、减少占地面积、节约成本。

TR-M 35机床配有3500x1400mm的工作台和一个φ1600mm的转台，X、Y、Z轴的行程分别为3500 mm、1300 mm、1600 mm；配置无级变速多任务附件头，每0.001°分度，转速为5000r/min，功率为37 kW。该附件头集成了一个创新的旋转锁定系统，可以直接使用铣削、车削和磨削刀具，无需添加中间元件。



该机床通过结合特定的循环工艺实现磨削操作,以易于对不同的操作进行编程;除了特定的冷却剂供应和冷却剂过滤系统外,该机床还配有修整和砂轮平衡所需的辅助设备,以确保最佳表面质量。

机床设计旨在最大程度上确保稳定性,附件头的高扭矩功率(37kW/900N·m)和转台(87kW)可以进行深度粗加工。结构元件全部由铸铁制成,稳定性和内部阻尼能力极高,品质出众。

该机床结构紧凑,符合人体工程学,而且可进入工作区域,可从前部和后部进入,便于设置零件、测量以及监控机床作业,性能卓越。

索拉露丝的展示的机床产品上集成了多项专有技术,比如主动减振、有效提升切削能力的动态工件稳定器(DWS)系统,用于大型工件就位的先进影像系统(VSET),智能人机界面(HMI)。在提升机床精度方面,索拉露丝还展示了滑枕平衡系统、DHC(动态附件头校准)自校准系统等专有技术。

(6) 汉布雷格(Hamburg)展区

随着荷兰的汉布雷格宣布加入达诺巴特集团,这次展会上汉布雷格将一台Mikroturn 100LS精密车床在达

诺巴特集团展区进行了联合展示。同时汉布雷格在17号展厅车床企业集中区域也进行了单独展示,现场展示了一台MikroTurnGrind 1000车磨复合机床。



MikroTurnGrind 1000是一款全新的车磨复合机床,兼具高精度硬车削和高精度硬车削的优点,能够在同一机器上完成精密车削和磨削加工。该机床满足了用户对复杂工件一次加工多个表面的要求,尤其是对于中小规模工厂,具有极大的灵活性、准确性和经济优势,非常适合短期、多个表面零件精密加工,具有亚微米精度要求。该机床夹持加工最大工件直径380mm,顶尖距≤1000mm,硬车削工件最大硬度值为70HRC。配备

西门子840D SL控制系统,系统分辨率0.01μm。机床床身和头架箱体都采用天然花岗岩材料,具有优越的热稳定性,床身还集成减振系统,进一步提升了整机的阻尼特性。机床采用斜床身结构,车刀塔和内外圆砂轮主轴都安装在B轴转台上。机床头架主轴和直线进给轴导轨都采用静压技术,头架主轴回转误差≤0.1μm, X、Z轴的定位精度≤1μm、重复定位精度±0.1μm。

MikroTurnGrind 1000可实现极高的加工精度,工件表面光洁度可以达到Ra0.1μm,形状精度控制在0.1~2μm,尺寸精度控制≤1μm。

以上介绍了德马吉森精机(DMG MORI)、哈挺(HARDINGE)、斯达拉格(Starrag)、马扎克(MAZAK)等七家具有较强综合实力、较大展览规模的机床主机企业集团的展览情况,希望能对EMO2019的盛大规模有一个总体描绘。除了这七家制造商,还有GF、Chiron、FFG、EWG、HELLER、联合磨削、Gleason、REISHAUER等很多企业也以盛大的规模做了精彩展示,在此未能尽述,有的产品或技术将在后续内容中进行介绍。(未完待续)□

广告索引 Advertisers Index

开天传动技术(上海)有限公司	封二
马波斯(上海)商贸有限公司	封三
第十七届中国国际机床展览会(CIMT2021)	封底
卡尔蔡司(上海)管理有限公司	1
斗山机床(烟台)有限公司	2
约翰内斯·海德汉博士(中国)有限公司	3
北京北一机床股份有限公司	5
上银科技(中国)有限公司	6
世界制造技术与装备市场杂志	7
机械传媒公益广告	9