

WMEM

世界制造技术与装备市场

World Manufacturing
Engineering & Market

No.3 2022
2022年6月
June 2022

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

出版: 中国机床工具工业协会
《组合机床与自动化加工技术》杂志社

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

特邀编委(各分会秘书长26人):
吴俊勇 邹春生 刘春时 房小艳 周慧 胡春美
陈瑞雷 李升 王珏 卢智良 刘庆乐 查国兵
陈鹏 崔瑞奇 边海燕 王兴麟 何培彦 张新龙
肖明 叶永生 武平 陈远东 孙兆达 李鸿基
王丽娜 陈长江

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

广告代理: 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

2022年第3期(总第180期)

WMEM世界制造技术与装备市场

资讯 News

- 9 CIMT2023招展工作全面启动等8则消息
CIMT2023 exhibition work fully launched etc. 8 news

行业观察 Industry Observation

- 11 日本电产布局机床产业背后的逻辑 李华翔
The logic behind the layout of NIDEC CORPORATION in the machine tool industry

专题综述 Topical Review

- 14 数控机床可靠性试验技术发展浅析 赵钦志 王军见
The reference and analysis of reliability test technology development of CNC machine tools
- 22 机床核心功能部件的自主研发与创新发展 周吉贞
Independent R & D and innovative development of core functional components of machine tools
- 26 机床共性技术的现状及发展趋势 张杨
Current situation and development trend of common technology of machine tool

展会报道 Exhibition Report

- 31 第十二届中国数控机床展览会(CCMT2022)部分展品综述(2) 机床协会市场部
Review of some exhibits of CCMT2022 (2)

研发与应用 Research & Application

- 41 高速动台式龙门铣床的研发与应用 赵旭靖
Development and application of milling machine with high speed moving table
- 45 一种箱体类零件精镗孔专用机床的研发 郭鑫
Research and development of a special machine for fine boring of box parts

产销市场 Production & Market

- 49 2021年电加工机床行业运行情况 吴国兴等
Operation of electric machining machine tool industry in 2021

编者的话

今年以来，新冠疫情的反复，给国内经济社会的正常运作带来了较大影响。受疫情管控限制，中国机床工具工业协会刚刚正式对外宣布：第十二届中国数控机床展览会（CCMT2022）停办。这是该展会4年之内的两届停办。疫情带来的损失无疑是巨大的，但我们也只能坦然接受这一现实。

对于广大国内行业企业而言，2022年无疑是处境较为艰辛的一年。面对地缘政治冲突加剧，能源、原材料价格大幅上涨，通胀压力不断加大，需求相对偏弱的不利局面，企业生存压力倍增。

面对当前不利局面，需要广大机床工具行业企业拿出信心和毅力，迎难而上，加快行业企业转型升级步伐，不断提升企业产品的市场竞争力。在产品开发方面，坚持差异化路线，走专精特新发展之路；在市场开拓方面，要保持国际化视野，走国际化发展之路。

同时，行业企业还应未雨绸缪，关注新技术所带来的相应变革，瞄准新能源电动汽车、机器人、医疗器械等发展迅速的市场领域，提前布局，力争将未来市场的主动权牢牢掌握在自己手中。本期“观察”栏目中《日本电产布局机床产业背后的逻辑》一文，分析了日本电产大举跨界收购三菱重工和OKK机床行为背后的行为逻辑。该公司的一些做法值得国内企业借鉴与参考。

当然，疫情阴霾之下也不全是坏消息。令人略感欣慰的是，作为全球机床工具行业四大名展之一的第十八届中国国际机床展览会（CIMT2023）的招展工作已全面启动。该展会定于2023年4月10~15日召开，目前各项展会前期筹备工作也将陆续展开。作为准确反映机床工具市场情况的晴雨表，CIMT2023这一行业盛会必将再次引发全球业界关注。

CIMT2023值得期待！

本刊编辑部

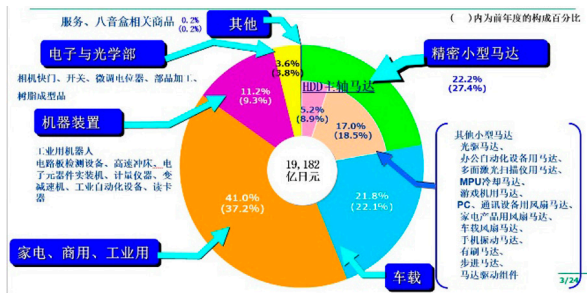
版权所有，未经本刊书面许可，不得转载。

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

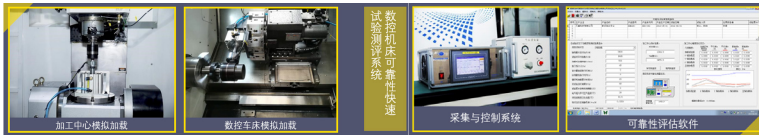
内容导读

9 CIMT2023招展工作全面启动等9则消息

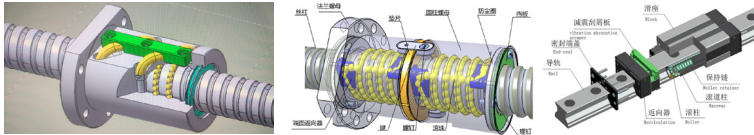
11 日本电产布局机床产业背后的逻辑



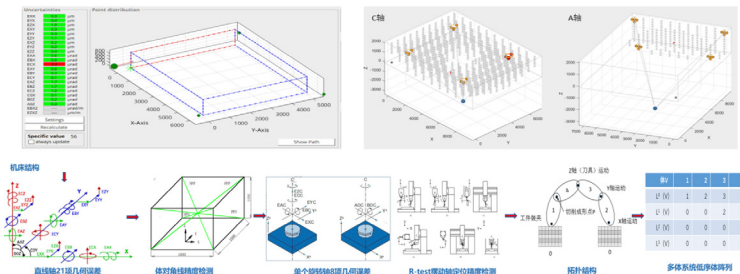
14 数控机床可靠性试验技术发展鉴别



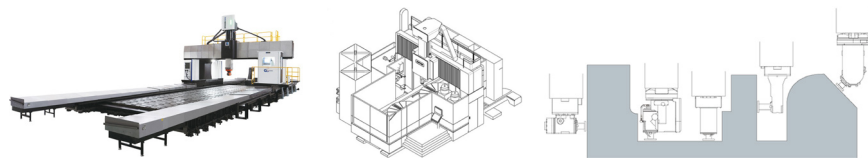
22 机床核心功能部件的自主研发与创新发展



26 机床共性技术的现状及发展趋势



31 第十二届中国数控机床展览会（CCMT2022）部分展品综述（2）



Competent Authority: China Machinery Industry Federation

Sponsor: China Machine Tool & Tool Builders' Association

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

Tel: (010) 63345259

E-mail: wmem@cmtba.org.cn

Publisher: CMTBA

Modular Machine Tool & Automatic
Manufacturing Technique

President of E-C: MAO Yu-feng

Vice President of E-C: WANG Li-ming

GUO Chang-cheng WANG Xu

Committeemen:

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

Specially invited Committeemen:

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

Chief-Editor: Li Huaxiang

Executive Editor: Mei Feng

ISSN 1015-4809

CN 11-5137/TH

Post Distribution Code: 80-121

Advertising agency:

WORLDWIDE SERVICES CO.,LTD

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

Tel: +886 4 23251784

Fax: +886 4 23252967

E-mail: Jessie@acw.com.tw

Contact: Jessie



WMEM官方网站

- 52 海关总署官网: 2022年版税则修订报告发布
——金属成形机床、增材制造设备等机床工具类商品税则号有变化 机床协会市场部
The official website of the General Administration of Customs: the revised
report on royalty rules for 2022 is released

产品与技术 Products & Technology

- 55 五轴机床关键动态性能的测试 周汉辉
Key dynamic performance testing of 5-axis machine tool
- 58 车桥专用机床的工艺设计与装备应用 孙雪娜等
Process design and equipment application of special machine tool for
automobile axle
- 64 激光焊接技术在动力电池制造中的应用 赵宇龙
Application of laser welding technology in power battery manufacturing
- 69 汽车油泥模型专用工具在实践中的创新与应用 胡卫兵等
Innovation and application of special tool for automobile sludge model in practice
- 73 双伺服电机消除控制C轴与主轴的切换 温小亮
The automatic switch between C axis and spindle is controlled by double servo
motor backlash elimination
- 75 有关精密卧式加工中心产品的研究 张丽丽等
Research on precision horizontal machining center products
- 78 直联式主轴松刀缸漏油分析及对策 荆立萍等
Analysis and countermeasures of oil leakage of loose cutter cylinder block of
direct spindle
- 81 一种立式侧刀架轴切换装置 李永真
A kind of axial switching device in a vertical side tool rest
- 84 激光干涉仪在机床定位精度测量中的不确定度 曹峰等
Uncertainty of laser interferometer in machine tool positioning accuracy measurement
- 96 双刀架数控立式板料开槽机控制系统的研发与设计 杨晨等
Research and design of CNC vertical plate slotting Machine with double knife frame

企业风采 Enterprise Style

- 99 汉江工具: 做精主业, 持续创新 汉江工具
HANGJIANG Tool Corporation Limited: do fine main business, continuous innovation
消息 (14、25、30、54、58、95、100)

CIMT2023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有限公司共同承办的“第十八届中国国际机床展览会（CIMT2023）”，将于2023年4月10~15日在北京中国国际展览中心（顺义馆）举办，预计展览总面积14万平方米。

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8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。

2022年高端数控机床人才招聘活动已全面启动

为深入贯彻落实党中央、国务院“稳就业”“保就业”决策部署，全力做好2022届全国普通高等学校毕业生就业工作，充分发挥中国机床工具工业协会在行业中汇聚岗位资源的优势，中国机床工具工业协会与教育部就业指导委员会在“国家24365大学生就业服务平台”共同举办的教育部“24365校园招聘服务”高端数控机床行业专场招聘活动已全面启动。在4月15日~7月31日活动期间，“国家24365大学生就业服务平台”开设高端数控机床行业专场招聘页面，供用人单位免费发布招聘信息，高校毕业生浏览查询和投递简历。

博鲁斯潘推出高速精密五轴联动叶片铣削中心

北京博鲁斯潘精密机床有限公司（简称PMT）于近日成功研发出高速精密五轴联动叶片铣削中心PMT BM40-5i，并在其天津基地完成了叶片曲面精密制造全工艺过程的切削验证，即将发往我国某飞机发动机制造公司。该机具有高刚度、高精度及高动态响应加速度性能，拥有完全自主知识产权和核心关键技术，主要技术指标接近或达到国际同类产品先进水平，主要用于400mm以内航空发动机、燃气轮机的高温合金、钛合金精密叶片的高速高效精密制造。



为进一步提振经济，工信部组织召开行业协会座谈会

6月20日下午，工业和信息化部召开部分行业协会座谈会，研判二季度和下半年工业行业经济运行形势，部署做好下一阶段进一步提振工业经济工作。

会议指出，今年以来，各行业协会配合政府部门积极采取措施应对下行压力，在保障产业链供应链稳定、推动企业复工达产、加强政策宣传解读等方面做了大量工作，为推动工业经济企稳回升发挥了积极的作用。同时也要看到，当前工业经济平稳运行面临的不确定不稳定因素依然较多，稳定增长的基础尚不牢固，仍要持续付出努力。

会议强调，当前正处全年经济发展承上启下的关键时期，各行业协会要发挥贴近企业的优势，靠前服务、加强帮扶，高效统筹疫情防控和工业生产，巩固5月份以来工业生产恢复增长势头，为稳住宏观经济大盘作出更多更大贡献。

捷太格特以“JTEKT”品牌首次推出外圆磨床

为了提升磨床产品的市场竞争力并扩大相关产品销量，日本捷太格特株式会社对磨床产品进行了更新，推出了继承传统TOYODA磨床技术的首款JTEKT品牌外圆磨床，主要面向电动汽车行业及其他领域。



JTEKT外圆磨床采用“变形”和“热位移”复合分析的最佳机械结构以及高可靠性的“TOYODA STAT BEARING[®]”，可抑制变形和热位移，实现低振动。该机床搭载最大功率22kW的砂轮轴，实现比同级别更快的加工节拍；安装的工件交换装置“XC”，装卸时间为0.5s；可选择基本磨削模式或附加模式，功能丰富；通过实时人工智能技术，实现机床自动化，保证连续加工质量，如：通过实时显示表面粗糙度，可以在出现缺陷之前进行处理；具有唤醒功能，大大降低非加工时间的功耗；降低砂轮磨削阻力，减少加工时的耗电量。

第四批专精特新“小巨人”企业培育工作启动

6月15日，工业和信息化部办公厅向各省、自治区、直辖市及计划单列市、新疆生产建设兵团中小企业主管部门发出通知，《关于开展第四批专精特新“小巨人”企业培育和第一批专精特新“小巨人”企业复核工作的通知》（工信厅企业函〔2022〕133号），部署相关工作及组织实施要求。

通知要求各省级中小企业主管部门要按照宁缺勿滥的原则，严格把关，积极稳妥开展推荐工作，确保培育工作稳定可持续。专精特新“小巨人”企业申请和复核采取线上填报与线下报送相结合的方式，线上与线下数据应保持一致。请2022年6月21日至6月28日期间上传申报材料。各省级中小企业主管部门于2022年7月12日前将相关文件报送至工信部。

山崎马扎克将推出新一代三维光纤激光加工机FG-400 NEO

近期，有来自山崎马扎克株式会社的消息称，该公司即将开始销售其最新研制的配备光纤激光振荡器的三维激光加工机“FG-400 NEO”。



FG系列是马扎克研制的一种三维激光加工机，可实现建筑和农业机械等领域所用钢材的高精度、高效率加工。

通过配备三维刀头，除钢管（管材）外，还可加工H型钢、槽钢等。即将面世的“FG-400 NEO”是一款面向大直径长尺寸管形钢的三维光纤激光加工机。

FG-400 NEO配备高能量转换效率的光纤激光振荡器，同时具有控制光束直径和光束形状的独特功能，因此可轻易实现对铝、黄铜、铜等高反射材料的高速加工，以及从薄板到厚板的各种板厚工件的高效加工。

此外，FG-400 NEO与传统机器相比，功耗降低40%，激光气体消耗量为零，具有良好的环保性能。

通用技术大连机床与南京理工大学签订合作框架协议

5月31日，通用技术大连机床与南京理工大学高端装备及功能部件团队（数控机床功能部件共性技术工业和信息化部重点实验室）在大连举行了合作框架协议签订仪式。



大连机床作为中国通用技术集团机床板块功能部件领域牵头单位，坚决落实集团公司、机床公司战略部署，经过充分调研和广泛论证，确定了关键核心功能部件发展方向和发展思路。为确保战略部署落实落地，大连机床已于前期就关键核心功能部件发展进行了全面系统分析研究，通过与南京理工大学的深入交流探讨，进一步厘清了战略定位、建设思路，形成了双方全方位合作的意愿。

签约仪式前，南京理工大学冯虎田教授一行参观了卧加装配车间，实地调研了精密主轴恒温装配、刀塔刀库和丝杠线轨等车间，详细了解了公司功能部件现状。随后，双方就后续强化合作，共同推动功能部件向更高层次、更加系统化发展进行了深入交流。最后，双方代表签署了《战略合作框架协议》、《滚动功能部件技术服务合作框架协议》。双方一致表示，将以《协议》为依托，围绕共同目标不断扩大交流，推动合作向深层次开展，共同为服务国家战略贡献力量。

日本电产 布局 机床产业背后的逻辑

中国机床工具工业协会传媒部 李华翔

4月6日，日刊工业新闻报道，世界电机行业巨头——日本电产重新调整规划，将日本电产平湖工厂的面积由原计划的6万平方米扩建至20万平方米，用于生产齿轮加工机床，以满足市场未来增长的需要。

消息一出，再次引发舆论热议。要知道，就在前不久短短的半年内，日本电产先后跨界并购了三菱重工机床（以“尼得科机床株式会社”的名义开始运营）和日本机床制造商OKK，已是众说纷纭。这次短期内再次追加在中国的投资，扩大机床产能，的确让人费解。

在外人看来，一是选择的时机不对。眼下新冠疫情反复，俄乌冲突依旧，全球经济下行压力不断加大，企业此时通常采取战略收缩的做法，以规避风险。二是跨界并购难度较大，成功率不高。电机类企业和机床企业有着完全不同的生产特点：一个是量大面广，一个是专业定制化，并购后的管理与文化整合是个大问题。

然而，日本电产或许是个特例。这家企业从一家名不见经传的小微企业成长为世界第一的综合电机企业，仅用了短短不到30年的时间，在经营方面自然有其独到之处。有关这一点，我们或许能从日本电产的发展历史中窥见一斑。

一、借助资本力量，有序并购扩张

1973年7月，日本电产在京都注册成立。作为一家生产小型电机的小微企业，公司掌门人永守重信先生，在创业之初就立志将公司打造成为该领域的行业翘楚。

时势造英雄，日本电产一开始便与国际市场结下了不解之缘。就像十五世纪开启大航海辉煌时代的葡萄牙、西

班牙欧洲小国一样，日本电产在成立的几个月后，便一路勇敢向西，登陆美国大陆开疆破土、寻找商机，同样取得了巨大成功。

日本电产在美国市场深耕细作多年，同时抓住美国PC机产业链转移东南亚市场的商机，很快在HDD（硬盘驱动器）电机产业领域打出了一片天地。短短十几年，公司便成为了该领域的世界知名供应商，应该说是美国市场、美国公司成就了日本电产最初的成功。

随着业绩的快速增长，日本电产开始借助资本的力量去扩大企业规模。自1988年到2001年，公司先后在大阪、东京、纽约三地成功实现上市。股市融资为公司的并购发展插上了翅膀。

长期以来，日本电产一直坚持积极的并购战略。从1984至2019的35年间，日本电产共发起了66件并购案，其中海外并购40件，占比超60%，平均每年就发起近2件并购案。企业开发新技术或新市场，常常要耗费大量时间。在永守重信眼中，并购就如同向市场“购买时间”，可为企业节省许多用于研发和市场开拓方面的宝贵时间资源。

为保证并购成功，公司确立了基本原则。据国内一家研究机构相关资料介绍，日本电产在确定并购之前一定要符合三项基本原则：一是定位清晰——并购领域是“旋转或驱动”事业，即始终围绕着电机这个老本行，不能离开太远；二是目标明确——一定要能够解决企业所面临的培育新技术或新渠道等课题；三是方针鲜明——绝不高价收购那些业绩良好的企业，而是瞄准那些濒临破产和倒闭的目标，经过日本电产之手优化重组，使之重新焕发活力。

永守重信曾在接受媒体采访时指出，“（并购）好比登山，签署合同仅仅是爬了五分之一，剩下的就是跨企业间的文化磨合，这是最耗时也是最难的过程。”为保证并购的成功，日本电产创造了独特的并购业务整合（PMI）标准，其中就包括其独具特色的重组方式——推行“3Q6S”管理。同时企业尊重员工利益，将不裁员作为日本电产实施并购的一项基本原则。虽然这些措施落实起来既费时又艰难，但却十分有效。

通过一次次成功的企业并购和产品经营，日本电产已从一家名不见经传的小微企业成长为当今世界一流的综合类电机制造企业。产品类别包括：精密小型电机、车载及家电、商用、工业用电机、机械装置、电子与光学部等。其中，作为公司重点发展的领域——车载类产品的市场份额逐年提高，2021年车载类产品的销售额就占据了约20%的份额，随着汽车市场的快速发展变化，这一占比仍在增加。



E-Axle三合一式驱动电机系统

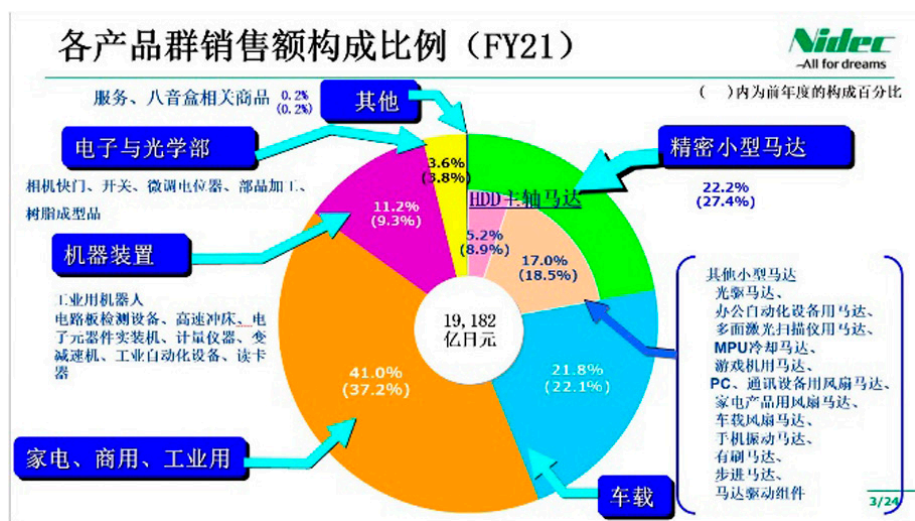
日本电产表示，在汽车行业面向“脱碳化”快速推进各项措施的过程中，公司将牢牢抓住“汽车电动化”及“绿色转型”这一中长期发展机遇，通过扩大销售以EV驱动电机系统“E-Axle”为核心的车载用电机产品，为温室气体减排作出贡献。

E-Axle驱动电机系统是由驱动电机、减速齿轮箱及逆变器构成，具有结构紧凑，小型轻量等特点，极具市场竞争力。这款拳头产品一经推出，广受市场好评，市场需求不断增长。为满足未来的市场需求，近两年日本电产集团又在现有的第一工厂（浙江省）的基础上，再在浙江与大连分别新建了第二、第三工厂。在此背景下，为进一步提升新能源汽车产业市场规模和产品竞争力，日本电产集团开始将目光投向了机床装备产业。

2021年8月，日本电产集团完成对三菱重工机床株式会社的收购，并以“尼得科机床株式会社”的名义开始运营；2022年1月，尼得科机床的平湖工厂项目云签约仪式成功举行。2022年2月，日本电产集团再次收购日本机床制造商OKK。

三、依托机床板块，助力集团公司战略目标实现

企业并购战略是实现企业发展战略的一种常规途径，通过并购等外源式的增长成为企业实现扩张的一种合



二、顺应汽车技术变革，着手布局机床产业

早在上个世纪九十年代，日本电产集团就进入中国大陆并着手全面布局中国市场，先后在浙江、广州、大连、苏州等地建立研发和生产基地。近几年更是加大了在中国的投资力度和发展速度。2019年6月20日，日本电产在北京市召开了在华业务战略说明会。强调“中国是非常重要的市场，将继续展开投资”。具体而言，日本电产将着眼于新一代通信标准5G、汽车的电动化和自动化、机器人的推广使用、家电节能化和农业物流自动化这5个潮流来拓展业务。这个时期，日本电产还没有把公司战略瞄准机床产业，至少公开的信息没有显示日本电产集团的业务将向机床产业方向延伸。

近年来，随着新能源汽车和自动驾驶技术的快速发展，汽车行业进入前所未有的技术革新时代。为此，日本电产集团提早谋划，凭借在轻薄短小技术、高效能技术及控制技术等领域的技术优势，及时推出了车载领域的新能源汽车驱动电机和新能源汽车平台两大产品，并将中国市场作为其主要目标市场。其研发的E-Axle整合式驱动电机系统于2019年4月全球开始量产，广汽新能源Aion S以及Aion LX也成为首批搭载该产品的车型。

理选择。

2021年7月，日本电产公布了中期战略目标“Vision 2025”，制定了“在2025年实现创收4万亿日元”的目标，包括驱动电机在内的车载业务、工业机器人有望成为其主导型业务的主要组成部分。

那么，如何看待日本电产并购机床企业？翻阅相关资料，不难发现，对三菱重工机床和日本OKK机床的跨界收购，是2020年初疫情爆发以来，日本电产仅有的两次收购行为。作为一家以并购见长的国际跨国集团，在“现金为王”的疫情期间，敢于出手去收购上游的机床制造企业，其行为背后的逻辑，需要从集团战略目标的实现路径、内部协同效应的有效发挥、以及不断提升企业核心竞争力等方面去寻找答案。

首先，收购机床业务有助于公司整体战略目标实现。日本电产集团的产品具有技术含量高、量大面广等特点，需要配备大量高性能的机床装备。为了短期内达成公司中期战略目标，势必要投入巨资购买机床设备以扩大产能。通过并购方式获取优质稀缺的机床装备资源，利用它们独有的技术优势、研发力量，可以更好地服务企业总体发展战略。

其次，随着日本电产集团机床板块阵容的扩大，其内部的协同效应也将愈发明显。有日媒认为，日本电产扩充机床阵容，可拓宽电机以外的利润来源，同时扩大公司生产的机床用伺服电机的应用范围，进而改变公司在机床伺服电机市场份额落后的现状（资料显示：伺服电机市场规模2020年为139亿美元，2025年预计达168亿美元），其竞争目标瞄准这一领域强大的竞争对手。

再有，由于受疫情的影响，许多机床企业经营受到了很大影响。日本电产选择在这个时间段收购两家日本机床企业，也让它在议价权上处于有利位置；同时日本企业间的管理文化相近，也使得跨企业之间的文化磨合问题相对容易解决。

四、电产机床板块：未来机床市场一支不容忽视的力量

目前，对于日本电产而言，三菱重工和OKK机床的成功加盟所带来的好处正在逐步显现。

三菱重工的齿轮机床位居世界三大齿轮机床之列，在汽车齿轮切削等机床设计和生产方面拥有着大量先进技术，其长期积累的经验也独具借鉴意义。有媒体报道，收购三菱重工机床，不仅加强了E-Axle三合一式驱动电机系统核心部件齿轮的制造能力，还为公司提供了齿轮和齿轮制造方面的工艺经验，使其一举成为电动汽车的完整牵引

解决方案提供商。

OKK主打中小型加工中心，擅长不锈钢和耐热性高的铝合金等难切削的材料的高精度加工，可以自动更换多种刀具，同时进行切削、钻孔。有日媒体报道称，日本电产2022年度内将把小型减速器的产能提高到现有的近3倍。为此公司将投资100亿日元在菲律宾工厂建设新厂房，以生产面向工业机器人使用的主要部件——小型减速器。新厂房将从集团子公司尼得科机床和NIDEC OKK CORPORATION引进最尖端的机床，以扩大产能，缩短从客户下单到供货的订货时间，从而扩大市场份额。5月23日日本电产对外宣布，将在浙江省平湖市建设驱动电机系统“E-Axle”的旗舰工厂以扩大车载电机产品的销量。



“E-Axle旗舰工厂”竣工效果图

可以预见，依托集团内部丰富的上下游资源，尼得科机床和NIDEC OKK CORPORATION机床将在日本电产电动汽车和工业机器人领域相关产品的产能提升方面发挥重要作用。

近期，永守重信表示，为了扩大车载和机器人用电机的生产，在机床方面，集团或将“再收购几家公司”。对于2021年收购的三菱重工机床，他表示，“虽然曾经亏损，但现在已经实现盈利”。显示了日本电产对正式进入机床领域充满信心。

不难看出，日本电产集团跨界机床并购行为还将继续下去。如果顺利的话，未来随着机床业务板块阵容的扩大，其集团内部相互间的协同效应也会愈发明显，将助力集团公司整体竞争实力的进一步提升。与此同时，其规模和外溢效应未来会逐步显现，将成为相关市场，特别是新能源汽车、工业机器人等装备市场领域强有力的竞争者。

当然，日本电产集团的发展其实也并非一帆风顺，除了经济不确定因素增多、市场竞争日趋激烈。以及规模化管理和文化整合难度加大等因素之外，公司目前面临的主要问题还是缺乏合适的“接班人”。就在今年4月，年满77岁的永守重信在卸任不满一年后，重新出山担任首席执行官(CEO)，原CEO关润转任首席运营官(COO)。

未来，并购整合后的日本电产机床业务发展如何，我们将拭目以待。□

数控机床可靠性试验技术发展鉴析

国家机床质量监督检验中心 赵钦志 王军见

机床是制造机器的机器，被称为“工业母机”，它代表了国家工业发展水平，也是国家综合实力和竞争力的体现。然而，国产机床的可靠性问题，一直是制约着我国机床行业的发展，严重影响国产机床市场竞争力的顽疾。

国家对此高度重视，自“八五”以来，通过国家科技攻关项目支持，引导了一批专家学者进入数控机床可靠性技术研究领域，创建了数控机床可靠性技术的试验与检测基地，产出了一批基础性的技术成果，显著提高了国产机床的可靠性水平。但由于我国机床可靠性技术研究起步晚，技术成熟度仍有待提升，加之企业对可靠性试验认识不足，也间接制约着可靠性技术推广应用，目前国产机床可靠性与国际先进水平相比，仍有一定差距。

本文分析了机床可靠性及可靠性试验的意义，并以国别的方式比较了包括前苏联、美国、德国、日本等机床强国的可靠性试验发展历程及其优缺点，试图从中借鉴相关经验；总结了我国机床可靠性发展过程，尤其以“高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项（简称04专项）为核心，表明了开展可靠性试验技术研究是提升国产机床核心竞争力的基本保证；并对当前国内相关机床可靠性研究政策及发展中的问题进行了探讨，为今后的机床发展等政策的制定提供参考。

在第六个“全国科技工作者日”之际，作者围绕“国产数控机床可靠性试验技术发展”，对国外研究情况及国内前期研究成果进行了系统分析，以此向本领域潜心钻研

的专家、学者表示致敬，也希望与各位同仁未来深入合作，共同为我国数控机床的可靠性提升做出应有的贡献。不当之处，敬请指正、交流。

一、可靠性与机床可靠性

可靠性的定义是产品在规定的条件下和规定的时间区间内完成规定功能的能力^[1]，通过可靠度、失效率、平均故障间隔时间等来评价。可靠性是系统和设备的灵魂，是评价系统和设备好坏的主要指标之一，体现了产品的耐用和可靠程度。产品的可靠性越高，产品可以无故障工作的时间就越长。

可靠性研究是由二战时期美国提出来的，面向电子管，解决飞机电子设备和复杂导弹系统等问题，后来逐渐被其他国家所重视。截止到2015年，其发展共分为4个阶段，分别为兴起阶段、全面发展阶段、完善阶段、现代化阶段，这也是目前较为大家公认的阶段^[2]。从2015年之后，各种新兴技术逐渐兴起，为可靠性检测手段提供了新的工具，也引起了一些研究变化，本文将其单独分离出来作为第5阶段，命名为智能化阶段，如图1所示。这5个阶段的可靠性研究各有特点，但是无不围绕可靠性理论体系、可靠性试验和可靠性标准等展开，其中可靠性试验更是提高产品性能的基础和重要手段。

资讯

险峰机床订单已排产到明年二季度

疫情影响仍未缓解，贵阳险峰机床有限责任公司却凭借技术实力实现逆势上扬。相关信息显示，目前在手订单已经排产到2023年第二季度，而且订单还在持续增加，全厂各部门倒排工期，力争产品按时交付客户。

险峰机床于2021年被认定为国家级专精特新重点“小巨

人”企业。公司一直专注于高端数控精密磨床整机制造的创新研发与应用，其轧辊磨床、无心磨床等产品广泛应用于钢铁、船舶、汽配、造纸、新能源、国防等领域。险峰机床在发展中始终坚持自主创新战略，持续深耕专有技术、关键技术和核心技术，力争做到开发一代、储备一代、应用一代。

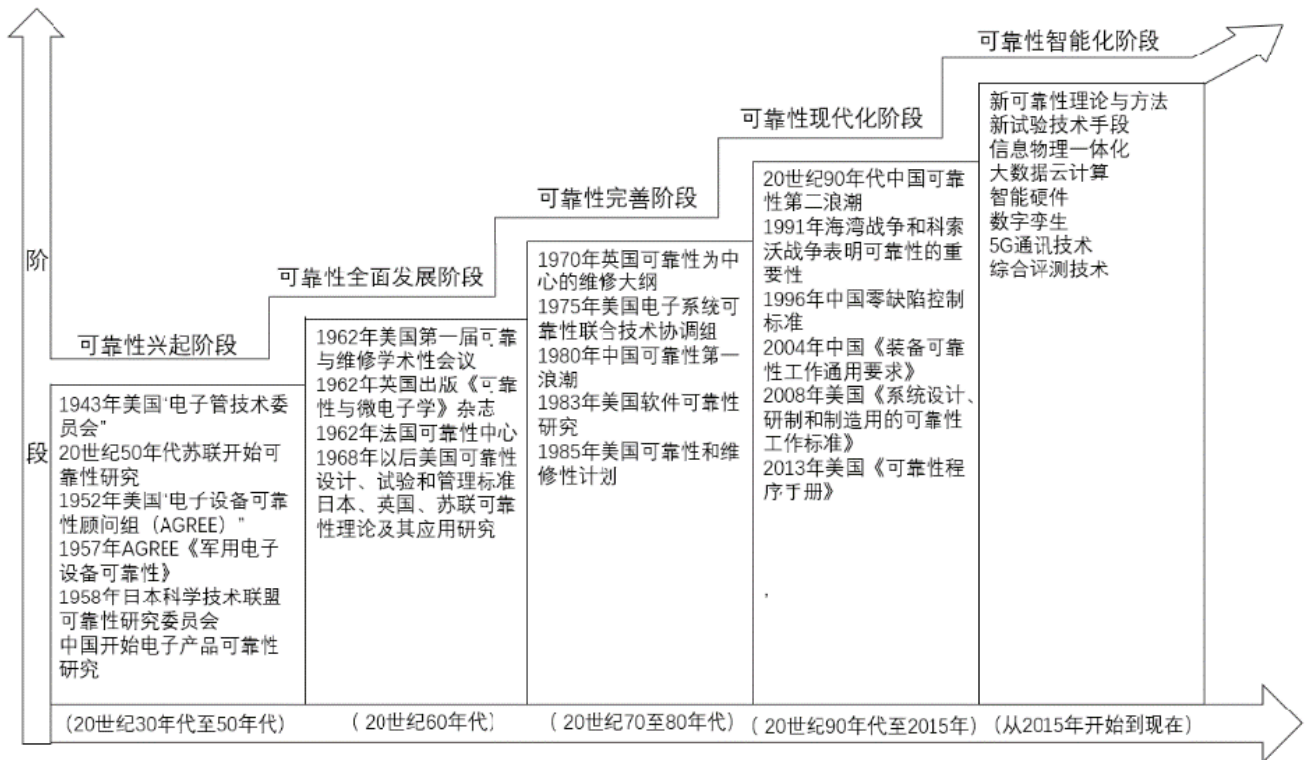


图1 可靠性研究的不同阶段

可靠性试验^[3]是指通过试验测定和验证产品的可靠性，目的是发现产品在设计、材料、制造、装配工艺方面的缺陷，提高可靠性水平，为减少维修及保障提供科学依据。它分为工程试验和统计试验两大类，如图2所示。工程试验的目的在于快速有效地暴露产品的可靠性缺陷，并采取纠正措施消除或者使故障发生概率低于许可水平。统计试验的主要目的是鉴定和评价产品的可靠性或使用寿命，对于试验中出现的缺陷，不采取其他措施。

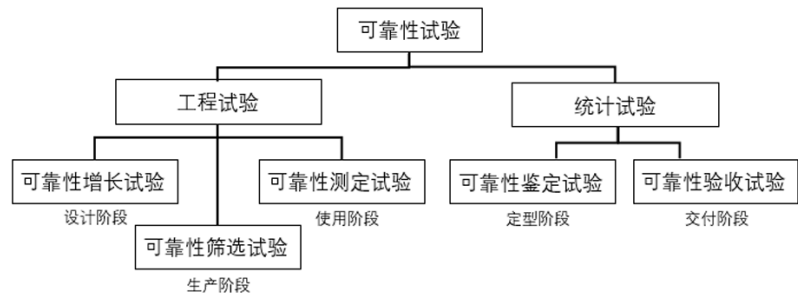


图2 可靠性试验

作为典型的机电一体化系统，数控机床是现代制造技术基础装备，其技术水平高低是衡量一个国家工业现代化水平的重要标志，而数控机床的可靠性是机床质量的关键。该研究贯穿数控机床整个产品生命周期，如图3所示。

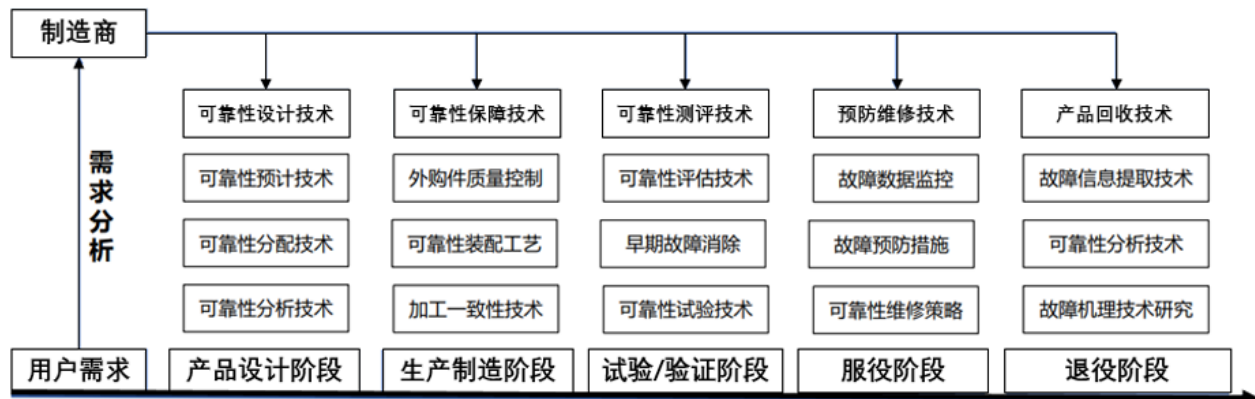


图3 数控机床产品生命周期可靠性技术框架图

数控机床可靠性评价指标包括平均故障间隔时间 (MTBF)、平均修复时间 (MTTR)、固有可用度 (IA)、精度保持时间 (KT)、有效度 (Ag)、全生命周期成本 (LCC)、平均非计划拆卸间隔时间 (MTBUR)、使用寿命 (RL) 等指标。从具体执行项目来说, 通用可靠性试验包括加速强化试验、加速寿命试验、定时截尾试验、定数截尾试验、序贯试验、基于贝叶斯的鉴定试验和可靠性摸底试验等。在机床可靠性试验方面, 基于模拟加载的可靠性快速加载试验是我国独创。

可靠性试验是评价和提高数控机床可靠性的重要手段, 其具体意义在于: 确定产品在预期工作时的可靠性特性, 验证产品是否符合设计要求, 发现缺陷, 为改进提升提供依据, 消除早期故障等。最关键的是, 它在产品生命周期中起到了承上启下的作用, 扮演着不可或缺的角色。

接下来通过对国内外机床可靠性发展历程等的对比分析, 试图找到客观的可靠性整体政策和技术方向, 并在此基础上探讨未来发展的多种模式, 为我国机床可靠性技术发展提供参考。

二、国外机床可靠性试验研究对比

机床作为复杂机电系统, 其可靠性一直是各国机床产品的核心竞争力指标。为此, 各个国家根据自身的理论基础及实际情况, 开展了不同的机床可靠性研究, 并最终落实到了可靠性试验之上。本节从世界上主要机床国家的机床可靠性试验特点出发, 结合时间线进行了比较, 希望从中能获得一些我国机床发展可鉴之处。

1. 前苏联 (俄罗斯)

机床可靠性研究最早源于前苏联。

20世纪50年代, 前苏联金属切削机床科学试验研究院一些著名机床研究学者转向机床可靠性研究, 在参数故障模型、工艺可靠性及蒙特卡洛法参数可靠性预测等方面建立了可靠性技术的基本理论, 并由其中的代表A.C.普罗尼柯夫教授根据机床产品在结构、功能、外载荷等方面的特殊性, 于70年代建立了机床可靠性基本理论体系^[4]。图4为前苏联的可靠性保证概念及其实施分类。

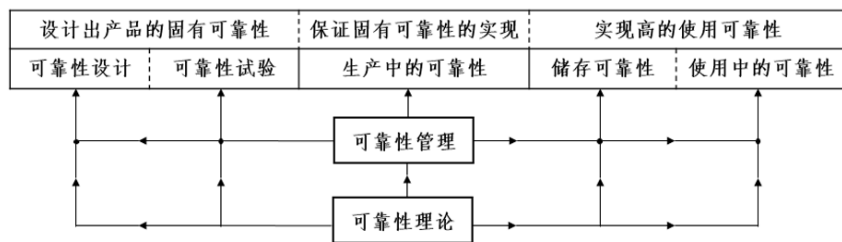


图4 前苏联的可靠性保证概念框图

20世纪80年代, 前苏联B.B.科希洛夫提出了技术使用系数的概念^[5], 指出在进行可靠性设计时应当适当考虑经济效益。同期一些专家学者在机床早期故障的排除方面提出进行工艺试运转和可靠性试验的方法, 包括可靠性设计、可靠性评估、可靠性管理、可靠性预测等多方面, 为数控机床在今后的可靠、智能、协调发展奠定了坚实的基础。

20世纪90年代以后, 俄罗斯学者对机床故障情况进行了收集分类, 并进行

了保护和预防等研究, 重点对数控机床加工精度进行控制和预报, 但未切实反映到机床可靠性中急需解决的关键问题, 有技术方向跑偏之嫌。

总体来说, 前苏联 (俄罗斯) 遵循“理论至上”的原则, 在机床可靠性研究方面提出了很多极有价值的理论与方法, 是机床可靠性试验的鼻祖, 缺点是过于集中于理论。另外, 在机床部件研究方面也取得了重要成果, 尤其电主轴、高速轴承等具有世界领先水平, 像瑞士、德国等国家均采用了该国成果。不过, 在数控系统等其它关键部件方面始终没有质的突破。

现在由于俄罗斯经济政策以及国际形势, 造成前苏联研究成果没有得到有效继承, 机床主要依赖进口。俄罗斯政府一直在试图改变这一状况, 并于2020年通过《2035年前俄罗斯机床工具工业发展战略》, 强调提高机床本地化水平, 增加国内市场占比, 扩大出口规模。

2. 美国

美国相较于前苏联, 注重结合汽车、轴承生产自动化需求以及领先于世界的电子、计算机技术, 在数控机床的主机设计、制造及数控系统方面基础雄厚, 并根据成果不断提出相应支持政策、标准及规范等, 以政策为引领, 在机床可靠性研究方面居于世界领先地位。当今美国不仅为航空航天等行业生产高性能数控机床, 也为中小企业生产廉价实用的数控机床。

从20世纪50年代初, 美国采用了单应力模拟的研制试验与鉴定试验。

20世纪60年代, 美国相继颁布一系列规定可靠性设计、建模和试验方法的标准, 之后通过相关实验和建立机床可靠性模型最终估算出可靠性MTBF, 为今后的机床可靠性试验奠定了雏形。随后J.T.Duane提出可靠性增长试验模型^[6], 美罗姆航展中心

提出了加速寿命试验方法^[7]。

20世纪70年代，美国采用综合应力模拟试验，并改进Duane模型为AMSAA模型，使其不仅用于可靠性增长试验数据跟踪，而且还可以进行可靠性预测^[8]。

20世纪80年代，美国从数控机床现场可靠性信息采集入手，建立可靠性信息数据库，开发可靠性评价和故障分析软件，确定故障分布规律和薄弱环节。1988年提出高加速寿命试验（HALT）和高加速应力筛选试验（HASS）^[9]。至此，形成完整加速试验技术体系，能更高效地激发产品缺陷，缩短试验周期，降低试验费用。如图5所示的就是加速寿命试验体系。



图5 加速寿命试验体系

20世纪90年代，提出加速应力试验法，并形成可靠性强化试验体系。

总之，作为前苏联的主要竞争对手，美国的机床可靠性研发之路与其相似，而且有突破。美国的特点是政府重视机床工业，不断提出机床发展方向、科研任务并提供充足的经费网罗世界人才，注重基础科研，因而在机床技术上不断创新。但是其更集中于机床可靠性试验方法以及试验体系研究上，忽略了应用技术的具体解决，走了一定的弯路，被更注重可靠性研究应用的日本等国家在20世纪80年代超越，目前已经有所转变。

3. 德国

德国是老牌工业强国，其机床开发思路一以贯之，保证了其长远的发展与优势。德国特别注重科学试验理论与实际相结合，基础科研与应用技术科研并重。

自19世纪开始，德国政府就将机床发展确定为战略性地位，放弃购买的政策，转为自己研发机床。直到现在，德国机床制造业仍然秉承这一思想。1907年创建世界首家机床实验室，并提出机床对比试验，据此进行机床制造与发展趋势研究。

在可靠性研发方面，德国讲究“实际”与“实效”，支持企业与大学科研部门合作，从理论与实践两方面，同时开展对用户产品、加工工艺、机床布局结构、数控机床的共性和特性问题的深入研究。通过对机床用户反馈的故障信息进行归类总结，开发了机床预测与机床诊断技术，并建立了机床可靠性研究体系和可靠性试验，将可靠性研发分析理论应用到机床的实际开发应用中，提高了机床的可靠性水平。德国更是在此基础上，首次提出了要提高机床可靠性，就必须重视部件可靠性的发展思路。

在机床可靠性管理体系方面，德国坚持“以人为本、师徒相传”，不断提高人员素质。制定严格的产品安全标准和法规，在机床产品制造、装配、检验的全过程都有质量和可靠性保障体系，高度重视产品售后故障信息反馈和可靠

性分析。

相比于美国和前苏联（俄罗斯），德国更加集中于“高、精、尖”方面；相比于日本，集中于“实用”方面，而且，随时注意将新技术融入到机床发展中来。经历了20世纪80年代日本机床的快速崛起，德国在CNC等方面及时进行了调整，很快恢复了世界领先地位。尤其是大型、重型、精密数控机床方面，以其良好的质量与性能而闻名于世。

总之，在机床可靠性研究及其试验方面，虽然我们未能查阅到德国的专门政策文件内容，但是在其基本国策、可靠性试验管理体系、研发政策等方面又处处体现出对可靠性的重视，值得中国当前机床行业参考。

4. 日本

作为机床制造业后起之秀的日本，以务实的观点和创新的行动让自己走在了机床业的前列。

从发展之初，日本政府对机床工业发展就积极出台规划、法规，提出日本数控机床行业的发展方向，确定“先仿后创”的发展思路，并提供充足研发经费，鼓励科研机构和企业大力发展数控机床^[10]。

20世纪80年代中期，日本以民用产品为主，大力推进机械可靠性的应用研究，成立了机械工业可靠性分科会，由企业可靠性推进人员和高等院校教授组成，研究可靠性在机械工业的引入、推进和开发。

在模仿方面，日本首先瞄准机床行业最先进的美国和德国。在人才培养及机床部件配套上学习德国，在质量管理、数控机床技术和数控系统的开发研究方面学习美国。同时，改进并发展两国的先进经验与成果，青出于蓝而胜于蓝。在产业政策上，先生产量大面广的中档数控机床占领世界广大市场，继而全力发展中小批柔性生产自动化的数控机床。这些都为日

本机床的持续发展奠定了良好基础。

在创新方面,日本最显著的成果是将故障模式、影响分析(FMEA)等技术^[11]成功引入机床行业中,这是机床可靠性研究重要成果之一,目前已普遍应用。他们将现场检测和故障诊断技术应用到机床可靠性试验研究中,通过对机床的故障模式与故障原因分析来保证机床的可靠性水平。

在机床可靠性应用方面,日本始终给予高度重视,并很好地处理经验与可靠性改进二者之间的关系,保证了其始终处于机床技术发展的最前沿。在机床设计方面采用以经验为主的设计规范,包括材料选择、结构形式、安全系数的确定等,实践证明这对于设计和原有产品相似的产品非常有效。这种规范的实现也保证了机床可靠性。另外,日本采用可靠性概率设计方法的结果与实物试验进行比较,总结经验,收集和积累机械可靠性数据以及故障分析案例,同时不断融入新技术,有效促进了机床可靠性水平的提高。通过可靠性分析进行反复的设计改进,是其机床可靠性试验的目的,也是其主要特征。

总之,日本这种后发先至的发展战略值得借鉴,尤其以实用性为主线的机床产业政策、发展方式、可靠性试验创新、故障统计数据积累等都得到了落实,保证了其机床产品的先进性。但是日本在机床可靠性研究方面公开发表的资料非常少,基本上是秘密研发,从一个侧面说明其对可靠性研究的重视程度,为我们的研发保密工作起到了提醒作用。

5. 英国

机床的起源地是英国。工业革命之后,英国机床制造业领先其它国家,但在20世纪60、70年代,英国对科技发展不重视,企业家不愿意将新兴科技运用到生产之中,工厂设备老化,机床制造业日益没落,逐渐退出了机床技术前沿,但是其在机床可靠性方面做出了一定的贡献。

首先,英国国家可靠性分析中心成立机械可靠性研究小组,汇编出版的《机械系统可靠性》一书,从失效模式、使用环境、故障性质、筛选效果、试验难度、维修方式和数据积累等7个方面,阐明了机械可靠性应用的重点,提出了几种机械系统可靠性的评估方法,并强调重视数据积累。

其次,借助1979年成立的欧洲可靠性数据库协会及其遍布欧洲的可靠性数据库交换协作网,收集大量可靠性数据。同时,通过数据库实现对数据的管理和分析等,如英国布拉德福大学Keller A. Z等采用模糊数学理论对数控机床的故障数据进行处理,伯明翰大学通过采集35台数控机床数据,确定数控机床整机的故障时间分布基本服从威布尔分布,得到分布模型形状参数。这些都为后来的可靠性评价提供了理论依据。

1991年英国出版的《以可靠性为中心的维修》^[12]一书,是当前大部分国家制定设备维修策略的参考依据。

总之,英国在机床可靠性试验方面的数学分析理论有所突破,并且注重数据积累及其应用,对于机床维修等起到了指导作用。然而,英国由于科技政策的落后,造成了产业发展没有很好延续,退出了机床制造业强国之列,值得我们反面加以思考。

另外,如瑞士、意大利、波兰、捷克等国家机床也各具特色,但是大都与前面几个国家的情况大同小异,在此不再赘述。

三、国内机床可靠性试验发展历程

中国机床起步较晚,第一台数控机床是1958年参考前苏联技术指标等搭建完成的,如图6所示,机床可靠性技术研究则更晚。

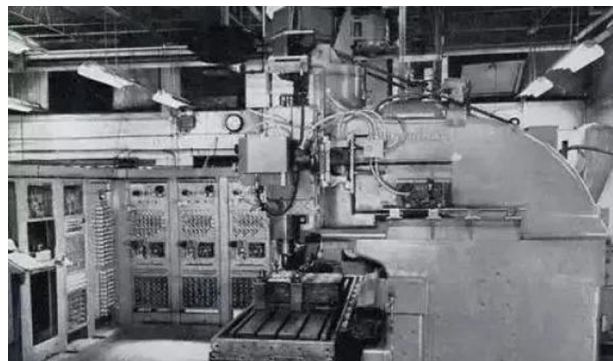


图6 中国第一台数控机床

20世纪60年代,我国开始对电子元器件的可靠性展开研究;70年代初,加速寿命试验技术进入我国,掀起了统计学与可靠性研究领域的一次研究热潮,该项试验技术也是我国目前应用较为成功的典范。

20世纪80年代末,我国开始展开机床可靠性研究。90年代初,数控机床可靠性的基础研究工作被列入国家重点科技攻关项目。在“八五”期间,作为最早进行这方面研究工作的北京机床研究所,对数控机床骨干企业典型产品进行可靠性摸底,得到国外机床可靠性MTBF为300~500h、国内机床可靠性MTBF为200~300h的结论,并取得了一些理论和标准规范成果。如1990年组织制定了“JB/GQ1153-1990 数控车床可靠性评定方法”,1992年北京机床研究所蔡亲民对数控机床可靠性的重要性进行阐述并研究了数控机床及其系统可靠性特征量^[13],1993年组织制定了“JB/T6610-1993 金属切削机床可靠性评定方法”等标准。

“九五”、“十五”期间,我国先后组织北京机床研

究所（国家机床质量监督检验中心）、吉林大学、沈阳机床厂、大连机床厂等多家单位进行数控机床可靠性基础研究和联合攻关，取得了一定的成果，摸索出了可靠性研究的方式方法，积累了实践经验。例如，北京机床研究所完成了“九五”科技攻关项目“数控机床及数控系统相关质量控制规范和可靠性增长技术的研究”（1997年~2000年），“十五”科技攻关项目“数控机床可靠性评定规范”（2001年~2003年）。除此之外，2004年由国家机床质量监督检验中心牵头执行了863计划课题“数控机床、数控系统可靠性测试技术平台的研究和开发”（2004年~2005年），通过测评，数控机床可靠性MTBF由200~300h提高到500~600h，进一步提高了机床可靠性。

“十一五”计划中的2009年，国家确立“高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项（简称04专项），并在此期间部署13个关于数控机床可靠性课题。其中，2009年安排6项有关主机可靠性技术研究课题，内容包括可靠性设计、可靠性试验、可靠性管理体系和可靠性评测技术，以及数控机床全寿命周期可靠性研究，涉及到数控机床可靠性的设计、试验、管理和指标考核等；2010年安排4项关键功能部件、1项数控系统和2项数控机床整机可靠性研究课题，重点解决功能部件和数控系统可靠性问题，以及数控机床整机考核方法研究。专项支持的大部分主机可靠性MTBF达到900h以上，相对提高50%以上。尤其是在人才培养和机构建设方面，有了长足的进步，建立了专业的数控机床可靠性技术创新团队，科研院所和大学等逐渐成为主力军，其中以国家机床质量监督检验中心（北京机床研究所）、吉林大学、重庆大学、东北大学等为主，使机床可靠性研发成为高等院校机械工程领域的“显学”，在一定程度上带动了相关学科的发展。这也表明，我国开始具备开发数控机床全生命周期可靠性各项实用技术的能力与基础，也具备研发模拟实际工况的关键功能部件可靠性试验系统的能力。

“十二五”时期，04专项继续得以展开，部署了6个关于数控机床可靠性课题。其中2011年布置1项有关数控高速冲压设备可靠性增长技术研究课题；2012年布置1项有关刀具可靠性设计制造的研究课题；2013年，针对数控车床、加工中心和数控磨床，布置3项“千台数控机床可靠性提升工程”的可靠性技术应用研究课题；2014年布置1项有关重型数控机床可靠性试验与评价技术研究的课题。研发的中高档数控机床和数控车床等新产品可靠性MTBF分别超过1500h和1700h，改进和研发的高速电主轴、数控转塔刀架和刀库机械手等关键功能部件的可靠性

MTBF均提高50%以上。与以往不同的是，研发形式以企业牵头，强调产、学、研、用相结合，确保前期研究的可靠性技术和成果落实到企业产品中。

“十三五”期间继续延续04专项研究与应用，2016年布置3项研究课题，分别是“数控机床可靠性快速试验技术”、“机床制造过程可靠性保障技术”和“国产高档数控系统可靠性第三方测试及可靠性增长研究”；2019年布置1项研究课题“数控齿轮机床可靠性试验与评价技术”。研究单位主要有国家机床质量监督检验中心、清华大学、重庆大学、北京航空航天大学 and 吉林大学。同时以10大标志性成果实际应用为主线，以高精高效五轴加工中心、超重型数控机床、大型压力机等为代表的创新成果逐步进入重要用户行业。高档数控机床可靠性MTBF实现从500h到1600h增长，部分达到2000h，精度整体提高20%。

从经费安排看，如图7所示，04专项中机床可靠性方面共支持23个项目，投入经费34713.95万元，其中专项经费24683.95万元，可以看出国家对此所给予的支持力度。

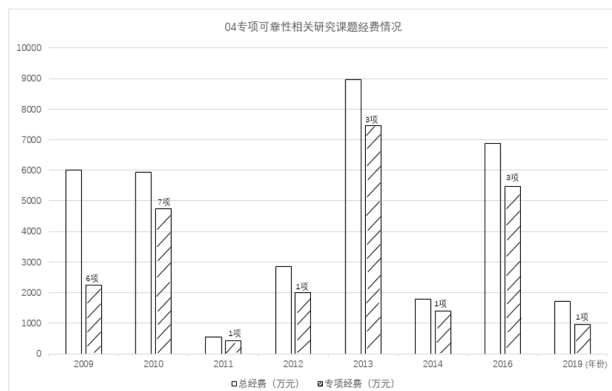


图7 04专项中跨年经费支持情况

04专项取得的成果显著，其中国家机床质量监督检验中心建立了高端数控机床可靠性试验检测基地（如图8所示），搭建了数控机床可靠性快速试验测评系统（如图9所示），面向主轴、丝杠、导轨、刀库等关键部件分别建立了可靠性试验平台（如图10所示），为进一步开展机床可靠性研究工作打下了良好的软硬件基础。



图8 高端数控机床可靠性试验检测基地

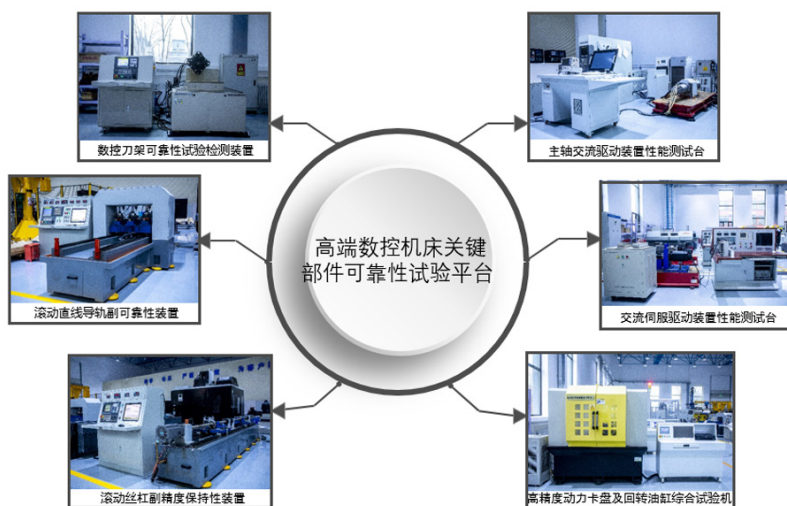


图10 高端数控机床关键部件可靠性试验平台

总之，04专项机床可靠性方面的研究体现出了我国研发制度与体系的特点，反映出“集中力量办大事”的优势，取得的成果也较为集中，包括数控机床可靠性试验技术研究与应用、数控机床制造保障技术研究与应用、国产高档数控系统可靠性第三方测试及可靠性增长研究等，为我国今后机床行业的发展与研究探索出了一种基本模式。这种发展方式也逐渐为其他国家所重视，例如俄罗斯机床工业发展五年计划（2010年~2015年）就是参考了我国的科技研发模式。

四、可靠性试验为国产机床保驾护航

1. 成果显著，前景可期

从以上两节可以看到，各个国家机床行业发展，无不以可靠性研究和可靠性试验为基本内容，而且可靠性研究的重视程度直接决定了本国机床发展的趋势与质量。此外，不同国家有着不同的国情，在机床发展的不同阶段都需要制

定相应的政策加以指导。其中，尤其值得借鉴的是德国的“以我为主”、美国的“理论研究”、日本的“先仿后创”等主要形式。

经过多年努力，我国机床可靠性研究利用标准化方法，使可靠性、维修性与保障性（RMS）成功应用于机床制造，初步建立了较为完整的机床可靠性标准体系，对我国提高机床效能、寿命起到了重要作用。同时，通过国家大力的政策扶持，使国产机床质量得到了很大提升。

（1）建立了一支专业化、集成化的可靠性研发人才队伍与团队，使机床可靠性研究成为机械工程领域研究的一个热点；而且机床企业从领导到员工的产品可靠性意识普遍增强，培养了一批初具可靠性知识的和技术和管理人才。

（2）积累了一批数控机床的可靠性与维修性数据，这是未来可靠性研发的重要基础；摸索并确立了数控机床可靠性技术研究与工程应用技术路线，为今后的相关技术应用订立了范例。

（3）开发了多项数控机床可靠性设计、可靠性试验和可靠性制造技术，搭建了多种用于功能部件、数控系统可靠性试验的系统，摸清了一些规律。

（4）研制了较为完整的数控机床可靠性技术规范和企业标准，使机床企业在今后的生产制造中“有法可依”。

以上研究成果为今后机床行业发展打下了良好技术基础。而且，当前国内经济处于上升期，无论机床需求、资金供给，还是政策环境都处于最佳阶段，未来前景光明，也是机床技术人员大展宏图的时刻。

2. 审慎乐观，政策支持

目前，我们虽然具备了一定的物质基础和技术条件，但是仍然要从国

外机床可靠性发展中认清经验教训，为下一步工作布局谋篇。

(1) 确定清晰发展思路，保证政策稳定

借鉴德国注重长期目标，将突出可靠性研究作为机床发展的重中之重，而不能瞻之在前忽焉在后。同时，从国内过去的机床发展历程看，国内机床可靠性研究很大程度上在走美国20世纪80年代的老路，即重视理论和试验体系的构建而忽略可靠性技术实用性，而这恰恰是美国落后日本的主要原因。所以，要在可靠性理论研究基础上，更加注重其实用性，而且要贯彻到底。

另外，国产高端机床部分指标仍然低于国外的高端产品，这与我国产业政策追求循序渐进有关，后期仍然需要在前面取得的成果基础上延续发展，制定支持政策和指标，达到研发的长期性和可持续性。

(2) 注重理论方法创新，寻求赛道超车

国内机床可靠性试验研究一直在追随国外的研究思路和方法，追求“被动事后改进”，可靠性理论表面看成果很多，实际上并没有质的突破，只是在算法效率等方面有所超越，没有如日本那种创新引领，因此亟待构建全新的可靠性理论体系。

随着科技发展，对数控机床可靠性的研究必将转向“主动试验暴露”，这实际上为我国机床发展提供了良好契机。如何实现赛道超车，必须抓住当前新技术的应用，如大数据、数字孪生、智能硬件、通讯技术等，在研发手段上跳出当前技术范畴，以全新的视角看待机床，才能建立新的研发体系和试验方法、标准与规范。

(3) 强调成果落在实处，坚持跟踪统计

04专项中强调机床可靠性研究

要与企业应用相结合，但是部分研究成果还是多以论文、专利和标准等形式呈现。而且由于高校和科研院所等本身与企业的联系不紧密，在管理体系上的成果和建议在企业中往往容易被忽视，甚至被当成影响企业生产的障碍。另外，从学习德国和日本先进经验而言，其重视售后故障数据统计的严密性与严谨性没有在04专项中得到充分体现。这主要是因为我们的研发项目执行时间短，结束后相关研究也随之停止，所研发的机床甚至于还没有成为商品，更不用说后面的使用跟踪评价。此外，类似西欧等国建立的遍布欧洲的可靠性数据库交换协作网以及美国的规模数据采集网络，国内一直没有建立起来。

对于这些现象，建议在制定产业政策时以结果评价为导向，保证即便研发项目结束，也要在后续制定扶持政策和投入资金进行长期跟踪统计分析，监督和鼓励企业将可靠性试验研究作为一项长期日常工作，在管理保障体系、人员岗位设置、基础研究与实际结合方面继续下大功夫、苦功夫、长功夫，让可靠性增长真正落到实处。

(4) 强化部件研究地位，推动联合攻关

04专项在数控机床、数控系统以及关键功能部件等可靠性研究方面均给予了支持，如前所述也取得了很多成果，但感觉相互间缺乏有效的传递和链接，致使在应用过程中存在一定脱节，这或许是造成可靠性研究成果没有得到最终落实的原因之一。零部件是构成机床的基础，其可靠性对整机可靠性的提升有着至关重要的作用。因此我们需要学习日本和德国，注重部件可靠性研究地位，提高整机和零部件生产制造企业在可靠性项目研发中的关联性，保障可靠性研究的有效性，支撑机床产业持续健康发展。

国产机床发展任重而道远，从现在至将来，要提高我国机床市场竞争力，需要抓住机床可靠性是机床发展核心这一本质，重视目前研究中出现的一些问题，着力研究理论、方法及可靠性试验方面的创新，大力提高机床核心指标及其竞争力，为我国的机床发展保驾护航。□

参考文献

- [1] GB/T 3187-94. 中华人民共和国国家标准可靠性维修性术语[S]. 北京: 中国标准出版社, 1994.
- [2] 张维竞. 舰船动力装置故障诊断与可靠性[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2013.
- [3] 中国电子技术标准化研究所. 可靠性试验用表[M]. 北京: 国防工业出版社, 1987.
- [4] (苏) A.C. 普罗尼科夫. 数控机床的精度与可靠性[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987.
- [5] (苏) B.B. 科希洛夫. 装配工艺学原理与自动装配设备[M]. 北京: 中国农业机械出版社, 1983.
- [6] 刘俊荣, 陈卫卫, 李星. 基于Duane曲线的可靠性增长模型[J]. 环境技术, 2017, 35(03): 43-47.
- [7] 刘展. 加速寿命试验的统计分析 with 优化设计[M]. 北京: 经济管理出版社, 2019.
- [8] 吴和成, 胡琳. 基于AMSAA模型的成型产品可靠性综合评估方法研究[J]. 装备环境工程, 2019, 16(05): 106-110.
- [9] (美) 哈里·W. 迈克莱. 加速可靠性技术(第2版)[M]. 北京: 航空工业出版社, 2014.
- [10] 田正. 日本中小企业非研发创新政策支持体系研究——以“机振法”产业政策体系为例[J]. 现代日本经济, 2021(05): 54-67.
- [11] (日) 盐见弘, 岛冈淳, 石山敬幸. 故障模式和影响分析与故障树分析的应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987.
- [12] (英) J·莫布雷(John Moubray). 以可靠性为中心的维修[M]. 北京: 机械工业出版社, 1995.
- [13] 蔡亲民. 试论数控机床及数控系统可靠性的特征量[J]. 机床, 1992(07): 49-54.

机床核心功能部件的自主研发与创新发展

通用技术集团大连机床有限责任公司 周吉贞

数控机床核心功能部件是工业母机的重要组成部分，其中电主轴、滚动功能部件（滚珠丝杠副、直线导轨副）、复合铣头、刀库、刀塔等核心部件直接影响着主机的技术水平和速度，掌握机床核心功能部件的自主研发与创新，就是掌握了工业母机的研制“秘籍”。做强核心功能部件是我国数控机床和装备制造发展进程中的重要环节和必经阶段。

一、数控机床与功能部件的现状阐述

数控机床被称为工业母机。发展高档数控机床，既是工业和信息化领域供给侧结构性改革、加快推进制造强国建设的客观需要，也是实现军民融合深度发展战略、确保国家安全的紧迫要求。数控机床行业技术水平和产品质量是衡量一个国家装备制造业发展水平的重要标志，而数控机床核心功能部件技术水平高低、性能优劣以及配套水平，直接影响数控机床的技术水平和性能，也制约着数控机床的发展速度。因此提高我国的数控机床的发展水平成为目前最需要解决的问题，而核心功能部件的自主研发与创新成为目前机床发展的当务之急。

数控机床是实现国家制造业和国防工业发展的必备工具之一，但是目前国内的机床水平总体略低于国外的发展水平，高端数控机床仍需要进口，而数控机床功能部件的发展是制约数控机床发展的主要因素之一。从全球水平看，我国是数控机床功能部件制造厂商较多的大国，但不是强国，存在品种单一、价值偏低、分布不合理、产业化程度低、技术水平不高、总产量和总产值不高的问题。

从产品的指标水平上看，我国的数控机床核心功能部件的运动稳定性、产品可靠性等综合方面的性能与发达国家同规格的知名品牌存在一定差距，但在发展中国家之上。近年来，国内重点企业部分核心功能部件产品技术指

标达到或接近国外先进水平。

从产业链看，制约我国高端数控机床发展的最大短板就是关键功能部件高度依赖进口，依赖度达80%以上。其中功能部件是实现机床的重要组成部分，直接影响零件加工精度、质量和效率。由于国内生产企业的规模不健全，适应性和满足度达不到市场需求，缺乏关键功能部件的核心技术，尤其是高档数控机床的功能部件产品需求，已成为制约工业母机发展的瓶颈。

二、机床关键功能部件产品介绍

1. 电主轴、铣头类产品

主轴对于超精密机床来说就是机床的“心脏”，对于精密机床在生产加工中起到了十分重要的作用。通用技术大连机床主轴系列产品涵盖公司全机型主机产品的配套，产品类型有：皮带传动主轴，齿轮传动主轴，直联主轴及电主轴，产品规格数量达100余种，主轴锥孔跳动精度 $\leq 2\mu\text{m}$ ，精度覆盖率达95%以上，有3种规格电主轴产品主要技术指标达到国际先进水平。2021年通用技术集团大连机床有限责任公司研制出“智能化高速高精电主轴产品”和“直驱式A/C数控双摆角万能铣头”两种核心功能部件产品。同时，通用技术大连机床是国内首批可以自己生产制造高速主轴HSK接口的生产单位。

（1）智能化高速高精电主轴

智能化高速高精电主轴产品突破了高速轴承润滑技术、冷却系统技术、自动预紧技术、振动监测技术、制造及装配技术、高速动平衡技术、可靠性技术等多项技术难题，成功研制出最高转速可达30000r/min、额定功率为120kW及主轴跳动精度 $< 1\mu\text{m}$ 的电主轴产品，能够与国际知名品牌GMN、KESSLER的电主轴产品技术指标进行

对标, 其主要技术指标达到国际先进水平。此款产品可用于五轴头、精密加工中心等高端设备上, 尤其在加工大型铝制航空航天结构件的应用上, 能够实现高材料去除率、高进给率和高响应性。

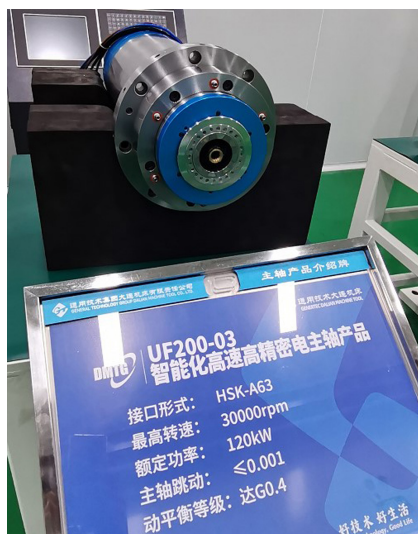


图1 UF200系列高速电主轴产品

(2) 直驱式A/C数控双摆角万能铣头

直驱式A/C数控双摆角万能铣头产品攻克了夹紧重复定位精度技术、双摆直驱技术、动态精度补偿技术、制造及装配技术、高速动平衡技术、可靠性技术等技术困难, 成功研制出最大扭矩可达 $2000\text{N}\cdot\text{m}$ 、C轴摆角范围 $\pm 360^\circ$ 、C轴定位精度 0.0005° 、A轴摆角范围 $\pm 110^\circ$ 、A轴定位精度 0.0012° 的铣头产品。此款铣头可应用于龙门类加工中心、翻版铣加工中心等高端五轴类数控机床。此产品具备大扭矩, 精度高的特点, 能够与国际知名品牌GMN、cytec进行对标, 其主要技术指标达到了国际先进水平。



图2 QM350系列“直驱式A/C数控双摆角万能铣头”产品

2. 滚动功能部件产品 (滚珠丝杠副、直线导轨副)

历经15年之久, 通用技术大连机床滚珠丝杠副和直线导轨副产品, 现已形成系列化产品型谱, 拥有各种品类产品技术储备、产品加工量产能力, 同时以高速、高精、高加速度为产品研发方向, 重点配套机床行业。

滚珠丝杠副产品多达29种型号, 精度等级可达P2级。常规批量生产传统内循环滚珠丝杠副、传统插管式外循环滚珠丝杠副、自主研发内循环滚珠丝杠副, 直径从 $25\sim 63\text{mm}$, 导程 $4\sim 20\text{mm}$, DN值可达8万; 三维插管式外循环滚珠丝杠副, 直径从 $25\sim 63\text{mm}$, 导程 $8\sim 20\text{mm}$, DN值可达16万; 大导程端面循环滚珠丝杠副打破了日本、中国台湾等丝杠厂对国内同类市场的垄断, 该型号丝杠主要用于自动化行业。

该产品性能上对标国际先进企业日本THK、NSK滚珠丝杠副产品, 精度等级(max) 1级, DN值可达130000, 最高转速 4500r/min 。

(1) 滚珠丝杠副产品

(a) GD系列内循环滚珠丝杠副产品。产品的主要技术参数: 公称直径 $20\sim 80\text{mm}$, 导程 $4\sim 20\text{mm}$, 精度等级批量P2级, 部分达到P1级, DN值可达80000, 最高转速 2000r/min , 噪音 $\leq 76\text{dB}$, 单根最大长度 4m 。

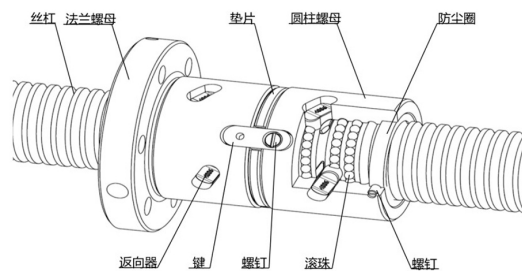


图3 内循环滚珠丝杠副产品

(b) CDM系列二维导管式循环滚珠丝杠副产品。产品的主要技术参数: 公称直径 $32\sim 63\text{mm}$, 导程 $4\sim 20\text{mm}$, 精度等级批量P2级, 部分达到P1级, DN值可达100000, 最高转速 2500r/min , 噪音 $\leq 76\text{dB}$, 单根最大长度 4m 。

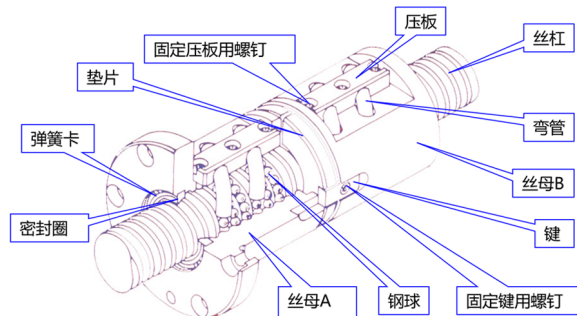


图4 二维导管式外循环滚珠丝杠副产品

(c) DGD系列端面循环滚珠丝杠副产品。产品完成系列化开发后,主要技术参数:公称直径:25~50mm,导程8~20mm,精度等级批量P2级,部分达到P1级,DN值可达120000,最高转速3500r/min,噪音 $\leq 76\text{db}$,单根最大长度4m。

端面循环滚珠丝杠副结构示意图

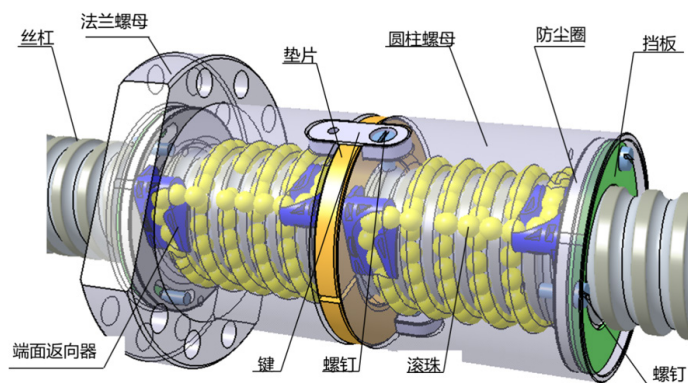


图5 DGD系列端面循环滚珠丝杠副

(d) 三维导珠管式外循环滚珠丝杠副。产品完成系列化开发后,主要技术参数:公称直径:32~50mm,导程10~20mm,精度等级批量P2级,部分达到P1级,Dn值可达140000,最高转速3500r/min,噪音 $\leq 76\text{db}$,单根最大长度4m。

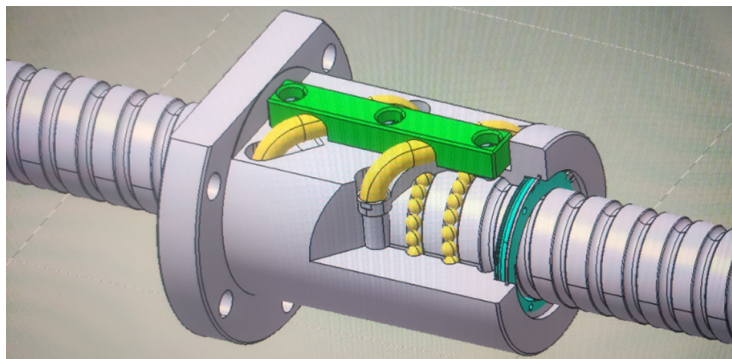


图6 三维导珠管式外循环滚珠丝杠副

(2) 直线导轨副产品

滚动直线导轨副产品多达21种型号,规格涵盖15、20、25、30、35、45、55、65等,精度等级可达P2级,最大加速度 2 m/s^2 。其中LR系列滚柱重载直线导轨副规格涵盖了LR35、45、55、65、85等,主要应用于要求高速度、高精度、高刚性、高载荷的高端数控机床及重型机械。其产品特点:

(a) 采用四方向等载荷、“O”形立交桥式 45° 接触,实现上下左右均具有高刚性、大载荷、大扭矩。

(b) 履带式保持链静音结构,实现高速、重载、静音。

(c) 双密封结构,实现密封、减震双重功能。

(d) 人性化接口,实现多润滑通道设置。

(e) LRZ自润滑组件,实现永久润滑、绿色环保。

(f) 单根制造长度:6000mm。

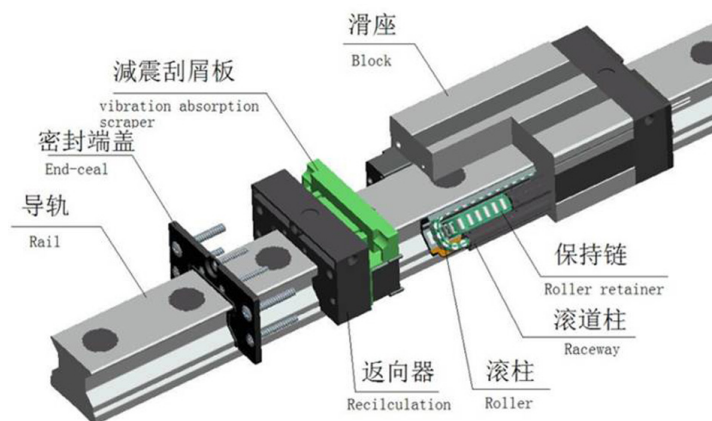


图7 LR系列滚柱直线导轨副产品

三、中国数控机床行业发展前景及趋势预测

根据“十四五”规划,我国将继续推动制造业优化升级,培育先进制造业集群,推动高端数控机床等产业创新发展;发展壮大战略性新兴产业,培育先导性和支柱性产业,推动战略性新兴产业融合化、集群化、生态化发展,战略性新兴产业增加值占GDP的目标比重超过17%。

当前我国正处于由制造大国向制造强国转型的重要阶段,在新一轮的产业升级中,高端制造业会逐步取代简单制造业,制造业也将从劳动密集型产业逐渐转变为技术密集型产业。随着中国制造业加速转型,精密模具、新能源、航空航天、轨道交通、3D打印、生物医药等新兴产业迅速崛起,其生产制造过程高度依赖数控机床等智能制造装备,这将成为数控机床行业新的增长点。预计到2026年,中国数控机床市场规模将突破5000亿元。

我国数控机床将向智能化、网络化、柔性化方向发展。根据我国政策规划和数控机床行业的发展情况,未来我国数控机床的发展趋势和特点将呈现为:高档数控机床需求旺盛、成套设备越加普遍、国产品牌持续崛起等。综合来看,我国数控机床市场空间较大,未来发展潜力可观。

高档数控机床需求旺盛

中国机床市场将向自动化成套、客户定制化和普遍的换挡升级方向发展,产品由普通机床向数控机床、由低档数控机床向中高档数控机床升级。

向智能化、网络化、柔性化方向深入

工业4.0要求通过智慧工厂、智能自动化生产线、物联网等工具,实现生产和流通领域的智能化,进而为消费者提供高度个性化的产品。

**多轴联动数控机床是未来发展趋势**

以五轴联动加工中心为代表的高档数控机床在加工方面有着适用范围广、加工质量精、工作效率高等特点,符合未来机床的发展趋势。

国产品牌持续崛起

国内数控机床企业借助我国制造业转型、中高档数控机床需求上升、进口替代空间巨大等有利市场条件,市场份额持续提升。

“数控机床+工业机器人”等成套设备越加普遍

无人化车间将以“数控机床+工业机器人”成套设备出现,解决劳动力生产成本急剧上升的痛点。

“数控机床+工业机器人”等成套设备的普及将成为未来行业发展的重要特点。

图8 数控机床行业发展趋势

四、数控机床功能部件产业的发展趋势

高精度主轴和滚动功能部件是数控机床的重要部分,对数控机床产品质量和水平起着至关重要的作用。

在过去的几十年中,国内各企业都在致力于数控机床高精度主轴和滚动功能部件的发展,但由于各种原因及西方国家的技术封锁,国产滚动部件水平基本保持在P2级以下水平,大部分产品在P3~P5级,难以满足中高端机床需求。此外,由于基础材料科学、加工工艺、结构设计上的差距,使国产功能部件(电主轴、丝杠、导轨、转台)的品种、数量、档次都不能满足主机配套要求,中档功能部件市场占有率不足50%,高档产品90%以上依靠进口,高档零部件和功能部件基本被德国、日本、瑞士、美国等国外企业控制。再有,由于中国机床行业的开放性和竞争性,导致国产机床自主

化虽有进步,但由于技术研发投入少,与国际先进水平差距进一步拉大,有专家估计这一差距在20年左右。

《机床工具行业“十四五”发展规划纲要》明确提出:中高端机床工具产品方面要实现产业基础高级化和产业链现代化,产业布局均衡合理;国产数控机床、功能部件、切削刀具、数控系统等基本具备支撑和满足国内经济发展需求的能力;关键机床工具产品接近或达到国际先进水平,国产中高端产品在市场上的比重稳步提升;培育出一批拥有自主知识产权和具有国际竞争力的品牌企业和产品。关键功能部件行业应对标中高端需求,研制一批中高端数控机床,自动化、智能化的制造单元、生产线、制造车间和工厂;自主提供中高端数控机床产品所需的主要关键核心功能部件。

因此,必须加快推进中高端数控机床功能部件自主研发和创新,助力机床产业高质量健康发展。□

资讯

汇专超声绿色机床及部件已销往全球70个国家和地区

日前,50台汇专超声绿色钻攻中心T-500如期发往越南。据悉,汇专超声绿色系列产品已销往瑞士、意大利、韩国、越南、印度、保加利亚、斯洛文尼亚等全球六大洲70个国家和地区。

近年来,汇专践行绿色发展理念,率先将超声加工技

术和绿色加工技术有机融合,突破硬脆性材料、难切削金属材料和复合材料加工难题,形成具有自主知识产权的超声绿色数控机床产品体系,在消费电子、航空航天、半导体、汽车、医疗和通用精密制造等领域广泛使用。

机床共性技术的现状及发展趋势

沈阳机床（集团）有限责任公司 张 扬

制造业是国民经济主体，是立国之本、兴国之器、强国之基。2013年在汉诺威工业博览会上，德国正式推出“工业4.0”战略计划，核心目的是提高德国工业竞争力，在新一轮工业革命中占领先机。随后，我国在2015年5月印发了全面推进实施制造强国的战略文件——《中国制造2025》，推进信息化与工业化深度融合，强化工业基础能力，成为我国实施制造强国战略第一个十年的行动纲领。2021年，我国又发布了“十四五”智能制造发展规划，对制造行业发展提出更高的要求，即实现数字化、智能化。高端数控机床作为工业母机，是构成制造业价值生成的基础，处于工业现代化产业链的核心环节，对提高生产力、推动生产方式变革具有重要作用。

一、现状及差距

当前，我国正处于制造大国向制造强国升级转变的关键时期，国内市场对于中高档数控机床需求比率逐年增高。据统计，2021年国内数控机床产量达60.2万台，数控化率达44.9%，而2011年该比率仅为29.5%，一定程度上反映了国内用户对机床装备性能指标要求的不断提高。与此同时，在中高端领域，相比国际领先水平，国产机床仍存在一定技术差距，成为制约国产机床高质量发展短板。主要体现在以下三方面：

1. 正向研发能力较弱

目前国产数控机床研发模式相对落后，基本处于跟随式研发阶段。企业层面产品设计依赖研发人员经验和主观判断，正向设计能力不足。对制约机床性能的系统性问题

（如进给轴刚度及动态性能、整机热稳定性、残余应力对机床精度影响及抑制措施等）缺少理论定量分析，也就难以提出优化改进方案。

2. 机床精度保持较差

精度保持性是衡量机床性能的关键指标，反映了机床在正常使用周期内的服役性能。在这方面国产机床与德国、日本先进水平存在显著差距。以德国WALDRICHCOBURG公司龙门加工中心产品为例，其使用10年后精度保持率可达到95%，而目前国产设备使用10年期精度保持率还难以达到85%。影响机床精度保持性的主要因素是机床结构件铸造（焊接）、加工以及装配过程中产生的残余应力，这些应力在长期均化释放过程中使整机发生不规则变形，最终影响机床精度。

3. 设备智能化程度较低

近年来，国际顶尖机床制造商在数控系统智能化方面做了大量工作。以日本OKUMA机床为例，其自研OSP数控系统中就集成了多项智能控制技术，包括：Thermo Friendly Concept、Collision Avoidance System、Machining NAVI、5-Axis Tuning、SERVONAVI等，构建起了OKUMA机床产品的智能控制体系。国产机床在高端数控系统方面依赖进口，功能局限于系统制造提供的标准功能模块，停留在自动化阶段，与智能化差距较大。

以上短板体现了国产数控机床领域在共性技术研究以及技术成果转化应用方面的不足。因此，要以共性技术研究作为切入点，鼓励研究成果工程化应用，实现企业技术创新。

二、基础技术攻关

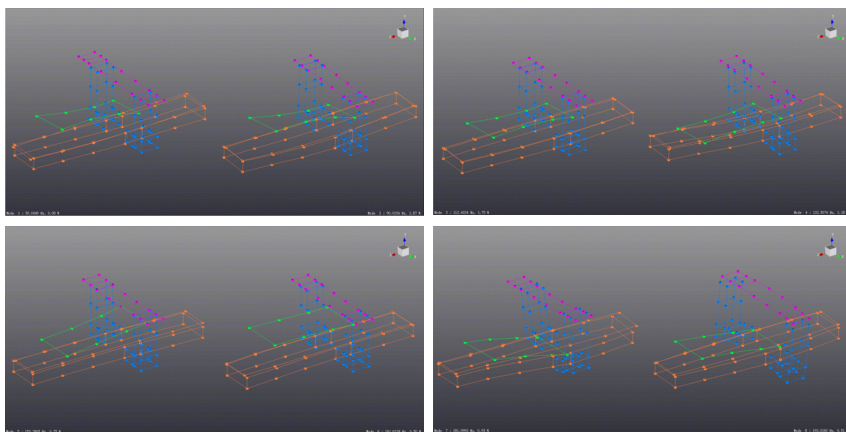
高校及科研院所的优势体现在理论研究层面，企业具备应用验证及成果转化条件，而用户是机床使用效果的最终评价方。通过产学研用深度融合，优势互补，针对以下基础共性问题开展深入攻关，并形成“研究—应用—验证—改进”闭环，提升国产数控机床技术水平。

1. 机床空间误差分离及误差源灵敏度分析

空间定位精度作为机床各类误差的综合作用结果，常用于高精度数控加工设备的误差评定。仅就几何误差而言，伺服轴直线度、平行度、垂直度、角度偏差、定位及重复定位精度，对于空间定位误差都具有重要影响。然而，目前各种误差对空间精度影响的贡献度缺少定量的评判依据，导致精密机床生产过程中，我们不知道应重点关注哪（几）项几何精度，才能达到预期的空间精度指标。因此，有必要进行误差分离及误差源灵敏度分析相关研究。通过建立不同构型机床的误差传递模型，获得空间定位误差与空间位置的多元函数，引入误差随机变量，采用Monte Carlo方法进行灵敏度测试，并结合实际测试数据验证误差分析模型，通过迭代修正得到与实际情况相吻合的灵敏度分析模型，进而指导实际生产。

2. 机床振动特性分析及振动抑制

数控机床在工作过程中会受到来自内部和外部的交变载荷（即激振力），使机床产生受迫振动。当激振力的频率与机床固有频率接近时，机床将发生“共振”现象，严重影响工件加工质量。对于高精度、高转速机床来说，其主轴转速范围可能会跨越数个共振区。因此，开展整机振动特性（固有频率及振型）研究，并对振动抑制方法（例如填砂、灌注树脂、优化筋腔布局、接触质量优化）开展研究具有深远意义。



机床实测固有频率及振型

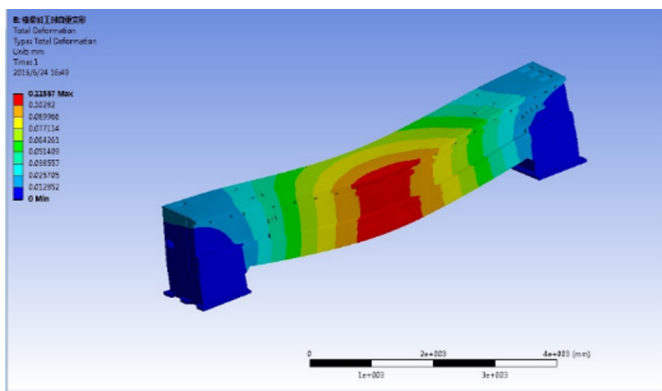
3. 机床温度场及热变形模型的预测及验证

对于精密机床，结构热变形对机床误差的影响巨大，根据经验可达到总误差的40%~70%。机床结构特征及热传导特性千差万别，导致机床热变形复杂，计算及预测难度大。误差通常采用激光跟踪（干涉）仪、双球规、R-test测量仪等装置测量，并结合温度传感器数据建立误差对温度及空间位置的多元函

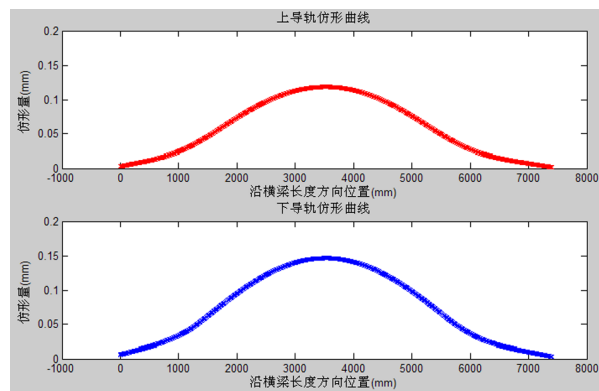
数，形成温度补偿模型。虽然测量结果真实可靠，但仪器测量数据分析提取过程复杂，且缺乏通用性。借助有限元分析及研究院测试条件，采用热力耦合分析手段，机床热变形状况进行预测，并与实测数据对比分析差异，并优化分析模型，可以为机床在热源影响下产生复杂变形的理论研究探讨提供可行性。

4. 以切削机理研究为基础的机床结构优化

切削过程是加工设备与被加工零件之间复杂的能力传递过程。受刀具规格（几何尺寸、切削刃形式及数量）、加工参数（主轴转速、进给速度、加速度、切削深度）、机床布局及刚性、零件材质等多方面因素影响，实际切削过程的主轴扭矩和各轴进给力（扭矩）是时刻变化的。尤其是面向空间复杂曲面加工的五轴类机床，伺服轴频繁做加减速运动，给主轴扭矩和各轴驱动力带来了巨大的不确定性。目前在伺服轴驱动计算过程中，对于切削力的评估仍然停留在经验公式或者估算层面。这种方法适用于平稳切削过程（如匀速铣平面），但是在五轴加工领域暴露出明显缺陷。缺少对切削力的准确评估导致两个极端：一是盲目提高驱动部件规格导致浪费，一是对切削力估计不足导致驱动能力不足，加工质量不达标。因此，进一步提升机床加工性能必须从源头出发，开展切削机理研究。通过理论研究与实际测试相结合的方式，采用显式动力学分析方法对复杂切削过程中的切削力进行模拟计算并与实际测量数据对比，完善切削模型。解耦得到各伺服轴的（角）加速度曲线，综合控制理论研究成果，对机床单轴驱动方案、整机结构刚性，以及伺服轴间匹配性进行评估并提出改进建议。



横梁悬垂变形分析及反变形加工



5. 新材料应用验证

用户需求的不断提高推动机床行业技术水平的不断进步，其中新材料在数控机床中的应用是热门发展方向。国内相关科研院所在新材料研究应用方面做了大量工作，但缺少产业化应用条件；机床企业对高性能（高刚性、低密度、低导热系数、低线胀系数）新材料的使用需求广阔，但缺少新材料来源。因此，打通供需通道，使新兴材料发挥最大效能，对于促进产业化应用，提升产品技术水平具有积极意义。而连接供需的桥梁应该由企业研究机构充当，一方面与科研院所对接，明确需求；另一方面进行新材料概念机试制验证，并推向生产端，实现产业化应用。

三、前沿技术突破

在高端机床领域，针对航空航天、船舶制造、国防军工等重点行业关键用户，开展客户化定制功能的研制开发，一方面更好地服务国家战略需求，另一方面以点带面发挥示范效应，进一步提升行业技术水平。涉及技术主要包括以下几项。

1. 大型精密机床空间误差实时补偿技术

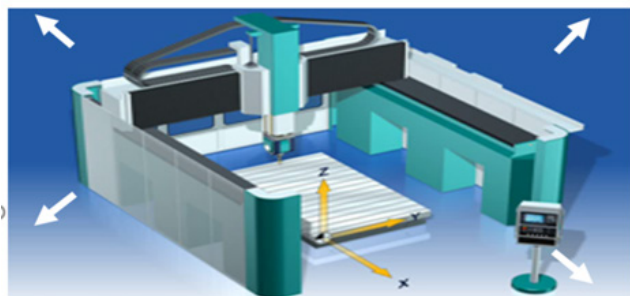
依据市场数据分析，国内重点领域关键用户对机床精度的考量，已从单一坐标精度（直线度、平行度、角度偏

差、定位及重复定位精度），向空间综合定位精度（例如空间定位误差 $\leq 0.01\text{mm/m}^3$ ）转变，为高精度数控机床应用提供了前提。提高机床精度的基本思路和方法包括误差防止和误差补偿。

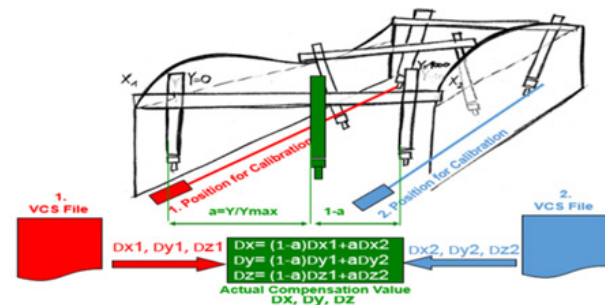
误差防止即通过设计、加工、装配等途径消除或减小可能的误差。这种方法从误差产生的源头予以控制，是机床精度保证的基础。但随着机床功能部件集成化水平的不断提高，机械结构趋于简化，在此大背景下，通过提高机械精度（加工精度、装配质量）来压缩机床误差的解决方案已达到瓶颈，即使可能进一步提高精度，从经济性角度考量也是不现实的。误差补偿则是人为地制造出一种新的误差去补偿甚至抵消原始误差，以达到提高机床精度的目的。

与误差防止相比，误差补偿可以用相当小的“成本”获得误差防止法难以达到的精度水平，并且随着测试技术、数控技术的不断进步，误差补偿技术逐渐成为现代精密机械工程的重要技术支柱之一。其关键技术点包括：

（1）误差高效辨识技术研究。虽然空间误差测量及辨识在行业内已有较为成熟的方案，但对于大型机床，测量空间大，测量点位多，测量耗费的时间将相当长，严重影响设备使用率及生产效率，因此有必要提出行的空间误差测量方案，缩短误差测量及模型建立时间，提高设备利用率。



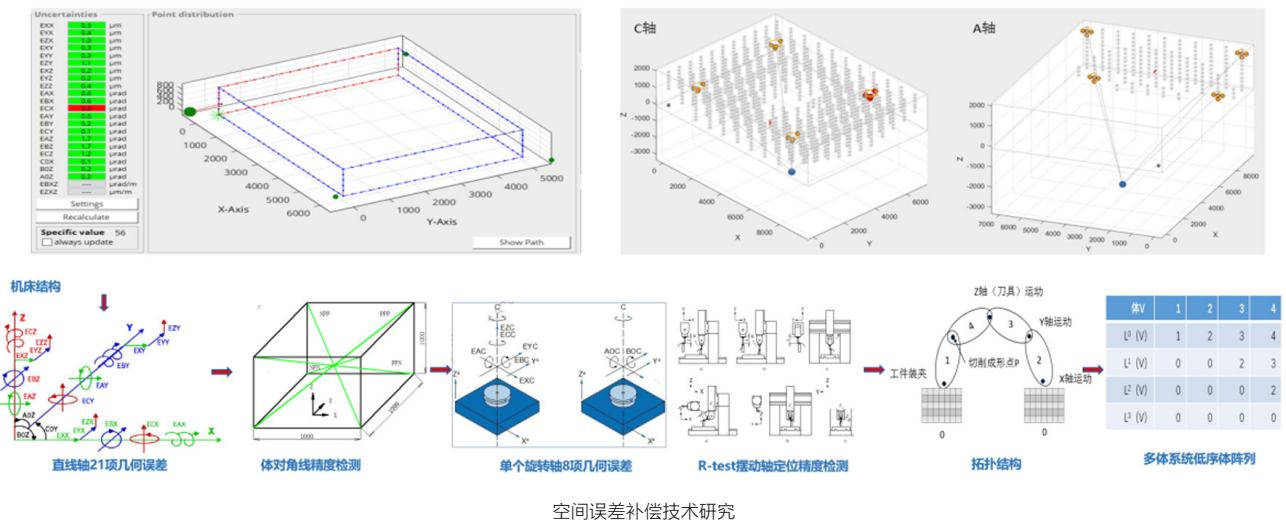
机床结构及热误差模型



(2) 几何误差与热误差综合补偿模型。误差补偿模型建立是在误差元素检测与辨识的基础上, 依据误差综合数学模型, 通过不同算法建立误差与自变量之间的数学关系。一台典型的五轴机床共有37个误差项。这些误差项通常是几何误差与热误差综合作用的结果。行业内主流空间误差补偿方案仅针对机床

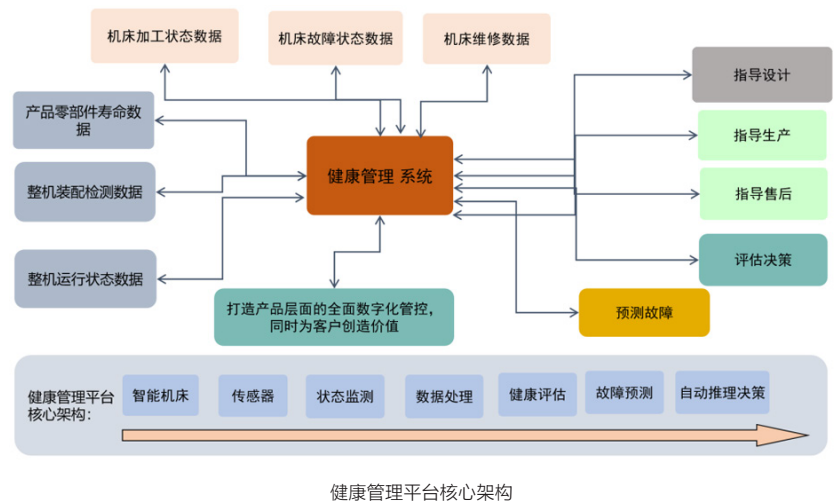
处于标准温度或冷态/常温条件下空间几何误差辨识与补偿。对于变温状态下(加工条件、使用周期、冷却条件及周围环境变化)的空间误差补偿鲜有涉及。而对于精密及超精密加工场合, 热误差引起的影响甚至达到机床总误差的40%~70%, 影响十分巨大。空间误差补偿系统甚至需要根据机床周围环境的

温度及湿度变化为机床建立数套误差补偿方案, 模型泛化能力较差。因此有必要深入研究复合误差(几何误差与热误差)补偿模型建立的技术方案并予以验证。检测机床在各种温度条件下空间误差, 再将几何误差与热误差分离, 并各自建模, 最后合成形成更为完备的误差补偿模型。



2. 机床故障预测与健康管理

故障预测与健康管理(Prognostics and Health Management, PHM)是一种集状态监测、健康评估、故障识别、故障预测为一体的健康管理技术, 利用传感器采集获取系统的状态信息用于设备的智能维护与管理。通过对状态信息健康状态评估, 采用故障预测模型实现对设备未来发展趋势的预测, 从而确定准确的设备维修位置和恰当的维修时间节点。



机床的故障预测与健康管理主要基于可靠性理论技术, 依托产业优势, 进行全生命周期的可靠性技术研究。通过搭建故障预测与健康管理系统平台。利

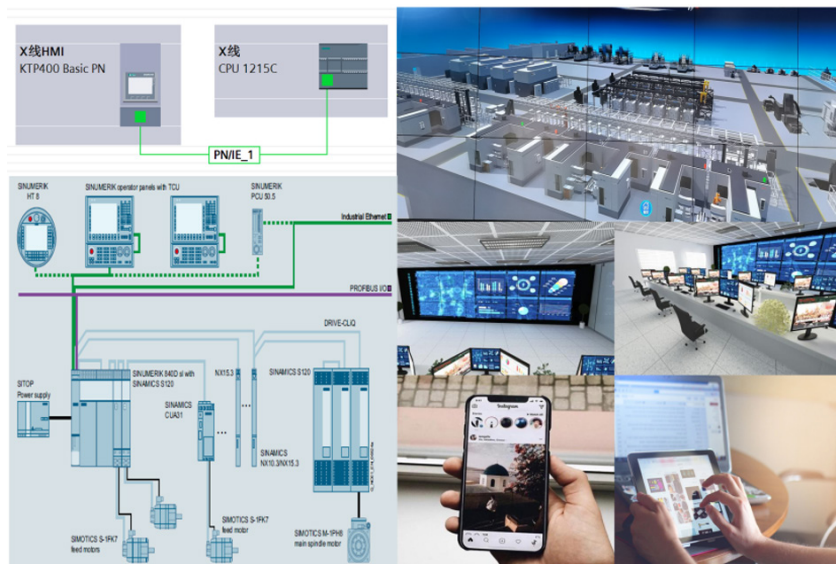
用各种传感器探测、采集机床的加工状态、故障状态、维修以及产品零部件寿命、整机装配检测、整机运行状态等相关参数信息, 将收集的数据进行有效信息转换以及信息传输, 作为系统输入, 通过健康管理系统实现指导设计、指导生产、指导售后、评估决策, 以及故障预测诊断及防治。健康管理平台的核心就是通过传感装置对机床的各个状态进行监测, 采集、处理数据, 进行健康评估、故障预测, 达到自动推理决策, 最终实现机床的自主感知、自主学习、自主优化与决策、自主控制与执行, 即新一代智能机床。

3. 数字孪生技术

数字孪生是物理产品的高集成度的数字化虚拟模型, 能够反映实体功能、实时状态、演变趋势等。现如今, 数字孪生技术逐步应用于智能制造系统中, 与物联网信息采集、大

数据处理、CPS 等新一代信息系统结合,实现对产品历史数据分析、当前状态评估及未来趋势预测等。利用数据采集系统、信息技术和网络技术构建与物理实体相对应的数字孪生体,通过“状态传感、实时分析、科学决策和精确执行”的闭环促进智能制造。

数字孪生技术还可以应用在零部件加工过程中。通过对零件加工过程中,零件几何数据、物理数据和过程数据的采集,将信息进行细粒度分类,并获取数据内部之间的关系;将工艺过程进行拟合知识模型,形成反应产品制造过程的基于知识的数字孪生模型;研究出数字孪生拟态建模方法构建数字孪生模型,可以反应加工过程中的实时状态。



基于数字孪生技术的智能化车间

所构建的数字孪生体可以既是机床单机,也可以是整个车间。通过物理实体与数字孪生体之间的实时交互,完成机床本身的故障预测及运维、加工过程中的协同作业,以及整个车间的生产运行规划和监控,帮助实现更精准、更好、更高效的管理。

五、结语

当前,我国数控机床产业与国际先进水平相比仍存在一定的差距。与此同时,地缘政治所引发的科技战、贸易战,让我们深刻意识到核心科技必须掌握在自己手中的重要性。作为国家工业的基石,机床制造业技术水平的提升任重道远又迫在眉睫。我们应当认清差距奋起直追,从共性基础技术入手,厘清理论问题,做到“知其然,更知其所以然”,掌握高档数控机床关键核心技术,并不断探索研究,形成企业专有技术,最终占领科技发展制高点。□

资讯

中国机床工具工业协会倡议书

各分会、各会员企业:

2022年我国高校毕业生达1076万,首次突破千万,当前正是大学生毕业就业的关键阶段。各分会、各会员企业要深入学习贯彻习近平总书记在宜宾学院实地考察高校毕业生就业工作时作的重要指示,“当前正是高校毕业生就业的关键阶段,要进一步挖掘岗位资源,做实做细就业指导服务”,“学校、企业和有关部门要抓好学生就业签约落实工作,尤其要把脱贫家庭、低保家庭、零就业家庭以及有残疾的、较长时间未就业的高校毕业生作为重点帮扶对象”。各会员企业要为高校毕业生挖掘更多岗位资源、提供更多就业信息。中国机床工具工业协会倡议如下:

1.牢记嘱托,勇担使命。各分会、各企业要深入学习贯彻习近平总书记在宜宾学院实地考察高校毕业生就业工作时作的重要指示精神,深入贯彻落实党中央、国务院“稳就业”“保就业”决策部署,全力做好2022届全国高校毕

业生就业工作,全方位强化高校毕业生招聘服务工作。

2.增加岗位,拓展就业。各企业按自身发展要求,结合《国民经济和社会发展第十四个五年规划》要求和机床工具行业“十四五”发展规划纲要建议,提前思考、超前安排新岗位配置,通过人力资源增加,促进产品转型升级、实现高质量发展;同时梳理企业现有岗位流程,通过增加新岗位,补齐产品开发、研制、生产、售后服务过程中的短板,达到产品水平提高,市场占有率扩大;加强与产业链、供应链的上下游联动,提供协同发展所需的相关人才的岗位需求。

3.培养行业优秀人才。通过产教合作、产学研用深度融合的方式,探索专业人才培养的新途径。在实现企业技术更新、产品迭代发展的过程中提供人才支撑。在这过程中,不断培养人才,形成一批行业急需的技术和管理人才,为创新驱动机床工具行业高质量发展奠定人才基础。

2022年6月24日

第十二届中国数控机床展览会 (CCMT2022) 部分展品综述(2)

中国机床工具工业协会市场部

七、龙门式铣床类

1. 概况

龙门式铣床类是指床身水平布置，铣头装在横梁上（附加的水平铣头可装在立柱上），由左右两立柱（或墙体）和连接梁（或横梁）构成门架的铣床。据已有资料，龙门式铣床类展商20余家，参展机床设备30多台。提供展品资料的展商有北京北一、通用技术集团、宁波海天、威达重工、南通国盛、纽威数控、山东蒂德、南京宁庆、意特利、湖南九五、河北发那数控、润星科技、山东翰坤、宁波天瑞、巨冈机械、日电产新宝、尼古拉斯克雷亚、金中贸、普锐米勒、山崎马扎克等公司。

本届参展的龙门式铣床类，从结构形式看，有工作台移动式，龙门移动式，高架式横梁移动（天车式），动梁式，定梁式；按机床净重和工作台承载能力，有轻型、中型、重型。

2. 龙门式铣床类主要技术特点

（1）加工范围广，适应性强。本次龙门式铣床类展品普遍拥有加工中心的功能，可完成铣面、镗孔、钻孔、刚性攻丝等工序，多数设备配直角铣头和万能铣头，一次装夹实现五面体加工，具备五轴联动的能力；既有能加工2~5m中型工件的设备，也有可以加工10~15m的大型工件的重型机床；可以满足对不同材料材质的低速重载和高速轻载加工要求，能完成对工件的粗加工-半精加工-精加工全工序加工。

（2）高刚性，高稳定性。龙门机床结构尺寸大，各部件（包括运动部件）吨位重，龙门式铣床要求更好的

刚性和稳定性。展品机床的整体结构普遍采用有限元法设计，横梁等大跨距移动部件的移动大部分采用同步双驱、重心驱动技术。主轴和进给运动采用直联直驱，长进给轴使用精密齿轮齿条传动。中大型龙门铣床使用大截面方型滑枕、高强度滚柱导轨及四线导轨结构，实现良好的刚性和运动平稳性。典型的如山东蒂德精密龙门加工中心主轴箱，采用大截面方滑枕结构，四条重载滚柱导轨支撑；南通国盛五轴桥式龙门X轴、Y轴、Z轴均采用四线轨结构。

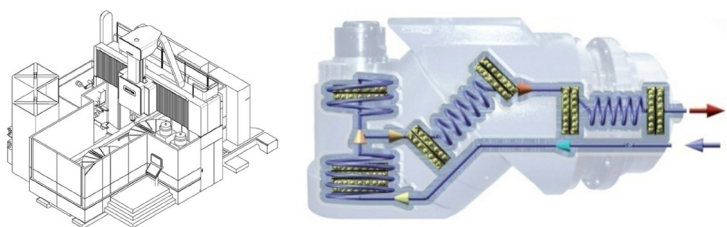
（3）精度及精度保持性。重心驱动、丝杠预拉伸、全闭环控制提高运动精度和精度保持性。处理热变形对精度的影响，各厂家的技术手段多种多样，如湖南九五精机对运动导向元件摩擦发热点主动强制冷却；南通国盛对三轴螺母冷却，降低丝杠热伸长；广东润星科技对主轴进行外循环冷却。

（4）功能丰富的铣头系统。铣头作为龙门铣加工中心重要的核心部件之一，是每一台龙门式铣床类展品的焦点。展品配备了各具特色的铣头系统及各种附件铣头，部分机床还配备了自动换头系统。湖南九五精机高架桥式五面体龙门使用自主研发的A、C双摆角铣头，独特的A、C轴定位、锁紧技术，保证高效切削时的稳定性和抑制切削振动；宁波天瑞精工使用最新研发的双摆角铣头，A、C轴采用直驱传动，最高转速60r/min，标配圆光栅，定位精度5"，内藏式电主轴最高转速为18000r/min；普锐米勒机床使用自制的双摆角铣头，A、C轴采用直驱电机，最高速度50r/min，主轴转速24000r/min。尼古拉斯克雷亚的FOX 60龙门加工中心，可配置铣头有UAD万能铣头和E5E连续运动的双摆角铣头。

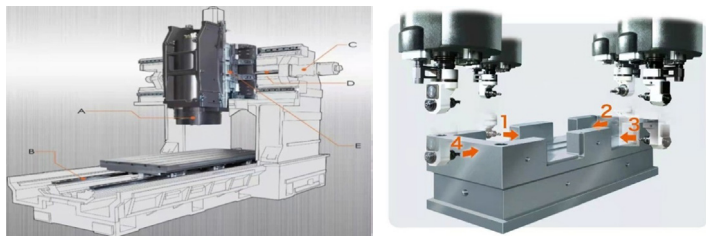
3.典型展品

西班牙尼古拉斯克雷亚集团FOX-60 龙门加工中心。

西班牙尼古拉斯克雷亚模块化设计生产量较高的一款机型，融合了恒温控制系统，热对称设计以及自动换刀系统等，可配置铣头有UAD万能铣头和E5E连续运动的双摆铣头。UAD铣头包括45° 万能铣头和 90° 直角铣头，采用双鼠牙盘系统的UAD自动微分度，最小分度0.02°，最高转速6000 r/min，刀具夹紧力2500kg，重复定位精度 $\pm 3''$ 。可配置一个内置或可拆卸车削转台，最大直径 $\phi 2500\text{mm}$ 。该机广泛应用于航空航天、能源和轨道交通等领域。

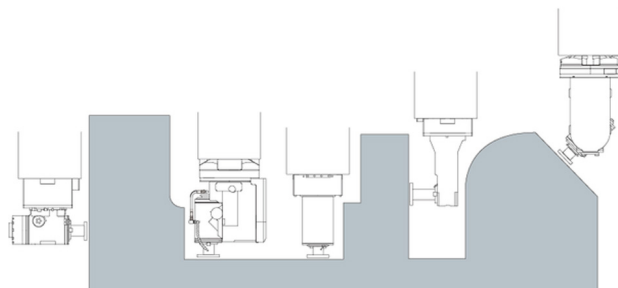


山崎马扎克（中国）有限公司FJV-35/60 L龙门立式加工中心。主轴箱采用热对称结构，主轴和主轴电机使用温控冷却油循环冷却；进给轴使用高精度的滚柱直线导轨，滚珠丝杠配置中心循环冷却系统；X、Y、Z轴快移速度40、40、30m/min，主轴10000r/min，通过主轴的分度功能和直角头，实现五面加工。该机搭载“MazatrolSmoothG”数控系统，使用高速双CPU，提高了数控系统的数据处理能力和运动控制性能，丰富的系统软件功能满足客户加工需求。该机适用于薄型铝件加工、模具、半导体、工程机械零件和航空零部件各种不同类型产品加工。



日电产新宝（上海）国际贸易有限公司Nidec MVR-30Hx龙门式五面加工中心。机床主体采用高刚性的铸件和热稳定设计；垂直轴、水平轴均能进行强力切削；通过对主轴内部和主轴大套冷却，抑制主轴热伸长；系统具有空间误差补偿功能。立柱门内宽度2550mm，主轴直径 $\phi 110\text{mm}$ ，主轴转速20~8000r/min，Y、Z轴快移速度

分别为35m/min、20m/min，精加工时接刀痕 $\leq 3.5\mu\text{m}$ 。可选配齿轮驱动主轴，最大扭矩3430N·m，实现重切削。根据窄部分、倾斜面、自由曲面等形状，高速加工、高精度加工等要求选择各种附件头。



普锐米勒机床GT18-5X 五轴高速龙门加工中心。自制五轴双臂摆头，A、C轴采用力矩电机驱动，最高转速50 r/min，主轴转速24000 r/min，工作台采用双丝杠驱动结构和三导轨支撑，丝杠中空冷却系统，全闭环控制，刀库容量60把。该机应用于航空发动机机匣、机身结构件、汽车模具等领域加工。

北京北一机床有限责任公司XKAg2525×60-V 高架桥五轴龙门机床。横梁和滑座采用铸造结构件，具有合理的截面和筋板结构。横梁采用上、下偏置导轨结构，优化了滑枕至横梁前导轨面的距离，提高抗扭转和抗弯曲能力。横梁导轨为直线滚柱导轨，安装基面加工采用反变形加工技术，保证铣头在横梁上运动的各项精度。双摆角铣头安装在滑枕端部，实现C轴和A轴摆动功能，主轴为高速电主轴，转速20000r/min，工作平台还可配置数控转台和其他工装扩展工艺范围。该机适合航空航天铝合金、大型模具的高效五轴粗加工、半精加工和精加工。

宁波海天精工股份有限公司BFL2030龙门加工中心。整机采用对称性设计，降低温度对机床热变形的影响。A、C双摆角铣头可部分嵌入滑鞍内，提升机床空间的利用率。通过有限元的专业分析，结合实验室的测试数据，优化移动部件结构设计，实现移动部件轻量化，提高设备的动态特性。X、Y、Z快速移动速度60、40、36m/min，主轴最高转速24000r/min，X、Y、Z移动加速度0.5g。可实现五轴加工，一次装夹可完成多角度特征加工。该机主要应用于新能源汽车的防撞梁、保险杠、底盘铝型材构造件、锂离子电池铝托盘、副车架等零件的加工。

中国通用技术（集团）控股有限责任公司（沈阳机床）GMC2040u桥式五轴加工中心。自主研发的A、C双摆角铣头，高速电主轴铣头为叉式结构，采用矢量控制，主轴转速240~24000r/min。X轴采用齿轮齿条驱动，可选用直线电机，其快移速度60m/min、加速度1g，数控

回转工作台旋转为C1轴。配置恒温冷却系统,对主轴及关键传动部件进行温度控制,配负压吸尘系统。配置自主知识产权的i5智能数控系统,实现五轴联动功能。零件一次装夹,能完成多种工序的五面加工和多种空间方向的铣、镗、钻等加工,适用于模具、航空航天等行业复杂零件的加工。

山东蒂德精密机床有限公司G10542L龙门加工中心。龙门跨距4200mm,工作台尺寸(长×宽)10500 mm×3500mm,三轴联动曲面加工,并可根据客户要求配置直角铣头,一次装夹实现五面体加工。X进给轴采用齿轮齿条传动,同步双驱控制,标配X轴光栅尺。主轴箱采用大截面方滑枕结构,四条重载滚柱导轨支撑,可承受主轴在Z轴全程的横向强力切削。主轴传动采用30kW大功率主电机直联两档变速减速机,切削扭矩大,满足高刚性低惯量大扭矩切削需求。可选配内藏式电主轴,最高转速10000r/min,配置各种附件铣头。

宁波天瑞精工机械有限公司UM3018 龙门五轴加工中心。三轴导轨均为高精度重载荷滚柱直线导轨;配置新设计研发的双摆角铣头,A、C轴采用力矩电机传动,定位精度5",最高转速60r/min;内藏式电主轴最高转速为18000r/min,有利于小刀径刀具的清角加工;标配五轴防撞功能。

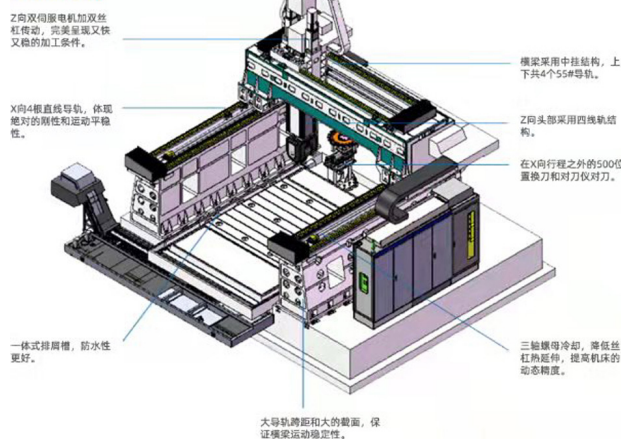
南通国盛智能科技集团股份有限公司GMV15050RH五面动柱龙门加工中心。X、Y、Z轴行程15500mm、5600mm、1250mm,配置自制直角头。床身设计四根重载65#滚柱导轨,间距700mm,配合坚实的壁厚及“米”字型筋板组合。X轴采用四个电机加减速机驱动,双电机消隙和双驱传动结构,精密齿轮齿条传动,标配光栅尺。Y轴设计三根65#重载滚柱导轨支撑,横梁截面大,导轨跨距大,主轴中心到Y轴导轨面距离短,具有较好抗震性、刚性和稳定性。



南通国盛智能科技集团股份有限公司GMB2528LX五轴桥式龙门。机床X轴左右两侧各两根高刚性滚柱直线导轨,每根导轨4个滑块,共16个滑块,确保了良好的刚性和运动稳定性。滑枕采用中挂式中箱结构,上下各布置

2个导轨,结构对称,热稳定性好。Z向采用4根高刚性滚柱直线导轨全包围结构,双伺服电机加双丝杠传动,重心驱动,可实现快速稳定加工。三轴螺母冷却,可以降低丝杠旋转过程中因发热引起的热延伸,确保机床的运行精度。A、C轴摆角范围 $\pm 105^\circ$ 、 $\pm 240^\circ$,A、C定位精度 $\pm 5''$ 、 $\pm 3''$ 。该机应用于精密模具、航空航天等机械加工领域。

性能特点

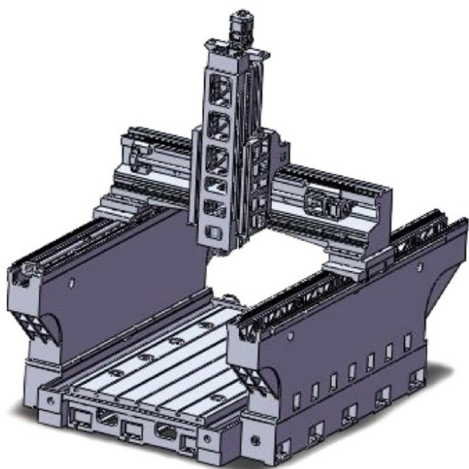


湖南九五精机有限责任公司J5BF1810 高架桥式五面体加工中心。整体式U型床身桥架。配置自主研发的A、C轴双摆角铣头,独特的定位、锁紧技术,保证高效率切削加工时的稳定性和抑制切削振动。使用专利驱动冷却技术,运动导向元件的摩擦发热点主动强制冷却。结构紧凑,较同规格工作台移动式龙门机床占地面积减小40%。实现一次装夹,进行五面加工的功能。X、Y、Z轴定位精度 $\pm 8 \mu\text{m}$,重复定位精度 $\pm 4 \mu\text{m}$;A、C轴定位精度 $\pm 3''$,重复定位精度 $\pm 2''$ (JIS标准)。根据用户需求,可实现五轴联动以及车铣复合功能的衍生变形。



南京宁庆数控机床制造有限公司VC5A3020HA龙门高速铣削加工中心。一款横梁移动式(桥式)五轴龙门加工

中心。X轴采用同步双驱和重心驱动技术；Y轴采用复合型导轨技术，横梁上在原有两根互为垂直面安装的直线导轨的基础上增加一根矩形导轨，加大切削抗力力矩和承载面积，增加了切削抗力，有效地克服了切削点悬臂太长的弱点。机床的整体结构采用有限元法结构设计，配置双摆角铣头，主轴功率42/55kW、转速18000r/min，全闭环控制和激光对刀仪为标准配置。该机适合精密模具及航空航天产品等零件加工。



意特利（上海）科技有限公司TITAN4025重型五轴桥式龙门加工中心。双横梁桥式龙门结构，X、Y、Z轴行程可达40000mm、6000mm、2500mm，采用双横梁专利技术及箱中箱结构，在保持加工精度的前提下加大了Z轴加工行程。该机适用高温合金、钛合金，碳钢，不锈钢、铝合金等金属材料大型结构件加工。

东莞市巨冈机械工业有限公司CL2020 5X 高速龙门摆头五轴加工中心。具备五轴五联动，直线轴重复定位精度 $8\mu\text{m}$ /全程，采用一体式龙门架设计，Z轴氮气平衡，快速速度36m/min。精密手工铲花，三轴滚柱导轨，双摆角铣头尺寸小、扭矩大，加工复杂大型工件时干涉范围小。

福建省威诺数控有限公司WN-LF2015 复合式镗铣加工中心。本产品是龙门镗铣床、卧式加工中心、对头镗和刨台式镗铣床等的复合体，立式镗铣头及两卧式镗铣头作多坐标移动形成了多轴控制；对置主轴及多轴位置的同步控制，实现多头复合式加工。龙门框架、四导轨的框式立柱支撑横梁、箱式滑鞍置于框式立柱中，四导轨支撑箱式滑鞍上下运动、滑枕包容在长导向箱式滑鞍中进行轴向运动。立柱、滑枕、床身、横梁和工作台等基础件均采用优质铸铁铸造，树脂砂造型工艺、薄壁多筋、箱中箱和蜂窝式筋条的箱体结构，充分人工时效处理。该机适用于重型机械、工程机械、机车车辆、矿山设备、能源等领域的大型零件加工。



八、铣镗类机床

1. 概况

本次参展的铣镗类机床是指镗轴水平布置并可轴向进给，主轴箱沿立柱导轨垂向移动，以镗削加工为主要加工方式，同时能进行铣削的镗床。该类机床主要用于加工高精度孔或者一次定位完成多个孔的精加工，镗孔的精度可达IT6，表面粗糙度可达到 $0.2\mu\text{m}$ 。据已有资料，铣镗类展商5家，展品6台。提供展品材料的展商有通用技术集团、南通国盛、湖南九五、帕马、达诺巴特。

2. 铣镗类展品主要技术特色

(1) 精度高。铣镗类机床由于其高精度、重切削的要求，各厂家在立柱、床身、导轨、工作台等部件及机床的总体设计制造中高度关注其刚性、动态稳定性及热平衡；大多利用有限元设计，优化机床刚性结构，采用薄壁多筋、箱中箱和蜂窝式筋条的箱体结构；应用误差补偿技术，提高机床的精度。比如帕马SPEEDMAT具有工作台静压补偿和主轴自动热补偿功能。达诺巴特SORALUCE FP10000具有DAS主动阻尼系统，集成了一系列实时控制震颤，可监控加工过程的传感器，增加机床动态刚性。另外静压导轨、大尺寸线性滚柱导轨、转台使用双小齿轮消隙等应用广泛。

(2) 功能丰富，适应范围广。铣镗类机床的功能越来越丰富，大多数铣镗类机床展品在保留了原有的高效铣削和高精度孔系加工的特点的同时，配备大容量刀库、丰富的铣头附件及铣头交换系统、精确的回转工作台、智能化的数控系统，使机床具有了镗削、铣削、钻削（钻、扩、铰）、攻螺纹（刚性攻丝）、直线插补、圆弧插补、多轴

联动、模拟加工等功能，扩大了铣镗类机床加工范围，提高了加工能力。

3.典型展品

意大利帕马公司SPEEDMAT铣镗加工中心是一款典型的大规格，重切削的铣镗机床。X、Y、Z行程4000mm、3000mm、2700mm，镗轴行程(W轴)800 mm，镗轴直径 $\phi 160\text{mm}$ ，工作台最大载重20000kg。采用热对称结构，中央式主轴箱，大尺寸线性滚柱导轨；闭式静压工作台采用双小齿轮消除系统，同时通过自动检测并补偿工作台偏载产生的倾斜力矩实现静压倾斜补偿；主轴传动系统配置两档变速齿轮箱，最高转速3000r/min，最大额定扭矩2073N·m，选配主轴自动热补偿功能。机床配有机器人换刀系统，刀具容量500把，最大刀具直径 $\phi 1200\text{mm}$ ，最大刀重70kg。该机适用于航空、能源、工程机械、石油和天然气、通用加工等领域。



达诺巴特集团（中国）SORALUCE FP10000落地铣镗床。配备长达10m工作台，床身全铸铁制造工艺，提供了良好的稳定性和刚性。配置专利DAS主动阻尼系统，系统集成了一系列实时控制震颤，可监控加工过程的传感器，能够有效增加机床动态刚性。应用电主轴和任意分度的万能铣头，实现高定位精度和高加工精度，通过法兰适配器的全模块化铣头更换系统，能够达成不同类型铣头的快速转换。搭载了西门子“数字化原生”数控系统Sinumerik One，借助其中数字孪生功能，可在虚拟环境下进行机床的调试、零件生产前的模拟加工、预测与生产工艺优化，可减少零件的加工失误，提高机床生产效率。FP10000在石油天然气、机床制造、模具生产、林业机械、轨道交通等诸多行业应用，覆盖了包括框架类、轴类、阀门类、吊杆等各类尺寸零件的加工生产。



中国通用技术（集团）控股有限责任公司（沈阳机床）PBC110m数控卧式铣镗床。机床总体设计布局为T字型，工作台沿床身导轨横向移动(X轴)，立柱沿床身导轨纵向移动(Z轴)，主轴箱沿立柱导轨垂直移动(Y轴)，主轴前后移动(W轴)，工作台可360°回转(B轴)。其主要零部件设计时均采用有限元分析方法优化结构。镗轴直径 $\phi 110\text{mm}$ ，工作台承重5000kg。数控回转工作台可实现工件一次装夹完成四个面上的孔组、孔系及平面的多工序加工。该机适用于箱体类、壳体类、机座类等零件加工。



南通国盛智能科技集团股份有限公司DBM-110 卧式铣镗加工中心。创台式滑枕中挂总体布局，镗轴直径 $\phi 110\text{mm}$ ，X、Y、Z、W四轴控制。X、Y、Z轴采用重载型滚柱直线导轨，刚性强、动态精度佳；三轴传动采用研磨C3级双螺母滚珠丝杠，两端预拉伸，消除热伸长造成的精度损失，组成稳定的高刚性机械传动系统。主轴使用大间距、高精度、高刚性的双列圆柱滚柱轴承；主轴传动采用二级齿轮变速，变速范围宽、主轴转速高、输出扭矩大，适用于各种加工材质。转台采用双齿轮消除，绝对式光栅尺闭环控制。配置随动刀库（安装在立柱一侧）与自

动换刀。可选配万向头、直角铣头、主轴伸长套筒、数控平旋盘、机械式自动平旋盘、自动刀具检测、自动工件测量、主轴中心出水等多种附件及功能选择。该机主要应用于能源、石油、造船、工程机械、航空航天等领域。



湖南九五精机有限责任公司 J5MB1112卧式数控铣镗加工中心。镗轴直径 $\phi 110\text{mm}$ ，采用T型床身，动立柱，正挂主轴箱结构，各传动轴系独立恒温冷却系统和液压氮气平衡系统，自制高刚性高精度镗轴单元。配置整体全封闭式或半封闭式双开门防护罩。该机适合对箱体类、壳体类高精度孔系加工。

湖南九五精机有限责任公司J5TK6413十字滑台数控铣镗加工中心。镗轴直径 $\phi 130\text{mm}$ ，整体铸造床身，采用四条直线导轨支撑方式，稳定性好。主轴箱采用一级齿轮和减速机实现变速，同时采用高精度等级圆锥滚子轴承，实现主轴转速 1500r/min ，扭矩 $1600\text{N}\cdot\text{m}$ ，实现大扭矩重切削加工。该机还可根据加工应用需求，配置刀具，或全闭环控制，满足更高精度要求的零件加工。

九、电加工类机床

1. 概况

电加工类机床是将电能施加在工件的被加工部位上而使材料被去除、变形、改变性能或被镀覆的特种加工机床。该类机床主要为满足航空航天、模具、汽车等领域用户各种高硬度材料和复杂形状的零件、模具，以及航空发动机和汽车发动机的喷油嘴、叶轮、叶片、机匣等零件上的小孔、深孔和窄槽的加工需求。据已有资料，电加工类机床展商10余家，展品20余台。提供展品资料的展商有北京电加工所、通用技术集团、苏州中谷、苏州亚马森、上海伊阳、广东商鼎智能、牧野、埃马克等。

主要展品有线切割机床（中走丝、慢走丝）、电火花成形机床、电火花穿孔机床、电解加工机床等。

2. 电加工类展品主要技术特色

（1）高精度与精度保持性。采用高刚性高稳定性结构设计，如牧野U6线切割机床采用将双电极存储器集成到床身铸件中，提高了机床的热稳定性；通用技术集团机床研究院的AF35P电火花成形机主机，采用C型结构设计，T型铸件床身、花岗岩大理石工作台；苏州亚马森穿孔机、北京电加工所电火花成形机等展品的闭环控制；苏州中谷ZGM501采用直线电机驱动，提高机床传动精度。

（2）微精高效的脉冲电源。脉冲电源对提升加工速度、降低电极损耗、确保加工精度及提高表面质量起到极其重要的作用。如北京电加工所HS600小孔机床，采用特色精密微细电源，具有电容增效、微精加工、低损耗加工回路等功能；通用技术集团机床研究院的AF35P电火花成形机，采用等能量控制复合脉冲电源，逐个脉冲检测控制，实现等能量脉冲放电，利于表面粗糙度均匀，前后沿可控的梯形波叠加高频锯齿波的独特复合电流脉冲，具有对超硬材料高效、低损耗加工的独特优势；泰州东方数控DK7732ZG中走丝线切割机采用等能量放电电源。

（3）开放式可二次开发的数控系统。电加工机床的数控系统因其独特的数学模型、控制模式和复杂多样的控制内容，必须实现加工状态控制与数控轴运动控制的高度耦合。电加工机床制造企业根据自己的专有技术及工艺，专门研发配套形成开放式通用性、灵活性、可靠性较高的电加工机床数控系统，满足多轴联动、多任务、3D图形CAD文件导入及链接局域网，实现异地通讯和监控等要求。如牧野U6线切割机床应用Hyper-i控制系统；通用技术集团机床研究院AF35P采用模块化、开放式体系结构，基于SSB3工业现场总线技术，支持SSB3总线式远程I/O单元，支持USB、以太网等程序扩展和数据交换功能，最大可实现六轴联动控制，内嵌高速软PLC，可实现梯形图在线编程和实时监控，最小控制精度 $0.1\mu\text{m}$ 。

（4）自动化。电加工机床自动化水平日益提高，减少人工干预，降低操作人员水平的依赖性和人力资源成本，加工性能和加工质量达到更好的水平。如北京电加工所HS600小孔机具有自动换丝、穿透检测等功能；苏州亚马森MS-DC430A电火花穿孔机具有的一键加工、自动定深、自动分中、自动定端面、数字采样、自适应伺服跟踪、穿透检测等功能。

（5）绿色制造。使用高频脉冲电源，降低电能消耗；优化工艺参数，减少加工过程中的耗材；通过分离与解析，加强工作液的循环利用，达到零排放，实现绿色制造目的。如牧野公司U6线切割机床，搭载绿色节能新电源ES200A，容量更大，标称电流 80A （峰值 100A ）；通过

更精细的数字化控制技术对电压和电流进行控制,控制更精准,损耗小,工作状态更稳定,虽然电源容量增大,综合耗能却更低,与之前的系统电源相比,综合节能40%,同时开发出针对2400余种加工条件下的理想工艺参数,达到降低线材消耗的目的。埃马克CI400电解加工机床带有集成的电解液管理过滤系统。通用技术集团机床研究院AF35P电火花成形机采用绿色等能量复合脉冲电源,采用电感储能元件,进行脉冲峰值电流闭环控制,放电部分的电能利用率达90%以上,电能消耗比电阻限流式减小一半以上,同时可获得效率、损耗指标的大幅优化。

3.典型展品

牧野机床(中国)有限公司U6高精度数控线切割机新的PICO导丝系统,导丝嘴安装在精密的定位螺纹孔内以保证其垂直度,导线夹可以将倾斜的线进行断丝和穿丝,丝的直线度可达 $5\mu\text{m}$,丝径可选择 $\phi 0.1\sim\phi 0.3\text{mm}$ 。双电极存储器集成到基础机床铸件中,固定式工作台,气动升降前门。配置Hyper-i控制系统,数据库支持包括工件材料、电极种类和尺寸设置功能,内设丰富的加工条件;良好的通用性,拥有多种智能工具和高效直观友好的人机界面,可以满足大中型模具、精密模具加工和零部件加工等需要,能够为客户提供加工解决方案。



埃马克(中国)机械有限公司太仓分公司CI 400电解加工机床。适用

于各种不同电解加工任务,如电解加工、电解钻孔、电解拉削、电解去毛刺。该机设计紧凑,带有集成的电解液管理过滤系统,可扩展的电源技术/脉冲技术,所有参数都由一个控制单元监控,可提供能够优化加工工艺和提高生产能力的选项,也可选择两个加工区域作为CI-DUO。



北京市电加工研究所ADV600多轴联动精密数控电火花成形机床。五轴五联动,专用浸入式精密数控回转工作台(B轴)和C轴(精密数控分度与高速旋转轴),一体化设计,自动升降油槽,可兼容机械手、电极工具库等。配置基于Windows的数控系统,内嵌CAD/CAM模块、EDM专家模块、微精加工模块。主要用于铝合金、钛合金、低膨胀合金及合金结构钢等材料的加工,可满足窄槽、窄缝、深腔、异型不通孔、内腔侧向不通孔等特殊形状加工的工艺要求。

北京市电加工研究所HS600精密数控小孔加工机床。具有电容增效、微精加工,低损耗加工回路等诸多功能的精密微细电源,配备高速旋

转轴高压冲水、自动换丝、穿透检测等功能模块。配置基于Windows的数控系统,具备六轴五联动功能,可实现多姿态下的电火花微细加工。配有并线接口,可方便实现自动化及无人加工。可加工异形孔,加工孔直径 $\phi 0.2\sim\phi 3.0\text{mm}$,最大深径比160:1,最大重熔层厚度 $\leq 0.03\text{mm}$ 。



中国通用技术(集团)控股有限责任公司(机床研究院)AF35P高精度全闭环电火花成形机。采用C型单立柱结构,倒T型铸件床身, $0.1\mu\text{m}$ 分辨率高精度光栅尺,实现高精度及保持性。X、Y、Z轴定位精度 $\leq 3\mu\text{m}$,重复定位精度 $\leq 2\mu\text{m}$;最佳加工表面粗糙度 $Ra\leq 0.08\mu\text{m}$ (模具钢), $Ra\leq 0.15\mu\text{m}$ (硬质合金);最小电极损耗 $\leq 0.1\%$ (模具钢);加工型腔位置精度 $\leq 3\mu\text{m}$ 。搭载GJ302/EDM专用数控系统,能够完成自动更换电极、自动测量、自动上油、等待液位、自动多腔加工、自动泄油等连续过程。该机具有中断返回、多边形测量找正、三点圆心找正等高级特色功能,适应更多应用场景。

苏州中谷实业有限公司ZGDC506电火花穿孔机采用滑枕式结构,6个伺服轴,其中S轴用于电极伺服放电加工。新一代微精超高频脉冲电源,纳秒级(200ns)的放电功

率脉冲输出。Contra多轴电火花小孔专用数控软件，定制性强，可以加工模具钢、高温合金、钛合金、镍基合金、硬质合金等各种导电金属材料，该机适用于在平面、异形面、球形面上加工直径 $\phi 0.2 \sim \phi 3\text{mm}$ 的盲孔或通孔。

苏州亚马森机床有限公司MS-DC435A多轴数控穿孔机用于直径 $\phi 0.1\text{mm}$ 以上电极管细孔、厚度300mm以内超薄工件、不同材料叠加和中空等特殊工件的加工，以及钨钢、铝、AK80等超硬、特殊材料加工。支持X、Y、Z、W、C五轴数控加工，一次可装夹500mm长电极，Z轴细分步进马达驱动，自主研发的控制系统内置专家数据库并具有多种自动功能，如一键加工、自动定深、自动分中、自动定端面、数字采样、自适应伺服跟踪、穿透检测、表面防护以及柔性高速控制的特点。

十、成形机床类

1. 概况

金属成形机床是通过压力或剪切成形对金属或其他材料的坯料或工件进行加工，使之获得所要求的几何形状、尺寸精度和表面质量的机器。金属成形机床加工方式具有节省材料、产品质量好、生产效率高优点，应用广泛。据已有资料，成形加工类机床参展商20余家，展品40多套。提供展品资料的展商有江苏亚威、徐州锻压、扬州锻压、江苏金方圆、深圳迪能、南通麦斯铁、江苏合泰、江阴机械、吉林瑞铭、无锡金球、信宜华辉、扬州天宇、滕州三合、全斯福、肯尼福、宝飞螺等。

主要展品有折弯机、自动折边中心、折弯单元、折弯机器人工作站、剪板机、弯管机、校直机、转塔冲床及冲割复合机（转塔冲和激光切割），压力机（旋压机、伺服压力机、油压机、机械压力机），螺纹成形滚压机等。

2. 成形机床类机床展品主要特色

（1）主驱动伺服化。本届成形类机床展品的锻造机床、冲压和钣金加工机床，其主要驱动的伺服化已经成为趋势。采用伺服主驱动的金属成形机床不仅工艺性好、加工精度高，而且节能降噪，具备自动化集成、信息化联网和智能化控制等功能。因为伺服主驱动应用极其广泛，这里不对具体展品做个别举例。

（2）自动化。随着自动测量技术、机器人技术及其控制系统的发展，成形机床特别是钣金类的折弯机、自动化折边中心、折弯单元等的自动化水平日益提高。全自动板厚检测系统、自动校正技术、自动上下料系统等的应用愈加成熟和广泛，不少的折边中心及折弯单元已可实现全

自动无人值守加工。典型的如南通麦斯铁MB11032R90自动折弯机器人工作站，将折弯机和机器人两种设备合二为一，实现了拆垛、上料、折弯跟随、码垛等自动折弯功能。江苏金方圆ABM自动折弯单元专为折弯工况而设计的ER80六轴机器人系统，搭载自主研发的高精度第七轴装置，可让机器人在任意位置都能自动完成工件的折弯。江苏亚威HPML30510数控冲割复合机，可与自动上下料、自动分拣、料库等自动化设备集成进行生产管理。另外德国全斯福DB 642-CNC-RL左右双向数控弯管机，配置多层模结构，在同一程序内自动实现顺时针方向、逆时针方向弯管，可以自动切换多种弯曲半径，自动切换弯管方向。江苏合泰机械CNC65XE全自动数控弯管机自动换模及Y轴（送料）自动位置检测功能。其他各种各样先进的自动化功能的例子不胜枚举。

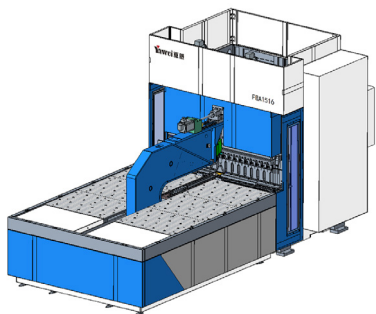
（3）智能化。金属成形机床在伺服主驱动以及各种专业技术和软件支持下，建立机床、机器人互联，实现与MES系统对接，可远程控制生产线。具有视觉识别、挠度补偿、角度补偿、3D仿真等功能，有的软件还可以自动生成模具、折弯工步、折弯机及机器人的NC代码。相关软硬件技术的发展使得成形机床的信息化联网和智能化控制更加切实可行。典型的如江苏亚威FBA1516数控板料折边机，折弯时检测每一块板材的回弹系数和拉伸强度，并自动校正折弯力度；HPML30510数控冲割复合机可搭载远程诊断健康、保障系统、生产管理系统、亚威智云工业互联网平台。肯尼福双模圆柱螺纹轧制机可配备KINETROLTM NC滚动控制系统和交互式人机界面，具有加工监控功能和全集成自动工件处理系统。南通麦斯铁MB11032R90自动折弯机器人工作站的折弯软件包MR-BEND和离线编程软件包MB-ROBERT，结合视觉识别，建立机床、机器人互联，实现信息互联和智能化控制。德国宝飞螺RP15 HP螺纹及成形滚压机具备过程参数屏幕化参数管理及操作者提示功能。

另外，越来越多的成形类机床展品体现了节能环保的优良特性。

3. 典型展品介绍

江苏亚威机床股份有限公司FBA1516数控板料折边机。专为小规格钣金成形加工设计，适合长1500mm、高165mm、对角尺寸1850mm以内盒型、门型零件的全自动折边加工。采用创新的万能折弯模具和轨迹折边技术，无需换模即可实现上折边、下折边、覆平与异形折边工艺；集成轻量化技术、高效控制软件，折边速度最快达0.3s/折，比传统压弯式折弯机速度快3倍以上；搭载创新的AAC智能

角度补偿技术,根据不同板材自动设置补偿,保证折弯精度的一致性,角度精度达30'/全长、折边直线度达0.20mm/全长。



江苏亚威机床股份有限公司HPML30510数控冲割复合机。产品复合了数控转塔冲床和激光切割机两种机型加工优势,工件一次上料即可实现冲孔、成形、滚筋、攻丝、切割等工序。最大冲压吨位达30t,冲床一次定位加工范围1500 mm×3000mm、激光一次定位加工范围1500 mm×2500mm。设备采用高刚性技术及冲压激光复合加工技术,机床加工精度高,冲、割独立加工精度±0.10mm,板材最大移动速度113 m/min,同时集成多轴自动攻丝功能,可实现M3-M8多种螺纹的自动攻丝。机床可与自动上下料、自动分拣、料库等自动化设备集成,可搭载远程诊断健康保障系统、生产管理系统、亚威智云工业互联网平台,实现自动化、数字化生产。



江苏亚威机床股份有限公司SME2-315型伺服压力机。SME2系列伺服压力机为满足家电、汽车、精密五金、军工客户的需求,通过齿轮传动间隙精密控制满足电机频繁加減

速及换向精度,高功率密度伺服电机以最低的损耗及优化的永磁伺服电机电磁结构保证了电机极限性能,整机集成了大功率伺服驱动位置环带宽设计、大功率系统能量回馈技术、双电机同步解耦控制技术、伺服工艺曲线规划优化技术,轻松运用钟摆模式及多连杆模式,搭载级进模、多工位模具配合自动化,实现连续生产。

深圳迪能激光科技有限公司V-Bend系列数控折弯机。折弯力1600kN、折弯长度3100mm、油缸行程250mm、开启高度550mm、侧板间距3150mm。采用了百超专利技术的O型机架结构,高频响的闭环液压控制技术,CNC控制的机械挠度补偿技术,高速、高精度、高可靠性的后定位系统。

江苏金方圆数控机床有限公司ABM自动折弯单元。双伺服电机直接控制油泵技术,电机、泵、阀、油箱、过滤器及油缸全部集成,油液响应效率高并减少油液泄漏。相比传统电液折弯机节能15%~50%。配备专为折弯工况而设计的ER80六轴机器人系统,搭载江苏金方圆自主研发设计的高精度第七轴装置,可让机器人行走在任意位置都能完成工件的折弯,可选配自动更换抓具系统、视觉对中装置等,同时还可满足拓展生产线的需求。



江苏金方圆数控机床有限公司TPI 2000智能折弯中心。传动轴全部采用伺服电机,四边成形最小尺寸200 mm×200mm,双边成形最小尺

寸200mm,0.3s/折的折弯速度。折弯过程完全自动化,操作人员只需将板材放到工作台上,便可自动完成四边或多边折弯,使用万能折弯刀,钣金一次成形,无需更换折弯模具,可实现拍平、大圆弧、回形、封闭型、翻边等特殊折弯工艺。高度智能和自动化的折弯过程控制技术,能实现自动补偿,保证了零件的成形精度。

信宜华辉数控机床有限公司SP40-16SP全电伺服折弯机/折弯中心。SP系列全电伺服数控折弯机是一种无油、无污染、节能、静音、高效率、高精度的绿色环保新产品,折弯中心可以实现全自动折边,效率高且节能环保。

无锡金球机械有限公司WE67S-125/4100电液同步数控折弯机。电液全伺服系统,配合光栅尺精确定位,实现全闭环控制,工作台采用液压或机械挠度补偿,后挡料采用伺服电机驱动、滚珠丝杆传动、直线导轨导向,确保定位精度。

南通麦斯铁数控机床有限公司MB11032R90自动折弯机器人工作站。将折弯机和机器人两种设备合二为一,实现了拆垛、上料、折弯跟随、码垛等自动加工。通过TCP/IP的方式互联互通,麦斯铁机器人可以控制折弯机,使自动折弯的操作更加简便和自如。麦斯铁开发的视觉识别、离线编程等技术,实现机床、机器人互联,对接MES系统,可远程控制生产线,实时查看生产线状态。

南通麦斯铁数控机床有限公司MB11032W2油电混合动力电液伺服数控折弯机。配麦斯铁Ehybrid control伺服驱动油电混合动力系统,伺服电机驱动双向泵控制油缸同步,按需求的流量和压力工作并组成无溢流和节流损失的闭环液压系统。光栅尺动态检测滑块的同步和位置误差,Y1、Y2的定位精度和重复定位精度

及平行精度可达 $\pm 0.01\text{mm}$ ；上滑块可倾斜工作，可加工异型工件如椎体型、梯型、多边型。

南通麦斯铁数控机床有限公司MS0632高精度直线度剪板机。重型机架结构的高精准快速数控剪切机床，独特的剪切机构、自动刃口间隙调整机构及刀架回程机构使该设备具有剪切速度快，剪切板料平行度、直线度优异的特点。反扭曲装置，可实现窄料优异的剪切质量，平板剪切后翻身拼直线度 $\pm 0.05\text{mm}$ 。

南通麦斯铁数控机床有限公司MTPE31550 数控转塔冲床。配置32个模具工位的自动选模系统和大范围的快速伺服送料系统，自动编程软件，具有自动检测保护和自动诊断功能。按板材加工要求，通过编程，自动加工出不同尺寸、形状和孔距的孔；也能选用小冲模以步冲方式冲出大的圆孔、方孔、腰形孔及任何形状的曲线轮廓。预留有控制接口，可方便地与自动上、下料装置连接，构成柔性加工单元。

扬州锻压机床有限公司YT4L系列闭式四点多连杆多工位压力机。采用德国舒勒技术，应用舒勒深度优化的多连杆传动结构。压力机机身采用分体高刚性焊接结构，滑块超长八面导向，整机抗偏载设计（上流侧60%-下流侧40%公称力分配），更好地满足多工位冲压工艺需求。多工位压力机可在一次工作行程中，同时完成拉伸、冲孔、整形、翻边、切断等多道冲压工序，生产效率10~30次/min。压力机可配前后双移动式工作台，具备ADC一键换模功能，极大缩短了换型时间。该压力机还可接入用户车间MES系统，满足智能化生产需要。

扬州锻压机床有限公司YSH 系列三点（四点）闭式高速精密冲压线。采用高强度球墨铸铁铸造机身；三导柱（或四导柱）驱动长滑块，滑块采用四柱高刚性圆柱轴承长导向，导向精度高；传动轴采用滚动轴承和滑动轴承复合支撑，提高了传动精度和承载能力；调节螺杆液压锁紧，强制润滑、温度自动控制系统、热补偿技术精准控制了机床下死点精度。该生产线主要应用于汽车电机、家电压缩机等要求较高的电机铁芯精密高效冲压成形。

江苏省徐州锻压机床厂集团有限公司DPC1-125开式单点伺服压力机。公称力1250kN、公称力行程5mm、滑块行程150mm、行程次数60spm、最大装模高度380mm、装模高度调节量90mm。全钢焊接刚性机身，矩形六面体导轨，导向长、耐磨损、精度稳定性好，液压过载保护装置。采用伺服电机和直驱式伺服控制系统，通过对不同材质设定最合适的滑块运动模式。

美国肯尼福公司MC-60 FTI CNC (H) POWERBOX KINEROLLER®。采用坚固耐用的箱式结构，适用于大直

径、高硬度和轧制精密螺纹加工，并提供良好的零件圆度和直线度。可配备KINETROL™ NC滚动控制系统和交互式人机界面，具有加工监控功能和全集成自动工件处理系统，以及自动装载功能。KINESPIN™ 离心机系统可清洁和回收用过的冷却液。

德国宝飞螺技术有限公司RP15 HP螺纹及成形滚压机。采用高刚性的C型框架床身，应用电机丝杠驱动系统，搭载宝飞螺多轴CNC数控系统，最大滚压力150kN，工件直径 $\phi 3 \sim \phi 50\text{mm}$ 。可以选择单滑座或双滑座结构，切入式或穿越式滚压方式；双滑座机床保证工件始终位于加工区的中间，提高了加工精度，更换新的工件时不需要重新调整位置；当加工的螺纹比模具宽度长时需要穿过式滚压工艺。宝飞螺多轴CNC数控系统基于西门子840D硬件，具有图形操作界面、过程参数管理系统、过程参数可视化、操作提示等功能。该机适用于外形滚压尤其是薄型空心工件的滚压要求。

德国全斯福机械制造有限公司DB 642-CNC-RL左右双向数控弯管机。配置多层模结构，在同一程序内自动化实现顺时针方向、逆时针方向弯管，可以自动切换多种弯曲半径，自动切换弯管方向，或配置复合结构模具，用于直线段较短或无直线段管件的全自动折弯成形。该机适用于结构复杂的流体管件或航空导管。

江苏合泰机械科技有限公司CNC65XE全自动数控弯管机。一款三维数控机头旋转左右共向弯管机，可实现在机头旋转范围内任意位置弯曲。C轴（弯管）采用伺服驱动及机器人专用减速机传动设计，Y轴（送料）具有自动位置侦测功能，实现位置补偿。快速转模、平行式夹模设计、上下多层模设计，具有慢退芯轴功能。

江阴机械制造有限公司纯电动数控弯管机。此次展出有25、40、80、160 CNC-EMR四种规格的纯电动数控弯管机，设备为9~13轴数控，多层模设计，同一个弯曲周期可实现左右弯曲，自动改变弯曲方向，且头部主轴旋转同时进行。可进行图形化编程，自动弯曲模拟，其中25CNC-EMR R/L纯电动数控弯管机可旋转头部实现同模左右弯曲，减少模具成本。

吉林瑞铭机电设备有限公司全自动校直机。250吨以内采用伺服电机作为主动力源，250吨以上采用伺服液压系统作为动力源。该机可实现根据测点绘制弯曲趋势曲线，压头自动寻找弯曲最高点校直或相应的合适校直位置进行校直，且可实现连续点动校直，可防止工件校直后反弹。其修正软件具有分段测量校直、多维空间测量校直、连续快速点动校直及依次顺序校直功能，且可根据工件的实际跳动量自动变换校直参数。□

高速动台式龙门镗铣床的研发与应用

中国通用技术集团沈阳机床中捷友谊厂 赵旭靖

摘要：高速加工是目前金属切削加工中最具发展前景的技术路线之一。高速龙门铣床兼具立式加工中心的高速性能和龙门式镗铣床的强大切削能力，能够显著地提高生产加工效率。本文针对高速动台式龙门镗铣床的结构选型和设计进行详细分析和计算，深入探讨各种配置的优点和不足，并对高速龙门镗铣床在模具等领域的应用进行有益探索和试验。

一、市场现状分析

随着近年来工业4.0和中国制造2025计划的实施，国内各行业对于金属切削加工领域的精度和效率更加关注。相对于传统数控龙门产品，高速龙门镗铣产品的各轴快速移动速度和进给速度更快，主轴转速更高，更符合高精度、高效率的应用场景。

龙门产品按照运动部件可以分为龙门移动式产品和工作台移动式产品（以下简称“动台”）。龙门移动式产品主要应用于传统的重化工业领域，这些在过去为中国工业化打下坚实基础的行业已经逐渐走入瓶颈期和存量阶段，中国工业未来的增量在于新能源、智能化装备、高速轨道交通等行业。由于运动部件惯量小、结构轻量化，快速性能更强，预期不久的将来，动台式高速龙门产品将成为镗铣类细分机床市场的重要组成部分。

二、高速动台式龙门镗铣床的设计选型和计算

目前，提高动台式龙门镗铣床性能的技术路线主要有两方面：

1. 通过设计计算，提高机床快速性能

通过合理的设计计算，在确保产品性价比的前提下，显著提高产品的快速性能。多年来中捷友谊厂在对于龙门产品引进、消化吸收的基础上，开发了多款动台式龙门镗

铣床。下面仅以其中某款高速动台产品的伺服轴Z轴（滑枕垂直运动）为例，其运动部件计算过程如下：

（1）参数的设定：根据市场调研，设定Z轴技术参数如下：

轴向抗力： $F=10000\text{N}$ $V_{\max}=20\text{m/min}$ 寿命： $L_t=20000\text{h}$

（2）丝杠的选择

A、螺纹直径、导程、螺母的选择：

根据同类型机床设计经验，粗选丝杠轴径 $d=63\text{mm}$ 螺距 $L=20\text{mm}$ 。

丝杠螺纹长 = 行程 + 螺母长 + 冲程 + 端边限度
 $=1000+347+105+400=1852\text{mm}$ 。

螺母：BNFN6320-1852LC5 双螺母型。

目的是通过双螺母预压方式将滚珠丝杠副的轴向间隙显著缩小，从而使受到负载时产生的轴向位移量减少，提高机床精度。

B、精度的选择：

根据技术经济性原则，选定导程精度：C5

C、热抗位移的计数测量（确定螺纹轴的预拉伸力）：

$$\Delta l = \rho \times \Delta t \times L$$

式中： Δl ——丝杠轴向伸缩量（mm）

ρ ——热膨胀系数 $12 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$

Δt ——丝杠温升变化，取 2.5°C

L ——螺纹有效长度 1490mm

$$\Delta l = 12 \times 10^{-6} \times 2.5 \times 1490 = 0.045\text{mm}$$

丝杠预拉力 $F = \Delta l \times K_s = \Delta l \times E \pi d_3^2 / 4L$

式中: F ——预拉力 (kg)

K_s ——螺纹轴轴向刚性

$E = 2.1 \times 10^4 \text{ kgf/mm}^2$ $d_3 = 55.9 \text{ mm}$ $L = 1490 \text{ mm}$

即预拉伸力: $F = 0.045 \times 2.1 \times 10^4 \pi \times 55.9^2 / 4 \times 1490 = 1556 \text{ kgf}$

综上所述: 查表可得出丝杠额定载荷:

$C_a = 147 \text{ kN}$ $C_{0a} = 463.5 \text{ kN}$

D、对已选择的滚珠丝杠的校核:

a. 寿命的校核:

$L_t = (C_a / f_w F_a)^3 \times 10^6$

式中: L_t ——按小时的寿命

C_a ——基本额定负载 147 kN

f_w ——负载因数 取 2.5

F_a ——轴向负荷 10000 N

n ——转速 $n = V_{\max} / L = 20000 / 20 = 1000 \text{ r/min}$

$L_t = (147000 / (2.5 \times 10000))^3 \times 10^6 = 2 \times 10^8 \text{ h} > L_t$

因此满足要求。

b. 临界速度的校核:

$n = f d_3 \times 10^7 / L^2$

式中: $f = 21.9$ $d_3 = 55.9 \text{ mm}$ $L = 1545 \text{ mm}$ L ——安装间距

$n = 21.9 \times 55.9 \times 10^7 / 1545^2 = 5128 \text{ r/min} > 1000 \text{ r/min}$

因此满足要求。

c. $3F = 3 \times 10000 \text{ N} = 30000 \text{ N} = 30 \text{ kN} < 463.5 \text{ kN}$ 因此满足要求。

(3) 轴承的选择

综合考虑高速龙门铣床进给轴的技术特点是: 高轴向刚性, 低启动扭矩, 极限转速高, 安装结构简单。因此选用高精度角接触球轴承。

(4) 电机的选择

选择电机的条件是: $N_{\text{电}} > n_{\text{负载}}$; $T_{\text{电}} \geq T_{\text{负载}}$; $J_{\text{电}} \geq 1/3 J_{\text{负载}}$ 。

粗选功率密度高, 运行稳定的西门子 1FK 系列电机, 其技术参数如下:

额定转矩: $15.5 \text{ N} \cdot \text{m}$; 额定转速: 3000 r/min ; 额定转动惯量: $127 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

校核所选电机:

1) 负载扭矩的校核

移动部件总质量 m	600 kg
丝杠数量 n	1
负载安全系数 f_0	1.000
不平衡因数 f_1	1.00
进给抗力 F	10000 N
丝杠导程 / 螺距 (mm) S	20.00 mm
丝杠效率: $\eta = 93\%$	0.93
齿轮箱减速比: i_{gear}	3.00
齿轮箱所需克服重力矩 T_{2g}	20.13 N·m
齿轮箱所需切削力矩 T_2	34.23 N·m
齿轮箱所需额定力矩 T_{2N}	54.36 N·m
电机所需额定力矩 T_{1N}	18.12 N·m

$T_{1N} = 18.12 \text{ N} \cdot \text{m} < T_{\text{电}n} = 22.9 \text{ N} \cdot \text{m} (n = 1200 \text{ r/min})$

2) 负载惯量的校核

丝杠转动惯量:

$J_1 = 0.78 D^4 L \times 10^{-6}$

$= 0.78 \times 6.3^4 \times 185.2 \times 10^{-6}$

$= 0.23 (\text{kgf} \cdot \text{cm} \cdot \text{s}^2)$

D : 滚珠丝杠直径, cm;

L : 丝杠总长, cm;

滑枕折算到丝杠上的转动惯量
(总重 $W = 600 \text{ kg}$)

$J_2 = \left(\frac{v}{2\pi m} \right)^2 \frac{W}{g} = \left(\frac{s}{2\pi} \right)^2 \frac{W}{g}$

$= \left(\frac{2}{2\pi} \right)^2 \times \frac{600}{980}$

$= 0.06 (\text{kgf} \cdot \text{cm} \cdot \text{s}^2)$

S : 滚珠丝杠导程, cm;

W : 滑枕重量, kg; $g = 980 \text{ cm/s}^2$;

折算到电机轴上的转动惯量:

$J = \frac{J_1 + J_2}{i^2} = 0.032 \text{ kgf} \cdot \text{cm} \cdot \text{s}^2 = 32 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

$J = 32 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

$J_{\text{电}} = 127 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

$J/J_{\text{电}} = 0.25 < 3$, 惯量匹配合理。

综上所述: $T_{\text{电}} > T_{\text{负}}$; $J/J_{\text{电}} < 3$;

$N_{\text{电} \max} / i > n_{\text{负} \max}$ 因此, 选用的 Z 轴电机满足要求。

2. 结构配置和外购件的合理选取

经过反复的实验和论证, 结合各部件功能需求, 合理选取结构配置和外购件, 方可获取高速龙门铣床预期的参数和性能。

(1) 高速导轨的选择

数控机床常用的导轨形式大体可以分为直线导轨, 铸铁-贴塑 (灌胶) 滑动导轨, 滚滑复合导轨以及静压导轨。

静压导轨可承受载荷大, 精度高且稳定性强, 但高速性能是其弱点, 且加工及安装调整环节复杂, 一般应用于重型龙门产品。直线导轨的滑块摩擦力小而均匀, 滚珠跳动低能够承受高速和高加速度运动, 适合高精、高速度运行, 因此我公司高速龙门产品的 X、Y 轴选用这种产品。

对于 Z 轴, 各机床制造商都有自

己的考量。传统上来说铸铁-贴塑滑动导轨由于其面接触的天然优势,接触刚性和稳定性非常好;在吸震性方面,贴塑导轨有着更为明显的优势。直线导轨只有通过增大预加载荷才能在垂直于运动方向上接近滑动导轨刚性,在沿着运动方向的刚性仍然稍差。考虑到Z轴和主传动的布局非常近,结合近年来市场对大扭矩产品的倾向性,仍然更优先于选择滑动导轨。随着贴塑基体和添加材料的性能逐步提高以及我公司刮研技术的改进和优化,导轨副接触率显著提高,塑面含油量比以往有着更高的数量和稳定性,润滑效果优异;目前铸铁-贴塑导轨的运行速度已经远高于以往,在我公司高速龙门产品样机试验中可以完全满足快移速度20m/min的要求。

(2) 主传动部件速度提升的方案

国内龙门产品大都仍然采用的是传统的斜齿轮箱变速经花键轴的传动方式。斜齿轮作为传动单元,不仅有振动和噪声大的缺点,而且增加了转动惯量,难以大幅提高主轴转速。行星齿轮箱相对于传统的惰轮齿轮箱设计,有着明显的优势。由于四个行星轮可以均分动力,在设计上可以节省空间使得齿轮箱外形紧凑。四组可同时啮合的带螺旋齿的行星齿轮保证了高速运转下的低噪音、低振动。

近年来,高刚性碳纤维联轴器逐渐进入主传动结构应用领域。碳纤维联轴器对交变负载不敏感,瞬间惯量远低于花键轴;而且可以补偿轴向、径向偏移量,反作用力低,可以实现零背隙传递扭矩,扭矩刚度高,我公司产品经过多次项目应用,已经完全可以用碳纤维高刚性联轴器替代花键轴。

国内龙门产品主轴轴承多采用以工作载荷为目标设计参数的角接触球轴承。这种轴承在4500r/min以下工作,只要控制好润滑脂的填充量,是可以满足工作要求的。但如要进一步提高转速,钢球离心力作用在轴承外圈产生高温,会显著降低轴承寿命。事实上,高速工作时,主轴旋转所产生的离心力远大于加工时滚动体所受到的切削力。因此,高速主轴轴承的主要设计参数应该是转速而不是切削力,陶瓷球轴承更适合这种工况。其氮化硅材料Si₃N₄具有硬度高、耐高温、热胀系数小等一系列优良特性,可使其离心力减少40%,纵弹性系数提高50%;轴承刚度非常高,摩擦力矩和温升更小,在同等温升条件下可以获得更高的转速。

自然冷却、油脂润滑适用的转速较低,给主轴转速的进一步提高带来了困难。主轴高速运动产生热变形,严重的会导致主轴系统无法正常运转以致失效。通常采用的方法是用封闭的油路来构成“油-水热交换系统”加以散热和对主轴箱体的冷却。对滚动轴承的润滑常采用下列方式,即连续的油脂润滑、油雾或油气润滑以及喷油润滑。油脂润

滑技术成熟,适用的转速上限可达到6000r/min。由于环境污染,油雾润滑越来越多地被油气润滑所代替。喷油润滑所能达到的主轴转速是最高的,其DN值为 $2.5 \times 10^6 \text{ mmr/min}$,但需配备附加的供油设备。

此外,高速龙门铣应切实提高刀具夹持可靠性,并考虑高速主轴和刀具的动平衡。实验表明,当主轴转速超过5000r/min时,离心力将使锥孔外径扩张,主轴与刀具的接触面积显著缩小,从而降低了刀柄的接触刚度。提高刀具拉紧力是有效的改进方式;流体压力夹紧方式的夹紧力随着主轴转速的提高而自动增大,效果更为显著。同时,必须对刀夹和刀具的旋转总成充分地进行动平衡,以消除有害的动态不平衡力,避免高速下的颤抖和振动。

三、高速动台式龙门镗铣床的应用

1. 高速龙门在模具生产中的应用

在现代模具生产中,随着对零件美观度要求的提高,模具结构也日趋复杂,自由曲面所占比例不断增加,因而大型模具采用龙门设备进行高速切削加工应用越来越广泛。

采用高速切削可以取代电加工和磨削抛光工序。对于大型模具零件,利用高速动台式龙门镗铣床,可一次装夹完成多工步加工。这改变了高淬硬钢模具件(45~65 HRC)传统加工路线:退火-铣削(电火花)-热处理-磨削(手工打磨-抛光),甚至可用高速铣削加工替代原来的全部工序。大量生产实践表明,应用高速切削,可节省约80%的模具手工研磨时间,模具表面加工精度可达 μm 级别,刀具切削效率可提高5倍以上。

为满足模具高速加工的需要,机床的驱动系统应具有下列特性:

(1)高进给速度:研究表明,对于小直径刀具,提高转速和每齿进给量有利于降低刀具磨损。目前常用的进给速度范围为15~20m/min;

(2)高加速度:复杂曲面廓形的高速铣削要求驱动系统具有良好的加、减速特性,驱动器必须能够提供 $0.8 \sim 5 \text{ m/s}^2$ 的加速度。

为此,我们采用全闭环位置伺服控制高精度精密滚珠丝杠。由于高速切削加工时离心力和振动的影响,我们为主轴锥孔和刀具设计了很高的拉紧力,并确保其装夹重复定位精度,以及高速动平衡的可靠性。

应用高速切削技术制造模具切削效率高、加工精度高、表面质量好,因此可以显著缩短后加工如磨削、人工后加工和取样检验辅助工时等许多优点。通过引进和应用高速龙门铣削加工设备,可以极大推动新能源汽车模具制造的发展。

研发与应用

高端机床作为工业母机，其导轨安装面有着严苛的要求。加工精度决定着产品性能，用简单、高效的工艺流程加工出高精度的导轨面，可以大幅提高机床性价比。沈机集团对产品导轨的精加工一般是采用导轨磨床执行的，在达到高精度的同时，也导致产品线导轨磨床长期满负荷工作。科堡导轨磨床可以加工的零件规格为2800mm，随着产品规格的不断扩大，导轨磨将不能满足工艺需要。高速龙门铣加工零件范围大，可一次定位加工导轨正侧面，能够保证工件的垂直度要求，而且加工效率高。

目前公司产品的床身、立柱、横梁等零件的导轨设计精度通常为直线度 $0.008\text{ mm}/1000\text{ mm}$ ，垂直度 0.01 。为达到设计要求，工艺流程一般采用粗刨—时效—精刨—导轨磨，以及后续的钻、镗、铣等工序，加工效率低、制造周期长，其中高精度导轨均需要在科堡导轨磨上进行加工。为了能够减轻导轨磨床的工作量，缩短生产周期，节约生产成本，充分发挥自主研发数控龙门铣设备的优势，我们经过详细分析后，在满足设计和装配要求的情况下，开展以动台式高速龙门精铣代替磨削的应用研究。

以我公司某型在制产品的立柱大件为例，该大件导轨原来采取导轨磨床精加工两处阶梯导轨面，现采取高速精铣替代磨削方案。试件采用了粗铣-人工时效-精铣的加工方法，其中精铣采用我公司高速动台式龙门镗铣床产品GMC2040XX进行加工。

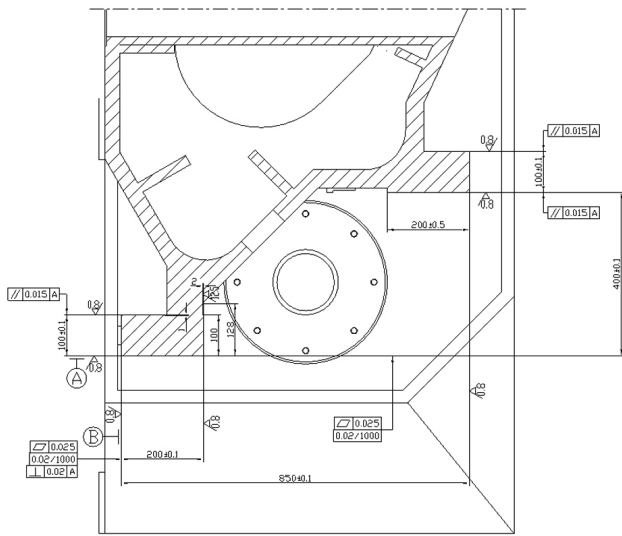


图1 某立柱零件加工截面

切削参数: 进给速度 $v=250 \text{ mm/min}$, 转速 $n=800 \text{ r/min}$, 切深 $t=0.04 \text{ mm}$

导轨正侧面采用数控龙门立主轴和直角头分别进行加工;考虑到动台式数控龙门铣床运动部件惯量更小,工作台的进给精度较高,且为了避免Y轴横梁重心下垂影响,

采取X轴工作台进给的方式沿工件长度方向加工。为提高导轨表面粗糙度,刀具采用硬质合金铣刀。

理论研究表明影响粗糙度因素有很多,包括粗加工后残留面积的高度、鳞刺、切削变形、刀具磨损等方面。此外,切削速度和进给量等切削用量对加工表面的粗糙度有重要影响。动台式高速龙门铣的X进给轴20m/min的快移移动能力、6000r/min的高主轴转速非常适合这种工况。

在切削实验中,随着切削线速度的增加,表面粗糙度明显降低。这是因为随着速度的增加,切削力有较大的下降,从而导致表面粗糙度迅速的下降。在低速工况下,由于刀具切削刃的挤压与摩擦易产生较大塑性变形,积屑及鳞刺,从而导致表面粗糙度增大。提高切削速度可以使积屑瘤和鳞刺减小从而降低表面粗糙度;但有一定限度,因为任何刀具的刃口圆弧半径不可能为零。如果维持进给速度不变,随着主轴转速的提高每齿进给量也变小,表面粗糙度下降的更快。

在实验我们发现,切削线速度在 $500 \sim 700 \text{ m/min}$,每齿进给量选择 $0.02 \sim 0.04 \text{ mm}$ 左右,工件的表面粗糙度比较好。对于铸铁材料零件来讲,兼顾效率与质量要求,可以设定切深为 0.04 mm 。当 $f_z > 0.1 \text{ mm}$ 时表面质量显著变差。主要是由于每齿进给量增加,会导致切屑体积的增加,导致作用在刀尖上的切削力的增加,从而使得表面粗糙度变大。

综上,从我公司采用高速龙门铣削代替磨削的实测结果来看,其加工的零件几何精度略高于导轨磨,完全满足设计要求;工件重要加工面的轮廓算术平均偏差Ra粗糙度略低;虽然 $Ra < 1.6$,但是很难接近0.8的水准,总体也可以满足产品性能和零件装配需要。以铣代磨工艺可以加快产品制造周期,降低生产加工成本和关键设备占用,其应用前景十分广阔。

四、结束语

随着国家工业水平的全方位提升, 各行业对于加工效率的提高也越来越关注。高速龙门式镗铣床作为一种大型数控设备, 在新能源、轨道交通、航空航天等行业得到了广泛应用。高速加工能有效地提高生产率、缩短切削时间和产品的制造周期; 另一方面, 高速加工还具有许多特殊的优点, 如切削力小、工件温升和热变形小等等; 此外, 对一些常规加工中难以解决的某些特殊材料如铜、铝、钛合金材料、纤维增强塑料等的高效加工问题也能加以解决。

高速龙门镗床和普通龙门铣相比可提高生产率三至四倍,并能使工件获得很高的加工精度和表面质量。目前我国数控龙门镗床的主轴转速和进给速度仍然可以进一步提高,如何改进结构使其更适应于高速加工的要求,是机床制造商需要深入研究的问题。□

一种箱体类零件精镗孔专用机床的研发

沈阳机床（集团）有限责任公司 郭鑫

摘要：大型箱体类零件深孔精镗加工受加工设备精度影响和工艺方法制约，很难保证被加工孔系的精度要求。本文针对机床及同类重点行业的箱体类零件孔系同轴度加工质量改善问题，研发了一种专机机床，在其设计制造过程中采用正向设计方法，攻克了加长主轴、高刚性导轨设计、对称结构设计等多项技术。精镗孔专机独特的深孔加工能力能够解决制约国内机床及同类重点领域发展的“卡脖子”问题，具有良好的应用前景。

机床作为“工业母机”被誉为“装备的装备”，是制造业升级发展的核心装备基础，直接关乎制造业发展能力和水平，具有极其重要的战略地位。根据目前制造业市场调研情况，传统的中低端机床已不能满足高端零件加工的需求，尤其是能源、军工、航空航天等重点行业对加工设备需求越来越趋向于高精、高效化，特别是数控卧式铣镗床方面，对其加工精度要求越来越高。

卧式铣镗床加工精度主要在于主轴精度，影响主轴加工精度的关键零件除主轴组自身质量精度外，主轴箱主轴孔加工精度直接影响主轴的安装精度。目前，国产机床主轴箱的深孔镗削主要采用直进式或回转式加工，受机床精度和加工方法的制约，深孔精加工一直是制约机加设备高端发展的“卡脖子”问题，高端产品零件的高精加工大多依赖进口机床设备。

为打破这一困境，沈阳机床针对制造业关键“卡脖子”问题和未来发展高端机床产品的市场需求，研制了主轴箱精镗孔专机。专机主轴悬伸达1.4m，可有效解决深镗孔精加工问题，不仅解决了关键加工难题，更填补了此领域的设备“空白”，其主要技术指标处于国内领先、国际先进水平。该机床的研制，为国产机床发展高端市场奠定了坚实基础，为掌握相关行业制造核心技术提供了强有力的设备支撑。

一、镗孔加工方法分析

主轴箱体的轴承孔多为镗削加工，是整个工件加工

的最后一序，此时主轴箱体的各个表面已经精加工完成，可以利用其他加工面作为基面进行主轴孔精镗加工^[1]。主轴箱体轴承孔系的同轴度普遍要求较高，一般不超过0.02mm，孔距一般在1m左右，大型箱体孔距将达到1.2m，加工时难度较大，目前较为常用的主要为悬臂式镗削、回转式镗削和支撑式镗削。

1. 悬臂式镗削

悬臂镗削加工一般是在卧式镗床上进行，加工时，通常将主轴箱体装夹在主轴进给方向，利用机床主轴的悬伸及镗刀杆的自身长度来实现多阶孔系的加工，其原理如图1所示。

采用主轴及镗刀杆镗孔切削时，刀杆会因自重变化产生一定的挠度变形，同时镗刀杆还会随主轴的不断悬伸产生轴线偏移，主轴伸出行程越大，主轴轴线偏移量就越大，当加工较长内孔时，加工孔的轴线很难保证。由于主轴不断伸出，整个刀杆系统刚性不断变差，镗削时在切削力作用下，系统弹性变形逐渐增大，使被加工孔产生较大的圆柱度误差。

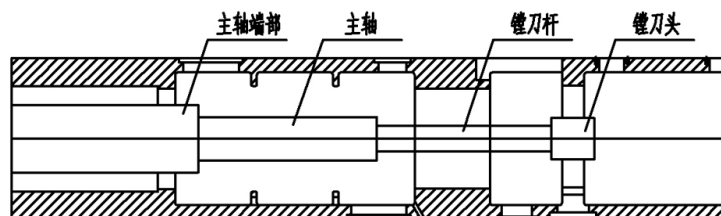


图1 悬臂镗削法

这种加工方法受主轴加工范围和直线度精度影响较大,在孔距较小时可以实现理想的同轴度,当前后孔距较大时,或加工距离更大的远端孔时,主轴伸出悬垂较大,加工精度很难保证。对于孔距较小或孔距较大、安装精度要求不高的情况下可以采用该方法加工。但由于镗轴伸缩行程有限,且伸出后精度下滑问题,对于深孔加工其同轴度难以保证,加工难度较大。

2. 回转式镗削

回转式加工需要在有回转工作台的刨台式铣镗床或落地式铣镗床上进行,该方法的优势在于不受加工孔距大小影响,在加工远端孔的时候为避免镗轴伸出过长导致加工精度变差,通过工作台回转180°的方法加工远端孔。

这种加工方法避免了主轴伸出悬垂对远端孔加工精度造成的影响,利用工作台的回转可以加工前后孔距较大的同轴孔。但该方法受工作台的回转精度影响较大。目前能够承载大型箱体重量的机床工作台回转精度大多在6"左右,最好的精度可以控制在3",同时受被加工件孔距的影响,孔距越大,折算到孔的同轴度精度就越低。以孔距 $l=1\text{m}$ 为例,当回转精度达到3"时:

$$\text{轴线偏移量 } \delta = l \times \tan 3'' = 0.013\text{mm}$$

$$\text{同轴度 } \phi = 2 \times \delta = 0.026\text{mm}$$

既折算到孔的同轴度上难以到达0.02mm,回转式加工无法实现高精度大孔距的同轴度加工^{[2][3]}。

3. 支撑式镗削

支撑镗削是采用支撑镗杆进行镗削的一种切削加工方式。根据镗杆支撑方式可分为:吊墙导向法和固定双导向法^{[4][5]},如图2、图3所示。通过增加镗杆辅助支撑,增强切削刚性,提高加工质量。

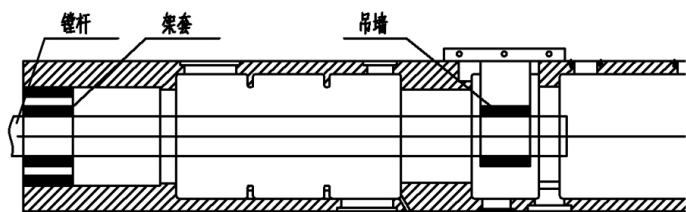


图2 吊墙导向法

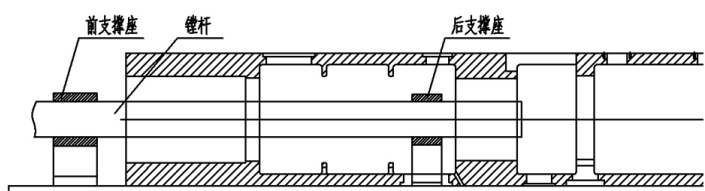


图3 固定双导向法

这种方法避免了深孔加工时悬垂误差和回转加工时回转精度误差对加工精度造成的影响。但该方法需要安装必要的辅助支撑具,支撑具的安装定位精度对加工效果影响较大。由于支撑具安装较为复杂,且每次加工安装受操作者影响较大,装配精度存在一定误差,导致零件加工一致性较差。

综上所述,针对零件深孔加工,各种加工方法均有其优劣势,其关键因素在于加工设备精度,机床精度直接影响加工质量。通过提高机床深孔加工能力,采用简单的加工方法,避免复杂工艺造成可靠性降低,是解决深孔加工面临的主要问题。针对这种情况,开发一种精镗孔加工专机,采用直进式深孔加工,可以有效解决较大孔距同轴度加工的难题。

二、精镗孔专机介绍

精镗孔专机是采用先进制造技术而开发的用于主轴箱镗孔加工的专机产品。具有镗削、铣削、钻削(钻、扩、铰)、攻螺纹(刚性攻丝)、铰削等多种加工功能,可配套带有工作台交换功能的数控回转工作台,实现工件一次装夹便完成四个面上的孔组、孔系及平面的多工序加工,配套刀具可使机床成为高效的自动化设备,用于自动化柔性单元使用。精镗孔专机整机外观如图4所示。

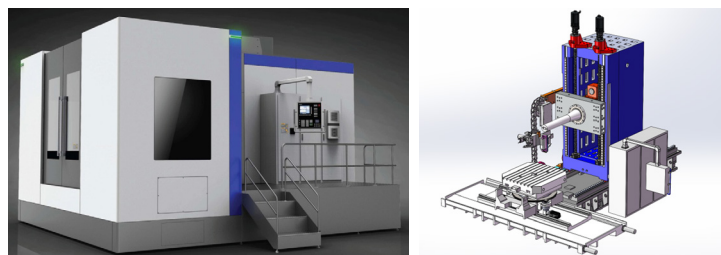


图4 精镗孔效果图及裸机图

该机床为框型单立柱、正挂箱结构,机床配套数控回转工作台,整体呈T字型布局形式。机床主轴箱沿立柱导轨垂直方向移动,立柱沿纵床身导轨移动,数控工作台360°回转。机床主传动采用主轴交流伺服电机作为动力源,实现无级传动,可实现低速大扭矩和高速恒功率切削,满足精加工要求。主轴轴承为进口主轴精密轴承,可保证主轴加工精度。主变速箱变速分高、低两档,挡内无极变速。各轴进给传动采用交流进给伺服电机带动滚珠丝杠无级传动,滚珠丝杠为两端固定支撑,双向预拉伸,确保丝杠进给精度和寿命。机床的X、Y、Z三轴导轨采用重载滚柱直线导轨,摩擦系数小,快移速度大,承载能力强,满足高效切削要求。其主要技术参数见表1。

表1 精镗孔专机主要技术参数

项目	单位	规格	
加工范围	主轴箱最大行程——Y轴	mm	1600
	立柱最大行程——Z轴	mm	2500
主轴	锥孔 (7:24)		BT50
	直径	mm	φ200
	转数范围(无级)	r/min	10~1000
	最大输出扭矩	N·m	1000/1200 (连续/30min)
	主轴电机功率	kW	17
	主轴轴向最大抗力	N	12250
	工作台尺寸	mm	1400×1400
工作台	工作台承重	kg	4000
	工作台回转——B轴	mm	360°/0.001°
	双向定位精度	"	±3"
	双向重复定位精度	"	±2"
	直线轴(X)运动直线度	mm	0.01
垂直度	Y轴运动直线度	mm	0.01
	Z轴运动直线度	mm	0.01
	主轴箱沿Y轴移动和工作台沿X轴	mm	0.01/500
	主轴箱沿Y轴移动和立柱沿Z轴移动	mm	0.01/500
	工作台沿X轴移动和立柱沿Z轴移动	mm	0.01/500
	主轴锥孔轴线的径向跳动	mm	0.007 (端部)
		mm	0.015 (端部300mm)
	主轴有效长度	mm	1400
	定位精度	mm	0.010
	重复定位精度	mm	0.008

三、机床先进技术应用

1. 加长主轴技术

精镗孔专机开发采用三维正向设计,其关键部件设计均采用模拟分析,通过对比分析数据进行结构优化,从而使其达到最合理的布局形式,整机刚性强、动态特性好,充分满足高精度切屑要求。其中最主要的是加长主轴的开发,为满足直进式加工,主轴有效长度1400mm,直径200mm,满足深孔镗削。并采用定心轴承结构,提高径向定位刚度,全齿轮变速传动,保证大扭矩输出。

精镗孔专机为保证加工刚性,采用固定式主轴参与进给,但主轴悬伸较大,受重力影响会导致主轴前端出现悬垂,即“低头”现象。如果变形尺寸过大会严重影响整机加工质量。本文开发的专用机床主轴前端有效加工长度为1400mm,即主轴前端1400mm范围完全悬垂,通过对分析数值的对比,不断优化主轴长径比和加强轴径分布结构,进而得到最佳的主轴结构^[6],如图5所示为主轴有限元分析,主轴前端最大悬垂变形量仅为0.01mm,满足高精度同轴度孔加工使用要求。

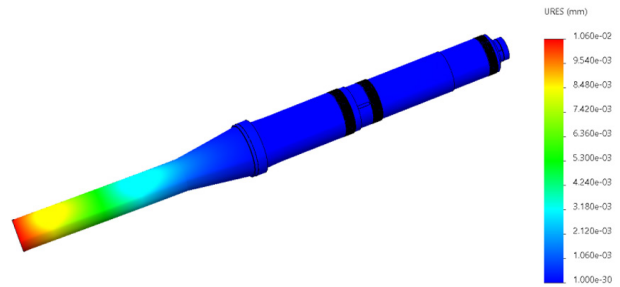


图5 主轴有限元分析

主轴前端带有1:12锥轴结构,主轴固定采用双列圆柱锥滚轴承,使主轴能够承受径向和轴向的联合负载。相比角接触球轴承,承载能力大,极限转速完全满足箱体镗削需求。通过轴承轴向游隙调整,可使主轴具有更好的装配同轴度,提高主轴精度保持性。主轴结构示意图如图6所示。

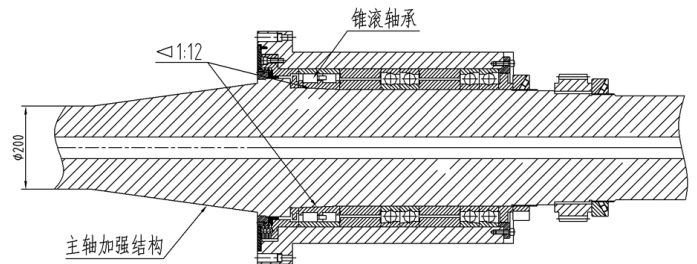


图6 主轴支撑结构

2. 高刚性导轨分布技术

精镗孔专机为保障主轴箱移动稳定性,立柱采用大截面设计,同时采用前后四导轨结构,如图7所示。导轨采用MR65规格重型滚柱直线导轨,左右导轨跨距1000mm,前后导轨跨距1880mm,导轨跨距大,其抗扭倾覆力矩大,有效增强主轴箱连接刚性。导轨上带有液压常闭式导轨锁,与直线导轨滑块在导轨上保持运动一致性,导轨锁安装结构紧凑,维护方便,常闭式控制保证机床即使在断电状况下,导轨锁也能够牢牢夹紧,防止主轴箱下沉,提高机床使用稳定性,如图8所示。

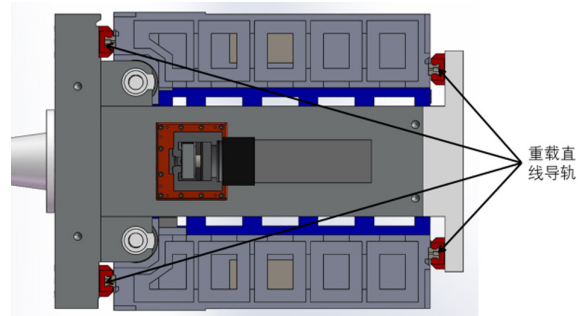


图7 主轴箱四导轨结构

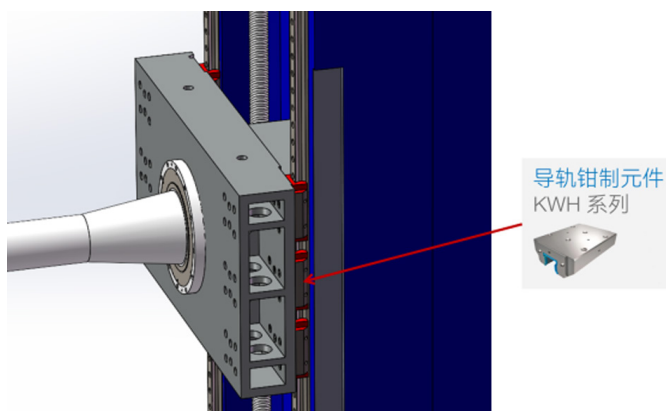


图8 导轨锁设计

3. 对称结构设计

精镗孔专机采用框型立柱与正挂箱布局形式^[7], 可使主机部分结构对称, 受力均匀, 使机床具有更好的精度保持性、刚性和抗载能力。主轴箱驱动采用对称双丝杠重心驱动结构, 同时两个丝杠各配以光栅尺, 实现对Y轴位置的检测, 运用双驱同步控制技术, 即平行轴技术——由两个相互独立的伺服驱动两个相互独立的电机共同驱动一个运动轴, 通过数控系统保证同步和移动的正确, 其结构如图9所示。

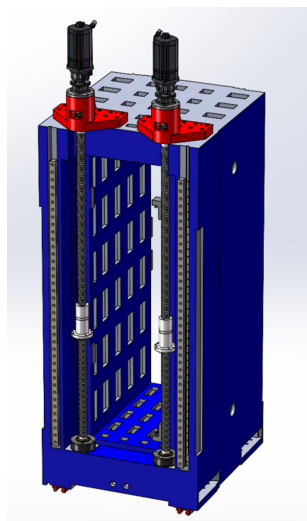


图9 正挂箱双丝杠结构

为提高丝杠驱动的精度, 丝杠的上端轴承采用深沟球轴承支撑, 而丝杠下端采用的是进口推力圆柱滚子轴承。该轴承起到对整个丝杆及驱动部件的支撑作用, 以提高丝杠的运行精度, 并有效提升了Y轴的驱动能力, 使重锤平衡装置得以取消, 使Z轴的驱动质量大大降低, 充分提高了Y轴及Z轴的动态特性。双丝杠结构提供了补偿主轴箱扭转角度误差的可能, 即通过龙门轴组间的微小坐标补偿差值, 实现主轴箱箱体的实际摆角变化, 从而弥补箱体变形引起的角度误差, 图10为丝杠装配示意图。

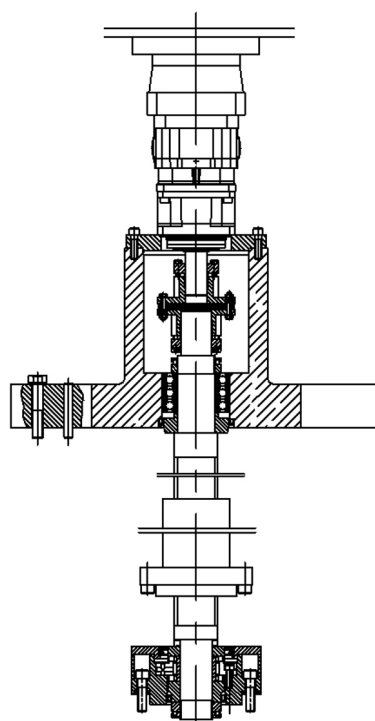


图10 立柱丝杠支撑结构

四、结语

精镗孔专机采用了整机三维设计、加长主轴设计、高刚性导轨分布技术和对称结构技术等多项先进技术和方法来实现其功能和各项精度, 在研制过程中解决了结构布局、参数修正、零部件优化等问题。精镗孔专机独特的深孔加工能力和良好的精度保持性, 特别适用于主轴箱等箱体类零件深孔精镗加工, 能够解决高端机床制造等国家重点制造领域、重点行业对此类机床的需求。该机床为加快推进中高端产品的研发及产业化, 实现高端产品满足国内重点领域需求, 起到填补国内空白、替代进口的作用, 彻底解决制约国内重点领域发展的“卡脖子”问题。□

参考文献

- [1] 周萌. 高速主轴箱轴承孔系同轴度改善方法研究[J]. 制造技术与机床, 2020(11).
- [2] 何定健, 李建勋, 王勇. 深孔加工关键技术及发展[J]. 航空制造技术, 2008(21).
- [3] 姜雪梅. 空心长轴深孔加工工艺研究[J]. 航空精密制造技术, 2011, 47(4).
- [4] 尚红. 滑枕体深腔精密孔加工[J]. 金属加工: 冷加工, 2008(11).
- [5] 张秀玲, 王常义. 高精度深孔加工的工艺设计[J]. 机械工程师, 2007, (9).
- [6] 余剑武, 桂林, 李民选, 罗嗣春, 张汉卫. 数控落地铣镗床滑枕变形有限元分析及补偿[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2015(10).
- [7] 周萌. HMC200ru卧式五轴加工中心的研制[J]. 世界制造技术与装备市场, 2020(1).

2021年电加工机床行业运行情况

中国机床工具工业协会特种加工机床分会 吴国兴 卢智良 陆晓淳 王晓娟

一、机床工具行业基本情况

根据中国机床工具工业协会公布的行业运行情况分析报告,2021年机床工具行业延续2020年下半年以来的恢复性增长态势,市场需求持续改善、进出口大幅增长、行业运行继续保持向好趋势。

根据中国机床工具工业协会统计,2021年1~12月重点联系企业累计完成营业收入同比增长26.2%,增幅比上年扩大23.2个百分点,所有分行业同比增幅均在10%以上,其中金属切削机床同比增长28.9%,金属成形机床同比增长20.6%;2021年重点联系企业在基数较低的情况下实现利润总额同比增长68.9%,亏损企业的占比降为19.8%,比上年同期收窄2.7个百分点,多数分行业实现盈利,机床行业长期以来的亏损或利润微薄情况有所改善。

2021年机床工具行业进出口额全年均保持快速增长,进出口总额再上新台阶,出口额为192.9亿美元,达到历史新高,同比增长29.6%;进口额为138.4亿美元,同比增长20.4%,进出口额保持了顺差态势,并呈现逐渐增大的趋势。其中,在金属加工机床的进出口贸易中,特种加

工机床的进口额和出口额分别位列第2位和第1位。

二、电加工机床行业经营情况

1. 总体经营情况

与机床工具行业的整体运行情况一样,电加工机床行业2021年的市场形势与2020年相比有明显好转。

根据中国机床工具工业协会特种加工机床分会对全国电加工机床行业22家重点骨干企业经营数据的统计分析,2021年电加工机床的销售总量同比增长27.40%、销售总额同比增长24.66%。其中,外资企业的销售情况好于行业整体情况,销售量和销售额同比增幅分别达到35.47%和34.54%,高出行业平均增幅8~10个百分点。

图1和图2是近三年电加工机床的销售情况。可看出,自2019年以来,行业整体运行情况呈现出逐步上升的趋势。随着我国抗疫成果不断扩大以及相关政策逐步落地,固定资产投资、新基建项目数量等有了明显增长;我国逐渐成为了包括制造装备在内的工业产品和日用消费品全球主要生产热点地区之一,从而刺激了市场

对电加工机床的旺盛需求,形成了近三年来电加工机床市场行情不降反升并逐年提高的好局面。

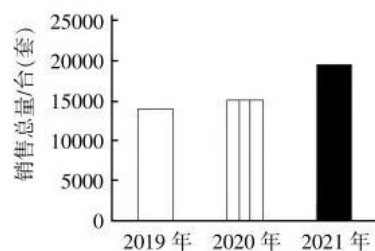


图1 近三年电加工机床销售总量

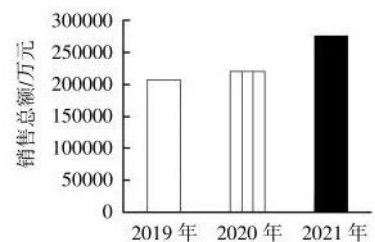


图2 近三年电加工机床销售总额

2. 分季度市场销售情况

根据22家电加工机床行业重点骨干企业统计数据,2021年一至四季度的市场行情呈现出等比例小幅下降的态势,全年的销售量和销售额分别见图3和图4。分析可知,2021年第一季度机床销售量为全年最高,同比涨幅达到了88.73%,第二、第三季度则以1.4%、1.5%的环比幅度下降,第四季度的环比降幅有所扩大,达到15%,但同比增幅仍达到9%。

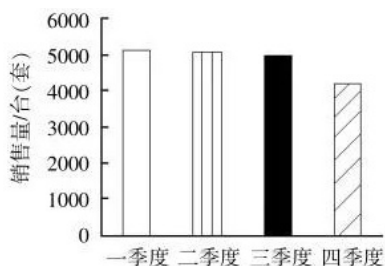


图3 2021年电加工机床销售量

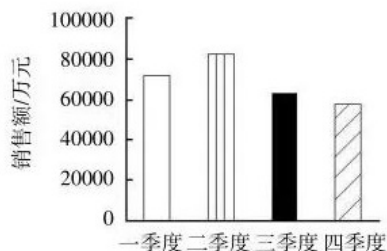


图4 2021年电加工机床销售额

2021年第一季度销售额创近年来新高，同比增长79.82%，甚至比业绩较好的2018年还增长了9.14%；第二季度继续保持增长势头，环比增幅达到15%。2021年下半年，钢铁、有色金属、煤炭、汽油等原材料以及铸件、薄板、丝杠导轨、电子元器件等配套件大幅涨价且供货紧张，加上环保、安全生产等检查力度加大等因素，企业的产能受到制约、利润下降，给企业生产和营销带来一定影响，使得第三季度出现了较大下滑，环比降幅达到23.09%，第四季度环比降幅则有所收窄（见图5和图6）。总体来讲，2021年各季度的销售量和销售额均较前两年有明显提高。

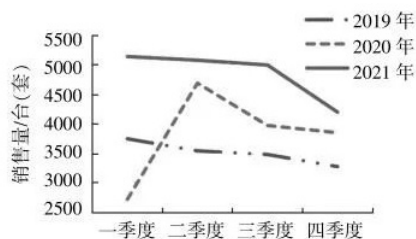


图5 近三年电加工机床分季度销售量

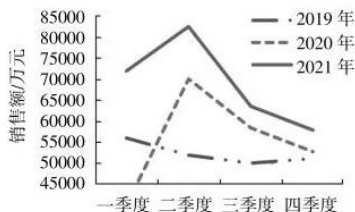


图6 近三年电加工机床分季度销售额

3. 各类产品销售情况

2021年各类电加工机床的销售量及销售额占比分别见图7和图8。可看出，与往年一样，2021年的电火花线切割机床销售量接近总销售量的七成，同比增长29.09%，销售额占总销售额的一半还多，同比增长26%。其中，往复走丝电火花线切割机床的销售量和销售额分别是单向走丝电火花线切割机床的8.7倍和1.28倍。与上年同期相比，往复走丝电火花线切割机床的销售量占比上升0.24个百分点，但销售额占比却下降2.14个百分点，而单向走丝电火花线切割机床的销售量和销售额占比则分别上升0.67个百分点和2.73个百分点。这一方面说明，电火花线切割机床在模具及零件加工制造业中继续发挥着不可或缺的作用；另一方面也表明，虽然目前往复走丝型电火花线切割机床以其高性价比赢得了绝大多数用户的青睐，但随着用户对机床性能要求的不断提高，单向走丝电火花线切割机床的用户群将慢慢扩大，与往复走丝电火花线切割机床销售量的差距会逐渐缩小。这也提醒行业企业，必须认真关注往复走丝电火花线切割机床的性能提升，尤其要注重加工质量、智能化和自动化程度、环保及安全、可靠性等方面的持续提高。

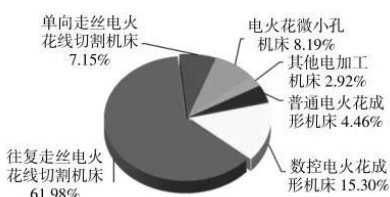


图7 各类电加工机床销售量占比

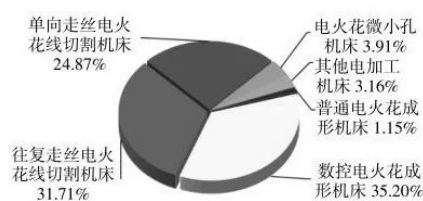


图8 各类电加工机床销售额占比

2021年电火花成形机的销量占比为19.76%，相比于2020年约增长了4个百分点，其中数控电火花成形机的销售量占比维持在14%以上，普通电火花成形机的销售量占比同比增长了三倍多，说明电火花成形机的应用面在扩大，高性能机床的市场需求稳定，而普通电火花成形机则受到小微企业的青睐。从销售额看，数控电火花成形机仍然排名第一，占销售总额的三分之一以上，行业企业切不可轻视其市场地位。

2021年电火花小孔机床的销量占比同比略有下降，下降幅度约1个百分点。这一方面说明，2020年是由于熔喷布喷板加工需求火爆带来了短时间的机床销量激增；另一方面也表明，2021年的市场逐渐恢复常态，电火花小孔加工机床的市场固有需求平稳，在航空航天、模具制造、超硬材料加工等领域还有较大的市场空间。

2021年其他电加工机床的销量占比与上年基本相当，略有微小增长。这表明电加工机床行业的细分市场逐渐清晰，面向某些特定领域的专用机床正逐步形成规模并有扩大之势，其单台平均售价接近15万元，充分体现了细分产品的价格优势。

4. 出口情况

2021年，22家电加工机床行业重点骨干企业的电加工机床出口量和出口额同比增幅分别达到30.56%和36.45%。其中，外资企业的出口量和出口额分别占出口总量和出口总额的58%和81.78%。这表明，内资企业

与外资企业相比，虽然在出口量方面相差不多，但在出口机床档次上还有很大差距。图9和图10是近三年电加工机床的出口情况。

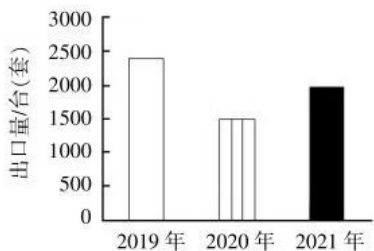


图9 近三年电加工机床出口量

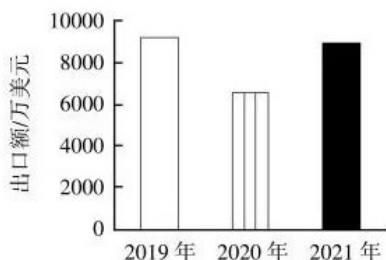


图10 近三年电加工机床出口额

自党的十九届五中全会提出构建“双循环”相互促进的新发展格局以来，行业企业除了进一步紧抓国内市场外，还积极拓展国际市场，由此取得了2021年出口量和出口额同比均有两位数增幅的可喜成绩。但全行业也必须清醒地看到，现在的出口业务仍处于恢复阶段，尚未恢复到疫情前的水平，还需继续努力。

三、行业运行特点

1. 市场需求增长明显，销售业绩创近年新高

2021年，随着我国新冠疫情防控形势越来越好，制造领域基本全面恢复常态，加上“以国内大循环为主体、国内国际双循环相互促进的新发展格局”逐渐形成，电加工机床的应用领域也有了进一步拓展和扩大，市场需求逐步得到释放，增长明显。电加工机床行业延续了2020年向好的

趋势，继续攀升，2021年产品销售量和销售额同比均取得了超过20%增长幅度的骄人业绩，创出了自2011年以来行业销售业绩的新高。

2. 先扬后抑，增速逐渐减弱

2021年上半年电加工机床产品需求旺盛，销售业绩喜人，给行业全年的良好运行奠定了基础，尤其是第一季度销售量的高开，是多年来少见的。2021年下半年以来，国内多地出现疫情散发、防控形势严峻复杂、出口海运不畅、主要配套件供货不及时、原材料价格持续居高不下，以及部分地区“限电”等情况，对市场需求和行业运行造成消极影响，行业全年的经济运行呈现了先扬后抑、前高后平的走势。

3. 出口贸易逐渐恢复，增长显著

在全球疫情反复、经济整体不振的情况下，“中国制造”为世界提供了急需的物资和装备。2021年电加工机床出口贸易逐渐恢复，出口量和出口额双双快速增长，同比增幅达到30%以上，尤其是出口额接近新冠疫情出现前的2019年。此外，中高端机床在电加工机床出口产品中所占的份额也在增加。

四、思考与建议

2021年是“十四五”开局之年，随着我国经济增长方式的转变，高质量发展将成为电加工机床行业的重要任务，行业企业应思考如何破解研发投入不足、人才缺乏、产品档次不高、竞争力不强的局面，让电加工技术及装备在我国国民经济和国防事业发展中贡献更大力量。

从国内市场需求角度看，2021年的市场形势明显好于前两年，甚至好于2018年。这一方面表明国内市

场基本摆脱了疫情带来的影响，各种需求正在逐渐释放；另一方面也显示出，在全球疫情反复、制造业低迷的情况下，我国似乎成为了世界工厂，为了满足出口订单而不得不扩大产能，从而催生了对电加工机床的旺盛需求，形成了大多数电加工机床制造企业在2021年上半年基本都是满负荷运转的局面。在这种看上去“火爆”的市场行情下，行业企业必须保持清醒认识，不能盲目跟风扩张，应该契合企业发展的战略规划，在提质、降本、增效、创品牌等方面多做文章，以增强企业的实力和市场地位。

通过对近几年电加工机床行业配套产业链变化的观察和分析发现，一旦市场转好、需求旺盛、机床热销，机床制造企业就会面临配套件紧缺、供货不及时、价格上涨的老问题，有些主要部件买不到货，合同供货时间拖延半年以上，而且采购价格普遍上涨，这对企业的正常生产和利润产生较大的不利影响。因此，各企业在产品的设计和生产过程中要充分考虑产业链风险，尤其在当今国际形势复杂多变的大环境下，要注意防范配套件断供、软件禁用等“卡脖子”现象，做到有备无患。

随着脉冲电源、控制和工艺技术的提升，新材料的不断应用以及加工要求的持续提高，电加工技术和设备以其独特的优势得到了更广泛的应用。近年来，一些企业根据工具和砂轮行业的需求，研制并生产出了电火花切刀、电火花工具磨床、金刚石砂轮成形和修整机床等细分产品，解决了相关领域的加工难题，创造了较好的市场业绩。这就启发行业企业，要关注社会新需求，积极寻找制造业中的痛点、难点，创新研究解决方案，为用户提供新的专用设备，并由此形成新的经济增长点。□

海关总署官网：2022年版税则修订报告发布

——金属成形机床、增材制造设备等机床工具类商品税则号有变化

中国机床工具工业协会市场部

税则细分、增列及税率调整是海关每年向各行业征求意见的例行工作，目的是解决企业在进出口过程中，遇到产品分类不明、同一产品可用两个甚至多个税号、具有发展前景的新产品或贸易额高的产品尚无适合税号等问题。

配合海关总署、财政部等机构进行进出口商品税则修订是中国机床工具工业协会的年度例行工作。在2022年版中国进出口商品税则修订工作中，协会组织锻压机械、特种加工机床等分会参与到相关工作，行业专家们诸多意见和建议在新版税则中得以体现。

在已发布的2022年版税则中，金属成形机床、增材制

造设备相关税则号有较大变化。现将机床工具行业相关商品税则的变化情况编辑整理如下，供行业企业参考。

一、成形机床

本次修订是在国际海关组织对成形机床六位子目进行转制的框架下完成的。主要是更加详细界定了8462品目的金属成形机床范围，明确区分了冷热加工工艺设备，并且根据技术发展和加工零件类别对税则进一步细分，与2021年版相比，累计增列了12个八位商品税则号列。

2021年税则号列	商品名称	2022年税则号列	商品名称
84.62	加工金属的锻造（包括模锻）或冲压机床；加工金属的弯曲、折叠、矫直、矫平、剪切、冲孔或开槽机床；其他加工金属或硬质合金的压力机；	84.62	加工金属的锻造、锻锤或模锻（但轧机除外）机床（包括压力机）；加工金属的弯曲、折叠、矫直、矫平、剪切、冲孔、开槽或步冲机床（包括压力机、纵剪线及定尺剪切线，但拉拔机除外）；其他加工金属或硬质合金的压力机；
	—锻造（包括模锻）或冲压机床及锻锤：		—热锻设备，热模锻设备（包括压力机）及热锻锻锤：
			--封闭式锻造机（模锻机）：
		8462.1110	---数控的
		8462.1190	---其他
			--其他：
8462.1010	---数控的	8462.1910	---数控的
8462.1090	---其他	8462.1990	---其他
	—弯曲、折叠、矫直或矫平机床：		—用于板材的弯曲、折叠、矫直或矫平机床（包括折弯机）：
			--型材成型机：
		8462.2210	---数控的
		8462.2290	---其他
		8462.2300	--数控折弯机
		8462.2400	--数控多边折弯机
		8462.2500	--数控卷板机
	--数控的：		--其他数控弯曲、折叠、矫直或矫平机床：
8462.2110	---矫直机	8462.2610	---矫直机

2021年税则号列	商品名称	2022年税则号列	商品名称
8462.2190	---其他	8462.2690	---其他
	--其他:		--其他:
8462.2910	---矫直机	8462.2910	---矫直机
8462.2990	---其他	8462.2990	---其他
	-剪切机床, 但冲剪两用机除外:		-板材用纵剪线、定尺剪切线和其他剪切机床 (不包括压力机), 但冲剪两用机除外:
			--纵剪线和定尺剪切线:
		8462.3210	---数控的
		8462.3290	---其他
	--数控的:	8462.3300	--数控剪切机床
8462.3110	---板带纵剪机		
8462.3120	---板带横剪机		
8462.3190	---其他		
	--其他:	8462.3900	--其他
8462.3910	---板带纵剪机		
8462.3920	---板带横剪机		
8462.3990	---其他		
	-冲孔或开槽机床, 包括冲剪两用机:		-板材用冲孔、开槽或步冲机床 (不包括压力机), 包括冲剪两用机:
	--数控的:		--数控的:
	---冲床:		---冲床:
8462.4111	----自动模式数控步冲压力机	8462.4211	----自动模式数控步冲压力机
8462.4119	----其他	8462.4212	----其他
8462.4190	---其他	8462.4290	---其他
8462.4900	--其他	8462.4900	--其他
			-金属管道、管材、型材、空心型材和棒材的加工机床 (非压力机):
		8462.5100	--数控的
		8462.5900	--其他
			-金属冷加工压力机:
			--液压压力机:
		8462.6110	---数控的
		8462.6190	---其他
			--机械压力机:
		8462.6210	---数控的
		8462.6290	---其他
		8462.6300	--伺服压力机
			--其他:
		8462.6910	---数控的
		8462.6990	---其他
	-其他:		-其他:
	--液压压力机:	8462.9010	---数控的
8462.9110	---金属型材挤压机	8462.9090	---其他
8462.9190	---其他		
	--其他:		
8462.9910	---机械压力机		
8462.9990	---其他		

注释: 品目84.62用于板材的“纵剪线”是由开卷机、矫平机、纵剪机和收卷机组成的生产线; 用于板材的“定尺剪切线”是由开卷机、矫平机和剪切机组成的生产线。

二、增材制造设备

删除了原列在8477品目下橡塑加工机器中的“三维打印机”, 新增“增材制造设备”品目8485, 并根据设备所使用的材料以及所加工零件的材料设定了子目。

2022年税则号列	商品名称
84.85	增材制造设备：
8485.1000	-用金属材料的
8485.2000	-用塑料或橡胶材料的
	-用石膏、水泥、陶瓷或玻璃材料的：
8485.3010	---用玻璃材料的
8485.3020	---用石膏、水泥、陶瓷材料的
	-其他：
8485.8010	---用纸或纸浆的
8485.8020	---用木材、软木的
8485.8090	---其他
	-零件：
8485.9010	---用金属材料的
8485.9020	---用玻璃材料的
8485.9030	---用橡胶或塑料材料的
8485.9040	---用石膏、水泥、陶瓷材料的

注释：品目84.85所称“增材制造”（也称3D打印）指以数字模型为基础，将介质材料（例如，金属、塑料或陶瓷）通过连续添加、堆叠、凝结和固化形成物体。

三、工业机器人

在8428品目——“其他升降、搬运、装卸机械（例如，升降机、自动梯、输送机、缆车）”项下，增列了8428.7000 工业用机器人

四、工业用钻石

工业用钻石原税号7104.9011，替换为7104.9110。□

资讯

第十二届中国数控机床展览会（CCMT2022）停止举办的通知

尊敬的境内外展团、参展商及观众：

自CCMT2022展会于3月18日宣布延期举办以后，我们一直密切关注境内外疫情的发展，并与有关政府部门和展馆保持沟通协商，积极探讨展会延期举办方案。

鉴于目前疫情防控形势依旧复杂严峻，本土病例多点散发的情况还时有发生，疫情走向仍存在不确定因素；境内外物流、客流、企业生产经营也未完全恢复到疫前水平；上海的展馆因防疫和原有下半年展会安排无法提供备用档期，而备选的南京国际博览中心因南京对赴宁人员仍有相应防疫管控措施，致使所能提供的档期所剩的操作周期难以完全满足要求，也加大了展会和观众的组织以及相关管理工作的难度，恐难以达到理想的展示效果。为积极配合和落实国家防疫政策，防范疫情风险，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，经认真评估和充分论证，现研究决定，原定于2022年4月11~15日在上海新国际博览中心举办的第十二

届中国数控机床展览会（CCMT2022）将停止举办。

感谢您的理解和多年以来的支持！对于展会停止举办对您造成的诸多不便，我们深表歉意。我们将与您保持密切沟通，妥善安排、处理后续事宜，努力维护境内外参展商、观众和合作单位的利益。

第十八届中国国际机床展览会（CMT2023）将于2023年4月10—15日在北京中国国际展览中心（新馆）举办，境内外招展工作即将于近期启动。我们将全力以赴筹办好CMT2023展览会，一如既往地为企业和行业用户提供优质的服务和展示交流平台，我们有信心在大家的通力合作下，给大家带来继CMT2021后的又一场安全和富有成效的全球机床行业的盛会！

期待与您北京相聚！

中国机床工具工业协会
2022年6月23日

五轴机床关键动态性能的测试

英国雷尼绍公司 周汉辉

随着五轴数控机床的应用越来越广泛，如高精度模具加工、航空叶片加工、纳米材料镜面加工等，都对机床空间移动中的动态精度提出要求。国际标准ISO10791-6 2014就是针对包括五轴机床在内的数控加工中心的动态性能的各个方面做出了相关检测要求。

本文就如何选用各类先进检测仪器来完成相关标准对五轴机床的各项动态检测要求进行了探讨，以期帮助读者提高对五轴机器动态误差的认识，以高效、准确并可溯源的方法来评估五轴机床的各项动态性能。

1. ISO10791-6标准简介

ISO10791-6第一版发布于1998年，并于2014年发布修订后的第二版，针对五轴机床的运动速度和插补精度等与运动轴动态性能相关的参数规定了若干检验项目，包括主轴转速的测试项K1，进给速度的测试项K2，两轴直线插补精度的测试项K3，两轴圆弧插补精度的测试项K4。

对于有回转轴运动的五轴机床，该标准对直线轴和回转轴共同参与的多轴插补精度，也规定了系列测试。

2. XL-80激光干涉仪测量机器主轴转速K1、直线运动速度K2等

XL-80激光干涉仪是机床行业标准的定位精度检测系统。该激光干涉仪基本线性测量系统如果配套使用一套选购的聚焦镜及标准球（见图1），就可以测量机床主轴的径向跳动，并可以根据对测试的数据进行FFT分析，得到主轴的转动速度。

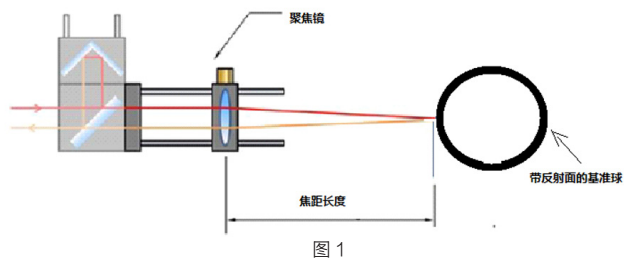


图1

某机床的主轴以3600r/min旋转，测试主轴跳动的曲线如图2所示。

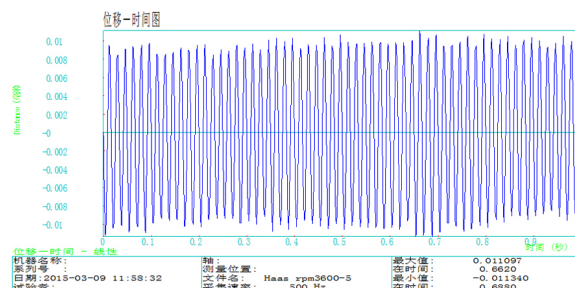


图2

经过仪器配套的快速傅里叶（FFT）变换软件对所测试的数据进行处理，得到图3所示的频谱分析结果，从图3可见主轴转速的频谱为59.57Hz，相当于主轴转速为59.57Hz × 60 = 3575 r/min 【(3575 - 3600) / 3600 = -0.69%，该测试结果 < ±5%的标准要求】。

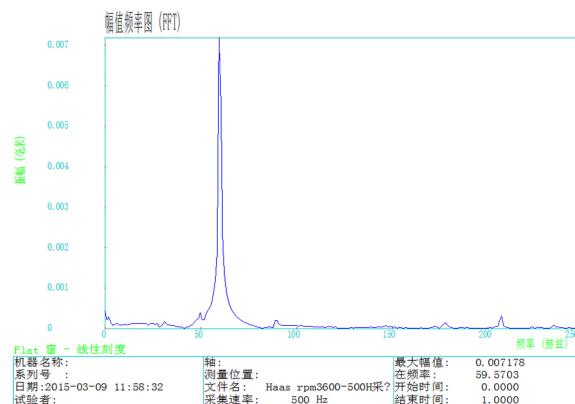
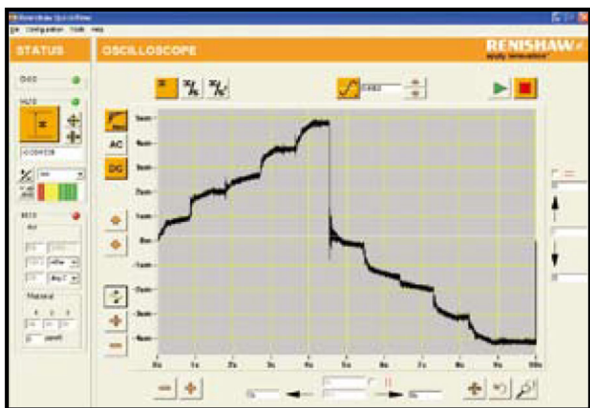


图3

对于机床直线移动速度的测量K3，XL-80的动态测量功能或动态示波器软件可以完全满足标准的测试要求，不

仅可以测量高达4000mm/s的直线运动速度，还能以接近静态的低速测量机床的低速运动的平稳性（低速爬行）。图4显示的是单步运行及正反向换向间隙。

线性位移随时间变化的曲线（详图）



线性位移随时间变化的曲线，正向和反向运动

图4

3.XM-60测量插补精度（动态直线度）K3

（1）动态直线度

自上个世纪人类开始利用数控机床进行机械加工以来，一直对两轴直线运动的插补精度都有着一定的要求，三轴机器的NAS试件中的菱形表面的直线度及对边的平行度等无不体现着人们对该性能的追求。

但长久以来，检测直线运动的插补精度多半是采用实物基准面配合百分表或千分表靠人工读数来实现，对于早期插补精度要求不太高的应用场合，基本上还是可以应付。但随着数控加工精度要求越来越高，镜面铣削等应用的普及，以及数字化制造理念的推广，传统的方法已无法满足当前技术进步的需要。

随着激光干涉仪测量技术的不断普及，激光干涉仪的非接触数字化测量的特点为当今数控机床的检测铺平了道路。对于直线插补精度的检测，相当于动态评估机床在任意角度方向进行直线插补的移动直线度。而在评价其动态直线度时，需要准确知道其每个数据采集点的位置，从而方便分析插补误差的大小及发生问题的具体位置。

（2）X-80适于增量光栅反馈系统的动态直线度检测

多年来，市场上广泛使用的是XL-80单光束激光干涉仪，它具有配套的直线度镜组，并能在机器作直线运动时接收触发脉冲来采集直线度数据。能让机床在某个特定位置发出触发脉冲，就需要机床使用的是增量光栅，配合TB20触发器，在其按设定间隔发出的触发脉冲控制下进行动态直线度数据采集。TB20是与XL80激光干涉仪联合使用的一种接口，用于对激光干涉仪采集数据进行触发的

一种方式。TB20电路将机器光栅系统输出的模拟或数字AB正交信号，按设定好（通过拨码设置）的比例，每接收N个AB正交脉冲信号就产生一个触发脉冲，该脉冲输入到XL80的辅助I/O接口控制XL80进行数据采集。

TB20几个典型应用如：滚珠丝杠动态精度检测、光栅或线纹尺刻线精度检测、主轴攻丝同步精度等。在本文所描述的应用中是配合激光干涉仪直线度镜组完成动态直线度的验证。

（3）XM-60多光束激光干涉仪适于任意光栅的动态直线度检测

上述XL-80配合TB20的方法仅对使用数控机床采用增量光栅时有效，对于部分使用绝对编码器的机器来说就无法实现动态直线度的检测。另外，对于机器较长行程的直线度或精度较高要求的动态直线度测量来说，环境气流的干扰是一个很难躲过去的问题，只对机器导轨运动一次来测量动态直线度数据，其直线度重复性不太容易得到保证。

多年来，高精度镜面加工雕铣机及五轴加工机器上采用绝对编码的直线光栅越来越多，XM-60多光束激光干涉仪具备对任意光栅的动态直线度（又称动态数据拟合DDF）检测的功能就填补了该项目检测的空白。CARTO Capture（数据采集）应用程序内置动态数据拟合功能，允许XM-60用户动态采集直线度测量值。在CARTO Capture中重新计算测试数据，以减少数据突跳奇点。这种改进方法具有更强的抗环境干扰能力，而且能够提供质量更高的长轴直线度误差数据。

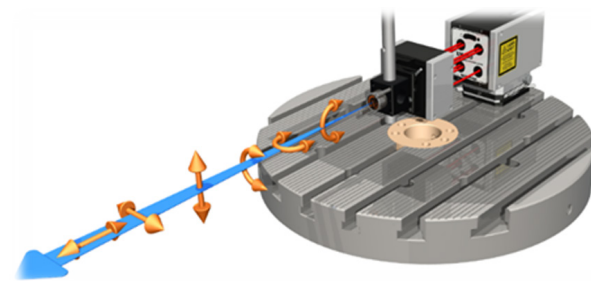


图5

笔者曾有机会利用XM-60多光束激光干涉仪对一台2000mm行程的高精度导轨进行动态直线度的测量，为消除环境气流、机械振动等外在因素对高精度动态直线度测量的干扰，将XM-60激光干涉仪的往复测量次数设置为15次，机器在测试过程中实际的数据采集的不确定度达到0.08um，实测动态直线度为0.3um。

4.两直线轴圆弧插补精度K4

标准中推荐两直线轴圆弧插补精度的方法之一是QC20

球杆仪，它是Renishaw(雷尼绍)公司基于蓝牙无线技术的无线球杆仪，可以完全符合ISO标准要求，对两直线轴的圆弧插补精度进行评估。它还具有新的部分圆弧测试功能，其测试结果可以用作新的“空间精度分析”。



图 6

球杆仪产品自从问世以来，经过不断的技术迭代、更新，现在的QC20球杆仪拥有最新的蓝牙技术，直接实现传感器与电脑的通讯，不仅仅使测量方便，而且安全性大大提高；还具备故障诊断、误差分析的功能，方便用户解决分析机床的问题，是数控机床维修人员的“听诊器”。全新的设计让三轴机床的直线轴插补的空间精度检测能够在一次安装下就可快速完成，极大地方便了机床检测。

5.直线轴与回转轴插补精度

大家都知道五轴加工精度还有更为复杂的刀尖跟随能力需要评定的问题需要解决。有些五轴机床的制造商或用户采用标准球配合千分表或百分表来监测RTCP刀尖跟随能力，但由于普通千分表的零敏度和人工读数的问题，该类检测手段无法按ISO 10791-6标准要求出具五轴机床刀尖跟随能力的检测报告。

数控系统种类	TCP 功能	开启	关闭
Fanuc 30 系列	Tool Centre Point (TCP)	G43.4*	G49
Siemens 840D	TRAORI	TRAORI**	TRAFOOF
Mazak Matrix 2	Tool Tip Point Control (TTPC)	G43.4***	G49

雷尼绍全新推出一款用于QC20-W球杆仪的循迹软件—Ballbar Trace. 它是基于时间的数据采集软件包，配合QC20-W球杆仪可用于按标准验证数控机床的综合性能。新软件可供现有QC20-W用户免费使用，该软件扩展了QC20-W的应用范围，包括依据ISO 10791-6标准执行

静态监控和数据采集，同时还可简化执行测试时的系统设置。伴随球杆仪循迹软件的发布，雷尼绍同时发布新版本的XCal-View数据分析软件，以便提供测试如图7所示的测试报告的功能。

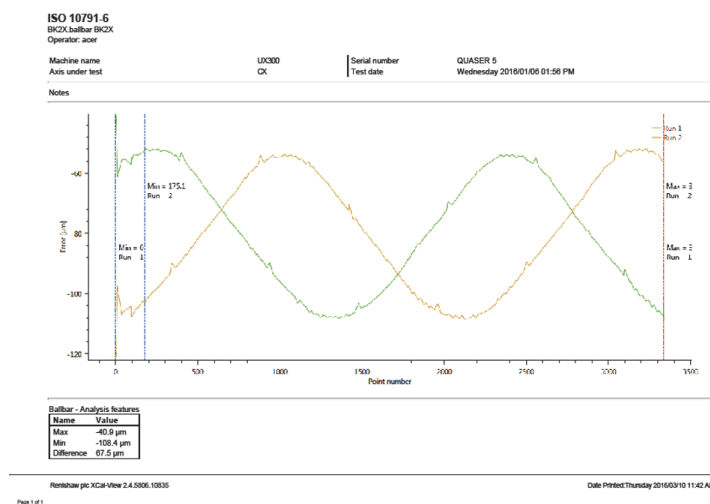


图 7

如果按ISO10931-6标准测试的刀尖跟随误差偏大，除建议使用雷尼绍的XR20对回转轴角度分度精度进行测量与补偿外，还需利用雷尼绍AxisetCheckup轴心线检测工具来检测调整机床回转轴的轴心线误差。雷尼绍的Axiset Check-Up（回转轴心线检查工具）通过自动测头测量程序，从标准球上采集性能数据，进而提供准确、可重复的测试结果，同时包含简单而有效的数据分析。所有测试均使用雷尼绍现有的主轴安装式触发测头（大多数多轴机床的标准配置，参见图8）来执行，并通过Axiset Check-Up随附的机床特定宏程序软件创建测头测量程序。

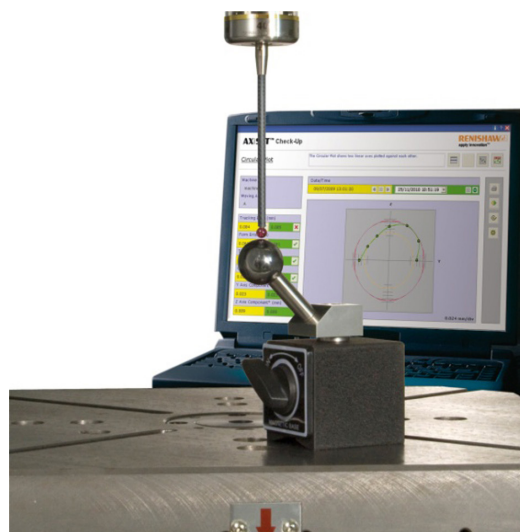


图 8

(下转第63页)

车桥专用机床的工艺设计与装备应用

沈阳机床（集团）有限责任公司 孙雪娜 程中文 郑志强

一、前言

近几十年来，汽车行业在我国得到了突飞猛进的发展，那么汽车各个零件的加工制造自然而然也在不断进步、不断完善。车桥作为汽车最关键的零部件之一，其加工制造在国内已经有了比较固定的加工方案，各个生产厂家基本上形成了专业化、系列化、批量化生产的局面。但是产品一直在更新，再加上效率需要不断提升等因素，导致加工设备和加工方案也需要不断创新或改进。

为了适应产品的快速更新换代，针对国内载重汽车市场需求增大和部分重点客户对车桥加工设备以及加工方案的新思路和新要求，我们成立专门技术工作组，与用户进行新机床的方案研究与论证，对设备的结构、功能、进给速度、自动上下料、不同规格零件共线加工、螺纹断屑、双主轴同步、刀具管理、断刀报警、加工参数的提升，效率、精度的提高等方面进行了论证及研究。在原有设备基础上，不断对比，研讨各项可改进的技术参数，最后根据加工方案、零件加工特点及要求，自动化加工要求等，制定了产品设计方案。方案体现了加工时受力均匀、抗震的要求，输出扭矩及功率满足快

速加工需要，改进防护外置铜条易磨损问题，改为内置式结构；设计了前面和上部同时满足上、下料的防护结构等一些新技术、新结构。最终设计出的专机产品满足用户提出的17项要求，在国内处于领先水平。该产品提升了我厂的市场化竞争能力，击败国内外众多竞争对手，成功中标数十台专用设备，实现销售收入近5000万元。下面针对此车桥专用机床的设计和应用，为大家进行一一的介绍：

二、车桥加工方案的制定

工艺方案是决定项目的关键，由于工件的特性属于薄壁细长轴，长径比在12:1~20:1之间，同时工件不平衡，加工时中间无法支撑，加工容易振刀，转速受限，因此制定了共3序车削的加工方案，主轴速度由最初的250r/min，提升到500r/min，提高了加工效率。采用先进的装夹方式，由前推式涨套卡具改为后拉式结构，卡具机体强度提升的同时，作用到工件的卡紧力受力均匀，防止工件变形，同时还研发了浮动卡紧技术，顶持和卡紧为一体，刚性增强的同时，又抑制了振动的产生，从而使工件的转速得到提

资讯

中国机床工具工业协会声明

全体会员企业、各相关单位：

近日，接企业反映有人冒充我协会名义，使用假冒的我协会公章，要求企业付费征订《2022年最新数控机床研发设计生产新工艺新技术与国内外数控机床安全操作及故障检修实用手册》、《2022年新型机床设计制造与零部件优化设计 & 国内外标准通则实用全书》。

在此郑重声明：中国机床工具工业协会没有从事以上书籍的修订工作，也没有通知要求会员和企业付费征订，

请大家注意不要上当受骗。

此行为属诈骗敛财行为，存在为企业带来经济损失的风险，严重损害我协会形象。我协会将采取法律措施，追究相关单位和个人的责任。如有单位已遭受损失，请立即报警，并告知我协会综合办公室。

我协会综合办联系电话：010-63345269

中国机床工具工业协会
二〇二二年六月二十七日

升,针对可能出现的卡持问题而开发了具有国际领先的复合卡紧机构。同时还进行了螺纹断屑技术的研究,试验效果较好,该技术有效解决了加工螺纹无法断屑的行业难题。具体的加工方案如下:

1.第1序

此工序加工车桥轴头外圆部位,设计专用夹具结构浮动撑紧内孔,开发拖料装置实现自动上下接料及左右运动送料机构,实现自动无人化上料、下料、夹紧、松开,一气呵成无缝衔接,安全可靠,工序卡如图1所示。

工件挠度计算,切削长轴类工件时,在切削力 F 的作用下,工件将产生一定弯曲。弯曲形成的挠度可按照下面的公式进行计算:

$$a = FL^3 / (KEJ) \quad \text{公式(1)}$$

式中, a ——工件挠度,粗车可允许 $a=0.1 \sim 0.4\text{mm}$,精车可取 a 为直径公差 $1/5 \sim 1/4$;

L ——工件在两支撑之间的长度;

E ——工件材料的弹性模量;

J ——工件的惯性矩,直径为 d 的工件 $J=0.05d^4$;

K ——工件装夹方法系数,工件装夹在两顶尖之间时, $K=70$;工件一端装在卡盘中,一端顶在后顶尖时, $K=140$;工件一端装在卡盘中,另一端悬伸时, $K=3^{[1]}$ 。

客户车桥工件最大长度为2240mm,两支撑之间长度按 $L=2200\text{mm}$ 计算,车桥轴头部位一般为40Cr、30Mn2等,属于合金结构钢,其弹性模量 $E=200 \sim 235\text{GPa}$,取最小值200GPa计算,工件直径为 $\phi 146\text{mm}$,工件惯性矩 $J=0.05 \times 146^4 = 2.27 \times 10^7 \text{mm}^4$,此工序为两顶尖装夹,故工件装夹系数 K 值取70,粗车削参数按转速500r/min,进给量0.3mm/r,切深2.5mm,可计算出粗车时切削力 $F_1=2250\text{N}$,精车削时参数按转速550r/min,进给量0.1mm/r,切深0.5mm,可计算出精车时切削力 $F_2=198\text{N}$,单位换算后,将以上数值代入公式(1)可得:

粗车时工件挠度 $a_1=0.075\text{mm}$;

精车时工件挠度 $a_2=0.007\text{mm}$;

客户工件直径公差为 $(+0.012, -0.025)$,因此粗、精车时工件挠度均满足加工要求,同时也说明此工序的合理性。

2.第2序

此工序加工车桥底板外圆部位,设计专用复合卡盘,顶尖定位浮动夹紧工件外圆,实现设计基准与工艺基准重合,定位机构与送料、拖料机构一体化设计,增加车削刚性、提高效率、降低震动趋势,工序卡如图2所示。

工件挠度计算,此工序容易出现振刀情况,故而开发

复合卡盘夹紧一端,另一端继续用专用夹具结构浮动撑紧内孔,因此装夹系数 K 应取值140,继续用公式(1)计算挠度,由于 K 相较于第1序增大,所以工件挠度 a 减小,远远低于限定值,更加满足工件的加工要求。

3.第3序

此工序加工轴头外圆螺纹,装夹原理同第1序,两端均采用顶尖定位,浮动撑紧内孔,工序卡如图3所示。同理计算工件挠度,均满足加工要求,证明工序的合理性、可靠性^[2]。

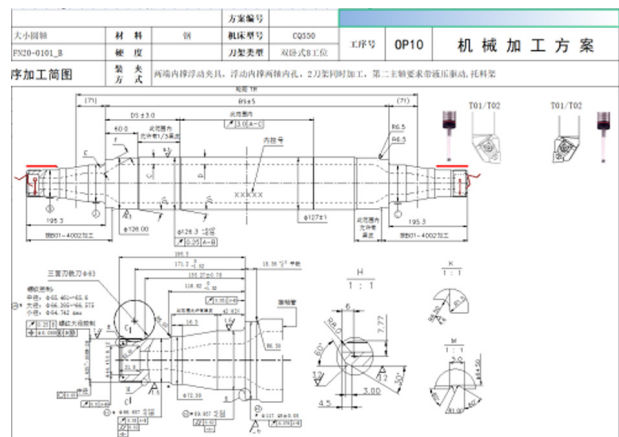


图1

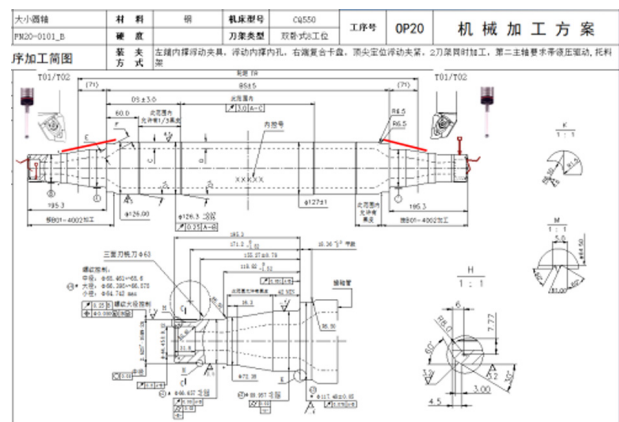


图2

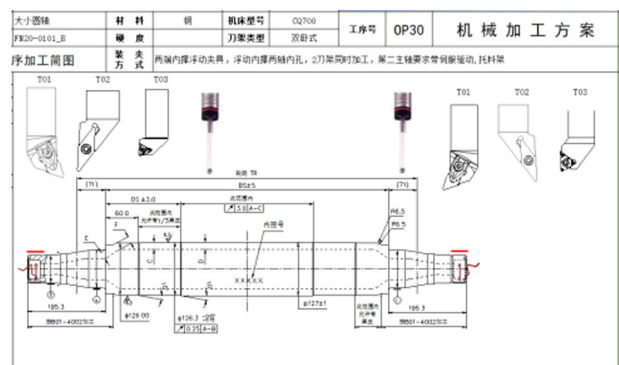


图3

三、车桥专用机床的设计

1. 双主轴同步驱动结构设计

双主轴机械上采用传动比精确的同步带结构，解决了窄V带丢转导致机械传动比不一致的问题，为避免噪声过大，我们增加了同步带切槽及同步带轮排气孔结构。电气上我们给用户提供了在加工粗孔车桥，双主轴采用转速同步提供最大的扭矩驱动力；当加工特殊细内孔车桥时，我们采用扭矩同步，副主轴配合主轴采用50%~90%区间扭矩同步主从驱动结构，在满足扭矩的情况下降低转速，防止打滑^[3]。

2. 内藏式铜条拉罩结构设计

传统拉罩结构铜条外露，铁屑容易进入铜条内导致拉罩损坏，我们设计了内藏桥式铜条结构，相同层数的拉罩比传统结构行程要短一些，但是能保证加工区域内没有故障隐患点的存在。

3. 天窗和大门同时气动驱动结构设计

为满足客户提出的需要实现自动上下料和人工上下料两种方式，我们研制采用了上下四自动门方式，天窗自动门留给机械手，正面自动门留给人工，上下气动门之间我们采用了断桥横梁作为支撑结构。

4. 特殊浮动内撑夹具结构设计

(1) 夹具原理介绍

因工件最大长径比达到25左右，转速要求500r/min，双刀架切削，扭矩大，卡紧位置为薄壁，我们设计了浮动内拉式涨胎卡具，避免了因夹紧而导致工件变形，解决了定位与夹紧孔偏心的问题，并且为了满足不同直径的多种工件，我们缩减夹具通用结构，一共仅有4套不同夹具，并且可以实现快换。专用夹具结构如图4所示。

夹具体通过止口及定位销定位，螺钉把紧安装在过渡盘上，过渡盘以主轴短锥形形式定位，通过螺钉紧固在主轴上，4个涨紧块经过配研后能在夹具体的开口中山下滑动自如，芯轴也经配研后，通过圆弧锥面与涨紧块接触，前后滑动自如，芯轴与夹具体内孔间隙为1mm，必需有此间隙才能实现涨块浮动夹紧，前拉杆与芯轴通过螺纹连接，穿过铜隔套前后推拉，带动芯轴前后运动，从而实现涨块先上运动，拉杆向后拉时，涨紧块涨紧工件内孔，拉杆向前推时，涨紧块松开。内孔相近的工件，可以更换不同大小的涨紧块实现工件夹紧，内孔相差较大的工件，需要更换夹具体来实现不同规格工件的装夹^[4]。

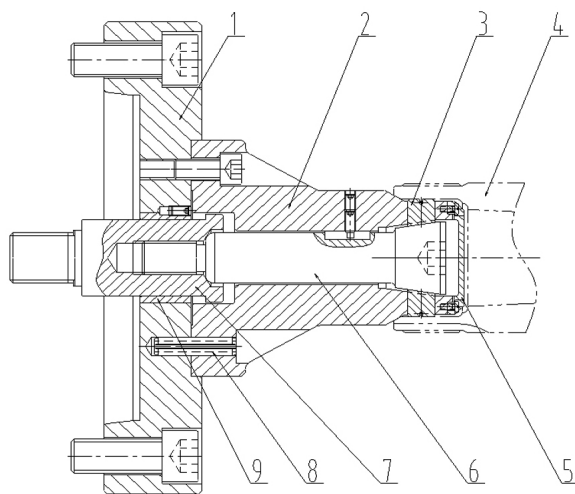


图4 加工车桥的特殊浮动内撑专用夹具装配图。

1.过渡盘 2.夹具体 3.涨紧块 4.车桥工件 5.防尘盖 6.芯轴
7.前拉杆 8.定位销 9.铜隔套

(2) 夹具受力分析及相关计算

如图5所示，为涨紧块在拉力的作用下涨紧工件时的受力分析简图， F 为油缸对拉杆的拉力； P 为工件对涨紧块的反作用力，即为：涨紧块对工件的涨紧力； N 为芯轴对涨紧块的反作用力； f 为芯轴与涨紧块之间的摩擦力；根据夹紧力的分析可知：

$$P = F / \tan(\theta + \beta) \quad \text{公式(2)}$$

式中， α 为芯轴圆锥角的一半； β 为涨紧块与芯轴圆锥面之间的摩擦角，根据摩擦角公式可知：

$$\mu = \tan \beta \quad \text{公式(3)}$$

式中 μ 为芯轴与涨紧块之间的摩擦因数，两零件材料都是合金钢，摩擦因数 μ 取值0.15，根据公式可算出 $\beta = 8.5^\circ$ ；机床液压系统压力按2MPa计算，此时油缸对拉杆的拉力 F 为30kN，此特殊浮动内撑夹具，芯轴圆锥角为 18° ，因此 $\theta = 9^\circ$ ；以上所得数值带入公式2，可计算出涨紧块对工件涨紧力 $P = 30 / \tan(8.5^\circ + 9^\circ) = 95.2\text{kN}$ 。

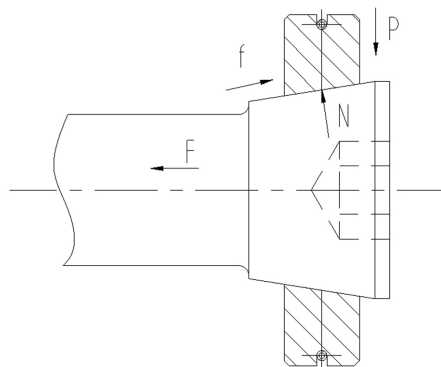


图5

下面进行扭矩校核,为了计算方便,现将车桥工件等效为 $\phi 150\text{mm}/\phi 130\text{mm}$ 的圆柱形筒料,长2200mm,重量为120kg,根据工件所受不同的切削力及夹紧力的作用情况,以加工过程中对夹紧最不利的状态进行计算。

车削工件时,若要保证工件对夹具不会发生相对滑动,那么工件夹紧时所产生的摩擦力就必须大于车削时产生的切削力,而阻止工件相对滑动的力为涨紧块对工件施加涨紧力后,工件与涨紧块之间产生的摩擦力 f_1 ,即:

$$f_1 = \mu P \quad \text{公式(4)}$$

式中, μ 为涨紧块与工件之间的摩擦因数,其值取0.15; P 为前文计算出的涨紧块的涨紧力。通过上式计算得出 $f_1 = 0.15 \times 95.2\text{kN} = 14.28\text{kN}$,前文计算工件挠度时已经计算出粗车产生的切削力 $F_1 = 2.25\text{kN}$,可见切削力小于涨紧时产生的摩擦力。

根据扭矩公式:

$$T = FL \quad \text{公式(5)}$$

摩擦力产生的扭矩:

$$T_1 = f_1 L_1 = 14.28\text{kN} \times 35\text{mm} = 499.8\text{N} \cdot \text{m};$$

切削力产生的扭矩:

$$T_2 = F_1 L_2 = 2.25\text{kN} \times 75\text{mm} = 168.75\text{N} \cdot \text{m};$$

摩擦力产生的扭矩大于切削力产生的扭矩,因此,夹具的涨紧力是安全的,车削时不会引起工件的相对滑动。

主轴启停时,摩擦力矩也必须大于主轴启停时工件产生的转动力矩,才能避免工件出现相对滑动。根据主轴电机参数可知,主轴从0加速到500r/min,所需要的时间为1.5s。

转动力矩公式为:

$$T_3 = I_a \quad \text{公式(6)}$$

式中: I ——工件转动惯量;

a ——工件启停时的角加速度。

转动惯量 I 可根据下式计算:

$$I = m(R_2 - r_2)/2 \quad \text{公式(6)}$$

式中: m ——工件质量;

R ——工件最大回转半径;

r ——工件最小回转半径;

$$\text{计算出转动惯量: } I = 0.34\text{kg} \cdot \text{m}^2 = 0.34\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2$$

根据公式:

$$\omega = 2\pi n \quad \text{公式(7)}$$

$$\alpha = \omega / t \quad \text{公式(8)}$$

计算出角加速度 $\alpha = 34.9\text{r/s}^2$,将转动惯量 I 和角加速度 α 代入公式6可计算出转动力矩 $T_3 = 11.8\text{N} \cdot \text{m}$ 。前文计算出的摩擦力产生的力矩 $T_1 = 499.8\text{N} \cdot \text{m}$,可见工件启停时产生的转动力矩远小于摩擦力矩,因此在此转数下工件启停时,不会产生打滑现象。

(3) 高精度专用复合卡盘结构设计

如图6所示,为此复合卡盘三维模型,以往加工车桥两端均采用浮动内撑结构,用涨胎涨紧工件两端里孔,这样设计由于工件里孔小,涨紧块采用光面压块,摩擦力小,整体涨紧力小,加工重切削时,加工后工件表面会出现振纹,表面粗糙度不好,满足不了图纸要求。本高精度复合卡盘为了能够解决以上问题,将原来的光面压块加长,并改为齿面压块,由于零件里孔光洁度不高,齿面的压块表面经过磨削,不会划伤工件里孔,摩擦力大幅度提高,这样设计在油缸拉力不变的情况下,可以大幅度地提高涨紧效果。并且采用双活塞油缸,一个油缸先动作,带动涨块,涨紧工件,另一个油缸推动卡爪伸出,浮动夹紧工件外径,这样设计是在浮动内撑结构的基础上添加浮动卡爪,提供了强劲夹持力,满足重切削的要求。

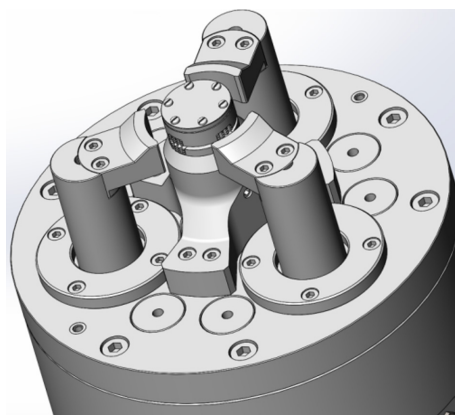


图6

(4) 工件位置和夹紧检测结构设计

自动线的加工要求机床必需有工件位置及夹紧检测功能,自动检测取代人工操作,由于浮动内撑夹具锥面定位处无法检测工件是否靠紧,所以我们利用工件测量来检测工件距离夹具端面的距离,通过这一数值来间接反馈工件是否靠紧定位面,这个距离会随着程序编入每一个零件的程序内,加工时长只增加了5s,但是实现了自动线检测功能。

(5) 纯滚动导轨床身结构设计

45°斜角的整体床身,切削时受力更稳定,极高刚性的床身内部筋形采用Ansys软件进行优化设计,使机床能承受极高的应力强度、拥有稳定的6阶频率模态,床身材料采用高密铸铁,强度高,吸震性好。加大的排屑口设计,确保机床切削顺畅,为满足动力二主轴频繁移动精度问题,床身采用滚柱导轨,使得进给系统的刚度,摩擦阻尼系数等动、静态特性都处于最佳状态,由于动、静摩擦系数接近,避免了低速爬行现象的发生,可获得较高的加工精度以及较高快速移动的速度,进而提高的生产效率。

(6) 托料架和中心架一体化结构设计

为解决加工个别类型车桥底板位时出现的震动的问题，我们在托料架结构上增加了中心架结构，做到了托料架、中心架一体化。图7为自动托料架三维模型，自上而下，共分为3层，第一层为支架层，包括螺母座、丝杆、垫块、传感器等，左、右两侧支架均可调节，前后移动靠

油缸推动，上下移动靠电缸推动，灵活性较高，适应不同长度工件，配合行架机械手可实现自动上、下料，完成车桥自动线加工；第二层为过渡层，包括过渡板、油缸、直线导轨，油缸控制托料架前后移动及相关限位装置等；第三层为固定层，包括固定板、镶条、压板等，主要是将托料架整体固定在机床床身之上^[5]。

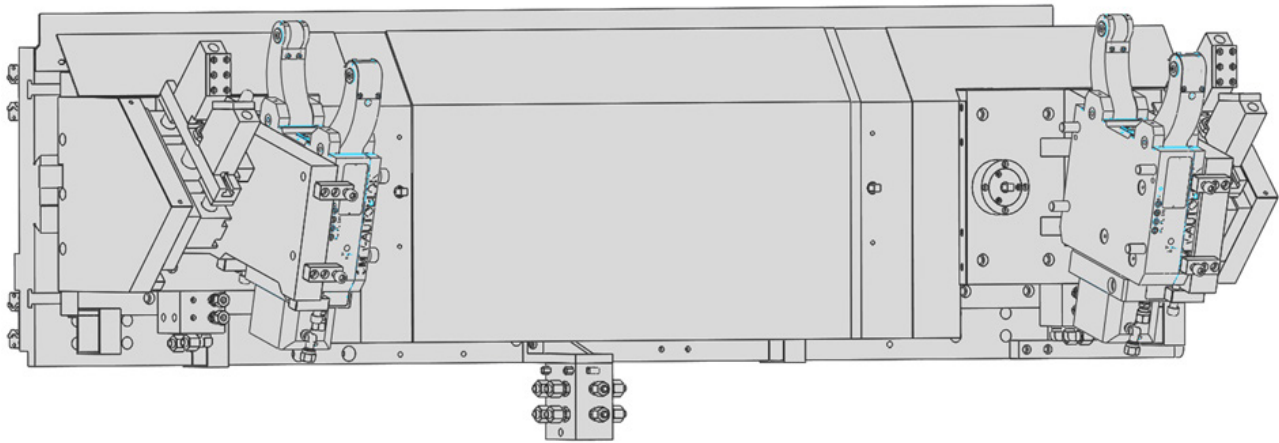


图 7

(7) 四内磁环油缸结构设计

为了避免用户长短不同工件退料时行程过长浪费时间，我们采用四内磁环油缸结构，在向前推时采用编程控制遇到开关不停直到顶紧工件，向后退时编程遇到开关就停，更换不同工件时第一次编程需退到根部。

四、车桥专用机床的应用

此次车桥专机的设计研发实现了车桥的自动化加工，图8车桥自动化加工时的流程图：

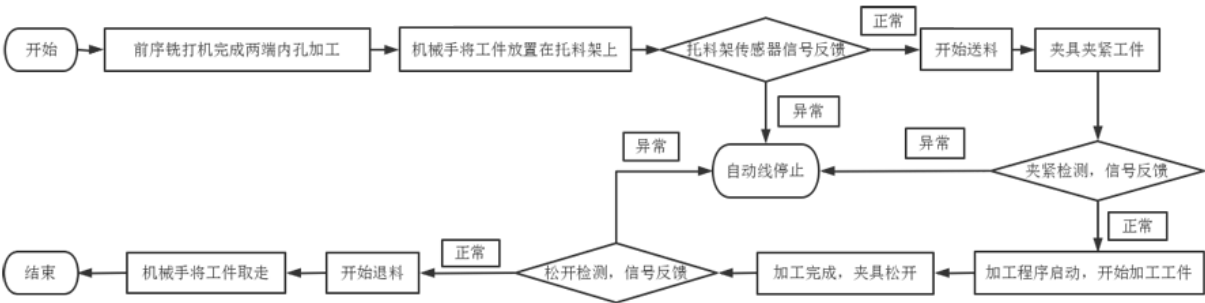


图 8

专用机床如图9所示。在机床验收过程中，客户也提出了一些问题：

- (1) 托料架V型块与工件直接接触部位，我们设计安装的是聚氨酯垫，增加摩擦力，并且可以防止工件表面划伤，客户担心聚氨酯强度不够，多次上下料后会磨损严重，经过与客户沟通后全部换成钢垫，增加强度。
- (2) 特殊浮动内撑夹具存在一定设计缺陷，夹具空拉时存在风险，没有轴向限位，针对这一问题，我们第一时

间改进了夹具结构，增加轴向限位套，避免空拉时造成夹具损坏。

机床经过不断的调试和参数优化后，各项精度和功能均已满足了客户的要求。通过此次车桥专机的设计，从开始的加工方案制定，到图纸设计，再到机床的最终验收，均满足了客户需求，得到了客户肯定，同时我们也积累了不少经验，为今后的相关设计打下一定的基础。



(a) 专机整体外观



(b) 托料架



(c) 特殊浮动内撑夹具

图 9

五、结论

综上所述, 我们所设计的双动力主轴双刀架车桥专机可以高效率、高质量地完成多种车桥的自动化加工, 运转平稳, 安全可靠, 对于用户批量化生产, 提供了有力的保

障, 受到了很多客户的青睐, 带动了整个车桥加工行业的发展, 值得在车桥工件加工中广泛应用。同时我们还会对此专机进行维护、改进, 让产品更稳定, 为客户、为公司创造了更大的价值。□

参考文献

- [1] 王先逵. 机械加工工艺手册[M]. 第1卷, 第2版, 北京: 机械工业出版社. 2006.12.
 - [2] 贾冀青, 常伟军, 杨锦斌. 汽车车桥类零件的工艺分析及高效加工[J]. 制造技术与机床, 1005-2402. 2013.10.043.
 - [3] 李颜平. 基于桥壳加工的两头同步驱动加工数控车床设计和研究[J]. 制造技术与机床, 1005-2402. 2017.09.003.
 - [4] 徐发仁. 气动液压机床夹具设计[M]. 上海: 上海科学技术出版社. 1982.
- 秦大同, 谢里阳. 现代机械设计手册[M]. 第2版, 北京: 化学工业出版社. 2019.

上接第57页

五轴机床在市场上呈现了强劲的增长势头, 采用标准球与千分表的传统五轴机床回转轴心线的检测方式显然已经不合时宜, 而且无法自动生成测试报告。雷尼绍采用应变片原理的以三位数起名的(如RMP600/OMP600/MP700等)高精度机床测头, 现在已经普遍在精密五轴机床上使用, 在该类机床上只需再加装一个标准球及几个价格不高的数据采集及分析程序, 就能实现回转轴轴心线误差的测量及补偿, 配合雷尼绍的球杆仪Ballbar Trace功能, 提供五轴机床中回转轴的中心线的调整, 实现按目前ISO标准推荐方法, 来分析、评估回转轴的性能, 通过周期性质量监控来有效识别因机床装调超差、碰撞或磨损而导致的故障。

6. 结语

保证精密五轴机床加工精度的关键在于, 除三维机床空间精度及其动态插补精度得到良好的控制外, 能够了解回转

轴的旋转中心相对于机床线性轴的位置, 特别是直线轴与回转轴之间的动态同步精度也需要得到准确的控制和评估。

2021年12月, 数控机床领域掀起了一波关于高端数控机床关键技术、检测技术及标准化的讨论 - “高端数控机床关键技术及标准新论坛”和“高端数控机床检测与标准技术国际论坛”分别于17日及30日在北京成功举办。笔者十分荣幸应邀参加了两次讨论, 并分享了关于数控机床新版标准带来的五轴机床校准的全新理念和可溯源的先进校准工具的应用。

相信随着机器校准的全新理念的引入, 我国机器制造业将迅速与国际标准和国家标准的要求接轨, 不仅需要满足静态几何精度的要求, 同时还需要能满足机器动态精度的测试要求。结合其它新版数控机床标准对定位精度测量不确定度分析的要求得到进一步落实, 将形成促使机器制造人员去设法改进机器制造质量的一股动力, 从而帮助提升我国机床制造业的整体质量控制水平。□

激光焊接技术在动力电池制造中的应用

中国汽车工程学会 赵宇龙

随着新能源汽车销量的增加，动力电池装机量也快速增长。数据显示，2021年我国新能源汽车销售352.1万辆，同比增长157.5%；动力电池装机量达到154.5GWh，同比增长142.8%。电池制造企业纷纷扩充产能，欧阳明高院士在电动汽车百人会上专家表示，到2025年我国动力电池产能将达3000GWh。在动力电池制造过程中，低成本、高质量和高效率是制造企业追求的三大目标，因此，能达到这三种目标的技术工艺和智能化装备受到电池制造商的青睐。

动力电池从外形来看分为方形电池、软包电池和圆柱电池，从2022年2月份装机量来计分别占到89%、6%和5%。电池制造工序繁多，从最初的浆料制作到最后的电池包加工，涵盖了流程工序和离散工序。以方形电芯为例，主要工序如图1所示。

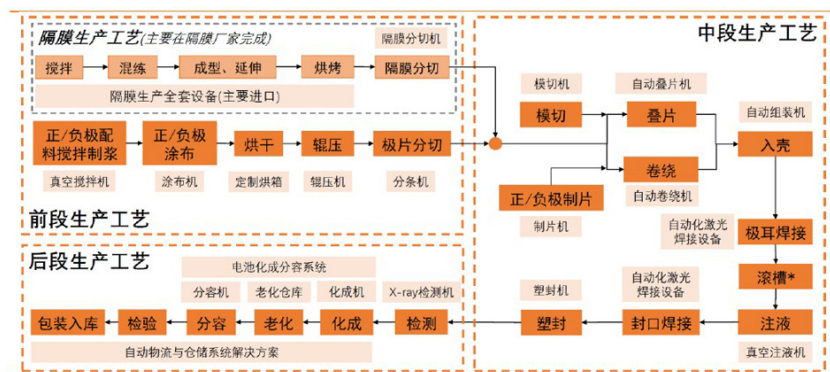


图1 电芯生产工艺流程（来源：阳如坤《电池装备产业发展报告》）

装车前还有电芯模组和电池包的制造。随着技术的发展，在焊接工序中使用激光焊接技术的越来越多。使用激光焊接的环节主要包括：中道工序：极柱的焊接（包括极耳焊接）、转接片焊接、盖板密封焊接、注液口密封钉焊接等；后道工序：包括电芯模组时的连接片焊接，以及模组后的盖板上的防爆阀焊接等。

激光焊接是利用高能量密度的激光束作为热源的一种高效精密焊接方法，热量集中、焊接速度快、热影响小、焊接变形小，易于实现高效率的自动化与

集成化，在动力电池制造中得到越来越广泛的应用。激光焊接设备主要由激光器、激光控制器、光束传输及聚焦系统、计算机数字控制系统（CNC）、CNC工作台、气体供给系统、循环水冷系统等组成。激光器可分为气体激光器、液体激光器和固体激光器，固体中具有代表性的包括红宝石激光器、半导体激光器、光纤激光器和YAG激光器（钕铝石榴石）等。目前，固体激光器在焊接中应用越来越普遍。

1. 极柱焊接

电池盖板上的极柱如图2的红圈部分，可分为电池内部和外部部分，内部是电芯极耳与盖板极柱的焊接，外部是电池极柱通过连接片（或称转接片）焊接，形成串联、并联电路，组成电池模组。极柱即电池的正负极，正极和电池正极材料相对应采用铝材，负极采用铜材（见图2）。一般为铆压结构，铆压完成后进行满焊。焊接时，在满足设计要求的拉力和导电性能的情况下，优先选择光束质量好、能量分布均匀的光纤激光器或是复合焊激光器，可实现极柱的铝-铝结构焊接、铜-铜结构焊接稳

定性,减少飞溅、进而提升焊接良率。

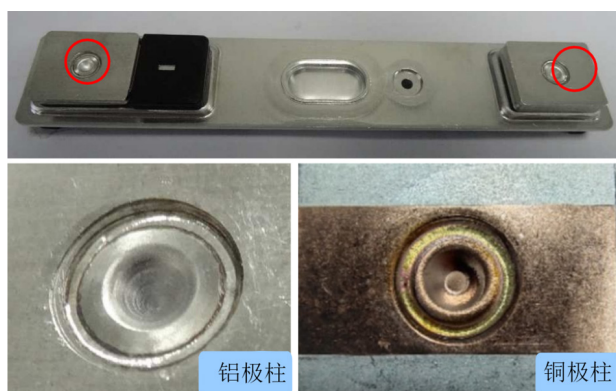


图2 电池极柱

也有负极柱采用铜铝复合材料制成,铜铝复合极柱主要有两种加工工艺:第一种利用化工工艺合成铜铝复合材料,这种方法制得的极柱虽然铜段和铝段连接紧密,但工艺复杂、成本高昂并且产率低;第二种将铜片和铝片通过摩擦焊接形成铜铝复合极柱,但是摩擦焊接不能100%有效焊接,存在断裂风险。激光焊接效率高,断裂风险低,是替代摩擦焊接的有效方法。但是铜铝属于高反材料(对激光的吸收率低),导致激光焊接困难。为了解决这个问题,池州市骏智机电科技有限公司发明了一种电池顶盖极柱激光焊接结构(见图3),其特征在于,极柱A段上朝向极柱B段的一端设有A焊接部,极柱B段上朝向极柱A段的一端设有B焊接部;AB焊接部通过激光焊接,AB焊接面上均设有多个纳米孔,形成磨砂面,避免了光滑表面导致的反光现象,焊接位置精准。采用平面焊接,焊接平面的面积不受限制可以根据需求设置,增强了焊接的牢固性。

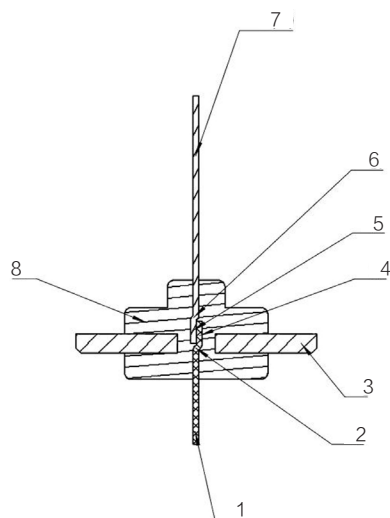


图3 极柱激光焊接结构

- 1.极柱B段 2.B段倾斜部分 3.盖板 4.B焊接部 5.A焊接部
6.A段倾斜部分 7.极柱A段 8.塑胶件

业内极柱结构和焊接技术均有不少创新,通过极柱+激光焊接查询专利,截止到4月初,现有公开的专利文献521条,塔菲尔新能源科技有限公司(东莞+深圳+江苏)以45项排在第一项。

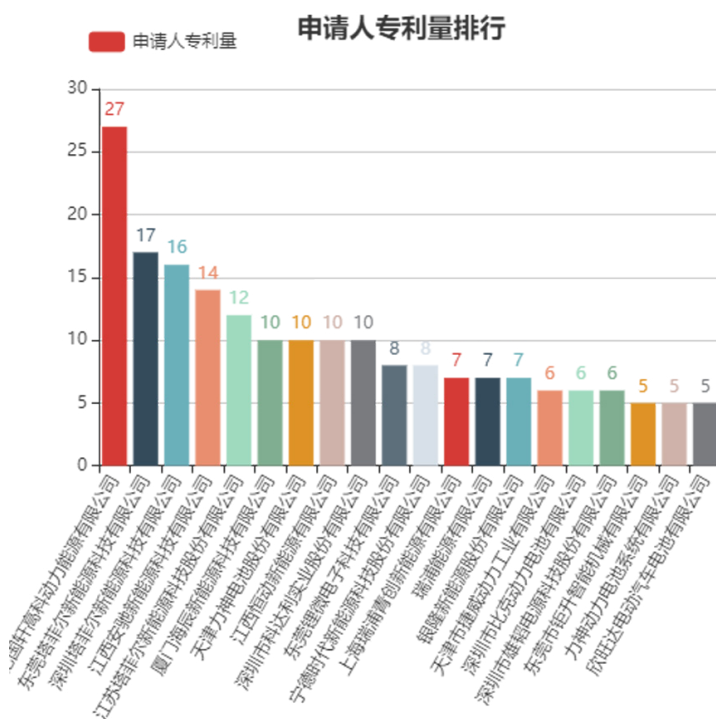


图4 极柱焊接相关专利申请人名

2. 转接片焊接

转接片的作用是连接方壳电池顶盖极柱及电池内部电芯极耳,形成电流导通。目前的焊接方案均选用光纤激光器,激光波段1030~1090nm,电池负极转接片为铜材质,铜材对于该波段吸收率极低,且散热极快,因此需要极高的功率密度才能进行深熔焊接,但在高功率焊接时又会导致铜/铝转接片焊点处熔化,形成熔珠飞溅,如清理不干净,会使电芯后续使用中存在短路等安全隐患。

为了解决类似问题,塔菲尔新能源科技有限公司发明了一种动力电池转接片结构,包括用于连接顶盖极柱和电池极耳的转接片本体(见图5),转接片本体焊接位置进行粗糙处理形成粗糙表面,所述粗糙表面的粗糙度为0.025~100 μm。转接片本体整体呈“山”型结构。

“山”型结构的两侧与电池极耳连接,“山”型结构的中部则与顶盖极柱连接;而将转接片设置成“山”型结构,一方面可以使转接片分别与顶盖极柱和电池极耳实现可靠连接;另一方面,这样可以有效保证转接片的过流能力和熔断性能,同时还可以充分利用电池内部空间,提高电池能量密度。

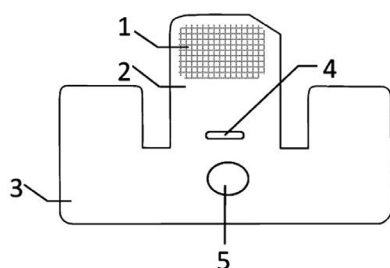


图5 一种动力电池转接片结构

1.粗糙表面 2.极柱焊接部；3.极耳焊接部 4.保险孔 5.固定孔

联赢激光则利用蓝光技术来解决铜材的高反问题。首先将待焊接的转接片与电池的顶盖极柱放置在一起，通过激光器输出蓝色激光至转接片表面，蓝色激光照射在铜转接片表面，由于铜材对于蓝色激光的吸收高达50%以上，转接片迅速熔化形成深宽比较小的液态熔池，该过程通过热传导的方式进行，熔池极为稳定，无飞溅产生，并且不受离焦量（焦点离作用物质间的距离）的轻微变化影响。但此时熔池深度较浅，不能满足转接片和顶盖极柱内侧的有效连接。随后，通过激光器输出光纤激光作用于液态熔池表面，以使在液态熔池表面吸收光纤激光形成匙孔。此步骤在形成液态熔池之后，再增加一束高功率密度的光纤激光作用于液态熔池表面，液态熔池对于光纤激光的吸收率已经由固态的2%左右上升至20%左右，此时只需较小的光纤功率即可形成焊接匙孔，增加熔池深度。由于光纤功率的降低避免了熔池的过度沸腾，有效抑制飞溅的产生。接着通过运动轴带动激光器的激光出射单元从焊接轨迹起点移动至焊接轨迹终点，随着激光束的移动，运动方向前方的材料开始熔化，后方的熔池开始冷却凝固，最终形成完整的一条焊缝，使得转接片与电池的顶盖极柱焊接在一起。

由于采用蓝色激光和光纤激光复合焊接，使得整体激光利用率较高，

利用较低的总功率即可完成转接片激光焊接应用，焊接过程稳定，不易出现虚焊问题，焊接无飞溅产生，焊缝宽度可调节，保证焊缝的过流能力，大幅提高了方壳电池的产品性能（见图6与图7的对比）。



图6 光纤焊接



图7 蓝光+光纤焊接

3. 电池壳体（密封口）的焊接

动力电池的壳体材料主要有铝合金和不锈钢，其中采用铝合金的最多，一般为1系和3系铝合金。不锈钢具有较好的激光焊接性能，如304不锈钢，无论使用脉冲激光还是连续激光，都能够获得较好的焊缝外观和力学性能。铝合金密度小，但焊接难度相对较大，使用高功率连续激光焊接时虽然解决了动力电池焊接要求的熔深和密封性问题，但由于其连续焊接的特性，熔化金属量较多，金属熔化后再结晶，晶体结构发生了转变，且焊接产生的变形导致产品的尺寸发生改变。从焊接的实际结果来看，连续焊接后焊缝都会有所凸起，导致产品尺寸超差，需要后道工序来去除超差部分，增加制造成本。

方形电池的壳体厚度一般在1mm以下，根据容量的不同有0.6mm和0.8mm这两种。激光焊接方形动力电池壳体主要可分为侧焊和顶焊：侧焊对电芯内部影响较小，飞溅物不会进入壳体内部，但焊接后容易产生凸起，对后续工艺造成影响；顶焊由于焊接在一个平面上，对前道工序入壳和定位要求很高，因此对自动化要求高。焊接飞溅的因素也很多，如材料自身的特性、材料的清洁度等，其中主要决定因素是激光器的稳定性。用连续激光器焊接薄壳锂电池，效率可以提升5~10倍，且外观效果和密封性更好（见图8）。现在为了追求更快的焊接速度和更均匀的外观，大部分公司已经开始采用复合焊和环形光斑取代以往低速的单光纤焊接（见图9），目前大部分公司的量产线焊接速度已达200mm/s，而部分厂家光纤焊接的低速线，为保证焊道稳定，一般量产速度为70mm/s。



图8 壳体焊缝

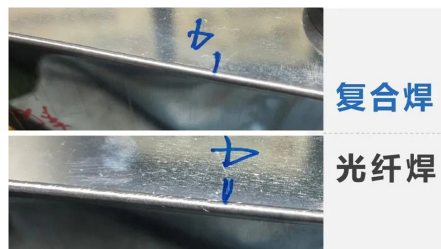


图9 复合和光纤焊缝比较

4. 密封钉（电解液注入口）焊接

密封钉（注射盖）形状通常是圆形帽，直径为8mm，厚度约为0.9mm，通常使用传统的YAG脉冲激光器焊接密封钉，激光以间隔脉冲的方式输出，所获得的焊缝成形美观、一致性好，良品率高。但脉冲模式焊接密封钉具有以下不足：一是焊接速度较慢，以平均输出功率为600W的YAG激光器焊接为例，焊接速度仅7mm/s以内；二是YAG脉冲激光器光电转换效率较低(3%左右)，平均输出功率为600W的激光器电功率需要20kW，能耗较高；三是激光器体积较大，且需要经常更换耗材。

采用光纤激光器通过连续光模式进行密封钉的焊接，焊接速度可达80~120mm/s，较YAG激光器焊接密封钉，焊接速度提高了10倍以上，但用连续激光焊接密封钉在焊缝收尾位置容易出现针孔状的气孔缺陷，导致密封钉焊接良品率低于YAG脉冲激光焊接密封钉。为了解决上述问题，大族激光发明了一种连续焊+脉冲焊的方法。具体做法是将密封钉放置于盖板的容纳槽中，并通过点焊的方式将密封钉固定于容纳槽中；通过第一激光沿着预设焊接轨迹的前一段对盖板和密封钉进行焊接，第一激光为连续光；通过第二激光沿着预设焊接轨迹的后一段对盖板和密封钉进行焊接，第二激光为脉冲光。该方法结合了连续光焊接的效率优点和脉冲光焊接的良品率优点，从而在保证密封钉焊接生产效率的同时，提高了密封钉焊接的良品率。第一激光和第二激光由同一个光纤激光器产生。即开始对圆形焊缝进行焊接时，使光纤激光器产生连续光模式的第一激光，并通过该第一激光以80mm/s的焊接速度沿预设焊接轨迹的前一段进行焊接至

前一段与后一段的相接处；然后使光纤激光器切换至脉冲光模式的第二激光，并通过该第二激光以10mm/s的焊接速度沿预设焊接轨迹的后一段继续进行焊接至结束(见图10)。

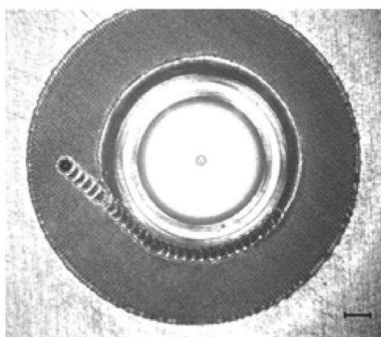


图 10

5. 连接片的焊接

电池模组经连接片（或称汇流条）将电芯串联或并联起来，连接片须满足过电流要求、电流均匀性要求，以及对电芯温度的控制要求。动力电池模组连接片多采用多层材料复合，其中一层材料为连接片与极柱的连接层，保证焊接性能。多层材料叠加用于保证连接片的导电性。连接片基材采用多层箔材堆叠之后加工成型，可形成柔性区域，用于补偿动力电池电芯膨胀造成的位移，减小对低强度界面的影响。动力电池模组连接片一般是长方形、梯形、三角形和阶段形等（见图11），连接表面贴0.1mm厚镀镍铜箔，这样在焊接时表面容易高温氧化变色，在不破坏产品表面镀层的情况下做耐抛光清洗，这样的产品，既解决了不需要整体电镀的问题，也解决了导电率最大化的问题。

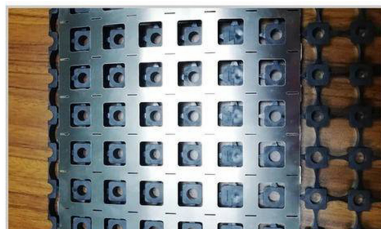


图11 连接片

由于铜和铝之间采用激光焊接后

易形成脆性化合物，无法满足使用要求，通常采用超声波焊接外，铜和铜、铝和铝一般均采用激光焊接。同时，由于铜和铝传热均很快，且对激光反射率非常高，连接片厚度相对较大，因此需要采用较高功率的激光器才能够实现焊接。

传统的连接片和极柱激光焊接是以叠焊的方式进行，激光能量穿透连接片传输到极柱，将连接片焊接在极柱上。这种焊接方式要求熔深大，激光入射能量高，焊接时焊缝表面容易出现炸点，影响电芯过流面积。且激光深熔焊过程中容易产生熔渣，飞溅的焊渣难以完全管控，一旦落入电芯中将会刺破隔膜，严重损害电芯的安全性能。为了解决类似问题，安徽环新集团股份有限公司发明了一种激光钎焊的方法。具体方法为：利用中间镂空的盖板将连接片压紧在极柱表面，且使得中间镂空位置与连接片焊接区域对准，焊接区域采用粗糙处理，且连接片与极柱焊接面设置有钎料镀覆层，连接片与极柱之间的间隙范围<0.1mm；将焊接激光对连接片的焊接区域进行移动加热，使连接片的焊接材料熔化完成焊接。此方法在焊接过程中不产生焊接炸点和飞溅焊渣，并且焊接完成后的电流导通面积显著提高，提高电芯安全性能的同时，降低电芯整体内阻。

6. 电池防爆阀焊接

动力电池防爆阀（见图12）是确保电池安全的重要部件，当电池内部温度异常，气压升高到一定压力时，防爆阀破裂开启排除内部气体，避免压力过高造成爆炸，从而保障了电池安全。防爆阀是一种纯铝质（AL1060）圆形薄片，厚度在0.08~0.1mm之间，铝材对激光的反射率高，且材料很薄，激光焊接过程中容易出现过烧穿孔现象。因而这道

工序对激光焊接工艺要求极为严格，要求焊缝密封，严格控制热输入量，保证焊缝的破坏压力值稳定在一定范围内（一般在0.4~0.7MPa），过大或过小都会对电池的安全性造成很大影响。

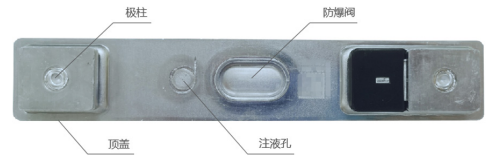
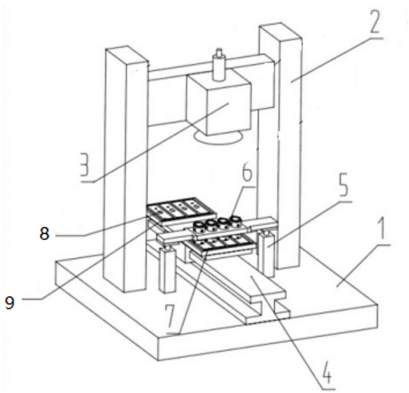


图12 电池盖板

现有技术中，大多采用三轴运动平台搭载准直聚焦焊接头来焊接动力电池防爆阀，其焊接速度大多在50~120mm/s。但由于三轴平台本身的运动单元质量过大，导致这种焊接方法的速度提升空间有限。其次，也有少量采用振镜焊接动力电池防爆阀的方案。但由于其采用敞口式侧吹的吹气装置，导致保护气流量及压力分布不均匀，得到的焊缝表面粗糙、不平整、生产良率不高。针对上述现有技术中存在的问题，大族激光发明了一种动力电池防爆阀焊接组件（见图13）及焊接方法。振镜焊接组件产生的焊接激光穿过吹气装置后，将密封的吹气环境中的待焊接动力电池防爆阀焊接到动力电池盖板上。其焊接速度快、保护气流量及压力均匀、保护气纯度高、焊缝表面平整光滑、熔深熔宽一致性高。



1.工作台 2.龙门架 3.振镜焊接组件 4.运动组件
5.升降气缸 6.吹气装置 7.料盘 8.电池防爆阀
9.电池盖板

兰钧新能源科技有限公司也发明了一种锂电池和锂电池防爆阀焊接工艺，该技术首先采用线条式的预定位焊接，再进行防爆阀和外壳之间的满程焊接，满程焊接的焊缝轨迹与预定位焊接的焊缝轨迹不重复，能够有效防止爆点，避免焊接薄弱区的形成，提高焊接产品的气密性，焊接轨迹更加美观。并且，预定位焊接采用线条式焊接，相对于现有技术中的点焊，有利于降低焊接的结构应力，缓解焊接位置周边发生的翘曲现象，提高焊接质量和产品良率，节约生产成本。

联赢激光推出的多波长激光同轴复合焊接技术和蓝光激光器技术在电池防爆阀焊接中应用广泛（见图14）。针对铝材焊接过程中飞溅、气孔、裂纹等工艺难题，联赢激光研发出了多波长激光同轴复合焊接技术，并设计开发了复合激光器。公司复合激光器的研发设计，一方面应用了能量负反馈技术，另一方面运用了复合焊接技术，将半导体激光器及光纤激光器的激光进行同轴复合，将不同波长的激光形成一束激光，从一个激光出射头，充分利用两种不同波长激光的优势，作用于被焊接材料。联赢激光的复合激光器可有效减少铝材的焊接缺陷，使得铝材的焊接效果大幅提升。该技术应用于动力电池防爆阀、顶盖、密封钉、极柱、软连接等工序焊接，有效解决铝材焊接过程中飞溅、气孔、裂纹等工艺难题。



图14

7. 结语

本文主要对激光焊接在方形电芯制造中的应用进行了总结，对眼下比较热门的4680圆柱电池全极耳与汇流盘的焊接工艺与解决方案没有涉及更多，因为其要求更高，成熟的方案并不多。

相对于激光切割和激光打标，激光焊接由于其工艺难度较大，渗透率还不是很高。随着激光焊接渗透率的提高，激光设备市场也会越来越大。依据《2021年中国激光产业发展报告》预测，2021年国内激光焊接设备市场约162.5亿元、同比增速约25%。考虑到随着激光焊接或在汽车制造、电池制造、3C产业、精密加工等领域应用的崛起，激光焊接设备渗透率将加速提升，激光焊接设备市场规模不断扩大。假设激光焊接设备市场维持25%的同比增速，则2025年激光焊接设备市场空间约400亿元，锂电池制造装备中激光焊接设备需求规模可达110亿元。目前，能提供电池激光焊接解决方案的企业有联赢激光、大族激光、逸飞激光、光大激光等。□

汽车油泥模型专用工具在实践中的创新与应用

东风汽车公司技术中心 胡卫兵 张 霓 杨 兴

『摘要』:本文介绍了汽车油泥模型制作的流程,分析模型制作过程中传统工具存在的缺陷,通过实际制作过程总结,重新设计和改进专用工具,最终满足设计对油泥模型质量要求,同时有效提升汽车油泥模型的制作效率。

随着科技的不断进步,人们对汽车的审美意识和个性化需求也越来越高,激烈的市场竞争推动着汽车产品的高速发展,新技术的发展促使汽车造型不断更新和完善。汽车油泥模型制作已成为新车型开发中不可缺少的关键环节,是汽车造型设计在效果图的基础上构思进一步完善的过程,汽车模型的制作是多工种、多技能的综合体现,在汽车油泥模型制作阶段,制作油泥模型专用工具,不仅能完成设计质量要求,同时能够高效制作油泥模型。

一、油泥模型制作的基本过程

与其他工业产品相比,汽车外形相对复杂,由许多样条曲线、高级曲面、细节部分组合而成,需要有一种可以灵活生成各种曲面的制作方法。工业油泥的可塑性强,可以方便地被刮削成任意形态,非常适合表现汽车细节部分的处理,并且汽车外形设计常有反复创新的过程,要对模型做反复推敲修改,使得模型本身具有可塑性,而油泥模型的特点恰好符合这样的要求。油泥模型外观的光顺及曲面的衔接流畅往往都是通过汽车模型工用手中的工具来刮削实现。油泥刮刀的尺寸大小、形状等都会影响油泥模型细节的制作精度,如何应用刮刀来刮削油泥模型细节部分,使其达到所需的精度并满足尺寸要求,能带来优美的视觉感受,是油泥模型制作的关键。

油泥模型制作的基本过程如图1所示:

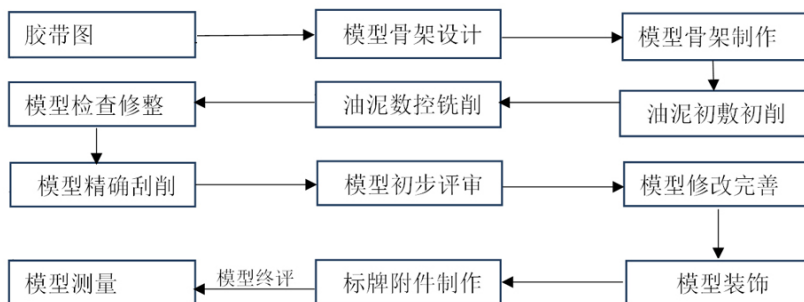


图1 油泥模型制作流程

1.接收设计输入,模型线图制作

设计师在绘制效果图和草图后(见图2),为了能够在模型制作过程中把握车身的曲面尺寸,还必须贴出大致的与模型近似比例的胶带图,贴图的过程同时也是设计师细化设计的演化,胶带图参照效果图和工程图纸依据车身尺寸进行贴绘。胶带容易定型更易修改,在模型制作初期,模型大部分的尺寸关系要依据胶带图来确定,在获得效果图和胶带图后,比例模型制作将正式开始。

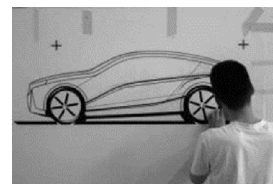
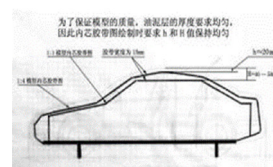


图2 设计效果图

2. 模型骨架设计与制作

设计与制作模型骨是模型师的职责，模型师设计出小于确定界限大约20 ~ 30mm的骨架表面，再画上50mm 或100mm的坐标格 (X,Y,Z)，便于工作。

选材、制作模型骨架：根据数模设计师正向建模数据进行模型骨架制作，在制作时必须考虑其精度以及轻量化，骨架由木板、聚苯乙烯泡沫等材料制成，完成模型骨架的选材、加工、封板的制作、泡沫材料粘接、局部切削，直至模型骨架初步完成（见图3）。



图3 模型骨架制作

3.油泥的填敷

在骨架的外表面聚苯乙烯泡沫上填敷油泥并均匀扩展到整个型芯，一般油泥厚度在20 ~ 30mm，填敷油泥时温度及油泥的厚薄均匀（见图4）都很重要。



图4 油泥的填敷

4.各种辅助工具、样板作业

通过辅助工具和样板制作（见图5），使整个油泥模型的外形按照设计标准确定模型的基本尺寸固化下来，为后工序油泥模型形体塑造提供良好的基础。



图5 样板作业

5.油泥模型形体塑造

通过样板将油泥模型的基本尺寸和大型确定以后，需要先对油泥模型的表面进行基本形状的修整，完成后再对油泥模型上的各个部分细节进行深入的设计和制作，解决汽车从二维图形转换为三维模型过程中所遇到的形体、形态、结构等各方面的问题，并就设计方案的一些细节进行再设计或是做进一步的分析。在这个过程中，各种油泥刮制工具的恰当使用，非常重要。

6.油泥模型确认及装饰

油泥模型的装饰以贴膜装饰为主，贴膜时要保证顺畅无气泡，装饰膜的接缝要尽量隐藏在模型的缝线里，确保模型的视觉效果。

装饰完成后的模型（见图6）用于专家评审及工程研讨。

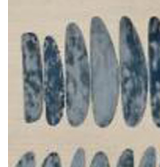


图6 油泥模型的装饰过程

二、油泥模型制作所使用的工具

1.油泥模型常用的工具

油泥模型制作过程是通过模型师对设计师创意再现的一个环节，由二维平面效果图到三维立体模型的转变过程，是油泥模型师通过理解设计方案构思，利用油泥模型专业工具，发挥专业制作技巧，表现设计师灵感的过程。附表为模型师主要常用油泥模型工具。

常用工具	作用	图示
直角刮刀	是把油泥手工制作平面和大形的工具，使油泥表面形成有细小凹凸的表面层，把油泥初步雕削成形	 
精细刮刀	处理油泥细节部位	
蛋形刮刀	制作外凹面或圆弧形的内表面	 
三角刮刀	用来刮削普通刮刀难以削到的、狭小复杂以及对细节部分有特殊要求的部位	  
钢片	根据不同形状、弧面和厚度，选择不同的钢片，来完成不同造型面和精细度的刮削，也用来光顺油泥模型的表面	  
其它	辅助工具	  

2. 现有油泥工具存在的问题及分析

(1) 现有油泥工具存在的问题

当前, 车型外观造型设计得越来越美观、前卫、丰富, 为了在模型上表现出丰富细致的造型细节, 较好地体现设计方案, 那就需要通过专业技能将模型细节部分制作成型。由于模型工具数量种类少、尺寸大等因素, 现有模型工具已不能满足对细小局部的修理, 制作有很大的难度, 不能准确表达设计最终的思想, 所以有必要对模型工具进行改进和创新, 方便模型制作 (见图7)。



图7 现有工具产生的缺陷示意图

(2) 现有油泥工具问题分析

现有的模型工具和刮片可以基本完成模型整体形态的调整, 达到设计效果。

双刃油泥等工具可以进行油泥模型大面修整, 其他特殊工具由于尺寸较大, 在对模型细节部分的修整时就会存在刀具无法刮削部分细部的问题 (见图8), 不能处理好细节部分的造型, 造成细节粗糙、缺失, 进而影响整体模型效果。



图8 油泥制作常用工具

三、解决方案及实践

1. 解决方案的思路

根据对平常修整模型局部细节的认识, 设计出一套适合于模型细节部分处理的刮削小工具, 既保证了模型的进度, 又提高了模型的质量。

为了提高油泥模型的制作精度, 根据在实际工作中所获得的经验自行设计制作出近二十把小型油泥工具 (见图9)。工作时可以根据模型制作时加工部位的大小和形状

选择相应的工具, 可有效提高模型的表面制作精度, 大大提高了模型的制作效率。



图9 新工具改型示意图

异形刮片形状设计分为两种: 计算机CAE设计和根据工作经验所获得形状 (见图10) 设计。

模型的型面千变万化, 各种角度也不尽相同, 根据工作经验制作各种形状和角度的小型工具。根据对平常修整模型局部细节的认识, 设计出一套适合于模型细部处理、内饰局部处理的刮削小工具, 既保证了模型的进度, 又提高了模型的质量, 达到快速制作模型的目的。



图10 新型角度工具

2. 改善工具的制作步骤

模型工具的制作步骤: 将手绘的刮刀形状拷贝到准备好的钢片上; 用砂轮机进行形状初步刃磨; 确定刮刀杆部的长度, 进行焊接加工处理; 刀刃部分的刃磨和刀架部分的焊接处理; 刀柄和刀架的组合安装; 刀柄油漆处理等 (见图11)。

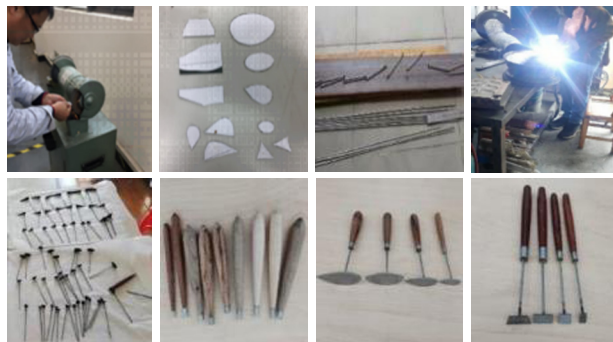


图11 自制工具制作示意图

3.改善工具的实践效果

常用工具和自制工具的对比（见图12）

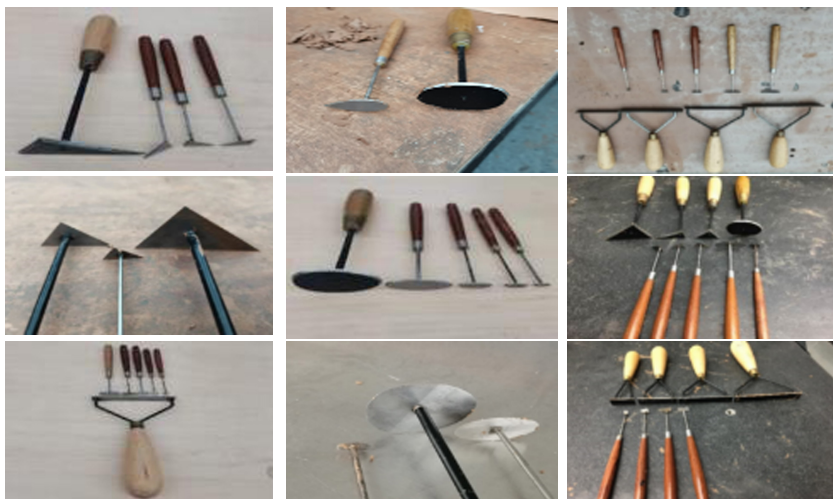


图12 新型工具展示图

实际工作情况的对比，新开发的工具对油泥模型细节有着良好的适应性，能较好地满足各种细节的高效处理（见图13）。

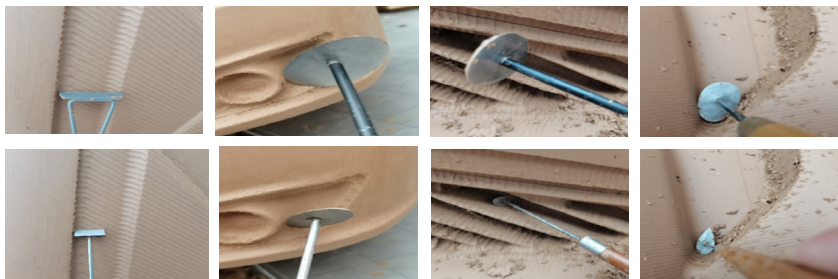


图13 新型工具使用后效果展示

4.小型油泥工具

小型油泥工具的使用，在实际工作中改善了模型制作的工作方法，有效提高了工作效率，缩短了模型制作周期，模型制作质量得到很大提高，更好地满足了模型制作的要求，大大提高了制作精度。

以下是根据自己在长期油泥模型的工作中的经验，借鉴其他模型师的实物，设计制作了一组小型油泥模型工具(见图14)



图14 新型小型油泥工具

5.模型整体效果展示

模型工具保证了模型制作质量的稳定，展示效果良好（见图15），为汽车模型制作的快速发展作出了贡献，同时也积累了宝贵经验，在乘用车各个开发项目中运用效果良好，在模型制作中得到了很好推广。



图15 油泥模型制作效果展示

四、结束语

汽车模型制作是一个创新和不断提高的过程，制造工艺不能停留在原有制作水平上，要在工作实践中不断探索，努力挖掘，寻求更快更好的模型制作方法。通过以上实例，可以认识到技术工人必须掌握一定的设计原理和专业知识，提高模型制作水平，完善模型制作工具，通过总结和改善不断提升技能水平。随着科技的进步，也要利用新材料和新科技，为模型制作寻找更加便捷的途径，只有遵循这样的原则，才能促进模型制作水平的稳步上升，为汽车产品的开发作出应有贡献。□

双伺服电机消隙控制C轴与主轴的切换

天水星火机床有限责任公司 温小亮

摘要：随着我国国民经济迅速发展，对高档、大重型多轴机床提出了急迫大量需求。研发、制造一台高精度、大承重、一次装卡完成多道工序加工的大重型车铣复合机床是设计制造瓶颈。依据新的要求，在大重型车铣复合机床上，C轴精度将直接影响大重型复杂工件的加工、制造精度，以及加工工艺的实现。为了提高C轴定位、分度的精度，提出了利用双伺服电机消隙控制C轴与主轴之间的自动切换应用。目的在于同时提高机床自动化，工作效率和加工精度。

1. 双伺服电机消隙C轴控制机构设计

所谓C轴就是把旋转主轴作为旋转进给轴使用，C轴有分度，定位功能，如图1所示。C轴主轴箱里Ⅰ轴和Ⅱ轴是由2台西门子1FT7 50N·m交流伺服电机分别通过行星减速机、双齿轮箱，经双齿轮箱上的两个小齿轮C轴齿轮1齿圈（Ⅳ轴）和C轴齿轮2齿圈（Ⅴ轴）与主轴大齿轮齿圈（Ⅵ轴）啮合，通过两个伺服电机的同步运动控制（主从控制）实现C轴的分度及定位进给。C轴进给与主轴主传动之间相互切换，C轴进给中的油缸推动端齿盘脱开，主传动中Ⅰ、Ⅱ档中的齿轮根据所需转速要求进行啮合，通过主电机驱动主轴箱中的齿轮旋转，实现主轴旋转运动，完成机床车削加工要求。反之，将主传动中的换挡齿轮至于空挡，而后将C轴进给箱中的油缸推动端齿盘啮合，通过C轴进给箱的伺服电机驱动齿轮旋转，从而带动主轴进行C轴进给运动，完成主轴的分度定位功能，实现铣削或钻削的加工要求。

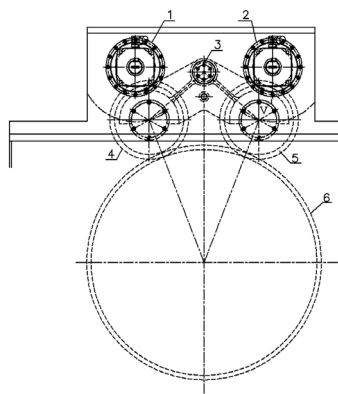
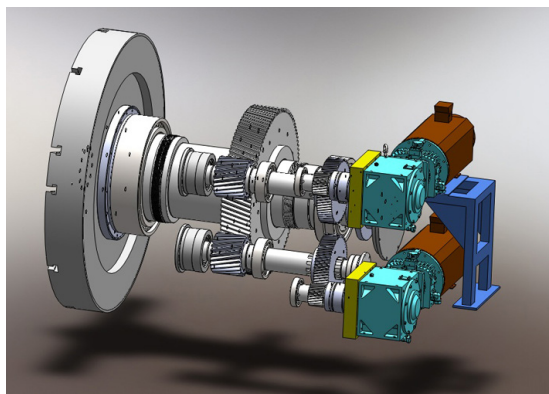


图1主轴与双电机消隙C轴切换进给箱传动图

1. C轴伺服电机1（Ⅰ轴） 2. C轴伺服电机2（Ⅱ轴） 3. C轴与主轴切换端齿盘（Ⅲ轴）
4. C轴齿轮1齿圈（Ⅳ轴） 5. C轴齿轮2齿圈（Ⅴ轴） 6. 主轴大齿轮齿圈（Ⅵ轴）

根据C轴传动所需满足分度定位功能要求，对其传动结构进行分析，选择最为经济实用的双伺服电机+减速机+小齿轮+大齿轮在传动到主轴的驱动结构，以满足加工复杂零件工况的设计要求。在车削时，该驱动链不执行车削功能，与主轴脱开并静止。采用以上驱动结构，并结合机床传动结构布置与配合摆放位置，最终确定如图1所示的传动结构图。

在机械上两个伺服电机通过两个小齿轮与主轴大齿轮连接在一起的，两个伺服电机都有速度控制，其中一个伺服电机利用主轴尾端安装的精密光栅尺作为位置控制。有位置反馈的伺服电机作为主动伺服轴，没有的作为从动伺服轴。主动伺服轴与从动伺服轴速度设定值一致。主伺服轴和从动伺服轴之间，实现速度和力矩耦合的过程。从动伺服轴跟随主动伺服轴运动，在主动伺服轴和从动伺服轴之间产生一个张力力矩，用于消除相互齿轮之间的间隙，利用两个伺服电机的力矩实现齿轮之间的间隙补偿。在C轴双齿轮箱上，C轴齿轮1（Ⅳ

轴)和C轴齿轮2(V轴)是两个滑移端齿盘,通过C轴与主轴切换(III轴)在油缸推动端齿盘的啮合或脱开,实现分度和定位的C轴传动与主轴传动之间的切换。

2. 主轴控制

在车削加工方式下,大重型车铣复合机床主轴为模拟主轴,主轴控制系统由西门子直流调速器驱动直流主电机(DC 90kW)工作。如图2所示,直流电机的运动经柔性联轴节传入主轴箱,经液压油缸操纵主轴箱内滑移变速齿轮,可实现两档无级调速,使主轴获得1~150r/min的转速范围。主传动线路采用了先进的高低分开的两条传动路线,经济有效地实现了较大的主轴变速范围。该主传动系统具有输出扭矩大、功率损失小,变速范围大等一系列特点。

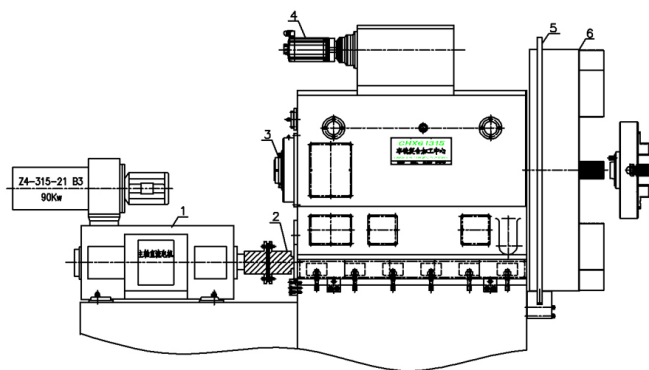


图2 主电机与主轴箱连接示意图

1. 主轴直流电机 2. 柔性联轴节 3. 海德汉圆光栅
4. C轴伺服电机及减速机 5. 主轴阻尼盘 6. 主轴卡盘

在铣削方式下,主轴为数字主轴,即车削的旋转主轴切换到双伺服电机驱动的C轴。C轴是由两个伺服电机驱动共同完成定位和分度,实现C轴的进给。同时针对大重型车铣复合机床旋转主轴与回转进给轴之间相互切换,在主轴卡盘上设计了主轴阻尼盘,安装有液压刹车锁紧装置,用于主轴的刹车和增加C轴定位、分度过程的阻尼锁紧。在旋转主轴停车时,实现快速刹车的功能;在C轴进给工作方式下,通过液压控制增加主轴阻尼,减小铣削时加工的振动,并在低速下能够平稳的进给,保证C轴的定位和重复定位精度。

3. 双伺服电机消除C轴控制与主轴之间的切换调试

双伺服电机消除C轴与主轴之间,通过电气控制电磁阀切换油缸方向,从而达到C轴传动与主传动的切换,并且在外部通过接近开关检测切换到C轴还是主轴。在使用主轴功能与C轴功能切换时,外部共用了一个主轴编码器(圆光栅)作为反馈,对旋转主轴功能来说是第一编码器,但对双伺服电机消除C轴的主伺服电机来说,是主轴编码器第二编码器。这样在主轴与C轴切换的时候,同时

也需要切换测量系统。

(1) 主轴与C轴之间控制的切换

在车削方式下,模拟主轴控制自动转换到铣削方式下的双伺服电机消除C轴的控制。通过PLC控制液压电磁阀,推动油缸动作,使图1中IV轴和V轴齿轮与主轴大齿圈齿轮啮合。检测到主轴检测开关信号为0,同时C轴检测开关信号为1后,C轴由主伺服电机速度环控制变为位置环控制,使系统激活主从功能,完成了旋转主轴向C轴的转换功能。在主轴向C轴转换过程中,要解决测量系统信号DB3X.DBX1.5/DB3X.DBX1.6切换的问题,在转换的过程中使DB3X.DBX2.1(进给轴伺服使能)为0,同时还要接通信号指令DB3X.DBX2.2(主轴复位)生效,能进行主轴向C轴的切换。

在铣削方式下,C轴控制自动转换到车削方式下的旋转主轴控制。当C轴向主轴转换时,通过PLC控制液压电磁阀,推动油缸动作,使图1中IV轴和V轴齿轮与主轴大齿圈齿轮相互脱开。检测到C轴到位开关信号为0,同时主轴到位开关信号为1后,取消掉系统主从功能,C轴由位置环控制变为速度环控制,从而实现了C轴向主轴的转换。

(2) 主轴与C轴的自动程序切换

为实现了车削方式和铣削方式的相互自动切换控制,提高机床的加工效率,缩短机床操作时间,体现出机床的高速,高效的特点,使机床更符合生产加工的需要,在PLC中利用M功能实现车削和铣削的切换,并且在机电液之间的进行互锁,保证设备和人身的安全。

4. 总结

用西门子数控系统具有的主从控制功能实现双电机驱动消除的C轴,不仅可以有效地消除传动间隙误差,同时实现高速响应的随动控制,从而提高机床传动精度。双伺服电机消除C轴与传统的机械消除机构相比较,有许多突出的优点:

(1) 机械设计简单。

(2) 在机械安装正确的情况下,由机械调整改为电气调整后,更加的灵活,方便。

(3) 可通过1个主动多个从动,有效解决电机机械安装可能存在的问题,如一台电机在安装空间受限情况下,可以采用多台小电机的方案来解决。同时降低了生产成本。

(4) 提高主轴的机械刚性、定位精度和重复定位精度。

5. 结论

经过现场的使用,双伺服电机消除控制C轴功能技术值得推广,其运行稳定、可靠,进一步优化大重型车铣复合机床的设计结构,深受用户的认可。□

有关精密卧式加工中心产品的研究

沈阳机床（集团）有限责任公司 张丽丽 张 弛 徐吉存 戴漫一

一、概述

随着装备制造业的发展，仅适用于单件、小批量、精加工生产的传统坐标镗的市场逐渐缩小，取而代之的是包括精密卧式加工中心在内的精密（坐标）加工中心。

该类加工中心适用于军工、航空航天、核电、船舶、汽车、能源、机床、刀具模具及机器制造业精密零件加工，如箱体类、盘套类、板件及模具类等复杂零件的中、小批量精密加工，特别适用于尺寸、形状和位置精度要求高的孔系加工。五轴产品可进行模具制造行业复杂型面加工、航空航天领域铝合金与钛合金的高精度和高速加工、医疗器械领域淬火钢和不锈钢等特殊材料加工、风电行业的叶片加工等。

近年来，精密卧式加工中心向着高精度、高刚性、高速度、高可靠性、高柔性等方向不断发展。目前，世界知名的该类机床制造商有日本安田（YASDA）、瑞士迪克西（DIXI）等。

二、主要竞争对手产品及特点

1.日本安田

公司产品应用于模具、航空航天、机械加工、精密零件等行业。追求亚微米精度的超高精度、高生产率的自动化、高超加工技术的多功能化，是安田的研发理念。

（1）精密卧式加工中心系列。

机床主要技术参数如表1所示。具体结构如图1所示。该类机床适用于机床主要部件、注塑机主要部件、压缩机壳、印刷机架等的加工。

表1

	YBM7T	YBM8T	YBM10T	YBM15T
X轴行程 (工作台左右) / mm	950	1300	1500	2100
Y轴行程 (主轴头上下) / mm	800	1000	1200	1800
Z轴行程(立柱前后) / mm	800	1100	1100	1500
各轴快移速度 / m · min ⁻¹	48			
工作台加工面积 / mm	630x630	800x800	1000x1000	1500x1500
工作台最大承载重量 / kg	1200	3000	5000	12000
主轴最高转速 / r · min ⁻¹	10000、 15000、18000			2800、 10000
主轴锥孔	BT50			
刀具存储数量(把)	60、90、120、 120~450		60、 90~450	60、 90~450
随机工作台数	2、4	2、6	2、5	2、5
NC装置	FANUC 31i-MODEL B5			



图1 YBM系列精密卧式加工中心

YBM10T：高承重（5t）。

YBM15T：承重达12t，适用于重型工件的高速、高精度的加工定位，达到坐标镗分度精度。

（2）卧式五轴加工中心系列。

机床主要技术参数如表2所示。

其结构外形如图2所示。

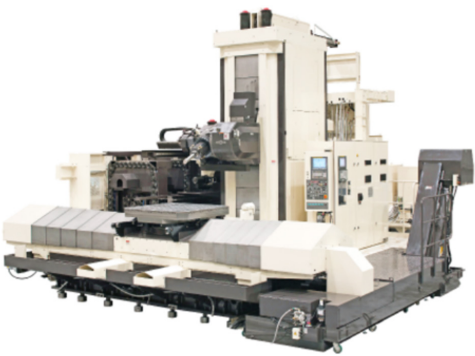


图2 YBM T-TH系列精密卧式五轴加工中心

表2

	H30i	H40i	YBM7Ti	YBM8T-63TT	YBM10T-TH	YBM10T-100TT
X轴行程（工作台左右）/mm	650	875	1250	1000	1500	1500
Y轴行程（主轴头上下）/mm	560	740	1000	1000	1500	1200
Z轴行程（立柱前后）	560	685	1100	1100	1800	1100
B轴行程（工作台回转）（°）	-120°~+45°	-185°~+45°	±100	360	360	360
C轴行程（倾斜工作台回转）（°）	360			A：-105~+15	A：-95~+5	A：-95~+5
工作台加工面积/mm	300x300	400x400	500 x 500	630x630	1000x1000	1000x1000
工作台最大承载重量/kg	80	200	500	800	5000	2000（垂直）、5000（水平）
主轴最高转速 / r · min ⁻¹	12000、20000	20000	10000		8000	10000
主轴锥孔	BT40		BT50			
刀具存储数量（把）	60、120、180、240	把	60		60、90~450把	60、90~300把
随机工作台数	2、32	2、24			2、5	1、5
NC装置			FANUC 31i -MODEL B5			

YBM10T-TH：高承重（5t），适用于中大型工件的高精度多面加工。

YBM10T-100TT：适用于飞机零件、难加工和复杂零件。

H30i-32PLS分上下三层，最多可存放32面工作台；H40i-24PL分上下三层，最多可存放24面工作台，节省空间和长时间的无人操作特性，实现加工的最佳性价比。

（3）主要技术特点

1）高刚性、高精度主轴

传统的主轴预加载方式，由于受到主轴转速增加引起热量温度上升造成预载增加的制约，而不得已采用尽量减少主轴初期预载这种有悖于主轴功能的方法。

公司开发的预载自动调整型高速主轴，低转速时大预加载，高速旋转时根据轴承发热量自动调整预加载，实现低转速重切削，高转速低发热高精度旋转。主轴驱动电机和主轴通过柔性联轴节高度同轴连接，实现全转速范围高精度旋转，使高硬度材料的高精度加工成为可能，在加工中发生轴向切削力反向时也能保持高精度加工。

2）高刚度机床结构

床身：采用最简单的“H”型结构，侧面结构壁厚90mm，上部水平结构壁厚40mm，具有极高刚性，保证立柱移动时不变形。各部结构热容积相同，并预设恒温系统管道，保证床身在室温变化时不产生扭曲或弯曲变形。

导轨：机床精度及精度保持性取决于导轨。机床导轨由淬火轴承钢制成，经精心磨削、手工抛光后，导轨表面具

有极高表面粗糙度，为定位精度及其持久性奠定了坚实基础。

经高精度加工的导轨安装在经过手工精密刮研的具有准确直线度的床身、滑鞍、立柱的导轨安装面上。在承重的X轴及Z轴上，配有承重检测系统，根据承重自动调整导轨面压，实现大、重零部件的高速移动。

立柱：立柱导轨左右并非完全平行，而是稍呈“鼓形”。无论主轴箱位于哪个位置，主轴箱两侧将受到恒定预加载。主轴变形小，定位精度高。

3）工作台夹紧机构

工作台夹紧机构由120~175mm厚的优质铸铁制成的高刚性工作台以及夹紧构造系统构成。该系统采用弧齿联轴节盘定位工作台于底盘，通过联轴节盘圆周上带30°压力角的弧齿以无齿隙咬合实现工作台高精度定位。工作台与底盘的结构一体化结构，保证高刚性夹紧，以及良好的振动衰减性。同时具有工作台交换的高重复定位精度，实现长时间的无人高精度加工。

4）机身温控装置

机床在工厂里所处的设置环境对机身精度有很大影响。比如强烈的室温变化、室内上部下部的温差、来自顶棚与墙壁的热辐射等，都会使机械不断发生热变形，并左右它的精度。安田产品的机身温控装置可将工厂环境对机身影响局限在最小范围内，通过在机身上循环的冷媒把主要部位控制在室温的±0.2℃以内，以防机身急剧变形，实现长期的稳定高精度加工。

5) 控制系统 “YASDA MiPS”

为实现高生产率和高度自动化而独创的控制系统 “YASDA MiPS” 具有便于机械日常维护的“维护演示功能”，能发现机械故障并以画面显示故障部位的“自诊断功能”，管理刀具、监视加工动力情况的“管理功能”，而且还在进一步增加新的加工支持功能，进行更高水平的机械控制。这些功能还可以与互联网对接。

6) 驱动系统

加工中心X、Y、Z轴采用双伺服电动机，双丝杠驱动，结构重心与驱动中心重合，保证驱动精度。X、Y、Z轴定位精度依据VDI/DGQ3441标准实测值为3.9 μm。

2.瑞士迪克西

自1904年成立以来，迪克西一直追求“高精度”理念，制造的机床应用于尖端技术领域，凭借产品及服务的高品质和可靠性，获得了世界各地的客户的高度评价。

公司精密卧式加工中心主要有DHP（DIXI High Production）高性能系列，产品有三种规格：DHP40、DHP 50、DHP80。机床具体结构见图3所示。

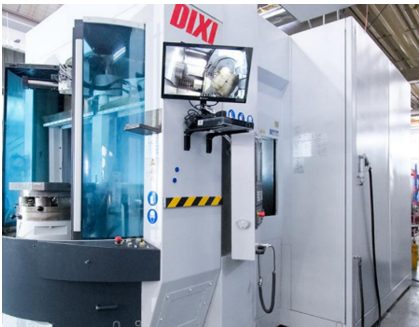


图3 精密卧式加工中心 DHP系列

(1) DHP高性能系列卧式加工中心

该系列产品是专为成批生产和大量生产中精密加工复杂零件而设计的四轴和五轴机床。其主要技术指标如表3所示。

表3

	DHP-40	DHP-50	DHP-80
X/Y/Z轴行程/ mm	500	700	1200 x 1100 x 1100
最大工件尺寸（直径x高度）/ mm	600x600	700 x 800	1200 x 1200
X/Y/Z轴快移速度/ m · min ⁻¹	60	60	40
力矩电机驱动B轴速度/ r · min ⁻¹	50	30	
B轴摆角（°）	-135~45		
托盘尺寸/mm	500x500	800 x 800	
托盘承重/ kg	400	800	1500
主轴转速/ r · min ⁻¹	12000、24000		12000
主轴功率/ kW	25、13.6		36
主轴锥柄	Cat 40, Big-Plus, HSK A63	Cat 50, Big-Plus, HSK A100	
托盘数量	2		
托盘交换时间/ s		< 8	
FMS或FPC托盘存储系统	可选		
刀库刀具数量	65 / 115 / 170 / 220		100 / 200
数控系统	Fanuc 16i MA/18i, Siemens 840 D		
定位精度/ μm		小于5	
重复定位精度/ μm		小于3	
托盘重复定位精度/ μm		小于2	

(2) 主要技术特点

1) 机床理念

DIXI 机床的理念：不需要试加工即可加工。所有机床都是根据这个理念开发的。为了实现这个理念，在全部加工中的定位准确性要控制到亚微米水平。通常，高精度机床的定位精度是5 μm，DIXI机床可实现0.99 μm。

2) 结构特点

迪克西机床的主要特征是坚固的床体和不随时间变化的高精度。

模块化机床结构，由整体式自支承球墨铸铁框架组成，稳定性和刚性高。为保证高精确度、精度和几何形状，床身经手工刮研。

采用预加应力的滚动导向元件，实现高精度和高速度。它带有集成在导轨内的集成测量系统和磁读数头，测量系统同导轨自身一样有相同的膨胀系数，可大大减小几何形状误差和变形误差，并可保证较高的精度等级。在正常操作条件下，集成测量系统对油、润滑脂和冷却液的污染不敏感。

3) 主轴

机床装有以长寿命理念开发的高刚性、高精度、高性能的主轴。主轴均用预加载荷的钢陶瓷混合轴承，且可根据速度进行调整；主轴上安装有轴向位移传感器、温度传感器、振动传感器等元件。

主轴结构：为了提高刚性，主轴采用了悬垂较短的构造。主轴驱动采用了直驱电机，实现高速同步攻丝。

轴承预紧的无级控制：为了延长轴承寿命和优化负载能力，研发了液压无级控制的主轴轴承预紧装置，可以根据主轴转数调整主轴轴承预压，削减了轴承产生的热量。

(下转至第80页)

直联式主轴松刀缸漏油分析及对策

通用技术集团大连机床股份有限责任公司 荆立萍 周吉贞 董建军

摘要：直联式主轴的松刀缸发现漏油现象。对其工作原理进行了论述，结合生产现场的实际情况分析了产生漏油的原因，并制定切实可行的技术改造方案，最终解决了漏油问题，为业内直联主轴松刀缸漏油解决提供参考。

直联式主轴是数控机床行业常用的一种主轴，它是由联轴器直接将电动机和主轴单元相联，对比皮带传动主轴省去了中间传动环节，具有传输功率损耗小、噪音低、振动小、灵活性高的特点。直联式主轴大大提高了数控机床钻孔、攻丝的效率及质量，实现了高速加工，成就了钻攻中心的时代。

松刀油缸是直联式主轴关键核心部件之一，它的故障率直接影响到主轴乃至机床的可靠性。直联式主轴的油缸是一个多功能集成的复杂结构油缸，具有松刀作用的同时，兼备动作指令发出、油和气路输入等作用。油缸结构的复杂性决定了它的易损、多故障，其中漏油故障，一直以来是直联式主轴的顽疾。机床在工作过程中，油缸频繁的执行松拉刀动作，经常会出现油缸漏油现象，造成油缸失效。为了解决油缸漏油问题，我们从松刀油缸工作原理入手，对油缸结构及密封件进行分析，结合漏油的实际情况，查找漏油原因，制定相应的技术改进方案。该方案经过在小型立式加工中心机床的应用，达到了预期效果。

1. 主轴概况及松刀缸工作原理

此油缸应用的主轴，主要由支撑部分、驱动部分和换刀部分等组成。换刀组件要完成拉刀和松刀两种动作。拉刀由碟簧和拉杆共同实现，松刀是由油缸压力油实现。该主轴的油缸主要针对于BT40刀柄换刀，需要拉刀力8000N，松刀力15000N以上，工作行程6mm以上，承受油压5MPa以上，换刀速度5s。

油缸主要零件包括活塞、缸体、油缸盖和密封圈等，如图1所示。油缸盖与缸体通过螺栓联接，然后整体固定连

接到主轴体上。油缸体上有两路油孔，压力油推动活塞沿主轴轴线方向进行反复的轴向运动。油缸右侧进油，活塞在油压力的驱动下向左端运动接触到拉杆，推动拉杆继续向左一直压缩弹簧，最终由油缸体硬限位。拉杆带动拉抓完成张开动作，实现松刀动作，油缸盖和活塞上的气路联通，触发油缸体上的传感器，发出松刀信号，打开气阀，通入压缩空气，进行锥孔吹气。反之左侧油缸进油，推动活塞右移，与此同时弹簧弹性复位推动拉杆向右，拉抓收缩拉紧刀柄，触发油缸体上的传感器，发出拉刀信号，活塞在油压的作用下继续向右运动，最终靠到油缸盖上，触发油缸盖上的传感器，发出活塞复位信号，主轴旋转。

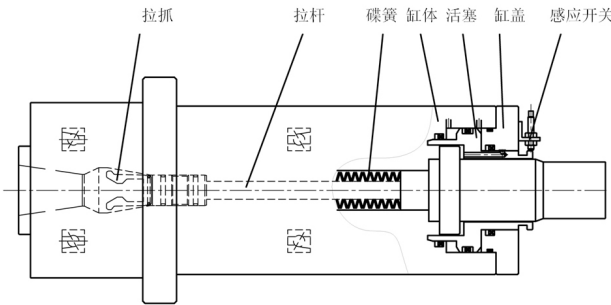


图1

2. 松刀缸的设计

该油缸的要求也比较高，要满足成本低、批量大、结构小、行程小、在冲击力和频繁换刀的工况下可靠工作，还要兼顾便于安装和调试的需求等。

O型圈和星型圈可以很好地满足以上要求，尤其是对

于批量大的主轴油缸产品非常具有应用价值。两种密封圈应用领域相似,大部分技术参数相同,但是因为截面形状不同,星型圈在动密封性能方面更具有优势。星型密封圈是一种自紧密封型的双作用密封元件,采用四唇口密封,形状类似X,特殊的星型截面使其在往复运动时,不会在沟槽内发生滚动和扭曲,而且需要的径向预压缩比较小,有较好的压力分布,产生的摩擦力较小,磨损量小,寿命长。星型圈密封唇之间形成了润滑容腔,可以改善启动状况,适合动密封,见图2。

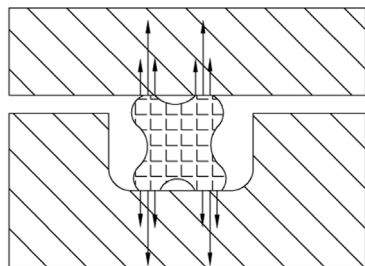


图2

此油缸的密封结构共有四处密封, 1处静密封处采用O形圈, 3处动密封处采用星形圈和挡圈结构。

该油缸在油缸盖与油缸体的径向密封处选用O型圈静密封。O型圈是一种双向密封元件，初始安装压缩量决定了O型圈的初始密封能力。油缸盖和油缸体设计需要考虑从O型圈的选型和具体零件结构设计两方面综合考虑。O型圈选型具体包括应用条件评估、材料选择、初始压缩量和径向间隙等。零件设计包括沟槽设计和安装倒角等。

该油缸的应用条件见表1。

表1

应用场合	工作介质	工作温度	工作压力
静密封	液压油34#	-30℃~+70℃	0~5MPa

根据应用条件选择橡胶材料NBR70,此种材料具有良好的耐油性,广泛的工作温度范围,整体性能优良。O型圈的初始压缩量为压缩尺寸与密封圈横截面的比值。允许径向间隙取决于系统压力、横截面和材料硬度,见表2。

表2

密封圈材质	密封圈硬度	初始压缩量	允许径向间隙
NBR70	邵氏硬度70	15%~30%	0.08~0.15mm

从零件特点和工艺性考虑,采用活塞式密封结构,便于加工和测量。具体结构见图3。

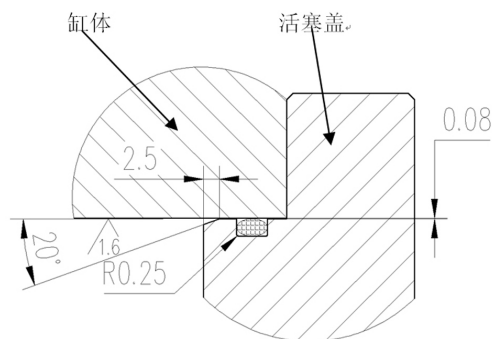


图3

此三处动密封决定了油缸的主要性能,包括活塞与缸体处密封,活塞与缸体的内腔密封和活塞与缸体盖处的密封。星型圈是自紧密封型密封元件,密封能力主要受系统压力和压缩量共同影响。星型圈选用除了考虑O型圈选用的因素,还要考虑动密封引起的新的限制参数、线速度和零件的表面处理(见表3),具体结构见图4。

表3

线速度	初始压缩量	表面粗糙度	允许径向间隙
< 0.5m/s	6%~18%	≤Ra0.4	~0.08mm

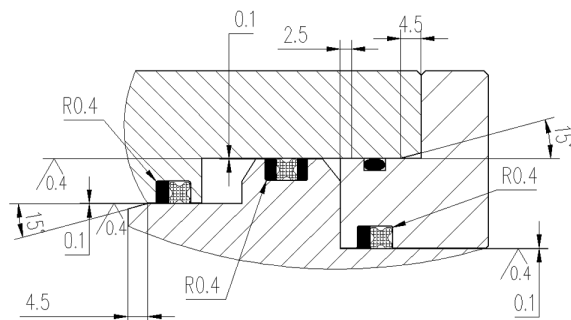


图4

3. 漏油现象及原因分析

在主轴实际工作时, 出现液压缸漏油、烧着、密封圈磨损等现象。一般都是从活塞偏心和密封圈失效进行分析。工作时活塞受到的是复杂变化的力, 拉杆的弹簧弹力、气压力、重力作用、油压力等多种作用力导致偏心。在安装时, 活塞需要经过油缸盖和缸体共三处的内孔进行径向定位, 由于不同零件的加工误差和安装等因素导致活塞偏心。活塞长期在油缸内作往复运动, 导致活塞的接触部位存在不同程度的磨损, 间隙变大, 造成活塞偏心。现具体现象分别列举如下。

实例1：油缸多次打刀后，在油缸盖和活塞接触处发现

明显漏油现象。

实例2：在活塞复位时，在活塞外表面发现密封圈的黑色颗粒状物体。

以上两种现象大部分原因是实际密封间隙大、密封圈失效和零件磨损等。可按照如下步骤进行排查找出主要原因。

(1) 油缸体，活塞等各零件尺寸，形位公差，粗糙度和密封圈尺寸是否合格，这些都可以造成密封间隙大引起漏油的现象。

(2) 油缸各部件是否清洗干净，油缸体里是否有杂质颗粒等，缸体的杂质颗粒会造成缸体过渡磨损，引起密封间隙变大。

(3) 检查装配过程中，是否有划伤密封圈，零件划伤等现象。

实例3：拆卸油缸后，发现活塞径向局部有磨损光痕，活塞与拉杆接触部分，发现烧伤性沟痕。

造成部件的烧伤故障和磨损故障，一般是尺寸链干涉和受力不均所致，解决此类问题方法可按如下步骤进行。

(1) 检查所有尺寸链上相关尺寸是否超差，尤其是装配链上的尺寸。

(2) 检查油缸和拉杆装配时是否偏心。

(3) 检查零件上具体磨损部位，具体分析受力情况。

4. 漏油的解决方法

(1) 增加耐磨环。在油缸盖上径向增加宽为10mm的耐磨环。耐磨环具有精确的导向作用，并可吸收径向力，同时，耐磨环可防止液压缸内滑动部件的金属接触。良好的耐磨性，避免金属间的接触，且能抑制机械震动。耐磨环还具有对中作用，允许配合件之间有一定的径向间隙，便于装配。

(2) 油压进口位置更改。油缸体上油口由径向入口改为油缸盖上的轴向入口，并且在油缸盖上增加缓冲腔。这个措施可以改变油压口进油一瞬间对活塞的冲击力方向，减小了活塞的颠覆力矩，使活塞在运动过程中，不偏心。

(3) 发令环尺寸缩小。油缸盖上的密封圈装配时，需要穿过活塞的发令环和空刀槽部位，会经过两次的挤压有被损伤的风险，优化设计后减小发令环径向尺寸，使密封圈只经过一次的挤压，并且在装配时增加润滑剂，进一步保护密封圈。

(4) 严格做好产品质量管理。加强各零部件检查工作，规范清洁工序，规范现场操作，例如使用符合清洁度及干燥度要求的气源和清洗剂进行部件清洗，安装活塞时添加润滑脂减少摩擦等。

5. 结束语

经过对该油缸的技术改造后，解决了油缸泄漏的问题，提高了油缸可靠性，为同行解决类似问题提供了借鉴。□

上接第77页

主轴冷却：对主轴发热处的轴套进行冷却，避免热量转移到主轴箱，从而防止热扩散，抑制热变形。

4) 双转台

可选直接驱动方式电机双转台，两轴配备线性光栅尺和编码器，实现五轴联动，兼顾高效率、高精度加工。A、B轴可同时分度，高效加工复杂形状及工序集约型工件。刀具可从最适合的角度趋近，实现高质量加工效果和刀具的长寿命。可选配托盘交换系统。

适用加工工件最大直径为 $\phi 1000/1200$ mm，最大高度为810 mm (DHP 80 II)。

机床可实现重切削中的高精度加工。在倾斜位置上自动更换刀具，摆动角度大，有利于复杂形状工件加工。

5) 工作台

通过采用直驱电机，实现零间隙的高速、高效驱动，有利于减少维护工时、延长寿命。

高速的双面旋转式托盘交换系统，简洁而可靠性高，可提高生产效率。托盘交换系统提供一个的标准托盘和一个的任选托盘。托盘交换时间小于8s。

机床防护顶部天窗宽度大，可以使用天车装卸工件。

三、产品战略发展建议

产品开发技术路径宜聚集国内其它关键技术优势单位，采用“产学研用”相结合的模式，建立研究和制造队伍，全面开展针对用户典型产品的加工工艺研究，通过自主设计、制造、安装调试，掌握高精度数控卧式坐标镗床关键单元技术、系统集成技术、关键试验技术、关键设备和仪器的开发技术，为精密卧式加工中心等相关高精度机床的研发、制造培养相应的优势团队。□

一种立车侧刀架轴切换装置

天水星火机床有限责任公司 李永真

摘要：针对带有侧刀架的立式专用车床，立车侧刀架的车刀需要沿X向及Z向的运动来实现工件的车削功能，在工作中随时要进行两个方向的切换，传统的侧刀架轴的切换采用纯手动操作，通过安装在箱体上的手把驱动拨叉，完成轴的切换，这种切换方式通常产生掉档，或切换不流畅，操作者不能直观判断当前轴的缺点，本文论证了通过一键切换方便实现刀架的自动换向的结构设计并将其实施。该机构具有结构简单、调整方便、操纵轻便灵活、运动灵敏度高，平稳性好等特点。实现高效、灵活、安全，减轻工人的劳动强度。

在特定行业的生产加工中，为了提高专用零件的加工效率，会用到带有侧刀架的立式车床，主要用于大型盘类零件，以及石油钻采设备中的滑轮、焊接滑轮、皮带轮、两轮、链轮体等零件外圆、孔系和轮槽R圆弧的加工等。传统的侧刀架轴的切换采用纯手动操作，通过安装在箱体上的手把驱动拨叉，完成轴的切换，这种切换方式通常产生掉档，或切换不流畅，操作者不能直观判断当前轴的缺点。

本文介绍的新型的轴切换装置，通过机械、电气、液压控制技术的灵活应用，根本解决了手动切换轴的缺点，一键切换，实现了高效、安全、灵敏的全自动切换控制。应用的领域主要以航空、石油、化工、能源、冶金等行业为主，可完全代替同类的进口设备，也可部分替代数控类机床，市场前景广阔。

1. 工作原理及机械结构

立车刀架自动轴切换装置，其结构特点如下：

(1) 用伺服电机作为驱动，通过按钮控制利用液压油缸驱动拨叉完成轴的快速切换。

(2) 用精密接近开关作为位置检测原件，保证安全、准确地进行轴的切换。

(3) 机构结构简单、调整方便、操纵轻便灵活、运动灵敏度高、自动化程度高、平稳性好，提高了机床的稳定性及加工效率，减轻了工人劳动强度。

(4) 转换过程中，伺服电机进行自动微量摆动，确保了切换流畅，无冲击。

2. 侧刀架自动换向装置设计

(1) 侧刀架

侧刀架安装在右立柱上，由伺服电机经减速箱驱动齿条传动。侧刀架X/Z轴的切换采用电磁阀驱动滑移齿轮，用压力继电器和行程开关作为轴切换完成检测条件，使侧刀架完成上下和前后的进给和快速移动。

(2) 换向结构

如图1所示，立车刀座19工作时需沿X轴及Z轴运动，为了实现上述运动，伺服电机1和I轴3通过联轴器2联接，I轴为花键轴，齿轮4装在I轴上，II轴5上通过花键轴装有齿轮6及齿轮7，III轴8上装有齿轮9及双联滑移齿轮10，油缸12上装有拨叉13，通过液压控制油缸12从a口或b口进油，推动拨叉13沿AB向移动来拨动双联滑移齿轮10移动，接通齿轮16或齿轮22来完成X轴或Z轴方向转换。齿轮16装在齿轮轴IV轴15上，当双联滑移齿轮10与齿轮16啮合时，齿轮轴IV轴15前端的齿轮部分与齿条17啮合，齿条17安装在滑枕18上，刀座19安装在滑枕18上，滑枕18可沿箱体20上的导轨沿X向移动，齿轮轴IV轴15前端的齿轮与齿条17啮合时，由于齿轮轴IV轴只旋转不平移，带动齿条17沿X向移动，实现整个滑枕18及刀座19一起相对箱体20沿X向左

右移动。当双联滑移齿轮10向下移动时, 齿轮10与安装在V轴21上的齿轮22啮合, 此时V轴21上的锥齿轮23旋转, 锥齿轮23与安装在齿轮轴25上的锥齿轮24啮合, 带动齿轮轴25旋转, 齿轮轴25前端的齿轮部分与安装在立柱27上的齿条26啮合, 齿条固定在立柱上不动, 齿轮轴25旋转并在齿条26上沿Z向移动, 带动整个机构沿立柱27沿Z向上下移动。

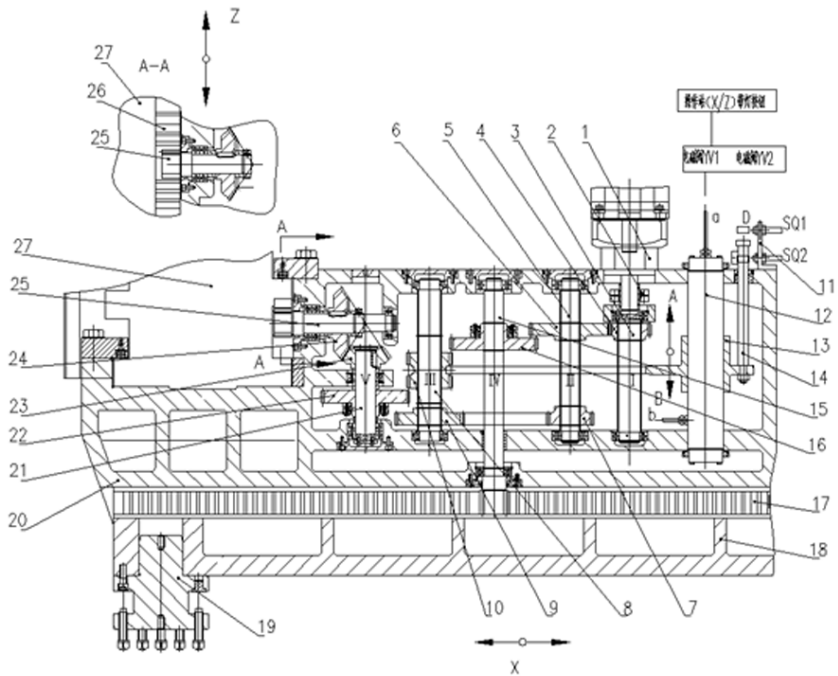


图1 立车刀架自动轴切换装置

- 1.伺服电机 2.联轴器 3.Ⅰ轴 4.齿轮 5.Ⅱ轴 6.齿轮 7.齿轮 8.Ⅲ轴 9.齿轮 10.双联滑移齿轮 11.接近开关 12.油缸 13.拨叉 14.检测杆 15.Ⅳ轴 16.齿轮 17.齿条 18.滑枕 19.刀座 20.箱体 21.V轴 22.齿轮 23.锥齿轮 24.锥齿轮 25.齿轮轴 26.齿条 27.立柱

(3) 电气控制系统说明

SIMOTION是一个全新的西门子运动控制系统, 它是世界上第一款针对生产机械而设计的控制系统, 将运动控制、逻辑控制及工艺控制功能集成于一身, 为生产机械提供了完整的解决方案。SIMOTION D的功能是集成在新的 SINAMICS S120多轴驱动系统的控制模板上, 使之成为一个极其紧凑的拥有控制器及驱动器的系统, 将运动控制与驱动器功能集成在一起, 使得系统具有极快的响应速度。

基于以上平台, 开发一台集数字化设计技术、加工制造装配技术、静压支承技术、电气控制技术、传感技术、伺服驱动等技术为一体的智能化低成本高精度高效率产品。具体配置: Simotion D425多轴位置控制器+MP277触摸屏 +SINAMICS单轴电机模块+1FT7105永磁同步伺服电机+PP72/48PN I/O板, 通过博图TIA Portal V16 step7进行各功能部件的调试, 以满足机床使用需求。

(4) 伺服轴控制

通过开放式的系统平台, 用伺服技术简化传统的机械传动实现多轴多通道, 高精度控制, 从而用普通机床实现数控系统功能, 完成复杂零件加工。

控制逻辑, 依据西门子 (或其它相关控制系统) 强大的调试软件, 各轴的运动通过伺服电机驱动, 在MP277上开发适合最终用户使用的OEM界面, 即可

实现单纯的速度控制, 也可实现精密的位置控制, 附加数显装置, 方便操作者适时观察到机床的位置、速度及其他各种工作状态, 方便进行手动、自动加工。

3.控制原理

(1) 操作说明

将侧刀架整个机构安装在立柱上, 通过液压调整好侧刀架的平衡, 在操作站设置好轴选择 (X/Z) 按钮, 采用带灯按钮进行控制, 按下X/Z轴按钮, 对应按钮灯亮起时轴切换完成, 按下对应轴的进给按钮实现切削, 如图2所示, 在侧刀架轴选择窗口, 按下选择X轴, 等检测到到位信号后, 选择X轴右侧绿灯亮起。要切换X轴时, 按下选择X轴, 等检测到到位信号后, 选择X轴右侧绿灯亮起。



图2 主界面

(2) 控制原理

各轴的位置控制界面如图3所示。按下X轴选择按钮电磁阀YV1工作, 油缸12驱动拨叉13沿A向运动, 拨叉13拨动双联滑移齿轮10与齿轮16啮合, 此时伺服电机1低速摆动, I轴低速摆动, 通过带动齿轮4-齿轮6-齿轮7-齿轮9-Ⅲ轴8-双联滑移齿轮10低速摆动, 以使双联滑移齿轮10与齿轮16啮合平滑柔和的啮合。此时, 电气控制方面油缸检测杆14到

达D位置，接近开关SQ1接受到到位信号，开关信号传送到面板Z轴的指示灯点亮，伺服电机1停止摆动，当面板X轴灯点亮说明X轴切换完成，X向传动路线接通。

(3) X轴切削进给

启动伺服电机1，伺服电机1的运动通过I轴3-齿轮4-齿轮6-Ⅱ轴5-齿轮7-齿轮9-Ⅲ轴8-双联滑移齿轮10-齿轮16-Ⅳ轴15旋转，齿轮轴Ⅳ轴15前端的齿轮部分旋转，与齿条17啮合，齿条17沿Z向移动，滑枕18及刀座19一起相对箱体20沿Z向左右移动。此时刀架就可以沿X轴按一定速度移动。



图3 各轴的位置控制界面

(4) 轴的切换

当需要沿Z移动时，按下Z轴选择按钮，电磁阀YV2工作，油缸驱动拨叉13沿B向运动，双联滑移齿轮10向下运动与齿轮22啮合，同时伺服电机开始微量摆动，实现双联滑移齿轮10与齿轮22啮合平滑柔和的啮合，电气控制方面油缸检测杆到达E位置，接近开关SQ2接受到到位信号，开关信号传送到面板Z轴的指示灯点亮，当面板Z轴灯点亮说明Z轴切换完成，Z向传动路线接通。

(5) Z轴切削进给

启动伺服电机1，伺服电机1的运动通过I轴3-齿轮4-齿轮6-Ⅱ轴5-齿轮7-齿轮9-Ⅲ轴8-双联滑移齿轮10-齿轮22-V轴21-锥齿轮23-锥齿轮24-齿轮轴25旋转，齿轮轴25前端的齿轮部分旋转与固定在立柱27上的齿条26啮合，由于齿条26固定在立柱27，齿轮轴25的旋转的同时沿齿条26Z向运动，带动整个机构沿立柱27沿Z向上下移动。切削工艺界面如图4所示。

为了保证操作加工安全，利用液压控制平衡油缸和锁紧压板等结构元件，用来控制侧刀架在Z轴位移(上下)方向的平衡及夹紧松开。



图4 切削工艺界面

4. 电气及液压控制

电气及液压控制图如图5所示。

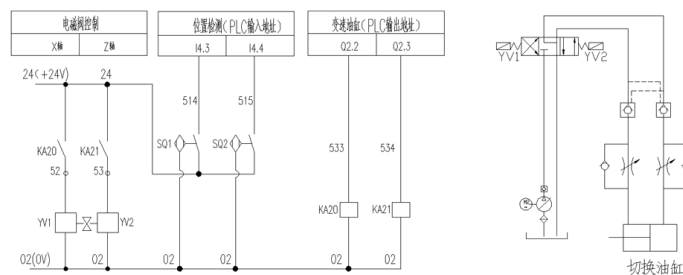


图5 电气及液压控制图

- KA20---油缸位置1/PLC输出地址Q2.2
- KA21---油缸位置2 /PLC输出地址Q2.3
- YV1-----X轴电磁阀 YV2-----Z轴电磁阀
- SQ1-----X轴位置检测开关/ PLC输入地址I4.3
- SQ2 ----Z轴位置检测开关/ PLC输入地址I4.4

电磁阀选用直流24V控制，用PNP型接近开关SQ1、SQ2高电平信号作为位置检测开关信号，触摸屏发出轴切换指令（也可以选择外部按钮开关）后，PLC判断当前位置并发出相应指令，Q2.2输出，KA20动作，YV1得电，电机微量摆动，至SQ1高电平输出，I4.3信号状态由“0”变为“1”档位符合，电机停止摆动，切换完成后X轴指示灯亮起，X轴切换完成。

5. 结语

这种新型的侧刀架轴切换装置，用按钮操作替代了传统的机械式切换，通过相应的检测原件，将当前轴直观的显示在操作面板上，避免了操作者的误操作，切换过程通过电气控制电机摆动，进给轴自动切换。该机构具有结构简单、调整方便、操纵轻便灵活、运动灵敏度高，平稳性好等特点，从而实现高效、灵活、安全，减轻了工人的劳动强度。本装置已成功应用，申请国家发明专利，专利号：ZL20140812418.2，并获得省专利三等奖。□

激光干涉仪在机床定位精度测量中的不确定度

武汉重型机床集团公司质管部计量测试中心 曹峰 王禧棠 徐皓莉

随着数控技术应用的日益发展和进步,激光干涉仪作为检测数控机床位置精度的主要工具,在大量厂家得到广泛应用。目前介绍激光干涉仪原理和检测方法方面的文章也有很多,但是对于其在测量位置精度时的测量不确定度还没有一个很详细的描述,特别是在常态下测量机床时的不确定度分析,还没有一篇描述很清晰的文章供实际工作中直接应用,往往只有理论上的推理,而在实际应用当中却不好作为依据,如环境因素中的温度梯度、地基振动和外部热源等的不确定度计算。另一些因素,如机床自身的稳定性、正确的材料膨胀系数则很难建立数学模型并进行不确定度的准确评定。以下本文就针对实际工作中的问题进行阐述及探讨。

关于激光干涉仪的结构及工作原理,很多书都介绍了,这里我们只需知道,不管单频激光干涉仪还是双频外差式激光干涉仪,它们检测的位移 L 在最后探测电路及运算电路后,均是和波长有关(即与干涉条纹有关)。简而言之,最终的数学公式就是:

$$L = N \cdot \lambda / 2 \quad \text{公式(1)}$$

其中: L = 动反射镜的位移量;

N = 半波长数,或干涉条纹个数;

λ = 激光的波长。

如图1所示,从激光头射出的激光光束(1)到达偏振分光镜时,被分成两束光:反射光束(2)和透射光束(3)。这两束光被传送到各自的角锥反射镜中,然后反射回分光镜中,在嵌于激光头中的探测器中形成干涉光束,如果两光程差不变化,探测器将在相长干涉和相消干涉的两端之间的某个位置观察到一个稳定的信号。如果两光程差发生变化,每次光路变化时探测器都能观察到相长干涉(4)和相消干涉(5)两端之间的信号变化。这些变化(条纹)被数出来,用于计算两光程差的变化。测量的长度等于条纹数乘以激光波长的一半,即公式1所示。

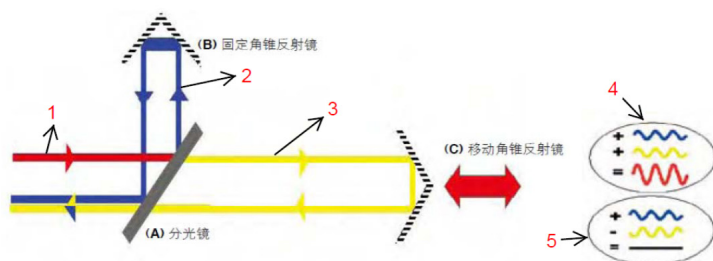


图1 单频激光干涉仪

如图2所示,双频外差式激光干涉仪是一种增量式的测长仪器,激光器输出两种频率 f_1 、 f_2 的双频激光通过准直扩束后,经1/4波片变为垂直和水平的两个线偏振光,一部分被分光镜反射进入参考光接收器,以取得频差为 $f_1 - f_2$ 的参考信号,用作测量基准,另一部分作为测量光束进入干涉分光镜,当反射镜随被测对象一起移动时,产生的多普勒频移使得 f_1 发生变化。由图3可知,从干涉镜射出并被测量光接收器接收到的光频分别为 $f_1 \pm \Delta f$ 和 f_2 ,频差为 $f_1 \pm \Delta f - f_2$ 。通过与参考光接收器获得的参考信号相比较,可得到 f_1 的频率变化 Δf ,该变化量包含了被测对象的运动信息,其值是半波长乘以频差对时间的积分,频差的时间积分就是累积的干涉条纹数,也即公式1所示。

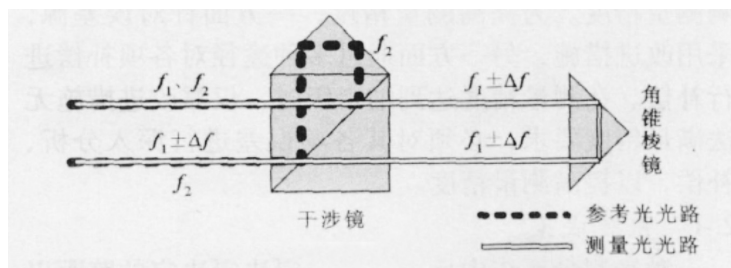


图2 双频外差式激光干涉仪

通过以上原理可知,激光干涉仪线性测距都是以参考

光和测量光的比较来测距的，移动距离最终结果是两光程差的变化。实际运用（见图3），参考光是以干涉分光镜和角锥反射镜连在一起得到（这束光是固定的作为参考光束），测量光是以随机床运动的角锥反射镜得到。

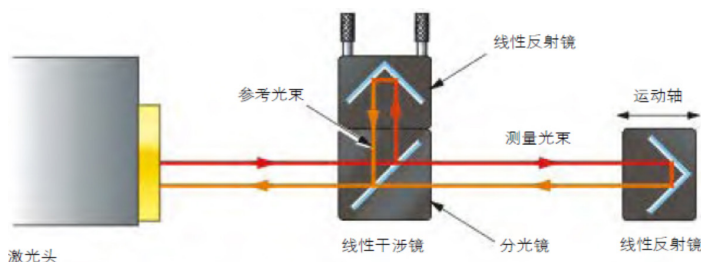


图3 激光干涉仪的测距示意图

我们的误差分析就是以此原理，应用到实际工作中环境人员操作和测量方法来分析。

一、激光干涉仪误差分析简介

激光在真空中的稳频精度，厂家给的都是 $0.02 \sim 0.05 \mu\text{m}$ ($2 \sim 5 \times 10^{-8}\text{mm}$)，在常态下允差给的是 $0.5 \mu\text{m}$ 以内。这是由于激光测量系统是利用光学效应进行测量，因此激光测量系统对工作环境十分敏感。在高精度的激光测量系统中，要求将实际工作环境控制在较为严格的范围内，其中环境控制的主要指标为空气温度、压力以及空气的相对湿度等。以上指标变化的综合结果将会引起空气折射率发生变化，从而导致波长的变化，最终引起测量误差。另外，对光时是凭人眼来找正的，故有测量轴线与运动轴线不平行带来的误差（即余弦误差），还有材料温度传感器的误差引起的测长误差。其它还包括测量电路的误差，光学镜组的制造误差等。

由于测量电路及光学镜组的制造误差（都小于 $0.05 \mu\text{m}$ ），这对于要求 $5 \mu\text{m} \sim 25 \mu\text{m}/\text{m}$ 的机床位置精度来讲可以忽略不计，所以下面主要讨论其他误差因素对于不确定度的影响。

1. 激光受环境变化引起的误差带来的不确定度分量 u_1

主要是空气折射率的变化导致波长的变化，根据资料介绍，一般每项环境条件的变化（下面所列的变化量），在没有补偿的情况下，分别都会导致激光在测长时带来大约1ppm的误差：空气温度 1°C (1.8°F)；空气压力 3.3 mbar (0.098 in Hg)；相对湿度 (20°C 时) 50% 相对湿度 (40°C 时) 30% 。

因为在测量过程中，相对湿度的变化 ($< 2\% \sim 5\%$)

和空气压力的变化 ($< 0.3 \sim 1 \text{ mbar}$) 都很小，这两个量在测量过程中基本没有影响，但是空气传感器允许误差这两项分别1mbar和6%，带来的激光仪误差分别为：

空气压力误差带来的误差

$$1 \div 3.3 \times 1 \mu\text{m}/\text{m} \approx 0.3 \mu\text{m}/\text{m};$$

相对湿度误差带来的误差

$$6\% \div 30\% \times 1 \mu\text{m}/\text{m} \approx 0.2 \mu\text{m}/\text{m}.$$

另外，环境温度传感器 0.2°C 带来的激光仪误差：

$$0.2 \div 1 \times 1 \mu\text{m}/\text{m} \approx 0.2 \mu\text{m}/\text{m}.$$

所以激光干涉仪本身受环境影响的固定误差：上面三项都是呈均匀分布，故三项不确定度分别为

$$0.3 \div \sqrt{3} \approx 0.17 \mu\text{m}/\text{m},$$

$$0.2 \div \sqrt{3} \approx 0.12 \mu\text{m}/\text{m},$$

$$0.2 \div \sqrt{3} \approx 0.12 \mu\text{m}/\text{m}.$$

$$u_1 = \sqrt{0.173^2 + 0.116^2 + 0.116^2} \approx 0.24 \mu\text{m}/\text{m}$$

则激光部分受环境影响带来的不确定度分量：

$$u_1 = 0.24 \cdot L (\mu\text{m})$$

L ——测量长度，以米 (m) 计

2. 余弦误差带来的不确定度分量 u_2

余弦误差主要是光线找正时对准标靶的误差，人眼在光斑很小时，一般在 $0.2 \sim 0.3 \text{ mm}$ ，在光斑大点时，这里给 0.5 mm 内，在距离较长 ($> 10 \text{ m}$) 光斑变淡变大的情况下，一般在 $1.5 \sim 2 \text{ mm}$ 内，此斜率带来误差（见图4）得到公式：

$$\Delta L = L - L' = L(1 - \cos \theta)$$

式中： ΔL = 余弦误差 L' = 移动轴线距离 L = 测量轴线距离 θ = 测量轴线与移动轴线夹角

显然这个误差也和距离有关。在对准误差一定时，轴越长误差越小。

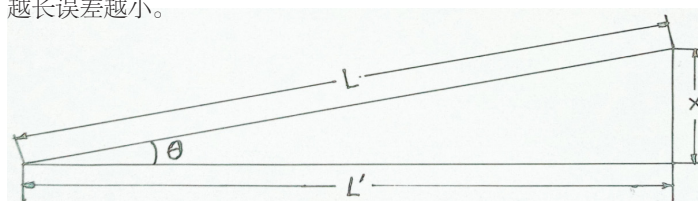


图4 测量轴线与移动轴线不平行

且成均匀分布。

由于 $\Delta L = L(1 - \cos \theta)$ 其中 $\theta = \sin^{-1} X/L$

故该不确定度分量： $u_2 = \Delta L / L = (1 - \cos(\sin^{-1} X/L)) / \sqrt{3}$

ΔL 为余弦误差 L 为测量轴线距离 θ 为测量轴线与移动轴线夹角 X 为对准误差

3. 材料温度传感器误差带来的不确定度分量 u_3

材料测量过程中因热膨胀带来的误差在不同材料时，

是不同的。通常我们机床行业的材料一般都是钢制或是铸铁的,光栅尺一般是专用玻璃和钢制的,这些材料的膨胀系数一般在 $10.5 \sim 12.5 \mu\text{m}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$,我们通常输入的系数值为 $11.5 \mu\text{m}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ 的,而激光干涉仪材料温度传感器一般厂家制造精度都是 $\pm 0.1^\circ\text{C}$,所以,最后带来的测量误差为 $11.5 \mu\text{m}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C}) \times 0.1^\circ\text{C} = 1.15 \mu\text{m}/\text{m}$ 。

写为通式: $11.5 \mu\text{m}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C}) \times L \times 0.1^\circ\text{C} = 1.15 \cdot L (\mu\text{m})$

其成均匀分布,所以,该不确定度分量:

$$u_3 = 1.15L \div \sqrt{3} \approx 0.66 \cdot L (\mu\text{m})$$

L —测量长度,以米(m)计。

4. 死程误差带来的不确定度分量 u_4

死程是图3所示分光镜到移动反射镜起始位置间的距离,这段距离仪器是没办法补偿的,所以温度环境变化会带来误差。该误差是随着该距离的大小而变化的。作为我们公司都是大型机床的特点,移动反射镜其始位置有时很难缩小到很小的位置,一般都 $> 300\text{mm}$,经常还要 $> 1\text{m}$ 。我们就以 300mm 死程来说,一般机床测量位置精度一次来回在 5m 内一般用时 $5 \sim 10\text{min}$,五个来回 $25 \sim 50\text{min}$,短时间内温度变化一般在 $0.05 \sim 0.2^\circ\text{C}$,材料温度一般在 0.1°C 以内。故可以估计该段死程误差的不确定度:

空气温度变化 0.2°C 带来激光误差:

$$0.2 \div 0.3 \times 1 \mu\text{m} \approx 0.06 \mu\text{m};$$

材料温度变化 0.1°C 带来的误差:

$$11.5 \mu\text{m}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C}) \times 0.1^\circ\text{C} \times 0.3 \approx 0.35 \mu\text{m}$$

以上两项都成均匀分布,不确定度分别为:

$$0.06 \mu\text{m} \div \sqrt{3} \approx 0.03 \mu\text{m} \quad 0.35 \mu\text{m}/\text{m} \div \sqrt{3} \approx 0.2 \mu\text{m}$$

则死程误差带来的不确定度分量:

$$u_4 = \sqrt{0.03^2 + 0.2^2} (\mu\text{m}) \approx 0.20 \mu\text{m}$$

则任意死程的不确定度分量为:

$$u_4 = 0.2 \times 1 \div 0.3 \cdot Y (\mu\text{m}) = 0.67 \cdot Y (\mu\text{m})$$

Y —死程的长度,以米(m)计。

5. 材料热膨胀系数带来的不确定度 u_5

通常我们机床行业的材料一般都是钢制或是铸铁的,光栅尺一般是专用玻璃和钢制的,这些材料的膨胀系数一般在 $10.5 \sim 12.5 \mu\text{m}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$,我们通常输入的系数值为 $11.5 \mu\text{m}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$,则有 $\pm 1 \mu\text{m}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ 的误差。其成均匀分布,所带来不确定度分量:

$$u_5 = 1 \mu\text{m}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C}) \times L \times \Delta t \div \sqrt{3} = 0.577 \cdot L \cdot \Delta t$$

L —测量长度,以米(m)计;

Δt —实际温度与标准温度 20°C 的差值。

6. 测量的重复性带来的不确定度分量 u_6

重复性是激光干涉仪多次测量机床同一点时的不一致

性带来的随机误差,测量位置精度时受到环境变化的影响以及机床综合性能的影响,在此影响下,测量同一点时会产生不一致性。该误差是不一定的,通过统计计算得到该项带来的不确定度。机床位置精度测量中,重复定位 S_i 是正反各5次测量同一位置的标准差平均值乘4(国标)或乘6(VDI3441)得到。由于是测量5次取平均值,所以平均值的标准差 $\bar{S}_i$ 作为该分量的不确定度。 $\bar{S}_i = S_i/4\sqrt{n-1}$, n 等于5;测量的重复性带来的不确定度分量:

$$u_6 = S_i/4\sqrt{5-1} = S_i/8 = 0.125 \cdot S_i (\text{VDI标准}=0.06 \cdot S_i)。$$

7. 环境变化带来的不确定度分量 u_7

在测量过程中,环境、仪器设备和/或机床可能漂移或发生改变,影响测量系统的读数这种环境变化误差是可以漂移试验(通过在被测机床上设置测量设备,并在被测机床极端位置上进行观察读数,并在测量时间长度内做该定位试验,测量其读数的变化量)检查,该检查结果包含该影响大小(E_{VE}),该值通过统计计算评估得到 u_7

该值统计区间为整个包容区间,在整个区间内成均匀分布,且不确定度分量计算是取半宽区间,故环境变化带来的不确定度分量: $u_7 = E_{VE}/2\sqrt{3} (\mu\text{m})$,需要注意的是:该分量不包含在设备的重复性定位里。

8. 测量安装反射镜位置的重复性带来的不确定度分量 u_8

直线定位精度和重复性在不同的测量线之间变化,这时如果移动轴具有俯仰和/或偏摆运动。因此,测量线必须准确地规定。测量线的准确位置是至关重要的。在实践中,不可能准确地说明测量线的位置,因此,该测量不确定度的因素必须包括在内。这种影响取决于被测轴的角度偏差(俯仰和偏摆)的大小,以及二次安装的测量线之间的阿贝偏移。偏移量是两侧测量直线间的距离(O_{ABBE}),角度偏差(俯仰和偏摆)的大小(D_{ANGLE}),则测量安装反射镜位置的重复性带来的测量长度的变化($\Delta L_{SETUP} = \sqrt{2} \cdot O_{ABBE} \cdot D_{ANGLE}/1000$)。该变化在整个区间内成均匀分布,且不确定度分量计算是取半宽区间,故测量安装反射镜位置的重复性带来的不确定度分量: $u_8 = \Delta L_{SETUP}/2\sqrt{3} = \frac{\sqrt{2} \cdot O_{ABBE} \cdot D_{ANGLE}}{1000 \times 2\sqrt{3}}$ 。

$$\text{最后合并标准不确定度 } u_{point} = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2 + u_6^2 + u_7^2 + u_8^2}$$

u_{point} 为位置测量点的不确定度,其中

$$u_1^2 = (0.24 \cdot L)^2 = 0.058 \cdot L^2$$

$$u_2^2 = (L(1 - \cos(\sin^{-1}X/L))/\sqrt{3})^2 = L^2(1 - \cos(\sin^{-1}X/L))^2/3$$

$$u_3^2 = (0.66 \cdot L)^2 = 0.44 \cdot L^2 \quad u_4^2 = (0.67 \cdot Y)^2 = 0.45 \cdot Y^2 \quad u_5^2 = (0.577 \cdot L \cdot \Delta t)^2 = 0.33 \cdot L^2 \Delta t^2$$

$$u_6^2 = (0.125 \cdot S_i)^2 = 0.016 \cdot S_i^2 \quad u_7^2 = (E_{VE}/2\sqrt{3})^2 = 0.289 \cdot E_{VE}^2 \quad u_8^2 = \left(\frac{\sqrt{2} \cdot O_{ABBE} \cdot D_{ANGLE}}{1000 \times 2\sqrt{3}}\right)^2$$

L —测量长度，以米（m）计
 X —激光调校时的测量轴线对准的误差；

Y —移动反光镜的起始点到干涉镜间的距离（即死程）；

Δt —实际温度与标准温度20℃的差值
 S_i —单次重复性的标准差；

EVE —环境变化带来的漂移
 O_{ABBE} —二次安装的测量线之间的阿贝偏移；

D_{ANGLE} —角度偏差（俯仰和偏摆）的大小（该值可测量出来，或以标准要求给出）。

扩展标准不确定度 $U_{point} = k \cdot u_{point}$ ，包含因子 k 取2

二、位置精度检测中各项精度结果的不确定度评估，包含因子都取（ $k=2$ ）

（1）VDI3441标准的检测参数如下：

有 P （定位精度）， Pa （位置偏差）， Ps （重复定位）， U （反向间隙）等4个参数。

a) Pa （位置偏差）的不确定度：

$$u_{Pa} = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2 + u_6^2 + u_7^2/n + u_8^2}$$

扩展不确定度 $U_{Pa} = 2 \cdot u_{Pa}$

b) P （定位精度）的不确定度：

$$u_P = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2 + u_7^2/n + u_8^2}$$

扩展不确定度 $U_P = 2 \cdot u_P$

c) Ps （重复定位）的不确定度（VDI3441是6倍的标准差）：

$$u_{Ps} = 6 \cdot \sqrt{\frac{1}{n-1}} \cdot u_7 \quad (n=10)$$

扩展不确定度 $U_{Ps} = 2 \cdot u_{Ps}$

d) U （反向间隙）的不确定度：

$$u_U = 2 \cdot \sqrt{u_7^2/n + u_8^2}$$

扩展不确定度 $U_U = 2 \cdot u_U$

（2）国标和ISO标准相同，其检测参数如下：

有定位精度（ A ， $A \uparrow$ ， $A \downarrow$ ），位置偏差（ E ， $E \uparrow$ ， $E \downarrow$ ），重复定位（ R ， $R \uparrow$ ， $R \downarrow$ ），反向间隙 B 。

a) 位置偏差（ E ， $E \uparrow$ ， $E \downarrow$ ）的不确定度：

$$u_{(E, E \uparrow, E \downarrow)} = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2 + u_6^2 + u_7^2/n + u_8^2}$$

单向 $u_{(E \uparrow, E \downarrow)}$ 时 $n=5$ 双向 u_E 时 $n=10$

扩展不确定度： $U_{(E, E \uparrow, E \downarrow)} = 2 \cdot u_{(E, E \uparrow, E \downarrow)}$

b) 定位精度（ A ， $A \uparrow$ ， $A \downarrow$ ）的不确定度：

$$u_{(A, A \uparrow, A \downarrow)} = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2 + u_7^2/n + u_8^2}$$

单向 $u_{(A \uparrow, A \downarrow)}$ 时 $n=5$ ；双向 u_A 时，由于双向是取了两个单向高低点，故 $n=3.5$ 。

扩展不确定度 $U_{(A, A \uparrow, A \downarrow)} = 2 \cdot u_{(A, A \uparrow, A \downarrow)}$

c) 单向重复定位（ $R \uparrow$ ， $R \downarrow$ ）的不确定度：

$$u_{(R \uparrow, R \downarrow)} = 4 \cdot \sqrt{\frac{1}{n-1}} \cdot u_7 \quad n=5$$

扩展不确定度 $U_{(R \uparrow, R \downarrow)} = 2 \cdot u_{(R \uparrow, R \downarrow)}$

d) 双向重复定位 R 的不确定度：

$$u_R = \sqrt{u_B^2 + u_{(R \uparrow, R \downarrow)}^2} \quad n=5$$

扩展不确定度 $U_R = 2 \cdot u_R$

e) 反向间隙 B 的不确定度：

$$u_B = 2 \cdot \sqrt{u_7^2/n + u_8^2} \quad n=5$$

扩展不确定度 $U_B = 2 \cdot u_B$

三、举例说明各定位精度检测参量的不确定评估

我们以温度分别为 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ ， $20 \pm 5^\circ\text{C}$ ， $20 \pm 10^\circ\text{C}$ 时，测量1000mm、2000mm、5000mm、10000mm的轴来评估不确定度。

（1）温度为 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ ，测量1000mm，2000mm，5000mm，10000mm的轴，测量时死程300mm，光轴对准误差在1mm，测量时间段实验漂移 $2 \mu\text{m}$ ，安装重复在50mm（以标准要求机床移动偏转角度误差0.05mm/m），机床重复定位结果0.01mm。得到下列各分量结果：

$$\begin{aligned} a) u_{1(1000)} &= 0.24 \times 1 = 0.24 \mu\text{m}, u_{1(2000)} = 0.24 \times 2 = 0.48 \mu\text{m}, \\ u_{1(5000)} &= 0.24 \times 5 = 1.2 \mu\text{m}, u_{1(10000)} = 0.24 \times 10 = 2.4 \mu\text{m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b) u_{2(1000)} &= 1000 \times (1 - \cos(\sin^{-1}(1/1000))) / \sqrt{3} = 0.5 / \sqrt{3} \mu\text{m} \approx 0.29 \mu\text{m}, \\ u_{2(2000)} &= 2000 \times (1 - \cos(\sin^{-1}(1/2000))) / \sqrt{3} = 0.25 / \sqrt{3} \approx 0.14 \mu\text{m} \\ u_{2(5000)} &= 5000 \times (1 - \cos(\sin^{-1}(1/5000))) / \sqrt{3} = 0.1 / \sqrt{3} \mu\text{m} \approx 0.06 \mu\text{m} \\ u_{2(10000)} &= 10000 \times (1 - \cos(\sin^{-1}(1/10000))) / \sqrt{3} = 0.05 / \sqrt{3} \mu\text{m} \approx 0.03 \mu\text{m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} c) u_{3(1000)} &= 0.66 \times 1 = 0.66 \mu\text{m}, u_{3(2000)} = 0.66 \times 2 = 1.32 \mu\text{m}, \\ u_{3(5000)} &= 0.66 \times 5 = 3.3 \mu\text{m}, u_{3(10000)} = 0.66 \times 10 = 6.6 \mu\text{m} \end{aligned}$$

$$d) u_{4(1000)} = 0.67 \times 0.3 = 0.2 \mu\text{m} = u_{4(2000)} = u_{4(5000)} = u_{4(10000)}$$

$$\begin{aligned} f) u_{5(1000)} &= 0.577 \cdot L \cdot \Delta t = 0.577 \times 1 \times 1 \mu\text{m} \approx 0.58 \mu\text{m}, \\ u_{5(2000)} &= 0.577 \cdot L \cdot \Delta t = 0.577 \times 2 \times 1 \mu\text{m} \approx 1.15 \mu\text{m}, \\ u_{5(5000)} &= 0.577 \cdot L \cdot \Delta t = 0.577 \times 5 \times 1 \mu\text{m} \approx 2.89 \mu\text{m}, \\ u_{5(10000)} &= 0.577 \cdot L \cdot \Delta t = 0.577 \times 10 \times 1 \mu\text{m} \approx 5.8 \mu\text{m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} j) u_{6(1000)} &= 0.125 \times S_i = 0.125 \times 0.01 \text{mm} = 1.25 \mu\text{m} = u_{6(2000)} \\ &= u_{6(5000)} = u_{6(10000)} \end{aligned}$$

$$h) u_{7(1000)} = E_{VE} / 2\sqrt{3} = 2 / (2/\sqrt{3}) = 0.58 \mu\text{m} = u_{7(2000)} = u_{7(5000)} = u_{7(10000)}$$

$$i) u_{8(1000)} = \frac{\sqrt{2} \cdot O_{ABBE} \cdot D_{ANGLE}}{1000 \times 2\sqrt{3}} = \frac{\sqrt{2} \cdot 50 \cdot 0.05}{1000 \times 2\sqrt{3}} = 1.02 \mu\text{m} = u_{8(2000)} = u_{8(5000)} = u_{8(10000)}$$

则在该条件下的各参数结果的不确定度为：

位置偏差（ E ， $E \uparrow$ ， $E \downarrow$ ）的不确定度：

$$\begin{aligned} u_{1000(E, E \uparrow, E \downarrow)} &= \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2 + u_6^2 + u_7^2/n + u_8^2} \\ &= (0.24^2 + 0.29^2 + 0.66^2 + 0.2^2 + 0.58^2 + 1.25^2 + 0.58^2/5 + 1.02^2)^{1/2} \approx 1.89 \end{aligned}$$

单向 $u_{(E \uparrow, E \downarrow)}$ 时 $n=5$ 双向 u_E 时 $n=10$

扩展不确定度: $U_{1000(E, E\uparrow, E\downarrow)} = 2 \cdot u_{(E, E\uparrow, E\downarrow)} = 2 \times 1.89 \approx 3.8 \mu\text{m}$

$$u_{2000(E, E\uparrow, E\downarrow)} = (0.48^2 + 0.14^2 + 1.32^2 + 0.2^2 + 1.15^2 + 1.25^2 + 0.58^2/5 + 1.02^2)^{1/2} \approx 2.44$$

扩展不确定度: $U_{2000(E, E\uparrow, E\downarrow)} = 2 \cdot u_{(E, E\uparrow, E\downarrow)} = 2 \times 2.44 \approx 4.9 \mu\text{m}$

$$u_{5000(E, E\uparrow, E\downarrow)} = (1.2^2 + 0.06^2 + 3.3^2 + 0.2^2 + 2.89^2 + 1.25^2 + 0.58^2/5 + 1.02^2)^{1/2} \approx 4.83$$

扩展不确定度: $U_{5000(E, E\uparrow, E\downarrow)} = 2 \cdot u_{(E, E\uparrow, E\downarrow)} = 2 \times 4.83 \approx 9.7 \mu\text{m}$

$$u_{10000(E, E\uparrow, E\downarrow)} = (2.4^2 + 0.03^2 + 6.6^2 + 0.2^2 + 5.8^2 + 1.25^2 + 0.58^2/5 + 1.02^2)^{1/2} \approx 9.25$$

扩展不确定度: $U_{2000(E, E\uparrow, E\downarrow)} = 2 \cdot u_{(E, E\uparrow, E\downarrow)} = 2 \times 9.25 \approx 18.5 \mu\text{m}$

定位精度(A, A↑, A↓)的不确定度:

$$u_{1000(A, A\uparrow, A\downarrow)} = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2 + u_7^2/n + u_8^2}$$

$$= (0.24^2 + 0.29^2 + 0.66^2 + 0.2^2 + 0.58^2 + 0.58^2/5 + 1.02^2)^{1/2} \approx 1.42$$

单向 $u_{(A\uparrow, A\downarrow)}$ 时 $n=5$ 双向 u_A 时由于双向是取了两个单向高低点, 故 $n=3.5$

扩展不确定度: $U_{1000(A, A\uparrow, A\downarrow)} = 2 \cdot u_{1000(A, A\uparrow, A\downarrow)} = 2 \times 1.42 \approx 2.8 \mu\text{m}$

$$u_{2000(A, A\uparrow, A\downarrow)} = (0.48^2 + 0.14^2 + 1.32^2 + 0.2^2 + 1.15^2 + 0.58^2/5 + 1.02^2)^{1/2} \approx 2.1$$

扩展不确定度: $U_{2000(A, A\uparrow, A\downarrow)} = 2 \cdot u_{2000(A, A\uparrow, A\downarrow)} = 2 \times 2.1 \approx 4.2 \mu\text{m}$

$$u_{5000(A, A\uparrow, A\downarrow)} = (1.2^2 + 0.06^2 + 3.3^2 + 0.2^2 + 2.89^2 + 0.58^2/5 + 1.02^2)^{1/2} \approx 4.66$$

扩展不确定度: $U_{2000(A, A\uparrow, A\downarrow)} = 2 \cdot u_{2000(A, A\uparrow, A\downarrow)} = 2 \times 4.66 \approx 9.3 \mu\text{m}$

$$u_{10000(A, A\uparrow, A\downarrow)} = (2.4^2 + 0.03^2 + 6.6^2 + 0.2^2 + 5.8^2 + 0.58^2/5 + 1.02^2)^{1/2} \approx 9.17$$

扩展不确定度: $U_{2000(A, A\uparrow, A\downarrow)} = 2 \cdot u_{2000(A, A\uparrow, A\downarrow)} = 2 \times 9.17 \approx 18.3 \mu\text{m}$

单向重复定位(R↑, R↓)的不确定度:

$$u_{1000(R\uparrow, R\downarrow)} = 4 \cdot \sqrt{\frac{1}{n-1}} \cdot u_r = 4 \times \sqrt{\frac{1}{5-1}} \times 0.58 = 1.16 \mu\text{m}$$

扩展不确定度: $U_{1000(R\uparrow, R\downarrow)} = 2 \cdot u_{1000(R\uparrow, R\downarrow)} = 2 \times 1.16 \approx 2.3 \mu\text{m}$

$$u_{1000(R\uparrow, R\downarrow)} = u_{2000(R\uparrow, R\downarrow)} = u_{5000(R\uparrow, R\downarrow)} = u_{10000(R\uparrow, R\downarrow)}$$

$$U_{1000(R\uparrow, R\downarrow)} = 2 \cdot u_{1000(R\uparrow, R\downarrow)} \approx 2.3 \mu\text{m} = U_{2000(R\uparrow, R\downarrow)} = U_{5000(R\uparrow, R\downarrow)} = U_{10000(R\uparrow, R\downarrow)}$$

双向重复定位R的不确定度:

$$u_{1000R} = \sqrt{(2 \cdot \sqrt{u_7^2/n + u_8^2})^2 + u_{(R\uparrow, R\downarrow)}^2} = ((2 \times \sqrt{0.58^2/5 + 1.02^2})^2 + 1.16^2)^{1/2} \approx 2.4 \mu\text{m}$$

扩展不确定度: $U_{1000R} = 2 \cdot u_R = 2 \times 2.4 \approx 4.8 \mu\text{m}$

$$U_{1000R} = 2 \cdot u_R = 2 \times 2.4 \approx 4.8 \mu\text{m} = U_{2000R} = U_{5000R} = U_{10000R}$$

反向间隙B的不确定度:

$$u_{1000B} = 2 \cdot \sqrt{u_7^2/n + u_8^2} = 2 \times \sqrt{0.58^2/5 + 1.02^2} \approx 2.01 \mu\text{m} \quad n=5$$

扩展不确定度: $U_U = 2 \cdot u_{1000B} = 2 \times 2.01 \approx 4 \mu\text{m}$

$$U_{1000B} = 2 \cdot u_R = 2 \times 2.4 \approx 4.8 \mu\text{m} = U_{2000B} = U_{5000B} = U_{10000B}$$

(2) 温度为 $20 \pm 5^\circ\text{C}$, 测量1000mm, 2000mm, 5000mm, 10000mm的轴, 测量时死程300mm, 光轴对准误差在1mm, 测量时间段实验漂移 $2 \mu\text{m}$, 安装重复在50mm(以标准要求机床移动偏转角度误差 0.05mm/m), 机床重复定位结果 0.01mm 。得到下列各分量结果:

温度的改变只对第五项分量膨胀系数的不确定度有影响, 即 u_5 会变, 别的分量不变。

$$u_{5(1000)} = 0.577 \cdot L \cdot \Delta t = 0.577 \times 1 \times 5 \mu\text{m} \approx 2.89 \mu\text{m}, \quad u_{5(2000)} = 0.577 \cdot L \cdot \Delta t = 0.577 \times 2 \times 5 \mu\text{m} \approx 5.77 \mu\text{m}$$

$$u_{5(5000)} = 0.577 \cdot L \cdot \Delta t = 0.577 \times 5 \times 5 \mu\text{m} \approx 14.45 \mu\text{m}, \quad u_{5(10000)} = 0.577 \cdot L \cdot \Delta t = 0.577 \times 10 \times 5 \mu\text{m} \approx 28.85 \mu\text{m}$$

则在该条件下的各参数结果的不确定度为:

位置偏差(E, E↑, E↓)的不确定度:

$$u_{1000(E, E\uparrow, E\downarrow)} = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2 + u_6^2 + u_7^2/n + u_8^2}$$

$$= (0.24^2 + 0.29^2 + 0.66^2 + 0.2^2 + 2.89^2 + 1.25^2 + 0.58^2/5 + 1.02^2)^{1/2} \approx 3.4$$

单向 $u_{(E\uparrow, E\downarrow)}$ 时 $n=5$; 双向 u_E 时 $n=10$

扩展不确定度: $U_{1000(E, E\uparrow, E\downarrow)} = 2 \cdot u_{(E, E\uparrow, E\downarrow)} = 2 \times 3.4 \approx 6.8 \mu\text{m}$

$$u_{2000(E, E\uparrow, E\downarrow)} = (0.48^2 + 0.14^2 + 1.32^2 + 0.2^2 + 5.77^2 + 1.25^2 + 0.58^2/5 + 1.02^2)^{1/2} \approx 6.2$$

扩展不确定度: $U_{2000(E, E\uparrow, E\downarrow)} = 2 \cdot u_{(E, E\uparrow, E\downarrow)} = 2 \times 6.2 \approx 12.4 \mu\text{m}$

$$u_{5000(E, E\uparrow, E\downarrow)} = (1.2^2 + 0.06^2 + 3.3^2 + 0.2^2 + 14.45^2 + 1.25^2 + 0.58^2/5 + 1.02^2)^{1/2} \approx 15$$

扩展不确定度: $U_{5000(E, E\uparrow, E\downarrow)} = 2 \cdot u_{(E, E\uparrow, E\downarrow)} = 2 \times 15 \approx 30 \mu\text{m}$

$$u_{10000(E, E\uparrow, E\downarrow)} = (2.4^2 + 0.03^2 + 6.62^2 + 0.2^2 + 28.85^2 + 1.25^2 + 0.58^2/5 + 1.02^2)^{1/2} \approx 29.74$$

扩展不确定度 $U_{2000(E, E\uparrow, E\downarrow)} = 2 \cdot u_{(E, E\uparrow, E\downarrow)} = 2 \times 29.74 \approx 59.5 \mu\text{m}$

定位精度 (A, A $\uparrow$, A $\downarrow$) 的不确定度:

$$u_{1000(A, A\uparrow, A\downarrow)} = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2 + u_6^2/n + u_8^2}$$

$$= (0.24^2 + 0.29^2 + 0.66^2 + 0.2^2 + 2.89^2 + 0.58^2/5 + 1.02^2)^{1/2} \approx 3.17$$

单向 $u_{(A\uparrow, A\downarrow)}$ 时, $n=5$; 双向 u_A 时, 由于双向是取了两个单向高低点, 故 $n=3.5$ 。

扩展不确定度: $U_{1000(A, A\uparrow, A\downarrow)} = 2 \cdot u_{1000(A, A\uparrow, A\downarrow)} = 2 \times 3.17 \approx 6.3 \mu\text{m}$

$$u_{2000(A, A\uparrow, A\downarrow)} = (0.48^2 + 0.14^2 + 1.32^2 + 0.2^2 + 5.77^2 + 0.58^2/5 + 1.02^2)^{1/2} \approx 6.03$$

扩展不确定度: $U_{2000(A, A\uparrow, A\downarrow)} = 2 \cdot u_{2000(A, A\uparrow, A\downarrow)} = 2 \times 6.03 \approx 12.1 \mu\text{m}$

$$u_{5000(A, A\uparrow, A\downarrow)} = (1.2^2 + 0.06^2 + 3.3^2 + 0.2^2 + 14.45^2 + 0.58^2/5 + 1.02^2)^{1/2} \approx 14.91$$

扩展不确定度: $U_{2000(A, A\uparrow, A\downarrow)} = 2 \cdot u_{2000(A, A\uparrow, A\downarrow)} = 2 \times 14.91 \approx 29.8 \mu\text{m}$

$$u_{10000(A, A\uparrow, A\downarrow)} = (2.4^2 + 0.03^2 + 6.6^2 + 0.2^2 + 28.85^2 + 0.58^2/5 + 1.02^2)^{1/2} \approx 29.71$$

扩展不确定度: $U_{2000(A, A\uparrow, A\downarrow)} = 2 \cdot u_{2000(A, A\uparrow, A\downarrow)} = 2 \times 29.71 \approx 59.4 \mu\text{m}$

单向重复定位 (R $\uparrow$, R $\downarrow$) 的不确定度:

$$u_{1000(R\uparrow, R\downarrow)} = 4 \cdot \sqrt{\frac{1}{n-1}} \cdot u_r = 4 \times \sqrt{\frac{1}{5-1}} \times 0.58 = 1.16 \mu\text{m}$$

扩展不确定度: $U_{1000(R\uparrow, R\downarrow)} = 2 \cdot u_{1000(R\uparrow, R\downarrow)} = 2 \times 1.16 \approx 2.3 \mu\text{m}$

$$u_{1000(R\uparrow, R\downarrow)} = u_{2000(R\uparrow, R\downarrow)} = u_{5000(R\uparrow, R\downarrow)} = u_{10000(R\uparrow, R\downarrow)}$$

$$U_{1000(R\uparrow, R\downarrow)} = 2 \cdot u_{1000(R\uparrow, R\downarrow)} \approx 2.3 \mu\text{m} = U_{2000(R\uparrow, R\downarrow)} = U_{5000(R\uparrow, R\downarrow)} = U_{10000(R\uparrow, R\downarrow)}$$

双向重复定位R的不确定度:

$$u_{1000R} = \sqrt{(2 \cdot \sqrt{u_7^2/n + u_8^2})^2 + u_{(R\uparrow, R\downarrow)}^2} = ((2 \times \sqrt{0.58^2/5 + 1.02^2})^2 + 1.16^2)^{1/2} \approx 2.4 \mu\text{m}$$

扩展不确定度: $U_{1000R} = 2 \cdot u_R = 2 \times 2.4 \approx 4.8 \mu\text{m}$

$$U_{1000R} = 2 \cdot u_R = 2 \times 2.4 \approx 4.8 \mu\text{m} = U_{2000R} = U_{5000R} = U_{10000R}$$

反向间隙B的不确定度:

$$u_{1000B} = 2 \cdot \sqrt{u_7^2/n + u_8^2} = 2 \times \sqrt{0.58^2/5 + 1.02^2} \approx 2.01 \mu\text{m} \quad n=5$$

扩展不确定度: $U_U = 2 \cdot u_{1000B} = 2 \times 2.01 \approx 4 \mu\text{m}$

$$U_{1000B} = 2 \cdot u_R = 2 \times 2.4 \approx 4.8 \mu\text{m} = U_{2000B} = U_{5000B} = U_{10000B}$$

(3) 温度为 $20 \pm 10^\circ\text{C}$, 测量1000mm, 2000mm, 5000mm, 10000mm的轴, 测量时死程300mm, 光轴对准误差在1mm, 测量时间段实验漂移 $2 \mu\text{m}$, 安装重复在50mm (以标准要求机床移动偏转角度误差 0.05mm/m), 机床重复定位结果 0.01mm 。得到下列各分量结果:

温度的改变只对第五项分量膨胀系数的不确定度有关, 即 u_5 会变, 别的分量不变。

$$u_{5(1000)} = 0.577 \cdot L \cdot \Delta t = 0.577 \times 1 \times 10 \mu\text{m} \approx 5.77 \mu\text{m}, \quad u_{5(2000)} = 0.577 \cdot L \cdot \Delta t = 0.577 \times 2 \times 10 \mu\text{m} \approx 11.54 \mu\text{m}$$

$$u_{5(5000)} = 0.577 \cdot L \cdot \Delta t = 0.577 \times 5 \times 10 \mu\text{m} \approx 28.85 \mu\text{m}, \quad u_{5(10000)} = 0.577 \cdot L \cdot \Delta t = 0.577 \times 10 \times 10 \mu\text{m} \approx 57.7 \mu\text{m}$$

则在该条件下的各参数结果的不确定度为:

位置偏差 (E, E $\uparrow$, E $\downarrow$) 的不确定度:

$$u_{1000(E, E\uparrow, E\downarrow)} = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2 + u_6^2/n + u_8^2}$$

$$= (0.24^2 + 0.29^2 + 0.66^2 + 0.2^2 + 5.77^2 + 1.25^2 + 0.58^2/5 + 1.02^2)^{1/2} \approx 6.04$$

单向 $u_{(E\uparrow, E\downarrow)}$ 时 $n=5$ 双向 u_E 时 $n=10$

扩展不确定度: $U_{1000(E, E\uparrow, E\downarrow)} = 2 \cdot u_{(E, E\uparrow, E\downarrow)} = 2 \times 6.04 \approx 12.1 \mu\text{m}$

$$u_{2000(E, E\uparrow, E\downarrow)} = (0.48^2 + 0.14^2 + 1.32^2 + 0.2^2 + 11.54^2 + 1.25^2 + 0.58^2/5 + 1.02^2)^{1/2} \approx 11.74$$

扩展不确定度: $U_{2000(E, E\uparrow, E\downarrow)} = 2 \cdot u_{(E, E\uparrow, E\downarrow)} = 2 \times 11.74 \approx 23.5 \mu\text{m}$

$$u_{5000(E, E\uparrow, E\downarrow)} = (1.2^2 + 0.06^2 + 3.3^2 + 0.2^2 + 28.85^2 + 1.25^2 + 0.58^2/5 + 1.02^2)^{1/2} \approx 29.11$$

扩展不确定度: $U_{5000(E, E\uparrow, E\downarrow)} = 2 \cdot u_{(E, E\uparrow, E\downarrow)} = 2 \times 29.11 \approx 58.2 \mu\text{m}$

$$u_{10000(E, E\uparrow, E\downarrow)} = (2.4^2 + 0.03^2 + 6.6^2 + 0.2^2 + 57.7^2 + 1.25^2 + 0.58^2/5 + 1.02^2)^{1/2} \approx 58.15$$

扩展不确定度: $U_{2000(E, E\uparrow, E\downarrow)} = 2 \cdot u_{(E, E\uparrow, E\downarrow)} = 2 \times 58.15 \approx 116.3 \mu\text{m}$

定位精度 ($A, A\uparrow, A\downarrow$) 的不确定度:

$$u_{1000(A, A\uparrow, A\downarrow)} = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2 + u_7^2/n + u_8^2} \\ = (0.24^2 + 0.29^2 + 0.66^2 + 0.2^2 + 5.77^2 + 0.58^2/5 + 1.02^2)^{1/2} \approx 5.92$$

单向 $u_{(A\uparrow, A\downarrow)}$ 时, $n=5$; 双向 u_A 时, 由于双向是取了两个单向高低点, 故 $n=3.5$ 。

扩展不确定度: $U_{1000(A, A\uparrow, A\downarrow)} = 2 \cdot u_{1000(A, A\uparrow, A\downarrow)} = 2 \times 5.92 \approx 11.8 \mu\text{m}$

$$u_{2000(A, A\uparrow, A\downarrow)} = (0.48^2 + 0.14^2 + 1.32^2 + 0.2^2 + 11.54^2 + 0.58^2/5 + 1.02^2)^{1/2} \approx 11.68$$

扩展不确定度: $U_{2000(A, A\uparrow, A\downarrow)} = 2 \cdot u_{2000(A, A\uparrow, A\downarrow)} = 2 \times 11.68 \approx 23.4 \mu\text{m}$

$$u_{5000(A, A\uparrow, A\downarrow)} = (1.2^2 + 0.06^2 + 3.3^2 + 0.2^2 + 28.85^2 + 0.58^2/5 + 1.02^2)^{1/2} \approx 29.08$$

扩展不确定度: $U_{2000(A, A\uparrow, A\downarrow)} = 2 \cdot u_{2000(A, A\uparrow, A\downarrow)} = 2 \times 29.08 \approx 58.2 \mu\text{m}$

$$u_{10000(A, A\uparrow, A\downarrow)} = (2.4^2 + 0.03^2 + 6.6^2 + 0.2^2 + 57.7^2 + 0.58^2/5 + 1.02^2)^{1/2} \approx 58.14$$

扩展不确定度: $U_{2000(A, A\uparrow, A\downarrow)} = 2 \cdot u_{2000(A, A\uparrow, A\downarrow)} = 2 \times 58.14 \approx 116.3 \mu\text{m}$

单向重复定位 ($R\uparrow, R\downarrow$) 的不确定度:

$$u_{1000(R\uparrow, R\downarrow)} = 4 \cdot \sqrt{\frac{1}{n-1}} \cdot u_7 = 4 \times \sqrt{\frac{1}{5-1}} \times 0.58 = 1.16 \mu\text{m}$$

扩展不确定度: $U_{1000(R\uparrow, R\downarrow)} = 2 \cdot u_{1000(R\uparrow, R\downarrow)} = 2 \times 1.16 \approx 2.3 \mu\text{m}$

$$u_{1000(R\uparrow, R\downarrow)} = u_{2000(R\uparrow, R\downarrow)} = u_{5000(R\uparrow, R\downarrow)} = u_{10000(R\uparrow, R\downarrow)}$$

$$U_{1000(R\uparrow, R\downarrow)} = 2 \cdot u_{1000(R\uparrow, R\downarrow)} \approx 2.3 \mu\text{m} = U_{2000(R\uparrow, R\downarrow)} = U_{5000(R\uparrow, R\downarrow)} = U_{10000(R\uparrow, R\downarrow)}$$

双向重复定位R的不确定度:

$$u_{1000R} = \sqrt{(2 \cdot \sqrt{u_7^2/n + u_8^2})^2 + u_{(R\uparrow, R\downarrow)}^2} = ((2 \times \sqrt{0.58^2/5 + 1.02^2})^2 + 1.16^2)^{1/2} \approx 2.4 \mu\text{m}$$

扩展不确定度: $U_{1000R} = 2 \cdot u_R = 2 \times 2.4 \approx 4.8 \mu\text{m}$

$$U_{1000R} = 2 \cdot u_R = 2 \times 2.4 \approx 4.8 \mu\text{m} = U_{2000R} = U_{5000R} = U_{10000R}$$

反向间隙B的不确定度:

$$u_{1000B} = 2 \cdot \sqrt{u_7^2/n + u_8^2} = 2 \times \sqrt{0.58^2/5 + 1.02^2} \approx 2.01 \mu\text{m}; n=5$$

扩展不确定度: $U_U = 2 \cdot u_{1000B} = 2 \times 2.01 \approx 4 \mu\text{m}$

$$U_{1000B} = 2 \cdot u_R = 2 \times 2.4 \approx 4.8 \mu\text{m} = U_{2000B} = U_{5000B} = U_{10000B}$$

四、总结通过不确定度评估, 使用这些评估中分析的影响量来减小测量误差

首先, 从以上说明的八个分量中确定可以减小的误差来源。

(1) 与仪器相关的四个误差分量中仪器的误差 (激光器和温度补偿误差是固有误差解决不了), 死程和余弦误差是人员操作熟练性造成, 通过调整可以减小最低限度。死程可以在机床检测时, 尽量使干涉位置靠近移动反射镜起始位置 (即机床起始位置), 可以适当减小该误差。而余弦误差的产生和特点如下: 我们看光斑在一到五米时, 一般认真调校可以控制在 0.5mm 对准误差, 则余弦误差: 在 1m 时, 因为对准有 0.5mm 的误差, 则斜线和直线间的夹角 $\theta = \sin^{-1} 0.5 \approx 0.0286^\circ$ 。则 1m 测量长度时余弦误差为: $\Delta L = L - L' = L(1 - \cos \theta) = 1000 \times (1 - \cos 0.0286) \approx 0.125 \mu\text{m}$ 。另外如果都对准误差 $\pm 0.5\text{mm}$, 测量长度在 500mm 和 2000mm 时, θ 分别为: $\theta_{500} = \sin^{-1} 0.5/500 \approx 0.0573^\circ$, $\theta_{2000} = \sin^{-1} 0.5/2000 \approx 0.0143^\circ$ 。

ΔL 分别为: $\Delta L_{500} \approx 500 \times (1 - \cos 0.0573) \approx 0.25 \mu\text{m}$, $\Delta L_{2000} \approx 2000 \times (1 - \cos 0.0143) \approx 0.062 \mu\text{m}$ 。显然在对准都是

0.5mm时,轴越长误差越小,而轴越短误差越大。随着光斑增大对准误差会变大,但是对准误差一般不会超过 $\pm 2\text{mm}$,则在长距离时仪器余弦误差也不会超过 $0.1\mu\text{m}$ 。故行程超过10m的轴此项误差影响很小,反观行程200~500mm的轴时,如果对准精度还是0.5mm时,则误差变为 $0.25\sim 0.62\mu\text{m}$,所以找正光线时,对于小机床应该仔细对好,尽量全范围看不到光标有移动,并且不确定度计算时要考虑此项误差。除了以上影响外,仪器的材料温度传感器的放置位置也影响测量结果,放置位置不同对结果影响较大(距离越长影响越大),一般放置于机床的标尺附近,注意不要放置于热源附近。

(2) 材料膨胀系数的误差是不同,一般是在系数 $2\mu\text{m}$ 的范围内变化,它的影响量与长度和温度有关,长度越长差的越多,温度和标准温度的差值越大误差越大。从上面不同温度条件下的计算过程及所得结果中可以看到该误差在大机床和温差很大时是位置精度检测中不确定度受影响最大的一个分量(可以说是主要分量)。而机床测量轴长是规定了的,不能通过减小长度来减小误差,所以只能通过控制温度来减小,对于定位精度要求越高的机床温度要求越高。在数控机床现场条件无法达到环境要求情况下,使用机床时需要在温差很大的情况下(武汉在不同季节时)重新检测机床位置精度,并补偿后使用。

(3) 重复性分量和机床的性能、热稳定性以及环境和周边震动等等有关,是综合性的误差来源。除了机床调到最佳状态外,并控制检查环境使之稳定。

(4) 环境漂移影响,控制环境条件,在测量的时间长度内和检查的最远距离观察激光仪读数的变化,测量时间是阶梯和线性方式检测定位精度的时长,一般机床轴由小到大(400mm~20000mm)检测时长在15~90 min内。这里说明一下,重复定位不确定度计算时阶梯方式和线性方式是不一样的即时长是不同的。阶梯式时机床轴长短测量时长是一样的(一般2~5min,线性方式时机床轴长短测量时长是不同的(和检测定位精度时长是一样的),所以环境漂移影响的试验时间在阶梯式时取测量时间长度内的2~5min的数值变化。

(5) 多次测量安装反射镜位置不同带来的影响,可以通过固定机床检测位置和反射镜安装位置来消除。即规定在机床被测轴外的其它轴所停位置作为检测线位置,移动反射镜安装位置固定并有安装附件。这样可以减小二次安装误差(控制在10mm内,甚至消除该误差)。

另外,在机床检测前,关闭车间大门避免空气对流,并需要空运转机床30min以上,使之预热并基本达到热平衡。检测期间停止使用机床附近的导轨运输车,最好行车不要经过机床附近,这样可以减小对检测结果的影响。

五、以实例结果的评估计算激光干涉仪在定位精度测量的不确定度

(1) 是恒温厂房里检测(WHCQ1600-002026)Z轴的定位精度,分别以阶梯和线性方式并且材料传感器放置在导轨检测定位精度,得到结果如图5所示:

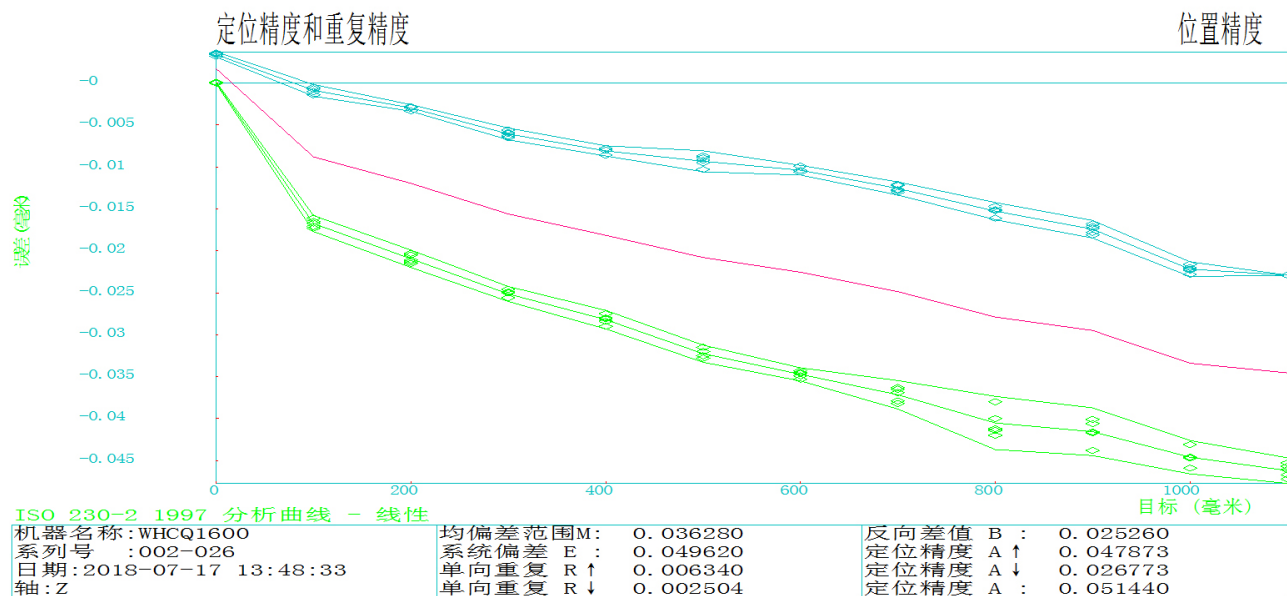


图5 阶梯式,材料传感器打在导轨端头

图5所示为材料传感器温度为26.1℃，测量轴长1100mm，测量时死程100mm，光轴对准误差调整在0.5mm内，测量时间段实验漂移0.7 μm，2分钟内0.5 μm，安装重复由于规定了机床位置并在同位置安装反射镜所以安装偏移接近于0，机床重复定位结果0.006mm。得到下列各分量结果：

- a) $u_1 = 0.24 \times 1.1 = 0.26 \mu\text{m}$; b) $u_2 = 1100 \times (1 - \cos(\sin^{-1}(0.5/1100)))/\sqrt{3} = 0.5/\sqrt{3} \mu\text{m} \approx 0.07 \mu\text{m}$;
 c) $u_3 = 0.66 \times 1.1 = 0.73 \mu\text{m}$; d) $u_4 = 0.67 \times 0.1 = 0.07 \mu\text{m}$;
 f) $u_5 = 0.577 \cdot L \cdot \Delta t = 0.577 \times 1.1 \times 6.1 \mu\text{m} \approx 3.87 \mu\text{m}$; j) $u_6 = 0.125 \times S_i = 0.125 \times 0.006\text{mm} = 0.08 \mu\text{m}$;
 h) $u_{\text{线}} = E_{\text{VE}}/2\sqrt{3} = 0.7/(2/\sqrt{3}) = 0.2 \mu\text{m}$, $u_{\text{测}} = 0.5/(2/\sqrt{3}) = 0.14 \mu\text{m}$; i) $u_8 = \frac{\sqrt{2} \cdot 0.05}{1000 \times 2\sqrt{3}} = 0 \mu\text{m}$.

则在该条件下的各参数结果的不确定度为：

位置偏差 ($E, E \uparrow, E \downarrow$) 的不确定度：

$$u_{(E, E \uparrow, E \downarrow)} = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2 + u_6^2 + u_7^2/n + u_8^2} \\ = (0.26^2 + 0.07^2 + 0.73^2 + 0.07^2 + 3.87^2 + 0.08^2 + 0.2^2/5 + 0^2)^{1/2} \approx 3.95$$

单向 $u_{(E \uparrow, E \downarrow)}$ 时, $n=5$; 双向 u_E 时, $n=10$.

扩展不确定度 $U_{(E, E \uparrow, E \downarrow)} = 2 \cdot u_{(E, E \uparrow, E \downarrow)} = 2 \times 3.95 \mu\text{m} \approx 7.9 \mu\text{m}$

定位精度 ($A, A \uparrow, A \downarrow$) 的不确定度：

$$u_{(A, A \uparrow, A \downarrow)} = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2 + u_7^2/n + u_8^2} \\ = (0.26^2 + 0.07^2 + 0.73^2 + 0.07^2 + 3.87^2 + 0.2^2/5 + 0^2)^{1/2} \approx 3.95$$

单向 $u_{(A \uparrow, A \downarrow)}$ 时, $n=5$; 双向 u_A 时, 由于双向是取了两个单向高低点, 故 $n=3.5$.

扩展不确定度: $U_{(A, A \uparrow, A \downarrow)} = 2 \cdot u_{(A, A \uparrow, A \downarrow)} = 2 \times 3.95 \mu\text{m} \approx 7.9 \mu\text{m}$

单向重复定位 ($R \uparrow, R \downarrow$) 的不确定度 (阶梯式检测方式) :

$$u_{(R \uparrow, R \downarrow)} = 4 \cdot \sqrt{\frac{1}{n-1}} \cdot u_7 = 4 \times \sqrt{\frac{1}{5-1}} \times 0.14 = 0.28 \mu\text{m}, n=5$$

扩展不确定度: $U_{(R \uparrow, R \downarrow)} = 2 \cdot u_{(R \uparrow, R \downarrow)} = 2 \times 0.28 \mu\text{m} \approx 0.6 \mu\text{m}$

双向重复定位R的不确定度：

$$u_R = \sqrt{(2 \cdot \sqrt{u_7^2/n + u_8^2})^2 + u_{(R \uparrow, R \downarrow)}^2} = ((2 \times \sqrt{0.14^2/5 + 0})^2 + 0.28^2)^{1/2} \approx 0.31 \mu\text{m}$$

扩展不确定度: $U_R = 2 \cdot u_R = 2 \times 0.31 \mu\text{m} \approx 0.6 \mu\text{m}$

反向间隙B的不确定度：

$$u_B = 2 \cdot \sqrt{u_7^2/n + u_8^2} = 2 \times \sqrt{0.14^2/5 + 0} \mu\text{m} \approx 0.13 \mu\text{m} \quad n=5$$

扩展不确定度: $U_B = 2 \cdot u_B = 2 \times 0.13 \mu\text{m} \approx 0.26 \mu\text{m}$

注：如果温度控制在 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 时, 则 $u_{(A, A \uparrow, A \downarrow)} = (0.26^2 + 0.07^2 + 0.73^2 + 0.07^2 + 0.63^2 + 0.2^2/5 + 0^2)^{1/2} \approx 1$

扩展不确定度 $U_{(A, A \uparrow, A \downarrow)} = 2 \cdot u_{(A, A \uparrow, A \downarrow)} = 2 \times 1 \mu\text{m} = 2 \mu\text{m}$

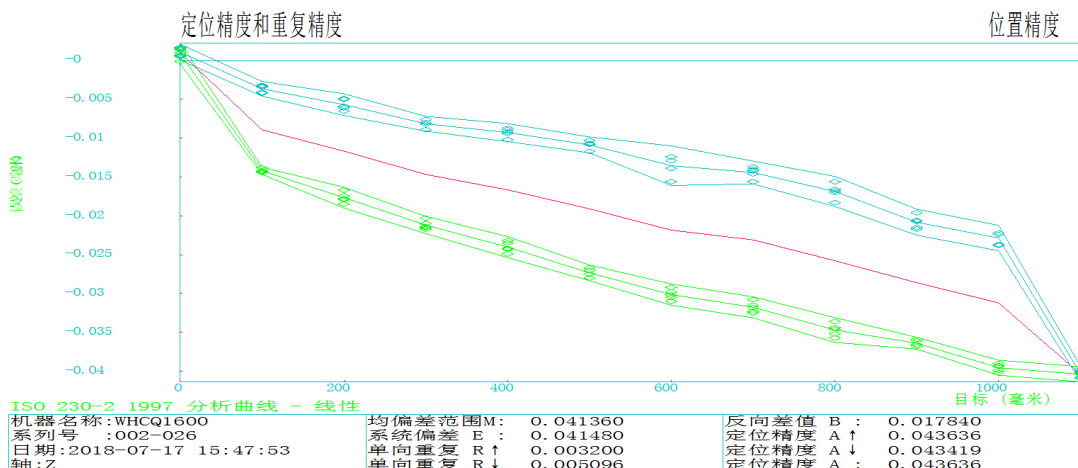


图6 线性方式，材料传感器打在导轨端头

图6所示为材料传感器温度为25.7℃, 测量轴长1100mm, 测量时死程100mm, 光轴对准误差调整在0.5mm内, 测量时间段实验漂移0.7 μm, 2分钟内0.5 μm, 安装重复由于规定了机床位置并在同位置安装反射镜所以安装偏移接近于0, 机床重复定位结果0.005mm。得到下列各分量结果:

- a) $u_1=0.24 \times 1.1=0.26 \mu\text{m}$; b) $u_2=1100 \times (1-\cos(\sin^{-1}(0.5/1100)))/\sqrt{3}=0.5/\sqrt{3} \mu\text{m} \approx 0.07 \mu\text{m}$;
 c) $u_3=0.66 \times 1.1=0.73 \mu\text{m}$; d) $u_4=0.67 \times 0.1=0.07 \mu\text{m}$;
 f) $u_5=0.577 \cdot L \cdot \Delta t=0.577 \times 1.1 \times 5.7 \mu\text{m} \approx 3.62 \mu\text{m}$; j) $u_6=0.125 \times Si=0.125 \times 0.005 \text{mm}=0.064 \mu\text{m}$;
 h) $u_{7\text{线}}=E_{\text{VE}}/2\sqrt{3}=0.7/(2/\sqrt{3})=0.2 \mu\text{m}$, $u_{7\text{阶}}=0.5/(2/\sqrt{3})=0.14 \mu\text{m}$; i) $u_8=\frac{\sqrt{2} \cdot 0.05}{1000 \times 2\sqrt{3}}=0 \mu\text{m}$ 。

则在该条件下的各参数结果的不确定度为:

位置偏差 ($E, E \uparrow, E \downarrow$) 的不确定度:

$$u_{(E, E \uparrow, E \downarrow)} = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2 + u_6^2 + u_7^2/n + u_8^2} \\ = (0.26^2 + 0.07^2 + 0.73^2 + 0.07^2 + 3.62^2 + 0.064^2 + 0.2^2/5 + 0^2)^{1/2} \approx 3.7$$

单向 $u_{(E \uparrow, E \downarrow)}$ 时, $n=5$; 双向 u_E 时, $n=10$ 。

扩展不确定度: $U_{(E, E \uparrow, E \downarrow)} = 2 \cdot u_{(E, E \uparrow, E \downarrow)} = 2 \times 3.7 \mu\text{m} \approx 7.4 \mu\text{m}$

定位精度 ($A, A \uparrow, A \downarrow$) 的不确定度:

$$u_{(A, A \uparrow, A \downarrow)} = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2 + u_6^2 + u_7^2/n + u_8^2} \\ = (0.26^2 + 0.07^2 + 0.73^2 + 0.07^2 + 3.87^2 + 0.2^2/5 + 0^2)^{1/2} \approx 3.7$$

单向 $u_{(A \uparrow, A \downarrow)}$ 时, $n=5$; 双向 u_A 时, 由于双向是取了两个单向高低点, 故 $n=3.5$

扩展不确定度 $U_{(A, A \uparrow, A \downarrow)} = 2 \cdot u_{(A, A \uparrow, A \downarrow)} = 2 \times 3.7 \approx 7.4 \mu\text{m}$

单向重复定位 ($R \uparrow, R \downarrow$) 的不确定度 (阶梯式检测方式):

$$u_{(R \uparrow, R \downarrow)} = 4 \cdot \sqrt{\frac{1}{n-1}} u_7 = 4 \times \sqrt{\frac{1}{5-1}} \times 0.2 = 0.4 \mu\text{m}; n=5$$

扩展不确定度: $U_{(R \uparrow, R \downarrow)} = 2 \cdot u_{(R \uparrow, R \downarrow)} = 2 \times 0.4 \mu\text{m} \approx 0.8 \mu\text{m}$

双向重复定位 R 的不确定度:

$$u_R = \sqrt{(2 \cdot \sqrt{u_7^2/n + u_8^2})^2 + u_{(R \uparrow, R \downarrow)}^2} = ((2 \times \sqrt{0.2^2/5 + 0})^2 + 0.4^2)^{1/2} \approx 0.44 \mu\text{m}$$

扩展不确定度: $U_R = 2 \cdot u_R = 2 \times 0.44 \mu\text{m} \approx 0.9 \mu\text{m}$

反向间隙 B 的不确定度:

$$u_B = 2 \cdot \sqrt{u_7^2/n + u_8^2} = 2 \times \sqrt{0.2^2/5 + 0} \mu\text{m} \approx 0.13 \mu\text{m}, n=5$$

扩展不确定度: $U_B = 2 \cdot u_B = 2 \times 0.13 \mu\text{m} \approx 0.36 \mu\text{m}$

注: 如果温度控制在 $21 \pm 1^\circ\text{C}$ 时, 则 $u_{(A, A \uparrow, A \downarrow)} = (0.26^2 + 0.07^2 + 0.73^2 + 0.07^2 + 0.63^2 + 0.2^2/5 + 0^2)^{1/2} \approx 1$

扩展不确定度: $U_{(A, A \uparrow, A \downarrow)} = 2 \cdot u_{(A, A \uparrow, A \downarrow)} = 2 \times 1 \mu\text{m} = 2 \mu\text{m}$

以上是机床检测不确定度计算。

(2) 是铣床公司安装厂里检测XKG2740 (线性导轨) X轴的定位精度, 分别以阶梯和线性方式并且材料传感器放置在导轨检测定位精度, 得到结果如图7所示:

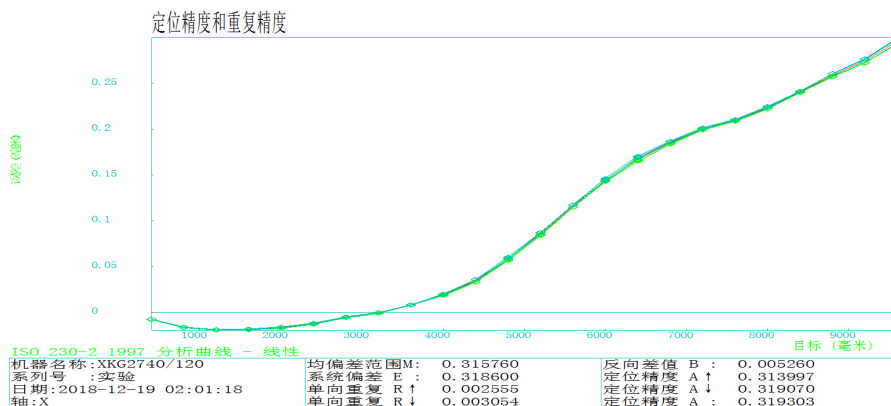


图7阶梯式, 材料传感器打在导轨端头

图7所示为材料传感器温度为11.8℃，测量轴长范围400~9600mm，测量时死程300mm，光轴对准误差调整在1mm内，测量时间段实验漂移2μm，2分钟内1μm，安装重复由于规定了机床位置并在同位置安装反射镜所以安装偏移接近于0，机床重复定位结果0.003mm。由图可知最大最小点在1600~9600mm，L取8000mm，得到下列各分量结果：

- a) $u_1=0.24 \times 8=1.92\mu\text{m}$; b) $u_2=8000 \times (1-\cos(\sin^{-1}(1/8000)))/\sqrt{3}=0.063/\sqrt{3}\mu\text{m} \approx 0.036\mu\text{m}$;
 c) $u_3=0.66 \times 8=5.28\mu\text{m}$; d) $u_4=0.67 \times 0.3=0.2\mu\text{m}$;
 f) $u_5=0.577 \cdot L \cdot \Delta t=0.577 \times 8 \times 8.2\mu\text{m} \approx 37.85\mu\text{m}$; j) $u_6=0.125 \times S_i=0.125 \times 0.003\text{mm}=0.038\mu\text{m}$;
 h) $u_{7\text{线}}=E_{VE}/2\sqrt{3}=2/(2/\sqrt{3})=0.58\mu\text{m}$, $u_{7\text{阶}}=1/(2/\sqrt{3})=0.29\mu\text{m}$; i) $u_8=\frac{\sqrt{2} \cdot 0.05}{1000 \times 2\sqrt{3}}=0\mu\text{m}$ 。

则在该条件下的各参数结果的不确定度为：

位置偏差 ($E, E \uparrow, E \downarrow$) 的不确定度

$$u_{(E, E \uparrow, E \downarrow)} = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2 + u_6^2 + u_7^2/n + u_8^2} \\ = (1.92^2 + 0.036^2 + 5.28^2 + 0.2^2 + 37.85^2 + 0.038^2 + 0.58^2/5 + 0^2)^{1/2} \approx 38.27$$

单向 $u_{(E \uparrow, E \downarrow)}$ 时, $n=5$; 双向 u_E 时, $n=10$ 。

扩展不确定度: $U_{(E, E \uparrow, E \downarrow)} = 2 \cdot u_{(E, E \uparrow, E \downarrow)} = 2 \times 38.27 \mu\text{m} \approx 76.5 \mu\text{m}$

定位精度 ($A, A \uparrow, A \downarrow$) 的不确定度:

$$u_{(A, A \uparrow, A \downarrow)} = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2 + u_7^2/n + u_8^2} \\ = (1.92^2 + 0.036^2 + 5.28^2 + 0.2^2 + 37.85^2 + 0.58^2/5 + 0^2)^{1/2} \approx 38.27$$

单向 $u_{(A \uparrow, A \downarrow)}$ 时, $n=5$; 双向 u_A 时, 由于双向是取了两个单向高低点, 故 $n=3.5$ 。

扩展不确定度: $U_{(A, A \uparrow, A \downarrow)} = 2 \cdot u_{(A, A \uparrow, A \downarrow)} = 2 \times 38.27 \mu\text{m} \approx 76.5 \mu\text{m}$

单向重复定位 ($R \uparrow, R \downarrow$) 的不确定度 (阶梯式检测方式):

$$u_{(R \uparrow, R \downarrow)} = 4 \cdot \sqrt{\frac{1}{n-1}} \cdot u_7 = 4 \times \sqrt{\frac{1}{5-1}} \times 0.29 = 0.58 \mu\text{m}; n=5$$

扩展不确定度: $U_{(R \uparrow, R \downarrow)} = 2 \cdot u_{(R \uparrow, R \downarrow)} = 2 \times 0.58 \mu\text{m} \approx 1.2 \mu\text{m}$

双向重复定位R的不确定度:

$$u_R = \sqrt{(2 \cdot \sqrt{u_7^2/n + u_8^2})^2 + u_{(R \uparrow, R \downarrow)}^2} = ((2 \times \sqrt{0.29^2/5 + 0^2})^2 + 0.58^2)^{1/2} \approx 0.64 \mu\text{m}$$

扩展不确定度: $U_R = 2 \cdot u_R = 2 \times 0.64 \mu\text{m} \approx 1.3 \mu\text{m}$

反向间隙B的不确定度:

$$u_B = 2 \cdot \sqrt{u_7^2/n + u_8^2} = 2 \times \sqrt{0.29^2/5 + 0^2} \mu\text{m} \approx 0.26 \mu\text{m}, n=5$$

扩展不确定度: $U_B = 2 \cdot u_B = 2 \times 0.26 \mu\text{m} \approx 0.5 \mu\text{m}$

注: 如果温度控制在 $21 \pm 1^\circ\text{C}$ 时, 则 $u_{(A, A \uparrow, A \downarrow)} = (1.92^2 + 0.036^2 + 5.28^2 + 0.2^2 + 4.62^2 + 0.58^2/5 + 0^2)^{1/2} \approx 7.28$

扩展不确定度 $U_{(A, A \uparrow, A \downarrow)} = 2 \cdot u_{(A, A \uparrow, A \downarrow)} = 2 \times 7.28 \mu\text{m} = 14.6 \mu\text{m}$

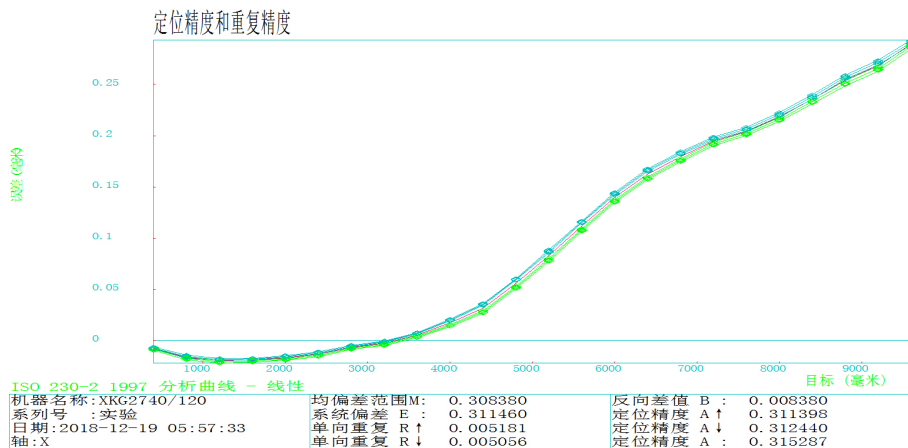


图8 线性方式, 材料传感器打在导轨端头

图8所示为材料传感器温度为12.1℃，测量轴长范围400~9600mm，测量时死程300mm，光轴对准误差调整在1mm内，测量时间段实验漂移2μm，2分钟内1μm，安装重复由于规定了机床位置并在同位置安装反射镜所以安装偏移接近于0

0, 机床重复定位结果0.003mm。由图可知最大最小点在1600~9600mm, L 取8000mm, 得到下列各分量结果:

b) $u_1=0.24 \times 8=1.92\mu\text{m}$; b) $u_2=8000 \times (1-\cos(\sin^{-1}(1/8000)))/\sqrt{3}=0.063/\sqrt{3}\mu\text{m} \approx 0.036\mu\text{m}$;

c) $u_3=0.66 \times 8=5.28\mu\text{m}$; d) $u_4=0.67 \times 0.3=0.2\mu\text{m}$;

f) $u_5=0.577 \cdot L \cdot \Delta t=0.577 \times 8 \times 7.9\mu\text{m} \approx 35.47\mu\text{m}$ j) $u_6=0.125 \times S_i=0.125 \times 0.005\text{mm}=0.064\mu\text{m}$;

h) $u_{7\text{线}}=E_{\text{VE}}/2\sqrt{3}=2/(2/\sqrt{3})=0.58\mu\text{m}$, $u_{7\text{阶}}=1/(2/\sqrt{3})=0.29\mu\text{m}$; i) $u_8=\frac{\sqrt{2} \cdot 0.005}{1000 \times 2\sqrt{3}}=0\mu\text{m}$

则在该条件下的各参数结果的不确定度为:

位置偏差 ($E, E \uparrow, E \downarrow$) 的不确定度:

$$u_{(E, E \uparrow, E \downarrow)} = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2 + u_6^2 + u_7^2/n + u_8^2} \\ = (1.92^2 + 0.036^2 + 5.28^2 + 0.2^2 + 35.47^2 + 0.064^2 + 0.58^2/5 + 0^2)^{1/2} \approx 35.91$$

单向 $u_{(E \uparrow, E \downarrow)}$ 时, $n=5$; 双向 u_E 时, $n=10$ 。

扩展不确定度: $U_{(E, E \uparrow, E \downarrow)} = 2 \cdot u_{(E, E \uparrow, E \downarrow)} = 2 \times 35.91 \mu\text{m} \approx 71.8 \mu\text{m}$

定位精度 ($A, A \uparrow, A \downarrow$) 的不确定度:

$$u_{(A, A \uparrow, A \downarrow)} = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2 + u_6^2 + u_7^2/n + u_8^2} \\ = (1.92^2 + 0.036^2 + 5.28^2 + 0.2^2 + 35.47^2 + 0.58^2/5 + 0^2)^{1/2} \approx 35.9$$

单向 $u_{(A \uparrow, A \downarrow)}$ 时, $n=5$; 双向 u_A 时, 由于双向是取了两个单向高低点, 故 $n=3.5$ 。

扩展不确定度: $U_{(A, A \uparrow, A \downarrow)} = 2 \cdot u_{(A, A \uparrow, A \downarrow)} = 2 \times 35.9 \mu\text{m} \approx 71.8 \mu\text{m}$

单向重复定位 ($R \uparrow, R \downarrow$) 的不确定度 (阶梯式检测方式):

$$u_{(R \uparrow, R \downarrow)} = 4 \cdot \sqrt{\frac{1}{n-1}} \cdot u_7 = 4 \times \sqrt{\frac{1}{5-1}} \times 0.58 = 1.16\mu\text{m}, n=5$$

扩展不确定度: $U_{(R \uparrow, R \downarrow)} = 2 \cdot u_{(R \uparrow, R \downarrow)} = 2 \times 1.16 \mu\text{m} \approx 2.3 \mu\text{m}$

双向重复定位 R 的不确定度:

$$u_R = \sqrt{(2 \cdot \sqrt{u_7^2/n + u_8^2})^2 + u_{(R \uparrow, R \downarrow)}^2} = ((2 \times \sqrt{0.58^2/5 + 0})^2 + 1.16^2)^{1/2} \approx 1.27\mu\text{m}$$

扩展不确定度: $U_R = 2 \cdot u_R = 2 \times 1.27 \mu\text{m} \approx 2.54 \mu\text{m}$

反向间隙 B 的不确定度:

$$u_B = 2 \cdot \sqrt{u_7^2/n + u_8^2} = 2 \times \sqrt{0.58^2/5 + 0} \approx 0.52 \mu\text{m}, n=5$$

扩展不确定度: $U_U = 2 \cdot u_B = 2 \times 0.52 \mu\text{m} \approx 1 \mu\text{m}$

注: 如果温度控制在 $21 \pm 1^\circ\text{C}$ 时, 则 $u_{(A, A \uparrow, A \downarrow)} = (1.92^2 + 0.036^2 + 5.28^2 + 0.2^2 + 4.62^2 + 0.58^2/5 + 0^2)^{1/2} \approx 7.28$

扩展不确定度: $U_{(A, A \uparrow, A \downarrow)} = 2 \cdot u_{(A, A \uparrow, A \downarrow)} = 2 \times 7.28 \mu\text{m} = 14.6 \mu\text{m}$

六、结语

总结, 以后测量结果都要求给出测量的不确定, 此文内用的实际计算公式, 可用于现场测量时, 根据不同影响量, 直接带入计算。□

资讯

宝鸡机床集团董事长李清耀到西安航空职业技术学院调研交流

近日, 宝鸡机床集团公司党委书记、董事长李清耀, 副总经理张文怀到西安航空职业技术学院调研交流。

座谈会上, 李清耀向校方介绍了企业发展的基本情况, 并就人才培养、师资培训、实训基地建设、科研合作等方面进行深入交流, 他表示, 要进一步促进校企合作、深化产教

融合、增强技术交流, 共同推动双方战略合作向纵深发展。

西安航空职业技术学院校长张敏华表示, 校企双方有着深厚的合作基础及广泛的合作前景, 职业教育植根于行业发展, 依靠技术进步, 未来希望双方能够加强沟通、深度合作、共促发展。

双刀架数控立式板料开槽机控制系统的研发与设计

瑞铁机床（苏州）股份有限公司 杨晨 浦进捷 雷斌华

摘要：双刀架数控立式板料开槽机，具有工作方式灵活、运行速度快、加工效率高的特点，基于HUST运动控制器研发了匹配双刀架数控立式开槽机的控制加工系统设计方案。该方案通过伺服轴带动的双刀架机构和板料液压夹持系统间的配合，实现双刀架机构的“双头单向加工”和“双头双向加工”两种加工工艺。

数控板料开槽机（又称为刨槽机）可以对不锈钢板、碳钢板、铝板、铜板等多种材质的金属板材进行V型开槽。在钣金折弯加工中，折弯后的工件棱边圆弧半径是随着折弯区的板料厚度的增大而增大的。因此如果我们在对工件折弯之前对板材进行适当的V型刨槽，使刨槽后的板材厚度只有原来的一半甚至更小，折弯后工件的棱边圆弧半径就会相应减小，达到美观要求。

瑞铁机床（苏州）股份有限公司研发的双刀架数控立式板料开槽机，配置双刀架结构，具有运行速度快、加工精度高、能源应用效率高、安全性高等特点，广泛应用于

电梯轿厢、不锈钢装饰装潢、铝幕墙、电器产品等行业的板料加工。

1. 立式开槽机结构形式

机床外形如图1所示，立式开槽机机身采用钢板整体框架焊接结构，液压泵站、油缸、电控箱及交流伺服传动系统等与床身集成于一体，布局简洁，操作方便。待加工的金属板料由液压夹钳夹持，机器后侧的送料机构由后向前移动完成送料，液压缸压紧板料后刨刀刨削加工。

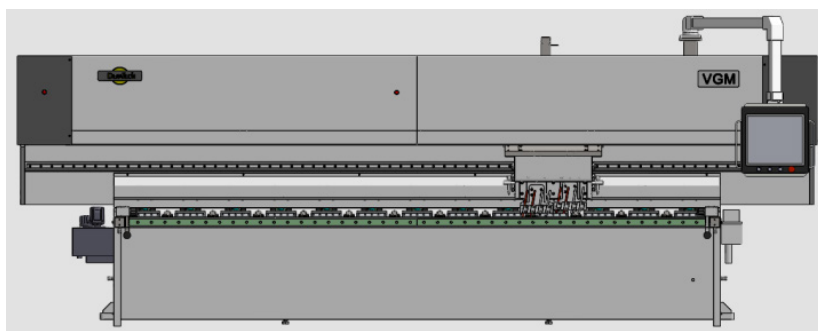
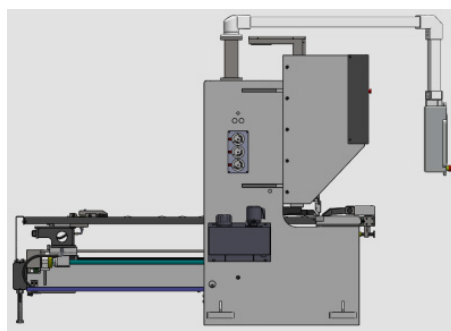


图1 数控立式开槽机外形图



VGM系列开槽机的双头刀架机构，采用高速滑动式刀架，上下动作采用精密滚珠丝杆传动，重复定位精度高。

两组刀架通过两个伺服轴控制，可对称装配6把刀或8把刀，实现“双头单向加工”和“双头双向加工”两种加工

工艺，加工方式可灵活切换、效率高。刀架左右运动（即刨削加工方向）采用齿轮齿条结构，刨削过程平稳高效，V槽表面平滑光整。

2. 开槽机工艺流程设计

设备的工艺流程主要由IO控制和轴运动控制，并通过HMI人机界面的处理来实现，工艺流程如图2所示。

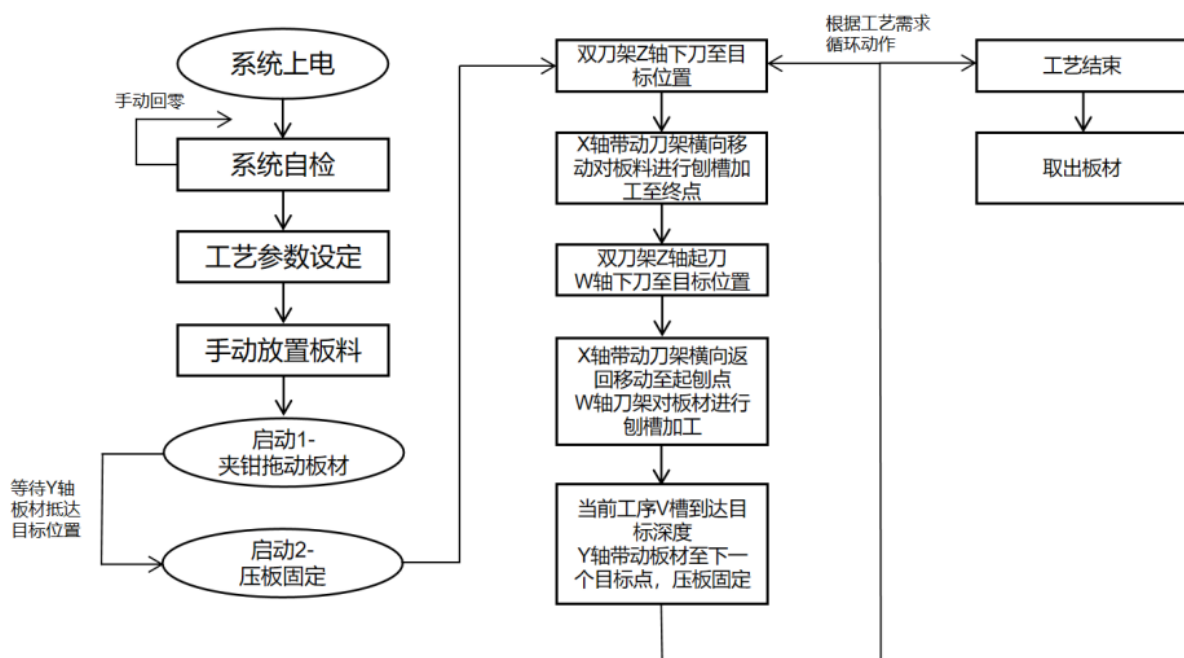


图2 开槽机工艺流程图

系统上电后，首先检测各运动轴位是否处于初始状态。初始状态条件为液压压板、夹钳均处于松开状态，控制刀头上下运动的W、Z轴以及带动板材运动的Y轴均处于原点位置。如果系统检测各工作站没有处于初始位置，需要人工回零操作，在系统回到初始位置后即可进行后续操作。之后通过人机界面输入需要执行的工艺参数，人工将板材置于工作台后可由脚踏或者人机界面启动液压夹钳压制板材，压制到位后再次启动，Y轴伺服会带动夹钳将板材移动至参数设置的槽距位置。Y轴到位后，液压压板对板材进行开槽线路压制，能够有效提升开槽的精度和稳定性，随后根据设置的参数，X轴带动刀架对板材进行V槽加工，基于双刀架结构的特性，如图3所示，Z、W轴可带动

两头刀架上下运动，从而实现以下两种加工工艺：

（1）双头单向加工：Z和W两个刀架（刀刃方向同向）下降至进刀点，W轴刀架的进刀点会高于Z轴刀架，两个刀架上的所有刨刀均参与加工，从右边进刀开槽至左边终点。完成开槽后两个刀架升起从左边高速回程，等待下一次加工，如此循环作业。此工艺通常用于加工较厚板材的深V槽。

（2）双头双向加工：Z和W轴两个刀架（刀刃方向为面对立方向）Z轴刀架下降至进刀点，从右边进刀开槽至左边终点，完成开槽后Z轴刀架上升。同时，W轴下降至进刀点，W轴刀架从左边进刀开槽至右边，如此循环作业。此工艺通常用于薄板加工。

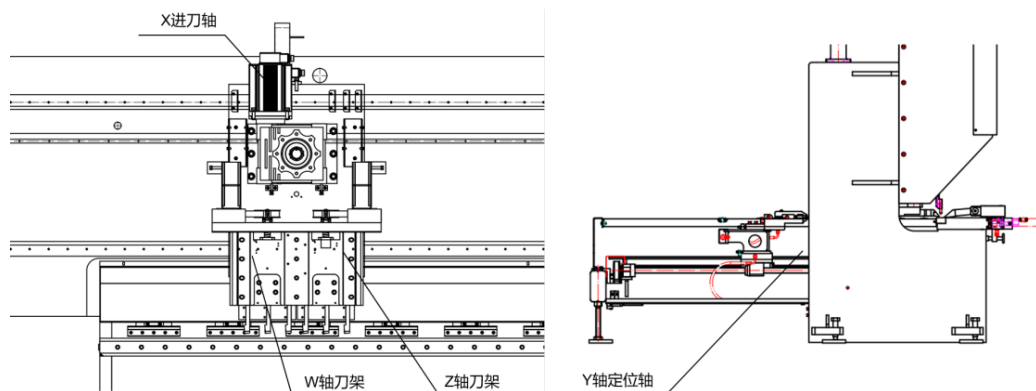


图3 开槽机的运动机构位置图

3. 板料液压夹持系统

本机液压系统由油箱、油缸、压力继电器、液压泵、板式溢流阀、电磁换向阀、调速阀等组成，可实现压板与夹钳的压下及夹紧动作。本设备液压系统采用间歇工作原理，动作灵敏，密封性能好。

液压原理如图4所示，液压夹钳和液压压板油路均设有压力继电器S01、S02。当控制液压压板和液压夹钳夹紧时，1YA与2YA分别得电，压板油缸和夹钳油缸开始工作。当压板和夹钳接触到板材时，S01会监测到油路内压力，S01到达设定压力时，1YA失电；S01未达到设定压力时，1YA得电。S02到达设定压力时，2YA失电；S02未达到设定压力时，2YA得电。根据材质、板厚、板宽的不同，以及开槽深度等情况来判定是否需要人工调整压力继电器的值，防止油缸施压过大对材料造成损伤。系统对板材压制完成后，通过压力继电器使1YA、2YA阀失电，而油缸内始终维持着设定的压力并对板材保持压制。当控制液压压板和液压夹钳松开时，3YA和4YA分别得电，压板油缸和夹钳油缸内液压油回流至油箱，使得压力减小从而松开对板材的压制。

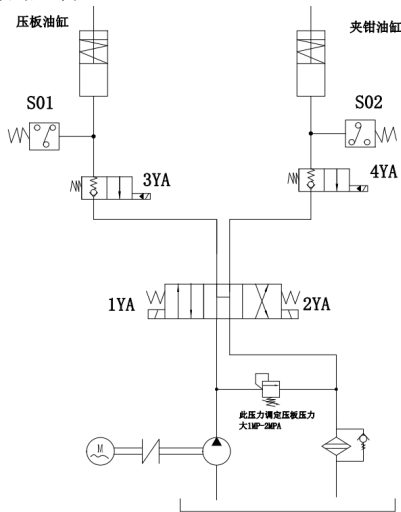


图4 液压原理图

4. 控制系统总体方案

在整个设备中，控制器主要由HUST的HS10-15-DC触屏和AEC2-NM-4-A-DC运动控制器组成，同时还配置有独立IO模块A6B-SIO-IO32-V2。通过SIO串口通讯，立式板料开槽机控制系统以运动控制器为核心作为PLC控制端，全闭环控制架构，结合IO模块实现液压站以及各阀组间的控制，位置检测等开关量的应用。其中PLC控制器与执行端伺服驱动器通过高速脉冲通讯，控制系统硬件框架如图5所示；运动模块由汇川SV610系列伺服驱动器，MS1系列三相伺服交流电机组成。

软件部分运用主流RT Linux嵌入式控制系统平台进行开发，主要编程语言为PLC+C#，采用HUST的CNC HMI Designer进行人机交互界面设计。

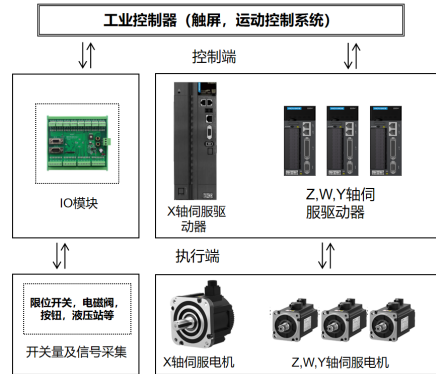


图5 系统控制硬件原理图

5. HMI界面设计

如图6所示，该系统的人机交互界面主要用于对系统启动、停止、复位的控制和参数设置等。界面功能主要分为编辑、手动、自动、呼出、帮助、监控、参数，其中编辑、自动、手动界面间的操作用来实现设备的运动控制，可以执行手动动作调试、各轴回机械原点，以及工艺参数设置等操作。



图6 系统操作界面

监控界面用来监测是否收到传感器信号以及输出点信号是否打出，以此来进行调试，或者判断外部传感器和电磁阀是否出现异常。例如，外部感应点已经导通（常开信号）或者灭掉（常闭信号），但系统并未收到相对应的信号，这时可以监控外部配套的IO板是否有信号，如果其同样未显示信号，则可以进一步判断IO板上NPN/PNP是否正确或者外部感应开关24V电源是否正常等。

6. 结论

数控立式开槽机控制系统，利用HUST运动控制器作为PLC的控制端，实现了对多个伺服电机的控制，结合双头刀架机构和液压夹钳、压板的配合，动作合理流畅，能够提高开槽机的作业效率和开槽精度。经过市场验证，该设备控制系统能够满足立式开槽工艺需求。□

汉江工具：做精主业，持续创新

汉江工具有限责任公司

汉江工具有限责任公司于1974年建成投产，是“三线”建设时期的西迁企业，主导产品主要有滚齿刀具、插齿刀具、剃齿刀具、车齿刀具、拉削刀具、铣削刀具、冷挤压刀具等精密复杂刀具，公司始终坚持人才支撑、创新驱动、模式制胜，持续深入推动“五大工程”、“六大结构调整”，打造创新型、国际化的知名企业。

做精主业，不断提升竞争力

汉江工具在激烈的市场竞争中不断提高核心竞争力，调整产品结构，加快产业链转型升级的步伐。将紧紧围绕“十四五”高质量发展的重要机遇，配套制定实施在精密复杂齿轮刀具制造领域的技术改造和创新能力建设项目，以汽车、航空航天、新能源、轨道机车、智能化等重大装备制造制造业所需的高端精密复杂刀具为主导，推动刀具产业链延伸和服务产业化发展转型，带动企业实现高质量、规模化发展。

近年来，汉江工具加大研发投入、加强人才队伍建设，开发技术领先的复杂数控齿轮刀具，努力迈向刀具高端技术和产品市场的第一梯队，刀具精度从DIN AA向DIN AA+迈进，打造以滚齿、插齿、剃齿、拉齿、铣削、成形复合刀具为核心的“汉工牌”系列金属切削刀具。

持续创新，成果丰硕

汉江工具以省级企业技术中心为研发平台，坚持产学研用，对市场需求产品持续加强研发投入，产品的精度、使用性能和寿命、技术水平稳步提升。

近年来，公司研发经费支出占营业收入比重每年保持在7%以上，年均实施技改投入4000万元以上，产品转型升级成效明显，技术创新能力领先，主导产品市场占有率

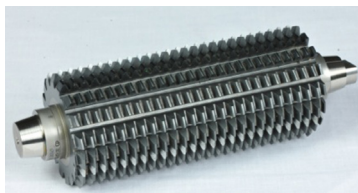
不断提升，尤其是齿轮刀具在国内市场占有率有较高份额。



插齿刀

公司面向汽车自动变速器、机器人关节减速器、航空及船舶精密减速器、新能源传动轮边减速器等特殊变速转动装置核心部件精密高效加工领域，创新开发高速环保干式切削、重载切削、超硬切削等关键技术，以及模数40-45镶片齿轮滚刀、40-50英寸弧齿锥齿轮滚刀、模数35硬质合金刮削滚刀、模数26整体尼曼蜗轮滚刀、模数25大型插齿刀、极小模数的齿轮刀具等新产品。





高速环保干切齿轮滚刀



滚刀组合



高精度车齿刀



锥柄修缘插齿刀

在高端机床行业，针对导轨和滑块开发了高精高效盘形铣刀、精密滑块拉刀和硬质合金数控刀具；针对丝杠开发了用于硬加工的旋风铣刀；针对机床行星减速器齿圈，开发了硬质合金车齿刀和高精度螺旋拉刀。



38°大螺旋角螺旋渐开线花键拉刀



槽槽拉刀

在汽车、航空航天、船舶、新能源、智能制造等关键领域，开发了高速环保干切齿轮滚刀、高速环保干切插齿刀、高速车齿刀（环保干切）、重载双切滚刀、修形修缘插齿刀、整体硬质合金拉刀等，实现了补短板和产品结构的升级。

走“专精特新”之路，实现高质量发展

汉江工具加强基础设施投入，引进和自主研发制造高端专用加工设备和检测仪器，加快企业主导产品的转型升级步伐。

在关键制造领域，攻克了各类减速器、变速器、各类传动等部件用切削加工关键核心技术；在难加工材料、小型专精齿轮刀具、精密合金齿轮刀具等方面，实现了创新突破；在新能源汽车、航空航天、船舶、能源、机器人、轨道交通等领域，满足其对各类齿轮传动刀具的高要求。

公司坚持走专业化、精细化、特色化、新颖化路线，达到了较高的齿轮刀具市场占有率，获得专精特新“小巨人”企业称号。未来，公司将持续加速高质量、规模化发展，努力实现“百年汉工、国际品牌”的企业愿景。□

资讯

多家机床工具企业上榜第三批第一年支持的 国家级专精特新“小巨人”企业名单

日前，工信部中小企业局公示了第三批第一年建议支持的国家级专精特新“小巨人”企业名单，共546家企业上榜，其中多家机床工具企业榜上有名。

文件指出，为深入贯彻习近平总书记关于“培育一批‘专精特新’中小企业”、提升中小企业创新能力的重要指示批示精神，落实中办、国办《关于促进中小企业健康发展的指导意见》，根据《财政部 工业和信息化部关于支持“专精特新”中小企业高质量发展的通知》（财建〔2021〕2号）要求，经各省级中小企业主管部门组织报送、专家审核等程序，现将通过审核的第三批重点“小巨人”企业名单予以公示（后附链接）。公示时间自2022年5月17日至5月23日。

记者粗略统计，此次上榜第三批第一年建议支持的国

家级专精特新“小巨人”企业中的机床工具企业主要有：苏州信能精密机械有限公司、宜昌长机科技有限责任公司、株洲精工硬质合金有限公司、株洲肯特硬质合金股份有限公司、广东凯特精密机械有限公司、桂林桂北机器有限责任公司、四川普什宁江机床有限公司、陕西汉江机床有限公司、汉江工具有限责任公司、浙江易锻精密机械有限公司、陕西渭河工模具有限公司、中山迈雷特数控机床有限公司等。

工业和信息化部于2021年4月21日通知部署第三批专精特新“小巨人”企业培育工作，并于当年7月19-23日公示了第三批上榜企业名单，共2930家。表明自2019年开展此项工作以来，已累计三批共培育4762家专精特新“小巨人”企业，并带动各地培育省级专精特新中小企业4万多家。