

精雕完成超10亿元战略融资

近日，国家级工业母机产业投资基金与北京市先进制造和智能装备产业投资基金联合战略投资国内精密数控机床行业领军企业——北京精雕科技集团有限公司（“北京精雕”），投资规模超过10亿元。

工业母机产业投资基金于2022年设立，基金规模为150亿元，是专注于支持工业母机全产业链发展的国家级产业基金。

北京市先进制造和智能装备产业投资基金于2024年设立，基金规模为200亿元，是为促进北京市制造业优化升级和智能装备科技创新而设立的产业投资基金，聚焦工业母机、仪器仪表、智能装备、工业控制系统、智能制造系统解决方案、其他先进制造应用等领域，落地一批强链、延链、补链项目，提升对京津冀地区经济的拉动作用和对全国制造业的引领带动作用。

北京精雕联合创始人、CEO黄山女士表示：“本轮战略融资的完成，是资本市场对公司长期发展价值的高度认可，更是国家及地方产业资本对硬科技创新发展的有力支撑。公司将以此轮融资为契机，持续加大研发投入，加快数字化转型步伐，在工业母机领域深耕细作，力争在高端五轴机床市场的占有率进入全球前列，为推动我国制造业从‘中国制造’向‘中国智造’‘中国创造’跨越贡献更大力量。”

兄弟工业的“SPEEDIO S系列”荣获第八届EcoPro Awards鼓励奖



兄弟工业株式会社在可持续经营推进机构主办的“第八届EcoPro Awards”评选中荣获“鼓励奖”。获奖产品是去年8月上市的小型加工中心“SPEEDIO S300Xd2/

S500Xd2/ S700Xd2(S系列)”。这是兄弟机床首次荣获EcoPro Award。

EcoPro Awards 是一项旨在促进“可持续发展转型(SX)”实现的奖项，SX 是指旨在实现社会整体可持续发展和企业可持续发展的管理和业务转型。该奖项旨在表彰那些为可持续发展转型（包括环保）做出贡献的举措，以及融入这些举措的产品和服务，这些举措在日本市场受到企业、消费者、投资者和市场参与者的高度评价。根据评审结果，奖项分为三个类别：部长奖、优秀奖和鼓励奖。Brother 此前凭借其无制冷剂点冷器 PureDrive-FL 荣获优秀奖。

兄弟工业的 SPEEDIO 系列机床是一款紧凑型加工中心（配备 30 号主轴），可切削各种机械零件，包括电动汽车、半导体制造设备和铝制飞机零件。它拥有高生产率和节能性能。该获奖机型在保持紧凑机身尺寸的同时，加工区域比以往机型扩大，从而节省资源，并使其能够处理大型电动汽车相关部件。它还配备了切屑淋浴节能操作和免预热加工支持功能等新功能，比以往机型进一步提高了能源效率。与通常用于加工大型部件的中型加工中心（40 轴）相比，这些增强功能可降低89%的功耗，并将循环时间缩短约50%，有助于减少环境影响，同时实现约两倍的生产效率。

北二机床进军低空经济新赛道

近日，北一机床旗下北京第二机床厂有限公司（以下简称“北二机床”）与江苏某用户成功签订6台 MKS1332、MKS1632型数控（端面）外圆磨床设备订单。此次合作标志着北二凭借高质量精密装备制造能力，成功闯入低空经济高端装备制造新赛道。

作为用户2025年新技术改造重点项目，该批次订单设备主要用于无人机曲轴类零部件的精密磨削加工，是该用户完善低空经济产业链布局的关键战略举措。针对此次合作，北二机床结合用户具体需求，对设备进行了专项优化与工艺适配，使其更好地满足无人机曲轴高精度、高稳定性的加工要求。

本次签约的产品，是北二机床在多年技术积累与市场实践基础上，自主研发的中高端数控机床产品，目前已广泛应用于汽车发动机曲轴、凸轮轴、传动系统零部件等大

批量精密加工领域。该系列设备通过高度的通用化、模块化设计，具有结构刚性强、加工效率高、工艺适应广等特点。

海德汉携多款精品亮相EMO 2025展会

在EMO 2025展会上，海德汉展示的数控系统、编程系统以及视觉刀具检查软件等新品引发了行业广泛关注。

TNC7系列数控系统包括新功能和数控系统，特别适用于老机床的升级改造和职业培训用机床。未来，19英寸版和24英寸版的TNC7数控系统可执行外圆磨削和轮廓成形加工，从而实现完整复合加工，达到更高的轮廓尺寸精度和表面质量。用户可轻松使用铣削、车削和磨削功能，无需重新装夹工件。TNC7和TNC7 basic还提供全新功能，即圆柱面加工功能。同时，全新的图形化编程和仿真功能提供更强的用户辅助功能，并新增分析功能，进一步提升TNC7数控系统的易用性。



展会上，用户现场体验了TNC7 go数控系统的用户友好性。该系统特别适用于职业培训和老机床升级改造。突出的亮点是其全新的“图形化定位”功能。用户只需在触控屏上直接绘制所需的轮廓或阵列孔，数控系统即可控制接近运动直到达到加工位置。海德汉TNC7 go简易型数控系统是TNC 128数控系统的后继产品，支持模拟轴。

海德汉编程系统也进行了全球首发，这是一个计算机软件，可生成NC数控程序，并在海德汉数控系统上运行所生成的程序。此编程系统的一个新功能是支持基于几何特征的编程，从3D模型的CAD数据中提取几何元素（如轮廓和深度）。铣削策略进一步增强了几何描述，并用于自动生成Klartext对话式程序。自动生成的数控程序可通过

Klartext转换工具转换，转换后的程序可在早于TNC7并需要软件选装项的海德汉数控系统上运行。此编程系统还支持全新仿真功能，例如快退和快进功能，可通过仿真日志轻松验证程序的正确性，并提供数字孪生的全新管理功能。当然，还包括海德汉编程站上所熟悉的全部功能。

在本届EMO 2025展会上，海德汉亮相的展品还包括1.6版的新版视觉刀具检查软件，该软件运行在VT 122测量摄像头头上。未来，视觉刀具检测软件将提供基于人工智能的刀具磨损测量能力，将当前的手动测量自动化，加快加工过程的记录和文档化。航空航天和医疗器械等行业将特别受益于此功能。因此，VT 122摄像头与视觉刀具检查软件的结合，其组成的刀具检测方案可在刀具监测中节省时间，同时为机床用户提供可靠的刀具状态数据。

日本瓦尔特推出适用于铁和铸铁硬质合金钻头，具有高耐磨性和韧性

瓦尔特日本公司推出了用于加工钢和铸件金属的高端硬质合金钻头“DD170”，这是其11年来首款产品的全面升级。其独特的多层涂层兼具高耐磨性和高韧性，同时还提升了冷却性能和直线性能。该钻头面向建筑机械、机床和汽车等行业。孔径范围从3毫米到20毫米。

该涂层采用氮化铝钛合金，铝和钛的成分以不同的层数分布。通过优先考虑表面的耐磨性和基材的韧性，实现了这两种截然不同的特性。

用作冷却液通道的周边凹槽数量从8个增加到12个，从而提高了冷却性能。起到导向作用的刃带结构也得到了改进，从而提高了直线性能。

德马吉森精机推出四款全新第三代多功能机床，精度和生产率显著提升



德马吉森精机发布了其“NTX 系列”复合加工机床第三代的四款机型：“NTX1000/2000/2500 /3000 第三代”。得益于主轴性能和功能的提升，这些机床比第二代机床实现了更高的精度和生产效率。与该公司的自动化系统相结合，它们可以长时间连续运行，从而有助于提高利润。这些机床旨在满足航空航天、医疗、能源和半导体等行业的零件加工需求。

新机床由用于车削工件的左右主轴，以及旋转刀具的主轴和刀塔组成。通过采用加工能力更强的 400 V 车削主轴、更高的刀具主轴转速和扭矩，以及彻底抑制热位移的措施，切削能力和精度得到了显著提升。

该公司独有的“技术循环”产品系列支持工序整合，可将切削、车削、齿轮加工、磨削、测量等多个工序（此前这些工序需要专用机床完成）整合到一台机床上。结合公司丰富的自动化系统（例如用于在机床上装卸工件的机器人），可实现长时间稳定连续运行，从而提高生产效率。

A&D推出一款数字切削油浓度计

A&D 推出了一款具有切削油浓度转换功能的数字切削油浓度计。通过选择和设置最多五个系数，可以转换为适合切削油类型的浓度。预计该仪器主要用于汽车和飞机零部件的加工，以及精密仪器和模具的制造。



一般的浓度计测量折射率并以白利度 (Brix%) 的形式显示，但在实际生产现场，需要将白利度 (Brix%) 转换为切削油浓度进行管理。由于白利度 (Brix%) 和切削油浓度

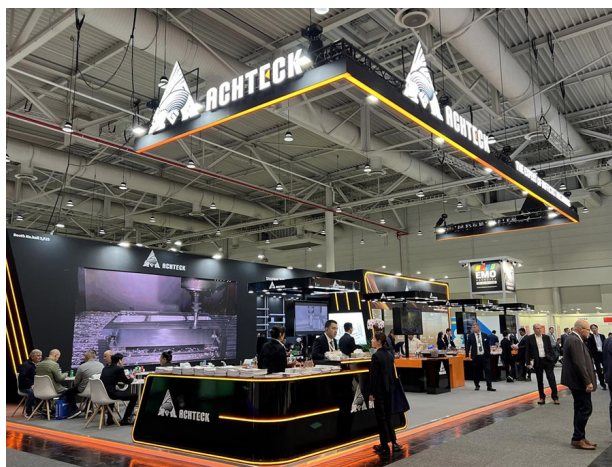
之间的转换系数会因切削油种类而异，因此必须为每种切削油设置一个转换系数。

新推出的“AD-4772”可根据测量值 (Brix%) 和预设的转换系数自动计算切削油浓度。测量时间约为两秒。设备最多可自动保存 100 组测量数据。

该设备防尘防水，符合 IP67 标准，可清洗。彩色 LCD 屏幕清晰可见，即使在黑暗环境下也能轻松使用。可通过 USB-C 接口充电，充满电后可进行约 490 次测量。

澳克泰工具以技术实力和创新产品吸引海外用户

在9月22日至26日举办的汉诺威EMO 2025展会，澳克泰工具凭借深厚的技术实力和系列创新产品，吸引了众多国际客户驻足交流。其展出的龙鱼系列AP130S槽刀，应对航空航天领域高温合金等难加工材料的挑战，以良好的耐磨性和稳定性，助力用户提升加工效率。其精密金属陶瓷刀具，是为轨道交通、汽车等领域的精密车削而设计的，致力于实现更高的加工精度与表面质量。包括高速钢切削丝锥和硬质合金挤压丝锥等在内的高效螺纹加工工具，为模具、医疗等行业的螺纹加工提供了高效、耐用的选择。



展会期间，澳克泰工具特别策划了技术交流日活动，聚焦航空航天、工程机械、新能源汽车等重点行业，与客户面对面剖析典型加工痛点，致力于提供系统化的解决方案。未来，澳克泰工具将持续在深化技术创新、优化服务网络和加强用户合作等方面发力。

以工匠精神 做高端轴承

——访洛阳鸿元轴承科技有限公司董事长 周树洲

中国机床工具工业协会 吴晓键 李华翔

轴承是工业的关节，机床运动部件中安装着大大小小的精密轴承。高端数控机床精密加工的背后是轴承稳定、可靠运行。有这样一种说法：机床精度一半在于轴承。成立于2005年洛阳鸿元轴承科技公司（以下称“鸿元轴承”），经过20年的发展，成为机床行业高精度轴承重要供应商，为此机床协会专题采访了鸿元轴承董事长周树洲。



一、坚守“专精特新”理念，专注高端轴承制造

“其实我们做产品比较专注，深耕细分领域，这是我覺得最核心的优势。”周树洲董事长开门见山地指出鸿元轴承的核心竞争力。2005年创业初期，公司仅有600平米的厂房，周树洲带领团队聚焦机床五轴加工中心的高精度转台轴承研发，通过攻克产品设计、加工工艺、设备配套及热处理流程等技术难题，于2008年成功实现小批量生产。

2009年北京国际机床展会上，欧洲某著名机床企业注意到鸿元轴承的YRT转台轴承。双方在展会现场展开深度交流后，该企业多次实地考察鸿元轴承的生产流程、工艺

规范及管理流程。经过鸿元轴承团队不断的改进完善，这家欧洲企业最终从体系上认可了鸿元轴承生产流程和管理规范。随后，双方对转台轴承的精度、载荷、噪音等多项关键指标进行严格考核和验证，确认轴承旋转精度达到2微米以内，其它技术指标也符合欧洲工厂使用要求，由此双方达成了长期合作意向。自此，鸿元轴承生产的转台轴承开始正式出口欧洲，各项性能指标达到德国和日本产品同等水平，实现了国际市场上的关键突破。

除了转台轴承，该欧洲企业的车铣复合机床上B轴铣头轴承也采用了鸿元轴承三个型号的轴承。周董事长介绍，“现在鸿元轴承每年有多批量、多系列、多规格轴承供应给该机床制造企业在全球的七个工厂”。此外，欧洲多家机床主机厂也选用了鸿元轴承的高精度转台轴承、摆头轴承等产品。

多年深耕转台轴承，鸿元轴承积累的技术Know-How，逐步转化成了产品核心竞争力并实现进口替代。公司自主研发的HRT转台轴承，现已形成HRTG系列、HRTGS系列、HRTGM系列、HKLDF系列四大系列，共计58种型号产品，转台轴承在国内市场的占有率位居前列，赢得了国内外几十家知名机床企业的认可。鸿元轴承牵头负责制定《滚动轴承 转台轴承》的行业标准，是转台轴承细分领域的佼佼者。

二、技术精湛生产灵活，用户期待得以实现。

作为“专精特新”企业，鸿元轴承的产品体现了技术精湛、生产灵活的特点，这与机床行业对轴承要求精度

高、批量小、定制化生产的需求高度契合。

以某国内机床厂为例，其高端数控机床需配置专用国产高端轴承。经同行企业推荐，这家企业抱着试一试想法订购了两套轴承。鸿元轴承用了该轴承销售价格的两倍成本完成了研制生产，达到了高精度要求，获得了用户高度认可。自此鸿元轴承进入了该机床制造厂的核心供应商名录。

现在国内外数十家主要机床制造企业均采用鸿元轴承生产的高精度轴承。科德数控从2014年起使用鸿元轴承的转台轴承。通过多年应用验证，2019年起大量使用，实现了进口轴承替代。科德数控总经理陈虎评价该产品完全满足科德数控五轴加工中心高精度转台使用要求。伊贝格公司总经理邵传伟则表示，“我从2009年做第一个摆头到现在，全部是鸿元轴承的轴承，质量没有问题。现场管理非常规范”。

在产品展厅中，周董事长展示了高精度滚珠丝杠轴承，“这个轴承（指滚珠丝杠轴承）精度非常高了，跳动在 2μ 以内，精度P2级。我们只做高端的，低端不做”。鸿元轴承已研制开发了交叉滚子轴承、机器人减速器专用轴承、精密转盘轴承、滚珠丝杠支撑轴承、等截面薄壁轴承等产品。



周董事长有感而发，“不管你做啥，你要专注一个行业。我们就是做机床轴承，就是为机床行业服务”。多年来，鸿元轴承60%的销售额是为机床行业企业提供高精度轴承。

三、站在智能制造新高度，聚焦智能制造再出发

早在2010年，面对研制生产工业机器人谐波减速机专用轴承这一全新领域，鸿元轴承从零开始，对研发、加工到检测等各项技术难点开展攻关，经过长达六个月的艰

苦努力，试制出第一个样品，此后经过进行反复试验和改进，历经7年时间30余次迭代、成千上万次的试验和试错，生产的工业机器减速器专用轴承在质量和性能方面达到国际先进水平，并成功入选工信部“工业强基一条龙”国家级示范项目，产品自2020年起开始出口日本等国家。

2020年鸿元轴承开始涉足人形机器人轴承领域，并于2022年实现人形机器人轴承的批量化生产。周董事长表示，目前“有上亿元的订单待生产，新建厂房还没投产就被催单！”，“宇树”扭秧歌，“众擎”跳街舞，“天工”跑马拉松，2025年走红的国产人形机器人中，都有来自鸿元轴承的机器人关节轴承。

历经15年的技术积累，鸿元轴承坚持每年8%的营收投入到机器人轴承研发中，现已构建4大类12个系列共计150种型号的机器人关节解决方案体系，团队攻克了高精度、轻量化、超薄壁、高刚性、低摩擦、长寿命、密封性等核心难题。2025年上半年数据显示：企业产值同比增长超60%、利税增幅近70%。随着4.3万平米的生产车间建设的完成，企业引入了精密加工及自动化设备，构建自主可控的上游供应链体系，全面保障机器人关节专用轴承的规模化生产。



作为工信部专精特新重点“小巨人”企业、河南省制造业单项冠军，鸿元轴承现已形成12个系列高精密轴承产品体系，即：转台轴承、交叉滚子轴承、机器人轴承、等截面薄壁轴承、精密转盘轴承、滚珠丝杠支撑轴承、角接触球轴承、圆柱滚子轴承、推力轴承、薄壁深沟球轴承、圆锥滚子轴承、液体静压推力轴承工作台。轴承精度等级为P2、P4、P5，尺寸范围为外径 $\phi 20\text{mm} - \phi 2500\text{mm}$ ，产品不仅为国内外知名企业长期配套，更远销德国、意大利、韩国等高端市场，广泛应用于高档数控机床、工业自动化(机器人)、航空、医疗器械等高端装备领域。二十年深耕轴承研发制造，鸿元轴承以“专注如匠，精进不止”的信念，在机床、机器人关节等领域书写中国制造的精密密码，用轴承的每一次旋转诠释“坚守与突破”的时代注脚。□

七十九载精磨路 新品聚力启新程

——上海机床厂有限公司2025年产品推介会圆满举办

中国机床工具工业协会传媒部 李华翔

在2025年上海工业博览会举办期间，上海机床厂有限公司（以下简称“上机”）于9月24日在其生产装备车间隆重举办“2025年产品推介会”。以“精于磨，立于信”为主题，本次会议不仅标志着上机产品结构调整后迈入大型精密专机批量交付的新阶段，更通过六款全新数控高端磨床及十余款升级的成熟优势产品的集中亮相，向行业展现了上机在精密制造领域的硬核实力。

中国机床工具工业协会会长毛予峰、全国70余家产业链重点企业代表、合作伙伴莅临现场，共同见证系列高端磨床产品的发布。上机党委副书记、执行董事、总经理王宇，上机党委书记、副总经理程鸿超出席推介会。



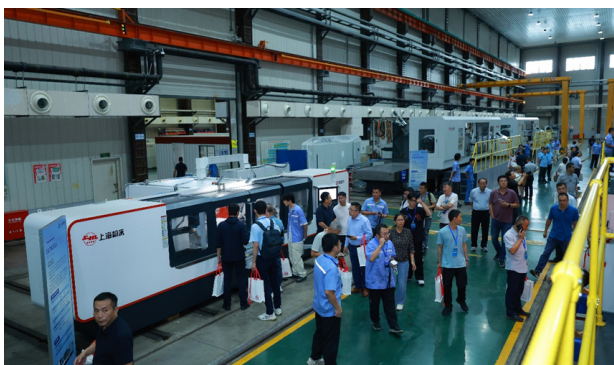
高端产品矩阵亮相：赋能战略性新兴产业

会上，王宇总经理致欢迎词。他表示，本次产品推介会，不仅是为了展示上机近年来的技术进步和研发成果，更是为了与始终关注磨床产业创新发展的领导、长期信任

和支持上机的合同伙伴分享上机在磨床技术领域的愿景与未来。近年来上机持续发扬攻坚克难的精神开展了一系列产品研发，成功将实验室技术成果向规模化生产转化，克服了从“零到一”以及从“单件到批量”的种种挑战，取得了显著成效。



本次推介会集中展示上机在大型、高精产品和行业解决方案的核心优势。H403-CS数控大回转直径分离式磨床、MK8280/SD数控随动曲轴磨床、SK7620A/F数控内螺纹磨床、SK7420A数控丝杠磨床、H392数控万能内圆磨床、MK5225x10000数控龙门导轨磨床六款产品成为焦点。MK82125数控曲轴磨床、H377A数控复合磨床、H234、H235数控外圆磨床、MK1632A数控端面外圆磨床、MK1350、MK1380、MK13125数控外圆磨床、MKA1320A、MKA1332A数控外圆磨床等十余款不断升级的成熟优势产品，因其在相关领域关键部件加工中的应用潜力，也吸引了与会嘉宾的广泛关注。

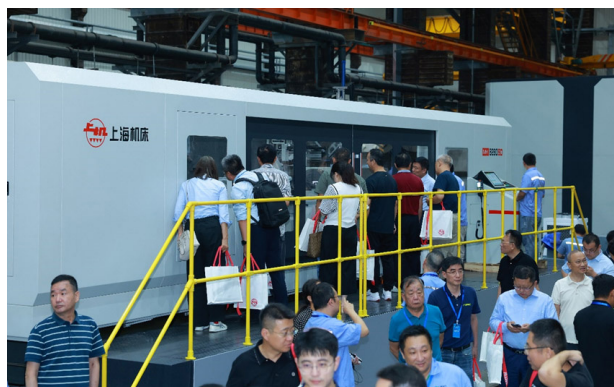


推介会上展示的这些高附加值产品，围绕航空、航天、大飞机、新能源汽车、轨道交通、船舶等战略性新兴产业领域的典型应用场景，直观呈现了针对用户工艺需求的系列解决方案，并介绍了产品在高精度、高稳定性及高效率等方面的特点，旨在突出其在提升加工质量与生产效率方面的价值。

七十九载技术积淀：厚积薄发，迈向高质量发展

上海机床厂有限公司自1946年成立以来，始终以精密磨床研发制造为核心使命，填补了国内多项技术空白，创造了包括“中国第一台精密磨床”在内的多项行业纪录。作为中国机床行业“十八罗汉”之一，上机不仅为国内机床行业提供了直接技术支持，更以“两颗明珠”的行业地位，成为国产高端装备制造标杆企业。近八十年来，上机始终将技术积累与产业需求深度融合，从基础磨床到高精度、智能化产品的迭代，形成了覆盖航空航天、新能源汽车、轨道交通等战略性新兴产业的完整解决方案。

面对全球高端机床市场被国外品牌垄断的现状，上机以“高质量发展”为战略核心，通过产品高端化与产业整体升级双轮驱动，构建了“技术研发-工艺验证-市场反馈”的闭环体系。



在产品研发和市场推广方面，上机近期专注于补齐市场缺口，通过“机器换人”计划为200、320系列经济型数控磨床赋能，提升产品性能和市场竞争力。上机加强了流量型专机的销售，利用现有优势产能，坚守东南亚等传统市场，并积极拓展“一带一路”沿线及南美市场。

为强化高端产品的销售，上机持续创新研发，坚持自主研发和产业链协同创新，不断加大研发力度并提升高端产品技术水平，使研发的磨床产品功能和性能，不断满足高端用户需求增长的要求。

技术攻坚之路：从实验室到产业化跨越

作为一家扎根磨床领域79年的制造企业，上机的成长始终与国家战略同频共振。从改革开放初期为基础工业提供通用磨床，到如今承接并攻克国家重大专项，突破国外技术封锁的困境，每一步发展都凝结着上机人对技术研发的长期坚守与突破。

在曲轴随动磨削技术攻关中，研发团队以“十五年磨一剑”的定力，从2009年立项到2024年实现批量交付，通过建立数学模型验证算法正确性、运用三维运动仿真技术优化磨削轨迹，历经37次工艺验证，最终攻克C-X-Z轴联动难题。这一技术突破标志着上机在精密传动控制领域实现从跟跑到并跑的关键跨越。

复合磨床技术的迭代则展现了上机在系统集成能力上的持续精进。从2005年原型机研发到2023年第四代产品问世，团队通过四次重大技术跃迁，将复合磨床关键功能部件砂轮转塔重复定位精度提升至1角秒。该技术突破不仅形成核心专利集群，更通过模块化设计辐射至十余个产品线，构建起复合磨削技术体系。

在智能制造转型中，上机自2005年组建专业软件团队，逐步构建起兼容主流控制系统的模块化软件架构。目前该平台已实现12类机床产品的工艺编程标准化，其“工艺编程+在线诊断”双模块设计使调试效率显著提升。这种软硬协同的创新模式，为设备智能化奠定了坚实基础。

这些技术突破不仅体现在实验室成果上，更通过产业化落地直接赋能用户生产。

用户见证与合作成果

推介会现场，用户反馈与合作签约共同印证了上机产品的市场价值。已交付同类产品获得多方用户好评，其中一位来自江苏的客户分享道：“在采购首台MK8280/SD数控随动曲轴磨床前，我们对国内外多个品牌进行了详尽对比。

（下转第34页）

数智创新 御风飞翔

——北京精雕马来西亚用户开放日成功举办

机械工业信息研究院



中国制造的快速发展，不仅依赖于巨大的市场体量和丰富的制造门类，更得益于完整的供应链体系和庞大的工程师队伍。风电、航空航天、轨道交通、新能源汽车和半导体等行业的快速发展，都是立足本土市场需求的源发式创新成果，一大批坚持技术创新，强调价值竞争的优秀中国企业发展壮大，实施全球化发展战略成为必然。

中国制造出海破卷是当下的热点议题，如何理解出海对于中国企业的价值收益？中国制造的创新成果又可以为全球制造业发展提供哪些新动能？不仅由于地理位置优势，更有血脉、语言与文化的同宗同源，东南亚地区成为中国制造出海发展的第一站。日前，北京精雕集团以“数智赋能，精准高效”为主题，举办马来西亚用户开放日暨四城巡展活

动，记者受邀参加新山站，除契合当地用户需求的技术、产品与方案的分享交流之外，北京精雕出海发展的启示与收获，则更值得制造业同仁深入思考与借鉴。

多元经济稳健增长

马来西亚作为一个典型的开放型经济体，其经济结构以出口导向为主，对外贸易在国民经济中占据着举足轻重的地位。马来西亚积极参与全球贸易合作，通过签署多项重要的自由贸易协定，进一步巩固了其在全球贸易中的地位。2022年3月18日，RCEP（区域全面经济伙伴关系协定）正式对马来西亚生效。此外，马来西亚还是CPTPP

（跨太平洋伙伴关系协定）的成员国之。2025年1月1日，马来西亚正式成为金砖国家伙伴国。2025年，马来西亚担任东盟轮值主席国。中国连续多年为马来西亚最大贸易伙伴，马来西亚则是中国在东盟成员国中的第二大贸易伙伴和最大的进口来源国。两国贸易结构丰富多样，马来西亚主要向中国出口农产品、机械、电气产品和能源产品，而中国则向马来西亚出口电子、服装、机械和金属等产品。近年来，马来西亚政府以“昌明大马”执政理念为指导，构建“昌明经济”框架，通过2030年新工业大蓝图（NIMP 2030）、国家能源转型路线图（NETR）等政策工具，推动制造业向高附加值、绿色低碳方向转型。

马来西亚制造业起步较早，工业基础扎实，产业覆盖电子电气、汽车、化工、机械制造、食品饮料及橡胶等多个领域，尤其在集成电路、半导体制造、汽车组装等细分行业已形成产业集群并具备技术优势。马来西亚是东南亚少数拥有自主汽车品牌的国家之一，拥有宝腾（Proton）和第二国产车（Perodua）两大本土品牌。2024年，马来西亚新车销量再创新高，达81.67万辆，同比增长2.1%。新能源汽车市场渗透率上升至5.6%，纯电动汽车销量增长45.3%。当前，马来西亚正大力扶持汽车电动化转型，已出台一系列优惠政策和补贴措施，并提出2030年电动汽车占新车销售比例达到15%的目标，吸引了包括中国在内诸多国际新能源汽车企业进入。电子电气产业是马来西亚制造业的核心支柱之一，其半导体、芯片、太阳能电池等产品在全球市场占据重要地位。

随着马来西亚经济发展，对机床的需求也不断增加。根据统计资料显示，近几年，马来西亚年机床进口额4亿多美元。目前，马来西亚机床仍以进口为主，进口地主要为日本、德国等国家和中国台湾地区，成形机床占1/3强，金切机床占2/3弱。进口金切机床中数控机床约占20%。其中每年加工中心进口额3000多万美元。为鼓励机床进口，目前马来西亚采取了进口机床零关税制度。美国最大机床制造商Hass在马来西亚的独立代理商SPC预计，在未来5年，马来西亚金属加工及机床业将以不低于年20%的速度增长。



半导体产业聚集地

1970年马来西亚设立了第一个保税区，吸引了包括英特尔、戴尔、惠普在内的全球知名电子公司投资设厂，逐渐发展成为电子产业的主要聚集地，特别是在半导体制造、信息与通信技术、计算机及相关设备、数据存储等领域积累了显著优势。

马来西亚的半导体产业不仅局限于封测环节，随着时间的推移，逐步向上游发展到芯片设计及晶圆制造，向下游扩展到电子产品生产及营销等领域。目前，马来西亚的芯片行业已经形成了从芯片设计到晶圆制造，再到电子产品生产和销售的完整产业链。相关企业类型丰富，提供设计、工程、制造和组装服务，包括从半导体 IDM（集成器件制造商）和无晶圆厂模式公司到提供设计和工程服务公司，再到OSAT（外包半导体封装和测试）和EMS（电子制造服务）提供商，以及材料、子系统、模块和组件的制造商。

为进一步巩固产业地位，马来西亚推出“国家半导体产业战略”（NSS），目标是将该国打造为全球半导体中心。马来西亚国家半导体战略（NSS）五个主要目标：吸引5000亿马币的投资，专注于集成电路设计、先进封装和晶圆制造，专注于追求先进的芯片设计、制造和测试，将本地冠军整合到先进制造公司的生态系统中；建立至少10家马来西亚公司，从事设计和先进封装，收入在10亿至47亿马币之间，以及100家与半导体相关的公司，收入约为10亿马币；专注于支持世界级马来西亚半导体设计、先进封装和制造设备公司的发展，并吸引苹果和华为等主要买家到马来西亚，将马来西亚发展成为具有世界级大学和企业研发的半导体全球研发中心；培训和提升60,000名高技能马来西亚工程师；至少分配250亿马币的财政支持，用于针对性的激励措施。



聚焦精度效率突破

对于市场需求的深刻理解与快速响应，是北京精雕有效实施出海战略的核心方针之一。本次开放日突出体现北

京精雕对于马来西亚市场需求的清晰定位，强调微电子等特征行业对于加工精度的核心需求，同时，对于加工与开发环节的效率提升，给出了明确答案。

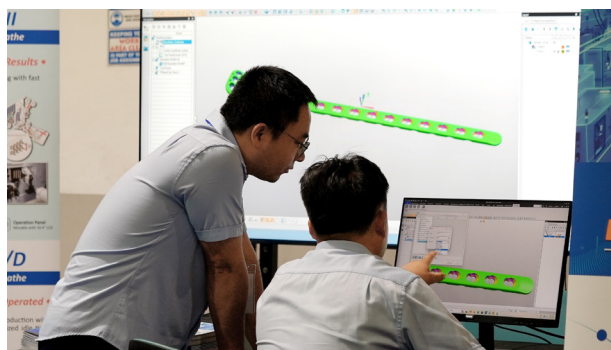
开放日现场展示的北京精雕JDGR100+JDGR200T自动化单元，配合JDFMS25S自动化供料系统，构建机加自动化解决方案，实现蛋雕、模具电极实际加工演示，该方案以四轴机械臂为两台五轴加工机床上下料，尤其适合电极、精密模具和医疗器械加工，可以大幅提升机加效率。而北京精雕自主研发的数字化制造软件平台JDSoft SurfMill 10.0既有支持精密、高效加工的专业功能模块，又可根据客户的实际工艺特点，提供定制化的编程自动化解决方案，可显著提升程序开发效率。活动现场展示了基于精雕SurfMill10.0的自动化编程APP定制化成功案例，如：医疗行业自动化编程模块、模具行业自动化编程模块、人形机器人行业自动化编程模块等，赢得现场客户的高度关注。

北京精雕于2019年设立马来西亚分公司，聚焦典型行业的中高端应用。在国际化的赛场与欧美、日韩的先进品牌竞争，不仅是对自身产品能力和行业积累的全方位检验，更需要快速响应需求，强化数字化与智能化的创新价值引领。掌管一家具有三十余年历史的马来西亚高端装备制造企业的负责人介绍，为实现快速灵活交付，该企业从外协加工改为自主生产过程中，一款关键部件存在加工难题，而其他知名品牌无法短时期内提供技术支持。北京精雕则依托总部技术团队，快速实现工艺设计和样件试产，效果令人满意。购买首台精雕机床后的稳定可靠生产，让该企业又复购十台精雕机床设备，这位老总还对北京精雕的机内自动化和在机检测等智能化功能，给予高度评价。

此次开放日的合作方是马来西亚的一家知名机加工设备代理企业，其行业覆盖度充分，了解用户需求特征。其

负责人表示，以北京精雕为代表的中国优秀机床品牌，已经具备了不低于众多世界知名产品的技术性能和参数表现，使用稳定性和精度保持能力可以令用户满意，而北京精雕突出的性价比和快速技术服务能力是其选择代理北京精雕的关键原因。

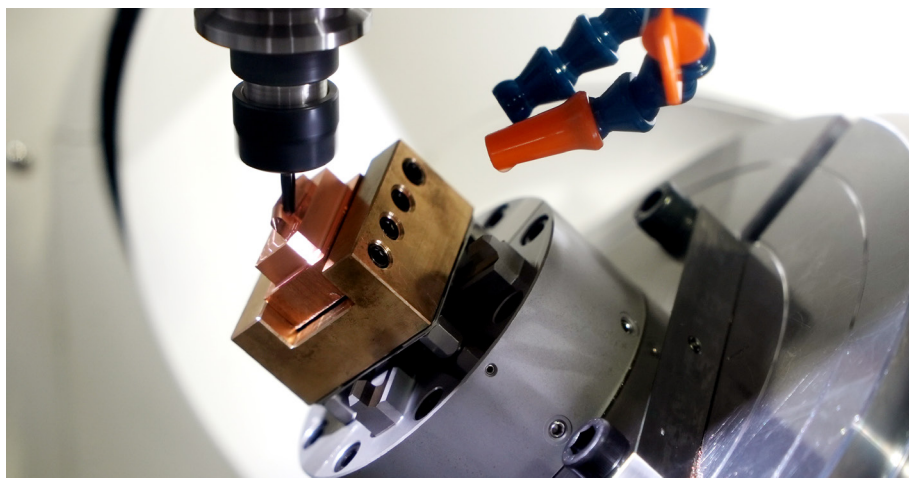
稳健的市场策略和充分的本土化则是北京精雕在出海管理方面收获的成功经验。北京精雕马来西亚分公司总经理盛海宁表示，在用户需求不明确和技术服务能力有欠缺之时，不要轻易向用户交付设备，要高度重视首台设备的用户满意度，而这背后需要有充分的需求调研、设备选型和技术服务。北京精雕总部的技术支持是收获客户满意评价的重要支撑。此外，马来西亚分公司的其他员工均是本土人员，高度的本土化形成了面向本土用户的沟通与服务优势。



结束语

从新山前往吉隆坡，近400km的高速之旅让人印象深刻。尽管有限速120km/h，但超速是常态。与国内长时间占超车道慢行的情况不同，这边超车道上后车高速逼近，前车主动换道让行的默契度非常之高。当然也有很多超过

140km/h抵近跟车距离3~5m的“激动时刻”。犹如中国机床的出海之旅，感受着速度差异，适应当地规则，形成伙伴默契，同时更要注重风险控制。北京精雕出海东南亚只是其全球化发展的第一步，相信今后越来越多来自差异化市场的新收获，必将为北京精雕的创新注入更加丰富的内涵，而中国制造的创新成果也将持续快速转化为全球用户的价值收益。□



数据模型在加工过程实时监控中的应用

深圳吉兰丁智能科技有限公司 王晋生 毕雪峰 吕东尧

【摘要】本文聚焦机械制造领域的加工过程实时监控系统，梳理国内外发展历程，重点分析了数据模型的路径及突破方法，并介绍相关成果。国外始于 20 世纪 80 年代，分为机理与数据模型路径，其发展过程多被国际集团并购；国内 2010 年后出现产品化公司，政策推动下多类企业参与，有领先全球可能但存资本泡沫。以监控系统中的“刀具状态监控系统”为例分析了数据模型的优缺点。其适用于批量加工，逻辑易理解且能监控过程异常，却存在对使用人员的知识要求高、适应场景少等问题。文中提出故障特征机理模型、工艺数字孪生方法两大突破路径，并以实际的产品为例，介绍了该领域的技术进展。

一、引言

在工业制造智能化升级的浪潮中，加工过程实时监控系统作为提升数控机床性能与刀具耗材应用能力的关键而备受关注。国外该领域始于 20 世纪 80 年代，形成机理模型（基于物理几何原理优化局部环节，市场需求有限）与数据模型（依托数据采集分析监控，因黑箱特性产品力低）两条路径，早期企业多被国际集团并购；国内虽有数十年数据采集历史，但 2010 年后才出现产品化公司，初期对标国外技术，后在国家政策推动及智能制造需求下，机加工企业、机床制造商等各类企业纷纷参与，该领域有中国领先全球的可能却也存在资本泡沫。当前数据模型路径在“刀具状态监控系统”中应用较多，适用于批量加工，逻辑易理解且能监控过程异常，却存在对使用人员知识要求高、场景少等劣势。基于此，本文梳理国内外发展历程，深入分析数据模型路径，并提出故障特征机理模型、工艺数字孪生方法两大突破路径，还介绍了深圳吉兰丁智能科技有限公司首创“机械制造过程级数字孪生理论”，打造“天机算系统”及系列软件，获国家专项支持助力行业进步的相关成果，为该系统技术迭代与产业化提供参考。

二、国外加工过程实时监控系统的发 展历史

国外“加工过程实时监控系统”的技术发展可追溯至 20 世纪 80 年代，当时工业自动化的理念逐渐渗透到制造业的各个环节，对加工过程进行实时监控以提高生产效率和产品质量成为行业的需求。欧美的一些公司敏锐地捕捉到这一机遇，率先涉足该领域，开启了加工过程监控系统的探索之路。这些公司普遍没有做大，但在工业 4.0 的风潮来临之时，其本身作为制造智能化的关键要素，成为了很多国际化集团的并购标的，加入了西门子、山特维克、马波斯、东京精密等知名企业。

国外的技术路径主要分为两类，每一类都有其独特的特点和应用场景。

1. 第一类技术路径：机理模型路径

机加工系统是典型的复杂系统，而且还在复杂的基础上叠加了高精度、高效率、高可靠性、高柔性等一系列特点，比大多数的复杂系统还要复杂，所以其机理研究一直是科研的重点领域，可见该领域的突破也非常难。因此整体系统的机理模型目前还有很多不清晰的地方，只有一些

局部机理模型清晰了，也就有了对应的局部优化系统，如“磨削消空程 / 防碰撞”等。这类系统基于其明确的物理、几何原理，能够针对加工过程中的特定环节进行监控和优化。以“磨削消空程系统”为例，它通过检测磨削功率或者声音，精确感知砂轮和工件的接触状态，进而优化机床的进给速度，减少砂轮在非加工状态下的空行程时间，从而提高设备的加工效率。“磨削防碰撞系统”功能则是通过实时监测，判断砂轮与工件和机床部件之间在快速移动时的接触状态，在可能碰撞的瞬间发出信号对机床进行相关动作控制，避免造成设备损坏等损失。

然而，这类系统的优化效果有限。由于其仅针对局部要素进行优化，无法从整体上提升加工过程的性能，因此难以形成大规模的市场需求。例如，在一些生产模式或复杂的加工工艺中，仅仅减少空行程时间，并不能显著提高加工的性能和生产效率，还需要考虑加工参数、刀具磨损等多种因素的综合影响。

2. 第二类技术路径：数据模型路径

由于整个机加工系统的复杂度，在机理不清晰时，基于统计学的数据模型就有了应用的可能。针对一些局部优化要素，就有了对应的产品，比如“批量制造下的刀具监控”。这类系统主要依靠对大量加工过程数据的采集、分析和建模，来实现对刀具状态的监控和预警。它通过安装在机床上的传感器，实时采集刀具的振动、功率、切削力等数据，然后运用统计学方法和机器学习算法对这些数据进行处理，建立刀具磨损、断裂等异常状态的识别模型。

但这类系统因为其数据模型的黑箱特性，存在诸多局限性，这部分内容将在后续进行详细介绍。所以，这类系统的产品力较低，多为项目性交付。有些时候需要根据不同的加工场景进行定制化开发，因此很难形成标准化的产品，导致该类产品的开发企业的规模化发展受到制约。

三、国内加工过程监控系统的发展历程

国内在加工过程数据采集方面已有数十年历史，但长期未走入产业化。这主要是由于该领域的工作为机械制造机理科研的必需工作，但是走入产业化的成本较高，而且技术路线的成熟度不够高，所以产品化的公司直到2010年之后才逐渐出现。

1. 国内企业的探索

2010年之后，伴随着物联网、传感器、数据采集技术的发展，国内一些企业开始推动对加工过程数据进行采集

和监控的领域。开始时技术路径上基本和国外的两条路径一致，走了国产替代进口的策略。然而，由于技术路线本身的问题，很多企业在盲目进行进口对标的过程中，也普遍莫名其妙的就进入了市场小或者产品力较低的状态。

2. 政策推动下的技术攻关

随着我国制造业的不断升级，对加工过程监控系统的需求日益迫切。国家层面认识到该领域的技术是智能制造中的关键技术，不断地通过各种项目推动该领域的研发和产业化工作。据不完全统计，从2019年后，国家层面在该领域的支持项目不少于50项，旨在推动该领域的技术攻关，占领智能制造的核心高地。这些政策的出台为国内企业的发展提供了有力的支持，激发了产学研各领域的研发热情。

3. 各种企业风起云涌参与其中

由于中国在智能制造的推进与全球的工业4.0浪潮基本同步，所以在2015年之后，中国的很多企业也和国际企业一样，从各自擅长的领域开始向这个领域切入。这其中除了一些致力于该领域的创业公司之外，不乏机加工企业、机床制造商、数控系统制造商、产线集成商、企业信息化公司、工业互联网平台、人工智能公司等各种企业。大家各有各的优势，比如：

(1) 机加工企业：拥有场景，也就意味着拥有实践和磨练系统的机会。

(2) 机床制造商：拥有机床的设计和集成能力，更容易形成监控系统的主机厂定位，以及更好地与机床融为一体。

(3) 数控系统制造商：拥有机床内最多的数据、最快速的采集速率潜力和天然的控制中枢，很容易将监控系统定义为智能数控系统的一个特征/功能。

(4) 产线集成商：是自动化和柔性化制造的解决方案提供者，其相对容易将基于“数据模型路径”的特点，将监控系统作为其管控产线变异影响的工具，最常见的即为对刀具异常的监控，这也是国外较多监控系统企业所服务的场景。

(5) 企业信息化公司：因为智能制造很容易从数据角度与企业管理系统进行相连，所以MES、数字化工厂软件供应商也纷纷投入其中。

(6) 工业互联网平台：将监控系统作为工业互联网App的典型应用是很多工业互联网平台企业追求的目标。

(7) 人工智能公司：监控系统是典型的数据应用，而且有高频数据应用的可能性，其非常符合人工智能公司去应用各种人工智能算法的场景定义，所以其也成为了其中

的玩家之一。

(8) 独立的创业公司：在如此群狼环伺的创业环境中，仍然有一些公司以独立的身份投入到该领域的推动中。一些企业以国产替代进口的定位，对标国外一些国际集团的相关公司，一些则有自己独特的技术能力，开始了对这个领域的探索，比如吉兰丁智能科技有限公司，就坚持以工艺智能化软件的创新性产品定义，以“机械制造过程级数字孪生理论”为支持，推动了该领域独特的技术路径、产品形态和产品竞争力。

不得不说明的是，2015年之后，随着国内硬科技投资的风潮兴起，这其中不乏一些优秀的公司获得了资本的青睐，凭借资本助力，吸引了更多的人才进入了该领域，推动了更多的技术进步与市场教育，让更多用户有了对该领域的体验和理解。以笔者来看，就市场繁荣度和技术先进性，以及从产品成熟度等级而言，虽然中国企业和行业状态也没有发展到理想状态，甚至很多企业仍然在“死亡谷”之前或之中。但是从该领域在全球的发展状态来看，该领域是工业界中少有的中国可能比全球领先的行业。这是中国企业的机会，也存在资本推动的泡沫特性，希望中国企业通过自身的努力，能在这个领域的产业机会中，跑出自己的优势，越过“死亡谷”，成为引领世界的硬核高科技企业，也为国家在自主可控的方面贡献力量，同时也助力国家在以自己的领先行业与国外的领先行业进行制衡时提供相应的可能性。

四、数据模型路径深入分析

在这个数字化时代，加工过程监控系统的数据模型路径得到了很多重视，也有很多企业投入其中，其中“刀具状态监控系统”这个产品上使用此技术路径的投入最多。这里详细介绍了目前以该类技术路线形成的“刀具状态监控系统”产品的应用场景要求、优势和劣势。

1. 应用场景要求

目前基于数据模型的“刀具状态监控系统”要求应用场景为批量加工模式。在批量加工模式下，产品的结构和工艺参数相对稳定，能够为系统提供大量的、一致性的数据样本，从而保证模型的准确性和稳定性。

2. 优势分析

目前基于数据模型的“刀具状态监控系统”的优势在于原理看似简单，客户易理解。它主要基于数据的统计分析和模式识别，如图1所示，不需要复杂的机理模型，因此客户能够快速理解系统的工作原理和功能。

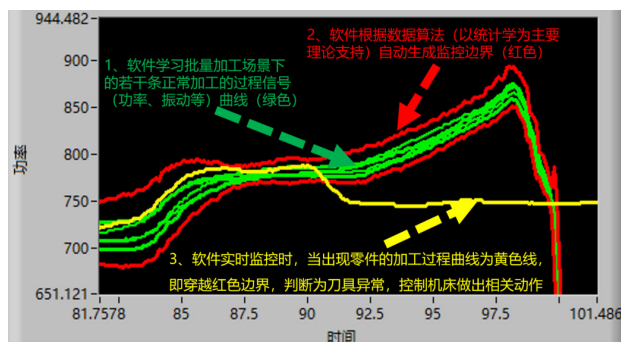


图1 目前基于数据模型的“刀具状态监控系统”异常监控的案例图

此外，该系统实际可实现“过程异常监控”，超出购买业务范围。除了对刀具状态进行监控外，它还可能监测到加工过程中的其他异常情况，如机床振动异常、切削参数异常等，为企业提供了更多的生产保障。

3. 劣势剖析

目前基于数据模型的“刀具状态监控系统”也因为其基于统计学的黑箱模型，在机加工行业这样的领域应用时呈现出了一些劣势。

(1) 对使用人员的知识要求较高。虽然基于数据模型的“刀具状态监控系统”的应用过程对机加工的从业人员易懂，但是原理中涉及到的统计学知识，往往需要深入学习才能理解其应用时所需要满足的条件，比如图1中对正常加工的“绿色曲线”样本数量、样本选取标准等都需要一定的统计学知识支持，才能选好。所以在该软件真实使用时会存在大量因为学习样本的完备度问题，而使得统计学模型的置信度不高，并进而产生误报和漏报的不可控问题，造成制造过程容易产生不可控中断。一些产品制造商在宣传和推广自有产品时，为了能够让客户快速使用该类产品，从而降低客户的使用成本，往往宣传为只需要少量样本，甚至一个对应正常加工的“绿色曲线”样本，便可以使用软件。但这样的设置使得模型的置信度、可靠性非常差，造成软件的使用效果较差。

(2) 应用要求为批量加工模式，可用场景少。这种加工模式在一些机加工行业中是存在的，但是越来越少了。伴随着社会的发展趋势，多品种小批量的加工模式越来越多。用户进行零件切换、工艺调整等变化是其业务中的常见行为，因此适用的市场面较小。

(3) 对加工系统的稳定性要求很高。即使是在批量加工模式中，加工系统可以保持一些可见参数的稳定不变，比如被加工产品、工艺参数等。但是数控机床作为高精度设备，会有一些不可控参数在实际运行过程中自然的发生

变化,比如数控机床会产生热变形,会有外界的振动传入,每一件来料毛坯会有软硬差异等,都会出现影响系统稳定性的不可控因素,从而造成加工过程中可能出现图1中的“黄色曲线”,但却不是因为真正的“刀具异常”或“加工异常”而产生的“黄色曲线”,并进而产生误报。图2以“机械制造过程级数字孪生理论”的形式,展示了很多影响加工系统稳定性的因素,其中很多因素在目前的大多数加工现场都没有被定量。

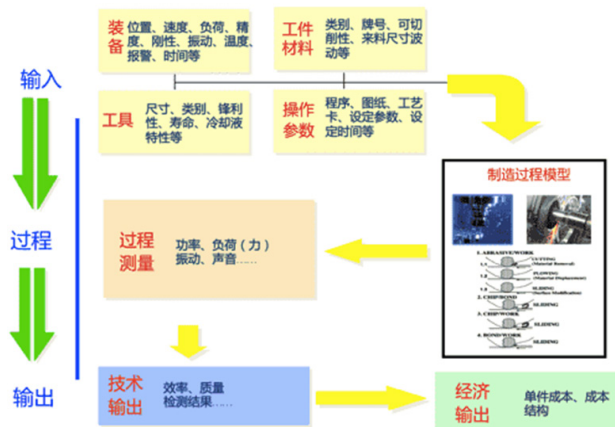


图2 “机械制造过程级数字孪生理论”

(4) “异常”标准难以界定。“刀具异常”涵盖的范围在用户侧主要包括“断刀”（大异常）、“崩刀”（小异常）和“磨损”（小异常）。所谓“异常大小”主要指“黄色曲线”距离“绿色曲线组”的距离。而这个异常往往和客户的工艺条件关联性很大,客户调整工艺后,或者更换设备后,都会造成这样异常出现时的“黄色曲线”与正常加工的“绿色曲线组”之间的距离出现变化。在这种条件下,用户或服务商需要频繁进行调试,以确定在不同产品和不同工况下的识别能力范围,造成使用成本较高。

也正是因为这些原因,众多依据数据模型路径的“监控系统”产品力不高,客户的反馈褒贬不一。这类公司的发展也受到了很大的影响。

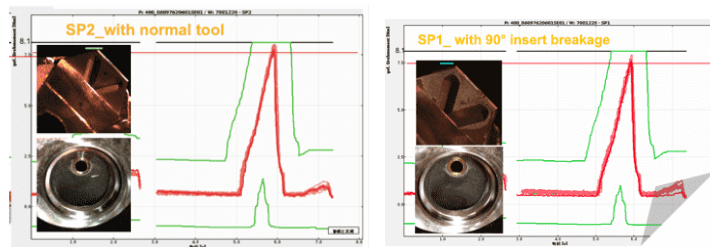
五、突破当前数据模型路径的建议方法

数字化和人工智能是时代的浪潮,毋庸置疑会对各个行业产生深远的影响。但是其真正落地并产生价值,需要结合机加工行业的特点,从而让客户真正能够受益,也能够以合适的成本和投入拥抱数字化,走入真正的智能化时代。这里给出两个建议方法。

1.故障特征机理模型

所谓故障特征机理模型,本质上是将“数据模型路

径”转化为“机理模型路径”。因为“数据模型路径”是黑箱模型,其概率性的本质就需要较大的数据量,从而产生了较高的应用成本。而“机理模型路径”是白箱模型,其用数学模型反映故障的第一性原理,因而可以通过较少的数据即可精准使用,因此精准识别故障,比如针对刀具的微小崩刀异常,构建的故障特征机理模型,就有了精准识别该故障,且不需要较多数据样本即可应用的可能性。该类异常从目前的“数据模型路径”角度出发,无法有效区分良品加工和微小崩刀所对应的异常加工。图3(a)中的“红色曲线组”为正常加工零件对应的曲线,由“数据模型”所生成的良品/不良品的区分边界为“绿色曲线”。而在这种控制模型下,微小崩刀时所产生的加工曲线由于很难和刀具磨损等情况进行区分,所以在图3(b)中,“红色曲线组”中就包含了微小崩刀所对应的异常工况,这样就会造成加工过程异常漏报,并进而给客户造成废品流出的损失。

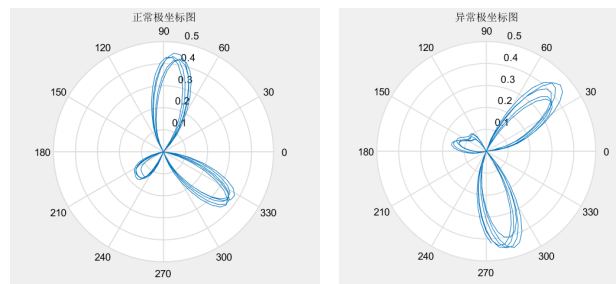


(a) 只有正常加工的曲线分布

(b) 包含正常加工和刀具微小崩刀的曲线分布

图3 基于数据模型方法无法区分异常,造成漏报

而基于“故障特征机理模型”构建的方法可以在特征域中非常精准地识别这种刀具的微小崩刀,由此将该类异常进行识别。如图4所示,即为吉兰丁智能科技有限公司在这个领域的成果。



(a) 正常加工的曲线分布

(b) 刀具微小崩刀的曲线分布



(c) 微小崩刀的刀具



(d) 微小崩刀量的确定

图4 基于“故障特征机理模型”进行刀具微小崩刀的监测

在该路径中，不同故障的机理模型突破，意味着一个个科研问题的突破，需要时间和投入。这样的科研突破往往也可以带来创新性的专利保护。虽然有可能也会由于“机理模型路径”会容易先从局部点进行解决，而产生局部价值，优化效果较小。但是因为有利专利保护的优势，也会推动相关市场保护性优势。同时，当整体机加工机理框架模型得以突破时，就可以判断其精准使用场景，从而会加速该类产品的市场推广。

2. 工艺数字孪生方法赋能

数字孪生的本质是将物理世界映射到数字世界中。不同的观点看同一个事物，会得到不同的数字描述。如图5以一个人来举例，在“地图数字孪生”中，只需要这个人的GPS坐标数据，即可完成其数据模型的构建；在“医学数字孪生”中，则需要各种人的健康检查数据，比如CT等，才可以对其进行健康状态的评估；在“服装数字孪生”中，则需要其身材数据，以便进行量体裁衣。所以数字孪生模型取决于物理模型。



图5 针对同一个人，不同的观点得到不同的数字孪生模型

针对机加工也是一样。如图6所示，从生产管理角度关注机床的运行状态；从生产管理角度，关注机床的相对运动；而从加工工艺角度，则关注加工时刀具和零件接触的微观区域，也就是“机械制造过程级数字孪生理论”（即图2）。

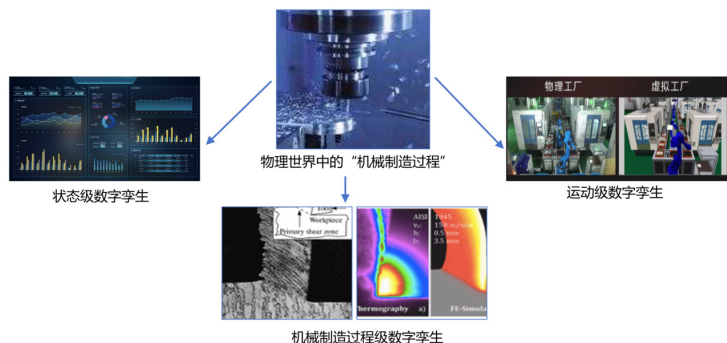


图6 从不同的角度看机加工得到不同的数字孪生

“机械制造过程级数字孪生理论”在应用过程中就会诞生“工艺数字孪生系统”，因为其目的在于通过数字化方法精准确定工艺在实际运行中的真实情况，明确相应的误差项，从而知道实际工艺与理想工艺之间差距的原因，以便进行精准改善。

通过工艺数字孪生方法的赋能，首先可以使用机理模型已经清晰的一些局部要素控制方法（比如微小崩刃监控等），从而用其子模型的输出作为工艺数字孪生中的一些要素。而机加工过程的复杂就在于目前不是所有的要素都可以精准清晰（比如机床的热变形），而工艺数字孪生系统可以在其模型中评估系统要素的误差，从而首先选择误差较小的区间进行精准过程控制，由此就可以赋能加工监控系统，变得更加稳定，增加监控的准确率，同时让其不需要大量样本即可快速使用起来。而误差较大的区间，可以通过AI方法，将误差与相关监控数据融合，进行模型的完善。随着数据的积累，工艺数字孪生系统会进化，这些误差会逐渐被求解，从而使得误差越来越清晰，形成相应的补偿性监控，进而更进一步提升监控的准确率。

同时因为工艺数字孪生模型不依赖于批量制造模式，只要有机械加工，就一定会有其对应的工艺要素，所以其可以针对单件小批量多品种的模式进行使用。图7即是吉兰丁智能科技有限公司的“智能刀具监控系统”的应用案例，该系统已经由工艺数字孪生方法进行了赋能，实现了在单件小批量多品种加工模式下的精准监控功能。



(a) 智能刀具监控系统在加工中心的应用案例



(b) 智能刀具监控系统在车床的应用案例

图7 工艺数字孪生方法赋能的智能刀具监控系统

六、天机算系统

吉兰丁首创“机械制造过程级数字孪生理论”，针对工艺数字孪生实现了原理层技术突破，并为此发布了白皮书（<http://popularize.grinddoctor.cn/>），布局了一系列国内和国际专利。依托该理论，吉兰丁打造了赋能数控机床

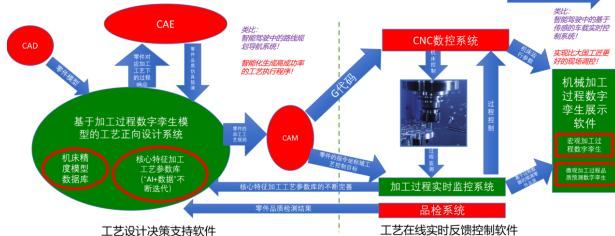
全面智能化的“天机算系统”，其整体系统架构和产品形态如图8所示。作为完整的工艺数字孪生系统产品，其能够考虑各种加工系统要素的物理特性，进行工艺优化设计和在线实时控制，同时基于人工智能模型持续学习进化。使得在数字化世界里所得到的决策越来越贴近物理现场，真正实现数字孪生领域的“以虚映实”和“以虚控实”。

天机算系统——机械加工的工艺智能软件

- 1. 基础数字孪生数据库体系建设：数字化加工系统的全要素应用特性

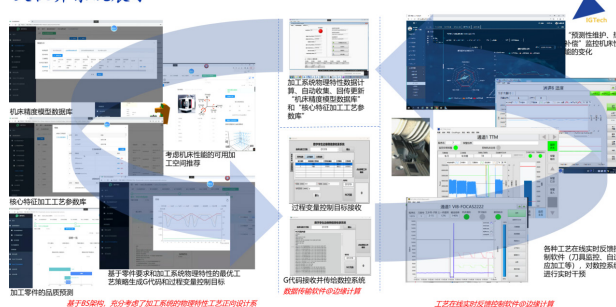
- 1.1 机床精度模型数据库
- 1.2 核心特征加工工艺参数库

- 2. 天机算系统的体系组成及使用流程



(a) “天机算系统”架构

天机算系统展示



(b) “天机算系统”展示

图8 基于“机械制造过程级数字孪生理论”的机加工工艺智能化产品“天机算系统”

吉兰丁同时使用“机械制造过程级数字孪生理论”开发了一系列工业软件产品，如图9所示，从包含“智能刀具监控”的各种监控系统到工艺决策支持系统。这些系统

都致力于在单点局部模型中进行其机理清晰化，还可以基于“机械制造过程级数字孪生理论”进行联动，甚至形成整体工艺数字孪生“天机算系统”。

天机算系统的多模块组成与联动使用



图9 “天机算系统”的各个模块及其联动使用

吉兰丁凭借该技术和长年积累获得多个国家重大专项支持，由其重要的是其牵头承担了国家在高端机床装备领域的智能加工大数据技术专项，致力于与志同道合的合作

伙伴一同推动该领域的技术进步，助力国家在该领域走到世界领先。□

浅谈数控系统发展趋势及技术开发

倍福（中国）自动化有限公司 钟秀斌

一、数控系统架构分类

1. 数控系统架构技术分类

目前数控系统CNC从技术路线上可以分为硬CNC和纯软CNC两种技术路线。硬CNC架构的数控系统结构有专用的数控主板，所有CNC的实时控制的数控功能、工艺包、时序逻辑PLC等均有数控主板的专用CPU和专用PLC逻辑芯片来执行，而CNC的HMI、管理级通讯等等非实时控制部分由与数控主板通讯的外置PC来执行；纯软CNC主要指基于PC base的硬件结构方式，所有的CNC功能块、PLC逻辑功能全部都是软件包，不需要专用的数控主板，直接使用PC的CPU来执行各种实时数据运算及PLC逻辑控制，当然CNC的HMI、管理及通讯等非实时部分也是由PC的CPU来执行，可以理解为CNC的HMI等非实时部分和CNC的实时控制都是由PC的CPU来执行，所有数据（非实时部分数据和实时部分数据）交互通过共享PC内存地址来实现，这样可大大减少两种任务之间数据交换的时间，实现系统的快速响应；另外软CNC由于所有的功能模块摆脱了硬件的限制，彼此通讯或者数据交换更容易实现，更易于开放二次开发和个性化开发接口，所以也俗称为开放式CNC。以下是两种架构示意图（见图1、图2）。

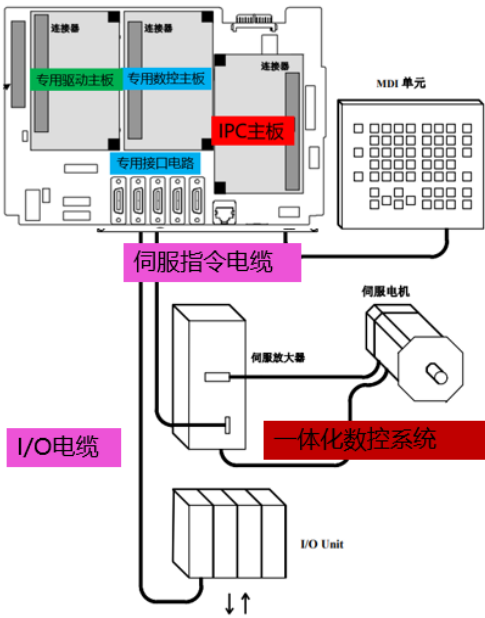


图1 PC+硬CNC架构数控系统示意图

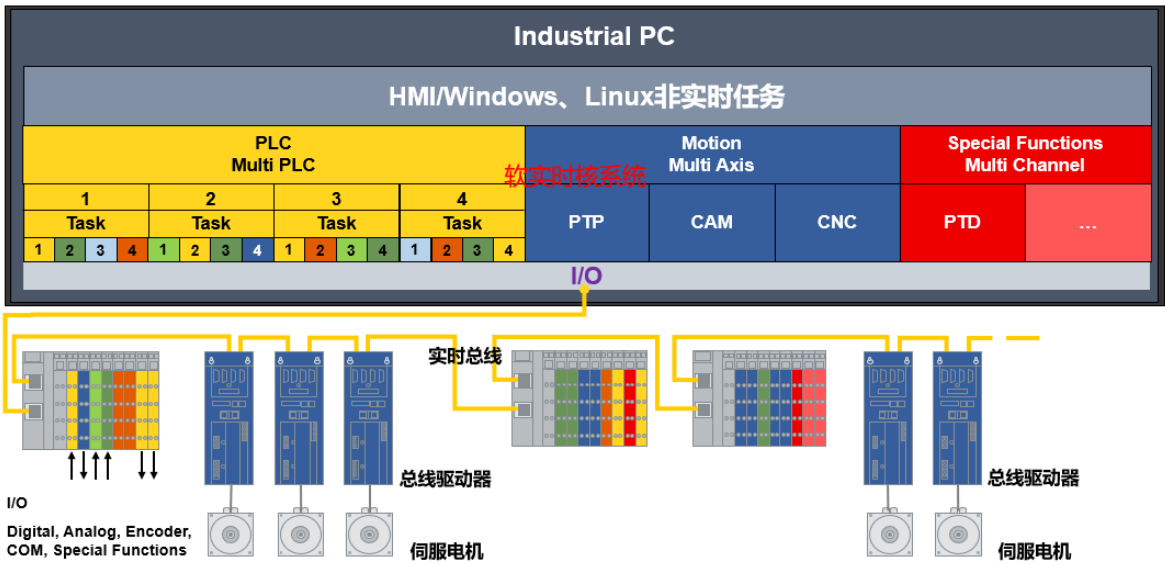


图2 PC+软CNC架构数控系统示意图

2. 数控系统控制方式分类

从控制方式来看，数控系统也可以分为总线型和非总线型。总线型包括各种实时总线，以下是部分数控系统公司开发的实时总线名称（见表1）：

表1

类别	实时总线名称
发那科	FSSB
西门子	Profinet
海德汉	HSCI
华中数控	UCNC
德国倍福	EtherCAT
三菱	CC-Link
凯恩帝	KSSB
广州数控	GSK-Link

非总线型主要指脉冲、模拟量等控制方式。

目前大部分数控系统都在采用总线控制方式，而且大部分数控系统公司都已经开发了自己的总线协议，这已经是一种趋势。

3. 数控系统综合分类

还有不同的角度来对数控系统的分类，在此就不多做分析。仅从以上两种技术路线和控制方式分类来区分，目前数控系统大致有以下组合：

表2

类别	脉冲、模拟量控制方式	总线型控制方式
硬CNC	脉冲、模拟量控制硬CNC	总线型硬CNC
软CNC	脉冲、模拟量控制软CNC	总线型软CNC

小结：数控系统类型趋势。从2025年北京CIMO国际机床展上看，无论是国内还是国外厂家、也无论是硬CNC还是纯软CNC的架构，大部分参展的数控机床都采用了总线型的控制方式，脉冲、模拟量控制的硬CNC展品已经难得一见。另外从最近几年的趋势看，全球主要的数控系统厂商也逐渐重视基于PC的软CNC的技术路线，很多数控系统厂商已经推出、或即将推出基于PC的总线式软CNC。

二、PC+软CNC架构的由来

1. PC+软CNC架构的发展历程

为什么这么多重要的CNC厂家都着重关注PC的软CNC的技术路线呢？个人认为这还要从数控系统最初发展说起。最初硬CNC的数控系统主板的CPU一般都采用DSP处理器等作为硬件实时核，来确保计算任务的实时执行，

DSP的最大优势在于对浮点运算的快速、准确计算，用来作CNC的轨迹机算非常合适。早期的PC机一般用于办公自动化使用，16位、32位的CPU更擅长整数字节的计算，作为画面显示、多任务、通讯、非实时等的处理场合优势也很明显，所以大部分的数控系统基本都采用了硬CNC的技术路线。把DSP的数控主板插在PC插槽上（或与PC分离通讯），PC仅作为HMI实现人机互动操作之用，这种技术架构到现在也没有过时，只不过大部分控制方式升级成为了总线控制。

随着半导体技术和IT技术的进步，通用PC的CPU性能得到极大提升，从最初的16位发展到32位，现在又升级到64位，并实现单核到多核，通用CPU的浮点处理能力得到极大增强，已经和专用于浮点运算的DSP不相上下了。以下是根据公开可查信源找到的几家DSP/CPU关于浮点运算能力数据：

表3

厂家	DSP/CPU型号	核数量	双浮点运算总能力
TI	C7x系列	4核	80GFLOPS
Intel	Xeon D-1567	12核	518.4 GFLOPS
Intel	core i5-6500	4核	57 GFLOPS
AMD	AMD Ryzen 7系列	4核	33.3GFLOPS
龙芯中科	3C6000/S	16核	844.8GFlops

考虑到工程需要，一般CNC可能用不到12核、16核这么强大的算力，即使使用2核或者4核的芯片，预计其浮点计算能力与专用DSP基本一致了，所以总体上来说通用CPU已经和专用的DSP在浮点运算能力上没有太大的区别，另外考虑到以后半导体技术的进步，也许通用CPU的浮点运算能力的提高快速会更快。基于这样庞大的算力，大部分通用CPU对CNC轨迹线段的插补解析精度已经可以实现纳米nm级别，有的可以到达皮米pm级别，这样的计算解析精度已经可以满足大部分数控机床道级（10μm）、微米μm级别的精密加工需要，也就使得直接使用通用CPU来运行软实时控制核变成可能，这样还省掉一个DSP的数控主板，减少了硬件，也可能降低了硬件的故障率。

2. 全球主要数控系统公司陆续推出PC+软CNC架构的产品

在通用CPU还处于16位、32位阶段时，绝大工程师们还不敢把通用CPU直接用到工业实时控制上来，包括CNC，但确实有人先知先觉，很早就预判通用PC的CPU将在PLC/CNC控制上大有作为，这家公司就是德国BECKHOFF（以下统称为“德国倍福”）。德国倍福从1985年开始与微软、Intel合作，在1988年就推出基于

DOS操作系统的软PLC产品——S1000；1995年推出基于Windows的软PLC——TwinCAT2 PLC；2003年推出了基于32位Windows、单核32位CPU的TwinCAT2 CNC；2010年升级为基于64位Windows、多核64位CPU的TwinCAT3 CNC。现在TwinCAT3 CNC的内部插补指令可以达到10皮米（10pm）级别，CNC的插补周期可达0.05ms，可基于Windows、Linux和Free BSD等操作系统。

另一个较早进入PC控制的CNC厂家就是海德汉。海德汉在2006年开发的iTNC 530还是采用双处理器的硬CNC架构，主机单元（MC）采用奔腾III-800芯片，控制单元（CC）集成DSP（数字信号处理器），通过专用总线分离实时任务与非实时任务（如Windows应用程序）。2011年后，软实时核HEROS 5（HEIDENHAIN Realtime Operating System）逐渐成熟后，iTNC 530升级至HEROS 5实时核系统，HEROS 5也成为后续系统（如TNC 620、TNC 640）的实时核基础架构。海德汉从TNC 620开始就一直采用HEROS 5实时核，TNC 640及TNC7系列进一步继承并扩展HEROS架构，集成AI功能（如碰撞监测）。最新版本的TNC7软实时操作系统HEROS 5，CNC快速插补周期小于0.1ms，输入最小指令为10nm，主机MC3x6的操作系统是Windows、使用Intel高性能CPU。

记得华中数控陈董事长在一次访谈节目中透露，华中数控在2012年就基于双CPU+Linux操作系统架构开发软实时核及CNC，由于实时核一直没有成熟，直至2021年才推出基于软实时核的华中9型，而这之前的数控系统架构还基本是数控主板+PC的硬CNC结构，华中9型数控系统的实时核本质是运行于专用硬件平台的软件控制系统。华中10型CNC继承了华中9型的技术路线，并在此基础上把性能和功能继续提升。华中9型通过软件实现“自主感知-学习-决策-控制”闭环，其热误差补偿、工艺优化等功能依赖AI算法包动态调整加工参数，“四个自主”解决方案（感知/学习/决策/控制）完全基于软件算法架构。华中10型更进一步，其“双码联控”技术（指令域数据与实测数据实时比对）通过软件层深度学习算法优化加工路径，缩短加工时间最高达20%；软件层承担核心实时任务（如多轴插补、动态补偿），通过开放接口支持功能扩展；硬件层（AI芯片/国产总线）提供算力与低延迟通道，核心特征是软件算法实现实时控制调度，依托专用硬件平台提供算力支撑，软件层实时控制核都有自主优化算法和开放式软件平台。两代系统均提供分层级APP开放平台，支持第三方开发实时控制应用（如智能会话编程、振动抑制），验证实时调度逻辑由软件实现。

在西门子2024年10月开始正式销售SINUMERIK ONE前，SINUMERIK 840D sl还是双CPU架构，硬件依赖较强，扩展性受限；ONE的实时核本质也是基于专用硬件（NCU单元）运行的软件实时核控制系统，系统的灵活性、开放性得到较大释放。SINUMERIK ONE系统在开放性上强调软硬解耦的数字化原生架构，通过软件定义硬件功能，支持灵活升级和扩展，减少物理硬件依赖，提升虚拟调试与仿真能力，凭借其数字化核心技术，构建了“数字原生”构架，支持创建高精度的数字孪生模型，实现虚拟与现实的无缝交互，加速新产品研发、调试和培训流程，显著降低风险和时间成本；采用新型NCU和PPU硬件单元，大幅缩短PLC响应时间并优化程序处理能力，提升整体系统稳定性，提高了加工效率与精度优化，支持基于数字孪生的虚拟调试服务，增强了网络连接与扩展性等等，这些都是基于PC+软CNC控制带来的好处。ONE的最快插补周期可达2毫秒、内部插补指令的最小位移单位为1个脉冲当量，对应实际物理位移通常为0.001毫米（1μm）。

日本发那科在2024年9月的芝加哥国际机床展官宣了新一代高端数控系统500i，这个型号的数控系统采用基于PC的软CNC技术路线，并进行了实物展示，而且宣布以后高端数控系统都将选择基于PC的软CNC技术路线，但具体性能指标还没有数据，在此就不多做评述。

其他国内的数控系统公司凯恩帝、广数、英诺威讯等正在开发或已经面世的系统，基本数控系统架构也应该与海德汉、西门子、华中数控基本一致，虽然他们还没有对外明确告知自己所用的实时核名称，但从各种信源来判断，他们都是自研实时核产品。

三、PC+软CNC架构的优势

1. 软CNC对比硬CNC的优点

基于PC+软实时核架构的数控系统，相对于PC+数控主板的硬CNC架构数控系统，优势相当明显，大体来说有以下几个优势：

（1）无需独家专用硬件，新系统的开发速度更快。基于PC+软实时核架构数控系统可以不单独依赖某一家硬件厂商，比如CPU，可以选Intel的，也可以是AMD、Arm、Atom、龙芯中科、麒麟等等的，内存、硬盘等其他硬件也是如此。其底层逻辑是硬件会随着时间而被淘汰，但是软件却可以一直方便迭代；我们不用担心某一家硬件的停产、断更而严重影响我们的生产使用。软CNC中的所有功能块都是软件模组，不需要特殊的硬件就可以实

现更快的、更便宜的来将新功能通过软件来实现。

(2) 加工工艺包和HMI的升级速度更快、操作更加丰富灵活智能。加工工艺包和HMI升级速度快的特点,对于CNC厂家来说非常重要,以前这方面升级往往还要考虑数控主板硬件的承载能力:程序量太大可能导致内部存储空间不足、算法太复杂可能导致CPU反应太慢、使用第三方软件可能导致软件格式不一致等等问题;现在使用PC控制架构,基本不用考虑CPU的计算能力、反应速度、软件兼容等问题,无论是使用C++、JAVA、MATLAB*/Simulink*等高级语言,只不过在PC机上多安装一个运行环境而已;还有就是效率问题,由于CNC的软件功能升级不再依赖硬件,经过测试的新升级版本CNC及工艺包可以很快投入市场,既能快速响应市场需求,还能可节省大量时间,为公司带来更好的效益。

(3) 开放程度更高,支持第三方实时控制应用开发,满足各种客户需求。开放性方面,支持第三方实时控制应用开发,对于PC+数控主板架构的硬CNC来说,困难相当大,往往需要专门为用户定制相关的软硬件版本,对于涉及底层的深度的应用开发,大部分数控系统厂商不允许主机厂或其他第三方来开发,需要主机厂或第三方把源代码交给数控系统厂商来集成调试,这往往又会带来主机厂和第三方的知识产权的外泄。基于PC+软实时核架构的数控系统则没有这方面的顾虑,数控系统厂商既可以为主机厂定制开发软件,也可以接受主机厂自主开发,双方的合作方式将更加灵活和友好。

2. PC+软CNC架构更有利于自主开发CNC

随着国家、企业对自主知识产权认识的提高,目前国内已经有不少机床OEM尝试开发具有自己知识产权的CNC,以便拓宽企业自身发展的护城河,维护公司自身的可持续发展。从各种信源可以获悉像通用技术集团、秦川集团、海天精工、科德、超同步等知名数控机床主机厂都在开发各自的数控系统。个人认为这个做法是很值得赞赏,毕竟各自生产的机型不太一样,甚至相同机型也有自己不同的加工工艺及方法,每个企业都有自己专利或知识产权的发明创新需要保护,能自主开发CNC是最稳妥的。但从我们分析数控系统发展历程和趋势来看,要打造一款称心的CNC真心是一件不容易的事情,特别是原始开发自主CNC,需要从实时核底层开始搭建,然后增加自己完整的加工工艺包,再匹配适合工人操作的HMI,最后还需要整合全套软硬件来确保稳定运行的CNC产品,工作量是巨大的,技术难度更是地狱级别的。部分国内外企业没有足够重视其中的难度,一腔热血投入巨资搞自主CNC研发,

却为此陷入第三方实时核平台的技术陷阱,最后对自主开发数控系统反而有点望而却步,委实相当令人叹息。

四、关于自主开发CNC

自主开发CNC有两种模式:一种是原始开发,另一种是二次开发。原始开发的难度已经在上一段中提过,是一件高难度、高工作量、高收益的工作,类似于一手房地产开发商建一座大厦:从拆迁、整地、挖坑、打地基、搭房梁骨架、地上建筑、封顶、内外装修、家居配套等全部工作,然后销售精装商品房,工作量巨大,收益也是最丰厚的。二次开发一般指在成熟的第三方实时平台和部分比较完整的CNC上,部分构建自己核心的算法和HMI,最后打造出具有自己基因的CNC,这种模式开发出来的CNC可以是自己的品牌,也可以是CNC内核厂家的,就看双方的协商结果了。由于不需要从底层开始做起,还能充分利用第三方平台的现有资源,二次开发一般会比较容易成功。这种方式需要借助第三方的系统或平台,在减少了研发工作量的同时,也需要给第三方系统或平台支付相关费用,可能会增加一点系统成本。普遍来说,大部分人都认为二次开发出的CNC成本会比原始开发CNC的要更贵一些,个人认为这个问题很难去衡量,个人观点是原始开发与二次开发的出发点不一样,各自的侧重点不一样。二次开发侧重保护自主工艺和算法的知识产权,它重点是依靠自主的工艺和算法,以局部更高溢价或市场份额而获利,与所使用的第三方系统和平台的成本关系不太大,所以一般比较适合主机厂。原始开发更侧重于实时核的自主知识产权,当然在实时核上开发的工艺和算法也属于开发者,由于原始开发工作量更大、人才需求量更多,开发的费用是很高的,所开发的CNC需要在市场大卖才能获利,如果卖的不好,就单套CNC而言也有可能出现亏损,所以它更适合数控系统公司。

无论是原始开发还是二次开发,从道理上讲很清楚:投入、投设备、投资金就一定干得出来,而且有的企业已经做出来了,只是更多的企业还没有做出来;但中国也有一句古话:心急吃不了热豆腐!凡是讲究策略才能事半功倍,越是心急,越容易被人带偏,特别是原始开发CNC,更容易陷入别人的陷阱。

个人认为,要开发好自己的数控系统,有三个问题值得思考:

1. 自主开发数控系统的目的

单纯从数控系统架构发展上来看,主要的数控系统公司现在都在往PC+软实时核的架构方向走,主要目的是在

一定硬件基础上（算力和实时响应满足的基础上），避免各种软件功能受限于硬件平台。

机床主机厂（或者数控系统厂商）自己开发数控系统选择PC+数控主板的硬CNC架构，其实是在走大数控系统公司的老路，未来随着自己数控机床要求、性能的不断提
高，现在选择的硬件平台未来有可能存在天花板，将来可能需要重新设计数控主板，重新再设计全新的数控系统硬件，要一切重新开始。当然如果公司开发出来的数控系统和配套的数控机床未来不做任何变动或者变动非常小，开发自己的数控系统就是为了降低成本，这样也是一个很好的选择。比如现在市场上的平面激光切割系统，由于绝大部分激光切割工艺已经相对成熟固定，功能上已经基本封顶了，有的主机厂就开始自己使用运动控制板卡开发自己的激光切割系统，可大幅降低数控系统的成本，进一步增强自身竞争力，效果也很好。

如果主机厂或数控系统公司所开发的数控系统是为了保护自己知识产权，提升企业自身价值，挖深挖宽技术的护城河，个人建议使用开放式的软实时核平台，对公司以后的发展或许会更加有益，在这方面国外的主机厂已经做的比较多一些：比如瑞士Willemin-Macodel在为钟表零件加工研制的微型加工中心701S系列机床，就是采用第三方基于PC+软实时CNC平台，无缝整合自己的加工工艺包所开发的，确保了自己的加工工艺及算法IP保密性，并得到市场的认可，类似的还有很多，在此就不多作介绍。

所以个人认为自主开发数控系统先确定其目的是更重要的，这样可以明确自己开发CNC的目的，在选择技术路线和方向不容易摇摆。

2. 二次开发需谨慎选择可靠、稳定的实时核平台，还有务实的态度

无论是选择软实时核还是硬实时核的架构，都要充分考核实时核的可靠性、稳定性。

如果选择硬实时核，其实部分运动控制器的成熟电路还是可以参考的，再注意一下PCB电路和板卡的EMC问题，需要公司储备对微电子电路、部分机器语言、高级语言（算法）比较精通的人才，需要更多的领域的人才，这个方向主机厂开发可以参考数控系统公司的做法安排人员，在此就多做说明了。

如果选择软实时核，则需要考虑软实时核本身的成熟可靠性、稳定性是否被市场认可、或者说是否在同行中有很成功的应用。拿以下全球部分比较知名的EtherCAT主站软实时核做个说明，他们有的用的人多，有的用的人少，大部分人都辨别不出哪家底层更可靠、性能更稳定、

服务更及时等等。

eCos
Intime
Linux with RT-Preempt
On Time RTOS-32
PikeOS
Proconos OS
Real-Time Java
RMOS
RT Kernel
RT-Linux
RTXC Quadros
RTAI Linux
QNX
VxWin + CeWin
VxWorks
Windows CE
Windows XP/XPE with CoDeSys SP RTE
Windows XP/XPE with TwinCATRT-Extension
XENOMAI Linux等等

Windows CE由于微软停止更新服务，以后应该会逐步淡出软实时核市场。

VxWorks是通过其高性能的微内核Wind，提供了严格的时间约束和确定性的任务调度机制，一般被认为是硬实时操作系统，在此就不做过多的评述。

在中国最知名应该是Codesys实时核平台，CODESYS Automation Platform 以“CODESYS接口工具包”的形式提供给客户，即将CODESYS IDE的接口向用户开放，用户获取这些接口之后可以做大量的二次化功能开发，并提供完全开放的组件接口的编程模板，方便用户轻松实现更加符合特定行业或特定工艺需求的上位编程环境的二次开发，上位编程环境则基于微软.Net技术开发。但根据本人从各个渠道收集到的信息来看，CODESYS软实时核用在CNC方面的成功案例很少看到，无论是CNC厂商还是机床主机厂商都没有大批量成功配套的先例，国内外的情况都差不多；它在通用PLC、通用运动控制卡方面倒是有很丰富的成功案例，像西门子、三菱、ABB、施耐德、汇川、台达等品牌的PLC和运动控制产品都在使用，但西门子和三菱CNC的技术底层与CODESYS毫无关系；当然CODESYS自身目前也在往CNC应用这方面拓展，在展会上展出过五轴RTCP的CNC，主机厂或数控系统公司展出基于CODESYS的CNC则很少见。

TwinCAT软实时核是开发的时间最早几个之一，相对

来说很稳定，不提供底层源代码，但底层功能模块封装比较好，任务优化合理流畅，各种软件接口也很丰富，更适合二次开发之用，基于TwinCAT的CNC已经在欧美市场得到比较多批量的应用，国内也有部分主机厂在配套，比如Trumpf、EMAG、+GF+、GROB、Affolter、Willemin-Macodel、Ecme AB等主机厂的部分机型就在与德国倍福进行合作，只是由于倍福大部分以提供开放式平台为主，自己推出的成熟CNC不多，在国内的知名度并不高。

华中数控的CNC平台也有国内主机厂在进行二次开发。

有一些企业在尝试采取买断类似上述国外底层核心源代码版权的方式来进行开发，想法也很好，可惜到现在成功者不多；究其原因，还是低估了最核心的软实时核在CNC应用中的复杂性和困难程度。大部分这些品牌的实时控制核授权只是包括实时核本身及各种功能授权，并不包括这些功能嵌入CPU线程中的授权，如何把这些软实时核的时序内容无缝嵌入CPU线程中，还需要CPU厂商和国外操作系统厂商的官方授权和许可，否则可能会造成CNC的不稳定，而且故障原因是随机的，基本不太好重现，这就是目前大部分购买了某些实时核授权的企业不能开发出稳定工作CNC的主要原因（国外企业情况大致也是如此）；还有一个问题就是所购买的实时核本身的稳定性和流畅性，它是否真正适合CNC这种浮点运算能力强、实时响应快、任务调度算法是否合理、稳定流畅等特点的应用要求，需要在大量的数控机床验证之后才能确定的，不能单纯用一两个测试报告、几个成功案例就能确定的。

为了绕开国外核心技术对国内正常发展的制约，国内企业比较喜欢在开源的Linux等平台上自己开发实时系统，毕竟使用国外第三方平台还是有风险的，这个思路无疑是最直接和正确的，但这个难度也是最大的，失败的风险也是最高的，这个在前面已经讲过。国内曾经有几家公司想在短时间内投入大笔资金，期盼可以在短时间内做出一套先进的数控系统，但是到现在这些厂家还没有一家完全成功。究其原因，是开发一套数控系统，不像建一座摩天大楼，按图纸施工即可，它的各种功能的确定需要经过实践的不断验证和修正，不是一朝一夕可以解决的；自主实时核的稳定同样需要在实践中不断验证、完善和加强；在整套系统的整个生命周期内，都还需要从内核底层、核心加工工艺算法、人机操作等方面不断完善，每一次修正、完善都可能出现底层调整、算法更新、HMI升级等里外翻新的情况，需要开发公司有专业且稳定的开发人才团队长期负责；另外数控系统方面实现完全国产化，还需要有国产的CPU和操作系统的加持等等，这些都不是目前完全具备的条件。所以自主开发国产数控系统需要一个持

续投入且长期的过程，也许采用长期投入资金、人才的添油战术，会是自主开发数控系统的一条比较稳妥的办法。

个人观点：要开发自主CNC，实现对竞争对手的超越，应该先站上巨人的肩膀上，超越起来会更容易一些；比如应该像华为一样，最初开始用安卓系统造手机、一度成为安卓全球最大的手机厂，通过安卓平台赚了钱，免费熟悉了安卓系统的整体架构，慢慢的自主开发鸿蒙就有资金和思路，再投入开发就减少公司的研发投入压力，也能有现成的产品技术借鉴，技术资金来源两不误；最终成就纯血鸿蒙。自主开发数控系统也是如此，最好是借鉴别人的思路，先学习熟练使用先进厂家的系统，充分利用合作机会理解其先进的技术思路，再慢慢形成自己的开发思路，这样自主化开发才能尽可能少走弯路、还可以有效避免相关知识产权的纠纷。归根到底，学习其他厂家的技术经验不是模仿或拷贝，开发自己的系统最终目的不是要成为他们，而是要成为自己。

3. 合作方式和开发支持问题

无论选择硬实时核还是软实时核开发CNC，个人认为最好都有比较完整的技术支撑团队为开发中遇到的问题作技术支撑，以备不时之需。特别是主机厂商自主开发CNC，因为机床主机厂商主要的重心还在于对数控机床结构、材料、加工工艺等方面研究，很少储备专业的计算机底层内核研发方面的人才，在开发中难免出现知识盲点；专业的CNC厂商和专业的软实时核公司在这方面问题就不是那么突出了。

五、结语

基于PC的软CNC系统以后将越来越受到关注，由于PC+软CNC架构的系统具有天然的开放性，未来的数控系统公司与各机床主机厂之间的合作会越来越紧密，在CNC功能上的开发可能不再主要依赖数控系统公司来完成，有一定研发能力的机床主机厂为了确保某些关键的自主知识产权也会参与自主开发部分功能，数控系统公司将来不但要为重要的机床主机厂提供一些标准CNC，还要提供稳定的开发平台和开发的技术支持，双方的合作会更加紧密。

当然，在PC+硬CNC结构的平台下，主要数控系统公司也在与机床主机厂进行类似的合作，比如发那科、三菱、西门子、华中数控等数控系统公司都有丰富的经验；这些合作大都属于定制化合作模式，系统厂商为主机厂定制独家专用软硬件，其中机床软件功能方面由主机厂提出要求，系统厂商安排人员进行定制开发、产品独家专享。双方合作一般存在排他性，约束力也很强。

（下转第38页）

越南制造业升温 中国机床成优选

——Metalex Vietnam 2025观后感

中国机床工具工业协会“越南机床展”考察小组

展会概况

2025年10月1日至3日，Metalex Vietnam 2025（越南机床展）在越南胡志明市西贡会展中心举办。Metalex Vietnam是越南颇具影响力和规模的金属加工与机械制造专业展览会，专注于金属加工机械、相关技术以及整个制造产业链，于2007年在越南胡志明市首次举办，每年举办一届，今年是第十八届。



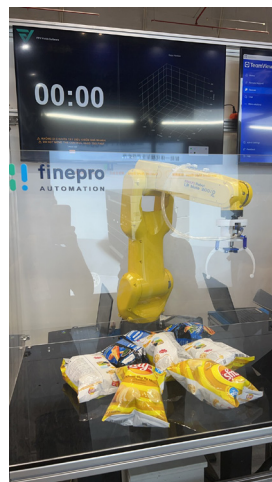
展会主办方是励展集团，应主办方邀请，中国机床工具工业协会执行副理事长王旭一行5人对展会进行了参观考察，观展过程中与多家参展企业负责人进行沟通、交流，通过展会了解越南机床工具市场的主流产品与技术，以及未来市场发展空间；并在展会期间与越南相关机械协会负责人、中国企业在越南的经营负责人等进行会谈，进一步了解中国机床工具企业在越南市场的运行状况，积极探索中国机床工具企业与越南机床市场对接的有效路径。

Metalex Vietnam 2025占用西贡会展中心一个展馆，

其参展商主要来自中国、日本、韩国、德国、中国台湾地区等国家和地区，以及越南本土的设备经销商和代理商。本届展会以零部件与辅助设备，如模具、刀具、夹具等以及测量与检测技术设备等小型展品为主，其中自动化与机器人展品不乏亮点。



日本松下下的焊接机器人



中国台湾集成商展出的发那科机械手抓取解决方案



上海沪工展出的激光焊机设备



意大利展出的3D打印设备



江苏盐城企业展出的平面磨床



中国机床企业展出的三坐标测量机



马鞍山折弯机参展企业



东莞刀具

本届展会一个明显的特征就是中国参展商数量众多，至少占据半壁江山，充分印证了中国制造企业开拓东南亚市场的热潮正在掀起。当下，越南已经成为全球制造业转移的一个重要目的地，对于中国参展商而言，通过参加展览会可以展示最新技术和产品，直接面对越南快速增长的制造业市场；通过寻找本地代理商、分销商和合作伙伴建立销售网络；并与来自各行各业的终端用户和高管进行面对面交流。



浙江美日展出的自动化工具磨单元

会谈活动

中国机床工具工业协会考察小组分别与越南配套工业协会（VASI）和胡志明市机械电气企业协会（HAMEE）进行了会谈，相互介绍了各自协会的行业属性、工作职责、运营状况等情况，并就双方共同关注的——中国机床工具行业以及相关产品技术的发展现状，越南机床工具市场的需求特点以及未来发展趋势等话题进行了深入交流。

越南配套工业协会（VASI）是一个全国性的、非政府的行业组织，是在越南政府的大力支持和批准下成立的，旨在代表和发展越南的配套工业，在越南工业和制造业领域具有重要影响力。配套工业是指生产零部件、配件和原材料，以服务于其他更大规模成品制造业的产业。例如，为汽车、电子产品、机械设备生产螺丝、模具、塑料部件、电路板等的企业，都属于配套工业。当下，越南政府正大力推动“配套工业”的发展，以提高制造业的本地化

比例和深度融入全球供应链。

胡志明市机械电气企业协会（HAMEE）是一个社会专业组织，在胡志明市工业和贸易部管理下运营，由来自机械和电气行业的企业、相关机构、学院和技术专家等成员组成，有50多家会员企业。该协会是在越南，特别是在南方经济中心具有重要影响力的行业组织。



与越南配套工业协会（VASI）会谈



与胡志明市机械电气企业协会（HAMEE）会谈

对于机床工具行业而言，这两家协会会员企业基本都是来自用户领域，两家协会积极与中国机床工具工业协会开展交流对接，在交流中都充分表达了一个共同愿望，期待中国机床协会推荐给他们更多好的中国机床工具行业企业以及相关的产品技术，包括加工中心、锻压设备、激光切割、刀具等，都是越南市场需求的主流产品，未来越南市场对中国机床产品的需求或有井喷之势。

除了通过参展企业了解情况，协会考察小组还分别与盛戈（越南）贸易责任有限公司总经理和邦德激光越南销售总监进行了会谈，进一步了解中国机床工具产品在越南市场的运营情况。其中越南盛戈贸易是越南一家颇具规模

的机床经销商，其公司旗下代理多家机床品牌，是大连机床在越南的独家代理，深耕越南机床市场多年。

越南机床市场：撬动东南亚市场的支点

据展会现场相关专业人士介绍，中国机床工具产品在越南市场的份额已经超越欧美日韩以及中国台湾等国家和地区。这一点在中国海关数据也得以体现，2024年越南是中国机床工具第四大出口国，出口额达15.9亿美元，出口增速32.97%；是金属加工机床第二大出口国，出口增速34.06%。

相较于更早进入越南市场的欧美、日韩以及中国台湾机床，中国大陆机床工具产品这两年在越南市场份额不断增加，正以优越的性价比逐渐替代欧美日韩产品，特别是关税问题加速催化这一进程。比如海天精工、北京精雕、纽威、创世纪的加工中心，以及扬锻压力机等等，这些企业产品在越南市场的口碑正在不断提升；国内激光企业进入越南市场更早，邦德激光、宏山激光两者已经深耕越南市场十年，在越南市场认可度高，采用直销模式，大族激光近几年开始涉足越南市场，但发展迅猛，依靠经销商迅速做到了市场前列。

越南制造业扩张和政府推动工业化政策促进了机床工具需求增长，而中国凭借技术优势和成本优势成为越南机床工具主要进口来源国。越南市场的表现充分证明了我国机床工具产品国际竞争力的显著提升，在东南亚市场中国替代已经悄然发生。

中国制造企业掀起开发东南亚市场热潮，越南市场成为首选之地，成为开拓该区域市场的桥头堡。越南经济发展跟中国具有高度相似性，中国企业在这里更容易复制国内的经营模式。另外，对于中国企业而言，开拓越南市场，盈利不是唯一目的，更深刻的意义在于某种程度上越南已经成为中国制造企业撬动东南亚市场的支点。

另外，越南制造业规模可观，尤其是电子、汽车、摩托车零部件行业蓬勃发展，对机床需求旺盛。近年来，在政府政策的扶持下，新能源和医疗器械成为新兴市场领域，有待进一步培育和开发。从地区角度，越南北部工业区，因紧邻首都河内，已经成为国内外企业投资的重要战略区域，近两年北部市场正在迅速赶超南部市场。据邦德激光越南销售总监介绍，2022年，越南北部激光设备市场开始超越南部市场，这一点同样体现在加工中心设备，盛戈机床也是顺应这一趋势在北部设立分公司。

据参展商介绍，越南机床工具市场当下发展阶段一个

显著特征就是低端混战、行业内卷，市场利润并不乐观，但是越南市场有诸多外部优势，包括政策扶持、规避关税战、人工成本低等等，多数企业认为越南市场当下尚属培育期，但看好越南机床工具市场未来的发展潜力已基本形成共识。

本土产业链缺失 中国替代持续升温

中国机床出口东南亚，排在第一位的目的国是越南，泰国其次。比如宏山激光已在泰国建厂，其产品出口到印度，未来或将进一步辐射土耳其市场。此外，印尼、马来西亚、菲律宾的市场都有其自身的特点，但存在相对分散，以及政策前景不明朗问题，尚在探索期。

越南乃至东南亚自身几乎没有机床主机生产厂家，其本土没有完善的机床供应链、产业链支撑主机生产。目前国内机床企业在越南建厂基本都是以装配为主的仓储类工厂，并不是真正意义的生产加工厂。越南盛戈贸易负责人表示，因为看好越南以及东南亚市场未来发展，盛戈已经开始从经销商向制造商转型，其选择在中国安徽建厂，明年将隆重推出其五轴产品和龙门产品。选择将工厂建在中国，就是因为中国本土拥有完整的机床产业链，从零部件到整机，供应链稳定，成本可控。

总体而言，东南亚市场的中国替代在持续升温中。有

相关人士表示，国产设备的可靠性指标每年提升几个百分点，稳定性逼近国际水准。虽然与顶尖产品仍有距离，但差距是在以可测量的速度缩小。除了性价比，中国替代的优势还体现在整体服务能力上。比如用户在泰国，远程诊断系统半夜弹出预警，国内团队在线修复，第二天机器如常运转。这样的维修故事并不起眼，却代表着组织能力、软件能力和服务能力整体升级。

售后服务瓶颈是国内机床厂家开拓东南亚市场需要解决的一个瓶颈问题。东南亚客户极度看重及时的安装、调试、维修和备件供应，建立本地化的服务网络是开拓东南亚市场的成败关键。据邦德激光越南销售总监介绍，目前，越南机床行业从业的售前售后技术人员处于供不应求状态，越南机床市场内卷的一个特征就是各企业之间经常互相挖人，这些懂技术的销售或者售后工程师其工资远远高于当地平均水平。

对于中国机床企业而言，开拓东南亚市场是一场持久战。在高端市场，东南亚客户对德国、日本、瑞士品牌的忠诚度很高，中国品牌常被贴上“中低端”的标签。成功的关键在于如何将“中国制造”的性价比优势与“深入本地”的渠道和服务能力结合起来，通过精准的市场定位、可靠的合作伙伴和完善的售后服务，中国机床工具企业必在这一充满活力的市场中占据主导地位。□

上接第15页

最终选择上机牌，既是对公司七十多年技术积淀的信任，也是对工业母机行业担当的认可。“该设备在实际应用中展现出稳定性能与高效产出，成为企业生产线的“印钞机”。更令人印象深刻的是，从设备搬迁方案的定制到加工难题的联合攻关，上机团队始终以用户需求为导向，通过二次开发实现技术突破，全生命周期服务充分彰显了精密制造实力。



与此同时，在与会嘉宾的共同见证下，上机与江苏兆泰新能源、唐山百川智能、上海星合机电、浙江君腾等企业达成了重要合作签约。这些合作不仅巩固了现有市场，更拓展了新能源汽车、智能制造等新兴领域的应用场景。

展望未来，王宇表示：上海机床厂将继续加大研发投入，优化产品结构，提升产品质量，拓展应用领域，实现从传统制造向智能制造的转型。上机将聚焦高精磨床，坚持自主创新，满足全球高端用户需求，力争在高端化、智能化机床领域取得更大突破，为行业的高端化转型注入新动力。

“独行者速，众行者远。”王宇在致辞中强调：“我们坚信，凭借技术实力与合作伙伴的共同信任，上机在高端装备制造国产化的道路上一定能迈上新的高度。”这一愿景与现场签约成果形成呼应，为推介会画上圆满句号。□

制造技术协会（MTA）携手The Quorum Principle 推动制造业协作创新

编译自英国制造技术协会（MTA）官网

制造技术协会（MTA）与The Quorum Principle宣布建立战略合作伙伴关系，旨在为MTA成员提供更强的协作能力，并在全球市场中获得竞争优势。

The Quorum Principle是一家专注于区块链技术和分布式账本解决方案的公司，主要为企业提供基于区块链的定制化服务。其核心业务围绕 Hyperledger Quorum（一个由Linux基金会支持的企业级区块链框架）的开发、部署和优化，帮助各行业客户（尤其是制造业、供应链、金融等）通过区块链技术实现数据共享、流程自动化和协作创新。



该合作正值英国制造业的关键时期——该行业对英国的增加值（GVA）贡献达2240亿英镑，提供260万个就业岗位，占英国研发投资的43%，并贡献了近一半的出口额。然而，该行业仍面临保持全球竞争力的挑战。

The Quorum Principle通过双重策略提升制造业绩效：一方面加强制造商与其关键解决方案供应商之间的协作，打破企业内部“信息孤岛”；另一方面推动解决方案提供商之间更紧密的合作。

根据合作协议，MTA成员将获得The Quorum

Principle创新培训和咨询方案的支持，从而通过强化协作能力建立竞争优势。

制造技术协会首席执行官 James Selka, DL 表示：

“英国制造业正面临一系列独特挑战，影响其国际竞争力和盈利能力。

The Quorum Principle 打破内部壁垒、促进协作的理念，与MTA倡导的‘协作式增长’高度一致。

我们的目标是培育一个充满活力、具有竞争力且可持续发展的英国制造业生态。

我们的会员负责设计、制造并供应现代制造所需的先进机械与设备，而此次合作将使他们更有能力抓住新机遇、消除增长障碍。”

The Quorum Principle创始人兼首席执行官 John Robinson 表示：

“如今已清楚表明，全球制造业的现有商业模式已不再适用。问题的根源在于企业在内部以及与其解决方案供应商之间的协作方式。

尽管全球许多‘工业4.0’倡议聚焦于技术互操作性，The Quorum Principle 则专注于组织互操作性，这是打破现有模式、释放制造潜力的关键。

我们与MTA的合作体现出英国制造业通过采用一种全新的协作理念，能够在全球舞台上获得竞争优势。”

Robinson 曾在 科尔尼（Kearney）、SAP、安永（EY）、Atos、AVEVA 与 施耐德电气（Schneider Electric）等公司担任高管职务，并在制造运营领域拥有十余年经验。这些多元经历帮助他于2020年提出了构成The Quorum Principle 核心的协作方法论。

通过此次合作，MTA成员将获得更强的协作能力，而MTA也通过提升成员获取前沿技术与可持续实践的渠道，进一步强化其对会员的支持承诺。□

日本机床市场：温和复苏，仍需谨慎

来源：日本机械行业相关媒体

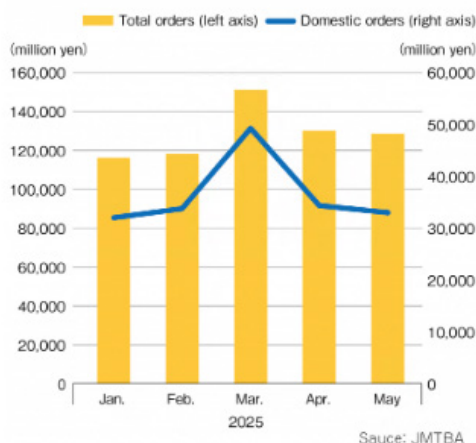
【编者按】在全球持续的不确定性背景下，日本国内机床市场仍处于谨慎停滞状态。本文将结合日本机床工业协会 (JMTBA) 发布的最新半年统计数据，探讨日本市场的现状，以更好地理解当前趋势。

尽管整体复苏，但国内订单仍持平

据JMTBA的数据，2023年日本国内机床订单同比下降约20%，2024年进一步下降7%。2025年上半年（1月至6月），机床订单总额略有增长，同比增长5.1%，达到7,775亿日元，但国内订单同比下降0.9%，至2223亿日元，这是连续第六个半年出现下降。国内订单总额也连续第四个半年低于2,500亿日元，表明日本的资本投资情绪尚未完全恢复。

日本机床工业协会会长坂元繁友评论道：“无论你问谁，答案总是相同的：‘未来充满不确定性。’”这种前景反映了一系列不确定因素，包括乌克兰和中东的地缘政治紧张局势，以及政策不稳定——尤其是特朗普政府的美国关税措施。由此产生的政治和经济不确定性抑制了制造业的资本投资情绪。

Orders up, domestic still slow
- Trends in total and domestic machine tool orders -



尽管如此，订单总额四个季度以来首次超过7,500亿日元，表明存在一定的潜在韧性。这种韧性可能反映了大中型企业持续的谨慎投资。相比之下，许多小型和微型企业仍处

于“观望”状态，通常等待补贴审批后再做出投资决策。

汽车行业低迷，但机遇犹存

对日本整体制造业趋势影响重大的汽车行业持续低迷。正如日本机床经销商协会 (JMTDA) 会长高田研至所指出的：“除非汽车行业的投资复苏，否则国内市场仍将面临困境。”

据日本机床经销商协会 (JMTDA) 的数据，2025年上半年汽车相关订单总额为419亿日元，同比下降 14.6%。预计该行业也将受到美国新关税政策的严重影响，因此其未来走势尤为值得关注。

虽然一些行业（例如半导体后端处理和能源）表现良好，但积极影响并未广泛蔓延。市场状况仍然高度“不平衡”且碎片化——不仅在行业之间，而且在公司规模之间也是如此。

例如，虽然电动汽车 (EV) 显示出放缓的迹象，但对混合动力汽车和汽油动力汽车的需求增长并未转化为大规模的新投资。然而，对提升效率技术的投资正在日益增长。同样，寻求通过自动化实现增长的公司也在积极投资设备，以增强其在日益全球化的市场中的竞争力。

在这种复杂的环境中，投资决策变得越来越复杂，一刀切的策略已不再有效。

定制化方案，释放隐藏需求

当今市场要求机床制造商和经销商采取更细致的销售和支持方式。企业不应坐等经济全面复苏，而应直接与客户沟通，识别潜在需求，并根据行业、公司规模和投资目的定制化方案。

积极主动的定制化方案对于振兴日本国内机床市场并确保未来几年的可持续增长至关重要。□

MF-TOKYO 2025: 冲压和钣金加工最新技术汇聚

来源：日本机械行业相关媒体



MF-TOKYO 2025
The 8th METAL FORMING FAIR TOKYO

July 16 (Wed.)-19 (Sat.), 2025 10:00~17:00 on July 19 10:00-16:00
Tokyo Big Sight East Halls

Organizers: **Jf** Japan Forming Machinery Association (JFMA)  THE NIKKAN KOGYO SHIMBUN

工艺集成与自动化取得重大进展

7月16日至19日，成形机械专业展览会MF-TOKYO 2025在东京都江东区东京国际展览中心举行。在为期四天的展会期间，共有271家企业和机构参展，创历史新高，吸引了31,207名参观者。

目前，该行业面临的主要挑战仍然是劳动力短缺和能源效率提升。参展商展示了专注于工艺集成和自动化的技

术，以解决这些问题，同时还推出了旨在满足新兴需求的解决方案。

符合加工机扩展切割能力

钣金加工涉及繁重的工作量，因此对工艺集成和自动化的需求由来已久。随着劳动力短缺日益严重，以及激光技术进步推动厚板加工需求的增长，对效率的要求也达到了新的高度。

山崎马扎克首次展示了“MAZAK LASER FA SYSTEM”——一套集材料供应单元、攻丝单元和自动分拣单元于一体的综合系统。整个系统由激光切割机的CNC控制器控制。在展位上，该系统以光纤激光切割机“OPTIPLEX 3015 HP”进行了演示。切割后的金属板材被输送到攻丝单元进行加工，然后再送往分拣单元。

常务董事山崎真嗣解释说：“攻丝单元甚至可以进行螺旋加工。通过将工件输送到机床外部，我们可以最大限度地提高激光切割的加工速度。”

村田机械展出了光纤激光复合加工机“LS3015MC”，该机配备了材料供给单元“FS3015TM”。LS3015MC将激光头和切割单元集成在其加工区域内，从而实现了节省空间和工序集成。该机可对厚度达16mm的板材进行复合加工，并可对厚度达25mm的板材进行激光切割。

“上一代机型已支持攻丝，而新机型还支持钻孔和铤孔加工。半导体行业对切削和加工工序的结合需求日益增长。”公司代表解释道。现场还展示了一个厚度为12mm的样品工件，以展示该机的加工能力。

下一代自动化

天田以“自动化改变制造业未来”为主题参展，携手集团公司共设四个展位。在众多新产品中，配备托盘交换装置的9kW光纤激光切割机“VENTIS-3015AJe”首次亮相国内展会。

天田还展示了其全厂数字化转型（DX）解决方案“LIVLOTS”，通过自主移动机器人“AMTES”展示了新一代自动化技术，该机器人可在落料、折弯和焊接工序之间运输工件。此次展示吸引了众多参观者的目光。

通快展示了其“TruMatic 5000”冲压激光复合机。该机配备6kW激光器，可进行高速钣金切割，并自动更换11种不同的冲压模具。

此次演示还展示了自动上下料系统“SheetMaster”，

该系统在加工过程中待在工作台附近，并立即取出已完成的工件。如果吸盘未能吸附零件，系统会检测到错误并多次重试，从而提供操作灵活性。

冲压机瞄准新应用

在冲压机领域，参展商专注于先进技术，包括下一代电池应用。

会田工程技术展出了两台专用于电池壳成型的新设备。“DIS-1600”专为圆柱形电池壳设计，行程230mm，适用于高速深拉工艺。它允许安装两排传送模具，显著提高生产效率。“传送模具采用两排配置的情况并不多见。我们将这项技术与可视化操作状态的数字化解决方案相结合，”该公司相关负责人表示。

第二台新产品“DPH-80-30”专为满足方形电池壳成型需求而开发。通过施加侧压并在一次行程中完成成型，与传统的立式压力机相比，它降低了能耗和切削油量。

放电精密加工研究所（HSK）展出了“ZENFormer nano”，这是一款在其高精度压机“ZENFormer”基础上开发的平行压合试验机。该试验机采用四个独立的伺服电机和滚珠丝杠进行平行滑动控制，可对下一代电池进行高精度压缩试验。

该公司代表解释说：“大多数试验机采用单轴操作，无法对大型下一代电池施加均匀的压力。该机器的平行控制技术解决了这个问题，并且能够实现每秒1微米的超慢速压合。”

在“未来制造伙伴”倡议的五家公司联合展位上，三机精工展出了用于碳纤维增强塑料（CFRP）的压机“CFR-0806-100”。该压机采用伺服电机控制，可以高精度成型不同厚度的CFRP板材。

大関敏也社长指出：“CFRP 压机的需求一直在稳步上升，目前有一位客户已经安装了九台。”□

上接第30页

采用PC+软CNC架构将来更多的合作方式，除了以上类似定制合作方式外，主机厂自己负责开发专属机床功能的机会就更多了，系统厂商主要负责提供稳定的硬件及软件开发培训，开发主动权更多在机床主机厂。这种合作方式在国外已经比较普遍，比如上面提到使用倍福的TwinCAT CNC进行自主二次开发的主机，所开发工艺软件机算法的知识产权、数控系统的品牌均归属主机厂，倍福只负责提供稳定的系统软硬件平台和相关的技

术培训。这种合作方式的不足之处在于主机厂和系统厂商之间的合作关系比较自由，相互的约束力很小，双方无法强制限制对方，有点类似简单的合同服务的合作方式；好处是责权利分明，双方的利益界限清楚，倍福主要负责开放式平台的技术服务，主机厂商主要负责设备功能的应用集成，双方很难产生彼此间的法律纠纷，当然双方合作的底层逻辑是对基于PC的开放式实时控制的认可。□

CIMT2025金属成形机床展品评述

中国机床工具工业协会锻压机械分会

一、展会概况

第十九届中国国际机床展览会（CIMT2025）于2025年4月21~26日在北京中国国际展览中心（顺义馆）与首都国际会展中心成功举办。本届展会首次使用全部17个室内展馆，展出面积达31万平方米，来自31个国家和地区的近2450家展商参展，成为近十年全球规模最大的机床工具专业盛会。

本届展会以“融合创新 数智未来”为主题，契合当下行业发展的技术特征与发展趋势，以推动信息化与制造业的深度融合为核心目标，聚焦数字化、智能化制造的前沿探索，为全球制造业转型升级提供了重要交流平台。

机床作为制造业的“工业母机”，随着制造业的转型升级，对高端机床的需求持续增长。从本届展会的展品情况看，金属成形机床技术的发展趋势主要包括以下几个方面：

1. 高端化发展

随着制造业的转型升级，对高端机床的需求将持续增长。通过技术创新，高端机床在精度、效率、稳定性和可靠性等方面将达到国际先进水平。智能、高速、大吨位、大行程、大台面等产品种类不断丰富，以满足不同行业的需求。

2. 智能化、自动化、柔性化发展

人工智能、物联网等技术的应用将推动机床行业的智能化发展。智能化生产将提高生产效率、降低人力成本，实现更高效的制造过程。各种类型的数控、智能锻压设备得到飞速发展，如：智能冲压生产线、智能锻造生产线、智能卷板机、智能折弯加工中心、智能数控冲压中心、智能数控高速压力机、智能数控剪切中心、智能数控激光切割加工中心、数控弯管加工中心、数控板材开卷校平线、数控辗环机、数控液压机、数控卷簧机、数控多边坡口加工机等。

3. 绿色化发展

随着环保理念的深入人心，机床企业不断加大绿色

技术研发投入，实现绿色生产，减少环境污染。使用噪声低、对环境无污染、精度高的数控伺服压力机、伺服液压机、伺服数控板料折弯机已成共识，平均节约能源超过30%，噪声降低10分贝。高节能的数控电液模锻锤、数控伺服螺旋压力机快速进入市场。

4. 个性化定制

锻压机械的功能不再是传统的单一功能、单一模式，而是复合了加工过程的不同成形工艺，以满足用户不同的工艺要求。随着消费者对产品个性化需求的增强，机床行业也迎来个性化定制时代。企业根据客户需求提供个性化的机床产品和服务，实现从大规模批量生产向定制化生产的转变。同时，数控机床将朝着高速化、高精度化、复合化的方向发展。例如，主轴转速、进给率、运算速度等方面的提升，以及运动精度、热变形控制、振动监测与补偿技术的应用，都将极大地提升机床的性能。

2025年，我国工业母机行业即将迎来国产化的关键窗口期，尤其是中高端国产机床的渗透率将显著提速。进口机床往往价格高昂，相比之下，国产品牌凭借优秀的性能和成本优势越来越受到青睐。

与此同时，国产机床企业不断发力，竞争力日益提升。例如，国产五轴联动机床已成功批量进入航空航天零部件产业链，在高端数控机床领域加速了进口替代的进程。随着新能源汽车行业渗透率持续走高，其对各类零件的加工要求也水涨船高。国内参展商表示，新能源汽车的电池、电机壳体、电池盒、减速器等零部件加工领域，正成为五轴机床新的增长点。在国产化窗口期的机遇下，中高端国产机床有望凭借自身优势，在市场中占据更广阔的份额。

二、金属成形展品概况

金属成形机床集中在E3馆。作为金属加工领域中的重要设备，其具有生产效率高、产品质量好、节能和技术集

成程度高等优点。本届展会聚焦金属成形机床行业领域的最新成果和技术突破，展示了最新研发的高精度、高效率机床，满足航空航天、汽车制造等领域对精密加工的需求，并重点突出了数字化、智能化特色。多款展品搭载人工智能、物联网技术的智能机床和解决方案，助力企业实现智能制造转型升级。随着现代技术的不断发展，金属成形机床集成了伺服技术、自动化技术、智能控制技术等多种先进技术，正逐渐向精密化、高效化和智能化方向发展，为制造业的发展提供有力支持。

1. 数控激光切割设备

激光切割行业展现出应用领域持续拓展和定制化需求增长的趋势，其在传统制造业和新兴产业中均得到广泛应用。随着制造业的快速发展和激光技术的不断进步，激光切割机凭借其精度高、速度快、加工效果好等优势，在现代制造领域占有越来越重要的地位。

本届激光切割机床展品体现出以下特点：

华工激光第五代智能三维五轴激光切割机实现全球首发，以多项突破性技术引领全球激光装备领域。该设备搭载自研FLL-ONE数控系统，关键核心部件100%自主可控，加工效率对标国际顶尖水平，可完美解决曲面工件上的切孔和修边等要求。



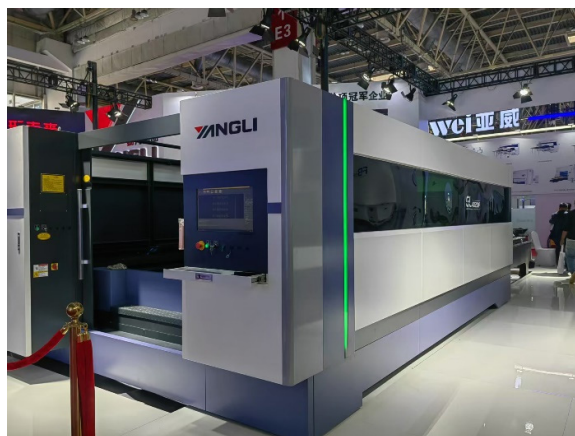
作为中国智能制造领域的头部企业，宏山激光展出GX-M高速光纤激光切割机。GX-M高速光纤激光切割机延续了GX经典家族的优异基因，经过5代更新迭代，其动态性能、加工稳定性与功能的平衡性都得到大幅提升，更有领先的切割工艺加持，在切割过程中可以做到又快又稳，保证批量加工质量，助力制造商降本增效。

激光切割机主要展现了高效、精确和灵活等优势。激光切割机通过精确控制激光束的移动路径和功率，能够实现纳米级的切割精度。无论是简单的直线切割还是复杂的曲线切割，都能以极高的精度完成，确保产品的尺寸精度和形状一致性。如江苏亚威机床股份有限公司展出的HLE-1530系列数控激光切割机，其加工范围（长×宽）为3000mm×1500mm；激光发生器功率为6kW；X-Y

轴最大速度为140m/min，最大加速度1.5G m/s²；定位精度±0.03mm/m，重复定位精度±0.02mm。HLE系列光纤激光切割机采用龙门双驱床身结构，可快速响应用户需求，省气省电省成本；采用亮面切割技术，切割速度快、坡度小、粗糙度低；退火去应力运行高效稳定；人性化操作界面与切割参数库全面升级。

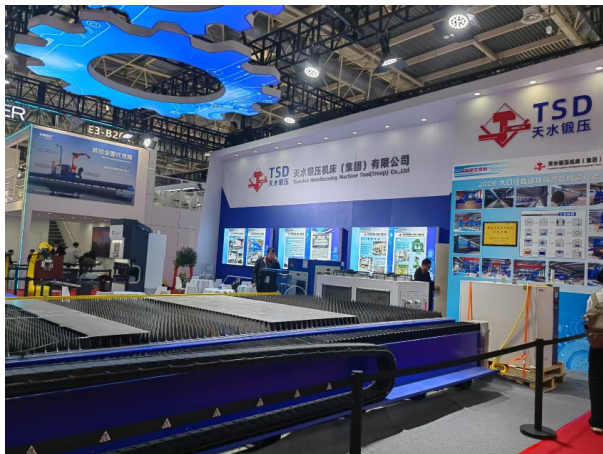


扬力集团股份有限公司GL4020F数控光纤激光切割机（12000W）采用龙门架结构、双边驱动，机身钢板焊接，毛坯退火处理，机加工后进行二次退火处理。良好的结构和高标准的加工要求保证了设备较好的动态性能和稳定的工作精度。设备采用柏楚控制系统和汇川伺服电机、高精度齿轮齿条传动，保证了机床稳定的切割精度；采用光纤激光器，光电转换效率高、切割速度快，具有免维护、使用成本低、功能强、稳定性高等优点；采用专用冷水机组双温控制，用于光纤激光器和切割头冷却，冷却效果好。快速交换工作台可大大减少工作台交换时间，提高工作效率。主要技术参数：切割板材尺寸4000×2000mm；X/Y/Z轴行程4050/2025/250mm；X、Y轴定位精度0.02mm/m，重复定位精度±0.02mm；X、Y轴进给速度169m/min；发生器功率12000W。



天水锻压展品为单台面-敞开式双驱高功率光纤激光切割机（TSD-FL30000W-13026）。主要参数：有效切割范围1300mm×2600mm；搭载30000W光纤激光器（波

长1070nm, 光束质量 $<0.373\text{mrad}$); X/Y1/Y2/Z快移速度120m/min; 工作台承重20000kg; 切割能力: 采用 O_2 切割碳钢的最大板厚50mm, N_2 切割不锈钢达40mm; 精度 $\pm 0.05\text{mm}$ (板厚 $\leq 12\text{mm}$); 最小割孔 \leq 板厚的2/3。该展品采用非接触激光切割实现无应力、无毛刺切口, 热影响区小(缝宽0.1~0.4mm), 免二次加工; 集成自动排版与数控编程, 切割面光滑, 异形件一致性好。结构经拓扑优化, 刚性强, 兼容多气体切割, 支持锈蚀/凹凸板材稳定作业, 搭配除尘排渣系统, 高效节能, 全面替代传统工艺。



2. 激光切管机

激光切管机作为一种高端智能化设备, 其主要应用领域涉及汽车、航空航天、管道制造、石油化工等行业。其中, 汽车领域是激光切管机的主要消费领域之一, 随着汽车行业的快速发展, 激光切管机的市场需求也在逐步增长。此外, 随着节能环保理念的普及, 生产环节对工业自动化设备的需求也越来越高, 国内企业正逐步向激光切管机的技术升级和研发方面投入更多资源, 未来的市场竞争必将更加激烈。

本次展会大族激光智能装备集团有限公司展出T6025T三卡盘重载型激光切管机。主要参数: 加工范围圆管 $\Phi 40 \sim \Phi 630\text{mm}$ 、方管 $\square 40 \sim \square 450\text{mm}$; X/Y/Z定位精度 $0.05/\pm 0.01/\pm 0.01\text{mm}/1000\text{mm}$; 重复定位精度 $\pm 0.05/\pm 0.01/\pm 0.01\text{mm}$; X/Y轴最大定位速度60/40m/min。主要技术特点体现在采用侧挂式焊接床身+全行程一体式卡盘设计, 大管小管切换无需更换卡爪; 切割头可越过第二卡盘实现零尾料切割; 浮动下料机构适配多种管材, 防止下垂, 提升加工精度。

邦德激光在本届展会上展出12000四卡盘零尾料多通道全工况自加工激光切管机, 采用四卡盘结构, 四卡盘双工序并行加工, 在切割最后一截工件时能够带料正向或反向移动, 真正实现0尾料切割, 单张板材加工效率提升25%。

宏山激光TX3R-9090S重型切管机应用了新一代360mm全行程方通孔卡盘, 适应各类不同尺寸管材与型材的加工需求, 重管切割能力尤为出众, 可应用于建筑、航空航天、能源和运输等领域。技术上, 应用了零尾料切割技术、静态切割技术等多种先进技术, 不仅优化了材料利用率(实现零尾料切割), 还在切割过程中保持管材静止以确保加工精度, 并且减少卡盘移动行程以节约能耗。

奔腾激光(浙江)股份有限公司展出的激光管切攻丝机。主要参数: 激光功率6kW; 切管范围覆盖圆管 $\Phi 15 \sim \Phi 245\text{mm}$ 、方管 $\square 15 \sim \square 245$; 可加工M5/M6螺纹孔。其技术特点: 半自动上料设计提升便捷性; 支撑装置确保切割稳定与精度; 攻丝功能扩展了激光管材加工应用范围, 满足多样化加工需求。

江苏亚威机床股份有限公司展出YTG-6012-3000W-FMC激光切管机。其主要参数: X/Y/Z轴行程6800/250/240mm; 切管范围覆盖圆管 $\Phi 5 \sim \Phi 120\text{mm}$ 、方管 $\square 5 \sim \square 120\text{mm}$; 最大管材重量单管/料库50/1000kg; X/Y轴最大速度150m/min, 加速度1.5g; A/B最高转速150r/min; 机床定位/重复定位精度 $\pm 0.05/\pm 0.03\text{mm}$ 。主要技术特点: 全自动/半自动双模上料系统; 集成坡口切割与焊缝检测扩展功能; 采用纳米级插补与微秒级响应技术保障切割精度; 伺服托料系统配合创新尾料优化设计显著降低材料损耗, 形成高效智能的管材加工解决方案。



3. 数控折弯机、折边中心、折弯单元

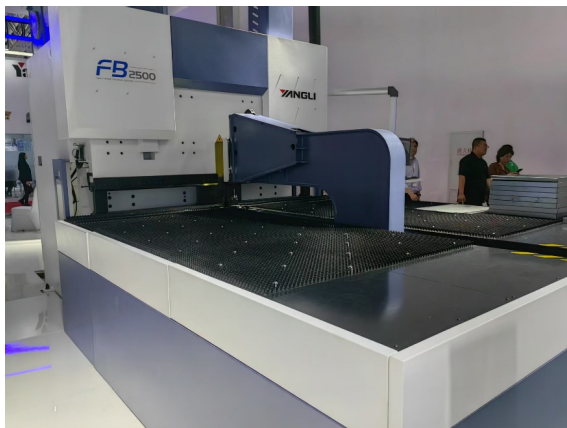
数控折弯机广泛应用于汽车、飞机制造、轻工、造船、集装箱、电梯、铁道车辆等行业。不同行业对折弯机的需求特点不同, 如汽车行业对折弯机的精度和稳定性要求较高, 而建筑行业更注重成本和效率。随着市场需求个性化和多样化的增加, 折弯机也在向定制化和柔性化方向

发展。新型折弯机设计更加灵活，可以根据客户需求进行定制，适应各种复杂形状和规格的板材加工需求。

本次展会江苏亚威展出PBE-35/1250电伺服折弯机。主要参数：公称力350kN；工作台长度1250mm；立柱间距1050mm；滑块行程150mm；装模高度480mm；滑块快下速度200mm/s；滑块重复定位精度 $\pm 0.01\text{mm}$ 。PBE电伺服驱动折弯机全电无油、低能耗、少维护，机器更稳定可靠；采用悬臂式控制系统和可升降工作台，操作使用更方便；机器占地面积小，可融入各种生产流程，运输极其方便。



扬力集团股份有限公司展出FB2500数控多边折弯中心。这是专门针对箱柜、电器柜等行业而开发的自动化折弯产品，可以根据折弯工艺自动完成上折、下折动作，实现圆弧、压死边、各种角度的组合折弯，为企业节省大量的人工和模具成本。设备采用全伺服控制，重载滚珠丝杠驱动，速度快、稳定性高、无液压油，节能、环保、经久耐用；采用基于PC自主开发数控系统及倍福控制器，应用EtherCAT总线技术，具有折边所需的专用软件功能。主要技术参数：折弯长度2500mm；进料宽度1500mm；折弯高度175mm；最小板厚0.4mm；控制轴数12轴。



南京蓝昊智能科技有限公司展出LHA06-2000A自动拼刀智能柔性折弯中心。最快折弯速度0.2s/刀；最大送料速度90m/min；最大折弯宽度2000mm；最大折弯尺寸长2000mm×宽1500mm；最大折弯高度170mm（含含页刀尺寸）；最小折弯高度3mm；最小圆弧半径0.5mm；最大折弯厚度：UTS 515N/mm² 304不锈钢1.5mm、UTS 410N/mm²冷板2.0mm；四边成形最小内尺寸约150mm×200mm（不含含页刀尺寸）；双边成形最小内尺寸约150mm；折弯角度0~180°。设备采用自主研发的智能数控系统，根据折弯工艺应用蓝昊独家专利自动拼刀算法实现自动拼刀，无需人工拼刀，业内综合效率最高。标配折弯辅刀，可根据折弯局部工艺自动完成拼刀。可更好解决客户多品种小批量的钣金折弯需求，拼刀速度更快、效率更高、精度更好、应用范围更广。已广泛应用于文件柜、工具柜、电气柜、通讯柜、厨具、家具、通风、净化、制冷、装饰、门业、电梯等近百个领域。



瑞铁机床（苏州）股份有限公司展出全新一代纯电伺服数控折弯机。该机拥有超前的设计理念，搭载具有自主发明专利的多驱组合式传动结构技术，高效节能、环保、高精度。该折弯机主电机输出功率几乎等于负载功率，机械传动效率高达95%；滑块空载回程耗电量小，节能显著；纯电技术无需液压油，根本不存在废油废液的污染问题，绿色环保。该折弯机的快慢速转换及下死点定位均通过伺服电机及丝杆控制，整个工作循环过程响应速度更快，效率提升近两倍。纯电伺服数控折弯机主要依靠伺服电机与丝杆传动驱使滑块上下运动及定位，丝杆传动不会产生较高的热效应，更适合长时间高精度运转。



泰安华鲁展出一台电液伺服折弯机，公称力1300kN，工作台长度3200mm；补偿工作台宽度100mm；喉口深度400mm；立柱间距2700mm；滑块行程200mm；开启高度485mm；主伺服电机功率9kW；控制轴数6+1轴（分别为Y1、Y2、X、Z1、Z2、R+V）。

4. 数控精密机械压力机

高速精密压力机是金属成形和冲压行业的重要生产设备，以其高精度、高效率 and 低能耗著称。近年来，随着自动化和智能制造技术的发展，高速精密压力机的控制系统和加工精度得到显著提升，能够满足复杂零件的批量生产需求。同时，行业正积极探索压力机的模块化和智能化，以提高生产灵活性和响应速度。未来，高速精密压力机行业将深入融合物联网和人工智能技术，实现设备的远程监控和预测性维护，降低停机时间和维护成本。绿色环保、节能减排是全世界的共同话题。锻造成形需要克服巨大的变形阻力，传统的大型液压式压力机体积大、能耗高，机械式高速压力机、电动伺服驱动压力机为锻压机械的节能转型带来新的发展途径。相较于普通压力机，高速精密压力机更为安全、高效、高精度。近年来高速精密压力机市场也得到了较好的发展。以济南二机床、扬力集团、扬州锻压、徐州锻压、广东锻压、浙江易锻、浙江易田、山东沃达重工为代表的压力机企业发展势头强劲。

扬力集团展出SCP1-63开式单点伺服压力机。整机精度达到JIS一级精度；机床角刚度达A级标准，整机线刚度达A级标准；伺服控制系统自主研发；可内置100套模具存储；内置曲轴模式、多连杆模式、保压模式、单边模式等多种常用运动曲线；系统开放高级编程模式，可自定义运动曲线。本系列机床采用伺服电机直驱齿轮传动，能够实现精密的位移控制，适用于需要高精度加工的场合，下死点动态精度达 $\pm 0.01\text{mm}$ 。通过复杂的电气化控

制，可以任意编程滑块的行程、速度和压力，即使在低速运转时也能达到压力机的公称吨位。主要技术参数：公称力630kN；滑块行程130mm；行程次数80spm；最大装模高度300mm；装模高度调节量80mm；工作台板尺寸580mm \times 900mm \times 100mm（前后 \times 左右 \times 厚度）；立柱间距580mm；伺服电机额定功率44kW；伺服电机额定扭矩1067N \cdot m；空气压力0.55MPa。

江苏亚威机床展出APL.SA-TR80全自动伺服冲压线。该线由双工位存料台+15kg五轴关节机器人+SKE1-80伺服电机+步进出料皮带等系统构成，采用伺服压力机的锻打+保压冲压模式，完成980MPa高强钢的折弯成形，单元最大节拍6spm。实际组线时生产节拍可达10spm。单元具备磁性分张、二次定位、称重双张检测、压机自由编程等功能。该系统具备无限扩展能力，可以兼容所有开式单点压力机的组线需求。

扬州锻压机床有限公司JH21D伺服压力机。公称力800kN~10000kN；公称力行程4~13mm；滑块行程140~220mm；行程次数15~80SPM。设备采用自主研发的数控系统；高刚性焊接机身；高精度八面长导轨；伺服电机与传动轴一体化直驱式结构；低速高扭矩电机，体积小，效率高；可编辑滑块运行速度，提高产品合格率及生产效率；节能环保，超低耗电量。

广东锻压机床厂有限公司展出HS1-110伺服控制开式单点精密压力机。其参数：公称力（在5mm处）1100kN；滑块行程180mm；无负荷连续行程次数0~60spm；工作能量6000J；最大装模高度350mm；工作台尺寸1100mm \times 680mm；滑块尺寸630mm \times 520mm；伺服电机最大扭矩6000N \cdot m；伺服电机额定转速350r/min；使用空气压力0.3MPa。该机具有高精度、柔性化、生产率高、低噪声、低振动、操作和维护简单、安全性能高、调模方便、节能等优点。

合肥合锻智能制造股份有限公司多工位机械压力机。开发生产的500~3200t大型多工位机械压力机，配置三次元机械手，可实现10~25SPM；800~1000t多工位压力机，配置三次元机械手，可达到15~40SPM。具备全自动换模、生产线速度自动匹配、自动监控和自动调用工艺参数等技术特点。

江苏省徐州锻压机床厂集团有限公司DPC1-200开式单点伺服压力机。公称力2000kN；公称力行程6mm；滑块行程200mm；行程次数0~60 SPM；最大装模高度450mm；装模高度调节量110mm；工作台板尺寸(前后 \times 左右)820mm \times 1400mm；滑块底面尺寸(前后 \times 左右)650mm \times 850mm。设备采用西格玛泰克数控系统；伺服

直驱技术使全行程速度、位移可调可控，具有多种工作曲线满足不同模具工艺要求，高效柔性，提高模具寿命；高能伺服电机以及能源管理系统的加持，无离合器及空程损耗，节能效果明显；减少噪声污染及油污，绿色环保。

江苏亚威机床股份有限公司SSE1-200门式单点精密伺服压力机。公称力2000kN；公称力行程6mm；滑块行程200mm；无负荷最大行程次数45SPM；最大装模高度450mm；装模高度调节量110mm；滑块底面尺寸(左右×前后)850mm×650mm；工作台面尺寸1150mm×850mm×170mm；冲床精度符合日本JIS 1st class 1级。设备搭载低转速、大扭矩专用伺服电机；高速现场总线技术使从站节点同步精度小于1μs；可任意设定和改变加工过程中的运动曲线；全稀油循环润滑，平衡气压自动调整；模具数据库功能可存储99套模具；具备关键部位轴温监测功能；存储12种常用工艺曲线。

浙江易锻精密机械有限公司展出的OCPS-110。其优势如下：可以任意设定和改变加工过程中的速度，生产易用性优越；与传统压力机相比，通过回程提速，生产效率可显著提高；可对行程高度与运动顺序进行编程，生产灵活性好；可优化运动顺序，提高零部件质量和延长模具寿命；高效驱动解决方案降低了能源消耗；与传统压力机相比，机械零部件数量更少，更易于维护；配备手轮微调功能可大幅缩短试模时间。

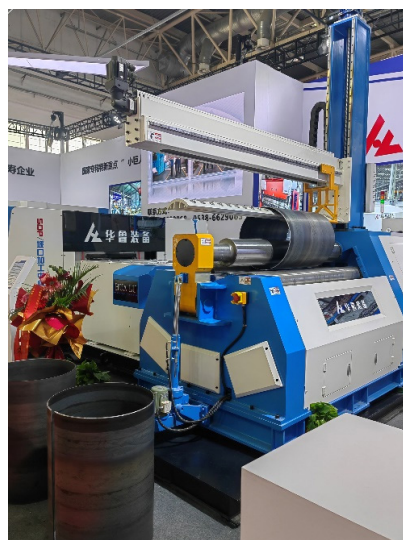
浙江易田精工机械股份有限公司展出APZ系列15~150t高性能行程固定式肘节连杆冲床。肘节连杆冲床的优点主要体现在两方面：一是冲床的机构设计。角度 α 较小，滑子部分X方向虽有微小变化，但难以影响下死点位置；因为角度 β 在90°以下，连杆的延展和肘杆的延展引起的下死点变位相互抵消。二是成形效果。在下死点附近的停留时间（成形时间）比曲轴式冲床时间长，成形效果使产品精度稳定。且在下死点放缓滑块速度，有助于延长模具寿命，提高产品品质。

三、其他

泰安华鲁装备科技集团有限公司的智能柔性板材上料校平坡口卷板线是集上料、矫平、坡口和卷板功能于一体的高智能成套柔性生产设备。其采用模块化可重构设计（MES-MOM架构），可实现工件从钢板到成形构件的全流程无人化加工。整条产线长约15m，宽约5m，板材最大加工厚度6mm，最大加工板材宽度1000mm。

该产线生产工艺流程为：板材上料→板材矫平→板材坡口→板材卷板出料。产线整体由六自由度协作机器人上料单元、高精密切平系统、高精度坡口加工站、数控四辊

卷板机组及桁架物流出料系统组成。



南京埃斯顿展出专用激光下料机器人ER50B-2700、专用折弯机器人ER45-2200、专用冲压机器人ER15-1520、专用弧焊机器人系统ER8-1450-HW+ERG350H ECO-35、力控打磨系统、数字孪生系统等钣金行业一站式成套解决方案。



四、结语

全球制造业正在经历前所未有的变革浪潮。一方面，CIMIT2025充分阐释了机床行业继续向更高速度、更高精度、更高效率方向发展的趋势；另一方面，随着AI技术的快速发展和应用，AI技术与机床深度融合，新一代智能机床成为未来趋势。从具体的应用和方案实施上看，如智能化与数字孪生的深度融合、柔性化与模块化设计的广泛普及、超精密与复合加工技术的深入突破、绿色制造与可持续技术的全面推广、新型材料加工解决方案的快速进展等等，无不展现出机床行业生机勃勃的发展势头。

（下转第46页）

CIMT2025工业制冷机展品评述

三河同飞制冷股份有限公司 解 静

在全球制造业加速向高精密化、绿色化、智能化转型的背景下，工业制冷机作为机床热管理系统的核心配套设备，正经历着技术革新与产业升级的双重变革。随着5轴联动加工中心、激光切割机等技术装备对加工环境温控精度要求的不断提升，以及全球“双碳”战略对制冷剂环保性能的规范，工业制冷行业呈现出高精度温控、环保冷媒应用、节能能效优化三大技术主线的深度融合。

由中国机床工具工业协会举办的第十九届中国国际机床展览会(CIMT2025)于4月21~26日盛大举行。展会规模浩大，首次同时启用首都国际会展中心和中国国际展览中心共计17个展馆，汇聚了来自全球30个国家和地区的知名机床工具产品的展商，展示了当下机床工具产品领域的前沿技术和创新成果。

在这一全球机床工具行业风向标盛会上，工业制冷机领域集中展现了从材料工艺到智能控制的全链条创新成果。以三河同飞制冷股份有限公司（同飞股份）、珠海格力智能装备有限公司（珠海格力）和广东省铨冠智能科技有限公司等为代表的参展企业，通过新型环保冷媒、智能变频控制、模块化系统设计等技术突破，不仅解决了传统制冷设备能效低、冷媒全球变暖潜能值（GWP）高、占地面积大等痛点，更实现了与数字孪生、AI算法的深度耦合。这些创新成果标志着工业制冷机正从单一温控设备向机床热力系统协同优化平台演进，其技术发展脉络既呼应了《中国制造2025》对绿色智能制造的政策导向，也为装备制造业的能效革命提供了底层技术支撑。

一、高精度：微米级温控的工艺革命

在超精密加工领域，温度波动已成为制约加工精度的核心挑战，据研究表明，温度每波动0.2℃，机床主轴变形约0.001mm，以5轴联动加工中心为例，主轴热变形导致的定位误差占总误差的40%~70%。对于工业制冷机多通

过能量调节技术和变频技术进行高精度温度控制。

在CIMT2025展会中，珠海格力通过变频压缩机和电子膨胀阀构建双闭环控制系统，结合PID控制算法，将油温波动抑制在±0.1℃以内。同飞股份进一步迭代的MCOI、MCWI、MCSI变频系列机组，采用EC永磁同步风机与变频压缩机协同控制，在负荷突变工况下实现±0.1℃温控精度，最高精度可达±0.02℃。

加工中心电柜的温度控制以及振动控制对加工精度同样重要，在CIMT2025展会中，同飞股份工业空调可进行壁挂式、嵌入式、门装式等多种方式安装，采用机组内置蒸发装置；同时采用减振结构设计（如低振风机、铜管避震管结构等），运行状态下机组的运转振动可低至0.5m/s²。相对于常规机型振动值1 m/s²降低了50%。

此外，三河同飞的“一键智能联控”——物联网将机组与移动端APP或PC端连接在一起，实时监控机组的运行信息、设置机组的运行模式，实现不同控温需求的实时变更。

随着技术的创新与进步，温控精度将会持续提升，下一步高精度温控将向纳米级波动抑制和多物理场协同控制（温度+振动+洁净度）发展。工业温控精度持续提升将作为各工业制冷公司未来的战略布局，该战略可同时推动超精密加工设备国产化进程，提升我国整体超精密加工实力。

二、环保化：环保冷媒迭代与低碳制造

为履行《蒙特利尔议定书》基加利修正案等国际协议，各国对氢氟碳化物（HFCs）实施严格配额管控。中国自2024年起冻结HFCs生产配额，并计划2029年启动削减进程，《中国制冷剂替代路线图》要求2027年前淘汰R22工业设备，R290/R32渗透率达45%；欧盟则要求2025年HFCs排放削减75.7%，GWP>750的制冷剂（如R404A）禁止用于新装机，计划2050年完全淘汰。全球政策的趋势

迫使行业加速淘汰高GWP值制冷剂。

基于环保冷媒的发展进程要求，同飞股份及国内外工业制冷机行业已经开始全面推进环保冷媒技术。展台中央的MCWI-50C-01Z6-3405C-ZJ机组采用R290冷媒，其全球变暖潜能值（GWP）仅为3，较传统冷媒低约99.7%（R134a）。同时MCOI、MCSI变频系列也推广R513A（GWP=631）、R32（GWP=675）等符合全球趋势的冷媒。

环保冷媒迭代既是国际履约和国内政策驱动的刚性要求，也是应对气候危机的必然选择。政策约束与环保需求形成合力，推动行业向低碳、高效方向升级。与此同时行业也将面临许多挑战如：可燃冷媒安全性、环保冷媒与传统系统适配性不足、传统冷媒产能过剩与环保冷媒成本较高等问题。面对挑战，业内企业提出应对措施：针对可燃冷媒安全性问题，可通过微通道防爆设计和智能泄漏监测系统降低风险；针对环保冷媒适配性问题，可开发动态配比控制算法，根据工况自动调节混合制冷剂比例，提升系统全场景适应性。

绿色制冷剂迭代需突破技术、成本、安全等多重壁垒，通过政策引导、技术创新与产业链协同形成合力。未来需重点发展混合工质技术、优化成本分摊机制，并强化标准体系，以实现环保目标与经济性的平衡。

三、节能化：变频技术驱动能效跃迁

在全球“双碳”战略及中国《工业制冷设备能效限定值能效等级》新国标（GB 19577-2024）的推动下，工业制冷领域正经历能效标准的全面迭代。在CIMT2025展会

中，同飞股份推出的TF EcoCool系列变频水冷却机，采用R290等环保冷媒，综合能效COP提升50%，使用变频压缩机制冷，根据实际冷量需求（适用于2~7kW冷量范围）自动调整压缩机运行频率，避免了定频压缩机因频繁启停控制冷量输出带来的能量损耗，使其更加高效节能，可直接服务于5轴机床等高精度设备。

在CIMT2025展会中也凸显了机床产业对于节能设备的需求，例如：山东豪迈数控机床有限公司（简称“山东豪迈”）的卧式五轴加工中心THB1150配套MCWI变频系列机组，与普通水冷却机相比综合耗电量可节约30%~50%。

四、总结

工业制冷机在CIMT2025展会中，清晰勾勒出精密制造与绿色制造双重战略下的产业进化路径。通过高精度温控算法、环保冷媒工程化和变频能效优化的三维突破，工业制冷已从传统辅助设备转型为智能制造系统的核心热管理单元。当前技术革新不仅有效缓解了机床热变形这一制约加工精度的世界性难题，更通过R290等近零GWP冷媒的应用，构建起覆盖设备全生命周期的碳减排技术范式。面向未来，工业制冷行业需在材料科学（新型相变储能介质）、控制理论（多物理场耦合建模）和能源架构（余热回收与微电网集成）领域持续突破，以应对超精密加工、氢能装备等新兴领域的热管理挑战。随着《中国制造2025》与全球碳中和议程的深度交织，工业制冷技术的迭代将不仅是能效指标的提升，更是推动高端装备制造业向精密化、低碳化、智能化跨越的战略支点。□

上接第44页

尤其值得一提的是，智能机床的发展正在进入快车道，行业厂商需要高度重视，及早布局，以免在智能时代落伍。从CIMT2025展品表现出的智能机床特征来看，新一代智能机床将深度融合AI、数字孪生、边缘计算、自主决策等智能技术；其动态感知、实时优化、全链协同，重构制造流程的精度、效率与可持续性核心特征将迈上新台阶；自动化与柔性生产的关键技术——工业机器人、自动上下料、智能检测等——将进一步得到广泛普及应用；产品从单机自动化到全厂柔性智造的完整解决方案将广泛覆盖；同时，复合化的集约功能将继续得到不断进步和发展，冲切复合、剪折复合、激光与成形复合等各种复合功能单元将继续得到应用和发展；绿色与节能技术也将得到深化和提高，包括备受关注的能量回收、低碳工艺、碳足迹追踪等功能。

可以预见的是，未来新兴技术、创新产品将继续呈现

爆发式增长，这是由我国巨大的市场和海量的需求所决定的。近年来，C919大型客机量产，航空航天新技术新产品不断涌现，推动难加工材料精密加工需求爆发式增长；新能源相关设备保持火热，汽车行业一体化压铸车身工艺、风力发电机叶片规格不断加大，推动铝合金加工、电机制造成为新风口；AI技术的突破性发展成为半导体产业新的增长引擎，半导体行业向先进制程迈进，对纳米级精度的光刻机基座、刻蚀机腔体等专用机床需求爆增，对先进冲床的市场也带来了新的机遇和挑战；光学、医疗等领域对亚微米级加工的需求旺盛，人形机器人市场的大爆发带动超精密车床需求井喷等等。这些新兴市场的快速发展带来了市场扩容空间，行业企业只有紧跟需求和发展趋势，积极研发满足市场需求的产品，抢占市场先机，才能在激烈的市场竞争中立于不败之地。□

CIMT2025落地镗展品评述

通用技术集团机床工程研究院 周 萌

一、概述

CIMT2025展会首次使用首都国际会展中心和中国国际展览中心全部17个室内展馆，展出总面积达31万平方米，为近十年来全球规模最大的机床工具专业盛会。来自全球31个国家和地区（含中国）的近2450家展商参展，来自13个国家和地区的机床协会、贸促机构等组团参展，机床工具协会11个分会组团参展。

本届展会落地镗展商共16家，其中有实物展品展商6家，共展出7台实物，其中进口一台，为意大利PAMA公司SPEEDMILL3000B落地式镗铣床；国产6台，分别为通用技术齐二机床的FBC160BRL，青岛辉腾的TK6920和KN07，山重机械TK6916，武汉国威TKD6920主轴箱，河南帆尔特FRT-130B。无落地镗实物展品展商10家，包括意大利INNSE，西班牙SRALUCE、JUARISTI，捷克道斯TOS、斯柯达SMT、飞马特FERMAT，韩国起兴（KIHEUNG），武重、济二、纽威等品牌。

二、部分展品信息

（1）意大利PAMA展出的SPEEDMILL3000B落地式镗铣床，机床支持5轴联动精密镗孔，适用于能源、工程机械、石油和天然气、模具、通用加工等领域。总体为正挂式落地镗，采用热对称结构，主轴箱位于中心位置，热稳定性好。X、Y轴采用直线导轨（X轴两线轨，Y轴4线轨），Z轴采用静压导轨。X轴采用双电机+双减速机+齿轮齿条进给结构，通过电气系统控制自动消除齿轮、齿条间的传动间隙，传动精度高、效率高、性能可靠。Y轴采

用双电机+双减速机+双丝杠，传动精度高、效率高、性能可靠。Z、W轴采用电机+减速机直连丝杠，结构紧凑、传动精度高。直线轴快移速度可达25m/min。直驱主轴，内置式电机，2档变速，机械部件减少30%，传动间隙小，主轴最高转速3500 r/min，最大扭矩2494N·m。具备自动热补偿功能，通过直接测量，CNC时时控制主轴热伸长并进行补偿，减少90%以上由热伸长引起的误差。静压滑动主轴，使主轴获得更高的刚性和最大的阻尼，提高抗震性，延长刀具使用寿命，提高W轴定位精度。



（2）通用技术齐二机床展出的FBC160RL落地镗铣床，该机床主要应用于船舶、传统能源、新能源风电、模具、石油机械等加工领域。采用热对称结构，主轴箱位于中心位置，热稳定性好。采用正挂式主轴箱结构，X、Y、Z轴全采用重载直线导轨，主轴转速3000 r/min，直线轴快移速度30m/min，定位精度0.008mm/1000mm，重复

定位精度0.006mm/m。机床在主轴转速、快移速度、定位精度、重复定位精度等主要技术参数与竞品相当，达到国际先进水平，但是在直线轴行程与竞品还存在一定差距，且精度补偿手段单一。可靠性、稳定性、精度保持性等还需进一步验证。



(3) 青岛辉腾展出的TK6920数控落地镗铣床，该机床主要应用于风电、工程机械、通用机械等加工领域。X、Y、Z轴采用恒压式静压导轨。滑枕悬垂补偿采用滑枕双液压拉杆+伺服比例阀分配前吊点压力。机床框架尺寸及基础大件截面尺寸均优于其他厂商同规格产品。此外，该公司还展出了KN07落地镗铣床，主要应用于风电、工程机械、通用机械等加工领域。此产品出口定制款，无主轴结构，搭配进口0.001度/分自动万能铣头。补偿采用滑枕双液压拉杆+伺服比例阀分配前吊点压力。X、Y轴采用恒压式静压导轨，Z轴采用重载直线导轨。



(4) 山工重机展出的TK6916数控落地镗铣床，适用于冶金、矿山、能源发电、造船、钢铁、交通运输等设备大型零件加工。该产品是山工重机自主研发的河北省首台数控落地镗铣床。机床导轨采用静压导轨，具有刚性好，抗震性好的特点。主轴箱为整体封闭式箱体，滑枕支撑在

全封闭的方形孔中，整体刚性好。



(5) 河南帆尔特展出的FRT-130B数控卧式镗铣床，适用于重型机械、工程机械、机车车辆、注塑机、矿山设备、大型电机、水轮机、汽轮机、船舶、钢铁、军工、核电、环保等机械加工领域优选加工设备，尤其适于船舶、新能源、航空航天、汽车、工程机械、包装、轨道交通、五金橡胶等各种机械加工领域的大型零件加工，以及加工精度要求较高、结构复杂的各种超大、超重型零件加工。正挂式落地镗：热对称铸铁结构，主轴箱位于中心位置，热稳定性好。机床导轨采用两线一硬：X、Y采用重载直线导轨，Z轴采用滑动导轨。X、Y、Z、W轴均采用电机+减速机直连丝杠，结构紧凑。主轴箱平衡采用双油缸平衡。



三、展品分析

1. 主要技术特色

本届展会落地镗铣床展品数量较往年显著增加，表明国内企业对中低端产品的技术掌握已趋成熟，市场重心正向高端领域转移。从结构类型看，展品主要分为侧挂箱式与正挂箱式两类，参数均呈现高精度、高速度、高稳定性的发展趋势。正挂箱式结构因刚性及热稳定性优势，成为

主流布局。意大利PAMA、通用技术集团齐二机床、河南帆尔特等企业均展出此类产品，其对称结构为整机精度稳定性提供核心保障。

主轴技术呈现双轨演进：机械式主轴仍广泛采用；直驱主轴技术加速渗透，通过减少传动链部件降低间隙误差，如意大利PAMA、通用技术齐二机床、武汉国威都采用了直驱主轴技术。从参展的展品来看，国内产品主轴转速一般在2000~3000r/min，定位精度一般0.008~0.02mm/1000mm，重复定位精度0.006~0.015mm/1000mm。国外产品主轴转速一般在3000~4000r/min以上，定位精度可达0.008mm/1000mm，重复定位精0.006mm。

此外，本届展品在整体功能性方面展现出较大进步的同时，工业设计也实现同步升级，产品外观风格也有较大改进，在外观美学与功能性融合上实现了双突破。

2. 本届展品亮点

亮点1：意大利PAMA主轴精度补偿技术综合应用

意大利PAMA公司SPEEDMILL3000B落地镗采用滑枕四拉杆补偿+立柱双拉杆补偿+主轴箱双拉杆补偿等多种补偿方式相结合，补偿主轴精度。实现主轴伸出直线度 $\leq 0.02\text{mm}$ 。

- 滑枕四拉杆补偿：顶面两根采用比例阀控制，底面两根为固定拉杆，补偿滑枕挠度变形，并通过接近开关检测拉杆补偿极限。

- 立柱双拉杆补偿：立柱采用热对称铸铁结构，并在左右各增加一根液压拉杆，增加立柱刚性。

- 主轴箱双拉杆补偿：主轴箱底面采用两根拉杆，通过比例阀控制，补偿主轴箱重心偏移。

亮点2：武汉国威TKD6920主轴箱

武汉国威展出最新研制TKD6920主轴箱，亮点如下：

- 性能参数：主轴直径200mm，滑枕截面500×500mm，Z轴行程2000mm，W轴行程1400mm，加工范围广。



- 主轴精度补偿：采用滑枕双液压拉杆补偿滑枕挠度变形，采用机械伺服补偿机构补偿主轴箱重心偏移（增加测力传感器）。补偿前，滑枕伸出时变形约0.2mm，补偿后，滑枕伸出时变形约0.02mm。

- 直驱技术：主轴采用伺服电机+双速变速箱直驱结构，减少了传动机构的机械部件数量，传动间隙小，主轴最高转速3000 r/min。

四、落地镗产品发展趋势

1. 正挂箱式结构高端化发展普及

热对称设计成为高精度保证的核心方案，正挂式主轴箱的热对称结构逐渐成为各厂家研究热点。目前国内外已有较多厂家在应用，以本次展会为例，采用该结构的厂家有意大利PAMA、通用技术齐二机床、河南帆尔特等企业，该结构在高精加工中有其技术优势，将在高端镗削产品中得到快速发展。

2. 高速高效加工技术升级

提升机床的加工效率成为各厂家的共识。传统镗削产品以低速重载、强力切削为主要特点，近几年，高速加工正在逐渐成为镗削产品发展方向，进给轴快移速度、主轴转速都有较大幅度提升，在高速主轴方面，越来越多厂商采用主轴直驱技术；在快速进给方面，各厂家均采用了能实现高速的精密滚动直线导轨或者静压导轨结构。以本次展会为例，PAMA的SPEEDMILL 3000B主轴直径160mm，主轴最高转速达到4000 r/min，直线轴快移速度达到25m/min。

3. 智能精度补偿体系逐渐成熟

各厂家对高效、稳定的精度补偿机构综合应用也越来越普遍，传感器、检测技术、补偿等技术集成应用，有效提高机床精度及可靠性。以本次展会为例，PAMA的SPEEDMILL 3000B采用滑枕顶部两根液压拉杆+滑枕底部两根拉杆预紧+滑枕座底部两根液压拉杆、ATC自动热补偿、HSS静压主轴等核心技术，极大地提高机床精度，完全满足航空航天、汽车模具等高端市场需求。

4. 复合工艺能力扩展

镗削机床的配置越来越丰富，可根据用户的实际需求提供多类型的高精度附件铣头、数控平旋盘等功能附件。如辉腾配置0.001度/分全自动万能铣头，西班牙尼古拉斯克雷亚的AXIA系列可通过模块化扩展实现激光熔覆修复功能。其余厂家也展示了不同形式的五轴头、A摆头等，极大地提高了机床工艺范围及加工效率。□

CIMT2025双端面磨床展品评述

新乡日升数控轴承装备股份有限公司 孔 艳

一、概述

本次展会双端面磨床与研磨机共有 14 家企业参与，其中 12 家国内企业携 21 台设备亮相，国外企业无实体设备展出。国内参展企业包含新乡日升数控轴承装备股份有限公司、宇环数控机床股份有限公司、湖南宇晶机器股份有限公司、北京特思迪设备制造有限公司、广东科瑞精密研磨技术有限公司、东莞金研精密研磨机械制造有限公司等众多业内知名企业。外资企业的参展规模明显收缩。斯达利公司仅以静态模型展示产品设计概念，莱玛特沃尔特斯（沈阳）精密机械有限公司则主要通过大屏幕动态演示和产品样本进行宣传。这种展示形式的转变以及参展数量的大幅减少，从侧面彰显了国产设备在市场中强大的替代能力。

此次展会共展出 17 台研磨机，其中 1200 及以上规格的有 4 台，大规格产品数量达到历次展会之最。从加压方式来看，6 家企业展示了 9 台气缸加压的机床，这类机床性价比颇高；5 家企业带来 7 台气囊杠杆加压的高精度研磨设备，其数量同样为历届展会最多。该类设备的上盘具备自动恒温及调平功能，整体高度降低，

更有利于提升精度，且大多兼具研磨和抛光功能，相对价格较高；还有 1 家企业展示了伺服驱动加压的机床。值得一提的是，4 家企业展示了机械手自动上下料结构以及磨削、研磨组成的自动化生产线。

双端面磨床方面，国内 3 家企业共展出 4 台设备，数量为历年之最，主要以单面磨削方式应用于半导体材料减薄领域，国外品牌均未参展。目前，高精度双端面磨床以其可达 $2\mu\text{m}$ 的加工精度以及便捷的自动上下料功能，正逐渐扩大其应用范围至更多领域。

双端面磨床与研磨机搭载 CBN 砂轮、金刚石砂轮及研磨盘，通过载盘带动工件在磨盘间旋转，可对钢铁、铜合金、硬质合金、复合材料、玻璃、陶瓷等金属与非金属硬质材料，以及半导体材料实施双面磨削减薄加工。该加工模式凭借精密控制技术，使双面精磨效率提升，同时确保产品平行度与平面度达到 $\pm 1\mu\text{m}$ 的高精度标准。设备以其高通用性与高精度特性，能够满足机械制造、电子信息、航空航天等多领域，不同材质及形状零件的平行平面精密加工需求。

二、部分代表展商及展品特点

1. 双端面研磨机

（1）新乡日升数控轴承装备股份有限公司的 2M84100C 双端面研磨机（见图1）

这款研磨机搭载的砂轮盘尺寸为 $970 \times 380 \times 55\text{mm}$ ，其上厚 6mm 的 CBN 磨料层为高效研磨提供了坚实基础。该设备的最大加工直径可达 285mm ，加工厚度为 $0.4 \sim 100\text{mm}$ ，适用范围极为广泛。其加工精度卓越，典型工件的加工平行度和平面度 $< 0.001\text{mm}$ ，等高度 $< 0.002\text{mm}$ ，表面粗糙度 $< \text{Ra}0.2\mu\text{m}$ 。



图1 2M84100C 双端面研磨机

该设备融合创新架构、智能控制与精密设计于一体，打造出高效可靠的加工体系。铸铁床身有效抑制加工时的振动与形变，为高精度加工提供稳固的刚性支撑；上下盘可灵活选用CBN、金刚石等多种砂轮，能适配金属、硬脆材料等不同材质的加工需求，展现出强大的工艺兼容性。

核心传动系统采用三电机独立驱动模式，通过比例阀控制的气缸压力调整方式，能够精确调控中心轮、上盘、下盘的速度与转向以及压力的大小，为复杂工艺提供灵活的解决方案。搭载的PLC控制系统搭配人机交互界面，支持同一加工流程五段参数自定义设置，能直观呈现运行数据，充分满足用户多样化的工艺需求。设备采用组合轴承支撑的转台式下砂轮主轴结构，保障端面精度长期稳定；上主轴与加压缸通过调心轴承浮动连接，在超薄零件的加工方面，展现出显著的优势，能够稳定地完成厚度 $<0.8\text{mm}$ 产品的高精度磨削，从而有效扩展了设备在航空航天、电子精密部件等对超薄零件需求旺盛领域的应用范围。

在智能化与便捷性设计上，设备可存储30种零件磨削参数，方便调用，大幅提升生产切换效率；集成的在线测厚系统以 $\leq \pm 1\mu\text{m}$ 的精度实时监测加工过程，磨削前预检测功能可对零件厚度异常自动报警，有效规避加工风险；故障自动诊断系统通过文字说明和直观图片定位问题，便于快速维修；六段压力与转速自动转换机制，结合在线尺寸测量功能，实现加工过程的动态优化；配备工业通信接口，支持远程实时操控。此外，设备还可选配机器人自动上下料系统，降低人工成本，提升生产效率，以卓越性能和人性化设计，为精密磨削加工提供一站式解决方案。

该设备已在轴承零件、粉末冶金

电机组件、制冷压缩机零部件、液压气动元件、油泵油嘴零部件、汽车零部件、航空航天发动机零部件、密封件、摩擦片、量刀具、仪表、硬质合金刀片、陶瓷阀芯等多个领域得到广泛应用。

(2) 湖南宇晶机器股份有限公司的YJ-SJM1200B双端面研磨机

这款超精密双面磨削设备砂轮盘尺寸为 $\phi 1200\text{mm}$ ，最大工件直径为 $\phi 310\text{mm}$ ，厚度为 80mm 。它以强大的技术集成与创新设计为核心，来实现高效精密的双面磨削减薄加工，可满足多领域研磨、抛光的复杂工况需求。



图2 YJ-SJM1200B 双端面研磨机

该设备的传动系统采用三电机直驱架构，上盘配备双气囊加压技术和低阻尼线轨，配合德国进口的伺服驱动器，确保了运行的平稳性，并能将压力波动精确控制在 $\pm 1\text{kg}$ 以内，实现了对上盘、下盘及中心轮的精确驱动。上盘的四点平衡控制系统实现了对盘面的平行调节以及旋转/固定模式的无缝切换，自主专利技术的磨盘集成热管理系统，集成了温度与振动检测功能，保证机床在 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 的恒温环境下进行精密加工。此外，安全装置的设计有效预防了上盘意外跌

落的风险。下盘传动系统实现了高精度，盘面端跳控制在 $\leq 15\mu\text{m}$ 以内。

基于反复测试研发的高精密气控系统、电涡流非接触式测控单元与平稳强力驱动技术，使这款设备不仅具备高效的研磨能力，还拥有高精度的平面加工性能，从而扩展了工艺的适应范围，显著推动了该类结构产品的国产化进程。此外，上盘亚克力

整体护罩美观实用，设备表面特氟龙材质便于日常维护；齿圈、中心轮应用内嵌低摩擦材料的圆柱销齿，提升了游星轮转动灵活性与使用寿命。

该设备研磨产品平行度、平面度达 $\leq 1\mu\text{m}$ 的高精度水准，使之在光学玻璃加工、半导体芯片制造等领域得到应用。随着6G通信、人工智能等新兴技术的发展，对光学器件和半导体芯片需求呈爆发式增长，其市场前景极为广阔，有望在高端制造领域占据重要份额。

(3) 宇环数控机床股份有限公司的YH2MG84125高精度立式双端面研磨（抛光）机（见图3）

该设备砂轮盘尺寸为 $\phi 1250\text{mm}$ ，加工工件尺寸最大为 420mm （直径或对角线长），厚度为 $0.4\sim 40\text{mm}$ ，主要用于研磨、抛光零件的平面。



图3 YH2MG84125 高精度立式双端面研磨（抛光）机

在核心驱动与控制技术上，该设备优势显著，采用四个伺服电机分别独立驱动上盘、下盘、内齿圈及中心轮，实现高精度的协同运转与独立控制，确保设备运行稳定、精准。气囊加压结构配合精密电气比例阀，能精准调控上盘压力，保障各工件所受压力均衡，为高精度加工提供可靠基础。

在结构设计与性能优化方面，上盘中心轴组件配备关节鼓形齿轮，赋予上盘 360° 小间隙旋转的自适应能力，可灵活适应不同加工需求；上盘滑动座组件下部创新性地设置四个平衡气缸，构建起精密的四点平衡控制机制。该机制协同形面检测系统，在设备运行全程持续监测上盘姿态与盘面形变数据，通过实时分析反馈，动态校准并精准调节平衡气缸压力，确保上盘下降过程中与下盘始终保持极高平行度，从根源上避免因平行误差损伤工件。此外，上盘兼具旋转与静止功能，配合特定工艺，能有效解决 TTV（总厚度变化）问题，提升加工质量。

设备在材料应用与温控系统上也独具匠心，上下研磨 / 抛光盘选用热膨胀系数极小的新材料殷瓦钢，降低温度变化对盘面平整度的影响；托盘与研磨 / 抛光盘内置冷却液通道，搭配高低温冷却机双路循环冷却系统，进一步减小盘面变形，保障加工精度。封闭式齿轮箱结构具有低振动、高精度、高稳定性的特点，为高精度加工提供坚实保障；与磨液接触的零部件采用不锈钢材质或高性能特氟龙防腐处理，大幅提升设备的耐腐蚀性能与使用寿命。

在智能化与便捷性配置上，设备搭载自动在线测量系统，可实时精确控制工件磨削厚度尺寸，降低撞机风险；盘面温度感应系统与盘面调整系统作为可选配置，增强设备智能化水平。机床加工程序采用配方管理与多段式加工模式，操作便捷高效；设备还预留自动上下料功能接口，便于后续升级扩展，满足自动化生产需求，展现出强大的技术前瞻性与实用性。

该设备在碳化硅、蓝宝石、陶瓷覆铜板、陶瓷基板等材料的加工方面具备独特优势。这些材料的核心价值在于有效突破高温、高频、高功率场景下的技术瓶颈。随着新能源、新能源汽车、智能制造、6G 技术以及航空航天领域的蓬勃发展，该设备的应用范围也将不断拓展。

（4）东莞金研精密研磨机械制造有限公司的 KD10DL 高精度双端面研磨机（见图4）。

这款精密加工设备配备了日本松下伺服系统作为核心驱动器，其出色的动态响应和精确控制性能确保了设备在各种工作条件下都能稳定、可靠地运行。在线砂轮修整系统实时监控并调整盘面精度，保持了磨削作业的高精度水平。

设备搭载高精度、高刚性的台湾主轴系统，结合台湾品牌精密线轨与滚珠丝杆的传动组合，通过伺服驱动加光栅尺实现微米级位移控制，保障加工

精度，使得加工后的厚度公差和平面度公差能够控制在 0.002mm 以内。人机交互与控制系统采用日本三菱 PLC 程序架构搭配触摸屏界面，既能实现参数可视化调节，又具备设备安全防护功能，有效提升操作便捷性与运行安全性。



图4 KD10DL 高精度双端面研磨机

自动化加工流程依托爱普生 SCARA 机器人构建全闭环上下料系统，通过减速器驱动丝杠控制料盘升降、位移传感器精准定位、加工时光栅尺实时反馈进给位移，形成“上料 - 取料 - 装夹 - 加工 - 清洗 - 取料 - 检测 - 补偿 - 下料”的全自动化作业链条。由气缸驱动的推料装置配合尺寸检测模块与自动补偿机制，确保加工精度的一致性。水箱过滤系统集成纸带过滤与工业级恒温冷却装置，维持磨削液洁净与工况稳定；配套的油雾收集器净化加工环境，兼顾生产效率与环保需求，为精密制造领域提供智能化、高精度、绿色化的综合解决方案。

2. 双端面磨床

（1）宇环数控机床股份有限公司推出的高精度数控立式双端面磨床 YHMG7758（见图5）。

该磨床凭借卓越性能与创新设计，为精密加工领域提供了高效解决方案。磨床适配两种规格砂轮，树脂砂轮尺寸为 $\phi 585\text{mm} \times \phi 195\text{mm} \times 75\text{mm}$ ，CBN / 金刚石砂轮为 $\phi 585\text{mm} \times \phi 195\text{mm} \times 65\text{mm}$ ，可满足不同材质的加工需求。加工件外径范围为 $\phi 10 \sim \phi 120\text{mm}$ ，厚度为 0.8~40mm，磨头最小进给量达 0.001mm，转速 100 ~ 890r/min，送料盘转速 1~10r/min，各项参数精准匹配多样化加工场景。

在结构设计上，采用上下箱体立式布局，上箱体四角

支撑角度可调节，确保上砂轮相对下砂轮的高精度定位，结构紧凑且角度保持性良好。双矩形硬轨滑动副取代传统线轨，以面接触增强主轴抗弯矩刚性，配合贴塑镶条降低摩擦、延长使用寿命，通过配铲刮与调节螺栓实现高精度间隙控制。固联式送料机构将送料台与下箱体固定，并设置辅助顶紧装置，保障送料台面精度，为强力磨削提供稳定支撑。

技术创新是该磨床的一大亮点，新型摆臂式双滚轮修整机构采用行星式轨迹，金刚滚轮由液压马达驱动高速旋转，修整臂带动双滚轮在磨削区域摆动公转，有效消除砂轮内外线速差导致的修整误差，使修整型面精度达微米级，攻克了传统单点式修整的精度难题。搭载西门子 808D 控制系统，实现精准高效的自动化加工，为精密零件的双端面磨削提供可靠保障。

在应用上，主要用于汽车零部件、液压元件等行业的精密加工。例如对轴承、活塞环、阀片、密封件、油泵叶片、硬质合金刀片等零件的双端面磨削，保证零件的尺寸精度和平面度，提升产品性能。随着汽车产业向新能源方向转型以及液压行业的技术升级，对高精度双端面磨床需求将持续增长，市场前景广阔。



图5 YHMG7758数控立式双端面磨床

(2) 东莞金研精密研磨机械制造有限公司通过式双端面磨床 KS450TL (见图6)。

该磨削设备采用通过式磨削方式，即工件在砂轮之间的导轨上连续传送进行加工，适用于加工余量较小、对生产率要求较高的工件，且采用单面磨削方式，更侧重于半导体材料的单面减薄。

在核心部件与传动系统上，设备搭载高精度高刚性 NSK 主轴系统，结合重型线性导轨与精密滚珠丝杆的传动进给方式，不仅有效降低摩擦损耗、延长设备使用寿命，

还借助通过式磨削方式提升加工精度。控制系统采用施耐德 PLC、触摸屏与伺服系统的组合方案，实现设备运行的智能化调控与便捷操作。



图6 KS450TL通过式双端面磨床

在工艺优化方面，采用硬修整砂轮盘技术剥离不锋利晶体，显著降低砂轮修整消耗，提升使用效率；水箱过滤系统集成磁性分离器、纸带过滤与工业级恒温冷却装置，保障磨削液洁净与温度稳定。此外，设备支持自动上下料装置选配，可根据工件尺寸、加工批量及精度需求，灵活升级为全自动连续加工模式。

该设备在半导体制造、太阳能光伏等行业发挥重要作用。在半导体芯片制造中，对硅片进行高效减薄加工；在太阳能光伏产业，用于硅片的单面磨削，提高生产效率和产品质量。随着半导体和光伏产业的蓬勃发展，其市场需求将不断扩大，市场前景乐观。

(3) 磨研自动生产线

广东科瑞精密研磨技术有限公司展出的磨研自动生产线由 DDV300XS 立式双端面磨床 + 自动上下料装置 + DSM1000 研磨机组成 (见图7)，致力于实现高效率、高精度的生产目标。

DDV300XS 双端面磨床采用行星磨削方式，工作时上主轴进给，下主轴固定，加工尺寸达标后工件转出。砂轮主轴配备推力角接触球轴承与双列圆柱滚子轴承，确保磨削过程稳定、高效。主轴进给导轨采用矩形贴塑滑动导

轨，具有导向精度高、承载能力强、抗振性好的特点。该设备采用双工位磨削模式，通过叠加磨削时间与换件时间，有效提高加工效率。工装夹具设置内外双工位，内工位用于加工，外工位实现工件交换存放，以内孔定位工件外圆，带动工件旋转完成双面磨削。上料机与下料机采用定位滑台式结构，支持人工或第三方自动化设备上料，经模组机械手与工作台交换实现全流程自动化加工，满足小批量多品种生产需求。主要加工工件包括连杆、陶瓷刹车盘、转子、齿轮等。

DSM1000 双端面研磨机以高强度铸铁床身为基础，保障设备运行稳定性。配备独立可调大功率电机与高精度主轴结构，结合电控比例阀实现加压闭环控制，多层防腐轴密封设计增强设备耐用性。该设备具备 μm 级分辨率在线尺寸测量功能，确保加工精度。



图7 磨研自动生产线

在这条生产线中，DDV300XS 双端面磨床与 DSM1000 双端面研磨机采用摩卡机械手臂全自动加载方案，实现全线加工速度匹配，大幅提升生产效率，降低人工成本，同时保

障产品质量稳定性，为生产制造提供可靠的技术支持。

三、结语

(1) 技术发展方向与市场需求变化

众多企业的积极探索，推动了精密双面磨削设备技术朝着智能化、精密化与多功能集成方向发展。在驱动与控制方面，多伺服电机独立驱动系统实现高精度协同运转，气囊加压结合比例阀控制技术，使压力调节精度达到国际先进水平；结构设计上，四点平衡控制、关节鼓形齿轮、上盘锁紧装置等创新结构，有效提升设备自适应能力、平行度控制水平与安全性。材料与温控技术不断突破，殷瓦钢等低膨胀材料及双路循环冷却系统的应用，显著降低温度对加工精度的影响。

智能化配置已成为技术进步的核心。通过自动在线测量、动态补偿以及模块化温控系统的应用，实现了加工过程的实时监控和精确控制；核心组件如机械手的使用，显著提升了自动化水平；智能化的生产协同增强了生产效率和柔性制造的能力；设备功能的集成度不断提高，集研磨、抛光等多种复合加工能力于一体，能够适应多种磨盘和材料。这些技术创新帮助国产装备突破了国际市场的垄断，凭借其高精度和高效率的特点，满足了航空航天、精密制造、半导体加工等高端领域严格的需求，并加速普及，有力地推动了国内制造业向高端化的发展。

随着制造业各领域对产品精度、质量和生产效率要求的不断提高，市场对具备高精度、智能化、多功能的双端面磨床设备需求持续增长。尤其是在新兴产业如新能源汽车、半导体、人工智能等快速发展的背景下，

对关键零部件的加工精度和表面质量提出了更高标准，进一步刺激了对先进磨床设备的需求。

(2) 行业现状与未来发展

从本次展会企业地域分布与产品布局来看，国内双端面磨床、研磨机及抛光机产业已形成河南、湖南、广东三大核心产业集群。各区域依托差异化技术积累与产业生态优势，在自动化生产线集成、高精度研磨抛光工艺等前沿领域不断突破，构建起覆盖全技术梯度的产品矩阵。与之形成鲜明对比的是，国外机床企业在国内中低端市场的参与度急剧下降。随着国产设备技术快速迭代、市场份额稳步扩大，国内已基本完成该领域的国产化替代。这不仅标志着国产装备在中低端市场占据主导地位，更意味着其正逐步向高端制造领域发起挑战。

产业规模的迅速扩张促使市场格局发生深刻变化。随着双端面磨削、研磨、抛光生产企业数量增多，中低端市场尤其是中端领域竞争愈发激烈，同质化产品引发的价格战成为行业显著特征。技术迭代推动市场结构重构：双端面磨床凭借不断提升的加工精度和自动上下料优势，逐渐抢占双端面研磨机的传统市场；抛光机通过功能拓展兼容研磨工艺，挤压研磨机的市场空间。

展望未来，双端面磨削行业的发展必须专注于技术创新和产业升级转型。企业需要增加核心技术的研发投入，提高产品的智能化水平和制造精度，从而打破同质化竞争的僵局，并以高端化和差异化的产品开拓新的市场领域。此外，企业需加速国产部件的替代进程，降低对进口部件的依赖程度。积极推广自动化、数字化、智能化的发展，以增强产品的竞争力，并在高端装备制造领域占据有利位置。□

高性能、绿色化、智能化

——CIMT2025滚动功能部件部分展品评述

通用技术集团机床工程研究院有限公司 田 壮

一、概述

2025年4月21日至26日，第十九届中国国际机床展览会（CIMT2025）在首都国际会展中心和中国国际展览中心（顺义馆）盛大举办。本届展会主题为“融合创新、数智未来”，旨在促进信息化技术与制造技术的深度融合，探索未来数字化和智能化制造之路。“高精、高效、数字、智能、绿色”是本次各参展商展出产品的主要特色，人工智能、机器人、物联网等前沿技术的融入，为传统制造业开辟了新的发展之路。通过梳理各家展品，可以基本概括为五个主要看点：工艺集成催生新结构、数字创新提升竞争力、少人无人制造新时代、精准定制开拓新市场、绿色发展树立新标杆。

丝杠、导轨类滚动功能部件广泛应用于各种工业装备中，从数控机床到机器人，再到航空航天装备，是不可或缺的基础核心部件。滚动功能部件需具备高效节能、精密定位、精密导向、对数字控制指令反应敏捷，以及实现传动的高速性、同步性、可逆性等性能，是数控机床和机电一体化产品的关键配套产品，其品质直接影

响各类装备的性能与精度。

本次展会聚焦高端机床核心功能部件的技术创新，重点参观了40余家滚动功能部件类产品参展商，包括蒂业技凯（THK）、施耐博格（SCHNEEBERGER）、日本精工（NSK）等国际知名厂商，其中南京工艺、汉江机床、台稳精密、宁波亚德克等国内供应商也展示了其技术实力与产品。深入了解了滚动直线导轨、滚动圆弧导轨、LM滚动导轨、LM滚动导轨智能组合单元、i4.0BS智能型滚珠丝杠、行星滚柱丝杠、大型重载滚珠丝杠副、滚珠花键等相关产品。

二、重点展品情况

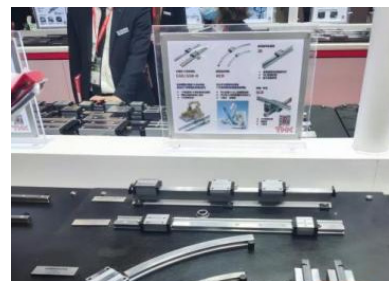
1.国际厂商主要展品情况

（1）蒂业技凯（THK）

作为全球线性导轨与丝杠的奠基者，在“滚动接触”技术领域稳居行业龙头。此次重点展出了机床用LM滚动导轨、滚珠丝杠、LM滚动导轨智能组合单元等。LM滚动导轨是全球率先将直线滚动部件付诸于实际应用的产品，它使开发高精度、高刚性、节能型、长寿命的高速机床成为现实。



此外，THK还带来了全新的OMNI edge丝杠导轨检测技术，通过运用自主研发的微振动传感技术，可以检测丝杠导轨的微型振动，精准控制停机，实现丝杠导轨的预测性维护；PPR技术也是本次THK展出的另一大亮点，将力传感器、LM滚动导轨、空压设备、Z轴电机、θ电机、制动器集成，形成轻薄的一体化结构，安装简便、节省配线，可实现高速P&P，可在轴心位置距离16mm间距时叠装，对工件的冲击值可以抑制到0.3N以下。





(2) 柯尔特 (Korta)

展出的产品从标准组件到成套系统, 提供了涵盖所有直线传动产品范围的全方位服务。Korta的丝杠导轨成套系统具有出色的承载力、高刚性、高精度、高可靠性的优点, 同时能满足运行平稳、高温/低温、真空环境、洁净室等特殊应用需求。在机床行业迈向智能化、高端化、定制化和绿色制造的新时代, Korta的全方位服务在突破效率瓶颈、实现降本增效上展现更多的优势。



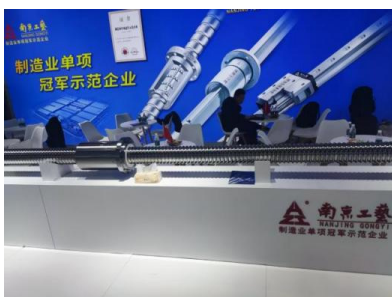
(3) 日本精工 (NSK)

展出的MT-Frix低摩擦滚珠丝杠, 摩擦减半, 发热减少。同等刚性下, 动摩擦力矩最高降低50%, 发热最高降低40%, 与以往产品的安装尺寸完全兼容, 降低能耗为碳中和做贡献; NSK直线导轨 NH型 / NS型高顺畅选配产品, 适用形式 NH15~25, NS15~30系列可选择使用, 通过高运行性技术改善动摩擦, 缓和了滚动体间的碰撞, 实现平滑顺畅的运行; 高精度机床用螺母冷却滚珠丝杠, 采用强制冷却维持高精

度, 和轴芯冷却拥有同等的强冷却效果, 无需轴芯冷却所必须的密封单元, 可阻断对机床的传热。

2.国内厂商主要展品情况

(1) 南京工艺



参展的直线导轨涵盖GZB、GGB、GGD、GGC、GGF等多种系列、覆盖多种规格的产品, 重点展示了导轨的高性能特性, 包括重载、高精度、高速度、低磨损、高可靠性等; 滚珠丝杠产品规格覆盖广泛, 从大到小一应俱全, 其中包括最大规格直径为 $\phi 245\text{mm}$, 单根丝杠长度为10m, 最大额定动载荷125吨。适应各种应用场合的滚珠丝杠副。最小规格直径仅为 $\phi 6\text{mm}$, 导程为1mm。此外, 南京工艺还展出了DKFZD端法兰式高速高精滚珠丝杠副、JF/JFZD矩阵式大型重载滚珠丝杠副等一批具有自主知识产权的新产品, 彰显了其技术实力。另外, 厂家还展出了AI型、AII型等多种型号的滚珠花键副, 该类产品通过精密磨削的花键轴和精密钢球传递转矩, 具有高承载、长寿命和传动效率高的特点, 广泛应用于各类直线运动系统。

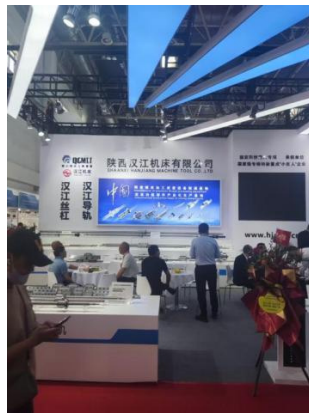


(2) 宁波亚德客



展出了自主研发的线轨新产品自润滑线轨: 增加自润滑器, 储油量多, 可润滑行程长, 大幅延长注油周期; 耐高温线轨: 适用温度 $-20\sim 150^{\circ}\text{C}$; 静音型线轨: 噪声较标准型降低4.1分贝; 新款高防尘线轨DD型: 应对木屑等软质粉尘, 增加刮油片数量, 增加上防尘片, 加强侧防尘片, 防尘片一体式牢固, 可靠防尘能力再升级。直线电机模组+线轨具备自动调心能力, 采用正面组合X型弧形滚道槽设计, 即使安装面有少许误差, 也能保持高精度平滑稳定直线运动。

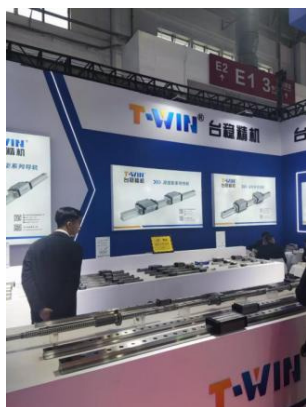
(3) 陕西汉江机床



参展的产品包括精密滚珠丝杠副、重载滚珠丝杠副、高速静音滚珠丝杠副、强冷滚珠丝杠副、耐腐蚀滚珠丝杠副、行星滚柱丝杠副、滚珠丝杠花键副等, 广泛应用于数控机床、航空航天、高铁、汽车、船舶、核电、石油、工程机械、冶金、医疗、自动化等国家重点行业。其中, 其强冷滚珠丝杠副的丝杠、螺母采用中空

双循环流体通道结构，该技术结合动态热平衡算法优化冷却效率，显著抑制热伸长对定位精度的影响。耐腐蚀滚珠丝杠副采用多层复合镀层工艺，有效保障海洋工程装备与化工设备的长期稳定运行需求。公司可针对不同领域、不同行业需求提供滚动功能解决方案及定制专用产品。

(4) 台稳精机



展出了LS高扭矩直线导轨副、LR滚柱直线导轨副等产品，重点推介了独具特色的研磨级端面循环滚珠丝杠副，采用自主研发的端塞反向器结构滚珠螺母，适用于大导程、要求高刚性、低噪音以及温升控制较高的应用场景。另外，台稳还可根据用户需求制造特殊外形的端面循环滚珠螺母，以方便客户集成使用。LS高扭矩直线导轨副采用四列圆弧O型排列设计，能承受更大的扭矩，同时具备高刚性、高负荷的能力；可配备防尘钢带，防尘钢带采用316不锈钢制造，卡装在滑轨上，有效防止异物在安装孔内的积累。该类产品适用于高速、高扭矩、高污染环境等严苛工况。LR滚柱直线导轨副以圆柱滚动体替代钢珠滚动体，在承受相同负荷时的弹性变形量更小，因此在相同尺寸的直线导轨副上可提供更高的刚性和负载能力，所用圆柱体较市场上同类产品的滚动体在直径和长度上更大，所获得的刚性和负载也更强。

(5) 广东凯特



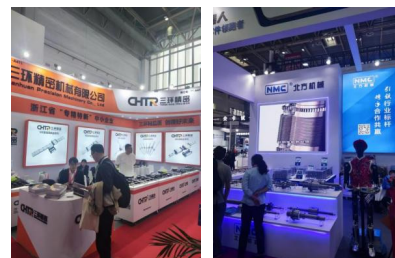
参展的产品包括LGR12~125滚柱直线导轨副，其规格覆盖12~125mm，具有承载能力大、刚度高、运动精度高、寿命超长、密封防尘性能优异等特点，最高速度达120m/min，最高加速度达2g；以及LGS15~65滚珠直线导轨副，该系列产品特点包括：具备自动调心能力，可有效吸收安装偏差，实现高精度稳定运动；具备高刚性，四列沟槽设计使各方向承载均匀，预压可进一步提高刚性；具备高密封性，提供多种密封件方案，能适应多粉尘、木屑或铁屑等严苛环境，经测试可在此类恶劣条件下长时间免维护运行。

(6) 福建恒而达



展出的产品主要包括：直线导轨SSA系列（H15、H20、H25、H30、H35、H45、C15、C20、C25），四列单圆弧接触式设计，自动调心，四方向等载功能。可通过调整预压力提高承载能力，适合精密、高载荷及平稳运行要求的工况；DSA系列（15、20、25、30、35、45）高性能设计，适用于多种工业场景，低噪音，高顺畅度，性价比高；SUA

系列（25、30、35、45）采用滚子替代钢珠，45°角接触设计，四方向等载功能。三大系列均具备低噪音和运行顺畅的特点。SSA系列适合精密工况，SUA系列适合重负载、高刚性需求，适用于精密设备、重切削机床、高负载自动化设备等。



此外，此次展会上，台湾鼎汉、北方机械、三环精密机械、浙江得利亚、丽水杰祥科技、江苏领臣精密机械、烟台艾迪、易格斯、亿孚传动等厂商也展出了相应的产品。

三、国内外展品技术对比分析

从本次展会上调研的相关展品来看，机床滚动功能部件发展到目前主要的技术亮点包括：

(1) 高精度、高速化与静音化。今年各个厂家都推出了高精度丝杠导轨产品，以此突破同质化竞争格局；众多厂家也陆续推出了高速静音产品，积极步入高端制造领域。

(2) 多级化与重载化。现代重载产品已突破“传统重型结构”的局限，更强调高预压负载能力的实现，这一点在本次展出的丝杠导轨产品上有突出体现。多级伸缩丝杠应用场景广泛，制造

难度高，尽管技术门槛高，但多家企业也已布局并推出相关产品。

(3) 行星滚柱丝杠的应用拓展。相比滚珠丝杠，行星滚柱丝杠在承受高负载、抵抗冲击以及适应高速运行方面更具优势，目前已在航空航天等全球高精尖领域广泛应用。其同时也作为人形机器人的核心线性执行器，可高效用于机器人的手臂、腿部以及灵巧手等关键部位。目前多家企业展出了行星滚柱丝杠产品，并已具备小批量生产能力。

(4) 自润滑与低摩擦技术。例如，THK的导轨产品通过微量注油系统实现自润滑，摩擦系数可降低至0.003（较传统产品显著降低），使导轨的免维护周期延长至5年。

(5) 新材料的应用。采用钢基+陶瓷涂层的复合材料，凭借其优异的耐磨性等特性，已在导轨、丝杠等传动部件上获得广泛应用。

(6) 预测性维护技术的深度融合。该技术已深度融入功能部件的日常使用场景中，为提升传动系统的使用寿命和可靠性带来了质的飞跃。

对比国内外主要展品的技术侧重点来看，其差异显著。国外参展商的亮点主要集中在新材料、新技术、新结构的创新上，包括智能传感监测技术、表

面处理技术、防尘技术等，其目标在于突破传统传动部件的技术壁垒，向高速化、高精度方向重点发展；而国内制造商的主要发展方向则在于深耕专业化领域的细分分工，以不同机床的实际要求为切入点，以不同行业领域的技术需求为导向，通过行业需求驱动创新，向“专、精、特、新”方向重点发展。

四、总结与展望

通过本次展会可见，国产功能部件在中端市场已具备显著竞争力：南京工艺、汉江机床的C3级精度丝杠实现量产，凯特精机导轨成功打入中端市场，表明国产部件已基本具备替代能力。但在高端领域，国产功能部件仍需突破材料、算法、标准三大核心壁垒。具体表现为：

①产业链短板：高端钢材等核心原材料依赖进口；

②研发投入不足：国际巨头研发占比超8%，国内企业普遍低于3%；

③技术积累薄弱：国外拥有数十年工艺经验（如THK导轨预紧技术），国内追赶周期长；

④应用验证缺失：国产部件在高端机床及严苛场景中缺乏验证机会，迭代速度慢；

⑤质量标准滞后：现行国家/行

业标准在智能化、绿色化、数字化领域覆盖不足，如数字孪生与预测性维护缺乏统一接口规范导致设备互联互通困难；绿色标准宽松（机床能耗较欧盟低20%~30%），且国产部件国际认证比例低，标准约束力弱，行业共识难以凝聚。

结合展品趋势，未来机床核心滚动功能部件技术发展方向如下：

(1) 智能化与数字化融合

功能部件广泛集成传感器，实时监测温度、振动、磨损等参数，结合云端数据交互优化加工精度与维护效率。基于大数据与AI算法预测故障风险，最大限度减少停机时间，可视化监测进给系统运行情况，为机床的可靠性提升带来质的飞跃。

(2) 高精度与高可靠性

通过采用陶瓷、复合材料、超合金等新型材料，提升核心功能部件的耐磨性和抗疲劳性能，满足航空航天、新能源汽车等领域对精密加工的要求。

(3) 绿色制造与节能技术

通过推广无油润滑、低噪音设计，以及可回收材料的应用，响应全球绿色制造趋势；通过直驱技术（Direct Drive）减少传动链能量损耗，提升整体能效，将在高端机床中广泛应用。□

资讯

天锻公司助力伊莱特超大装备核心部件项目投产

9月25日，天锻压力机有限公司研制并配套的全球最大的2.2万吨自由锻压机、最大22米轧环机、300吨操作机等先进装备组成的全球顶级自由锻造产品线在伊莱特公司正式投产。

该设备能够生产出最大环件直径达22米、最大高度达5米的各类锻造件，它标志着我国在超大型锻件制造上实现了自主可控，为我国高端重型

装备核心部件的自主化制造提供了有力支撑。

自2022年加入通用技术集团以来，天锻公司依托央企平台，在技术创新、资源整合、产业链协同等方面持续发力，不断向高端化、智能化、绿色化迈进。该条产品线的成功投产，不仅彰显了天锻公司服务国家重点领域的技术担当，更充分展现了我



国装备制造产业链协同创新的合力，为推动高质量发展注入动力。

基于层次分析法探讨机械零部件 三化设计评估

通用技术集团机床工程技术研究院
江苏烽禾升智能科技有限公司

初光宇
白紫山

【摘要】本文聚焦机械零部件通用化、系列化、组合化（简称“三化”）评估研究，深入剖析“三化”在机械制造领域的重要意义，构建包含通用化、系列化、组合化维度的综合评估指标体系，并详细介绍适用于“三化”评估的层次分析法方法及其应用流程。通过实际案例分析，展示评估体系与方法在实践中的运用及效果，旨在为企业科学开展机械零部件“三化”工作提供全面的理论与实践指导，助力机械制造业提升生产效率、降低成本、增强创新能力与市场竞争力，推动行业可持续发展。

一、引言

1. 研究背景

在全球制造业竞争日益激烈的当下，机械制造行业面临着产品更新换代快、成本控制难、客户需求多样化等诸多挑战。机械零部件作为机械产品的基础组成部分，其设计与生产的合理性直接影响机械产品的性能、质量、成本以及生产周期。为应对挑战，提升企业竞争力，机械零部件通用化、系列化、组合化理念应运而生，并逐渐成为机械制造领域的重要发展方向。通用化、系列化、组合化的有效实施，能够优化企业的产品设计、生产制造、供应链管理等多个环节，对机械制造行业的高质量发展具有关键意义。

2. “三化”研究目的与意义

本研究旨在构建一套科学、系

统、全面的机械零部件通用化、系列化、组合化评估体系与方法，为企业在机械零部件“三化”实践过程中提供准确的评估依据和决策参考。通过对“三化”的深入研究与评估，帮助企业合理规划产品结构，优化生产流程，降低生产成本，提高生产效率和产品质量，增强企业的创新能力和市场竞争力，推动机械制造行业向高效、集约、可持续方向发展。

（1）提高生产效率

通用化的零部件可在多种机床产品中使用，企业能够实现批量生产，从而提升生产效率。例如，标准化的齿轮、丝杠、轴承等零部件，在不同型号机床的传动系统中广泛应用，企业通过规模化生产这些通用件，减少了生产准备时间与加工工序，使生产效率大幅提高。系列化产品依据既定参数系列设计制造，企业可预先规划生产流程与工艺，在满足不同用户需

求的同时，保证生产过程的高效性。组合化通过快速组合通用部件形成新产品，缩短了产品研发与生产周期。当市场出现新需求时，机床企业可迅速从通用件库中选取合适部件进行组合装配，快速推出新产品，大大提高了对市场的响应速度。

（2）降低成本

通用化减少了零部件种类与数量，降低了企业的采购、库存与管理成本。企业无需为众多专用零部件建立复杂的供应链体系，采购过程更加集中高效，同时库存管理难度与成本也显著降低。系列化产品的设计与生产遵循统一标准与规范，降低了研发与生产成本。在研发环节，基于系列化设计理念，可减少新产品研发的重复劳动，提高研发效率；生产环节中，由于工艺相似性，企业能够更好地利用现有生产设备与工艺装备，降低生产成本。组合化避免了为每个新

产品单独设计与制造大量零部件，降低了设计成本与制造成本。企业只需维护一个通用件库，新设计主要集中在部件组合方式与专用部件上，极大地减少了设计工作量与制造成本。

(3) 增强市场竞争力

“三化”使机床产品在满足多样化需求的同时保证质量稳定性，提高了客户满意度。通用化零部件的高可靠性与互换性，确保了产品在使用过程中的稳定性；系列化产品提供多种规格选择，满足不同客户的个性化需求；组合化产品可根据客户特殊要求快速定制，增强了客户对产品的认可度。“三化”有助于企业快速推出新产品，抢占市场先机。面对快速变化的市场需求，企业凭借通用部件库与组合化设计能力，能够迅速开发出适应市场的新产品，提升市场占有率。

二、零部件通用化、系列化、组合化的概念与重要性

1.通用化

机械零部件通用化是指在不同型号、不同用途的机械产品中，尽可能采用相同或相似的零部件，以实现资源的优化配置。通用化零部件能够在多个产品中重复使用，减少零部件的种类和数量。

从设计角度，减少新零部件设计工作，降低研发成本与时间；制造环节，实现批量生产，利用规模经济降低单位制造成本；采购方面，因采购量大增强议价能力，获取更优价格与条款；库存管理上，减少零部件种类，降低库存积压风险，提高资金周转率；产品维护时，通用零部件易获取，维修人员熟悉，可缩短维修时间，降低维修难度，提高设备可用性。

2.系列化

系列化是指将同一类型产品，按照一定的规律和标准，合理规划产品的参数、尺寸、性能等，形成一系列具有不同规格但相互关联的产品，以及与之配套的零部件系列。通过系列化设计，企业可以较少的产品品种满足更广泛的市场需求。

对于企业而言，系列化有助于产品规划与市场拓展，通过对市场需求的细分，针对性开发系列产品，满足不同客户需求，提高市场占有率；在生产制造过程中，系列化产品的零部件具有一定的相似性，可共享生产工艺和设备，降低生产准备成本，提高生产效率；研发方面，系列化产品可以在已有产品基础上进行改进和升级，减少研发的重复劳动，加快新产品推出速度。

3.组合化

组合化是指将机械产品分解为若干具有独立功能的模块或零部件，这些模块或零部件可以根据不同的需求和功能要求，进行灵活组合，形成多样化的产品。组合化强调零部件的模块化设计和快速组合能力，以实现产品的多样化和定制化生产。

组合化能够快速响应市场多样化和个性化需求，企业通过对不同模块的组合，快速推出满足客户特定需求的产品，缩短产品开发周期；在生产过程中，模块化的零部件可以实现专业化生产，提高生产质量和效率；产品维护和升级时，组合化使得零部件更换和升级更加便捷，降低维护成本，延长产品生命周期。

三、通用化、系列化、组合化评估指标体系构建

1.构建原则

科学性原则要求评估指标体系能够准确反映产品“三化”的本质特征与内在联系，各项指标概念明确、计算方法科学、数据来源可靠。例如，在衡量机床产品通用化程度时，采用通用零部件数量占总零部件数量的比例这一指标，能够直观、准确地反映通用化水平。全面性原则确保评估指标涵盖“三化”的各个方面，避免遗漏重要信息。从零部件通用性、产品参数覆盖范围到部件组合灵活性等方面，均设置相应指标进行评估。独立性原则保证各评估指标相互独立，避免指标间信息重复。例如，通用化中的通用零部件种类数与通用零部件数量占比这两个指标，分别从不同角度衡量通用化程度，相互之间不存在包含或重叠关系。可操作性原则要求评估指标的数据易于获取与计算，评估方法简便可行。指标数据应能通过企业生产记录、产品设计文档等渠道获取，且计算过程不复杂，便于企业实际应用。

2.具体评估指标

通用化评估指标包括通用零部件数量占比，即通用零部件数量与总零部件数量的比值，该比值越高，表明通用化程度越高。例如，某机床产品总零部件数量为1000个，其中通用零部件数量为600个，则通用零部件数量占比为60%。通用零部件种类数反映了企业在机床产品中使用的不同类型通用零部件的数量，种类数越多，说明企业在零部件通用化方面的工作越深入，产品的通用性潜力越大。系列化评估指标涵盖产品参数覆盖范围，通过计算机床产品主要参数（如加工尺寸范围、主轴转速范围

等)在行业标准规定范围内的覆盖比例来衡量。如某系列车床的加工直径范围为 200~ 600mm,而行业标准规定的该类车床加工直径范围为 150~800mm,则其加工直径参数覆盖范围为 $(600 - 200) / (800 - 150) \times 100\% \approx 61.5\%$ 。产品系列完整性考察企业是否按照既定的产品参数系列,完整地开发出相应型号的产品,避免出现参数空缺或不连续的情况。组合化评估指标有部件组合灵活性,通过评估通用部件之间的连接方式、接口标准的通用性以及组合方式的多样性来衡量。例如,采用标准化接口的通用部件,能够更方便、快捷地进行多种组合,提高了部件组合灵活性。组合化产品种类数体现了企业利用通用部件组合形成不同功能、规格机床产品的能力,该数值越大,表明组合化程度越高。

3.通用化评估指标

重用性指标:包括零部件重用次数,即统计零部件在不同产品型号或批次中的使用次数,次数越多通用性越强;重用产品范围,衡量零部件应用产品类型的多样性,范围越广通用性越高。

互换性指标:涵盖尺寸互换性,确保零部件外形、安装、配合等尺寸符合标准,实现相互替换;功能互换性,要求零部件在相同工作条件下,功能参数一致,可等效替代。

标准化程度指标:包含符合标准数量,零部件遵循国家、行业或企业标准越多,标准化程度越高;标准应用广泛性,所遵循标准在行业内应用越广泛,零部件通用性越强。

4.系列化评估指标

参数系列合理性指标:分析产品参数系列是否符合相关标准和行业规律,参数分级是否合理,能否满足不同客户需求,如产品的尺寸、功率、承载能力等参数的系列划分是否科学。

零部件关联度指标:评估系列产品中零部件的通用程度和关联程度,例如系列产品中共享零部件的比例,以及零部件在不同产品型号中的可替换性。

市场覆盖度指标:考察系列产品对目标市场的覆盖范围,能否满足不同客户群体、不同应用场景的需求,反映系列产品在市场上的适应性和竞争力。

5.组合化评估指标

模块独立性指标:衡量模块功能的独立性,即模块是否具有明确、单一的功能,是否能够独立完成特定任务,减少模块间的功能交叉和依赖。

组合灵活性指标:评估模块之间的组合方式是否多样、便捷,能否快速根据不同需求进行组合,以形成多样化的产品,如模块接口设计是否标准化、通用化。

可扩展性指标:考察模块是否便于增加、删减或升级,以适应产品功能的扩展和技术的发展,反映产品在未来发展中的潜力。

四、层次分析法（AHP）

1.概述

层次分析法（Analytic Hierarchy Process，简称AHP）由美国运筹学家托马斯·萨蒂（Thomas L. Saaty）于 20 世纪 70 年代提出，是一种将复杂问题分解为多层次指标体系，通过定性与定量结合的方式计算指标权重、实现综合评估的决策方法。其核心逻辑是将问题分解为“目标层 - 准则层 - 指标层”的层次结构，通过两两比较确定指标相对重要性^[1]，最终通过数学计算得出权重及评估结果。

2.实施步骤

首先，明确三个层次结构模型：目标层为三化设计的综合方案；准则层可为标准化水平、系列化水平、通用化水平；指标层为具体内容，如标准件使用情况、文档标准化程度，主参数系列化覆盖情况，零部件通用情况。

其次，构造判断矩阵和权重计算：采用萨蒂 1 - 9 标度法，两两比较各因素相对重要性，构建判断矩阵。标度值及含义如表1所示。

表1 判断矩阵标度值与含义对应表

标度值	含义
1	两指标同等重要
3	一指标比另一稍重要
5	一指标比另一明显重要
7	一指标比另一强烈重要
9	一指标比另一极端重要
2,4,6,8	中间值

准则层矩阵示例如表2所示。

表2 矩阵示例表

准则层	系列化水平	标准化水平	通用化水平
系列化水平	1	1/3	2
标准化水平	3	1	4
通用化水平	1/2	1/4	1

上述矩阵经特征向量法计算权重结果为：标准化水平 0.5、系列化水平0.3、通用化水平0.2。

指标层中各指标进行量化评分（可采用0-100分），按照计算准则层权重方法，最终计算不同准则层下指标层的权重得分。其中各指标层得分及说明见表3。

表3 指标层权重、解释及得分示例

准则层（权重）	指标层（权重）	指标解释	得分
B1标准化水平 （50%）	C1企业标准与国标 / 行标的符合性（0.3）	企业标准与国家 / 行业标准的匹配度	90
	C2标准件使用率（0.4）	标准件占整机零件数量的比例	85
	C3计文档标准化规范度（0.3）	图纸、工艺文件等的标准化程度	90
B2系列化水平 （30%）	C4 主参数系列化覆盖率（0.5）	产品参数覆盖标准系列的比例	70
	C5 产品型谱完整性（0.5）	产品型号覆盖市场需求的完整度	90
B3通用化水平 （20%）	C6 部件通用化率（0.6）	通用部件占总部件数量的比例	90
	C7 模块化接口标准化程度（0.4）	模块接口与标准的兼容性	80

指标层计算如公式（1）：

$$S1 = \sum_{j=1}^m Wcj \times Scj \dots\dots\dots (1)$$

其中：

Wcj为指标层权重，Scj为指标层得分。

标准化水平得分：0.3×90+0.4×85+0.3×90=88分

系列化水平得分：0.5×70+0.5×90=80分

通用化水平得分：0.6×90+0.4×80=86分

目标综合得分：0.5×88+0.3×80+0.2×86=85.2分

3.评估结论建议

根据得分区间（如 80分~90 分为良好），判定该产品三化设计水平为“良好”，并可通过权重分析发现系列化水平得分相对较低，需优化产品型谱。企业组织技术团队针对系列化参数不合理、组合化模块灵活性不足等问题进行改进。

五、研究结论

本论文通过对机械零部件通用化、系列化、组合化评估研究，明确了“三化”在机械制造领域的重要意义，构建了涵盖通用化、系列化、组合化维度的综合评估指标体系，详细介绍了层次分析法在“三化”评估中的应用流程，并通过实际案例验证了评估体系与方法的有效性和实用性。研究成果能够为企业开展机械零部件“三化”工作提供全面的理论指导和实践参考，帮助企业优化产品结构，降低成本，提高生产效率和市场竞争力。

层次分析法仅是评估方法中的一种，还有模糊综合评价法等。未来可结合大数据、人工智能、物联网等新兴技术，利用大数据分析海量零部件数据，挖掘“三化”规律和潜在价值；借助人工智能算法优化评估模型，提高评估准确性和智能化水平，确保评估的准确性，为企业领导层制定规划提供科学有效的数据支撑。□

参考文献：

【1】王城超、邹强、贾汝娜、张天赫。基于改进AHP-FCEM的导弹装备“三化”程度综合评估。计算机与数学工程，2018（9）1802-1808

资讯

北一机床AE系列数控龙门加工中心三季度收获多领域订单

近日，北京北一机床有限责任公司在“十四五”规划收官的关键节点，多个项目成功中标。三季度，北一机床战略产品AE系列分别成功中标新疆、山东、辽宁等用户共5台设备。

其中，青岛环球重工科技有限公司XHAE2840×200数控龙门加工中心项目将满足用户对长达 17.6米的竖井模具顶面侧模工件的重点加工需求。设备投产后，用户可实现自主加工，彻底摆脱对原有外协加工模式的

依赖，并且大幅提升工件质量，显著提高生产效率。

技术升级后的AE系列在性能和设计上均实现了跃升。其固定工作台、动梁动柱的创新结构，为设备运行的稳定性提供了坚实保障，可实现任意四轴三轴联动，确保加工过程中的高精度与高效率。AE系列机床还搭载了高速、高精度、大扭矩主轴，加工范围极为宽广，能够轻松应对各类大型工件的加工任务。可为用户提



AE系列同类型产品

供匹配多种材料、更加高效全方位的一体化加工解决方案，广泛适用于模具、汽车、印刷、轨道交通、航空航天等领域。

国产数控系统桥式AB摆台热误差补偿的研究

通用技术集团机床工程研究院有限公司沈阳分公司 王东辉 常博宇 黄冠超

【摘要】随着国产数控系统功能的不断发展，热误差补偿将是设备的一项重要功能，该功能为高精度加工提供了一个很好的方向，用来解决在国产数控系统设备，随着环境温度变化也能保证设备精度，本文详细的阐述了在桥式AB摆台上，通过华中数控系统解决热误差及热偏移的方案。

本文将基于华中数控系统HNC 848Di以桥式AB摆台五轴加工中心为例，对整个热误差和热补偿进行研究，包括热误差分析及热补偿方案分析及处理，从而保证在各种室温温度下的准确加工。

1.硬件选择

(1) 数数控系统

华中HNC 848Di 高性能数控系统（见图1）：系统采用LED 17”超清液晶显示屏，模块化开放式体系结构，支持多种总线协议，包括 NCUC 总线、EtherCAT、安川 MIII 等多种总线协议，最多能控制 8 通道64 个轴，支持五轴 RTCP、高速高精模式、多轴多通道、五轴法向进退刀、3+2 定向加工、线性插补、大圆插补、五轴刀具测量、五轴工件测量、立式摇篮转台五轴 RTCP 结构参数自动标定、进给速度自适应、多组五轴RTCP 参数切换，支持角度编程、矢量编程、双 NURBS 编程功能，具有空间误差补偿、热误差补偿功能。



图1 华中数控系统HNC 848Di

(2) 温度采集卡HIO-1075和HIO-1076

HIO-1075和HIO-1076温度采集卡（见图2），是华中系统对各种温度传感器设计的温度采集卡，该采集卡可通过HIO-1000型底板的扩展I/O板卡安装，基于NCUC协议将采集到的温度信号,再通过HIO-1061通讯板将温度信号传递到数控系统。HIO-1075和HIO-1076都是用于采集外部传感器温度的板卡，区别在于所配套的温度传感器不同，HIO-1075只能外接Pt100（铂）温度传感器，HIO-1076只能外接KTY84（硅）温度传感器，每个传感器只支持三线制接线方法或短接的两线制接线方法，每一块板卡由6个温度采集通道组成，对应可连接6个温度传感器。

HIO-1075 / 1076		两线制接法		三线制接法	
引脚号	端口名称	Pt100 引脚	KTY84 引脚	可选端口组	可选端口组
A	1 +R1	红	黄	①	红 黄
	2 RL1				白 绿
	3 -R1	白	绿		红 黄
	4 +R2	红	黄	②	红 黄
	5 RL2				白 绿
	6 -R2	白	绿		红 黄
	7 +R3	红	黄	③	红 黄
	8 RL3				白 绿
	9 -R3	白	绿		红 黄
	10 GND	屏蔽层			白 绿
B	1 +R4	红	黄	①	红 黄
	2 RL4				白 绿
	3 -R4	白	绿		红 黄
	4 +R5	红	黄	②	红 黄
	5 RL5				白 绿
	6 -R5	白	绿		红 黄
	7 +R6	红	黄	③	红 黄
	8 RL6				白 绿
	9 -R6	白	绿		红 黄
	10 GND	屏蔽层			白 绿

图2 HIO-1075或HIO-1076板卡视图及端口定义

HIO-1075板卡的温度测量范围为-40℃~240℃，

HIO-1076板卡为-40℃~270℃，电气误差为±0.5%（不含Pt100引线带入的误差），系统显示温度分辨率为0.1℃，ENOB/NFR为16/16位，板卡工作温度0℃~55℃。

2.温度采集设置及显示

(1) 硬件配置以及参数PLC的修改

完成连接以后给设备通电，如果总线连接正常，HIO-1061通讯板卡的【X2A】/【X2B】的通讯指示灯会快速闪烁，而HIO-1075板卡上的信号灯会和其余扩展板的LED指示灯顺次明暗交替。然后在NC系统的设备配置菜单-设备配置图中，系统会自动识别出新接入的IO_NET设备，如图3所示。

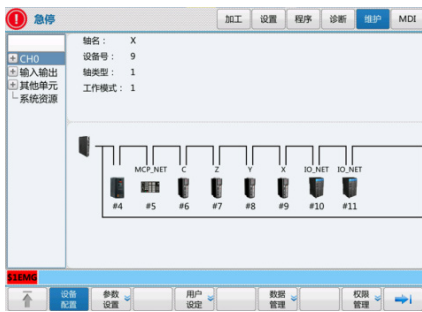


图3 HIO-1075配置IO_NET设备

增加一块HIO-1075板所识别出的IO_NET设备为【#11】组将新识别出的I/O设备的输入 / 输出起始组号相对于前一个I/O设备顺次累加10组，而输入 / 输出点组数都设置为10即可。

由于HIO-1705和HIO-1076板都占用2组6通道X输入地址，即12组8Bit位X信号，所以当前面没有输入型的扩展设备时，一块HIO-1075或HIO-1076板卡就会识别出两个新的硬件设备，若前面有输入型的设备且没有占满10组的地址（有多余的3组地址，其中一组要留给I/O看门狗），则HIO-1075或HIO-1076板卡的地址会自动拼接到前面的空闲的地址后，系统只会识别出一个新的硬件设备。

再将数控系统切换到设备接口参数界面，设置#11号IO_NET的相关参数，参数界面如图4所示。



图4 IO_NET设备配置

参数配置：

【50X012】：输入起始组号为“10”；

【50X013】：输入点组数为“10”；

【50X014】：输出起始组号为“10”；

【50X015】：输出点组数为“10”；

2.1机床PLC梯形图的编写

由于增加一块温度采集卡，系统会自动识别多出一个或两个I/O设备，所以在PLC程序中，需要将看门狗的MOV【X9】【Y9】改成MOV【X19】【Y19】或MOV【X29】【Y29】指令模块。如图5、图6所示，



图5 看门狗后移

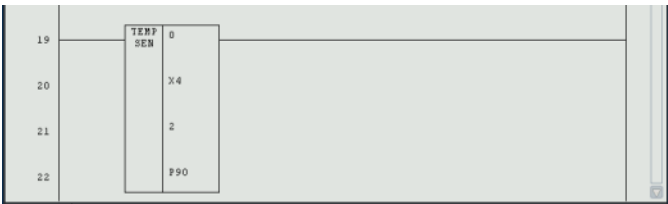


图6 热误差补偿模块

PLC热误差补偿模块TEMPSEN各项参数：

第一项：温度传感器编号；

HNC-848D型系统最多支持20个温度值采样，编号显示为0-19，采样温度可在数控系统的主界面右上方辅助信息显示区显示数值，或在G3080~G3099寄存器上观察到传感器采集到的温度值，在十进制格式下查看，单位设置：0.1℃。

第二项：温度采集数字信号对应的X寄存器组号，每个传感器占用两组的输入；

若机床HIO-1000上安装了两块输入端子板，占用了4组输入信号，即：X0.0~X3.7，所以温度采集的信号从第5组输入信号开始，即：X4.0。

第一个模块设为X4，即占用：X4.0~X5.7。第二个则为X6，即占用：X6.0~X7.7。

第三项：采集卡类型；

0：HIO-1073（模拟量输入，通过参数4设定温度边界于输入数字量的对应关系；

1：专项板卡（定义 0~300℃对应0~6.7V）；

2：HIO-1075（适配Pt100温度传感器）；

3：HIO-1076（适配KTY84温度传感器）；

4：HIO-1075（V1.0版，通过参数4设定温度边界与电阻的对应关系）；

第四项：线性参数地址项；

1, 当参数3为0时, 此处填写需要调用的两组用户P参数首地址号。

如: P90 (调用P90和P91中的数值作为最低和最高温度与输入数字量0~4096相对应)

需要在机床用户参数中的P90、P91中填如对应温度值, 单位0.01℃

P90: -2000 (即输入数字量为0时对应最低温度-20℃)

P91: 10000 (即输入数字量为4096时对应最高温度100℃)

2, 当参数3为4时, 此处填写需要调用的四组用户P参数首地址号。

如: P90 (调用P90和P91中的数值与P92、P93中的数值进行线性对应)

需要在机床用户参数中的P90、P91中填写温度边界值, 单位0.01℃

P90: -2000 (最低温度-20℃)

P91: 10000 (最高温度100℃)

还需要在机床用户参数中的P92、P93中填写与温度对应的电阻值边界, 单位0.01Ω

P92: 9216 (最低电阻92.16Ω)

P93: 13851 (最高电阻138.51Ω)

(2) 温度硬件测试

硬件连接完成, 参数配置完成以后, 第一: 可以在系统的辅助显示区域看到前六个温度传感器所采集到的实时温度, 编号从0到5显示; 第二: 也可以在寄存器界面中查找到G3080~G3099所对应的20个传感器温度值 (十进制, 显示单位0.1℃); 第三: 未配置的温度模块显示温度为“-40.0℃”, 配置后若传感器出现断线时显示为最大温度“240.0℃或270.0℃”。传感器检测机温度显示界面如图7所示。

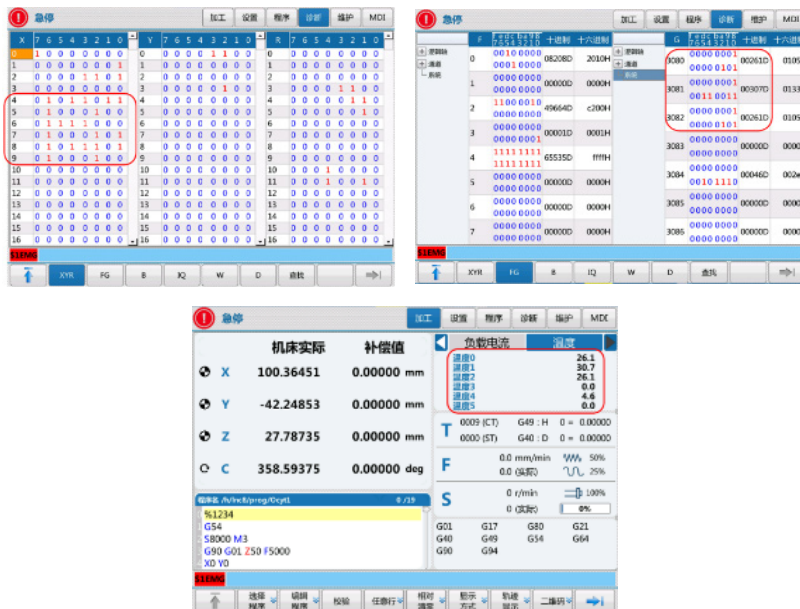


图7

3. 华中HNC 848Di 热温度补偿

(1) 热温度补偿功能介绍

机床在加工运行过程中, 由于电气元件发热和功能不见的摩擦发热引起的机床局部结构发生型变, 从而导致机床设置位置 and 实际位置偏差即是机床的热误差。华中HNC 848Di数控系统针对该类变形量提供了专门的热补偿方案, 以

下介绍有传感器热误差补偿方法, 补偿方法包扩机床结构的热偏置误差补偿和伺服轴丝杠的热膨胀误差补偿。

可通过各轴的误差补偿参数 parm: 300*005进行开启。传感器热误差补偿类型如图8所示。

参数列表	参数号	参数名	参数值	生效方式
MC参数	300000	热误差补偿类型	1	复位
机床用户参数	300001	热误差补偿类型	0.010	复位
(+1)进给参数	300002	热误差补偿类型	0.010	复位
(+1)坐标轴参数	300003	热误差补偿类型	0.000	复位
(+1)误差补偿参数	300004	热误差补偿类型	0	复位
(+1)设备接口参数	300005	热误差补偿类型	0.000	复位
数据系参数	300006	热误差补偿类型	0.000	复位
	300007	热误差补偿类型	0.000	复位
	300008	热误差补偿类型	0	复位
	300009	热误差补偿类型	0.000	复位

图8

(2) 温度线性补偿原理

在关键发热部件 (齿条、导轨等) 上安装温度传感器采集温度, 测量出发热部件各个温度区间所对应的变形量, 通过计算绘制两者之间曲率图形, 在温度补偿表填入对应的补偿数据。系统通过温度传感器检测的实时温度以及温度补偿表的数据, 对相关机床伺服轴进行位置补偿, 从而消除温度对机床热偏差。丝杠热膨胀变形对线性定位的影响如图9所示。

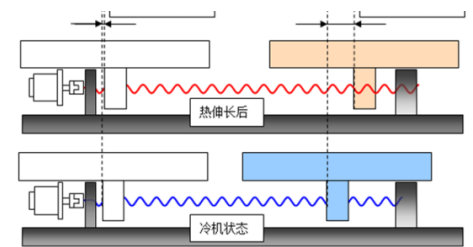


图9

热误差补偿相关参数, 如下所示:

- 300006-热误差补偿参考点坐标 (P0)
- 300012-热误差斜率表测量起始温度
- 300013-热误差斜率表测量温度点数
- 300014-热误差斜率表测量温度间隔

(下转第76页)

航空卡箍数字化设计与精密制造

大连长之琳科技股份有限公司 王洪久

【摘要】随着新一代飞机性能的不断提高，对管路设计的维修性、可靠性等要求也越来越高。这就要求管路系统中导管与导管、导管与附件之间的连接形式要安全可靠，因此对卡箍的设计制造提出了更高的技术要求。文章主要分析了航空管路刚性连接卡箍的设计及制造工艺，在此基础上剖析了数字化结合的设计分析方法，结合当今航空卡箍先进技术展开论述，阐述了飞机管路连接件设计制造需要控制的因素。

环控空气管路系统是飞机输送气体的重要系统，其连接结构设计的好坏直接影响飞机环控系统的使用性能、寿命和飞机安全可靠。如：引气系统对飞机的气密舱实施空气调节，为发动机提供各种气源通道、对发动机和APU滑油附件进行启动前预温、为特种设备进行增压和冷却；防冰系统的作用是提供热空气，防止飞机表面在可能结冰的气象条件下结冰，或除去飞机表面已结成的冰层，以保障飞行安全；空调系统的作用是为驾驶舱、货舱等提供新鲜空气，对电子设备进行通风冷却。而空气管路连接快卸卡箍则是飞机环控系统空气管路连接中不可缺少的关键标准件，对连接密封起着重要作用——确保管路连接的密封性，控制连接部位的泄漏量。

一、卡箍数字化设计

1. 材料确认

航空用管路连接件使用环境特殊，导致卡箍选用材料是需要具备高强度低密度，出色的耐蚀性，在高温环境中具备可靠的性能，能够适应航空环境的苛刻要求。目前国内外常用的金属材料包括不锈钢、钛合金、铝合金以及镍基高温合金，同时螺纹副及拆装部位需要涂覆防咬合的涂层材料，一般使用干膜润滑剂。

2. 结构尺寸优化设计

目前行业应用广泛的刚性快卸卡箍结构，其主要材料为镍基高温合金，能够在650℃条件下保持良好的工作性能。卡箍轮廓结构如图1所示。

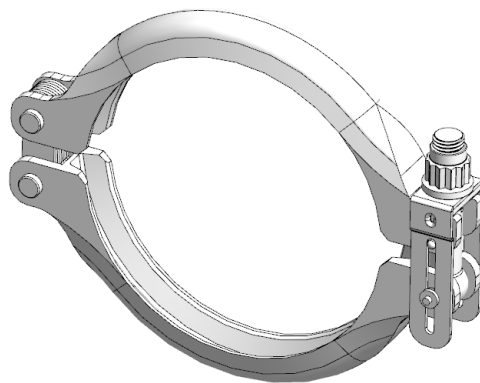


图1卡箍结构图

根据系统需求，设计卡箍的接口尺寸，需要通过全面的理论测算，外形设计，完成结构定型。

3. 数字化分析

卡箍的强度、刚度以及密封性能是其重要的技术性能指标。强度失效和密封失效是最常见的两种失效形式。在设计时要求必须具有足够的强度和刚度，以保证长期使用

而不发生破裂或者产生变形,同时要求卡箍密封部位有合适的密封比压,以保证密封部件既不损伤又能有良好的紧密度,以阻止介质泄漏。关于卡箍的强度分析已经很成熟,而阻碍现代密封设计应用的因素有:密封结构中包含复杂材料特性的密封元件;有限元求解过程中包含接触分析;密封结构在工作状态中遇到的不稳定工况,如温度、压力、密封介质特性等。因此,大多数情况下设计人员沿用传统经验来确定密封结构的方法。而基于经典力学理论的常规设计计算方法由于其固有的局限性,对于复杂几何结构、多载荷作用下的计算是无能为力的,即使对于受简单边界条件的结构,也会因为结构较复杂使得计算不准确,甚至与实际相差甚远。随着有限元分析方法的发展,基于有限元法的数值模拟成为解决这些复杂问题的利器,利用仿真软件进行有限元计算和结构分析,从而解决工程实际问题。

(1) 卡箍密封性分析

通过ansys workbench有限元仿真技术模拟卡箍在各工况时的工作状态,通过仿真分析起密封作用的接触面的应力分布状况,对比其是否达到工程上规定的密封表面的密封比压标准,并通过卡箍右侧滑槽位移大小来衡量卡箍开口程度,并通过有限元仿真找出其最大位移量,并对不同规格的卡箍在若干工况下的密封性能做出合理评价。

依据网格划分确定分析精度(见图2)。分析过程中,重点关注的是卡箍与接头接触表面的接触应力,并根据接触应力的分布来评价卡箍的密封性,所以需要卡箍与管路接触面的网格进行局部细化,尽量提高接触部位的网格质量,使该表面的应力仿真结果尽量精确,而其他位置的网格质量满足一般的分析要求即可。

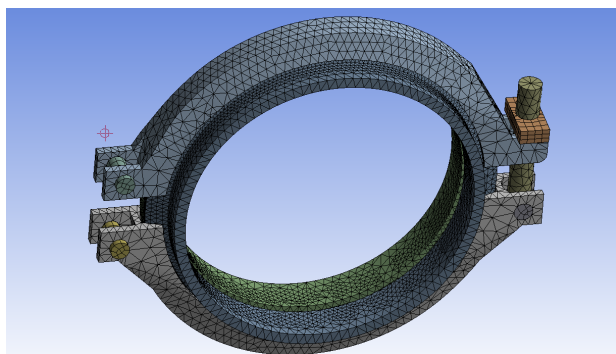


图2 网格划分结果

根据卡箍工作的受力状态,模拟其工作条件和所受载荷,对该有限元模型分别施约束条件。依据边界条件和荷载施加情况可求解卡箍各位置载荷分布情况,图3中已标出最大、最小应力分布位置。

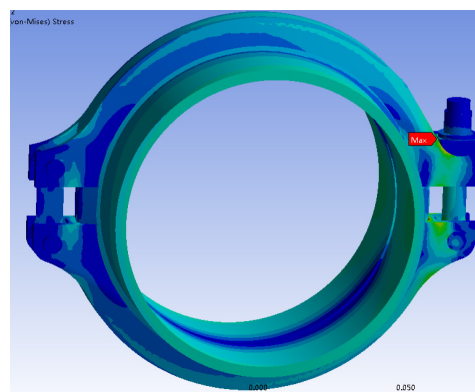


图3 施加边界条件和载荷

以上分析得出卡箍密封性薄弱点位置,在结构设计中对此进行重点分析,设计产品结构时,控制铰链定位尺寸,以及铰链销侧与耳环螺栓侧相对位置距离,从而确保产品性能。

(2) 强度分析

卡箍在工作时,其所受载荷形式复杂,再加之卡箍复杂的外形结构,通过有限元软件仿真求解是一种高效又合理的方式。根据实际情况,重点关注在破坏载荷(三倍工作载荷)下卡半卡箍是否仍能满足强度要求。利用有限元软件仿真得出模型在给定外载和边界条件下的应力分布,考察其最大应力,对比强度极限做出判断。根据应力分布情况(见图4),卡箍结构设计时,在应力较大位置进行厚度补偿,确保产品结构强度满足标准要求。

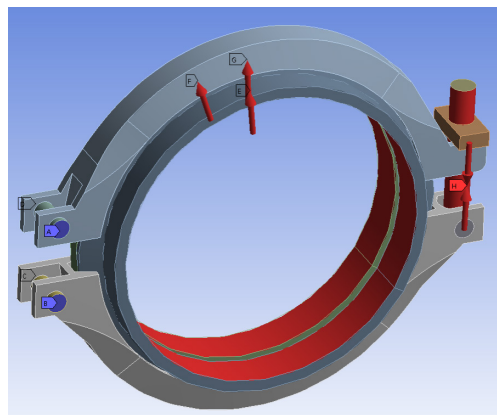


图4 破坏载荷下卡箍总体应力分布

二、卡箍结构设计及工艺设计注意事项

1. 结构设计

考虑受力合理性,卡箍确保在工作状态下能有效地紧固且受力均匀;避免复杂的几何形状导致应力集中;流出足够的安装和操作空间;设计合适的连接方式和接口,保

证连接可靠,考虑与其他零部件的配合兼容性。

2. 工艺设计

结合制造能力和设备条件,确保设计可实现;优化工艺流程,减少工序间的等待和周转时间;考虑模具和工装设计便利性和通用性;对特殊工艺要求进行合理的规划和安排;预留适当的加工余量,避免印余量不足导致废品;工艺路线设计要求兼顾效率和质量;考虑装配公益性,使卡箍易于组装和拆卸;与结构设计协同,确保工艺能够实现,结构的功能和性能要求。

三、航空卡箍精密制造

1. 卡箍制造工艺路线

通过对卡箍材料选型,结构的设计分析确定卡箍的基本结构尺寸,针对不同形式的零件形成专属加工工艺。卡箍主体的半联接头通过组合机械加工,销轴类连接定位件通过数控加工完成,钣金零件设计专用的冲压模具完成。

刚性快卸卡箍的主体半联接头选用耐蚀性优良的合金材料加工,选用不同材质的合金加工程序有所不同,根据材料的特性,高温合金硬度高,韧性好,切削加工困难,刀具磨损快,钛合金作为主要加工材料时其切削温度高,由于钛合金导热系数低,热量不易散出,切削区温度可达1000℃以上,加剧刀具磨损。加工效率低,数控切割时刀具转速一般不高于300r/min,切削量设置在10~30 μm较为合适。而在工况强度和耐蚀性要求较低的管路连接区域,使用普通不锈钢材料作为卡箍主体即可,其加工工艺则相对容易控制。但是仍然需要考虑这种半环形结构的卡箍主体加工后的变形控制。所有零件主要加工工艺如下:

(1) 卡箍主体半联接头

毛坯粗加工→切割内孔和外轮廓→精加工外形内槽→切割槽口。

高温合金和钛合金切削的卡箍零件加工过程中产生大量的热量,导致工件局部快速升温 and 冷却,热胀冷缩过程导致材料金相组织变化产生内部应力;同时在切削力作用下材料会产生塑性变形,在卡箍内部产生积聚应力;在加工工序间按照材质不同,增加热处理工艺,以便减小加工难度和去除加工应力。

(2) 销轴类零件

热处理→数控切削→切割成型→倒角→研磨。

简单的机械加工零件,在产品组件中起到导向定位作用,通过结构分析并非受力强点,对产品精度控制可以稍微放宽,按照HB5800-1999《一般公差》控制零件加工。

(3) 钣金类零件:

分条→落料→成型→折弯→热处理。

钣金类零件则设计专用的工装模具,通过冲压成型,为提高模具寿命,一般使用固溶状态的材料加工,在成型后对产品进行热处理,保证卡箍配件的机械性能。

(4) 卡箍组装

螺栓侧组装→铰链侧组装→涂覆干膜润滑剂→整体装配→标印。

卡箍组装后的效果直接影响到其密封性能,所以在每个工序都需要控制尺寸的精密度,一般将装配公差控制在0.1mm以内,在组装过程中使用专用的自动化设备及配套工装夹具,控制卡箍组装的一致性、稳定性。

2. 航空卡箍生产制造过程中注意事项

严格遵循工艺标准:卡箍所有零组件在工艺定型后,每批生产都需要按照既定的工艺规范和流程进行操作,确保每一步符合要求。

尺寸精度的控制:卡箍重要的外部接口尺寸使用高精度测量工具,常规手段无法测量的尺寸,设计专用的工装检具,检测尺寸的符合性。

材料确认:原材料入厂验收时对原材料进行严格的检验和筛选,确保材料质量合格,不存在内部缺陷,避免加工过程中裂纹、夹杂情况出现。

特殊过程确认:卡箍生产过程中涉及到的热处理、表面处理以及干膜润滑涂覆等特殊过程必须进行特殊过程确认,按照确认准则要求内容规范实施。

数据记录:航空卡箍生产制造需要具备可追溯性,严格履行工艺评审,生产试制前准备检查,首件鉴定以及质量评审的流程,并在每一个节点阶段做好评审记录,同时生产检验原始数据记录清晰并随产品合格证明材料一同保存,便于后续质量审查时查阅。

四、结语

航空工业飞速发展,飞机及发动机设计开发技术不断革新,航空管路连接快卸卡箍的结构设计与精密加工也需要不断提升能力,数字化结构设计较比传统的迭代设计模式能够更快更好地分析出卡箍的结构需求,精密的加工工艺更能够保证卡箍的基础性能达标,在迭代更新中快速提升,逐步赶超国外先进技术。□

参考文献:

- [1]黄敏 卡箍类工件配套加工的工艺[J].机械工人:冷加工,1998(05):31-32.
- [2]曹翌军;肖文;李博 转弯卡箍裂纹失效分析及加工优化[J].新技术新工艺,2021(10):74-76.

机床主轴零件加工精度与温度相关关系探究

沈阳机床股份有限公司 张伟

【摘要】针对非恒温车间（16℃~28℃）温度波动导致主轴轴套加工精度超差问题，本研究突破传统仅优化切削参数、材料性能等固有因素的局限，首次系统确立环境温度波动为影响批量加工一致性的关键变量。基于主轴核心零件功能与精度分析，结合切削热传导机理，构建了环境温度与工件热变形之间的定量映射模型。依托全年138组车间实测数据，创新提出并实施了分段热变形补偿策略。应用后，零件合格率显著提升（82.4% → 98.7%），过程能力指数大幅改善（CPK 0.89 → 1.52），有效解决了温度波动下的精度控制难题。该策略为变温环境下精密零件的批量稳定加工提供了可靠的技术方案和重要参考。

主轴作为机床核心功能单元，承载刀具或工件的旋转运动，其回转精度、刚度和动态性能稳定性直接决定了被加工零件的极限精度与表面质量。主轴系统精度本质上是心轴、轴承、轴套等核心零件几何精度与装配精度的综合体现。其中，轴承精度通常由选定品牌和精度等级（如P4、P2级）预先确定，其制造误差相对固定且可控；而心轴与轴套的加工精度一致性，则成为影响主轴最终装配性能的关键变量，尤其在批量生产中面临严峻挑战。

研究表明，在切削参数（如转速、进给量、切削深度）高度稳定的前提下，环境温度波动对轴套批产精度一致性的影响贡献率高达65%以上^[1]。这是因为金属材料具有显著的热膨胀特性，温度变化导致轴套本体及工装产生微米级甚至亚微米级的尺寸与形变漂移。在传统制造模式中，这种由环境温度（如昼夜温差、季节性变化、车间空调启停）引入的热误差往往被忽略或难以主动补偿，成为制约高精度轴套批产合格率提升的瓶颈。

基于上述原因一方面研究多物理场耦合相关性，结合实验数据，全面揭示零件在不同环境温度下热变形对尺寸精度的影响规律；另一方面，从切削工艺、冷却润滑系统优化等角度出发，提出针对性较强的零件加工精度的提升方案，实现机床在复杂工况下加工精度一致性的明显提

升。研究视角具有一定创新性，突破传统作用因素研究局限，将主轴零件加工精度与车间环境温度相关联，深入探讨二者间的双向耦合关系，考虑到温度对材料性能、热传导、热对流以及零件配合间隙等多方面的综合影响，为冷加工过程零件精度稳定性与一致性的提高探索出新的参考思路。

一、主轴核心零件失效机制

1. 主轴关键零件功能分析

常用车床主轴的心轴作为“输出端”，其材质常选用高强度、低热膨胀系数的合金钢，如40Cr、20CrMnTi、38CrMoAl等，经调质、淬火、氮化、深冷等热处理工艺，使其表面硬度达到50~62HRC，前端通常设计有高精度的短锥及锥孔，常见有1:4锥度短锥，用于定位卡盘等夹具；1:20内锥孔用于定位夹头，确保工件在高速旋转时的稳定性与同轴度。

轴承是支撑心轴旋转的关键零件，其精度与性能直接关乎心轴的回转精度。角接触球轴承常用于主轴前端，以抵消切削力产生的轴向分力，同时配合圆柱滚子轴承增加径向承载能力；后端则搭配圆柱滚子轴承，为心轴提供稳

定支撑。这些轴承的精度等级通常要求达到P4甚至P2级，其径向跳动控制在微米级，例如，P2级角接触球轴承的径向跳动可低至0.5μm，保障主轴的高精度旋转。

轴套置于轴承外，内孔与轴承外圈配合，外圆与箱体配合定位主轴，其与轴承和箱体的配合情况影响主轴的精度、刚度、热稳定性等。轴套多采用耐磨的低碳合金，具有良好的热稳定性，即要确保主轴转动灵活，又要保障主轴的轴向和径向刚度稳定性。

2. 核心零件关键尺寸公差分析

依据机床行业相关标准GB/T 17421.1-1998《机床检验通则第1部分：在无负荷或精加工条件下机床的几何精度》^[2]等，车床主轴轴颈尺寸偏差一般不得超过±0.003mm，使主轴在高速旋转时能获得稳定支撑，减小径向跳动。其表面粗糙度Ra值达0.3~0.6μm。短锥及锥孔是装夹的基准，1:4短锥和1:20锥孔的锥度公差常为±0.001~0.002mm，以确保夹具安装后的径向跳动不超过0.003mm，保障回转精度。且表面粗糙度同样要求严苛，Ra值一般要求达到0.4~0.8μm，保证夹具装夹的紧密性与稳定性，防止加工过程中夹具松动或偏摆；心轴上与轴承配合的轴肩，其端面圆跳动公差通常限定在±0.002~±0.004mm，保证轴承安装的垂直度，避免因轴肩偏摆导致轴承受力不均，进而引发主轴轴线偏移；轴套的外圆柱面，其圆柱度公差约为±0.003~±0.006mm，直线度公差在全长范围内控制在±0.005~±0.01mm，保障主轴整体外形精度，确保与箱体等部件的装配精度。整理后如表1所示。

表1 核心零件关键尺寸表

零件	关键特征	公差要求	温度敏感系数
轴套	φ150轴承孔	-5~-10μm	12×10 ⁻⁶ /℃
心轴	φ80轴颈	±0.003mm	13.5×10 ⁻⁶ /℃
轴承	P2级径向跳动	≤0.5μm	≤0.1×10 ⁻⁶ /℃

二、环境温度变化对零件加工精度的影响

1. 加工过程热交换路径

主轴零件精密磨削过程，车间环境温度、磨削加工区温度、冷却介质温度等均会影响零件加工精度。零件加工时与周边环境涉及三种热交换方式，即热传导、热辐射、对流换热。热传导主要为零件与夹具、零件与冷却液之间进行接触热交换，转移走绝大部分热量；热辐射主要为零

件与加工区域空气之间进行热交换，经过热传导散热后剩余热量较少，可忽略不计；热对流主要为零件加工后与车间空气间进行热交换，达到与环境等温状态，车间温度（非恒温车间）的四季变化会有较大差异，零件可以放热缩小，也可以吸热膨胀，致使精度稳定性发生较大变化，也是本文重点研究之处。主轴零件主要热交换路径如表2所示。

表2 热变形路径

热传递方式	作用机理	影响权重
热传导	切削热→零件内部→轴向伸长/径向膨胀	45%
热对流	零件-空气强制换热，残余热导致变形	35%
热辐射	加工区空气换热，热量可忽略	<5%

2. 环境温度引发的热变形分析

在实际加工过程中，环境温度的变化对零件轴向、径向热变形影响较明显。以某主轴轴套（内孔直径φ150mm）加工车间为例，研究轴承孔尺寸公差，该车间在春夏季无空调调控时，环境温度可达26~28℃，而在秋冬季无采暖条件下，温度可降至16~18℃，昼夜温差近10℃。车间内的主轴轴套，其轴长为300mm，采用45钢材质，热膨胀系数α约为12×10⁻⁶/℃。

根据热膨胀原理，轴套径向孔热变形量ΔL可由公式（1）所示：

$$\Delta L=L*\alpha*\Delta T \tag{1}$$

其中：L为轴套直径-内孔直径；α为材料热膨胀系数；ΔT为温度变化量。

计算得出在上述车间环境下，昼夜温差引发的轴套径向热变形量为：ΔL=60*12×10⁻⁶*10=0.007mm。在精度公差0.004~0.006mm的设计要求下，温差带来的热变形量已严重影响零件加工精度的一致性。

三、零件加工精度与环境温度相关性分析

基于环境温度变化给主轴关键零件带来较大影响，甚至影响主轴精度及性能一致性，因此对精密零件加工精度与温度变化关系研究，建立温度变化与精度变化综合曲线，形成工艺方法并指导生产。以车床主轴轴套为研究对象，使用进口高精度磨床进行加工（配备切削区温度控制系统），建立验证平台，跟踪不同车间温度条件下，精加工数据采集，分析零件加工精度与环境温度相关性。

1. 实验数据采集

开展实验数据采集工作，取样时间跨度为12个月，包含冬季持续供暖时间段，冬春交替暖气停供时间段，春夏交替空调制冷温度调控时间段。高精密磨床具备加工区恒温功能，加工区温度一直控制在21~22℃之间；加工完成后放置机台旁进行恒温4小时，操作人员采用内孔千分

尺、卡规等工具校准后进行检测；车间检测合格后送交三坐标室进行恒温后检测。采样数据共计138件，记录了车间实时温度、加工区温度、目标尺寸值、加工完成后机台自检数据、恒温后三坐标检测数据等。示例部分如表3所示。

表3 车间温度与对应加工精度数据（示例部分）

序号	加工日期	基本尺寸/mm	车间温度/℃	加工温度/℃	目标尺寸/ μm	补偿调整/ μm	机台测量尺寸/ μm	恒温后测量尺寸/ μm	尺寸变化量/ μm
1	2024年6月27日	150	21	21.5	-8.00	8.00	-5	-6.8	-1.8
2	2024年7月18日	150	28	21.5	-9.00	9.00	-6	-7.5	-1.5
3	2024年8月20日	150	28	21.5	-9.00	9.00	-6	-7.5	-1.5
4	2024年9月28日	150	24	21.5	-6.00	6.00	-4	-5.6	-1.6
5	2024年10月30日	150	23	21.5	-2.00	2.00	-6	-8.8	-2.8
6	2024年11月28日	150	20.5	21.5	-2.00	2.00	-5	-6.5	-1.5
7	2024年12月15日	150	20.5	21.5	-2.00	2.00	-5	-6.5	-1.5
8	2025年1月16日	150	23.5	21.5	-4.00	4.00	-6	-7.6	-1.6
9	2025年2月10日	150	20	21.5	-2.00	2.00	-5	-6.3	-1.3
10	2025年3月10日	150	24	21.5	-4.00	4.00	-6	-8.4	-2.4
11	2025年3月28日	150	16.5	21.5	0.00	0.00	-5	-6.6	-1.6
12	2025年4月30日	150	20.5	21.5	-5.00	5.00	-3	-4.6	-1.6
13	2025年5月7日	150	23	21.5	-6.00	6.00	-4	-5.7	-1.7
14	2025年5月23日	150	21	21.5	-8.00	8.00	-5	-6.8	-1.8
15	2025年6月4日	150	28	21.5	-9.00	9.00	-6	-7.5	-1.5

2. 温度-精度关联规律

对于温度数据，采用移动平均滤波法去除高频噪声干扰，设置窗口宽度为5~10个采样点，使温度曲线更平滑，以精准反映温度变化趋势。针对精度测量数据中的异常值，运用格拉布斯准则进行判别与剔除，以确保数据可靠性。当某测点精度数据偏离均值3倍标准差时，判定为异常值并予以剔除，避免其对后续分析造成误导^[5]。由以上数据总结如表4所示。

表4 车间温度变化与检验精度关系

车间温度/℃	补偿调整/ μm	三坐标检测/ μm	变形方向
16→28	0→-9	-3.1→-9.4	膨胀
28→16	-9→0	-9.4→-3.1	收缩

关键发现：

（1）日均温变曲线呈"晨低→午升→晚稳"特征

针对上述车间温度变化，需要适时调整加工目标值，保证最终加工目标值进入公差范围，本研究所加工轴套 $\phi 150$ 轴承孔，要求公差范围-5~-10 μm 以保证轴承装配精度。全年对应车间温度变化的调整量为-9~0 μm ，最小值-9 μm 发生在5~6月，车间最高温度在26~28℃时，在当天的加工过程中，早上设定150-7 μm ；随着车间温度逐渐升高，到上午10~12点，参数调整为150~8 μm ；下午开始至晚上8~9点参数调整为150-9 μm ，按此规律进行参数调整保证机台恒温自检精度范围-6~-2 μm ，三坐标检验结果在-8~-4 μm ，满足设计预期；最大值0，发生在9~10月，车间最低温度在16~18℃，在当天的加工过程中，早上设定150-0 μm ；随着车间温度逐步升高，到上午到10~12点，参数调整为150-1 μm ；下午开始至晚上8~9点参数调整为150-2 μm ，按此规律进行参数调整

保证机台恒温自检精度范围 $-5\sim-3\mu\text{m}$ ，三坐标检验结果在 $-7\sim-5\mu\text{m}$ ，满足设计预期。

(2) 补偿响应存在三段式特性

由上述结果可知，车间温度变化带来的补偿调整可分为三个阶段： $16\sim21^{\circ}\text{C}$ 为第一个区间，轴套孔尺寸加工调整补偿值与三坐标恒温检测标准值相比表现为“缩”的趋势，均值为 $5\sim6\mu\text{m}$ ； $21\sim23^{\circ}\text{C}$ 为第二区间，轴套孔尺寸加工调整补偿值与三坐标恒温检测标准值相比表现为“持平”的趋势； $23\sim28^{\circ}\text{C}$ 为第三区间，轴套孔尺寸加工调整补偿值与三坐标恒温检测标准值相比表现为“涨”的趋势，均值为 $4\sim5\mu\text{m}$ 。

3. 实施效果

应用上述补偿方法，轴套批量加工后，轴承孔合格率%提升16%，CPK值增加0.6，零件加工一致性提升明显。提升效果如表5所示。

表5 实施补偿前后提升效果

指标	补偿前	补偿后	提升率
合格率	82.4%	98.7%	+19.8%
CPK值	0.89	1.52	+70.8%

四、结论与展望

1. 研究成果总结

围绕机床主轴精密零件精度与环境温度的相关关系展开深入探究，通过对主轴结构的精细剖析，明确了心轴、轴承、轴套、润滑及密封装置等关键零件的构造特征，提出关键核心零件的精度要求，阐述了环境温度对零件精加工的影响机制，以实验的方式采集并分析数据，总结出主轴零件精加工与车间温度相关关系，得出零件加工精度在车间温度变化的过程中保持一致性的方法，为主轴零件加工精度一致性持续提升增加了新的思路。

由本研究可总结出以下几个方面：首先，在季节交替过程中，无温度调节手段前提下，随着机床发热车间温度变化范围在 $16\sim28^{\circ}\text{C}$ 之间（不同地理位置可能有所不同），且呈现出上午快速拉升下午平缓增长的特点；其次，加工车间温差导致的精度偏差与金属材料热膨胀相关性，符合热胀冷缩特性，但受综合条件影响，尺寸变化值与热膨胀计算方法不完全一致，具有一定的衰减特性；最后，在车间温度变化时，精加工尺寸精度可以通过调整补偿值的方式进行修正，提升零件精加工一致性。

2. 未来研究方向

未来在机床主轴精密零件精度与环境温度相关关系的研究领域，仍有很多方向需深入研究。在影响机理深化方面，需进一步考虑微观视角下材料组织相变行为对尺寸精度的影响。如精加工过程中切削高温作用下主轴材料的晶粒变化、晶界滑移、合金元素扩散引发的相变，如何精准量化其对热膨胀系数、热导率等参数的动态改变，进而深入剖析对零件目标精度的连锁反应等方面还需进一步探究。与高校联合借助先进的分析设备及方法，如高分辨率电子显微镜、同步辐射X射线衍射等，实时观测微观组织变化，进一步揭示热传导、热变形的微观机制，实现更精准的补偿调整。

同时，拓展研究范围。一方面，在多品种变批量生产模式下，机床频繁切换加工任务，主轴经历不同切削力、热载荷冲击，其精度与温度的耦合关系随时间呈现复杂动态变化。通过长期在线监测，收集海量数据，挖掘不同工况序列下的精度退化规律，建立基于时间序列的预测模型，实现对零件精度的全生命周期管控。另一方面，扩充多场影响研究，充分考虑机床运行中的振动、电磁等物理场与温度场交互作用。例如，高速电主轴的高频电磁场对轴承润滑特性、热生成的影响，以及切削振动通过改变接触状态加剧热变形等问题，综合多物理场建模分析，全面提升对复杂实际工况的模拟精度。□

参考文献：

[1] 张国庆, 李志刚. 精密机械零件热变形补偿技术研究进展[J]. 机械工程学报, 2019, 55(3): 189-200.
ZHANG G Q, LI Z G. Research progress in thermal deformation compensation technology for precision mechanical parts[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(3): 189-200.
[2] ISO Central Secretariat. ISO 492:2014 Rolling bearings — Radial bearings — Geometrical product specifications (GPS) and tolerance values[S]. Geneva: ISO, 2014.
[3] 李志仁. 数控木工机床的安装与调试[J]. 农业科技, 2010(7): 38卷.
[4] INCROPERA F P, DEWITT D P. Fundamentals of Heat and Mass Transfer[M]. 7th ed. New York: Wiley, 2011: 120-155.
[5] MONTGOMERY D C. Introduction to Statistical Quality Control[M]. 8th ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2019: 98-102.

推土铲臂耳变形原因分析及相关工艺改进

泰安嘉和重工机械有限公司 安宝峰 赵忠刚 邢长昕

【摘要】本文简述了推土铲的常规焊接方案，详细剖析了常规组焊推土铲工艺导致两臂耳孔焊后同轴度超差的各种原因，论述了新式组对推土铲总成工装的设计及其关键点的控制事项，并加述了新式油缸耳板芯轴系统和臂耳芯轴系统的设制要领，图文并茂地讲解了新式组对推土铲总成的工装制做环节及应用方法，系统地描述了组对推土铲总成过程中的点焊细节及注意环节。从组焊推土铲总成变形的各种根源上入手进行了新式组对工装的设计和制做。该工装置制新颖、操作简捷、组对高效、质量可靠，实现了业内梦寐以求的无隙组对各种耳板的芯轴系统的发明设制，开辟了机械制造业无隙组对耳板的先河。

某型推土铲的结构如图1所示，主要尺寸如图2所示。目前业内生产厂家在组对该产品时，虽然多数先将前板、侧板、底板、扣板与加强板组焊为一体（后续称其为：前箱体，如图3所示），也将臂板与臂耳组焊为一体（后续称其为：主臂，如图4所示），最后组焊推土铲总成，进行了焊接热量的分解；并将两臂耳档距进行了适当的放量，且多数是用一根芯轴（通轴）对臂耳孔进行的定位，两臂耳在组对时也点焊上了撑筋，其撑筋也是在推土铲焊完并冷透后去除的。但是，仍有百分之十以上的推土铲在安装前需要对其臂板进行矫正，两臂耳孔穿不下经验芯轴（ $\phi 59.854\text{mm}$ ）者，须对其进行打磨，直到检验芯轴通过后。利用该组对方式点焊完成后，各耳板必然受焊接应力的影响而发生偏移和扭曲，使芯轴外圆受到了耳板孔壁因变形带来的径向力，孔内的芯轴须通过锤击的方式取出，不但使生产现场的噪音较大，严重制约着该型推土铲的生产工效，浪费着许多生产辅料及生产资源。另外，由于各耳板孔的直径是按照其公差带进行加工的，如图2可知，其孔径最大尺寸与最小尺寸的差距为 0.074mm ，而此组对方式中的芯轴直径是按照耳板孔的下差尺寸再减 $0.01\sim 0.04\text{mm}$ 进行设制的，其与耳

板孔的最小间隙为 $0.02+0.074=0.084\text{mm}$ ，最大间隙为 $0.04+0.074=0.114\text{mm}$ ，这就造成了各组孔系在组对时已经或许发生了上述间隙值的同轴度误差。

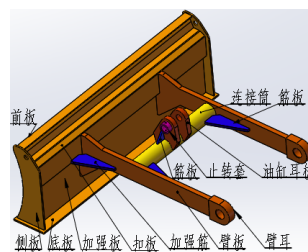


图1 推土铲

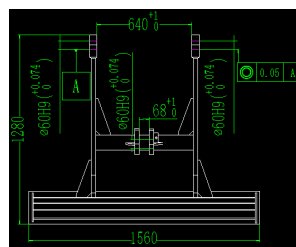


图2 推土铲主要尺寸示意图

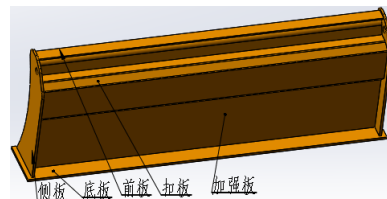


图3 前箱体

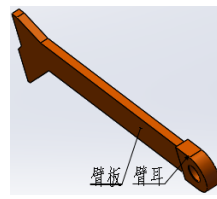


图4 主臂

究其孔系同轴度误差的产生原因，主要是由于组对推土铲的工艺装备设制不合理及点焊方式不正确、焊接工艺不科学、焊接参数选用不当造成的。因此，改进该型推土

铲的组对工艺装备及点焊方式、优化其焊接工艺、正确选择焊接参数至关重要。

1. 原因分析及相关措施

由图2中可知,该型推土铲的臂耳档距为6400+1mm,在组对时放量该尺寸为644mm。由于组对该产品时,先将其主臂分别向外移2mm(用工装支座定位),两臂耳孔($\phi 60H8_0^{+0.074}$)中穿一根直径为 $\phi 60g7_{-0.04}^{-0.100}$ 芯轴,然后进行点焊等事项。推土铲在焊完、冷透并去除撑筋或经矫正,使其档距符合图纸尺寸后,两主臂此时是向档内弯曲,两臂耳孔的轴线此时是交叉的。若使其左端臂耳孔轴线处于水平状态时,其右端臂耳孔中心必然向上偏移;反之亦然。臂耳与底架耳板通过销轴($\phi 60d8_{-0.146}^{-0.100}$)安装时,左端臂耳及底架耳孔安装销轴后,右端臂耳孔的中心会产生图5和图6的两种极限状态。

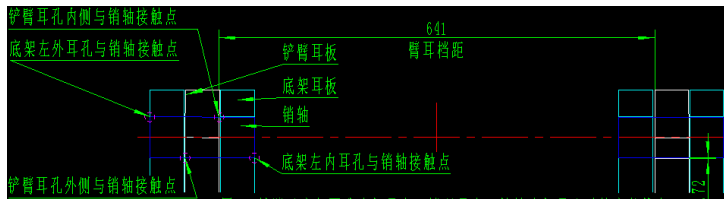


图5 铲臂及底架耳孔直径最大、档距最大、销轴直径最小时的安装状态

由图5可知,当臂耳孔及底架耳孔直径最大、档距最大、销轴直径最小时,销轴与各耳孔的间隙为 $(60+0.074)-(60-0.146)=0.22\text{mm}$ 。通过CAD作图可知,其左端臂耳安装后,在耳孔与销轴0.22mm的装配间隙下调整右端臂耳,可使其臂耳孔壁向下超出底架耳板孔壁至0.72mm,再回调至基本同轴后是可以安装的。

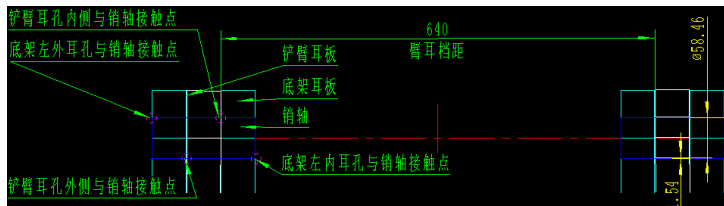


图6 铲臂及底架耳孔直径最小、档距最小、销轴直径最大时的安装状态

由图6可知,当铲臂及底架耳孔直径最小、档距最小、销轴直径最大时,销轴与各耳孔的间隙为 $60-(60-0.1)=0.1\text{mm}$ 。通过CAD作图可知,其左端安装后,调整右端臂耳向下至极限状态后,臂耳孔下侧至底架耳板孔壁仍有1.54mm的距离。此时臂耳孔与底架耳板孔的最大共轴尺寸仅为 $\phi 58.46\text{mm}$,该尺寸小于销轴的最小时的直径 $60-0.146=\phi 59.854\text{mm}$,这样,右端臂耳孔与底架耳板孔是无法装入销轴的。

将上述两种状态合并分析可知,推土铲左端臂耳孔与

销轴的间隙在0.1mm至0.22mm之间变化时,右端臂耳孔下侧的摆动范围为 $0.72-(-1.54)=2.26\text{mm}$ 。因此,若使推土铲右端臂耳孔壁下侧能够上调1.54mm,即可使该端铲臂耳孔下侧高点与底架耳板孔壁下侧重合,由于销轴在最大直径、耳板孔在最小直径时有0.1mm的间隙,理论上右端臂耳孔只需上调 $1.54-0.1=1.44\text{mm}$ 即可使其孔装入最大直径时的销轴。此时,左端臂耳孔与销轴间隙为 $0.1+(0.22-0.1)\div(0.72-(-1.54))\times(1.54-0.1)=0.1+0.076=0.176\text{mm}$ 时,即便推土铲右臂耳孔径及底架耳板孔径均为最小尺寸,销轴在最大直径状态下也是可以装入的。

由此可知,通过上述方式组对、焊接后的推土铲,在其左或右耳板系统与销轴装配间隙低于0.17mm时,需对推土铲主臂或有关耳孔进行矫正或打磨才能进行相关件的安装。

再加上因点组次序不合理、焊序不科学、焊接参数选用不当、组对间隙较大、撑筋位置不当或撑筋强度不足等导致的相关耳板孔同轴度走失的问题,还会使组装前对推土铲臂的矫正及耳孔打磨工作更加繁琐。

当然,对于推土铲臂耳孔的打磨事项,许多是在组装过程中进行的。

2. 新式组对推土铲总成工装的设计的关键点

通过上述分析已知:原推土铲的组对工装设计不科学,导致推土铲总成焊完、冷透并去除撑筋后,铲臂两耳孔轴线发生了明显的空间交叉问题。为此,必须改进该型推土铲总成的组对工装,以使推土铲总成在焊完、冷透并去除撑筋后,其两臂耳孔的轴线达到“重合”,尽量提高其两臂耳孔的共轴直径。根据上述对推土铲两臂耳孔焊后同轴度超差的原因分析可知,只需将工装上定位推土铲两臂耳的定位座与推土铲臂耳贴合的定位面作反向的扭转,即可使焊后去除撑筋的推土铲两臂耳孔轴线实现重合。

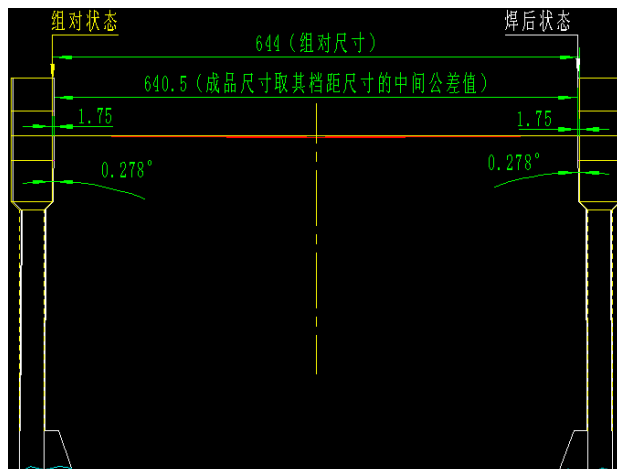


图7 推土铲耳板内侧面由组对状态至焊后状态的变化角度

由图7可知,该型推土铲耳板档距由组对时的644mm到焊后成品的640.5mm(成品尺寸取其档距尺寸的中间公差值)、其耳板内侧面向内侧偏移了1.75mm、两耳板内侧面的角度变化了 0.278° 。因此,制做新式组对该型推土铲的工装时,须按照图8所示,将定位耳板侧面反向倾斜 0.278° ,使推土铲总成在后,其臂耳变形侧面达到或趋近平行的状态,提升两耳板孔轴心线的重合度,以增大两耳板孔的共轴尺寸。

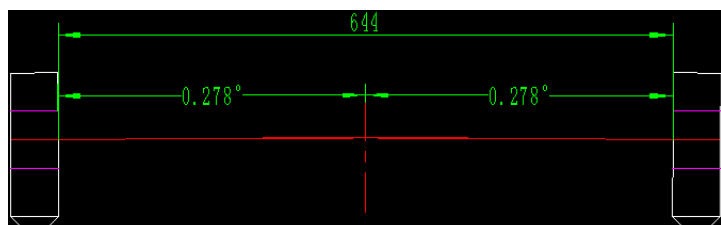


图8 推土铲耳板内侧面组对状态

另外,原工装组对推土铲的臂耳芯轴和油缸耳板芯轴均采用的是常规的芯轴新式,在推土铲总成组对完成,由于点焊的原因,导致每组耳板发生了微量偏扭,其孔壁与芯轴发生了径向挤压,致使在取芯轴过程中常常采取锤击的方式进行,既导致芯轴受损,又有较大的噪声,且费时费力。为此,本工装的臂耳芯轴和油缸耳板芯轴均作了创新设计。

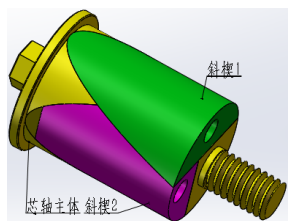


图9 臂耳芯轴

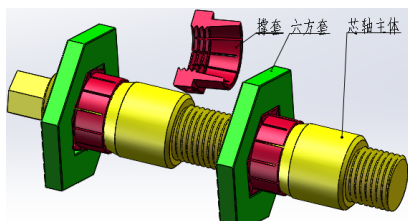


图10 油缸耳板芯轴

臂耳芯轴如图9所示,它由芯轴主体、斜楔1和斜楔2组成的一个组合体。两斜楔的端面均有M12的丝孔,在组对过程中,用螺栓通过其丝孔将其顶紧,芯轴主体和两斜楔便将耳孔撑紧了,实现了“无隙”组对,提高了耳孔与工装孔的同轴度;取出时,先通过两斜楔的丝孔将两斜楔沿芯轴主体的轴向拉动一下,芯轴主体和两斜楔与耳孔壁就有了间隙,芯轴无需锤击便可轻易取出。芯轴尽量采用40Cr或T8、T10钢材制做,为提高其使用寿命,其加工前须调质处理,加工后须对其外圆面进行高频淬火处理,硬度为45~50HRC^[1]。

油缸耳板芯轴图10所示,它由芯轴主体和四个撑套、两个六方套组成,也是组合体。芯轴主体的两段直面外圆与工装的定位孔是配车的,它们只有0.01~0.02mm的间隙配合。使用时,将其插入工装的孔中,旋拧其六方头,通

过其端头螺纹与工装螺母的旋合将其拉入工装定位孔;退出时,反向旋拧其六方头即可,杜绝了锤击的现象。撑套的内孔有一段螺纹和一段圆锥面组成,其螺纹与芯轴主体的螺纹相匹配,其圆锥面与芯轴主体的圆锥面向匹配,其周向分别沿轴向交错地加工了一些槽,可使其在径向上随芯轴主体锥面对其内孔锥面的撑力而发生涨大现象,从而实现对其工件孔的径向无隙定位。使用时,将撑套和六方套按照图示的方式组配,旋拧六方套即将撑套拧入工件孔;退出时,方向旋拧六方套,待其均退出工件孔时,取下六方套,其便能与轴向主体自由脱落了。该芯轴中的芯轴主体的材料与加工方式同臂耳芯轴一样,其撑套最好用弹簧钢制做,其外径与耳板孔的配合公差为H6/g6^[2]的过渡配合,这样有利于加大撑套周向与耳板孔壁的接触面积,以提升定位的准确性及延长撑套的使用寿命。

3.新式组对推土铲总成的工装制作

该工装如图11所示,其中蓝色的立板、托板、撑板、钢套、油缸耳支板、螺帽、连板、臂耳支板、筋板、支板1、支板2、主台板、挡块和围板等组焊一体,称为平台,其不禁有夹具体的作用,还有定位的作用[1]。其各自的作用在后续组对推土铲总成中将会知悉,但两臂耳支板须按照图8的倾斜尺寸进行镗铣,螺帽须旋拧在油缸耳板上的油缸耳板芯轴的端头螺栓上后,再焊在油缸耳板上的,须保证其螺孔与油缸耳支板孔的同轴度。

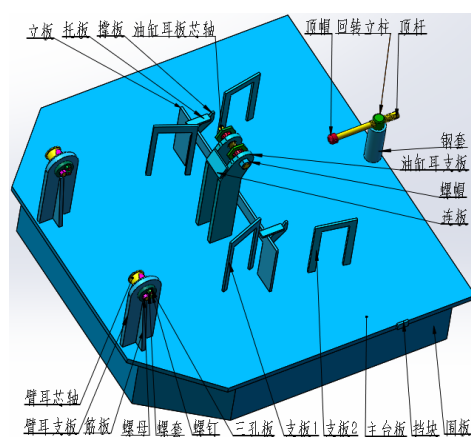


图11 组对推土铲总成的工装

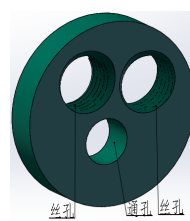


图12 三孔板

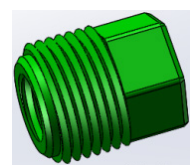


图13 螺套

臂耳芯轴和油缸耳板芯轴分别如图9和图10所示。顶帽在顶杆上是可以自由转动的源头套,它起着防止顶杆在顶紧推土铲前箱体的过程中因直接接触而发生较大摩擦阻力而造成旋拧扭矩过大的作用,同时,还防止推土铲前箱体被顶杆顶伤的情况。三孔板如图13所示,它有两个丝孔和一个通孔,其丝孔是安装图13螺套的,内六角螺钉是旋拧在螺套中的。

4.新式组对推土铲总成的工装应用及相关注意事项

该工装的应用如图14所示，首先，将连接筒置于工装上的对应位置，并将油缸耳板组于其上；其次，将组焊完成的臂耳和臂板组于其上；再次，将前箱体组上；然后，调整连接筒与油缸耳板靠实，旋拧顶杆使前箱体靠实臂板；最后，将各筋板及加强筋组焊于对应位置，点焊完成后，在两臂耳端头点焊撑筋。全部点焊牢固后取下各孔芯轴，退回顶杆并旋转回转立柱90°，卸下推土铲。

注意：点焊时须先点焊臂板与前箱体对接处，并只点焊臂板与前箱体接触的上、下端，且两端焊点须交叉两次完成，焊后立即用锤子击打一下焊道；然后，按照上述方法点焊油缸耳板与连接筒对接处的两端；最后，再按照上述方法点组各筋板及加强筋。

连接筒若与两臂板有间隙时，须使其两端间隙均匀对称。点焊时，须待其与臂板连接的筋板两端均点焊牢固后，再点焊其水平中心面与臂板接触处的焊缝，并在点焊后及时锤击一下焊道。

所用撑筋必须具有足够的强度，其点焊必须牢靠；为在工件冷透后便于取下撑筋，需在撑筋的单侧进行点焊。

点焊电流不宜过大，防止熔深过大致使焊缝收缩趋势过大而造成组对过程中工件的点焊应力偏高；也不宜可过小，点焊电流过小，熔深浅，点焊不牢，在后续焊接过程中会有开裂的隐患。改产品组焊件的材质为Q235和Q355B，采用混合气体保护焊、应用直径 $\phi 1.2\text{mm}$ 、抗拉强度50Kg级的焊丝（H08Mn2SiA）进行点焊，根据焊接电流公式 $U=0.04I+20\pm 2$ （焊接电流 $>200\text{A}$ ）[3]及点焊经验，组对该推土铲总成时，点焊工艺参数附表所示。

点焊工艺参数

点焊电流/A	点焊电压/V	气体流量/L.min	焊接温度/℃
200~230	24~28.5	15~20	≥ 5

上接第65页

300015-热误差斜率表温度传感器编号

300016-热误差斜率表起始参数号

通过上述参数的设置，计算曲率值 $\tan \beta(T)$ ，利用热补偿公式，计算出补偿数值，对机床的坐标值进行偏移。

$$Dx = -((Px - P0) \times \tan \beta(T))$$

线性热膨胀补偿原理如图10所示。

4.结语

综上所述，热误差补偿是机床提高加工精度的一个重要研究方向，尤其是在国产数控系统上的应用，该研究为国产数控系统在机床领域填补该研究方向的空白。□

若环境温度低于5℃时，须做加热处理，加热温度为 $\geq 50^{\circ}\text{C}$ ；由于臂板厚度为25mm，为防止点焊时焊缝开裂，须将焊缝两侧75mm范围内清除油污及锈蚀等，并加热到75~100℃后方可进行点焊。

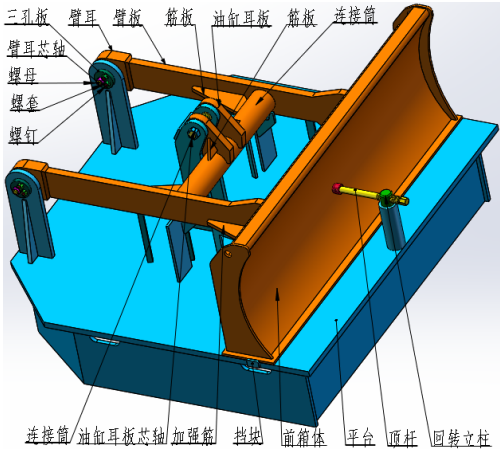


图14 新式组对推土铲工装的应用

5. 结语

文章对该型推土铲焊后臂耳变形的分析通透、易懂，从其变形根源入手进行了细致的分析，依据上述分析设制了该型推土铲的新式组对工装，并简述了使用该工装的注意事项。该新式组对推土铲的工装设制新颖、操作简捷、创新性地发明了无隙组对各耳板的芯轴系统，开辟了机械制造业无隙组对耳板的先河。□

参考文献：

[1] 王纯祥. 焊接工装夹具设计及应用 [M]. 北京：化学工业出版社，2020.
[2] 朱耀祥. 浦林祥. 现代夹具设计手册 [M]. 北京：机械工业出版社，2016.
[3] 焦万才. 张文明. 张以鹏. 焊工实际操作手册 [M]. 沈阳：辽宁科学技术出版社，2006.

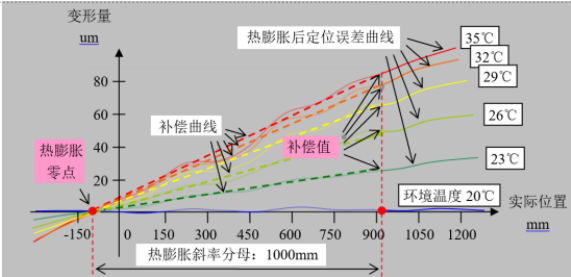


图10

参考文献：

[1] 华中8型智能数控系统综合样本
[2] 华中8型数控系统选型手册
[3] 智能高速五轴数控机床综合解决方案
[4] 智能高速五轴数控机床综合解决方案
[5] 五轴引领 高端智胜——HNC-848Di五轴数控系统

龙门加工中心横梁优化及仿真分析

通用技术集团机床工程研究院有限公司 尹晓霞 张一平

【摘要】 龙门加工中心横梁由于自重、滑鞍、滑枕的重力及其所承载的各种零部件的重力而产生变形，进而导致导轨安装基面精度失真并影响龙门加工中心横梁的综合直线度，不同构型的筋板对横梁的导轨安装基面刚度以及抗振性会产生不同的影响。为了提升某型号龙门加工中心横梁导轨安装基面的刚度以及抗振性，对其受力进行求解并基于Workbench分析其变形和固有频率，基于不同筋板构型横梁的分析结果，设计一种具有组合筋板构型的优化横梁，其导轨接触面刚性及抗振性均有所提升。通过分析两种构型筋板占比对变形及固有频率的影响，确定横梁内部两种筋板构型的占比，使横梁的抗振性进一步提升。

1.引言

龙门加工中心具有高刚性、高精度和高切削效率的特点，主要应用于航空航天、工程机械、能源设备、轨道交通、模具制造等行业^[1]。横梁作为龙门加工中心的关键部件之一，起到了连接和承载的作用，对龙门加工中心的精度具有重要的影响。因此，对横梁进行优化设计，保证横梁的几何精度，是龙门加工中心研发过程中重要的一环。

罗京^[2]等通过对某横梁进行静、动态特性分析，找出横梁的薄弱位置，以横梁的柔度最小为目标函数，运用变密度法对其进行拓扑优化，改进后横梁的位移变形量减小16.29%，1-3阶模态的固有频率分别提高了7.40%，7.72%，12.32%。田亚峰^[3]等结合Workbench有限元分析软件，基于对乌龟壳的结构仿生，设计了一种拱形与纵横筋板相结合的新型横梁筋板结构，新型筋板结构横梁与原型横梁相比在性能有了明显的提升。ZHAO^[4]等对龙门机床采用仿生优化设计，根据叶肋和仙人掌的结构性能应用于机床横梁，达到了轻量化效果。LEE^[5]等基于灵敏度分析的稳健设计方法，建立了目标函数和约束函数的稳健型模型，并将其运用于机床结构设计。

上述研究表明，经过改善龙门加工中心横梁的构造，能够显著提升其总体精度，但基于拓扑优化或仿生设计而

得出的横梁筋板构型过于复杂，其铸件制作难度大、生产周期长，很难满足机床企业低成本、高效率的实际生产需求。

本文以某型号龙门加工中心横梁为原型，通过对其进行受力分析，确定仿真的边界条件，得出原型横梁在载荷作用下产生的变形以及固有频率，并将其作为基准。再根据常见的机床横梁筋板构型，选择其中两种构型进行组合，得出一种组合构型横梁作为原型横梁的优化型号。将原型横梁的边界条件施加在优化横梁上，对比两种横梁的变形结果，确定优化结果的正确性。

2.边界条件求解及原型横梁仿真

为了减少网格划分及静力学分析时间，本次分析直接对横梁导轨的受力情况进行理论计算，并对横梁及导轨进行边界条件加载。

在不考虑切削力的情况下，横梁受到滑鞍、滑枕的重力及其所承载的各种零部件的重力，如电机、减速机、平衡油缸、传动轴、主轴等，将上述重力累加并记为 G ，将上述零部件的整体质心记为 CM 。由于横梁受到立柱的支反力，其大小、方向均未知，若直接对横梁进行受力分析将会增加计算量，因此取滑鞍、滑枕等零部件作为分析对

象，认为横梁上导轨、滑鞍上滑块接合面受力等大反向。且上述零部件近似为对称结构，可将整个力学模型简化为二维形式，如图1所示，即滑鞍下侧滑块接合面受力为 F_{1X} 、 F_{1Y} ，滑鞍上侧滑块接合面受力为 F_{2X} 、 F_{2Y} 。

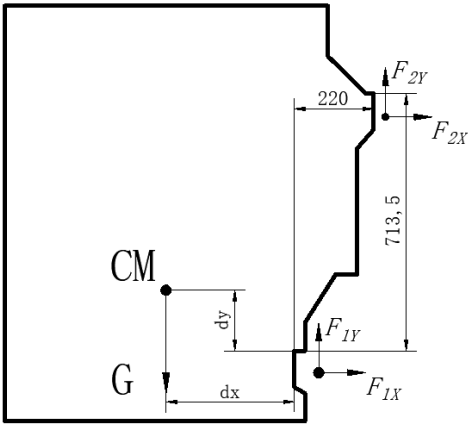


图1 受力分析图解

由于滑鞍处于平衡状态，可对合力列出以下方程^[7]：
对CM列矩可得：

$$F_{1X} + F_{1Y} - G = 0 \tag{1}$$

$$F_{2Y} \cdot (220 + dx) - F_{2X} \cdot (dy - 713.5) + F_{1Y} \cdot dx + F_{1X} \cdot dy = 0 \tag{2}$$

对列矩可得：

$$G \cdot dx + F_{2Y} \cdot 220 - F_{2X} \cdot 713.5 = 0 \tag{3}$$

对列矩可得：

$$G \cdot (220 + dx) - F_{1Y} \cdot 220 + F_{1X} \cdot 713.5 = 0 \tag{4}$$

根据式（1）-（4）可得如下线性方程组：

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 \\ dy & dx & dy - 713.5 & dx + 220 \\ 0 & 0 & -713.5 & 220 \\ 713.5 & -220 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{1X} \\ F_{1Y} \\ F_{2X} \\ F_{2Y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G \\ 0 \\ -G \cdot dx \\ -G \cdot (220 + dx) \end{bmatrix} \tag{5}$$

在SolidWorks中对滑鞍及其上的零部件进行装配，使滑鞍处于横梁中间位置，滑枕伸出长度最长，测得质量及质心位置，如表1所示。

表1 质量及质心位置

质量/kg	G/N	dx/mm	dy/mm
4865	47700	286	24.5

根据滑鞍处于平衡状态可知式(5)有且仅有一个解，该解如表2所示。

表2 滑鞍受力结果

F_{1X}/N	F_{1Y}/N	F_{2X}/N	F_{2Y}/N
24700	-32000	-24700	16800

对表2中四个分力取相反数即为横梁导轨面受力，至此，边界条件已解出。

将原型横梁模型导入Workbench中，材料选择HT300，密度7300kg/m³，弹性模量143GPa，泊松比0.27，横梁内部筋板采用井型布置。模型间接触及网格划分完成后对其施加上述边界条件和标准地球重力，对横梁两底侧立柱接合面选择固定支撑并运行仿真，结果如图2所示。

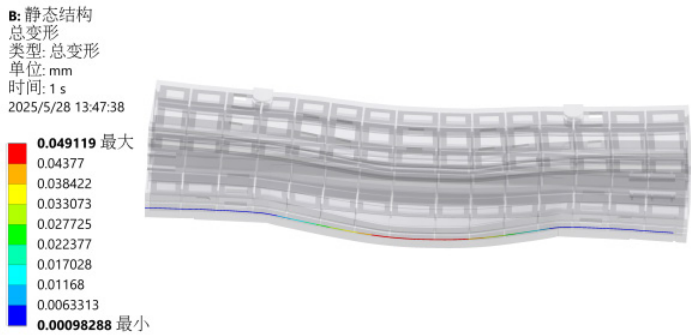


图2 原型横梁仿真结果

由仿真结果可知，横梁最大应力为14.8MPa，上下两导轨面变形如表3所示。

表3 横梁导轨面变形结果(单位: mm)

位置	总变形	X向变形	Y向变形
上导轨面	0.051	0.039	0.032
下导轨面	0.049	0.008	0.049

由于零部件的最低几阶固有频率对其性能影响最大，因此只对横梁的前6阶模态进行研究，横梁的前6阶固有频率如表4所示。

表4 横梁前六阶固有频率(单位: Hz)

阶数	1	2	3	4	5	6
频率	114	175	182	238	279	307

根据仿真结果，横梁上下两导轨面总变形量基本一致，但X、Y向变形差异较大。在X方向上，上导轨面的变形相较于下导轨面多出0.03mm；在Y方向上，上导轨面的变形相较于下导轨面少了0.015mm，考虑到上下两导轨面的Y向受力，可以得出结论：原型横梁的上半部分刚性较差。

3.横梁筋板构型选择

常见的横梁筋板构型主要分为以下几种：井型、菱形、米字型、O字型^[6]，其剖面结构如图3所示。

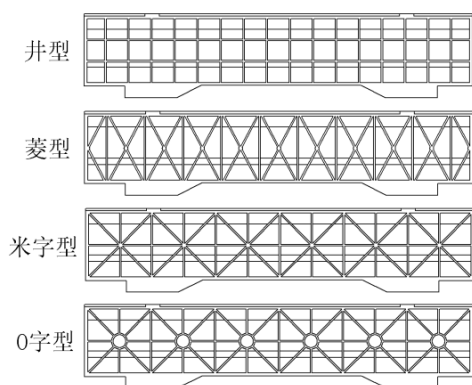


图3 常见横梁筋板形式

按照图3中的横梁筋板构型进行横梁三维模型绘制，筋板厚度均为20mm，将其导入Workbench中，设置与原型横梁相同的材料和边界条件进行静力学仿真，导轨面变形结果如表5所示。

表5 不同筋板构型的横梁导轨面变形结果

构型	变形量/mm	质量/kg
井型	0.044	6539
菱型	0.040	7058
米字型	0.042	7020
O字型	0.043	6948

上表中四种筋板构型的横梁变形量差距较小，其中井型横梁的变形量最大，为0.044mm，但质量最小；菱型横梁变形量最小，为0.040mm，质量最大。然而仅分析四种筋板构型横梁的静态特性是不够的，还需要综合分析横梁的动态特性以及结构特点。基于前文的静态分析，对四种横梁进行模态分析，结果如表6所示。

表6 横梁前六阶固有频率(单位: Hz)

	井型	菱型	米字型	O字型
1阶	113	152	152	135
2阶	168	156	198	182
3阶	173	157	214	194
4阶	193	158	222	209
5阶	198	158	237	220
6阶	265	159	258	272

根据模态分析结果，菱型横梁的前6阶固有频率变化较小，动态特性较差，米字型横梁动态特性最好，井型和O字型横梁的动态特性相较于米字型横梁略差。然而如图4所示，米字型横梁的筋板交叉结构过于复杂，易产生应力集中，铸件制作难度大，废品率高。因此菱型及米字型不适合作为横梁的筋板构型。

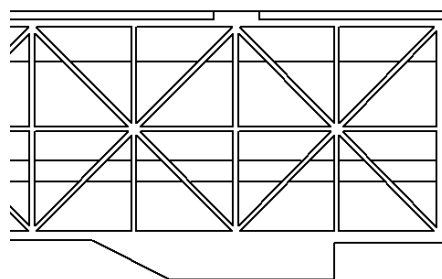


图4 米字型筋板交叉结构

综合分析横梁的变形、固有频率、质量以及铸件制造难易程度，虽然井型和O字型横梁变形量相较于其它两种构型的横梁略大，但其质量较小、动态特性尚可、铸件易于制造，经济效益高，符合企业的生产需求，且这两种筋板构型在企业中应用较多，因此选择井型和O字型作为优化横梁的筋板构型。

4. 优化横梁设计及对比

根据前文得出的方案，对横梁筋板构型进行重新设计，得出优化横梁构型见图5。

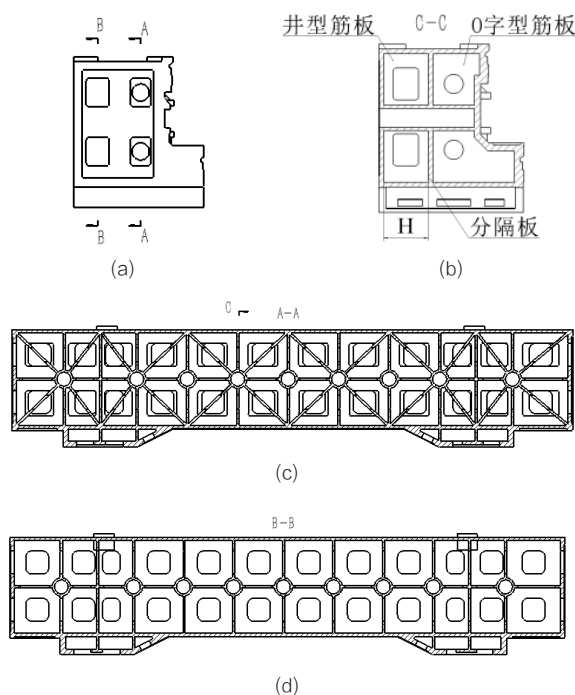


图5 优化横梁筋板构型

如图5所示，优化横梁由O型和井型筋板组成，分隔板前侧采用O字型筋板，用于提高导轨接触面的刚性，进而使其变形降低，分隔板后侧采用井型筋板，用于降低横梁的重量，进而达到降低成本的目的。

将优化横梁导入Workbench中，其余设置与原型横梁一致，得出仿真数据后与原型横梁进行对比，具体结果如表7所示。

表7 横梁仿真结果对比

项目	原型横梁	优化横梁	
上导轨面	总变形	0.051mm	0.034mm
	X向变形	0.039mm	0.022mm
	Y向变形	0.032mm	0.026mm
下导轨面	总变形	0.049mm	0.041mm
	X向变形	0.008mm	0.010mm
	Y向变形	0.049mm	0.039mm
1阶固有频率		107Hz	156Hz
2阶固有频率		153Hz	209Hz
3阶固有频率		167Hz	215Hz
4阶固有频率		211Hz	240Hz
5阶固有频率		248Hz	244Hz
6阶固有频率		274Hz	304Hz

由上表可知，优化横梁除了下导轨面的X向变形略高于原型横梁外，其余变形项目均优于原型横梁，其中上下导轨面总变形分别比原型横梁降低了0.017mm、0.008mm，

分别降低33.3%、16.3%，可以认为优化横梁的静态特性优于原型横梁。优化横梁的第5阶固有频率略微低于原型横梁，相差4Hz，其余阶数固有频率均高于原型横梁，综合1至6阶固有频率，优化横梁的动态特性优于原型横梁。

综合来看，组合筋板构型的优化横梁静态特性要优于原型横梁，为了进一步寻优，将图5b中井型筋板长度定义为H，绘制8种不同井型筋板宽度的横梁模型，对其进行仿真，得出导轨面变形及前6阶固有频率如表8所示。

根据表8仿真结果，两种筋板构型的占比对横梁导轨面变形影响不大，横梁的固有频率以及质量随O字型筋板的占比增大而提升，这说明在侧挂式布局下，横梁内部距离导轨面较远部分的筋板对导轨面变形影响有限，但其对横梁的整体抗振性有较大影响。综合考量横梁的导轨面刚度、抗振性以及成本，选取井型、O字型组合筋板构型横梁，且井型筋板长度为380mm的横梁作为最终优化横梁。

表8 不同井型筋板长度的横梁模型仿真结果

H	480mm	430mm	380mm	330mm	280mm	230mm	180mm	130mm	
上导轨面	总变形	0.034mm	0.034mm	0.034mm	0.034mm	0.034mm	0.034mm	0.033mm	0.033mm
	X变形	0.024mm	0.024mm	0.023mm	0.023mm	0.022mm	0.022mm	0.021mm	0.020mm
	Y变形	0.024mm	0.024mm	0.024mm	0.025mm	0.026mm	0.025mm	0.026mm	0.026mm
下导轨面	总变形	0.039mm	0.038mm	0.038mm	0.038mm	0.041mm	0.039mm	0.039mm	0.039mm
	X变形	0.009mm	0.009mm	0.009mm	0.009mm	0.010mm	0.009mm	0.009mm	0.009mm
	Y变形	0.038mm	0.037mm	0.037mm	0.037mm	0.039mm	0.038mm	0.038mm	0.038mm
1阶固有频率		144Hz	145Hz	150Hz	153Hz	156Hz	157Hz	162Hz	165Hz
2阶固有频率		199Hz	200Hz	208Hz	213Hz	209Hz	217Hz	216Hz	214Hz
3阶固有频率		213Hz	217Hz	217Hz	217Hz	215Hz	220Hz	227Hz	232Hz
4阶固有频率		229Hz	232Hz	237Hz	240Hz	240Hz	245Hz	249Hz	248Hz
5阶固有频率		249Hz	252Hz	251Hz	251Hz	244Hz	254Hz	250Hz	253Hz
6阶固有频率		301Hz	306Hz	310Hz	312Hz	304Hz	317Hz	321Hz	322Hz
质量		6856kg	6995kg	7101kg	7119kg	7215kg	7267kg	7455kg	7542kg
井型占比		84.2%	75.4%	66.7%	57.9%	49.1%	40.4%	31.6%	22.8%

5.结论

通过以上分析和研究，得出以下结论：

（1）基于受力分析，得出横梁上下导轨所受分力分别为24700N、-32000N、-24700N、16800N，并将其作为仿真分析的边界条件。

（2）根据横梁受力，通过仿真得出原型横梁的变形以及固有频率，通过仿真分析不同的横梁筋板构型，并对比确定井型和O字型作为优化横梁的组合筋板构型。

（3）设计优化横梁并对其进行仿真分析，优化横梁的上下导轨面变形分别降低33.3%、16.3%，优化横梁的动态特性也优于原型横梁。

（4）基于井型和O字型横梁结构，分别对不同筋板构型占比的横梁进行仿真分析，通过对比选取井型、O字型组合筋板构型横梁，且井型筋板长度为380mm的横梁作为最终优化横梁。□

参考文献：

[1] 王强.高精度龙门加工中心横梁铸件的研制[J].铸造工程, 2024, 48(05): 24-30.
Wang Qiang. Development of High Precision Gantry Machining Center Beam Castings[J].Foundry Engineering, 2024, 48(05): 24-30.
[2] 罗京,包丽.龙门加工中心横梁的优化设计[J].齐齐哈尔大学学报(自然科学版), 2023, 39(05): 45-48+56.
Luo Jing, Bao Li.Optimized design of gantry machinin-g center crossbeam[J].Journal of Qiqihar University (Natural Science Edition), 2023, 39(05): 45-48+56.
[3] 田亚峰,李正羊,王礼明,等.横梁筋板的结构仿生设计及优化[J].机床与液压, 2016, 44(20): 5-9+43.
Tian Yafeng, Li Zhengyang, WangLiming, et al.Structur-al Bionic Design and Optimization of Beam Stiffened Plates[J].MACHINE TOOL & HYDRAULICS, 2016, 44(20): 5-9+43.
[4] ZHAO L, MA J F, CHEN W Y.Lightweight design and verification of gantry machining center crossbeambased on structural bionics[J].2011, 8(2): 201-206.
[5] LEEK K H, PARK G J.Robust Optimization Consideri-ngTolerances of Design Variables[J].Computers &Structures, 2001, 79(1): 77- 86.
[6] 高志来,邱自学,任东,等.桥式龙门铣床横梁结构设计与优化[J].工程设计学报, 2019, 26(01): 56-64.
Gao Zhilai, QiuZixue, RenDong, et al.Structure design and optimization for crossbeam Of bridge gantry milling machine[J].Chinese Journal of Engineering Design, 2019, 26(01): 56-64.
[7] 李晓丽,姚占全.理论力学[M].中国水利水电出版社: 202309.319.
Li Xiaoli, Yao Zhanquan. Theoretical mechanics[M]. China Water & Power Press: 202309.319.