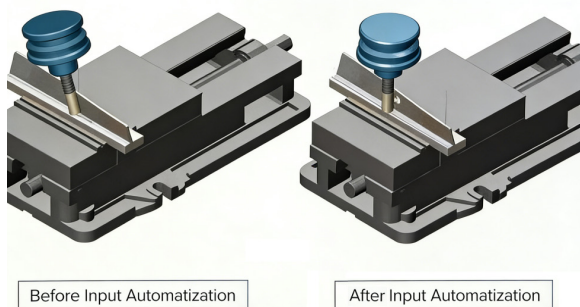


ModuleWorks 发布新的软件组件

ModuleWorks 发布了其面向数字化制造与数字工厂的软件组件 2025.12 版本。这一最新版本推出了一系列全新的自动化功能，旨在提升加工效率、工艺安全性和零件质量。

复杂模具和模具通常包含深型腔与尖锐内角，这些特征因加工可达性和刀具约束受限而难以加工。传统的三轴铣削依赖长而细的刀具，这会导致成本升高、风险增加，以及需要人工抛光的残留材料。

ModuleWorks 2025.12 引入了全新的角部精加工刀路，旨在克服这些挑战：它通过检测未切削余量、生成稳定的刀具中心轨迹，并合并优化路径以最小化重定位。它能自动调整陡峭和浅滩区域的刀路策略，确保材料去除精准、表面质量优异，并减少人工抛光工序。



进给控制（FeedControl）可根据切削力和机床的个体性能动态调整刀路，帮助工程师维持稳定的切削条件、延长刀具寿命并加快加工周期。

ModuleWorks 2025.12 提供了一个新选项，可直接在 FeedControl 界面中定义自定义工艺约束。通过指定侧刃负载、切屑负载和功率 - 扭矩限制等参数，用户现在可以精细调整刀路，以优化加工效率和安全性。

ModuleWorks 2025.12 对侧刃铣削（SWARF machining）进行了重大改进。最新更新引入了增强逻辑，可在曲面上可靠地检测引导曲线，即使是那些带有圆角边界的曲面。这克服了以往的限制，无论边缘几何形状如何，都能实现一致的曲线选择。它还简化并加快了编程 workflow，使用户能够更轻松地处理多样的零件拓扑结构，并在复杂加工场景中获得一致的结果。

芝浦机械推出双铣镗床对置同步加工系统 助力大型零件加工提质增效

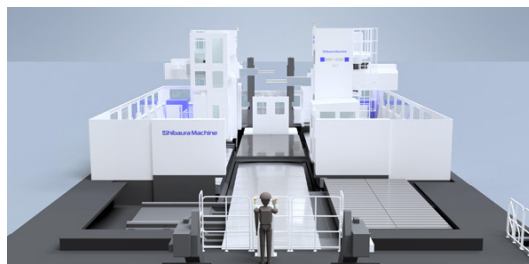
近日，芝浦机械株式会社推出基于双铣镗床对置同步

加工技术的生产系统，可提升大型零件加工效率、推动企业自动化升级并优化人工成本，该系统已获多田野株式会社丸龟工厂订单，正式进入商业化落地阶段。

该系统以两台自研 BSF-150C 落地式卧式铣镗床为核心，采用对置安装设计，可同时加工工件相对两侧，将传统四步分度的四面加工精简为两步，大幅缩短加工周期。针对工程机械领域对大型零件加工的高要求，这套定制化系统可覆盖大型工程机械回转架全加工流程，部分规格能满足高端需求，搭配自动测量功能与专用夹具，进一步实现加工自动化，减少人工投入与设备设置时间。

系统在效率、精度、自动化层面优势显著，双托盘交换器可灵活适配多类生产场景；依托设备高刚性与同步加工模式，双面同心加工精度优于传统单机床加工。同时，系统搭载排程功能，专用控制面板可联动机床与托盘交换器，实现无人化多工序加工，降低人工成本。

该系统的核心技术难点是双大型机床的协同控制，芝浦机械通过搭建专用控制系统，实现了机床与自动换刀装置（AWC）的精准协同。未来，企业将持续聚焦行业需求，以技术创新提供定制化解决方案，助力制造业自动化、高效化升级。



适用于长切屑钢材的断屑槽

玛帕（Mapal）针对加工长切屑钢材的精镗刀片，研发了全新的标准化断屑槽几何结构。



切屑形成对加工过程的可靠性、刀具寿命及表面质量起着关键作用。为此，玛帕推出了一种全新的精镗刀具断屑方案。该方案将精确定义的导程角与前角几何形状，与经过优化适配的切削参数及切削深度相结合。即便加工难

切削材料，该设计也能实现稳定的切屑形成，最终达成切屑的优化排出，并有效减少切削热的产生。

断屑槽并非新生技术，但将标准化设计应用于长切屑钢材的精镗加工领域，尚属首创。这款断屑槽的几何设计凝聚了数十年的行业经验，同时明确聚焦于成本效益与用户导向。在此之前，玛帕的断屑槽技术主要应用于定制化解决方案。

目前，配备该断屑槽几何结构的精镗刀片已实现标准化库存管理，可适配非合金钢、合金钢及不锈钢等材料，且几何参数与涂层规格均已明确统一。

埃姆科（EMCO）推出全新车削中心

埃姆科（EMCO）正式发布 UNIVERSALTURN 50 高性能车削中心。该设备在确保复杂车铣复合零件加工精度与刚性最大化的同时，显著提升了生产效率。其棒材加工直径可达 51mm，作为该前瞻性系列的首款机型，专为满足市场对高效复合加工日益增长的需求而设计。

UNIVERSALTURN 50 以成熟的 MAXXTURN 系列为基础，融合了埃姆科的经典技术与面向未来的创新成果，实现了卓越的加工效率、过程可靠性与多功能性。机床搭载高动态驱动系统，既能实现快速加工循环，又能在车铣复合加工中保障高精度。



该机床的核心亮点是配备全集成式加长导轨 Y 轴，在为车削作业提供极致稳定性的同时，大幅拓展了铣削加工能力。紧凑型副主轴可高精度承接工件，完成背面加工，省去了额外工序，减少了停机时间，从而提升整体生产效率。

刀塔可容纳 12 个快换刀座（VDI30 或 BMT45P 规格），最高转速达 12,000 r/min，驱动功率为 8.8 kW，可兼顾高负荷钻孔与高精度铣削加工。该机型目前独家搭载西门子 SINUMERIK ONE 数控系统，具备直观的编程界面，可无缝融入数字化制造流程。此外，发那科 Oi plus 系统版本将于 2026 年推出。

DMG 森精机在德国开设机床培训中心 传授最新机床技术

DMG 森精机于德国巴伐利亚州普夫龙滕的工厂内开设机床培训中心，学员可在此学习最新的机床技术与知识。该中心可容纳 150 名学员，配备聚焦最新技术、自动化与数字化的尖端设施，非公司员工亦可参与培训，此举将助力培养行业年轻人才，增强德国制造业的专业实力。

普夫龙滕工厂是 DMG 森精机在欧洲最大的机床生产基地，同时也是公司重要的研发中心。新落成的培训中心为三层建筑，总建筑面积约 4500m²，设立初衷为支持公司员工的持续学习。该中心的设计环节有现有学员参与，力求打造可助力学员自主成长、同时能提供高水平培训的学习环境。

在近期的开幕仪式上，公司一位高管表示：“新培训中心的落成，充分体现了我们致力于为下一代人才打造发展平台的决心。”同时其还表达了对人力资源发展的重视：“我们将以创新技术、实践学习环境和对机械工程的热情，支持年轻人才的成长。”



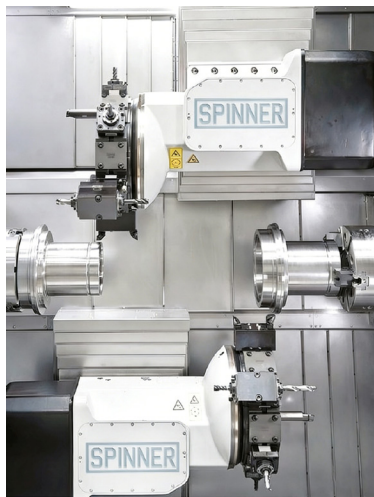
斯宾纳（Spinner）扩展多刀塔车床产品线

斯宾纳（Spinner）扩大了其 TTS 车铣复合加工中心的产品系列。通过提升可加工棒料的规格，全新的 85 和 125 型号加入了已完成第二代升级的 42 和 65 型多任务车床阵容。

在 2025 年 9 月的 EMO 展会上推出的 TTS 85 和 TTS 125 车削中心，由英国及爱尔兰地区独家代理 Whitehouse Machine Tools 提供。每台机床均配备一对高功率电主轴，棒料加工能力分别为 85 mm（80 kW）和 125 mm（67 kW）。卡盘可夹持直径最大 500 mm 的坯料，且副主轴的卡盘加工可与主轴的棒料加工同步进行。

凭借灵活的模块化设计，该系列设备可配置 2 个、3 个或 4 个刀塔，精准匹配用户的个性化加工需求。刀塔采用坚固的伺服分度结构，有 16 工位和 12 工位两种规格可

选，所有工位均为动力工位，并适配 BMT45 或 BMT65 刀座，确保了卓越的切削性能与换刀精度。动力刀具功率为 15kW，最大扭矩达 82.7 N·m，标准最高转速为 4,000 r/min，可根据需求选配升级至 8,000r/min。



该系列机床提供两种床身长度规格，主轴鼻端最大间距分别为 1.5 m 和 2.1 m。此外，还可单独选配带温度控制功能的 80 巴高压冷却系统。

斯大精密新工厂投产机床主轴 推广 AMR 技术实现劳动力节约

2026 年 2 月 5 日，斯大精密宣布，位于静冈县菊川市菊川工厂旧址的菊川南工厂竣工。该工厂以扩大机床主轴生产能力为建设目标，已于 2025 年 12 月投入运营，项目总投资约 100 亿日元。



该工厂配备多款旨在减少人力投入的尖端设备与系统，自主运输机器人（AMR）便是其中之一，可实现工件运输的自动化。作为推进数字化转型（DX）的重要举措，工厂引入制造支持系统，该系统可实现工作流程与检验记

录的可视化；同时引入调度器，能够为复杂加工流程自动推荐最佳加工日期。

工厂将制造与研发部门的工作区域设置于同一楼层，以此促进两个部门间的互动，提升研发速度。菊川南工厂为三层建筑，建筑面积约 10300 m²，总建筑面积约 13700m²。

片冈精工推出机床用微气泡油水分离器

片冈精工株式会社与关西自动化设备株式会社（天津市）合作，研发出采用微气泡技术的机床用油水分离器，并于 2 月起正式接受订单。该分离器利用微气泡技术，将加工后的冷却液与清洗液混合，实现油泥、油污的分离与回收，从而延长设备使用寿命，公司研发该产品的核心目的，是满足零部件加工厂降低人工成本的需求。该产品定价预计低于 100 万日元，年销量预计为 100 台。



当前，汽车零部件制造商及其他相关企业正积极研发、投入省力设备。机床冷却液与清洗机清洗液虽可循环利用，但使用过程中会不断积聚油泥与油污，最终仍需更换。

片冈精工新开发的这款油水分离器，预计可将清洗液的使用寿命延长至原本的两倍左右。该产品的推出，能够满足制造工厂减少清洗液更换人工、消除废液异味的需求，同时也有助于减少工厂废料产生。

该分离器可从储罐中积聚的冷却液与清洗液中吸取浮油和油泥，将其与 20μm 的气泡一同排入分离罐，微气泡会带动油泥上升至水面，完成油泥油污的收集。设备的处理能力为 5 L/min，且配备脚轮，移动便捷，单台设备即可维护多台机床。

片冈精工专务片冈照喜表示：“这款产品体现了来自业界的反馈。我们也希望考虑以租赁的方式提供该产品。”目前公司正计划将该产品推广至各行业。

CCMT2026主题：数字·互联·智造

中国机床工具工业协会



当技术创新叠加市场机遇的合力形成，时代正在赋予机床工具行业全新的生命力。在此之际，第十四届中国数控机床展览会（CCMT2026）即将隆重登场。招展一经启动，展会就吸引了全球业界的高度关注与广泛参与，CCMT2024曾经创造的辉煌将在这里再上台阶，这里将为您生动演绎一个智能制造的全新时代，并再次彰显中国机床工具市场强大的吸引力。

CCMT2026将于2026年4月21~25日在上海浦东上海新国际博览中心举办。

演绎智造新时代

CCMT2026主题的主体部分将继续沿用“数字·互联·智造”，不变的主

题背后是数字时代智能制造持续迭代的演变史。数字互联与智造技术从最初的萌芽，不断快速迭代，时至今日，它早已脱离最初的形态，无论从精度指标还是从其智能化的程度，不断把不可想象演变为现实智造。

新一代智能制造的本质是把智能化和绿色要素一起装入新一代设备。

在智能化技术上，机床正在与数字孪生、人工智能、大数据、物联网等新技术深度融合，使现代机床的性能不断超越，精密机床加工精度已经可以达到纳米级别，以及优异的稳定性与可靠性，高度的自动化与智能化，广泛的应用领域等各方面都在升维发展中；在绿色制造方面，传动效率优化、环保材料替代加速，行业能效水平显著提升；在产业生态上，智能制造开启了产业链的连锁反应，材料—零部件—整机—工艺—检测环环相扣，全产业链条协同效应日益凸显。

技术突破持续驱动生态体系的演变，新时代智能制造正在经历体系重构、换道快跑的关键阶段。智能控制系统、伺服系统与高精传动成为核心，直接决定了智能制造装备的响应速度、精度与柔性。谁掌握设备与软件，谁就能在工艺数据库、接口协议和检测标准上具有影响力——“定义标准”的能力成为制造业竞争的长期位势。

“十五五”期间，我国将全面实施“人工智能+”行动，以人工智能引领科研范式变革，加强人工智能同产业发展相结合，全方位赋能千行百业。在机床行业，一方面是人工智能将全方位赋能机床产业，大大提高生产效率的同时，还将突破长期难以解决的工艺难点；另一方面，“人工智能+机床”将赋能制造业，生产工具的智能化，会大大加速制造业向智造业转型。



千亿级市场持续扩容

在中国市场，政策催化供给升级，行业迎来历史性机遇。2025年9月1日，国家标准委、工信部联合印发《工业母机高质量标准体系建设方案》。该方案不仅提出了到2026年制修订标准不少于300项、国际标准转化率90%的量化目标，更重要的是构建了覆盖基础通用、设计配套、制造装备、制造工艺、检验检测、行业应用等6大层次、34个大类的全产业链标准框架。近年来，国家发改委、工信部、科技部以及各地方政府等相继出台了系列促进机床工具产业高质量发展的扶持政策，行业将逐步从“国产化”迈向“高端化”。

从市场现状来看，中国已长期稳居全球最大机床生产及消费国地位，千亿级市场规模潜力巨大，近年来新兴市场需求全面爆发，不断衍生新的竞技场。新能源、新材料、航空航天、低空经济、人形机器人等新兴战略产业的快速发展，为工业母机行业带来新的增长动力。在新能源汽车领域，一体化压铸技术的推广带动了对大型五轴龙门加工中心的需求，新能源汽车的电池、电机壳体、电池盒、减速器壳体等零部件加工成为五轴机床新的增长点；人形机器人产业的爆发式增长，对精密加工设备提出更高要求，精密减速器、丝杠、导轨等核心零部件的加工需要超高精度磨削设备，精度要求达到微米级；低空经济领域的发展同样值得关注，电动垂直起降飞行器大量采用碳纤维复合材料与金属复合结构，这对增减材复合加工装备提出新的需求。等等。

CCMT（中国数控机床展览会）作为CIMT（中国国际机床展览会）的姊妹展，在全球业界具有高度的品牌效应。特别值得一提的是，CCMT2024在CCMT2020和CCMT2022连续停办再度重启之际，取得了突破性发展。展览面积大幅扩容，观众人数再创历史新高，展品科技创新亮点频现，展会现场签约异常踊跃，这场展览盛会充分见证了彼时全球机床工具技术与中国机床工具市场的发展态势和时代特征。时隔两年，行业发展再上新台阶，CCMT2026将充分展现当下机床工具产业最前沿的技术进化与更加深刻的产业升维，这里将继续带您见证行业高光时刻，以帮助每一位参与者切身体验智能制造强大的生产能力，并正确把握未来智能制造发展的道路与方向所在。□

CCMT2026展品预览(1)

中国机床工具工业协会

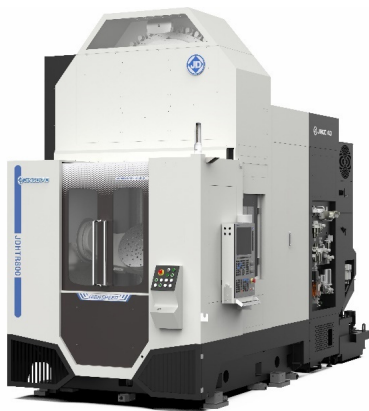
【摘要】 CCMT2026 聚焦智能制造与高端装备创新，汇聚全球优质展商与前沿展品。本次预览涵盖加工中心、磨床、机器人及自动化、刀具附件等核心领域，展品兼具高精度、高效率与智能化特质，广泛适配航空航天、汽车、医疗等多元行业需求。

从五轴联动加工设备到智能控制系统，从精密刀具到自动化解决方案，每款展品均凝聚技术突破与工艺革新，既展现了行业对极致精度与效率的追求，也彰显了制造业数字化、柔性化转型的趋势。

本预览梳理各展品核心优势与关键参数，为行业同仁搭建高效选型参考，助力精准对接供需，共探行业发展新机遇。

JDHTR800 卧式五轴高速加工中心

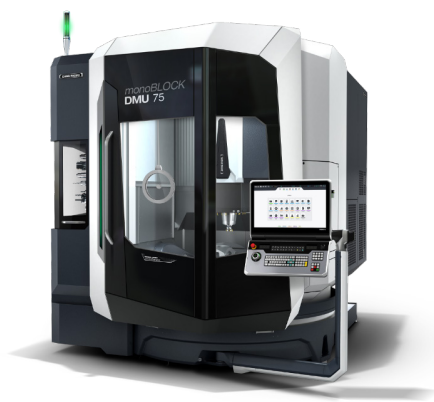
北京精雕科技集团有限公司 (展台号: E7-B101)



水平主轴 + 摇篮式转台，结合卧式排屑优势与五轴加工能力，A+B 轴转台可选单轴配置。大扭矩高速电主轴，15000r/min，HSK-A63 接口，S6 扭矩 121N·m，标配中心出水，机内喷淋 + 刮板排屑系统。刀库顶置，占地面积小，G00 定位速度 60m/min，切屑间换刀 ≤ 5s。X/Y/Z 行程 750/660/560mm，工作台 φ500mm，负载 350kg，定位精度 6 μm，重复定位 3 μm。

DMU 75 五轴联动万能数控铣削加工中心

德马吉森精机机床贸易有限公司 (展台号: W5-A101)



大型机床门开度达 1,310mm，便于接近加工区，超紧凑结构占地面积仅 8m²，三点支撑结构方便安装。无限制吊车起吊能力达 600kg，标配全面冷却措施、高性能冷却系统及多传感器补偿功能，标准定位精度从 4 μm 起，X/Y 轴配直驱滚珠丝杠。采用一体式高稳定性 monoBLOCK 结构，立柱配大型铸造床身，所有轴均配 45mm 滚柱导轨及大型滚珠丝杠，部件经有限元优化设计。X/Y/Z 轴

最大行程 750/650/560mm，最大工件直径 840mm，最大工件高度 500mm，工件最大重量 600kg，可选配 SIEMENS、HEIDENHAIN 数控系统及软件。

CY15G 数控螺旋锥齿轮小模数磨齿机

湖南中大创远数控装备有限公司 (展台号: E1-B201)



七轴五联动磨齿机，采用展成法磨削圆弧收缩齿螺旋锥齿轮、准双曲面齿轮，具备自动磨削、对刀、余量分配、砂轮修整等功能。磨齿精度达 DIN4 级，齿面粗糙度 Ra0.3，适配机器人、电动工具等领域小模数齿轮加工。使用砂轮直径 1.1~4"，金刚滚轮直径 0.55~1.99"，最大端面模数 4mm，齿数 1~200，总功率 50kW，净重约 9000kg，机床尺寸 2700×2650×2300mm。

FANUC ai-D Series SERVO 伺服系统

北京发那科机电有限公司 (展台号: W1-B101)



高速高精度节能伺服系统，旋转平滑的伺服电机适配各类机床进给轴，主轴电机大功率大扭矩，产品序列丰富。耐切削液性能优异，有多种故障预测功能，维护便捷；放大器小型化，配线少，调整与选型简便。标配电源再生，采用低损失元件，200V/400V 两种规格，伺服电机配 3200 万 /rev 脉冲编码器，最大扭矩 18000N·m，最大功率 500kW，防护等级 IP67。

J10-650FE 随动磨床

克林伯格机床(上海)有限公司 (展台号: E2-A232)



针对非圆、偏心圆等不规则曲面高效磨削，适配航空航天、汽车制造等领域，采用先进随动控制技术，实时调整磨削参数与砂轮位置。模块化设计搭配 FEA 技术床身，刚性与稳定性优异，配备高功率高刚性一体式磨削电主轴、光栅尺闭环控制直驱工件主轴头架。中心高(到工作台) 200mm，最大回转直径 $\phi 399$ mm，两顶尖距 650mm，最大磨削直径 $\phi 380$ mm，两顶之间承重 100kg；砂轮头架主轴转速 500~6,000r/min，外磨砂轮最高线速度 120m/s，砂轮尺寸 $\phi 500$ mm，电机功率 20kW。

RFHS63PE 卧式加工中心

浙江日发尼谱顿机床有限公司 (展台号: N5-A102)



采用高低轨结构，提升床身刚性、减轻移动部件重量，增强立柱抗后倾能力，三轴配滚柱式直线导轨，快移速度 60m/min。主轴箱为笼型设计，电主轴搭配恒温水冷却，转台与托盘经圆锥型定位锥定位、液压拉力锁紧，可高精度互换。核心电子部件及密封圈均为日德进口，托盘交换机构液压升降、伺服旋转，装卸工位托盘可 360° 旋转。X/Y/Z 行程 1050/900/1000mm，工作台分度 0.001°，台面 630×630mm (双工作台)，承重 1200kg，电主轴最高转速 8000r/min，配 BT50 刀柄、60 把刀库；X/Y/Z 轴定位 / 重复定位精度 0.008/0.004mm，B 轴为 10" /5"。

STUDER KC33 高精度数控万能内外圆磨床

联合磨削集团 (展台号: W5-B301-2)



可选配转台砂轮头架(含外圆、内圆磨削主轴, 1° 自动分度 / 2.5° 手动分度)或右置外圆砂轮头架(0/15/30° 档位),床身采用 Granitan®S103 人造花岗岩。搭载StuderPictogramming图标编程、StuderGRIND编程软件,操作便捷。适配中型工件单件 / 批量磨削,顶尖距分 650mm、1000mm 规格,对应承重 80kg、120kg;床身吸震性、热稳定性优异, X/Z 轴伺服驱动可微进给,转塔式砂轮架可 - 15° 至 + 195° 自动旋转, 1° 分度。

MBR-5000H-es 高速卧式加工中心

北京北一机床有限责任公司 (展台号: E7-A101)



适配铝合金零件高速加工,大扭矩主轴可应对难加工材料重切削,伺服优化控制缩短加工时间,新增矩阵式刀库,适配多品种零件加工,广泛应用于 FMC 和 FMS。X/Y/Z 轴行程均 760mm,托盘 500×500mm,最大承重 500kg,分度角度 1°,最大工件尺寸 $\phi 800 \times 1000\text{mm}$;主轴转速 50~15000r/min,锥孔 NT.40,快移速度 60000mm/min,切削进给速度 1~60000mm/min,主轴电机 26/18.5kW,刀库 48 把。

亚威智能制造系统解决方案

江苏亚威机床股份有限公司 (展台号: W2-B101)



钣金数字化平台为钣金行业定制,标准化设计,实施快、成本可控,可与亚威设备、CAM 套料软件、ERP 无缝集成。涵盖从计划到成品、订单到仓库全流程,实现图纸导入、自动拆图、套裁、开报工、上下料全自动化。业务管理 + 工具软件集成,提高项目落地成功率,缩短实施周期,有效减人增效,助力钣金行业智能制造升级。

CY-K100HmY/2000 车铣复合机床

云南 CY 集团有限公司 (展台号: N4-B112)



大规格数控车床,过床身回转直径 $\phi 1000\text{mm}$,盘类最大加工直径 $\phi 800\text{mm}$,加工长度 1500/2000/3000mm,刚性好、切削扭矩大,加工精度达 IT6 级, C_p 值 1.33。可加工轴类、盘类零件,满足黑 / 有色金属高速切削,主轴、床身等部件刚度合理分配,适配汽车、摩托车等行业。机电解构紧凑,关键外购件为国际知名品牌,整机封闭式全防护,符合人机工程学。床身上最大回转直径 1000mm,最大切削长度 2000mm,主轴转速 50~750r/min,配 BMT65 卧式 12 工位带 Y 轴动力刀塔,刀架转位时间 0.5s,盘类件承重 600kg、轴类件 2000kg。

DNC 8050 高精度石英&陶瓷研磨加工机

迪恩机床(中国)有限公司(展台号: N2-B101)



采用一体式高刚性床身结构,移送轴导轨提升稳定性,减振、热位移效果好,配备 40Tool Magazine 刀库。最大加工直径 $\phi 810\text{mm}$,卡盘与磨削主轴之间最大距离 610mm,为工件装夹和对刀提供充足操作空间,专用于石英、陶瓷材质的高精度研磨加工。

BF 12-21D 卧式加工中心

埃斯维机床(苏州)有限公司(展台号: W4-A402)



双主轴、双工作区设计,一台机床可同时加工 2 个不同零件,立柱移动式结构, X/Y/Z 轴行程 1200/650/650mm,适配新能源汽车、航空等领域大型零部件加工。采用混合动力驱动系统, X/Z 轴直线电机、Y 轴滚珠丝杠驱动,快移速度 120m/min,加速度 20m/s^2 ,加工节拍大幅提升,还可与自动化设备连接,占地面积小,兼具高效与柔性。

YD3126-CF 数控滚齿铣棱复合机床

重庆机床(集团)有限责任公司(展台号: E1-A101)



十二轴四联动高速干切机床,绿色高效,集成滚齿、

铣棱功能,四工位同时加工,指状铣刀适配盘齿、轴齿铣棱。全密封护罩+快速排屑内防护,热稳定性好,滚刀及工作台主轴直驱传动、闭环控制,高刚性滚动轴承支承。可选配上下料机构、自动料仓,配 Siemens 或 FANUC 系统,加工精度达 GB/T10095.1-2008 标准 6 级。最大工件直径 260mm,模数 6mm,滚刀主轴最高转速 2500r/min。

KMC63U 五轴卧式加工中心

青岛云科智能装备有限公司(展台号: E7-B201)



适配航空航天、能源、军工等领域,可加工复杂型面、五面加工典型零件,兼备卧/立式加工中心能力,搭配自动换刀系统,可组建自动化生产线。X/Y/Z 行程 800/850/900mm,主轴转速 6000r/min、锥度 BT50,电机功率 15/18.5kW;工作台 630×500mm,工件最大回转直径 800mm,承重 500kg,XYZ 快移速度 30m/min,刀库 30T(可选 40T/60T),最大刀具尺寸 112mm、重量 18(25)kg、长度 350mm。

5AX-BC650 五轴五联动加工中心

海扬精密机械(安庆)有限公司(展台号: E2-A201)



2023 年获“安徽省首台套重大技术装备”,搭载 15000r/min 高刚性 BBT40 主轴,独立温控模块补偿精度误差,刀库可选 36T 圆盘式/60T 链式。X/Y/Z 轴行程 620/520/460mm, B 轴 $-50^{\circ} \sim +120^{\circ}$, $\phi 650\text{mm}$ 滚子凸轮工作台零背隙回转,多角度加工重复精度 $4\mu\text{m}$ 内,米汉纳床身保障精度持久。标配波龙 3D 测头、激光对刀仪,五轴全自动标定功能校正回转中心,适配机械、医疗等行业。控制系统为 FANUC,三轴滚柱线轨快移 48/48/36m/min, BC 轴最小分割精度 0.001° 。

TapX丝锥刀具磨床

昂科机床(上海)有限公司(展台号: W4-B401)



专为高效高精度丝锥生产设计,集成先进直线电机技术与智能软件,一次装夹可磨削高速钢、硬质合金等多种材质及规格丝锥。拥有独特的圆顶硬质合金丝锥解决方案,生产灵活性与效率突出,能助力制造商快速响应市场变化,缩短交货周期,是高端丝锥生产的理想选择。

YHJM2835 高精度数控立式磨床

玉环数控机床股份有限公司(展台号: N3-B105)



X/C/Z/B轴可实现2-4轴联动,加工内、外轮廓等多种工件,配备3个同步内装式电主轴,工位转换提升加工效率。B轴高精度任意角度定位,X/C轴为液体静压方式,X轴直驱电机无反向间隙,电主轴配在线动平衡及AE装置。B轴锁紧力矩2900N·m,带在线自动测量、双种修砂方式,搭载3D仿真人机交互软件。广泛应用于航空航天、轨道交通等领域,可高效磨削非圆轮廓面等多种零件要素。

U-700 天车摇篮五轴加工中心

厦门扬森数控设备有限公司(展台号: E7-A313)

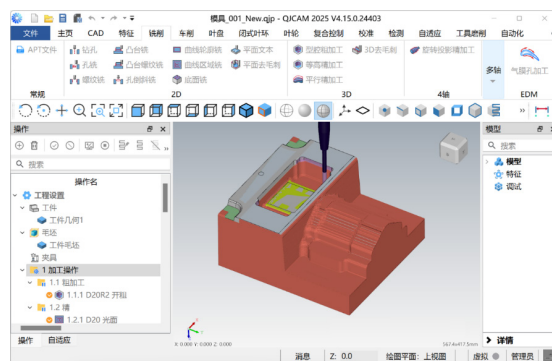


采用天车式箱型床身,高牌号灰铁整体铸造并时效处

理,工作台固定,适配重载大尺寸零件。摇篮转台配A/C双直驱马达,球墨铸铁材质,气幕+迷宫密封,RTCP刀尖跟随精准。搭载HSKA63-20000r/min电主轴(可选16000r/min),32T平置链式刀库换刀仅2s。全轴闭环检测,联动精度高,结构紧凑,适配航空航天、人形机器人等精密零部件制造。

QJCAM 智能制造软件平台

苏州千机智能技术有限公司(展台号: W1-B102)



自研平台整合多款专业CAM工具,一站式满足多元加工需求,核心算法拥有专利,技术自主可控。支持2-5轴零件编程及透平机械特征化编程,与数控系统融合实现“在机测量-加工-校验”闭环。适配零件维修、再制造等场景,应用于航空航天、汽车等数十个行业,立足国产研发,开放兼容国产制造生态,助力制造业数字化智能化升级。

MULTUS U3000 铣车复合加工机

大隈机械(上海)有限公司(展台号: N2-A301)



智能化复合加工机床,可多方向灵活加工,铣削、车削效率高,双滑板机构缩短加工时间,工序集约性强,长期加工精度稳定。X/Y轴行程645/1100mm,主轴转速50~5000r/min⁻¹,B轴-30~+210°,C轴360°;旋转刀具主轴转速50~12000r/min⁻¹,电机22/15/11kW,X/Y/Z轴快移速度50/50/40m/min。系列含U3000/U4000/

U5000, 可适配不同加工工件需求。

Bumotec 191neo 7轴5联动铣车复合加工中心

瑞士斯达拉格公司 (展台号: W5-B101)



经典 s191 升级款, 被誉为加工界“瑞士军刀”, 人体工程学设计, 操作界面基于 Windows, 培训便捷。主轴通孔直径 42/50/65mm, 12 种配置适配医疗、微型机械等领域, 换刀时间缩短 15%, 背面加工单元速度提升 12%。90 刀位刀库带刀具断裂检测, 可对接自动化单元实现 24/7 生产, 模块化设计支持选配外围设施, 一次装夹完成多工艺加工。X/Y/Z 轴行程 410/200/400mm, 快移 50m/min, 分辨率 0.0001mm。

ProSOL G50-MM2 高精度立式数控珩磨机

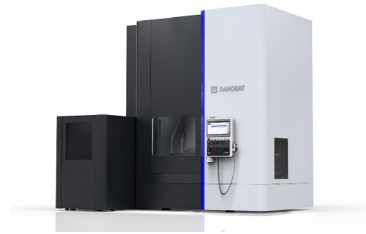
株式会社日进 (展台号: N2-B421)



擅长 $\phi 3.0 \sim \phi 100\text{mm}$ 孔超精密加工, 在液压零部件、谐波减速器柔轮加工领域业绩突出, 多孔自动定位等技术提升效率。可提供全自动、半自动、多功能机等机型, 多功能机双主轴可自由切换珩磨模式。加工孔径 $\phi 4 \sim \phi 100\text{mm}$, 最大长度 130mm; 主轴直径 $\phi 45\text{mm}$, 电机 5.0kW, 转速 1~3000r/min; 行程最大 300mm, 扩张最小设定量 $0.01\mu\text{m}$ 。

高精度通用型紧凑式立式磨床

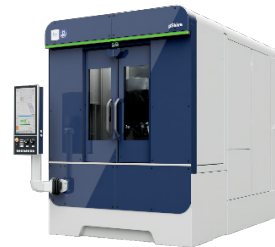
达诺巴特集团 (中国) (展台号: E2-B101)



欧洲设计中国制造, 全球统一质量标准, 占地面积不足 11 平方米, 成本效益优异。可处理外圆砂轮 $\phi 350 \times 100\text{mm}$ 、内圆砂轮 $\phi 250 \times 60\text{mm}$, Z 轴行程大, 工件加工高度达 700mm, 同类别唯一配 3 工位 B 轴, -15° 至 $+195^\circ$ 旋转。配雷尼绍在线测量装置, 自动补偿误差, 直驱静压转台跳动 < 1 微米, 线性轴分辨率 $0.1\mu\text{m}$, 圆度 $< 1\mu\text{m}$ 、圆柱度 $< 2\mu\text{m}$ 。机床尺寸 $3550 \times 3150 \times 4000\text{mm}$, 最大工件重量 2500 kg。

PITTLER T&S pSkive刮齿机床

DVS 集团 (展台号: W4-A402)



为齿轮加工树立新标准, 高精度加工中小型工件内、外齿, 转塔刀架实现一次装夹完成刮齿、车削等多工艺, 可选 MONO 单刀头 / DUO 双刀头。DUO 双刀头可快速切换粗 / 精加工, 也可装姐妹刀具 / 左右刮齿刀, 最多配四个固定刀头, 可装测头或传感器。结构紧凑, 性价比高, 可实现热后硬精加工。工件最大外径 315mm, 加工模数 0.3 到 5, 最大长度 300mm, 工件主轴最高转速 3500r/min, 刀具主轴 6000r/min。

K6S 高速石墨加工中心

广东省机械研究所有限公司 (展台号: E6-B282)



国内首创床身底座采用矿物铸件，阻尼减振、低热传导、精度稳定、耐腐蚀。双螺杆全自动排屑排粉，湿式加工配自动清洗系统，干式可选粉尘回收系统，丝杠导轨多层密封防护。适配 3C、汽车等行业，加工金属与石墨、陶瓷等非金属材料。工作台 680x550mm，X/Y/Z 行程 600/520/320mm；主轴最高 30000r/min，定位精度 $\pm 0.005\text{mm}$ ，重复定位 0.003mm，快移 24m/min。

CX45MY 车铣复合数控机床

安阳鑫盛机床股份有限公司 (展台号: N4-B205)



底座、床台采用 HT-300 米汉纳铸铁一体铸造，经五面体加工中心一次加工，45 斜背式 + 水平组合床台排屑方便，导轨中频淬火并精密磨削，滑板贴塑料贴面。高刚性主轴采用铬钼合金钢，配日本 NSK 轴承，主轴电机为 FANUC iP50/6000 型，无齿轮结构噪音低，同步齿型带传动防打滑。配 12 工位进口动力刀架，刀座可互换，旋转重复定位精度 $\pm 2''$ 。

THG-15S 卧式无心式内圆磨床

东洋先进机床株式会社 (展台号: N2-B411)



适配轴承等需内外径同心的部件加工，支持自动化，有单支点 / 双滚轮、双支点 / 电磁卡盘两种工件支撑方式。床身结构控制冷却液温度影响，优化冷却液回收路径，热变形最小，进给轴配滚柱导轨 + 高分辨率伺服电机，尺寸日差 $< \phi 5\mu\text{m}$ ，暖机时间减半。上料器和量仪数控化，上料时间缩短 30%，无液压设计使换装时间减半。单支点双滚轮适配工件外径 $\phi 6 \sim \phi 40\text{mm}$ ，双支点电磁吸盘适配 $\phi 12 \sim \phi 150\text{mm}$ 。

CLT58200 多导轨多轴同动重切削车铣复合机

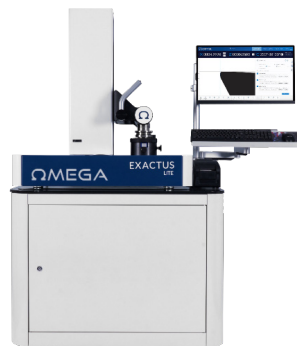
三锋机器工业股份有限公司 (展台号: W3-A002)



一体成型机体结构刚性高，主轴马达低转速全马力输出，重切削时低噪音、高精度。一次装夹可完成车削、铣削、研磨等多工序加工，减少二次加工，降低精度误差，稼动率高。适配能源勘探、航空航天等领域，同系列 CLT-58240 可加工 6 米长、直径 1.3 米工件，超大型主轴孔径，配 C 轴动力刀塔 + Y 轴、V12 刀塔，四导轨床身，半型床鞍不干涉中心架及尾座。

Omega TMM 刀具预调仪

帕莱克机械(南京)有限公司 (展台号: E2-A211)



采用优质延展性铸铁，对称式结构 + 防振设计，经有限元分析，稳定性与抗振性优异，适配车间恶劣环境。配备 ISO50 高精度机械主轴，集成校准球，主轴锥面跳动 $1\mu\text{m}$ ， 360° 任意锁紧，X/Z 轴 $1\mu\text{m}$ 精密微调系统。搭载工业成像系统、24 寸显示器，一键测量五组几何参数，支持多语言，气动锁紧 + 真空气动拉紧，主轴承重 $\geq 150\text{kg}$ ，适配各类加工中心刀具测量。

联轴器 / 倍力夹爪 / 快速接头等

布莱特(上海)精密机械有限公司 (展台号: N2-A506)



联轴器适配直结式主轴和进给传动轴，经 3D-CAD 和有限元分析，测试扭力、转速等性能，品质媲美德国进口。倍力夹爪为专利产品，减少碟形弹片数量，换刀速度提升，拉刀力更大，拉刀系统寿命长，经 120 万次寿命测试。快速接头获专利，安装容易，容许作动误差，不锈钢材质防锈抗腐蚀，适用于机电气、液压通路自动连接。

TM-1000S 七轴五联动车铣复合中心

广州台茂精密机械有限公司 (展台号: E2-B203)



配 BMT65/12 工位伺服动力刀塔，双滑鞍规格提升生产效率，Y 轴行程大，立柱移动式结构实现全程高精度强力切削。B 轴 DD 转台无反向间隙，±120° 旋转，标配海德汉圆光栅尺，C 轴 0.0001° 高精度定位。搭载霄特铣削主轴，标配 12000r/min 主轴，北钜刀库可装 80 把刀具，定制雷尼绍对刀仪，标配高效排屑机。床身最大回转直径 600mm，棒料最大加工长度 1050mm。

伊斯卡刀具国际贸易 (上海) 有限公司

铣削刀具 (展台号: W4-B201)



展出 LOGIQUICK 与 NEOLOGIQ 全新系列，覆盖方肩铣、大进给铣等全工艺，适配钢、铸铁、高温合金等多材质，数字化兼容工业 4.0。LOGIQUICK 系列全能铣刀可铣削、钻孔，四切刃刀片利用率高，3D 打印内冷通道，模块化快换设计。NEOLOGIQ 系列含大进给铣刀等，不等齿距 + 减振结构，搭载 SUMO-TEC 专利涂层与高性能硬质合金，适配汽车、航空航天行业。

SC7-32 多主轴车床

舒特机床销售 (上海) 有限公司 (展台号: W5-A001)



刚性设计，高速稳定，兼顾柔性换产要求，全球首创横向加工单元工作轴结构，融合刚性刀架与灵活配置优势。加工区域无驱动装置等，切屑自由落下，操作、改装简便，可自由选择转速，副主轴扩展背面加工范围，C/Y 轴集成于全流程。标配刚性十字刀架单元，静压导轨减振性好，减少刀具磨损，广泛应用于汽车零部件、机器人零部件等大批量生产领域。

FlexFunction CTS 安全开关

安士能 (上海) 机电商贸有限公司 (展台号: W5-A412)



尺寸仅 135x31x31mm，最大锁紧力 3900N，有三种安装方向，通用触发块带弹簧支架，可加扩展逃生解锁装置。基于应答机技术，安全等级达 EN ISO 13849-1 的 4/PL e，集成 IO-Link 通信，FlexFunction 功能让单一装置实现多种功能。同时推出 MGB2 系列新模块，MCM 扩展模块最多配六个控制元件，MSM 子模块可集成其他安全传感器到 PROFINET/PROFISAFE，适用于机械制造领域。

MCH-500A 卧式综合加工机

大立机器工业股份有限公司 (展台号: W3-B304)



齿轮传动配二档变档功能, 302r/min. 时全马力输出, 主轴及传动齿轮强制冷却, 降低温升提升精度。主轴头部与立柱滑道面 8 面接触, 左右对称设计, 热变形最小, 刚性强, 重切削稳定性高。T 型床台刚性优异, X/Y/Z 轴滑轨可选铸铁披覆合金钢一体铸造, 三轴配预拉式滚珠导螺杆, 减少热变形, 提高定位精度。

AP600 多轴精密数控电火花成形机床

北京市电加工研究所有限公司 (展台号: E5-B306)



攻克多项核心关键技术, 主要参数达国际同类水平, 成功加工直径 730mm 以上三元闭式叶轮, 获航天、中航等重点用户认可。适用于航空航天、能源压缩机精密复杂零部件加工。工作台 800×500mm, X/Y/Z 行程 600×400×400mm, 工作台最大工件重量 1000kg; X/Y/Z 定位精度 $\leq 5\mu\text{m}$, 重复定位精度 $\leq 3\mu\text{m}$, 机床重量 5000kg, 外型尺寸 2080×2510×2860mm。

508MT2 五轴联动加工中心

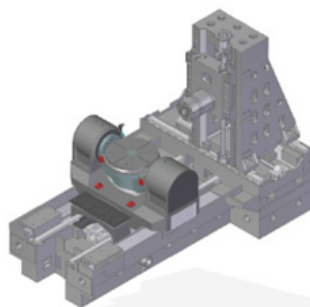
瑞士威力铭 - 马科黛尔公司 (展台号: W5-B213)



五轴联动加工中心, 一次装夹完成复杂零部件加工, 配备带 C 轴的可摆动对置主轴, 及可倾斜二次装夹虎钳。企业自主研发所有核心机床部件, 自行设计电主轴及分度/主轴单元, 业务遍及全球。除机床外, 还提供自动化集成、专业化加工解决方案及专属生产管理系统, 为复杂高精度零部件提供定制化加工方案。

THM6380IV 精密卧式五轴加工中心

四川普什宁江机床有限公司 (展台号: E6-A101)



采用华中智能控制系统控制 X、Y、Z、A、B 五轴, 操作面板基于人机工程学设计, 配有以太网、USB 接口。床身、立柱、滑座均采用高质量铸铁, 立柱为整体框式结构, 床身为 T 型整体结构, 立柱 X 向移动, 工作台 Z 向移动。X、Y、Z 轴采用伺服电机、直线滚动导轨副和精密级滚珠丝杠副, 集中定时润滑, 采用国产 INA 电主轴。托板直径 800mm, 工作台面最大承重 800kg (倾斜 $10^\circ \sim -45^\circ$)、700kg (倾斜 $-45^\circ \sim -100^\circ$); X/Y/Z 轴行程 1300/1000/1100mm, 快进速度 40m/min, 定位精度 0.006mm, 重复定位精度 0.003mm。

VD-8iB CNC 立式加工中心

东刚精密机械有限公司 (展台号: W3-A412)



经 FEM 有限元素分析, 结构刚性、精度与可靠性优异, 双工位交换台实现切削与装卸同步, 减少停机时间, 占地面积小。嵌入式操作箱可调节角度, 操作便捷; 高刚性铸件床身吸收振动, 标配高性能直联式主轴, 减少振动

噪音。主轴 BT-40/12000r/min，三轴配45精密柱线轨、C3级 40mm 滚珠螺杆；X/Y/Z 行程 800/500/560mm，台面800*450mm，承重300kg，工作台180° 旋转仅6 s。

FM-CBH 微调大径精密镗头

宁波德克刀具有限公司 (展台号: E2-A321)



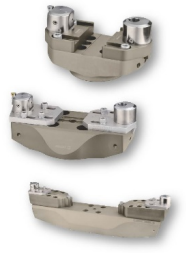
FM-CBH 微调大径精密镗头

产品简介:

CBH 微调精镗系列作为德克最具核心竞争力产品，自问世 10 年来，已广泛应用于孔加工领域，其系列分支涵盖正镗、反镗以及外圆套镗。现推出新款 FM-CBH 大径精镗，重装上阵。

特点:

- 调整精度为0.01mm/格(直径)，通过游标副尺可达0.001mm；
- 铝制比重提高1-4倍，结构刚性的质变；
- 通过变更精镗头的安装方向，可切换内孔/外圆镗削模式；
- 全系列均有内冷设计，狭小空间易于铁屑排出，利于散热，保障加工稳定性；
- 动平衡G6.3 1000RPM。



内孔镗可调范围：148-1275mm

属 CBH 微调精镗系列升级款，铝制比重提高 1~4 倍，结构刚性大幅提升，可切换内孔、外圆镗削模式，全系列内冷设计，铁屑排出顺畅、散热性好，保障加工稳定性。调整精度 0.01mm / 格(直径)，游标副尺可达 0.001mm，动平衡达 G6.3 1000RPM，内孔镗可调范围 148~1275mm，广泛应用于各类孔加工领域。

toolVibe® 智能刀柄

瑞格费克斯有限公司 (展台号: W5-B103-1)



可精准优化机床加工流程，全面监控机床、刀具及工件，借助数据采集、平板实时监控实现数字化加工。操作简单无需复杂培训，软件支持创建加工项目、数据管理，可设置报警、生成记录、趋势分析。电池续航 10 小时(无线激活)，最高转速 30,000r/min，25,000r/min 下动平衡达 G2.5，内部冷却液压力 80bar、外部 20bar，工作温度 +20°C 至 +60°C，无线传输 2.4GHz ISM 频段。

GMT-2000 铣车复合加工中心

程泰机械(吴江)有限公司 (展台号: W3-B214)



整合车削、加工中心功能，最高 9 轴控制、5 轴同动加工，重切削能力强，适配各行业复杂工件加工。X 轴超主轴中心线 125mm，Y 轴 ±150mm，无需 C 轴即可高精度轮廓铣削与钻孔；三轴伺服马达直驱，快移速率 50/40/50m/min。选配 G.LINC 智能操作系统及自动化配备，可装 120 支刀链式刀库，提升生产效率，降低制造成本。

TM26D 对刀仪

美得龙(上海)贸易有限公司 (展台号: N2-A281)



触头直径 φ20、高度 67mm，尺寸小巧，性价比高，可预设刀具、补偿磨损 / 热位移，保持加工精度。带超行程信号，防止碰撞损坏设备，重复精度 1 μm，防护等级 IP67，耐冷却液飞溅。接触式测量错误少、成本低，在加工前测量、加工中自动补偿，缩短测量时间。接点精度寿命 300 万次，行程 5mm，接触力 1.5N，使用温度 0°C~60°C，超行程信号为 DC24V 100mA 常闭输出。

Mikron Multistar LX-24 机床

米克朗 (展台号: W5-B222)



全球高速旋转传送机床，高精度、高重复定位精度，运行稳定可靠，操作简便、维护需求低，性价比优异。每个工位可双侧同步加工，多循环运行，可并行生产两种零件，上下料与加工同步，换刀便捷。可增设 24 个中间工位，最多配 44 根加工主轴，多方向加工，每分钟最高生产 600 个零件，适配书写工具、汽车、医疗等大批量制造。

EB6325 全电伺服数控折弯机

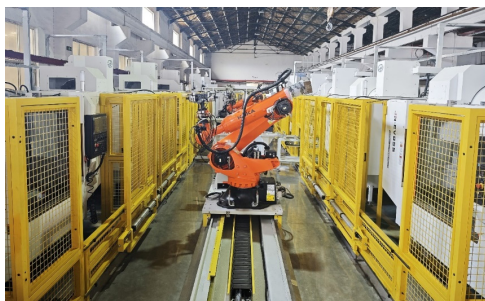
扬力集团股份有限公司 (展台号: W2-A001)



采用机械式挠度补偿系统，保证折弯角度一致，伺服电机驱动滚珠丝杠推动滑块，磁栅尺闭环控制精度高，比同吨位液压折弯机节能 60%。机身钢板焊接并回火处理，后挡料机构功能全，上动式折弯平稳，Y1/Y2 可单独编程实现锥度折弯。上模分段拼装，下模快换式结构，公称压力 630KN，折弯长度 2500mm，滑块行程 180mm，快进速度 200mm/s。

机床上下料第七轴机器人

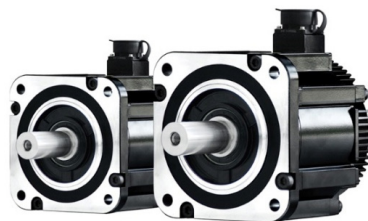
伊赛奥(苏州)自动化有限公司 (展台号: E2-B481)



数控机床上下料自动化核心装备，伺服驱动 + 精密导轨实现 $\pm 0.01\text{mm}$ 级高精度定位，搭配工业机器人完成工件取放，24 小时不间断运行。可定制吊挂式安装，支持多工位协同，对接多台机床，可靠性高、维护简便，替代人工降低工伤风险与成本。最大行程 100m，速度 3m/s，加速度 3m/s^2 ，负载 10000kg，重复定位精度 $+0.1\text{mm}/0.05\text{mm}$ 。

S18 系列永磁同步伺服电机

超同步股份有限公司 (展台号: W1-A301)



内置高精度绝对值编码器，定位精度高、低速运转稳定，低齿槽力设计，转矩脉动小，速度稳定性优异。定子采用全新叠压拼接工艺，温升低，电磁特性好，效率与可靠性高，可实现高精度、高动态响应控制。S18-130 额定转矩 $6\sim 16\text{N}\cdot\text{m}$ ，转速 3000r/min；S18-180 额定转矩 $20\sim 56\text{N}\cdot\text{m}$ ，转速 1500/3000r/min，功率覆盖 1.9~17.6kW。

SC6、SI6 和 SD6 第六代驱动控制器

斯德博驱动技术(太仓)有限公司 (展台号: W5-A422)



结构紧凑、安装简单、高性能可组合，SC6 独立驱动控制器集成电源，与精益电机组，为节能运输系统提供支持。与 HEIDENHAIN 联合开发 OCS 单线缆解决方案，单线缆传输电力与编码器数据，最长 100m，50m 内无差错传输，无需扼流圈。SC6A062 为双轴驱动控制器，4kHz 时额定输出电流 $2\times 4.5\text{A}$ ，8kHz 时 $2\times 4\text{A}$ 。

T-510520 TAP 高精度数控 5 轴转台分度头

上海瑞曼精密机械有限公司 (展台号: W5-B282)



黑匣子监控转速、温度等参数，旋转轴最大转速 80min⁻¹，主轴夹紧时间 0.12 秒，效率高。柔性模块化设计，电机可选西门子、法那科等品牌，PGD 预载荷传动消除反向间隙，动态响应好。中心高 210mm，主轴最大负载 133kg (0° ~30°) /85kg (30° ~90°)，接口 HSK-A63，夹紧扭力 800N·m；重复定位精度 5"，可选 3" /2"，旋转轴定位精度 ±17"。

MJ-860DT 卧式双刀塔数控车床

济南第一机床有限公司 (展台号: N4-B001)



单主轴、双刀架、四轴驱动重载型车床，对置式双刀架可同时无干涉加工，45 斜床身 + 15 斜拖板复合倾角，刚性高，精度保持性好。适配航空发动机高强度零件、冶金行业大型工件强力切削，主轴端部法兰 A2-11，通孔直径 φ105mm，主电机 22/30kW，转速 20~1000r/min。床身最大回转直径 φ860mm，X/Z 轴快移速度 9/9 m/min，刀架 8+8 刀位，换刀时间 1s。

夹具油缸

事德拿(上海)智能科技有限公司 (展台号: E2-B404)



高强度合金钢一体缸体，硬铬镀层活塞杆，抗磨损耐腐蚀，适配高速高频、切削液等复杂工况。多道进口密封系统，防泄漏、低摩擦，0.5~20MPa 宽压力范围灵敏响应，可检测夹紧位置并反馈。支持行程、油口定制，适用于机床、自动化等领域。标准工作压力 1~7MPa，夹持力 1~30kN，行程 20~200mm 定制，最低启动压力 ≤0.3MPa，安装接口多样。

NOG500XPB 偏心轴多面体磨床

陕西诺贝特自动化科技股份有限公司 (展台号: N4-A201)



高精度磨床，适配精密偏心轴、曲轴等随动加工，可加工陶瓷、超硬合金等材料，三轴数控搭配在线测量，实现自动修整、磨削与补偿。工件导轨双 V 结构贴塑，砂轮架导轨为液体静压 + 直线电机驱动，纳米级光栅尺闭环控制。工件头架 DD 力矩电机 + 圆光栅控制，砂轮主轴液体动静压轴承，导轨面手工刮研。最大磨削直径 φ200mm，顶尖距 550mm，机床重量 3800kg。

轮毂机加工自动线

浙江旺邦精密机床有限公司 (展台号: N5-B302)



上下料、清洁等工位集成于机床本体，无需机器人，LV24WA 双刀塔立车 + LA24WA 车钻复合机组组成，比三机联线占地小 30%。机床大扭矩电主轴，1400r/min 拐点转速，粗精车均在恒扭矩区域，刀塔与车铣主轴增强设计，效率与质量提升。仅需两台加工设备，降低购置与维护成本，无机器人杜绝相关安全隐患，工件搬运于机床内部更安全。最大切削直径 24 寸，主电机功率 80kW，主轴最大扭矩 610N·m。

C800M 激光金属 3D 打印机

宁波海天增材科技有限公司 (展台号: E4-B001-5)

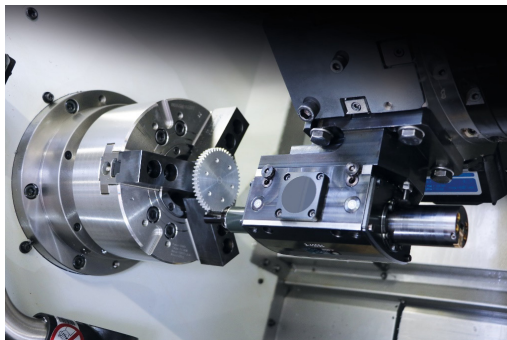


不锈钢一体式成型缸，最高 2 米净成型尺寸，6/8/10 激光可选，单 / 双向动态铺粉，全光束同步扫描。超均

匀智能风场，大尺寸零件保护镜无污染，长寿命过滤系统自动反吹，三工位设计操作便捷。快速气氛培养，低耗气量，多重安全冗余，7 点位氧含量检测。设备尺寸 674035803950mm，成型空间 800×800×900mm，八个激光，成型速率 200cm³，可打印模具钢、钛合金等。

拉削单元

奔驰刀具系统（展台号：W5-A384）



可经济高效加工各类形状与轮廓，工件一次装夹完成全部加工，缩短装夹时间、降低成本，减少机床运行与停机时间，提升生产效率。节能节约资源，可利用机床现有功能，作为机床辅助装置，无需额外购置拉床，投资成本低。可加工高抗拉强度材料，提刀装置避免刀具磨损、防止回程断裂，生产过程绿色节能。

雄克航空航天行业解决方案

雄克精密机械（上海）有限公司（展台号：W4-A101）



提供航空航天定制化夹持解决方案，适配结构组件、发动机部件、起落架等加工，六爪卡盘等低变形夹持设计，保障精密零件加工完整性。产品可承受极端应力，适配严苛加工环境，VERO-S Aviation 模块化系统可直接夹持结构部件，减少装配需求。拥有刀柄、卡盘等完整产品矩阵，搭配高精度组件，兼容航空航天专属工艺，保障加工精度。

EROWA Robot Compact 80

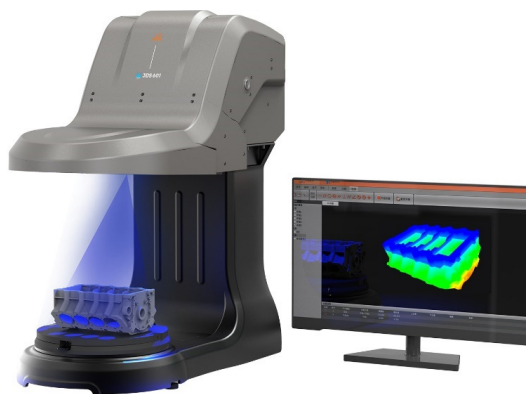
爱路华机电技术（上海）有限公司（展台号：W5-B411）



紧凑型自动化单元，仅占地2m²，料仓容量大且灵活，可容纳 ITS 电极夹持座至 UPC 320 托板，快速启动，性价比高。可同时为两台机床装载工件，自动识别托板，优化空间利用，可自动运行混合尺寸托板，密封盖保持卡盘清洁。料仓层可定制，可 50% 扩容，机器人滑向一侧可留出机床操作空间，搬运重量 80kg，每层载重可达 180kg。

3DS 601 三维扫描测量仪

桂林量具刀具有限责任公司（展台号：E1-A305）



采用结构光原理，无需贴点，旋转载物台实现 360° 自动扫描拼接，双投影仪减少阴影，扫描速度快。带模板匹配、截面测量功能，可间接测量二维尺寸，自主研发软件集成扫描、处理、测量，多任务自由切换。非接触无损测量，被测物材质形状无限制，扫描范围 $\phi 300 * H200$ mm，精度 $\pm 30 \mu\text{m}$ ，重复精度 $3 \mu\text{m}$ ，载物台负载 20kg，重量 40kg。

思格迈斯特四轴立柱式机器人上下料工作站

温泽测量仪器（上海）有限公司（展台号：W3-B111）



专为精密检测设计，以四轴立柱机器人为核心，融合立体料库、智能控制系统，实现零件装卸、上下料、分拣全流程无人化。立体料库与机器人同步作业，快换夹具支持多品种切换，模块化架构兼容 AGV，开放接口对接 MES/QMS。立柱机器人 + 立体料库布局紧凑，一体化底座可快速移机，关键部件为国际品牌，多重安全防护，实时监控设备状态，可视化看板展示指标。

VT 2-4 电机轴立式加工车床

埃马克两合责任有限公司（展台号：W5-A303）



四轴配置、短行程及高功率主轴保障高产量，双刀塔同时加工大幅缩短时间，两个 11 刀位刀塔可配车刀 / 动力刀具，柔性高。卡盘直径 160mm，回转直径 210mm，工件最大直径 100mm、长度 400mm，X/Y/Z 行程 332/+ -25/625mm。Fanuc 主轴功率 33.5/62.5kW，扭矩 142/112Nm，最高转速 6000 r/min，X/Y/Z 轴快进速度 30/15/30 m/min。

VTM-MS30 视觉对刀仪

上海威研精密科技有限公司（展台号：W3-B284）



基于图像智能分析技术，全自动高速高精度测量，耐苛刻加工环境，可在机掌握刀具状态。刀径测量范围 0.05mm ~ 30mm，重复精度 0.5um (2sigma)，可在工作转速下对刀，还能实现刀具轮廓测量、逐齿磨损监测、主轴热伸长监测，满足智能制造刀具检测需求。

KNM 4X 分析测量机

卡帕有限公司（展台号：W5-A401）



导轨与底板均为花岗岩制成，长期稳定性高，低热膨胀系数，空气轴承带应急运行特性，运动无磨损、无短期误差。底板下空气弹簧隔绝冲击振动，无需独立地基，回转工作台采用非铁磁性直线电机及转矩电机，定位与轨迹精度高。结构紧凑，行程范围广，可实现齿廓切向展成运动，控制柜布置灵活，专为齿轮、齿轮刀具等回转对称工件高精度测量设计，含 2X/4X/6X/9X 型。

X500 五轴联动加工中心

深圳市朗恩精密科技有限公司（展台号：E6-B412）



QT600-7 球墨铸铁床身，Z 轴框中框天车式结构，刀库与床身一体式，A/C 轴力矩电机驱动，Y 轴双电机平衡设计，加工区域全防护。标配 14000r/min 大扭矩主轴，可选 20000r/min，HSK-63 规格，可加工铝合金、钛合金等材料。A 轴 $\pm 130^\circ$ 、C 轴 $\pm 360^\circ$ ，适配叶轮、曲面件等加工。控制系统 HEIDENHAIN TNC-640，行程 400520350mm，重复定位精度 $< 0.003\text{mm}$ ，机床重约 10000kg。

TwinCAT CNC 自动化系统

毕孚自动化设备有限公司（展台号：W4-B114）



针对数控机床优化，软件功能丰富，简化工程设计，模块化方案可扩展 HMI、机器人等功能，支持 IEC 61131-3、C/C++ 等编程语言。开放接口可集成至可视化、数据库系统及云通信，最多实现 32 个联动插补轴运动，轴 / 通道数量可通过选项包调整。支持铣削、车削等多种加工技术，8 个轨迹轴 / 可控主轴，可选至 64 轴 / 12 通道，编程符合 DIN 66025 标准。

HBF160 落地式铣镗加工中心

山东蒂德精密机床有限公司（展台号：E6-A201）



动立柱、正挂主轴箱布局，可配数控转台 / 落地平台，X 轴双伺服电机同步驱动，其余轴滚珠丝杠驱动。主轴箱二级齿轮变速，低速大扭矩、高速高转速，方滑枕球

墨铸铁铸造，带自动伸出补偿。立柱封闭框型结构，Y 轴双丝杠四导轨，床身为矿物铸件，其余灰铸铁，吸振性与热稳定性优异。X 轴行程 16000mm，Y 轴 5000mm，方滑枕截面 $480 \times 520\text{mm}$ ，落地平台载重 10t/m^2 。

LSK5710 数控软硬内拉床

长沙思胜智能设备有限公司（展台号：W2-A401）



机电解构，以绿色节能、高精度、智能化为设计导向，双丝杆同步送料，导轨与主丝杆共面，受力分布优，加工稳定性高。支持多工位加工，拉削速度 $0 \sim 100 \text{ m/min}$ 无级调节，兼容软拉 / 硬拉模式，开放式接口可对接 MES/ERP。智能系统实时监控负载、故障诊断，模块化设计便于维护，适用于汽车、航空航天等重载通孔加工。额定拉力 100 kN，行程 1250 mm，机床净重 18500 kg。

PRO.FLEX5 (MTG) 紧凑型铣车磨五轴加工中心

百德机械股份有限公司（展台号：W3-A301）



龙门式结构，运动部件重心靠近立柱，减少结构变形，长期精度稳定，标配 48 把刀库，可选 60/90/120T。旋转工作台双直驱电机驱动，C 轴最高 1000r/min (S6)，B 轴 80r/min ，夹紧力矩 $3000/1600\text{N} \cdot \text{m}$ ，承重 300kg，加工 $\phi 500 \times \text{H}390\text{mm}$ 工件。320mm 横截面履带式排屑，冷却液箱可分离，人机工程化设计，操作面板可倾。XYZ 行程 $825 \times 508 \times 515\text{mm}$ ，快移 36m/min ，

主轴 15000r/min、HSK T63。

Rumba 系列高精度三坐标测量机

思瑞测量技术(深圳)有限公司(展台号: W1-A205)



横梁和 Z 轴采用碳化硅陶瓷,热膨胀系数低、硬度高、密度小,精度稳定、耐磨损,提升动态性能。整体燕尾导轨三面闭环,与平台一体加工,无分体胶结变形,结构紧凑稳固。柔性气动平衡技术避免运动干涉, Fly 2 路径优化技术提升测量效率,带 ECO Mode 节电模式与温度补偿技术。经 HEXAGON200 年技术沉淀,精度显著提升,有效降低微形变、振动对测量的影响。

HBR6513/15X15 卧式加工中心

武汉重型机床集团有限公司(展台号: N5-A101)



采用系列化、模块化、标准化设计,经有限元仿真分析优化整机动静刚度。构建多场耦合下超高速精密镗铣主轴单元映射模型,攻克总体设计难题,通过超精加工及装配工艺、高精度动平衡测试提升主轴性能。配备自适应加工控制系统,实现伺服优化控制、热变形补偿,基于实测数据进行刀路轨迹规划误差补偿。交换工作台采用梭式交换,实现快速精密交换。主轴直径 $\phi 130\text{mm}$, 转速 $1\sim 4000\text{r/min}$, 镗轴最大扭矩 $1250\text{N}\cdot\text{m}$; X/Y/W/Z 轴行程 $2000/1500/1500/500\text{mm}$, 工作台尺寸 $1600\text{mm}\times 1400\text{mm}$, 承重 6t , 刀库容量 120 把。

TM-2500S 车铣复合加工机床

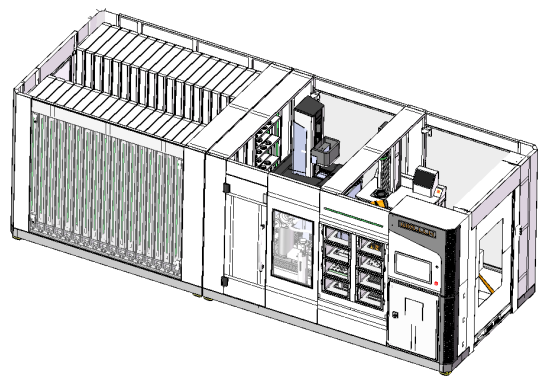
丽驰精密机械(嘉兴)有限公司(展台号: E2-B403)



基于人体工学设计,操作人性化,大型窗口便于观察加工状况,旋转式 CNC 操作系统,可选配旋转视窗,主轴位置接近性出色。实现 2 轴车床 + 加工中心互补,减少治具费用、生产设备及人力成本,大幅提升生产效率。采用减少热变形设计,占地面积小,机床结构融合车铣复合技术,一次装夹完成高精度加工,适配医疗器械、测量器等小型精密部件加工。X/Y/Z 行程 $560/\pm 125/1060+93\text{mm}$, W 轴移动行程 1090mm , B 轴旋转角度 $-20^{\circ}\sim 200^{\circ}$, C 轴 360° , 刀库容量 36 把。

方舱式智能中央刀具库

宁波伟立机器人科技股份有限公司(展台号: W1-B201)



方舱式设计,集刀具自动装配、检测、存储功能于一体,便于快速部署与搬迁,降低现场实施难度和人员技能依赖。抽屉式自动存储模块实现高密度存储,单个方舱可储存 800 把刀具,支持扩展。可与 AGV 集成实现刀具自动配送与回收,刀柄、刀具和附件分区存储及防呆控制。功能区模块化设计,可灵活选配测量、清洁等模块,智能管控系统实现预测性管理与无人化运维,可与上游管理系统和数控机床深度集成。刀具储存数量 $800\text{pcs}+$, 重复测量精度(直径、长度 $> 0.1\mu\text{m}$, 同心度 $0.5\mu\text{m}$, 刀具直径范围 $0.05\sim 32\text{mm}$ 。

机器人轴承

洛阳鸿元轴承科技有限公司 (展台号: N1-B411)



适配机器人谐波减速器与 RV 减速器, 分为谐波减速器用交叉滚子轴承、柔性轴承及 RV 减速器用角接触球轴承。交叉滚子轴承含 CSG (CSF)、CSD 等系列, 柔性轴承命名为 HYR, RV 减速器主轴承命名为 Rv。交叉滚子轴承分外圈分体 / 内圈整体、外圈内圈均整体两类, 滚动体为圆柱滚子, 互成 90° 垂直排列在 V 型滚道中, 可同时承受轴向、径向载荷及倾覆力矩, 具备高精度、高刚性及复合承载能力。

2MK2210X2B 高精度数控珩磨机

宁夏银川大河数控机床有限公司 (展台号: N3-A102)



新一代双主轴数控珩磨机, 用于摩托车发动汽缸体、航空航天精密零件等珩磨加工, 可单机使用或并入自动生产线。采用整体框架结构、模块化设计, 由控制系统、主轴系统、砂条涨缩系统等组成, 高刚性且精度稳定。可选配珩磨前后测量系统、吹气清洁系统, 配珩磨后测量系统后尺寸稳定在 0.003mm 以内。采用自主知识产权 GSK980Hi 控制系统, 具备珩磨工艺数据库、多轴插补等功能。珩磨直径范围 30~100mm, 最大珩孔深度 200mm, 主轴往复行程 500mm, 往复范围 1~30m/min, 转速范围 10~600r/min, 整机功率 25kW。

RU400 摇篮五轴加工中心

昆山台功精密机械有限公司 (展台号: E6-B312)



属台功旗下中瑞自主开发产品, 应用于汽车、航空航天等领域, 工件一次装夹可完成铣、镗、钻等多工序加工。总体布局为天车式框架结构, 底座和立柱一体, 横梁沿立柱做 Y 向运动, 十字滑板做 X 向运动, 主轴箱做 Z 向运动, 底座前端配置 AC 两轴数控摇篮工作转台。立柱为一体化结构, 布置大量加强筋, 整体温度平衡设计, 主轴主动循环水冷, 全封闭防护并具备自动排屑功能。X/Y/Z 轴行程 460/600+220/400mm, 摇篮工作台尺寸 $\Phi 400$ mm, 最大负载 200kg, C 轴最大转速 150r/min, A 轴倾斜角度 $\pm 120^\circ$; 主轴最高转速 15000r/min, 主电机功率 S1/S6: 15/22kW, 刀库刀具数量 21 把。

JXLC45CX-A 数控双主轴车铣复合立式车床

巨鑫机床有限公司 (展台号: N4-B201)



结构紧凑, 占地面积少, 床身结构高刚性, 立式布置利于排屑, 后置集中自动排屑。高精度高刚性主轴单元采用国际强刚性设计标准, 独立回转尾架保证静态精度和长轴加工精度。X、Z 轴采用 35/45 重型滚柱导轨, 保障大切力下的刚性及精度持久性。可自动进行内、外圆柱面、螺纹、铣键槽等工序切削加工, 适配汽车配件、轴齿类零件等加工。最大工件高度 600mm, 最大车削直径轴类 180 (回转 450) mm, 主轴转速范围 50~2500 r/min, 主电机功率 11kW; X/Z 轴最大行程 250/620mm, 快速移动速度 15/15m/min, 刀塔重复定位精度 0.005mm, 换刀时间 1.5s。

多品种混线 FMS 柔性制造系统

宁夏巨能机器人股份有限公司 (展台号: W1-B001)



面向多品种、小批量生产的智能化柔性生产线，通过模块化设计、智能调度与自动化适配技术，无需停工调试即可实现多品牌混合生产。MOM 系统下发工单，AGV 搬运物料并与机台对接，生产全程可控，适配定制小单与多品种混线生产，减少库存积压，提升设备利用率。解决小批量生产开机成本高、换型慢等痛点，实现“多品种不降效、小批量能盈利”。包含 FCP 柔性圆形托盘系统、FDP 柔性拖拽式托盘系统等多种类型托盘系统，搭配 Ai+FMS 柔性智能调度软件、CTS 中央刀库系统。

ZXK2104X2-5五轴钻铣复合深孔机床

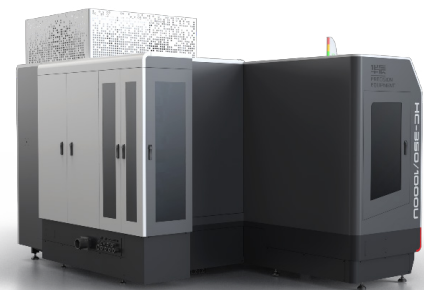
山东普利森集团有限公司 (展台号: N1-A211)



可五轴联动加工任意角度斜孔、双斜度深孔，复杂角度孔一次成型，解决传统机床摆角受限问题。集深孔钻、铣削、镗孔、攻丝于一体，一次装夹完成多工序，减少装夹误差与辅助时间。适配深孔加工工艺，深孔加工可达 1500mm，孔径覆盖 $\phi 3 \sim \phi 40\text{mm}$ ，配备专用导套、高压冷却排屑系统。导向箱自动倾斜移开设计，实现深孔钻与铣削模式快速切换。枪钻钻孔直径 $\phi 3 \sim \phi 40\text{mm}$ ，最大钻削深度 1000mm，Y 轴行程 1000mm，X 轴行程 1200mm，W 轴调整范围 500mm；钻孔偏斜度 $\leq 0.5\text{mm}/1000\text{mm}$ ，粗糙度 $Ra0.8 \sim 3.2\mu\text{m}$ ，孔径精度 IT7~IT10，铣削平面度 $\leq 0.010/300\text{mm}$ 。

HC-350-1000U亚u磨削中心

华辰精密装备(昆山)股份有限公司 (展台号: N3-A105)



高精度复合型转塔式数控磨削装备，具备外圆、内圆、非圆、螺纹磨削功能，可柔性化配置满足多元精密磨削需求。应用于军工、航空等领域，轴类、套类等零件可一次装夹完成多特征精密磨削。夹持磨削圆度最高 0.2 微米，圆柱度最高 1 微米。顶尖距 1000mm，中心高 175mm，两顶尖支撑最大重量 150kg，砂轮线速度 120m/s；X/Z 轴采用矩形静压导轨，定位精度 0.004mm，重复定位精度 0.002mm，X 轴最小进给量 0.1 μm ；标准试件直线度 $\leq 0.003\text{mm}$ ，最高磨削圆度 0.2 μm 。□

2025年度机床工具行业经济运行报告

中国机床工具工业协会

本报告依据国家统计局公布的金属加工机床产量数据、中国海关进出口数据、本协会测算数据和重点联系企业统计数据，对机床工具行业2025年度的主要运行指标进行了汇总、分析，并对2026年度运行情况进行预判，供行业及有关方面参考。

一、机床工具行业主要运行指标

1. 营收与利润指标

(1) 营业收入

2025年，机床工具行业完成营业收入10571亿元，同比增长1.6%。行业营业收入情况，详见表1。

表1 2025年机床工具行业及主要分行业的营业收入情况

指标名称	单位	总计	金属切削机床	金属成形机床	机床功能部件及附件	切削工具	磨料磨具	其他
营业收入	亿元	10571	1868	1019	611	1081	4370	1621
同比增减	(%)	1.6	10.8	9.6	0.1	0.4	-2.9	1.3

数据来源：协会测算数据

(2) 利润总额与利润率

2025年，机床工具行业实现利润总额421亿元，同比增长58.6%。平均利润率为4.0%，同比提高1.4个百分点。行业利润总额、利润率情况，详见表2。

表2 2025年机床工具行业及主要分行业的利润总额、利润率情况

指标名称	单位	总计	金属切削机床	金属成形机床	机床功能部件及附件	切削工具	磨料磨具	其他
利润总额	亿元	421	137	57	48	91	1	86
同比增减	(%)	58.6	25.3	40.8	-3.5	1.0	101.3	-3.1
利润率	(%)	4.0	7.3	5.6	7.9	8.4	0.03	5.3
同比增减	百分点	1.4	0.9	1.3	-0.3	0.1	2.5	-0.2

数据来源：协会测算数据

2. 进出口指标

(1) 总体情况

2025年中国机床工具进出口总额334.8亿美元，同比增长5.0%。贸易差128.8亿美元，同比增长11.4%。详见表3。

表3 2025年机床工具产品的进出口情况

指标名称	单位	进出口总额	其中：进口	出口	贸易差
金额	亿美元	334.8	103.0	231.8	128.8
同比增减	(%)	5.0	1.4	6.7	11.4

数据来源：中国海关数据

机床工具产品进口来源和出口去向排名前五的情况，详见表4。

表4 2025年机床工具产品进口来源和出口去向排名前五的情况

排序	进口来源				出口去向				
	国家或地区	金额亿美元	同比 (%)	占比 (%)	国家或地区	金额亿美元	同比 (%)	占比 (%)	
	合计	103.0	1.4		合计	231.8	6.7		
1	日本	34.9	17.7	33.9	1	越南	20.4	27.7	8.8
2	德国	24.2	4.3	23.5	2	俄罗斯	20.3	-5.0	8.7
3	中国台湾	11.3	-8.8	10.9	3	印度	19.16	9.6	8.3
4	韩国	5.6	2.2	5.4	4	美国	19.15	-14.6	8.3
5	瑞士	4.3	-19.5	4.2	5	泰国	11.4	53.1	4.9

数据来源：中国海关数据

机床工具主要产品门类的累计进口和出口情况，详见图1和图2。

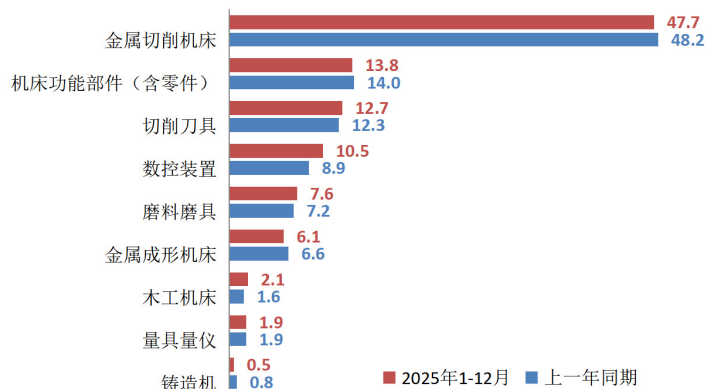


图1 机床工具产品累计进口情况 (亿美元)

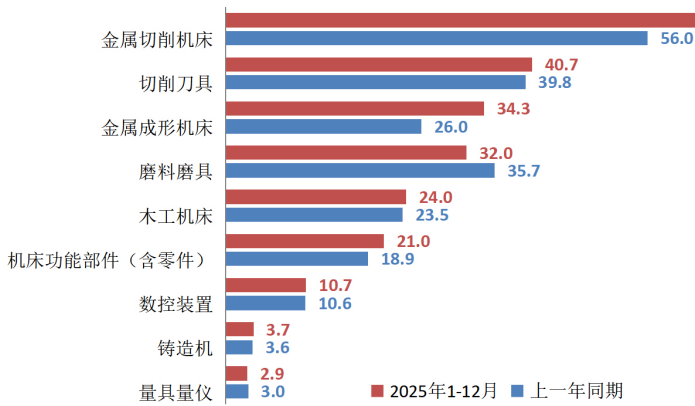


图2 机床工具产品累计出口情况 (亿美元)

(2) 金属加工机床进出口情况

2025年金属加工机床进口53.9亿美元，同比下降1.7%。出口96.8亿美元，同比增长17.9%。详见表5。

表5 2025年金属加工机床的进出口情况

产品名称	进口		出口		贸易差 金额 亿美元
	金额 (亿美元)	同比 (%)	金额 (亿美元)	同比 (%)	
金属加工机床	53.9	-1.7	96.8	17.9	42.9
其中：金属切削机床	47.7	-1.0	62.5	11.5	14.7
金属成形机床	6.1	-7.0	34.3	31.7	28.1

数据来源：中国海关数据

金属加工机床进口来源和出口去向排名前五的情况，详见表6。

表6 2025年金属加工机床进口来源和出口去向排名前五的情况

进口来源					出口去向				
排序	国家或地区	金额 (亿美元)	同比 (%)	占比 (%)	排序	国家或地区	金额 (亿美元)	同比 (%)	占比 (%)
合计		53.9	-1.7		合计		96.8	17.9	
1	日本	22.6	22.7	42.0	1	越南	11.6	57.3	11.9
2	德国	12.1	-5.5	22.4	2	俄罗斯	9.1	-6.4	9.5
3	中国 台湾	5.1	-14.9	9.5	3	印度	8.3	18.1	8.5
4	瑞士	3.3	-23.1	6.2	4	泰国	6.4	79.0	6.6
5	新加坡	1.7	52.9	3.2	5	美国	5.3	-9.3	5.5

数据来源：中国海关数据

金属加工机床进口前五位的品种及其进口金额，详见表7。

表7 2025年进口金额前五位的金属加工机床品种

排名	金属加工机床品种	进口金额 (亿美元)	同比 (%)	占比 (%)
1	加工中心	18.3	-2.6	33.9
2	特种加工机床	10.7	28.3	19.8
3	磨床	6.8	-17.7	12.7
4	齿轮加工机床	5.5	0.5	10.2
5	车床	4.0	-19.8	7.5

数据来源：中国海关数据

金属加工机床出口前五位的品种及其出口金额，详见表8。

表8 2025年出口金额前五位的金属加工机床品种

排名	金属加工机床品种	出口金额 (亿美元)	同比 (%)	占比 (%)
1	特种加工机床	26.3	12.8	27.2
2	加工中心	9.9	21.5	10.2
3	金属冷加工压力机	8.9	57.3	9.2
4	成形折弯机	8.6	18.4	8.9
5	其他成形机床	8.0	29.0	8.3

数据来源：中国海关数据

3. 金属加工机床生产、消费指标

(1) 金属加工机床生产额与消费额

2025年我国金属加工机床生产额为2198亿元，同比增长6.9%。消费额为1892亿元，同比增长1.6%。

金属切削机床和金属成形机床的生产额、消费额情况，详见表9。

表9 2025年金属加工机床的生产额与消费额情况

产品名称	进口		出口	
	金额 (亿元)	同比 (%)	金额 (亿元)	同比 (%)
金属加工机床	2198	6.9	1892	1.6
其中：金属切削机床	1349	10.4	1243	6.6
金属成形机床	849	1.8	648	-6.8

数据来源：协会测算数据

(2) 金属加工机床产量

根据国统局公布的规模以上企业统计数据，2025年金属切削机床产量86.8万台，同比增长9.7%。金属成形机床产量17.9万台，同比增长7.2%。两项产量指标都延续了上年度的增长趋势，但增幅有所收窄。

(3) 金属加工机床订单指标

根据协会重点联系企业统计数据，2025年，金属加工机床新增订单、在手订单同比分别增长7.9%、2.5%，均延续上年增长趋势，新增订单的增幅扩大，在手订单的增幅收窄。其中，金属切削机床新增订单、在手订单同比分别增长9.3%、7.9%，相较于上年度，新增订单增幅扩大，在手订单增幅收窄。金属成形机床新增订单同比增长4.9%，较上年度增幅扩大；在手订单同比下降7.4%，较上年度由增长转为下降。

二、2025年度机床工具行业运行分析

年初以下行开局，上半年降幅逐步收窄，三季度恢复至增长，四季度增速趋稳，结束连续两年的下行趋势。

1. 整体营业收入重回增长区间

在政策支持与市场需求的三重赋能下，行业整体营业收入同比增长1.6%，结束连续两年的下行，重回增长区间。主要分行业中，磨料磨具分行业虽仍未走出下行区间，但降幅明显收窄，对行业整体的影响减弱；其他分行业都有不同程度的增长。

随着“两新”“两重”政策加力扩围，设备工器具购置投资保持高位，全年实现11.8%的增速，对机床工具行业形成重要拉动。同时，人形机器人、航空航天、新能源汽车、AI算力等新兴领域的快速发展，对高精度、自动化、复合化机床装备的需求持续提升，为行业高质量发展注入了新的增长动力。另外，机床工具产品出口对行业整体营收增长的贡献率为63.6%，明显高于国内市场的贡献率，对行业增长起到重要支撑作用。

2. 行业平均利润率略有回升

行业平均利润率为4.0%，虽仍处于较低水平，但同比提升了1.4个百分点。各分行业中，磨料磨具分行业经历连续两年大幅亏损后触底回稳，实现扭亏，但其利润率仍处于极低水平；其他主要分行业都达到历史较好水平。

由于传统制造业转型升级深入推进，对机床工具产品的需求向中高端方向发展，同时，随着新兴领域需求的快速崛起、国际市场的拓展，以五轴机床为代表的高端产品需求持续增长，需求结构的深刻变化，助推行业企业在产品结构升级与技术创新方面持续发力，为行业整体盈利能力的提升打下了良好基础。另外，相关支撑政策的落地实施，也为行业企业的效益改善提供了有效支持。

3. 金属加工机床行业增幅明显

金属加工机床行业自年初以来持续上行，带动了全行业经济指标的好转。2025年金属切削机床和金属成形机床分行业的营业收入同比分别增长10.8%、9.6%，金属切削机床和金属成形机床的产量同比分别增长9.7%、7.2%，增长势头比较稳健。利润总额同比分别增长25.3%、40.8%，平均利润率分别提升至7.3%、5.6%，盈利水平过低的状况有所改善。

生产额增速快于消费额增速。金属加工机床的生产额、消费额都有所增长，但生产额增速比消费额增速高出5.3个百分点。其中，金属切削机床的生产额增速较消费额增速高3.8个百分点；金属成形机床生产额同比增长1.8%，而消费额则同比下降6.8%。这种情况表明，产出的增加，更多地流向了出口，而国内需求的增加相对较少。

机床订单走势偏弱。金属切削机床和金属成形机床的新增订单增速均低于营业收入增速。在手订单方面，金属

切削机床增幅收窄，金属成形机床则转为下降。2026年前期金属加工机床行业的运行将承受一定压力。

4. 出口对行业经济运行贡献持续增强

(1) 机床工具出口持续增长，进口触底回升

在外部环境不稳定不确定性明显上升的背景下，机床工具产品出口展现出较强的韧性和活力，实现6.7%的增长，同比扩大2.7个百分点。

在国内中高端机床工具产品需求增长的拉动下，机床工具产品进口触底回升，实现1.4%的增长，扭转了下降的趋势。

贸易顺差扩大至128.8亿美元，但增速明显放缓。

(2) 金属加工机床出口增幅扩大，进口降幅收窄

金属加工机床出口同比增长17.9%，较上年同期扩大12.3个百分点。出口额排前五位的品种都有不同程度的增长。出口去向排前五位的国家和地区中，对越南、印度、泰国出口增长；对俄罗斯、美国出口下降。

金属加工机床进口同比下降1.7%，较上年同期收窄8.2个百分点。进口额排前五位的品种中，特种加工机床、齿轮加工机床增长；磨床、加工中心、车床都有所下降。进口来源排前五位的国家和地区中，自日本、新加坡进口大幅增长；自德国、中国台湾、瑞士进口明显下降。

(3) 出口市场布局多元化与产品结构优化

机床工具产品的出口额同比增长6.7%，较行业营业收入的增幅高出5.1个百分点，继续成为行业增长的重要支撑。

行业企业加快“走出去”，市场布局多元化。在美国及俄罗斯出口市场较大幅度下降的情况下，企业积极开拓东南亚等市场，越南、泰国、巴西、印度尼西亚、马来西亚、印度等实现不同程度的增长，出口格局实现优化调整。

出口产品附加值提升，结构优化。机床功能部件（含零件）、加工中心、特种加工机床、齿轮加工机床、金属冷加工压力机等技术密集型产品出口额快速增长，反映出我国机床产品在国际市场的竞争力不断加强。

三、2026年度机床工具行业运行展望

2026年，行业发展仍面临多重挑战。国际环境不稳定不确定性因素仍然较多，地缘政治冲突变数犹存，都可能给机床工具产品出口带来变数。部分用户领域需求不及预期，国内有效需求不足问题尚未根本缓解，供强需弱的矛盾仍较为突出，也将对行业及企业发展形成一定压力。

（下转第47页）

2025年工具进出口海关数据分析

中国机床工具工业协会工具分会

中国机床工具工业协会工具分会秘书处收集、整理了2025年工具（刀具、量具、量仪）进出口海关数据，并进行了计算和分析，供业界参考。

2025年刀具出口额260.34亿元，同比增长1.48%；进口额88.34亿元，同比增长3.63%；量具和量仪出口额19.39亿元，同比下降9.99%。其中，量具出口额12.02亿元，同比下降20.78%；量仪出口额7.36亿元，同比增长15.8%；量具和量仪进口额13.61亿元，同比增长1.14%，其中量具进口2.96亿元，同比增长5.87%，量仪进口10.65亿元，同比下降0.1%。

1. 刀具进出口分析

数据显示，2025年刀具出口额是进口额的2.95倍，出口增长放缓，进口增长稍有提高。

2025年刀具出口主要品种及金额是：钻头（91.93亿元）、圆锯片（44.1亿元）、互换工具（25.01亿元）、刀片（29.67亿元）、铣刀（26亿元）、攻丝工具（10.47亿元）、超硬孔加工刀具（7.59亿元）、超硬互换工具（6.63亿元）、

双金属带锯条（5亿元）。

按海关商品编码，18类刀具品种中，12类刀具出口同比增长，6类刀具出口同比下降。其中，钻头同比增长3.08%，其他铣削工具同比增长9.44%，超硬材料制工作部件的镗孔或铰孔工具同比增长100.57%，其他材料制工作部件的未列名可互换工具同比下降9.27%，涂层刀片同比下降3.05%，非涂层刀片同比下降2.58%，丝锥同比下降5.04%。

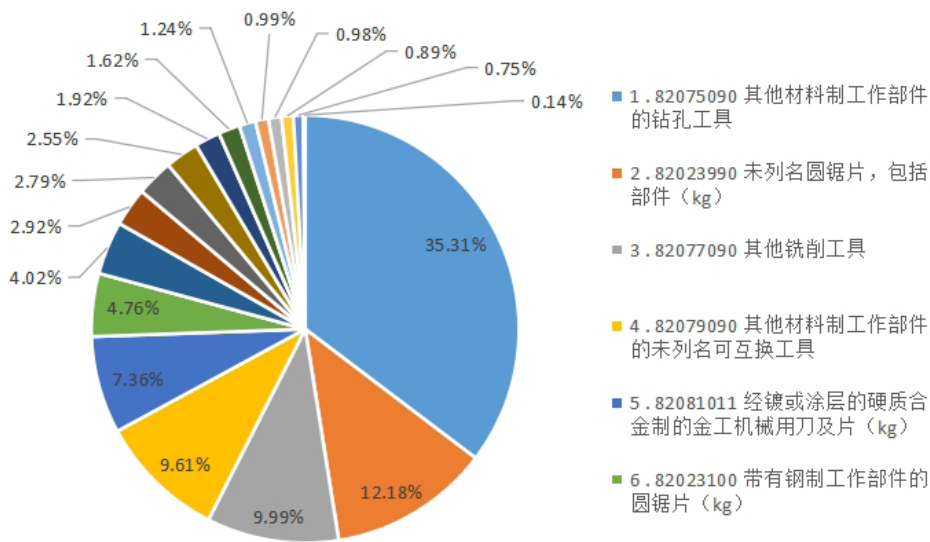
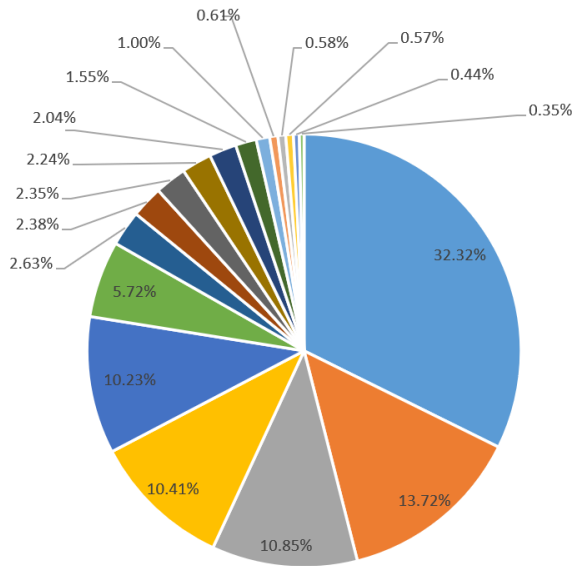


图1 2025年刀具出口分类

2025年刀具进口主要品种及金额是：刀片（39.55亿元）、钻头（12.12亿元）、攻丝工具（9.59亿元）、铣刀（9.04亿元）、互换工具（5.05亿元）、镗铰刀（2.33亿元）、超硬互换工具（2.1亿元）。

涂层刀片进口同比增长2.69%，非涂层刀片进口同比增长8.01%。超硬

车刀增长7.75%，双金属带锯条下降20.25%，车刀增长3.95%，铣刀下降3.36%，丝锥增长11.47%，钻头增长11.26%，互换工具增长1.33%。



- 1. 82081011 经镀或涂层的硬质合金制的金工机械用刀及片 (kg)
- 2. 82075090 其他材料制工作部件的钻孔工具
- 3. 82074000 攻丝工具
- 4. 82081019 其他硬质合金制的金工机械用刀及片 (kg)
- 5. 82077090 其他铣削工具
- 6. 82079090 其他材料制工作部件的未列名可互换工具
- 7. 82076090 其他材料制工作部件的镗孔或铰孔工具
- 8. 82079010 超硬材料制工作部件的未列名可互换工具
- 9. 82023990 未列名圆锯片, 包括部件 (kg)
- 10. 82078090 其他车削工具
- 11. 82081090 其他金工机械用刀及刀片 (kg)
- 12. 82022090 其他带锯片 (kg)

图2 2025年刀具进口分类

2025年，硬质合金刀片进口额（37.75亿元）是出口额（26.43亿元）的1.43倍。进出口刀片金额之比与2024年（1.33倍）相比有所增加，涂层硬质合金刀片出口额同比下降3.05%，而进口额同比增长2.69%，出口下降幅度比2025年1-9月（4.67%）有减缓，进口额由2025年1-9月下降1.83%转为增长。

非涂层硬质合金刀片出口额同比下降2.58%，而进口

额同比增长8.01%，出口稍有下降，进口出现增长。

涂层刀片进口来源地主要为：日本26.05%；瑞典16.42%；德国15.23%；以色列12.14%；印度8.46%；韩国6.51%；美国4.97%。非涂层刀片进口来源地主要为：日本74.49%；德国7.88%；韩国6.59%；泰国1.47%；卢森堡1.45%；美国1.01%；捷克1%。

涂层刀片出口目的地主要为：俄罗斯、印度、德国、韩国、土耳其、美国、新加坡。非涂层刀片出口目的地主要为：俄罗斯、印度、越南、德国、美国、墨西哥、日本。

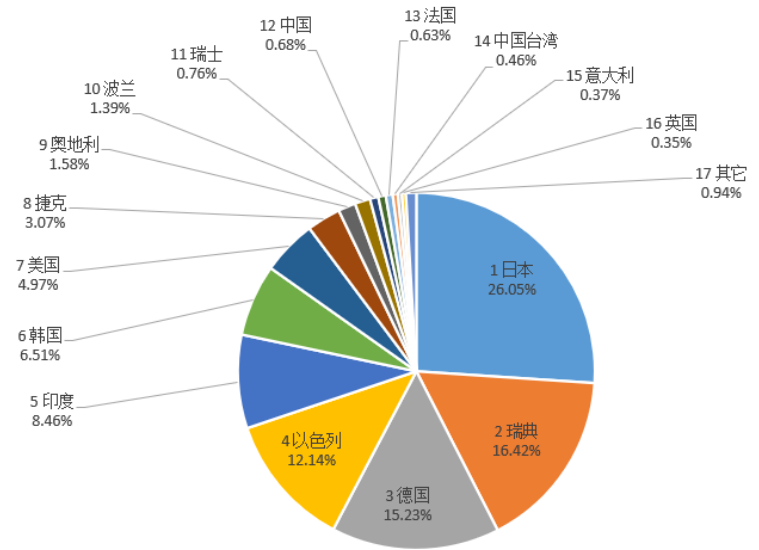


图3 2025年经镀或涂层的硬质合金制的金工机械用刀及片(82081011)进口来源地统计

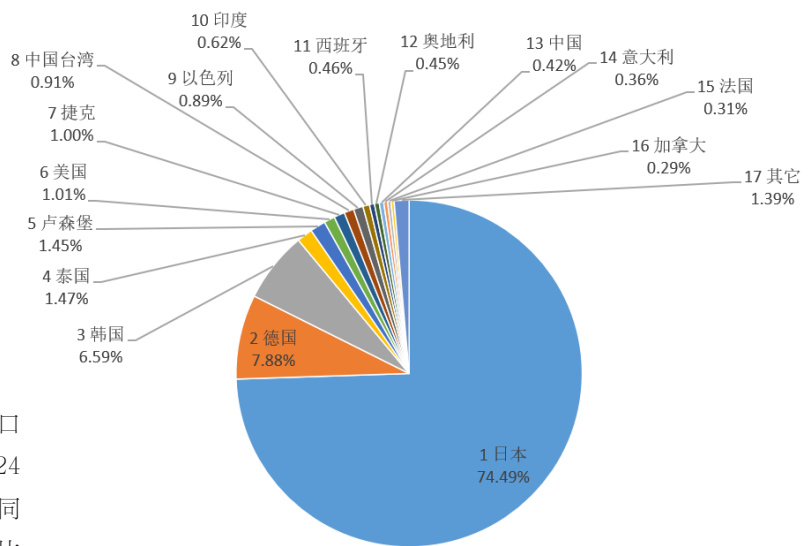


图4 2025年其他硬质合金制的金工机械用刀及片(82081019)进口来源地统计

2025年钻头出口目的地主要有：美国、德国、俄罗

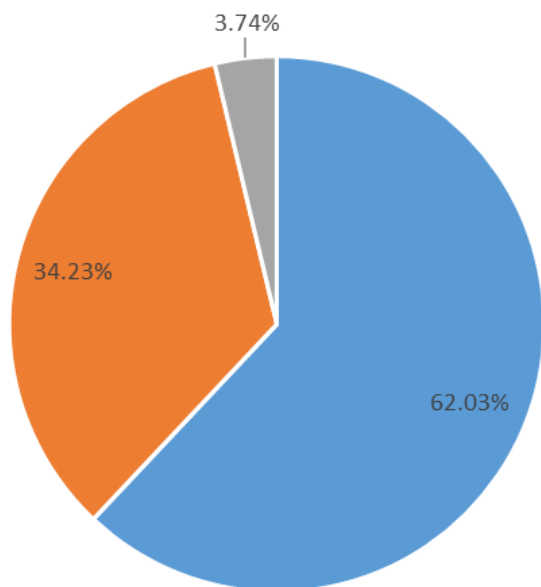
斯、韩国、荷兰、印度、英国。

刀具进出口单价方面，比较相同商品编码产品，进口刀具价格远高于出口价格。例如：涂层刀片的进口平均价格约为出口平均价格的3.12倍，未涂层刀片为3.93倍，丝锥为7.43倍。

出口单价变化较大的刀具品种有：铣刀单价同比下降11.58%，钻头单价同比下降3.53%，丝锥单价同比增长2.27%，双金属带锯条单价同比下降7.81%，涂层刀片单价同比下降9.14%，非涂层刀片单价同比增长6.71%。

2. 量具和量仪进出口分析

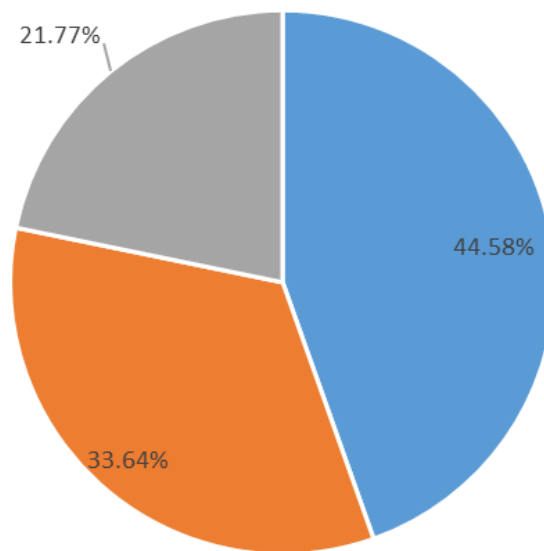
2025年，量具和量仪出口额19.39亿元，同比下降9.99%。其中，量具（千分尺，卡尺及量规）出口额12.02亿元，同比下降20.78%；量仪（坐标测量仪，轮廓投影仪）出口额7.36亿元，同比增长15.8%。



- 1. 90173000 千分尺、卡尺及量规
- 2. 90318020 坐标测量仪
- 3. 90314910 轮廓投影仪

图5 2025年量具、量仪出口分类

2025年，量具和量仪进口额13.61亿元，同比增长1.14%。其中，量具进口2.96亿元，同比增长5.87%，量仪（坐标测量仪、轮廓投影仪）进口10.65亿元，同比下降0.1%。



- 1. 90318020 坐标测量仪
- 2. 90314910 轮廓投影仪
- 3. 90173000 千分尺、卡尺及量规

图6 2025年量具、量仪进口分类

2025年，千分尺、卡尺及量规出口目的地主要为：美国、俄罗斯、德国、印度、西班牙、日本、巴西。

量具和量仪进出口单价方面，比较相同商品编码产品，进口量具和量仪价格远高于出口价格。

量具出口额（12.02亿元）远大于进口额（2.96亿元），量仪出口额（7.36亿元）小于进口额（10.65亿元）。□

附加说明：

海关数据是根据海关进出口商品编码进行分类，与行业习惯分类不完全一致。文中所列产品可能未完全包括所有的工具产品，也可能包括了不属于工具行业的产品。在计算产品单价时，圆锯片、刀片、带锯条的单位采用公斤（kg），其它类产品以件为单位。进口来源地中“中国”指“中国境内保税区”。

意大利机床制造商协会： 2025年第四季度机床订单同比下降13.6%， 其中国内订单降2.9%、海外订单降17.1%

意大利机床制造商协会官网

2025年第四季度，意大利机床制造商协会生产系统经济研究与商业文化中心编制的机床订单指数较2024年10~12月下降13.6%，该指数绝对值为68（以2021年为基准年，基准值100）。

国内市场方面，2025年第四季度订单较2024年同期下降2.9%，指数绝对值为56.3。

海外订单的下滑幅度更为显著，同比下降17.1%，指数绝对值为69.3。

从年度数据来看，得益于2025年前三季度的订单增长，全年订单整体仍实现正增长：较2024年同比增长3.1%，指数绝对值为67.6；其中国内订单大幅增长38.9%，指数绝对值为55.1；海外订单则下降9.4%，指数绝对值为76.4。

意大利机床制造商协会主席里卡多·罗萨指出：“2025年的整体订单情况与过去两年持平，这一结果再次令人失望。”

他补充道：“尤其看去年第四季度的情况，海外市场的业务放缓显然未能被国内市场的实质性复苏所抵消。”



“国内市场的表现表明，5.0计划并未达到预期效果。诚然，该计划与此前的4.0计划一同，在一定程度上刺激了市场需求，但计划推进过程中多次中断，直至2025年12月落幕，整个实施过程杂乱无章、衔接不畅。”

里卡多·罗萨继续表示：“目前，我们正等待新政策实施法令的出台，该政策将为2028年前的新技术投资提供支持。意大利企业对这一政策抱有极高期待，尤其是其实施周期较长，能让企业更好地规划采购事宜，进而更高效地布局企业生产活动。但我们认为，相关法令的出台刻不容缓，唯有如此，我们才能在清晰的政策框架下立即开展业务，在当前国际形势给传统经济体工业体系带来巨大压力的背景下，为市场需求提供支撑。”

“放眼海外，地缘政治动荡引发的巨大不确定性，严重影响了意大利企业的经营表现。海外市场的诸多商业机会被剥夺，持续的地区冲突、特朗普政府反复调整关税的贸易策略、汽车行业及德国市场的危机，再加上俄罗斯等部分市场的封闭与准入限制，严重制约了意大利一向的优势领域——出口贸易。” □

2026 年磨削技术展前瞻：抢先领略全球 顶尖磨削与表面处理技术行业盛会

英国航空制造官网

斯图加特展会将迎来强劲的国际参展阵容，展商集中展示前沿技术，2027 年美洲磨削技术展首次亮相成为焦点。

2026 年磨削技术展筹备工作正有序推进：距展会开幕还有两个月，线上前瞻活动已为行业人士浓缩呈现了展会的趋势、创新成果与国际化定位。这场全球顶尖的磨削技术展将于 5 月 5 日至 8 日在斯图加特举办，吸引了来自 28 个国家的 430 余家展商参与。即便行业生产与出口数据下滑，磨削技术领域的创新活力依旧强劲，而本次磨削技术展也将成为行业发展的核心交流平台，向全球工业界传递这一重要信号。

行业在下行与创新承压前行

最新统计数据 displays，行业经济形势依旧严峻。2025 年前三季度，德国磨削、珩磨、研磨及抛光机床的产值达 6.26 亿欧元，较 2024 年同期下降 15%；出口下滑尤为明显，同比降幅达 25%，出口额为 4.56 亿欧元。与之相反，国内销售额呈正增长态势，2025 年 1-9 月国内销售额达 1.7 亿欧元，同比增长 33%。2025 年末，行业新接订单量逐步萎缩，全年订单余额最终录得 5% 的降幅，其中国内市场表现疲软，出口市场则基本保持稳定。

德国机床制造商协会执行董事、本届磨削技术展主办方负责人马库斯·黑林表示：“数据清晰表明，行业正身处充满挑战的发展环境，但我们也看到，众多企业依旧保持着强劲的创新动力。在这样的时期，行业需要发展指引、信息共享渠道和实实在在的商业机会，而这正是磨削技术展所能提供的。”

国际参展规模再创新高

从初创企业到行业巨头，共有 430 余家企业确认参展本届磨削技术展，此次线上前瞻活动也成为各展商提前亮相、剧透展会亮点的契机。在斯图加特展览中心的三个展馆内，来自德国、中国、瑞士、意大利等国家的展商将展



示产业链各环节的创新成果，展品涵盖磨床、磨料、加工周边设备、软件解决方案以及检测测试技术等。

黑林强调：“磨削技术展远不止是一场产品展示会，它是磨削技术领域的国际舞台，更是企业缔结合作、筹备投资、布局未来技术的重要平台。”瑞士是本次参展商中代表性较强的国家之一，这也凸显了磨削技术对瑞士本土工业的重要性。瑞士科技行业协会瑞士机械电子工业协会的克里斯托夫·布拉特勒表示：“磨床占瑞士机床出口总量的约五分之一，这足以体现该技术对我们会员企业的核心价值。瑞士磨削技术展区能让中小企业更高效地在展会上展现自身实力。”

2027 年磨削技术展将首次登陆美国

斯图加特展览中心执行董事塞巴斯蒂安·埃斯魏因在本次前瞻活动中，除介绍本届德国展会的相关情况外，还公布了磨削技术展的国际拓展规划。首届美洲磨削技术展将于 2027 年 5 月 18 日至 20 日，在美国俄亥俄州辛辛那提市的杜克能源会展中心举办。

埃斯魏因表示：“2027 年的美洲磨削技术展，将成为北美地区首个且唯一专注于磨削技术的专业展会。辛辛那提的区位优势得天独厚，地处汽车、航空航天等核心产业集群的中心地带，这让我们能紧贴市场需求，为行业打造一个量身定制的全新交流平台。” □

兰泰克与伊克兰联合研发自主智能体人工智能技术，助力巴斯克地区工业实现技术自主

西班牙机床制造商协会官网

兰泰克是引领金属行业数字化转型的跨国企业，伊克兰则是巴斯克地区的顶尖技术研究中心，二者均为巴斯克人工智能生态系统的核心参与者、巴斯克人工智能中心成员。目前，双方正合作开展“银河计划”研发项目，旨在打造一套基于多智能体系统的工业自主智能体人工智能架构。该架构不仅能实现信息分析，还可在实际生产环境中执行协同操作。

本项目由巴斯克政府“哈齐泰克”产业研发计划资助，通过推动

工业领域先进人工智能技术的本土研发，助力地区实现技术自主，减少对外部技术平台的依赖，同时保障本土企业对核心数据与生产流程的掌控权。

“银河计划”的研发全程严格遵循《欧洲人工智能法案》的相关要求，该法案强制企业对其人工智能系统进行升级，以符合安全、透明性和治理层面的全新标准。伊克兰设计的多智能体架构中，设置了明确的机制，界定了各智能体的操作范围、适用场景及自主决策等级。

兰泰克担任该项目的牵头方，依托其在工业软件、高级数据开发及生产流程智能辅助系统研发领域的专业优势提供技术支持；伊克兰作为技术主导方参与项目，凭借其多元技术研发能力，以及在智能系统和工业应用研究方面的丰富经验赋能项目开发。

此外，该项目联盟还吸纳了埃罗斯基、蒙德拉贡装配、戈伊茨佩、萨贝特、乌比卡雷、利斯数据、法格阿拉萨特等多个战略领域的企业，这些企业正通过具体的应用场景，对该人工智能技术进行落地验证。□



智造升级：五轴加工中心的发展趋势与市场洞察

——聚焦CIMT2025五轴加工中心展品

中国机床工具工业协会市场部 沈华红 执笔

由中国机床工具工业协会（简称协会）主办的第十九届中国国际机床展览会（CIMT2025）4月21-26日在北京举行，展会规模空前，展览总面积达到了31万平方米，来自全球31个国家和地区的2449家展商集中亮相，顶尖技术荟萃，创新理念交相辉映，彰显行业巅峰盛会。协会市场部组织协会铣床分会、小型机床分会、钻镗床分会、重型机床分会、数控系统分会对五轴加工中心展品进行了专题调研。调研通过现场考察和技术资料收集，了解和汇总了本届展会的五轴加工中心展品情况，我们就其所反映出的国内外最新技术发展趋势和新兴应用市场的需求变化等相关信息进行了整理分析，供行业同仁参考，不当之处请指正。

一、CIMT2025五轴加工中心展品概况

本次调研对象是五轴加工中心，至少涵盖三个直线轴和两个旋转轴，能完成五轴联动或四轴联动加工，包括立式五轴加工中心、卧式五轴加工中心、龙门五轴加工中心、钻镗铣类五轴加工中心和铣车复合五轴加工中

心五类产品。

1. 五轴加工中心的机床类型

本届展会共有300家展商共展出729台加工中心，其中有212家展商展出了404台五轴加工中心，占加工中心的比例分别为展商数70.7%、展品数55.4%，且有319台具备五轴联动功能，占参展的五轴加工中心79%。各类五轴加工中心展品数以及占各参展五轴加工中心的占比（分境外、境内和整体）情况如下：

	五轴加工中心	立式五轴加工中心		卧式五轴加工中心		龙门五轴加工中心		镗铣五轴加工中心		铣车复合五轴加工中心	
		台数	占比	台数	占比	台数	占比	台数	占比	台数	占比
境外	84	45	53.6%	13	15.5%	12	14.3%	2	2.4%	12	14.3%
境内	320	179	55.9%	45	14.1%	37	11.6%	4	1.3%	55	17.2%
整体	404	224	55.4%	58	14.4%	49	12.1%	6	1.5%	67	16.6%

2. 五轴结构形式

五轴加工中心结构形式比较多，典型结构有摇篮式工作台、双摆头、摆头+旋转工作台、悬臂式双摆工作台、立卧转换摆头、非正交双摆工作台和铣车复合加工中心等。境内展品主要以摇篮式工作台、摆头+旋转工作台和双摆头等通用型五轴结构为主导，境外展品在铣车复合和悬臂式双摆工作台占比明显高于境内展品。

	五轴加工中心	摇篮式工作台		摆头+旋转工作台		铣车复合式		双摆头		悬挂式双摆工作台		立卧转换五轴		其它	
		台数	占比	台数	占比	台数	占比	台数	占比	台数	占比	台数	占比	台数	占比
境外	71	27	38.0%	6	8.5%	14	19.7%	6	8.5%	8	11.3%	3	4.2%	7	9.9%
境内	195	100	51.3%	33	16.9%	18	9.2%	23	11.8%	1	0.5%	3	1.5%	17	8.7%
整体	266	127	47.7%	39	14.7%	32	12.0%	29	10.9%	9	3.4%	6	2.3%	24	9.0%

3. 五轴加工中心的数控系统

对所调研404台五轴加工中心的数控系统进行统计，西门子、发那科和海德汉三家占比近70%；国产数控系统在五轴机床应用比例在提高，占比13.9%；值得注意的是，主机厂自研系统占比9.2%。展示的数控系统型号都是最高配置和最新技术，如西门子系统中配置SINUMERIK ONE有112台套，占西门子参展的五轴系统76%，海德汉五轴系统均为TNC640或TNC7，发那科31i有13台套，占发那科参展的五轴系统19.4%。

境外五轴加工中心展品均配置境外品牌的数控系统，其中，西门子、发那科和海德汉数控系统分别占比39.3%、23.8%和22.6%，主机厂自研系统占比11.9%。320台国产五轴加工中心有218台配置境外品牌数控系统，占比68.1%，西门子115台套（ONE 88台套），发那科47台套（31i 6台套），海德汉28台套；102台配置国产数控系统，占比31.9%，主机厂自研系统占比8.4%，有5台铣车复合加工中心配置国产五轴数控系统。

4. 五轴加工中心的核心功能部件

机床主轴、摆头和转台是五轴加工中心的核心功能部件，是影响机床的性能的关键因素，其供应链策略呈现不同。境内展商更倾向于自制转台类部件，优化机床整体结构设计，但在高端主轴（如高转速、大扭矩电主轴）和摆头（高动态响应技术）上通常采用外购，通过引入专业成熟产品弥补技术短板，优化整机性能与成本

效益；境外展商则普遍展现出更强的核心部件自主研发能力，尤其在摆头、转台自制率比较高，同时，将高性能电主轴等作为核心竞争力。整体而言，双方均采取“自制+战略外购”组合策略，但境外厂商在关键部件技术自主可控深度上占优，而国内厂商需突破主轴动力性能、摆头动态精度等高端技术瓶颈以提升自主化水平。

本届展会中，境内、外知名企业五轴展品密集参展，德马吉森精机（5台全五轴）、马扎克（7台中含4台五轴）、大隈（3台）等；境内五轴水平快速提升，科德数控（12台加工中心全部为五轴）、通用技术集团（15台中含10台五轴）、海天精工（7台中含6台五轴）等企业均携多台高端设备亮相。五轴加工中心的代表性展商参展情况如下：

序号	展商	加工中心台数	五轴加工中心台数	序号	展商	加工中心台数	五轴加工中心台数
1	德马吉森精机	5	5	1	科德数控	12	12
2	马扎克	7	4	2	通用技术集团	15	10
3	大隈	4	3	3	海天精工	7	6
4	GF加工方案	4	3	4	威达	7	6
5	巨浪	4	3	5	汇专	11	5
6	普锐米勒	4	3	6	科杰	7	5
7	恒轮	3	3	7	博鲁斯潘	6	5
8	北村	3	3	8	拓璞	5	5
9	友嘉	7	2	9	豪迈	5	5
10	牧野	6	2	10	埃弗米	5	5
11	赫可	4	2	11	巨冈	5	5
12	格劳博	3	2	12	精雕	5	4
13	威力铭	2	2	13	宁江	3	3
14	埃斯维	2	2	14	成都煜鼎	3	3
15	兹默曼	2	2	15	三善	3	3
16	优龙	2	2	16	北一机床	6	2

根据协会展商填报的展品信息和本次调研掌握的数据，CIMT2025五轴加工中心产品的展商数占比，从CIMT2021的39.3%增至70.7%，五轴加工中心的展品数占比从35.7%升至55.4%，其中，展商数占比境外从38.2%增至76.2%，境内从40.3%增至69.2%，展品数占比境外从35.4%增至57.5%，境内从35.9%增至54.9%。近两年，境内五轴加工中心展品增长尤为迅猛，本届164家境内展商展出了320台五轴展品，占五轴加工中心总展商数的77.4%、加工中心展品总数的79.2%。

五轴加工中心展商数占比

	CIMT2021			CIMT2023			CCMT2024			CIMT2025		
	境内	境外	合计	境内	境外	合计	境内	境外	合计	境内	境外	合计
加工中心	77	68	145	82	70	152	140	48	188	237	63	300
五轴加工中心	31	26	57	33	42	75	68	34	102	164	48	212
五轴加工中心占比	40.3%	38.2%	39.3%	40.2%	60.0%	49.3%	48.6%	70.8%	54.3%	69.2%	76.2%	70.7%

五轴加工中心展品数占比

	CIMT2021			CIMT2023			CCMT2024			CIMT2025		
	境内	境外	合计	境内	境外	合计	境内	境外	合计	境内	境外	合计
加工中心	153	127	280	149	122	271	302	93	395	583	146	729
五轴加工中心	55	45	100	54	63	117	124	49	173	320	84	404
五轴加工中心占比	35.9%	35.4%	35.7%	36.2%	51.6%	43.2%	41.1%	52.7%	43.8%	54.9%	57.5%	55.4%

二、五轴加工中心技术发展现状与趋势

为了更进一步了解机床具体情况，做调研策划时对各类五轴加工中心的结构、使用直驱技术、全闭环控制、复合功能等机床性能特点进行了分解，如立式加工中心按结构特点分十字滑台、小型龙门式、立柱移动式、滑座顶置式和其他五种形式；卧式加工中心分正T、倒T、框中框、固定工作台、龙门式、整体式、分体式和其他；龙门加工中心分工作台移动、龙门架移动、横梁升降式、双龙门式和其他；镗铣加工中心分落地镗、刨台式、坐标镗、龙门式和其他。

1. 高精度与高动态性能

通过在床身、主轴、丝杠等关键位置埋入多通道温度传感器，数控系统自动补偿，实现热变形主动补偿；采用直线光栅尺和编码器实现全闭环位置控制，配合有限元分析设计的轻量化高刚性桥式龙门结构，立式加工中心有31%采用小型龙门式结构，70%五轴加工采用全闭环控制；采用高速主轴振动抑制，实现20000r/min以上转速下的亚微米级振动控制；应用直驱技术提高机床的动态特性，有80%展品的旋转轴采用力矩电机驱动，其中，30%五轴展品所有伺服轴均采用直驱。

GF加工方案Mikron MILL S 200 U主轴最高转速为50000r/min，采用主动抑振技术，实现低于0.06 μm

的表面粗糙度；大昌洋行的KERN MICRO HD采用直线电机驱动+Kern微间隙静压导轨，实现纳米级加工精度，内部温控系统（±0.05°）抑制热变形，CSC主轴提升热稳定性，适用于超精密微加工领域。

北京精雕 JDMR800 五轴高速加工中心采用龙门式结构，A、C轴采用力矩电机驱动，直线轴定位/重复定位精度为0.003/0.002mm，旋转轴定位/重复定位精度6" /4"；通用技术集团VMU63P立式加工中心直线轴加速度1g，直线轴定位/重复定位精度为0.005/0.003mm，旋转轴定位/重复定位精度为6" /3"；科德数控 KHM 150U 非正交卧式车铣复合加工中心采用双重倾斜结构，整体高刚性，实现五轴重切削，直线轴定位/重复定位精度0.003/0.002mm。



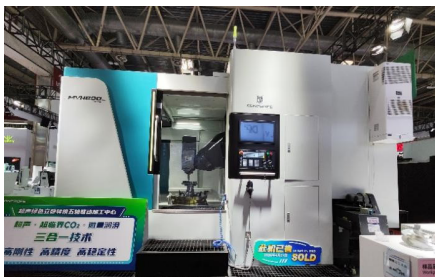
2. 效率与复合化

形式多样的复合加工机床不断显现，以满足不同的应用场景。如铣车复合、车铣复合、增减材复合、切削加工与超声加工、激光加工复合等，同时，还有将测量环节、自动上下料装置整合到加工设备，实现在线测量和单机自动化。

WFL的M30多功能车、钻、铣复合加工机床，可实现4轴车削、5轴铣削，

完成工件6面完整加工，还可根据需要进行齿轮或深孔加工；因代克斯G220集成铣削功能，可配置3个刀塔，多达16个运动轴，三把刀具可以同时加工，为复杂零件的完整加工提供最大的柔性；德马吉LASERTEC 50 Shape Femto融合激光加工，拓展硬质合金加工能力；斯达拉格公司的Bumotec 191neo七轴五联动车铣复合加工中心，铣削主轴最高转速40000r/min，车削主轴最高转速6000r/min，加速度1.2g，将小型精密复杂的零件一次性完整加工，可以实现磨削、抛光、车齿、滚齿和钻石刀镜面加工等加工。

秦川机床集团宝鸡机床的BHR500V铣车复合加工中心，最大加工工件 $\Phi 500 \times 1000\text{mm}$ ；北一机床XHA $\mu 24$ -MTR25车铣复合加工中心，最大车削直径 $\Phi 2500\text{mm}$ ，机床滑枕具备自动抓取功能，配置车削头、伸长铣头、机械摆角铣头等多种附件头库；汇专科技的MBR6030C-5AXIS超声复材切割龙门五轴联动加工中心，配置自主研发超声切割系统和超声铣削系统，融合超声、超临界二氧化碳、低温冷风三种技术。



3. 智能化与自动化

五轴加工中心展品大多集成基于AI的加工过程监控与优化（刀具磨损预测、振动抑制、参数自适应）、数字孪生、远程运维平台、车间级管理系统（MES）、机器人/自动化上下料等。通过NC-Link、umati、MTConnect等协议连接机器人、AGV，构建柔性制造单元（FMC）和自动生产线。

牧野的五轴加工中心搭载ICTS智能温控系统，德马吉森精机的五轴加工中心配备CELOS温度补偿模块；马扎克VARIAXIS i-600 NEO集成协作机器人单元，实现汽车结构件无人化生产；哈默C42U-MT采用“匣式嵌板”结构，可扩展为柔性制造系统；格劳博HF 5500配备圆形托盘库（PSS-R450），支持无人化生产。

北京精雕的JDSR1000配置北京精雕的在机检测系统，对工件、刀具、夹具状态进行在机检测与修正，降低关键要素“固有偏差”对零件精度的影响；科德数控的KMF 320 车铣复合加工中心采用主轴热误差智能补偿技术，复杂回转

体类零件的多轴联动机床空间误差建模，机床精度及精度稳定性控制；刀具状态的自适应加工方法，双通道独立管控功能，可同时控制11轴的五轴联动技术。

4. 绿色制造与可持续性

五轴加工中心通过智能化控制，实时监测和调整机床的能源使用情况，最大化能源利用效率，优化机床结构设计、高效的能源管理、先进切削技术、能源回收以及废弃物回收再利用等绿色制造技术和策略，实现机床产业可持续发展。

大隈机床应用了Thermo-Friendly Concept（亲和）智能技术，配置“免清洗水箱”，减少了能源消耗和废弃物排放；德马吉森精机结合制动能回收、自适应进给控制、高级能源监控等，提升机床的能源效率；马扎克通过改进机床性能来提高生产效率、优化整机功耗、节省外围设备的能源等措施来降低机床产品的能耗；Index的机床通过降低机床组件的重量、所有驱动装置配备电能回馈装置、智能控制周边设备的运行等措施，提高机床产品的能源利用效率并降低能耗。

拓璞机床移动部件采用碳纤维复合轻量化结构，降低机床能耗；汇专科技MVC1250-5AXIS超声立式五轴联动加工中心搭载汇专自主研发的超声、超临界二氧化碳和微量润滑（MQL）三项技术，在加工过程中可使切削力大幅降低、切削温度降低、摩擦系数降低，降低废弃物排放和能量消耗。

5. 数控系统支撑五轴加工中心的技术创新

从调研可以看出，五轴加工中心的性能提升和技术创新较大程度上依赖其数控系统的发展。

（1）技术发展的核心驱动力

数控系统通过强大的多轴协同控制算法（如NURBS插补、RTCP/RPCP）实时解算复杂空间轨迹，实现了高精度复杂曲面加工；其动力学性能突破（如自适应前馈控制、加速度平滑优化）有效抑制高速切削振动，充分释放机床物理潜能；集成激光补偿、热变形建模等先进技术，维持微米级长期加工精度。

（2）智能化创新的实现载体

系统内嵌AI模型（如分析切削负载与振动频谱）可自主优化工艺参数，提升效率并延长刀具寿命；基于物理传感器与虚拟模型的数字孪生闭环控制能预测规避加工故障；结合在线测量系统的自适应加工能力，可自动修正坐标系与刀具补偿，应对装夹变形和毛坯余量波动。

（3）功能拓展和提高效率的关键平台

数控系统支持车铣复合加工，显著减少工序切换时间；开放接口实现金属增减材一体化制造；作为自动化集成中枢，通过NCLink、umati、MTConnect等标准协议连接机器人、AGV构建柔性单元和自动线。同时，图形化与对话式编程极大降低五轴操作复杂度，虚拟机床仿真则有效缩短调试周期。

总体而言，数控系统作为五轴数控加工中心的“大脑”和“神经中枢”，其技术能力决定了五轴加工中心的性能上限和创新边界。



三、市场需求驱动五轴加工中心的技术迭代

航空航天、医疗器械、汽车制造、半导体等领域各种形状复杂高精度零件的加工需求，促进了五轴加工中心的快速发展。现场调研时，对机床应用领域进行了统计，有60%五轴加工中心展品应用于航空航天，51%应用于汽车领域，34%应用于能源装备。

1. 航空航天领域引领高端需求

航空航天领域零件具有以钛合金、高温合金和复合材料为主，结构复杂（整体框架、机匣、叶轮叶片），薄壁、易变形，型面精度、表面质量要求高，小批量、多品种等特点。所用的五轴加工中心需要高刚性、高动态响应以应对难切削材料；超高精度（微米级）和复杂曲面处理能力（RTCP必备）；高效粗加工能力以减少材料去除时间；热变形补偿与振动抑制技术对保证薄壁件精度。

GF加工方案 Liechti GOMILL 350C实现一次装夹中对翼型件、轮毂和叶尖进行粗精加工，以及对涡轮叶片的中跨、翼弦等加工区域进行探测和自适应加工；巨浪凯龙Mill 800 FX主轴转速24000r/min，满足高温合金精加工要求。

通用技术集团SMC1200u专攻钛合金整体叶盘加工，机床数控系统、测量反馈系统、转台、主轴等核心功能部件均实现国产化，应用于盘形零件复杂曲面的高精度铣削加工；北一机床 GT1200 Pro高精度立卧转换五轴加工中心工作区域大，可选配车削功能，适用于中小型高温合金、钛合金及有色金属机匣、套筒类零件的高精度、高效率的五轴加工需求；科德数控KTBM 1200六轴五联动叶盘加工中心，机床具有三个直线轴和三个回转轴，使五轴加工运动产生RTCP动作最小化，应用航空航天行业领域大规格叶盘类产品加工；博鲁斯潘BM80-5i五轴联动加工中心主要用于叶片类零件型面、进排气边、缘板及根部转接的复杂曲面加工。



2. 新能源汽车重塑制造方式

新能源汽车领域需求大型一体化压铸件（铝合金）的精密加工（电池盒、车身结构件）；电机壳体、减速器壳体（多面加工、高同轴度/位置度）；轻量化结构（铝、镁合金或钢铝混合）的复杂构件；需求高效率、高节拍。五轴加工中心需具有驱动大型工作台、高承载能力；高速、高进给下的加工稳定性与精度保持性；对复合加工（铣削+测量）集成度要求高，以实现工序集中；需要自动化接口（与机器人、AGV集成）构建柔性产线；对话式/图形化编程需求旺

盛以降低操作门槛，适应快速换型。

格劳博G系列双主轴加工中心：提供无障碍工作空间和接近性，便于大型压铸件和复杂动力总成件的装夹和操作；埃斯维BA space3-21双主轴卧式加工中心：机床工作行程大，采用直驱技术，快移速度为120m/min，加速度1g，用于加工大尺寸零件，如一体压铸件、前后车舱等新能源压铸件。

济南二机新能源汽车大型一体化铝合金压铸零件加工智能生产线，由1台高速双龙门五轴加工中心和1套机器人自动上下料物流系统组成，双龙门五轴加工中心快移速度达到120m/min，最大加速度1.3g，主要用于新能源汽车前机舱、后底板及电池壳等大型一体化铝合金压铸零件的高速、高效加工；普什宁江HMC630-221高速五轴加工中心：主轴采用双电主轴，直线轴和回转轴均采用直驱，刀库顶置一体化设计，服务于新能源汽车和其它行业的铝合金零件高效加工；成都煜鼎PHD0822采用双主轴、双转台的五轴结构设计，配合60m/min快移速度，满足转向节、控制臂、转向管柱、离合器壳体、变速箱壳体等关键压铸零件加工需求。

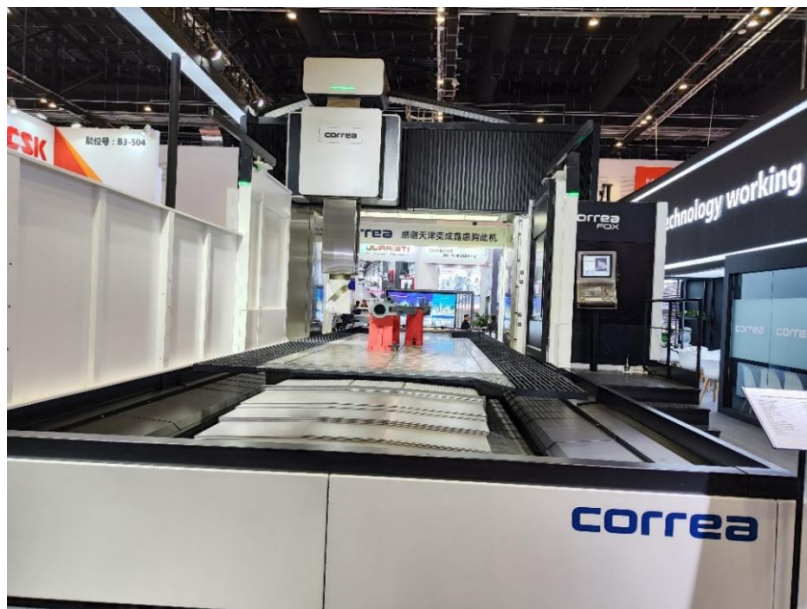


3. 能源装备催生超限制制造

能源装备领域的零件具有以下特点：大型、重型工件（如风电齿轮箱壳体、水轮机叶片、涡轮机叶片、大型阀门）；材料多样（高强度钢、不锈钢、耐热合金）；复杂自由曲面（叶片类）；深孔、长悬伸加工；对可靠性和长寿命要求极高。推动超大型、大扭矩、高稳定性五轴加工中心的发展；大行程、高刚性是关键；需要深腔加工能力；对热变形补偿（大型工件长时间加工）需求迫切；增材-减材复合制造（如激光熔覆修复叶片）成为发展趋势；在机测量技术用于大型工件定位与精度验证。

尼古拉斯FOX 60在能源领域，进行风电、核电以及汽轮机、泵壳的高精度产品加工；德马吉森精机DMU125FD配备 $\phi 1250\text{mm}$ 大直径工作台，实现大型风电齿轮箱壳体一体成型；兹默曼FZP100的X轴行程达40m，突破超长叶片加工瓶颈。

武重CHX5240i 智能双柱立式铣车加工中心，配有一个右数控车铣复合刀架，滑枕内置铣轴，复合车、铣、镗、钻等功能，最大车削直径 $\phi 4000\text{mm}$ ，适合大型回转体类零件的复杂曲面加工。绿色转型推动特种加工发展：普利森ZKF2103-5深孔钻，钻孔范围 $\phi 3 \sim \phi 35\text{mm}$ ，钻孔最大深度1000mm，深孔 $\pm 0.004\text{mm}$ 精度，提高热交换器管板加工效率。



四、调研观感

CIMT2025展会作为全球机床行业的“风向标”，其展出的五轴加工中心集中体现了该领域最新技术发展趋势及市场需求的变化，呈现“高精化、复合化、智能化、绿色化”四维升级，直驱技术、复合功能模块及柔性制造单元成为竞争焦点。

1. 多重因素推动五轴加工中心快速发展

一方面，航空航天、新能源汽车和能源装备等重点领域对复杂零件“高精、高效、复合加工”的迫切需求，提供了五轴加工中心迅猛发展的沃土；另一

方面，五轴加工中心的直驱技术、全闭环控制、机床主轴、摆头、转台和五轴数控系统等核心技术显著提升，为五轴加工中心规模化快速发展提供了有力的条件。另外，本土化生产成本大幅度降低，普通五轴加工中心的生产企业增多，市场能接受五轴加工中心企业增多，五轴加工中心设备在加工中心领域的角色，由仅为高端选项逐步转变为助力装备。

2. 境内外五轴加工中心的差距

境外高端五轴加工中心厂商在核心技术积累与整体技术体系成熟度上仍显著领先，其优势体现在多个维度：

在核心技术深度与综合性能稳定性方面，境外领先厂商凭借长期技术积累，实现了伺服驱动、控制算法与机械结构的高度耦合，从而在高速、高负荷加工条件下仍能长期保持亚微米级的精度稳定性和轮廓精度。其热变形补偿、振动抑制等底层技术已发展到纳米级应用阶段，并经过多年市场验证。相比之下，国产设备虽然在静态精度指标上已达到国际高端水平（如直线轴重复定位精度0.002mm），但在动态精度保持性、长期服役稳定性以及复杂工况下的抗干扰能力方面，仍存在一定差距，尤其在持续高速加工下的精度寿命与境外产品尚有距离。

在复合化与智能化功能的成熟

度方面，境外厂商已实现高度集成的“一次性完整加工”解决方案，例如车铣增材一体化、激光加工融合等技术已广泛应用于高端制造领域，并构建了以机床为载体的智能化生态，深度融合AI工艺优化、数字孪生和在线测量校正，支持无人化柔性生产单元。国内虽在车铣复合机型上已实现规模化生产，并在自动化集成（如机器人上下料）和基础数据采集方面取得实质进展，但在多能源场复合、工艺链全程闭环优化等更高阶的集成与智能决策层面，仍处于追赶阶段。

在绿色制造与先进工艺应用层面，境外厂商广泛采用节能设计、微量润滑、干切技术等并实现成熟应用，同时高温合金切削、复合材料无损加工、超精密光学元件加工、激光增材修复等尖端领域具备明显的工艺优势。国内厂商目前仍集中于满足主流市场（如新能源汽车结构件、一般航空航天零部件）的加工需求，在特殊材料加工、超精密制造、绿色工艺等方面的技术储备和应用案例相对有限。

总之，国产五轴加工中心在市场规模、主流应用满足度和静态精度指标上已快速接近国际水平，但在底层技术深度、持续稳定性、尖端工艺能力与智能化生态建设等维度仍面临挑战，需在核心技术研发与高端应用验证方面进一步突破。

3. 国产五轴加工中心机遇与挑战

通过CIMT2025五轴加工中心参展情况的调研，可以看出国产五轴加工中心呈现出“量增”与“同质”并存的特点，同时也面临着机遇和挑战。

国产五轴在立式五轴加工中心、摇篮转台等常规技术领域进步迅速，并通过外购核心部件，弥补了技术短板，降低了成本，实现了规模化发展，降低了市场门槛，导致众多厂商扎堆涌入，但也可能引发了产品同质化和低价位“内卷”竞争的风险。

要实现可持续发展，国产五轴加工中心应聚焦：

（1）突破核心技术：重点攻克高端数控系统、精密电主轴、摆头、转台等核心部件的自主研发，摆脱对外购的依赖，实现自主可控。

（2）深化智能化集成：深度融合AI、物联网和大数据技术，发展自适应加工、预测性维护和数字孪生等智能功能，提升设备价值。

（3）拓展高端应用：积极进入航空航天复杂零件、新能源、精密医疗等高端领域，通过提升精度、稳定性和可靠性，赢得高端市场信任。

国产五轴加工中心应以技术自主化、产品特色化、场景深度适配、绿色制造等为导向，推动国产五轴加工中心从“规模扩张”向“全球价值链高端攀升”的战略转型，筑牢中国高端制造基石。□

（上接第34页）

同时，行业也将迎来诸多发展机遇。我国经济基础稳、优势多、韧性强、潜能大，长期向好的支撑条件和基本趋势没有变。《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十五个五年规划的建议》明确提出，要加强原始创新和关键核心技术攻关，完善新型举国体制，采取超常规措施，全链条推动工业母机等重点领域关键核心技术攻关取

得决定性突破。中央经济工作会议明确要实施更加积极的财政政策，持续支持“两重”项目和“两新”政策实施。此外，国际市场的开拓、新兴领域的迅猛发展和传统领域的提质升级，都将持续推动机床工具行业的增长。

综上，展望2026年，我国机床工具行业整体将实现小幅增长，结构分化的态势将进一步演进。□

刀具自动测量功能在车铣复合数控机床上的研发与应用

武汉华中数控股份有限公司研究院 叶琦 王旭 孙楠 高翔 孙永吉 胡少云

【摘要】为实现车铣复合数控机床在加工过程中自动完成刀具长度与直径参数设定、磨损监测与补偿等功能，本文研发了一套基于华中8型数控系统的刀具自动测量功能模块。该系统结合测头硬件与数控系统的运动控制与位置记录能力，通过人机界面实现参数设置与测量任务调度，支持车刀、铣刀等多种刀具类型的在线测量与破损检测。实验结果表明，该功能显著提高了加工精度与效率，减少人工干预与废品率，具有良好的工程应用价值。

随着工业4.0与智能制造的发展，航空航天、汽车制造、医疗器械等行业对加工设备的自动化与精度提出了更高要求。车铣复合数控机床因其集成车削与铣削功能，成为复杂零件高效加工的关键设备。刀具作为加工过程中的核心部件，其几何参数的准确性直接影响加工质量。传统手动对刀方式存在效率低、误差大、依赖经验等问题，难以满足现代制造的高精度与自动化需求^[1]。为此，本文基于华中8型数控系统，研发了一套刀具自动测量与磨损补偿功能模块，实现了刀具长度、直径的自动测量、磨损监测与自动补偿，提升了加工过程的智能化水平。

一、刀具自动测量功能研发

1. 技术原理

刀具自动测量功能基于接触式测头与数控系统的协同工作。测头安装在机床工作台上，当刀具按预设轨迹接触测头时，测头产生触发信号，数控系统记录当前坐标位置，通过算法计算刀具的实际几何参数^[2]。系统通过以下步骤实现自动测量：

位置标定：对刀仪量块A点与主轴中心的相对位置通过参数设定界面（见图1）进行标定，计算公式为：

$$X_{POS} = \frac{X_a}{2} - X_{WIDE}$$

其中， X_a 为外圆直径， X_{WIDE} 为对刀仪长度。

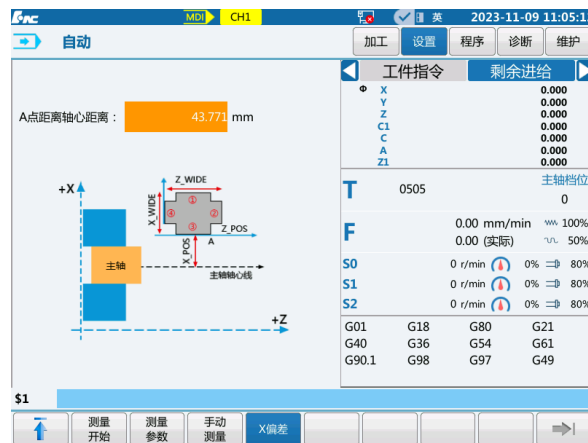


图1 对刀仪量块位置设定界面

轨迹规划：根据设定的安全距离、测量次数和速度参数，系统自动规划刀具接近、接触和退回的路径，避免碰撞。

数据采集与处理：刀具接触测头瞬间，系统记录坐标值，并通过多次测量取平均值提高精度。磨损量通过对比初始参数与实测值计算得出。

自动补偿：测量结果自动写入刀具偏置表，数控系统在加工过程中实时调用修正值，实现磨损补偿。

2. 系统组成与界面设计

系统由测头硬件、华中8型数控系统和人机交互界面组成^[3]。界面设计注重便捷性，主要功能界面包括：用于标定对刀仪与主轴的相对位置（见图1）。设置安全距离、测量速度等参数（见图2）。支持车刀、铣刀等10种刀具类

型的测量任务配置（见图3），一键完成Z轴偏差标定，数据自动存入零点偏置表（见图4）



图2 测量参数设置界面



图3 测量类型选择界面



图4 教导模式界面

3.自动测量循环

系统通过G1082指令调用测量循环，参数D、E分别控制X、Z方向的测量流程（见图5）。测量轨迹包括接近、接触、记录和退回四个阶段，确保安全性与重复精度。

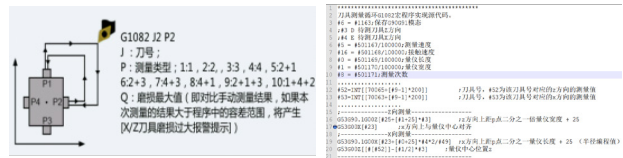


图5 系统调取宏程序控制刀具测量轨迹

二、实验与结果分析

1. 实验设计

为验证系统性能，在某汽车零部件企业车铣复合机床上进行对比实验。选取10组刀具（车刀、铣刀各5组），分别采用手动对刀和自动测量功能进行参数设定与磨损监测。加工材料为45钢，测量重复性条件为同一刀具连续测量5次。

2. 数据对比（见附表）

测量数据对比表

指标	手动对刀	自动测量
对刀时间/min	8.5	1.2
长度误差/ μm	± 15	± 3
直径误差/ μm	± 20	± 5
磨损检测成功率(%)	75	98
废品率(%)	5.2	0.8

3. 结果分析

效率提升：自动测量将对刀时间从8.5分钟缩短至1.2分钟，效率提升约85%。

精度改善：长度和直径误差分别控制在 $\pm 3 \mu\text{m}$ 和 $\pm 5 \mu\text{m}$ 以内，显著优于手动对刀。

可靠性增强：磨损检测成功率提高至98%，避免了因刀具磨损导致的批量质量问题。

成本降低：废品率从5.2%降至0.8%，减少了材料与工时浪费。

四、结语

刀具自动测量功能的研发与应用，推动了车铣复合数控机床向智能化、高精度方向发展。通过集成传感器技术、运动控制算法和人机交互设计，该系统实现了刀具参数的快速精确测量与磨损补偿，有效提升了加工质量与效率。未来，将进一步优化测头精度与自适应算法，拓展其在智能制造中的应用场景。

参考文献：

- [1] 秦泽政. 数控机床刀具状态智能监测[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [2] 潘卓夫, 梁文达. 工件测量在华中8型数控系统中的实现方法[J]. 制造技术与机床, 2017(8): 45-48.
- [3] 田国富, 高峰, 刘新颖. 基于计算机视觉的数字刀具测量系统研究[J]. 微型机与应用, 2015, 34(22): 78-81.

数控机床上不同电机类型的角度头切换的研究

通用技术集团机床工程研究院有限公司沈阳分公司 马俊杰

【摘要】因角度头可以加工各式各样的异性结构件，在航空航天类数控机床上得到了广泛应用，由于用户对特殊内腔筋格顶面、侧壁、底面加工的需要，在一台数控机床需要配置三个加长角度头和一个延伸头；加长角度头是由同步电机驱动的，延伸头是由异步电机驱动的；本文详细的介绍了如何通过数控系统的驱动设置以及PLC控制，使用一个驱动模块并根据用户工艺自动切换同步电机和异步电机参数的同时切换不同同步电机的相位角等数据。

1.前言

近年来，我国航空航天事业发展迅猛，数控机床配置直角头和延伸头以其独具的结构特性，大加工范围、高加工效率、高动态特性等优点，成为广泛应用于高精尖航空航天大型结构件加工的行业重器。为使数控机床能够实现多面，异形面加工，各式各样的角度头应用越来越广泛。

本文介绍了一台立式加工中心数控机床，如图1所示，配置了三个加长角度头和一个延伸头，加长角度头使用同步电机驱动，延伸头使用异步电机驱动；需要根据用户的切削工艺自动更换头库区域更换不同的角度头。

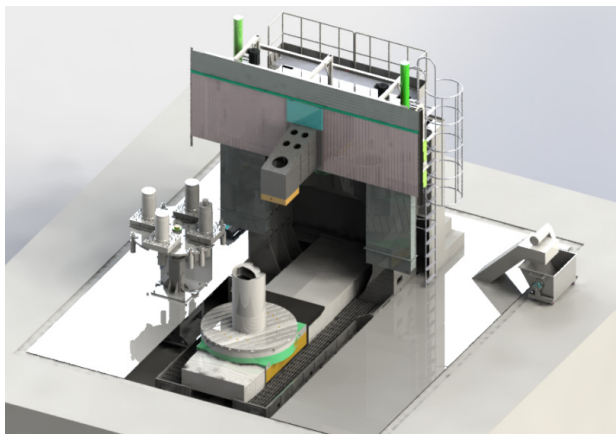


图1 立式加工中心

选用 350mm、500mm、800mm 长度的加长角度头（如图 2 所示），可根据工艺以及待加工工件高度更换角度头，适合加工内腔筋格顶面、侧壁、底面等结构。

加长角度头是同步电机驱动的电主轴，采用西门子 828D 数控系统搭配 S120 驱动控制；350mm、500mm、800mm 加长角度头均配置同一款同步电机，电机参数一致，但换向角位置不一致。

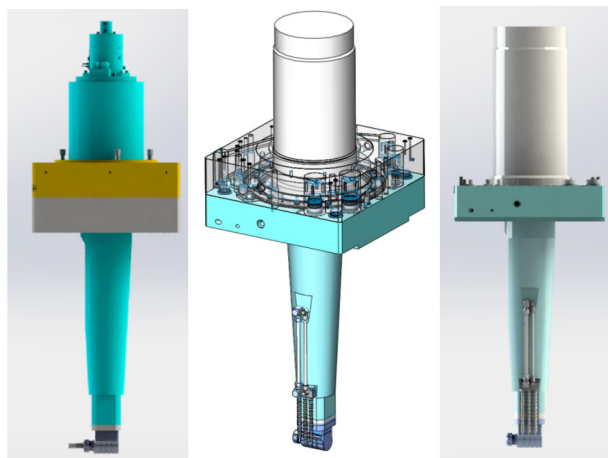


图2 350/500/800mm加长角度头

延伸头为异步电机驱动的电主轴。延伸头便于用于加

工大型平面铣削和钻削加工，如图3所示。

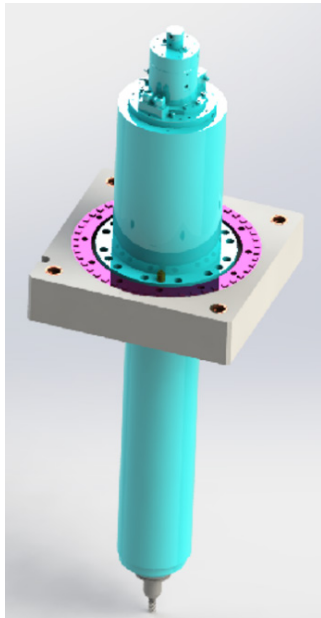


图3 延伸头

如图4角度头库所示，头库上设计了三个加长角度头的位置和一个延伸头位置外，还配置了6个刀柄位置，可以放置延伸头的刀具。头库配置可旋转转盘，当需要更换加长角度头时，系统根据换刀命令自动旋转至指定的角度头位置，便于机床轴移动至换头位置抓取角度头。

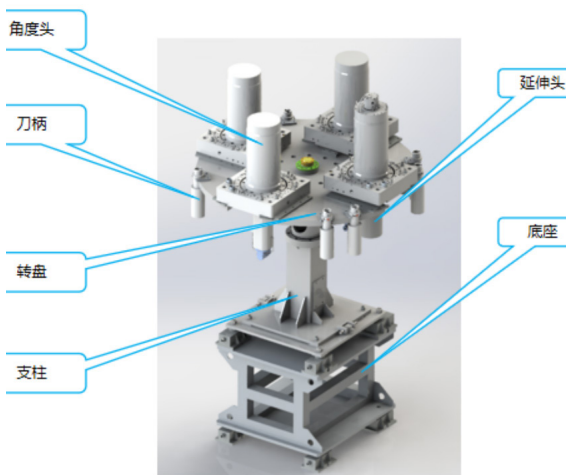


图4 角度头库

2.硬件配置

在数控机床上更换角度头，通过宏程序即可实现，但需更换不同电机类型（同步电机 / 异步电机）的相关数据且共用同一个驱动模块的情况，则不多见；首先需根据电机厂家提供的电机参数，选择一个驱动模块，其容量能够涵盖这四个电机的参数要求即可。加长角度头的参数如图5所示，延伸头的参数如图6所示。

参数表版本号	4.6			
电机类别	同步			
电机型号	LSM220085-PM12P-001			
备注				
参数含义	参数值	参数值	单位	备注
绕组连接	y		/	
额定电压 (线)	382		V	
额定电流 (线)	42.3		A	
额定功率	17.2		kW	
额定频率	150		Hz	
额定转速	1500		rpm	
额定转矩	109.6		Nm	
极对数	6		pair	
最大转速	6000		rpm	
功率因数	0.68			
定子电阻 (相, 冷态)	0.21		Ω	Y接等效值
反电势系数 (线)	168		Vrms/krpm	
d轴电感	4.24		mH	
q轴电感	4.23		mH	

图5 加长角度头参数

Parameter	Symbol	Value	Unit	Nr.	Remarks
Motor type		1		p300	third party motor
Rated motor voltage	U_N	310	V	p304	
Rated motor current	I_N	121	A	p305	Continuous operation
Rated motor power	P_N	45	kW	p307	Continuous operation
Rated motor power factor	$\cos\phi$	0.78		p308	
Rated motor frequency	f_N	85	Hz	p310	
Rated motor speed	n_N	1220	rpm	p311	Asynchronous speed at rated load
Max. motor speed	n_{max}	6000	rpm	p322	Synchronous speed
Equivalent Circuit Data All data are exclusively based on the motor. An additional choke is not considered in the data:					
Circuit connection	Y or D	Y			
No-load current	I_0	39.9	A	p320	Phase to phase
Stall torque reduction factor	K_M	100	%	p326	
Moment of inertia of motor	J_{motor}	0.27327	kgm ²	p341	
Speed for field attenuation	n_s	1496	rpm	p348	Asynchronous speed under load
Phase stator resistance (20°C)	R_1	0.061	Ω	p350	
Phase rotor resistance (20°C)	R_2'	0.063	Ω	p354	Stator concerned
Stator leakage inductance	$L_{1\sigma}$	0.38	mH	p356	
Rotor leakage inductance	$L_{2\sigma}'$	0.76	mH	p358	
Phase main field inductance	L_s	7.38	mH	p360	
Caution					
Rotary encoder pulse number		384	Inc/rev	p408	
Motor temperature sensor type		6		p601	Pt1000
Maximum spindle speed		6000	rpm	35100	

图6 延伸头参数

根据电机参数配置，在NC62选型手册中查到，6SL3120-1TE31-3AA3驱动可满足电机驱动要求。

产品编号	6SL3120-1TE28-5AA3		6SL3120-1TE31-3AA3	6SL3120-1TE32-0AA4
产品名称	采用内部风冷的书本型单轴电机模块			
直流母线电压 DC 510 ... 720 V				
输出电流				
• 额定电流 $I_{\text{额定}}$	A	85	132	200
• 基本负载电流 I_{H}	A	68	105	141
• S6 运行 (40%) 时的 I_{S6}	A	110	150	230
• $I_{\text{最大}}$	A	141	210	282
额定功率				
• 在 $I_{\text{额定}}$ 下	kW	46	71	107
• 在 I_{H} 下	kW	37	57	76
额定脉冲频率	kHz	4	4	4
直流母线电流 I_{d}	A	102	158	200
载流能力				
• 直流母线母排	A	200	200	200
• 24 V DC 母排	A	20	20	20
直流母线电容	μF	1880	2820	3995
电流需求 24 V DC 最大值	A	1.5	1.5	1.5
功率损耗 典型值 / 最大值	kW	0.77/0.79	1.26/1.29	2.03/2.09
冷却风需求	m^3/s	0.044	0.144	0.144
声压等级 L_{pA} (1 m)	dB	< 60	< 73	< 73
电机连接 U2, V2, W2		M8 螺钉 (X1)	M8 螺钉 (X1)	M8 螺钉 (X1)
• 最大可连接横截面	mm^2	2.5 ... 95, 2 x 35	2.5 ... 120, 2 x 50	2.5 ... 120, 2 x 50
屏蔽连接		参见“附件”	参见“附件”	参见“附件”
PE 连接		M6 螺钉	M8 螺钉	M8 螺钉

图7 NC62选型

电气柜中的配置如图8所示:

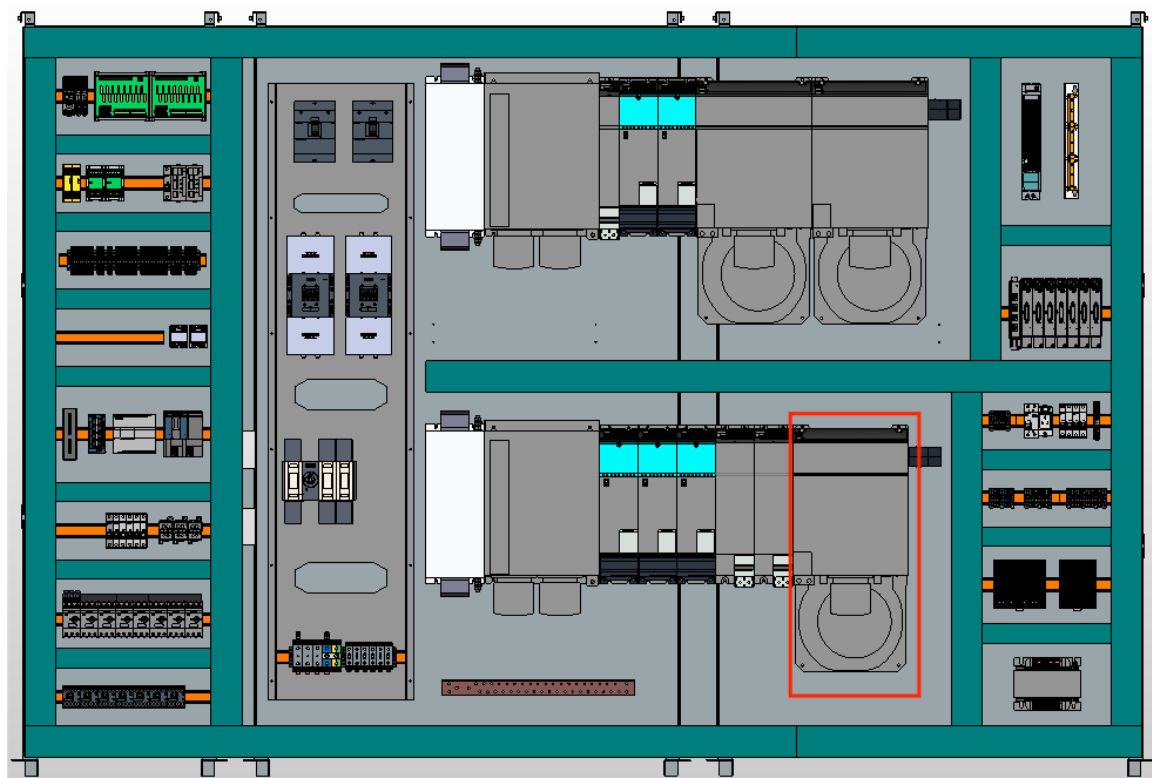


图8 6SL3120-1TE31-3AA3驱动

3. 扩展电机数据组和驱动数据组

在数控系统的驱动参数中配置两组电机数据组和驱动数据组。驱动中现有的电机数据组(MDS)和驱动数据组(DDS)的数量可通过以下驱动参数测定：

p0130 (电机数据组数量) = 2

p0180 (驱动数据组数量) = 2

驱动的电机数据组(MDS) 适用以下对应关系：

MDS[0] → 异步电机数据；

MDS[1] → 同步电机数据；

在扩展后的电机数据组和驱动数据组中，通过 MDS/DDS 数据接口输入异步电机和同步电机的参数：对应参数的 [0] 口输入异步电机数据，对应参数的 [1] 口输入同步电机数据，如表 1 所示。

表1 电机参数设置

序号	电机参数号	异步电机参数[0]	同步电机参数[1]	备注
1	p300	1	2	电机类型
2	P304	310	0	额定电压
3	P305	121	42.3	额定电流
4	P307	45	17.2	电机额定功率
5	P308	0.78	0	电机额定功率因数
6	P310	85	0	电机额定频率
7	P311	1220	1500	电机额定转速
8	P312	0	109.6	电机额定转矩
9	P314	0	6	电机极对数
10	P316	0	2.59	电机转矩常数
11	P317	0	168	电机电压常数
12	P318	0	42.3	电机静态电流
13	P319	0	109.6	电机静态转矩
14	P320	39.9	24.2	电机额定励磁电流
15	P322	6000	6000	电机最大转速
16	P323	0	67.7	电机最大电流
17	P326	100	71	电机F补偿系数
18	P341	0.27327	0.04007206	电机转动惯量
19	P348	1496	2262	Vdc = 600 V 弱磁开始转速 / n_弱磁开始转速
20	P350	0.061	0.21	冷态电机定子电阻
21	P354	0.063	0	冷态电机转子电阻/d 轴阻尼电阻
22	P356	0.38	4.23	电机定子漏电感
23	P358	0.76	0	电机转子漏电感/d 轴阻尼电感
24	P360	7.38	0	电机主电感/d 轴饱和主电感

参数设置完成后，保存数据。

4. PLC控制自动切换数据组

请求接口：切换到新的电机数据组(MDS)和/或驱动数据组(DDS)的请求通过以下接口进行：DB31, ... DBX21.0 - .4 = <MDS / DDS 下标>。

取值范围：电机数据组或驱动数据组的定址 n (n = 1, 2, 3, ...)，根据其下标 i 进行，其中 i = n - 1 = 0, 1, 2, ...。

电机数据组：MDS[0, 1, 2, ... 15]

驱动数据组：DDS[0, 1, 2, ... 31]

接口格式：请求接口的格式，即哪些位用于电机数据组(MDS)的定址以及哪些位用于驱动数据组(DDS) 的定址，通过格式接口进行设置。

那么，PLC程序编写如下图9和图10所示，参数组选择0即为异步电机参数激活，参数组选择1即为同步电机参数激活。

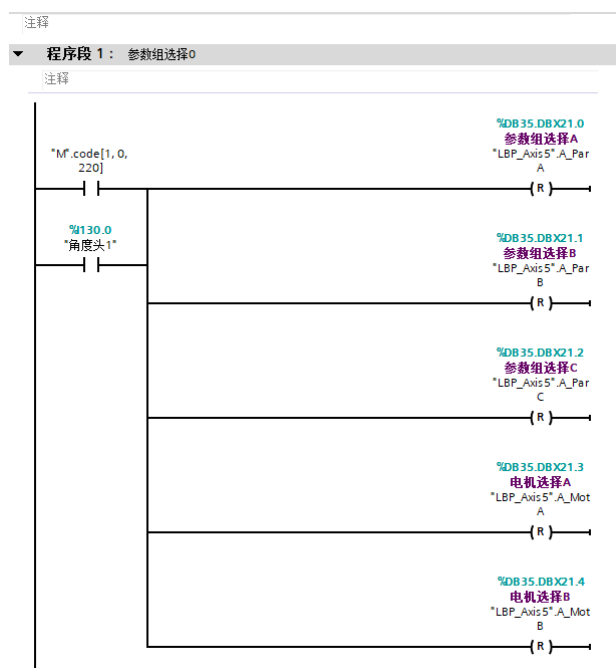


图9 参数组选择0

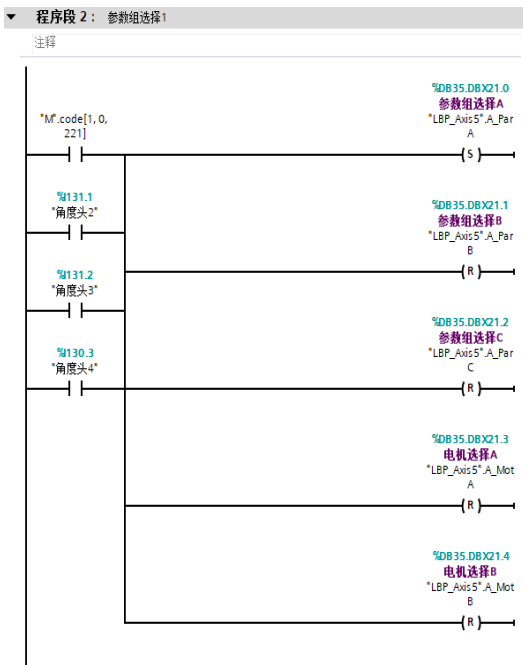


图10 参数组选择1

5.NC程序控制换向角参数的切换

三个加长角度头所配同步电机的换向角不一致，需分别识别并记录每个角度头的换向角；本文采用的方法是在宏程序中进行参数刷新，即角度头更换完成后，通过写驱动参数的指令切切换向角数值和最大转速限制值。

使用写驱动参数指令DRVPWR写电机最大转速限制，如写轴的最大转速是6000，如下所示：

```
D R V P W R ( _
ERROR,AX5,1082,1,6000)
```

因为轴的换向角参数属于编码器参数，而更改编码器参数的前提是该驱动处于编码器调试模式。所以写轴的换向角时需要先将编码器调试打开，写完成后要关闭，并保存参数，控制程序如下所示：

```
N1 IF($A_DBB[22]==1)
GOTOF _HEADNUM1 ; 角度头1
在主轴上
```

```
N2 IF($A_DBB[23]==1) GOTOF _HEADNUM2 ; 角度头2在主轴上
N3 IF($A_DBB[24]==1) GOTOF _HEADNUM3 ; 角度头3在主轴上
N4 IF($A_DBB[25]==1) GOTOF _HEADNUM4 ; 角度头4在主轴上
N5 _HEADNUM1: ; 角度头1
N6 M220 ; 参数组选择0
N7 STOPRE ; 结束预读
N8 DRVPWR(_ERROR,AX5,1082,1,6000) ; 写角度头1最大转速
N9 GOTOF _END ; 跳转至结束
N10 _HEADNUM2: ; 角度头2
N11 M221 ; 参数组选择1
N12 STOPRE ; 结束预读
N13 G4F2 ; 延时2s
N14 DRVPWR(_ERROR,AX5,10,0,4) ; 编码器调试开启
N15 G4F1 ; 延时1s
N16 DRVPWR(_ERROR,AX5,431,0,-90.95) ; 写角度头2的换向角
N17 G4F2 ; 延时2s
N18 DRVPWR(_ERROR,AX5,10,0,0) ; 编码器调试关闭
N19 G4F1 ; 延时1s
N20 DRVPWR(_ERROR,AX5,1082,1,6000) ; 写角度头2最大转速
N21 DRVPWR(_ERROR,AX5,971,0,1) ; 保存驱动参数
N22 G4F5 ; 延时2s
N23 GOTOF _END ; 跳转至结束
N24 _HEADNUM3: ; 角度头3
N25 M221 ; 参数组选择1
N26 STOPRE ; 结束预读
N27 G4F2 ; 延时2s
N28 DRVPWR(_ERROR,AX5,10,0,4) ; 编码器调试开启
N29 G4F1 ; 延时1s
N30 DRVPWR(_ERROR,AX5,431,0,107.61) ; 写角度头3的换向角
N31 G4F2 ; 延时2s
N32 DRVPWR(_ERROR,AX5,10,0,0) ; 编码器调试关闭
N33 DRVPWR(_ERROR,AX5,1082,1,6000) ; 写角度头3最大转速
N34 G4F1 ; 延时1s
N35 DRVPWR(_ERROR,AX5,971,0,1) ; 保存驱动参数
N36 G4F5 ; 延时5s
N37 GOTOF _END ; 跳转至结束
N38 _HEADNUM4: ; 角度头4
N39 M221 ; 参数组选择1
N40 STOPRE ; 结束预读
N41 G4F2 ; 延时2s
N42 DRVPWR(_ERROR,AX5,10,0,4) ; 编码器调试开启
N43 G4F1 ; 延时1s
```

N44 DRVPWR(_ERROR,AX5,431,0,59.37) ; 写角度头4的换向角
 N45 G4F2 ; 延时2s
 N46 DRVPWR(_ERROR,AX5,10,0,0) ; 编码器调试关闭
 N47 DRVPWR(_ERROR,AX5,1082,1,2500) ; 写角度头4最大转速
 N48 G4F1 ; 延时1s
 N49 DRVPWR(_ERROR,AX5,971,0,1) ; 保存驱动参数
 N50 G4F5 ; 延时5s
 N51 _END:
 N52 M17 ; 程序结束

6. 结语

综上所述，本文讲述的两种电机类型（同步/异步）切换的方法，首先扩展驱动数据组和电机数据组，然后在索引号为[0]/[1]的口中分别输入同步电机的参数和异步电机的参数；再通过PLC切换生效的数据；最后通过NC宏程序切换不同电机的换向角和最大速度。

切换不同类型电机参数的方法还有很多，例如在电气柜中增设一个驱动模块，通过切换接触器的吸合来切换驱动。不过，该方法不仅故障率

高，且成本较高，而本文提出的方式可大幅降低成本、减少故障率，适合推广应用。□

参考文献：

- [1] SINUMERIK 840D sl Commissioning CNC: ShopMill [Z].2008.Siemens AG Division Digital Factory
- [2] FB2sl_1015_Extend Function_CN[Z].2015/03.Siemens AG Division Digital Factory
- [3] SINUMERIK 840D sl Commissioning CNC: ShopTurn[Z].2008.Siemens AG Division Digital Factory
- [4] Overview of functions SINUMERIK solution line[Z].2012.Siemens AG Division Digital Factory
- [5] Machine data and parameters Parameter Manual[Z].2013/03 .Siemens AG Division Digital Factory
- [6] Basesoftware and operating software Commissioning Manual[Z].2013/03.Siemens AG Division Digital Factory
- [7] Milling Operating Manual[Z].2013/03.Siemens AG Division Digital Factory
- [8] siemens, DocOnCD siemens[Z].2013.Siemens AG Division Digital Factory
- [9] Job Planning Programming Manual[Z].2013/03.Siemens AG Division Digital Factory
- [10] FB1sl_1015_Basic Function_CN[Z].2015/03.Siemens AG Division Digital Factory
- [11] FB3sl_Special function-US[Z].2015/03.Siemens AG Division Digital Factory
- [12] Fundamentals Programming Manual[Z].2013/03.Siemens AG Division Digital Factory
- [13] motion-control-NC62-complete-Chinese-2019.Siemens AG Division Digital Factory

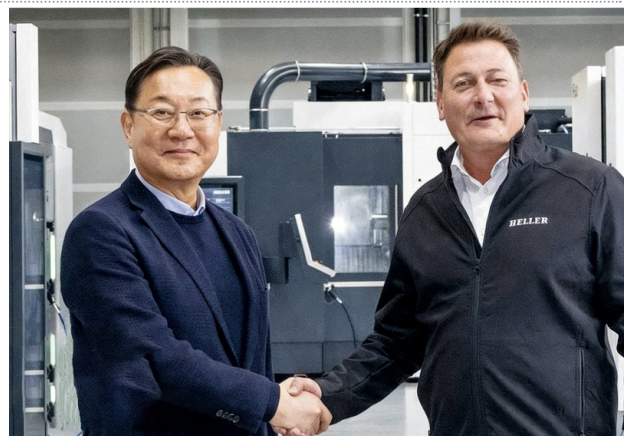
资讯

DN Solutions 完成对 Heller 的收购

韩国领先的机床制造商 DN Solutions 已完成对德国机床制造商 Heller 的收购。

此次收购将 DN Solutions 的全球规模、运营灵活性和先进数字平台，与 Heller 在精密工程领域深厚的技术专业知识和相结合，显著拓展了面向客户的解决方案范围，并推动全球高要求行业的创新。

DN Solutions 首席执行官金元钟 (Won-jong Kim) 表示：“此次收购对两家公司而言都是具有变革意义的一步。我们的目标是打造一个任何一方都无法独立构建的行业巨头，以满足不断变化的行业需求，并实现长期稳定与增长。通过整合双方优势，我们将显著巩固在全球制造业格局中的领先地位，为客户创造更大价值。”



Heller 首席执行官托尔斯滕·施密特 (Thorsten Schmidt) 补充道：“这对两家公司来说是双赢的局面。我们将以无与伦比的产品广度、专业能力和创新实力服务全球客户。这一合作关系使我们成为高要求行业的优质合作伙伴，并在机床制造领域打造一站式服务，全方位支持客户。”

长轴类零件自动化加工生产线设计

通用技术集团机床工程研究院有限公司沈阳分公司 翟晓飞 周永胜 李文平

【摘要】通过对长轴类零件（直径≤80 mm）的高效、稳定与智能化加工需求进行分析，提出了一套完整的自动化加工生产线设计方案。该产线集成高精度数控车床、六轴工业机器人、地轨输送系统、RFID 物料识别系统、清洗烘干装置及激光打标机等辅助设备，并构建柔性制造系统（FMS），实现从原材料上料到成品下料的全流程自动化作业。生产线具备人机协同功能、物料信息全程追溯功能、可视化监控功能以及与企业 ERP 系统的数据对接功能。实际运行表明，该产线显著提升了生产效率，保证了产品一致性，降低了人工干预与质量波动风险，为类似精密轴类零件的智能制造产线建设提供技术参考与工程实践依据。

长轴类零件作为机械装备中最基础且应用最广泛的连接件之一，其加工精度、表面质量与尺寸一致性直接关系到装配性能、设备运行安全与使用寿命。目前，国内多数中小型制造企业仍普遍采用单台数控车床配合人工上下料的方式进行长轴类零件的加工，存在劳动强度大、生产节拍不稳定、产品质量波动、信息孤岛严重等问题。因此，构建一条集自动化加工、智能调度、信息追溯、在线检测与可视化管理于一体的长轴类零件自动化生产线，已成为提升企业核心竞争力的重要路径。自动化产线不仅能够实现“无人化”连续生产，大幅降低人力成本，还能通过设备协同与数据集成，提升生产节拍、保证加工一致性，并为后续的质量分析与生产优化提供数据支撑。

该设计方案旨在构建一条面向中小规格长轴类零件（最大直径 80 mm）的全自动加工产线，涵盖从毛坯上料、多工序加工、在线检测、清洁烘干、标识打印至成品下线的完整工艺流程，工件规格如表1所示。

表1 工件规格

毛坯规格	毛坯重量	成品	材质
Φ35×220	2.8kg	Φ30×210	合金钢
Φ40×300	5.4kg	Φ35×290	合金钢
Φ50×380	8.9kg	Φ45×370	合金钢
Φ60×650	19kg	Φ55×640	合金钢
Φ70×450	26kg	Φ65×440	合金钢
Φ60×400	12kg	Φ55×390	合金钢

该设计方案主要介绍本自动化生产线的总体架构、核心设备选型与关键技术实现，涵盖加工系统、物流系统、信息识别、辅助功能及安全防护等多个子系统，旨在为类似轴类标准件的智能制造产线建设提供可复制、可推广的技术解决方案。

一、产线总体设计方案

1. 功能目标

本自动化生产线主要服务于中小规格长轴类零件的批量化、高精度加工，系统控制面板如图1所示，具备以下核心功能目标：

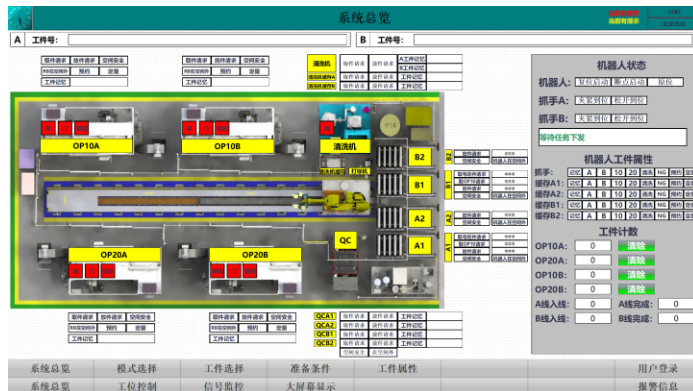


图1 控制面板界面

(1) 全流程自动化：实现从毛坯上料到成品下线的无人化连续作业，仅需人工将毛坯送至指定区域，其余工序由系统自动完成。

(2) 多品种柔性切换：支持不同规格、不同长度轴类零件的自动换型加工，系统通过程序调用与夹具自适应调整，实现快速换产。

(3) 物料信息追溯：配备RFID识别系统，每件工件附带唯一身份标签，实现加工过程全生命周期数据采集与质量追溯。

(4) 智能物流调度：采用六轴机器人配合地轨，完成跨机床物料搬运，具备高定位精度与运行稳定性。

(5) 集成化辅助工序：内置超声波清洗烘干装置与光纤激光打标机，实现加工后清洁与标识一体化，减少中间转运环节。

(6) 柔性管控系统(FMS)：建立统一的中央控制系统，协调各设备运行，支持任务分配、状态监控、故障诊断与远程通信。

(7) 人机协同模式：具备自动/手动模式自由切换功能，在设备调试、维护或异常情况下允许人工干预，保障生产连续性。

(8) 可视化监控：部署车间大屏、PC端与移动端监控平台，实时展示设备状态、生产进度、质量数据与视频画面，提升管理透明度。

(9) 系统集成能力：预留OPC UA接口，支持与MES系统无缝对接，实现生产计划自动下达与数据共享。

2. 系统组成架构

产线采用“加工岛+中央管控”的模块化架构，效果图如图2所示，由以下七大子系统构成：

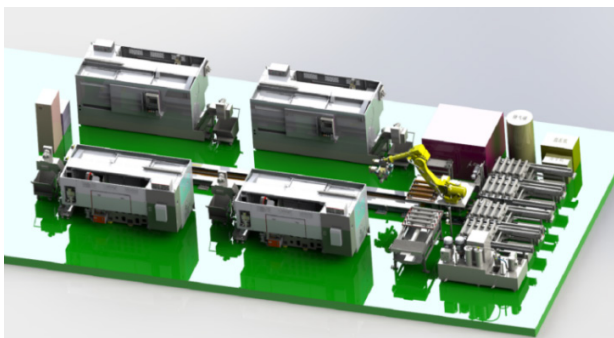


图2 效果图

(1) 加工系统：配置4台高刚性数控车床，分为OP10与OP20两道工序，每序2台机床并行作业，提升产能。

(2) 物流系统：采用1台负载165 kg的六轴关节机器人，该机器人搭载双工位气动抓手，可沿12.2 m长的

地轨移动，实现跨工位物料周转。

(3) 上下料系统：配置4套可调式输送料仓（用于毛坯与成品存储）、1套随行缓存台及1套固定缓存站，支持多品种、小批量混线生产。

(4) 信息识别系统：在每个工件托盘中嵌入抗金属干扰的RFID芯片，配合4套高频读写器，实现工件身份自动识别与加工路径匹配。

(5) 辅助系统：集成超声波清洗烘干机、光纤激光打标机、空气压缩机与冷干机，完成清洗、干燥与标识工序。

(6) 安全系统：设置全封闭安全围栏、安全门锁、急停按钮、光栅保护器与声光报警灯柱。

(7) 管控系统：基于西门子828D数控平台开发产线级FMS系统，该系统集成数据采集模块与远程通信接口，实现统一调度与状态监控。

3. 工艺流程设计

零件加工流程如下：

(1) 操作人员将毛坯批量放入指定料仓。

(2) 读写器自动识别托盘信息，上传至FMS系统。

(3) 机器人抓取毛坯，送入第一台数控车床装夹。

(4) 执行OP10粗加工工序：车外圆、钻中心孔、粗车螺纹、倒角等。

(5) 机器人将半成品转运至第二台车床。

(6) 执行OP20精加工工序：精车外圆与端面、铣削键槽、螺纹精车、攻丝等。

(7) 系统启动在线测头进行关键尺寸检测，数据反馈至数控系统进行刀具补偿。

(8) 加工完成后，机器人将成品送入超声波清洗烘干机。

(9) 清洁后进入激光打标工位，打印批次号、规格等信息。

(10) 成品放入缓存台。

(11) FMS系统自动记录全过程数据，生成电子质量报告并上传至服务器。

整个流程实现闭环控制，各环节状态实时反馈，确保生产过程可控、可查、可追溯。

4. 柔性管控

产线核心为自主研发的柔性制造系统(FMS)，其主要功能包括：

(1) 任务调度：根据生产计划自动分配加工任务，优化机床负载分配；

(2) 设备监控：实时采集各设备运行状态、主轴转

速、进给速度等参数；

(3) 异常处理：当某台机床故障时，系统自动将任务转移至备用机床，避免整线停机；

(4) 数据存储：记录每件工件的加工时间、刀具使用次数、检测结果等信息，形成电子档案；

(5) 接口开放：支持OPC UA协议，可与企业MES系统无缝对接，实现生产订单自动下发与完工反馈。

二、机床关键部件设计

1. 数控车床基础结构

本产线选用4台高刚性数控车床，采用45°整体斜床身结构，全封闭防护，适用于长轴类零件的高速、高效、高精度车铣复合加工。其主要结构特点如图3所示：

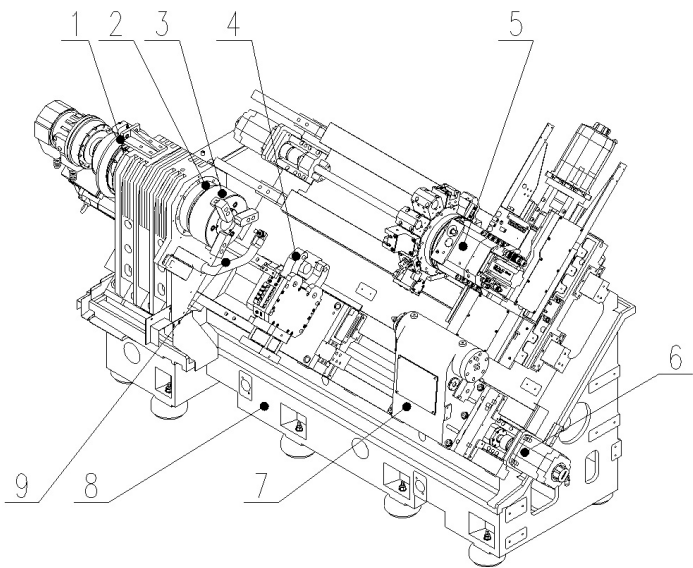


图3 车床结构

1.刹车 2.主轴 3.卡具 4.中心架 5.动力刀架 6.尾台伺服轴 7.尾台 8.床身
9.对刀仪

(1) 高刚性床身。床身采用筒形筋板结构设计，提升整体抗弯与抗扭刚度；导轨为特宽矩形淬硬滑动导轨，贴覆聚四氟乙烯耐磨材料，适合大负载强力切削，有效抑制振动。

(2) 主轴系统。主轴前端采用双列圆柱滚子轴承与角接触球轴承组合，后端配双列圆柱滚子轴承，轴承等级达P4级，确保高旋转精度与高刚性。主轴在恒温环境下装配并经动平衡校正，回转精度 $\leq 2\mu\text{m}$ 。主轴箱采用热对称结构，外部设散热片，有效控制温升，减少热变形。

(3) C轴控制。C轴采用高精度进口环形编码器实现闭环反馈，分辨率达 0.001° ，并通过同步齿形带驱动主轴，满足钻孔、铣削等分度与插补加工需求。

(4) 进给系统。X/Z/W轴采用伺服电机直连滚珠丝杠，丝杠两端采用预拉伸固定结构，减少热伸长影响。X轴伺服电机带自动抱闸功能，断电时防止滑板因重力下滑，保障安全。

2. 动力刀架与刀具系统

(1) 动力刀塔：采用BMT55动力刀架，分度链由伺服电机驱动，支持正反向连续旋转，带自动粗定位与加减速控制，换刀时间 $\leq 0.3\text{s}$ ；动力链由伺服电机驱动齿轮组，输出至动力刀具主轴，最高转速 6000 r/min ，扭矩达 $35\text{ N}\cdot\text{m}$ ，满足钻、铣、攻丝等复合加工需求。刀塔共配置12个刀位，支持CAPTO C4接口的外圆刀座、镗刀座、端面刀座，实现快速换刀。

(2) 刀具监控系统：刀具系统配备振动传感器与断刀检测模块，实时监测刀具状态。当检测到异常振动或断刀信号时，系统自动报警并暂停加工，防止批量废品产生。主轴前端安装自动对刀仪，支持机内对刀与加工中自动补偿，提升加工精度与效率。

3. 夹具与装夹系统

(1) 液压卡盘。机床配置10英寸大行程中空液压卡盘，OP10工序采用专用硬爪，确保夹持稳定性。OP20工序采用子母爪的结构，子爪加装铜垫，快速换产的同时保护已加工表面不被夹伤，避免表面划痕。

(2) 液压尾座。采用回转式结构，套筒芯轴由双列圆柱滚子轴承与深沟球轴承组合支撑，回转精度 $\leq 3\mu\text{m}$ 。套筒伸缩由液压驱动，其伸出和回退可编程控制。尾座本体由伺服电机+滚珠丝杠驱动，移动后自动液压锁紧，并带位置编码器反馈，确保定位准确。

(3) 液压中心架。针对长径比大于8的细长轴工件，配置 $\phi 20 - 120\text{ mm}$ 液压中心架，由床鞍拖动至指定位置后，液压锁紧，辅助支撑工件，防止加工中弯曲变形。

4. 自动化与辅助功能

(1) 自动门与防护。机床配备全封闭防护间，拉门由气缸驱动，配备磁性开关检测位置，其开闭时机可通过程序控制。内部集成工业摄像头，实现远程实时监控加工过程。

(2) 冷却与润滑系统。配置集中式 7MPa 高压冷却水箱，强化断屑效果，防止缠屑。水箱内置过滤系统与油水分离器，延长切削液寿命。导轨与丝杠采用集中稀油润滑系统，分油器均匀供油；液压系统采用变量叶片

泵，节能高效，油箱配备风冷装置。高压水箱如图4所示。

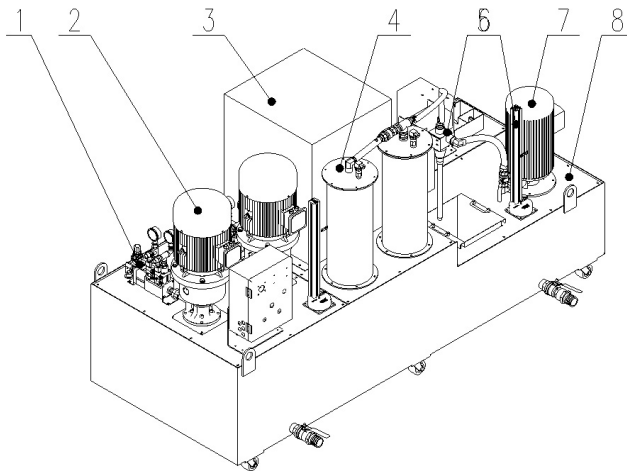


图4 高压水箱

1.同轴阀 2.高压泵 3.控制面板 4.过滤罐 5.涡旋分离器 6.液位计 7.提升泵
8.水箱

(3) 排屑与油雾处理。配置右侧链板式排屑机，切屑自动输送至排屑小车，便于集中清运。同时安装高效油雾收集器，降低车间空气污染，改善作业环境。

(4) 在线测量与清洁。配备雷尼绍OLP40型无线测头，可在加工中自动测量关键尺寸（如外圆直径、螺纹中径），数据反馈至数控系统进行刀具补偿。系统开发专用宏程序，加工结束后自动喷淋清洗工件表面与工作台，清除残留切屑与冷却液，确保后续抓取与测量精度。

三、安全与可靠性设计

为保障产线长期稳定运行与人员安全，系统在设计阶段贯彻安全理念：

(1) 所有运动部件均设置安全围栏与联锁装置，开门即停机。

(2) 机器人工作区域安装安全光栅保护器与警示灯，防止人员误入。

(3) 冷却液存储系统、液压油存储系统及润滑系统均

设有液位与压力传感器，异常时自动报警。

(4) 数控系统具备断电记忆功能，恢复供电后可继续执行未完成任务。

四、生产线应用效果

实践表明，该生产线（如图5所示）投入使用后，生产效率提升约60%，产品合格率稳定在99.5%以上，人工干预减少80%，实现了显著的经济效益与管理升级。为类似轴类标准件的自动化产线建设提供技术参考，具有较强的工程应用价值与推广前景。

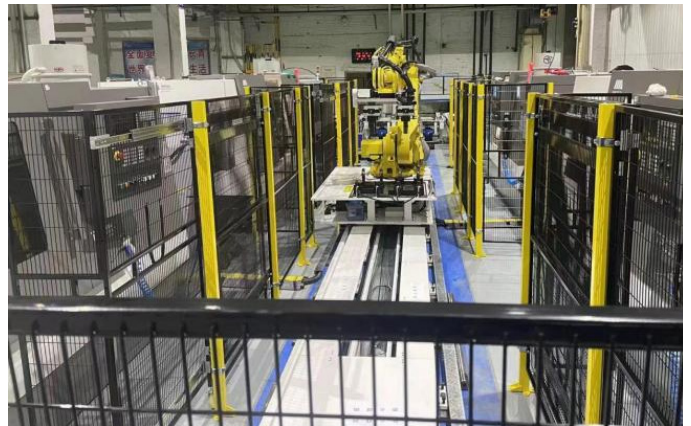


图5 生产线

五、结语

该长轴类零件自动化加工生产线方案，围绕“高效、智能、可靠”的设计理念，构建了一套集加工、检测、清洁与信息管理于一体的智能制造系统。通过对数控车床的高刚性结构设计、动力刀架配置、液压夹具优化及自动化功能集成，确保了复杂工序下加工精度与稳定性。同时，借助工业机器人、RFID识别与柔性管控系统，实现了全流程无人化运行与生产数据可追溯。该产线不仅满足当前长轴类零件的自动化加工需求，还具备良好的可扩展性，生产线的应用提升了长轴类零件的制造数字化制造水平，为国产自动化数控装备的研发提供了良好的应用示范。□

参考文献：

- [1]李有兵,林勇.柔性生产线智能控制系统设计[J].机电工程技术2018(12).
- [2]徐帅强,张彦彬,周宗明,刘波,李长河.汽车轮毂洁净制造自动化生产线设计[J].制造技术与机床,2022(4):32-37.
- [3]刘志刚.智能制造系统中的RFID技术应用[J].自动化仪表,2023,44(3):45-48.
- [4]胡军宝.面向智能化的数控机床优化研究[J].现代工业经济和信化2023(02).
- [5]杨兆军,何佳龙,刘志峰,李国发,陈传海.数控机床可靠性技术新进展[J].机械工程学报2023(19):152-163.

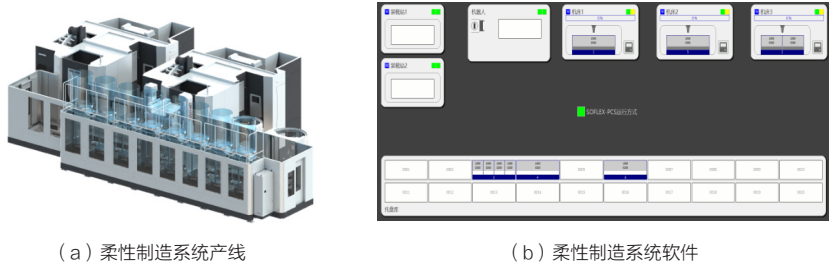
柔性制造系统中生产预测算法的研究

宁夏巨能机器人股份有限公司 靳开轩
通用技术集团大连机床有限责任公司 张宏岩 王鹏翔 张峰 张迺瀚 陈涛

【摘要】生产预测是制造业生产启动前的关键环节，其核心功能是输出工单完成时间、毛坯与刀具需求数量、设备负荷率等关键参数，为生产计划的动态调整提供数据支撑。传统自动化生产线因产品单一、流程线性，可通过“平均加工节拍×产量+工单开始时间”预测，但柔性制造系统（FMS）由于多品种、变工艺、动态调度的特性，面临产品工艺与刀具需求不确定、受交货期、物料及刀具可用性等多因素影响，传统线性方法失效。本研究提出基于“全流程动态仿真”的FMS生产预测方案：以机器人作业为仿真核心触发节点，每完成一轮动作，实时更新机床、装载站、托盘库等设备状态参数；以本轮系统状态为下一轮初始条件，循环迭代至计算超时或所有工单完成；同步记录刀具更换与物料补给时刻，最终输出工单完成时间、毛坯与刀具准备清单、生产甘特图及设备负荷趋势图。实验表明，该方案具备良好的场景适应性，可灵活应用于不同规模的FMS，核心逻辑无需重构，运算效率可达400道工序/秒，满足车间实时决策需求，有效解决FMS生产预测精准落地难题。

一、引言

随着制造业向多品种、小批量生产模式转型，柔性制造系统（Flexible Manufacturing System, FMS）凭借其适应性、自动化和智能化的特点成为推动制造业实现转型升级的关键驱动力^[1]。图1展示了国内某知名自动化厂家的柔性制造系统，其中（a）为实际产线布局，（b）为配套管理软件界面，直观呈现了FMS的硬件与软件协同架构。



(a) 柔性制造系统产线

(b) 柔性制造系统软件

图1 柔性制造系统

当前主流FMS的核心技术集中于“实时调度与执行控制”，其配套软件虽能实现工单分配、设备状态监控等功能，但普遍缺乏前瞻性生产预测能力；同时，现有研究在支撑FMS生产预测工程落地方面仍存在不足，具体表现为：

文献^[2]基于约束管理思想研究混流生产计划制定，但其方法仅针对人工混线场景，无法适配自动化FMS的运行逻辑；

文献^[3]指出生产预测对企业数字化转型的价值，可缩短交付周期、降低库存，但未构建可落地的生产预测数学模型；

文献^[4]提出FMS能量消耗预测方法，能输出工件加工方案与能耗数据，却未涉及生产保障关键环节（如刀具、原材料准备）的预测。

文献^[5]设计了基于Petri网建立的机床座类柔性生产调度模型，为关系复杂且离散并行的问题提供帮助，但未考虑刀具和物料的准备计划。

生产预测作为FMS启动前的关键环节，需提供工单完成时间、备刀/备料计划及清单等核心信息，为生产决策提供数据支撑。然而，FMS的生产预测面临显著挑战：单一品种生产线可通过“工单开始时间+产量×平均加工节拍”线性计算完成时间，而FMS的排产优化属于NP-

hard 问题^[7]，其预测结果受排产策略、调度规则、工单优先级等多因素耦合影响，多产品并行生产时，难以精准预测单个工单的完成时间。

针对上述问题，本文提出基于“全流程仿真”的 FMS 生产预测方法，通过模拟实际生产过程获取关键数据，具体流程如下：

(1) 数据采集：收集生产线所有设备（机床、机器人、托盘库等）的属性参数，以及工单对应的零件工艺数据（如工序、加工时长）。

(2) 过程仿真：计算机器人在不同设备间的移动时间，捕捉生产过程中的里程碑事件（如机床加工完成、机器人上下料完成），并动态更新工件状态。

(3) 辅助环节计算：对人工上料、刀具更换等动作进行仿真，确定每次操作的具体时刻，生成备料、备刀的时间计划表。

(4) 预测输出：持续仿真直至整个生产计划完成，输出完整的生产预测结果。

二、算法场景

本研究中的算法满足柔性车间调度问题的约束条件[8]并采用文献[9]的所设定的生产场景，由于本文不针对调度策略本身展开研究，故直接沿用该文献提出的调度策略，作为本次生产预测算法的基础调度策略。

为聚焦研究核心，消除无关变量干扰，特设定以下前提条件：

(1) 物料齐套：生产所需毛坯数量充足且齐备，不额外考虑人工在线外寻找毛坯的时间损耗。

(2) 刀具齐套：机床所需刀具种类与数量齐全，不额外考虑人工在线外寻找刀具的时间损耗。

(3) 换刀时间为 0：刀具通过机床刀库侧门进行更换，且机床配置

姊妹刀，可避免加工过程中因等待人工换刀导致的停机问题。

(4) 入料状态：所有经装载站进入生产线的工件均为未加工毛坯，排除返修件或半成品进入生产线的情况。

(5) 刀具更换规则：人工为机床更换的刀具均为全新刀具，更换后刀具的当前寿命直接等同于其最大寿命。

(6) 毛坯补给规则：若工单需求产品数量超出生产线内现有毛坯数量，每当有成品下线后，预测算法将依据机床生产能力与工单优先级，自动生成新的毛坯入线计划。

(7) 搬运设备配置：生产线内仅配备 1 台搬运设备，如机器人、轨道运输车等。

基于上述前提，为保障预测算法的有效运行，所用调度策略需具备以下功能：本次生产预测算法不研究具体调度策略，需要调度策略满足以下功能：

(1) 调度结果输出：每完成一次机器人调度任务后，需输出本轮调度的总用时，以及各托盘的位置变动信息。

(2) 加工时间输出：当机床启动加工任务后，需输出从机床启动至加工任务完成的总耗时。

三、算法模型

1. 工单

工单即生产任务单据，指由一个或多个作业组成的制造计划，用于明确特定产品的生产要求。本文定义的工单包含以下核心属性：

(1) 产品类型：单个工单仅对应一种产品，即工单与产品类型为“一对一”映射关系。

(2) 开始时间：若工单预设开始时间早于预测起始时间，则将预

测起始时间自动赋值为该工单的实际开始时间；若工单预设开始时间晚于预测起始时间，则在预设开始时间之前，该工单不启动生产。

(3) 生产数量：当该工单对应的成品产出数量达到或超过预设生产数量时，工单自动终止生产。

(4) 优先系数：在每次调度计算过程中，首先确定本次调度涉及的产品，再通过该产品关联对应的工单以获取优先系数。将当前调度得分与该优先系数相乘，可提高该工单对应产品被送入机床加工的概率。

2. 生产计划

生产计划是一组具有逻辑关联或时间序列关系的工单集合，用于统筹某一周期内的整体生产任务。

3. 机器人

机器人即生产线中的搬运设备，可为产线内所有加工或辅助设备提供上下料服务，属于线性机器人制造单元^[7]，其核心属性定义如下：

(1) 移动最大速率：指机器人行走轴的最大移动速度，为恒定值。

(2) 加速度：指机器人行走轴的运动加速度，取值为恒定值，且正向加速度与反向加速度大小相等。

(3) 当前位置：指机器人当前所在位置与行走轴原点之间的直线距离。

4. 机床

机床即核心加工设备，本文仅考虑单工位加工场景：机床仅配置 1 个主轴，且仅含 1 个用于加工作业的工作台。其核心属性定义如下：

(1) 剩余加工时间：当剩余加工时间为 0 时，机床处于空闲状态，可接受新的加工任务；当剩余加工时间大于 0 时，机床处于加工状态，无法执行上下料操作。

(2) 上下料位置：指机器人进行上下料作业时需到达的机床固定位

置, 仅在此位置可完成工件的装卸。

(3) 上料用时: 指机器人将单个工件放入机床, 并离开机床到达安全位置所需的总时间。

(4) 下料用时: 指机器人从机床内部取出单个工件, 并离开机床到达安全位置所需的总时间。

5. 装载站

装载站是用于存放待加工毛坯或暂存已加工成品的辅助设备, 本文仅考虑单工位场景: 装载站仅含1个用于人工上下料的工作台。其核心属性定义如下:

(1) 剩余操作时间: 当剩余操作时间为0时, 装载站处于空闲状态, 机器人可执行上下料操作; 当剩余操作时间大于0时, 装载站处于人工操作状态, 禁止机器人进行上下料。

(2) 上下料位置: 指机器人进行上下料作业时所需到达的装载站固定位置, 仅在此位置可完成毛坯或成品的装卸。

6. 托盘库

托盘库是用于临时存放工件的辅助设备, 包含多个可独立使用的工位。其核心属性定义如下:

(1) 上下料位置: 指机器人对某一工位进行上下料作业时所需到达的固定位置, 不同工位对应不同的上下料位置。

(2) 有无托盘: 若某工位存在托盘(即已放置工件), 则该工位仅支持工件取出操作; 若某工位无托盘(即处于空置状态), 则该工位仅支持工件放置操作。

四、算法方案

1. 基本思想

本算法通过离散事件驱动的方式模拟生产线全流程运行, 以机器人动作执行为核心触发节点, 实现系

统状态的动态更新。具体逻辑如下:

(1) 初始状态设定: 算法启动时, 将系统初始时间设为0, 并初始化所有设备(机床、机器人、装载站、托盘库等)的初始属性, 包括但不限于机器人初始位置、机床剩余加工时间、装载站剩余操作时间等。

(2) 机器人动作与时间更新: 每执行一次机器人动作(如上下料、工件搬运), 先更新机器人当前位置; 再根据该动作的实际耗时, 将系统时间累加至动作执行完成时刻。

(3) 设备状态动态更新: 以当前系统时间为基准, 同步更新所有机床的剩余加工时间(即减去自上一状态至当前时刻的时间差)。

(4) 加工完成与刀具维护触发: 若某台机床的剩余加工时间更新后变为0, 立即记录该机床的加工完成时间; 同时检查该机床所用刀具的剩余寿命, 若刀具寿命已到期, 则立即执行刀具寿命补充操作, 并同步记录本次换刀的耗时。

2. 调度算法输出要求

由于本研究不针对调度策略本身展开设计, 仅需调度策略提供满足预测算法运行的基础数据, 具体输出要求如下:

(1) 输出机器人单次动作的总耗时, 包括移动耗时、操作耗时等。

(2) 每轮调度周期内, 仅支持对一台设备(机床或装载站)执行单次上料操作, 即“一轮一设备一上料”。

(3) 若上料对象为机床, 需额外输出该机床加工对应工件的预设加工用时。

(4) 若上料对象为装载站, 需额外输出装载站的操作总耗时; 操作完成后, 还需输出装载站的产品状态(无料/有料); 若为有料状态, 需明确标注毛坯的具体产品类型。

3. 机床数据更新

(1) 剩余加工时间更新

每轮机器人任务执行完毕后, 需以机器人动作耗时为时间基准, 更新所有机床的核心数据, 具体规则如下:

$$T_{i,j} = \begin{cases} T_{i-1,j} - t_i, & T_{i-1,j} - t_i > 0 \\ 0 \end{cases} \quad (1)$$

在第*i*轮调度中, 第*j*台机床的上一轮的剩余加工时间为 $T_{i-1,j}$, 本轮机器人动作总耗时为 t_i , 则第*j*台机床本轮的剩余加工时间 $T_{i,j}$ 按(1)计算。

(2) 加工完成时间记录

若满足 $T_{i-1,j} > 0$ 且 $T_{i,j} = 0$, 则表明机器人执行本轮动作期间, 第*j*台机床已完成加工任务:

$$P_{i,j} = T_{i-1,j} + \sum_{l=1}^{i-1} t_l \quad (2)$$

在第*i*轮调度中, 记录了第*j*台机床在 $P_{i,j}$ 时刻完成了一次加工。

(3) 刀具寿命更新

机床完成加工后, 需对所用刀具的寿命进行检测与更新:

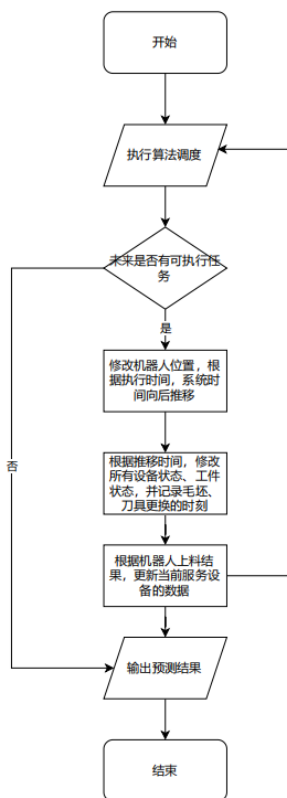


图2 生产预测算法流程

$$\begin{bmatrix} l_{i,j,1} \\ l_{i,j,2} \\ \vdots \\ l_{i,j,n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_{i-1,j,1} \\ l_{i-1,j,2} \\ \vdots \\ l_{i-1,j,n} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c_n \end{bmatrix} \quad (3)$$

同时满足：

$$l_{i,j,n} = \begin{cases} l_{i,j,n} - c_n, l_{i,j,n} - c_n > l_{n,alarm} \\ l_{n,max}, l_{i,j,n} - c_n \leq l_{n,alarm} \end{cases} \quad (4)$$

其中 $l_{i,j,n}$ 代表第*i*轮调度第*j*台机床的第*n*把刀具寿命， c_n 代表本次程序加工完毕刀具*n*消耗寿命， $l_{n,alarm}$ 代表刀具的预警寿命， $l_{n,max}$ 代表刀具的最大寿命。当(4)公式触发条件 $l=l_{n,max}$ 时，需要记录 $P_{i,j}$ 时刻更换一次刀具。

(4) 机床有料后剩余加工时间重置

则若第*i*轮调度中，机器人对第*j*台机床执行了上料动作，则该机床的剩余加工时间需重置为对应工件的加工用时：

$$T_{i,j} = T_{p,k} \quad (5)$$

代表第*i*轮第*j*台机床在结束时剩余加工时间变为第*p*种产品第*k*道工序对应程序的加工用时。

4. 装载站数据更新

(1) 剩余操作时间更新

每轮机器人完成任务后，需要根据机器人运行时间，更新装载站数据：在第*i*轮调度中，设第*j*台装载站在上一轮(第*i-1*轮)的剩余操作时间为 $T_{i-1,j}$ ，本轮机器人动作总耗时为 t_i ，则第*j*台装载站本轮的剩余操作时间 $T_{i,j}$ 按式(6)计算：

$$T_{i,j} = \begin{cases} T_{i-1,j} - t_i, & T_{i-1,j} - t_i > 0 \\ 0 \end{cases} \quad (6)$$

若满足 $T_{i-1,j} > 0$ 且 $T_{i,j} = 0$ ，则表明在机器人执行本轮动作期间，第*j*台装载站已完成操作任务。此时，需将装载站的产品更新为新毛坯，毛坯类型由装载站夹具适配类型、对应产品工单的完成状态等因素共同确定。

(2) 装载站上料后剩余操作时间重置

若第*i*轮调度中，机器人对第*j*台装载站执行了上料动作，则该装载站的剩余操作时间需重置为对应操作的总耗时，如式(7)所示：

$$T_{i,j} = U_{pm} + L_{pm} \quad (7)$$

其中， U_{pm} 为第*pm*种产品的下料用时， L_{pm} 代表第*pm*种产品的上料用时。

五、实验-测试

为验证生产预测算法的有效性 & 准确性，本节设计针对性实验场景，明确实验参数、输入条件与评价指标，最终输出并记录预测结果。

1. 实验场景与参数设定

(1) 核心设备与生产任务配置

实验场景包含4台加工机床(M1-M4)、6个托盘库(W1-W6)及1台搬运机器人，生产任务涉及3类产品，具体参数如下：

产品与生产需求：生产箱体、轴承座、电机座3类产品，初始毛坯均存放于托盘库，单类产品初始毛坯数量分别为n1、n2、n3，目标生产数量分别为p1、p2、p3；实验测试案例中，3类产品目标生产数量均设为100件，初始毛坯数量均设为2件，且3类产品工单优先级相同。

机床加工参数：4台机床的工序适配性与加工时长明确，仅支持特定工序加工，加工时长以秒为单位，具体参数见表2(产品工序表)。

机器人与设备位置参数：机器人移动最大速率为2m/s，加速度为1m/s²(正向与反向加速度相等)，导轨总长度30m，初始位置为0m(导轨原点)；各设备(机床、托盘库)的X坐标、上料用时与下料用时统一，具体参数见表3(设备位置及服务用时表)。

(2) 实验初始条件

时间初始条件：所有产品工单均从2025年10月8日00:00:00开始执行，系统初始时间与实际开始时间一致。

设备初始状态：机床、托盘库初始剩余加工/操作时间均为0(空闲状态)；刀具初始寿命均为最大寿命，无提前损耗；机器人初始位置固定为导轨原点(0m)。

2. 实验输入数据

表1 产品工序表

工件	数量	工序	M1	M2	M3	M4
箱体	n1	O11	416	416	-	-
		O12	-	-	495	495
轴承座	n2	O21	343	343	-	-
		O22	-	-	173	173
电机座	n3	O31	575	575	-	-
		O32	-	-	371	371

注：“-”表示该机床不支持对应工序加工。

表2 设备位置及服务用时表

设备	X坐标	上料用时	下料用时
M1	3	5	5
M2	11	5	5
M3	19	5	5
M4	27	5	5
W1	1.5	4	4
W2	4.5	4	4
W3	7.5	4	4
W4	10.5	4	4
W5	13.5	4	4
W6	16.5	4	4

3.实验预测结果

基于上述场景与参数，采用本文提出的生产预测算法进行模拟运算，得到 3 类产品的生产完成时间预测结果，具体如下：

(1)箱体：完成 100 件生产任务的预测时间为 2025 年 10 月 9 日 07:14:42。

(2)电机座：完成 100 件生产任务的预测时间为 2025 年 10 月 8 日 21:02:31。

(3)轴承座：完成 100 件生产任务的预测时间为 2025 年 10 月 8 日 21:34:04。

序号	产品名称	产品编码	工单数量	计划开始	预测开始	预测结束	实际结束	延迟	备注
1	箱体	W0001	100	2025-10-08 00:00:00	2025-10-09 07:14:42	2025-10-09 07:14:42	2025-10-09 07:14:42	0	
2	电机座	W0002	100	2025-10-08 00:00:00	2025-10-08 21:02:31	2025-10-08 21:02:31	2025-10-08 21:02:31	0	
3	轴承座	W0001	100	2025-10-08 00:00:00	2025-10-08 21:34:04	2025-10-08 21:34:04	2025-10-08 21:34:04	0	

图3 排产预测结果

设备开动率预测结果：

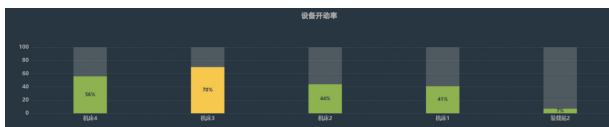


图4 设备开动率预测结果

生产趋势预测结果：

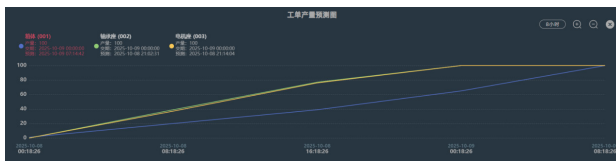


图5 生产趋势预测结果

排产甘特图：

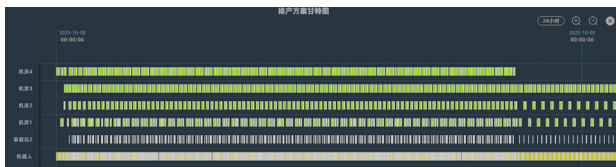


图6 生产甘特图

备刀计划：

序号	名称	刀具规格	刀长(mm)	刀具类型编码	设备名称	任务时间
1	Φ160精铣刀	Φ160	163	AT0005	机床1	2025-10-08 01:51:56
2	Φ160精铣刀	Φ160	163	AT0005	机床2	2025-10-08 02:19:29
3	Φ56精铣刀(底面)	Φ56	273	AT0002	机床1	2025-10-08 02:44:20
4	Φ72精铣刀	Φ72	334	AT0003	机床1	2025-10-08 02:44:20
5	Φ56精铣刀(底面)	Φ56	273	AT0002	机床2	2025-10-08 02:45:39
6	Φ72精铣刀	Φ72	334	AT0003	机床2	2025-10-08 02:45:39
7	Φ100半精铣刀	Φ100	150	BT0010	机床4	2025-10-08 02:58:02
8	Φ160精铣刀	Φ160	163	AT0005	机床1	2025-10-08 03:26:36
9	Φ100半精铣刀	Φ100	150	BT0010	机床3	2025-10-08 03:33:47
10	Φ50精铣刀	Φ50	240	AT0012	机床1	2025-10-08 04:11:58

图7 备刀计划

备刀清单：

序号	名称	刀具规格	刀长(mm)	刀具类型编码	设备名称	准备数量
1	Φ160精铣刀	Φ160	163	AT0005	机床1	17
2	Φ56精铣刀(底面)	Φ56	273	AT0002	机床1	8
3	Φ72精铣刀	Φ72	334	AT0003	机床1	8
4	Φ50精铣刀	Φ50	240	AT0012	机床1	5
5	Φ110精铣刀	Φ110	165	AT0001	机床1	3
6	Φ49精铣刀	Φ49	265	AT0009	机床1	3
7	Φ62精铣刀	Φ62	265	AT0010	机床1	3
8	Φ50精铣刀	Φ50	200	AT0004	机床1	1
9	Φ47精铣刀	Φ47	165	AT0011	机床1	1
10	Φ160精铣刀	Φ160	163	AT0005	机床2	10

图8 备刀清单

备料计划：

序号	名称	产品类型编码	当前工序	任务时间
1	箱体	W0003	0	2025-10-08 00:21:32
2	轴承座	W0002	0	2025-10-08 00:35:19
3	电机座	W0001	0	2025-10-08 00:45:39
4	电机座	W0001	0	2025-10-08 00:47:04
5	箱体	W0003	0	2025-10-08 00:52:53
6	箱体	W0003	0	2025-10-08 00:59:30
7	轴承座	W0002	0	2025-10-08 01:01:53
8	电机座	W0001	0	2025-10-08 01:08:30
9	电机座	W0001	0	2025-10-08 01:13:43
10	箱体	W0003	0	2025-10-08 01:15:44

图9 备料计划

备料清单：

序号	名称	产品类型编码	当前工序	准备数量
1	轴承座	W0002	0	98
2	电机座	W0001	0	98
3	箱体	W0003	0	98

图10 备料清单

不同初始条件下，生产预测结果存在显著差异，具体规律如下：

(1) 产量与生产及预测时间呈正相关：当目标产量增加时，生产过程所需的总时长相应延长，预测输出的完成时间也随之增加。

(2) 初始毛坯数量对结果影响呈双向性：初始毛坯数量越少，一方面会因夹具有限限制生产节奏（机器人易出现等待空闲），导致实际生产总时长增加；另一方面，因初始数据量减少，算法的预测计算耗时会缩短。

表3 不同条件预测结果

序号	名称	初始数量	计划产量	开始时间	预计结束时间	预测用时/s
1	箱体	2	100	2025-10-8 0:00:00	2025-10-9 7:14:00	1.421
	轴承座	2	100	2025-10-8 0:00:00	2025-10-8 21:02:00	
	电机座	2	100	2025-10-8 0:00:00	2025-10-8 21:14:00	
2	箱体	2	500	2025-10-8 0:00:00	2025-10-14 10:50:00	6.902
	轴承座	2	500	2025-10-8 0:00:00	2025-10-12 7:51:00	
	电机座	2	500	2025-10-8 0:00:00	2025-10-12 8:03:00	
3	箱体	1	100	2025-10-8 0:00:00	2025-10-10 22:50:00	0.882
	轴承座	1	100	2025-10-8 0:00:00	2025-10-9 15:11:00	
	电机座	1	100	2025-10-8 0:00:00	2025-10-9 15:28:00	
4	箱体	1	500	2025-10-8 0:00:00	2025-10-22 18:47:00	3.998
	轴承座	1	500	2025-10-8 0:00:00	2025-10-16 3:59:00	
	电机座	1	500	2025-10-8 0:00:00	2025-10-16 4:16:00	

六、结论

本文围绕柔性车间生产预测需求设计算法模型与实验方案，通过理论构建与场景测试，明确了算法的核心功能、适配特性、运行效率及待优化方向，主要结论如下：

(1) 功能完整性：在调度算法满足预设输出要求的前提下，本文提出的生产预测算法可实现全流程生产预测，输出多维度实用结果。具体包括生产进度类图表（甘特图、生产趋势图）、设备效率类图表（设备开动率预测图），以及生产保障类文件（备刀计划与清单、备料计划与清单），可为车间生产规划提供全面数据支撑。

(2) 场景适配性：该算法对柔性车间的核心设备数量无强制约束，可灵活适配不同规模的生产场景。无论是机床、装载站还是料库的数量调整，均无需对算法核心逻辑进行重构，具备较强的工程应用灵活性。

(3) 运行高效性：实验测试表明，该算法的预测效率可达 400 道工序 / 秒。该效率能够匹配现场实时生产的节奏需求，避免因预测耗时过长导致的计划滞后问题，满足车间实际使用的时效性要求。

(4) 局限性及应用建议：本研究在算法设计时对生产环境进行了部分理想化假设，可能导致预测结果与实际存在偏差。因此，建议在实际应用中，依据预测结果为备刀、备料等环节预留合理的缓冲时间，以增强计划的鲁棒性。□

参考文献：

- [1]彭扬扬, 基于Petri网的柔性制造死锁控制[D]. 保定: 河北大学, 2024.
- [2]刑超, 顾巧祥, 马志斌.多品种混流生产计划制定方法研究[D].杭州: 中国计量大学, 2017.
- [3]王鹏, 彭先涛.工业大数据在工业数字化转型中的应用探索[D]: 智能制造, 2022.
- [4]路璐, 王秋莲.基于 Petri 网的柔性制造系统能量消耗预测模型研究[D]: 机电产品开发与创新, 2017
- [5]贾云富, 张凯.基于Petri网的机床座类柔性生产线调度模型[J].机电工程, 2022, 39(10):1470-1476.
- [6]洪良, 王艺翔, 南恺恺, 等. 柔性制造系统时延Petri 网模型排产优化研究 [J]. 机械设计与制造, 2022 (4): 262-265, 269.
- [7]高亮, 张国辉, 王晓娟. 柔性作业车间调度智能算法及其应用[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2012.
- [8]靳开轩, 张宏岩, 王鹏翔, 等.基于综合评分法的托盘机器人柔性调度算法研究[J].智能制造, 2025, (04): 65-69.
- [9]牛樱清.基于混合Java算法的复杂制造系统调度问题研究[D].西安: 长安大学, 2023.
- [10]张瑞杰, 何舟, 施威杰. 基于Petri 网的车间物料配送及路径规划方法 [J]. 现代制造工程, 2021(6) : 17-24.

车轮加工模块化可重构柔性夹具的设计与应用

中车青岛四方机车车辆股份有限公司 都江炜 管益辉 姜辛 马文波

【摘要】针对轨道列车车轮型号繁多导致的加工中夹具更换频繁、辅助时间长、产线换产能力弱及效率低等问题，本文设计了一种数控加工中心车轮模块化可重构柔性夹具。该夹具以夹具本体为基础，通过组合配备短轮缘装夹体、长轮缘装夹体、内撑装夹体与踏面装夹体，满足不同加工工艺的装夹需求。经研究与实践验证，该夹具显著提升了可重构性、稳定性和适用性，有效减少了夹具更换时间，提高了生产节拍和效率，降低了生产成本，对提升车轮加工效率与产线柔性化水平具有重要意义。

一、引言

转向架作为列车的“腿”，而车轮则是承载整车质量、确保列车运行平稳性与安全性的关键部件。在整车研制过程中，车轮的高质高效加工至关重要。然而，目前各车型车轮型号丰富多样，其加工过程涉及外形轮廓、轮毂孔、注油孔等多种特征的加工。在实际生产中，为满足这些工艺需求，往往需要对车轮进行翻转两面装夹，导致夹具更换十分频繁，工艺辅助时间大幅增加。这种生产现状严重制约了产线的换产能力，降低了生产效率，进而对整车的研发水平与进程产生不利影响。因此，研发一种高效的车轮加工夹具，解决现有生产中的问题，成为机械加工技术领域亟待解决的重要课题。

二、现有车轮加工夹具存在的问题

当前，在车轮加工过程中，主要存在以下几方面不足：

首先，由于车轮型号众多，每种型号可能需要特定的夹具来满足加工工艺要求，这就导致企业需要配备大量不同类型的夹具，增加了夹具采购成本和管理难度。

其次，频繁的夹具更换不仅耗费大量的人力和时间成

本，还延长了工艺辅助时间，使得机床的实际加工时间缩短，降低了设备利用率。

此外，传统夹具在设计上往往缺乏通用性和灵活性，难以适应不同型号车轮的快速切换生产，严重影响了产线的换产能力，无法满足市场对多样化车轮产品的快速响应需求。

三、模块化可重构柔性夹具的设计理念与结构组成

1. 设计理念

本研究采用模块化设计理念，结合现场实际工艺需求，以提高夹具的可重构性、稳定性和适用性为目标进行设计[1]。模块化设计将夹具分解为多个功能独立的模块，各模块之间通过标准化的接口进行连接和组合，使得夹具能够根据不同的加工需求快速更换和重组装夹体模块，从而实现对不同型号车轮的高效装夹。

2. 结构组成

本车轮用模块化可重构柔性夹具主要由以下五个部分

组成：

(1) 夹具本体：通过螺栓紧固于机床工作台，作为其他装夹体模块重构与安装的基体，为整个夹具提供稳定的支撑和连接平台。

(2) 短轮缘装夹体：用于车轮外侧面特征加工时的轮缘装夹，可满足特定加工工艺对车轮外侧面加工的装夹需求。

(3) 长轮缘装夹体：适用于车轮内侧面特征加工时的轮缘装夹，当需要对车轮内侧面进行加工时，可快速更换该装夹体实现装夹。

(4) 内撑装夹体：主要用于车轮内侧面特征加工时，通过内撑的方式实现车轮的稳定装夹，以适应不同的加工工艺要求。

(5) 踏面装夹体：在进行车轮内侧面特征加工时，利用踏面装夹体实现踏面装夹，其独特的结构设计可有效避免车轮踏面损伤和夹具磨损。

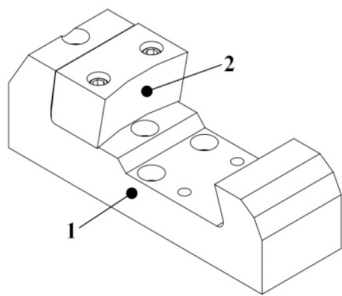


图1 短轮缘装夹体夹具

1. 夹具本体, 2. 短轮缘装夹体

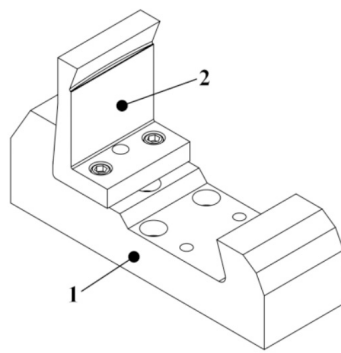


图2 长轮缘装夹体夹具

1. 夹具本体, 2. 长轮缘装夹体

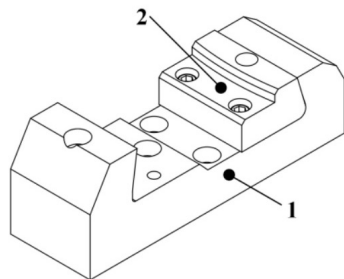


图3 内撑装夹体夹具

1. 夹具本体, 2. 内撑装夹体

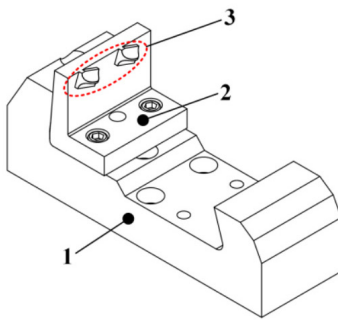


图4 踏面装夹体夹具

1. 夹具本体, 2. 踏面装夹体, 3. 斜式半圆柱凸元

四、模块化可重构柔性夹具的优势

1. 高可重构性与广适用性

以紧固在机床工作台上的夹具本体为基础，通过模块化设计配备的短轮缘装夹体、长轮缘装夹体、内撑装夹体与踏面装夹体，各模块更换简便。根据不同的车轮加工工艺和装夹需求，可快速将相应的装夹体模块与夹具本体固连，实现灵活组合应用，能够满足车轮加工过程中各种复杂的装夹要求，大大提高了夹具的可重构性和对不同型号车轮的适用性。

2. 高稳定性

采用圆周均布式的夹具布局方式，共使用3套夹具。这种布局方式能够使车轮在装夹过程中受力均匀，有效提高了装夹的可靠性与稳定性，确保在加工过程中车轮保持稳定的位置和姿态，从而保证加工精度和产品质量。

3. 无损伤

踏面装夹体具有斜式半圆柱凸元，其母线与车轮踏面母线进行“点-点”接触。这种独特的接触方式相较于其他接触方式，能够避免在装夹过程中对车轮踏面造成损伤，同时也减少了夹具自身的磨损，延长了夹具的使用寿命，降低了维护成本。

4. 高效率

使用该模块化可重构柔性夹具进行车轮装夹，显著降低了夹具更换频次，减少了工艺辅助时间。机床能够更快地进入实际加工状态，提高了设备的有效加工时间，进而提升了产线的换产能力与生产效率[2]，使得企业能够在相同时间内生产更多的车轮产品，提高经济效益。

5. 低成本

该夹具以一套模块化系统替代了传统‘一型一夹具’的离散模式[3]，企业无需再为每种车轮型号采购专门的夹具，大大减少了夹具采购数量和成本。同时，由于夹具的模块化设计，在维护和更换部件时更加方便快捷，降低了维护成本，整体上实现了生产成本的有效控制。

五、模块化可重构柔性夹具的应用实施

1. 夹具布局

在实际应用中，采用圆周均布式的夹具布局方式，共使用3个夹具

[4]。这种布局方式能够充分利用机床工作台的空间，使车轮在装夹和加工过程中受力均匀，保证装夹的稳定性和加工的精度。有限元分析表明，该布局下车轮装夹时应力分布偏差可控制在5%以内，相比传统非均匀布局，加工后车轮形位公差合格率提升约12%，有效规避因受力不均导致的车轮变形、加工尺寸超差等问题。

2. 夹具本体安装

通过螺栓将夹具本体牢固地安装紧固于机床工作台上。夹具本体作为整个夹具系统的基础结构[5]，其安装的牢固程度和精度直接影响到后续装夹体模块的使用效果和车轮的装夹精度，因此在安装过程中需严格按照安装规范进行操作。安装前，需对机床工作台安装面进行清洁、去毛刺处理，采用高精度水平仪对夹具本体安装面进行找平，水平度精度控制在0.02mm/m以内；螺栓紧固时，使用扭矩扳手按照预设扭矩分三次交叉拧紧，安装后通过千分表检测夹具本体关键定位面的平面度、垂直度，确保误差在设计公差（平面度 $\leq 0.03\text{mm}$ ，垂直度 $\leq 0.05\text{mm}$ ）范围内。

3. 不同装夹体的装夹操作

(1) 短轮缘装夹体夹具装夹：将待加工车轮放置在合适的装夹位置，选用短轮缘装夹体，使用螺栓将其与夹具本体进行固连。机床工作台在其运动范围内带动3个夹具同步运动，实现对车轮轮缘的装夹，随后可进行车轮外侧面特征加工。装夹时，利用车轮轮缘与短轮缘装夹体的定位槽进行初步对中，初步对中偏差应小于0.5mm以内，再通过螺栓预紧、二次微调（借助装夹体上的微调顶丝，调整车轮周向位置，周向定位精度可达 $\pm 0.1\text{mm}$ ），确保后续外侧面加工尺寸精度，加工后轮缘外侧

尺寸公差可稳定控制在 $\pm 0.05\text{mm}$ 。

(2) 长轮缘装夹体夹具装夹：将待加工车轮翻转至合适的装夹位置，选择长轮缘装夹体，同样使用螺栓将其与夹具本体固连。机床工作台带动3个夹具同步运动，完成车轮轮缘装夹，进而进行车轮内侧面特征加工。针对长轮缘车轮，装夹体设计有适配长轮缘的阶梯型定位结构，装夹前需检查车轮长轮缘外观质量，清理表面油污、铁屑，避免影响定位精度；装夹后，通过拉力传感器监测装夹力，防止装夹力过大损伤轮缘，或过小导致加工振动。加工内侧面（如轮辐内侧孔加工、内侧平面铣削等）时，凭借该装夹方式，孔位置度公差可控制在 $\pm 0.05\text{mm}$ ，平面粗糙度可达 $\text{Ra}1.6\mu\text{m}$ 。

(3) 内撑装夹体夹具装夹：把待加工车轮置于合适装夹位置后，选用内撑装夹体，通过螺栓固连于夹具本体。机床工作台带动3个夹具同步运动，实现车轮内撑面装夹，以满足车轮内侧面特征加工的需求。内撑装夹体采用可调节式弹性内撑结构，装夹前根据车轮内撑面尺寸，通过调节内撑体的胀紧行程，适配不同规格车轮；装夹时，内撑体均匀胀紧车轮内撑面，胀紧压力通过压力继电器监测，保证内撑面受力均匀，加工内侧面复杂特征（如内侧曲面车削、内侧凹槽加工等）时，形位公差可控制在 $\pm 0.05\text{mm}$ ，满足高精度车轮制造要求。

(4) 踏面装夹体夹具装夹：将待加工车轮放置在合适位置，选用踏面装夹体并使用螺栓与夹具本体固连。机床工作台带动3个夹具同步运动，实现踏面装夹，可进行车轮内侧面特征加工。踏面装夹体表面设计有仿形防滑纹路，增大与车轮踏面的摩擦力，装夹时，依据车轮踏面轮廓调整装夹体角度，通过激光对中装置辅助定位，对中精度 $\pm 0.1\text{mm}$ ；加工过程中，实时监测机床振动，避免因踏面装夹不稳定引发振动，影响内侧面加工精度。

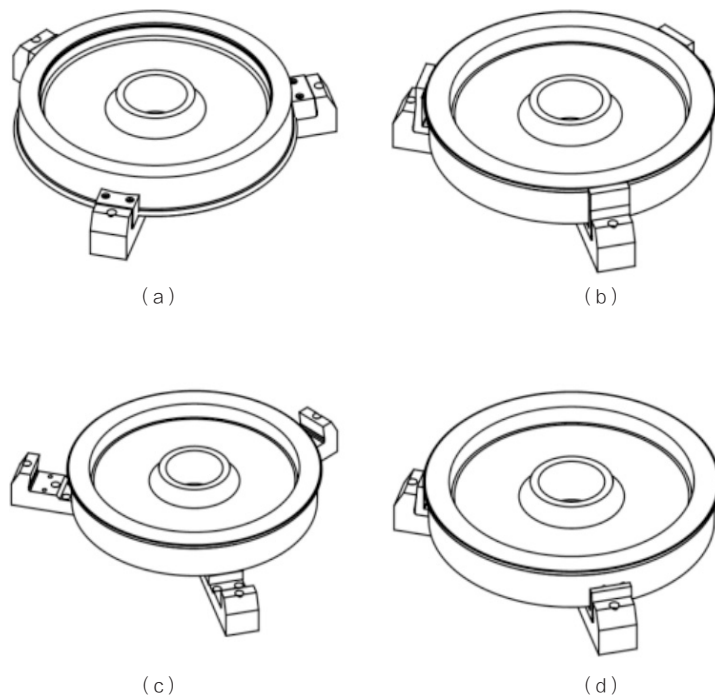


图5 车轮装夹示意图

(a)短轮缘装夹 (b)长轮缘装夹 (c)内撑装夹 (d)踏面装夹

六、工程化应用验证与效果

经过在实际生产现场的工程化应用验证，该模块化可重构柔性夹具取得了良好的应用效果。在应用该夹具后，车轮加工过程中的夹具更换时间显著减少，生产节拍得到有效提升，生产效率较使用传统夹具时提升了约50%。同时，由于夹具的高稳定性和无损伤特性，车轮的加工质量得到了可靠保障，产品合格率提高了20%。此外，模块化的结构设计使得夹具的维护和管理更加方便，降低了企业的运营成本。目前，该夹具已在生产现场完成推广应用，获得了企业的高度认可，为企业带来了显著的经济效益和社会效益。

七、结论

本文所设计的数控加工中心用车轮模块化可重构柔性夹具，通过采用模块化设计理念，有效解决了现有车轮加工过程中夹具更换频繁、工艺辅助时间长、产线换产能力弱和生产效率低等问题。该夹具具有高可重构性、广适用性、高稳定性、无损伤、高效率 and 低成本等显著优势。经过工程化应用验证，其在提高生产效率、保障产品质量、降低生产成本等方面效果良好，对于推动

车轮加工技术的进步与增强企业市场竞争力具有重要意义。未来，可进一步对该夹具进行优化和改进，探索其在更多类型车轮加工以及其他机械加工领域的应用潜力，以满足不断发展的制造业需求。□

参考文献：

- [1] 王敏杰, 康仁科, 郭东明. 现代夹具技术的发展趋势[J]. 机械工程学报, 2004(09): 19-23.
- [2] 刘雄伟, 王启平. 机床夹具设计手册[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2010.
- [3] 张世昌, 李旦, 高航. 机械制造技术基础[M]. 北京: 高等教育出版社, 2015.
- [4] 赵军, 王福吉, 姜彬. 智能夹具技术研究现状与发展[J]. 机械设计与制造, 2018(05): 259-262.
- [5] 孙宇. 面向精密加工的新型夹具设计及性能研究[D]. 大连理工大学, 2020.

资讯

伊索克斯集团推出突破性固态电池技术

伊索克斯集团公布了新一代固态电池技术在国防装备领域的应用规划。

在甜甜圈实验室于2026年国际消费电子展上发布全球首款可量产固态电池后，伊索克斯集团确认，正依托国防专属授权框架，推动该技术在军事及安防领域的落地应用。



目前，公司正与合作方完成该固态电池技术的最终国防专项测试，计划

2026年下半年启动量产，各项工作进度将与技术认证和装备集成时间表保持同步。

甜甜圈实验室的此次发布聚焦于固态电池在乘用车领域的应用，而伊索克斯集团则深耕该技术在国防安防领域的转化落地——这一领域对电池的安全性、抗损毁性、续航能力及供应链韧性均有着极高要求。

伊索克斯集团首席执行官丹·沃尔姆斯利表示：“随着国防开支的增加，无人装备及各类关键军用技术对电池的需求也持续攀升。对于欧洲及其盟友而言，保障电池供应链的稳定可靠，其重要性正与电池性能本身比肩。我们的新型固态电池技术，既能提升装备的抗损毁性、续航能力和使用安全性，又能增强本土及盟友的工业制造能力。”

金属试样工艺分析及数字化加工

重汽（济南）车桥有限公司 刘胜勇

【摘要】以一款头部带螺纹的棒材拉伸试样为例，从数控加工的角度出发，讲述工序划分、工件装夹、刀具选择、程序编制的技巧。用户即可在配有FANUC系统的单台机床上进行加工，也可经由智能制造单元实现“毛坯到成品”的交付。配置SINUMERIK、MITSUBISHI及GSK等系统的用户能够直接借鉴该分析过程。

1. 前言

金属材料的机械性能试验是原材料入厂入库的必检项目，其中的塑性指标是以拉伸试验后得到的延伸率和断面收缩率作为评价手段。用户进行拉伸试验，需要按照GB/T 228.1-2001《金属材料 拉伸试验第1部分：室温试验方法》预先制作符合要求的拉伸试样。为获取图1所示的拉伸试样，用户会在数控车床、立式加工中心、带锯床、立式铣床等生产装备上，按编制好的工艺流程和符合既定规则的数控程序进行机械加工。

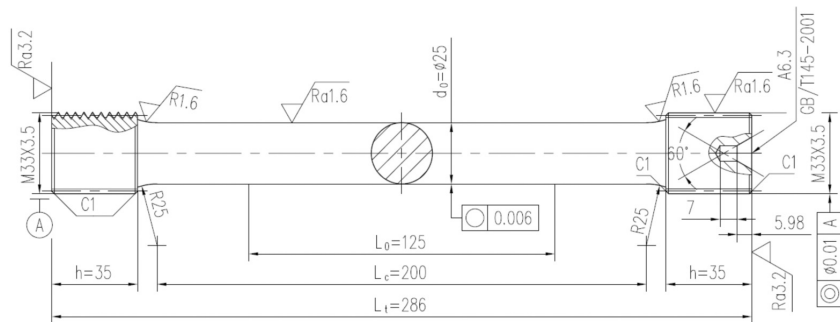


图1 一款头部带螺纹的棒材拉伸试样成品示意

2. 工序划分与工件装夹

头部带螺纹的棒材拉伸试样一般是在数控车床（或称圆拉伸试样加工中心、多功能试样加工中心）上完成，期间涉及05序齐端面钻中心孔、10序头部外圆车削、15序中部外圆车削、20序头部右旋单线普通三角外螺纹车削、25序成品切断五个工序以及棒材喂料、顶尖夹紧、成品取下等辅助环节。有的用户是安排操作者，在单机上手动装卸工件后，执行数控程序一次性实现加工的；还有用户是由工业机器人完成工件装卸，数控车床会根据不同的工序加工要求，自动进行M辅助功能代码下棒材的装填与Z方向长度的供给。

对于图1所示左右头部用于一般旋合用途的中等公差精度6g螺距 $P=3.5\text{mm}$ 的外螺纹 $d=M33$ ，20序车螺纹所需的拉伸试样半成品头部外圆面需要在10序车削完。10序头部车削尺寸按经验公式“ $d-0.1P$ ”计算，即 $\varnothing33-0.1 \times 3.5 = \varnothing32.65\text{mm}$ ，方可保证车削完的外螺纹符合通止规检查要求。

制作拉伸试样的棒材直径为 $\varnothing36\text{mm}$ ，长度600mm，材质为钢件。在其端面钻中心孔后，程序调用伺服刀塔上的自动夹钳，先将目标件自主轴通孔内拉出至车削所需长度，随后在主轴侧经液压自定心三爪卡盘进行装夹，在尾座侧经回转顶尖进行顶紧，如图2所示。机床配置GSK 25Ti、FANUC OiTF或SINUMERIK 828D等CNC系统，床身为一体树脂砂铸造成型的斜床身，刀塔为12工位的后置型伺服刀塔（方刀柄、圆刀柄的最大尺寸分别为 $\square 25\text{mm} \times 25\text{mm}$ 和 $\varnothing40\text{mm}$ ），主轴通孔直径为 $\varnothing66\text{mm}$ 、拉杆通孔为 $\varnothing52\text{mm}$ 。更多参数及性能请读者参见所选机床的说明书，如CXWK310多功能试样加工中心。

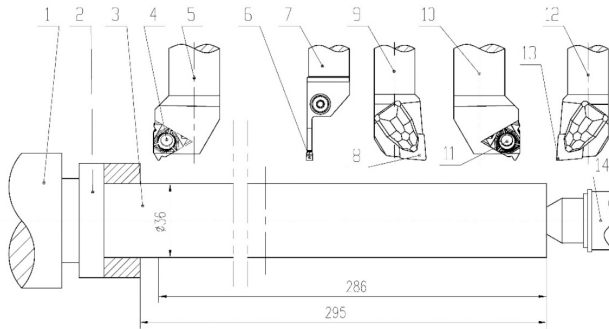


图2 棒材拉伸试样的装夹示意

1. 机床主轴 2. 液压自定心三爪卡盘 3. 试样毛坯 4、11. CoroThread® 266外螺纹车削刀片 (右偏) 5. 反置的266RFG-2525-22外螺纹车削刀柄 6. 切断刀片 7. T-Max® Q-Cut常规刀柄 (左偏) 8、13. T-Max® P车刀片 9. T-Max® P车削左偏刀杆 10. 266RFG-2525-22外螺纹车削刀柄 12. T-Max® P车削右偏刀杆 14. 尾座回转顶尖MT5

3. 刀具选择

棒材自 $\varnothing 36\text{mm}$ 车削至图1所示的 $\varnothing 32.65\text{mm}$ 、 $\varnothing 25\text{mm}$ ，其单边切削量对应为 1.675mm 和 5.5mm 。为满足拉伸试样端面中心孔以及车削两端外圆面、中部外圆和圆弧的要求，可选择表1所示的机夹可转位刀具。关于山特维克可转位外圆车刀杆、外螺纹车削刀柄、左偏切断刀与对应刀片的编号说明，请读者参见山特维克官网的样本手册。

表1 棒材拉伸试样切削用数控刀具

工序号	刀具编号	刀杆/柄规格	刀片规格	加工内容
05	T01	DCLNL2020K12 T-Max®P车削方刀杆 切削刃角95°，左偏	CNMG120408-PM4415 T-Max®P车刀片	$\varnothing 36\text{mm}$ 棒材经机器人装料后，机床主轴正转，经左偏车刀对棒材的右端面进行车平加工
	T03	no.6154-20夹紧套筒 品牌：钻领	no.6155-287 A型右旋中心 钻，材质HSS	端面钻中心孔，夹紧套筒与伺服刀塔的连接采用自制接刀柄，主轴正转
10	T05	随机专用水压夹钳	—	伺服刀塔随斜床鞍朝-Z移动，使夹钳夹住棒材右端后，机床松开液压卡盘，刀塔朝+Z移动至图2所示295mm长度
	T01	DCLNL2020K12 T-Max®P车削方刀杆 切削刃角95°，左偏	CNMG120408-PM4415 T-Max®P车刀片	调用05序的01号车刀，将 $\varnothing 36\text{mm}$ 棒材外圆分2刀车削至 $\varnothing 32.65\text{mm}$ 。第1刀为棒材外圆找齐、单边切深 1.2mm ；第2刀单边切深 0.475mm ，保证粗糙度 $\leq \text{Ra}1.6\mu\text{m}$
15	T07	DCLNR2020K12 T-Max®P车削方刀杆 切削刃角95°，右偏	CNMG120408-PM4415 T-Max®P车刀片	在10序基础上，机床主轴正转，将棒材中部 $\varnothing 32.65\text{mm}$ 的外圆车削至 $\varnothing 25\text{mm}$ ，两侧圆弧R25一并车出。中间部位下刀，调用相应车刀，分别向两侧切削，采用外径粗车循环G71与精车循环G70，保证粗糙度 $\leq \text{Ra}1.6\mu\text{m}$ 。
	T01	DCLNL2020K12 T-Max®P车削方刀杆切削刃 角95°，左偏	CNMG120408-PM4415 T-Max®P车刀片	
20	T09	266 RFG-2525-22 CoroThread®266 外螺纹车削右偏刀柄	266 RG-22MM01A350M 1020外螺纹刀片，右偏	在15序基础上，机床主轴正转，经正向安装的右偏刀柄自左侧向尾座方向车削右旋单线普通三角外螺纹M33×3.5
	T10	反置266 RFG-2525-22 CoroThread®266 外螺纹车削右偏刀柄	266 RG-22MM01A350M 1020外螺纹刀片，右偏	随后，机床主轴反转，经反向安装的右偏车刀自右侧向卡盘方向车削右旋单线普通三角外螺纹M33×3.5
25	T12	LF151.23-2020-40M1 T-Max®Q-Cut左偏刀柄	N151.2-400-5E1125 T-Max®Q-Cut切断刀片	机床主轴正转，自右端至卡盘侧控全长 $L_i=286\text{mm}$ ，经宽度 4mm 刀片进行切断

为了有效降低切削温度和提高刀具的寿命，车削工件时辅以5%的乳化液进行冷却。读者在刀具图形绘

制时，可借助山特维克官网的在线刀具组装器（见图3），根据棒材材质选择刀杆和刀片后，在线装配并形

成二维图形，下载扩展名为DXF的图形，用于后续绘图；下载刀具信息，用于工艺分析和轨迹编程；查看刀具价格，用于成本控制；明确是否有货，用于选型和采购。

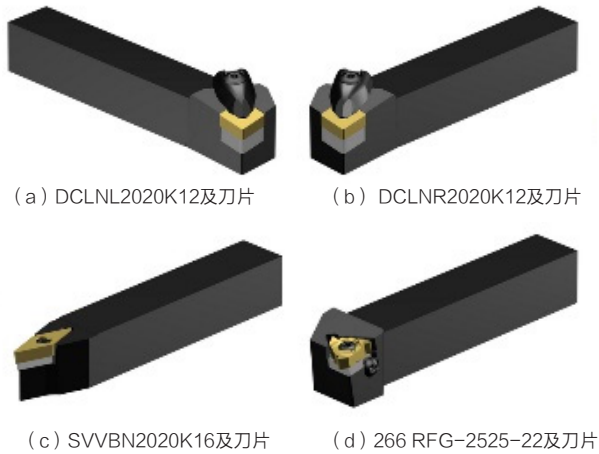


图3 基于山特维克在线刀具组装器的刀具示意

4.加工程序编制

(1) 05序齐端面钻中心孔

05序分为2个工步：先是程序调用T01左偏车刀DCLNL2020K12，对M03正转的棒料右端面齐平处理；再是程序调用T03钻领右旋中心钻，在正转的棒料右端面上钻中心孔，用于后续车削时尾座顶尖的夹紧。中心钻的夹紧套筒与伺服刀塔的连接采用自制接刀柄，中心钻对刀仅控制Z方向，X方向由调整实现与机床主轴对尾座的中心线同轴。

CNMG120408-PM4415刀片基于钢件进行端面车削的推荐线速度 $V_c = 345\text{m/min}$ 、进给量 $f_n = 0.288\text{mm/r}$ ，按 $V_c = \frac{\pi Dn}{1000}$ 计算主轴转速 $n \approx 3050\text{r/min}$ 。基于钢件在车床上钻中心孔的线速度一般控制在 40m/min ，按 $V_c = \frac{\pi Dn}{1000}$ 计算主轴转速 $n \approx 354\text{r/min}$ 。图4为05序钻中心孔示意。表2为05序齐端面钻中心孔的加工程序。

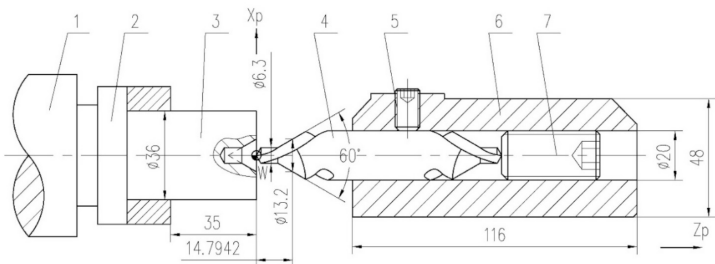


图4 05序钻中心孔示意

- 1.机床主轴 2.液压自定心三爪卡盘 3.试样毛坯 4.钻领A型右旋中心钻
- 5.内六角平端紧定螺钉 6.钻领no.6154-20夹紧套筒 7.挡块

表2 05序齐端面钻中心孔的加工程序

O0005 (Center Hole)	程序名及其说明, FANUC OiTF
N0010 T0101	调01号左偏车刀及其01号补偿量
N0020 G50 M03 S3050	限制主轴正转最高转速3050r/min
N0030 G96 S345	齐端面恒线速度控制345m/min
N0040 G00 Z0.	车刀沿Z轴快移至定位点
N0050 G01 X-2.F0.288 M08	齐端面, 开切削液
N0060 G00 Z5.M09	关切削液, 沿Z轴离开端面
N0070 G28 U0 W0	返回第1参考点
N0080 T0303	调03号中心钻及其补偿量
N0090 G97 M03 S354	取消恒线速度, 主轴低速正转
N0100 G00 X0. Z20.	中心钻快移至定位点
N0110 G01 Z0. F1. M08	靠近端面, 开切削液
N0120 Z-14.7942 F0.07	钻A型中心孔
N0130 Z0. F1. M09	退刀, 关切削液
N0140 G00 Z20. M05	快速退刀, 主轴停转
N0150 G28 U0 W0	返回第1参考点, 程序结束符略

(2) 10序头部外圆车削

10序头部外圆车削分为2刀完成：第1刀为棒材外圆找齐、单边切深1.2mm；第2刀单边切深0.475mm，保证粗糙度 $\leq Ra1.6\mu\text{m}$ 。CNMG120408-PM4415刀片基于钢件外圆车削的推荐线速度 $V_c = 379\text{m/min}$ 、进给量 $f_n = 0.206\text{mm/r}$ ，按 $V_c = \pi Dn/1000$ 计算主轴转速 $n \approx 3350\text{r/min}$ 。01号左偏车刀进行头部外圆车削的轨迹为：A→B→C→H→D→A→E→F→G→D→A，如图5所示。表3为10序头部外圆车削的加工程序（未包含机器人装卸料的呼叫代码与机床门开关的控制）。因20序头部卡盘侧外螺纹车削时，需要给出2mm引出量，故10序头部外圆车削时成品全长为286mm，因20序车削外螺纹需预留2mm引出量，故10序头部外圆车削时向卡盘侧延伸加工5mm，加工长度控制为291mm（286mm+5mm），确保螺纹加工无收尾缺陷。

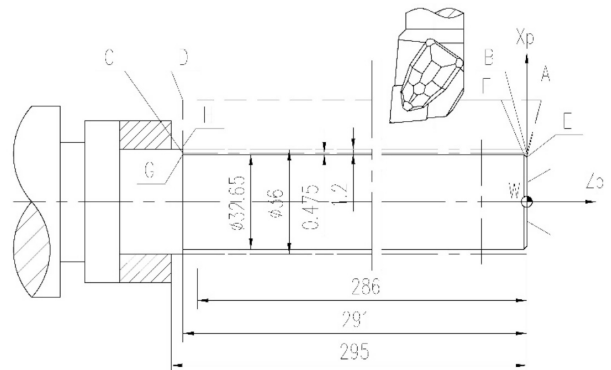


图5 10序头部外圆车削轨迹示意

表3 10序头部外圆车削的加工程序

O0010 (Head)	程序名及其说明, FANUC OiTF
N0010 T0303	调03号水压夹钳及其03号补偿量
N0020 G97 G94 G00 X0 Z5.	取消恒线速, 每分钟进给靠近棒料的右端面
N0030 G01 Z0 F80.	直线慢速移动以夹持棒料外圆
N0040 M60	水压夹钳夹紧棒料外圆
N0050 M11	主轴卡盘松开
N0060 G01 Z260. F150	棒料抽向尾座端, 控全长295mm
N0070 M10	主轴卡盘夹紧
N0080 M61	水压夹钳松开棒料外圆
N0090 G28 W0	Z轴回第1参考点
N0100 G28 U0	X轴回第1参考点
N0110 G90 G81 Z248.5685	可编程伺服尾座移动, 顶紧棒料。与尾座相关动作经宏程序O9010编程, 参数#6050预先设为81
N0120 T0120	调01号左偏车刀及其20号补偿量, Z260处为工件的新原点Z0
N0130 G97 M03 S3350	取消恒线速, 主轴正转
N0140 G95 G00 X70. Z5.	每转进给, 车刀快移定位至A点
N0150 G01 X33.6 Z0 F1. M08	1mm/r, 插补至B点, 开切削液
N0160 Z-291. F0.3	0.3mm/r, 插补至C点
N0170 X38.	退刀至H点
N0180 G00 X70. M09	快速退至D点, 关切削液
N0190 Z5.M08	快回起始点A, 开切削液
N0200 G01 X30.65 Z0. F1.	1mm/r, 直线插补至E点
N0210 X32.65 Z-1. F0.18	0.18mm/r, 倒角C1至F点
N0220 Z-291. F0.206	0.206mm/r, 车外圆至G点
N0230 G00 X70. M09 M05	快退至H点, 关切削液, 关主轴
N0240 G28 U0 W0	快回第1参考点, 程序结束符略

(3) 15序中部外圆车削

继续沿用10序外圆车削的刀具参数 (Z260处为工件的新原点, 也就是工件右端面处为Z0), 01号左偏刀 (07号右偏刀) 自中间部位下刀, 采用外径粗车循环G71与精车循环G70, 向主轴 (尾座) 侧车削。01号左偏刀轨迹为I→J→K→L→M→N→I, 07号右偏刀轨迹为I→J→P→Q→R→S→I, 如图6所示。表4为15序中部外圆车削的加工程序。

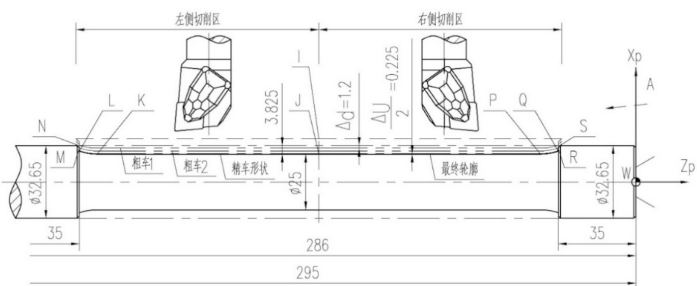


图6 15序中部外圆车削轨迹示意

表4 15序中部外圆车削的加工程序

O0015 (Middle)	程序名及其说明, FANUC OiTF
N0010 T0120	调01号左偏车刀及20号补偿量
N0020 G97 M03 S3350	取消恒线速, 主轴正转
N0030 G95 G00 X70. Z5.	每转进给, 车刀快移定位至A点
N0040 X38.9 Z-143.M08	快移至1点, 开切削液
N0050 G71 U1.2 R0.5	外径粗车削循环, 半径值给定无符号切深 $\Delta d=1.2$, 退刀量 $e=0.5$
N0060 G71 P70 Q120 U0.45 F0.21	左侧精加工轮廓起始段号 $ns=70$, 结束段号 $nf=120$; X向精加工余量 $\Delta u=0.45$, $f_n=1\text{mm/r}$
N0070 G01 X25.	沿X轴进刀至J点
N0080 Z-243.	向卡盘侧车外圆至K点
N0090 G2 X27.628 Z-251.R25.	顺时针插补圆弧R25至L点
N0100 G01 X30.65	车立面至M点
N0110 X33.65 Z-252.5	倒斜角至N点
N0120 G00 X38.9 Z-143.	快退至I点
N0130 G70 P70 Q120	外径精车削循环去除G71剩余量
N0140 G28 U0 W0 M09	快回第1参考点, 关切削液
N0150 T0707	调07号右偏车刀及07号补偿量
N0160 G00 X38.9 Z-143 M08	快移至1点, 开切削液
N0170 G71 U1.2 R0.5	外径粗车削循环, 半径值给定无符号切深 $\Delta d=1.2$, 退刀量 $e=0.5$
N0180 G71 P190 Q240 U0.45 F0.21	右侧精加工轮廓起始段号 $ns=190$, 结束段号 $nf=240$; X向精加工余量 $\Delta u=0.45$, $f_n=1\text{mm/r}$
N0190 G01 X25.	沿X轴进刀至J点
N0200 Z-43.	向尾座侧车外圆至P点
N0210 G3 X27.628 Z-35.R25.	逆时针插补圆弧R25至Q点
N0220 G01 X30.65	车立面至R点
N0230 X33.65 Z-33.5	倒斜角至S点
N0240 G00 X38.9. Z-143.	快退至I点
N0250 G70 P190 Q240	外径精车削循环去除G71剩余量
N0260 G28 U0 W0 M09	快回第1参考点, 关切削液

(4) 20序头部右旋单线普通三角外螺纹车削

螺纹车削方法的决定因素有: 螺纹形式——内螺纹和外螺纹, 螺纹旋向——左旋和右旋, 螺纹车刀偏向——左偏和右偏, 螺纹车刀安装——正向和反置 (刀片向下), 机床主轴旋转方向——正转和反转, 以及切削方向——仅装用负刃倾角刀垫时采取拉式螺纹加工。本文中右旋单线普通三角外螺纹的车削包含2个环节: 右端经右偏外螺纹车刀在主轴顺时针正转情形下向尾座侧车削, 左端经反置的右偏外螺纹车刀在主轴逆时针反转情形下向卡盘侧车削。普通三角外螺纹 $M33 \times 3.5$ 车削均采用复合形螺纹车削循环G76指令进行加工, 外螺纹的牙形高度 $\frac{5H}{8}$ 等于牙顶高 $\frac{3H}{8}$ 与牙底高 $\frac{H}{4}$ 之和, 即 $\frac{5H}{8}=0.541265877P=0.541265877 \times 3.5 \approx 1.8944$ 。经刀具参数软件计算得知: 266RG-22MM01A350M 1020外螺纹刀片的切削线速度 $V_c=127\text{m/min}$ 、进给量 $f_n=3.5\text{mm/r}$, 走刀次数12次, 按 $V_c = \frac{\pi Dn}{1000}$ 计算主轴转速 $n \approx 1200\text{r/min}$ 。

09号外螺纹车刀的轨迹为A→B→C→D→E→B→A, 10号反置外螺纹车刀的轨迹为A→N→G→L→M→N→A, 如

图7所示。表5为20序头部右旋单线普通三角外螺纹车削程序。

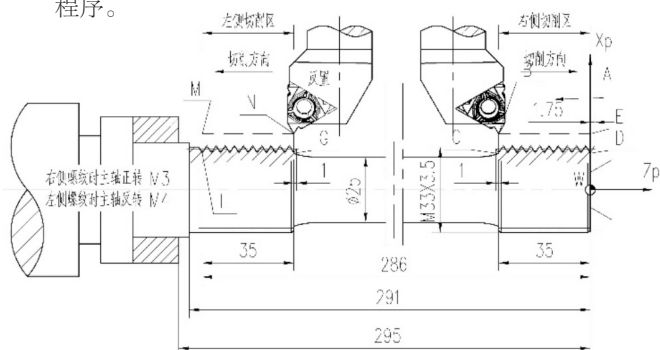


图7 20序头部外螺纹车削示意

表5 20序头部右旋单线普通三角外螺纹车削程序

程序名及其说明, FANUC OiTF	程序名及其说明, FANUC OiTF
O0020 (Thread)	调09号外螺纹车刀及09号补偿量
N0010 T0909	取消恒线速, 主轴正转
N0020 G97 M03 S1200	每转进给, 定位至A点, 开切削液
N0030 G95 G00 X70. Z5. M08	快移至右侧外螺纹加工起始点B
N0040 X42.65 Z-35.	P参数中精车重复次数m=01、螺纹尾端倒角值r=00、刀尖角度即牙形角 $\alpha=60^\circ$, Q参数中最小切削深度 $\Delta d_{\min}=0.16\text{mm}$, 精车余量 $d=0.134\text{mm}$
N0050 G76 P010060 Q160 R0.134	外螺纹车削终点D (27.8324, 0), 圆柱螺纹时省略掉定义螺纹锥度量i的参数R, P参数中螺纹牙形高度 $k=1.894$, Q参数中第1次车削深度 $\Delta d=0.16\text{mm}$, F参数中螺距 $L=3.5$
N0060 G76 X27.8324 Z0 P1894 Q160 F3.5	快回第1参考点, 关切削液
N0070 G28 U0 W0 M09	调10号外螺纹车刀及10号补偿量
N0080 T1010	主轴反转
N0090 M04 S1200	每转进给, 定位至A点, 开切削液
N0100 G00 X70. Z5. M08	快移至左侧外螺纹加工起始点I
N0110 X42.65 Z-251.	P参数中精车重复次数m=01、螺纹尾端倒角值r=00、刀尖角度即牙形角 $\alpha=60^\circ$, Q参数中最小切削深度 $\Delta d_{\min}=0.16\text{mm}$, 精车余量 $d=0.134\text{mm}$
N0120 G76 P010060 Q160 R0.134	外螺纹车削终点D (27.8324, 0), 圆柱螺纹时省略掉定义螺纹锥度量i的参数R, P参数中螺纹牙形高度 $k=1.894$, Q参数中第1次车削深度 $\Delta d=0.16\text{mm}$, F参数中螺距 $L=3.5$
N0130 G76 X27.8324 Z0 P1894 Q160 F3.5	回第1参考点, 关切削液, 停主轴
N0140 G28 U0 W0 M09 M05	

(5) 25序成品切断

N151.2-400-5E1125 T-Max®Q-Cut刀片基于钢件切断的推荐线速度 $V_c=180\text{m/min}$ 、进给量 $f_n=0.12\text{mm/r}$, 按 $V_c=\frac{\pi Dn}{1000}$ 计算主轴转速 $n\approx 1755\text{r/min}$ 。LF151.23-2020-40M1 T-Max®Q-Cut刀柄最大无障碍切深为 $CDX=16.5\text{mm}$, 试样的切断半径为 19mm , 故直接切断即可, 无需宏编程进行刀具的纵向Z轴往复车削。12号切断刀的轨迹为: A→B→C→B, 如图8所示。表6为25序成品切断程序。

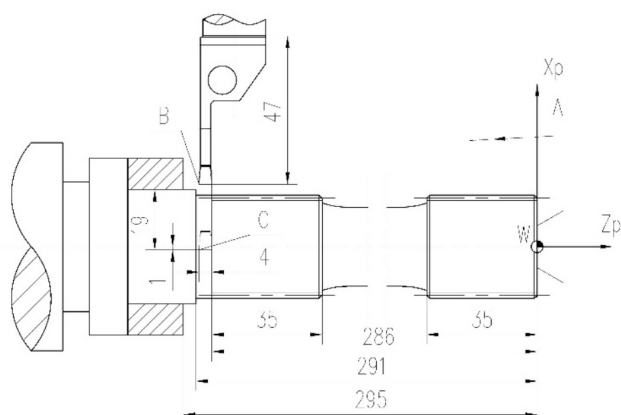


图8 25序成品切断轨迹示意

表6 25序成品切断程序

程序名及其说明, FANUC OiTF	程序名及其说明, FANUC OiTF
O0025 (CUT)	调12号左偏切断刀及12号补偿量
N0010 T1212	限制主轴正转最高速1755r/min
N0020 G50 M03 S1755	恒线速度控制180m/min
N0030 G96 S180	车刀沿X、Z轴快移至A点
N0040 G00 X70. Z5.	沿X、Z轴快移至进刀点B
N0050 X40. Z-290.	靠近试样表面, 开切削液
N0060 G01 X34. F1.0 M08	以0.12mm/r速度直线插补至C点
N0070 X-2.0. F0.12	退刀回B点, 关切削液
N0080 X40. M09	回第1参考点, 停主轴
N0090 G28 U0 W0 M05	可编程序移动尾座退回
N0100 G90 G81 Z500.	主轴卡盘松开, 机器人残料取出
N0120 M11	

5. 结语

棒材拉伸试样的数控加工分为头部不带螺纹和头部带螺纹两种情形, 前者加工相对简单, 后者涉及圆弧处立面、外螺纹车削等, 其加工相对复杂。作为一名优秀的工艺师, 从拿到产品图样起, 就得充分发动脑细胞, 宏观考虑现有装备, 如何划分工序及各工序的衔接细节, 兼顾所选刀具的性价比与加工中是否存在干涉问题, 查看机器人装卸料是否有足够空间, 编制程序时分清圆弧加工指令G02/G03与螺纹车削的主轴旋向和进刀方向, 初次调试务必退出一段距离、切削倍率最低并随时据动态调整, 以防代码错误、数据格式不对引发撞机事故。有条件的用户, 既可以借助CAXA数控车、CAXA制造工程师等软件自动实现编程, 也可在机床上进行图形化程序加工仿真, 预先检查程序正确性。□

参考文献:

[1] Liu S Y. 汽车冲压桥壳总成的工艺分析 [J]. 金属加工 (冷加工), 2016, 44 (12): 34-38.
 [2] Liu S Y. 实用数控加工手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2015: 120-150. (若为第1版可省略版次, 补充核心内容页码)
 [3] Liu S Y. 柔性生产线中工件定位精度的提升措施 [J]. 汽车工艺与材料, 2019, 37 (12): 55-59.

环线切割工艺对单晶硅切割质量的影响研究

天通日进精密技术有限公司
杭州助成科技有限公司

裴忠 张婧祎 朱勤超 陆吴强
徐晓华

【摘要】本研究聚焦于环形金刚石线锯开方单晶硅棒技术，深入探讨了单晶硅环线切割工艺的关键作用及其对切割质量和生产效率的影响机制。研究重点分析了线速、张力和切割水流量等核心工艺参数对单晶硅棒切割质量的综合影响，通过设计三组对照试验，结合详实的实验数据，对切割工艺进行了系统分析，最终确定了各工艺参数的最优取值范围。研究结果表明，优化后的切割工艺可显著提升单晶硅切割质量和生产效率，同时有效降低生产成本。本研究不仅为单晶硅切割技术的工艺优化提供了可靠的理论依据，同时也为实际生产提供了切实可行的实践指导，对推动单晶硅切割技术的创新发展具有重要意义。

一、引言

单晶硅作为半导体产业的核心材料，其加工技术直接影响着集成电路、太阳能电池等产品的性能与成本。传统的单晶硅棒开方工艺主要采用内圆锯或砂浆线锯，然而这些方法存在切割效率低、材料损耗大、表面损伤层深等问题，难以满足日益增长的产业需求。环形金刚石线锯技术作为一种新型切割工艺，凭借其高效、精密、环保等优势，近年来在单晶硅棒开方领域展现出巨大的应用潜力。

环形金刚石线锯技术利用电镀或树脂结合的方式将金刚石磨粒固结在环形金属线上，通过高速往复运动实现对单晶硅棒的切割。与传统方法相比，该技术具有以下优势：首先，金刚石作为自然界最硬的材料，可显著提高切割效率，缩短加工时间；其次，线锯切割产生的切缝窄，材料损耗小，提高了硅材料的利用率；此外，线锯切割过程中冷却液用量少，且无需使用砂浆，更加环保。

国际上，日本、瑞士等国家在环形金刚石线锯技术领域起步较早，已开发出多种商用设备，并广泛应用于太阳能硅片和半导体硅片的切割。国内相关研究起步较晚，但近年来发展迅速，部分高校和科研机构在环形金刚石线锯的制造工艺、切割机理、表面质量控制等方面取得了重要

进展，并逐步实现了国产化设备的推广应用。近年来，国内通过引进国外先进设备与技术，结合基础研究与技术攻关，在锯丝制造、工艺优化及设备国产化等方面取得一系列突破。

环形金刚石线锯开方单晶硅棒技术的应用，对于提升我国半导体和光伏产业的竞争力具有重要意义。首先，该技术可以提高单晶硅棒的开方效率和材料利用率，降低生产成本；其次，该技术可以获得更高质量的硅片表面，减少后续加工工序，提高产品良率；最后，该技术的推广应用将推动我国高端装备制造业的发展，提升我国在全球半导体产业链中的地位。

本文将围绕环形金刚石线锯开方单晶硅棒技术展开研究，重点探讨环形金刚石线锯切割工艺（线速、张力、切割水流量）对单晶硅棒切割质量的影响，通过三组对照试验，找到线速、张力、切割水流量等参数的最优取值范围。

二、环线切割的工艺过程

环形金刚石线锯切割单晶硅棒是一种高效、精密的加工方法，其工艺过程需要严格控制各个环节，才能获得高

质量的硅片。

图1是环线切割工艺过程示意图，图中示意了环线和切割轮的绕线情况。环形金刚石线通过驱动切割轮、被动切割轮及张力组件形成一个闭环切割循环。通过高速运转的金刚石线配合切削水对单晶硅棒进行截断、开方等切割加工工序，环形金刚石线线径在0.3~0.5mm之间。由于金刚石线较细，因此使用环形金刚石线工艺切割的硅料损耗较低；但线切割的成功率要求较高，一旦发生断线，会产生更大损耗。

环形金刚石线锯切割单晶硅棒的工艺过程主要包括以下几个步骤。

1.准备工作

设备调试:检查并调试环形金刚石线锯设备，确保其运行平稳，张力控制系统、冷却系统等正常工作。

环线切割工艺及切割构造示意图如图1所示。

线锯安装:将环形金刚石线锯安装到设备上，并调整其张紧度至合适范围。

硅棒固定:将单晶硅棒牢固地固定在切割平台上，并调整其位置，确保切割面与线锯运动方向垂直。

参数设置:根据硅棒尺寸、材料特性以及切割要求，设置合适的切割参数，包括线锯速度、进给速度、冷却液流量等。

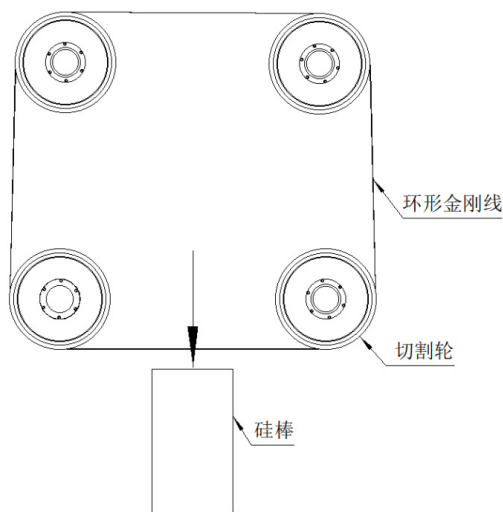


图1 环线切割工艺及切割构造示意图

2.切割过程

启动设备:启动环形金刚石线锯设备，线锯开始高速往复运动。

进给切割:切割平台带动硅棒缓慢进给，线锯上的金刚石磨粒对硅棒进行磨削切割。

冷却润滑:冷却液持续喷射到切割区域，起到冷却、润滑和排屑的作用，防止线锯和硅棒过热，并提高切割效率和质量。

实时监控:在切割过程中，实时监控切割状态，包括线锯张力、切割速度、冷却液流量等参数，并根据实际情况进行调整。

3.切割完成

停止进给:当硅棒被完全切割开后，停止切割平台进给。

停止设备:关闭环形金刚石线锯设备，停止线锯运动。

取出硅片:小心取出切割好的硅片，并进行清洗和干燥。

4.后续处理

硅片检测:对切割好的硅片进行检测，包括厚度、表面粗糙度、翘曲度等指标，确保其符合要求。

表面处理:根据需要对硅片进行表面处理，例如抛光、清洗等，以进一步提高其表面质量。

三、切割工艺对切割效果的分析研究

1.线速变化对切割效果的影响分析

为了验证切割线速度对单晶硅环线切割质量的影响，本文进行了相关实验研究。实验选用不同的切割线速度，每组进行三次实验切割，观察并记录切割过程中的现象和数据。

实验目的:通过对五组不同切割线速进行实验切割，可以分析出线速对硅棒加工质量的影响。

实验方法:使用四工位环线开方机，在张力及切割水流量等其他条件不变的情况下，将线速按2000m/min、2100m/min、2200m/min、2300m/min、2400m/min的工况，对A1、B1、C1、D1、E1五组相同规格硅棒分别完成开方切割。实验结束选取每组硅棒的相邻两面（1面及4面），观察已切割表面的切割质量。

对实验数据进行汇总，见表1。

表1 线速变化下切割质量变化统计

组别	实验数据		
	线速 /m·min ⁻¹	崩边 (%)	表面不良问题 (%)
A1	2000	13.03	2.50
B1	2100	8.40	2.20
C1	2200	2.11	1.90
D1	2300	2.10	1.60
E1	2400	1.98	1.58

根据表1数据变化的趋势分析得出：当线速逐步增加时，崩边比例随之明显降低，当线速到达2200m/min以上时，崩边比例逐渐趋向稳定，并保持在2%左右；表面不良问题随线速增加比例随之缓慢降低，到达2200m/min以上时，比例逐渐趋向稳定，并保持在1.6%左右。

实验结果表明，随着线速逐步增大，更有利于维持线锯的切割能力，确保切割硅棒的表面质量。金刚线的切割主要通过金刚石颗粒实现，当线速增加时同一时间内参与切割的金刚石颗粒数量增加，金刚线切割能力增强，走线更稳定。当切割线速为2200~2400m/min时，切割质量逐渐趋于稳定，即可确保切割质量又可节约生产成本，是四工位环线开方机最优的切割线速工况。

2. 张力变化对切割的影响分析

为了验证线张力对单晶硅环线切割质量的影响，本文进行了相关实验研究。实验选用不同的线张力，每组进行三次实验切割，观察并记录切割过程中的现象和数据。

实验目的：通过对五组不同切割张力进行实验切割，可以分析出张力对硅棒加工质量的影响。

实验方法：使用四工位环线开方机，在切割线速及切割水流量等其他条件不变的情况下，将张力按70N、80N、90N、100N、110N的工况，对A2、B2、C2、D2、E2五组相同规格硅棒分别完成开方切割。实验结束选取每组硅棒的相邻两面（1面及4面），观察已切割表面的切割质量。

对实验数据进行汇总，见表2。

表2 张力变化下切割质量变化统计

组别	实验数据		
	张力 / N	崩边 (%)	表面不良问题 (%)
A2	70	3.00	2.05
B2	80	2.80	1.87
C2	90	2.10	1.64
D2	100	1.90	1.53
E2	110	1.75	1.45

根据表2数据变化的趋势分析得出：当线张力逐步增加时，崩边与表面不良问题比例有所降低，但是降低幅度不大。实验结果表明，线张力的增加能够减小切割时的线弓问题，可保证切割进出刀时的平稳性[4]，但是由于张力的变化对金刚线的切割能力的影响较小，因此对切割质量的改善效果不明显。

3. 切割水流量对切割的影响分析

为了验证切割水流量对单晶硅环线切割质量的影响，

本文进行了相关实验研究。实验选用不同流量的切削水，每组进行三次实验切割，观察并记录切割过程中的现象和数据。

实验目的：通过四组不同水流量的切割水进行实验切割，可以分析出水流量对硅棒加工质量的影响。

实验方法：使用四工位环线开方机，在切割线速及张力等其他条件不变的情况下，将切割水流量按30L/min、50L/min、70L/min、90L/min的工况，对A3、B3、C3、D3四组相同规格硅棒分别完成切割。实验结束选取每组硅棒的相邻两面（1面及4面），观察已切割表面的切割质量，以及设备内部的脏污等情况。

对实验数据进行汇总，见表3。

表3 切割水流量变化下切割质量变化统计

组别	实验数据		
	切割液流量 / L · min ⁻¹	崩边 (%)	表面不良问题 (%)
A3	30	2.00	1.30
B3	50	1.80	1.13
C3	70	1.70	0.70
D3	90	1.90	0.62

设备内部脏污程度：A3组 > B3组 > C3组 > D3组，C3、D3两组设备内部脏污较少，属于可接受的程度。

实验结果表明，随着切割水流量逐步增大，更有利于维持线具的切割能力，确保切割硅棒的表面质量。根据表3数据变化的趋势分析得出：当流量增加的情况下，崩边问题的比例基本保持不变；而表面划痕、凹坑等不良问题的比例则显著下降，因为大流量切削水能够更及时地带走分散切屑，减少硅粉堆积从而改善切割环境。而当流量达到70L/min以上后，C3与D3两组实验数据的切割质量差距并没有前两组的差距明显；综合考虑成本及后续工序处理的难度，当切割水流量为70L/min时，即可确保切割质量又可节约生产成本，是四工位环线开方机最优的切割水流量工况。

四、结语

切割是单晶硅生产制造过程中造成硅料损伤的主要工序，环线切割工艺作为现今光伏及半导体工业的重要技术，其技术革新对提升行业质量和效率有着重要作用。随着行业快速发展，对加工工艺的精确度与生产效率提出了更高的要求，因此在现今众多切割技术研究的基础上，进一步研究完善切割工艺对切割质量的影响，对发展环线切割工艺有着重要意义。

(下转第80页)

数控机床主轴回转圆度误差分离方案及测试

漯河技师学院机械工程系 刘颖杰 王青
河南垂天智能制造有限公司 李峰

【摘要】 主轴回转圆度的准确率直接影响到数控机床的加工精度，受到旋转惯性的影响会产生圆度误差。本文建立了一种面向三点法测量方法的机床主轴回转圆度误差分离方案，采用多种形式的目标优化手段来寻找在线测量旋转误差的关键特征。采用非触摸型定位传感器捕捉旋转精度数据，开展回转圆度误差分离测试分析。研究表明：圆度和回转误差变化幅度都在 $\pm 0.4\mu\text{m}$ 范围，分离程序可有效反馈回转和圆度误。对圆度误差和回转误差判断的准确率较高，特别是对回转误差测试达到了最佳误差控制性能。该研究可以有效的将主轴回转误差和圆度误差实现准确分离，提高机床的加工精度。

1. 引言

随着当前机械制造领域各类先进技术的开发，整体加工水平不断提升，对机床控制精度提出了更高要求，这对主轴旋变误差控制提出了更高要求，从而更好地实现机器设备产能提升及促进产量的大幅提高^[1-2]。目前，如何将圆度与主轴旋变误差实现有效控制已成为众多专家学者研究的焦点问题。通过三点法计算方式可以达到自动消偏移和实时检测的功能，而且还可以实现较高测量准确度，已被广泛应用到各加工行业^[3]。

以上方面得到了越来越多学者的关注。迟玉伦等^[4]提出了一种基于神经网络的主轴回转误差分离降噪方法，通过三点法分离出同步误差和异步误差，泵通过方差来评价不同方法的降噪效果。孙文彪等^[5]通过仿真研究了磁化效应对系统闭环幅频特性的影响，回转误差时域仿真结果表明磁化效应会增大回转误差，并采用瞬态磁导模型进行验证。孙备等^[6]设计可以精确预测面向切削力修正的主轴回转精度分析方法，针对切削工况开展主轴回转精度测试，同步误差和切削载荷具有正相关关系。

目前的研究多是针对回转数控中人工智能方法进行优化，在利用设备自身空间热点方面的研究仍有不足。通过

本文在前人研究的基础上，开展数控机床主轴回转圆度误差分离方案设计，并采用非触摸型定位传感器捕捉旋转精度数据开展测试分析，取得了很好的圆度控制效果。

2. 回转误差分离的原理

图1是在测试棒边缘部位设置的角度探测器，以此采集回转误差数据^[7]。

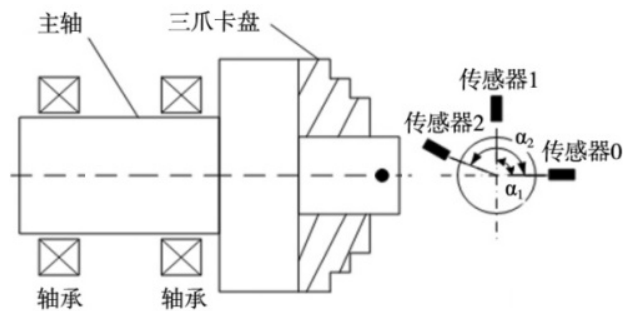


图1 三点法测量原理图

沿标准棒圆周安装三个传感器，记为0、1、2，将 $h(\theta)$ 、 $\delta_x(\theta)$ 、 $\delta_y(\theta)$ 设置为圆度、回转误差， θ 为角度

参数, N为采样点个数, α 为夹角, 建立如下的传感器对信号数据的输出函数:

$$\begin{aligned} s_0(\theta) &= h(\theta + \alpha_0) + \delta_x(\theta)\cos\alpha_0 + \delta_y\sin\alpha_0 \\ s_1(\theta) &= h(\theta + \alpha_1) + \delta_x(\theta)\cos\alpha_1 + \delta_y\sin\alpha_1 \\ s_2(\theta) &= h(\theta + \alpha_2) + \delta_x(\theta)\cos\alpha_2 + \delta_y\sin\alpha_2 \end{aligned} \quad (1)$$

对式(1)进行不等权重因子 c_0 、 c_1 、 c_2 进行乘积运算, 并针对 α 进行离散化处理, p 为离散角。消除了主轴旋转误差, 进而导出下述加权表达式:

$$s(n) = h(n) + c_1h(n+p) + c_2h(n+2p) \quad (2)$$

根据傅里叶转换时频, 可以确定三点法误差分离权函数主轴回转误差:

$$\delta_x(n) = s_1(n) - h(n) \quad (3)$$

$$\delta_y(n) = \frac{[s_2(n) - h(n+2p_2) - \delta_x(n)\cos(2\pi p_2/N)]}{\sin(2\pi p_2/N)} \quad (4)$$

三点法在离散点曲率计算中, 假设相邻的三个离散点构成一段圆弧, 通过计算这段圆弧的半径来近似得到该段的曲率。通过三点法对数据计算时, 同时具备高精度与在线测试功能, 由此吸引了众多研究者的广泛关注。然而, 当权函数 $G(\omega)$ 处于零值状态时, 实际的误差分离效果存在明显谐波抑制的情况。

3.回转圆度误差分析

本研究根据传统的3点检测理论对误差分割及全面评价过程开展分析, 并以此建立了误差分割函数模型, 在此基础上采用多种形式的目标优化手段来寻找在线测量旋转误差的关键特征, 从而显著提升了误差分割能力。最后, 通过对比误差分割前后的结果差异, 证实通过此种方式能够实现精确控制以及满足可靠性的目标。

(1) 误差分离方案

测试获得旋转圆度测试结果。本实验采用非接触模型定位传感器捕捉旋转精度数据, 利用北京双诺公司制造的MP420数据采集器进行样本采集, 设定采集频率为100kHz, 单转包含了2000个样本。为了保证数据采集的准确度, 系统软件同时运行。本次共收集了12周旋转数据, 之后, 在系统软件中使用线性插值法完成数据分组。

调节谐波抑制模块采用分离权函数零点验证的方式完成, 测试原理见图2所示^[6]。在分析主轴回转和圆度误差的基础上, 对传感器信号进行误差分类, 然后对分离后的误差进行评判。最后融合三点误差后输出结果。

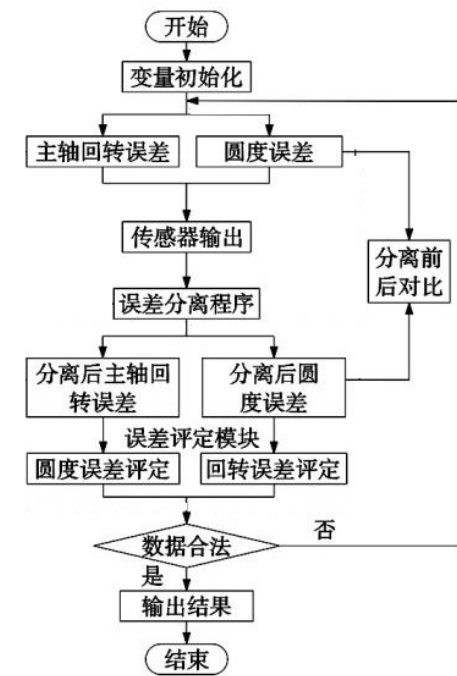


图2 误差分离流程

(2) 结果分析

采样圆度误差时域数据, 本次实验在360等距采集样本点中选取表1中所列的特征点进行测试。首先采用混合处理法分离出旋转偏差和圆形偏差的数据, 并以此作为检测器0、1、2测试结果, 接着利用MATLAB工具包完成前二个误差识别。为了更直观对比分析误差分类效果并分析其变化过程, 我们对前后状态进行了对比, 同时利用幅度差的方式来表示这种差异性, 再利用该指标进行求解。

表1 圆度误差采样点

序号	测量值/ μm	序号	测量值/ μm
1	43.6	10	39.5
2	40.8	11	42.8
3	42.6	12	44.1
4	36.8	13	42.5
5	39.4	14	39.3
6	43.2	15	43.4
7	44.1	16	42.8
8	45.6	17	33.5
9	38.6	18	38.2

图3所示是经过旋转偏差分离得到的x轴向上 δ_x 以及y轴方向 δ_y 幅度与圆形偏差测试结果。由上述结果可以看出, 圆度和回转误差变化幅度都在 $\pm 0.4 \mu\text{m}$ 范围, 本研究分离程序可有效反馈回转和圆度误差, 并可得到与分离前相同的波形, 表明本文测试方法是正确的。

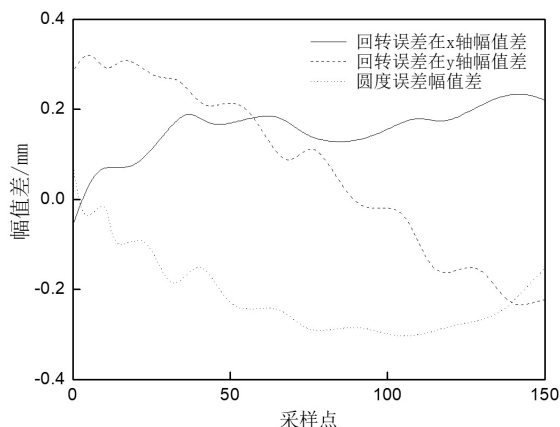


图3 分离前后误差幅值差

(3) 对比分析

通过鞍点规划原理并结合三点误差与区间分类方法对本研究设计的模型进行圆度误差精度验证,以10个实验样例计算得到的平均结果作为判定依据,得到表2的测试结果。通过对比可知,对圆度误差和回转误差进行判断的准确率较高,特别是对回转误差进行测试达到了最佳误差控制性能。

表2 精度结果对比

参数	圆度误差	回转误差
本文方法	0.991	0.986
鞍点规划理论	0.973	0.933
三点误差分离	0.926	0.905
区间分类方法	0.896	0.868

4. 结论

本文开展数控机床主轴回转圆度误差分离方案及测试分析,取得如下有益结果:

(1) 圆度和回转误差变化幅度都在 $\pm 0.4 \mu\text{m}$ 范围,分离程序可有效反馈回转和圆度误差。

(2) 对圆度误差和回转误差判断的准确率较高,特别是对回转误差测试达到了最佳误差控制性能。

该研究具有很好的实际应用价值,可以拓宽到其它的机加工领域。但是面对异性结构的时候存在传感器布置的困难,后续需要考虑各个传感器之间的型号融合效果。□

参考文献:

- [1]杨赫然,赵桐,孙兴伟,等.基于改进遗传算法的机床主轴径向回转误差分离技术研究[J].仪器仪表学报,2021,42(01):82-91.
- [2]刘思遥,黄美发,张政泼.基于多变量优化的机床主轴回转误差分离研究[J].组合机床与自动化加工技术,2020(07):85-87+92.
- [3]张国庆,于贺春,王文博,等.形状误差对气体静压主轴回转精度的影响[J].重庆理工大学学报(自然科学),2021,35(08):265-270.
- [4]迟玉伦,李希铭,朱文博,等.基于LSTM-GRU神经网络的机床主轴回转误差分离降噪研究[J].计量学报,2024,45(11):1615-1625.
- [5]孙文彪,熊万里,原帅,等.磁化效应对高速磁悬浮外圆磨削电主轴回转精度影响规律研究[J].机械工程学报,2024,60(23):236-245.
- [6]孙备,张玲玲,李峰,等.面向切削力修正的机床主轴回转精度预测实验分析[J].机床与液压,2024,52(06):93-96.
- [7]吕铭,陈蔚芳,苏川,韦子祥.基于EEMD与频域分析的主轴回转误差评定[J].组合机床与自动化加工技术,2021(01):61-65.
- [8]范晋伟,谢本田,叶倩,等.基于区间理论的数控内圆复合磨床几何误差灵敏度分析方法研究[J].机械工程学报,2022,58(11):220-230.

(上接第77页)

文章探讨了单晶硅环线切割工艺的关键作用,切割工艺对切割质量和生产效率的影响。结合实验数据,对切割工艺详细分析,介绍切割工艺优化对提高单晶硅切割质量、提升生产效率及降低生产成本的重要作用,为单晶硅切割技术的优化提供了理论依据和实践指导。

通过实验研究和理论分析,本文研究了改善环线切割工艺(线速、张力、切割水流量)对切割质量的影响。同时结合实验数据,分析提供了切割工艺变化对于提高硅棒质量、切割效率的理论依据。为实际生产提供了技术参考,建议基于单晶硅切割工艺的具体要求,选择合适的切割工艺技术,并严格控制。

环形金刚石线锯开方单晶硅棒技术的研究与应用,对

于提升我国单晶硅材料加工水平、推动半导体与光伏产业高质量发展具有重要的现实意义。深入探究该技术的发展现状与应用情况,有助于明确技术发展方向,为进一步的技术创新与产业升级提供理论依据与实践指导。□

参考文献:

- [1]孟剑峰.环形电镀金刚石线锯加工技术及加工质量研究[D].济南:山东大学,2006.
- [2]蔡二辉.晶体硅的金刚石线锯切割性能研究[D].南昌大学,2011.
- [3]高红刚,郑丽霞.环形金刚石线锯开方单晶硅棒试验研究[J].工具技术,2021,55(06):89-93.
- [4]贾艳飞.金刚石线切割工艺对硅片表面质量影响研究[J].山西化工,2019,39(03):85-86+90.DOI:10.16525/j.cnki.cn14-1109/tq.2019.03.28.