

2024年意大利第四季度机床订单上升 (+11.4%)：国内订单+33.3%，国外订单-6.5%

2024年第四季度，由UCIMU-系统生产研究与商业文化中心编制的机床订单指数较2023年10月至12月期间增长了11.4%。该指数的绝对值为78.7（以2021年为基准=100）。在国内方面，与2023年第四季度相比，订单增长了33.3%，绝对值为58。相比之下，海外订单下降了6.5%，该指数的绝对值为83.6。

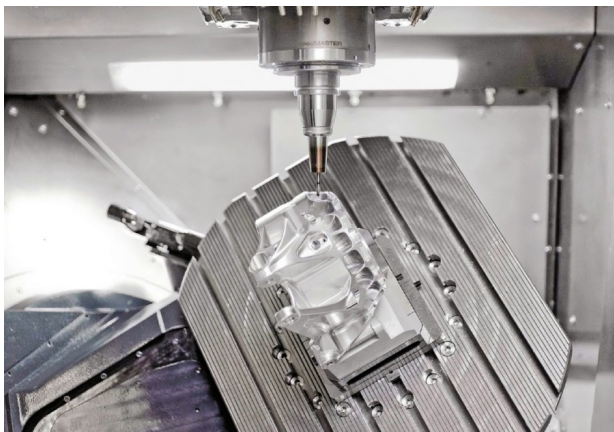
从全年来看，订单量仍为负增长，同比下降5.6%（绝对指数为65.5）；其中，国内订单下降3%（绝对指数为39.6），国外订单下降7.5%（绝对指数为84.3）。

东南亚外国直接投资（FDI）激增，美国公司位居前列。然而，随着主要国家之间的贸易争端持续，投资执行速度可能成为一项挑战。

（来源：意大利机床协会UCIMU官网）

DMG MORI推出全新第二代DMU 60 eVo五轴加工中心

该机型采用垂直主轴与旋转工作台设计，通过热对称门式结构及优化运动学系统实现性能升级。作为成熟产品线的迭代机型，其研发旨在满足市场对加工精度、动态性能和柔性化生产日益增长的需求。该设备创新性地运用了MX集成化制造理念，深度融合工艺系统、自动化技术，并搭载数字化与绿色双转型解决方案，推动智能制造升级。



该集成化制造平台深度融合铣削加工、最高转速达1200rpm的车削加工、基于自主开发工艺循环的齿轮刮削（gear skiving）技术以及精密磨削工艺。通过集成这些拓展的金属切削能力，传统生产中心得以升级为多功能复合加工平台。相较于前代机型，其加工空间实现

40%的显著扩展，达到750×550×550mm的立方体工作容积。

该加工中心在直线轴标配直驱式滚珠丝杠（Direct-drive ballscrews）传动系统，同时可选配直线电机驱动方案，实现80米/分钟的超高快速速度。工作台摆动范围扩展至-5°/+110°，最大承载负荷提升100公斤至半吨（500公斤）。设备内部采用大倾角不锈钢内壁设计（符合VDI 3837标准），结合加宽20%的排屑输送系统（有效排屑带宽达300mm），确保加工过程中切屑高效排出并维持系统稳定运行。

主轴配置包含最高转速达40,000转/分钟的高转速版本和扭矩达200牛米的大扭矩版本。刀库系统在机床占地9平方米的范围内提供30、60或120刀位的存储容量（较前代减少20%占地面积），同时可选配双链式刀库以支持最多300把刀具。得益于创新的刀具交换门设计，换刀时间缩短1秒至4.5秒，进一步提升了加工效率。

高性能的发那科SCARA机器人

全新的FANUC SR-12iA/C机器人，配备ISO Class 5洁净室认证、IP65防护等级、食品级润滑油及防锈螺栓等特性，是食品工厂与洁净室环境的理想选择。这款高性能食品级SCARA机器人可显著提升需要清洁工艺流程的物料搬运、装配、检测及分拣/包装等应用的作业效能。

发那科SR-12iA/C机器人除具备结构坚固、耐腐蚀性、易清洁性及符合食品安全法规等特性外，其所有四个控制轴均实现超高速运行，为食品企业提供可靠高效的解决方案。该机型配备市场差异化波纹管，可在冲洗作业中保护Z轴主轴。在先进工程、光学、激光及制药等领域运营洁净室的企业亦可充分发挥该机器人的多项优势。

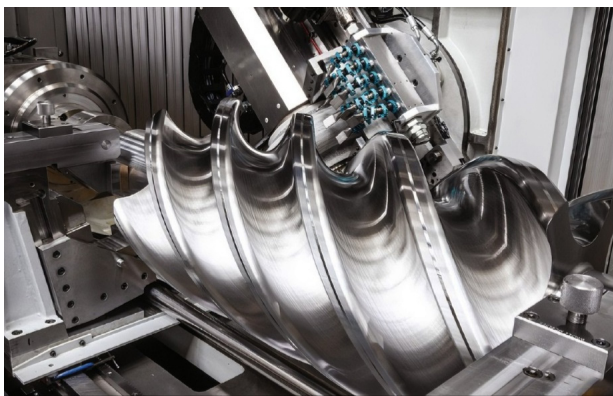


该机器人的另一关键特性是其白色环氧涂层，可在极端环境中提供额外耐久性。其IP65防护等级确保设备免受喷水、一定量粉尘及其他颗粒物污染物的侵入。所有运动轴均采用NSF-H1食品级润滑油以及防锈螺栓设计，进一步保障其在食品处理应用中的可靠性。

发那科SR-12iA/C机器人配备高强度机械臂，腕部最大负载达12公斤（达到该公司现有食品级SCARA机器人负载能力的两倍），臂展900毫米，且具有极具竞争力的性价比优势。其各轴高速运动实现快速循环周期：旋转J1轴和J2轴分别达到440%和510%的加速度，直线J3轴运动速度达2800毫米/秒，J4轴（腕部旋转）加速度达2500%。

PTG Holroyd Precision推出新型HG500机床

PTG Holroyd Precision（英国霍洛伊德精密有限公司）推出新型HG500机床，专用于加工制冷与空压机制造领域最大型螺旋转子。该设备可对直径50毫米至510毫米、型线深度130毫米、重量达1500公斤的转子进行粗磨与精磨加工。



当以标准形式配置时，HG500磨床可采用500毫米陶瓷结合剂可修整氧化铝砂轮，或采用镀层立方氮化硼粗磨与精磨砂轮，以实现经济高效的大批量生产。此外，还可选配600毫米陶瓷结合剂可修整氧化铝砂轮选项，为精密磨削最大螺旋组件的制造商提供最大砂轮寿命。

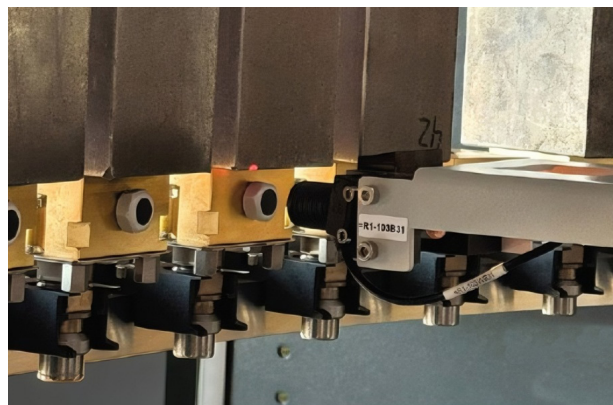
PTG霍洛伊德设计团队重点聚焦于提供直观编程系统。为实现这一目标，公司采用西门子SINUMERIK ONE数控系统，确保HG500在转子加工能力上具备高度柔性化优势。该磨床配置搭载SPRINT™技术的雷尼绍OSP60在线扫描测头，即使针对最长工件也能实现全面的测量策略。与传统磨床工作台不同，HG500创新采用移动式磨头

结构，通过砂轮头架的轴向运动替代工件轴向进给，有效减少长工件加工时的累积误差。

配备轮式清洗装置的高压单元提供变频冷却功能，确保冷却液高效利用，而智能可编程节能模式可在制造周期之间最大限度降低能耗。

爱路华（EROWA）推动自动化技术普及化

瑞士爱路华最新推出的EROWA Robot Compact 150（ERC150）是一集成高精度定位技术的自动化搬运解决方案。现可通过REM Systems获取，该设备将智能自动化应用于车削、铣削、磨削、模具加工、电火花加工及增材制造等多样化生产工艺。此外，ERC150还能提升检测与检验作业效率，确保实现高水准的质量控制。



全新EROWA ERC 150采用紧凑型整体式结构设计，可贴近机床布置，占地面积仅4.7平方米。尽管体积小巧，其最大负载能力达150公斤，可服务最多两台机床，并配备超长双驱动X轴（行程达1,458毫米）。EROWA创新设计在有限空间内实现高容量存储系统，通过可调节存储层适应不同尺寸工件加工需求。

柔性刀库容量适配不同托盘尺寸，从ITS50夹具到可容纳工件高度达400毫米的MTS400托盘。可扩展刀库系统能够存储500多个不同尺寸的EROWA托盘。可选配LS 500 Comfort装夹工作站，其符合人体工程学设计，可辅助完成托盘装载、卸载及清洁作业，有效减少操作人员在设备设置过程中的疲劳度，并确保机器人持续稳定运行。

为实现空间集约化集成，可选配的装载站可使大型重型工件（UPC与MTS托盘）在机器人作业时定位在符合人体工学的高度。精密分度系统（4x90°）可自动锁紧托盘，防止定位偏移。

五轴车铣复合机床关键技术与应用前景

通用技术集团沈阳机床有限责任公司 郭生

一、引言

全球五轴车铣复合机床市场规模已从2019年的62.9亿元增长至2024年的120亿元，年复合增长率达13.8%。这一增长源于航空航天（钛合金构件加工需求增长35%）、新能源汽车（电池托盘加工设备需求增长50%）等领域的爆发性需求。中国作为全球最大机床消费国（2023年消费额2064亿元），其高端五轴机床国产化率仅6%，但政策推动下，预计2025年核心部件国产化率将突破80%。本文将从技术迭代、产业竞争、生态重构三大视角展开深度剖析。



二、关键技术突破与核心创新点

1. 摆头式结构：从刚柔耦合到热力协同优化

（1）结构创新及优化

国际标杆企业WFL的MILLTURN系列通过双丝杠驱动技术，将摆头扭矩提升至 $2000\text{N}\cdot\text{m}$ ，较传统结构提高40%，其核心在于采用预拉伸滚柱丝杠与双闭环反馈系统，实现扭矩波动控制在 $\pm 1.5\%$ 以内。

（2）动态性能与工艺集成创新

日本MAZAK的INTEGREX i-200AG系列则集成车铣复合与齿轮加工功能，通过B轴摆头与Y轴联动实现螺旋锥齿轮一次成型，加工效率较传统工艺提升60%。

2. B轴电主轴：功率密度的突破

受卧式车铣等机床的结构限制，对车铣头的结构紧凑性有更高的要求，电主轴的功率密度提升日益受到关注。日本MAZAK的INTEGREX i-200AG采用磁悬浮轴承电主轴，通过轴向-径向混合磁极阵列设计，在 $35000\text{r}/\text{min}$ 转速下实现 $5\text{kW}/\text{kg}$ 功率密度突破，其轴向刚度达 $800\text{N}/\mu\text{m}$ ，径向刚度 $500\text{N}/\mu\text{m}$ ，可满足高温合金涡轮盘高效加工需求。

3. 多轴协同工艺：从运动控制到物理场耦合

（1）多物理场感知与动态补偿

DMG MORI的CELOS系统通过切削力-振动-温度多传感器融合技术实现工艺突破：在主轴鼻端集成三向压电式力传感器（量程 $\pm 10\text{kN}$ ，分辨率 0.1N ），配合红外热像仪（测温范围 $0\sim 300^\circ\text{C}$ ，精度 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ ），构建切削过程数字孪生模型。当检测到薄壁件变形趋势时，系统动态调整进给速率（调节精度 $0.1\text{mm}/\text{min}$ ），使变形量减少70%。该技术已用于航空发动机机匣加工，将圆度误差从 0.05mm 降至 0.015mm 。

（2）精密测量与闭环控制

上海交通大学团队研发的超声动态测厚系统取得重大进展：采用 10MHz 高频超声探头，通过声波飞行时间补偿技术（补偿精度 0.1ns ），将壁厚检测精度提升至 0.005mm 。其创新点在于开发了基于FPGA的实时信号处理器，将检测-反馈-补偿周期缩短至 5ms ，并与数控系统形成闭环控制。在航空发动机钛合金叶片加工中，该技术

使壁厚一致性标准差从0.03mm降至0.006mm，废品率从12%降至3%。而谢黎明团队的研究表明，在高速电主轴系统中，轴承刚度软化会使刀尖频率响应偏移15%，但通过结构阻尼比优化可将其影响降低至5%以内。

三、国际竞争格局与国产化进程

1. 国际巨头技术护城河：从核心技术到生态壁垒

(1) WFL：精密制造领域的绝对王者

奥地利WFL凭借其MILLTURN系列在全球高端市场占据18%份额，其技术护城河体现在三个维度：

▶超大型件加工能力：通过双丝杠驱动技术实现2000N·m扭矩输出，可加工15米船用曲轴，主轴同轴度误差 $\leq 0.005\text{mm}$ ，满足ISO 10791-1标准。其M120型号机床配备独立抓取式刀库，可装载长达2.5米刀具，在石油机械领域实现深达2000mm的内孔加工。

▶工艺软件创新：开发的齿轮齿面切削软件支持圆柱齿轮、螺旋伞齿轮等复杂齿形加工，配合西门子840D数控系统，将传统需3天的齿轮加工缩短至8小时。其碰撞保护工作室可实现五轴联动轨迹仿真，规避加工风险。

▶服务网络布局：全球1200台设备装机量中，60%服务于航空航天领域，在中国市场通过快速响应机制实现48小时备件供应，维护成本较日系厂商降低25%。

(2) DMG MORI：智能化生态构建者

德国DMG MORI以32%的航空航天市占率巩固领先地位，核心优势在于：

▶CELOS系统深度整合：集成2000种工艺数据库，支持与西门子NX CAM无缝对接。其切削力-振动-温度多传感器融合技术，在钛合金机匣加工中实现进给速率动态调整，使薄壁件变形量减少70%。

▶增材制造技术突破：LASERTEC 3D hybrid设备将激光熔覆与五轴铣削结合，在航空发动机叶片修复中实现材料利用率提升40%，加工周期缩短50%。

▶数字化服务体系：通过DMG MORI账号系统构建全球用户生态，整合设备数据监控、工艺优化建议等功能，客户设备利用率提升18%。

(3) MAZAK：高端市场定价权掌控者

日本MAZAK在中国高端市场维持60%毛利率，其核心竞争力表现在：

▶控制系统革新：SmoothX系统实现车铣混合编程与3D仿真同步，在汽车模具加工中将编程时间从6小时压缩至45分钟。其INTEGREX i-200AG系列配备35000rpm磁悬浮电主轴，功率密度达5kW/kg，支撑新能源汽车电机

壳体高效加工。

▶市场策略精准：针对中国客户推出“阶梯式付款”方案，首付比例低至20%，同时通过上海技术中心提供每年1500人次的免费培训，客户粘性提升30%。

2. 国产替代路径：从单点突破到系统创新

(1) 核心部件自主化攻坚战

▶电主轴技术突破：深圳爱贝科、通用技术大连机床，科德数控等企业的相关车铣电主轴产品已经在五轴产品上获得了应用。

▶功能部件替代：通用技术沈阳机床自研的重载型机械车铣头历经迭代，已经在重点领域实现了成熟的批量应用。国测时栅等国内企业的高精度时栅尺，已经成功应用于各类转台等分度机构，可实现对进口同类产品的替代。

(2) 行业定制化解决方案创新

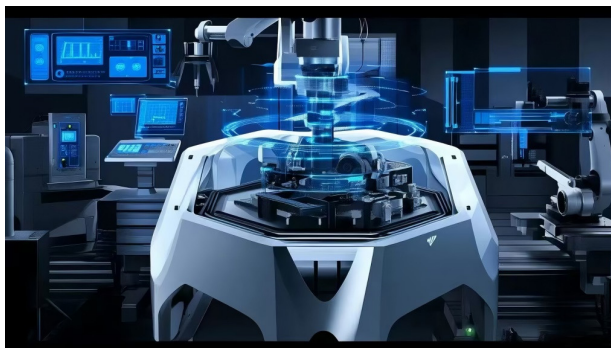
在航空航天领域：基于围绕航发领域盘轴类零件加工，通用技术沈阳机床通过高精度B/C轴、摆动车削工艺，在线测量、专用工艺软件开发等整体解决方案，解决了盘轴类零件半封闭内腔及端面均布孔高精度加工问题，实现了进口卧式车铣产品的批量替代。

(3) 产业链协同创新模式

▶通用技术机床板块通过统一集采模式对通用外购件进行统一招标集采，大幅度降低采购及管理成本。滕州产业集群通过共享采购平台将滚珠丝杠采购成本降低35%，建立区域检测中心提供主轴动平衡检测服务，使中小企业设备故障率下降40%。

▶长三角产学研联盟：上海交大联合拓璞数控开展多物理场耦合补偿算法研究，在C轴转台热变形进行控制，并应用于卫星支架加工。

四、未来发展方向与技术挑战



1. 智能化集成：从数字孪生到自主决策的深度演进

(1) 工艺孪生与认知制造系统

德国DMG MORI的CELOS系统已集成2000种工艺数

数据库，通过切削力-温度-振动多传感器融合，实现进给速率的动态调节精度达0.1mm/min。而国内技术突破体现在边缘计算层，如通过在数控系统中嵌入FPGA芯片，将运动控制周期压缩至0.5ms，配合纳米级光栅反馈（分辨率0.1nm），使五轴联动精度达到0.005mm。

（2）边缘智能与实时控制体系

边缘智能的突破体现在三个层面：

▶硬件架构：采用异构计算平台（CPU+FPGA+GPU），实现纳米级轨迹规划的实时解算，如新松机器人开发的EtherCAT总线系统，将总线周期缩短至250μs；

▶算法创新：基于深度强化学习的振动抑制算法；

▶安全冗余：双通道冗余控制技术将故障切换时间控制在3ms以内，满足航空航天领域AS9100D认证要求。

（3）自主运维与预测性维护

基于振纹频谱分析的刀具寿命预测系统实现两大突破：

▶多模态数据融合：集成振动（0~20kHz）、声发射（100~500kHz）、红外热成像（-20℃~650℃）等多维度数据，故障预判准确率提升至99%；

2.多轴协同工艺：从轴数拓展到物理场耦合

（1）7轴5联动技术重构加工范式

在风电叶片加工领域，7轴5联动技术通过增加直线电机辅助轴（行程15m，加速度0.5g），实现以下创新：

▶装夹革命：采用真空吸附+磁流变柔性夹具，装夹时间从8小时缩短至1.5小时；

▶材料优化：拓扑优化算法使叶片结构减重18%，配合碳纤维铺层工艺（0°/±45°交替），材料利用率从60%提升至85%；

▶精度突破：通过箱中箱结构设计，横梁移动式五轴龙门机床在30m行程下保持0.02mm/m的直线度精度。

（2）增材-切削复合工艺创新

中航工业的激光熔覆协同五轴铣削技术实现三大技术跨越：

▶在线修复：采用Nd:YAG脉冲激光器（功率300W，脉宽10ms），在航空发动机叶片损伤部位实现Al-Y-Nb合金熔覆，抗晶间腐蚀性提升50%；

▶过程控制：尼康Lasermeister系统通过3D扫描生成补偿路径，将修复精度控制在±0.1mm，成本较传统工艺降低60%；

▶材料创新：开发梯度功能材料（如Ti64/In718梯度层），使修复部位疲劳寿命达到新件的90%。

（3）超精密加工的技术高地争夺

北京精雕的“气浮主轴+纳米光栅”系统实现0.001mm

轮廓精度，其核心技术包括：

气浮轴承技术：采用多孔介质气体润滑，轴向跳动控制在0.05μm，较传统滚珠轴承精度提升10倍；

误差补偿算法：基于小波变换的热变形补偿模型，将环境温度波动（±2℃）引起的误差抑制在0.0003mm/m；

工艺集成：在光学模组加工中，实现车削（Ra0.02μm）与抛光（Ra0.005μm）工序一体化，替代瑞士Studer设备。

3.可持续发展生态：从单点突破到系统重构

（1）绿色制造体系深度构建

▶能效管理系统：基于数字孪生的能源流监控平台，实现切削能耗（kWh/kg）与加工精度的多目标优化，2024年国产设备平均能效比达1.8kWh/kg；

▶材料循环利用：利用切削废屑在线回收系统，通过热等静压技术将钛合金废料再生成形，大幅度材料回收率。

（2）再制造产业链闭环建设

▶电主轴再制造：采用激光熔覆修复轴承滚道（层深0.3mm，硬度62HRC），大幅度降低修复成本，MTBF恢复至初始值的85%左右；

▶机床再造工程：通用技术沈阳机床建立的导轨激光淬火生产线（硬度提升3倍），使二手设备精度恢复至出厂标准的90%，价格仅为新机的55%；

▶碳足迹管理：构建的LCA（生命周期评价）系统，通过工艺优化降低单台机床碳足迹。

（3）开放生态与协同创新

科德数控GNC系统的开源接口战略形成三大生态：

▶工艺模块市场：吸引第三方开发车铣-抛光复合模块，生态伙伴达200家；

▶数据共享平台：建立切削参数共享库（含500种材料加工方案），用户贡献数据可获算力积分奖励；

▶协同研发网络：与上海交大共建数字制造实验室，联合攻关多物理场耦合控制算法，缩短研发周期40%。

4.技术挑战与突破路径

（1）基础理论瓶颈

▶热-力-振耦合机理：需建立多尺度仿真模型（从纳米级晶界滑移到米级结构变形），目前国产软件在200mm以上构件的预测误差达15%；

▶材料-工艺数据库：缺乏航空级高温合金（如Inconel 718）的全生命周期加工数据，导致AI算法泛化能力不足。

（2）核心部件依赖

▶高精度光栅：纳米级光栅90%依赖海德汉、雷尼绍，

国产产品在长期稳定性 (>10000h) 上存在差距;

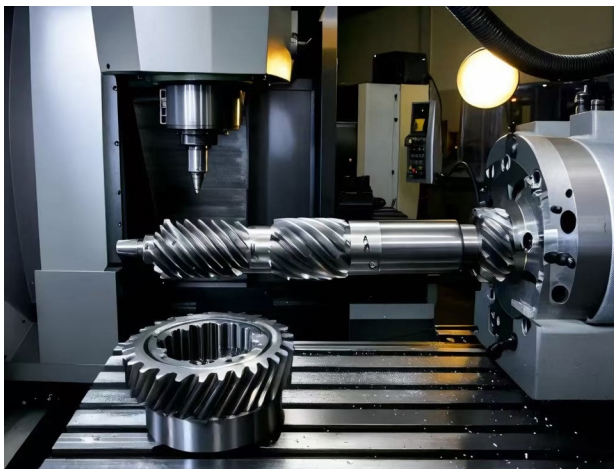
▶智能传感器: 三向压电力传感器(精度0.1N)完全依赖进口, 制约自主运维系统发展。

(3) 产业协同障碍

▶标准体系缺失: 五轴机床动态精度检测尚无国家标准, 导致国产设备国际认证通过率不足30%;

▶人才断层危机: 复合型工艺工程师缺口大, 急需产教融合培养体系。

五、结论与建议



车铣复合作为五轴机床中的一个独立的品类, 其技术发展在逐渐与其他五轴产品进行深度融合, 随着国内五轴产品技术进步, 车铣复合产品也在逐渐的突破创新, 未来智能化、复合化、绿色化仍是该类发展的整体趋势。中国五轴车铣复合机床产业正处于从“跟跑”向“并跑”跃升的关键阶段, 需通过系统性工程突破技术壁垒、构建产业生态。建议实施三大战略工程, 形成“基础研究-应用转化-标准引领”的协同发展体系。同时, 在应用层面应注重以用户工艺牵引的机床整体解决方案研究。其中:

(一) 关于基础研究-应用转化-标准引领”的协同发展体系:

1. 基础研究攻坚工程: 突破“卡脖子”技术瓶颈

(1) 设立五轴机床国家实验室。聚焦热误差补偿与多物理场耦合控制两大领域, 重点攻关:

- ▶基于数字孪生的热-力-振耦合模型;
- ▶高功率密度的电主轴技术;
- ▶高速机械车铣头技术;
- ▶深度学习驱动的切削颤振抑制算法;

▶基础工、基础材料研究。

(2) 建设共性技术研发平台。整合高校、企业资源, 建立开放共享的工艺数据库, 重点积累高温合金、碳纤维复合材料等战略材料的切削特性数据。

2. 应用生态培育工程: 构建产业协同网络

(1) 打造区域示范产业园。根据各地发展优势, 培育示范园区; 建设产业园, 形成“整机企业+功能部件集群+检测服务中心”的生态体系。

(2) 深化行业定制化创新 建立航空航天等领域的“揭榜挂帅”机制。

(3) 针对航空航天、新能源等车铣复合机床典型应用领域开展整体解决方案研究, 围绕需求开展关键技术创新。

3. 标准体系建设工程: 掌握行业话语权

制定动态精度检测标准; 参考S形试件国际标准(ISO 10791-7:2020), 建立包含几何误差、热漂移、多轴同步性的评价体系。推行基于RTCP误差特征识别的动态检测方法。

推动国际认证互认 加速CE/UL认证体系建设, 重点突破:

- ▶开发符合ISO 10791-1标准的检测装备(参考德国VDI 3410动态精度标准);
- ▶建设多个CNAS认证检测中心;
- ▶培育第三方认证机构(2025年前实现30%国产设备通过认证)。

(二) 关于应用层面的机床整体解决方案研究:

通过典型零件, 典型行业研究探查真实用户需求, 通过需求牵引, 凝练机床典型功能, 提升产品性能。比如:

- ▶开展基于需求牵引的机床正向设计研究;
- ▶通过需求引领带动机床功能模块开发; 比如: U轴功能, 集成式镗刀系统等;
- ▶机床可靠性及精度保持性提升;
- ▶围绕工艺的系统功能二次开发, 工艺软件开发;
- ▶用户体验提升; 比如: 机床的安全性, 操作宜人性, 编程便捷性等。

通过上述路径, 通过顶层设计及应用研究, 培育市场, 预计2027年高端五轴机床国产化率突破30%(当前约6%), 2030年形成千亿级产业集群。建议同步实施人才专项(培养复合型工艺工程师)、金融创新(设立200亿产业基金)、数据安全(构建机床工业互联网安全防护体系)等配套措施, 最终实现全产业链自主可控, 打破西方长期的技术垄断格局。□

我国机床企业数字化转型的进程与思考

中国机床工具工业协会 黄韶娟

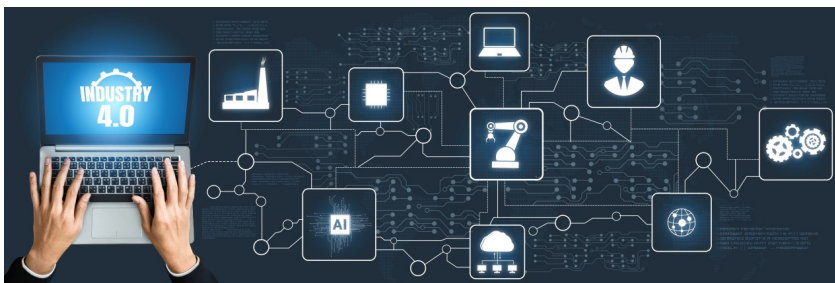
一、前言

在科技飞速发展的时代浪潮下，数字化技术的深度应用、自动化生产的高效推进以及智能制造的推广普及，已成为机床行业未来发展的主要趋势。2024年举办的CCMT展会以“聚焦——数字·互联·智造”为主题，契合了当下大力发展新质生产力的时代需求。众多展商集中展示了与数字化及智能制造紧密相关的前沿技术与创新产品，涵盖了从智能控制系统到数字化制造解决方案。越来越多的企业正积极探索数字化转型的有效路径，而展会则为供需双方搭建了一个高效便捷的交流平台，实现了面对面的深度沟通与精准对接。即将召开的CIMT2025将以“融合创新 数智未来”为主题，继续践行数字化转型行动，届时，展会将呈现更多突破性的数字化、智能化、绿色化产品与技术，为制造业高质量发展提供强大支撑，助力行业在全球竞争中实现新的突破。

数控技术是机床数字化的核心基础，我国机床企业的产品数控化率不断提高，众多企业的数控机床在精度、速度和稳定性等方面都有了显著提升，能够实现复杂零件的高精度加工，满足了高端制造对精密零部件的加工需求。

CCMT2024展会期间，笔者走访了几十家国内外机床工具及数控系统企业，与企业代表深入交流，了解他们对于数字化转型和智能制造的理解与具体实践。总体来看，国内机床企业的数字化转型主要体现在设计过程和生产管理环节，通过采用信息化、数字化管理技术，提升企业内部运营效率。而国外许多机床企业则在产品层面直接展现数字制造技术的成果。

本文对我国机床企业数字化转型情况进行梳理与适度延伸，旨在为业界提供参考，引发大家更深入的探讨与思考。希望能借此引发行业内更多的关注与讨论，为推动我国机床行业数字化转型提供有益借鉴，助力行业实现高质量发展。



二、机床企业数字化转型的实践与成效

当前，世界正快步迈入新一轮工业革命时期，数字技术日新月异，全球制造理念也随之发生深刻变革。各国调整战略、研究对策，纷纷建设起新的现代化工厂，这对我国机床工具行业的发展也产生着巨大影响，企业对数字化转型的需求日益迫切，有力推动了中国制造业的全面转型升级。

企业的数字化转型是一项复杂的系统工程，不仅需要企业领导和员工突破固有观念，树立数字化思维，还需从设计、生产流程到企业经营手段等全方位进行革新，从而提升企业决策与组织管理效率。推进数字化转型，能让企业与市场、员工和客户实现更高效的沟通交流，达成信息的共享与整合。这不仅有助于提高生产效率、降低运营成本，更重要的是能助力企业实现经营模式的转变，业务流程的优化，推动产品研发与服务模式的创新，进一步稳定产品质量，提升企业在市场中的核心竞争力。

通过多年的努力与坚持，许多机床企业已经在数字化转型方面取得了积极

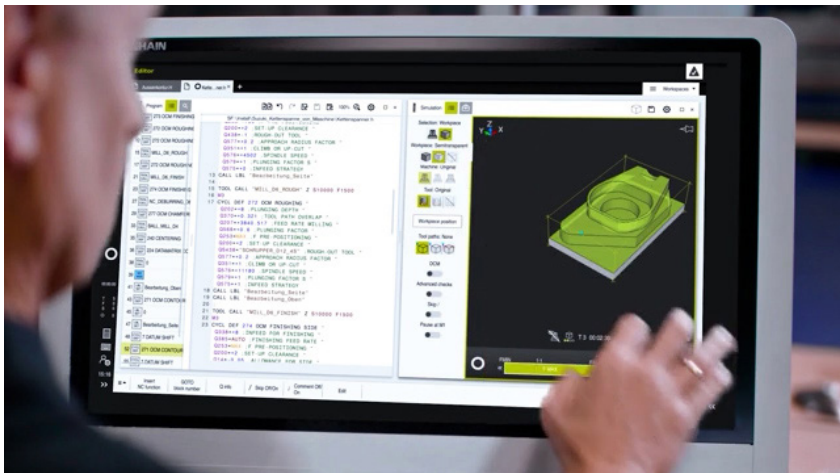
成效，部分企业通过建设智能工厂，实现了生产过程的数字化管理和优化，显著提升了生产效率和产品质量。一些企业通过数字化手段实现了定制化生产，满足不同客户的个性化需求。

1. 数控系统企业

开展数字化转型工作，数控系统企业是主力军。不仅自身积极践行数字化制造，同时也为用户进行数字化转型提供技术支持。据了解，目前国内数控系统的控制精度可以达到进口系统的级别，完全能满足市场需要。从芯片到电路板，从硬件到软件，包括通讯协议在内，数控系统的国产化率已经达到了较高水平。虽然在使用体验上与进口系统仍存在一定差距，但国产数控系统凭借显著的成本优势，能够有效避免外部制约，为企业提供更具性价比和安全保障的选择。

在为用户数字化转型服务的过程中，数控系统企业主要聚焦于搭建数字化车间和实现智能制造。早期的数字化车间搭建工作，主要围绕机床数据监控展开，通过将生产线、数控系统以及装配、存储、物流等周边环节进行数字化连接，实现统一管控，并以看板形式直观展示关键数据，如操作模式、各轴状态、机行状态、开机时间、切削时间和运行时间等。这些数据的采集与分析，均基于企业自主编写的代码，可根据用户需求进行定制化开发，这一阶段的数字化车间被称为第一代数字化车间，这项工作目前许多数控系统企业都能够胜任。

近年来，数控系统企业的能力不断提升，能够打造更为完整的数字化解决方案。以机械加工车间项目为例，涵盖了从设备参数设定、工艺规划、加工流程优化、任务排产，到数字孪生、视觉识别、自动化物流与上传ERP订单交互等全流程，构建成高度自动化的“黑灯工厂”，人员从几十人减到个位数，每班仅需一到两人即可维持高效运转。整个数字化车间集成了原料库、堆垛机、转料架、加工机床（粗/精加工）、珩架、打标机、二维码生成器、AGV小车、机械手、出库入库系统、抽检台等设备，以及其他一些搬运工作，并对所有相关数据进行采集与分析，以可视化方式呈现，为生产决策提供精准依据。不仅如此，在热加工车间、热处理车间和表面处理车间等领域，也都有许多成功案例，基本覆盖了制造业的全工艺链条。在第一代数字化车间的基础上，通过持续的技术迭代和实践探索，各数控系统企业已建立起自己的一套完整的数字化车间建设架构，包括上层可视化展示、中间层大数据挖掘治理与分析计算以及下层数据采集、边缘计算与辅助视觉等技术，每一层都有成熟的应用案例可供借鉴，标志着第二代数字化车间的全面升级。



除了数字化车间建设，数控系统企业还积极开展单机智能制造项目。单机数字孪生系统以虚拟仿真为核心，通过传感器实时采集数据并进行分析计算，在虚拟环境中对温度、速度、压力等关键参数进行优化调整，确保各项参数在最佳范围内匹配后，驱动机器进行实际生产，实现单机层面的智能制造。

未来，人工智能技术将为数控系统带来新的变革。机床将具备更强的自主决策能力，能够自动优化加工过程，实现设备间的高效协同和智能化管理，甚至在无人干预的情况下保持连续生产，大幅提升整个生产系统的运行效率和稳定性。

2. 机床主机企业

对于机床企业的数字化转型，如果主机企业能够同时拥有自主数控系统，将更具优势。

数字化转型是企业发展的重要决策，需要时间积累与技术迭代。机床企业的数字化转型通常分为三个阶段：流程驱动的信息化、数据驱动的数字化以及AI驱动的智能化管理。现在绝大部分企业都在第一、第二阶段实践，真正能到第三阶段的非常少。

早在上世纪九十年代初就有一部分国内机床企业开展了信息化工作，包括OA（办公自动化）、CRM（客户关系管理）、ERP（企业的资源计划）、PLM（产品生命周期管理）等。如今，一些企业逐步迭代为数字化转型，实现在数字化环境中进行设计研发和生产工艺过程的优化，以数据驱动机床制造及调试的虚拟仿真升级。比较完善的包括管理数字化、服务数字化、研发数字化和产品数字化等，贯穿售前、产品的设计研发、生产、售后等环节，构建起一整套企业管理的数字化系统解决方案，企业领导都非常重视。

(1) 管理数字化。企业现有做法，一般是以ERP为主线，前端搭配CRM，初期的产品设计使用PDM(产品数据管理)过渡，后期进化到PLM以实现产品全生命周期管理。MES(制造企业生产过程执行系统)作为整个车间生产管理系统，是生产执行端，涵盖订单管理、工艺流程、计划排程、生产制造以及品质管控等多个环节，结合软硬件一体化，实现了从生产制造、数据采集、管理运营业务的全面覆盖，服务于加工和装配，服务于业务和财务。MES系统的排产功能则依据ERP系统提供的生产计划进行智能调度和资源优化。为了管理的高效和显性化，很多车间引入了数字化看板系统，显示工作进度、设备状态和生产结果等，以获取实时生产数据，提高车间管理效率，缩短订单交付周期。

(2) 服务数字化。企业通过拓展服务业务，为机床提供远程监控和运维服务支持，实现数控机床的故障预测、诊断和维护。通过对数控机床运行数据的分析和处理，识别出可能引发故障的异常情况，提前预警，降低设备维修成本和停机时间，减少对人工的依赖，提升设备使用效率。不仅提升了企业的服务质量和响应速度，还增强了设备的可靠性和可维护性。

(3) 研发数字化。企业在研发的手段上，除了使用CAD/CAE/CAM等工具进行机床设计和编程外，在实体机制造之前先创建虚拟机床，提前完成机床运动、控制调试及加工软件测试。许多调试工作以仿真形式先行，比如路径规划、节拍优化、机床运动动作测试等，有效缩短研发周期。当机床实物完成后，将虚拟调试好的所有程序导入，可以快速验证其适用性，与在真实机床上调试效果相当，这在新产品开发中极具价值。

(4) 产品数字化。是给用户赋能，例如状态监控、运动过程的仿真等，这些数字化功能都集成在机床上。还有虚拟机床随机看功能，让用户体验到无需观察实机的运动，就可以通过虚拟机床给用户展示机床的加工过程，尤其在用户加工贵重工件、对可靠性要求较高时，可在虚拟机床上进行预加工，提高成功率。虚拟机床技术的软件开发，部分由企业自主完成，也有部分委托给第三方。



3.NC-LINK推广

在推动工厂数字化与信息化升级的过程中，设备集成商及企业需优先解决设备联网与数据采集问题，这是构建MES系统或推进车间信息化建设的基础。然而，当前数控系统及各类公共设备厂商众多，可以说有成百上千的操作系统或数据接口，就有成百上千不一样的通讯协议。面对用户不同工艺要求，面对不同厂商提供的设备，数字化工厂或自动化产线对零件制造数据信息的需求也各不相同，因此在数字化改造前，必须先完成各类设备和系统的协议适配工作，否则数据采集与后续工作将无法顺利开展，这就要消耗大量的资源投入去做接口适配的这个工作。

如果能有一个统一的协议标准，各方均遵循此标准提供数据，无需依赖专有协议，将彻底消除设备间的协议适配问题，显著降低数据采集、转换与连接的成本。企业可将更多精力与资源投入到开发对用户具有实际价值的高效制造应用程序中，从而减少在基础数据采集与整理上的投入。

NC-LINK标准协议正是为了解决这一问题而制定的。我国制造业的体量庞大，若数字化管控系统集成商及企业均基于统一的NC-LINK协议进行数据采集，将无需投入大量人力进行底层兼容性开发，而是专注于管控软件的开发，为用户和企业提供具有易用性和适用性的功能，创造更多价值。即使在引进国外设备或数控系统时，若其支持NC-LINK协议，也将极大简化集成工作，促进国内整个行业的发展与进步。

在数字化与智能制造的大趋势下，企业通常愿意在维护自身私有协议的同时，支持通用的标准协议，前提是该标准协议成熟且应用广泛。目前，NC-LINK标准的推广程度有限，这不仅制约了其迭代更新的速度，也影响了技术的成熟度与行业认可度，是推广动力不足的重要原因之一。尽管NC-LINK在技术层面与国际先进水平相比仍存在一定差距，但其完全自主可控、更新迭代灵活应变的特点，正是我们的优势所在。

NC-LINK推广动力不足的另一个关键因素是企业面临的额外成本问题。数控系统企业原本各自拥有成熟的通讯协议，而且因研发基础和技术来源不同，各企业的私有协议不一样，若要同时支持私有协议与NC-LINK协议，并将NC-LINK集成进数控系统，需要投入额外的研发成本与IT人员进行研发与长期维

护。目前，大多数企业的数控系统没有内置NC-LINK协议。

推广NC-LINK需要多方面力量。一方面，如果用户明确要求支持NC-LINK，那么上游的集成商和APP开发商就会为满足用户需求而开发适应NC-LINK协议的软件和管理系统，进而促进数控系统厂商提供支持NC-LINK协议的系统以满足市场需求；另一方面，如果数控系统厂商普遍提供NC-LINK协议，也将促使上游的集成商去适配NC-LINK，从而构建起完善的上游生态，减少集成商的工作量，形成良性发展循环。但是这个推广过程确实是痛苦的，需要集成商和数控系统厂商先期投入大量的人力和成本，而且还需要相对较长的维护和迭代周期，短期内并不能产生多少明显收益。因此现在两方面还都是处于比较初期的阶段，支持的都不太好。此外，国家从自主可控的角度给予政策支持也至关重要，但仅靠几个项目的支持难以达到预期效果，最终仍需各方力量共同推动NC-LINK的广泛应用。



在梳理机床企业数字化转型的实践与成效时，发现尽管许多企业取得了显著突破，但部分企业在转型过程中仍面临战略方向模糊、技术应用碎片化等问题，折射出在信息化、数字化转型和智能制造的认知层面存在分歧与盲点。因此，有必要先厘清信息化与数字化转型的关系、智能制造的本质内涵。

三、对企业信息化、数字化转型和智能制造的认识

企业信息化、数字化转型和智能制造的概念现在还没有明确的官方定义，但三者之间是有联系和区别的，有必要加以明确。

1.三者概念的关系描述

(1) 企业信息化：是指企业以业务流程的优化和重构为基础，借助计算机技术、网络技术和数据库技术，对生产经营活动中的各类信息进行控制和集成化管理，实现企业内外部信息的共享与有效利用。也可以说是利用信息技术对企业的生产、管理、销售等各个环节进行改造，以提高内部管理效率和决策的科学性，增强市场响应能力。

(2) 数字技术：是一个更广泛的概念，涵盖了所有使用数字信号进行信息处理和传输的技术。这包括计算机硬件和软件、网络技术、数据编码和压缩、数字信号处理等多个方面，同时也涉及信息的存储、检索、分析和应用等方面。数字化则是指将模拟信息转换成数字格式的过程，将客观世界中的事物转换成计

算机唯一能识别的机器语言，即二进制0和1。这个过程通常包括采样和量化，即将连续变化的模拟信号转换为离散的数字信号，以便于计算机处理。数字化是实现数字技术的基础步骤之一，它是信息数字化的前提。

(3) 企业数字化转型：是在企业信息化的基础上，利用数字化技术对物理机床和生产过程进行数字化建模，以优化生产流程，提升产品质量，并通过现代技术和通信手段，改变企业为客户创造价值的方式。数字化转型并不是对企业以往的信息化推倒重来，而是在整合优化企业信息化系统基础上，进一步提升管理和运营水平。数字化转型与企业信息化的区别在于，信息化侧重于将传统业务数字化以提高效率，而数字化转型则更强调利用数字技术改变商业模式，以应对日益严重的劳动力短缺等挑战。

(4) 智能化：是指由现代通信与信息技术、计算机网络技术、行业技术、智能控制技术汇集而成的针对某一个方面的应用，按照与人类思维模式相近的方式和给定的知识与规则，通过数据的处理和反馈，对随机性的外部环境做出决策并付诸行动。智能制造则具体体现在制造过程的各个环节与新一代信息技术的深度融合，通过物联网、大数据、云计算、人工智能等技术，把设计、生产、供应链和售后服务整合成一个高度协同的系统，包括智能产品、智能生产、智能工厂、智能物流等。目前，智能制造仍处于初期阶段，各国政府均将此列入国家发展计划，并大力推动实施。

信息化是数字化和智能化的基础，它通过计算机技术、网络技术等手段实现了信息的电子化和初步的集成与共享，为数字化提供了数据资源和信息基础。数字化是信息化的延伸和深化，进一步将各种信息和物理世界的实体、现象进行数字化处理，使

得数据更加精确、丰富和易于处理，从而为智能化提供了大量的高质量数据。智能化则是信息化和数字化发展的更高目标，借助人工智能、物联网等技术对数字化数据进行深度分析和学习，实现系统或设备的智能行为，如智能决策、智能控制、智能服务等，从而提升整个社会和经济的运行效率和质量。

2. 对机床企业数字化转型的理解

谈到数字化转型，有时会被单纯理解成数字化车间或工厂，其实信息化本身也是数字化转型的重要基础。数字化设计和制造过程能够对机床的生产参数进行精确控制，有效减少人为因素导致的误差。借助对生产过程数据的实时监测和反馈，企业能够及时调整生产工艺、加工参数等，确保产品质量的稳定性。

具体到机床机械结构的数字化建模，这一过程离不开CAD/CAE等专业工具的应用。这些工具可以分析形变、环境温度变化、振动等因素对机械结构的影响，还能分析材料在不同温度条件下的形变特性、结构产生的机械应力以及内部应力的释放情况等。此外，机床的连接方式，如螺栓连接、焊接及整体铸造等不同工艺的效果，也需要借助专业的软件来精确的模拟与评估。

数字化转型的协同效应不仅体现在生产环节，更可全方位拓展至设备、流程、人员、部门及产业链上下游。一方面，数字化转型能够实现设备之间的协同，自动完成调度、排产等工作；另一方面，企业还可以依据数字化模型和数据分析结果，对生产流程进行优化，例如缩短物料搬运距离、调整机床加工顺序、提高设备利用率等。数字化转型还涵盖人员、部门、上下游企业、供应链以及客户等，构成一个庞大的协同工作生态系统。通过数字化平台，企业之间能够实现信息的实时交互与共享，共同优化产品设计和生产工艺，整合资源并开展协同创新，为客户量身定制个性化的解决方案，增强产业竞争力，达成高效的设计、生产和管理目标。

此外，机床本身的数字化同样是机床企业数字化转型的重要组成部分。



3. 机床本身的数字化功能

机床作为车间和生产线上的关键设备，其操作和维护的便捷性对于整个生产流程的顺畅运行起着至关重要的作用。在传统管理模式下，企业依赖于一套成熟的常规方法来掌控生产全局。随着数字化转型的深入推进，可实现更高

效、省力的智能化管理，避免人为干扰导致的错误，通过预测性维护方案，提前规划设备保养，减少设备停机时间，从而提高生产效率。

机床数字化并非无中生有的新应用需求，而是强大的实用工具。它能够帮助在各个应用场景下提高效率，增强可行性，节约大量时间和资金。数字化的范畴非常广泛，企业要做的是从宽泛的数字化内涵中筛选出最适合自己的部分，以实现更高的投资回报比。

需要指出的是，数控机床本身就是数字化产品。机床的数字化还体现在：可视化监控机床工作状态，监控加工条件和诊断刀具磨损及破损情况，自动托盘装卸工件系统，自动空间误差补偿，保证高精度加工和自动生产及长时间无人化生产等。

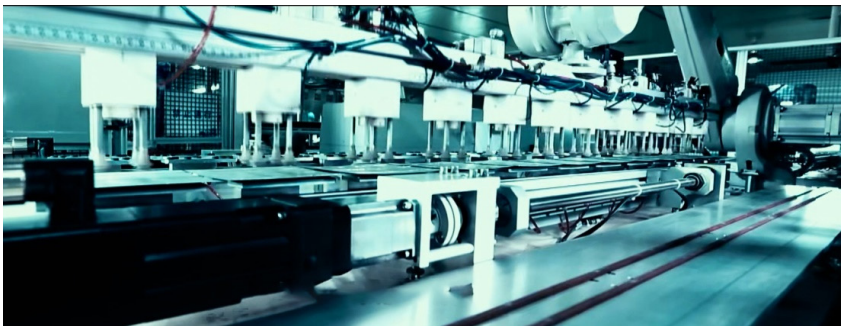
从功能角度来看，机床本身的数字化大致可以分为以下几类：

(1) 新设计的机床：在机床设计与制造的全流程中，融入数字技术与专业软件进行仿真、分析及优化迭代，能够精准识别并修正设计初期的潜在缺陷，规避不必要调整所带来的资源与时间损耗，显著提升产品设计的精度与效率，更快地保障新产品开发成功率。同时，数字化手段贯穿制造环节，通过实时监测与智能调控，精简工序，削减浪费，实现生产效率与产品品质的双提升，有效缩短从研发到量产的周期，降低开发成本。

(2) 已有的机床：面对新的市场竞争态势，尤其是那些销售效果较好的机床，通过实施数字化升级举措来提升其性能表现，例如提高加工效率、加工质量和加工稳定性等，以满足用户更高的要求，提升企业的竞争力，使竞争对手处于跟随状态，这将对企业极为有利，同时也能为行业技术的持续进步与创新注入源源不

断的动力。

(3) 安装传感器：数控机床通过数字化设计和优化，实现了虚拟与现实的无缝交互，提高了加工精度和效率。在机床设备的数字化进程中，为其安装传感器是一关键步骤，这些传感器能够实时采集设备运行数据，并将这些数据稳定传输至云端或本地服务器，进行分析和处理。例如，通过对机床振动数据的分析，可以提前预测机床刀具的磨损程度与磨损趋势，提前安排刀具的更换维护，避免因刀具损坏而引发的加工质量问题，确保生产过程的连续性与稳定性。



4. 数字孪生技术

在机床数控系统的数字化进程中，数字孪生技术不仅带来震撼的视觉效果，更在实际应用中发挥着举足轻重的作用。数字孪生极大地改变了机床开发和零件加工中的高风险及不确定性，解决了试切阶段长期存在的高耗能、高耗资、高耗材等弊端。当下数控系统的数字孪生一般做到了以下几个层次：

(1) 比较初级的：是构建包含机床、刀具、夹具和工件等实体的三维几何模型，搭建机床各部件之间的连接配合关系，以及各轴之间的精确运动关系，通过模拟真实的零件切削过程，包括合理选择切削参数、科学规划刀具路径、优化分配加工余量等，确保加工过程的高效和精确。同时，利用模拟结果验证机床结构的合理性和运动干涉情况。

(2) 中级的：是将加工零件的模型导入数控系统后，系统可自动生成对应的加工程序，并在虚拟机床上进行模拟加工，加工完成后，系统能够对整个加工过程及结果进行深入分析。其内置的大数据应用场景能够对加工参数、加工条件、刀具负载等进行优化分析，如果加工参数超出机床的承受范围，系统会自动提示修改。此外，机床还可以配备在线测量功能，加工完成后，自动调用



测头测量零件尺寸，并与理论值对比，若存在偏差，系统将自动调整和补偿相关加工参数，并反馈以进行二次加工；若发现过切，系统将立即停机报警，从而实现对加工过程和程序的自主优化。

(3) 更高级的：是以西门子为代表的在数字孪生世界里构建一个虚拟数控内核，能够模拟真实机床上的逻辑运动。我们所见到的每一步动画，均是在虚拟数控内核中执行真实机床上给定的G代码指令，调用和执行PLC等指令操作时所呈现出的结果，执行完成后又会反馈到创建的虚拟环境中，这一过程是基于真实计算得出的。例如，在加工常见的金属材料（如钢、铁、铝）时，系统不仅能够模拟刀具路径和进行干涉验证，还能进一步模拟出材料的加工运动特性，模拟刀具在设定速度下能否实现有效加工，若需要更大的加速度，系统会智能提醒机械设计中的电机选型是否合适、伺服电流是否充足，或者是否存在冗余设计导致成本增加等问题。此外，虚拟内核还会精确计算所配置电机和伺服性能在刀尖处的表现，包括速度和加速度等参数，从而确保加工质量的一致性，有效避免模拟加工结果与实际加工结果出现偏差的情况。当加工零件的加工时间较长（以天计）或工件材料昂贵且程序尚未编写完成时，系统内部还可增加一个加速条的形式，让它运算的更快，通过快速验证，可以提醒程序员编程时应注意某些难加工问题，更好地优化程序。当然这种加速功能也是有其极限的。

四、机床企业数字化转型的相关思考

机床工具行业作为制造业的根基，为航空航天、汽车、船舶等高端

制造领域提供了重要支撑。在当下，数字化转型已成为中国机床工具企业提升竞争力、迈向高端制造的关键路径。通过数字化技术赋能，企业能够优化生产流程，提高产品质量，实现精准服务，从而在激烈的市场竞争中脱颖而出。

目前，不少机床企业已在设计、生产环节以及产品功能上融入数字化技术。同时，各地区政府也在积极推动数字化转型，搭建区域级工业互联网平台，实现设备资源与技术服务的共享，促进协同制造。越来越多的机床企业已意识到数字化转型的重要性，行业协会连续以数字化转型为主题，举办研讨会与成果展，激发了企业之间的学习交流热情。许多中小企业也开始主动寻求数字化改造方案，尝试引入新技术、新模式，以改善经营环境，摆脱不良的同质化竞争。

在数控机床的全生命周期中，会产生大量关于设计、生产以及产品应用的数据和信息。如何有效采集和分析这些数据，并将其用于提高生产效率，已成为提升企业未来竞争力的关键。

数字化转型是一个复杂且庞大的课题。在实际操作中，部分企业的尝试取得了成功，但也有一些企业的努力付诸东流。要解决这一问题，关键在于技术的落地必须结合具体行业、应用场景以及企业的实际情况。每个企业在人力储备、资金状况、发展决心和研发投入等方面都存在差异，因此不能盲目跟风。企业一定要有清晰的认识，先从高处看全局，再结合自身条件，找到最重要的适合自己的那一部分做起来。正如毛主席在抗美援朝时期提出的“你打你的，我打我的！”在全球数字化转型的浪潮中，很多时候企业家也需要具备这种破局思维，立足自身实际，走出一条独特的数字化转型之路。



1. 机床企业数字化转型的作用

机床作为“工业母机”，在制造业中占据着举足轻重的地位。机床企业的数字化转型，已然成为推动制造业迈向数字化变革的关键驱动力。从本质上讲，它意味着将数字技术全方位、深层次地融入机床的设计、生产、销售、服务等各个环节，打破传统制造业的固有模式，构建一个智能化、高效化、协同化的全新生态系统。

(1) 设计环节：是数字化转型的前沿，借助计算机辅助设计（CAD）软件、虚拟现实（VR）/ 增强现实（AR）技术，工程师能够突破二维图纸的局限，进行三维立体建模，提前模拟产品性能，精准优化产品结构，将传统的试错式设计升级为可预见性创新，大幅缩短新品研发周期，使设计出的机床更贴合市场多样化、个性化的需求。还可通过模拟分析不同工况下机床的应力分布，通过数据闭环实现缺陷自诊断与参数自优化，避免实际加工中发现结构缺陷而造成的浪费，提高机床的可靠性。

(2) 生产环节：是数字化转型的主阵地，通过设备联网，将数控机床、工业机器人、自动化物流系统等生产要素无缝连接，实现对生产过程的实时数据采集与监控。基于这些数据，制造执行系统（MES）能够发挥其强大的智能排产功能。它能够根据订单需求、设备状态、物料库存等多方面信息，自动生成生产计划，精准调度生产任务，优化生产流程，合理分配人力、物力和设备资源。这不仅有效避免了生产拥堵或设备闲置，还可显著提高生产效率，让生产节奏更加紧凑、有序。此外，在物料搬运、上下料、装配等环节，自动化设备和机器人取代传统的人工操作，它们以精准的动作、稳定的性能，可实现24小时不间断作业，不仅能提升生产节拍，还将人工操作带来的误差降至最低，使产品质量的一致性和稳定性得到保障，同时减少浪费，进一步降低生产成本，为企业在市场竞争中赢得更大的优势。

(3) 销售与售后环节：因此成为企业提升竞争力和服务质量的关键领域。借助大数据分析客户的浏览习惯、采购历史、地域分布等信息，企业得以精准定位目标客户群体，制定针对性的营销策略，精准推送符合潜在客户需求的机床产品，提高营销效率和销售转化率。售后服务方面，通过物联网技术，机床在使用过程中设备的运行状态、故障信息等关键数据能够实时回传至机床企业的数据中心，维修人员借助远程诊断工具，能够快速对故障进行精准定位和分析，对于简单故障，维修人员可以远程指导客户快速排除，确保设备迅速恢复运行；而对于复杂故障，企业则能够提前做好维修配件和专业人员，实现精准维修。大幅缩短停机时间，提升客户体验和满意度，赢得客户长期信任与合作。

机床企业实施数字化转型，核心在于破解一系列棘手难题：将原本无法完成的任务变为可能，让低效的流程变得高效快捷，将高风险的环节变得成功率更

高、风险更低等等。这一转型过程，是通过引入前沿技术手段，提升企业的技术实力，从而更好地适应数字化时代带来的新挑战和新要求。

当下，机械制造业正面临着严峻的人力短缺问题。许多年轻人不愿从事相关行业，导致行业人员缺口不断扩大。因此，企业对于提升生产效率、减少对人力的依赖的诉求愈发迫切。如何通过数字化转型升级来满足企业的这一需求，已成为整个社会亟待解决的重要课题。这绝非仅仅依靠国家出台政策、投入资金、示范项目引领就能解决，而更需要企业实实在在地投入人力、物力和财力，深入分析自身特点与基础条件，精准规划出符合自身发展的数字化转型路径，一步一个脚印地付诸实践。



2. 企业数字化转型面临的问题

数字化转型能够促进企业创新，激发企业活力。数字化技术为企业提供了更多的创新工具与平台，企业可以利用这些资源开展新产品研发、新业务模式探索等活动，从而在市场竞争中脱颖而出。

（1）为何必须由企业一把手主导

济南二机床前董事长张世顺在演讲中曾分享过他对企业数字化转型的两个重要观点，引发了众多企业的共鸣与思考。一是企业数字化转型一定是个一把手工程，如果一把手不下决心，下面的人很难去推行，这个观点已经越来越多的得到企业的认可。第二个是企业数字化转型做起来眼要高手要低，“眼高”的含义在于做之前要有很清晰的认知，不一定是一把手本人，也可以是被授权的一个数字化团队，要有全局观念，从战略高度审视数字化转型的方向和目标，确保转型工作能够契合企业的整体发展战略。“手低”则是在实际操作中，要基于企业眼下有限的基础条件、有限的预算、有限的人员等，制定出切实可行的方案，避免好高骛远，确保转型工作能够落地生根，真正为企业带来价值。

机床企业进行数字化改造需购置硬件设备、升级软件系统、引进专业人才及建设数据中心等，投资回报周期长，短期内难以看到显著经济效益提升，企业决策层易陷入犹豫观望。此外，数字化转型带来的效益不仅体现在成本降低、产量提升等直观指标上，还包括产品质量优化、客户满意度提高、市场响应速度加快等隐性收益，难以用传统财务数据精准度量，导致企业难以清晰评估转型投入产出比，从而制定出合理的转型策略与资源配置计划。

因此，数字化转型并不意味着一把手要成为数字化的专家，但一把手的决心和行动至关重要。一把手需坚定不移地推动数字化转型，将其融入企业长期发展规划，明确方向并提供充足资源。同时，要定期评估转型效果，及时发现并解决问题，持续关注并推动转型进程。

（2）数字化转型还是一个信任工程

企业要上数字化，通常会组建专门的工作小组来负责项目规划和预算编制。

然而，当工作小组提交预算时，领导层往往面临艰难的决策：这个预算是否合理？投入这么多资金后究竟能带来怎样的效果？这些问题很难在短时间内得到清晰的答案。由于数字化转型的复杂性和不确定性，领导层往往难以仅凭表面数据做出准确判断。

工作小组在数字化转型中扮演着至关重要的角色。他们需要带着明确的任务和目标，深入学习、咨询和研究，明确企业真正需要解决的核心问题，并从不同角度充分考虑是否有优化空间。只有这样，才能制定出详尽且准确的工作方案和预算，为领导层的决策提供有力支撑。因为不同企业的数字化转型深度和广度各异，仅从表面看到的结果可能大同小异，但实际投入的资金和内在逻辑却可能天差地别，这些差异需要经过时间的积累才能逐渐显现。

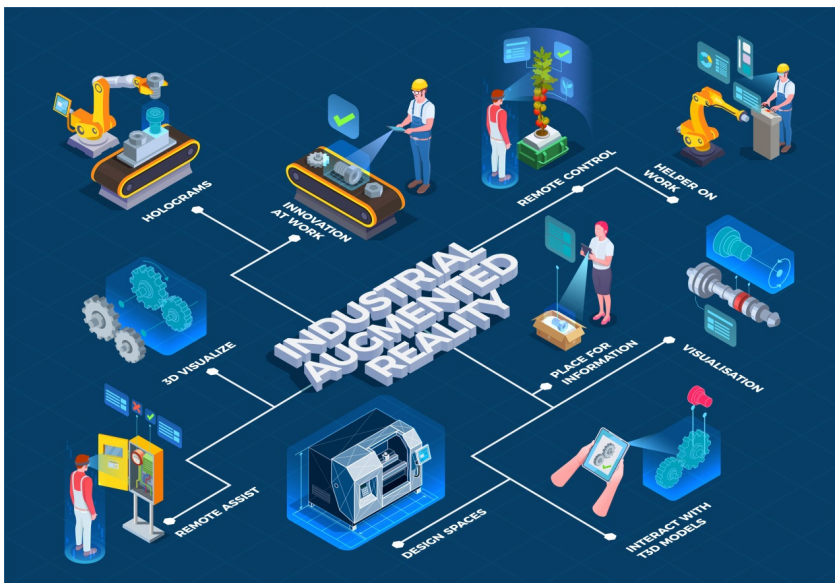
企业领导对工作小组要有充分的信任。数字化转型最终需要投入大量资金，这些资金不仅包括硬件设备的采购费用，还包括集成商的报价和利润，以及企业自身的隐性投入。这些隐性投入包括人员的时间和精力、员工和管理者思维的转变等，都需要时间去适应，需要由上而下接受这样的技术变革，虽无法直接体现在财务报表上，但却是实实在在的投入并直接影响着企业的转型进程。因此，企业在制定前期方案和规划时，必须基于企业的特点和现状，确保方案真正契合企业的需求。

数字化转型的许多环节具有隐性特征，难以直接观察，这给企业领导层的决策带来了很大困难。他们不可能像专业工程师那样对数字化相关技术有深入的了解，但又必须具备一定的专业素养，才能理解并有效推进。在国内，许多机床企业规模很大，但电气工程师数量却很少，甚至有时仅为个位数。这些工程师不仅要承担繁

重的电气设计和设备调试工作，还要兼顾数字化转型的研究，精力有限。在这种情况下，选择合适的合作方显得尤为重要，合作方需要真正深入企业，全面了解企业的具体情况，才能设计出切实可行的数字化转型规划。

在数字化转型过程中，企业引入新的数字化技术和工具，员工需要信任这些系统能够高效助力工作，而非增添负担，要相信系统中的数据是准确的，员工还需要信任企业在数字化转型过程中的决策是为了整体的发展和效率提升。不同部门之间需要共享数据来实现业务流程的优化，这种数据共享建立在部门间相互信任的基础上。供应商同样需要信任企业数字化平台的稳定性和安全性，同时企业也需要信任供应商能够按照数字化流程准确地提供货物和服务。企业与客户的互动方式发生了很大变化，企业会通过网站、移动应用等数字化渠道收集客户数据，以提供个性化的产品与服务。客户需充分信任这些技术、流程和数据的安全性、可靠性及隐私保护，相信企业会妥善保护其关键信息，并利用这些信息提供高质量、可靠的服务，给他们带来更好的体验等等。

在当前数字化浪潮的推动下，国家滚动出台了一系列支持政策，这些政策不断更新和完善。然而，如何将这些政策转化为企业实际的效益，无论是集成商还是制造企业，要在数字化转型中实现共赢，真正为企业带来实实在在的效果，不仅需要技术的支持，更需要各方的信任与合作。



(3) 解决成本与效益平衡问题

企业实施数字化转型，面临的是全方位的巨大投入。为了实现数据的高效存储、处理与传输，企业需要购置或更新先进的服务器、网络设备、智能终端等硬件。这些设备价格昂贵，动辄数百上千万，软件系统的采购与定制开发成本同样不容小觑。且随着技术的快速迭代，更新换代的频率也在加快，使得企业在软硬件方面的投入持续上升。

数字化转型需要既懂技术又懂业务的复合型人才，这类人才在市场上供不应求，薪资待遇较高。企业不仅要支付高额的薪酬，还需投入大量资源用于人才培训与职业发展规划，成为企业数字化转型中的一大开支。

然而，与高昂的成本相对应的效益产出却并非立竿见影，回报存在滞后性和不确定性。转型初期，企业会面临业务流程的调整与磨合问题，新的数字化

系统与原有的业务模式可能存在冲突，员工需要时间去适应新的工作方式，导致工作效率在短期内或许不升反降。更糟糕的是，如果企业在数字化转型过程中未能精准把握市场需求，推出的产品或服务无法满足客户的期望，即使投入大量资源进行数字化改造，也难以获得预期收益。

如何平衡这些难题，以较小成本撬动更大价值，考验着企业家的智慧。企业应立足定位与目标，做好顶层设计，基于自身产品特点、市场定位、客户群体制定数字化转型战略。大型龙头企业瞄准全球高端制造，以打造智能化工厂、引领行业标准为目标，全方位布局数字化技术研发、产业链协同创新；中小企业聚焦细分市场，优先解决生产瓶颈、质量痛点，选择性价比高、易实施的数字化项目，如引入简易MES优化车间调度、利用云服务外包设计计算，逐步提升数字化能力。企业还可将数字化转型分解为短、中、长期目标分阶段稳步推进，先从关键环节入手，做容易见效的部分，比如设备联网、数据采集等，优先实施能明显提升效率或节省成本的项目，比如预测性维护，减少停机时间；为客户提供设备状态监控服务，增加服务收入；通过数据优化供应链，减少库存成本等等，这样初期投入少，见效快，能增强信心。各阶段设定明确里程碑与考核指标，按照自己的节奏，避免盲目跟风与全面铺开带来的资源浪费与项目烂尾，降低转型风险与成本。

在硬件设施采购方面，企业可以通过租赁、共享等方式降低一次性投入成本；在软件系统采购与开发方面，选择适合自身需求的软件产品，合理控制定制开发的范围与深度；利用政府补贴、合作生态来分担成本。优化人才结构，通过内部培训与外部引进相结合的方式，逐步提升员工的数字化技能水平，同时建立科学合理的绩效考核与激励机制，提高人才的使用效率与价值创造能力。

数字化转型和智能制造是一项长期投入的系统工程，绝非一蹴而就，其真正的价值在于运用技术去改变企业的思维方式和运营逻辑。企业必须在战略上保持足够的耐心，在执行上注重细节，每个阶段都要有扎实的基础。未来的竞争，不仅是技术层面的竞争，更是思维方式的深度较量。



3. 我国机床企业数字化转型的有力因素

我国机床企业的数字化转型是近年来国家战略推动下的重要产业升级方向，技术的发展和市场需求加速了这一进程。机床企业的数字化转型，包括产品研发、生产制造、企业管理及服务等多个方面，几乎所有企业已或多或少地参与进来，虽然各企业转型的深度和广度有所不同，但转型的目的是一致的，即提高效率、降低成本、提升自主可控的能力和市场竞争力等，不是为了数字化而数字化。

(1) 政策推动

在国家层面，出台了如《中国制造 2025》、《工业互联网发展行动计划》、《工业强基工程》等一系列政策，推动了机床工具行业的技术升级和产业链完善；《制造业数字化转型行动方案》强调要加快核心技术攻关和成果推广应用，推动设备联网、协议互认、标准制定和平台建设；国家制造业转型升级基金将高端数控机床等领域的智能化改造作为重点支持对象。在地方层面，各地政策形成叠加效应，通过设立产业基金、提供税收优惠、给予财政补贴以及开展“智改数转”行动等方式，为机床企业的数字化改造提供了实实在在的资金支持和政策便利。降低了企业数字化转型的成本，提高了企业开展数字化转型的积极性和主动性。

(2) 技术应用

一方面，机床企业基本普及了设计过程的数字化，越来越多的机床企业将工业互联网技术应用于生产制造中。CAD、CAE、CAM、ERP、SCM、CRM等在机床企业中得到广泛应用，实现了企业内部管理的信息化和数字化。有些企业还通过设备联网，实现了机床之间、机床与系统之间的数据共享，对生产过程进行实时监控、调度和优化，提高了生产效率和设备利用率。

另一方面，部分机床企业开始利用大数据分析技术帮助机床企业挖掘生产数据中的价值，用于优化生产流程、预测设备故障，实现预防性维护，降低设备停机时间。将人工智能技术应用于机床的自适应控制、智能编程等方面，提高了加工效率和质量。开始采用数字孪生技术，为机床设备创建虚拟模型，实时反映物理实体的状态和性能。有的企业已通过数字孪生模型，在虚拟环境中进行产品设计验证、工艺优化和生产调度模拟，减少了实际生产中的试错成本。企业实现了对人、财、物等资源进行集中管理和优化配置，提高了管理效率和决策的科学性。

(3) 生态协同

机床行业的数字化转型不仅是单个企业的努力，还涉及产业链上下游的协同合作。企业借助数字化手段，与上下游供应商和客户之间的信息交互更加顺畅高效，实现了供应链的协同设计、协同采购、协同生产和协同物流，根据市场需求快速调整生产计划和供应链策略，提高了供应链的响应速度和灵活性，降低了库存成本和物流成本。有些企业通过工业互联网平台，实现数据共享和资源整合，比如工艺参数共享，大幅提升设备利用率和加工效率，提升了整个产业链的效率。企业从单纯的设备制造商向综合服务提供商转变，基于数字化技术，开展远程运维、故障诊断、设备租赁等，提高服务效率。

一些有能力的企业，他们更是构建了自己的工业互联网平台，搭载自主数控系统，应用虚拟调试技术，大幅缩短研发周期，精确控制加工精度，压缩设备调试时间，不仅提升了加工过程数据的实时处理效率，还减少了远程运维服务的故障响应时间，显著提高了设备利用率，为企业带来了实实在在的效益提升。

4. 自主可控是必须走通的路径

机床企业的数字化转型，不仅是生产效率与智能化水平的提升，更是全球竞争格局重构的体现。自主可控成为保障数据主权、规避技术封锁、实现可持续发展的核心。机床企业通过数字化转型，能够打破信息孤岛，实现数据的集中管理和高效共享，不仅提高企业内部的协作效率，还为产业链上下游企业提供数据支持，促进整个行业的协同发展。

数字化转型依赖工业互联网平台，若使用国外系统，国外软件，加工参数、设备状态、工艺模型等数据可能被境外服务器实时监控。应采用

国产工业云平台、部署本地化加密协议、国产软件，确保设计、编程国产化，工艺数据不出厂。

以协会主导推广的NC-LINK为例，现在在国内机床企业和用户中推广的还不够理想，其实，欧洲主导的OPCUA及美国主导的MTConnect，都已经发展近20年了，推广得也不快，说明这确实需要一个比较漫长的过程，急不来。不过，相关的工作还是要持续做下去，特别是对于NC-LINK来说，目前还不很完善，将来如何完善，谁来完善，谁来做标准的推广工作，这些都需要相关部门沉下心来做好总体调度，分工合作，以“应用—改进—完善”这样的良性循环持续推进，直至成熟，真正打造出适合中国制造业的成熟的统一的标准协议。

NC-LINK是我国真正自主设计开发且自主可控的通讯协议，所有的软件设计以及整个生态的建立和维护都是自己做的，这也是保障我国制造领域生态安全很重要的一环。如果我们照搬并支持OPCUA、MTConnect等国外相对成熟的协议，那么我们会依附于它们，受制于它们。这些协议也会不断发展，后续我们需要一直跟随它的发展，并且与协议相应的一些附属的各种设施，不管是软件还是硬件，无论代码还是生态等，等都需要与它们的生态去兼容和接入，这显然不是我们所希望的。

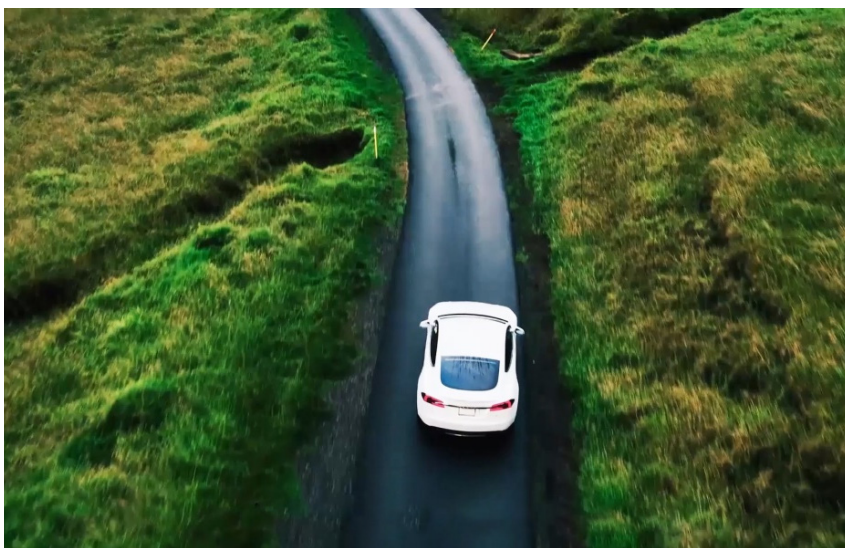
作为过渡方案，携汇智联开发了软硬兼备的NC-LINK接口转换模块，一端与数控系统私有协议通信，另一端转换为NC-LINK协议。这使得上游集成商和其他软件开发商能够通过NC-LINK协议与设备进行通信，实现协议兼容。如果企业积极采用，将推动相关技术不断进步。

未来，工业通信标准也可能成为大国利益诉求和博弈的焦点。虽然互

联方式的变化更迭带来了便利，但不同的通信标准又造成了新的壁垒。机床行业通信标准的建立，也绝不仅仅是一个协会、一个联盟的事情。国家的一些政策，包括规划的2025、2030、2035几个时间节点，都设定了智能制造的目标。如果NC-LINK协议能够与这些政策相结合，其推广动力将会更足，推广速度也会更快。

机床企业的数字化转型，绝非只是简单地“上云用数赋智”，而是一场深层次的变革，涉及数据主权、技术生态和产业规则的重塑，自主可控是抵御“卡脖子”风险的坚固盾牌。只有掌握从底层芯片到顶层软件、从物理设备到数字孪生的全栈能力，才能在全球工业4.0的竞争中，实现从跟随者到规则制定者的跨越。

五、结语



随着数字化转型的深入推进，机床工具行业将迎来更多发展机遇。数字化转型不仅是企业自身发展的需要，更是推动行业生态与协同发展的关键。通过数据共享、生态构建、产业链优化、智能制造、跨行业合作、人才培养和客户体验提升等多种方式，机床行业的数字化转型将为整个制造业的高质量发展注入新的活力，同时，国家政策的持续支持和市场需求的不断升级，将成为行业高质量发展的有力保障。

数字化转型不仅是技术的升级，更是企业战略思维的转变。机床企业需要从整体战略的高度出发，冷静审视现状，关注技术、人才、数据、成本效益等关键问题，不断地评估和改进，将数字化转型融入企业的核心竞争力之中。通过精准的市场洞察、高效的资源配置和持续的技术创新，动态调整策略，紧跟技术迭代与市场变化节奏，探索出适合自身的数字化发展路径，使企业能够在数字化时代中脱颖而出，实现可持续发展。

阳春三月，北京城喜迎一场罕见瑞雪，恰似大自然对即将到来的CIMT2025国际机床展览会的深情祝福。展会将于4月21日至26日隆重举行，我们诚挚邀请全球机床行业的同仁拨冗莅临。让我们携手共进，共同见证全球机床企业的辉煌成就与创新进步，开启机床行业新篇章！□

绿色智造与再制造：超精密机床在循环经济中的技术迭代与商业模式创新

通用技术集团机床工程研究院 常博宇

【摘要】本文探讨了绿色智造与再制造背景下，超精密机床在循环经济中的技术迭代与商业模式创新。研究首先阐述了绿色智造与再制造的概念、发展历程及在循环经济中的作用，分析了超精密机床的技术特点及其在制造业中的重要性。其次，深入探讨了超精密机床在绿色智造与再制造中的技术迭代路径，包括关键技术突破下的单元创新、智造模式与流程协同的集成创新，以及产业链与生态系统全面升级的系统重构三条路径。再次，研究了超精密机床在循环经济中的商业模式创新，包括产品服务系统从交易到价值共享转型、逆向供应链的数字化整合以及碳资产运营三个方面。最后，探讨了超精密机床在循环经济下的政策协同与产业生态构建。研究表明，超精密机床在推动循环经济发展中具有重要作用，通过技术创新和商业模式创新，可以实现资源高效利用和环境保护的双重目标。

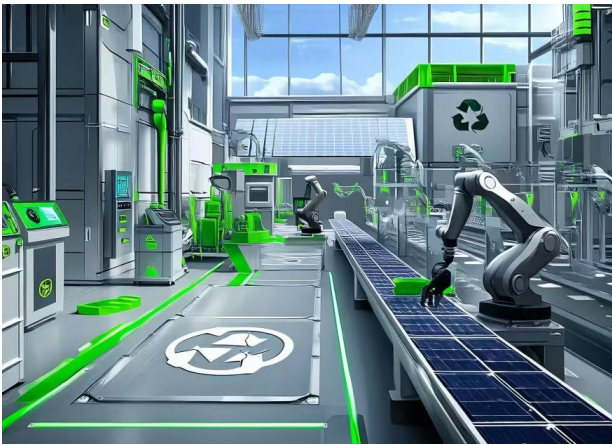
一、引言

党的二十大报告中指出要“推动制造业高端化、智能化、绿色化发展。”为我国制造业的高质量发展提供了清晰的绿色转型需求。制造业作为我国实体经济的重要基础，为社会提供了丰富的产品与财富，但也伴随着资源的消耗和废弃物的排放等环境问题。面对如何同步推进全面建设社会主义现代化国家与2060年实现碳中和目标的挑战，制造业的未来发展无疑面临着重大的考验。进一步的，超精密机床作为高端制造业的核心装备，其技术水平和应用范围直接关系到航空航天、精密仪器、半导体等关键领域的发展。另一方面，由于其制造过程对材料、能源和工艺要求极高，传统的线性经济模式导致资源浪费和环境污染问题突出。因此，其绿色化与再制造对于不仅关乎产业链韧性，更直接影响高端装备的自主可控能力。据预测，2027年我国机床保有量将突破1000万台，其中约15%的设备面临淘汰或升级需求。

此外，在全球资源日益紧张和科技迅猛发展的当下，循环经济成为推动制造业向绿色、智能及可持续发展转

型的关键策略。循环经济是以资源的高效利用和循环利用为核心，以“减量化、再利用、资源化”为原则，符合可持续发展理念的经济增长模式。虽然循环经济近年来受到了广泛关注，但仍存在一些重要的研究缺口。一方面，技术与创新方面的研究不足。尽管已有一些技术被应用于资源回收和再利用，但在不同行业和场景下的技术适配性、成本效益分析以及技术创新路径仍需进一步探索。另一方面，商业模式与市场机制的研究缺口较大。如何设计有效的商业模式以推动循环经济在实践中的落地，以及如何通过市场机制促进资源的循环利用，仍需更多的研究探讨。

因此，本文旨在探讨绿色智造与再制造在超精密机床领域的技术迭代路径，为循环经济理论在高端制造行业中的应用提供了新的视角。并试图通过分析技术迭代与商业模式创新的协同机制，期望揭示循环经济背景下高端制造企业如何实现资源高效利用与可持续发展的内在逻辑，以期为制造业的可持续发展提供理论指导和实践参考。



二、相关理论概述

1. 绿色智造与再制造的概念及发展

绿色智造是指将绿色理念与智能制造技术相结合，通过资源高效利用、能源节约和环境保护等手段，实现制造业的可持续发展。再制造则是指通过对废旧产品进行专业化修复或升级改造，使其性能达到或超过原产品水平的过程。这两者在循环经济中扮演着重要角色，通过减少资源消耗、降低环境污染，推动经济与环境的协调发展。

绿色智造与再制造的发展历程可以追溯到20世纪90年代。随着环境问题日益突出和可持续发展理念的普及，各国开始重视制造业的绿色转型。进入21世纪，随着信息技术和智能制造技术的快速发展，绿色智造与再制造进入了一个新的发展阶段。在循环经济中，绿色智造与再制造通过实现资源的循环利用和产品的全生命周期管理，大大提高了资源利用效率，减少了环境污染。

超精密机床作为制造业的核心装备，在绿色智造与再制造中发挥着关键作用。其高精度、高效率的特点不仅能够提高产品质量和生产效率，还能减少材料浪费和能源消耗。同时，超精密机床在再制造过程中也发挥着重要作用，通过对废旧机床进行精密修复和升级，延长了产品生命周期，减少了资源消耗。

2. 超精密机床的技术特点及其在制造业中的重要性

超精密机床是指能够实现亚微米级甚至纳米级加工精度的机床设备。其主要技术特点包括：高精度、高刚性、高稳定性和高智能化。这些特点使得超精密机床在航空航天、电子信息、光学仪器等高端制造领域发挥着不可替代的作用。在制造业中，超精密机床的重要性主要体现在以下几个方面：

一方面，超精密机床是提升产品质量的关键。在航空航天、精密仪器等领域，产品精度直接决定了其性能和使用寿命。超精密机床能够实现纳米级加工精度，大大提高了产品质量和可靠性。其次，超精密机床是推动技术创新的重要工具。随着产品向微型化、精密化方向发展，传统加工技术已无法满足需求，超精密机床为新材料、新工艺的研发提供了有力支撑。

另一方面，超精密机床是提高生产效率的有效手段。其高精度、高效率的特点不仅能够缩短生产周期，还能减少废品率，从而降低生产成本。最后，超精密机床在推动制造业绿色转型中发挥着重要作用。通过减少材料浪费、降低能源消耗，超精密机床为实现绿色制造提供了技术保障。

三、超精密机床的技术迭代：从单元创新到系统重构

1. 单元创新：关键技术的突破

关键技术的突破与创新是推动超精密机床发展的核心动力。超精密机床的技术迭代首先需重点突破绿色材料与设计、节能制造工艺、智能监测与维护以及再制造技术等关键技术。绿色材料与设计方面，采用轻量化、可回收和环保材料替代传统高能耗材料，并通过模块化设计提升机床的可拆卸性和可维修性。节能制造工艺方面，开发低能耗、低排放的制造工艺，如增材制造（3D打印）技术，优化传统加工工艺，如采用干切削技术减少冷却液的使用。智能监测与维护方面，通过传感器和物联网技术实现对机床运行状态的实时监测，预测性维护技术可以减少非计划停机时间，延长机床使用寿命，降低资源浪费。再制造技术方面，针对超精密机床的核心部件（如主轴、导轨等），开发高精度再制造技术，如激光熔覆、纳米表面修复等，恢复其性能并延长生命周期。

（1）绿色材料与设计革新

基于轻量化与抗振性协同进化的材料革新。陶瓷基复合材料主轴的突破标志着超精密机床材料革命的开始。以日本东芝机械MSV-5000机型为例，其采用碳化硅纤维增强陶瓷基复合材料的主轴系统，不仅实现40%的减重，更通过纳米级晶界调控技术将热变形系数降至 $0.8 \times 10^{-6}/K$ ，在连续加工中温升波动控制在 $\pm 0.3^{\circ}C$ 以内。德国斯宾纳机床的仿生拓扑结构床身则从生物力学中汲取灵感，通过多孔蜂窝结构与梯度密度设计，将振动衰减率提升60%，同时降低铸造环节30%的能耗。此类创新推动机床基础部件向“轻如蝉翼、稳若磐石”的方向进化。

(2) 节能降耗的工艺突破

①切削介质革命：从污染控制到性能跃升。水基纳米流体的突破性进展体现在摩擦学性能的颠覆性改变。添加二硫化钼/石墨烯复合纳米颗粒（粒径 $<50\text{nm}$ ）的新型切削液，在钛合金加工中将摩擦系数从0.15降至0.05，同时切削温度降低 120°C ，刀具寿命延长3倍。微量润滑（MQL）技术的参数优化模型则通过机器学习算法，将钛合金切削力波动区间从 $\pm 15\%$ 压缩至 $\pm 5\%$ ，加工表面粗糙度Ra值稳定在 $0.4\ \mu\text{m}$ 以下。

②废屑高值化回收：循环经济的技术突围 铝合金屑真空热压成型技术通过梯度加压（ $0.1\sim 1.5\text{GPa}$ ）与温度场控制（ $450\sim 520^{\circ}\text{C}$ ），使再生材料密度达到理论值的98%，抗拉强度恢复至原材料的92%。更革命性的是硬质合金屑等离子体雾化技术，通过 3000°C 高温等离子体将WC-Co废屑直接气化，冷凝后获得粒径分布 $D_{50}=25\pm 5\ \mu\text{m}$ 的球形粉末，3D打印成品致密度达99.5%，成本较传统粉末降低40%。此类技术使机床加工废料从环境负担转变为战略资源。

③无害化处理技术：化学污染的终极解决方案 超临界 CO_2 萃取再生工艺在机床报废油液处理中展现出惊人效率。在压力 $8\sim 12\text{MPa}$ 、温度 $35\sim 45^{\circ}\text{C}$ 条件下， CO_2 对矿物油的溶解度达 0.8g/g ，经三级分离后可获得SAE 5级再生基础油，残留重金属含量 $<1\text{ppm}$ 。该技术较传统蒸馏节能60%，且无二次污染，已在江苏某再制造基地实现日处理20吨废油液的规模化应用。

(3) 智能检测与系统维护



①工艺参数动态优化：能效革命的实时推手。Sandvik Coromant开发的自适应切削系统，通过数字孪生实时映射切削过程中的力-热-振耦合关系，动态调整进给速率与主轴转速。在航空铝合金薄壁件加工中，该系统使能耗降低18%，同时将加工变形量控制在 0.02mm 以内。该技术的进阶版本已实现与车间能源管理系统的联动，能根据电网实时电价优化加工时序，在浙江某模具厂实现综合用能成本下降12%。

②碳足迹可视化平台：绿色制造的神经中枢。数字孪生与区块链技术的融合催生出新一代碳管理平台。三一重工建立的机床碳足迹追踪系统，通过智能电表、流量计等物联网设备采集500+维度数据，结合区块链不可篡改特性，生成符合ISO 14067标准的碳足迹报告。该平台使企业产品碳标签认证周期从3个月缩短至7天，并支持碳配额交易的自动核销。

当前，超精密机床的绿色智造已突破单一技术改进阶段，进入“材料-工艺-运维-回收”全链条协同创新的新纪元。从东芝机械的陶瓷主轴到中国矿大的能量回收系统，从超临界 CO_2 再生技术到量子传感监测，每个技术突破都在改写机床产业的生态位。未来竞争将聚焦于“物理-信息-能源”三元系统的深度融合，唯有实现从单元创新到系统重构的跨越，方能在全球碳中和竞赛中占据制高点。

(4) 再制造技术体系升级

1) 再制造性评估与寿命预测

损伤检测技术的多维突破。再制造性评估的核心在于对废旧机床损伤状态的精准识别。太赫兹成像技术（THz-TDS）通过 $0.1\sim 3\text{THz}$ 频段的电磁波穿透非金属材料，可实现对铸铁床身内部裂纹的非接触式检测，分辨率达 $0.1\ \text{mm}$ ，较传统超声波检测灵敏度提升3倍以上。例如，某航空发动机涡轮盘再制造项目中，太赫兹成像技术成功识别出深度 $2\ \text{mm}$ 的亚表面微裂纹，避免了传统磁粉探伤的漏检风险。同时，X射线残余应力分布建模技术结合同步辐射光源，可量化分析机床导轨的应力梯度分布，精度达 $\pm 10\ \text{MPa}$ ，为后续修复工艺参数优化提供数据支撑。

在寿命预测算法领域，基于疲劳累积损伤理论的机床主轴剩余寿命模型已实现工程化应用。通过采集主轴运行中的振动、温升、扭矩等多维度数据，结合有限元仿真与贝叶斯网络融合算法，置信度提升至95%。例如，沈阳机床集团采用该模型对服役20年的数控车床主轴进行寿命评估，预测剩余寿命误差仅3.2%，较传统经验公式精度提高40%。这一技术突破使得再制造决策从“经验驱动”转向“数据驱动”，显著降低过度修复或修复不足的风险。

2) 核心部件的高精度再生工艺

①导轨再制造的纳米级精度控制。复合电沉积修复技术通过梯度电化学沉积镍基碳化钨涂层（硬度HV1200），配合原位激光微熔工艺，可在导轨磨损表面形成 $10\sim 50\ \mu\text{m}$ 的强化层。上海交通大学团队研发的脉冲反向电源技术，使涂层孔隙率降至0.5%以下，摩擦系数降低至0.08，直线度恢复精度达 $3\ \mu\text{m/m}$ ，超越新导轨的ISO 230-2标准要求。该技术已成功应用于某重型龙门铣床导轨修复，使用寿命延长2.3倍。

②主轴平衡修复的颠覆性创新。激光熔覆与在线动平衡校正的协同工艺，开创了主轴修复新范式。采用同轴送粉激光熔覆（功率3 kW，扫描速度15 mm/s）修复磨损轴颈后，配合基于RISC-V架构的智能动平衡仪实时采集振动频谱，通过遗传算法优化配重方案，最终将主轴振动值控制在0.3mm/s以内，优于GB/T 31207-2014规定的0.5mm/s限值。该技术在国内外某风电齿轮箱再制造企业的应用中，使主轴修复效率提升60%，能耗降低45%。

③数控系统升级的开放生态构建。基于RISC-V指令集的开放式数控系统（兼容FANUC/西门子G代码）打破国外技术垄断。通过模块化架构设计和实时操作系统（RTOS）优化，系统响应延迟降至50 μs，同步精度达±1脉冲/转。浙江某机床厂采用该系统对1990年代进口加工中心进行改造，不仅实现五轴联动功能，还通过OPC UA协议接入工业互联网平台，设备综合效率（OEE）提升28%。

3) 再制造精度认证体系的全球博弈

①国际标准的技术壁垒与突破。对比美国APR再制造标准（RMI认证）与我国GB/T 31207-2014，核心差异体现在三方面：

- 精度恢复率：RMI要求关键部件精度恢复≥98%，而国标为≥95%；
- 寿命保证期：RMI认证产品质保期5年，国标仅3年；
- 碳排放指标：RMI将单位产值碳排放纳入考核，国标尚未涉及。为突破认证壁垒，我国正推动《机床再制造精度分级标准》制定，引入VDI 2617多系统误差分析理论，建立涵盖几何精度、运动精度、热稳定性的综合评价体系。

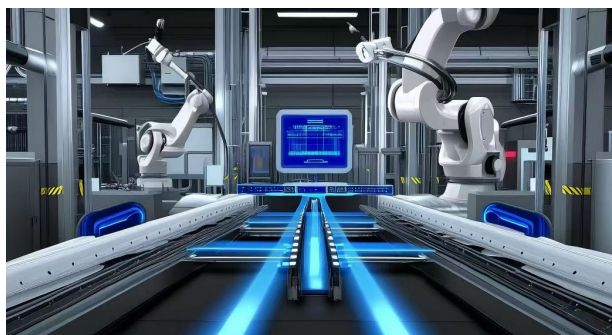
②检测技术的极限突破。激光干涉仪多自由度误差同步测量技术（符合ISO 230-2标准）通过五维光路补偿算法，可同时检测线性定位误差、俯仰偏摆和垂直度。在南京某再制造企业验证中，某五轴加工中心经修复后，空间定位精度达1.5 μm，较修复前提升80%，达到德国VDI/DGQ 3441标准最高等级。此外，太赫兹时域光谱技术（THz-TDS）被创新性用于涂层结合强度无损检测，通过时域反射信号特征分析，可识别0.05mm²的界面微缺陷。

③认证生态的产业协同。构建“检测机构-再制造企业-保险机构”三方联动的认证新模式。江苏试点推行再制造机床性能保险，由第三方检测机构（如中国机械工业联合会认证中心）出具CNAS认证报告后，保险公司对精度衰减提供风险兜底。该模式使再制造机床市场溢价提升

15%~20%，加速淘汰粗放式修复业态。

目前，再制造技术体系正经历从“经验修复”到“数字孪生驱动”、从“单一工艺”到“多技术协同”、从“区域标准”到“全球互认”的深刻变革。随着太赫兹检测、激光干涉仪等技术的持续突破，以及RISC-V开放生态的成熟，再制造精度将向亚微米级迈进。在此过程中，唯有攻克标准话语权、核心工艺自主化、检测认证体系化三重挑战，才能在全球再制造产业格局中占据制高点。

2. 集成优化：制造模式与流程的协同



(1) 数字化与智能化制造

数字化与智能化制造是超精密机床绿色智造的核心驱动力之一。通过构建数字化制造平台，可以实现设计、制造、检测和运维的全流程数据共享与协同优化。数字化制造平台将各个环节的数据整合到一个统一的系统中，实现信息的实时传递与反馈，从而减少信息孤岛和资源浪费。

在具体实施中，人工智能技术的应用尤为重要。例如，通过机器学习算法优化加工参数，可以在保证加工精度的同时减少试错成本和时间。传统的加工参数设置往往依赖于经验，存在一定的盲目性，而基于AI的优化方法能够根据实时数据动态调整参数，显著提升加工效率和质量。此外，数字孪生技术的应用可以实现机床的虚拟仿真和实时监控，提前预测潜在问题，减少停机时间和能源浪费。具体表现在以下两个方面：

(1) AI预测性维护。从故障修复到健康管理。基于振动频谱的轴承剩余寿命预测模型通过小波包分解与深度置信网络（DBN）融合算法，在SKF轴承试验台上实现剩余寿命预测误差<5%。某汽车零部件企业应用该系统后，非计划停机减少70%，润滑剂消耗降低45%。更前沿的技术如量子传感轴承监测装置，通过氮空位色心检测微观应力场变化，可在轴承失效前300小时发出预警，精度达纳米级。

(2) 智能诊断系统的集成创新。融合数字孪生技术的在线监测系统可实时重构机床动态特性。某型号加工中

心通过部署振动-温度-电流多传感器阵列,结合深度学习算法,实现轴承早期故障识别准确率达92%。系统还能基于历史数据生成虚拟样机,模拟不同工况下的损伤演化路径,为再制造方案提供动态优化依据。

(2) 绿色供应链管理

绿色供应链管理是实现超精密机床绿色智造的重要环节。通过与上下游企业协同,建立绿色供应链体系,可以从源头减少资源消耗和环境污染。绿色供应链管理的核心在于将环保理念贯穿于原材料采购、生产制造、物流运输和产品回收的全过程。

在原材料采购环节,与供应商合作开发环保材料是重要的举措。例如,采用低环境负荷的合金材料或可回收材料,可以显著降低机床制造过程中的碳排放。在物流运输环节,与物流企业合作优化运输路径,采用新能源运输工具,可以减少运输过程中的能源消耗和污染物排放。此外,通过建立供应链碳排放监测系统,可以实时追踪和评估各环节的碳排放情况,为绿色决策提供数据支持。

(3) 生命周期评估(LCA)

生命周期评估(LCA)是全面分析超精密机床环境影响的重要工具。LCA通过对机床从原材料获取、生产制造、使用维护到报废回收的全生命周期进行量化评估,识别关键改进环节,为绿色智造提供科学依据。

在实施LCA时,首先需要建立完整的数据采集系统,涵盖机床生命周期的各个环节。例如,在原材料获取阶段,评估矿石开采和材料加工的环境影响;在生产制造阶段,评估能源消耗和废弃物排放;在使用维护阶段,评估能耗和维修成本;在报废回收阶段,评估资源回收率 and 环境影响。通过LCA分析,可以识别出对环境影响最大的环节,并针对性地提出改进措施。例如,如果发现生产制造阶段的能耗较高,可以通过引入高效加工技术或优化生产流程来降低能耗。

具体实践中可融入数字孪生驱动的低碳设计。例如:西门子NX Eco Design模块通过多物理场耦合仿真,将机床碳足迹评估精度提升至零件级。某五轴加工中心的数字孪生模型显示,通过拓扑优化将床身壁厚从12mm减至8mm,在刚度保持98%的前提下,材料用量减少22%,全生命周期碳排放降低18%。此类技术正在改写机床设计范式,如大连科德数控开发的虚拟样机平台,使新型机床研发周期缩短40%,试制阶段的材料浪费减少75%。

(4) 闭环制造系统

闭环制造系统是实现资源高效循环利用的关键模式。传统的线性制造模式(制造-使用-废弃)存在资源浪费和环境污染的问题,而闭环制造系统通过将再制造环节纳

入制造体系,形成“制造-使用-回收-再制造”的循环模式,显著提升资源利用率。例如从局部优化到全域循环的能量闭环管理的技术创新中,直线电机反向制动能量回收系统通过电磁感应原理,将传统机床制动时耗散的动能转化为电能,能量利用率达85%。中国矿业大学研发的矿井提升系统已实现该技术的产业化应用,单台设备年回收电能超5万度。瑞士GF加工方案在激光切割机中嵌入废热发电模块,利用温差发电技术将冷却系统废热转化为电能,年节电1.2万度,相当于减少8.4吨CO₂排放。更值得关注的是,这类技术正从单机应用向车间级微电网延伸,形成“设备-产线-工厂”三级能量网络。

在闭环制造系统中,再制造技术是核心。再制造通过对废旧机床进行拆解、清洗、修复和升级,使其恢复或接近新机床的性能,从而延长机床的使用寿命。与传统的回收利用相比,再制造能够最大限度地保留机床的原有价值,减少新材料的使用和能源消耗。例如,某高端超精密机床企业通过引入再制造技术,将废旧机床的零部件回收率提升至90%以上,显著降低了生产成本和环境影响。

此外,闭环制造系统还需要建立完善的回收网络和逆向物流体系。通过与用户和回收企业合作,确保废旧机床能够及时回收并进入再制造流程。同时,通过数字化技术对回收和再制造过程进行监控和优化,进一步提升资源利用效率。

3. 系统重构: 产业链与生态系统的全面升级

产业链协同创新是系统重构的基础,其核心在于推动上下游企业、科研机构、行业协会等多方主体的深度合作,形成绿色智造产业联盟,共同制定技术标准和行业规范,促进技术共享与成果转化。

(1) 产业链重构: 从线性到循环的转变

1) 绿色供应链的构建

传统产业链以线性模式为主,资源从上游到下游单向流动,容易造成资源浪费和环境污染。在超精密机床的绿色智造中,需要通过构建绿色供应链,实现产业链协同创新,能够有效整合资源,避免重复研发和资源浪费,提高资源利用率及循环再生。例如,上游原材料供应商可以通过提供绿色材料,帮助超精密机床制造商降低生产过程中的碳排放;下游用户企业则可以通过反馈使用数据,为制造商优化产品设计提供依据。此外,还可以建立逆向物流体系,回收废旧机床进行再制造,延长产品生命周期。这种协同模式不仅提高了资源利用效率,还加速了技术创新的落地应用。

2) 产业链纵向整合与横向协同

在超精密机床的制造过程中,产业链的纵向整合可以

加强上下游企业之间的协作，实现技术共享和资源优化配置。一方面，科研机构的参与为产业链协同创新提供了技术支撑。通过与高校和科研院所的合作，企业可以快速获取最新的绿色制造技术，并将其转化为实际生产力。例如，某超精密机床企业与国内知名高校合作，共同开发了基于人工智能的节能控制系统，显著降低了机床的能耗水平。另一方面，行业协会在产业链协同创新中发挥了桥梁作用。通过制定行业标准和规范，协会可以引导企业采用统一的绿色制造技术，避免技术碎片化。例如，中国机床工具工业协会近年来积极推动绿色制造标准的制定，为超精密机床行业的可持续发展提供了有力支持。

3) 数字化与智能化的赋能

产业链的横向协同可以通过跨行业合作，引入新技术和新模式。其中，数字化与智能化技术为产业链重构提供了重要支撑。通过工业互联网、大数据和人工智能技术，实现产业链各环节的数据共享与协同优化。例如，利用大数据分析优化供应链管理，降低库存和物流成本；通过人工智能技术优化机床设计，提升性能和能效；利用区块链技术实现供应链透明化，确保绿色制造的可追溯性。与信息技术企业合作开发智能控制系统，与环保企业合作开发绿色制造技术。

(2) 生态系统升级：从竞争到共生的转变

1) 绿色制造生态系统的构建

超精密机床的绿色智造需要构建一个以可持续发展为目标的生态系统。其核心在于以超精密机床为核心，整合技术研发、生产制造、市场应用和回收再利用等环节，实现经济、环境和社会效益的协调发展。这一生态系统不仅包括制造商、供应商和用户，还包括科研机构、行业协会、政府机构等多方参与者。通过协同合作，共同制定绿色制造标准，推广绿色技术，推动行业整体升级。例如，建立绿色制造联盟，推动企业间的技术交流与合作；与科研机构合作开展绿色制造技术研发，加速技术迭代。

2) 循环经济模式的实践

在生态系统中，循环经济模式的实践是实现绿色智造的重要路径。其需要覆盖到全生命周期管理之中。从设计阶段开始，企业就需要考虑产品的可回收性和可再利用性，例如采用模块化设计，方便零部件的更换和升级。在生产制造阶段，企业需要通过绿色制造技术降低能耗和排放。在市场应用阶段，企业需要提供高效节能的产品，帮助用户企业实现绿色生产。在回收再利用阶段，企业需要通过再制造技术，将废旧机床修复为高性能设备，延长其使用寿命。通过再制造、再利用和再循环，减少资源消耗和废弃物排放。例如，对废旧机床进行再制造，恢复其性

能并重新投入使用；对制造过程中产生的废料进行回收利用，减少资源浪费；通过产品服务化模式，提供机床租赁和共享服务，降低用户的使用成本，同时减少资源消耗。

3) 开放创新与价值共创

生态系统的升级需要打破传统的封闭式创新模式，转向开放创新与价值共创。通过建立开放创新平台，吸引多方参与者共同参与技术研发与应用推广。政府、企业、科研机构和用户企业需要形成合力，共同推动绿色制造技术的发展。其中，政府通过政策引导和资金支持，鼓励企业采用绿色制造技术；科研机构通过技术研发，为企业提供创新支持；用户企业则通过反馈使用数据，帮助制造商优化产品设计。此外，建立开源技术社区，推动绿色制造技术的共享与普及；采用众包模式，集思广益解决技术难题；通过跨界合作，探索新的商业模式和价值创造方式。

四、超精密机床的商业模式创新：从产品到服务的价值重构

传统商业模式的转型是超精密机床适应循环经济发展的必然选择。传统的“生产-销售-使用-废弃”线性模式已无法满足循环经济的要求。因此，许多企业开始探索从产品销售向服务提供的转型，如机床租赁、按使用量付费等模式。这些模式不仅能够延长产品生命周期，还能促进资源的循环利用。其次，基于循环经济的创新模式探索为超精密机床的发展提供了新思路。例如，建立机床再制造中心，对废旧机床进行专业化修复和升级，使其性能达到或超过原产品水平。这种模式不仅能够节约资源、减少环境污染，还能为中小企业提供高性价比的设备解决方案。另外，发展机床共享平台也是创新模式之一，通过整合闲置机床资源，提高设备利用率，减少资源浪费。

1. 产品服务系统（PSS）的实践：从交易到价值共享

(1) 按加工量计费模式：重构客户成本结构。德国通快（TRUMPF）的TruConnect平台彻底颠覆传统机床销售逻辑，客户无需一次性支付数百万欧元购置设备，而是按实际加工时长付费（85欧元/小时），费用涵盖设备租赁、维护、再制造及软件升级。这一模式将客户固定成本转化为可变成本，现金流压力降低60%以上。例如，某医疗器械制造商通过TruConnect平台加工钛合金关节假体，设备利用率从35%提升至78%，综合成本下降22%。更深远的影响在于，通快通过实时采集加工数据优化设备性能，其再制造机床的平均无故障时间（MTBF）较传统模式延长40%，形成“数据驱动服务迭代”的正向循环。



(2) 性能保障合约：风险共担重塑信任机制。日本大隈（OKUMA）推出的再制造机床性能保障合约，将加工精度维持期从新机的3年延长至5年，并承诺若精度衰减超差，免费提供修复或更换核心部件。这一模式倒逼企业从材料、工艺到检测全链路升级：通过激光熔覆修复的主轴需通过2000小时加速寿命测试，导轨再制造后需满足ISO 10791-1标准中定位精度 $\pm 1.5 \mu\text{m}$ 的要求。某汽车模具企业采用该合约后，模具修模率从15%降至4%，年节省成本超200万欧元。此类合约正在改变供需关系——机床制造商从“设备供应商”转型为“加工质量担保方”，客户忠诚度提升50%以上。

2. 逆向供应链的数字化整合：从线性消耗到闭环再生

(1) 区块链溯源：破解逆向供应链信任困局。上海机床厂联合蚂蚁链开发的旧件溯源系统，通过区块链技术记录机床从生产、使用到报废的全生命周期数据（包括维修记录、切削力载荷谱、关键部件剩余寿命预测值）。每个旧件赋予唯一数字身份证，溯源信息上链后不可篡改。在河南某再制造基地，该系统使旧件质量评估时间从72小时压缩至4小时，旧件利用率从45%提升至68%。更关键的是，区块链技术打通了机床制造商、再制造企业、终端用户的信任壁垒，旧件回收价格透明度提高30%，逆向物流成本降低18%。

(2) 分布式再制造中心：敏捷响应激活区域循环。3D打印卫星工厂模式以50公里为半径构建服务网络，通过分布式数字仓库存储高价值备件模型数据。当客户机床部件损坏时，就近卫星工厂调用模型文件，采用激光选区熔化（SLM）技术4小时内完成备件打印并交付。山崎马扎克（MAZAK）在中国试点该模式后，丝杠螺母等精密备件响应时间从72小时缩短至3.5小时，库存持有成本降低55%。这一模式正与逆向物流网络深度耦合：废旧件拆解后，可用粉末经等离子旋转电极雾化（PREP）再生，重新进入3D打印材料库，实现“拆解-再生-制造”闭环。

3. 碳资产运营的创新路径：从成本中心到利润引擎

(1) 碳积分交易：循环经济的货币化表达。江苏某机床再制造企业通过光伏供电（绿电占比65%）、废屑再生（回收率92%）等工艺，年碳减排量达4800吨，经上海环境能源交易所核证后获得碳积分（CCER），以60元/吨的价格出售给高耗能企业，年增收120万元。该企业进一步将碳积分嵌入产品定价体系：购买其再制造机床的客户可按减排量抵扣碳配额，促使某压铸企业采购量提升40%。这一模式推动再制造从“合规成本”转向“创收资产”，据测算，到2025年机床再制造行业碳交易市场规模可达25亿元。

(2) 绿色金融工具：低成本资金催化产业升级。机床再制造项目的绿色债券发行利率较普通债券下浮0.8个百分点，例如沈阳机床集团2023年发行的5亿元绿色债券（票面利率3.2%），资金专项用于真空熔覆修复中心建设，预计使再制造主轴成本降低35%。更创新的工具是碳收益权质押贷款：重庆某企业以未来5年碳积分收益为抵押，获得建设银行6000万元贷款，利率较基准下浮15%。金融杠杆的介入使再制造项目投资回收期从5年缩短至3年，加速产业规模化进程。

当前，机床产业正经历从“硬件销售”到“服务赋能”、从“单向消耗”到“循环共生”的范式革命。无论是通快的按需付费、马扎克的分布式制造，还是碳资产的金融化创新，其本质都是将机床从独立商品转化为工业生态系统的价值节点。未来竞争不再局限于精度与效率，而是生态整合能力——谁能在服务化转型中构建更高效的资源闭环、更紧密的客户协同、更灵活的金融工具，谁就能占据价值链制高点。这一进程中，商业模式创新不仅是技术进步的催化剂，更是行业格局重写的决定性力量。

五、绿色智造与再智造下的政策协同与产业生态构建

1. 政策协同支持

(1) 国际经验借鉴：立法护航与真金白银激励

德国政府通过“工业4.0再制造专项计划”，对机床再制造企业给予每台设备改造成本30%的现金补贴（上限50万欧元），并配套提供3%的绿色贷款贴息。政策实施三年间，德国机床再制造渗透率从18%提升至27%，旧件利用率提高至65%。美国《购买美国再制造产品法案》则规定联邦政府采购中再制造产品占比不低于25%，且价格优惠

幅度可达15%。例如，美国海军舰艇维修中心采购的再制造五轴加工中心，单价较新机降低40万美元，全生命周期碳排放减少320吨。这些政策不仅降低企业转型成本，更通过市场端需求牵引构建产业闭环。

（2）我国政策优化建议：破解制度性障碍

当前我国再制造机床未被纳入《高新技术企业认定管理办法》，导致企业无法享受15%所得税优惠。建议修订认定标准，将“纳米级主轴修复”“数字孪生再制造”等核心技术列入重点支持领域，预计可降低企业税负20%，带动研发投入强度从2.1%提升至4.5%。在旧件进口环节，高达8%的关税税率和繁琐的固体废物进口审批流程，使企业采购海外高价值废旧机床成本增加12%-18%。亟需建立旧件进口“白名单”制度，对经认证的数控系统、精密导轨等核心旧件实施零关税，并允许增值税进项抵扣。此类政策组合拳可加速构建“全球采购-中国再制造-国际销售”的循环贸易网络，推动我国再制造机床出口占比从7%提升至15%以上。

2. 产业生态构建

机床产业的绿色革命正从“技术-经济-政策”三螺旋协同中孕育新范式。据预测，2030年全球再制造机床市场占有率将突破25%，年碳减排贡献达1.2亿吨，标志着行业从线性消耗向循环再生的根本转型。

（1）技术驱动：以纳米级主轴修复、激光熔覆动态平衡为代表的再制造技术，将机床精度恢复率提升至98%，同时融合数字孪生和区块链技术构建全生命周期碳足迹追踪系统，推动再制造机床的智能化迭代。

（2）经济重塑：德国“按加工量付费”模式和中国“再制造即服务”（RaaS）平台，将设备使用成本降低25%以上，并通过碳积分交易形成年超百亿元的新

增市场。政策层面，中国《“十四五”循环经济发展规划》明确再制造产业战略地位，而欧盟碳边境调节机制（CBAM）倒逼企业加速低碳转型，形成全球市场准入的技术壁垒与创新动力。

（3）生态协同：以长治高新区为例，其“源网荷储一体化”能源体系与数字化碳管理平台，推动再制造机床绿电消纳占比超30%，成为区域降碳的核心节点。未来，随着国际标准互认和产业链闭环的完善，机床产业将彻底告别“生产-废弃”模式，迈向零废弃的全球制造新纪元。

六、结论

本研究探讨了绿色智造与再制造背景下，超精密机床在循环经济中的技术迭代与商业模式创新。研究表明，超精密机床在推动循环经济发展中具有重要作用，通过技术创新和商业模式创新，可以实现资源高效利用和环境保护的双重目标。

首先，超精密机床的技术特点使其在绿色智造和再制造中具有独特优势。通过关键技术的突破与创新，以及智能化与绿色化的融合，超精密机床在提高加工精度和效率的同时，也大大减少了资源消耗和环境污染。其次，商业模式的创新为超精密机床在循环经济中的应用提供了新思路。从传统的产品销售向服务提供转型，以及基于循环经济的创新模式探索，不仅延长了产品生命周期，还促进了资源的循环利用。

然而，超精密机床在循环经济中的发展仍面临诸多挑战，如技术创新成本高、再制造标准不完善等。为此，需要加强技术创新，完善标准体系，加大政策支持力度，推动循环经济理念的普及。□

资讯

马卡航空航天数控机床智慧工厂项目开工

3月17日，沈阳马卡智工科技有限公司航空航天数控机床智慧工厂项目在沈阳大东区欧盟工业园举行开工仪式，来自政府相关部门、行业协会、合作伙伴和社会各界的嘉宾参加活动。

据介绍，该项目总投资2.9亿元，占地面积90亩（预计2025年5月新增二期用地70亩，合计160亩土地）。项目定位为数字化高端智能机床的研发制造中心，规划建设4

万平方米数字化恒温车间，聚焦民用航空航天智能制造技术、机匣高精高效五轴加工技术、国产大飞机C919吊挂制孔技术、数控机床数字孪生可视化系统等重点领域，开展定制化产品选型服务，提供整体解决方案。产品将广泛应用于民用航空航天、轨道交通、新能源汽车等高端制造行业，推动产业升级，提高自主创新能力，实现替代进口，加快形成新质生产力。

积极推广自动化和省力化解决方案

——日本四家公司在大阪举办企业展览

摘编：《日本生产材》杂志等媒体

2月6日和7日，四大机床公司大隈、沙迪克、冈本机床和东京精密（通常称为 ACCRETECH）在大阪地铁御堂筋线江坂站附近举办了企业展览。由于这四家公司的办公室和展厅都在步行距离内，因此此次活动为参观者提供了一个探索各种制造解决方案的有效机会。每家公司都展示了其最新技术，重点关注自动化和省力创新。

大隈机床：新机型在日本西部首次亮相

大阪府吹田市的江坂地区是一公里范围内工厂自动化制造商销售办事处和展厅的中心。江坂站距离新大阪站仅两站路程，为游客提供便利的交通。

每年二月初，在江坂设有办事处的公司都会同时举办企业展览。由于场地都在步行距离内，游客可以高效地观看各种产品，使其成为一项受欢迎的年度活动。

大隈举办了“2025 大隈大阪机械展”，首次在日本西部展示了“MS-320H”，这是一款紧凑型卧式加工中心 (MC)，在 JIMTOF 2024 上首次亮相。MS-320H 在加工点正下方设有垂直工作台和切屑输送机，可立即排出切屑，实现长期连续加工。它还具有最小的冷却液消耗，以优化环境可持续性。在展会上，该机型以量产设置展示，集成了装载机和工件储料器，以展示减少劳动力依赖的自动化。公司还介绍了“OMR20”移动协作机器人，作为多品种、小批量生产自动化的解决方案。



实现全新的加工制造
追求省人化、自动化的新概念机床

小型卧式加工中心

MS-320H



的机器人“ARMROID”和 OMR20 协作机器人。该公司还强调了其将 CAD/CAM 软件与自动化相结合。松浦机械和 C&G Systems 与大隈共同展出，展示了使用大隈机床与 CAD/CAM 软件结合生产的样品工件。

沙迪克：激光加工和注塑解决方案

沙迪克举办了“Private Show 2025”，重点介绍激光加工和注塑解决方案。

该公司展示了采用去年推出的“LSP4040”飞秒激光机加工的样品工件。飞秒激光可以最大限度地减少热影响区，降低工件开裂的风险。LSP4040 具有可定制的规格，例如激光移动的行程，允许定制配置以适应可用的工厂空间和特定的操作需求。

对于注塑成型，沙迪克推出了熔体剪切粘度测量装置“Nendy-E”，以及模具状态支持系统“Molding Navi Class-AI”。

Nendy-E 提供熔体粘度的现场测量。它可以通过更换喷嘴直接连接到注塑机上，使其与 Sodick 和非 Sodick 注塑机兼容。

除了 MS-320H，大隈还展示了自动化增强解决方案，包括安装在机床内

沙迪克还展示了其机械加工产品线，包括“UX450L”立式加工中心、“LPM325”金属3D打印机、“AL400G iG+E”线切割放电加工机和“AL40G+”电火花成型加工机。



沙迪克西日本营业部的一位经理表示：“过去，我们只在双数年举办这个活动。但是，我们的年轻员工们表达了强烈的愿望，希望每年都举办。今年是我们第一次在奇数年举办活动，我们希望将来每年都举办。”

冈本机床：注重节省时间和提高劳动效率

冈本机床举办了“大阪销售处企业展示”，展出了四种磨床型号，包括其最畅销的“PSG63SA1”平面磨床。

PSG63SA1 基于传统的“PSG-DX”系列，增加了自动砂轮修整和移位切入磨削功能，允许砂轮在切入磨削过程中移位。用户界面也已从选择开关升级为触摸屏，以提高易用性。

展出的型号配备了“Quick Touch”机内测量单元（可选），展示了自动工件测量以节省劳动力。



展出的其他型号包括用于大型工件的“PSG64CA-iQ”平面磨床、具有自动修整和校正进给功能的“OGM250EX III”外圆磨床和“HPG500NC”数控成型磨床。

“本次展会的主要主题是减少加工时间和劳动力需求，”大阪销售处经理说。“尽管关西地区的经济前景仍不明朗，但我们希望此次活动能带来更多订单。”

东京精密：测量和检查自动化

东京精密举办了“东京精密东京精密企业展2025”，展出了表面粗糙度、轮廓测量等解决方案。

该公司展出了“SURFCOM NEX 200 DX2”，这是一款混合表面粗糙度和轮廓测量系统，其测量范围是以前型号的两倍多。它可以高效地一次性测量倾斜和不平坦的表面。同时展出的还有在 JIMTOF 2024 上推出的可选 $\pm 45^\circ$ 自动倾斜驱动装置，它可以轻松测量重型或难以倾斜的工件。



还展出了紧凑型表面粗糙度测量装置“SURFCOM TOUCH”。它具有可选的条形码扫描功能，可通过扫描预先记录的二维码自动配置测量设置。此功能无需手动设置每个工件的测量条件。

“我们的私人展览还提供现场机器销售，”该公司国内销售部门的一位经理说。“许多参观者专门来做短期购买。”虽然关西地区的市场环境仍不明朗，但航空航天业的复苏是一个积极的信号。” □

2025年度欧洲商业联合会 (BusinessEurope) 晴雨表调查报告

摘编：捷克工业联合会SPCR官网

欧盟的投资吸引力正持续下滑。与2019年相比，2021年来自第三国的外商直接投资（FDI）暴跌66%。与之形成鲜明对比的是，美国同期的FDI则实现了近同等比例的显著增长。此外，美国推出的《通胀削减法案》（Inflation Reduction Act, IRA）——一项通过大规模支持本土企业工业转型的新举措——可能进一步将投资活动从欧盟抽离，除非欧盟采取切实措施改善其投资环境。



欧洲雇主组织联盟——欧洲商业联合会（BusinessEurope）发布了其年度《改革晴雨表》（Reform Barometer），该报告持续监测欧洲的全球竞争力并对结构性改革成效进行评估。捷克工业联合会（Confederation of Industry of the Czech Republic）的专家积极参与了此份报告的编制工作。

该报告聚焦于乌克兰战争对全球供应链的冲击、能源价格飙升以及原材料成本攀升的连锁影响。根据晴雨表数据，过去一年对欧盟27国企业而言极具挑战性，企业不得不对借贷成本因利率上升而增加、市场需求疲软等多重压力，其中能源密集型工业部门尤其面临在全球市场中长期生存的困境。

近期经济形势虽现转机，但欧洲仍难言乐观。全球通胀压力有所缓解，天然气批发价格回落，然而欧洲的能源成本困境未解。2025年夏季天然气期货价格仍高达疫情前水平的四倍，而美国仅不到两倍。企业因此不得不面对能源成本长期高企的前景。通胀压力方面，欧洲更是首当其冲——截至去年末，欧元

区通胀率超日本与中国两倍有余，甚至高于美国水平。

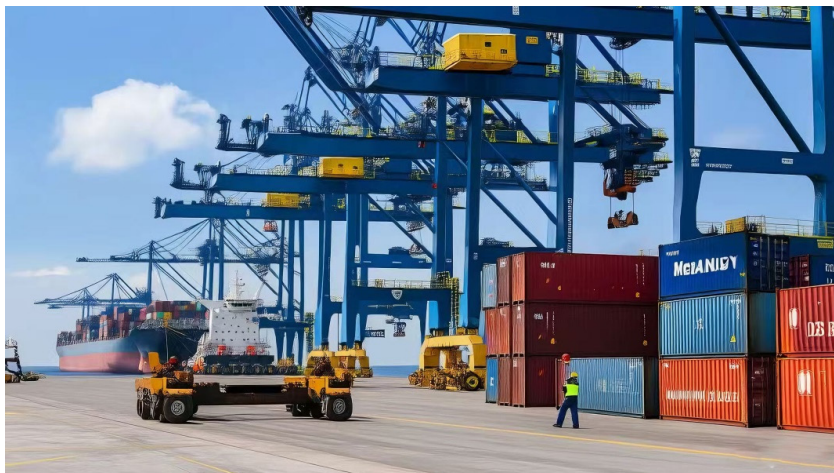
欧洲竞争力的核心制约因素不仅包括能源价格高企，还涉及过度的官僚主义负担——近半数受访者认为其严重性远超其他发达国家。多数观点还指出，监管负担近年来持续加重，而立法质量却反向走低。另一大阻碍则是税制问题，尤其是劳动力税负较美国高出30%，远超经合组织（OECD）平均水平。对此，《晴雨表》建议：削减能源、环境及数字技术等领域的过度监管（例如加强对新立法的社会影响评估、加速项目审批流程）；降低劳动与资本税负并简化税务管理；大幅降低能源成本（如减少相关税费）并确保能源供应的竞争力。

创新是欧盟长期面临的另一项关键挑战。当前，欧盟的研发支出仅占GDP的2.3%，显著低于日本和美国（两国研发投入均接近GDP的3%）。此外，欧盟在新专利数量与光纤宽带基础设施部署方面的表现也显不足。因此，提升研发投入、优化创新政策监管，以及加速数字基础设施建设已迫在眉睫。更值得深思的是，现有支持绿色投资的举措是否真正契合目标，能否切实助力企业完成转型，仍需进一步审慎评估。□

来自东南亚的最新商业资讯

摘编：美国机械制造技术协会AMT官网

2025年，东南亚外国直接投资（FDI）项目的公布呈上升趋势。然而，项目的公布和资金投入通常存在时间差。在某些情况下，由于全球关税政策频繁变化引发的市场不确定性，投资的实际履行将被延迟。美国仍是该地区的主要投资国，并持续加强其在政治和防务关系上的承诺。



马来西亚

马来西亚投资发展局（MIDA）宣布，2024财年上半年共吸引190亿美元的FDI项目，比上一年增长了40%。电气与电子、半导体和更广泛的制造业是推动增长的主要动力。

2024年，美国企业在马来西亚的投资达至少74亿美元，涵盖获批项目和多项科技计划。半导体领域尤为活跃，主要企业包括英特尔、格芯（GlobalFoundries）、德州仪器和美光。

科技巨头对数据与云计算中心的投资：亚马逊（62亿美元）、英伟达（43亿美元）、谷歌（20亿美元）和微软（22亿美元）此前已承诺在马来西亚建设数据中心，部分项目仍在执行中。

现代汽车宣布计划在2025年至2030年间投资近4.8亿美元，用于提升其在马

来西亚的产能。现代将与当地合作伙伴Inokom公司合作，升级目前生产旧款圣达菲SUV的组装厂。

新加坡与马来西亚政府签署协议，将在新柔长堤对岸建设柔佛-新加坡特别经济区，占地相当于美国罗德岛州的面积，预计将吸引大量在电气与电子、半导体、航空航天、医疗器械及汽车零部件领域的外资。

泰国

2025年1月至2月，泰国批准了181宗外国投资案例，比去年同期增长了68%。这些项目总投资额约达10亿美元，同比增长33%。2025全年FDI预计将达到300亿美元，主要集中于数据中心、云服务、电动车（EV）、混合动力汽车和半导体等领域。

马自达宣布将在泰国追加投资1.5亿美元，将其打造成电动紧凑型SUV产品线的制造中心，面向国内和出口市场。

泰国投资委员会批准中国欣旺达电子10亿美元在泰国建设电池工厂的投资。

台达电子宣布将在四年内投资5亿美元。台达在电子供应链中扮演关键角色，其产品涵盖电源管理系统、

组件和支持半导体、电动车及数据中心的解决方案。此次投资与泰国发展数字经济和汽车产业的战略一致。

丹麦Vestergaard公司计划投资7500万美元，扩大其航空地面设备的生产。

越南

2025年初，越南迎来大量FDI。越南计划与投资部数据显示，2025年1月宣布的外资金额达43亿美元，同比增加48.6%。制造业仍是FDI的重点领域。

越南积极吸引美国投资，以向当前美国政府展示其平衡贸易的决心。越南对美贸易顺差达1240亿美元，位列全球第四，仅次于中国、欧盟和墨西哥。

三星显示（Samsung Display）宣布将在越南北部投资18亿美元建设OLED工厂，届时三星在越南总投资将达224亿美元，包括六家工厂、一家研发中心和一家销售公司。



越南本土车企VinFast宣布将在河静省建设第二座工厂，将其国内年产能提高到60万辆，主要生产小型和中型车型VF3和VF5，面向国内和出口市场。

在越南已有运营的一级汽车零部件供应商如博世、电装、麦格纳、大陆集团和法雷奥也可能扩大产能。Apriv、采埃孚和佛吉亚等其他供应商正在考虑合作或设立新厂。

韩国首尔的Dentium公司将投资1.77亿美元，在越南生产牙科植体系统。

特瑞堡密封系统公司将在越南巴地头顿省投资8500万美元建设第二家制造厂，专注于高精密封件的生产，靠近胡志明市。

日本北泽公司将在其越南子公司工厂用地上投资8800万美元，建设一座生产高纯度气体阀门的新工厂，主要用于半导体设备市场，预计将于2025年11月投入生产。□

资讯

ZITU 与 Lorenzo 齿轮厂借力人工智能推动工业转型

在数字化与流程优化对制造业竞争力至关重要的背景下，ZITU与洛伦佐齿轮工厂（Lorenzo Gear Factory）联合启动了“OptimAI”项目。这一倡议通过应用人工智能优化生产规划，动态调整资源分配以应对供应链波动。该项目隶属于欧盟“AIRISE计划”（由AFM集群担任推广大使），并获得“地平线欧洲”（Horizon Europe）资金支持，旨在推动工业流程管理的变革，提升运营效率，并促进更可持续的生产模式。工业生产规划始终是一项复杂挑战。协调资源、最小化停机时间以及适应供应链中的突发事件，需要先进的解决方案。

OptimAI通过ZITU开发的算法应对这一需求——应用人工智能生成最优制造订单规划，并根据洛伦佐齿轮工厂（Engranajes Lorenzo）的机器可用性、生产优先级及需求动态调整排程。由此，洛伦佐齿轮工厂能够优化资源

利用率、减少浪费，并确保生产流程更加敏捷且可持续。得益于ZITU开发的这项技术，工厂能够以更高的精度和灵活性运作，快速适应需求波动或设备可用性变化。实时调整生产规划的能力使洛伦佐齿轮工厂（Engranajes Lorenzo）得以避免时间与资金浪费，在实现流程现代化与优化的同时获得竞争优势

OptimAI标志着制造业数字化进程的又一突破，并推动行业向工业5.0迈进——这一模式将技术与可持续性深度融合，以打造更智能、更具环境责任感的工厂。在AIRISE计划与“地平线欧洲”（Horizon Europe）的支持下，ZITU与洛伦佐齿轮工厂（Engranajes Lorenzo）的合作彰显了人工智能如何成为工业变革的驱动力，助力企业在竞争日益激烈的市场中提升效率、增强韧性并实现可持续发展。

瑞士科技行业： 复苏仍未见底，重大风险隐现

摘编：瑞士技术产业协会（Swissmem）官网

瑞士科技产业（涵盖机械与电气工程及相关技术领域）在2024年遭遇挫折。全年销售额同比下降4.6%，出口下滑3.1%，新订单量与上年持平（+0.1%）。全球投资环境疲软是主要诱因。该产业的未来发展将取决于瑞士受贸易冲突升级的影响程度——若美国对瑞士及欧盟加征全面关税，后果将极其严峻。瑞士联邦亟需加强自由贸易布局：加速批准与印度、泰国的自贸协定，系统推进与南方共同市场（Mercosur）及美国的新协议谈判，并更新与中国、墨西哥的现有协定。此外，达成“双边协议III”（Bilaterals III）将为其最大贸易伙伴欧盟市场提供长期稳定的框架条件。

销售额：2024年同比下滑4.6%，第四季度同比下降5.7%（较2023年同期）。新订单：全年基本持平（+0.1%），但第四季度小幅增长1.3%。产能利用率：2024年第四季度为81.3%，显著低于长期均值86.2%；短期工作制大幅增加反映产业内产能闲置加剧。就业规模：2024年第四季度员工总数降至32.9万人，环比减少0.5%。



出口仍在下降

2024年，瑞士技术行业的商品出口额同比下降3.1%，降至683亿瑞士法郎。在主要产品类别中，金属出口下滑6.2%，机械工程出口下降4.9%，精密

仪器出口减少2.1%。唯一实现出口小幅增长的领域是电气工程/电子行业（+1.3%）。印度（+9.4%）和美国（+3.9%）是仅有的出口增长的主要市场。然而，这些增长不足以抵消对欧盟出口的下降（-5.6%）。对亚洲市场的出口则陷入停滞（-0.2%）。

美国全面加征关税或引发重大冲击

当前瑞士科技产业几乎未见复苏迹象。多重贸易冲突正引发巨大不确定性，且全球投资环境持续低迷。瑞士科技产业的未来发展，很大程度上取决于该国在日益升级的贸易冲突中受到冲击的严重程度。瑞士机械与电气工程行业协会（Swissmem）总干事Stefan Brupbacher表示担忧：“最糟糕的情况是欧盟效仿美国实施全面关税报复，并将瑞士视为第三方国家纳入反制范围。此举可能波及瑞士科技产业70%的出口，造成的冲击将是灾难性的。”企业期望增长动力来自印度、中国，尤其是美国市场。若美国大幅升级关税壁垒，此类增长机遇或将被扼杀在萌芽阶段。

瑞士亟需以智慧且务实的外导策略应对挑战

外交层面，瑞士需全力争取美国政府认可其作为公平贸易伙伴的地位。若能将取消工业关税作为关键筹码，将显著增强谈判优势。面对欧盟，瑞士必须竭力避免在贸易争端中被划入“第三方国家”范畴而遭报复性措施。此外，联邦政府需加速推进自贸协定网络建设——瑞士机械与电气工业协会（Swmem）主席斯特凡·布鲁普巴赫（Stefan Brupbacher）强调：“这是一场竞赛。欧盟在与南方共同市场（Mercosur）的自贸谈判中已抢占先机，但瑞士通过签署瑞士-印度自贸协定已赢得战略优势。当前关键在于快速完成协定批准程序，最大化释放红利。”

布鲁普巴赫呼吁瑞士社会党（SP）、绿党及非政府组织（NGO）放弃发起全民公投，以免协定因政治博弈流产，最终损害各方利益。

复杂局势下，稳定的长期框架条件愈发关键。瑞士与最重要贸易伙伴（欧盟）之间的“双边协议III”（Bilaterals III）将为此类条件提供保障。若瑞士能成功达成该协议，将有效抵御欧盟的报复性措施。瑞士机械、电气工程与金属行业联合会（Swissmem）主席Martin Hirzel强调：“在大国不可预测的权力政治行动成为新常态的全球背景下，对欧盟单一市场的非歧视性准入将为瑞士经济安全提供可靠基石。”

就国内政策而言，瑞士必须避免制定损害经济的短视政策。青年社会党提出的“为了未来”征收倡议

（For a future initiative）及《负责任商业倡议2.0》（Responsible Business Initiative 2.0）即属此类。Martin Hirzel严正警告：“青年社会党的征收倡议将直接影响瑞士Swissmem三分之一的成员企业。由于追溯条款（retroactivity clause）的法律正当性存疑，众多企业主正考虑迁离瑞士。此举将重创我国工业根基。”瑞士mem正全力推动议会宣布追溯条款无效——唯有如此方能阻止企业提前撤离。此外，《负责任商业倡议2.0》亦与国际可持续性监管趋势背道而驰，欧盟已承认其因过度微观管控而偏离正轨。

安全政策领域亟需行动。随着美国逐渐退出其保护者角色，欧洲需具备自主防御能力。乌克兰战争表明，唯有拥有本土国防工业方能实现这一目标。瑞士奉行武装中立政策。为践行这一承诺并强化自身安全，瑞士需要具备有效的国防工业。然而近年来，过于严苛的出口限制已迫使相关产业外流。瑞士机械与电气工业协会（Swissmem）期望联邦国防、民防与体育部（DDPS）新任部长优先致力于改善瑞士安全与军备产业的框架条件，尤其是《战争物资法》（War Materiel Act）中的出口规定。若无法出口，瑞士国防工业将难以为继；而若无本土国防工业，瑞士的安全保障也无从谈起。

动荡时局中的机遇。世界正经历动荡时期，但每种局势都暗藏机遇。瑞士需通过灵活务实的国内政策、外交策略与安全政策把握这些机遇。唯有如此，才能遏制潜在损害——而这将使瑞士全体国民受益。□



Ressennibale Business Insietnattieve 2.0

Together for a better future

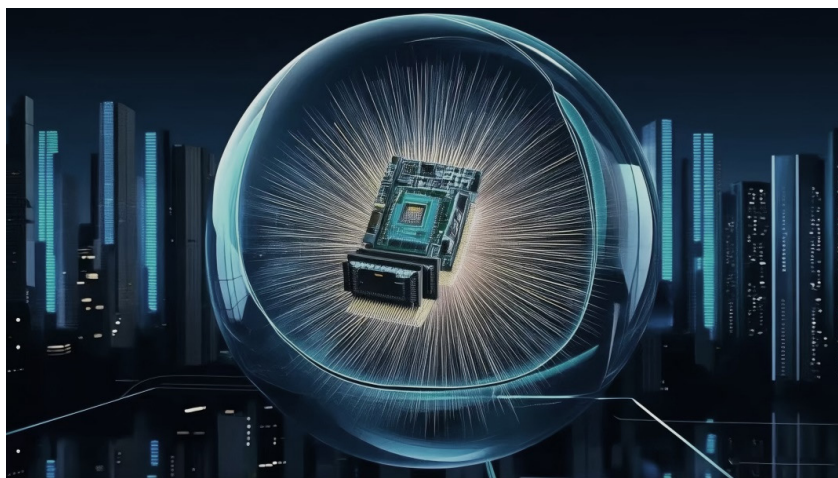
捷克工业联合会就“AI扩散规则” 提交意见书

摘编：捷克工业联合会SPCR官网

捷克工业联合会（Confederation of Industry of the Czech Republic）作为捷克国内工商业界代表及最大雇主协会，其成员企业正致力于新技术研发并推动捷克与美国的持续合作。联合会呼吁美方重新评估当前提案，并敦促工业与安全局（Bureau of Industry and Security, BIS）在“人工智能扩散规则”（AI Diffusion Rule）中沿用现有的国家分组体系。

捷克工业联合会代表广泛的企业群体，包括与美国市场紧密关联的成员——既有在美国直接投资的捷克企业，也有在现代化技术领域与美国伙伴合作的商业实体。值得注意的是，众多在捷克开展重要业务的知名美国企业也是本联合会的成员。

美国是捷克共和国的战略合作伙伴。在捷克投资的美国企业涵盖国防、航空航天、电信及信息技术产业。与此同时，过去五年间，捷克资本在美国本土创造了逾2000个就业岗位，捷克企业对美国经济的累计投资额已突破60亿美元。



对捷克而言，确保获取先进半导体芯片是其人工智能发展的关键基石。这

些芯片是AI技术的核心驱动力，支撑着从数据处理到复杂机器学习算法的全链条运作。保障尖端芯片的供应不仅关乎技术进步，更涉及维持经济竞争力、激发创新活力，以及在全球数字化格局中巩固战略地位。此外，这也是捷克加强经济安全、持续作为全方位可信赖合作伙伴与盟友的广泛战略举措之一。

人工智能与半导体正成为捷克政府的优先发展领域。捷克政府、本土及外资企业（包括美国企业）正致力于推动这些领域的技术研发与竞争力提升。

美国工业与安全局（Bureau of Industry and Security, BIS）针对“AI技术扩散”发布的暂行最终规则引入了一套新的目标国家分类体系，以确定出口管制如何适用于AI相关技术。尽管该目标明确，但BIS无需为此创建一套全新的国家分类体系，而应与《出口管理条例》（Export Administration Regulations, EAR）第740部分补编1中的现行国家分组保持一致。此举将简化监管规则、降低企业合规成本，并在确保达成“AI扩散规则”国家安全目标的同时，维

持出口管制政策的一致性。

捷克工业联合会相信，沿用现行成熟的国家分组机制能够提升监管效率、降低规则复杂性，同时精准反映国家安全风险。现有体系通过减少行政不确定性为行业提供了稳定性，将更好地促进人工智能技术的扩散与全球协作。然而，令人担忧的是，作为北约成员国及美国紧密的安全与经济合作伙伴，捷克等欧洲盟友却被毫无理由地排除在《临时最终规则》下限制最少的国家组别之外。

这一做法与此前美国商务部工业与安全局（BIS）在其他敏感技术（如半导体制造设备或高性能计算）出口管制中的决策逻辑相矛盾。例如，在**“先进计算规则”（87 FR 62186）与“半导体制造设备控制”**（88 FR 73458）等过往政策中，BIS始终将北约成员国及其他可信伙伴纳入优先许可框架——具体体现为允许向这些国家出口受控技术时适用更宽松的许可例外。这些先例表明，现有国家分组机制已为出口管制的实施提供了可靠且有效的操作路径。

引入一套全新的国家分组体系，显著增加了企业的合规成本。出口商

在判定各类受控物项的许可证要求时，本就需应对《出口管理条例》（EAR）中复杂的国家分组体系。而新规下的目标国分组要求企业进行双重分类——既要依据EAR既有国家分组，又要遵循“AI扩散规则”下的目标国分组。这不仅推高了追踪和报告合规状态的行政成本（需适应陌生框架），还因“AI扩散规则”与其他BIS法规的潜在冲突，加剧了无意违规的风险。

与此同时，这一框架的推行可能引发战略风险。例如，迫使美国紧密盟友转向其他国家的AI技术合作，导致美国企业处于竞争劣势。此类做法或将不必要地阻碍技术进步与国际协作。

捷克等国的出口风险微乎其微，应当纳入《出口管理条例》（EAR）第740部分补充条款第1号中现有的A组国家进行管理。该组别涵盖了北约盟友、多边出口管制伙伴以及关键经济盟友，这些国家已通过美国国家安全评估并享有最高信任等级。

总结而言，捷克工业联合会充分理解《人工智能扩散规则》旨在平衡国家安全目标与经济技术领导地位的初衷。然而，当前规则引入的独立

国家分类体系（如将捷克等盟友排除在外），不仅与现有EAR国家组别脱节，反而削弱了上述目标。捷克工业联合会认为，若将AI扩散规则与EAR现有的国家组别体系（包括A组、B组、D组等）对齐，BIS可实现以下核心优势：

（1）提升监管效率：现有国家组别已基于综合风险评估划分，无需重复建立新分类体系，减少企业合规成本；

（2）强化国际伙伴关系：现有A组国家（如澳大利亚、日本、德国等）已构成美国技术联盟核心，排除盟友将损害合作互信；

（3）降低合规复杂性：企业已熟悉EAR国家组别框架，双重分类体系易导致混淆和误判风险；

（4）确保国家安全有效性：现有国家组别已通过严格安全审查，新增分类体系可能引入冗余且削弱对高风险国家的精准管控。

基于上述结论，捷克工业联合会强烈建议BIS修订《人工智能扩散规则》，将目标国家分类与EAR第740部分补充条款第1号的国家组别保持一致，以维护监管一致性、强化技术联盟并巩固国家安全防线。□



融合创新 数智未来

——CIMT2025展品看点

中国机床工具工业协会市场部

第十九届中国国际机床展览会（CIMT2025）将于2025年4月21-26日在首都国际会展中心（新国展二期）和北京中国国际展览中心（新馆）举行。展出面积31万平米，来自全球30个国家或地区的2400多家展商齐聚一堂，共襄盛会。届时，境内外著名机床工具制造商悉数到场，其中德国、美国、英国、瑞士、意大利、西班牙、法国、捷克、日本、韩国、印度、中国台湾地区和香港地区等13个国家和地区的机床协会或贸促会等机构组团参展。本届中国国际机床展览会是目前全球规模最大的机床工具专业展览会，必将成为全球制造业关注的焦点。

CIMT2025展会以“融合创新，数智未来”为主题，旨在促进信息化技术与制造技术的深度融合，探索未来数字化和智能化制造之路。展会主题紧扣制造技术发展方向和时代特点，将在业内引起巨大的关注和共鸣。

CIMT2025境内外代表性行机床企业如斯特拉格集团、联合磨削、巨浪、埃马克、西门子、+GF+、马扎克、大隈、DMG Mori、牧野、发那科、中国通用技术、济二、秦川机床、华中数控等，在展示技术发展的大方向方面，强调集成与复合、数字化技术、柔性自动化、绿色技术等。在目标产业应用方面，特别针对汽车、航空航天、半导体、模具等领域，提供解决方案，以满足客户工件加工的效率和精度要求。

一、工艺集成催生新结构

工艺集成就是将车、铣、磨、齿轮加工、测量、自动化等功能中的2项或多项功能集成在一台机床上，这样原本需要在多台机床上依次加工的工件，现在可以在一台复合加工机床上完成，以达到更高的精度，提高生产率。这种整合能减少所需的操作人员数量，弥补操作人员的不足，并减少每次加工后的中间在制品，节省占用的车间空间和成本，有助于在公司内创造一个有价值的工作环境，操作

人员有更多的时间用于高附加值的工作，提升员工的工作价值。

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，促进了复合加工机床的快速发展。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、车磨复合、铣磨复合、增减材复合、车削和制齿复合、切削加工与超声加工复合等，另外还有将测量流程、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。

铣车复合加工机床一次装夹能够完成车、铣、镗、深孔钻、磨削、齿轮加工、在线测量等几乎所有的冷加工工序，实现从毛坯到成品的全序加工，是解决飞机起落架、叶轮、叶片、涡盘、船用螺旋桨、重型发电机/汽轮机转子、齿轮轴、大型柴油机曲轴、真空器螺杆等形状复杂零件最高效的加工手段。

WFL公司作为铣车复合加工机床细分行业的开拓者和技术引领者，专注于铣车技术的研究，其五轴铣车复合加工机床一次装夹可完成所有的冷加工工序，最近又集成了在机测量以及激光熔覆（增材制造）、激光焊接和激光淬火等热加工工序，进一步丰富了其铣车复合加工机床的功能。本次展出的M30小型多功能车、钻、铣复合加工机床，可加工回转直径 $\phi 520\text{mm}$ 的复杂轴类及盘类零件，最大加工长度2000mm，可实现4轴车削、5轴铣削，完成工件6面完整加工，还可根据需要进行切齿或深孔钻加工。



科德的KTX1250TC五轴联动卧式铣车复合加工中

心，最大车削直径 $\phi 630\text{mm}$ ，对置双车削主轴，标配36把圆盘式刀库，采用直驱技术，精度高，适用于复杂轴类零件的6面完整加工。

秦川机床集团宝鸡机床展出的BHR500V卧式铣车复合加工中心，采用卧式对列双主轴布局，上刀塔为回转B轴，下刀塔（选配）为卧式刀塔型结构，最大加工工件 $\phi 500\text{mm} \times 1000\text{mm}$ ，适用于航空航天、船舶、汽车、模具等行业复杂轴类零件的精密加工。

INDEX铣车复合加工中心G220，可配置3个刀塔，多达169个刀位的刀库，以及16个运动轴，为复杂零件的完整加工提供最大的柔性。该机具有宽敞的加工区域，三把刀可以同时加工，无碰撞风险，适用于机械工程、汽车、航空航天领域小型或中型复杂轴类工件的高效加工。

魏因加特纳mpmc系列万能车铣复合加工中心，一次装夹可以实现车削、铣削、旋风铣加工，最大车削直径和铣削直径从 $\phi 700\text{mm}$ 到 $\phi 2800\text{mm}$ ，最大加工长度可达20m，工件最大重量可达30t，典型加工件包括发电机轴、塑机机筒、塑机螺杆、起落架、燃气和蒸汽涡轮轴、大型压缩机轴、印刷胶辊、轧钢辊等，为能源、石油和天然气、塑料和重型工程等各个行业提供解决方案。



车铣复合加工机床在加工中心基础上，增加了车削功能，主要针对大直径盘类形状复杂零件的加工，典型零件包括机匣、轮辋、轴毂等。

斯达拉格公司的Bumotec 191neo七轴五联动车铣复合加工中心，是由其旗舰机型S191加工中心演变而来，将小型精密复杂的高价值零件的一次性完整加工提升到新的高度。与S191加工中心相比，该机换刀时间减少15%，速度提高12%，主轴功率提高到22kW，扭矩可达175N·m，刀库最多90刀位。副主轴有四种选择，单虎钳（P型）、多虎钳和夹具组合（RPM型）、立卧转换背主轴结构（R型）、背主轴+虎钳或顶尖结构（RP型）。除了铣削和车削之外，无需更换设置或夹具，还可以实现磨削、抛光、车齿、滚齿和钻石刀镜面加工等加工。是医疗器械、骨科植入物、奢侈品、航空航天燃油喷嘴、微细机械等高精度、高价值复杂零件的理想加工设备。

北京北一机床的XHA $\mu 24$ -MTR25车铣复合加工中心，最大车削直径2500mm，工作台承重15t，可快速、

精准地抓取车削头、伸长铣头、机械摆角铣头等多种附件头。一次装卡可实现车、铣、镗、钻、铰、攻丝等多工序加工，完成航空发动机机匣、船舶燃气轮机机匣等形状复杂大型零件的内外回转面、内腔等部位的高精度加工。

大隈的MU-8000V-L五轴立式加工中心，集成了车削功能，一次装夹可实现高精度的铣削和车削加工。高效加工能力令人惊叹，S45C材质下的面铣加工能力 $504\text{cm}^3/\text{min}$ ，立铣加工能力 $672\text{cm}^3/\text{min}$ ，车削加工能力 3mm^2 。

复合加工机床结构形式多样，除常见以满足构复杂零件的高效高精度加工为主要目的铣车复合和车铣复合外，以提高加工效率、提高加工精度以及满足用户特定需求的各种类型的复合机床也快速发展。如车磨/铣磨复合，增材/减材复合，激光加工与切削加工，超声加工与切削加工等复合加工机床也是屡见不鲜。

埃马克的VLC 200 GT车磨复合加工中心，集成了磨削、硬车工艺，能够在一次装夹中完成热处理后高精度硬加工，最大限度地缩短整体加工时间，主要应用与汽车传动齿轮等盘类件的高精度加工。

玻璃、陶瓷、硬质合金等硬脆材料以及碳纤维复合材料，用传统的工艺方法很难加工。然而，在传统的切削加工件技术上加上高频振动，也就是把超声技术和切削技术相结合，能显著地提高加工效果。

汇专科技近年来专注于绿色超声技术解决方案的研发，以其超声加工、超临界 CO_2 低温冷却、微量润滑、整体PCD刀具四大核心技术为基础，研发出系列超声绿色加工机床。本次展出的多台超声绿色加工中心，广泛应用于高温金属、钛合金、陶瓷、单晶硅等难加工材料的加工。其中MVC1250-5AXIS超声绿色立式五轴联动加工中心，搭载了超声加工技术、超临界 CO_2 低温冷却技术和微量润滑冷却技术，加工高温合金整体叶盘，叶片的表面粗糙度值减小56%；UEM-600超声雕铣加工中心搭配超声辅助加工技术及整体PCD微钻，加工单晶硅可连续加工2000个以上 $\phi 0.45 \times 24.75\text{mm}$ 的超深微孔，入口处目视无崩缺，孔针圆度达0.003mm；孔壁粗糙度从 $\text{Sa}6.54\mu\text{m}$ 降低至 $0.013\mu\text{m}$ 。



江苏集萃华科的CV500+JUS五轴超声波复合加工中心，集成了超声波加工技术，在主轴旋转时，刀具端同时产生轴向20kHz的高频振动，能减低刀具加工时的切削力，延长刀具寿命，特别适合于难加工金属、复合材料以及非金属硬脆材料的高效加工。

格里森的Genesis 280HCD滚齿倒棱机床，是专为干式滚齿和倒角加工而设计的滚齿倒棱复合加工机床。直驱滚到主轴转速可达6000r/min，集成了倒角切削单元，可在齿轮滚齿的同时进行倒角加工模数5mm以下的齿轮。还可根据需求，选配双工位或四工位环形上料装，实现单机自动化。

浙江陀曼智能科技股份有限公司的Y3125CNC13滚棱复合机，上下料工位、待料工位、滚齿工位和滚棱工位的连续转换。滚棱工位刀架允许大角度翻转，方便滚棱刀的更换，同时可以根据需要采用多种滚棱工艺对工件上下端面进行倒角。采用四工位上下料机机械手，实现少人化与无人化加工，提高机床的加工效率。

复合加工技术的进步和发展，淋漓尽致地体现在本届展会的展品上，这类高新技术的复合加工机床，不再是全球知名机床企业的专美，境内外一些新锐企业也将在本届展会上展示各自的复合加工机床。

本届展会，WFL、DMG Mori、马扎克、大隈、Index、中国通用技术、秦川机床、大连科德、齐重数控、富信国际、北京博鲁斯潘、汇专科技、甘肃星火智能、南通国盛、南阳煜众、上海诺俾力等机床企业都将有复合加工机床展出。

二、数字创新提升竞争力

数字化技术能够帮助企业提高生产力和效率，减少故障率，提升企业的竞争力，是近10多年来发展最快的技术之一。

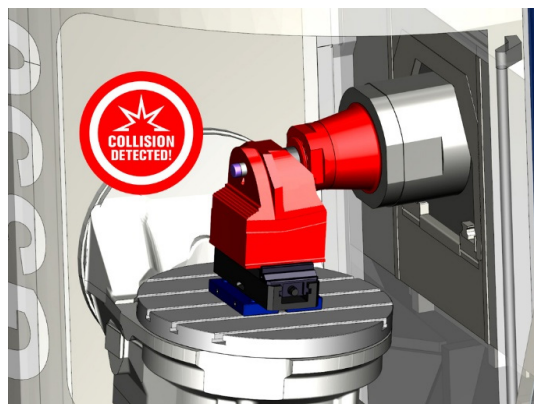
数字化技术涵盖了现代制造企业的整个流程链，从产品规划、产品设计、生产实施、生产制造、销售和售后服务等。

世界知名的软件开发公司、机床制造企业将携各自的数字化解决方案亮相展会，从功能强大的CAD/CAM软件、企业管理软件，到集成的生产计划、生产管理和工具管理系统以及数字双胞胎仿真等，为制造业的数字化转型提供支持。

Openmind的CAD/CAM集成化软件HyperMILL，是一款专业的五轴联动加工解决方案，以其高效的算法和精细的加工策略受到高端制造业的青睐，在航空航天以及高

精度五轴加工领域享有盛誉。HyperMILL提供2.5轴到标准5轴的全系列可选模块，具有自动干涉检查、独立五轴联动、动态变化刀轴等功能，编程功能简单易用，能够轻松地完成五轴加工的编程，可靠而高效地制造航空叶轮、叶片、结构件等要求严苛的零件，并使所有曲面都具有完美的质量。

CGTech的专业切削仿真软件Vericut，是当前全球数控加工程序验证、机床模拟、程序优化软件领域的领军者。它能够精确模拟仿真数控铣床、数控车床、车铣复合加工中心、并联机床、线切割、电火花等机床的NC程序，具有先进的碰撞检测功能，可以检测和避免机床、工件、刀具之间的碰撞。此外，Vericut还可以进行加工过程的优化和切削力分析。



华中数控的iNC-Cloud大数据平台，针对多类工业设备接入、多源工业数据融合、海量工业数据管理、多种工业应用集成等需求，以工业大数据为核心，以“多源感知”、“存储分析”、“标识溯源”、“信息安全”四大体系为支撑，提供柔性产线、数字车间、智能工厂等全方位解决方案，助力制造业中小型企业数字化转型。其IntePlant产线仿真与虚拟调试平台，支持以工艺（工序、工位、产线、工厂）直接驱动仿真环境的搭建并进行仿真验证工作，为产线设计、实施、运行提供全过程解决方案。产线设计阶段，对产线布局结构、工艺流程、生产节拍、加工效率等进行仿真与验证；产线实施阶段，与产线PLC联合虚拟调试，可视化验证PLC运行逻辑，确保产线控制逻辑准确无误；产线运行阶段，虚实同步运行，产线状态监控，确保产线有序运行。

精雕的数字化制造软件平台JDSoft Surfmill 10.0，集成了CAD/CAPP/CAM功能，确保制造信息能够在制造链中精确传递，为用户构建完善的数字化制造工程服务，如零件设计、工艺规划、夹具开发、加工工艺编程、切削仿真和优化等。

亚威智能制造系统解决方案，可以为企业提供云端设备监控、设备分析、维保管理等服务；设备管理EMC系统，专门与亚威的机床设备配套，帮助企业快速了解机床的运行状态，可以实现远程运维指导、加工产量统计、下发NC加工程序等功能。钣金MES软件，集成ERP、MES及CAD/CAM的优势功能，为钣金行业企业提供一站式数字化制造解决方案；威智造，为客户提供一站式轻量化数字解决方案，涵盖供应链管理、制造管理、设备管理、能耗与环安管理等模块，具有简单，快捷，高效等特点。



格劳博的Grob-NET4Industry的数字化解决方案通过9个模块化的应用程序，来实现从生产规划、监控和分析、生产过程的可视化，以及有计划性的维修和保养，支持用户的生产流程网络化数字化，提高生产力和竞争力。

济南奥普瑞思的汽车零部件加工自动化案例，展示了为客户规划的无人工厂的整体解决方案。无人工厂被分为加工、装配、物流、仓储、控制中心五个区域。控制中心通过MES软件、数据云下发生产订单等指令，收集并可视化加工设备状态、装配进度、物流运输AGV小车状态、库存等信息，为企业生产管理、人力资源、财务核算提供作为管理层决策依据的可视化数据。

大隈的数字化工厂（OKUMA Smart Factory）由Smart Manufacturing（智能化制造）和Smart Machines（智能机床）构成，通过Connect Plan工厂管理系统实现信息可视化。大隈的数字化工厂充分融合了其最新的IT技术、自动化系统和长期培养积累的熟练技能，实现了高附加值产品的高效率生产，通过灵活应用IoT技术，可满足小批量生产也能保证批量生产的生产效率，实现大规模定制，灵活应对市场需求变动。

大隈基于其数字化工厂技术，建设了3个DreamSite示范工厂。第3家示范工厂DS3继承了大隈总部工厂的DS1和DS2的理念，通过机器人和FMS，自动清洁、切屑收集和切削液供应系统，提升自动化效率，在节省人工的同时，可实现7×24h连续无人操作。通过IoT技术，实现加工设

备及机器人工作的可视化，通过运作分析提高生产效率。

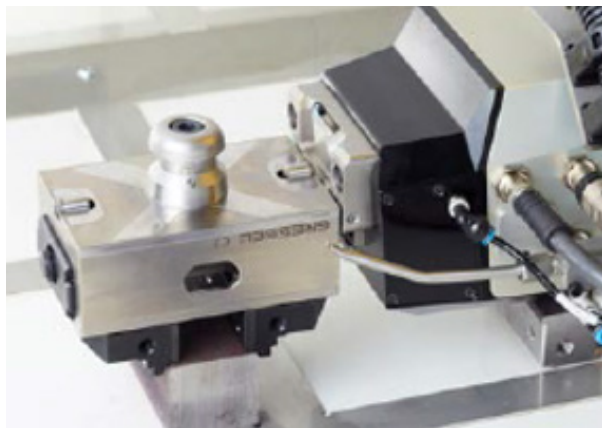
三、少人无人制造新时代

为解决劳动力短缺的问题，支持少人化或无人化生产的自动化技术日益成为现代制造业的核心驱动力之一，不仅带来了效率提升、成本降低和品质保障，更重要的是在改变我们的思维方法、生产方式和工作模式。

CIMT2025自动化技术展区，汇聚了来自全球的自动化技术和设备供应商，包括专门从事机器人、协作机器人（cobot）、运动控制、数据管理和自动化集成的公司。此外，本届展会中的展品将展示切削加工、成形加工、增材制造、视觉系统、计量、工具、工夹具、齿轮加工、零件处理和清洁以及制造技术的自动化解决方案。

雄克展示的工件及托盘混合自动化方案——雄克R-C2自动化虎钳系统，整合了抓取和夹持两种功能，具备托盘自动化和机器人上下料两种工艺的优势，简化了机床自动化上下料的流程。在机床内，R-C2如同托盘，定心虎钳被机器人送入机床并松开；装件时，R-C2如同机械手，模块中定心虎钳作为一个可控的伺服机械手。只要启动自动化流程，工件的抓取、夹持和六面加工均可一次完成。对于新的工件，R-C2无需重新设置需求，伺服驱动会自动重新定位工件。

除了R-C2自动化虎钳系统，雄克还将展示多种自动化系统经典产品和新产品，如EZU三指电动机械手、NSE3-PH 138 IOL电动零点快换模块等新产品。



库卡的KMP 1500i自主移动机器人，基于库卡导航解决方案（KUKA Navigation Solution），融合激光SLAM（同时定位和构图）、二维码导航与视觉SLAM导航的重载潜伏顶升式移动机器人，额定负载1500kg，搭载前后3D相机，可智能绕障，模块化设计与丰富的接口可以快速实现客制化，提高生产线的柔性、效率、安全性及智能

化，适用于汽车、电子、食品等一般工业重型物料搬运。

珠海广浩捷的快换基准板系统，具有高精度定位、快速换装、结构紧凑、耐用、易维护等特点，确保每次更换工装都能实现高精度的定位，只需要简单的操作即可实现工装的快速锁紧和释放，减少换装时间，提高生产效率。

武创智达的智眼系列桁架机器人，将机器人控制系统和视觉系统进行融合，通过机械手夹持住加工件，再对机械手夹持加工件进行视觉标定，即可完成机器人系统对夹持对象的标定。加工件无需按照特定的姿态插入仿形槽，备料方便快捷。加工件换型时只需更换或调整机械手夹爪，并对换型加工件进行视觉标定和抓取测试即可，能有效缩短产品换型的准备时间。

江苏集萃华科的机器人叶片自动化磨抛工作站RBP-X-200/500，专为航空发动机叶片等复杂曲面零件的打磨和抛光设计的高度自动化、智能化装备，支持叶片自适应闭环检测与全特征磨抛，力控砂带磨抛工位和力控砂轮磨抛工位可数字化控制相关参数，提高叶片磨抛产能、精度和一致性。系统核心组成部分包括六轴工业机器人、控制系统以及视觉检测系统。其中视觉检测系统是工作站的一大亮点，通过高精度线扫相机和其他传感器，对叶片表面进行详细的扫描和分析，获取工件的实际尺寸和形状信息。基于这些测量数据，系统可以自动规划最优的打磨和抛光路径，从而保证每个叶片都能得到精确而均匀的处理。

力鼎智能装备的LDS800托盘转运系统，针对复杂结构件加工的机床托盘上下料，配备了先进的信息管理系统，能有效组织和管理物料，通过优化物料传输和存储，灵活应对生产任务和产品的变化，减少重新设置的时间和成本，提高生产效率。该系统还可以实时监控生产数据，提供分析报告，为生产过程的优化和决策提供数据支持。



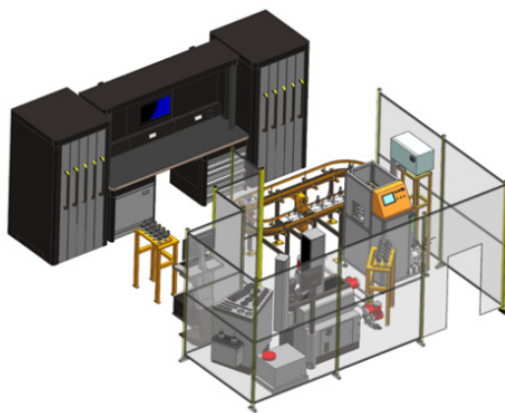
西安汉沣智能柔性自动化生产线管控系统（汉沣PCS），具有生产过程控制、生产资源管理和生产决策分析的功能，通过控制生产线内的全部硬件资源和管理生产线内的全部数字资源，实现柔性生产。

深圳华成工业控制的多关节机器人控制系统GC-R6，最多可控制8个运动轴，支持直线插补、圆弧插补、路径

平滑，具有高性能连续轨迹前瞻控制和速度曲线规划，支持Ethernet、RS485和CAN等多种通信接口，以便和外部编码器建立通信，实现视觉跟随、位置闭环控制等数据交互。深圳华成同时还将展出水平多关节机器人控制系统、线性机器人控制系统等。

GF解决方案的托盘库WorkPartner 1+采用模块化设计，配置灵活，解决了托盘库占地面积小与料库容量大的矛盾，而且可随时根据需要添加第二甚至更多的料库。WorkPartner 1+托盘库适应性广，可以和铣削加工中心、电火花成形机床、线切割机床、激光加工机床和磨床一对一适配，也可以一对二适配。托盘库内集成了机械手和工作台夹头，能够同时自动上下工件和电极，最大举升和搬运总重量80kg。

上海交大智邦的协作机器人复合换刀AGV，集成了移动平台技术和协作机器人技术，能够自主定位、自主移动，智能避障，可实现无人化刀具自动更换；自动快换手爪，应对不同刀柄形式的刀具更换。刀具信息对刀仪自动获取，机床刀库数控系统自动写入。其自动刀具装备及检测单元，包括自动化机械手、自动对刀仪和热装仪一体机、自动化控制系统等，配备了刀具寿命管理和刀具统计分析模块，能够实现机器人自动上下料刀具刀柄，自动上下料刀具、自动装刀、自动冷却刀柄、自动对刀、自动清洁刀柄、自动下料至刀具托盘等一系列自动化、智能化操作。



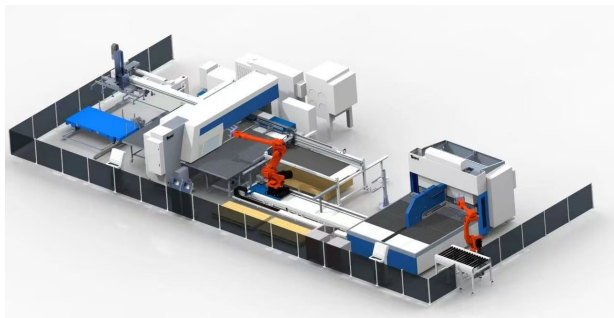
宁夏巨能的柔性直线托盘系统FLP630，基于RGV搬运机床托盘或零点夹具托盘的搬运系统，采用更换托盘的方式实现换产，通过柔性制造软件完成柔性加工的产品。适用于使用APC交换工作台的卧式或立式加工中心。柔性控制系统融入了AI技术，具有全流程追溯，实时预警，权限管理等智能功能。

格劳博的PSS-R450圆形托盘库，与其五轴联动通用加工中心G350搭配展出，作为一个灵活的加工单元，为

用户实现自动化、高效生产提供了切入点。展现格劳博持续为各行各业的用户提供完善服务，量身定制的自动化解决方案，确保产品质量，提升生产效率的愿望。格劳博可根据用户生产需求，为用户量身定制多种托盘库，包括PSS-R圆形托盘库、PSS-L线形托盘库、PSS-T塔形托盘库。

济南森永展出的北村Mycenter-HX250iG卧式加工中心，搭配一个10工位的多托盘自动化单元，机床定位精度 $2\mu\text{m}$ ，重复定位精度 $1\mu\text{m}$ ，适合于小型精密零件、液压滑块的多品种小批量生产。

江苏亚威数控板料冲割折边自动化生产线AMS.HLB-1525，主要有数控冲割复合机、数控板料折边机、机器人组成，用于钣金件柔性全智能加工，可实现自动上料、冲压、激光切割、攻丝(选配)、成形、机器人分拣下料、自动收集废料、机器人自动翻面上料、折边加工、机器人智能码垛等功能。生产线通过上位终端智能管理，编程及任务自动下发。



自动化测量不仅仅是测量对象形貌参数的自动测量，还意味着管理员和机器操作员之间的互动、直观的订单管理、高精度测量，以及与现有生产系统的通信和联网，包括与ERP和QM系统的连接。奥地利Alicona协作机器人测量系统，基于协作式6轴机械手和光学3D测量传感器IFSensorR 25，实现尺寸、位置、形状和粗糙度的高分辨率、可追溯和可重复的自动化测量。测量报告可以送入质量管理体系(QM)和ERP系统，还可反馈到生产过程。当测量传感器检测到有问题的部件时，测量信息自动输入生产过程，生产会自动纠正。

波龙诺孚特(Blum-Novotest)的FormControl X测量及自动化软件，适用于加工中心，结合Blum工件测头在单件和批量生产中对工件进行自动质量控制。它通过FormControl X创建测量程序，并根据加工之间和加工后的控制测量，基于记录测量值进行统计过程控制，并在原始装夹装置中进行返工，来实现加工过程可靠的自动化控制，优化成品质量和制造成本。

先临三维的RobotScan机器人智能3D检测系统，可进行全自动、标准化三维扫描，快速获取工件的三维数据，并进行实时在线检测，输出检测报告。可根据实际检测场景进行定制化开发，适用工厂批量化3D尺寸检测。



DMG Mori、马扎克、沙迪克、杭州蕙勒、西安笑宽、毕孚自动化、南京埃斯顿、上海微茗、安徽力成、宁波伟立、宁夏巨能、奔腾激光、苏州新火花、北京航锐维斯等众多展商都有自动化相关技术和设备展出。

四、精准定制开辟新市场

机床是为制造业提供加工技术的设备。制造业各个行业的工件所用材料不同，工件的几何精度、加工面表面质量要求相差巨大，有的需要高切削效率，有的需要高加工精度，有的需要高表面质量；有的材料硬而脆，有的材料韧而黏等等，因此对于制造技术的要求也存在巨大的差异。通用型机床难以全方位满足用户行业的需求，机床企业围绕汽车、航空航天、模具、半导体、生命科学、精密仪器等行业的用户需求，有针对性地提供解决方案，帮助用户解决制造中所面对各种挑战。

格劳博从传统汽车动力系统制造设备提供商转型成为为电驱动汽车生产设备供应商，能够为电驱动汽车的驱动电机、电池组的大规模生产提供解决方案。格劳博掌握了各种电驱动产品的所有绕组和装配技术。其发卡式电机定子绕组技术已经成为国际标准。格劳博还在近年来开发了在单台折弯机上生产定子完整发卡的方法。格劳博的模块化、可拓展的，从单个电芯到复杂电池包的柔性生产装配系统，可以为整个电池生产流程提供解决方案。



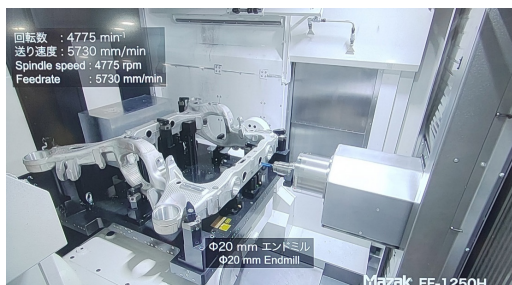
雄克的新能源汽车三电领域自动化解决方案，包括各类电池搬运的专用产品组合，从方形、圆柱到软包电芯，从单个电池到大尺寸电池模组和电池包等。如新产品永磁体机械手RCG，专为大圆柱电池开发，通过压缩空气驱动，用于搬运直径为46 mm的圆柱电芯，多个RCG可组合成一个抓取装置。在新能源车领域，雄克可提供包括电机生产和装配应用、电池系统搬运和装配应用、电控系统的电路板分板工艺在内的多种标准产品组合和定制化行业解决方案。



雄克的生命科学领域解决方案，主要包括机械手、旋转模块、线性模块以及传感器组件和机器人附件，能满足生物技术、医疗技术和制药行业对质量和可靠性、洁净度的严格要求。

针对电驱动汽车大型一体化铝合金压铸零件加工和紧固件装配，济南二机床的由高速双龙门五轴加工中心和一套机器人自动上下料物流系统组成的整体解决方案，具有视觉对中、视觉检查、质量追溯等功能，适用于电动汽车前机舱、后底板及电池壳等大型铝合金压铸零件的高速、高效加工。

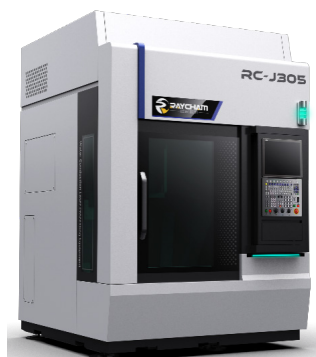
马扎克的FF-1250H L卧式加工中心，是针对新能源汽车一体式压铸大型零件加工而开发的新机型，最大可承载工件 $\phi 1600\text{mm} \times 1100\text{mm}$ ，650kg，适用于中、大型零件的多面加工，具有专门用于工艺集成的机械结构，有助于在加工大型铝工件时缩短生产周期并提高生产率。配置A、B轴摇篮工作台，工件姿势可以自由改变，无需改变装夹就可连续进行多面加工，配置HSK-100铝工件重切削主轴，兼容大直径面铣刀和异形大直径/重型刀具。



汇专科技的超声高效加工解决方案，将其超声绿色机床、超声气钻、超声切割刀具、超硬刀具等创新产品灵活组合应用，能够针对不同材质的复合材料加工需求提供专业的整体解决方案，能够大幅降低切削力、减少工件毛刺、提升表面质量。其MBR6030C-5Axis超声复材切割龙门五轴联动加工中心，配置自主研发智能化双超声系统，超声切割系统及超声铣削系统，可融合超声、超临界二氧化碳、低温冷风三种技术，超声切割铣削最高转速达24000r/min。一机兼顾蜂窝材料、碳纤维预制体、碳纤维复合材料等多种航空航天材料的高效高质加工。

航空航天、汽车、化工等领域对于微小孔结构的加工有大量需求，典型零件包括发动机燃油喷嘴、涡轮叶片冷却孔、陀螺仪上的微孔、化纤喷丝板上的异形孔等。尤其是航空航天领域对于零件的加工质量和加工精度有严格要求，材料多为高温合金等难加工材料。对于这类加工需求，西安中科微精MicroDrill 40P超快激光双工位并行微孔加工设备，采用多路分光高响应精准控制技术，实现高功率飞秒激光光源的两路分束传输、调整与动态控制，配备多功能高速扫描模块，实现了曲面零件复杂微结构(圆孔、倒锥孔、簸箕孔等直圆孔或异形孔)的高品质制孔。

南京中科煜宸RJ305水导激光加工设备，将激光与“细如头发”的水射流相结合，通过光在水射流中的全反射效应，以类似于传统光纤的方式在水射流内精确传导激光。实现大长径比微孔加工，获得高质量、高精度的微孔。



针对航空发动机整体叶盘、机匣、叶片、结构件等领域难加工材料零件，赛因刀具的中心内冷却波纹立铣刀具有非线性切削特性，能够降低30%~40%的切削力，降低60%以上切削力波动，振动加速度值控制在2g以下，使得加工机匣壳体类航空薄壁结构件零件的变形量控制在0.05mm以内。波纹立铣刀的非线性切削特性，能够提升切屑断裂频率，切屑长度控制在5mm以下，成倍提高排屑速度，使得加工整体叶盘通道时，断屑不良率从17%降低到2%。应用中心内冷波纹立铣刀加工航空发动机难加工材料零件，材料去除率可提升70%，刀具寿命延长3倍，加工节拍缩

短35%。

对于航空航天、光学器件、半导体、精密模具等领域一些高精度、高表面质量要求零件的加工，北京海普瑞森的北京海普瑞森超精密单点金刚石车床，加工工件口径 $\phi 250\text{mm}$ ，表面粗糙度 $Ra < 2\text{nm}$ ，面形精度 $PV < 0.2\mu\text{m}$ ，可加工平面、球面、锥面、非球面、离轴面、自由曲面、衍射面、模仁D-CUT等。可加工材料包括铜、铝、单晶锗、硒化锌、单晶硅、硫系玻璃、氟化物、树脂、人工晶状体、PMMA（有机玻璃）等。其CGK-400V超精密数控光学定心车床，用于镜片光学轴线与镜座几何轴线偏差的自动检测和加工修正。一次装夹，可实现光学轴线自动定心及上、下端面，外圆的同时加工，镜片顶端至镜座端面高度误差 $< 2\mu\text{m}$ ，镜片光学轴线与镜座轴线对心精度 $< 3\mu\text{m}$ ，镜片光学轴线与镜座轴线角度偏差 $< 3''$ ，镜座圆度、圆柱度 $< 2\mu\text{m}$ 。配合相应耦合透镜后，可测量任意曲率半径的镜片。可加工镜座材料包括不锈钢、钛合金、铝合金、铜合金等。

无锡市锡山区半导体先进制造创新中心的光学非球面超精密复合加工机床UPN150G5，是针对光学器件加工专门研制的超精密加工机床，整合了磨削、车削以及在机测量功能，一次装夹可实现纳米级光学磨削、车削及在机纳米测量和反馈补偿，磨削加工口径最大 $\Phi 150\text{mm}$ ，车削加工工件表面粗糙度 $Ra < 1\text{nm}$ ，面形精度 PV 值 $< 0.1\mu\text{m}$ ；磨削加工工件表面粗糙度 $Ra < 5\text{nm}$ ，面形精度 PV 值 $< 0.15\mu\text{m}$ 。

浙江博谷精密的MIXTECH T42 MYT超精密车削中心，最大回转直径 $\phi 685\text{mm}$ ，最大车削直径 $\phi 240\text{mm}$ ，最大车削长度 350mm ，适用于有色金属、不锈钢、合金钢、钛合金等材料的精密复杂形状零件的高精度加工，加工圆度 $< 1\mu\text{m}$ ，表面粗糙度 $Ra < 0.4\mu\text{m}$ 。

牧野的V33i立式加工中心以其高速加工性能、高精度以及长期精度保持性成为高精度模具硬铣加工的最终方案。首次在中国展出的V300立式加工中心是V33i的改进型，在保持原机型长期稳定的加工精度和高表面质量的基础上，进一步提高了对可靠性、生产率、自动化的支持，并降低能耗，提升机床的性能。升级后的几何智能控制技术SGL.6（Super Geometric Intelligence Function）能够更细致地处理复杂三维模型中微小的程序段，提高加工运行速度的同时，保证更高的加工精度。选配安装eStabilizer（稳定器），能够自动抑制环境温度变化而导致的机床变形，使得设备在通常环境温度下保证高精度加工，并提升加工精度稳定性。与V33i相比，V300的三轴行程不变，最大工件尺寸在宽度上增加了 50mm 。V300将

成为中小型精密模具的新选择。



首次在中国展出的V900立式加工中心，其Y轴行程 1300mm ，比原有机型V99L增加了30%，工件深度可达 1500mm ，比原机型增加了 500mm ，能满足大型和复杂模具机零件的加工需求，如汽车零部件模具。

爱佩仪（API）的mScan激光扫描仪，采用蓝色交叉激光的工作方式，以每秒200,000点的速度生成点云，为工件扫描作业提供了一种准确高效的解决方案。mScan可以集成到自动化测量单元中，完全取代传统手工扫描操作，为重复性的工件检查作业提供了极大的便利，还可应用于车间质量控制，与爱佩仪（API）智能分析软件相结合，实现生产过程监控、分析，为生产流程的进一步优化和改进提供数据支撑。



满足各个工业领域不同加工和测量需求的解决方案不胜枚举，遍及整个展场，期待您的发现。如浙江畅尔用于航空发动机和燃气轮机压气盘、涡轮盘的榫槽加工的数控高速拉床；珠宝、钟表、医疗、航空航天等行业精密小型复杂零件尖端加工需求的解决方案有威力铭-马科黛尔公司的508MT2车铣复合加工中心、宝美的Bumotec 191neo车铣复合加工中心；浙江固本专用于碳化硅外圆和Notch缺口磨削加工的GC-400HV龙门复合半导体专用磨床；针对小型精密复杂零件大批量生产的解决方案，有米克隆的Multistar CX-24、Multistar LX-24，朗快智能的多主轴多工位车铣复合加工中心，河北力准的LH006807多主轴多工位水车式组合机床，台湾凯泓的8工位9轴CNC水车加工机，Index的MS22-8多轴数控多功能机床；马扎克的

FSW-460V将摩擦搅拌焊和加工功能集合在一台机床，可以根据不同的产业和工件加工需求，为客户提供理想的适合批量生产的FSW 综合解决方案。

五、绿色发展树立新标杆

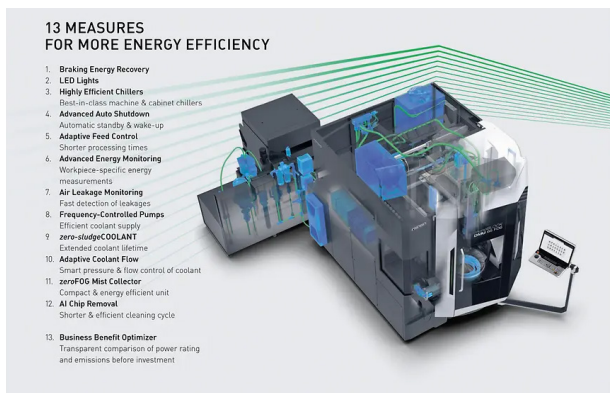
机床产品广泛应用于汽车、航空、半导体、能源、交通、工程机械、模具等领域，然而，在使用过程中，存在大量能源消耗和废弃物排放，对环境造成极大的影响。机床产品的绿色转型面临的挑战包括减少能耗与排放、减少废弃物以及提高资源利用效率等。

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成为了机床产业实现可持续发展的关键。

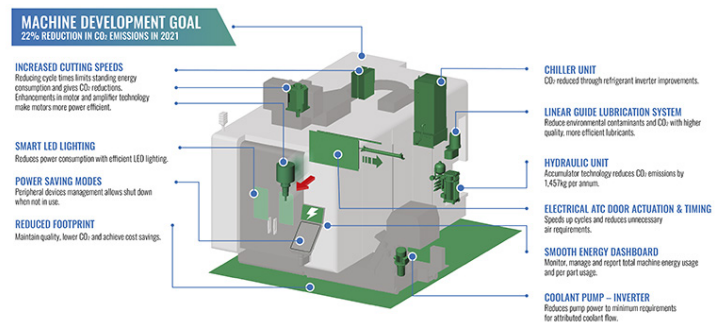
通过智能化控制，实时监测和调整机床的能源使用情况，最大化能源利用效率。

大隈的MA-600H III卧式加工中心，应用了Thermo-Friendly Concept（亲和）智能技术，能够减少因室温变化和加工热量而引起的加工尺寸变化，无需采取例如恒温车间之类的特别措施，在普通的工厂环境下，即可实现高精度的加工；也不需要长时间的热机，无需机身冷却装置或过度的空调控制，即可保证长时间加工的尺寸稳定性，降低能耗。配置“免清洗水箱”，去除会影响加工的切屑液杂质（油泥），减少清洗水箱的次数，延长切屑液的使用寿命，减少废弃物排放。

DMG Mori一直致力于提升机床的能源效率，如采用LED灯、高效冷却器等节能部件，结合制动能回收、自适应进给控制、高级能源监控等13项创新措施和功能，能够显著降低机床使用过程中的能源消耗，实现30%以上的节能。其NLX 2500 2nd G使用了400V工作电压，配置无油泥水箱（zero-sludgeCOOLANT）和易于维护的zeroFOG油雾收集系统，能够降低机床16%的能耗，减少12%的压缩空气和50%冷却液的用量，延长冷却液的使用寿命，减少废弃物的排放。



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。新推出的NEO系列绿色环保机床，保持了原有机种的高生产效率和高精度加工性能，显著降低了机床功耗，以减少CO₂的排放。其VARIAXIS i-600 NEO立式五轴加工中心，通过一次装夹，实现完整加工，减少装夹辅助时间，利用高速加工、复合加工等先进加工技术，大幅减少加工时间。搭载的Mazatrol Smooth AI控制系统，能够智能地控制机内照明和CNC背光；在检测到操作人员接近后，机内照明自动点亮；加工加工结束后，排屑器自动停止运行减少功耗；使用润滑脂对主轴、滚柱导轨、滚珠丝杠进行润滑，大幅减少润滑油的消耗。采用蓄能器的液压单元、变频式冷水机组、去油泥节能冷却系统，降低能耗，减少环境污染。



Index的机床产品在开发和进行技术改进时，就将能效作为核心要求，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。

采用变频技术可以根据负载调整电机转速，降低能源消耗；在加工过程中对金属切屑和冷却液进行再生利用，减少环境污染，节约资源。

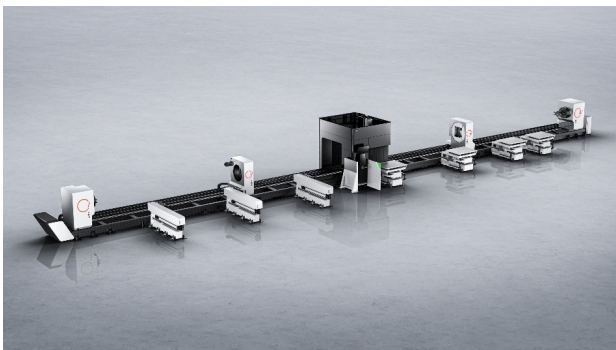
恩斯克（NSK）的MT-Frix低摩擦滚珠丝杠，降低摩擦，减少发热。同等刚性下，动摩擦力矩最高降低50%，发热最高降低40%。

海德汉的绝对式封闭直线光栅尺LCxx6系列，本着“降低用户使用成本TCO”的理念，采用新的光学扫描系统，光栅尺上的光束始终能聚焦在标准位置，扫描质量不受液体或水珠污染的影响，提高了光栅尺的抗污染特性。不再需要安装附加的空气过滤器，能大幅降低使用成本。

格兰富水泵的高压螺杆泵，结构紧凑，使用寿命更长，是为中国市场打造的高效节能产品，适用于为机床泵送冷却润滑剂、冷凝液转移及类似应用。配备内置变频控制的高效E-电机，电机转速可连续可变控制，能够减少冷却剂的热输入，减少能耗。

邦德激光M系列激光切割机，可实现零尾料，双工序并行加工，切割+下料、切割+上料两大工序并行开展、循环往复，缩短管材加工时间，大幅提升综合加工效率，减少废料产生，提高材料利用率。

三河同飞的变频水冷却机，采用变频压缩机，可实现其转速在一定范围内连续调节，改变输出能量；采用新冷媒R410A，不破坏臭氧层，工作压力为普通R22制冷剂的1.6倍左右，制冷效率高；与普通水冷却机相比耗电量可节约10%~20%。



上海朗畏液压的LW-ZJ-05节能液压系统，能够长时间保持30MPa的高压，电机只需要间歇性工作，比普通的液压系统节电90%以上。其永磁变频液压站，采用变频控制技术，比普通液压站节电65%以上。

秦川机床YK8030车齿机、重庆机床的YD8060重型数控车齿机、南京二机的Y8130CNC型数控车齿机、宜昌长机的YK3620数控卧式滚齿机，采用干式切削，不需要使用冷却液，减少了环境污染；另外车齿机采用展成加工方法，加工效率比插齿工艺提高4~5倍。



增材制造能够减少机加工，提高材料利用率，显著减少产品的重量以及所需材料，减少浪费，降低CO₂的排放。

宁波海天增材科技的金属3D打印机C650M，采用选择性激光熔化（SLM）增材制造工艺，使用8路激光，可打印650mm×650mm×880mm的模具钢、不锈钢、铝合金、高温合金、钛合金等金属材质零件。使用C650M生产制造航空发动机燃烧室，能够实现传统的铸造和机加工工艺难以制造的复杂冷却通道，优化空气流动和散热性能，减少焊接和装配工艺，缩短开发周期，减少材料浪费，降低生产成本。

中科煜宸的LDM16RD送粉式激光增材制造设备，采用了定向能量沉积增材制造工艺，针对航空发动机叶片的修复而开发的激光精密修复设备。该设备采用小型高柔性机器人与高精度双轴变位机联动结构，环形送粉或光内送粉精细熔覆头，相机快速定位，RC-Argus智能运维系统，由机器人完成送粉，实现叶片自动化修复。

西安铂力特的3D打印机BLT-S400，采用SLM增材制造工艺，是针对批量化增材制造开发的双激光头双向铺粉设备，可生产最大成形尺寸400mm×250mm×400mm的钛合金、钴铬合金、高温合金、铝合金、不锈钢、高强度钢、模具钢等材质金属零件。□

资讯

南京浦荣数控装备有限公司智能制造基地项目开工奠基

2025年3月16日，南京浦荣数控装备有限公司高档工业母机及智能制造装备研发制造基地项目开工奠基典礼在南京市浦口区隆重举行。区政府和主管部门、合作高校等主要领导等嘉宾出席了仪式，中国机床工具工业协会毛子锋会长出席仪式并致辞。

据悉，该项目用地49.7亩，总投资5亿元，拟新建总建筑面积约38000平方米的研发制造基地，包含生产厂房、中试厂房、研发中心、办公、食堂、宿舍等配套设施。计划购置高精设备，组建1.25-16米数控成形磨齿机生产线、4米以上规格数控齿轮机床可靠性测试中心及10MW+智能制造装备测试平台，达产后能够实现大型高档数控成形磨齿机的量产。



CIMT2025展品综述

—— 激光加工设备类

中国机床工具工业协会市场部

激光加工以其高精度、非接触式加工及工艺灵活性的技术特点，获得越来越广泛的应用，很大程度上丰富了加工手段，成为推动制造业转型升级的有效手段之一。激光加工设备展品涵盖精密微加工、增材制造、表面处理等领域，其技术向精密化（微米级精度）、智能化（AI闭环控制）、绿色化（零污染工艺）及柔性化（多工艺集成）等方面加速发展，为航空航天、半导体、新能源汽车等领域提供高效解决方案，并推动制造业向高端化、可持续方向转型。

一、主要技术特色

1. 精密加工与多轴协同

五轴联动技术结合直线/力矩电机驱动与动态补偿，实现 $\pm 5\mu\text{m}$ 形状精度及 $Ra < 0.1\mu\text{m}$ 表面质量。GF加工方案LASER S 500 (U)：热平衡水冷系统抑制热变形，对称结构降低振动。西安中科微精MicroDrill 40P：双转台异步加工，孔径精度 $\pm 0.003\text{mm}$ ，深径比15。

2. 超快激光微加工突破

飞秒/皮秒激光器实现硬脆材料（SiC、陶瓷）及超硬刀具（PCD、CBN）无热损伤加工。德马吉森精机LASERTEC 50 Shape Femto：3D激光烧蚀技术结合CCD快速定位，支持零电极损耗。原点智能Micro3D L530V：400fs脉宽，表面粗糙度 $Ra 0.4\mu\text{m}$ ，适用硬质合金精密加工。南京中科煜宸LCS800：激光微射流切割SiC材料，切口宽度 $30\mu\text{m}$ ，崩边率趋零。

3. 增材制造多材料融合

金属/陶瓷一体化成形技术缩短高端装备研发周期。

铂力特BLT-S400：6×500W激光并联，钛合金成形效率 $150\text{cm}^3/\text{h}$ 。宁波海天C650MSLM：氧含量控制 $\leq 25\text{ppm}$ ，零件致密度波动 $< 5\%$ ，智能铺粉校准提升良率。

4. 智能数字化集成

AI与IoT技术赋能全生命周期管理：江苏亚威MES系统：远程监控设备状态与能耗，优化运维效率。大族激光HF50磁悬浮切割机：0.25ms插补周期，支持云端工艺库实时调用。北京安德CL2激光刀具机：视频界面实时调焦，降低操作复杂度。

5. 绿色制造与能效优化

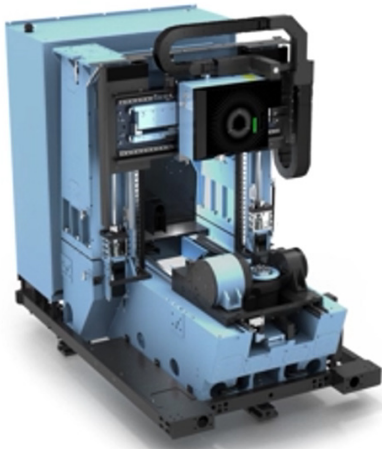
“双碳”目标驱动节能设计。山东豪迈激光旋切机床：采用立式轻量化结构，能耗降低30%。上海名古屋激光磨床：无切削液工艺减少污染。济南邦德M系列切管机：四卡盘智能切换实现零尾料切割。

二、典型展品

1. 激光精密加工机床

(1) GF加工方案LASER S 500 (U) 激光加工机床。首次在中国展出。主要参数：加工精度 $\pm 5\mu\text{m}$ ，表面粗糙度 $Ra 0.1\mu\text{m}$ ，扫描速度 3500mm/s 。

技术特点：五轴联动，采用直线电机和力矩电机驱动，热平衡水冷系统结合对称布局设计，有效抑制温升和振动。新一代3D扫描器实现高效微加工，支持自动化配置（三向机床门自动操作），能加工碳化硅、氮化硅等硬脆材料。适用于IC封装、晶圆卡盘等高精密场景，兼具微雕刻、微成型和表面处理功能，满足光学镜头、液态轴承等领域的超精细加工需求。



(2) 德马吉森精机机床贸易有限公司 LASERTEC 50 Shape Femto。主要参数：X/Y/Z轴行程 500/460/700mm，定位精度 $\leq 8\mu\text{m}$ ，加工硬质合金刀具的表面粗糙度 $Ra < 0.1\mu\text{m}$ ，加速度 $> 1g$ 。

技术特点：紧凑结构（占地面积 4m^2 ），B/C轴高动态力矩电机驱动，五轴联动，搭载CCD相机+3D测头快速定位系统，可变脉冲长度和突发模式的可调谐激光源。创新的3D激光烧蚀技术实现无接触、无电极加工，突破硬质合金、陶瓷等材料的传统加工限制，尤其擅长微型模具和精密雕刻，满足航空航天、医疗领域对终极表面质量的要求。



(3) 孚尔默（太仓）机械有限公司 VLaser 370激光机床。主要参数：最大加工刀具外径 $\Phi 150\text{mm}$ ，长度250mm。

技术特点：横梁固定、刀具移动的专利结构确保激光发射端稳定，C轴旋转中心直接加工，焦点定位精度高，五轴联动。直线电机驱动结合智能操作系统（触摸屏/键鼠控制）。可选对向顶尖提升同心度，支持自动化无人生产，专攻PCD、CVD-D等超硬刀具制造，适用于高精度刀具再加工及批量生产。



(4) 西安中科微精光子科技股份有限公司 MicroDrill 40P 超快激光双工位并行微孔加工设备。主要参数：X1、X2/Y1、Y2/Z1、Z2轴行程 400/400/450mm，制孔范围 $\phi 0.1 \sim \phi 1.5\text{mm}$ ，孔径精度 $\pm 0.003\text{mm}$ ，孔深径比 ≥ 15 ，表面粗糙度 $Ra 0.4\mu\text{m}$ 。

技术特点：双主轴、双工位并行加工，双B/C轴转台独立控制，多路分光技术实现高功率飞秒激光分束及异步加工。自主知识产权光束扫描模块支持曲面复杂微结构（倒锥孔、簸箕孔等），适用于晶圆、光学器件等异形孔高效加工。



(5) 南京中科煜宸激光技术有限公司 LCS800 Synova水导激光加工设备。主要参数：激光波长532nm，激光功率20~200W，最高水压600bar，加速度1g，最小切缝0.030mm。

技术特点：水导激光切割，无热影响区。激光与微米级水射流结合，无需对焦控制，切口平行无V形。集成自动喷嘴校准和喷射角度校正功能，适用于碳化硅、CFRP等复合材料及半导体器件的高效切割，支持小批量至大批量生产。

(6) 广东原点智能技术有限公司 Micro3D L570V 精密模具五轴飞秒激光加工中心。主要参数：X/Y/Z轴

行程300/300/260mm, B/C轴行程 $\pm 110^\circ / n \times 360^\circ$; 定位精度X/Y/Z轴0.005/0.005/0.003mm, B/C轴精度10"/5", 重复定位精度X/Y/Z轴0.003/0.003/0.002mm, B/C轴精度5"/3"; 兼容飞秒/纳秒激光器, 激光功率 $\geq 20W$, 脉宽 $\leq 400fs$ 。

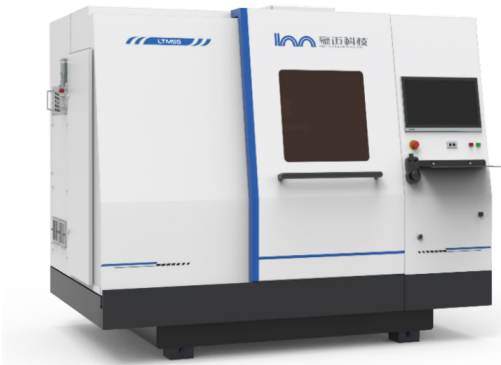
技术特点: 自主Nuconsys五轴数控系统, 支持3D动态振镜与多轴联动, 可加工硬质合金刀具槽型、微刃结构, 解决PCD/CBN刀具开槽及表面微结构难题, 适配航空航天、微电子、精密模具等行业精密刀具需求。

(7) 北京安德建奇数字设备股份有限公司 CL2 激光刀具机。主要参数: X/Y/Z轴行程300/400/300mm, A/B轴行程 $-210^\circ \sim +40^\circ / n \times 360^\circ$, 最大刀具尺寸 $\phi 280 \times 300mm$, 重量30kg; A/B轴定位精度 $\pm 2''$ 。

技术特点: 双支撑摇篮式旋转轴+DD马达直接驱动, 消除机械反向间隙。集成刀具参数工艺库及自动化上下料系统, 6摄像头实时监控, 大屏界面融合视频操作(调焦、暂停等), 提升批量加工效率。

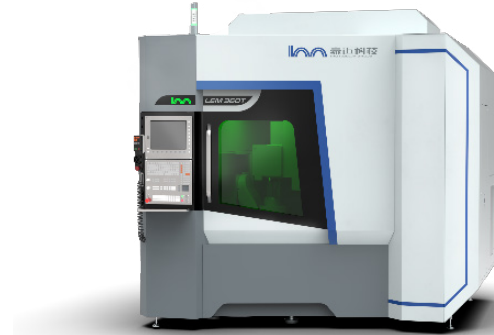
(8) 山东豪迈数控机床有限公司 LTM55 激光旋切机床。主要参数: X/Y/Z轴行程360/180/160mm, B/C轴行程 $\pm 100^\circ / n \times 360^\circ$, 激光功率55W, 波长515nm, 最小孔径 $30\mu m$, 最大深径比20。

技术特点: 立式轻量化设计, 能耗降低30%, 高精旋切光路确保材料去量均匀, 五轴联动控制, 实现反锥度打孔, 专攻汽车喷油嘴、医疗器械微型孔加工, 兼顾加工稳定性与深径比要求。



(9) 山东豪迈数控机床有限公司 LEM360T 超硬刀具五轴激光加工中心。主要参数: X/Y/Z轴行程420/960/600mm, A/C轴行程 $-130^\circ \sim +90^\circ / n \times 360^\circ$, X/Y/Z轴快移速度30/50/50m/min, A/C轴最高转速50/150r/min, X/Y/Z轴定位精度0.003/0.004/0.003mm, 激光束直径 $< 30\mu m$, 标刻速度3.5m/s, 加工轮廓度 $< 0.005mm$ 。

技术特点: 整体铸造床身+直线电机全闭环控制, 支持多脉宽(20~200ns)及高频(max 2MHz)激光调节, 专用CAM软件适配PCD/CBN焊接变形加工, 适用于超硬刀具刃口、断屑槽的高效成型。



(10) 东莞市千岛机械制造有限公司 QD-JG160 数控激光磨床。主要参数: X/Y/Z轴行程400/450/300mm, A/C轴行程 $\pm 125^\circ / n \times 360^\circ$, A/C轴最高转速200r/min, 定位/重复定位精度X/Y/Z轴 $\pm 0.002 / \pm 0.001mm$, A/C轴 $4'' / 2''$, 激光功率200W, 加工刀具直径 $\phi 0.1 \sim \phi 200mm$, 轮廓精度 $\pm 0.005mm$, C轴接口HSKE63。

技术特点: 五轴数控激光磨床, 支持PCD、CBN超硬刀具修磨, 高转速A/C轴结合直线电机驱动, 适配车削、铣削刀具的精密加工需求。

(11) 长沙中拓创新科技有限公司 ZT-LM4035 五轴激光加工中心。主要参数: X/Y/Z轴行程500/390/270mm, A/B轴行程 $\pm 110^\circ / n \times 360^\circ$ 。工作台最大负载30kg, A/B轴最高转速250/400r/min, 激光器功率100W, 定位/重复定位精度X/Y/Z轴0.003/0.002mm, A/B轴 $\pm 5'' / \pm 2''$ 。

技术特点: 纳秒脉冲激光器, 床身经18个月自然时效, 滚针导轨, 激光校准系统与测头确保精度, 直驱马达提升动态响应, 封闭式绝对光栅尺全闭环控制保障机床稳定性。

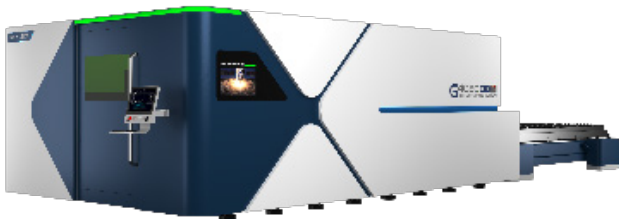
(12) 上海名古屋精密工具股份有限公司 GIVEALASER 3100L 卧式五轴激光工具磨。主要参数: X/Y轴行程470/250mm, 超快激光器功率100W, 脉宽 $< 500ns$, 频率 $< 1MHz$, 最大刀具 $\phi 300 \times 430mm$ 。

技术特点: 卧式五轴布局, 大理石床身+直线电机闭环控制, 微米级视觉/接触测量系统, 粗精一体切割头实现高速粗加工与刃口精加工, 封闭空间自动抽尘, 实现金刚石和CBN等超硬材料刀具制造。

2. 激光板材切割机

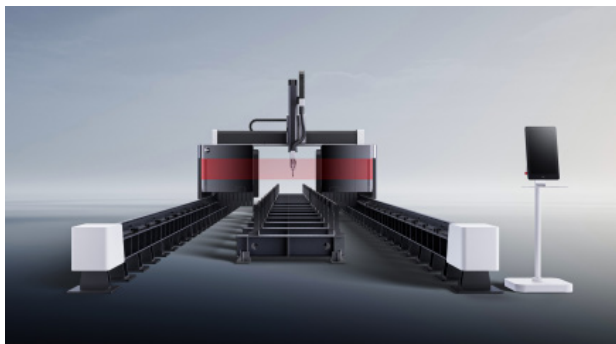
(1) 大族激光智能装备集团有限公司 G4020 HF50 系列超高速磁悬浮光纤激光切割机。主要参数：加工幅面 $4000 \times 2500\text{mm}$ ，X/Y轴最大定位速度 $300\text{m}/\text{min}$ ，加速度 5g ，重复定位精度 $\pm 0.005\text{mm}$ ，支持 $1 \sim 25\text{mm}$ 板材切割。

技术特点：一体全中空床身+高刚性横梁设计，确保龙门轴平行运动稳定；微米级直线电机驱动结合全磁悬浮技术，实现 5g 加速度仅需 55s ；绝对式集成测量系统+纳米精度导轨，全闭环反馈控制提升切割精度；二次开发数控系统，操作流畅易学，支持高速高精切割，适用于多种板材加工场景。



(2) 济南邦德激光股份有限公司 U10 激光切割机。主要参数：加工范围型材加工尺寸 $H \leq 1500\text{mm}$ 、 $B \leq 600\text{mm}$ 、 $L \leq 28000\text{mm}$ ；圆管 $\phi 100 \sim \phi 1200\text{mm}$ ；方管 $\square 200 \sim \square 820\text{mm}$ 切割。

技术特点：全长 28m 多工位设计，支持型材、板材、管材灵活组合加工；实时测量型材位置与尺寸，智能调整路径，避免切割错位与碰撞风险；适配等离子切割地基，快速升级为激光加工，实现上料、切割、下料无缝循环，提升生产效率。



(3) 济南邦德激光股份有限公司 P3 激光切割机。主要参数：加工幅面 $3048 \times 1524\text{mm}$ ，最大联动速度 $200\text{m}/\text{min}$ ，加速度 4.0g ， 1m 空移仅需 480ms 。

技术特点：板材余料图像自动识别与排版，样件视觉对比+参数智能导入，优化切割效果；全向视觉感知摄像头实时监控，安全防护区内异物进入自动停机；高速空移与智能优化功能显著降低人工成本，提升切割效率与安全性。

(4) 江苏亚威机床股份有限公司 HLE-1530 激光切割机。主要参数：加工幅面 $3000 \times 1500\text{mm}$ ，X/Y最大联动速度 $140\text{m}/\text{min}$ ，加速度 1.5g ，定位/重复定位精度 $\pm 0.03/\pm 0.02\text{mm}$ 。

技术特点：高刚性轻量化钢横梁+ 360° 防撞切割头设计，搭载焦点补偿、智能控速、雷暴穿孔等工艺，提升全板厚切割性能 20% ；兼容自动化上下料、料库、分拣码垛设备，支持远程诊断与生产管理，实现车间透明化与高效生产。



(5) 北京龙雕伟业数控设备有限公司 LD6025E-12526E 超高功率光纤激光切割机。主要参数：加工幅面 $12500 \times 2600\text{mm}$ ，重复定位精度 $\pm 0.03\text{mm}$ ，激光功率 $6\text{kW} \sim 20\text{kW}$ 。

技术特点：优质碳素结构钢焊接床身，交换平台自动上下料+自动排烟系统；聚焦镜自动更换+全周水冷却设计，确保高功率长期切割不发热；适配碳钢、不锈钢、铝合金等多种材料，满足高功率、高效率切割需求。

(6) 天水锻压机床(集团)有限公司 单平台敞开放式双驱高功率光纤激光切割机。主要参数：有效切割范围 $1300 \times 2600\text{mm}$ ，搭载 30000W 光纤激光器（波长 1070nm ，光束质量 $< 0.373\text{mrad}$ ），X/Y1/Y2/Z快移速度 $120\text{m}/\text{min}$ ，工作台承重 20000kg ，切割能力：采用 O_2 切割碳钢的最大板厚 50mm ， N_2 切割不锈钢达 40mm ，精度 $\pm 0.05\text{mm}$ （板厚 $\leq 12\text{mm}$ ），最小割孔 \leq 板厚 $2/3$ 。

技术特点：非接触激光切割实现无应力、无毛刺切口，热影响区小（缝宽 $0.1 \sim 0.4\text{mm}$ ），免二次加工；集成自动排版与数控编程，切割面光滑，异形件一致性好。结构经拓扑优化，刚性强，兼容多气体切割，支持锈蚀/凹凸板材稳定作业，搭配除尘排渣系统，高效节能，全面替代传统工艺。

(7) 南通麦斯铁数控机床有限公司 MLC128025 激光切割机。主要参数：激光功率 12000W ，加工区域 $8050 \times 2550\text{mm}$ ，X/Y轴最大联动速度 $200\text{m}/\text{min}$ ，加速度 2.0g 。

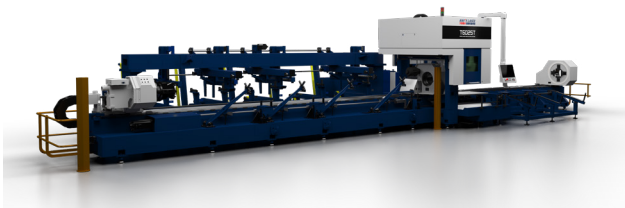
技术特点：床身表面覆盖石墨板，分区除尘设计实现无烟无尘切割；双路气路系统（切割气体+辅助压缩空

气)结合大风量除尘过滤,确保安全高效;支持远程诊断与数据采集,维护便捷。

3. 激光管材切割机

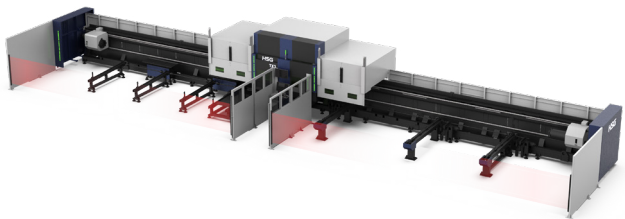
(1) 大族激光智能装备集团有限公司 T6025T 三卡盘重载型激光切管机。主要参数:加工范围圆管 $\Phi 40 \sim \Phi 630\text{mm}$ 、方管 $\square 40 \sim \square 450\text{mm}$, X/Y/Z定位精度 $0.05/\pm 0.01/\pm 0.01\text{mm}/1000\text{mm}$, 重复定位精度 $\pm 0.05/\pm 0.01/\pm 0.01\text{mm}$, X/Y轴最大定位速度 $60/40\text{m}/\text{min}$ 。

技术特点:侧挂式焊接床身+全行程一体式卡盘设计,大管小管切换无需更换卡爪;切割头可越过第二卡盘实现零尾料切割;浮动下料机构适配多种管材,防止下垂,提升加工精度。



(2) 广东宏石激光技术股份有限公司 TX3R-9090S 激光切管机。主要参数:切管范围覆盖圆管 $\Phi 20 \sim \Phi 360$ 、方管 $\square 20 \sim \square 360$ 、矩形管(对角线 $\leq 509\text{mm}$)及型钢(角钢 $50 \sim 250\text{mm}$, 槽钢/工字钢 $50 \sim 360\text{mm}$, HW型钢 $100 \sim 300\text{mm}$), 管长 $1 \sim 12\text{m}$ 。机床定位精度 $\pm 0.05\text{mm}/1000\text{mm}$, 重复定位精度 $\pm 0.03\text{mm}$, 空行/空转速度最高 $60\text{m}/\text{min}$ 及 $60\text{r}/\text{min}$ (随负载降低), 加速度 0.6g 。

技术特点:全规格兼容,标配随动卡爪与斜口切割功能,满足精密拼接需求;尾料自动切换、循环切割技术减少浪费;侧挂重载床身提升稳定性,HSG-X10000智能系统+TubesT套料软件优化效率,支持双卡盘选配,实现高速高精度连续生产。



(3) 奔腾激光(浙江)股份有限公司 激光管切攻丝机。主要参数:激光功率 6kW , 切管范围覆盖圆管 $\Phi 15 \sim \Phi 245\text{mm}$ 、方管 $\square 15 \sim \square 245$, 加工M5/M6螺纹孔。

技术特点:半自动上料设计提升便捷性,支撑装置确保切割稳定与精度;攻丝功能扩展激光管材加工应用,满

足多样化加工需求。

(4) 济南邦德激光股份有限公司M3激光切管机。

主要参数:切管范围覆盖圆管 $\Phi 25 \sim \Phi 356\text{mm}$ 、方/矩管边长 $25 \sim 356\text{mm}$ 、角钢 $3\# \sim 22\#$ 、槽钢 $5\# \sim 22\#$, 最大长度 12500mm , 管材重量 $\leq 1200\text{kg}$, 卡盘转速 $60\text{r}/\text{min}$, 空行速度 $60\text{m}/\text{min}$ 。

技术特点:四卡盘结构,双工序并行加工,切割与上下料同步执行;智能切换重管/高效/0尾料模式,卡盘带料双向移动消除余料;随动翻板落料系统提升切割精度,全流程自动分料下料,无人工干预,安全高效。



(5) 江苏亚威机床股份有限公司 YTG-6012-3000W-FMC 激光切管机。

主要参数: X/Y/Z轴行程 $6800/250/240\text{mm}$, 切管范围覆盖圆管 $\Phi 5 \sim \Phi 120\text{mm}$ 、方管 $\square 5 \sim \square 120\text{mm}$, 最大管材重量单管/料库 $50/1000\text{kg}$; X/Y轴最大速度 $150\text{m}/\text{min}$, 加速度 1.5g , A/B最高转速 $150\text{r}/\text{min}$, 机床定位/重复定位精度 $\pm 0.05/\pm 0.03\text{mm}$ 。

技术特点:全自动/半自动双模上料系统,集成坡口切割与焊缝检测扩展功能。采用纳米级插补与微秒级响应技术保障切割精度,伺服托料系统,配合创新尾料优化设计显著降低材料损耗,形成高效智能的管材加工解决方案。



4. 激光增材制造设备

(1) 马路科技顾问股份有限公司DMP Flex 350金属3D打印解决方案(3D System)。主要参数:成形尺寸 $275 \times 275 \times 380\text{mm}$, 氧含量 $< 25\text{ppm}$ 。

技术特点:支持双向铺粉,优化的扫描策略,粉末循环利用率高;真空仓设计结合氩气流优化,有效降低氧含量与粉末劣化风险,提升零件致密度;集成3DXpert软件与LaserForm材料库,满足医疗行业对稳定性和精度的严苛需求;特殊粉末残留控制技术,兼顾环境清洁与材料

利用率，适用于小批量高精度医疗部件打印。

(2) 西安铂力特增材技术股份有限公司 BLT-S400 金属3D打印机。主要参数：成形尺寸400×300×400mm，成形效率50/75/150 cm³/h，激光器功率500W×2/3/6。

技术特点：自适应铺粉修正+深度学习技术，实现智能打印优化；粉末闭环处理系统自动回收筛分，减少浪费；零件三维重建与成形可视化功能支持质量追溯；长寿命过滤系统与全域氧含量控制（≤100ppm），适配钛合金、高温合金等材料，广泛应用于航空、航天高复杂度零件制造。



(3) 南京中科煜宸激光技术有限公司 LDM16RD 送粉式激光增材制造设备。主要参数：转台直径φ125mm，B/C轴行程-30°~120°/n×360°，转台最大负载立式50kg，卧式35kg；机器人臂展1100mm，机器人重复定位精度0.02mm，激光器最大功率1000W。

技术特点：激光送粉熔融技术实现多工艺兼容（熔覆/打印），粉末利用率高；机器人臂展1100mm，支持复杂大型工件成形；适用钛合金、陶瓷等多材料复合加工，冶金结合强度高，专攻零部件修复、表面强化及异形结构直接制造。

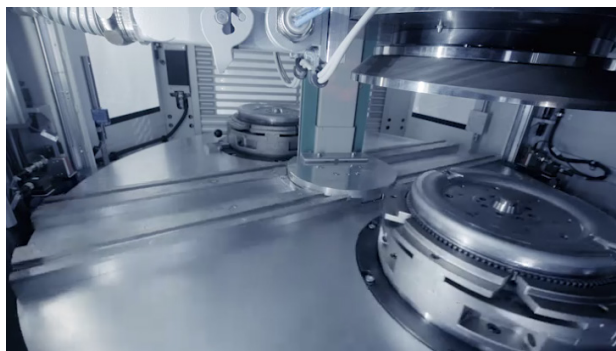
(4) 宁波海天增材科技有限公司 C650M SLM 激光金属3D打印机。主要参数：成型空间650×650×880mm，500W×8激光器，成型速率200cm³/h，全域氧含量≤100ppm。

技术特点：自主激光路径规划+双层风场设计，全域打印质量波动<5%；ATEX认证防爆系统+除静电技术确保安全；智能视觉铺粉监测+阶梯式基材存量监测，支持24小时无人值守；适配模具钢、钛合金等材料，满足工业级高效率高稳定性生产需求。



5. 激光焊接设备

莱斯豪尔FLW 400柔性激光焊接机床（菲索玛特）。专为对称回转体部件高效焊接设计。采用Trumpf固体碟片激光器，模块化旋转工作台，深熔焊与精密焊接平衡技术，提升焊缝强度与工艺稳定性；独立工位并行完成装配-预热-焊接，缩短节拍时间；激光能量闭环监测+智能化控制系统，保障汽车传动部件（差速器、行星架）批量一致性，支持快速换型与连续生产。



6. 激光表面处理设备

(1) 乐嘉文有限公司 Etxetar BD Concept 激光熔覆机床。主要参数：激光束直径φ1.5~φ3.5mm可调，激光功率22kW，粉末流量200g/min，涂层合格率≥99.5%。

技术特点：矿物铸件床身+对称光路设计，激光开启时间≥90%；模块化熔覆头快速切换喷嘴，闭环送粉控制提升均匀性；红外测温+光谱分析实时监控熔池，动态调整工艺参数；中间清洁工位增强涂层结合强度，降低制动粉尘排放，支持镍基合金、碳化钨熔覆，适用于环保制动盘高效制造。

(2) 洛阳速飞信 风冷脉冲激光清洗机。主要参数：功率300W/500W，波长1070±10nm，脉冲宽度20~500ns，可调幅面0~190mm，风冷体积0.15m³。

技术特点：非接触式清洗无基体损伤，免化学试剂与耗材；双摆枪头+高功率密度设计（能量达普通机型2倍），8种出光模式，支持6种预置工艺+3种自定义模式；一体式风冷结构轻便节能，适配航空航天、汽车零部件表面处理，环保高效。□

CIMT2025展品综述

—— 卧式加工中心类

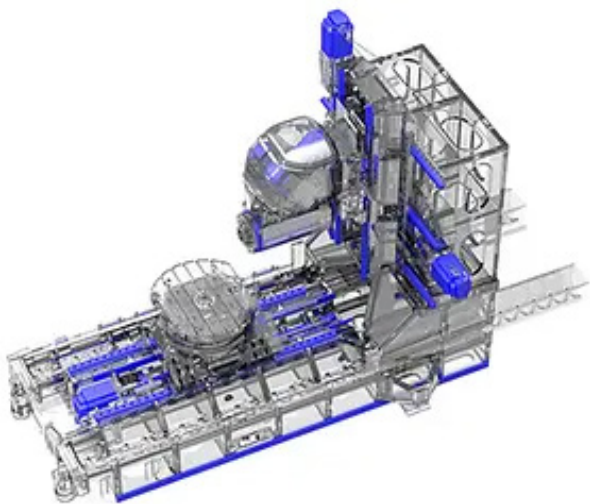
中国机床工具工业协会市场部

本届展览会，卧式加工中心展品大多采用四轴联动模块化结构，搭载360° B轴转台，实现单机完成五面体加工，并使复杂曲面加工效率提升。可以关注的是：五轴联动、具有车削或磨削等功能的复合加工、大容量刀库和刀具快换系统、热对称设计和温控系统、模块化的主轴设计、多交换工作台和托盘存储系统带来的柔性自动化等特点。

(1) 德马吉森精机机床贸易有限公司 MU 125 FD duoBLOCK 卧式加工中心

主要参数：X/Y/Z轴行程1250/1000/1250mm，最大工件尺寸 $\Phi 1250 \times 1600 (H)$ mm，工作台最大承载2600kg，工作台最高转速500r/min，刀库容量453把。

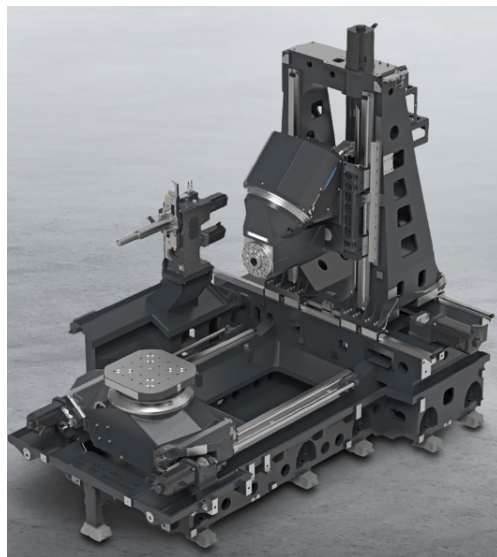
技术特点：直驱工作台，集成磨削技术，超紧凑轮式刀库，标配SGS主轴热膨胀传感器；一次装夹完成铣削与车削，水冷进给驱动提升精度；适应高精度、高效率加工需求，尤其适合复杂工件加工。



(2) 恒轮机床(常州)有限公司 F6000 新一代5轴卧式加工中心-F系列

主要参数：X/Y/Z轴行程1000/1000/1000mm，C轴摆动范围350°，叉式头旋转范围175°，主轴最高转速8000r/min，最大扭矩1146N·m，X/Y/Z轴加速度0.7g；定位精度X/Y/Z轴0.005mm，B/C轴7"。

技术特点：高刚性移动立柱+高扭矩主轴，可选8款高速电主轴或2款机械主轴单元，支持铣-车复合加工；摆头立姿状态可过回转中心，实现高精度5面体加工；叉式头大旋转范围支持负角度与底切加工，标配自动夹紧，可选液压锁紧，适应重型切削与高柔性需求。



(3) 株式会社新泻机械科技HN80E-IIFC多功能复合卧式加工中心

主要参数：X/Y/Z/U/W轴行程1530/900/1020/130/300mm，托盘尺寸800×800mm，

工作台最大承载2500kg；主轴最高转速6000r/min，X/Y/Z轴快移速度40m/min，刀库容量62把。

技术特点：T字型一体化加厚床身设计，满足重切削需求；B-HP低摩擦导轨+加宽导轨面构造，确保长期高精度加工；支持车削、铣面、钻孔、攻丝、镗孔等复合加工；适用于阀体、泵体、桥壳等复杂工件的高效加工，一次装夹完成多工序，显著提升效率。



(4) 精研精工机械有限公司MH-800IIB-FC卧式加工中心机

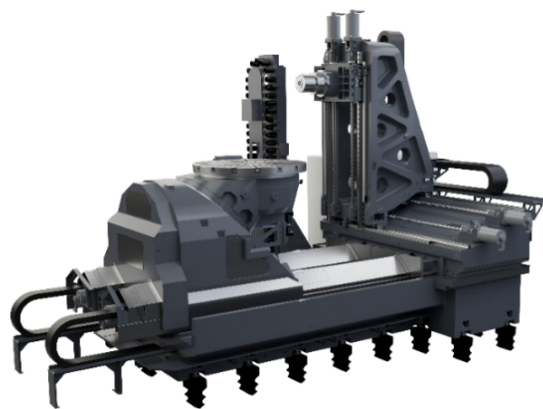
主要参数：X/Y/Z/W/U轴行程1300/1000/1200/500/130mm，W轴直径 Φ 130mm，平旋盘直径 Φ 700mm，工作台最大承载2000kg，主轴最高转速2500r/min，平旋盘最高转速600r/min。

技术特点：融合铣削与车削功能，支持自动换刀及W/U轴分时驱动；刚性旋销面盘由主轴电机直驱，扩展宽域镗削能力，适用于车削、镗孔、钻孔等复合加工，但U/W轴不可同步运行。

(5) 科德数控股份有限公司KHM 150U非正交卧式车铣复合加工中心

主要参数：X/Y/Z轴行程1900/1800/1250mm，定位/重复定位精度0.003/0.002mm，最大工件直径 Φ 1850 \times 1050(H)mm，C轴扭矩11000/19850N·m（锁紧20000N·m），B轴扭矩4458/7478N·m（锁紧20000N·m）。

技术特点：采用双重倾斜结构，确保切削阻力下整体高刚性，实现5轴重切削；阶梯式立柱设计兼顾Z轴刚性与轻量化，提升加速能力；Z型工作台优化重心分布，减少加工中力矩变化，支持高效大切削量去除，适用于高精度、高刚性复合加工需求。



(6) 山东豪迈数控机床有限公司 THW1450-C 卧式五轴车铣复合加工中心

主要参数：X/Y/Z轴行程1600/1450/1625mm，A/B轴行程 $-135^{\circ} \sim 45^{\circ}$ ，最大回转直径 Φ 1600mm；X/Y/Z轴快移速度40m/min，A/B轴最高转速40/60r/min，铣削主轴10000r/min，车削主轴最高转速500r/min，刀库容量90把，定位/重复定位精度X/Y/Z轴0.008/0.005mm，A/B轴7"/4"。

技术特点：龙门结构刚性强，高刚性摆头配大扭矩电主轴，可交换托盘，热对称设计、全闭环控制和热补偿，车削功能集约工序，工作台直驱技术。

(7) 格劳博机床(中国)有限公司G350五轴联动加工中心+PSS-R450系统

主要参数：X/Y/Z轴行程600/855/750mm，X/Y/Z轴快移速度70/45/90m/min，主轴最高转速16000r/min；最大托盘存储位20个，最大搬运量450kg，最大干扰尺寸 Φ 600 \times 500(H)mm。

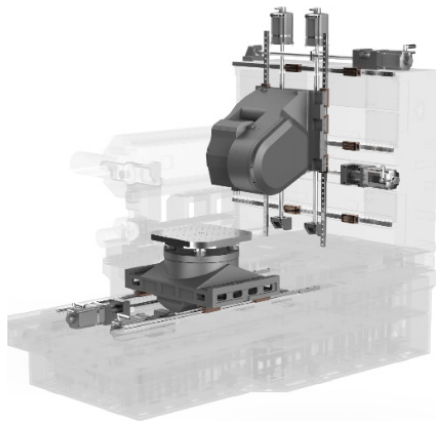
技术特点：G350结合博集团自主开发生产的圆形托盘存储系统PSS-R450，发挥其灵活性和可定制性，凭借各种标准自动化到灵活的机器人单元、柔性制造系统以及全自动交钥匙生产线，为用户提供更加全面的自动化解决方案。也可实现机床的无人操作，从而缩短装调过程、提高生产效率并减少停机时间。



(8) 科德数控股份有限公司KMU180T五轴联动卧式加工中心

主要参数：叉摆头选项 X/Y/Z 轴行程 2200/2600/1750mm，A/C 轴 $-105^{\circ} \sim +60^{\circ} / n \times 360^{\circ}$ ，工件最大回转直径 $\Phi 2500\text{mm}$ ；主轴最高转速 10000r/min，最大进给速度 X/Y/Z 轴 40m/min，A/C 轴 50/100r/min；刀库容量 60 把；定位/重复定位精度 X/Y/Z 轴 0.01/0.006mm，A/C 轴 10"/8"。

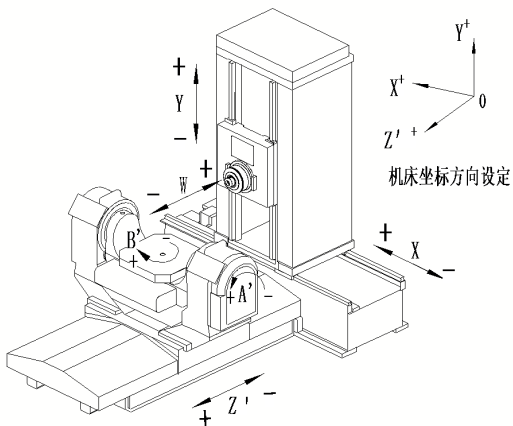
技术特点：墙式单立柱+上下动梁结构，气液平衡系统提升稳定性；热对称床身设计+双螺旋排屑，减少热变形；YRT 转台轴承高承载，液压锁紧；A/C 轴直驱+全闭环控制，高速滚珠丝杠+预拉伸工艺，长期精度保持性佳，可选配 45° 立卧头选项，B 轴行程为 $-70^{\circ} \sim +180^{\circ}$ 。



(9) 秦川机床工具集团股份公司 HMC120/5UT 高精度摇篮式五轴卧式加工中心 (秦川精密装备)

主要参数：X/Y/Z/W 行程 2000/1500/1800/600mm，A/B 轴 $-120^{\circ} \sim +30^{\circ} / n \times 360^{\circ}$ ，工作台承重 3000kg；主轴最高转速 4000r/min，主轴最大扭矩 1300N·m，刀库容量 60 把；定位/重复定位精度 X/Y/Z 轴 0.008/0.005mm，A/B 轴 10"/6"。

技术特点：T 型床身+双齿轮消除 A 轴驱动，蜗轮蜗杆 B 轴；高精度滚动导轨+全闭环补偿；链式刀库+ATC 自动换刀，支持五轴联动插补与重切削。



(10) 四川普什宁江机床有限公司 THM6363IV 精密卧式五轴加工中心

主要参数：X/Y/Z 轴行程 1000/800/900mm，A/B 轴行程 $-25^{\circ} \sim 0^{\circ} / n \times 360^{\circ}$ ；主轴最高转速 6000r/min，X/Y/Z 轴快移速度 45m/min，A/B 轴最高转速 15/20r/min；X/Y/Z 轴定位精度 0.006mm，A/B 轴定位精度 10"/6"。

技术特点：采用华中数控系统控制五轴，床身是 T 型整体结构，X 向阶梯型，安装便捷，能保证精度稳定，可满足复杂精密加工。



(11) 四川普什宁江机床有限公司 HMC630-221 高速五轴加工中心

主要参数：X/Y/Z 轴行程 800/1000+300/650mm，A/C 轴行程 $\pm 110^{\circ} / n \times 360^{\circ}$ ；X/Y/Z 轴快移速度 100m/min，A/C 轴最高转速 40r/min，主轴最高转速 14000r/min，刀库容量 64 把；直线轴定位精度 0.006mm，旋转轴定位精度 6"。

技术特点：箱中箱结构、运动部件轻量化设计；A 轴双驱摇篮转台，双电主轴和直驱技术确保高精度和效率；直线轴配导轨钳制器，断电时能够自动抱紧导轨；刀库顶置一体化设计，无机械手换刀，减少换刀时间；适用于高精度五轴加工。

(12) 纽威数控装备 (苏州) 股份有限公司 HP80F 五轴卧式加工中心

主要参数：X/Y/Z 轴行程 1500/1325/660mm，A/B 轴行程 $\pm 120^{\circ} / n \times 360^{\circ}$ ，工作台最大载荷 1000g；X/Y/Z 轴快移速度 120m/min，A/B 轴最高转速 25/40r/min，最高加速度 1.1/1.2/2.2g。

技术特点：一体式底座与龙门框架驱动，移动部件轻量化设计，高速电主轴和拾取式刀库，五轴摇篮工作台，A/B 轴力矩电机驱动。适用于航空航天等轻金属加工，多

工序一次装夹完成，具备五轴联动和防碰撞功能。



(13) 上海拓璞数控科技股份有限公司TP600HC卧式五轴加工中心

主要参数：工作台尺寸400×400mm，最大工件尺寸 $\Phi 630 \times 500$ (H) mm；X/Y/Z轴快移速度60m/min，B/C轴最高转速60r/min，主轴最高转速14000r/min（可选20000r/min），加速度0.8g；刀库容量60把；定位/重复定位精度X/Y/Z轴0.008/0.004mm，B/C轴12"/6"。

技术特点：一体化床身+三点支撑，热对称设计；B/C轴直驱，RTCP精度0.02mm，全闭环控制；自研rocOS，系统支持五轴联动；丝杠冷却+绝对光栅尺，正交双摆转台结构，高动态响应。

(14) 浙江日发精密机床有限公司CLOCK800 C5AX BI五轴双工位卧式加工中心

主要参数：X/Y/Z轴行程800/800/800mm；X/Y/Z轴快移速度75m/min，主轴最高转速14000r/min，主轴功率81kW（持续），扭矩323N·m，加速度0.7g，定位/重复定位精度直线轴0.005/0.003mm，旋转轴5"/3"。

技术特点：热对称布局+恒温系统，实现热平衡，闭环控制补偿变形，几何精度达0.003mm；重心驱动技术消除摩擦损耗，延长零件寿命并减少热源；MCM高精度装配工艺结合铲刮技术，三轴垂直度 ≤ 0.003 mm；双工位设计支持高效五轴联动，满足复杂曲面高精度加工需求。



(15) 意特利（上海）科技有限公司HS1512交换工作台卧式五轴加工中心

主要参数：X/Y/Z轴行程1200/1500/750mm，主轴转

速16000r/min，刀库容量40把。

技术特点：配备交换工作台，支持加工与上料同步进行，可连接生产线；全轴直驱设计，加工效率与节拍领先市场，占地面积 \leq 单工位机床，专为新能源汽车压铸件及航天零部件高效加工设计。

(16) 格劳博机床（中国）有限公司G520双主轴加工中心

主要参数：X/Y/Z轴行程750/1000/870mm，双主轴间距800mm，主轴转速12000r/min（HSK-A100）。X/Y/Z轴快移速度95/70/120m/min。

技术特点：双主轴同步加工，支持干式/湿式加工；GROB-NET4Industry模块化设计，实现网络化生产；刀具扩展性强，快速换刀技术缩短非切削时间，适用于柔性化多型号工件加工。



(17) 上海大侨誉远精密机械股份有限公司DH-500R双主轴高速卧式加工中心

主要参数：X/Y/Z轴行程750/560/560mm，主轴最高转速16000r/min，X/Y/Z轴快移速度60m/min，加速度1.2g，刀库容量32把×2。

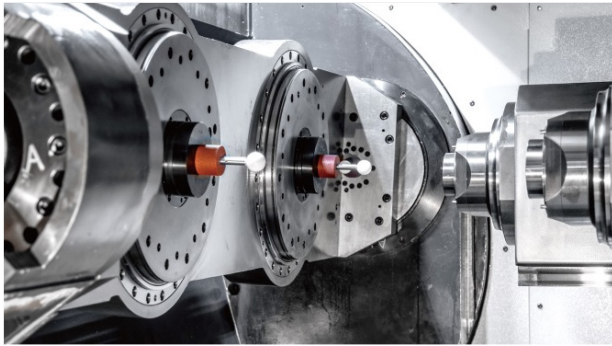
技术特点：双主轴双工作台，双主轴同步加工，单台设备实现双倍效率；配合高速主轴与快移系统，适用于新能源车电机壳体、变速箱等大批量精密零件的高效加工；配备双机内螺排+机外链排自动排屑系统，提升连续加工能力。



(18) 北京博鲁斯潘精密机床有限公司HMC60L-FMC 五轴联动卧式加工中心

主要参数：X/Y/Z轴行程 630/600/600mm, A/U轴加持工件最大干涉范围 $\Phi 680 \times 1490 (H)$ mm；主轴最高转速 19000r/min, A/U轴最高转速103r/min, X/Y/Z轴快移速度 120m/min；定位重复定位精度X/Y/Z轴 0.006/0.005mm, A/U轴8"/5", C轴6"/5", 交换工作台定位/重复定位精度6"/5"。

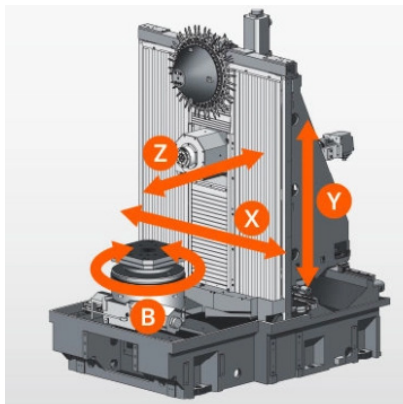
技术特点：双主轴+双摇篮式交换工作台系统，可切换A1/A2、C1C2/C3C4五轴联动；机床在加工的同时，同步进行上下料，提高加工效率、提升尺寸一致性、缩短生产节拍，用于涡轮涡扇、缸体、壳体、转向节等零部件精密加工。



(19) 山崎马扎克(中国)有限公司 FF-1250HL 卧式加工中心

主要参数：X/Y/Z轴行程1550/1250/700 mm, 工作台最大加工范围 $\Phi 1600 \times 1100$ mm；主轴最高转速 10000r/min, X/Y/Z轴快进速度60/60/65m/min；刀库容量43把。

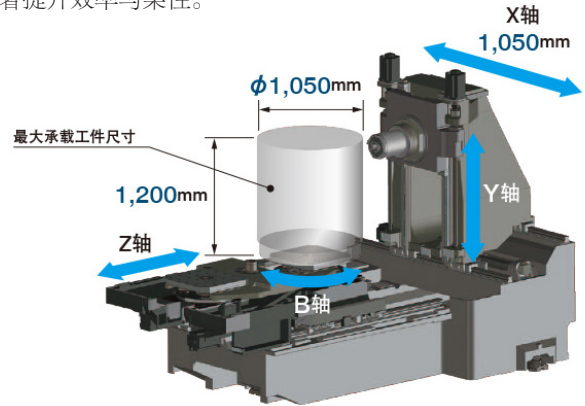
技术特点：该机型是针对新能源汽车一体式压铸大型零件加工而开发的新款设备，融合智能化与模块化设计，优化切削力分布，集成智能监控系统，可实时分析切削力、温度等参数，通过AI算法优化加工流程并预判故障，保障生产连续性，适用于中、大型零件的多面加工。



(20) 大隈机械(上海)有限公司 MA-600H III 卧式加工中心

主要参数：X/Y/Z轴行程1050/900/1000mm, 最大工件尺寸 $\Phi 1050 \times 1200 (H)$ mm, 主轴最高转速6000r/min, 快速进给60m/min, 刀库容量60把；材料S45C加工能力 1240m³/min, 材料FCD450加工能力1496 m³/min。

技术特点：采用Thermo-Friendly Concept, 减少热变形, 确保长时间加工尺寸稳定性；标配“免清洗水箱”, 减少切削液杂质, 支持多面APC与自动化接口, 显著提升效率与柔性。



(21) 牧野机床(中国)有限公司 JA6

主要参数：X/Y/Z轴行程750/560/500mm, 最大工件尺寸 $\Phi 790 \times 740 (H)$ mm, 主轴最高转速16000r/min, X/Y/Z快速移动速度75m/min, 加速度0.9/1.3/1.9g, 主轴启动时间0.46s (0~16000r/min)。

技术特点：紧凑型卧式加工中心, 标配光栅尺反馈, 适合高产量零件加工；大直径滚珠丝杠确保高精度与切削性能, 支持机器人或龙门机械手组合, 实现无人化生产, 优化加工流程与柔性。

(22) 宝力机械有限公司HMC 500 卧式加工中心 (尼得科)

主要参数：X/Y/Z轴行程760/760/800mm, 快移速度 63m/min, 主轴最高转速15000r/min, 加速度1g, 屑对屑换刀时间2.9s。

技术特点：伺服ATC+可变转速功能, 主轴采用两档变速适配重刀加工；宽幅立柱+滚柱导轨, 高刚性结构优化, 减少非切削时间, 适合精密小件高效加工。

(23) 北京北一机床有限责任公司MAR-800H-e 卧式加工中心

主要参数：X/Y/Z轴行程1300/1100/1250mm, 最大工件尺寸 $\Phi 1450 \times 1450 (H)$ mm；主轴最高转速6000r/min, 最大切削进给速度50m/min, 刀库容量60把。

(下转第84页)

CIMT2025展品综述

——电加工机床类

中国机床工具工业协会市场部

第十九届中国国际机床展览会（CIMT2025）将于2025年4月21~26日在北京中国国际展览中心（顺义馆）和首都国际会展中心举办。在此次展会上，预计将有40多家企业展出90多台电加工机床，本文根据企业提供的参展信息，选择部分产品作一简单介绍，供观众参考。

一、电火花成形机床

1. 主要技术特点

（1）五轴数控成为高端机床的标配。参展企业均有五轴数控机床展出，如GF加工方案的FORM P 600、德国艾克索的EDM 313 MF 30、沙迪克机电（上海）有限公司的A35LBs、北京市电加工研究所有限公司AP600、上海汉霸数控机电有限公司的GS45L、北京迪蒙斯巴克科技有限公司的DR400S以及中国通用技术（集团）控股有限责任公司的AFU600等，为航空航天等领域的复杂型腔零件加工提供了解决方案。

（2）高刚性床身、升降式油槽为提升机床精度、实现自动化加工创造了条件。机床结构的高刚性，提高了机床的承载能力，为大型零件的高精度加工提供了保障。升降式油槽是工件自动上下料的必要条件，以此实现自动化加工和组线，同时，工作液面可以根据工件的加工位置高度进行

自动调节，既方便了操作人员在加工过程中可以实时观察，又节省了注油和泄油的时间。

（3）智能化脉冲电源已成趋势。脉冲电源性能的优劣直接关系到机床的加工性能，尤其在窄缝、窄槽、微细型腔、深腔和大面积加工时，智能化脉冲电源自带丰富的工艺数据库、专家系统和优化决策系统，可以根据要求自动选择加工参数，实时监测每个脉冲的放电状态，并依据检测结果实时优化脉冲参数，调整放电波形、电流及主回路形态等相关参数，以提高加工效率、减少电极损耗，杜绝积碳，实现智能优化放电加工，表面粗糙度可达Ra0.08 μ m的实用水平。

（4）专有技术成为抢占市场的独门绝技。高精度机床本体的设计制造、高精度运动轴的驱动、机床受热变形控制、三维矢量加工、难切削材料加工、高表面质量加工、智能加工定位等等，是实现高效高精度的专有技术，更是机床性能和技术水平的体现，为市场应用创造了充分良好的条件。

（5）数字化、自动化水平进一步提升。在数控系统、远程监控、运动控制、适应控制、ATC和AWC、机床内部温度控制、工作液液温和液面控制、运行管理等方面引入数字化技术和网络技术，进一步提升机床的

自动化、智能化水平，结合电极和工件料库、检测仪器和协作机械手（或移动式机器人），通过MES系统组成自动化加工单元，与其他电加工机床和金切机床一起组成柔性加工产线，形成无人值守的自动化加工线。

2. 典型展品介绍

（1）GF加工方案FORM P 600电火花成形机床。该机配置由高精度、高刚度C轴，与各数控轴联动可进行如螺旋内齿轮廓、航天航空发动机带冠叶盘等整体特种零件以及旋转环槽加工、弧形加工和3维矢量加工等。自动升降式工作液槽，支持温度控制选配，可配多种自动化解决方案。“EDM工艺管理内置专有技术”，“智能高速脉冲电源”（ISPG）结合创新的iGap功能，可自动设置合理的放电参数，最大限度提高材料切除率，保持高精度的表面质量。



主要技术参数：XYZ行程600×400×450mm；工作台

面到夹头之间最小/最大距离150~600mm；最大工件尺寸1040×730×410mm；工作液箱容积700L；最大工件重量1600kg；最大电极重量50kg；最佳表面粗糙度Ra0.08μm。

(2) 德国艾克索EDM 313 MF 30电火花成形机床。该机是经FEM优化设计，采用人造大理石一体化床身结构，操作系统单元以及机床组件完全内置成一体式，数控轴为交流伺服电机直接驱动，带光栅尺反馈。工作液箱和加工液面的高度可由程序M指令控制。采用windows操作系统，加工路径可模拟，expuls+高功率脉冲电源，实现智能优化放电加工，可与多种自动化设备进行连接。



主要技术参数：X/Y/Z行程620×420×400mm；工作台尺寸1000×600mm；工作液槽内腔尺寸1070×670mm；工作台面到电极安装板之间距离（最小/最大）160/560mm；最大电极重量50/250kg（桥架式结构C轴）；最大工件重量1500kg；油槽液位高度400mm；最大加工电流60~120A；定位精度5μm；重复定位精度3μm。

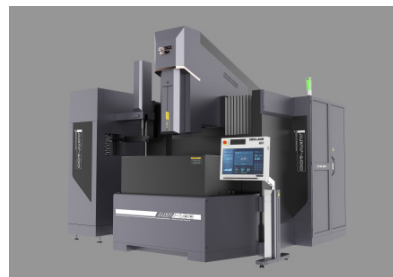
(3) 沙迪克机电（上海）有限公司A35LBs电火花成形机床。五轴数控，直线电机驱动，高运动精度和应答性能；标准搭载了新放电稳定加工系统Arc-less Plus，缩短加工时间和成本；SVC回路，在短时间内

获得高品质的暗光面或镜面。加工槽自动升降，电源控制器可左右配置，可与SZ20组建柔性工作站及自动化生产线，大幅提高生产效率。



主要技术参数：X/Y/Z行程350×250×270mm；最大电极重量50kg；最大工件重量550kg；机床主体尺寸2133×2325×2346mm。

(4) 北京市电加工研究所有限公司AP600电火花成形机床。该机为牛头式五轴数控机床，达到中国机械工业联合会团体标准《单立柱三轴数控电火花成形机床性能评价规范》要求。一体化结构，升降式油槽，新一代脉冲电源系统，全封闭自动控温柜体，浮动式控制台。新一代智能化专家系统，配合机外刀库，可自动生成加工程序。内置难加工材料专用软硬件，可实现导电陶瓷、钛合金、高温合金高效加工。该机可与机器人及电极工具库组成微单元，或实现柔性组线，兼容数字化工厂，可实现远程控制。



主要技术参数：X/Y/Z轴行程600×400×400mm；工作台尺寸800×500mm；工作液槽内腔尺寸1050×750×450mm；工作台面至主轴下端板的距离

（最小/最大）200/600mm；最大电极重量80kg；工作台承重1500kg；最大加工电流50A；最佳表面粗糙度Ra≤0.08μm；最小电极损耗≤0.05%；最高加工效率≥600mm³/min。

(5) 上海汉霸数控机电有限公司GS45L电火花成形机床。该机采用固定工作台式一体化箱型结构，主轴为直线电机驱动，全闭环控制，整体自动升降式工作液槽，配置主轴冷却系统、加工液冷却系统和床身恒温系统。搭载自主开发的操作系统、AUTO自动加工系统和智能定位系统，只需输入加工条件及要求，即可自动生成匹配的放电参数。可选装隐藏式电极交换装置，扩展成自动化单元或组成自动化产线。



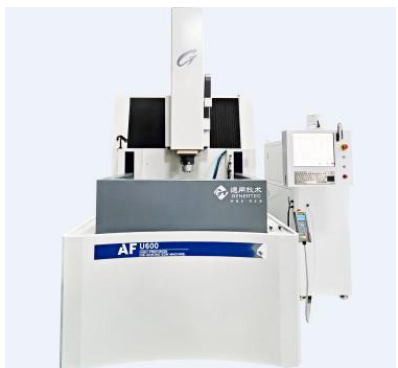
主要技术参数：X/Y/Z行程450×300×300mm；工作台尺寸600×450mm；工作台面至电极安装板的距离（最小/最大）250/550mm；最大电极重量50kg；最大工件重量800kg；抬刀速度≥10m/min；最大加工电流50A；最佳粗糙度Ra≤0.1μm；最高加工效率≥500mm³/min。

(6) 北京迪蒙斯巴克科技有限公司DR400S电火花成形机床。机床采用T形牛头式结构，五轴数控，自动升降油槽，Windows操作系统，内置铜电极、石墨电极的工艺数据库和专家放电系统，操控便捷。



主要技术参数：X、Y、Z轴行程 $400 \times 300 \times 320\text{mm}$ ；工作台尺寸（长 \times 宽） $600 \times 400\text{mm}$ ；加工液槽内部尺寸（长 \times 宽 \times 高） $900 \times 595 \times 370\text{mm}$ ；工作台面到电极安装板的最小/最大距离 $300/620\text{mm}$ ；最大电极重量 50kg ；最大工件重量 600kg ；最大加工效率 $\geq 500\text{mm}^3/\text{min}$ （石墨打钢）， $\geq 400\text{mm}^3/\text{min}$ （铜打钢）；最佳表面粗糙度 $Ra \leq 0.08 \mu\text{m}$ 。

(7) 中国通用技术（集团）控股有限责任公司AFU600电火花成形机床（北京精密机电有限公司）。牛头式结构、闭环伺服控制，配有高精度C轴、全浸液A轴，可进行五轴五联动电火花成形加工。配置新研发的低损耗大功率脉冲电源，可实现钛合金、高温合金等难加工材料的低电极损耗高效加工，能满足整体流道扭曲、刀具不可达的盘类、轮类等零件的加工需求。



主要技术参数：X/Y/Z轴行程 $600 \times 400 \times 350\text{mm}$ ，直线轴定位精度 $\leq 5 \mu\text{m}$ ，重复定位

精度 $\leq 3 \mu\text{m}$ 。C轴、A轴等旋转轴的定位精度 $\leq 15''$ ，重复定位精度 $\leq 5''$ ，最佳表面粗糙度 $Ra \leq 0.08 \mu\text{m}$ （加工模具钢）， $Ra \leq 0.15 \mu\text{m}$ （加工硬质合金）。

(8) 江苏群基精密机械有限公司LN60S电火花成形机床。该机为五轴数控，采用绝对值编码器或光栅尺作为数控轴位置反馈器件，闭环控制，开机无需机械回零。支持工业4.0通讯协议，可实现远程诊断、监控和调试。配置石墨、钨钢专用电路，能加工出高质量的镜面效果，升降式油槽。



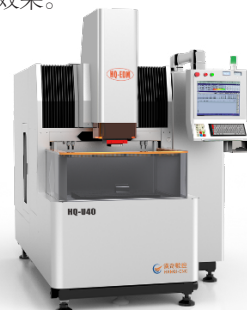
主要技术参数：X/Y轴行程 $600 \times 400\text{mm}$ ；Z轴行程 350mm ；工作台尺寸 $800 \times 550\text{mm}$ ；工作液槽内腔尺寸 $1100 \times 750 \times 380\text{mm}$ ；加工头板距工作台面最小/最大距离 $195/545\text{mm}$ ；最高液面到台面距离 340mm ；最大油箱容量 720L ；最大电极重量 100kg ；最大工件重量 600kg 。

(9) 广东台正精密机械有限公司CNC-B45L/T750电火花成形机床。该机为三轴数控，Z轴采用直线电机驱动，全闭环控制，最大移动速度可达 $20\text{m}/\text{min}$ 。Linux操作系统，配置自动编程系统，脉冲电源采用多电压组合形式，具有多种材料加工的工艺数据库，可一键生成加工程序，能实现钨钢、石墨及特殊材料的镜面加工。具有59个用户坐标系和一个机械坐标系，支持电极自动交换。



主要技术参数：X/Y/Z轴行程 $450 \times 330 \times 300\text{mm}$ ；工作台尺寸 $700 \times 400\text{mm}$ ；卡盘端面至工作台面距离（最小/最大） $110/410\text{mm}$ ；工作台面到地面距离 520mm ；工作油槽内尺寸（长 \times 宽 \times 高） $850 \times 650 \times 350\text{mm}$ ；最大电极重量 30kg ；工作台最大承重 500kg ；最大工件尺寸（长 \times 宽 \times 高） $700 \times 500 \times 250\text{mm}$ ；液位最大高度 250mm ；重复定位精度 $\pm 2 \mu\text{m}$ ；最大加工电流 75A ；最佳表粗糙度 $Ra \leq 0.045 \mu\text{m}$ ；最小电极损耗 0.1% ；最高加工效率 $800\text{mm}^3/\text{min}$ 。

(10) 苏州汉奇数控设备有限公司HQ-U40电火花成形机床。该机为三轴数控，采用Linux操作系统，总线式数控系统，数控轴全闭环控制，控制分辨率 $0.01 \mu\text{m}$ ，可在线互联网控制，具有精加工稳压电路、低损耗控制回路、PIKA回路、C回路、微细IP回路、钨钢高效加工回路以及多种摇动功能和抬刀模式，最小加工电流仅为 0.1A ，可实现镜面加工，自动升降式油槽，适用于封装模、接插件等高精度微细模具加工，加工 $\Phi 40\text{mm}$ 、深 60mm 的型腔，达到镜面效果。



主要技术参数：X/Y/Z行程400×300×300mm；工件加工平面度 $\leq 0.003\text{mm}$ ；最小追加加工尺寸0.005mm，粗糙度 $Ra0.8\mu\text{m}$ （加工面积 15000mm^2 ）。

(11) 深圳市米尔迪克精密机械科技有限公司AM120R双头电火花成形机床。该机为双牛头结构形式的大型三轴数控电火花成形机床，交流伺服电机驱动，配置铜加工钢、石墨加工钢、铜钨加工硬质合金、铜加工锌合金、石墨加工锌合金、铜加工铜合金等独立放电回路，具有多孔位自动移位加工、横向加工、45°斜向加工和倒扣加工等功能。



主要技术参数：X/Y/Z行程700（双头）×500×400mm；工作台尺寸(长×宽)1300×600mm；定位精度（JIS标准），任意300mm范围内 $6\mu\text{m}$ ；重复定位精度（JIS标准），任意300mm范围内 $3\mu\text{m}$ ；工作液槽外型尺寸2000×1100×600mm；最大电极重量200kg；最大工件重量4500kg；主轴端到台面的最小/大距离500/900mm；最大加工电流50A；最佳表面粗糙度 $Ra0.2\mu\text{m}$ （小面积 $Ra0.1\mu\text{m}$ ）；最小电极损耗0.1%；最高生产率 $500\text{mm}^3/\text{min}$ （铜打钢）， $1030\text{mm}^3/\text{min}$ （石墨打钢）。

(12) 北京迪蒙特机床有限公司CTM550-ABC电火花成形机床。该机为六轴数控，交流伺服驱动，全闭环控制。AB轴为可浸泡式

转台，C轴内置于Z轴内，配置气动快换夹具，手持操作盒，可用于不锈钢、高温合金和钛合金等难加工材料零件空间位置的簸箕孔和封严槽等形状的加工。



主要技术参数：X/Y/Z轴行程550×400×400mm；A/B/C轴转动范围 $\pm 360^\circ / \pm 90^\circ / 360^\circ$ （连续）；回转轴台面尺寸 $\Phi 180\text{mm}$ ；工作台面距导向器之间最大距离760mm；转台最大承载20kg；直线轴定位精度 $\leq 0.008\text{mm}$ ；重复定位精度 $\leq 0.005\text{mm}$ ；旋转轴分度精度 $\leq 15''$ ；重复分度精度 $\leq 10''$ ；最大加工电流50A；最高加工效率 $600\text{mm}^3/\text{min}$ ；最佳表面粗糙度 $Ra\leq 0.2\mu\text{m}$ （铜打钢）；最小电极损耗 $\leq 0.1\%$ 。

(13) 苏州新火花机床有限公司NSC-DJGZN电火花智能加工单元。该单元由自动升降式工液槽的电火花成形机床、工业机器人、数字化线边库、PLC中控柜、自动换爪系统以及MES系统等组成。能快速适应产品需求变化，实现多品种、小批量生产，满足个性化定制需求。通过智能制造技术，可实现无人化自动加工，提高生产效率，降低使用成本。



主要参数：电火花成形机床X/Y/Z轴行程400×300×320mm；关节工业机器人，AC伺服驱动，重复定位精度 $\pm 0.05\text{mm}$ 。

二、电火花线切割机床

(一) 单向走丝电火花线切割机床

1. 主要技术特点

(1) 大厚度、大承载、大锥度、高精度。从机床结构形式、床身材料、UV轴结构、数控轴行程、工作液冷却、机内空气循环等多方面进行优化设计，强化机床的刚性，减少热变形，提高机床的机械精度和精度保持性，满足大工件、大锥度的加工需求（尤其是模具行业）。

(2) 进一步融入智能控制技术，更注重技术细节。利用先进的计算机运算速度、集成电路、精密传感器、检测技术、人工智能等新技术，有效提升数控系统的功能和运行速度，将专门技术集成为模块化，形成具有特定技术细节的功能模块，如沙迪克的ECO CUT O-Plus技术、牧野的GS-CUT（凸面精灵）等等，这也许是未来的发展趋势。另外，如升降式工作液槽、触摸式显示屏、良好的人机界面、绿色节能脉冲电源、尖角圆弧过渡、尖角直线过渡轨迹处理、加工轨迹过切自动修正、三点找圆心、火花找正，自动垂直找正等实用功能，在展品中有了很好的应用。

(3) 自动穿丝成为标配。为了节约人工，提高整体工作效率，自动穿丝已是单向走丝电火花线切割机床的必备装置。除了国外参展机床外，国内参展的单向走丝电火花线切割机床也都配置了自动穿丝机构，穿丝成功率达到95%以上，有了很大的突破。

2. 典型展品介绍

(1) 沙迪克机电(上海)有限公司AP250Ls单向走丝电火花线切割机床。该机采用直线电机驱动和低重心门型构造设计,采用高精度加工液冷却装置以及空气循环系统,以实现高精度加工。配备19英寸触摸屏、最新的人机界面和“高速ECO CUT O-Plus”,可以使用油性加工液在微区获得高速性能。采用自动3面上下式加工槽、“コ”字型标准工作台,将操作面板与本机分离,集中配置阀门、流量计等操作区,在机床正面就可进行全部作业。



主要技术参数: X/Y/Z各轴行程 $250 \times 150 \times 120\text{mm}$; U/V轴行程 $35 \times 35\text{mm}$; 最大锥角 $\pm 7^\circ$ (板厚: 100mm); 工作液槽内尺寸(宽 \times 深) $895 \times 740\text{mm}$; 最大工件尺寸(宽 \times 长 \times 高) $400 \times 270 \times 100\text{mm}$ (喷流加工时); 最大加工物质量 80kg (喷流加工时); 电极丝直径 $0.03\sim 0.2\text{mm}$ 。

(2) 牧野机床(中国)有限公司U86单向走丝电火花线切割机床。该机可实现超高精度及高速加工。可编程的三面升降式工作液槽,高效智能穿丝系统,即使类似压铸模具复杂表面上的穿丝位置,也能保证顺利穿丝。GS-CUT(凸面精灵)技术能保证超大型塑胶模具和零件加工的直线度在 $0.01\mu\text{m}/400\text{mm}$ 以内。



主要技术参数: X/Y/Z行程 $800/600/520\text{mm}$; 最大工件尺寸 $1220 \times 910 \times 500\text{mm}$; 最大工件重量 3000kg ; 工作液箱容量 2150L ; 电极丝直径 $0.20/0.25/0.30\text{mm}$ 任选; 最大加工电流 30A 。

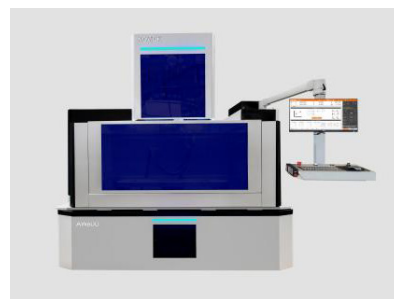
(3) 苏州三光科技股份有限公司LA500A单向走丝电火花线切割机床。该机为浸泡式精密机床, Windows XPE操作系统,配置TFT液晶触摸屏、局域网和U盘数据交换接口。采用LRT1节能型脉冲电源,可减少60%的耗电量;数控轴交流伺服驱动,全闭环控制;具有拐角精度控制功能,能自动调节切割速度和脉冲能量;内置钢件、铝件、铜及合金等不同材料、不同厚度的工艺数据库。



主要技术参数: X/Y轴行程 $500 \times 350\text{mm}$; U/V轴行程 $70 \times 70\text{mm}$; Z轴行程 270mm ; 工作台面尺寸(长 \times 宽) $745 \times 510\text{mm}$; 最大切割锥度 $\pm 15^\circ / 100\text{mm}$; 电极丝直径范围 $\Phi 0.15\sim \Phi 0.3\text{mm}$; 最大工件厚度 260mm (冲水加工)

$/180\text{mm}$ (浸水加工); 最大工件尺寸 $1100 \times 800\text{mm}$ 。最大切割效率 $\geq 210\text{mm}^2/\text{min}$ (电极丝直径为 $\Phi 0.3\text{mm}$); 最佳表面粗糙度 $Ra \leq 0.35\sim 0.6\mu\text{m}$; 加工精度 $5\mu\text{m}$ (对边尺寸 15mm 正八角形)。

(4) 北京安德建奇数字设备股份有限公司AW600单向走丝电火花线切割机床。具有小圆弧自适应处理、回参考点穿丝、尖角圆弧过渡和尖角直线过渡轨迹处理、加工轨迹过切自动修正、三点找圆心、火花找正,自动垂直找正、45度和90度找孔中心、加工中实时修改程序偏置量、加工过程的信息处理及记忆、自动再穿丝等功能。



主要技术参数: X/Y/Z轴行程 $600 \times 400 \times 360\text{mm}$; U、V轴行程 $100 \times 100\text{mm}$; 工作台尺寸 $850 \times 600\text{mm}$; 最大工件尺寸 $1030 \times 800 \times 350\text{mm}$ 。

(5) 上海汉霸数控机电有限公司DS430单向走丝电火花线切割机床。机床床身为T型结构设计,XY轴为直线电机驱动+光栅尺闭环控制,Z轴具有防撞保护功能,自主研发的自动穿丝机构,穿丝成功率达95%。数控系统采用汉霸自主研发的Windows DSP,配置专家系统和工艺数据库,只需根据系统提示选择工件材料、工件高度、电极丝直径以及切割次数等加工条件,即可自动生成放电参数。如遇到加工中断,BYPASS功能会记录信息,自动跳转到下一个工序段继续加工。



主要技术参数：X/Y行程400×300mm；U/V行程80×80mm；Z行程250mm；最大切割斜度±22°；最大工件重量500kg；最大工件尺寸840×750×240mm；割一修三表面粗糙度Ra0.45μm，最佳表面粗糙度Ra0.35μm。

（二）往复走丝电火花线切割机床

1. 主要技术特点

（1）自动穿丝技术得到逐步应用。困扰往复走丝电火花线切割机床多年的自动穿丝技术近几年正在被逐渐突破，多家行业企业推出的新产品都配置了自动穿丝机构，自动穿丝成功率也有了很大提高，这对提升往复走丝电火花线切割机床的技术水平具有里程碑式的意义。

（2）自动化、智能化水平不断提高。随着用户不断提出新的要求，也为了缓解对操作者的技能要求和劳动强度，生产企业将机床的自动化水平提升作为创新研发的主要课题，并以此作为产品提档升级、增强竞争力、稳定售价的有效手段之一。近年来，在市场需求的催动下，根据用户实际需求，并适当参考和移植单向走丝电火花线切割机床的一些自动化功能，自动编程、电极丝张力自动控制、工件自动找正、拐角切割参数自动优化、放电状态实时监测、放电参数自适应优化、自动穿丝和加工监控

等自动化功能，在往复走丝电火花线切割机床上得到了应用，加持机器人的应用而形成“灵动工作站”，很好地提高了往复走丝电火花线切割机床的自动化水平。

（3）新技术、新材料得到应用。无电阻脉冲电源的应用，有效降低了机床的能耗，更具节能绿色化。机床的床身、立柱等大件采用矿物铸件，对提升机床的热稳定性、抗振性和抗干扰性进行了很好的尝试；直线电机具有无接触、移动速度快等优点，部分企业推出了直线电机驱动、全闭环控制的展品；另外，防电解电源、钛合金专用电源和新型张力控制机构等技术也得以应用，使得往复走丝型多次切割电火花线切割机床的整体技术水平有了明显提升。

2. 典型展品介绍

（1）苏州三光科技股份有限公司HC400往复走丝型多次切割电火花线切割机床。该机为自动穿丝型机床，X轴与Y轴独立布局，UV轴为桁架式结构。基于Windows操作系统平台，内置工艺数据库，自带编程图形，能自动编辑加工代码程序。配置防电解脉冲电源，抑制电解腐蚀，提高表面质量，具有电极丝张力在线检测和智能控制、多坐标系统、平行补偿、清角设定、程序镜像、拐角优化、比例缩放、加工信息跟踪记录和加工监控等功能，保证无人加工时的安全运行。



主要技术参数：X/Y轴行

程400×300mm；工作台尺寸300×400mm；最大工件尺寸930×550×300mm；最大工件重量500kg；最大切割厚度300mm；最大加工电流12A；最大切割效率300mm²/min；最佳表面粗糙度Ra≤0.6μm。

（2）昆山瑞钧机械科技有限公司“灵动切割工作站”。该灵动切割工作站由往复走丝型多次切割电火花线切割机床、六轴协作机器人、多工位零点夹具等组成，搭载自动穿丝系统，通过精密夹具进行工件的快速更换和定位，实现包括上下料在内的全流程自动化，可用于批量化精密零部件的自动切割加工。



（3）苏州市宝玛数控设备有限公司BMA400C往复走丝型多次切割电火花线切割机床。该机为C结构，T型床身，采用一体化设计，电气与主机集成一体。XYUVZ轴均为数控，XY轴交流伺服电机驱动，闭环控制。搭载防电解无电阻脉冲电源，加工表面质量高，绿色节能。配置双向智能紧丝系统、铝切割回路和钛合金切割回路，具有工件自动找正（AR）、锥度切割后电极丝一键回垂直、斜顶跳步切割电极丝位置预置斜和定时自动润滑等功能。该机型通过机械工业特种加工机床产品质量检验检测中心检测，达到团体标准《数控往复走丝电火花线切割机床性能评价规范》（T/CMBTA 1010-2021）。



主要技术参数：X/Y行程400×320mm；U/V行程50×50mm；工作台面尺寸650×420mm；工作台承重400kg；切割厚度300mm；加工精度 $\leq \pm 0.003\text{mm}$ ；最佳粗糙度 $Ra \leq 0.6\mu\text{m}$ ；切割锥度 $\pm 6^\circ$ （45mm厚以内）；最大加工电流12A；最大加工效率350mm²/min，整机功率 $\leq 2\text{kW}$ 。

（4）杭州华方数控机床有限公司HF450CB往复走丝型多次切割电火花线切割机床。该机采用Windows操作系统和Autocut（10.1）编控一体系统，支持图形驱动自动编程和多种线切割软件生成的3B代码、G代码等加工代码。数控轴均采用伺服电机驱动，两级电极丝张力系统（华方发明专利）可根据切割工艺需要由力矩电机调整电极丝张力，上下进电块采用双边V型槽结构设计，加工时只需输入工件厚度和锥度大小两项参数即可完成锥度加工，具有校垂直、碰边、定中心、自动上丝、自动紧丝、清角延时、Z轴切割高度记忆、运动轴软硬限位和丝筒冲程防护等功能。



主要技术参数：X/Y行程450×320mm；U/V轴行程70×70mm；Z轴最高切割高度350mm；XYUV轴定位精度 $\leq 0.005\text{mm}$ ；最大切割锥度 $\pm 12^\circ$ （工件高度100mm）；最佳粗糙度 $Ra \leq 0.6\mu\text{m}$ ；腰鼓度 $\leq 0.01\text{mm}$ （150mm厚）。

（5）北京安德建奇数字设备股份有限公司MWE6 Pro-400往复走丝型多次切割电火花线切割机床。该机为安德“中走丝”6代机床，全封闭一体机形式，T形结构床身，左右推拉式前门，后侧上下推拉门与平开门组合，便于操作和维护。搭载自主知识产权的自动穿丝系统，运丝系统采用全伺服自动恒张力调节机构，电极丝张力自动调节。搭载自主研发的无阻高频电源，可获得较好的表面粗糙度。



主要技术参数：工作台面尺寸650×460mm；X/Y坐标轴行程400×300mm；U/V坐标轴行程70×70mm；Z轴（数控）最大行程250mm；最大工件重量500kg；最大工件尺寸960×550×300mm；整机外形尺寸（含电柜）2250×1900×2200mm；最佳粗糙度 $Ra \leq 0.5\mu\text{m}$ 。

（6）泰州东方数控机床有限公司DK7732ZT往复走丝型多次切割电火花线切割机床。采用C型结构，十字滑台，直线导轨，XY轴交流伺服或混合电机直联驱动，前置紧凑型

UVZ轴。搭载智能双向闭环张力控制技术，不锈钢悬挂拉板装置，可实现四轴控制四轴联动，动态控制电极丝张力。



主要技术参数：工作台面尺寸660×460mm；X/Y轴行程400×320mm；U/V轴行程 $\pm 20 \times \pm 20\text{mm}$ ；Z轴行程250mm；最大切割厚度300mm；最大切割斜度 $\pm 3^\circ / 80\text{mm}$ ；最佳表面粗糙度 $Ra \leq 0.9\mu\text{m}$ ；最大切割效率280mm²/min；一致性尺寸误差 $\leq 0.007\text{mm}/50\text{件}$ 。

（7）苏州汉奇数控设备有限公司HQ-400FU往复走丝型多次切割电火花线切割机床。一体式结构，XY轴独立分布，三面自动升降式工作液槽。计算机与显示器集成一体式结构，采用自主开发系统软件，国际通用G代码编程，数控系统为总线模式，XY轴为交流伺服电机直驱，UVZ轴采用双导轨四滑块设计，均具备螺距补偿和反向间隙补偿功能。



主要技术参数：X/Y/Z行程

400×320×300mm；最佳表面粗糙度 $Ra \leq 0.6 \mu m$ ；割一修二表面粗糙度 $Ra \leq 0.5 \mu m$ ；最大加工效率 $\geq 300mm^2/min$ ；钼丝损耗15万 mm^2 / 零损耗（9000 mm^2/h / 水基加工液）；绝对值精度 $\leq \pm 0.003mm$ （连续加工多个八方），达到中国机床工具工业协会团体标准T/CMBTA 1010-2021《数控往复走丝电火花线切割机床 性能评价规范》要求。

（8）北京凝华科技有限公司NH400W往复走丝电火花线切割机。该机采用一体型全封闭结构，集成了欧姆龙SCARA四轴机械手，形成自动装夹、上料、切割、取料的柔性配置生产单元。数控系统采用嵌入式操作系统，搭载Windows操作系统，PC104架构，上下位机控制模式，数控轴交流伺服驱动，半闭环控制，具有电极丝恒张力控制，加工中可编程自动改变加工参数，一键启动加工，智能防撞，自动寻找圆孔、圆柱和槽中心、碰边定位等功能，内嵌编程系统，兼容G代码、3B代码，根据加工件的特点配置相应的料仓，由传统的人工更换单个零件变为更换料盘，加工中可以无人值守，专用于各种小型零件的大批量切割。



主要技术参数：X/Y轴行程400×320mm；U/V轴行程60×60mm；Z轴行程120mm；工作台面尺寸（长×宽）630×440mm；最大切割锥度 $\pm 6^\circ / 100mm$ ；电极丝直径范围 $\phi 0.1 \sim \phi 0.2mm$ ；

最大工件厚度200mm；最大工件尺寸750×580mm。最高切割效率 $\geq 300mm^2/min$ （电极丝直径为 $\Phi 0.2mm$ ）；最佳表面粗糙度 $Ra \leq 0.6 \mu m$ 。

（9）浙江霸器智能装备股份有限公司BQ1063-76往复走丝型多次切割电火花线切割机床。数控运动轴采用伺服电机驱动，配置防电解脉冲电源，具有自动寻边、自动寻中心、自动分中、AR、轨迹防切错、自动回加工起始点等功能。



主要技术参数：X/Y轴行程1050×650mm；U/V轴行程80×80mm；工作台尺寸1450×800mm；最大工件尺寸1600×860mm；最大切割直线厚度380mm；最大承载重量1600kg；数控运动轴重复定位精度 $\leq \pm 0.005mm$ ；最大加工锥度 $\pm 15^\circ / 150mm$ （上下水嘴）；多次切割精度 $\leq \pm 0.003mm$ （材料Cr12，厚度40mm，对边20mm的八方工件）；最大切割效率 $\geq 300mm^2/min$ ；最佳表面粗糙度 $Ra \leq 0.7 \sim 1.4 \mu m$ （割一修二）；电极丝损耗 $\leq 0.01mm / 200000mm^2$ 。

（10）上海伊阳机械有限公司EFH43S往复走丝型多次切割电火花线切割机床。一体化设计，T型床身，C型结构，数控轴交流伺服驱动，配置智能化脉冲控制单元、可视化机床监控单元、双向恒张力调整机构和工艺数据库。



主要技术参数：XYZ轴行程400×350×250mm；UV轴行程60×60mm；工作台尺寸660×505mm；最大工件尺寸760×560mm；最大工件重量500kg；最大切割厚度300mm；最大切割锥度 $\pm 10^\circ / 80mm$ ；最大切割效率 $\geq 250mm^2/min$ ；粗糙度 $Ra \leq 0.6 \sim 1.2 \mu m$ （割一修二，工件Cr12，厚度30mm）；多刀切割精度 $\leq \pm 0.005mm$ （对边14的正八角，Cr12，H=40mm）；电极丝直径范围 $\Phi 0.13 \sim \Phi 0.2mm$ 。

（11）上海特略精密数控机床有限公司TL5040B往复走丝型多次切割电火花线切割机床。具有高效率切割、高精度加工、高精度找中心、找边等功能，大锥度摇摆线架结构，适用于塑胶、钣金和模具制造企业。



主要技术参数：X、Y轴加工行程500×400mm；最大加工厚度280mm；最大切割效率 $\geq 500mm^2/min$ ；最大切割锥度 $\pm 30^\circ$ ；最高加工精度 $\leq \pm 3 \mu m$ ；最佳表面粗糙度 $Ra \leq 0.6 \mu m$ 。

三、电火花小孔加工机床

1. 主要技术特点

(1) 自动化、智能化是多轴电火花小孔加工机床的发展方向。目前及未来一段时间内,作为高档电加工机床的多轴数控电火花小孔加工机床,仍将是航空航天领域特殊材料零件上进行孔加工的主要关键设备,自动化和智能化将是其发展趋势。随着重点用户对孔加工自动化要求的不断提高,加工程序的自动生成和导入、自动更换电极、自动更换导向器、自动变换规准、自动在机测量零件外形轮廓和孔位纠偏、穿透检测、加工深度自动控制、矢量加工、孔加工和铣加工自动转换、自动规划和优化铣加工路径、铣削深度自动控制以及无人化生产管理等将是这类机床的必备功能。本次参展产品中,有些展品已具备或部分具备上述功能,并能与其他机床设备和仪器集成,形成孔加工柔性生产线。

(2) 加工能力有了进一步增强。电火花小孔加工机床一直在追求加工能力的不断突破,朝着孔更深、直径更小的方向进步。目前已能在钨钢等超硬材料上加工500mm深的小孔,最小加工孔径可达0.2mm,有的甚至0.15mm。多轴数控小孔加工机床可加工倾角小于 20° 的群斜孔,孔的位置偏差小于0.05mm,能通过逐层铣削方法进行叶片异形导流口的加工。

(3) 操作便利性和设备可靠性有了提高。通过对编程软件的优化升级,孔位数据的导入得到了简化;通过零件轮廓在机检测和纠偏功能,可有效补偿由于零件外形不同而导致的孔位偏差;穿透检测功能可在孔穿透后及时停止加工,确保不损伤叶片内壁;能根据加工顺序和要求自动更换电极和导向器等等,这些都在一定程度上大大简化了操作人员的作业量

和作业强度,明显提高了操作的便利性。另外,数控系统、控制电路、元器件等的性能质量在设计、采购和装配制造过程中得到了足够重视,整机可靠性也有了较大的提高。

2. 典型展品介绍

(1) 盈丰精密机械有限公司SX-80电火花小孔加工机床。该机床为桌面式机床,配置高精度电极自动送料主轴,有自动轴定位控制、孔深控制功能,可加工直径为0.045~3.0mm的高精度孔加工,可进行3D电火花铣削加工。通过选配A/B旋转轴和SP12-AC电极交换夹头,可使机床变成电极自动更换的五轴数控机床;选配微细脉冲成形器(SX-MFPS)进行加工,可获得 $Ra0.1\sim 0.05\mu m$ 的表面粗糙度;选配电极丝整形装置,可进行小至 $\Phi 0.02mm$ 的微孔整形。



主要技术参数: X/Y/Z行程 $300\times 150\times 200mm$;定位精度 $\pm 0.002mm$;直线轴分辨率 $0.0001mm$;轴进给速度,直线轴 $1200mm/min$;工作台尺寸 $510\times 270mm$;工作台承载 $25kg$;工作液压力 $75bar$ (流过电极管的压力)。

(2) 百德机械股份有限公司HSD351电火花小孔加工机床。该机床是Winbro Group Technologies最新开发的产品,可高效加工异形孔,并根据设计意图生成复杂的2D和3D扩散器孔加工程序。借助TCPro和TCpost编程,加工过程中操作人员

可看到零件模型,并通过序列号可跟踪每个部件在每次加工操作中的进度,加工前能监测和记录电极、导向器和零件中的冲液流量。雷尼绍机上探测装置可实现机床的精确、自动校准。两组14站电极仓,每桶可容纳15、25或49个电极,最长可达750mm,最多可容纳13个导向器和1个测量头,可进行电极和导向器自动更换。具有OPC-UA或MT Connet接口选项,实时监控关键变量,数据采集系统(DAX)可记录每个功能的详细信息。



主要技术参数: X/Y/Z行程 $290\times 350\times 550mm$;A行程 $+10^{\circ}/-140^{\circ}$;C行程 $+/-360^{\circ}$;线性轴定位精度 $0.005mm$;回转轴定位精度 $10arc/s$ 。

(3) 苏州电加工机床研究所有限公司SE-GK020C多轴数控电火花小孔加工机床。该机床为固定工作台式六轴数控机床,花岗岩工作台,四根直线轴、二个旋转轴,配置自主开发的数控系统和编程软件、电极随动扶持装置、电极自动更换装置、交流伺服驱动闭环控制系统、自适应控制脉冲电源和去离子高压工作液系统等,具有零件在机测量纠偏、刀尖跟随、自动检测加工零位、矢量跟随加工、电火花铣削加工、自动变换规准、穿透检测等功能,可实现空间位置分布小孔的高效精密加工,还可进行簸箕形、腰型、锥形等异形导流口的电火花铣削加工。



主要技术参数：X/Y/Z/S轴行程 $500 \times 400 \times 350 \times 400\text{mm}$ ；B/C轴转动范围 $\pm 90^\circ / 0^\circ \sim 360^\circ$ ；C轴盘面距导向器之间的最大距离 350mm ；C轴盘面直径 $\Phi 200\text{mm}$ ；C轴最大负载 20kg ；夹持电极范围 $\Phi 0.2 - \Phi 3\text{mm}$ ；最高工作压力 8MPa ；最大加工电流 30A ；XY轴运动的定位精度 0.015mm ；重复定位精度 0.01mm ；B\C轴分度精度 $25''$ ；重复分度精度 $15''$ 。

(4) 苏州市宝玛数控设备有限公司BMD703A-400CNC数控电火花小孔加工机床。该机为三轴（四轴）数控机床，采用嵌入式控制系统，实现与CAD无缝连接，兼容UG\SOLIDWORKS\AUTOCAD等绘图软件输出的DXF图形。具有自主知识产权的穿孔机编控系统，可在放电加工的同时进行绘图编程工作，实现分时作业；内置智能化工艺数据库，具有“互联网+”功能，可进行远程实时监控加工状态。选配C轴（旋转轴），可扩展为四轴数控。



主要技术参数：XY轴行程 $400 \times 320\text{mm}$ ；Z轴行程 300mm ；工作台尺寸 $466 \times 330\text{mm}$ ；工件厚度 $0 \sim 300\text{mm}$ ；工作台承重 300kg ；电

极夹持直径范围 $0.2 \sim 3.0\text{mm}$ ；加工电流 30A ；XY轴定位精度 0.02mm ；

四、其他电加工机床

(1) 孚尔默（太仓）机械有限公司VHybrid 260机械电火花复合工具磨床。结合了磨床放电功能，可以在两项加工功能中自动内部切换。可磨削和修磨直径至 150mm 的合金钻头、合金铣刀和PCD刀具。



主要技术参数：最大刀具外径 150mm ；最大刀具长度 360mm ；最大砂轮和电极直径 150mm ；磨削主轴为皮带主轴；转速 8500r/min ；驱动功率（100%开机状态） 11kW ；峰值功率 23kW ；主轴适配接口HSK50；连接负荷约 18kVA 。

(2) 北京迪蒙特机床有限公司QX5-D400电火花磨刀机。该机为五轴数控机床，专用于金刚石铣刀、金刚石锣刀、螺旋形金刚石修边刀、封边刀、金刚石锯片的磨削加工。三根直线轴，两个旋转轴，多轴联动，可实现各种曲线刀具的加工。配有三维高精度测量探针，测球采用红宝石材料，可实现在机全自动测量。车削机构，可实现在线电极修正，修正后车削量软件自动补偿。有多种加工工艺供选择，可利用探针对加工刀体进行在机测量和修磨。



主要技术参数：X/Y/Z轴行程 $400 \times 400 \times 260\text{mm}$ ；A轴旋转角度 360° ；W轴旋转角度 $\pm 180^\circ$ ；手动B轴可转动角度 $\pm 30^\circ$ ；电极最大外径 125mm ；最大内孔 50mm ；电极最大厚度 40mm ；线性轴的定位精度 $\leq 0.01\text{mm}$ ；重复定位精度 $\leq 0.006\text{mm}$ ；旋转轴分辨率 0.001° ；圆跳动 0.005mm ；轴向跳动 0.003mm ；主轴转速 $80 \sim 2500\text{r/min}$ ；油箱容积约 100L ；流量 90L/min ；平刀类齿顶的加工圆度 $\leq 0.02\text{mm}$ ；尺侧的平度一致性 0.02mm 。

(3) 苏州电加工机床研究所有限公司DJK6032电化学去毛刺机床。主机采用全防腐钢板焊接结构，工作区域为全不锈钢制成，花岗岩工作台，主轴部件的上下滑动采用双导柱形式，气控驱动，气动上下提拉式挡溅门。晶闸管无阻恒流恒压脉冲式电源，脉间与脉宽可调，具有过流、短路保护功能；控制系统具有多工位短路检测、位置到位检测和自动循环等功能，能高效去除毛刺，实现倒圆角边，边沿交接处呈水滴状，满足精密零件去毛刺的要求。



主要技术参数：最大电流 300A 以上，达到GB/T 25635.1-2010《电解去毛刺机床 第1部分：精度检验》标准的要求。□

高精度航空薄壁件加工技术体系：从材料特性到机床装备的迭代升级

通用技术集团机床工程研究院 路平 陈洪军

【摘要】针对航空薄壁件加工中材料特性、机床装备与工艺创新的协同优化问题，构建了“材料-工艺-装备-控制”四位一体的技术体系。首先剖析了钛合金、铝合金等材料的切削性能差异及微观组织对加工变形的影响，通过 Johnson-Cook 本构方程与有限元仿真揭示了热-力耦合机制。基于此，提出融合五轴联动、低温冷却、数字孪生等技术的智能加工方案，突破传统试错法的效率瓶颈。通过某型无人机翼肋加工验证，该体系使产品合格率上升，加工周期缩短。研究表明，该技术体系通过材料各向异性本构模型、深度强化学习参数优化及亚微米级动态补偿功能，有效抑制了切削振动与热变形，为航空薄壁件精密加工提供了科学解决方案。

【关键词】航空薄壁件；精密加工；材料特性；五轴联动；数字孪生；自适应控制

一、引言

在航空领域，自由曲面薄壁零件的精密加工技术受到极大关注，特别是飞机发动机和燃气轮机叶片的制造。这些零件通常具有复杂的几何形状和微薄的壁厚，使得在保持高精度和低变形的条件下加工它们尤为困难^[1]。航空薄壁件作为现代飞行器轻量化设计的核心载体，其制造精度直接决定了飞行器的气动性能、结构强度与服役寿命。但航空发动机薄壁零件高效高精度制造空气阻尼工艺装备技术针对航空发动机薄壁零件，因切削加工振动大，导致加工效率低、零件精度差、表面完整性差、刀具消耗大等难题^[2]。随着全球航空产业进入后疫情时代的复苏期，航空装备市场规模与技术创新需求同步攀升，而薄壁件加工技术体系正成为推动这一进程的关键引擎。

然而，传统加工技术体系在面对新型航空合金材料时逐渐显现出局限性。这些新型航空合金材料具有高比强度和出色的耐热性，往往具备独特的机械和化学性能。例如，一些广泛应用于飞机发动机高温部件的镍基高温合金，硬度极高且热导率低。使用传统的铣削和车削技术进



行加工时，其高硬度会导致切削刀具快速磨损。这不仅增加了刀具更换的频率，大幅降低了整体加工效率，还极大地提高了生产成本。此外，由于这些合金的热导率低，加工过程中产生的热量难以散发。这会导致切削区域温度集中，可能对工件表面造成热损伤，如产生微裂纹以及材料微观结构发生变化。这些缺陷严重损害了零件的机械性能和疲劳抗性，对飞机发动机的安全性和可靠性构成潜在威胁。传统加工技术的局限性还体现在薄壁构件在加工过程中产生的残余应力场分布不均问题。该问题导致零件回弹

变形量可达理论设计值的0.3%~0.8%，严重制约了整体装配精度。这种材料特性与加工变形之间的强耦合效应，使得单纯依靠工艺参数优化的传统路径已难以满足新一代飞行器对薄壁件形位公差 $\pm 0.05\text{mm}$ 的严苛要求。

本文提出高精度航空薄壁件全流程加工技术体系，其创新性体现在三个维度：首先，建立材料各向异性本构模型与切削动力学参数的映射关系库，实现加工变形的多物理场预测；其次，开发基于深度强化学习的工艺参数自适应优化系统，突破传统试错法的效率瓶颈；最后，研制具有亚微米级动态补偿功能的智能加工装备，通过主轴热伸长实时补偿技术将热致误差控制在 $0.8\mu\text{m}$ 以内。经某型无人机翼肋加工验证，该体系使产品合格率从78.6%提升至95.3%，同时加工周期缩短22%。

1. 行业背景：万亿美元市场下的精度博弈

2023年全球航空装备市场规模已突破1.17万亿美元，其中航空薄壁件作为关键结构件的细分市场达120亿美元，年均增长率达8.7%。这一增长由两大核心需求驱动：一方面，航空航天领域对飞行器性能提升的不懈追求。随着飞机和航天器向更高速度、更远航程、更大载重方向发展，对航空薄壁件的轻量化与高强度要求愈发严苛。轻量化设计能有效降低飞行器的整体重量，减少燃油消耗，提升燃油经济性；而高强度则确保在复杂飞行环境下，薄壁件仍能维持可靠的结构完整性，保障飞行安全。例如，新型商用客机为实现更高效的燃油利用，其机翼和机身大量采用薄壁结构设计，通过优化薄壁件的材料与制造工艺，在减轻重量的同时大幅提高了结构强度，从而显著提升了飞机的运营效率。

另一方面，新兴航空应用场景的不断拓展。无人机技术的迅猛发展，催生了对航空薄壁件的海量需求。从物流配送无人机到测绘、巡检无人机，不同应用场景对无人机的续航能力、有效载荷和操控灵活性提出了多样化要求。航空薄壁件凭借其独特的轻量化优势，能够有效增加无人机的续航里程，提升其有效载荷能力，同时保证在复杂飞行条件下的稳定性和可靠性。此外，城市空中交通（UAM）概念的兴起，使得电动垂直起降飞行器（eVTOL）成为研究与开发的热点。这类飞行器同样依赖大量高性能航空薄壁件来实现高效飞行，其轻量化设计对于降低能源消耗、提高飞行安全性和运营经济性至关重要。这些新兴应用场景的蓬勃发展，为航空薄壁件市场注入了源源不断的活力，进一步推动了其市场规模的持续增长。

中国在这一领域的崛起尤为显著。2023年国产大飞机C919实现商业首飞，标志着中国成为全球第三个具备自主

研制干线客机能力的国家。中国商飞预测，未来20年全球新机交付量将达4.2万架，其中中国市场占比22%，对应薄壁件市场规模超260亿美元。然而，技术壁垒与供应链短板仍制约着国产化进程——国内航空薄壁件加工合格率仅为65%~75%，远低于国际领先企业的90%。

2. 技术痛点：变形失控与成本黑洞

薄壁件加工中的变形问题已成为全球航空制造业的共性难题。统计显示，钛合金薄壁件因切削热诱发弹性变形导致的尺寸超差率高达30%~40%，而铝合金薄壁件因残余应力释放产生的翘曲变形普遍在 $0.2\sim 0.5\text{mm}$ 范围内。此类缺陷不仅造成单架飞机返工成本达50万美元，更导致材料利用率不足30%（传统工艺下钛合金薄壁件材料成本占比超60%）。核心挑战体现在三方面：

（1）材料自身特性带来的挑战。航空常用的钛合金、铝合金等材料，虽具备优异的强度重量比等优势，但在加工过程中，其物理性质导致变形问题频发。钛合金导热性差，切削热易在加工区域聚集，使局部温度急剧升高，造成材料热膨胀不均，引发弹性变形。而铝合金材质较软，在加工应力作用下，残余应力难以均匀分布，极易在后续加工或服役过程中释放，致使薄壁件产生翘曲。不同材料的微观组织结构也影响着加工变形，例如钛合金的多相结构，在切削力作用下，各相变形协调性差，进一步加剧了尺寸偏差。

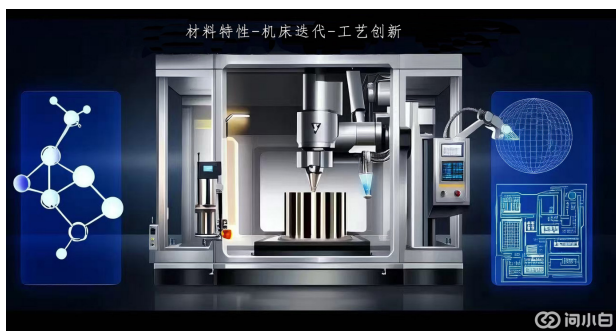
（2）加工工艺的复杂性。传统切削加工工艺，如铣削、车削，在处理薄壁件时，切削参数的选择极为关键却又困难重重。切削速度、进给量和切削深度的微小变化，都可能显著改变切削力与切削热的产生和传递，进而影响薄壁件的变形程度。高速切削虽能提高加工效率，但会带来更高的切削温度，增加热变形风险；低速切削虽可降低热影响，却难以保证加工精度和表面质量。此外，加工路径规划也至关重要，不合理的刀具轨迹会导致切削力分布不均，使薄壁件局部受力过大而变形。同时，冷却液的使用也需精细调控，不当的冷却方式不仅无法有效带走切削热，还可能因温度骤变引发额外的热应力。

（3）装备精度与稳定性不足。航空薄壁件加工对机床的精度和稳定性要求极高。然而，现有机床在长时间高速运转过程中，易出现热变形、振动等问题，影响刀具与工件的相对位置精度，直接导致薄壁件加工尺寸偏差。机床的传动系统、导轨精度也会在一定程度上影响加工精度，微小的传动误差或导轨磨损，在薄壁件加工的高精度要求下被放大，加剧了变形缺陷的产生。并且，加工过程中的工装夹具若设计不合理，无法为薄壁件提供均匀稳定的支撑，也会在切削力作用下促使工件变形。

3.综述价值：工艺链协同优化的理论突破

国内外学者就薄壁件加工技术过程中的难题展开大量的研究。董辉跃等^[3]采用有限元仿真技术进行研究后,表明装夹布局对残余应力分布有重要影响,且夹具定位点分布较平均的装夹方案可获得比较均布的残余应力和较小的变形。陈蔚芳等^[4]建立了夹具布局和变夹紧力分层优化模型,通过实例分析验证了分层优化设计方法可以进一步减小工件加工变形,提高加工变形均匀度。DOU等^[5]结合有限元仿真技术,采用4种不同优化算法对零件高速铣削过程中的装夹定位布局进行了优化与结果对比。胡福文等^[6]通过协调单元生死顺序和铣削力加载,实现了切边过程有限元仿真分析,并选择典型飞机蒙皮零件进行了集成验证试验,试验分析结果表明加工精度满足制造要求。秦国华等^[7]为提高夹具定位的设计效率,建立了定位方案的修订式设计算法,该算法适用于复杂形状薄壁零件的定位方案分析和设计。石志云等^[8]提出了一种适合柔性薄板冲压件定位位置优化设计的方法,该方法利用APDL语言基于遗传算法开发了定位点优化布置计算方法,研究了平面及曲面零件在重力作用下定位点的分布情况,分析了曲面零件定位误差在观测点的放大情况,完善了考虑工件制造误差的定位点布置的分析方法。Li等^[9]为了提高薄壁件的机加尺寸精度,给出了一种将GA和FEA相结合的优化算法,从而确定最优的夹具布局。张洪双等^[10]建立了适用于多种机翼的定位器行程的目标函数,利用遗传算法获得定位器的布局 and 最优行程。曲巍巍等^[11]根据有限元分析计算结果,提出了一种改善结构受力、减小环形轨道变形、提高制孔精度的定位安装方案;随后,对有限元模型进行了模态分析,考察了整机的动态特性;最后,应用工程样机进行了制孔试验,验证了环形轨道制孔系统的实际加工效果。齐振超等^[12]着眼于工装设计补偿,针对大型壁板自动钻铆定位误差控制问题展开定位误差溯源分析和定位点布局优化。Zhou等^[13]为了解决薄壁件刚性差、在制造过程中易因工装夹紧力产生弹性变形等问题,提出一种基于改进蚁群优化算法的薄壁件柔性工装布局优化方法,对薄壁件柔性工装进行了优化布局。

本文系统构建“材料特性-机床迭代-工艺创新”三位一体的技术体系,旨在破解航空薄壁件加工中的多尺度耦合难题:从材料科学层面来看,深入研究材料微观结构与宏观性能的关联机制至关重要。一方面,针对现有航空用钛合金、铝合金等材料,通过添加微量元素、优化热处理工艺等手段,调控其晶体结构与相组成,从而改善材料的热稳定性与力学性能均匀性。例如,在钛合金中添加适量稀土元素,可细化晶粒,提升其热传导能力,有效缓解切削热导致的热膨胀不均问题,降低弹性变形风险。另一方面,研发新型高性能复合材料,如连续纤维增强金属基复合材料,利用纤维的高强度特性承担主要载荷,基体材料提供良好的成型性与界面结合力,在实现薄壁件轻量化的同时,显著增强其抗变形能力。同时,借助先进的材料表征技术,如高分辨电子显微镜、同步辐射 X 射线衍射等,精确分析材料在加工过程中的微观组织演变与应力分布,为材料的优化设计提供数据支撑。在装备工程层面,机床的迭代升级聚焦于提高精度、稳定性与智能化水平。首先,采用新型结构材料与设计理念,增强机床的整体刚性热稳定性。例如,运用低热膨胀系数的陶瓷材料制造机床床身与关键零部件,结合有限元分析优化结构布局,减少热变形对加工精度的影响。其次,研发高精度、高动态响应的传动系统与运动控制技术,如直线电机驱动、高精度滚珠丝杠副与纳米级分辨率的位置检测装置,确保刀具运动的精准度与平稳性,有效抑制加工过程中的振动。再者,引入智能化的机床监控与诊断系统,通过传感器实时采集机床的运行参数、切削力、温度等信息,利用大数据分析与人工智能算法,实现对机床状态的精准监测、故障预测与智能补偿,保证加工过程的稳定可靠。此外,开发专用的工装夹具,根据薄壁件的形状与材料特性,采用柔性支撑、真空吸附等技术,实现对薄壁件的均匀稳定装夹,减少装夹变形。工艺集成层面强调多种加工工艺的协同优化与创新融合。其一,将传统切削工艺与新兴特种加工工艺相结合,如激光辅助切削、超声振动切削等。激光辅助切削通过对工件待加工区域进行局部预热,降低材料硬度与切削力,改善切削条件;超声振动切削则利用高频振动使刀具与工件之间产生周期性的分离与接触,减小切削力与摩擦力,提高加工表面质量与尺寸精度。其二,基于数字化技术实现加工工艺的虚拟仿真与优化。借助计算机辅助工程(CAE)软件,模拟加工过程中的切削力、温度场分布以及工件的变形情况,通过对切削参数、加工路径、工艺顺序等进行多参数优化,提前预测并规避潜在的加工缺陷。其三,构建智能化的工艺管理系统,实现对加工过程中各类工艺信息的实时采集、存储与分析,为工艺



的持续改进提供依据。通过材料科学、装备工程与工艺集成三个层面的有机结合，形成一个相互促进、协同创新的“材料特性-机床迭代-工艺创新”三位一体技术体系，有望从根本上破解航空薄壁件加工中的多尺度耦合难题，推动航空制造技术迈向新的高度。

二、材料特性挑战

1. 材料基础性能对比

航空薄壁件加工的核心挑战源于材料的多样性及其复杂的物理特性。除钛合金（Ti6Al4V）与铝合金（7075）外，镍基高温合金（如Inconel 718）和碳纤维复合材料（CFRP）的广泛应用进一步加剧了工艺难度（如表1所示）。例如，钛合金与铝合金性能对比，钛合金与铝合金虽同为轻质材料，但其切削性能差异显著。从导热性来看，铝合金导热系数为130~150 W/(m·K)，而钛合金仅7~15 W/(m·K)，导致钛合金切削热量积聚，刀具寿命下降30%~50%。从弹性模量来看，钛合金（110 GPa）高于铝合金（70 GPa），但两者均远低于钢材，加工中易因切削力诱发弹性变形，导致尺寸偏差。从硬度与强度来看，钛合金硬度（30~40HRC）显著高于铝合金（HRB 80~90），切削力需求增加20%~40%，加剧薄壁件振动风险。

表1 航空材料关键性能对比

参数	钛合金 (Ti6Al4V)	铝合金 (7075)	Inconel 718	CFRP (单向层)
密度 (g/cm ³)	4.43	2.81	8.19	1.76
导热系数 (W/(m·K))	7~15	130~150	11.4	纵向5.0 横向0.5
弹性模量 (GPa)	110	70	200	纵向120 横向8
抗拉强度 (MPa)	895~930	540~570	1350	1760

(2) 镍基高温合金与复合材料的特性。

Inconel 718：其低导热性（11.4 W/(m·K)）与高温强度（650℃下 \geq 800 MPa）导致切削力较钛合金提升25%~30%。退火状态下加工虽延长刀具寿命，但表面光洁度较差；时效硬化状态下切削力波动显著，需采用陶瓷涂层刀具（如Al₂O₃-TiCN）。

CFRP：各向异性显著（纵向弹性模量120 GPa vs. 横向8 GPa），切削力各向异性系数 >3.5 。纤维方向与切削路径夹角（0°~180°）直接影响切削力分布，0°方向（顺纤维）切削力较90°方向（垂直纤维）降低40%。

(3) 微观组织对切削性能的影响。钛合金的 α/β 相比比例直接影响切削力与刀具磨损。 β 相含量每增加10%，切削力上升12%，且刀具后刀面磨损量（VB）增加0.1 mm。研究表明，当 β 相占比超过15%时，刀具寿命缩短至原有水平的60%。通过固溶时效处理（如950℃/1h+550℃/4h）可将 β 相比比例控制在5%~10%，显著降低切削力波动。

2. 切削参数优化策略

(1) 理论建模与仿真。钛合金切削过程的热-力耦合效应可通过Johnson-Cook本构方程量化：

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n)(1 + C \ln \varepsilon / \varepsilon_0) \left(1 - \left[\frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}} \right]^m \right)$$

其中，应变率敏感系数 $m=1.03$ ，表明钛合金对动态载荷敏感。通过有限元仿真，可预测不同切削速度下的温度场分布。例如，当切削速度从50 m/min提升至80 m/min时，切削温度从620℃升至890℃，导致刀具扩散磨损加剧。

(2) 切削参数优化实验。

钛合金：低切削速度（50~80m/min）、大切深（0.2~0.3 mm）与小进给（0.02~0.05 mm/r）可抑制切削热积累。采用液氮冷却时，刀具寿命较干切延长80%，表面粗糙度（Ra）从1.6 μ m降至0.8 μ m。

CFRP：高转速（12,000 r/min）、小切深（0.1mm）与低进给（0.05mm/r）可减少分层缺陷。螺旋铣削工艺通过刀具公转与自转的协同运动，将轴向力降低30%。

(3) 冷却方式对比。实验表明，不同冷却方式对刀具寿命的影响显著：

干切：刀具寿命仅15min，切削温度高达900℃；

微量润滑（MQL）：刀具寿命延长至25分钟，切削温度降至650℃；

液氮冷却：刀具寿命达45min，切削温度控制在400℃以下，且表面残余压应力提升至-200 MPa。

3. 加工物理现象

(1) 颤振抑制与稳定性控制。颤振是薄壁件加工中的主要动态失效形式。基于稳定性叶瓣图（Stability Lobe Diagram, SLD），可通过临界转速与极限切深参数组合避免颤振。例如，当主轴转速 $n=10,000$ r/min时，钛合金的极限切深 $m_{ap}=0.15$ mm，而铝合金可达0.25 mm。通过半离散算法（SDM）优化机床动态刚度，可将颤振临界切深提升20%。

(2) 残余应力分布与调控。X射线衍射法（XRD）测量表明，钛合金

切削表面残余应力分布范围从最大压应力-450 MPa至拉应力+200 MPa。通过切削参数优化（如液氮冷却与低进给），可显著提升表面压应力占比，抑制疲劳裂纹萌生。例如，液氮冷却下钛合金表面压应力占比从40%提升至75%，疲劳寿命延长3倍。

三、机床迭代需求

1. 高速切削与五轴联动技术

高速切削与五轴联动加工技术是航空薄壁件精密加工的核心支撑。高速切削通过提升主轴转速（ $\geq 20,000$ r/min）与进给速率（ ≥ 30 m/min），实现材料去除率倍增；五轴联动则通过B/C轴旋转扩展加工自由度，减少装夹次数并优化刀具姿态，从而解决复杂曲面的干涉问题。

（1）机床结构对比：立式与卧式五轴适应性分析：立式五轴加工中心：典型代表如沈阳机床中捷航空航天有限公司、宁波海天精工股份有限公司等企业的龙门加工中心，采用高架桥式龙门结构，适用于大型飞机蒙皮、燃油油箱、翼梁等薄壁件的高效加工。其开放式工作区便于大型工件装卸，但受重力影响，横梁动态刚性较卧式低约15%，更适合铝合金等高切削效率材料。卧式五轴加工中心：如华亚数控YHHC-1000B，采用横梁移动式结构，主轴悬伸短，刚性提升30%，尤其适合钛合金等重切削场景。卧式布局通过重力平衡切削力，可将镍基合金薄壁件的切削振动降低40%，但加工区域受限，适用于发动机机匣等复杂内腔零件。



沈阳中捷机床GmCmr系列龙门移动式加工中心



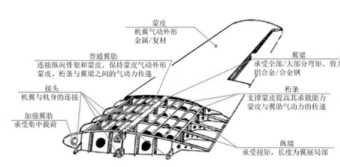
海天精工 GKUE系列动梁龙门五面加工中心



发动机机匣



梁翼及蒙皮



燃油油箱

2. 机床性能提升路径

（1）刚性优化：一是矿物铸造床身与动态刚度提升。矿物铸造床身的阻尼系数（0.08）是传统铸铁（0.03）的2.6倍，可通过吸收高频振动能量降低薄壁件颤振风险。二是通过有限元分析，尤其是龙门加工中心的桥梁、横梁、滑板、立柱等机床结构框架大件，能够有效增强整机动静态刚性，同时采用大扭矩电主轴直驱方式。

（2）热稳定性控制：最小二乘支持向量机算法。基于布谷鸟算法优化的混合核最小二乘支持向量机（LS-SVM）模型，通过温度传感器网络实时采集机床关键点温升数据（如主轴、导轨、丝杠），预测热漂移误差。在GMC2000A机床上实测显示，该模型补偿精度达 $3\mu\text{m}/\text{m}$ ，较传统BP神经网络误差降低65%。此外，西班牙尼古拉斯格雷亚FOX 40机床的实时温控系统，通过滑枕内部流动空气循环冷却，将热变形梯度控制在 $2\mu\text{m}/\text{C}$ 以内。

（3）动态响应增强：直线电机与轮廓精度关联性。直线电机驱动技术（加速度 30 m/s^2 ）通过消除滚珠丝杠反向间隙与弹性变形，实现纳米级定位精度。实验表明，加速度每提升 5 m/s^2 ，轮廓误差可下降 $0.5\mu\text{m}$ 。例如，海天精工DFS系列五轴机床采用直线电机驱动X/Y轴，搭配光栅尺闭环反馈，将钛合金薄壁件轮廓精度稳定在 $\pm 5\mu\text{m}$ 内，加工效率提升2倍。

3. 智能化技术融合

（1）数字孪生：虚拟机床与振动预测。基于Unity 3D与SolidWorks构建的数控机床数字孪生系统，通过实时映射物理机床的切削力、振动与温度数据，预测刀具磨损与加工振动误差。

（2）数控系统升级：西门子840Dsl的预读功能。西门子840Dsl数控系统通过“预读功能”实时分析后续2000段程序，动态调整进给速率与加速度，抑制轮廓误差。实验表明，在五轴联动加工钛合金叶片时，预读功能可将轨迹误差从 $\pm 8\mu\text{m}$ 降至 $\pm 3\mu\text{m}$ ，降幅达60%。此外，系统支持光栅尺全闭环控制，通过热膨胀系数补偿算法抵消机床热变形，定位精度稳定性提升50%。

重庆大学开发的VGC1500龙门加工中心数字孪生模型，对钛合金薄壁件颤振的预测误差 $\leq 8\%$ ，并通过仿真优化刀具路径，将实际加工中的表面波纹高度降低60%。

(2) 自适应加工：力控主轴与动态参数调节。力控主轴（如Kistler 9129AA测力仪）通过实时监测切削力波动，动态调整进给速率（ $\pm 20\%$ ）与主轴扭矩。在钛合金圆筒件加工中，当切削力超过阈值（如200 N）时，系统自动降低进给量并激活微量润滑，避免刀具崩刃。实验显示，该技术将刀具寿命从15分钟延长至45分钟，同时将表面残余应力从+200 MPa降至+50 MPa。

四、典型案例

1. 钛合金圆筒件加工

某航空发动机燃烧室外机匣（材料Ti6Al4V，壁厚2 mm）的加工精度直接影响发动机气动效率与服役寿命。传统三轴加工工艺因工序复杂、变形失控等问题，已难以满足新一代航空装备的高标准要求。

(1) 传统工艺痛点。采用传统三轴机床加工时需20次以上装夹，累计加工时间超280小时。由于钛合金弹性模量低（110GPa）且切削热积聚严重，残余应力导致圆筒件圆度偏差达0.6 mm，良品率不足60%。此外，材料利用率仅20%，刀具成本高达15万元/件，主要问题包括：装夹变形：三爪卡盘夹紧力（200~300 N）导致椭圆度误差（0.1~0.3 mm）；热变形失控：切削温度达900°C时，局部热膨胀系数差异引发尺寸漂移。

(2) 新型工艺方案。采用“3D打印近净成形+五轴精加工”复合工艺，通过材料-工艺-装备协同设计实现技术突破：SLM工艺参数优化：激光功率（200~400 W）与扫描速率（800~1600 mm/s）直接影响成形致密度。实验表明，当激光功率从200 W提升至350 W时，致密度从99.2%提升至99.8%，但功率超过400 W会因熔池过深产生匙孔气孔（最大直径148.94 μm ）。通过正交实验确定最佳参数组合：激光功率300 W、扫描速率1200 mm/s、铺粉层厚0.03 mm，实现致密度99.6%且无未熔合缺陷。

(3) 工艺对比与突破。新型工艺使加工周期缩短至90小时，良品率提升至92%，材料利用率达80%。关键突破包括：桁架式支撑结构：3D打印毛坯采用仿生桁架支撑（孔隙率 $< 0.5\%$ ），结合热等静压（HIP）消除内部缺陷；智能补偿算法：基于振动信号在线监测，动态调整进给速率（ $\pm 20\%$ ），抑制颤振引发的表面波纹。

2. 多案例横向对比

(1) 铝合金翼肋五轴高速加工某型号飞机翼肋（材料7075铝合金）采用传统三轴工艺加工时，因多次装夹导致壁厚不均匀（ $\pm 0.15\text{ mm}$ ），表面粗糙度Ra达1.6 μm 。升级五轴高速加工中心（主轴转速20,000 rpm，加速度2.5 g）后，通过B/C轴联动实现一次装夹完成全部型面加工：表面质量提升：高速切削（ $V_c=400\text{ m/min}$ ）结合微量润滑（MQL）将表面粗糙度降至Ra 0.8 μm ，轮廓精度 $\pm 0.03\text{ mm}$ ；效率优化：刀具路径优化减少空行程30%，加工效率提升2倍。

(2) 镍基合金火焰筒车铣复合加工 某燃气轮机火焰筒（材料Inconel 718）传统车削+铣削工艺存在刀具崩刃率高（30%）、加工周期长（120小时）等问题。采用车铣复合加工中心（双主轴同步控制）实现工艺革新：刀具寿命倍增：陶瓷涂层刀具（ $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiCN}$ ）在车铣复合工况下寿命从4小时/刃提升至8小时/刃，切削力波动降低40%；残余应力控制：通过低温 CO_2 冷却（ -50°C ）将表面拉应力从+200 MPa降至+50 MPa，疲劳寿命延长2倍。

(3) 技术经济性对比：

指标	传统工艺	新型工艺
铝合金翼肋Ra	1.6 μm	0.8 μm
镍基合金刀具寿命	4小时/刃	8小时/刃
综合成本	高（返工率30%）	低（良品率95%）

五、未来发展方向

航空薄壁件加工技术的未来将围绕超精密化、绿色化与智能化三大核心方向展开，通过多学科交叉创新推动产业链升级。

1. 超精密加工：从纳米级向原子级跃迁

离子束抛光技术（Ion Beam Figuring, IBF）作为超精密加工的核心突破点，正逐步取代传统机械抛光工艺。在真空环境中，高能氦离子束通过轰击工件表面实现原子级去除，可消除切削残留的微裂纹与位错缺陷，将表面粗糙度控制至 $\text{Ra} \leq 0.05\ \mu\text{m}$ 级别。例如，德国蔡司公司采用IBF技术加工极紫外光刻物镜，表面粗糙度达20皮米（0.02 nm），支撑5nm以下芯片制程，具体技术优势体现在五个方面的创新维度（如表所示）

IBF技术加工极紫外光刻物镜的五大技术创新优势

创新维度	具体技术优势
确定性原子层量级去除机理	采用氩离子束梯度能级溅射技术，通过0.1~2.0 keV能量精确控制单次去除深度（0.5~20原子层），结合实时原位X射线反射仪测量，实现0.02 nm RMS表面粗糙度的跨尺度制造。相较于传统磁流变抛光，该技术将中高频面形误差收敛速度提升3个数量级。
热力学零损伤加工模式	非接触式离子束加工消除了传统机械抛光的亚表面损伤层，使熔融石英基底的热变形量降低至0.03 nm/K，保障了EUV光学系统在13.5 nm波长下的反射率稳定性（>99.8%）。该特性对维持光刻机每小时200片晶圆的曝光精度至关重要。
全自由度曲面适应能力	开发六轴联动离子束扫描系统，通过0.001°步进精度的磁悬浮偏转器，实现非球面光学件（偏离度>10 mm）的矢量溅射加工。在蔡司ASML EUV光刻机物镜制造中，成功将800 mm口径非球面的波像差控制在0.5 nm PV值以内。
多物理场协同控制体系	构建离子束流密度（±1%）、入射角（±0.05°）、驻留时间（10 μs分辨率）的三维闭环控制系统，结合蒙特卡洛溅射模型与深度残差网络，将复杂曲面的面形修正残差从λ/10提升至λ/50。
跨尺度制造集成方案	创新提出“离子束粗修+等离子体化学精修”复合工艺链，使直径300 mm硅基光学元件的加工周期从1200小时缩短至400小时，同时将表面缺陷密度控制在<0.01个/cm ² ，满足5 nm节点光刻机物镜的缺陷容限要求。

2. 绿色制造：低温冷却与循环经济协同

低温CO₂冷却技术通过干冰升华吸热原理替代传统切削液，可减少70%的碳排放与95%的废液污染。实验表明，钛合金切削中采用CO₂低温喷射（-78℃）可使切削温度降低200℃，刀具寿命延长2倍，同时抑制切削烟尘扩散。

关键技术路径：

（1）低温冷却-微量润滑复合系统：CO₂与生物降解润滑剂协同作用，摩擦系数降低40%。

（2）碳足迹追踪：基于区块链技术建立切削液全生命周期碳排放数据库，优化工艺链碳配额。

（3）材料循环利用：开发钛屑原位回收技术，通过真空电弧熔炼实现废料再利用率≥90%。

3. 智能化升级：数字孪生与自适应控制

基于数字孪生的虚拟加工系统可实时映射物理机床的动态特性，预测切削振动与变形量。例如，重庆大学开发的五轴机床数字孪生模型，通过多物理场耦合仿真将加工误差预测精度提升至8%以内，并通过自适应算法优化刀具路径，减少空行程30%。

集成方向：

（1）力-热-振多传感器融合：实时监测切削力、温度与振动频谱，动态调整进给速率（±20%）与主轴功率。

（2）AI工艺决策：利用深度学习模型从历史加工数据中提取最优参数组合，加工效率提升25%。

（3）区块链质量追溯：构建加工参数-质量数据的不可篡改链，实现航空零件全生命周期溯源。

六、结语

航空薄壁件加工技术体系的演进，不仅是制造工艺的革新，更是从“经验驱动”向“科学驱动”的范式跃迁。通过系统梳理材料特性、机床迭代与工艺创新之间的耦合关系，本文提出“材料-工艺-装备-控制”四位一体的技术框架，为破解薄壁件加工中的多尺度难题提供了理论支撑与实践路径。

1. 方法论突破：四位一体协同创新

在“材料-工艺-装备-控制”四位一体的技术框架

中，各要素紧密关联、协同共进，为航空薄壁零件加工带来革新。材料作为根基，新型航空合金材料不断涌现，其特定性能助力加工，准确把握材料特性对加工技术选择意义重大，可减少加工试错。工艺层面涵盖多元加工方法，精密铣削等随技术发展而优化，自适应及激光辅助加工工艺在提升效率、质量与表面完整性上成效显著。装备取得显著进步，高精度多轴机床及机床集成的先进传感器，为复杂几何形状加工及加工过程监测与反馈控制提供支撑。控制技术则将整个框架串联，先进控制算法实现加工过程精准调控，智能控制系统促使材料、工艺与装备无缝融合，让加工操作更为协调高效，全方位推动航空薄壁零件加工技术迈向新高度。具体而言：

四位一体的协同创新已在多个航空制造项目中成功应用。在飞机发动机压气机叶片的生产中，通过将新型钛合金的材料特性与优化的铣削工艺、高精度多轴机床以及先进的控制系统精确匹配，制造精度提高了30%，表面粗糙度降低了40%。这显著改善了压气机叶片的性能和使用寿命。这些实际成果表明，所提出的四位一体技术框架有潜力彻底革新航空薄壁零件的加工，为高性能航空发动机和飞机结构的发展开辟新的可能性。

2.政策赋能：制造强国战略落地

《中国制造2025》将高端数控机床列为十大重点领域之一，通过“04专项”（高档数控机床与基础制造装

备）投入超220亿元，推动五轴联动、复合加工等关键技术国产化。政策明确要求：至2025年，航空航天领域高端数控机床国产化率从不足30%提升至70%，定位精度达 $\pm 3\mu\text{m}$ ，主轴转速 $\geq 20,000\text{ rpm}$ 。在此背景下，沈阳机床、华中数控等企业已推出五轴加工中心热对称设计、智能误差补偿等原创技术，支撑C919、CR929等机型关键部件自主生产。

此外，拥有先进技术的高端数控机床推动了整个航空航天制造供应链的整合与创新。从材料供应商到零部件制造商，再到最终装配商，供应链中的各个环节如今协调得更加紧密。这些机床所具备的精准高效加工能力，使航空航天企业能够更好地控制产品质量和生产周期。

随着相关政策的持续实施以及企业的不断创新，预计国内高端数控机床行业将取得更大突破。具有更高精度、更高速度和更智能功能的新一代机床将被研发出来。这不仅会进一步提高航空薄壁零件的加工精度和效率，还将为更先进的航空航天产品的研发提供支持，例如下一代超音速飞机和可重复使用的航天器。高端数控机床的发展还将在推动中国制造业整体转型升级方面发挥关键作用，为国家的高质量经济发展做出重大贡献。从实验室创新到产业落地，航空薄壁件加工技术的突破印证了“需求牵引、技术驱动、政策护航”的发展逻辑。这一领域的持续精进，将为中国从制造大国迈向制造强国注入核心动能。□

参考文献：

- [1]罗丹.航空薄壁件自由曲面精密铣削加工参数优化研究[J].今日制造与升级,2024,(10):54-56.
- [2]李焱,张晟玮,刘波,等.航空发动机薄壁零件高效高精度制造空气阻尼工艺装备技术[J].航空动力,2018,(02):27-29.
- [3]Dong H Y, Ke Y L, Wu Q, et al. Finite Element Model for Optimal Clamping Scheme of Frame Shape Workpiece Based on Residual Stress Distribution[J].Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2003.
- [4]陈蔚芳,陈华,倪丽君.基于GA和FEM的夹具布局和变夹紧力优化设计[J].数值计算与计算机应用,2009,30(01):1-9.
- [5]Dou J, Wang X, Wang L. Machining fixture layout optimization under dynamic conditions based on evolutionary techniques[J].International Journal of Production Research, 2012, 50(14-16):4294-4315.
- [6]胡福文,李东升,李小强,等.面向飞机蒙皮柔性夹持数控切边的定位仿真系统及应用[J].计算机集成制造系统,2012,18(05):993-998.
- [7]秦国华,叶海潮,崔跃,等.面向计算机辅助夹具设计的修订式定位方案设计算法[J].计算机集成制造系统,2012,18(10):2145-2150.
- [8]石志云,刘渝,余时建.基于遗传算法的柔性薄板冲压件定位位置优化设计[J].机械科学与技术,2012,31(07):1145-1149.
- [9]Xiong L, Molino R, Zoppi M. Fixture layout optimization for flexible aerospace parts based on self-reconfigurable swarm intelligent fixture system[J].International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 66(9-12):1305-1313.
- [10]张洪双,蒋君佚,柯映林,等.用于大部件调姿的数控定位器布局及行程优化[J].计算机集成制造系统,2013,19(11):2742-2747.
- [11]曲巍巍,方全,柯映林,等.环形轨道制孔系统定位方法分析[J].航空学报,2014,35(08):2319-2330.
- [12]齐振超,张开富,李原,等.大型壁板自动钻铆定位误差分析与优化[J].航空学报,2015,36(10):3439-3449.
- [13]Zhou T, Xiong Z Q, Yao W, et al. Flexible tooling layout optimization for thin-walled workpieces based on improved ant colony algorithm[J]. Journal of Propulsion Technology, 2016.

GNC62数控系统定位精度补偿校准应用

科德数控股份有限公司 侯颜博 李国学 张国靖 王增龙

【摘要】GNC62数控系统可以提供不同的补偿功能，使实际位置编码器（光栅尺）或额外的传感器（激光）获得的测量值来补偿偏差，从而获得更加准确的加工精度效果。科德自主研发的GNC62数控系统利用螺距误差补偿功能进行调整，大大提高了数控机床的定位精度。本文针对GNC62数控系统对螺距误差补偿进行深入分析及探讨。

数控机床作为一种高精度、高效率、稳定性强的自动化加工装备，已经成为行业内必不可少的现代化技术装置。搭载的GNC62数控系统拥有强大的机床误差补偿功能，支持每个坐标的定位误差双向螺距补偿，直线度补偿以及3坐标间垂直度补偿。该功能对于提升大型机床精度，降低数控机床制造和装配的难度，降低数控机床的成本具有极其重要的意义。

一、概述

GNC62数控系统是科德自主研发的具有完全自主知识产权高档数控系统，目前已经在航空航天、国防军工、能源、模具、汽车、医疗、轨道交通、家电、教学科研等多个领域得到了广泛的应用。GNC62具备强大的多轴多通道控制能力，完善丰富的五轴控制能力、伺服驱动的高动态响应能力、空间几何误差补偿能力、外部误差补偿输入接口等；具备3维在线切削仿真和3维防碰撞检查功能，拓展了系统的人机交互能力；提供了更为方便的对刀方式和刀尖点坐标显示功能；提供了丰富多样的二次开发接口，进一步增强了数控系统的开放性。

GNC62系列数控系统卓越的闭环控制技术提升了伺服驱动的动态响应能力。在GLINK总线技术的支持下，优化了伺服系统的速度前馈加速度前馈和加加速度前馈，保证了数控机床在高速度下同时兼具高精度。GNC62优化了数控系统反向越冲补偿，帮助机床各坐标快速平稳地越过反

向间隙克服换向带来的振动和加工表面缺陷；

GNC62数控系统具有丰富的五轴控制功能，展现了极佳的安全、开放、易用的优势。

二、机床误差的分类及检测

1. 机床误差的分类

从误差的性质来分，机床误差主要有力误差、几何误差和温度误差三大类。

(1) 力误差分为半静态力误差和动态误差两大类，主要由于机床传动链中传动部件的非刚性引起的，前者主要是由于工件或者机床运动部件因重力或夹紧力变形而引起的，后者主要是由于切削力和惯性力引起的。

(2) 几何误差只与刀具或工件所处的位置有关，主要是来自机床的制造缺陷、机床部件之间的配合误差，机床部件的动静变位等。主要包括因丝杠节距改变而产生的定位误差，因导轨变形而产生的直线度误差和角运动误差，因定位、安装不精确而产生的坐标轴之间的垂直度误差、因丝杠、齿轮等反向间隙和伺服驱动系统的时效而产生的反向间隙误差，以及伺服不匹配误差等。

(3) 机床的温度误差主要是由于机床工作时复杂的温度场早场的机床各部件变形即机床温度动态过程而引起的。机床的温度动态过程，主要是系统受到内外温度源的扰动，使机床各部分产生温变至温度平衡的不稳定剪短，

从而造成加工精度下降的温度变形过程。

2. 精度补偿的前置条件

在精度补偿时，往往机械精度误差掺杂进来，所以在机床进行定位精度检测前，需要将机床水平、各轴的平行度、垂直度等几何精度调整到国标控制范围之内，尽量减少几何精度对定位精度的影响。

3. 定位精度的检测仪器

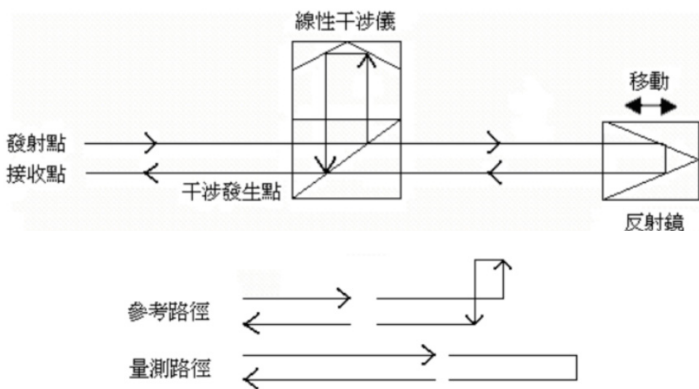
在检测机床定位精度时，检测工具使用激光干涉仪，配置分度仪可以实现对直线轴、旋转轴定位精度和重复定位精度的检测，在检测完毕后，按照GNC62数控系统补偿规则惊醒双向误差补偿分析，将数据写入数控系统的补偿文件中。

(1) 激光干涉仪的原理分析

激光干涉仪是机床、三次元坐标测量及其它定位装置、精度校准用的高性能一起，通常用来检测机床的定位精度、重复定位精度、直线度等。并进行数据分析，输出误差补偿值。

(2) 干涉原理

反射镜组反射的一束光和干涉镜组折射的一束光发生干涉，形成一条光束返回接收点，通过反射镜组的移动测量实际位置。



(3) 干涉仪的防止误差

在进行机床定位精度检测时，要注意激光干涉仪的测量环境，不良的环境会导致不同的测量结果，影响定位精度。

- ① 测量环境应尽量避免太阳光直接照射或突然流动的风产生扰流现象。
- ② 装设干涉镜及反射镜在被测机台上时，必须牢固，否则机台移动会造成不可预期的测量误差。
- ③ 环境传感器和温度传感器是否启动，必须在测量前检查确认，以免造成不必要的误差。

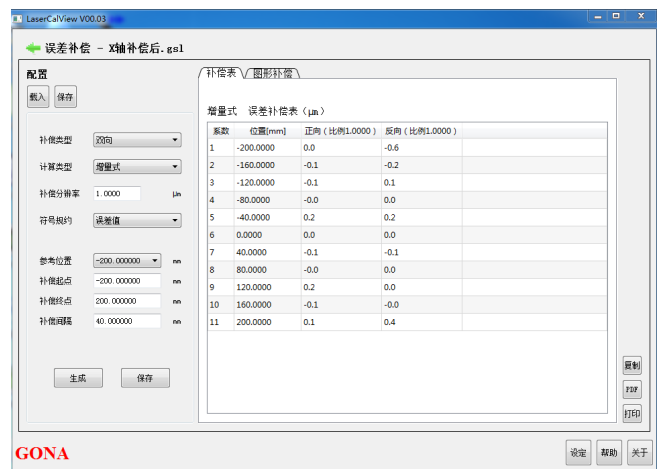
④ 在测量过程中不可因其它因素而中断，测量必须一次完成检验，若发现测量中断情形，必须重新进行检测。

4. GNC62数控系统定位精度补偿

数控机床的误差补偿系统主要由三部分构成：数控机床、激光干涉仪和计算机软件，通过激光干涉仪对数控机床的精度进行测量和数据分析，然后将数据载入计算机端进行误差补偿，最后反馈给数控机床。

(1) 补偿文件的数据分析

使用干涉仪进行定位精度检测后，对生成的结果进行数据分析，GNC62数控系统采用双向补偿分析，生成补偿表，可以将实际的机械间隙误差通过补偿的方式消除。



(2) 数控系统补偿

在GNC62数控系统内部，有特定的补偿文件系统，通过系统参数的设定，控制补偿数据的开启和关闭。

补偿文件中，按照激光分段距离进行点位设置，将生成的补偿值写入到文件中，通过系统参数使补偿文件生效。

```
%_N_NC_GEC_INI
```

```
CHANDATA(1)
```

```
$MAP_AXIS[X]=TO(X)
$MAP_AXIS[Y]=TO(Y)
$MAP_AXIS[Z]=TO(Z)
```

```
$AN_GEC[0,0]=0
$AN_GEC[0,1]=-2.9
$AN_GEC[0,2]=-8.8
$AN_GEC[0,3]=-15.7
$AN_GEC[0,4]=-21.7
$AN_GEC[0,5]=-28.2
$AN_GEC[0,6]=-35.8
$AN_GEC[0,7]=-43.1
$AN_GEC[0,8]=-49.7
$AN_GEC[0,9]=-55.8
$AN_GEC[0,10]=-62.7
$AN_GEC_ITEM_TYPE[0]=LINEPOS
$AN_GEC_INPUT_AXIS[0]=(Y)
```

```

$AN_GEC_OUTPUT_AXIS[0]=(Y)
$AN_GEC_STEP[0]=+61.0000
$AN_GEC_MIN[0]=-610.0000
$AN_GEC_MAX[0]=0.0000
$AN_GEC_DIRECTION[0]=1
$AN_GEC[1,0]=44.3
$AN_GEC[1,1]=38.3
$AN_GEC[1,2]=31.7
$AN_GEC[1,3]=25.4
$AN_GEC[1,4]=19
$AN_GEC[1,5]=13
$AN_GEC[1,6]=6.9
$AN_GEC[1,7]=0.7
$AN_GEC[1,8]=-4.6
$AN_GEC[1,9]=-8.4
$AN_GEC[1,10]=-7.3
$AN_GEC_ITEM_TYPE[1]=LINEPOS
$AN_GEC_INPUT_AXIS[1]=(Y)
$AN_GEC_OUTPUT_AXIS[1]=(Y)
$AN_GEC_STEP[1]=+61.0000
$AN_GEC_MIN[1]=-610.0000
$AN_GEC_MAX[1]=0.0000
$AN_GEC_DIRECTION[1]=-1
    
```

	GBCActiveRTCPComp	十进制	0	GBCActiveRTCPComp
	GBCComp			
	GBCEnable	十进制	1	补偿是否有效
	GBCOriM	十进制	1	补偿进参模式 (1: 需进参, 0: 有进参标志生效)
	GBCIFS	十进制	1	补偿拟合算法类型 (0: 直线, 1: C样条)
	HeatEngineTime(s)	十进制	60	热机时间
	HniMacPosDraw	十进制	0	hni 使用机械坐标绘图
	InflexScrew			

三、总结

数控机床的定位精度是机床性能的重要指标，是影响工件加工精度的重要因素。影响数控机床精度的因素很多，起主要作用的是数控系统误差和机械传动误差，其中最重要的环境就是反向误差和丝杠螺距误差。

本文综合给出了如何对数控机床进行螺距精度测量，仪器的使用以及产生的数据在GNC62数控系统中的补偿方法。数控系统对螺距进行双向补偿后，消除了由于反向间隙、螺距误差带来的加工精度差的问题，经过补偿后，数控机床的定位精度得到显著提高。□

参考文献：

- [1] 陈虎,王声文,张赞秋,等.GB/ T 29001.1-2012,机床数控系统NCUC-Bus现场总线协议规范 第1部分:总则[S].北京:中国标准出版社,2013.
- [2] 王声文,白彦庆,王大伟.CANopen协议栈关键功能设计[J].北京:制造技术与机床,2011:30-32.
- [3] 王声文,白彦庆,刘庆宏,孙振,黄岩. GNC62数控系统组态和设备调试设计[J]. 北京:工业技术创新, 2015: 292—296.
- [4] 陈虎. 在传承基础上创新[J]. 深圳:伺服控制, 2015: 19.

上接第63页

技术特点：模块化设计，有多种主轴和刀库可选，搭载Thermo-Friendly热控制技术，通过环境热位移控制、主轴热稳定性优化实现高精度加工；配备OSP智能系统，含铣削加工条件自动优化（M-i功能）和防撞机保护功能，兼顾高效与安全，适应从量产到高附加值工件的多场景需求。

(24) 安徽卓朴智能装备股份有限公司 HMC63 (四轴) 卧式加工中心

主要参数：X/Y/Z轴行程1050/750/900mm，主轴最高转速5300r/min。X/Y/Z轴定位/重复定位精度0.010/0.006mm。B轴定位/重复定位精度12"/5"。

技术特点：高低阶梯底座增强钻镗支撑力；轻量化运动部件提升响应速度，钣金大排屑结构+自动排屑装置，快速散热减少热变形。

(25) 南通国盛智能科技集团股份有限公司 DHM80P 高速卧式加工中心

主要参数：X/Y/Z轴行程1400/1200/1200mm，工

作台承载2500kg；主轴最高转速8000r/min，快移速度60m/min；直线轴定位/重复定位精度0.010/0.006mm。



技术特点：正T型墙板结构，三轴滚柱导轨+全闭环控制；丝杆中空油冷，减少热膨胀，高速刀库+高效排屑，适合重切削连续加工。□

数字孪生三维模型轻量化技术方法与流程的应用

通用技术集团机床工程研究院有限公司 张磊

【摘要】传统数字孪生模型往往包含大量的数据和信息，需要产生极高的存储和计算成本，会导致系统整体性能的下降。本文旨在探讨通过合并物体、模型重复利用、降低多边形数量等方法对数字孪生模型进行轻量化处理，达到提高系统的响应速度、降低资源消耗、提升系统整体性能的目的。

前言

新一代信息技术加速突破应用，数据成为新的生产要素，促进数字经济与实体经济深度融合，加速重塑产业形态和商业模式，正在成为改变全球竞争格局的关键力量，为加快形成新质生产力提供了重要支撑。制造业数字化是新一轮科技革命和产业变革的重要趋势，数字经济正在成为重组全球要素资源、重塑全球经济结构、改变全球竞争格局的关键力量，为加快形成新质生产力提供了重要赛道。

数字孪生技术是当今制造业中的一项关键技术，它通过整合物理模型、传感器数据以及历史运行数据等信息，实现对实体装备的实时监控、仿真、预测和优化^[1]。传统数字孪生模型往往包含大量的数据和信息，需要产生极高的存储和计算成本，会导致系统整体性能的下降。本文旨在探讨数字孪生模型轻量化的方法和流程，以提高数字孪生系统的运行效率。

一、模型轻量化的基本思想

1.模型轻量化的必要性

数字孪生模型轻量化是减少视频渲染计算量的最有效方法，通过减少模型的顶点数量，提高系统的实时刷新频

率；减少存储空间的占用；降低系统能耗，特别适合电池供电的移动设备上使用；更容易在不同软件之间传递，适合快平台使用；提高网络传输效率，在通过联网展示3D效果的系统上保持流畅的交互性。

2.模型轻量化的核心目标

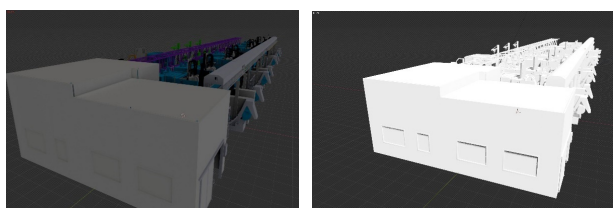
衡量数字孪生系统实时渲染性能重要指标是“每秒帧数”（Frames Per Second，以下简称“FPS”）^[2]。本文示例为某产品自动化生产线数字孪生项目（以下简称“本项目”），生产线布局如图1。要求在保持模型主要结构特征的基础上，从模型总体数量、模型复杂度、存储空间占用等方面进行轻量化处理。



图1

如图2所示，在进行轻量化之前，文件总顶点数为32,485,028个，模型总数量为42,145个，运行时内存占用

2.9GB，硬盘空间占用4.3GB，平均帧率为1.4FPS，无法满足系统画面实时响应的显示要求。



(a)模型轻量化前 (b)模型轻量化后

图2

一般人眼的视神经元反应速度是41ms~30ms之间^[3]，所以为了给本项目使用人员提供良好的操作体验，需要将显示画面的渲染速度从平均1.4FPS提升到30FPS以上。

二、模型轻量化方法与流程

1.减少场景模型数量

数字孪生场景的模型数据结构一般为树状结构，具体如图3所示，系统控制程序通过获取实物设备实时数据，进行计算处理后，通过遍历层级检索到对应的“设备对象”模型和所有子物体“零件模型”，修改其状态，将修改后的图中“渲染部分”对象加入到显卡渲染队列中等待计算，即CPU对显卡发送一次Draw Call指令，因此要想让画面达到实时渲染的效果，要求硬件设备在41ms内完成计算并刷新画面。

控制计算速度最重要的方法是减少CPU对GPU发送DrawCall指令的频率，减少DrawCall指令比较直接的办法是减少渲染画面中的物体数量。

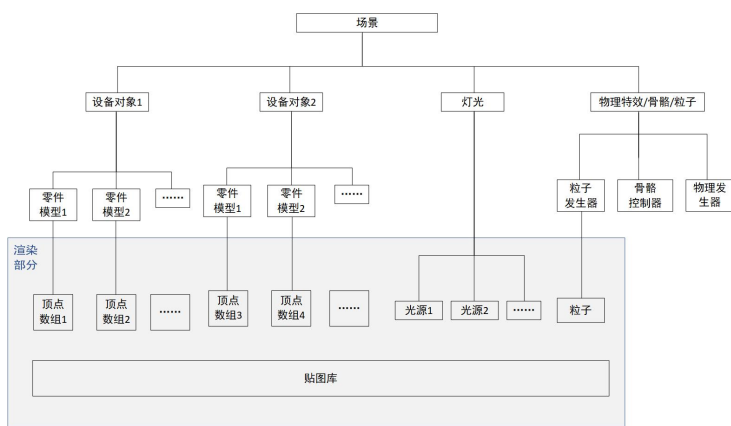


图3 场景数据结构

数字孪生系统在多设备模型场景搭建时，一般把单体设备模型作为基本控制对象，每个单体设备下由若干子

物体零件组成，子物体零件中包含可移动和不可移动的零件。作为基本控制单位的设备对象会影响整个场景的基本运行，不能被减少，应该减少每个设备的子物体零件模型的数量；同时为了保留设备的机械结构特征，应该以合并模型为主要手段，合并后的子物体可以共享同一纹理材质，具有相同材质的模型能够被合并，进行批处理(以下称batch)，即将多个DrawCall指令合并为1个batch进行处理，还可以把这些模型的顶点和纹理数据存储在连续内存空间，提高内存的局部性，优化内存访问速度。优化方法可以考虑将运动中心点相同的可运动零件合并为一个模型；把多个互相固定连接的不可运动的零件合并为同一个整体模型，如图4所示，可以把机床床身、固定立柱等静态物体合并为一个模型。

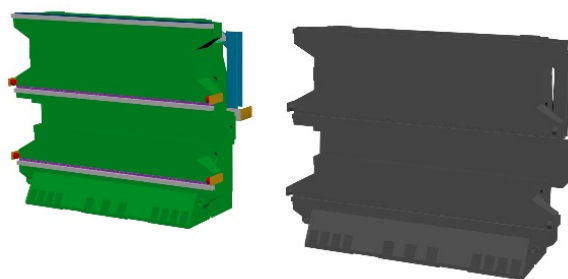


图4

加工区域的机床工作台底座等旋转物体，见图5，左侧模型组的321个物体全部随工作台底座轴承模型旋转中心运动，右侧合并为一个模型后，批处理数量从1268个减少到7个，渲染速度从84.8FPS上升到146.9FPS，渲染线程效率提高72%，如图6(a)和图6(b)所示。

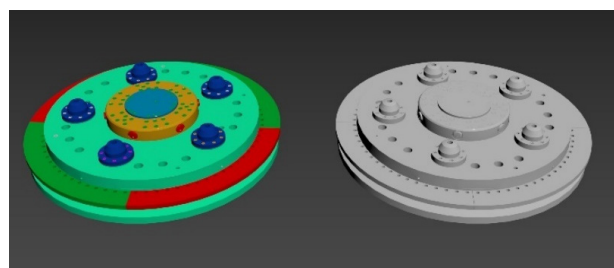


图5

Statistics		Statistics	
Audio:	Level: -74.8 dB (MUTED) Clipping: 0.0%	DSP load: 0.2%	Stream load: 0.0%
Graphics:	84.8 FPS (11.8ms)	CPU: main 11.8ms render thread 1.1ms	Batches: 1268 Saved by batching: 0
	Tris: 7.6M Verts: 5.9M		
	Screen: 1469x733 - 12.3 MB		
	SetPass calls: 28 Shadow casters: 633		
	Visible skinned meshes: 0		
	Animation components playing: 0		
	Animator components playing: 0		
Audio:	Level: -74.8 dB (MUTED) Clipping: 0.0%	DSP load: 0.2%	Stream load: 0.0%
Graphics:	146.9 FPS (6.8ms)	CPU: main 6.8ms render thread 0.3ms	Batches: 7 Saved by batching: 0
	Tris: 7.5M Verts: 5.8M		
	Screen: 1469x733 - 12.3 MB		
	SetPass calls: 7 Shadow casters: 2		
	Visible skinned meshes: 0		
	Animation components playing: 0		
	Animator components playing: 0		

(a)模型合并前

(b)模型合并后

图6

本项目中的模型原文件,见图7, batch总数为136679个,根据NVIDIA提出的“1GHz主频的CPU按100%使用率,每秒可以处理25000个batch”理论,如果要想画面保持在相对流畅的30FPS,测试使用3.5GHz频率的6核心CPU,并为其他业务逻辑处理预留算力25%左右,可以使CPU的使用率保持在50%左右,可以使用公式:

$$25000 \times n(\text{GHz}) \times \text{Percentage} / \text{Framerate} = \text{Batches}$$

其中Percentage为CPU的占用率, Framerate为目标帧率, Batches为最大batch/帧,可计算每帧最大batch处理数量为:

$$25000 \times 3.5 \times 6 \times 0.5 / 30 = 8750$$

根据计算结果,将最大批处理数量从136,679个减少到8,750个,是本次模型轻量化的目标。

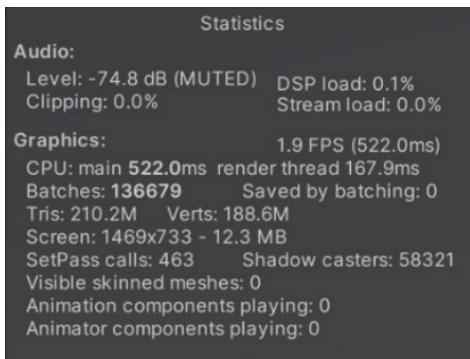


图7

具体操作可使用上述合并原则,对于不影响模型主要几何特征的螺丝、密封圈、滚动轴承等可以直接删除,如图8所示。

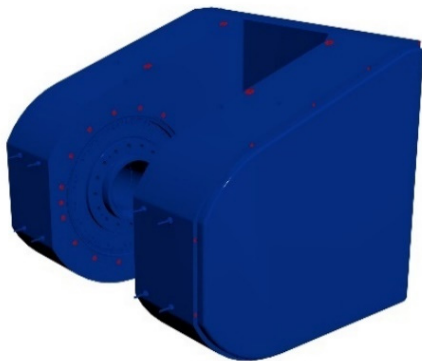


图8

在本项目案例中,场景中的模型总数从42,145个减少到1,852个,削减率约为95%。

2.利用视锥剔除和遮挡剔除缓解计算压力

视锥剔除和遮挡剔除是图形领域的基本概念,主要目的是在渲染时把视锥以外的模型和被其他模型遮挡的模型从渲染队列中剔除掉,如图9(a)和图9(b)所示,达到加速渲染的目的,是目前几乎所有渲染引擎都支持的功能。

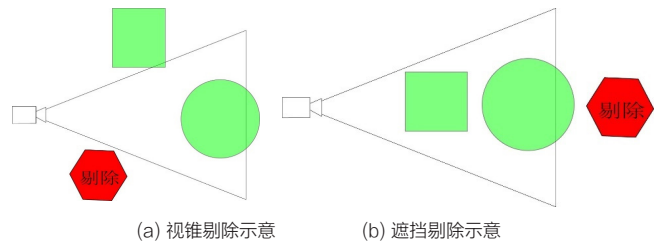
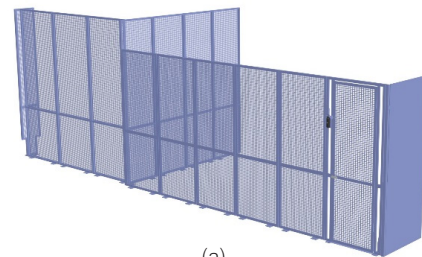
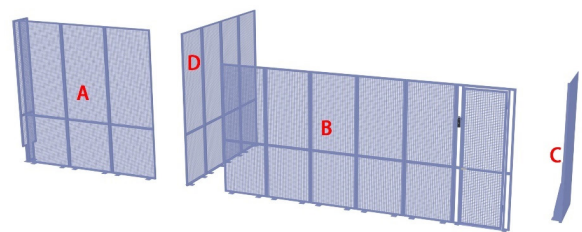


图9

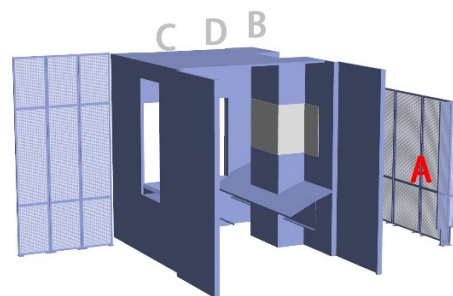
视锥剔除和遮挡剔除只有模型完全被遮挡或完全不在视锥空间内才会被剔除,所以在合并零件模型时应考虑尺寸能充分利用视锥剔除和遮挡剔除功能,如图10(a),因为物体整体过长,把所有围栏合成一个物体就不合适。本项目中将其拆分为4个更小单位的物体如图10(b),考虑到C和D模型可能会在视角旋转时被遮挡,拆分为单独物体, A和B被拆分后,更容易排除在视锥之外,从而增加被剔除的概率,如图10(c)中B、C、D物体完全被遮挡,仅A物体被加入batch队列。经测试,图10(b)的batch数量根据视角旋转不同在14~27之间浮动,图10(a)的batch数量根据视角旋转不同在31~33之间浮动,按图10(b)的拆分方法比图10(a)中运行效率更高。



(a)



(b)



(c)

图10

3.使模型重复利用减少存储空间占用

本项目中，产线由多台相同结构或相同零件的设备组成，如图11中刀库的支架A上固定了6个结构和材质都相同的刀具支座，顶点总数为62,400个，其中B、C、D、E、F、G每个支座的顶点数为9,964个，合计59,784个。

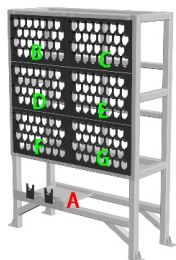


图11

如果只保留其中一个对象B，其他5个支座作为B的实例拷贝，在场景加载时将不会加载C、D、E、F、G物体所引用的模型数据，因为实例拷贝仅对指针进行复制，不会再创建新的数据内存空间，如图12(a)和图12(b)所示，而且在整个项目编译时C、D、E、F、G物体引用的模型数据也不会被打包进最终运行程序中，可以减少整个项目文件所占空间，便于网络传递或在移动设备上运行。

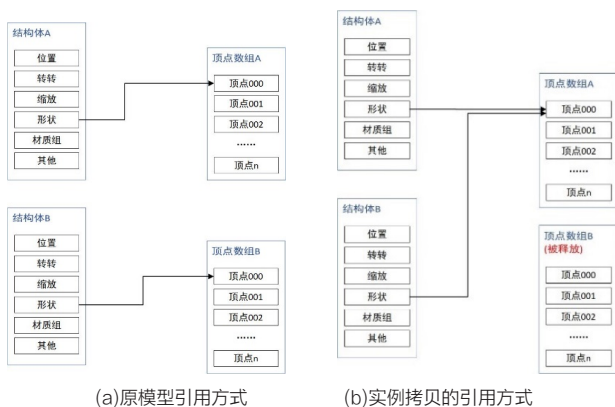


图12

所以本项目在实际操作中大量重复利用了相同的模型，如图13(a)将结构相似的两个货架拆分为图13(b)中的四部分，使A物体与B物体的几何特征完全相同，对A物体进行实例复制为B物体。经过上述步骤优化后项目文件的整体大小从4.2GB下降到1.1GB，运行内存从2.9GB下降到2.2GB。

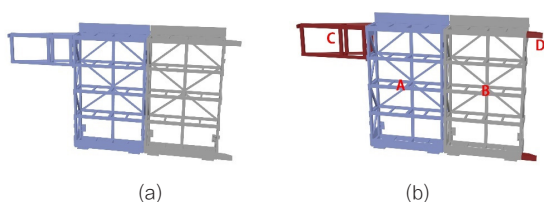


图13

4.减少模型顶点数量降低计算复杂度

减少模型顶点是减少计算和渲染时间、降低存储成本的最直接方法，但减少顶点应注意保留模型的基本几何特征，可以使用直接简化曲面、贴图替代复杂细节、细节层次技术(Level of Detail, 以下称LOD)方法实现。

(1) 直接简化曲面

利用辅助设计软件导出的设备模型，因为实际制造的精确性和细节要求，使用基于精确数学定义的实体模型，所以模型中会包含大量的工程信息和元数据。而在数字孪生系统中为了应对项目的交互性、轻量化、通用性需求，一般会将工程实体模型转化为更轻量化的网格文件后使用，为了替代这些工程实体模型中的曲面，网格模型需要大量使用多边形网格顶点来表示，导致网格模型文件的体积庞大。本项目采用增加曲面顶点之间间隔，减少倒角圆滑度，近似表现曲面的方法，达到轻量化模型的目的。如图14(a)所示零件在简化边缘倒角后仍然保持近似的圆角效果，如图14(b)所示，并且不影响系统功能和整体画面的表现。

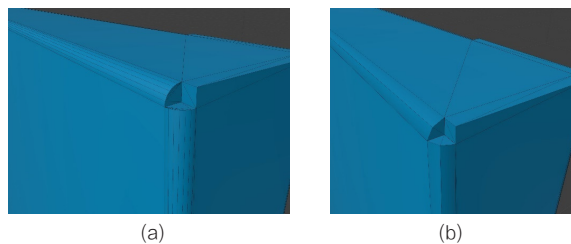


图14

需要注意的是简化后的边缘需要根据平面的夹角重新设置平滑组，如图15所示结合边简化后的平面切角从7°变为20°，需要从新设置平滑组的默认切角度数，否则会导致两个平面之间产生硬转角，影响模型美观。

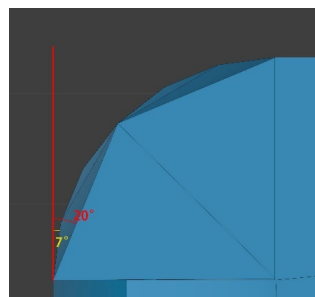


图15

本项目中的箱体、薄壁状、圆柱状等近似基本几何体的零件均采用上述方法对曲面进行简化（如图16所示）。图17所示的薄壁状零件，其每条边缘由原来的14个顶点减少到6个，按每个零件8条边线计算，每个薄壁板可减少顶点64个，本项目中原文件在优化前具有类似结构的薄壁零件近14,000个，所以整个文件估计减少顶点总数可达896,000个。



图16

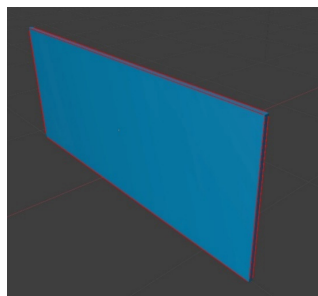


图17

对于更复杂的异形零部件可以采用拓扑的方法重新进行布线。如图18所示，拓扑时可以将不影响基本几何特征和零件功能的孔洞、铆钉、纹理细节删除，这些细节可以在之后用贴图替代；形状边缘转折连接或规则圆柱、立方体等基本几何形状的部分仍按照上述简化曲面的方法处理，可以达到较好的优化效果。

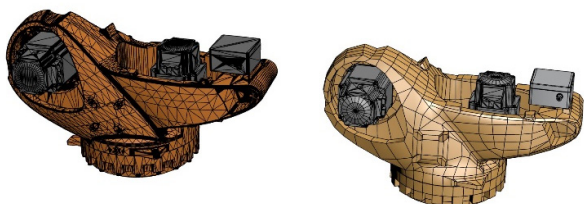


图18

(2) 使用贴图替代复杂细节

本项目的自动化产线中使用网状透视围栏对各功能区域进行分隔，每块透视围栏均由大量规则柱状物体交织组成，所以可采用在模型透明通道添加网状贴图的方法，替代实体3D模型，达到减少模型顶点的目的。如图19所示，A为原3D模型，其顶点数量8,968个，B为删除所有网状结构的模型，其顶点数量为364个，在B模型透明通道添加网状贴图后的模型如C，得到结果为顶点数量减少95%。

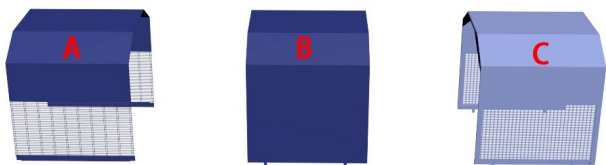


图19

对于表面特征细节较多，且不是数字孪生系统中主要观察或运动对象的物体，可以使用法线贴图替代实体模型表面细节特征，达到使用较少顶点数量表现模型特征细节的目的，如图20所示。

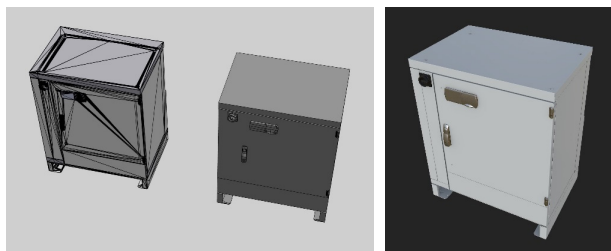


图20

上图中，将原模型的铆钉、折页、按钮、螺丝等细节删除，只保留由立方体、圆柱、球体等简单几何体组合的简单形状，然后将原模型细节烘焙成蓝紫色的法线贴图，其中B值（蓝色）代表物体的正面光照数据，所以贴图基本呈蓝色，R值（红色）代表横向光照信息，G值（绿色）代表竖向光照信息，将RGB值混合后得到法线贴图。将得到的贴图添加到简化后的模型法线通道，视觉效果上就可以呈现出大部分原来的细节，模型顶点数量从81,602减少到678个。

对于具有较多安装孔或螺丝孔的模型，也可以将孔洞全部删除后使用发法线烘焙的方法，如图21所示，A为简化前模型，B为删除细节特征后的模型，C为在B模型法线通道中添加法线贴图的模型。

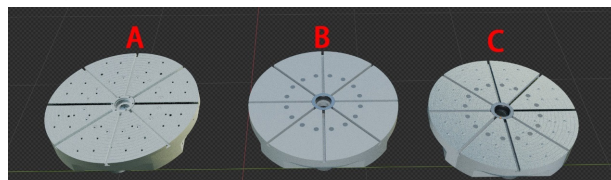


图21

法线贴图虽然可以减少计算机对3D模型的计算量，但场景中过多的贴图数量会显著增加存储空间的冗余，增加场景资源的加载时间。因为每个贴图被调用时都会产生Draw Call指令，这样会增加场景的渲染时间，所以本项目中为了减少Draw Call指令，采用把多个贴图合并后根据贴图的UV坐标循环遍历取得所需纹理，如图22所示，将4张尺寸为1024×1024的法线贴图合并成一张贴图，加载时可以作为一张贴图进行存储，读取时根据A、B、C、D位置坐标取得像素信息。

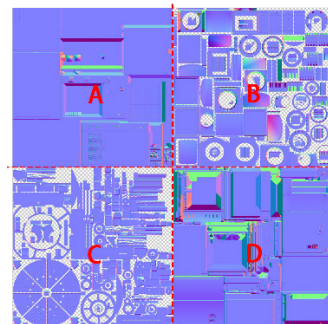


图22

(3) 利用细节层次技术提高渲染速度

细节层次技术 (Level of Detail, 以下简称LOD) 主要是根据物体的位置和重要性动态调整渲染的详细程度, 达到提高渲染性能的目的^[4]。当视点与物体达到预设距离时动态加载预先设置好的带有不同程度细节的模型, 在搭建场景时, 需要把多个不同细节的模型预先制作好并反复调试, 使用LOD会增加项目文件的容量和大幅增加模型处理人员的工作量, 所以在使用LOD技术时, 需要对制作周期、人力资源、运行环境等进行成本评估。

本项目中某些重要运动物体需要特写显示, 可以仅将这些物体由近到远的分为3个层次进行简化, 如图23所示。当物体距离视点最近, 占据显示窗口的60%以上时, 则显示一级物体, 因为该层次物体顶点超过30万, 对计算机硬件造成较大计算压力, 所以需要调试保证大多数物体被其遮挡时调用, 如图24所示, 近景的一级物体已经遮挡了画面中的其他物体, 所以不会对计算机的渲染造成较大的计算压力; 当物体距离最远, 难以准确辨认时可显示层次三, 该层次模型删除了所有细节特征仅体现物体的基本形状, 但顶点数量减少了99%, 又不会影响场景的整体视觉表现。



图23

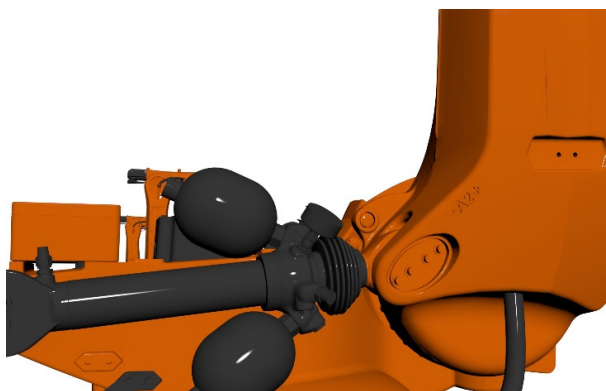


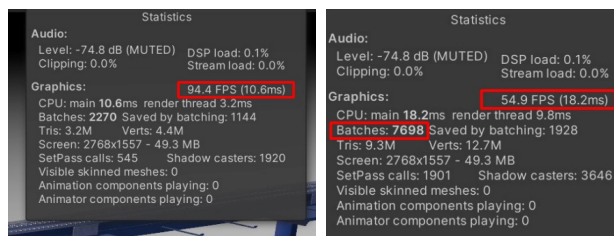
图24

三、结论

本项目模型采用上述轻量化处理方法后, 文件占用空间由4.3GB减少到0.305GB, 场景中的实体模型数量从42,145个减少到1,852个, 总顶点数量从32,185,028个减少到1,543,211个, 运行内存的占用从2.9GB减少到1.5GB。在使用同一硬件设备和操作系统环境下, 轻量化后在不强制锁定FPS的情况下, 如图25所示, 最高渲染速度达到94.4FPS, 最低速度可达54.9FPS, 场景的最大batch数量不超过7,698个, 符合轻量化预期目标, 轻量化前后对比数据如下表1所示。

表1 工程文件轻量化前后对照表

	文件大小 (GB)	多边形顶点 数量(个)	设备模型 数量(个)	运行内存 占用(GB)	平均渲染 速度(FPS)
轻量化前	4.3	32,185,028	42,145	2.9	1.4
轻量化后	0.305	1,543,211	1,852	1.5	75.65



(a)运行效率最大值

(b)运行效率最小值

图25

本文从减少场景物体数量、优化内存占用、减少物体顶点方面对数字孪生模型轻量化的方法和流程进行了探讨和举例验证, 证明应用上述方法和流程可以显著提高系统的响应速度、降低资源消耗、提升系统的整体性能, 使数字孪生系统更好的适应不同应用场景, 为用户提供更加高效、经济、可靠的服务。□

参考文献:

- [1]郭亮;张煜.数字孪生在制造中的应用进展综述[J].机械科学与技术, 2020, 39(04): 590-598.
- [2]潘志庚;高嘉利;王若楠;袁庆曙;范然;余莉.面向实物交互的空间增强现实数字孪生法配准技术[J].计算机辅助设计与图形学学报, 2021, 33(05): 655-661.
- [3]李骁健;蒋震;王毅.初级视皮层神经元对瞬态刺激响应的时性质[J].生物化学与生物物理进展, 2012, 39(12): 1190-1196.
- [4]闫爽;郭兰博;王严;李向然.基于LOD技术的虚拟场景建模方法的研究与应用[J].测绘与空间地理信息, 2021, 44(09): 145-147.

梯形螺纹加工的一种方案

甘肃星火智能数控机床有限公司 王俊刚

【摘要】本文以我公司的CCK61160数控重型卧式车床作为车削机床，介绍了梯形螺纹加工的一种方案，梯形螺纹加工的编程方法，梯形螺纹加工中出现断刀等突发情况进行退刀的编程，并以自己工作中遇到压缩机的拉杆轴螺纹加工为例，详细说明了梯形螺纹加工中要考虑的因素和编程的方法。

CCK61160数控重型卧式车床的数控系统828D及伺服电机是西门子的产品。在828D数控系统中，有专门的工艺循环CYCLE99-螺纹车削，用于直螺纹，锥形螺纹，端面螺纹和螺纹链的车削，并且能够设置螺纹的前置量和后置量，螺纹的头数，起始偏移量和车削深度与循环次数。我们车削拉杆轴的螺纹的牙形槽比较宽，在车螺纹车削工艺中只能采用左右“互切法”进行车削，除了基本的螺纹加工精度要求外，还要求螺纹正在车削过程中突然发生断刀和其它情况，按下CYCLESTOP按键，把刀从Z向退出来，再退回到起始点，这两步动作是连贯进行。在法拉克的FANUC Oi-TF(Plus)数控系统中，系统自带这种功能，当出现断刀等其它突发情况，需要把刀退回到起始点时，只需按下CYCLESTOP按键时，刀具自动从Z向退出，再退回到起始点。西门子系统中CYCLE99-螺纹车削也具有这样的功能，在使用中CYCLE99-螺纹车削不满足我们车削的左右偏移的要求，只能使用G33螺纹编程语言，使用宏程序和循环跳转功能进行编程。加工拉杆轴的局部零件图如图1所示。

一. 加工工艺分析

1. 该零件梯形螺纹加工方案

梯形螺纹的加工方法有很多种：直进法，斜进法，左右切削法，多刀组合法，车直槽法，分层法等，其中前4种在数控车削中使用比较多。直进法：又称成形法，在车削螺纹时，车刀X向间隙地进给至牙深处，Z向不作移动。斜进法；又称单面切削法，螺纹车刀沿牙型角方向斜向间隙进给牙深处。左右切削法：螺纹车刀沿X向进给至一直径处，在每一层面进行左右移动切削，直至左右端面，再沿X向进刀，直至牙深处。多刀组合法；组合方式很多，如先选用小切刀切直槽，车刀在牙槽的中心位置，Z向不动，以一定的深度循环车削，直至距离牙深处一定距离处（留有精加工余量），再选用较宽的螺纹刀具向左或者向右偏移一定的距离，循环车削至切刀槽等高深度，直至牙形槽的宽度达到粗加工宽度要求，最后，使用精车刀的螺纹刀具进行精加工成型。在以上几种方案中，直进法在加工梯形螺纹时，螺纹的牙型精度较高，但由于三刀刃均参与切削，切削

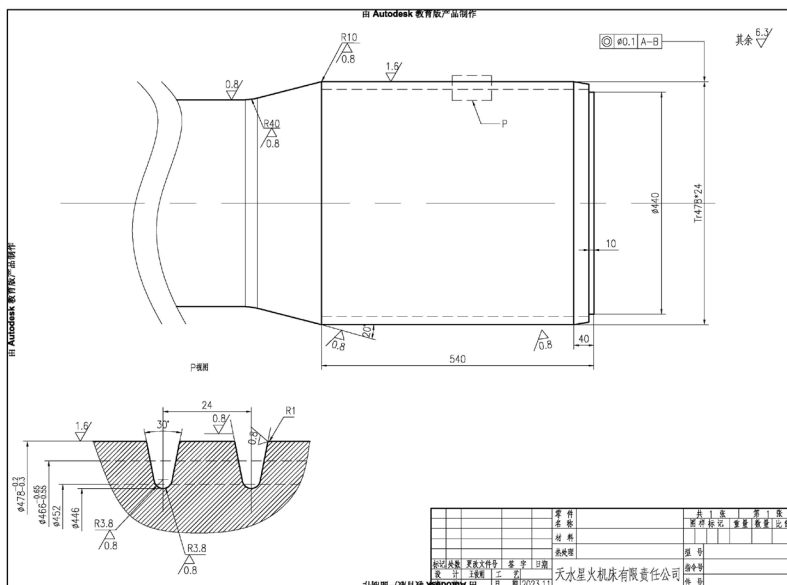


图1

力过大容易导致加工变形，且只在小螺距加工时采用。由于刀具在刀板上固定，螺纹刀具无法沿着牙型角斜向进刀，只能垂直工件沿X轴向进刀。左右切削法，刀具采用与牙型槽等宽的尺寸，加工中刀具纵向左右两侧移动结合横向进刀，对操作者的技术要求比较高。综上分析，我们采用多刀组合法加工螺纹。

2. 在加工过程中特别的要求

梯形螺纹在拉杆轴中是用于设备固定定位。压缩机的拉杆轴，成本较高，在加工过程中出现断刀等其它突发情况时，需要把刀即时退到起始点，需要按下CYCLESTOP按键后，刀具自动退回到起始点，在退刀时不能“擦伤”螺纹，先X向出来，再Z向退回到起始点。在828D系统中，使用螺纹切削时快速返回LFON，LFOF，使其能快速返回。在装上新的刀具或者故障处理完，按下CYCLESTART按键后，车刀轨迹沿着上一刀从起始点接着车削螺纹。除了满足梯形螺纹的成型加工要求，以及梯形螺纹的加工精度要求外，梯形螺纹没有退刀槽时，要在编程时加一段锥螺纹，使刀具顺利退刀出来。

二、程序的编程方案

1. 梯形螺纹的加工程序与用户特殊要求程序的编程

带恒定螺距的螺纹切削指令G33，在该零件加工中使用到的螺纹编程的句法有：圆柱螺纹切削：G33 Z... K...，圆锥螺纹切削：G33 X... Z... K...，其中Z...：以直角坐标给定终点，K...：Z方向的螺距，在圆锥螺纹的螺纹螺距数据（I... 或 K...）取决于圆锥角度： $< 45^\circ$ ：通过K...给定螺纹螺距（纵向螺纹螺距）， $> 45^\circ$ ：通过I...给定

螺纹螺距（横向螺纹螺距）。用户特殊要求的程序的编程，螺纹切削时快速返回指令（LFON，LFOF，DILF，ALF，LFTXT，LFWP，LFPOS，POLF，POLFMASK，POLFMLIN），使其能快速返回，通过返回和返回方向对返回运行进行编程：采用的句法如下；G33 ... LFON DILF=<值> LFTXT/LFWP ALF=<值>;

其中：LFON：使能“螺纹切削时的快速返回”（G33）

DILF=：确定返回行程的长度

LFWP：执行返回运行的平面是有效的工作平面。

ALF=：在返回平面中，使用ALF以不连续的角度编程返回方向。

使用LFTXT时，通过ALF=1确定返回方向为刀具方向。

使用LFWP时，工作平面中的方向被分配如下：

G17（X/Y平面）

ALF=1；以X方向返回

ALF=3；以Y方向返回

G18（Z/X平面）

ALF=1；以Z方向返回

ALF=3；以X方向返回

G19（Y/Z平面）

ALF=1；以Y方向返回

ALF=3；以Z方向返回

在本样例中，车床使用的是Z/X平面，以X方向返回，编程语言如下；LFON DILF=60 LFWP ALF=3，使能快速返回的条件是当按下键盘的循环暂停按键，执行快速返回功能，在程序中语句如下；IF \$AC_LIFTFAST GOTOB MM_THREAD_0。

2. 梯形螺纹的加工程序：

N10 G95 G90 G54 G18

N20 R0=478 拉杆轴的轴径，同时表示梯形螺纹车削初始值R0

N30 R1=477.5 梯形螺纹有锥度时，R1表示小的螺纹轴径的大小。

N50 M42

N60 S20M3

N70 LA:G0X900 当R0>459.4时，程序跳回到此处，循环执行，直到螺

N80 Z200 纹车削的轴径小于459.4时，粗车螺纹完成。

N90 R0=R0-0.6 每一刀的单边车削深度是0.3mm。

N100 R1=R1-0.6

N110 MM_THREAD_0: 当按下CYCLESTOP按键时，程序跳转到此处，循环

N120 \$AC_LIFTFAST=0 执行。

N130 G0 X660

N140 G0 Z0

N150 X=R0 使用R0用户变量，把R0赋值给X。

N160 G33 X=R1 Z=2100 K24 LFON 螺纹切削时的快速返回，螺距为24，退刀距离为
DILF=60 LFWP ALF=3 60。

N170 G33 X478 Z=2120 K24

```
N180 IF $AC_LIFTFAST GOTOB MM_THREAD_0
N190 WHILE R0>459.4
N200 GOTOB LA
N210 ENDWHILE          当WHILE条件不满足时,结束WHILE循环,加工完成。
N220 M30
```

按下CYCLESTOP按键时,在N180 IF \$AC_LIFTFAST GOTOB MM_THREAD_0 判断条件满足,程序跳转到N110,根据程序,先是X走到660处,再退Z向,梯形螺纹一刀车削不出来,要循环车削几十刀。使用828D系统编程语言中的WHILE循环语句,在程序中每次双边深度为0.3mm,每次车削完轴径与R0的数值一致。当WHILE R0>459.4时,程序跳转到N70处,这一逻辑必须嵌套到判断条件IF \$AC_LIFTFAST GOTOB MM_THREAD_0的外围。调用828D系统中R0用户变量,通过R0数值变化实现实时监控每一刀车完轴径的大小。R1变量是用于圆锥类螺纹的加工, R1的数值到加工侧的轴径的大小。

“分层法”车削梯形螺纹实际上是直进法和左右切削法的综合应用。在车削极大螺距的梯形螺纹时,“分层法”通常不是一次性就把梯形槽切削出来,而是把槽分成纵向的若干层,每刀的深度是0.3mm。转化成宽度较小梯形槽来进行切削,可以降低车削难度。当深度达到粗切的深度时,即当R0=459.4 mm时,使用G54零点偏移指令,使刀向左或者向右偏移一定的位置,再进行车削直至深度到达459.4mm。依次类推,直至牙型车削出来。这样,梯形螺纹刀始终只有一个侧刃参加切削,从而使排屑比较顺利,刀尖的受力和受热情况有所改善,因此能加工出较高质量的梯形螺纹,且容易掌握,程序简短,容易操作。

三. 仿真效果与加工结果的显示:

1. 仿真效果

使用SinuTrain for SINUMERIK Operate 4.5软件能够把西门子编程的程序进行模拟仿真。在试件之前可以在电脑上模拟运行程序,检查编的程序是否符合西门子编程要求,判断走刀轨迹是否满足工艺要求。仿真结果如图2所示;



图2

图2中黄绿色线条是车梯型螺纹的走刀轨迹,循环走刀31次,程序执行完成。如图2所示,程序正在运行车削梯形螺纹执行的走刀轨迹,编的加工程序没有出现错误报警,走刀轨迹符合要求,程序模拟结果满足该零件的工艺要求。

2. 试件结果

编程的程序满足工艺要求,运行程序没有出现错误。在加工零件时,按下CYCLESTOP按键,刀从Z向退出来,再退回到起始点。按下CYCLESTART按键后,刀架按照退刀前的一刀从起始点加工螺纹,符合用户的特殊要求,加工的零件满足工艺要求。在用户参数界面,可以随时监控RO数值的变化。加工零件的局部视图如图3、图4所示;



图3

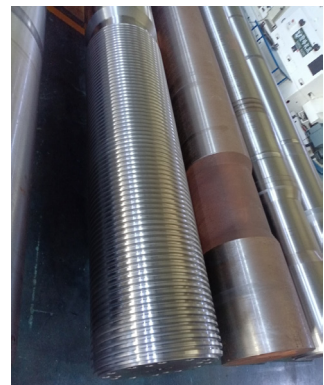


图4

该拉杆轴是按照圆柱螺纹加工出来的,而程序是考虑到轴有锥度,编的程序是锥螺纹的加工方案。该轴没有锥度,没有锥度时,N160语句中只把X=R1改为X=R0,N30语句去掉,其它编程语言不变。

(下转第94页)

高精度键槽铣削加工工艺开发

王佳伟 欧虎 丑洋洋 朱平 朱万奇 张组林

【摘要】 本文通过实际机械加工中的实验与探索，研究机械加工中高精度键槽的数控加工方式，探讨高精度数控加工遇到的低效加工、精度不足等问题，提出解决建议，同时进一步探讨键槽铣削的数控程序优化、加工刀具改进等多项优化措施，改善高精度数控加工产品质量，提升加工效率。

1. 问题提出

(1) 国外某加工产品键槽对称度要求0.1mm（见图1）。某中大型曲轴键槽对称度要求0.08mm（见图2）。某机车曲轴键槽对称度要求0.05mm（见图3）。

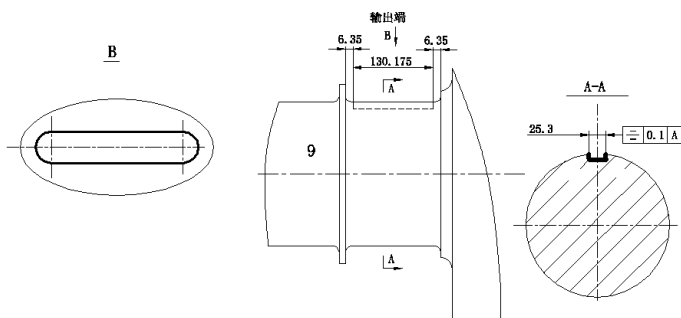


图1 国外某加工产品键槽及要求

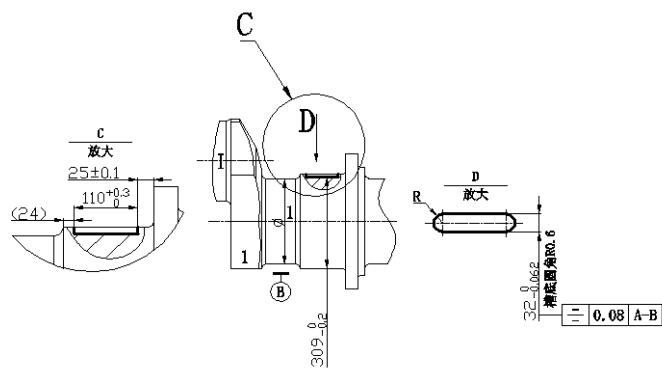


图2 某中大型曲轴键槽及要求

上接第63页

三、结语

在注塑机，空气压缩机等通用设备领域，拉杆轴是这些通用设备的关键零件，拉杆轴轴两头梯形螺纹的加工是其中的重点。梯形螺纹在拉杆轴中起定位的作用，对梯形螺纹的精度要求比较高，对螺纹的圆度与同轴度都要求在10丝以内，拉杆螺纹外径的表面粗糙度要求在 $1.6\ \mu\text{m}$ 以内。拉杆轴一般在12m以上，要加工的螺纹长度是2000mm，螺距要求是24和28这两种，拉杆螺纹外径到拉杆螺纹内径的深度是32mm，每一刀的单边车削深度是0.3mm。本样例中梯形

螺纹加工的编程使用了828D宏程序编程，应用循环语句简化程序数量，程序简洁易懂，可以参数化修改，适用多种轴径的加工，也适用于圆柱类轴和圆锥类轴的梯形螺纹加工。□

参考文献：

- [1] 《SINUMERIK 840D sl/ 828D工作准备部分》机床资料；
- [2] 《SINUMERIK 840D sl/ 828D基础部分》机床资料；
- [3] 《SINUMERIK 840D sl基本软件和操作软件》机床资料；
- [4] 《机械工人切削手册》（第五版）中国社会劳动保障，2003.3
- [5] 《车工工艺学》（96新版）中国社会劳动保障，1997.5

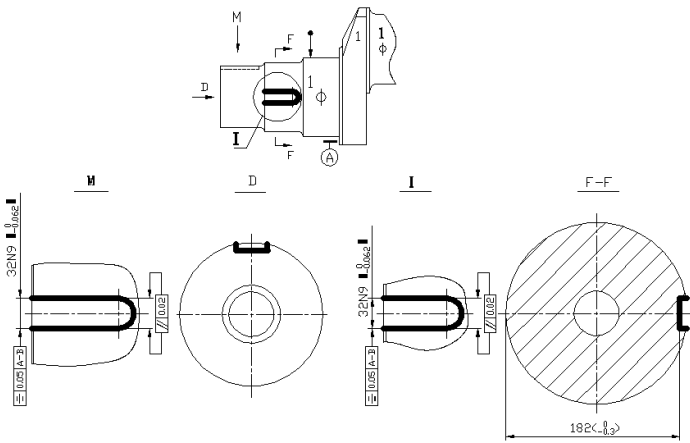


图3 某机车曲轴键槽及要求

(2) 本次实验加工的某类型曲轴键槽对称度0.03mm (见图4)。

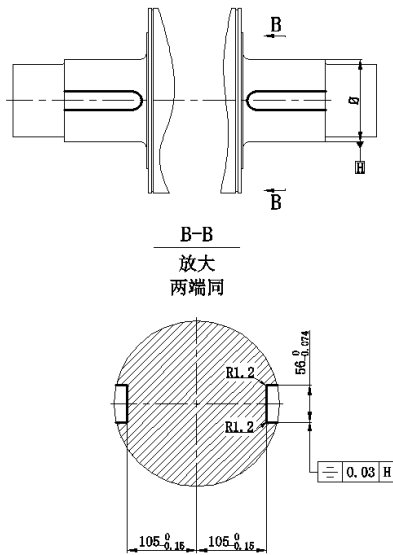


图4 实验加工某类型曲轴键槽及要求

(3) 本次加工的键槽对称度要求比以往加工的产品要求都要高，加工设备经过长时间的持续生产制造，存在维修、磨损造成的精度下降，在加工键槽时，较难保证加工精度。

2. 针对难点改善加工方式

(1) 实验加工将键槽加工分为粗铣、精铣两个工步。粗铣旨在快速去除多余的加工余量，提高加工效率。精铣时调整加工参数，控制加工精度。

(2) 精铣键槽的过程中通过重复实验、多次检测的方式，对影响对称度的设备坐标轴系和键槽基准拐角进行偏差修正，直至坐标轴系修正值小于0.01mm、基准角度小于0.001° (对称度理论误差小于0.0026)，再进行正式加工。

(3) 通过至少2次的坐标轴系和基准角度修正后，通过实验加工，模拟成品加工的各项加工参数，但再成品的尺寸上留下0.5mm的单边加工余量，在检测平台进行对称度检测，确保测量结果满足成品要求后，再次装夹完成键槽的加工。

(4) 为保证成品的人工检测存在的人为误差、操作误差、平台误差等误差因素不会对产品质量造成影响，在完成键槽加工后，进行三坐标检测，确保结果的可信度。

(5) 确保产品键槽加工满足要求后，留有一定余量的情况下略微提高精铣加工参数，实验保证加工精度的最高效率。

三、改进过程

(1) 刀具选择：为保证加工质量的同时，提高加工效率，实验加工将键槽加工分为粗铣、精铣两个工步进行。粗铣时选择直径50mm的粗铣刀，刀具刚性好，将进给参数设置为500mm/min，旨在快速去除多余加工余量，留下1.5mm残余余量给精铣提供足够的实验余量。精铣时选择直径25mm的精铣刀，精铣时根据刀具特点，将进给参数降低至300mm/min，提高精铣键槽的表面粗糙度及尺寸精度。

(2) 铣削前，使用专用的测量程序 (见图5)，对机床Y轴中心进行检测，修正机床Y的偏置。精铣时，再次使用该程序对机床Y轴进行更高精度的修正，使Y轴修正值达到0.001mm，完成Y轴的修正，修正结果如图6所示。

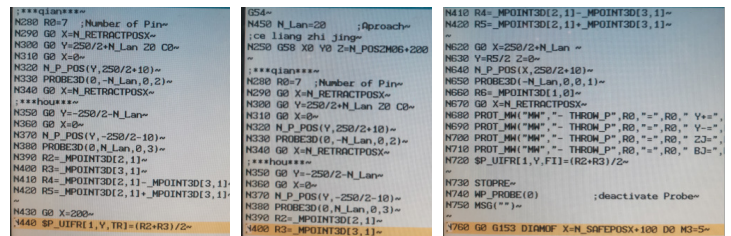


图5 轴补偿程序

可设置零点偏移				
		X [mm]	Y [mm]	Z [mm]
G54	忽略	0.000	-0.064	2747.629
	精确	0.009	0.001	5.804
G55	粗略	0.000	0.000	2724.020
	精确	0.000	0.000	0.000
G56	粗略	0.000	0.000	0.000
	精确	0.000	0.000	0.000
G57	粗略	0.000	0.000	3424.020
	精确	0.000	0.000	0.000

图6 Y轴补偿结果

(3) 铣削前，使用专用的测量程序 (见图7) 对机床C轴进行修正，使基准拐第1拐的角度在Y轴修正角度小于0.001°，完成C轴修正。

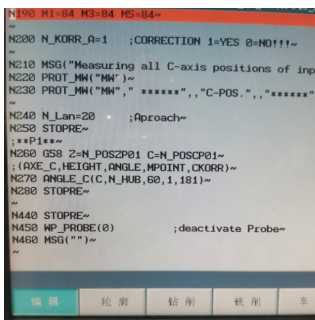


图7 C轴补偿程序

(4) 粗铣键槽时，为提高加工效率，保证程序的通用性，采用直线铣削的方式加工，轨迹不走键槽型线，铣削深度1mm/刀，5mm宽度局部铣削深度为2mm/刀，其余45mm宽度处铣削深度1mm/刀，铣削示意图如图8所示。由于加工产品键槽端存在工艺颈，工艺颈在加工过程中控制的长短存在差异，为保证程序的通用性，在程序中增加长度修正值R90，如图9所示，使R90预设值为0，当工艺颈长短有较大变化时，由操作者根据曲轴实际长度进行修改R90参数，使程序能适用于所有工艺颈长度的加工。

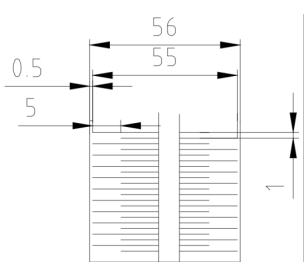


图8 键槽粗铣刀具轨迹示意图

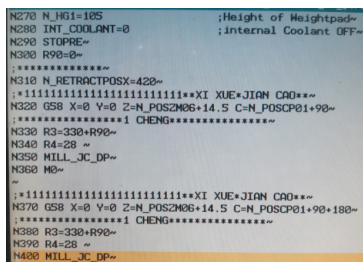


图9 键槽粗铣主程序及R90长度补偿程序

(5) 精铣键槽的过程中及完成实验加工后，在机床上检测键槽尺寸及对称度，结果如表1所示。

表1 键槽机床检测结果

M1	M1'	M2	M2'
27.996	27.962	28.001	27.959

对称度计算公式为：

$$F = \left(\frac{t_1(\Delta_1 + \Delta_2)}{d - t_1} + (\Delta_1 - \Delta_2) \right)$$

式中：

Δ1、Δ2 为键槽一端不同两点的平均高度差；

d——为轴的直径；

t₁——为键槽深度。

对称度计算结果为：

$$F = \left(\frac{19 \times (0.017 + 0.021)}{250 - 19} + (0.021 - 0.017) \right) = 0.007$$

图样要求0.03，机床检测结果0.007<0.03，满足图样要求。

(6) 平台检测，对称度及结果计算（见表2）。

表2 键槽检测平台检测结果

M1	M1'	M2	M2'
152.46	152.50	152.44	152.50

根据式1计算对称度为

$$F = \left(\frac{19 \times (0.02 + 0.03)}{250 - 19} + (0.03 - 0.02) \right) = 0.014$$

图样要求0.03，平台检测结果0.014<0.03，满足图样要求。

(7) 键槽三坐标检测结果（如表3、表4所示）。

表3 自由端键槽检测结果（每个面测量8个点取平均值）

键槽1侧面检测数值	中心偏移量	键槽2侧面检测数值	中心偏移量
27.9759	-0.0093	27.972	-0.012
-27.9955		27.9958	

表4 输出端键槽检测结果

键槽3侧面检测数值	中心偏移量	键槽4侧面检测数值	中心偏移量
27.983	0.009	27.9947	0.0161
-27.9737		27.960	

四、高精度键槽铣削加工方式的效果

(1) 开发了一种新的高精度键槽铣削加工方式，为拓展开发高精度要求键槽曲轴提供了技术支撑和保证。

(2) 开发了一种新的高精度键槽铣削加工方式，降低了键槽铣削加工技术难度。

(3) 增加了曲轴制造技术的多样性。

(4) 提高了制造技术的竞争性。□

参考文献：

- 1、《加工中心设备操作说明书》
- 2、《西门子编程手册》
- 3、《国家形位公差标准GB/T 3177-2009》