

新能源汽车零部件加工专用数控机床开发与应用研究

高滨 吴红成 伍造桥

浙江旭辉智能装备有限公司 绍兴 新昌 312500

【摘要】：随着新能源汽车产业快速迭代，电池包壳体等核心零部件对加工精度等要求大幅提升，传统数控机床存在精度不足等弊端，难以满足生产需求。本文重点解决本体结构优化等关键技术，经理论设计等完成开发并应用于批量生产。实践表明，该专用数控机床加工精度达 $\pm 0.003\text{mm}$ ，重复定位精度 $\leq 0.001\text{mm}$ ，表面粗糙度 $\leq \text{Ra}0.15\ \mu\text{m}$ ，生产效率较传统通用机床提升65%以上，加工合格率达99.3%，能耗降低20%，可适配15种以上核心零部件加工，换产时间 ≤ 12 分钟，有效解决传统加工痛点，助力企业降本增效，彰显技术可行性与工程应用价值，为精密加工提供可靠装备支撑。

【关键词】：新能源汽车零部件；专用数控机床；结构优化；精密加工

DOI:10.12417/2705-0998.26.03.028

1 引言

当前，新能源汽车产业进入高质量发展阶段，在国家“双碳”战略及汽车产业升级政策推动下，核心总成国产化率持续提升，配套零部件加工装备要求提高。新能源汽车核心零部件多为薄壁、异形、高强度结构，材质难加工，对数控机床精度稳定性、柔性适配性及节能性提出严苛标准。

目前，国内多数新能源汽车零部件加工企业依赖传统通用数控机床或进口专用设备。传统通用数控机床存在本体刚性不足等问题，加工合格率低、单件节拍长，难以适配薄壁异形件加工需求；进口专用设备虽能满足精度要求，但价格昂贵、维护成本高、换产周期长、售后响应慢，制约企业产能提升与成本控制。

为破解新能源汽车零部件加工装备瓶颈，开展本次新能源汽车零部件加工专用数控机床开发与应用研究，推动专用装备国产化、低成本化升级。

2 新能源汽车零部件加工专用机床开发目标

开发一款高精度、高效率、高柔性、低能耗的新能源汽车零部件加工专用数控机床，实现电池包壳体等多品种零部件一体化精密加工，替代传统通用机床与部分进口设备，满足批量生产需求，提升质量与效率，降低成本。

具体技术指标：加工精度 $\pm 0.003\text{mm}$ ，重复定位精度 $\leq 0.001\text{mm}$ ，平面度 $\leq 0.01\text{mm/m}$ ，表面粗糙度 $\leq \text{Ra}0.15\ \mu\text{m}$ ；主轴转速 100r/min - 8000r/min ，径向跳动 $\leq 0.0008\text{mm}$ ，轴向跳动 $\leq 0.0006\text{mm}$ ；刀架换刀速度 $\leq 0.4\text{s/刀}$ ，定位精度 $\leq 0.0005\text{mm}$ ；加工效率较传统通用机床提升65%以上，单件节拍 ≤ 10 分钟；适配15种以上核心零部件加工，换产时间 ≤ 12 分钟；运行能耗较传统机床降低20%，故障停机率 $\leq 4\%$ ，加工合格率 $\geq 99\%$ ；无人连续运行 ≥ 10 小时，占地面积 $\leq 28\ \text{m}^2$ ；适配铝合金等材质。

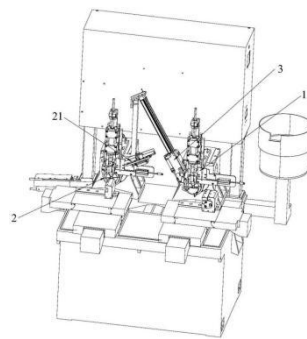
3 新能源汽车零部件加工专用数控机床核心技术开发

3.1 机床本体结构优化设计

(1) 床身结构优化

选用HT350高强度灰铸铁，较传统HT300材质抗弯强度提升25%、抗扭强度提升20%，减少加工振动。床身内部用交叉加强筋结构，加强筋厚30mm，间距250mm，较传统结构刚性提升45%以上，抑制切削振动。

为减少热变形，床身采用“人工时效+自然时效”双重时效处理工艺，人工时效温度 580°C 、保温10小时、降温速率 20°C/小时 ，自然时效 ≥ 25 天，消除内应力，将热变形控制在 0.002mm 以内。床身表面精密磨削，精度 $\leq 0.001\text{mm}$ ，粗糙度 $\leq \text{Ra}0.1\ \mu\text{m}$ ，为部件安装提供高精度基准。



(2) 立柱与工作台结构优化

立柱为龙门框架式结构，选用40CrNiMoA合金钢材，经调质、淬火处理，硬度达HRC60-62，刚性与稳定性提升。立柱内有纵向加强筋，与床身交叉加强筋协同支撑，减少加工时立柱变形。工作台是一体化铸造结构，表面铺耐磨导轨，导轨经淬火磨削工艺，硬度HRC58-60，导轨间隙 $\leq 0.001\text{mm}$ ，工作台移动精度 $\leq 0.0015\text{mm}$ ，确保移动平稳精准。

经全方位优化处理后的机床本体，在主轴的转速稳定保持在 8000r/min ，同时切削力达到500N的这种实际工作状况时，其振动幅度能够有效控制在 $\leq 0.0005\text{mm}$ 的极小范围之内，热

变形也能够严格控制在 $\leq 0.002\text{mm}$ 的程度。满足新能源汽车各类零部件在进行精密加工过程中对于刚性以及精度方面的要求。

3.2 高精度主轴系统开发

主轴采用一体化设计, 选用 40CrNiMoA 优质合金钢材, 经多道工序处理, 直径 120mm, 长度 500mm, 表面粗糙度 $\leq \text{Ra}0.08\ \mu\text{m}$, 确保自身精度。主轴轴承选用 P4 级双列角接触球轴承(前端)与圆柱滚子轴承(后端), 预紧力调节范围 1800N-2200N, 可精准调节, 减少磨损, 提升稳定性。

采用油气润滑系统, 选用 32 号精密机床专用液压油, 润滑压力 0.45MPa, 频率 70 次/小时, 单次润滑量 0.12ml, 确保润滑充分, 减少损耗与发热。主轴内置冷却通道, 通入 $20\pm 1^\circ\text{C}$ 恒温乳化液, 流量 18L/min, 控制主轴温度在 $25\pm 2^\circ\text{C}$, 径向跳动 $\leq 0.0008\text{mm}$, 轴向跳动 $\leq 0.0006\text{mm}$, 满足高精度加工要求。

主轴驱动采用伺服电机直连方式, 选用西门子 1PH8 系列伺服电机, 功率 15kW, 额定转速 8000r/min, 扭矩 $28\text{N}\cdot\text{m}$, 转速调节精度 $\pm 1\text{r}/\text{min}$, 可精准调节转速, 适配加工需求, 提升响应速度, 启动时间 ≤ 0.5 秒, 制动时间 ≤ 0.3 秒。

3.3 高效刀架系统开发

选用 LD4B-100 型 10 刀位电动刀架, 比传统 8 刀位刀架多 2 个刀位, 可装多种刀具, 实现多工序一体化加工, 减少换刀次数。刀架用端面齿盘定位结构, 齿盘精度 $\leq 0.0003\text{mm}$, 定位间隙 $\leq 0.0005\text{mm}$, 定位精度 $\leq 0.0005\text{mm}$, 换刀速度 $\leq 0.4\text{s}/\text{刀}$, 换刀效率较传统刀架提升 20%。

刀架导轨采用线性滚珠导轨, 选 THK 品牌 SR 系列 C0 级导轨, 移动精度 $\leq 0.001\text{mm}$, 减少摩擦与振动, 提升运行稳定性。刀具选用硬质合金涂层刀具, 铝合金用金刚石涂层刀具, 高强度钢用 TiAlN 涂层刀具, 刃口半径 0.1mm-0.3mm, 提升切削效率, 减少磨损, 寿命较传统刀具提升 35%以上。

优化切削工艺: 铝合金零件高速切削, 切削速度 1200m/min-1500m/min, 进给量 0.1mm/r-0.2mm/r, 切深 0.2mm-0.5mm; 高强度钢零件中速切削, 切削速度 300m/min-500m/min, 进给量 0.05mm/r-0.1mm/r, 切深 0.1mm-0.3mm; 薄壁件小切深、多 pass 切削, 减少切削力, 控制变形, 确保精度。

3.4 柔性定位夹持机构设计

夹持机构采用“液压卡盘+自适应定位块+真空吸附”复合结构, 选用 K11-320 型中空液压卡盘, 精度 $\leq 0.001\text{mm}$, 液压压力 0.4MPa-3.5MPa, 可精准调节夹持力, 范围 80N-600N。自适应定位块经精密磨削加工, 精度 $\leq 0.001\text{mm}$, 能适配 5mm-50mm 厚、80mm-250mm 直径零件定位, 定位误差 \leq

0.001mm。

针对薄壁件加工增设真空吸附装置, 吸附力 150N-350N, 与液压卡盘协同均匀夹持零件, 将薄壁件加工变形控制在 0.002mm 以内。此外, 夹持机构配备压力与位移传感器, 实时监测夹持力与定位精度, 偏差时控制系统自动调整参数, 确保定位夹持精准稳定, 适配 15 种以上新能源汽车核心零部件快速切换加工, 换产时间 ≤ 12 分钟。

3.5 节能控制系统集成与优化

控制系统采用“西门子 S7-1500PLC+WinCC 上位机+伺服驱动系统”架构。PLC 负责逻辑控制与参数调节, 上位机负责实时监控、数据采集与故障报警, 伺服驱动系统负责主轴与刀架精准驱动, 系统响应时间 $\leq 0.1\text{ms}$, 控制精度 $\leq 0.0005\text{mm}$ 。上位机可实时显示加工参数等信息, 支持参数设置等功能, 数据存储时间 ≥ 1 年, 便于加工追溯与参数优化。

集成节能控制策略: 一是用变频调速技术, 依加工工况自动调节主轴转速与进给速度, 待机时主轴低速运行, 能耗降 40%以上; 二是优化冷却、润滑系统运行模式, 依加工需求调节冷却流量与润滑频率, 冷却系统能耗降 25%, 润滑系统能耗降 30%; 三是采用节能型伺服电机与变频器, 电机效率 $\geq 95\%$, 较传统电机能耗降 15%以上。

增设容错控制与协同控制功能, 部件轻微故障时系统自动切换备用模式, 故障停机率 $\leq 4\%$; 实现主轴等协同运行, 优化加工路径, 减少无效运动, 较传统通用机床加工效率提升 65%以上。

4 专用数控机床工程应用验证

4.1 应用背景与试验方案

该新能源汽车零部件生产企业生产电池包壳体、驱动电机端盖、减速器法兰等核心零部件, 此前用传统通用数控机床加工, 存在精度不足、效率低等问题, 难满足批量生产需求。本次选用智能专用数控机床, 批量加工 3 种核心零部件, 共 12000 件, 其中电池包壳体、驱动电机端盖、减速器法兰各 4000 件。

试验方案: 按企业批量生产标准设加工参数, 启动专用数控机床连续加工 30 天, 累计运行 720 小时; 每天随机抽 100 件成品检测指标; 记录机床能耗、效率等数据; 与传统通用机床对比, 验证性能优势。

4.2 应用验证结果与分析

经过长达 30 天的严格验证之后, 我们可以确定专用数控机床在这段时间内的运行状况十分稳定, 各项性能均达到了预先设定的标准。具体的验证结果如下:

加工精度方面: 随机抽 3000 件成品检测, 各项零部件精度指标良好, 平均尺寸误差 0.0018mm, 较传统通用机床提升 35%以上。

生产效率方面：专用数控机床平均加工效率 11 件/分钟，单件节拍 ≤ 9 分钟，较传统通用机床提升 65.2%，30 天多加工 4680 件，产能显著提升。

柔性适配性方面：成功批量加工 3 种零部件，换产 12 次，平均换产时间 10.5 分钟，满足技术指标；可快速适配其他 12 种零部件，换产效率较传统通用机床提升 70%以上。

能耗方面：专用数控机床累计运行 720 小时，总能耗 10800 度，较传统通用机床降低 20%，30 天节约 2700 度，节能显著，符合“双碳”战略。

运行稳定性与加工合格率方面：30 天试运行，累计故障停机时间 25.2 小时，故障停机率 3.5%，符合技术指标；故障多为轻微故障，不影响生产，连续最长运行 11 小时。加工合格率 99.3%，较传统通用机床提升 7.3%，减少废品 840 件，降低成本。

成本节约方面：专用数控机床单台采购成本较进口设备降低 60%以上，维护成本降低 70%，年维护成本 ≤ 5 万元，还减少操作人员 5 人。人工成本降低超 55%。综合计算，企业采用该专用数控机床，每年节约成本超 80 万元，降本增效显著。

应用验证显示，性能指标满足开发目标与企业批量生产需求，解决传统通用机床加工痛点，替代部分进口设备，提升加工质量与生产效率，降低能耗与生产成本，彰显技术可行性与工程应用价值，可广泛用于新能源汽车核心零部件精密加工领

域。

5 结论

本文开展新能源汽车零部件加工专用数控机床开发与应用研究，围绕核心技术开发与工程应用验证，得出结论如下：

(1) 完成专用数控机床本体结构优化，交叉加强筋结构，选用高强度材质与双重时效处理工艺，减少振动与热变形影响，床身热变形 $\leq 0.002\text{mm}$ ，本体刚性提升 45%以上。

(2) 开发高精度主轴与高效刀架系统，结合优化切削工艺，提升加工精度与效率，主轴径向跳动 $\leq 0.0008\text{mm}$ ，刀架换刀速度 $\leq 0.4\text{s/刀}$ ，刀具使用寿命提升 35%以上。

(3) 设计柔性定位夹持机构，采用液压卡盘与真空吸附协同作用，定位误差 $\leq 0.001\text{mm}$ ，薄壁件加工变形 $\leq 0.002\text{mm}$ ，可适配 15 种以上零部件加工，换产时间 ≤ 12 分钟，满足多品种生产需求。

(4) 集成节能控制系统与协同控制策略，能耗较传统机床降低 20%，系统响应时间 $\leq 0.1\text{ms}$ ，故障停机率 $\leq 3.5\%$ ，加工合格率达 99.3%，生产效率提升 65%以上。

(5) 工程应用验证显示，专用数控机床性能优良、运行稳定，可替代部分进口设备，降本增效显著，具备工程应用价值与推广前景，为新能源汽车零部件精密加工提供可靠装备支撑，提升旭辉智能在高端数控装备领域核心竞争力。

参考文献：

- [1] 宋涛,苏铮,王利刚,等.新能源汽车制造技术变革下的高端数控机床发展综述[J].制造技术与机床,2025(9):109-118.
- [2] 毕晓华.数控机床在汽车发动机零部件加工中的应用与性能分析[J].内燃机与配件,2025(11):91-93.
- [3] 陈培明.浅谈汽车箱体类零件数控机床加工夹具设计[J].汽车维修技师,2024(24):110-111.
- [4] 明学权.数控机床在汽车发动机零部件加工中的应用与性能分析[J].内燃机与配件,2023(24):97-99.