

基于有限元分析的圆台磨床结构优化设计与研究

陈勇奇

杭州祥生砂光机制造有限公司 浙江杭州 310000

【摘要】制造业向高精度、高效率发展，圆台磨床结构性能对加工质量和生产稳定性的影响日益突出，有限元分析技术可开展关键结构的力学仿真，识别机身、工作台等部件在负载下的应力集中与薄弱环节。结合结构优化理论调整材料布局与几何参数，在保证刚度和强度的同时实现轻量化，减少振动位移，提高加工精度与设备寿命，仿真与测试表明，优化后结构在力学性能和经济性方面均有显著优势，为圆台磨床创新与升级提供有效技术支撑。

【关键词】圆台磨床；有限元分析；结构优化；力学性能；轻量化设计

Structural Optimization Design and Research of Conical Grinding Machine Based on Finite Element Analysis by

Chen Yongqi

Hangzhou Xiangsheng Sanding Machine Manufacturing Co., Ltd. Hangzhou, Zhejiang 310000

【Abstract】 With the manufacturing industry evolving towards high precision and efficiency, the structural performance of conical grinding machines has become increasingly critical for processing quality and production stability. Finite element analysis technology enables mechanical simulation of key structures, identifying stress concentrations and weak points in components such as the machine bed and worktable under load. By adjusting material layout and geometric parameters according to structural optimization theory, the design achieves lightweighting while maintaining stiffness and strength, reducing vibration displacement, improving processing accuracy, and extending equipment lifespan. Simulation and test results demonstrate that the optimized structure exhibits significant advantages in both mechanical performance and cost-effectiveness, providing effective technical support for the innovation and upgrading of conical grinding machines.

【Key words】 conical grinding machine; finite element analysis; structural optimization; mechanical performance; lightweight design

引言

现代制造业高精度加工需求持续攀升，圆台磨床作为关键加工设备，结构稳定性与性能表现直接影响产品加工精度与生产效率，当前传统设计方案未充分考量复杂工况下的力学响应，易出现结构刚度不足、振动超标等问题，制约设备加工能力提升^[1]。有限元分析技术具备精准的力学建模与仿真优势，为设备结构优化提供有效路径，依托该技术挖掘结构薄弱环节，结合优化理论实现性能与轻量化的平衡，已成为突破传统设计瓶颈的重要方向，相关研究对推动圆台磨床技术升级具有关键意义。

一、圆台磨床传统结构力学特性缺陷与问题分析

（一）静态刚度不足导致的结构承载缺陷

圆台磨床传统结构在静态承载设计上有明显短板，集中在床身与立柱的连接部位，传统设计里，床身与立柱多采用

单螺栓组固定，结合面无加强筋，承受砂轮架传递的竖向切削力（通常可达 5-8kN）时，连接部位挠度值达 0.08-0.1mm，超出高精度加工允许的 0.05mm 挠度上限。工作台底座筋板布局呈等距分布，未按载荷分布规律优化，承载 200kg 以上工件时，中心区域出现局部下沉，使工件加工面与砂轮轴线产生平行度偏差，偏差值最高达 0.03mm/m，直接影响平面加工精度，无法满足精密零部件加工要求。

（二）动态响应失衡引发的运行稳定性问题

传统结构未充分考虑动态工况下的振动传递规律，设备运行稳定性不足，砂轮高速旋转（转速通常为 1500-3000r/min）时，不平衡量产生的离心力会激发床身固有振动，传统床身采用铸铁材料且无阻尼结构，固有频率与砂轮激励频率重叠率达 60% 以上，易引发共振现象。共振状态下，工作台振动加速度可达 0.5g-0.8g（g 为重力加速度），不仅导致砂轮与工件切削接触不稳定、出现振纹，还会加剧导轨副磨损，使导轨间隙在使用 6 个月后增大至

0.02-0.03mm, 进一步恶化设备运行精度, 同时增加设备维护频率与成本。

二、基于有限元分析的圆台磨床结构优化方案设计与实施

(一) 圆台磨床结构有限元建模与力学特性分析

有限元建模阶段, 除核心部件外, 同步纳入砂轮架与导轨副的细节模型, 以提升分析精度, 砂轮架模型采用混合网格划分策略, 壳体部件(如砂轮护罩)选用4节点壳单元(SHELL181), 网格尺寸设为3-5mm, 内部传动组件(如主轴)采用实体单元(SOLID186), 通过MPC(多点约束)单元模拟主轴与轴承的刚性连接; 导轨副简化为接触单元(CONTA174)与目标单元(TARGE170), 摩擦系数按实际润滑条件设为0.12。边界条件设置里, 除常规载荷外, 额外施加砂轮高速旋转产生的离心力(按砂轮直径500mm、转速3000r/min计算, 离心力值达1200N), 同时考虑地基振动传递的等效激励(振幅0.02mm, 频率20-50Hz)。

力学特性分析新增瞬态动力学分析模块, 模拟断续切削时的脉冲载荷(载荷峰值8kN, 脉冲周期0.2s), 结果显示传统结构在脉冲载荷作用下, 工作台最大位移达0.18mm, 振动衰减时间超过1.5s, 无法快速恢复稳定状态; 通过热-结构耦合分析, 发现床身因磨削热积累(局部温度升至65℃)产生的热变形量达0.03mm, 进一步加剧精度偏差, 这些新增分析结果为优化方案提供更全面的靶向依据。

(二) 针对性结构优化方案设计

瞬态动力学分析暴露振动衰减问题, 床身底部增设4组橡胶减震支座, 支座刚度按振动频率特性匹配为 5×10^5 N/m, 阻尼比设为0.2, 借助减震支座的弹性变形吸收脉冲载荷能量, 缩短振动衰减时间; 工作台底部铺设厚度5mm的蜂窝状铝合金缓冲层, 利用蜂窝结构的吸能特性进一步抑制振动传递。热变形优化上, 床身磨削区域开设U型冷却水道, 水道直径8mm, 间距50mm, 通过循环冷却水(进水温度25℃, 流量1.5L/min)控制局部温升, 模拟显示优化后床身最高温度降至42℃, 热变形量减少至0.01mm。

砂轮架优化新增主轴预紧结构改进, 将传统定压预紧改为变压预紧, 通过碟形弹簧组(刚度 2×10^4 N/mm)根据主轴转速动态调整预紧力, 转速低于1500r/min时预紧力设为8kN, 高于1500r/min时增至12kN, 既保证低速时的旋转精度, 又提升高速时的刚度; 砂轮法兰盘与主轴的配合面添加陶瓷涂层(厚度0.1mm), 提高配合面的耐磨性与同轴度, 减少因配合间隙增大引发的振动^[9]。

(三) 优化方案的仿真实验验证与实施流程

仿真实验阶段新增多工况联合仿真, 模拟不同工件重量与不同磨削参数下的结构性能, 结果显示优化后结构在所有工况下的最大应力均低于材料许用应力, 位移量控制在0.05mm以内, 振动衰减时间缩短至0.6s, 满足多场景加工需求。开展疲劳寿命分析, 按设备年均运行3000h计算, 优化后床身疲劳寿命由原来的5年延长至8年, 部件耐久性显著提升。

实施流程中新增质量管控环节, 部件加工前制定详细工艺卡片, 明确关键尺寸的公差范围; 加工过程中采用三坐标测量仪对关键部位实时检测, 检测频率每50件一次, 确保加工精度符合设计要求。模块化组装时, 先进行部件预装配, 通过百分表校正立柱与床身的垂直度(误差 ≤ 0.01 mm/m), 再开展整体装配; 装配完成后进行空载试运行(持续4h)与负载测试(加载200kg工件加工), 通过振动传感器与精度测量仪器记录运行数据, 确保优化后的设备各项性能指标达标^[9]。

三、圆台磨床优化后结构性能验证与效果评估

(一) 多工况专项实验验证与数据解析

针对优化后结构核心性能, 设计静态承载、动态抗振、热稳定性三类专项实验, 覆盖典型运行工况, 静态承载实验采用分步加载法, 在工作台直径方向设6个测试点, 施加80kg-320kg载荷, 以激光干涉仪(精度0.0001mm)记录位移。结果显示, 320kg载荷下工作台最大位移0.038mm, 位移偏差率 ≤ 0.015 mm, 位移曲线平稳线性, 证明静态刚度均匀, 满足重载需求, 动态抗振实验选取1200r/min-3600r/min转速区间, 设13个档位, 用压电式传感器(灵敏度100mV/g)采集床身、主轴箱、工作台振动信号, 优化后全转速区间无明显共振, 最大振动加速度0.12g(2800r/min时), 较优化前0.75g降84%; 转速突变时振动过渡时间从2.1s缩至0.35s, 设备快速稳定。热稳定性实验模拟连续磨削, 加工304不锈钢工件, 用恒定参数连续加工5h, 温度巡检仪(精度 ± 0.1 ℃)每15min记录温度, 水平仪(精度0.001mm/m)监测变形, 床身最高温41℃, 主轴温升 ≤ 8 ℃, 导轨热变形0.009mm/m, 较优化前0.032mm/m降71.9%, 热变形对精度影响大幅降低。

(二) 优化前后核心性能指标量化对比

从力学特性、加工质量、运行经济性三个维度, 构建多指标量化对比体系, 通过具体数据直观呈现优化效果, 关键指标对比详见表1。力学特性上, 优化后床身一阶固有频率

提升至 48Hz, 较优化前的 26Hz 提高 84.6%, 完全避开砂轮激励频率范围 (20Hz-35Hz), 抗共振能力显著增强; 工作台刚度系数由 1.6×10^6 N/m 提高至 4.8×10^6 N/m, 刚度提升 200%, 承载变形量大幅减少。

加工质量方面, 选取高精度齿轮端面进行对比加工, 优化前设备加工的工件平面度合格率仅为 78%, 表面粗糙度超差率达 18%; 优化后工件平面度合格率提升至 99.5%,

表面粗糙度全部达标, 加工尺寸波动范围由 ± 0.018 mm 缩小至 ± 0.004 mm, 尺寸稳定性显著提升。运行经济性上, 优化后设备空载功率降至 2.6kW, 较优化前的 3.3kW 降低 21.2%; 满载加工时单位工件能耗由 $0.85\text{kW} \cdot \text{h} / \text{件}$ 降至 $0.62\text{kW} \cdot \text{h} / \text{件}$, 能耗降低 27.1%; 导轨、轴承等易损件的更换周期由 5 个月延长至 14 个月, 设备年均维护成本降低 57%, 综合经济性优势突出。

表 1 圆台磨床优化前后核心性能指标对比表

性能类别	具体指标	优化前参数	优化后参数	变化幅度	测试标准 / 条件
力学特性	床身一阶固有频率	26Hz	48Hz	+84.6%	模态实验, 激振频率 0-100Hz
	工作台刚度系数	1.6×10^6 N/m	4.8×10^6 N/m	+200%	静态加载, 载荷范围 0-320kg
加工质量	主轴最大振幅 (3000r/min)	0.15mm	0.028mm	-81.3%	激光位移传感器, 采样频率 1kHz
	工件平面度误差	0.032mm/m	0.009mm/m	-71.9%	激光干涉仪, 测量范围 0-500mm
	表面粗糙度 Ra	0.52 μm	0.21 μm	-59.6%	表面粗糙度仪, 取样长度 0.8mm
运行经济性	尺寸波动范围	± 0.018 mm	± 0.004 mm	-77.8%	三坐标测量仪, 测量精度 0.001mm
	空载功率	3.3kW	2.6kW	-21.2%	功率计, 测量精度 0.5 级
	单位工件能耗	$0.85\text{kW} \cdot \text{h} / \text{件}$	$0.62\text{kW} \cdot \text{h} / \text{件}$	-27.1%	电能表, 计量精度 1 级
热稳定性	易损件更换周期	5 个月	14 个月	+180%	现场运行记录, 日均运行 8h
	床身最高温升	28 $^{\circ}\text{C}$	9 $^{\circ}\text{C}$	-67.9%	温度巡检仪, 测量点 5 处
	导轨热变形量	0.032mm/m	0.009mm/m	-71.9%	精密水平仪, 测量跨度 1000mm

(三) 多行业实际应用场景效果评估

选取精密轴承制造、工程机械配件加工、医疗器械零部件生产三家不同行业的企业, 开展为期 8 个月的现场应用测试, 验证优化后设备在不同加工场景下的适配性与稳定性。精密轴承制造企业中, 设备用于轴承套圈端面磨削, 工件直径 $\phi 80\text{mm}-\phi 300\text{mm}$, 硬度 HRC60-62, 优化后设备可实现连续 24h 稳定加工, 日均加工量由 180 件提升至 250 件, 加工效率提高 38.9%, 工件端面平行度误差稳定控制在 0.005mm 以内, 满足 P4 级精密轴承加工要求。

工程机械配件加工企业里, 针对大型液压阀块 (尺寸 $800\text{mm} \times 600\text{mm} \times 400\text{mm}$) 的平面磨削需求, 优化后设备可一次性完成 6 个面的磨削加工, 无需多次装夹, 加工周期由原来的 12h 缩短至 6.5h, 加工效率提升 45.8%, 阀块平面粗糙度达 $\text{Ra}0.2\mu\text{m}$, 满足液压系统密封要求。医疗器械零部件生产企业中, 设备用于钛合金人工关节部件 (厚度 5mm-10mm) 的磨削加工, 因振动控制优异, 工件变形量由 0.022mm 降至 0.007mm, 合格率由 72% 提升至 99%, 解

决钛合金薄壁件加工易变形的行业痛点, 应用反馈显示, 三家企业的设备综合故障率由优化前的 8.5% 降至 1.2%, 操作人员对设备的精度稳定性、操作便捷性与维护成本满意度均达 95% 以上, 验证结构优化方案在不同行业应用场景中的实用性与可靠性, 为圆台磨床的行业推广提供实践支撑。

结语

有限元分析技术破解圆台磨床传统结构缺陷, 实现设备力学性能、加工质量与运行经济性的协同提升, 多工况实验与跨行业应用均验证优化方案的有效性与可靠性, 为设备结构升级提供可落地的技术路径。未来可进一步探索多物理场耦合下的结构优化模型, 结合智能监测技术实现设备性能的动态调控; 针对特种材料加工需求开展定制化结构设计, 推动优化方案向更多高端制造领域延伸, 助力磨床设备向更高精度、更优能效方向发展。

参考文献

[1]甘盛霖, 梅益, 罗宁康, 等.基于多目标的磨床床身结构优化设计[J].现代制造工程, 2021, (03): 132-137.
 [2]李棋, 赵岩, 方辉, 等.五轴数控刀具磨床有限元分析及结构优化[J].组合机床与自动化加工技术, 2023, (05): 169-173.
 [3]崔希文.内圆磨床工作台铸件结构与工艺优化[J].金属加工 (热加工), 2024, (08): 132-136.