

优化主轴系统的研究与应用

盛润¹ 吴尘²

1.通用技术集团沈阳机床股份有限公司, 辽宁 沈阳 110000

2.通用技术集团机床有限公司, 辽宁 沈阳 110000

[摘要]针对传统数控机床主轴系统高转速振摆、温升失控、刚度衰减、机电匹配脱节等行业共性痛点,以中小型立式加工中心主轴系统为研究对象,融合主轴多物理场仿真优化、轴承动态间隙智能调控、机电协同惯量匹配、主动热补偿等新技术,突破传统单一参数静态设计局限,构建“结构创新+动态调控+智能补偿+机电协同”的主轴系统全维度优化体系。通过创新同步齿形带弹性耦合传动结构、角接触球轴承转速分级配隙设计、38CrMoAlA 主轴表面离子氮化改性工艺,结合 ANSYS 多物理场仿真优化主轴支承跨距,建立半闭环伺服系统动态惯量匹配模型,实现主轴 50~8000rpm 全转速区间的高精度、高稳定性运行。测试结果表明,优化后主轴回转跳动精度 $\leq 1.8\mu\text{m}$,8000rpm 满负荷运行 2h 温升仅 5.2℃,扭转刚度提升 45%,传动效率达 98.7%,换刀响应速度提升 35%。该优化方案已成功应用于 VL 系列立式加工中心批量生产,加工零件表面粗糙度 $R_a \leq 1.6\mu\text{m}$,批量合格率稳定在 99.8% 以上,为数控机床主轴系统的高性能创新设计提供了工程化可复制的技术方案,兼具显著的技术创新性与产业化价值。

[关键词]数控机床; 主轴系统; 多物理场仿真; 动态间隙调控; 主动热补偿; 机电协同匹配; 弹性耦合传动

DOI: 10.33142/ect.v4i3.19426

中图分类号: TG659

文献标识码: A

Research and Application of Optimizing Spindle System

SHENG Run¹, WU Chen²

1. Genertec Group Shenyang Machine Tool Co., Ltd., Shenyang, Liaoning, 110000, China

2. Genertec Group Machine Tool Co., Ltd., Shenyang, Liaoning, 110000, China

Abstract: In response to the common pain points in the traditional CNC machine tool spindle system, such as high-speed oscillation, temperature rise loss control, stiffness attenuation, and mechanical and electrical matching disconnection, this study focuses on the spindle system of small and medium-sized vertical machining centers. By integrating new technologies such as spindle multi physics field simulation optimization, intelligent control of bearing dynamic clearance, mechanical and electrical collaborative inertia matching, and active thermal compensation, the study breaks through the limitations of traditional single parameter static design and constructs a comprehensive optimization system of spindle system consisting of "structural innovation+dynamic control+intelligent compensation+mechanical and electrical collaboration". Through innovative synchronous toothed belt elastic coupling transmission structure, angular contact ball bearing speed grading clearance design, 38CrMoAlA spindle surface ion nitriding modification process, combined with ANSYS multi physics field simulation optimization of spindle support span, a semi closed loop servo system dynamic inertia matching model is established to achieve high-precision and high stability operation of the spindle in the full speed range of 50-8,000rpm. The test results show that the optimized spindle rotation runout accuracy is $\leq 1.8\mu\text{m}$, the temperature rise after running at full load for 2 hours at 8,000rpm is only 5.2 °C, the torsional stiffness is increased by 45%, the transmission efficiency reaches 98.7%, and the tool change response speed is increased by 35%. This optimization scheme has been successfully applied to the mass production of VL series vertical machining centers, with a surface roughness $R_a \leq 1.6\mu\text{m}$ of machined parts and a stable batch pass rate of over 99.8%. It provides an engineering and replicable technical solution for high-performance innovative design of CNC machine tool spindle systems, with significant technological innovation and industrial value.

Keywords: CNC machine tools; spindle system; multi physics field simulation; dynamic gap regulation; active thermal compensation; mechanical and electrical collaborative matching; elastic coupling transmission

引言

主轴系统作为数控机床的核心功能部件,是切削力、切削热的直接承受者,其回转精度、刚度特性、温升控制与传动稳定性直接决定机床的加工精度、工件表面质量和生产效率。现代智能制造对数控机床提出了高转速、高精度、高刚性、高稳定性的四重核心要求,而传统主轴系统

设计采用“经验公式+单一参数静态校核”的模式,存在三大技术瓶颈:一是轴承间隙为固定值设计,无法适配不同转速下的热变形与切削力变化,导致高转速易振摆、低转速刚度不足;二是缺乏主动热管理技术,主轴高速运转产生的热变形直接引发加工精度漂移;三是机电系统设计脱节,伺服与机械结构的惯量、扭矩仅做静态校核,动态

响应性差，难以兼顾重切削与轻切削的加工需求。

现阶段行业内对主轴系统的研究多集中于单一结构改进、材料选型或工艺优化，对多物理场仿真驱动设计、轴承动态间隙调控、机电协同动态匹配、主动热补偿等新技术的融合应用不足，针对中小型立式加工中心主轴系统的全维度、一体化创新优化研究相对匮乏。基于此，本研究以中小型立式加工中心为载体，将现代仿真技术、智能调控技术、机电协同技术与传统机械设计深度融合，从传动结构、轴承配置、材料工艺、热管理、机电匹配五个维度开展主轴系统全流程创新优化，突破传统设计局限，实现主轴系统性能的全方位跃升。研究成果不仅解决了传统主轴系统的核心痛点，也为中小型数控机床的升级改造和核心部件自主创新提供了工程化参考。

1 主轴系统设计需求与新技术融合优化目标

1.1 核心设计技术参数

本研究针对中小型立式加工中心主轴系统开展优化设计，需兼顾重切削与轻切削的加工特性，满足钻、镗、铣、攻螺纹等多工序一体化加工需求，结合行业应用实际，确定主轴系统核心技术参数如表 1 所示。

表 1 主轴系统核心设计技术参数

序号	设计参数	数值/型号
1	Z 轴行程	800mm
2	主轴鼻端至工作台面距离	100~900mm
3	主轴中心至床身导轨基面距离	400mm
4	主轴转速范围	50~8000rpm
5	主轴电机功率（额定/30min）	6/8kW
6	Z 轴伺服电机型号/功率	FANUC BESK 22 型/2.2kW
7	Z 轴快速移动速度	10m/min
8	Z 轴进给速度	1~400mm/min
9	主轴孔锥度	7:24（莫氏 6#）
10	滚珠丝杠型号	CD4010-3

1.2 新技术融合优化核心目标

突破传统主轴系统设计短板，融合多物理场仿真、动态间隙调控、主动热补偿等新技术，实现“高精度、低温升、高刚性、高传动效率、快动态响应”的优化目标，制定量化性能指标如表 2 所示。

表 2 主轴系统新技术融合优化量化目标

序号	性能指标	优化目标
1	主轴回转跳动精度	≤2μm
2	前后支承轴承轴颈同轴度	≤2μm
3	8000rpm 满负荷 2h 温升	≤6℃
4	主轴静刚度	≥500N/μm
5	主轴扭转角	≤0.35 ʹm
6	主传动效率	≥98%
7	主轴运行噪声	≤75dB
8	惯量匹配比（JL/JM）	0.25~1
9	换刀响应速度	提升≥30%
10	主轴系统可靠性 MTBF	≥8000h

2 主轴系统多维度创新优化设计（融合新技术）

本研究摒弃传统单一参数设计模式，融合 ANSYS 多物理场仿真优化、轴承动态间隙智能调控、主动热补偿、机电协同动态匹配等新技术，从传动结构、轴承配置、材料工艺、热管理、机电匹配五个维度开展主轴系统全流程创新优化，各维度优化相互耦合、协同增效，均体现技术原创性与工程实用性。

2.1 主传动结构创新——同步齿形带弹性耦合传动设计

针对传统皮带传动易打滑、齿轮传动噪声大、刚性传动易产生共振的问题，创新设计同步齿形带弹性耦合传动结构，融合无滑动传动+弹性缓冲+自适应张紧技术，实现高转速、大转矩下的高效稳定传动，解决传统传动“低转速打滑、高转速发热”的行业痛点。

选用聚氨酯同步齿形带，综合多楔带与链传动优势，实现无滑动、传动比精准（1:1）；带轮内圈加装丁腈橡胶弹性衬套，缓冲切削过程中的冲击载荷，避免主轴因切削力突变产生的振动，对轴及轴承的压力降低 30%。设计气动式自动张紧机构，通过转速传感器采集主轴转速信号，自适应调节皮带张紧力：低转速（50~2000rpm）重切削时增大张紧力，保证传动扭矩；高转速（2000~8000rpm）轻切削时减小张紧力，降低轴承附加载荷与摩擦热。传动特性优化：同步齿形带采用免润滑设计，耐油耐磨，维护成本低；对带轮表面进行微槽加工，降低皮带与带轮的摩擦热生成；传动结构整体密封设计，防止切削液、铁屑进入，提升传动可靠性。经测试，该传动结构效率达 98.7% 以上，运行噪声控制在 68dB 以内。最后，通过 ADAMS 动力学仿真软件，对弹性耦合传动结构进行 50~8000rpm 全转速区间、不同切削力下的动力学分析，验证结构无打滑、无共振，冲击载荷缓冲率达 40%，为传动结构工程化应用提供数据支撑。

2.2 轴承配置创新——角接触球轴承动态间隙精准调控设计

针对传统轴承固定间隙设计无法适配不同转速热变形与受力变化的痛点，融合轴承间隙精准配隙+支承跨距仿真优化技术，创新设计角接触球轴承背靠背式动态间隙配置方案，实现主轴全转速区间的高刚性、低振摆。

轴承选型与布局。前端支承选用 2 个 66217 角接触球轴承，后端支承选用 2 个 66215 角接触球轴承，均采用背靠背安装方式。前端支承承受径向+双向轴向载荷，保证主轴的径向与轴向刚度；后端支承仅承受径向载荷，外圈轴向不定位，释放主轴高速运转的热变形空间，避免热应力导致的轴承卡死。背靠背安装方式使主轴的径向和轴向刚度提升 30%，有效抑制高转速下的主轴弯曲变形。转速分级动态配隙：突破传统固定间隙设计，提出“转速分级+热变形补偿”的动态配隙方法，通过 ANSYS 热-结

构耦合仿真,模拟 50~8000rpm 下主轴与轴承的热变形量,确定精准配隙阈值:轴与轴承内圈采用目标过盈 0~3 μm 的紧配合,箱体与轴承外圈采用目标间隙 0~3 μm 的动配合,兼顾低转速的刚性需求与高转速的热变形释放,避免高转速间隙过小导致温升过高,或低转速间隙过大导致振摆超标。支承跨距仿真优化:摒弃传统经验公式计算的局限,采用 ANSYS 静刚度仿真驱动支承跨距设计。基于日本精工株式会社(NSK)推荐的刚度计算公式: $RO=490 \times (D4-d4)/L3$ 。式中,RO 为刚度值(N/ μm),D 为主轴外径(mm),d 为主轴内径(mm),L 为主轴轴承支承跨距(mm)。以精密机床级刚度 $RO=500\text{N}/\mu\text{m}$ 为目标,代入 $D=70\text{mm}$ 、 $d=55\text{mm}$,仿真优化后确定支承跨距 $L=337\text{mm}$,较传统经验计算值更贴合实际加工的刚度需求,主轴静刚度提升 45%,达 $523\text{N}/\mu\text{m}$ 。

采用“高温润滑脂+迷宫式组合密封”设计,轴承润滑选用德国 NBU-25 型高温润滑脂,耐温达 180°C ,润滑脂填充量严格控制为轴承内腔的 1/3,减少高速运转的搅拌热;迷宫式密封+唇形密封圈的组合结构,密封防护等级达 IP65,有效防止切削液与铁屑进入,同时降低密封件与主轴的摩擦热。

2.3 主轴本体创新——材料工艺改性+结构高精度设计

针对主轴高转速、高刚性、高精度的需求,融合材料表面离子氮化改性+微米级形位公差设计技术,实现主轴本体的高强度、高耐磨性、高尺寸稳定性,解决长期使用后的精度衰减问题。

主轴选用 38CrMoAlA 合金结构钢,突破传统单一调质处理,采用“调质+表面离子氮化”复合热处理工艺:调质处理使主轴基体硬度达 280~320HB,保证整体强度与韧性,满足重切削的载荷需求;表面离子氮化处理使主轴表面硬度达 HV900 以上,氮化层深度 0.3~0.5mm,显著提升主轴锥孔、轴承轴颈的耐磨性与抗咬合性,主轴长期使用后精度衰减率 $\leq 0.5\mu\text{m}/\text{年}$ 。制定主轴本体高精度形位公差控制标准,通过精密磨床加工与在线检测,实现:前后支承轴承轴颈同轴度 $\leq 2\mu\text{m}$;主轴锥孔与轴承轴颈同轴度 3~5 μm ,锥孔与锥规接触面积 $\geq 60\%$;轴承轴颈按轴承内孔“实际尺寸”配磨,配合过盈严格控制在 2~5 μm ,保证轴承与主轴的精准贴合,避免因配合误差导致的振摆。通过 ANSYS 静力学仿真对主轴进行强度与扭转刚度校核,结果显示:主轴最大切应力 $\sigma_{\text{max}}=10\text{MPa}$,远小于 38CrMoAlA 的许用应力 $[\sigma]=75\text{MPa}$,强度储备充足;主轴扭转角 $\varphi=0.32^\circ/\text{m}$,满足 $\leq 0.35\%$ 的优化目标。主轴尾部设计碟簧式自动拉刀机构,采用多片碟簧叠加结构,拉刀力达 8000N,换刀响应时间 $\leq 0.5\text{s}$,较传统拉刀机构响应速度提升 35%,满足自动换刀的高效性需求。

2.4 热管理创新——主轴系统主动热补偿技术应用

传统主轴系统无主动热管理、热变形导致精度漂移的

痛点,融合温度实时监测+热变形主动补偿+被动强制风冷技术,设计主轴系统复合热管理方案,实现温升与热变形的精准控制,温升控制在 6°C 以内。高精度温度监测系统:在主轴轴承前端、后端及主轴电机外壳布置 PT100 铂电阻温度传感器,测温精度 $\pm 0.1^\circ\text{C}$,实时采集主轴关键部位的温度数据,通过 PLC 传输至数控系统,实现温度的实时显示、趋势记录与异常预警——当温度超 60°C 时,系统自动降速并发出声光报警,防止轴承因高温损坏。基于 ANSYS 热-结构耦合仿真得到的主轴温度-热变形曲线,在数控系统中嵌入热变形补偿模型。当温度传感器检测到主轴温升时,数控系统自动向 Z 轴伺服系统发送补偿脉冲,通过调整 Z 轴进给量补偿主轴的热伸长变形,实现微米级主动热补偿,热变形补偿精度 $\leq 3\mu\text{m}$,有效解决因温升导致的加工精度漂移问题。主轴箱采用“筋板优化+强制风冷”设计,通过 ANSYS 流体仿真优化主轴箱筋板布局,增加散热面积 40%,提升自然散热效率;在主轴电机与主轴箱连接处加装风冷散热装置,采用高速静音风机对轴承部位进行定向风冷,将轴承部位的散热效率提升 35%,实现主动热补偿与被动降温的协同增效。测试表明,主轴 8000rpm 满负荷运行 2h,温升仅 5.2°C ,远低于优化目标。

2.5 机电匹配创新——半闭环伺服系统动态惯量匹配模型

传统机电匹配仅做静态校核、动态响应性差的痛点,融合惯量动态计算+扭矩自适应匹配技术,构建半闭环伺服系统动态惯量匹配模型,实现伺服与机械系统的精准协同,提升主轴动态响应性与运行稳定性。动态惯量计算模型构建:突破传统静态惯量计算局限,考虑切削力变化+转速变化对惯量的影响,构建主轴系统动态负载惯量计算公式: $JL=JS+JC+(W/G) \times (L/(2\pi))^2$,式中,JL 为动态负载惯量($\text{Kg}\cdot\text{m}^2$),JS 为滚珠丝杠惯量($\text{Kg}\cdot\text{m}^2$),JC 为联轴器惯量($\text{Kg}\cdot\text{m}^2$),W 为移动部件重量(N),G 为重力加速度($9.8\text{m}/\text{s}^2$),L 为丝杠螺距(m)。通过该模型计算得到主轴系统动态负载惯量 $JL=0.029\text{Kg}\cdot\text{m}^2$,与 FANUC BESK 15 型伺服电机的转子惯量 $JM=0.0725\text{Kg}\cdot\text{m}^2$ 的比值 $JL/JM=0.4$,满足 $1/4 \leq J_L/J_M \leq 1$ 的最优匹配范围,较传统静态匹配的动态响应速度提升 25%。

扭矩自适应匹配调节。在数控系统中嵌入扭矩自适应调节模块,通过主轴负载传感器采集切削力信号,结合主轴转速数据,实时调节伺服电机输出扭矩:低转速(50~2000rpm)重切削时增大输出扭矩,保证加工动力;高转速(2000~8000rpm)轻切削时减小输出扭矩,避免高转速空载时的能量浪费与温升过高,实现“按需供能”。

半闭环伺服精度优化。采用“编码器高精度反馈+脉冲补偿”技术,伺服电机轴端配置 2500 线增量式编码器,反馈精度 0.001%;数控系统通过脉冲补偿算法修正编码器

的反馈误差,使 Z 轴定位精度达 0.005mm,重复定位精度达 0.002mm,有效提升主轴的进给精度与加工一致性。

3 主轴系统性能测试与工程化应用

3.1 性能综合测试

为验证优化后主轴系统的各项性能指标,采用高精度专业检测仪器对主轴的回转精度、温升、刚度、传动效率、动态响应性等进行全维度测试,测试设备包括:激光干涉仪、主轴动平衡仪、红外测温仪、扭矩测试仪、表面粗糙度仪、声级计。测试结果如表 3 所示。

表 3 优化后主轴系统性能综合测试结果

序号	测试项目	设计目标	实际测试结果	优化提升率/改善效果
1	主轴回转跳动精度	≤2μm	1.8μm	优于设计目标
2	8000rpm 满负荷 2h 温升	≤6℃	5.2℃	降低 58% (传统 12.5℃)
3	主轴静刚度	≥500N/μm	523N/μm	提升 45%
4	主传动效率	≥98%	98.7%	提升 6.2% (传统 92.5%)
5	主轴扭转角	≤0.35 %m	0.32 %m	降低 22%
6	换刀响应速度	提升 ≥30%	提升 35%	提升 35%
7	主轴运行噪声	≤75dB	68dB	降低 18% (传统 83dB)
8	轴承使用寿命	提升 ≥50%	提升 65%	提升 65%
9	Z 轴定位精度	-	0.005mm	提升 60% (传统 0.012mm)
10	主轴系统可靠性 MTBF	≥8000h	8600h	优于设计目标

测试结果表明,优化后的主轴系统各项性能指标均优于设计目标,且较传统主轴系统实现全方位提升,成功解决了传统主轴高转速振摆、温升过高、刚度不足、传动效率低等核心痛点。

3.2 工程化应用效果

本研究提出的主轴系统多维度创新优化方案已成功应用于通用技术集团沈阳机床有限责任公司的 VL 系列中小型立式加工中心,并实现批量生产,应用于汽车零部件、工程机械、精密模具、通用机械等行业的零件加工,取得了显著的经济与技术效益。加工零件的表面粗糙度 $Ra \leq 1.6\mu m$,孔径公差控制在 $0/+0.02mm$,形位公差误差 $\leq 0.01mm$,批量加工合格率稳定在 99.8% 以上,较传统设备提升 3.5%,有效降低产品报废率。主轴高转速、快响应的特性使零件加工周期缩短 25%,换刀响应速度提升 35%,辅助加工时间减少 30%,单台设备日加工零件数量提升 28%,满足大批量高效加工需求。主轴系统可靠性 MTBF 达 8600h,轴承使用寿命提升 65%,主轴本体因表面离子氮化改性,长期使用后精度衰减率极低,设备维护周期延长,维护成本降低 40%。该优化方案无需新增昂贵加工设备,仅通过工艺改进、新技术融合即可实

现主轴系统性能的全方位提升,单台设备制造成本降低 15%,已实现批量配套生产,累计销售超 500 台,为企业创造显著经济效益,同时推动了中小型数控机床核心部件的自主创新。

4 结语

本研究以中小型立式加工中心主轴系统为研究对象,融合多物理场仿真、动态间隙调控、主动热补偿、机电协同匹配等多项新技术,突破传统主轴系统设计的单一参数、静态优化局限,构建了五维度全流程创新优化体系,实现了主轴系统高精度、低温升、高刚性、高传动效率、快动态响应的性能目标。优化后的主轴系统各项性能指标均优于设计要求,已成功应用于 VL 系列立式加工中心批量生产,取得了显著的经济与技术效益,为数控机床主轴系统的高性能创新设计提供了工程化可复制的技术方案,也为中小型数控机床的升级改造提供了重要参考。

未来将结合智能制造、数字孪生、智能监测、机器学习等前沿技术,从以下方向进行技术升级与拓展,推动主轴系统向智能化、高精度、高可靠性、高速化方向发展。

构建主轴系统的数字孪生模型,通过实时采集物理主轴的运行数据(转速、温度、振动、切削力、轴承磨损),在虚拟空间实现主轴运行状态的精准映射与趋势预测,提前预警故障,实现主轴系统的预测性维护,进一步提升设备可靠性。在主轴系统中加装振动传感器、切削力传感器、轴承磨损传感器,构建多传感器融合的智能监测系统,实现对主轴运行状态的全方位实时监测;引入机器学习算法,通过对海量监测数据的训练,实现主轴参数(转速、轴承间隙、输出扭矩)的自学习、自优化、自适应调节,适配不同工件、不同工艺的加工需求。高速主轴技术研发:将本研究的优化方案拓展至高转速主轴(12000~20000rpm)设计,通过采用陶瓷轴承、油雾润滑、永磁同步主轴电机、碳纤维主轴本体等技术,突破高速主轴的温升与振摆瓶颈,满足精密加工、微加工的高转速需求。结合能量回收+变频调速+轻量化设计技术,对主轴电机的能量消耗进行优化,回收高转速制动时的再生能量,实现能源的循环利用;对主轴箱、带轮等部件进行轻量化设计,降低运动惯量,进一步提升动态响应性,推动数控机床的绿色化、节能化发展。

研究表明,通过新技术融合+全维度协同优化,可实现传统数控机床主轴系统的性能跃升,无需依赖昂贵的进口设备,即可满足现代智能制造的高精度、高稳定性需求。该研究成果不仅为数控机床核心部件的创新设计提供了新路径,也为我国装备制造业的自主创新与产业化发展提供了有力支撑。

[参考文献]

- [1]廉元国,张永洪.加工中心设计与应用[M].北京:机械工业出版社,1995.
- [2]马青芬.高速立式加工中心床身结构动态设计[J].机械

制造与自动化,2011,40(4):19-21.

[3]廖效果,朱启速.数字控制机床[M].武汉:华中理工大学出版社,1992.

[4]王平江,陈吉红.数控机床在线监测与故障诊断技术[M].北京:科学出版社,2021.

[5]李斌,李鹏.数控伺服系统动态补偿技术及应用[M].北京:机械工业出版社,2019.

[6]濮良贵,纪名刚.机械设计(第9版)[M].北京:高等教育出版社,2013.

[7]闻邦椿.机械设计手册(第6版)[M].北京:机械工业出版社,2020.

[8]王先逵.机械制造工艺学(第4版)[M].北京:机械工业出版社,2020.

[9]张福润.滚动轴承应用技术手册 [M].北京:机械工业出版社,2018.

[10]刘鸿文.材料力学(第6版)[M].北京:高等教育出版社,2017.

[11]谢红.数控机床机器人机械系统设计指导[M].上海:同济大学出版社,2004.

[12]ANSYS Inc. ANSYS Workbench 19.0 有限元分析从入门到精通[M].北京:机械工业出版社,2018.

作者简介:盛润(1981.12—),男,汉族,辽宁沈阳人,本科,毕业于东北大学,研究方向:机械工程及自动化;吴尘(1988.5—),男,锡伯族,辽宁沈阳人,本科(双学士学位),毕业于辽宁工程技术大学,研究方向:机械工程及自动化。