

数控机床机械结构优化设计探讨

杨嘉俊 魏亮

巨冈精工(宁夏)有限公司 宁夏 银川 750000

摘要: 本文聚焦数控机床机械结构优化设计。阐述机械结构组成与特点,包括主要部件及高刚性、热稳定性等特性。介绍功能优先、精度保持等优化设计原则,以及拓扑、尺寸等优化方法。针对主轴、进给传动系统、床身与立柱等关键部件提出优化设计策略。旨在提升数控机床性能,满足高速、高精度加工需求,增强产品市场竞争力。

关键词: 数控机床;机械结构优化;优化原则;拓扑优化;关键部件优化

引言:在制造业升级转型背景下,数控机床作为核心装备,对提升生产效率与产品质量至关重要。机械结构作为数控机床的基础,其性能直接影响机床的加工精度、稳定性及可靠性。当前,高速、高精度加工需求增长,对数控机床机械结构提出更高要求。因此,开展数控机床机械结构优化设计研究,探索有效的优化原则与方法,对提升机床性能、推动制造业发展具有重要意义。

1 数控机床机械结构组成与特点

1.1 主要组成部分

基础部件包含床身、立柱,作为机床支撑框架,承受自身、工件重量及切削载荷,需保障足够刚性以避免受力变形,为其他部件提供稳定安装基准,是机床稳定运行的基础。主传动系统由主轴电机、传动装置构成,负责实现主轴主运动,将电机动力传递至主轴以带动工件或刀具旋转,需精准控制传动效率、减少误差,确保主轴按加工需求平稳调节转速,适配不同材料与工艺^[1]。进给传动系统含伺服电机、滚珠丝杠,完成各坐标方向进给运动。伺服电机提供动力,滚珠丝杠将旋转运动转为直线运动,需保障运动平顺性,减少反向间隙与滞后,直接影响零件加工尺寸精度。自动换刀装置为加工中心配置,含刀库与换刀机械手。刀库存储刀具,机械手实现快速换刀,需优化换刀路径与衔接以缩短时间,保证刀具定位精度,满足复杂零件多工序连续加工需求。辅助装置涵盖润滑、冷却、排屑系统。润滑系统减少部件摩擦损耗,冷却系统带走切削热量以降低热变形影响,排屑系统清除切屑,共同保障机床长期稳定运行。

1.2 结构特点

高刚性与抗振性是核心特点。为满足高速、高精度加工,机床结构需足够刚性以抵抗切削力、夹紧力变形,避免加工误差;需良好抗振性,减少切削振动,防止影响加工表面质量与刀具寿命,确保加工稳定。热稳定性需重点考量。机床运行时,电机、切削会产热导致

结构热变形,影响精度。设计中需优化热源布局、设置散热通道、采用热对称结构,减少热变形对精度的干扰,保障不同工作时长下的精度稳定。轻量化与紧凑性显著。在保证强度与刚性的前提下,通过优化结构、选用轻质材料降低运动部件惯性,提升动态响应速度;紧凑设计减少机床占地,适配不同车间布局,提升空间利用效率。

2 数控机床机械结构优化设计原则

2.1 功能优先原则

功能优先原则要求优化后的结构紧密贴合数控机床的核心加工需求,不偏离机床既定的功能定位。设计过程中需优先明确机床的加工范围、精度等级、负载能力等基础性能指标,确保结构优化不会对这些核心功能产生负面影响。例如针对铣削类机床,需保障优化后的床身与主轴系统仍能承受铣削过程中的切削力,维持稳定的切削运动;针对车削类机床,需确保进给传动系统优化后仍能实现精准的轴向与径向进给,满足不同工件的车削加工需求。通过功能导向的结构调整,让优化设计服务于机床加工能力的提升,而非单纯追求结构形式的改变。

2.2 精度保持原则

精度保持原则以提升与稳定机床加工精度为核心目标,从结构层面减少精度损失因素。优化设计需重点关注结构刚性、受力变形、热变形等对精度的影响,通过合理的结构布局与材料选择,降低外部因素对精度的干扰^[2]。例如在主轴系统优化中,通过改进轴承支撑结构减少主轴径向跳动与轴向窜动;在床身设计中,通过优化筋板布局降低切削力导致的床身形变,避免因结构形变传递至加工部件影响精度。同时,需考虑结构长期使用中的精度稳定性,减少因磨损、疲劳等因素导致的精度衰减,确保机床在长期运行中仍能维持较高的加工精度水平。

2.3 动态性能优化原则

动态性能优化原则聚焦机床在高速加工场景下的动态表现,通过结构调整提升机床应对动态载荷的能力。设计中需注重提高机床结构的固有频率,避免加工过程中出现共振现象,减少振动对加工精度与表面质量的影响;通过优化运动部件的质量分布与连接方式,降低振动幅度,提升机床运行的平稳性。例如在进给系统优化中,通过轻量化设计降低运动部件惯性,提升系统响应速度,减少高速运动时的冲击与振动;在主轴箱设计中,通过增强箱体刚性与合理布置减振结构,削弱切削振动的传递。这些调整让机床能更好适配高速加工需求,在提升加工效率的同时保障加工质量。

2.4 可靠性与可维护性原则

可靠性与可维护性原则要求优化后的结构具备稳定的工作能力,同时降低后续维护难度与成本。结构设计需考虑零部件的受力合理性与材料耐久性,避免因局部应力集中或材料疲劳导致的结构失效,确保机床在规定工况与时间内稳定完成加工任务。在可维护性方面,需优化结构的拆装便利性,例如在关键部件设计中预留足够的维修空间,采用模块化连接方式便于零部件更换;同时简化润滑、冷却等系统的维护流程,减少维护操作对机床正常运行的影响。通过可靠性与可维护性的双重保障,延长机床使用寿命,降低停机维修带来的生产损失。

2.5 经济性原则

经济性原则需在满足机床性能要求的前提下,实现结构设计的成本优化。材料选择上,根据结构不同部位的功能需求选用适配材料,避免过度追求高性能材料导致成本浪费,例如非关键受力部件可选用性价比更高的普通钢材,关键承重部件则采用高强度合金材料;制造工艺上,优先选择成熟、高效的加工工艺,减少复杂工艺带来的成本增加,例如通过优化结构形状简化铸造或焊接工序,降低加工难度与工时消耗。同时,需考虑结构的批量生产适应性,通过标准化设计减少零部件种类,提升生产效率。这些措施在保障机床性能的基础上,有效控制制造成本,增强产品在市场中的竞争力。

3 数控机床机械结构优化设计方法

3.1 拓扑优化方法

拓扑优化方法的基本概念是在给定的设计空间内,依据预设的性能目标与约束条件,通过算法优化材料在空间中的分布状态,实现结构性能最优且材料用量最合理的设计效果。该方法无需依赖经验预设结构形式,能从本质上改善结构受力合理性,剔除冗余材料区域,强化关键受力部位。在数控机床中的应用需针对核心部件

特性展开^[3]。对于床身、立柱等基础部件,可通过拓扑优化在满足刚性要求的前提下,调整内部筋板的分布密度与走向,减少非关键区域材料用量,实现轻量化设计;针对主轴箱等承载与运动兼具的部件,拓扑优化能结合主轴工作时的受力特点,优化箱体壁厚与内部支撑结构,在降低整体重量的同时提升结构刚性,减少主轴运转时的振动传递,为加工精度提供保障。

3.2 尺寸优化方法

尺寸优化方法的原理是在结构拓扑形式与整体形状已确定的基础上,以结构的尺寸参数(如构件厚度、截面尺寸、部件间距等)为优化对象,结合性能要求(如刚性、强度、振动特性等)建立优化模型,通过迭代计算确定最优尺寸组合。该方法聚焦结构细节参数调整,能在不改变整体布局的前提下精准提升结构性能。应用场景需贴合数控机床关键部件的设计需求。在滚珠丝杠选型与设计,可通过尺寸优化调整丝杠直径、导程及支撑轴承型号,确保丝杠在承受额定载荷时形变最小,提升进给传动精度;对于主轴支撑结构,尺寸优化可用于调整轴承安装座的壁厚、螺栓连接的规格与间距,增强支撑刚度,减少主轴径向跳动;在导轨滑块设计中,优化滑块截面尺寸与接触面积,能在保证承载能力的同时降低运动摩擦,提升进给系统的可靠性与使用寿命。

3.3 形状优化方法

形状优化方法的概念是通过调整结构的外形轮廓、曲面形态或局部细节形状,改善结构表面的应力分布状态,减少应力集中区域,提升结构的强度、刚度与抗疲劳性能。该方法注重结构外观与受力特性的适配,能通过细微的形状调整解决局部结构薄弱问题。在数控机床结构设计中,针对立柱与横梁的连接部位,可通过形状优化将直角连接改为圆弧过渡或渐变截面,降低该区域的应力集中程度,避免长期受力导致的结构疲劳损坏;对于主轴前端的刀具夹持部位,优化其内壁锥度与端面平整度,能增强与刀具的贴合度,减少夹持误差;在床身的导轨安装面设计中,通过形状优化调整导轨贴合面的平面度与边缘倒角,可提升导轨安装精度,减少运动时的摩擦阻力与振动,保障进给系统的平稳运行。

3.4 多学科优化方法

多学科优化方法的内涵是打破单一学科设计的局限性,综合考虑机械结构、控制系统、热力学等多个学科的设计需求与约束条件,建立多目标优化模型,通过协同计算实现各学科性能的平衡与机床整体性能的最优。该方法能识别不同学科间的耦合关系,避免单一优化导致的其他性能损耗。其优势在数控机床设计中尤为

突出。在主轴系统优化中，多学科优化可同时兼顾机械结构的刚性要求、电机的散热需求与控制系统的响应速度，通过调整主轴直径、电机安装位置与控制参数，解决刚性提升与散热不足、响应延迟的矛盾；在整机设计中，综合考虑结构轻量化（机械学科）、加工精度（控制学科）与热变形抑制（热力学学科），优化床身材料选择、热源布局与冷却系统设计，实现轻量化、高精度与低热变形的协同，大幅提升机床的综合加工性能，满足复杂工况下的加工需求。

4 数控机床关键部件机械结构优化设计

4.1 主轴部件优化设计

主轴刚性与强度优化需结合材料选择与内部结构。根据工作载荷与转速，选用高强度合金钢材或复合材料以减少切削力形变；采用中空结构在保证刚性的同时降低重量、减少惯性，中空通道还可用于冷却液输送或刀具更换机构安装^[4]。部分主轴通过内部加强筋或阶梯式结构，强化关键受力区域，避免长期高负荷下的结构疲劳。主轴动态性能优化聚焦轴承配置与预紧力调整。采用角接触球轴承或圆锥滚子轴承组合，通过背对背、面对面等排列方式提升径向与轴向刚度，减少运转时的跳动与窜动；根据转速与负载设定合适预紧力，避免过紧导致摩擦发热、过松降低刚性，以此提高主轴固有频率，抑制高速振动，保障动态稳定性。

4.2 进给传动系统优化设计

滚珠丝杠副优化需围绕精度、刚性与使用寿命展开。精度等级选择需匹配机床的加工精度要求，高精度滚珠丝杠可减少传动误差，提升进给定位精度；导程选择需结合加工效率与精度需求，大导程丝杠适合高速进给场景，小导程丝杠则更利于精准微量进给；预紧方式可采用双螺母预紧或单螺母变位导程预紧，通过合理预紧消除丝杠与螺母间的间隙，提高进给传动刚性，避免反向运动时的空行程误差，确保进给运动的平稳性与准确性。伺服电机与传动装置匹配优化需结合机床负载特性综合考量。伺服电机选择需根据进给系统的最大负载、加速需求计算所需功率与扭矩，确保电机输出动力能满足机床在不同加工工况下的运动需求，避免电机过载或动力不足；传动装置传动比优化需平衡进给速度与扭矩传递效率，通过调整齿轮箱或同步带轮的传动比，

使伺服电机的输出转速与扭矩能高效转化为进给运动，减少传动过程中的能量损耗，实现进给系统的高效传动，提升机床的进给响应速度与运动精度。

4.3 床身与立柱优化设计

结构布局优化是提升床身与立柱刚性的关键手段。内部筋板布局需根据床身与立柱的受力特点设计，对于床身，可采用交叉式、井字形或蜂窝状筋板结构，增强床身的抗弯与抗扭刚度，减少切削力导致的床身形变；立柱结构优化可采用框架式或箱式筋板布局，强化立柱在承受主轴切削力时的稳定性，避免立柱出现弯曲或扭转。筋板的厚度与间距需合理设计，过密会增加结构重量，过疏则无法有效提升刚性，通过优化布局可在轻量化前提下实现刚性最大化。材料选择与热处理优化需兼顾性能与成本。材料选择上，铸铁材料具备良好的减振性与铸造性能，适合制作床身与立柱基础结构；钢材焊接结构则便于实现复杂形状，且强度较高，适合大型数控机床部件。热处理工艺需根据材料特性制定，铸铁件可通过时效处理消除内应力，减少加工后变形；钢材则可通过调质处理提升材料的综合力学性能，增强强度与硬度，降低长期使用中的变形风险，确保床身与立柱长期保持稳定的结构精度。

结束语

数控机床机械结构优化设计是提升机床性能的关键途径。通过明确优化设计原则，综合运用多种优化方法，针对关键部件进行针对性优化，能够有效提高机床的刚性、精度、动态性能等，满足复杂加工需求。未来，随着技术发展，需进一步探索创新优化策略，推动数控机床机械结构优化设计向更高水平迈进，为制造业发展提供更有力的装备支撑。

参考文献

- [1]张中海.互联网背景下数控机床机械结构设计及优化措施[J].造纸装备及材料,2023,52(11):52-54.
- [2]韩志勇.数控机床机械结构设计和制造技术优化[J].中国金属通报,2023(6):102-104.
- [3]连俊茂,吴琼,杜成龙.数控机床机械结构设计与制造技术的研究探讨[J].科学与财富,2024(23):25-27.
- [4]王明,尹秀铭,陈廷卫.数控机床加工精度优化措施研究[J].现代制造技术与装备,2025,61(4):175-177.