

Discussion on mechanical structure design and manufacturing technology optimization of CNC machine tool

Xiangdong Cao

General Technology Group Shenyang Machine Tool Co., Ltd., Shenyang, Liaoning, 110000, China

Abstract

The mechanical structure design and manufacturing technology of CNC machine tools is the key to the performance and reliability of machine tools. This paper expounds the basic principles and common methods of the mechanical structure design of CNC machine tool, and then analyzes the key points in the design, including the transmission system, spindle system, guide rail system and the overall layout of the machine tool. On this basis, put forward the vigorously promote modular design method, actively adopt new materials and new technology, strengthening precision detection and compensation technology and attaches great importance to the reliability design and verification countermeasures and Suggestions, aims to further enhance the technical level of CNC machine tool reference, and promote the CNC machine tool to high-grade, precision, intelligent, green manufacturing direction, provide strong support for the transformation and upgrading of manufacturing industry.

Keywords

CNC machine tool; mechanical structure; manufacturing technology; optimization countermeasures

数控机床机械结构设计和制造技术优化探讨

曹向东

通用技术集团沈阳机床有限责任公司, 中国·辽宁 沈阳 110000

摘要

数控机床的机械结构设计和制造技术是机床性能和可靠性的关键。文章阐述了数控机床机械结构设计的基本原则和常用方法, 然后重点分析了设计中需要注意的几个要点, 包括传动系统、主轴系统、导轨系统和机床整体布局。在此基础上, 提出了大力推广模块化设计方法、积极采用新材料新工艺、强化精度检测和补偿技术以及重视可靠性设计与验证等对策建议, 旨在为进一步提升我国数控机床的技术水平提供参考, 进而推进我国数控机床向高档、精密、智能、绿色制造方向发展, 为制造业转型升级提供有力支撑。

关键词

数控机床; 机械结构; 制造技术; 优化对策

1 引言

数控机床作为现代制造业的重要基础装备, 其性能水平直接影响制造业的发展质量。近年来, 随着我国工业化、信息化进程不断加快, 对高性能、高可靠性数控机床的需求日益增长。机械结构设计和制造技术作为保证数控机床性能和可靠性的关键因素, 也备受业界关注。因此, 系统分析数控机床机械结构设计和制造技术优化的原则、方法和对策, 对于指导数控机床的研发实践具有重要意义。

2 数控机床机械结构设计原则与方法

2.1 设计原则

数控机床的机械结构设计需要遵循一系列基本原则,

以确保机床具有优异的性能和可靠性。首先, 设计必须满足机床的功能要求, 如工作行程、转速范围、进给速度等, 同时要充分考虑工件装夹、上下料及切屑排除等实际工况需求。其次, 保证机床精度的稳定性是设计的核心目标之一。设计人员需要通过合理布局结构、优化尺寸配置和选用高品质材料等措施, 最大限度地减少机床在受力和温度变化下产生的变形, 从而避免加工精度的损失。再者, 设计中应采取各种方法提高机床整机及关键部件的刚性, 避免共振的发生。优化传动链设计, 改善机床的动态响应, 对于提升加工质量至关重要。设计还需在满足性能要求的前提下, 最大限度地采用标准件和通用件, 减少加工难度大的异形零件。最后, 先进的设计理念要与成本控制相平衡, 以保证机床具有市场竞争力。选用物美价廉的材料和元器件, 优化加工工艺, 在节约成本的同时还要实现节能环保。

【作者简介】曹向东(1984-), 男, 中国辽宁沈阳人, 本科, 助理工程师, 从事机床设计与制造研究。

2.2 设计方法

常用的设计方法有参数化设计、模块化设计、拓扑优化设计和可靠性设计等。参数化设计是一种基于产品参数驱动的设计方法。设计人员首先确定机床的关键性能参数和尺寸规格，然后通过计算和优选确定机构方案，再生成三维模型和工程图。该方法可大幅度减少重复劳动，缩短开发周期，特别适用于成熟度高的常规机型设计。模块化设计则是将复杂的机床系统划分为若干功能和制造工艺相对独立的模块，在模块内部进行标准化设计，最后通过预定义接口将模块组合成整机。这种方法使得设计任务系统化、简单化，有利于实现产品族的快速衍生和定制。拓扑优化设计是借助数学模型和优化算法，在约束条件下寻求最优的结构布局形式。可用于实现机床的轻量化设计，在保证强度和刚度的前提下最大限度地减少材料用量，在节约成本的同时改善机床动态性能。拓扑优化设计在大型铸件和焊件的设计中应用日益广泛。可靠性设计强调在设计各个环节引入可靠性分析和控制措施，从源头上提高机床的可靠性水平。常用的方法有失效模式和影响分析（FMEA）、故障树分析（FTA）、可靠性预计等。通过对设计方案进行可靠性评估，识别潜在的薄弱环节，制定针对性地优化措施。在样机试制阶段，还需开展系统的可靠性试验，及早发现问题，持续改进设计。

3 数控机床机械结构设计和制造技术优化要点分析

数控机床机械结构设计和制造技术优化是一项复杂的系统工程，涉及诸多关键要素。设计人员需要重点关注以下几个方面。一是传动系统的优化设计，设计中需要根据机床的类型和功率要求，合理选择齿轮传动、皮带传动或滚珠丝杠传动等方式，并重点提高传动系统的刚度和稳定性。二是主轴系统的设计，作为机床的“心脏”，主轴的转速、功率、刚度等参数决定了机床的切削能力。设计时需要综合考虑轴承配置、防尘防护、冷却润滑等，确保主轴在苛刻工况下能够稳定可靠地运行。三是导轨形式的选择要匹配机床的类型和性能要求，如重载型可选用滚动导轨或静压导轨，高速型可选用滚珠导轨或直线电机。优化导轨的布局和预紧力设计，对提高机床精度至关重要。四是重点强化核心零部件如床身、立柱等的加工精度控制，合理应用铸造、焊接、热处理等工艺，最大限度地消除应力变形。

4 数控机床机械结构设计和制造技术优化的路径探索

4.1 大力推广模块化设计方法

在数控机床行业日益走向数字化、智能化的大背景下，传统的设计和制造模式已经难以适应市场对产品多样化、个性化、快速化的要求。大力推广模块化设计方法，已成为机床企业提升核心竞争力、实现柔性高效生产的必由之路。在数控机床的设计环节，可以将传动系统、主轴系统、导轨系

统、电控系统、安全防护等划分为独立的功能模块，在每个模块内部进行参数化、系列化设计^[1]。例如，在主轴系统的设计中，可以根据不同的功率和转速需求，开发出一系列标准化的主轴单元，包括电主轴、锥度主轴等，每个单元都有统一的安装接口和尺寸规格。就制造和装配环节，模块化生产可以实现标准件的批量化制造，减少加工工序，降低生产成本。如将机床的底座、立柱等结构件设计为标准的铸件模块，采用专用的加工单元进行批量生产。同时，将主轴、刀库、换刀机构等关键功能部件设计为独立的装配单元，在专门的装配线上进行预装和测试，再与机床主体进行集成。模块化设计还有利于产品的在役维护和升级换代。通过合理的模块划分和接口设计，可以实现故障部件的快速诊断和更换，缩短停机时间。当市场需求或技术水平发生变化时，只需对特定的功能模块进行升级或替换，而不需要对整机进行大规模的改动，从而大大延长了产品的使用寿命，降低了用户的使用成本。

4.2 积极采用新材料新工艺

在数控机床的设计和制造中，新材料和新工艺的应用可以说是一个重要的突破口，对于提升机床的性能水平、拓展应用领域具有重要意义。一方面，高强度、高刚性、耐磨损的新型材料可以显著改善机床的动态特性和使用寿命。设计人员应积极追踪材料领域的前沿进展，重点关注高性能合金、复合材料、陶瓷材料等在机床关键功能部件中的应用潜力。例如，采用碳纤维复合材料制造机床导轨，可以大幅降低导轨的动态质量，提高机床的运动速度和加速度，同时还具有良好的减震抑振性能。另一方面，先进的加工制造工艺可以突破传统工艺的瓶颈，实现机床零部件的复杂化、精密化制造^[2]。数控机床生产企业应重点布局增材制造、激光加工、超精密加工等前沿工艺技术，探索其在机床领域的创新应用。例如，采用激光熔覆技术对机床导轨表面进行强化处理，可以显著提高导轨的耐磨性和抗腐蚀性，延长使用寿命。采用3D打印技术制造复杂结构件，可以实现传统工艺难以加工的内部复杂流道和轻量化结构，在降低零件重量的同时提高其性能。此外，材料与工艺的协同创新也是优化数控机床性能的重要路径。设计人员应充分考虑新材料的加工工艺特性，优化零部件的结构设计，实现材料性能的充分发挥。加工工艺的改进和优化也可以扩大新材料的应用范围，突破传统材料的使用局限。例如，采用超声辅助加工、热辅助加工等复合加工工艺，可以显著改善难加工材料的切削性能，提高加工效率和表面质量。

4.3 强化精度检测和补偿技术

在数控机床的精度保障体系中，精度检测和补偿技术可以说是两项最为关键的支撑技术。一则，精度检测是精度控制和改进的基础，只有全面、准确地掌握机床各项误差的来源和规律，才能有针对性地制定优化措施。设计和制造企业应大力强化精度检测技术的研发和应用，建立完善的精度

检测规范和方法体系。例如,采用激光干涉仪、电子水平仪等高精度测量仪器,对机床进行全方位的几何精度测量,并采用球杆仪、R-Test等测量系统测试机床在实际加工过程中的综合误差。在数据处理方面,可以运用机器学习等智能算法,对海量的测量数据进行挖掘分析,准确建立机床误差模型^[3-4]。二则,在获得机床误差规律的基础上,精度补偿技术可以通过主动调节和反馈控制,实时修正机床运动误差,从而显著提升机床的加工精度。数控系统是实现精度补偿的重要载体,设计人员应充分发挥数控系统的软件算法优势,在控制器中集成先进的误差补偿模型和控制策略。例如,针对机床导轨的几何误差,可以采用空间误差补偿技术,通过软件建立机床坐标系与工件坐标系的数学映射关系,实时修正刀具的空间位置坐标。针对主轴热变形引起的刀尖位置漂移,可以采用基于温度场的热误差补偿技术,通过传感器实时采集主轴的温度信号,根据热变形模型动态调整刀尖轨迹,实现纳米级的补偿精度。此外,精度检测与补偿技术的融合创新,也是提升数控机床精度性能的重要方向。设计人员应积极探索在线测量、实时补偿等新型技术,突破传统“测—补—测”的离线补偿模式。如在机床主轴上集成高分辨率编码器,实时测量主轴的角度位置信息,通过闭环控制实现实时补偿。在机床进给轴上集成激光位移传感器,对导轨的实际运动轨迹进行在线测量,通过前馈控制修正进给指令,实现动态跟踪误差的抑制。

4.4 重视可靠性设计与验证

在数控机床领域,确保设备能长期稳定运行的关键所在,便是其可靠性设计与验证环节。此环节贯穿于机床从研发到制造的整个生命周期当中,涵盖了从最初的概念设计一直到最终验证的各个不同阶段,对产品的市场竞争力以及用户满意度有着直接的影响作用。就可靠性设计而言,设计人员可运用故障模式与影响分析(FMEA)的方法,对传动系统、主轴系统、导轨系统等这些关键部件潜在的失效模式予以系统的识别,同时对其严重度、发生频率以及检测难度展开评估,进而制定出具有针对性的预防举措^[5-6]。比如针对主轴轴承这一关键部件,借助FMEA分析能够识别出在高

速运转状况下所出现的温升以及润滑不足等问题,随后在设计环节采用经过优化的冷却通道布局以及自动润滑系统。提高机床可靠性的核心要点在于加强对关键零部件的选型与设计工作。对于像轴承、丝杠、伺服电机等这类对机床可靠性存在影响的关键零部件,应当建立起严格的选型标准以及验证流程。验证设计有效性的重要方式是建立起完善的可靠性试验体系。结合数控机床自身的特点,可以构建起包含加速寿命试验、极限工况试验以及环境适应性试验等在内的综合验证方案。比如能够设计连续切削试验,让其在最大功率以及最高转速的条件下持续运行,以此来模拟在极端使用情形下的性能表现;或者是通过开展温度循环试验,对机床在不同环境温度下的几何精度稳定性以及热变形补偿效果加以验证。

5 结语

数控机床的高性能高可靠性离不开先进的机械结构设计和精益求精的制造工艺。设计人员需要在深入理解机床功能要求的基础上,综合运用各种设计方法和手段,重点做好传动、主轴、导轨系统的设计和优化,合理进行整机布局。在制造环节应大力推广模块化设计、新材料新工艺应用,强化加工精度控制和可靠性验证,不断提升我国数控机床的综合性能,为制造业转型升级提供有力支撑。

参考文献

- [1] 朱士云,仲小敏.数控机床机械结构设计和制造技术优化[J].中国金属报,2021,(09):72-73.
- [2] 连亚宣.数控机床机械结构设计和制造技术优化[J].内燃机与配件,2021,(04):157-158.
- [3] 安红卫,朱健.数控机床机械结构设计和制造技术优化[J].内燃机与配件,2021,(03):75-77.
- [4] 王冠.数控机床机械结构设计和制造技术的创新研究[J].内燃机与配件,2021,(03):71-72.
- [5] 杨文龙.数控机床机械结构设计和制造技术的创新研究[J].内燃机与配件,2020,(11):102-103.
- [6] 张文甲.试论数控机床上下料机械手的机械结构设计[J].设备管理与维修,2021,(22):82-84.