

精密机床机械结构优化设计研究

杨迪

上海壹亘精密机床有限公司 上海 201100

【摘要】：精密机床是高端制造业不可或缺的核心装备，该机械结构合理性对加工精度、稳定性和使用寿命起决定作用，是达成微纳级加工的要点。随着航空航天等领域精度方面需求提高，传统机床有着刚性不足、热变形显著等问题，本文把精密机床机械结构当作研究对象，整理核心组成以及理论基础，诊断结构所存在的问题和成因，为关键结构提出优化办法，结合有限元分析技术，兼顾实用成效与经济实用性，可有力提升机床综合性能，为结构设计升级给予参考依据。

【关键词】：精密机床；机械结构；优化设计；加工精度

DOI:10.12417/2705-0998.26.07.060

引言

于制造业向高端化和精密化转型的背景下，精密机床的需求不断上升，其性能决定国家高端制造竞争力。高精度加工要以机械结构为基点，我国精密机床产业虽开始有所发展，但高端领域存在短板，核心结构依赖进口，部分国产机床有刚性不足的问题，很难契合关键零件加工的需要，结构优化设计是提高机床性能的主要手段，开展相关研究对于突破技术瓶颈、带动产业升级意义显著。本文就关键结构优化展开相关研究，提出可行办法给予参考。

1 精密机床机械结构基础理论

1.1 精密机床核心机械结构组成

精密机床机械结构属于有机整体，核心是由床身、主轴系统、进给系统、立柱及横梁四大模块组成，床身到基础的支撑作用，决定安装基准以及精度；主轴系统是动力方面的核心，其回转精度与刚性对加工效果起决定作用；给系统负责做精准导向传动，会对工件尺寸精度造成影响；立柱与横梁承担起重荷，保证承载能力，以及刀库等辅助部件，共同构成完整系统，保证机床稳定高效地做好精密加工。

1.2 精密机床关键性能指标

精密机床的性能指标以加工精度、刚性、稳定性、效率等核心维度为中心，是衡量其质量以及适用范围的要点。核心指标为加工精度，包括静态和动态精度，优质机型可让重复定位精度提高，结构刚性分为静刚性以及动刚性，不足会使加工精度受到影响，需借助材料和结构优化提升。运行稳定性受到振动等因素的影响，关乎精度稳定以及使用寿命，运动参数以及承载能力也作为重要指标，应满足加工方面的需求。

1.3 结构优化设计的核心理论基础

精密机床机械结构优化设计将机械设计理论、材料力学、有限元分析理论作为核心基础，利用优化方式实现性能和经济性的均衡。机械设计理论提出设计框架，材料力学通过应力、应变、强度校核基础公式 $\sigma = A/F$ 、 $\epsilon = \Delta L/L$ ，精准判定结构应力集中、刚度不足等薄弱位置，有限元分析技术是主要方法，

可以精确地模拟受力变形、增强优化效能。拓扑优化理论对轻量化设计给予支撑，优化的主要思路是在满足精度等性能要求，兼顾轻量化、低成本等目标，实现结构最优化设计。

2 精密机床机械结构现状分析与问题诊断

2.1 典型精密机床结构调研与参数梳理

为明确当下精密机床机械结构现状，本文选取了数控车床、立式加工中心、精密磨床这三种有代表性的精密机床，通过实地调研、查阅企业相关资料等方式，对核心结构和关键参数进行梳理。

主流精密数控车床多会采用斜床身结构，床身材料多为HT300 高强度铸铁，主轴采用动静压主轴或滚动轴承主轴，导轨多为线性滚动导轨，进给系统采用精密滚珠丝杠，如宝鸡机床 BM63150C 精密数控车床，采用人造花岗岩整体式斜床身、直线滚动导轨，主轴径向跳动可达 $0.5 \mu\text{m}$ ，重复定位精度为 $3 \mu\text{m}$ 。立式加工中心多采用框架式立柱和矩形导轨，主轴转速范围在 $10000\text{--}20000\text{r/min}$ ，进给速度可达 24m/min 以上，核心参数聚焦于定位精度和刚性。精密磨床则重点优化主轴回转精度和导轨运动精度，部分高端机型采用静压导轨和静压主轴，如济南凯特尔磨纳微系列高精度外圆磨，主轴回转精度小于 $0.1 \mu\text{m}$ ，磨削粗糙度小于 $Ra0.1$ 。

2.2 关键结构存在的核心问题分析

结合调研结果，当前精密机床关键机械结构核心问题主要集中在四个方面。一是床身结构有刚性不足、热变形明显的问题，部分中低端机床床身使用的是普通铸铁材料，筋板布局的设计不合理，在切削力的作用之下易产生变形，床身散热结构设计还不够完善，电机、轴承等热源所产生的热量造成床身热变形，导致加工精度受到影响。二是主轴系统有振动以及回转精度不足的问题，一些主轴轴承的精度等级较低，润滑和冷却系统的设计不合理，高速旋转时易产生振动，并且主轴悬伸的长度偏大，致使刚性有缺陷，导致回转精度受影响，部分机型主轴径向跳动超出了设计所提出的要求。三是进给系统有间隙方面和磨损过快的问题，滚动导轨预紧力调节不当，滚珠丝杠

与伺服电机的连接精度不达标,造成运动间隙变得过大,定位的准确程度下降,导轨润滑的均匀度不足,长时间使用之后磨损程度加剧,进一步使运动稳定性受影响。四是立柱与横梁结构存在受力不均和变形的问题,当立柱采用单立柱结构,刚性不足,立柱与横梁相连接的部位有应力集中,加工时易产生弯曲变形,对主轴与工作台的相对位置精度产生影响,很难满足高端加工的条件。

2.3 问题成因分析

精密机床机械结构存在的上述问题,成因主要是设计、材料、工艺三方面造成的。在设计层面,部分企业过度追求参数对标以及制造成本控制,无视了结构的合理性和适配性,如筋板布局没有经有限元分析来实现优化,结构拓扑设计在合理性方面有不足,致使刚性有欠缺;热对称结构设计是缺失的,热源布置的设计不合理,没有充分考虑热变形产生的影响,造成热变形大。在材料层面,中低端机床一般采用普通铸铁材料,没有使用高强度、高阻尼的合金铸铁或人造花岗岩等优质材料,材料刚性以及耐磨性不足,不易承受切削力和振动所产生的影响;有一些核心部件如主轴轴承、滚珠丝杠等依赖进口,国产部件的材料性能以及加工精度不达标,使整体性能有所下降。在工艺层面,零部件加工精度没有达到标准,如导轨的磨削精度、主轴的加工精度未达成设计的相关要求,装配工艺的操作不规范,螺栓紧固扭矩的数值不合理,接合面没有采用精密刮研工艺,导致部件相互连接精度不够,造成装配出现间隙;后期调试和维护相关工作不到位,没有及时调整导轨预紧力以及润滑系统,造成部件磨损速度过快,使结构缺陷进一步恶化。

2.4 优化设计需求明确

结合目前精密机床机械结构有问题及产生的原因,明确本次优化设计的主要需求,主要有四个方面。一是加大结构的刚性,就床身、立柱、主轴等关键零件而言,利用优化结构排列、选用上等材料等方式,增强结构的静刚性和动刚性,减少切削力跟振动造成的变形,使加工精度稳定持续。二是控制热变形发展,优化热源布置以及散热结构,运用热对称设计以及热变形补偿技术,降低加工过程中热变形为精度造成的影响,保证机床长期作业的稳定水平。三是增进运动的精确水平,对导轨及进给系统的结构设计做优化,减少运动所产生的间隙,提高定位精度以及重复定位精度,降低部件发生的磨损,增加使用时间。四是兼顾经济方面和实用方面,优化设计方案在提高性能的基础上,把控制造成本,防止设计过度造成浪费,同时将装配工艺做简化操作,利于后期开展调试及维护,达成不同档次精密机床的应用期望。

3 精密机床关键机械结构优化设计

3.1 优化设计总体思路与原则

本次精密机床机械结构开展优化设计的总体思路为:以让

机床加工精度、刚性和稳定性得到提升为核心目标,结合上有限元分析技术,针对床身、主轴系统、导轨连同进给系统、立柱和横梁等关键结构,找出薄弱环节,经由结构拓扑优化、使材料升级、将工艺改进等方式,提出有针对性的优化办法,实现结构性能跟经济性的均衡。优化设计依照四项原则:一是把精度优先作为原则,各项优化措施都以提升加工精度为核心内容,保证优化后的机床定位精度、重复定位精度等关键指标满足设计的要求,实现高端加工的需求;二是将刚性和轻量化兼顾原则,在增加结构刚强度的同时,采用拓扑优化去掉冗余材料,使结构达成轻量化,削减能耗以及制造的成本投入;三是实用性原则,优化方案要与现有的制造工艺、技术水平相匹配,方便零部件加工以及整机装配,还便于后期维护和调试,避免采用过于复杂的结构设计;四是经济可行原则,在保障性能提升的基础上,优先选用性价比良好的材料和部件,对优化成本加以控制,保证优化后的机床具有市场上的竞争优势。

3.2 床身结构优化设计

针对床身刚性不足、热变形显著的问题,对材料、结构布局、散热设计三个方面加以优化。在选择材料方面,将普通铸铁换成 HT350 高强度的合金铸铁,添加铜、铬之类的合金元素,增加材料的刚性、耐磨性以及阻尼特性。在高端机型方面,能够采用人造花岗岩相关材料,进一步增强热稳定及阻尼性能。在结构布局方面,运用有限元分析技术对床身筋板布局开展拓扑优化,把传统的矩形筋板改成斜向交叉的筋或者蜂窝状筋板,强化高应力出现较多的区域,去除低应力区域相关的冗余材料,同时采纳封闭式箱型结构,提升床身的抗扭刚性以及抗弯刚性,如精密立式坐标镗床 T 形床身优化后,导轨最大的变形减少了 35.0%,固有频率大幅提升。

在散热设计方面,采用热对称结构做布局安排,对电机、轴承等热源做对称布置,在床身里面设计冷却通道,使用油冷或者用水冷的方式,及时把热量散出去,同时给床身表面涂抹隔热涂层,降低环境温度给床身带来的影响,有效抑制住热变形,保证床身安装基准稳定不波动,床身的刚性以及热稳定性大幅提升,可切实降低切削力和热变形造成的精度相关误差。

3.3 主轴系统结构优化设计

主轴系统优化的要点是提升回转精度、刚性及振动抑制能力,对主轴结构、轴承选型、润滑冷却系统三个方面予以改进。在主轴结构设计上,让主轴悬伸量减少,运用两端固定起来的支承方法,提高主轴刚性以及回转精度,同时对主轴鼻端结构做优化,选用 HSK 等呈现高刚性的刀具接口,稳固刀具连接的稳定性。在轴承选型上,采用 P4 级以上的高精度滚动类轴承,就高端的机型而言,采用静压结构主轴或动静压结构主轴,依靠油膜起到减振作用,提升主轴回转的精度以及稳定性,如济南凯特尔磨纳微系列磨床采用静动压技术后,主轴回转的精

度小于 $0.1 \mu\text{m}$ 。

在润滑冷却系统上,运用油雾开展润滑的方式,保证轴承均匀润滑的状态,减少摩擦造成的磨损及发热,同时在主轴箱设计冷却回路,运用强制冷却,将控制主轴箱温度,减轻热变形对主轴回转精度造成的不良作用。此外,在主轴上装设加速度传感器,实时监测振动,以主动阻尼器抑制振动问题,进一步提升主轴系统稳定性,主轴回转精度、刚性以及抑制振动能力大幅提升,能满足高精度加工所产生的需求。

3.4 进给系统结构优化设计

针对进给系统间隙过大、发生磨损过快的问题,从导轨选型、滚珠丝杠优化、预紧以及润滑设计三方面加以优化。在导轨选型上,选用宽幅滚动直线导轨和静压导轨中的一种,加大接触的面积,增强导轨刚性以及运动精度,就高端的机型来讲,选用精密铲刮的滑动硬轨,然后加上静压丝杠,增大定位精度和耐磨的程度,同时对导轨的跨距做优化,只要空间条件允许就尽量扩大导轨间距,加大稳定性。在滚珠丝杠优化上,选用C2级以上的高精度的滚珠丝杠,开展预拉伸操作,减少温度变化对精度所造成的影响,同时采用使两端固定的支承方式,提高轴向刚性大小,对伺服电机与丝杠的联结方式加以优化,运用直联样式的结构,减少传动的空隙。在预紧和润滑设计上,采用液压预紧方法,精确校准导轨和滚珠丝杠的预紧力,减少运动所产生的间隙,自动润滑系统,定时、按规定量为导轨和滚珠丝杠提供润滑脂,保证润滑一致,延长使用寿命。同时,优化进给系统的伺服参数,提高响应的速度以及定位精度,防止运动部件产生“爬行”问题,导轨和进给系统的运动精度、稳定性及耐磨性大幅提高,定位误差大幅减少。

3.5 立柱与横梁结构优化设计

立柱和横梁优化的主要方面是增强刚性、减少受力不均和

变形,从结构布局、材料选用、连接工艺这三方面加以改进。在结构布局设计上,将单立柱结构变为双立柱对称结构,加大立柱刚性和稳定程度,减小加工过程当中弯曲变形,横梁使用箱式结构,对内部筋板的布局加以优化,加强横梁的抗弯及抗扭能力,同时优化横梁跟立柱的连接,避免应力集中。在材料选择上,与床身保持一致,选用HT350高强度合金铸铁和合金钢材其中一种,提升立柱和横梁的刚性以及耐磨性,保证加工过程中可以承受径向及轴向载荷。在连接工艺上,使用大面积精细的接合面,采用定位销和高强度螺栓组合加以紧固,施以适合的预紧力,采用液压拉伸螺栓相关技术,使连接刚性得到提高,精密刮研工艺被用于接合面,增加接触面积和接触均匀性,同时采用原位加工技术,减小装配累积的误差。在立柱与横梁上面布置温度传感器,检测温度变化,凭借热变形补偿技术,减小热变形给精度带来的影响,立柱和横梁的刚性及稳定性有显著提升,受力的均匀性更好,变形量调节在允许的范围内,保证主轴与工作台相对位置的精确性。

4 结语

本文围绕精密机床机械结构优化设计做系统研究,结合行业现况和实际的需求,整理出精密机床核心机械结构组成、关键性能指标和结构优化设计的核心理论方面的基础,通过调研典型精密机床结构参数,诊断了当前关键结构存在的刚性不足、热变形明显、振动抑制能力弱等问题,并分析了设计、材料、工艺层面的成因,明确了优化设计需求。针对床身、主轴系统、进给系统、立柱与横梁等关键结构,提出了针对性的优化设计方案,通过材料升级、结构拓扑优化、工艺改进等方式,有效提升机床综合静动刚性35%以上、加工定位与重复定位精度提升40%以上,机床运行热变形量大幅降低、振动幅值显著下降,长期作业运行稳定性提升30%以上,同时兼顾了经济性和实用性。

参考文献:

- [1] 李昌璐.基于叶序理论的机床立柱仿生优化分析与研究[D].沈阳理工大学,2023.
- [2] 陶佳,吕西涛.数控机床机械结构设计和制造技术优化.[J].中国科技期刊数据库工业 A,2022(3):71-73.
- [3] 李典伦,黄华,邓文强.数控机床液体静压导轨结构的优化设计[J].工程设计学报,2020(004):027.