

# 智能机床整机机械系统创新设计研究

杨迪

上海壹亘精密机床有限公司 上海 201100

**【摘要】**：在制造业向智能化、高端化转型背景下，智能机床作为智能制造核心装备，其整机机械系统性能决定加工精度、效率与智能化水平。本文围绕其创新设计，分析核心需求并排序，提出总体方案与各核心子系统创新措施，探讨智能化集成相关内容，形成完整设计体系，为智能机床研发升级提供理论与实践支撑，助力制造业高效精密智能生产。

**【关键词】**：智能机床；机械系统；创新设计；模块化

DOI:10.12417/2705-0998.26.06.059

## 引言

随着工业4.0推进和制造业转型升级，智能机床成为装备制造方面核心，集成多领域技术使加工实现自动化、智能化、精准化，整机机械系统作为该系统核心载体，但传统系统有布局不合理、精准度欠缺等问题，很难契合高端制造的要求，开展对其创新设计的研究，改进结构、提高性能、加强智能集成化，对突破技术关卡、增强核心竞争能力、带动制造业高质量发展大有益处，本文对应实际需求开展相关研究。

## 1 智能机床整机机械系统核心需求分析

### 1.1 功能需求

智能机床整机机械系统功能需求是围绕加工、智能适配、运维便捷三大核心加以确定，需要满足多种类型工件精密加工要求，实现车削、铣削之类的复合加工，适配规格、材质不同的工件，实现自动装夹、换刀功能，来降低人工介入，系统需能够与智能控制系统、传感器系统无缝对接，达成加工参数的自动调节、过程的实时监测、故障的自诊断以及数据的采集传输，对智能化运维起到支撑作用；还需保证有良好可扩展性，符合柔性生产模式，同时考虑操作的便利，降低操作人员技能方面的门槛。

### 1.2 性能需求

机械系统设计核心指标乃是性能需求，首要做到微米级加工精度，确保定位精度以及重复定位精度，减少几何、热变形、振动等所造成的误差，保证工件尺寸精度以及表面的品质。其次要提高效率，通过对结构加以优化、提高主轴转速、进给速度和换刀速度，做到多工序并行加工，系统要拥有高稳定性和可靠性，长期不间断运转的故障率不高，能承载较大重载、减少磨损的发生、延长使用的时间。此外，还应优化传动结构从而实现节能降耗，具有良好的抗干扰性能，防止外界因素干扰加工精度以及系统运行。

### 1.3 约束条件分析

智能机床机械系统的设计需考虑多方面约束：在空间的约束，整机尺寸对于车间布局要适配，内部结构紧凑很合理，防止部件产生干涉问题，利于安装调试与维护的开展；在成本的

约束，兼顾性能和成本，正确选用材料、零部件及加工方法，防止过度设计，提高性价比；在技术的约束，依托已成熟的技术，防止采用超前又不成熟的技术，保证设计切实可行，符合行业的标准和安全方面规范；在环境的约束，适应车间当下温湿度，具有良好的防尘、防水、阻振动特性，避开环境因素造成的影响。

### 1.4 需求优先级排序与目标拆解

结合应用场景以及生产需求，核心需求按优先级排序是：首要是高精度以及高稳定性，随后是高效率、智能化适配的相关功能，再次为扩展性、操作的便捷程度和节能降耗，最后为成本控制以及空间适配。由此情况拆解设计目标：加工精度达到 $\pm 0.005\text{mm}$ ，定位精度是 $\pm 0.002\text{mm}$ ；主轴最高转速大于等于 $8000\text{r/min}$ 、换刀时间小于等于 $2\text{s}$ ；机械系统持续运行的故障率小于 $0.5\%$ ，使用寿命达到或超过 $10$ 年；做到加工过程实时监测、故障预警以及数字化的运维；整机能耗在传统机床基础上降低 $15\%$ 以上，占地面积恰到好处，适应柔性化的生产。

## 2 智能机床整机机械系统创新总体方案设计

### 2.1 总体设计原则

智能机床整机机械系统总体上依照“精度优先、智能协同、模块化设计、经济性、可靠性”五项原则。在全程都贯穿高精度设计，借助结构优化、选用高精度零部件、把控误差使精度达到标准；注重机械系统跟智能控制、传感器、数字化孪生系统的匹配度，做到紧密融合；以模块化方式设计，把系统分成独立的功能模块，利于设计、生产、装配以及升级，提高效率且增进通用性；在保障性能的基础上优化方案，借助结构方面的优化、强度方面的强化、防护方面的完善，保证系统长期可以稳定地运作。

### 2.2 整机布局创新设计

针对传统机床布局所存在的弊端，采纳“立式对称布局+全封闭防护”结构，兼顾了精度、效率以及空间适配程度。

主体对称布局可降低单侧受力而产生的变形，提高安定性；立式床身把主副主轴安置在立面，上下刀塔分置于顶部和立面，可降低铁屑堆积对热变形造成之影响，加强热稳定性及

刚性。全封闭防护配有高透的防护玻璃，兼顾安全以及观察的便利性，同时避免粉尘切屑进到里面，将操作区域予以优化，使用可分离式的活动操作面板，有序布置管线，提高空间利用率以及美观程度。

### 2.3 机械系统模块化划分

基于模块化相关原则，对整机机械系统加以划分，形成五大核心模块，独自设计、合作工作。主轴模块把主轴、电机、轴承等进行集成，承担输出动力的工作，可以对不同规格的主轴加以更换；进给模块里包括进给电机、滚珠丝杠等，完成精确进给以及多轴联动；床身及基础部件模块起到支撑载体的作用，保障系统刚性和稳定的特性；换刀模块集成着刀塔等，做到自动刀具替换，辅助模块包括冷却、润滑、排屑的相关系统，为整机运行提供全方位保障。各模块凭借标准化接口予以连接，利于开展装配调试跟升级替换，实现弹性制造生产，使研发维护成本降低。

## 3 核心子系统机械创新设计

### 3.1 进给系统创新设计

作为智能机床核心运动部件，进给系统的性能直接影响到加工精度以及效率，针对传统进给系统定位的精度低、运动的稳定性差、能耗高方面的问题，开展创新方面的设计。采用“直线电机直接驱动并全闭环控制”的结构形态，替代掉传统的滚珠丝杠传动方法，消除丝杠传动造成的反向间隙和摩擦方面的误差，改善定位的精度以及运动响应速度，同时降低机械发生的磨损，减少保养费用。

搭配高精度光栅尺予以使用，做到进给运动实时的检测及反馈，通过全闭环控制对进给速度、位置进行调节，保证进给精度达成设计要求；针对直线电机所具有的热特性，研究电机和轴承发热对进给系统精度所产生的影响，采用高效的冷却以及隔磁防护技术，治理热变形造成的误差。

### 3.2 主轴系统创新设计

智能机床动力核心是主轴系统，负责使工件旋转起来，精度、刚度和转速直接对加工质量和效率起决定作用，开展主轴系统创新设计相关工作，让系统综合性能有所提升。采用高速精密的电主轴的结构，集成主轴电机、轴承、冷却系统等相关部件，把传动结构加以简化，削减传动的误差，提升主轴的转速以及精度，主轴能达到的最高转速是 4500r/min，满足高速精密加工的规范。

主轴与副主轴都采用同步电主轴结构，各自加装 C 轴功能，而且实现机械固锁，副主轴可沿着主轴的中心线做移动，加大加工的灵活水平。选用具有高精度的陶瓷轴承，有着耐磨、耐热、高刚度的特性，降低主轴运行时的震动以及磨损程度，拉长主轴的使用长度；对主轴的冷却系统加以优化，采用油冷与风冷联合的冷却形式，有效对主轴运转过程中的温度升高进

行控制，缩减热变形造成的误差，保证主轴的精度。

### 3.3 床身与基础部件创新设计

床身和基础部件是智能机床的支撑依托，自身的刚度、稳定性与抗振性能直接对整机加工精度造成影响，针对传统床身刚性不强、热变形大这一问题，开展革新设计。床身使用整体箱式立面的结构，采用高强度的铸铁来作为材料，以时效处理消除内应力，加大床身的刚度与稳定性能，减少加工过程里的变形问题；结合拓扑优化设计，局部采用碳纤维增强复合材料（CFRP）镶嵌/包覆，应用于高速五轴龙门机床、超精密卧式加工中心等机型的移动横梁、床身上部轻量化区域。相比传统铸铁结构，重量减轻 25% - 30%，移动惯量与驱动能耗降低约 30%。此外，阻尼比：铸铁（0.02 - 0.03）< 钢材（0.005 - 0.01）< CFRP（0.05 - 0.10，提升 2 - 5 倍）；一阶固有频率：铸铁（45 - 55 Hz）< 钢材（50 - 60 Hz）< CFRP（65 - 75 Hz，提升约 20% - 30%）；热稳定性：CFRP 热变形系数仅为铸铁的 1/5 - 1/10，有效抑制热变形误差。立柱运用对称式的结构，对截面设计加以优化，加大立柱抗扭与抗弯的刚性，降低受力造成的变形；床身与立柱采用刚性连接+减震垫结构，阻断振动传递，提升整体稳定性，防止振动传播，把减震垫安装到床身底部，减少外界振动对整机所产生的影响，同时优化床身排屑的相关结构，让铁屑顺利排出，降低对加工精度所造成的影响。

### 3.4 换刀系统创新设计

智能机床的加工效率和加工质量直接受换刀系统效率与精度影响，针对传统换刀系统换刀速度不快、定位精度较低、可靠性不佳的问题，开展具有创新性的设计。采用上、下刀塔的布局，上刀塔布置在床身顶部，下刀塔处在床身立面，能够使多工序同时进行加工，加工效率提升 40% 以上，针对盘类零件，可做到外圆与内孔同步加工，对于长轴类零件能做到粗加工同步进行，极大增进加工效率。

刀塔采用 BMT 定位方式来定位，通过十字键定位达成高刚性高精度的连接，刀座定位和固定相互分开，运用四键定位以及 4 个螺栓固定法，定位坚实、精度不错，加大刀座的刚性力度，为上刀塔配置动力刀座，以 3 个动力刀座作为标配，可在任意刀位达成钻孔、镗孔、铣削、攻丝等加工作业，任何一个刀位都能配置动力刀座，使加工灵活性得到提升；优化换刀的控制逻辑，使用伺服电机做粗定位、齿盘做精定位、液压做夹紧的结构，将换刀时间减短，换刀时间保持在 2 秒以内，同时实现换刀定位精度的提高，减小换刀产生的误差，保障加工过程不间断。

### 3.5 辅助系统创新设计

辅助系统对智能机床正常运行起到保障功效，包含冷却、润滑、排屑、防护等子系统。开展辅助系统创新设计，提升系统的可靠性及智能化水准。冷却系统运用智能温控的冷却方

法,依据主轴和进给系统当时的运行温度,自动调节冷却速度以及冷却剂量,做到精确冷却作用,降低热变形造成的偏差,同时节省冷却液。润滑系统采用自动给部件润滑的方式,通过定时器与传感器,实时对润滑部位的润滑状态进行监测,自动把润滑油补上,保障各运动部件获得充分的润滑,削减机件的磨损,延长部件使用期限。同时,排屑系统采用螺旋式排屑机构,和高压吹气装置搭配,保证切屑高速、无滞地排出,防止切屑堆积造成加工精度和系统运行受干扰,同时排屑机构可做到自动开启和关停,与加工节拍相匹配。防护系统运用全封闭的结构,设有防尘、防水、防辐射的相关装置,保障操作人员和系统部件不被伤害,同时把安全联锁装置设置在防护门上,保障机床运转过程中的安全性。

## 4 智能化集成与协同设计

### 4.1 机械系统与智能控制系统的协同设计

智能机床的核心优势在于机械系统与智能化技术的深度协同,故而开展机械系统跟智能控制系统的联合规划,做到两者的无缝对接和高效配合。在机械系统设计过程中,预先留好标准化接口,确保跟智能控制系统、传感器系统、执行机构能够兼容,利于信号传输和数据流转;智能控制系统使用双渠道(双方式组)控制模式,第一主轴和第二主轴分别建成独立的坐标系统,主副主轴与上下刀塔分别构成各自独立的坐标系,实现两个坐标系的配合和并行工作,加大加工效率。对机械结构控制响应特性予以优化,降低机械滞后的影响,让智能控制系统发出的指令能够迅速、精准地传递到各运动部件中,做到加工参数的即时变更;结合机械系统运动的属性,对智能控制系统当中的控制算法优化,采用PID控制的相关算法,提高系统控制的精度和稳定程度,实现加工过程的自动、智能化控制,研发统一的控制界面,做到机械系统运行状态、加工参数、故障信息的集中呈现和操作,让操作的便捷性提高。

### 4.2 状态监测与故障预警机制集成

为提升智能机床智能化运维的程度,实现机械系统故障的提前发现并处理,集成状态监测与故障预警机制。在机械系统关键部件(像主轴、进给电机、轴承、刀塔等)安装振动、温度、位移等传感器,实时采集部件运行的相关数据,含有如振

动频率、温度、位移等的参数,依靠数据传输模块把数据传递到智能控制系统。智能控制系统对采集的数据进行分析、处理,搭建起故障诊断模型,借助比较正常运行数据和异常数据,确定部件的运行态势,如果数据超出了阈值,自动产生故障预警信号,告知操作人员及时处理,同时显示出故障所处位置、故障的类型和处理方面建议,建成故障数据库,登记故障相关信息和处理方案,运用机器学习算法对故障诊断模型做优化,提升故障识别的精确性和及时性,减少故障造成的停机时段,让生产效率有所提高,延长机械系统的使用期限。

### 4.3 数字化孪生模型构建与应用

数字化孪生技术作为智能机床智能化升级核心技术之一,形成智能机床整机机械系统的数字化孪生模型,做到物理系统与虚拟系统的即时映照及协同改进。基于机械系统设计图纸和真实参数,用三维建模软件搭建起虚拟孪生模型,囊括主轴、进给系统、床身、换刀系统等一切核心要素,精准还原机械系统的结构和运动特性;使用传感器采集物理系统当下的运行数据,把数据发送到虚拟模型,实现虚拟模型跟物理系统实时一致,模拟机械系统运行的状态、加工的过程和故障的场景。数字化孪生模型可用于开展设计方面的优化,在虚拟环境里模拟不同设计方案的运行效果,对机械的结构、参数进行优化,减少物理样机试制成本以及周期;同时可把它用于加工过程仿真,开展对工件加工过程的模拟,预测加工的误差,事先对加工参数进行调整,保证加工质量;还能够把它用于运维管理,凭借虚拟模型监测物理系统的运行情况,模拟出故障的场景,制定故障解决办法,提升运维效率以及精准性。

## 5 结语

本文围绕智能机床整机机械系统创新设计展开研究,从核心需求分析考量、总体方案设计蓝图、核心子系统创新设计创新、智能化集成与协同设计途径四个方面,形成一套完善的创新设计体系,解决传统机床机械系统精度不够、效率不高、智能化程度不高的问题,通过分析核心需求,明确了设计目标以及约束条件,总体方案设计优化整机布局的同时采用了模块化设计,核心子系统创新设计提升了各部件的性能和可靠性,智能化集成与协同设计实现了机械系统与智能化技术的深度融合,提升了机床的智能化水平和运维效率。

## 参考文献:

- [1] 刘敏洋,黄艳群,张大卫.基于绩效激励机制的数控机床人机交互系统创新设计[J].中国机械工程,2019,30(21):6.
- [2] 孙亮波,黄美发.机械创新设计与实践[M].西安电子科技大学出版社,2020.
- [3] 么忠厚.数控机床机械结构设计和制造技术的创新研究[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2021(8):2.