

旋转进给复合机构设计与运动特性研究

蔡建功 王霞

河北科技学院, 河北唐山, 063200;

摘要: 旋转进给复合机构属于旋转运动、直线进给运动等多功能的传动机构, 具有运动联动性好、体积小、运行稳定等优点, 是加工和机床自动化设备及精密仪器的主要机构, 其设计合理与运动特性直接影响设备的加工精度与运行性能。本文从旋转进给复合机构的设计与运动特性入手, 排除繁琐理论推导, 围绕实际设计流程与运动特性测试实践, 明确旋转进给复合机构的设计要求和性能指标, 完成机构的整体结构设计、核心零部件选型与参数确定, 研究机构的运动规律与影响运动特性的因素, 提出机构的优化措施并测试结果。结果表明, 合理的机构设计与参数匹配可以有效地提升旋转进给复合机构的运动平稳性与联动精度, 使机构的运动特性满足实际使用要求, 从而为旋转进给复合机构的设计、制造与应用提供可靠的实践依据。

关键词: 旋转进给; 复合机构; 结构设计; 运动特性; 联动精度

DOI: 10.69979/3029-2727.26.05.055

引言

旋转进给复合机构主要的功能是同时联动旋转运动和直线进给运动, 解决单一运动机构功能限制, 在机械加工中实现工件旋转切削进给送料, 在自动化设备中实现零部件转运定位。旋转进给复合机构的特点是集成性好, 将旋转传动机构与进给传动机构结合在一起, 同一个机构相比独立安装两个机构体积缩小40%以上, 可节约安装空间。旋转进给复合机构运动联动性强, 可实现同步联动或独立联动, 可满足各种工况要求, 运行平稳噪声低, 可满足精密加工和自动化运行的要求。与复杂复合机构相比, 简单传动链路, 减少了辅助零件, 制造难度小、成本低, 同时具有良好的可维护性, 更适合批量生产和各类中高端设备的适用。

1 旋转进给复合机构的设计需求与约束条件

1.1 核心设计与性能要求

旋转进给复合机构主要的设计与性能要求是联动精度、运动平稳性、承载能力和运行效率。联动精度是指旋转运动和直线进给运动协同误差不超过范围, 两种运动保持同步, 避免运动偏差影响加工精度和设备运行。运动平稳性是指机构运行时无冲击、振动和卡滞现象, 转速、进给速度均匀, 减少运动波动对机构零部件的磨损, 延长使用寿命。承载能力是指设备工作载荷是否适用, 机构在长期运行期间有无零部件断裂的现象, 要求机构具有一定的抗冲击能力, 能够抵抗启动和运行时的载荷波动; 运行效率是指机构在传递动力、实现复合运

动过程中能量的消耗较小, 提高设备的能源效率, 保证机构能够长期稳定运行且能耗可控。

1.2 设计约束条件

旋转进给复合机构需要约束条件, 防止设计与实际的制造和使用不符。制造工艺上, 主要零部件要采用一般的加工工艺, 如车削、铣削、磨削等工艺, 减少加工工艺复杂造成的加工费用和制造工艺复杂化, 保证机构零部件可批量化生产, 精度要求高; 空间上要注意控制空间要素。根据安装空间尺寸, 确定机构结构和零部件的布置, 控制机构的体积与重量, 使机构可以安装并不受其他零部件的影响。材料上要注意适用于强度高, 耐磨性好、加工性能好的材料, 兼顾性能与价格的结合, 不要以廉价为主, 保证材料的力学性能满足承载与运动的要求。控制上要注意简单可靠, 结合一般控制系统选用常规控制算法, 不需要复杂的控制算法, 方便控制, 控制精度要求高。

2 旋转进给复合机构整体设计

2.1 机构整体结构设计

旋转进给复合机构整体结构以协同联动、结构简单、运行稳定为主线, 确定零部件连接方式、传动路径与装配关系, 两种运动协同连动。整个机构由“电机+齿轮+滚珠丝杠传动”组成, 驱动电机、减速齿轮组、滚珠丝杠、旋转主轴、进给滑台、导向机构及机架组成。驱动电机通过减速齿轮组将转速和扭矩调整到需要的转速

和扭矩以后分别驱动旋转主轴和滚珠丝杠旋转,使旋转主轴带动工件旋转运动,滚珠丝杠带动进给滑台通过导向机构完成直线进给运动。导向机构采用线性导轨,使进给滑台运动平稳不偏转,机架采用刚性结构,使各零部件稳定支承,减少机构运行中振动。整体结构简化传动链路,仅用一种动力源联动两种运动,减小了控制难度,同时考虑合理的运动间隙和装配空间,不允许零部件之间进行干涉,使旋转运动与直线进给运动协同精度更高。

2.2 核心零部件选型与设计

核心零部件的选型和设计会直接影响机构的运动和运行稳定性,主要是对驱动电机、减速齿轮组、滚珠丝杠、旋转主轴和导向机构进行选型优化。驱动电机采用伺服电机,转速可调、定位准确、响应速度快,能满足旋转、进给运动的协同控制需求,根据机构载荷和转速的要求,确定电机的功率和转速参数,动力足够稳定;减速齿轮组采用直齿圆柱齿轮组,结构简单、传动效率高,通过合理选择齿轮齿数比,实现转速和扭矩的匹配,齿轮采用渗碳淬火处理,增加齿面硬度和耐磨性,减少啮合磨损,同时优化齿轮齿形参数,啮合顺畅、噪声小。滚珠丝杠采用高精度滚珠丝杠,传动效率高、定位精度高,能实现直线进给运动,根据进给速度和载荷的要求,确定滚珠丝杠的导程和直径,进给运动平稳无爬行现象。旋转主轴采用高强度合金,通过精加工和热处理提升主轴刚度和回转精度,减少旋转过程中的径向跳动和轴向窜动;导向机构采用线性导轨,配置滚动滑块,减少进给运动的摩擦阻力,提高进给精度和运动平稳性。

2.3 关键参数确定与优化

参数的确定和优化还应结合机构运动需求和性能要求,优化传动比、滚珠丝杠导程、主轴转速、进给速度等参数,做到参数匹配、运动协同。传动比由电机转速、机构目标旋转转速、进给速度确定,减速齿轮组传动比在 5-15 之间,通过齿轮齿数比的调整,实现转速与扭矩的最优匹配,使旋转主轴和滚珠丝杠运动速度协同;滚珠丝杠导程根据进给速度、定位精度确定,导程越小,进给精度越高,结合实际使用需求,选用 2-5mm 的导程,兼顾进给精度和进给效率,同时优化滚珠丝杠预紧力,减小丝杠轴向间隙,提高进给定位精度;主轴转速由实际加工或运行需求确定,转速为 500-2000r/Min,

旋转运动平稳且可调,可适用不同工况。进给速度和主轴转速协调匹配,进给速度在 10-50mm/min 之间,旋转运动和直线进给运动同步不发生运动偏差,同时优化参数匹配,减少机构运行能量损耗和振动。

3 旋转进给复合机构运动特性分析

3.1 机构运动规律分析

旋转进给复合机构运动规律包含旋转运动、直线进给运动,两种运动速度、位移关系直接决定了机构的运动规律。旋转运动由伺服电机驱动减速齿轮组驱动旋转主轴,旋转主轴转速与电机转速、齿轮传动比线性联系,转速稳定可调,旋转位移随时间均匀变化,因此旋转运动平稳无振动。直线进给运动由伺服电机驱动减速齿轮组驱动滚珠丝杠,进给速度与电机转速、齿轮传动比、滚珠丝杠导程相关,进给位移与丝杠转角线性联系,因此直线进给运动精准可定位;两种运动可同步联动或独立控制,同步联动时,旋转转速与进给速度保持一定比例,运动协同精准,满足精密加工等需要,独立控制时,可根据工况需求分别调整两种运动速度、位移,提高机构适配性。机构运动过程中,两种运动联动误差主要是传动间隙、参数匹配偏差引起的,需要重点控制。

3.2 影响运动特性的关键因素

影响旋转进给复合机构运动特性的主要因素是传动间隙、零部件加工和装配误差、润滑条件和负载变化,这些因素直接影响机构的运动平稳性、联动精度和运行效率。传动间隙主要是减速齿轮组、滚珠丝杠和旋转主轴的连接部位,间隙过大造成运动滞后和冲击破坏两种运动关系,增大联动误差,间隙过小使摩擦阻力增大,增加零部件磨损和运动灵活性。零部件加工和装配误差会破坏机构的正常传动关系,齿轮的齿形误差、齿距误差会导致旋转运动转速变化,滚珠丝杠导程误差、导轨平行度误差会导致进给运动偏移,装配的同轴度误差会导致运动偏差、降低联动精度;润滑条件差会增加各传动部位的摩擦阻力,造成运动卡顿、噪声大,增加零部件磨损,影响运动平稳性和使用寿命;负载变化会导致机构运动速度和扭矩变化,负载过大易造成零部件变形、运动滞后,负载过小造成运动不平稳、空转损耗增加。

3.3 运动特性测试方法

运动特性测试以机构联动精度、运动平稳性与转速、进给速度稳定性为目的,采用适合的测试设备、测试方

法,使测试结果符合实际运行情况。测试设备包括转速测试仪、位移传感器、振动测试仪,分别测量旋转主轴转速和波动、进给滑台位移和定位、机构运动中振动的幅度。将机构调试至空载运行,选择不同的旋转转速和进给速度,记录转速波动值、进给定位误差和振动幅度;将机构调试至负载运行,在工作载荷上运动。重复上述试验测试,得到空载和负载状态下的运动特性数据,其中运动误差测试,记录两种运动的联动误差,观测不同参数、不同工况下机构的运动规律,找出影响运动特性的变化,为进一步优化措施的选取提供数据基础。然后对测试数据进行整理分析,进一步确定机构运动特性是否满足设计要求。

4 旋转进给复合机构运动特性优化措施

4.1 传动间隙控制优化

传动间隙控制是提高机构运动联动的准确率及平稳性的关键因素,应根据不同部位的传动间隙进行控制,减速齿轮组啮合间隙采用齿轮高精度齿轮,齿轮齿形参数调整,齿轮配对研磨减小啮合间隙,齿轮箱内加装弹性垫片,使间隙变小,而不是变大。滚珠丝杠轴向间隙采用预紧螺母,通过预紧力消除丝杠与螺母间隙,提高进给定位精度;定期检查丝杠的磨损,及时调整预紧力,避免间隙过大。旋转主轴与传动部件的连接间隙采用过盈配合或弹性连接,使连接紧固,减少间隙造成的运动滞后,定期检查连接部位是否松动,避免间隙过大。通过间隙控制,减少运动滞后及冲击,提高两种运动协同精度。

4.2 加工与装配精度提升

提升零部件加工与装配精度,减少误差对运动特性的影响,确保机构正常传动与协同运动。加工过程中,采用高精度加工设备,严格控制齿轮的齿形误差、齿距误差,滚珠丝杠的导程误差,旋转主轴的回转精度与线性导轨的平行度误差,确保加工精度符合设计要求。优化加工工艺,对齿轮、主轴等关键零部件进行热处理与精密磨削,提升零部件的尺寸一致性与表面质量,减少加工误差带来的运动偏差。装配过程中,采用专用定位工具与检测仪器,确保各零部件的装配位置精准,调整旋转主轴与滚珠丝杠的同轴度,确保齿轮啮合均匀、滚珠丝杠运行顺畅,进给滑台运动无偏移。装配完成后,进行全面的精度检测与试运行,及时发现并修正装配偏差,确保机构的运动特性达标。

4.3 润滑与负载优化

优化润滑与负载条件,减少摩擦损耗与运动波动,提升机构的运动平稳性与运行效率。根据机构的运动特点与零部件材质,选用适配的润滑油与润滑脂,齿轮箱与滚珠丝杠选用粘度适中的齿轮油,导向机构与旋转主轴选用润滑脂,确保各传动部位能形成稳定的润滑油膜,减少摩擦阻力。采用定期润滑与维护方式,根据机构的运行时间,及时补充与更换润滑油,清洁传动部位的杂质,避免润滑油老化、变质导致润滑效果下降。优化负载分配,确保机构的实际运行载荷控制在设计承载范围内,避免过载运行导致零部件变形与运动滞后,同时避免负载过小导致的运动不平稳,通过合理的负载控制,确保机构运动速度与扭矩稳定,提升运动特性。此外,在传动部位添加防尘密封装置,避免粉尘进入影响润滑效果与零部件磨损。

5 结论

旋转进给复合机构的设计和运动特性研究应结合实际需要,采用结构简单、联动精确、运行可靠的优化结构、参数优化和精度控制方式,实现旋转运动和直线进给运动协同运行。通过对旋转进给复合机构的设计和运动特性研究,完成机构总体结构、重要零部件选型设计、重要参数优化设计和装配工艺设计、分析机构运动规律和运动特性,提出传动间隙、加工装配精度、润滑、负载等优化方法和设计和优化措施,并通过实测检验优化后的旋转进给复合机构结构简单、装配方便,旋转运动和直线进给运动协同精确、联动误差小于允许值,运动平稳、无振动、无噪声,转速、进给速度稳定,承载能力和运行效率满足设计要求,设计和优化措施符合实际制造和使用场景,制造成本可控、实用性强,能够快速满足机械加工、自动化设备等领域使用需求,为旋转进给复合机构设计和使用提供可靠的实践依据,满足各类设备对复合运动机构的精准传动。

参考文献

- [1] 刘朝轩,李剑. 旋转超声主轴与工具的设计与研究[J]. 机械设计, 2025, 42(S2): 141-147.
- [2] 李晓高,官涛,刘勇,等. 纤维陶瓷旋转超声辅助加工性能研究[J]. 陶瓷学报, 2025, 46(05): 1008-1017
- [3] 薄祥恒. 五轴数控机床进给速度自适应控制方法分析[J]. 中国机械, 2025, (29): 57-61.