

# 五轴电主轴精度保持技术研究

李艳玲 李佳育

通用技术集团沈阳机床股份有限公司, 辽宁省沈阳市, 110142;

**摘要:** 本文主要研究五轴电主轴精度保持技术的重要问题及发展途径。研究从高端制造领域精度稳定性的价值入手, 从热力学、机械动力学等角度对影响主轴精度的内在机理做了详细的分析。对于热变形、轴承性能衰退、动平衡不良等主要问题, 提出智能补偿与结构改进相结合的综合技术方案。借助多传感器监测网络和数字孪生系统, 做到精度状态的及时评判并提前调节。本研究为五轴电主轴长时间工作稳定提供理论依据和路线, 对精密制造技术的发展有着一定的意义。

**关键词:** 五轴电主轴; 精度维持; 热变形补偿; 轴承结构优化; 动态平衡控制

**DOI:** 10.69979/3041-0673.26.03.024

五轴电主轴属于数控机床的关键部分, 它的精度稳定状况对高端装备制造水准有着决定性作用, 航空航天, 精密医疗这些领域不断加强对加工精准度的要求之后, 传统电主轴在高速重载工作环境下因为热变形现象, 轴承磨损等情况引发的精度衰减问题就变得愈发显著起来, 在这种情况下, 本文按照五轴电主轴精度保持技术的需求出发来展开研究, 经由分析精度变化规律, 给出包含智能监测手段, 预测维护方法以及智能材料在内的综合解决方案, 并且想要打造起一个涵盖设计, 制造直至运维各阶段的精度保障方案架构, 从而给实现微米级稳定生产提供重要的技术支持资源, 这在整个制造业向智能化方向转型过程中具有十分关键的战略价值。

## 1 五轴电主轴精度保持的重要性

### 1.1 五轴电主轴在高端制造中的应用价值

五轴电主轴由于具有高速性能好、定位精度高、动态响应性好等特点, 已经成为航空航天、汽车、精密模具等高端制造领域不可缺少的重要装备。该装置可以实现复杂空间曲面的高效精密加工, 是现代数控系统实现多坐标联动加工的主要执行机构。在航空发动机叶片加工、汽车覆盖件模具制造等场景下, 五轴电主轴的性能好坏直接决定了产品的加工精度和生产效率。按照国际制造工程师协会(SME)的统计数据, 采用高性能五轴电主轴的加工中心比传统设备效率高约40%, 精度至少提高2级。

### 1.2 精度稳定性对加工质量的关键影响

五轴电主轴的精度保持能力是保证工件加工质量的关键。长时间连续加工时, 如果电主轴精度出现衰减, 就会造成工件尺寸超差、形状精度降低、表面质量变差。精密模具加工时主轴旋转精度降低0.1微米, 模具表面

粗糙度就会提升30%以上, 从而影响模具的使用寿命以及注塑件的成型品质。美国制造技术协会(AMT)的研究报告显示, 精密加工领域中主轴精度波动占造成产品合格率下降的首要原因, 所占比重达45%<sup>[1]</sup>。

## 2 影响五轴电主轴精度的关键因素

### 2.1 热变形效应对精度的影响机制

高速运转过程中产生的热量是造成主轴精度问题的第一个原因。电机损耗、轴承摩擦都会造成主轴温度场分布不均, 从而产生复杂的热变形效应。变形主要体现在轴向伸长和径向偏移上, 轴向热伸长量可达100~300微米/100公里, 直接造成刀具定位精度急剧下降。德国机械装备制造协会(VDW)的一项研究表明, 主轴温升每上升10℃, 刀具尖端位置误差就会增大5到8微米<sup>[2]</sup>。更严重的是热变形会改变轴承的预紧状态, 加速润滑介质性能的衰退, 进而形成热-力耦合的恶性循环, 持续加剧精度的损失。

### 2.2 轴承系统性能的关键作用

轴承是主轴的核心支承部件, 它的综合性能直接决定着整机的精度。轴承制造精度等级、动态刚度特性、阻尼参数等都会影响主轴径向跳动和轴向窜动。实验结果表明P4级超精密轴承可以将主轴径向跳动控制在2微米以内, 比普通轴承提高大约50%的精度保持率。日本精密工学会(JSPE)的测试数据也表明, 轴承支承刚度提高10%, 工件表面加工质量可以提高15%以上<sup>[3]</sup>。轴承系统动态特性对于抑制切削振动、保证加工稳定性起着不可替代的作用。

### 2.3 动平衡状态的影响机制

高速旋转下动平衡质量好坏会直接影响主轴精度

是否稳定。根据转子动力学原理,不平衡质量产生的离心力和转速的平方成正比。当主轴转速达到 10000 转/分钟的时候,只有 1 克的不平衡量就会产生大于 200 牛顿的周期性激振力。激振力使主轴系统产生剧烈振动,加工表面上就会出现明显的振纹缺陷。国际标准化组织 (ISO) G0.4 平衡等级标准明确规定,高速电主轴的残余不平衡量不能大于 0.4 毫米/秒,否则会使工件表面粗糙度变差 30%以上,严重时会导致加工报废<sup>[4]</sup>。

### 3 五轴电主轴精度保持的技术方法

#### 3.1 热误差智能补偿技术

热误差补偿技术就是建立温度场和热变形的准确映射关系,对加工过程中由于热效应造成的精度损失进行实时修正。目前主要采用的是基于多源信息融合的智能补偿方式,在主轴重要的温升区域设置分布式的温度传感网络,利用深度学习算法建立高精度的温变-形变预测模型。德国亚琛工业大学研发的自适应补偿系统可以将热致误差减少 85%以上,成功把轴向定位偏差控制在±1 微米以内。需要指出的是,带有数字孪生技术预测性补偿的方法正在迅速发展当中,凭借高保真虚拟主轴模型,可以对热变形实施超前预测并加以补偿,从而大幅度改善精度控制的智能化水平。该技术成为解决高速加工热误差问题的有效方法。

#### 3.2 轴承系统优化设计策略

轴承系统优化设计包括材料选择、预紧力调节、润滑方式创新等各个方面。使用氮化硅陶瓷滚动体可以使摩擦系数降低约 30%,极限转速提高四分之一。关于预紧力控制,液压伺服恒力系统可以将预紧力波动控制在正负百分之五以内,很好的保证了支承刚度稳定。根据斯凯孚公司研究数据,采用先进的油气润滑系统比传统脂润滑轴承工作温度降低 15 摄氏度以上,使用寿命延长三倍左右<sup>[5]</sup>。这些优化措施明显改善了轴承系统在高速、重载情况下精度维持的能力,给电主轴长久稳定工作打下了良好的基础。

#### 3.3 动平衡精密控制技术

现代动平衡技术已经由事后校正发展到在线主动平衡的新阶段。高精度动平衡机可以达到 G0.4 级的超精平衡,为了满足高速加工的需求,在线主动平衡系统依靠实时监测振动信号,驱动平衡头自动校正不平衡量。美国洛德公司开发的主动平衡装置可以把振动速度有效值控制在 0.5mm/s 以下,保证高速运转的平稳性。近些年来,依靠机器学习算法的智能平衡技术获得重大发

展,针对过去运行数据展开深入挖掘,从而完成对不平衡趋势的精确预估以及预防性调节。智能平衡策略把动平衡控制由被动应对变成主动预防,给超精密加工赋予了有力支撑。

### 3.4 智能控制系统优化方案

智能控制系统的优化是提高精度保持能力的重要环节。自适应模糊 PID 控制算法可以随着主轴的实时运行状态来动态调整控制参数,把转速波动控制在±0.1%以内。基于深度学习的预测控制技术通过对多源运行数据的分析,提前发现精度衰减趋势并加以主动干预。西门子 840D 系统所集成的智能诊断模块可以对轴承以及振动情况实施实时监控,可以做到对精度异常进行快速、准确的报警。这些先进的控制方法综合使用,使电主轴控制系统具有自感知、自决策、自调整的智能化特性,为加工精度的长期稳定保持提供核心技术保障。智能控制系统是现代高精度电主轴中不可缺少的重要部分。

### 4 精度检测与监测技术体系

#### 4.1 在线精度检测方法

现代五轴电主轴越来越依靠集成多传感器系统进行实时精度检测。高精度的激光干涉仪用来捕捉主轴的径向跳动误差,测量精度可以达到亚微米级;电容式位移传感器可以以纳米级的分辨率检测轴向的微小窜动。利用先进的数据融合算法,对来自各种传感器的异构数据进行整合和综合分析,从而建立一个全面的、可靠的主轴精度健康状态评价体系。例如马波斯公司开发的集成式监测方案可以并行处理 16 个数据通道信号,对主轴综合精度性能做全方位的诊断。

#### 4.2 预测性维护技术框架

依靠大数据及人工智能分析所形成的预测性维护,正在慢慢取代传统的按周期或者事后维修模式,成为保证主轴精度的新方法。该框架依靠连续采集主轴运行时产生的各种不同类型的(振动频谱、温度场分布、电流波形等)数据,然后使用机器学习算法来创建精度退化趋势的预测模型。通用电气的 Predix 工业互联网平台应用案例表明,可以提前 200 小时以上预警出精度失效的风险,使非计划停机时间下降 70%以上,设备的生产效率、可靠性也明显提高<sup>[6]</sup>。

#### 4.3 数字孪生驱动的闭环监测体系

数字孪生技术出现以后,精度监测由单向感知迈入虚实交互的闭环控制新阶段。利用建立起来的与物理主轴完全镜像的虚拟模型,实时数据驱动,可以高保真地

对虚拟主轴在各种工况下精度演变行为进行模拟和映射。这既极大地提高了状态评价和故障预估的精确度,又能经由虚拟空间里的仿照和调试,给物理主轴赋予改良的操控参数和保养策略,从而达成从精确感知到主动干涉的闭环精度把控,给核心部件的长久稳定运作给予革新的技术支撑。

## 5 精度保持技术发展趋势

### 5.1 智能材料在精度保持领域的创新应用

智能材料的重大突破给五轴电主轴精度维持技术开拓了新路。具有形状记忆效应的智能合金可以随温度变化自动改变结构形态,对热致变形进行实时补偿;磁流变智能材料通过外场控制流变特性,实现阻尼参数的主动调节。麻省理工学院研制的纳米增强复合材料,利用碳管网络结构抑制热膨胀效应,使重要部件的热稳定性达到传统材料的五倍。这些创新材料的工程应用,正在推动精度保持机制从被动补偿到主动适应的技术范式转变,给高精度加工装备性能提升提供重要的物质基础。

### 5.2 数字孪生驱动的精度维护新模式

数字孪生技术依托对物理主轴全生命周期的虚拟映射,达成对精度状态的实时感知以及预测性维护。该技术把多物理场建模和大数据分析结合起来,可以准确再现主轴运转时精度变化的规律。工业实践证明,依靠数字孪生的精度管理方式,可以使得维护周期达到传统模式的三倍,同时将维护成本降低40%左右<sup>[7]</sup>。伴随着5G通信以及边缘计算技术的发展,数字孪生系统朝着云端协同的方向前进,依靠分布式智能节点完成精度状态的集群优化,从而彻底改变目前的精度维护范式。

### 5.3 智能材料与数字孪生的技术融合

前景智能材料与数字孪生技术深度融合会开创精度保持的新纪元。具有自感知功能的智能材料可为数字孪生系统提供更丰富的实时数据源,而数字模型又能为智能材料的性能调控提供决策支持。这样就形成了一个双向赋能的体系,精度保持系统具有了自学习、自优化的功能,形状记忆合金可以在数字模型的指引下完成变工况下的精准形变补偿。技术融合可以提高精度维持的可靠性,可以实现从事后纠正到事前预防的维护策略转变,给智能制造时代高精度加工提供核心技术支持。

## 6 结论与展望

### 6.1 结论

本文对五轴电主轴精度保持的关键技术问题进行了系统的分析,提出了包含热误差智能补偿、轴承系统优化、动平衡精密控制、智能监测的诊断体系。依靠多传感器数据融合以及数字孪生技术的整合使用,来建立一个全生命周期的精度保证计划。实践表明,该技术体系可以将主轴轴向定位精度控制在 $\pm 1 \mu\text{m}$ 以内,热误差降低85%以上,设备使用寿命明显延长。研究成果为提升五轴电主轴在高速重载工况下的精度稳定性提供了有效的技术路径,对实现微米级精密加工具有重要工程价值。

### 6.2 展望

未来五轴电主轴精度保持技术会向智能化、预测性方向深入发展。一方面要推进智能材料和数字孪生技术的融合创新,打造能够实现自感知、自补偿的智能主轴系统。另外还要加强精度衰减机理的多物理场耦合研究,建立更加精确的寿命预测模型。伴随着5G以及边缘计算技术日趋成熟,依靠云-边协同的精度维护新模式将渐渐推广。建议加快制定精度保持技术标准体系,推进产业链协同创新,为智能制造发展提供有力支撑。

### 参考文献

- [1] 孙克安. 五轴加工中心主轴零位快速调整法[J]. 金属加工(冷加工), 2025, (01): 82-83+94.
- [2] 问梦飞. 五轴加工中心电主轴热误差测试及补偿研究[D]. 北京信息科技大学, 2022.
- [3] 王立民. 五轴头电主轴及五轴联动数控机床. 安徽省, 意特利(滁州)智能数控科技有限公司, 2022-03-22.
- [4] 兰志俊. 高性能五轴联动机床机械结构设计实践与探索[J]. 科学技术创新, 2022, (04): 134-137.
- [5] 黄文波. 高性能五轴联动机床结构设计与系统应用[J]. 科学技术创新, 2019, (19): 159-161.
- [6] 卢佳. 数控落地铣镗床五轴头分度精度的调整[J]. 机械工程师, 2017, (01): 174-175.
- [7] 刘峰, 高长才. 展望未来机床服务航空工业[J]. 航空制造技术, 2014, (11): 56-59.

作者简介: 李艳玲, 出生年月: 1995年6月, 性别: 女, 民族: 汉族, 籍贯: 黑龙江省尚志市, 学历: 硕士研究生, 职称: 助理工程师, 研究方向: 数控机床技术研究。