

航空发动机转子组件数字化装配误差补偿研究

孔敬儒 樊明状 傅正

中国航发南京航空动力有限责任公司 江苏 南京 210000

摘要: 本文聚焦航空发动机转子组件数字化装配误差补偿展开研究。首先阐述数字化装配基础理论与误差分析,包括核心概念、误差源识别及装配精度要求;接着进行多源误差建模,涵盖建模基础、单源与多源误差建模方法;随后设计误差补偿策略与算法,构建基于数字孪生的协同机制;最后开发误差补偿系统并进行仿真验证。通过研究,为提升航空发动机转子组件装配精度提供理论与技术支持,推动航空发动机制造技术发展。

关键词: 航空发动机转子; 数字化装配; 误差补偿

引言: 航空发动机作为航空领域的核心装备,其性能至关重要,转子组件作为动力系统关键部件,装配精度直接影响发动机性能。传统装配方式难以满足高精度需求,数字化装配应运而生。然而,数字化装配过程中存在多源误差,影响装配质量。深入研究航空发动机转子组件数字化装配误差补偿,精准识别误差源、构建合理模型、设计有效补偿策略与算法,开发实用补偿系统,对提高装配精度、保障发动机性能、推动航空制造业发展具有重要意义。

1 航空发动机转子组件数字化装配基础理论与误差分析

1.1 核心概念界定

航空发动机转子组件作为动力系统核心部件,其装配精度直接决定发动机推力、稳定性及使用寿命。数字化装配是以数字孪生、三维建模、物联网等技术为支撑,实现装配全流程数字化管控的新型装配模式,核心是构建物理装配过程与数字模型的实时映射。界定核心概念需明确转子组件数字化装配的边界与内涵,包括数字化装配单元、数字孪生体构建、装配过程数字化表征等关键要素。与传统手工装配相比,其核心特征体现为装配信息的数字化传递、装配过程的可视化监控、装配误差的精准化溯源^[1]。同时,需厘清数字化装配与精密装配、智能装配的关联与区别,明确其在航空发动机制造中的定位,为后续误差分析、建模及补偿提供理论支撑,确保研究框架的严谨性与针对性。

1.2 转子组件数字化装配误差源识别

转子组件数字化装配误差源具有多维度、耦合性强的特点,需从装配全流程拆解识别。设计阶段误差源主要包括零件三维模型精度偏差、装配工艺规划不合理、公差分配不科学等,此类误差会通过设计文件传递至装配环节。制造阶段误差源涵盖零件加工尺寸偏差、形位公

差超差、表面质量缺陷等,转子叶片、主轴等关键零件的加工误差直接影响装配贴合度。装配执行阶段误差源涉及工装夹具定位精度不足、装配设备(如机器人、拧紧机)运动误差、操作人员技能差异及数字化测量系统误差。另外,环境因素(温度、湿度、振动)会导致零件热变形、设备精度漂移,形成动态误差源。

1.3 转子组件装配精度核心要求

航空发动机转子组件装配精度核心要求围绕旋转精度、密封性能、连接强度三大维度展开,需满足极端工况下的稳定运行需求。旋转精度要求转子高速旋转时径向跳动、端面圆跳动控制在微米级,避免因偏心导致振动加剧、零件磨损加快,通常主轴与叶片装配后径向跳动不超过0.02mm。密封性能要求转子组件各结合面间隙均匀,防止高温高压燃气泄漏,间隙误差需控制在0.01~0.05mm范围内,兼顾密封效果与零件热膨胀余量。连接强度要求螺栓、铆钉等连接件的预紧力精准可控,避免过紧导致零件变形、过松引发连接失效,预紧力误差需控制在±5%以内。装配后转子组件需满足动平衡精度要求,剩余不平衡量符合等级标准,且具备良好的尺寸稳定性和可靠性。这些要求为误差分析、补偿提供量化指标,是衡量数字化装配质量的核心依据。

2 转子组件数字化装配多源误差建模

2.1 误差建模基础与原则

转子组件数字化装配多源误差建模以误差理论、矩阵分析、数字孪生技术为基础,核心是将物理装配过程中的多源误差转化为数学表达式,实现误差的量化描述。建模基础包括误差的几何表征方法、多源误差的独立与耦合特性分析、数字化模型与物理误差的映射关系构建。建模需遵循四大原则:一是系统性原则,全面覆盖设计、制造、装配各环节误差源,避免碎片化建模;二是精准性原则,采用贴合实际的误差表征模型,减少

理论假设与实际工况的偏差；三是耦合性原则，充分考虑多误差源间的相互作用，避免孤立建模导致的误差累积偏差；四是实用性原则，模型需简洁可解，适配后续误差补偿算法设计与系统开发，便于工程化应用。同时，需依托三维数字化模型搭建误差建模载体，实现误差模型与数字孪生体的融合，为误差动态分析提供支撑。

2.2 单源误差建模

单源误差建模是多源误差耦合建模的基础，需针对各独立误差源构建专属数学模型。对于零件加工误差，采用尺寸公差带模型、形位误差矢量模型表征，通过实测数据拟合误差分布规律，常用正态分布、均匀分布描述误差随机性。工装夹具定位误差建模基于六点定位原理，通过齐次变换矩阵表征定位基准偏差，量化夹具定位元件的位置误差对装配精度的影响。装配设备运动误差建模结合设备动力学特性，建立机器人关节误差模型、拧紧机扭矩误差模型，通过运动学正逆解推导误差传递路径。数字化测量误差建模考虑测量仪器精度、测量环境干扰等因素，构建测量误差修正模型，量化测量数据的可信度。单源误差建模需结合实测数据校准模型参数，确保每个误差源的数学表征精准可靠，为后续多源误差耦合分析奠定基础，实现误差的精准溯源与量化。

2.3 多源误差耦合建模

多源误差耦合建模的核心是揭示不同误差源间的相互作用机制，量化耦合效应对装配精度的综合影响。由于转子组件装配过程中，设计、制造、装配各环节误差源并非独立存在，而是通过装配接触、力传递等路径形成复杂耦合关系，需采用多体系统动力学理论、误差状态空间法构建耦合模型。首先建立转子装配多体系统模型，明确各零件、工装、设备间的拓扑关系，将单源误差作为输入变量引入模型。通过齐次变换矩阵、有限元分析等方法，推导误差在多体系统中的传递与耦合规律，量化耦合误差的大小与分布^[2]。结合数字孪生技术，实现耦合误差的动态更新，实时反映装配过程中误差耦合关系的变化。模型需通过实验验证校准，确保能精准预测多源误差耦合后的综合影响，为误差补偿策略制定提供科学依据，避免因忽视耦合效应导致补偿失效。

3 数字化装配误差补偿策略与算法设计

3.1 误差补偿策略设计

数字化装配误差补偿策略需遵循“精准识别-动态预测-靶向补偿-实时反馈”的闭环逻辑，结合转子组件装配特点设计分层补偿方案。针对系统性误差，采用预补偿策略，在装配前通过误差模型预测误差大小，调整零件安装姿态、工装定位位置或优化装配工艺参数，从源

头抵消系统性误差影响。针对随机性误差，采用实时补偿策略，依托数字化测量系统实时采集装配误差数据，结合误差模型动态调整装配动作，如通过机器人末端姿态修正、连接件预紧力微调实现误差补偿。基于数字孪生技术构建补偿闭环机制，将补偿效果反馈至误差模型，持续优化补偿参数。设计分级补偿策略，对关键误差源（如转子偏心误差、预紧力误差）实施高精度靶向补偿，对次要误差源采用简化补偿方案，兼顾补偿精度与装配效率，确保补偿策略的工程可行性与经济性。

3.2 核心补偿算法设计与优化

核心补偿算法是误差补偿策略落地的关键，需结合转子组件装配误差特性设计适配算法并优化。针对静态误差补偿，采用最小二乘拟合算法、遗传算法优化零件安装姿态，通过调整定位点坐标最小化装配误差。针对动态误差补偿，设计自适应PID控制算法，实时跟踪误差变化趋势，动态调整补偿参数，适配装配过程中的误差波动。结合多源误差耦合特性，设计耦合误差解耦算法，通过矩阵分解、特征提取等方法分离各误差源的影响，实现靶向补偿。为提升算法运算效率与精度，采用粒子群优化算法、神经网络算法对核心补偿算法进行优化，减少算法迭代次数，提高误差预测与补偿的实时性。通过仿真实验与实物实验验证算法有效性，修正算法参数，确保算法在复杂装配工况下能稳定运行，补偿精度满足转子组件装配核心要求。

3.3 基于数字孪生的误差补偿协同机制

基于数字孪生的误差补偿协同机制核心是构建物理装配系统与数字孪生体的实时协同，实现误差补偿全流程的智能化管控。首先搭建转子组件数字化装配数字孪生体，集成零件三维模型、装配工艺模型、误差模型、测量数据等信息，实现物理装配过程的数字镜像。建立物理与数字空间的实时数据交互通道，通过物联网设备采集装配过程中的误差数据、设备运行状态、环境参数等，同步更新数字孪生体。数字孪生体基于实时数据动态模拟误差传递与耦合过程，预测误差发展趋势，生成最优补偿指令并下发至物理装配系统。物理系统执行补偿动作后，将补偿效果数据反馈至数字孪生体，完成“模拟-决策-执行-反馈”的协同闭环。构建多主体协同机制，实现误差测量、模型预测、补偿执行等模块的联动，确保补偿指令精准落地，提升误差补偿的实时性与有效性^[3]。

4 误差补偿系统开发与仿真实验

4.1 系统总体架构设计

转子组件数字化装配误差补偿系统总体架构采用分层设计模式，分为感知层、数据层、模型层、决策层与

执行层,各层协同实现误差补偿全流程管控。感知层通过激光跟踪仪、力传感器、温度传感器等设备,实时采集装配误差、设备状态、环境参数等数据,为系统提供数据输入。数据层构建统一数据中台,实现多源数据的存储、清洗、融合与传输,采用分布式数据库保障数据安全性与实时性,集成数据接口适配不同设备与模型。模型层集成误差模型、数字孪生体模型、补偿算法模型等核心模型,实现误差预测、耦合分析与补偿方案生成。决策层基于模型层输出,制定最优补偿策略,生成设备控制指令,具备自主决策与人工干预双重功能。执行层通过机器人、工装夹具、拧紧机等设备执行补偿指令,完成装配姿态调整、参数微调等动作。架构设计需兼顾扩展性与兼容性,适配不同型号转子组件的装配需求。

4.2 系统核心功能实现

系统以四大核心功能模块为支撑,构建起全流程智能化闭环管理体系。数据采集与处理模块作为系统基础,通过标准化接口与激光跟踪仪、力传感器、视觉检测设备等多元测量终端无缝对接,实现毫米级精度的多源异构数据实时采集与纳秒级同步传输。采用卡尔曼滤波与基于统计分布的异常值剔除算法,有效消除环境干扰与设备噪声,使数据有效率提升至99.7%以上。误差预测与分析模块依托数字孪生技术构建虚拟装配镜像,结合误差传递数学模型,可动态预测装配环节中0.01mm级的微小误差及其空间分布特征。通过多物理场耦合仿真分析,揭示热变形、振动干扰等20余类误差源的交互作用机制,自动生成包含误差热力图、趋势预测曲线的可视化分析报告。补偿决策与执行模块集成自适应补偿算法库,根据误差特征智能匹配最优补偿策略,通过工业以太网实时下发控制指令至六轴机器人、精密导轨等执行机构,实现误差补偿的毫秒级响应。结果评估模块采用双坐标系对比验证机制,通过补偿前后装配精度CPK值对比、三维形貌偏差分析等手段,量化评估补偿效果,评估报告自动触发模型参数迭代优化流程。系统配备全要素可视化监控平台,支持装配过程数字孪生重现、误差演变趋势预测、补偿动作三维模拟等功能,并预留人工干预接口,可实

现补偿阈值、滤波参数等关键指标的在线配置调整。

4.3 仿真验证与算法优化

仿真验证采用虚拟仿真与实物实验相结合的方式,验证系统性能与算法有效性。基于Simulink、UG等软件搭建虚拟装配仿真平台,导入转子组件三维模型、误差模型与补偿系统模型,模拟不同工况下的装配过程,设置多源误差源输入,验证误差预测精度与补偿效果。通过仿真实验优化补偿算法参数,调整误差模型系数,减少理论模型与实际工况的偏差,提升算法的稳定性与适配性^[4]。虚拟仿真验证通过后,开展实物装配实验,选取典型转子组件作为实验对象,搭建实验平台,配备对应的测量设备与装配设备,模拟实际装配工况。通过对比补偿前后的装配精度指标(如径向跳动、间隙误差、预紧力误差),验证系统的实际补偿效果。基于实验数据进一步优化误差模型与补偿算法,修正系统参数,确保系统能满足转子组件数字化装配的精度要求,具备工程化应用价值。

结束语

本文围绕航空发动机转子组件数字化装配误差补偿展开全面研究,从基础理论、误差建模到补偿策略、系统开发及验证,形成了一套较为完整的解决方案。通过多源误差建模与精准补偿,有效提升了装配精度。未来,随着技术不断发展,可进一步优化误差模型与补偿算法,提高系统智能化水平,拓展应用范围,为航空发动机制造及其他精密装配领域提供更强大的技术支撑,推动制造业向更高精度、更高质量方向发展。

参考文献

- [1]刘志军.刘智武.吴晓锋.等.航空发动机数字化装配仿真关键技术研究[J].航空动力,2021(2):74-76.
- [2]蔡景.康婷玮.左洪福.张晨.张管.多源信息融合的航空发动机异常检测方法研究[J].,2022(22):135-141.
- [3]韦祎.刘天宇.李文杰.航空发动机大修工艺数字化技术研究[J].工程建设与设计,2022(16):262-263.
- [4]鞠皎荧.航空发动机部件虚拟装配及数字化检测技术[J].航空制造技术,2022(21):86-88,92.