

面向数字孪生的机床主轴热变形补偿系统开发

卢吉平,殷冬冬,孙小芳

(郑州电力高等专科学校,电气工程学院,河南省郑州市,450004)

摘要 数字孪生技术是一种通过数据驱动方式实现的智能服务和控制方法。构建数字孪生系统组成部分包括孪生空间、实体空间和虚拟空间。基于物联网收集技术,构建实体与虚拟空间之间的信息对应关系,基于MySQL等数据库,对所获取的主轴物性进行热边界变换,构建基于虚拟空间的热力特征APDL指令流。研究表明:数字孪生测试精度达到98%以上,热变形达到95%以上,电主轴热特性数字孪生体能够准确体现电主轴的实际热特性。

关键词 数字孪生;机床主轴;热变形;系统开发

中图分类号:TG659 文献标识码:B

文章编号:1008-0899(2025)12-0018-02

现代数控机床不断呈现高速化发展的趋势,在高速机床系统中,电主轴属于一个核心组成部件,该部件的尺寸控制精度与品质对其性能具有直接影响^[4-5]。当电主轴进入高速转动阶段时会发生明显热变形,从而降低了机床的控制精度,这种热误差属于机床误差的主要来源,对分析电主轴热特性具有重要参考价值^[6]。张丽秀^[3]则采取了不同路径进行控制,首先获取电机的实际损耗参数,然后运用有限元方法设置精确的电主轴温度增长模型,从而对电主轴内部温度分布情况实施预测,由此获得更高精度的电主轴温度预测结果。邓小雷^[4]在模型中同时加入了热源、导热系数并设置散热结构,利用风速法确定主轴表明传热系数,建立了主轴与立柱热耦合模型。

热边界辨识精度是影响电主轴热分析精度的关键因素,现阶段大部分学者都是根据理论仿真与实验测试结果来确定热边界参数,受复杂热边界与测试局限性的影响,辨识精度跟真实值之间会产生一定的差值。在分析热特性数字孪生机理的基础上,设计了数字孪生控制和通信系统,并开展测试分析。

1 热特性方案

作者简介:卢吉平(1981~),男,江西宁都人,讲师,高级技师,主要研究方向:智能制造技术。

热特性数字孪生策略,通过在电主轴核心区域部署温度探头进行实时监测,同时构建了一套多功能数据采集系统用于追踪关键部件的温度变化以及这些变化对主轴热变形的影响。将收集到的数据输入到数字孪生模型中,随后,我们通过热边界校正函数对主轴热边界进行调整^[5]。调整后的热边界信息通过APDL接口导入有限元模拟环境,接着,利用后台高效数值模拟工具对电主轴热行为进行深入数字孪生分析。

若发现测点1的仿真温度与实际值存在偏差,需要使用热边界校正模型来微调接触热阻1,直至两者吻合,以此锁定其数值。按照同样步骤处理测点2,通过对比实际温度和仿真结果差异性调整接触热阻2,直到两者的温度相匹配,由此确定其精确参数。经过上述迭代后,确定所有边界条件的精确状况。

2 热特性数字孪生系统

2.1 物理空间搭建

本文构建的实体结构主要由核心组件、信号监控单元和物联网数据采集模块组成。核心部分由变频控制器、电动主轴以及高效冷却体系构成。温度监控过程巧妙融合了热电阻和电涡流位移探测器,能够实时捕捉主轴关键区域的温度指标。对于物联网数据采集系统,则通过精确配置的IP地址和端口,建立与上级服务器间的TCP通道。根据以上条件,系统对获取的热性能参数进行深度处理和标准化转换,然后无缝对接到数据库中,确保信息的

准确存储和管理。

2.2 孪生空间开发

数字孪生系统构成要素包括孪生模型、逻辑模块与参数化模块,本文的热性能数字孪生模型特点在于结合了电主轴有限元素模拟过程与热特性参数,通过双向交互的方式将热参数注入到模型中,再进行深入热-结构动态关联^[6]。逻辑运算部分则利用Java程序驱动的方式。

建立数字孪生空间需要实时同步实体与数字镜像间的交互过程。通过软件平台整合数字孪生体和实体设备的参数信息,这些参数涵盖了实时测量的温度数据、云端监控图像、节点温度以及校正系数等变量。首先,从现场获取的温度数据导入软件系统中,接着通过修正函数对边界条件实施微调。在这一过程中,软件平台会调用优化后模型来获取电主轴热特性数据。最终,物理世界中的热特性状态可以在虚拟环境中以数字形式实时反馈,形成了电主轴和数字孪生体之间的映射路径。

样本数据与孪生模型之间的传输机制是通过集成TCP/IP协议的智能网络架构来完成的。此过程依赖于两个关键组件间的交互过程:一个运行IoT数据采集任务的Server服务器端,另一个是客户端的Client。它们通过接口技术进行高效的数据交换,这种接口要求至少存在一对连接结构,一方作为服务提供者,一方作为请求者。一旦客户端和服务端建立起稳定的通信连接,Server会接收到来自Client的请求,并以结构化的信息包形式实时转发传感器的最新参数。在客户端,这些信息包被精确地解析与处理。通信模型的详细流程显示了数据的双向流动和处理过程。

3 实验验证

针对SQD65-0.8-24K水冷电主轴进行测试,为获取精确温度参数,对测试区域开设了小孔,确保PT100温度测试器能够跟测试部位形成紧密结合状态,从而获得更高精度的测试结果。本实验按照均匀形式开始小孔,之后在这些小孔中填充具备导热功能的硅胶,有效降低传感器与测试部位接触热阻。设置热特性数字孪生空间,完成电主轴与虎钳的固定后,再把位移传感器固定至轴端,测试主轴轴芯热变形。

图1给出了对关键测温点进行测试得到的数字

孪生体温度及其实际测值。图2显示了由数字孪生技术模拟得到的轴向热膨胀与实际测试的数据。结果发现,所有通过数字孪生模型预测得到的测温点温度精度均达到98%以上,而仿真精确度超过了95%。由此可以判断,电主轴热性能数字孪生模型可以准确反映实际热效应。

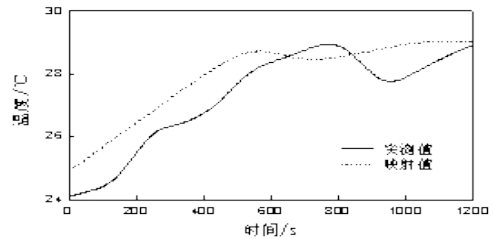


图1 冷却水套温度

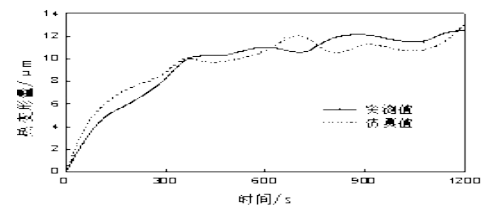


图2 轴端热变形

4 结语

本文开展基于数字孪生技术的机床主轴热变形分析,并开发设计了相应的监控系统,研究发现:数字孪生测试精度达到98%以上,热变形达到95%以上,电主轴热特性数字孪生体能够准确体现电主轴的实际热特性。

参考文献

- [1] 顾家宸,韩振宇,贾力伟,等.基于数字孪生的纤维缠绕虚拟仿真系统开发和应用[J].航空制造技术,2023,66(21):58-66.
- [2] 王进峰,问丛川,花广如,等.基于Unity3D的数控机床数字孪生系统设计与实现[J].中国工程机械学报,2023,21(05):443-448.
- [3] 张丽秀,李超群,李金鹏,等.高速高精度电主轴温升预测模型[J].机械工程学报,2017,53(23):129-136.
- [4] 邓小雷,戴温克,周翎飞,等.数控机床主轴-立柱系统热态特性分析与测试[J].光学精密工程,2020,28(03):601-609.
- [5] 李聪波,孙鑫,侯晓博,等.数字孪生驱动的数控铣削刀具磨损在线监测方法[J].中国机械工程,2022,33(01):78-87.
- [6] 方喜峰,张杰,程德俊,等.数字孪生驱动的船用柴油机关键件加工质量管控方法[J].机械设计与制造,2023(03):46-52.