

基于数字孪生的加工设备健康监测系统研究

连嘉琦 安富友

河北科技学院, 河北 唐山 063200

摘要: 加工设备健康运行是制造业提高生产效率和产品质量的前提条件, 人工巡检、单一传感器检测加工设备健康的方式存在监测滞后性、精度低、故障预判能力弱等问题, 无法适应现代化智能制造的需求, 数字孪生通过物理设备与虚拟模型的实时映射, 实现设备全生命周期的动态监测与仿真分析, 为加工设备健康监测提供全新技术模式。本文设计并实现基于数字孪生的加工设备健康监测系统, 集传感器数据采集、虚拟模型建模、数据交互、健康评价和故障预警等核心功能于一体, 结合实际生产场景改进系统结构, 解决传统监测系统的不足。搭建物理设备和虚拟模型实时数据链路, 实现设备运行参数采集、动态仿真及健康状态评价, 并进行实验测试验证系统的有效性, 测试结果表明, 可实时感知设备运行异常, 提高故障诊断精度, 提前预警故障、减少设备停机时间, 为加工设备智能运维提供可行的技术解决方案。

关键词: 数字孪生; 加工设备; 健康监测; 虚拟建模; 故障预警; 数据交互

0 引言

随着工业 4.0 的发展, 制造业正在快速向智能化自动化方向发展, 而加工设备作为生产过程中的关键设备, 其运行状况直接关系到生产进程、产品质量和生产成本。而加工设备大多数处于高强度、长时间工作状态, 齿轮、轴承、刀具等关键部件易出现磨损、疲劳、松动等情况, 如果不及时加以发现和及时处理, 很容易导致设备故障, 导致生产停止造成严重的经济损失。而传统的加工设备健康监测方法一般为人工巡检结合单一传感器检测的方式, 其弊端在于人工巡检效率低, 主观性强, 很难及时发现设备早期一些问题, 单一传感器检测只能得到局部运行参数, 很难呈现加工设备的整体健康状态, 且相关数据与设备实际运行情况不符, 故障诊断滞后。数字孪生能够建立和物理设备 1:1 匹配的虚拟镜像, 实现实时互联和虚拟仿真, 突破了传统监测方法的弊端, 是解决加工设备健康监测痛点的重要手段, 在金属加工、复杂机械运维等领域的应用已经显示出其优势。

1 系统需求分析与总体架构

1.1 系统功能需求

基于数字孪生的加工设备健康监测系统需要实现数据采集、虚拟映射、健康评估、故障预警、运行监控、数据管理 6 个功能。数据采集功能需要实现加工设备的主要运行参数, 如转速、温度、振动、负载等, 从而实现设备的数据采集, 供设备的健康评估和维护。虚拟映射功能需要实现与物理加工设备 1 比 1 的虚拟模型, 实现与物理设备的运行状态和虚拟模型

实时同步, 能够实时仿真设备运行时的状态, 直观反映设备的健康状况; 健康评估功能需要依据运行数据和虚拟仿真结果来建立健康评估指标体系, 实时评估设备健康等级, 识别设备的异常状态。故障预警功能需要实现设备早期故障信号, 根据早期故障类型和位置, 实时发出预警信号提醒工作人员及时处理, 避免扩大故障; 运行监控功能需要实时显示设备的运行参数、虚拟模型状态、健康等级等信息, 方便工作人员对设备运行状态进行实时监测。数据管理功能需要记录设备运行数据、健康评估结果、故障信息等信息, 形成设备运维数据库, 方便设备维护和系统优化。

1.2 系统性能需求

系统性能需求主要围绕监测精度、响应速度、稳定性、适配性四个方面, 针对具体生产环境制定具体指标。监测精度方面, 振动、温度等参数采集精度不低于 $\pm 2\%$, 故障诊断率不低于 96%, 精确检测设备运行异常和故障; 响应速度方面, 数据采集周期 100ms 以内, 虚拟模型与物理设备同步延迟不大于 200ms, 故障预警响应时间不大于 1s; 稳定性方面, 连续稳定运行 8 小时以上, 无故障, 数据传输无丢失、误传现象, 降低停机维护时间。适配性方面, 适配不同类型和规格的加工设备, 无需大规模地调整硬件结构和软件参数, 简单调试即可完成设备适配。

1.3 系统总体架构设计

整个系统采用模块化设计, 由物理层、数字孪生层、软件层、应用层构成。各层面分工协调, 全面实现系统的运行。物理层主要包括

加工设备、传感器模块、数据采集模块、通信模块,主要完成设备运行参数采集和传输的部分。数字孪生层作为基本,完成物理设备虚拟模型的建立,实现物理和虚拟空间的映射、动态仿真、数据交互,结合多物理场耦合技术,还原设备运行状态,为健康评估及故障预警提供仿真支持。软件层是系统的逻辑处理部分,主要包括数据处理、虚拟模型驱动、健康评估算法、故障诊断算法和数据管理模块,对所采集到的原始数据进行处理,驱动虚拟模型执行,完成健康评估及故障诊断;应用层是用户的操作界面,主要包括运行监控界面、故障预警界面、数据查询界面和参数设置界面,帮助用户操作界面实时监控设备状态、处理故障、管理数据。模块化设计方便系统的调试和维护,各个模块能够相互独立实现,具有一定的扩展性。

2 系统总体设计与实现

2.1 硬件选型与搭建

硬件选型以实用性、兼容性、稳定性和经济性四个方面为原则,结合设备运行实际情况,保证各硬件设备的协同工作,满足系统需求。传感器模块选择高精度的振动传感器、温度传感器和负载传感器,其中振动传感器用于采集设备关键部件的振动,温度传感器用于测量设备运行过程中的温度,负载传感器用于收集设备的负载数据,所有传感器均能抗干扰,保证数据采集的准确性。数据采集模块选择工业级数据采集卡,支持多通道采集,采集频率可调节,快速接收传感器采集的原始数据,进行初步滤波,减少噪声。通信模块选择5G+工业以太网通信,其中5G用于远距离数据传输,工业以太网用于近距离数据传输,保证数据采集的稳定性和实时性,确保采集的数据及时到达数字孪生层、软件层。虚拟建模服务器选择性能优异的工业服务器,具有强大的运算能力和存储能力,能够支持虚拟模型的实时驱动与仿真运算,满足多物理场耦合仿真的要求。硬件搭建按照系统整体结构先后完成传感器的安装、连接,将传感器固定在设备的重要部分,变换其安装位置,采集数据;连接数据采集模块和传感器、通信模块,配置数据传输线路;搭建虚拟建模服务器,安装建模软件,完成虚拟模型的搭建。

2.2 虚拟模型构建

虚拟模型是以物理加工设备为主体,基于多物理场耦合建模的方式,将物理设备和虚拟模型1:1映射,包括设备的机械、电气和运行特性。首先通过三维扫描获取物理设备几何参数,利用SolidWorks软件建立设备的几何模型还原

设备的外形、关键部件的尺寸和位置,几何模型与物理设备一致;添加设备的物理属性,包括材料属性、力学属性、运动约束等,模拟设备的运行情况,基于多物理场耦合,建立温度场、振动场、应力场,反映设备运行过程中的温度、振动和应力分布。虚拟模型与物理设备通过实时数据链路实现联动,将采集到的设备运行参数同步进入虚拟模型,驱动虚拟模型运行,实现物理设备运行状态的实时仿真,可以清晰的反映设备关键部件的运行情况,捕捉到细微的状态变化,并在虚拟模型设置健康监测节点,对应物理设备关键部件,实时采集虚拟模型运行数据,为后续进行健康评估和故障预警提供参考,解决传统检测方法难以反映设备内部状态的问题。

2.3 软件模块开发

软件系统采用Python编程语言,通过虚拟建模软件接口以及传感器通信协议进行各模块的集成,包括数据预处理模块、虚拟模型驱动模块、健康评估模块、故障预警模块、数据管理模块等。数据预处理模块对硬件层传输过来的数据采用高斯滤波算法滤除数据中的噪声,对缺失、异常数据进行修补,将数据标准化,转化成虚拟模型驱动和健康评估数据,保障数据的可靠性。虚拟模型驱动模块通过数据接口接收预处理后的运行数据,驱动虚拟模型运行,实现物理设备与虚拟模型的联动,并根据数据变化调整虚拟模型运行状态,真实模拟实际设备运行。健康评估模块基于运行数据和虚拟模型仿真结果建立健康评估指标,运用改进的模糊综合评价算法,评估设备的健康等级,分为正常、轻微异常、严重异常三种类型,得到设备的健康状态。故障预警模块通过分析运行数据和虚拟模型状态的变化,发送故障特征信号,结合故障数据库识别故障类型和位置,当设备异常或潜在故障时,发出声光预警,提供故障处理建议;数据管理模块通过数据库存储设备运行数据、健康评估结果、故障信息等数据,支持查询、统计、导出,建立设备运维数据库。

3 系统测试与优化

3.1 测试方案设计

系统测试以功能测试和性能测试两个部分为主,以加工设备实际运行场景作为测试平台,测试结果能够反应系统运行效果。功能测试以数据采集、虚拟映射、健康评估、故障预警等功能为主,测试数据采集的准确性和完整性,虚拟模型和物理设备的同步性,健康评估结果的合理性、故障预警的及时性和准确性;性能

测试以系统监测精度、响应速度、稳定性、适配性为主,依据系统性能需求确定测试指标,改变设备工况,获取设备工况下测试数据,测试系统在不同场景下的运行能力,以典型加工设备为测试对象,在设备主要部位安装传感器,搭建数据传输路线,运行系统软件,模拟正常工况、轻微异常、严重异常工况,记录测试数据,分析系统运行效果,排查系统存在问题。

3.2 测试过程与结果分析

测试过程中,首先进行功能测试,启动系统后,传感器成功采集设备的转速、温度、振动等运行参数,数据采集完整、准确,无丢失、误传现象;虚拟模型能够实时同步物理设备的运行状态,动态仿真设备的运行过程,几何形状和运行特性与物理设备一致;健康评估模块能够根据运行数据实时输出设备健康等级,评估结果与设备实际健康状态相符;当模拟设备出现故障时,故障预警模块能够及时捕捉故障信号,发出预警信号,准确识别故障类型和位置,推送合理的处理建议,所有核心功能均满足设计要求。性能测试结果显示,传感器数据采集误差控制在 $\pm 1.5\%$ 以内,故障诊断准确率达到97.2%,超过预设指标;数据采集周期为80ms,虚拟模型同步延迟为150ms,故障预警响应时间为0.8s,均满足响应速度要求;系统连续稳定运行10小时,无明显故障,数据传输稳定;系统能够成功适配两种不同规格的加工设备,无需大规模调整参数,适配性良好。测试结果表明,系统整体运行稳定,功能完善,性能达标,能够满足加工设备健康监测的实际需求,有效解决了传统监测方式的痛点。

3.3 系统优化

结合测试过程中发现的问题,对系统进行针对性优化,进一步提升系统的运行性能和实用性。针对数据采集过程中存在的轻微噪声干扰,优化数据预处理算法,增加自适应滤波环节,提升数据处理的精度,减少噪声对监测结果的

影响。针对虚拟模型同步过程中偶尔出现的延迟,优化数据传输链路,调整通信参数,提升数据传输效率,确保虚拟模型与物理设备的实时同步。针对健康评估精度的细微不足,优化健康评估指标体系,调整评价算法参数,结合设备运行历史数据,提升健康评估的准确性,能够更精准地识别设备早期异常。针对故障预警的针对性不足,完善故障数据库,增加不同类型故障的特征参数,优化故障识别算法,提升故障诊断的准确性和针对性,推送更贴合实际的故障处理建议。通过多轮优化,系统的运行稳定性、监测精度和实用性得到进一步提升,能够更好地适配实际生产场景,为加工设备健康监测提供更可靠的支撑。

4 结论

基于数字孪生的加工设备健康监测系统为解决传统加工设备健康监测缺乏监测速度快、监测精度低、故障预判能力弱等实际问题,通过物理层、数字孪生层、软件层和应用层构建完善、稳定的健康监测系统。硬件采用精密的硬件设备,通过数据采集和传输网络,建立和物理设备1:1匹配的虚拟模型,实现物理与虚拟空间的实时映射、动态仿真,全面、准确地掌握设备运行状态。软件结合主要功能,通过数据预处理、健康评估、故障预警模块实现设备健康状态的评估和前期故障预警,通过测试验证和系统优化,确保满足实际生产需求。测试结果表明,系统监测精度高、速度快、稳定,故障诊断准确率为97.2%,可提前捕捉设备故障隐患,减少停机时间、降低运维成本,推动加工设备运维由“被动维修”向“主动预判”转变。该系统的设计与实现为加工设备智能化健康监测提供了有效的技术支持,丰富了数字孪生技术应用制造业设备监测领域,有助于制造业智能化升级。

参考文献:

- [1] 吴艳. 机械加工设备急停保护系统可靠性提升的工程技术路径研究 [J]. 现代制造技术与装备, 2026, 62(02): 57-59.
- [2] 刘伟, 程明亮, 黄正凯, 等. 基于数字孪生和混合现实的人机共存安全防护系统 [J/OL]. 机器人, 1-9 [2026-03-22].
- [3] 仇祥桂. 机械加工车间的危险有害因素识别与安全管理体系构建 [J]. 中国设备工程, 2026, (05): 54-56.

作者简介: 连嘉琦(2003.03—), 男, 汉族, 河北省保定市, 专科, 研究方向: 机械制造及自动化。