

数字孪生驱动的机电设备远程运维方法

孙培禄^{1,2}, 刘馨², 张耿³, 张映锋³

(1. 运城学院机电工程系, 044000, 山西运城; 2. 西安工业大学机电工程学院, 710021, 西安;

3. 西北工业大学工业工程与智能制造工信部重点实验室, 710072, 西安)

摘要: 针对机电设备制造商为远程客户提供维护/维修/大修和运营(MRO)服务时存在的高成本与低效率问题,提出了一种数字孪生驱动的机电设备 MRO 远程运维方法。首先,从远程运维服务端和客户端开展分析,构建机电设备 MRO 数字孪生远程运维服务的数学模型;其次,利用云端服务器实现本地客户端与异地服务端的虚实同步,从服务端视角搭建设备孪生机电模型,研究了远程运维异构数据融合问题,阐述了远程运维服务和设备故障智能诊断的实现过程;最后,以三轴数控加工设备为对象,部署数字孪生远程运维服务三层架构,对设备开展运行过程同步监控和主轴电机故障诊断。研究结果表明:异地服务端孪生模型实现了客户端设备的远程同步实时监控,能够对客户端设备进行远程数据采集和分析并做出故障智能诊断,验证了所提模型和方法的有效性。该研究可为数字孪生驱动的远程运维服务提供参考。

关键词: 数字孪生;维护/维修/大修和运营;远程运维;机电设备

中图分类号: TP399 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202508003 **文章编号:** 0253-987X(2025)08-0020-12

Digital Twin-Driven Remote Operation and Maintenance Method for Electromechanical Equipment

SUN Peilu^{1,2}, LIU Xin², ZHANG Gen³, ZHANG Yingfeng³

(1. Department of Mechanical and Electrical Engineering, Yuncheng University, Yuncheng, Shanxi 044000, China;

2. School of Mechatronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China;

3. Key Laboratory of Industrial Engineering and Intelligent Manufacturing of Ministry of Industry and Information Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: To address the high costs and low efficiency faced by electromechanical equipment manufacturers when providing maintenance, repair, overhaul, and operation (MRO) services to remote clients, a digital twin-driven remote operation and maintenance method for electromechanical equipment is proposed. First, an analysis is conducted from both the remote operation and maintenance service server and client perspectives, leading to the construction of a mathematical model for digital twin remote MRO services. Next, cloud servers are utilized to achieve virtual-physical synchronization between local clients and remote servers. A twin electromechanical model of the equipment is established from the server's perspective, and the issue of heterogeneous data integration in remote maintenance is addressed. The implementation process of remote maintenance services and

intelligent fault diagnosis is investigated. Finally, a three-axis computer numerical control machining device is selected as the subject for deploying a three-layer architecture of digital twin remote maintenance services, facilitating synchronized monitoring of the operating process and spindle motor fault diagnosis. The results indicate that the twin model at the remote service end enables real-time synchronized monitoring of the client device, allowing for remote data collection, analysis, and intelligent fault diagnosis, thereby validating the effectiveness of the proposed model and method. This research provides a reference for digital twin-driven remote maintenance services.

Keywords: digital twin; maintenance/repair/overhaul and operation; remote operation and maintenance; mechatronics equipment

在当今全球经济体系中,企业品牌本身蕴含着显著的资产价值,消费者在做出购买决策时,往往会受到企业品牌效应的深刻影响。这一现象在制造业领域内同样显著,其中知名制造商的产品通常被视为质量可靠与信誉卓著的象征。除了产品设计与生产流程、市场营销策略等前端环节外,维护并强化企业品牌认同度的路径还延伸至后端服务领域,即售后服务成为提升品牌忠诚度与正面形象的有效机制。通过提供卓越的售后服务,企业能够进一步增强消费者的品牌偏好与忠诚度,从而在竞争激烈的市场环境中稳固并扩大其市场份额。维护/修理/大修和运营(MRO)是制造业领域的服务模式之一,其代表的并不是某一固定的产品,而是对客户恰到好处的服务^[1]。从事MRO服务的企业或单位在面临客户运维请求时,需要派遣驻场工作人员或指派临时工作人员,这种情况带来的高成本和低效率往往让人难以接受。

工业物联网的快速发展正在推动制造业智能化转型进入新阶段。随着传感技术、边缘计算与云平台的深度融合,工业设备已逐步形成覆盖感知层、传输层到应用层的全链路数字化能力。这种技术演进不仅实现了生产数据的实时采集与可视化管理,更重要的是还催生了设备运维模式的系统性升级——通过构建跨地域、跨系统的远程运维体系,设备运行状态得以突破物理空间限制进行全天候监控。远程运维是MRO服务模式下出现的一种技术,其使得维护人员无需亲临现场,即可实时进行设备监控、故障排除和修复,节省了时间和成本。远程运维在MRO中发挥了重要作用,使得维修、维护和运营过程更加高效和便捷。通过远程运维,维护人员可以迅速响应设备故障和异常,并远程进行诊断和修复,以减少停机时间和生产损失。国内变电站领域的远程运维研究较多^[2],远程运维尤其适用于海上偏远地区发电机组^[3]。制造业和自动化领域同样也有相关研究^[4-5],以降低设备运维成本。目前,远程运维

技术能够对设备进行简单的远程维护,但无法获取设备的详细运行数据,维护的层次较为单一,也无法对设备故障形成深层次、多维度的有效分析,更无法对设备运行状态进行预测。

陶飞等^[6]提出了最新的数字孪生五维模型,使得数字孪生的相关研究迎来高峰。随着其研究内容的不断深入,从设备的故障诊断^[7]、剩余寿命预测^[8]、设备装配的误差分析^[9],到生产车间的可视化监控^[10]以及生产线的数字孪生应用^[11],均有数字孪生的相关研究。李琳利等^[12]完整论述了数字孪生在产品全生命周期中的应用,提出了产品数字孪生多学科协同建模方法。随着数字孪生的应用领域继续扩大,在电力电网系统^[13]、水利工程^[14]、智慧城市发展^[15]和医学医疗领域^[16]均有相关研究。伴随着应用领域的扩大,数字孪生的内涵被不断丰富和扩充,在其研究和应用从工业领域扩展到其他领域的过程中,物理实体和虚拟模型的概念不再只是简单的具体存在,凡是可以具有数字孪生虚实映射特性的存在均可以称为数字孪生。数字孪生驱动的设备远程运维能够获取设备运行的全部数据,对设备进行更全面分析,并形成可靠的预测性分析结果。

闫德林等^[17]将数字孪生应用于加油机器人的远程运维,实现了对其从外部环境到内部工作状态的全面检测,通过对孪生数据的分析,形成了对加油机器人的预防性维修。洪学武等^[18]将数字孪生应用于船舶的远程运维,采用卫星或4G、5G通信技术,建立船舶数字化运维模型与船舶之间的通信,形成对船舶关键设备运行状态的健康管理,既降低了运营成本,也为无人船研究提供了参考。Apostolidis和Stamoulis^[19]在飞机系统MRO研究中引入基于人工智能的数字孪生,旨在增强预测性运维能力并降低运营成本。王义军等^[20]设计针对桥式起重机的数字孪生监控管理系统,实现了对起重机设备的状态监控和故障诊断。Yu等^[21]设计管道数字孪生运维系统框

架,实现了对管道系统的高效运维分析。李旭东^[22]设计基于数字孪生技术的电磁搅拌设备远程运维系统,实现了对电磁搅拌机的远程监控和故障诊断。Yu 等^[23]提出了一种面向服务的织造机数字孪生建模方法,并对喷气织机的翘曲时间预测服务进行了案例验证。黄彬彬等^[24]研究了数字孪生驱动的复杂产品智能运维服务体系与核心技术,并采用数控机床通过其核心技术验证了构建体系的可行性。Sun 和 Liu^[25]研究了数字孪生技术驱动的机电设备远程运维服务,提出数字孪生远程运维服务概念,搭建数字孪生远程运维服务平台,研究了基于数字孪生远程运维服务虚拟仿真、软/硬件在环虚拟调试、虚实同步和云端互联 4 个层次的支撑技术,为数字孪生驱动的远程运维理论和方法的深入研究奠定了基础。

综上所述,已有众多关于数字孪生驱动设备运维的研究,但这些研究仅适用于固定设备,强调数字孪生技术应用,更多聚焦在数字孪生运维平台和体系上,并没有从理论方法层面、以运维服务提供者的视角阐述数字孪生如何驱动远程运维服务。基于上述现状,本文开展了如下研究:首先,基于原始设备制造商视角,构建 MRO 数字孪生远程运维服务模型;其次,基于数字孪生以虚映实和以虚控实的特性,提出 MRO 数字孪生远程运维服务方法,并对该方法进行了详细研究;最后,采用三轴数控系统设备远程运维案例,验证模型和方法的有效性及其可行性。

1 MRO 数字孪生远程运维服务模型的构建

传统意义中,原始设备制造商(OEM)的产品是客观存在的有形产品,发展到如今,在有形产品的基础上增加了服务这种无形产品。数字孪生技术提出之前,无形服务是有形产品的附属品。数字孪生技术的出现,使得无形服务和有形产品具有同等地位。数字孪生具有以虚映实和以虚控实的特性,通过对设备虚拟实体的观测,可获取设备物理实体的运行状态,虚拟实体和物理实体之间的连接为 MRO 远程运维服务提供了前提。虚拟实体包含设备几何模型和数学模型两部分,几何模型提供虚实控制基础和监控大屏展示,数学模型是物理实体的抽象,是数字孪生虚实对应的关键。设备几何模型由 OEM 设计提供,数学模型由 OEM 运维提炼定义,并通过孪生模型实现对设备的运维服务。本文结合数字孪生和远程运维技术,以 MRO 服务为落脚点,提出 MRO 数字孪生远程运维服务(DTRS)模型 M_{DTRS} ,将其形式化地描述为

$$M_{DTRS} = \{E_{ONS}, E_{OFS}, E_{MROS}, E_{CDB}, E_{DS}\} \quad (1)$$

式中: E_{ONS} 表示本地服务对象; E_{OFS} 表示异地运维组织; E_{MROS} 表示远程运维服务; E_{CDB} 表示云端数据库; E_{DS} 表示各个部分通信之间的数据流。根据式(1),MRO 数字孪生远程运维服务模型的结构如图 1 所示。

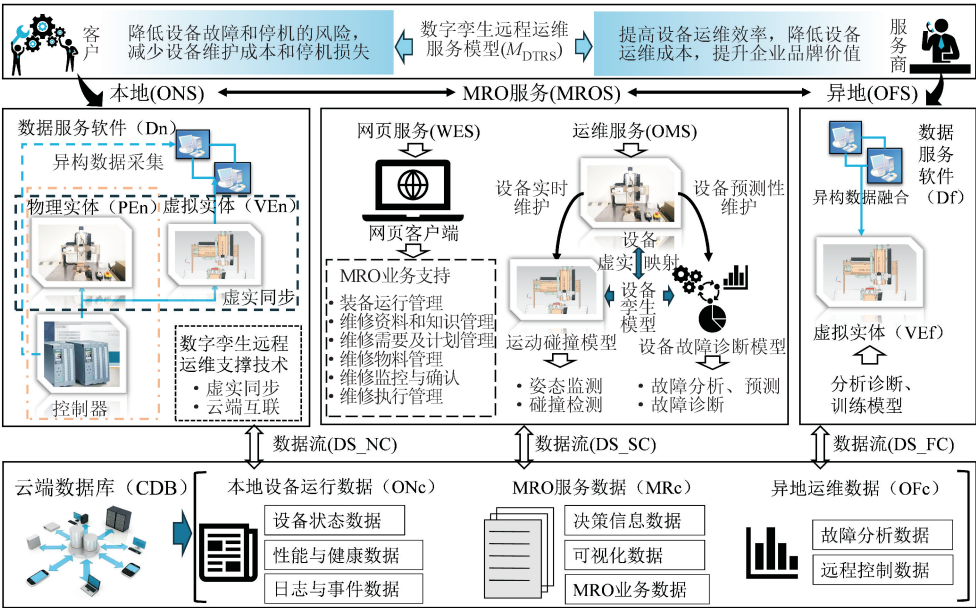


图 1 MRO 数字孪生远程运维服务模型

Fig. 1 MRO digital twin remote operation and maintenance service model

E_{ONS} 是 MRO 数字孪生的服务对象,也是构建 M_{DTRS} 的基础,本文构建的 E_{ONS} 不仅包括客户本地现场设备,还包括现场设备构建的本地虚实同步虚拟调试层级,虚实同步是由本地设备和设备孪生模型组成的最低层级的数字孪生体。在此基础上,采用数据服务软件将 E_{ONS} 产生的异构数据通过 E_{DS} 上传给 E_{CDB} ,这样便可形成 M_{DTRS} 中的 E_{ONS} ,形式化地描述为

$$E_{ONS} = \{PE_n, VE_n, D_n\} \quad (2)$$

式中: PE_n 、 VE_n 、 D_n 分别表示物理实体、虚拟实体和数据服务软件。

提供 MRO 数字孪生远程运维的异地运维组织 E_{OFS} ,通过数据服务软件从云端获取 E_{ONS} 的设备运行数据,一方面驱动异地的虚拟实体,用于观测 E_{ONS} 设备的运行状态,另一方面用于数据分析,训练故障诊断模型,采用专家系统或深度学习等方式对设备进行全面分析诊断。 E_{OFS} 可形式化地描述为

$$E_{OFS} = \{VE_f, D_f\} \quad (3)$$

式中: VE_f 、 D_f 分别表示映射 E_{ONS} 设备运行状态的虚拟实体和连接云端的数据服务软件,虚拟实体由从不同角度反映设备状态的孪生模型组成。

所有 E_{OFS} 在异地提供的服务 E_{MROS} ,既包括从云端获取数据实现的运维服务,又包括部署在云端的网页服务端服务。 E_{OFS} 提供的运维服务可分为实时维护和预测性维护,设备实时维护主要通过设备的运动碰撞模型,实现姿态监测和碰撞检测;设备预测性维护主要通过设备故障诊断模型,实现故障分析、预测和诊断。网页服务端服务主要用来实现 MRO 核心业务支撑。 E_{MROS} 可形式化地描述为

$$E_{MROS} = \{OMS, WES\} \quad (4)$$

式中: OMS 、 WES 分别表示运维服务和网页端服务。

云端数据库 E_{CDB} 包含 M_{DTRS} 整个构成的所有数据,可形式化地描述为

$$E_{CDB} = \{ON_c, OF_c, MR_c\} \quad (5)$$

式中: ON_c 、 OF_c 、 MR_c 分别表示本地设备运行数据、异地运维数据和 MRO 服务数据。 ON_c 主要包括设备状态数据、性能与健康数据和日志与事件数据; OF_c 主要包括故障分析数据和远程控制数据; MR_c 主要包括决策信息数据、可视化数据和 MRO 业务数据。

整个 E_{MROS} 过程中所有的数据流 E_{DS} 可由各种

通信协议构成,例如 OPC 协议、TCP 协议等。 E_{DS} 可形式化地描述为

$$E_{DS} = \{DS_{NC}, DS_{FC}, DS_{SC}\} \quad (6)$$

式中: DS_{NC} 、 DS_{FC} 、 DS_{SC} 分别表示 E_{ONS} 和 E_{CDB} 的连接、 E_{OFS} 和 E_{CDB} 的连接以及 E_{MROS} 服务和 E_{CDB} 的连接。

在运维服务过程中,客户在本地的现场设备构成本地服务对象,运维服务商在异地构建异地运维组织,本地服务对象通过本地与云端的连接发送数据到云端数据库中,异地运维组织再通过异地与云端的连接从云端数据库获取设备运行数据。这些数据经过运维服务商的分析后形成对客户设备的异地运维服务。服务产生的数据再通过运维服务与云端的连接存储于云端数据库中,一方面直接维护本地服务对象的设备,另一方面形成对本地服务对象设备的 MRO 维护资料。上述过程即实现了 MRO 数字孪生远程运维服务。

2 MRO 数字孪生远程运维服务方法

制造商通过自身的 MRO 服务业务,为客户提供有效的远程运维服务,服务的形式分为实时维护和预测性维护两种,实时维护是指运维服务商对联网设备进行运维诊断,在分析设备运行数据后,找出潜在的故障发生点,减少甚至消除设备故障隐患;预测性维护一般是指客户主动向运维服务商提出运维请求,这通常发生在设备运行至需要停机维护的年限,或因为故障停机时。实时维护和预测性维护的主要区别在于客户是否主动提出申请,服务内容其实存在重叠之处,例如提供预测性维护时也可以使设备处于实时同步状态,对设备系统当前的运行进行动态测试和分析。MRO 数字孪生远程运维服务方法主要包括 3 部分,第 1 部分是客户端所在地数字孪生模型的搭建,第 2 部分是异构数据融合,第 3 部分是运维服务商的远程运维服务和设备故障诊断,如图 2 所示。

2.1 数字孪生模型的搭建

客户购买 OEM 的机电设备产品,包括其真实的物理设备和对应的数字资产,主要是机电设备的孪生模型。采用控制器控制真实设备和孪生模型,并在客户所在地(以下简称本地)构建真实设备和孪生模型的虚实同步运行环境,这就是最低层次数字孪生。以三轴数控加工设备为例,实现本地数字孪生虚实同步的过程如图 3 所示。

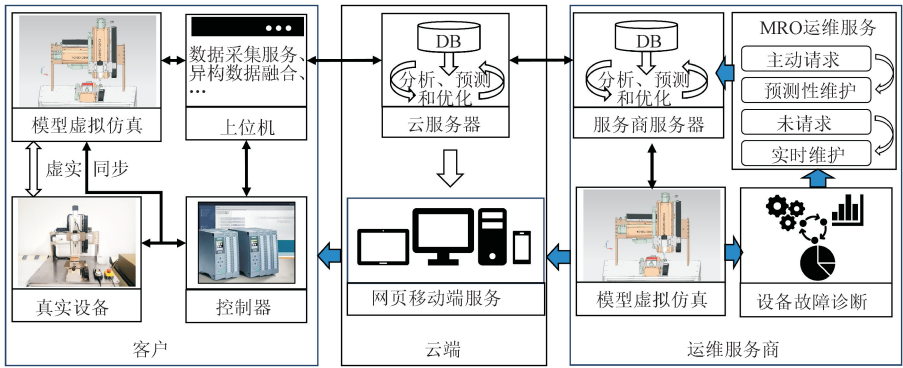


图 2 MRO 数字孪生远程运维服务方法

Fig. 2 MRO digital twin remote operation and maintenance service method

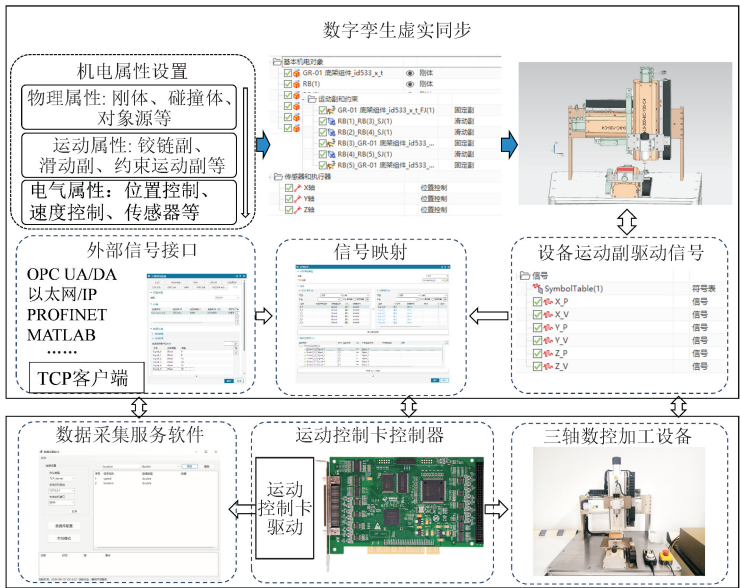


图 3 本地虚实同步实现过程

Fig. 3 Process of on-site virtual and real synchronization

本地虚实同步首先需要在具有虚拟仿真功能的软件中添加机电设备的机电模型,包括设置必要的物理属性、运行属性和电气属性,其次添加设备的运动副驱动信号,并配置相应的外部信号接口,然后将外部信号与设备运动副的驱动信号映射连接,最后设置好孪生模型,采用数据服务软件将孪生模型与真实的物理设备建立连接。本地运行虚实同步环境中的数据通过数据服务软件可储存在云端的云服务器中,数据是产生服务的前提,将其提供给运维服务商,运维服务商便可使用数据对设备形成 MRO 数字孪生远程运维。

2.2 异构数据融合

传统设备远程运维过程中产生的工业时序数据

往往是结构化的,且均为数值类型,例如一些车间中,可使用长度固定的浮点数表示传感器中采集到的电流和电压数据。这是由于传统设备在远程运维过程中获取数据的方式单一所导致的。通过观测一段时序数据的变化趋势,分析设备故障,消除潜在安全隐患,也可分析设备的产能和消耗等。异构数据的采集过程和传统设备运维数据采集过程类似,同样是基于时间变化采集到的工业时序数据,采用现有的通讯协议均可完成该过程。

数字孪生远程运维服务中的异构数据融合效果较为显著。数字孪生远程运维服务过程中,为保证孪生模型能够准确映射设备的当前运行状态,需要从多维度获取设备状态信息。由于运维服务过程中使用的工

具和设备不同,导致数字孪生运维过程中的数据存在模态异构、结构异构、时间异构、空间异构以及分辨率

异构 5 种异构形式。针对数字孪生远程运维过程中的数据异构,采用不同方式将其融合,方式如图 4 所示。

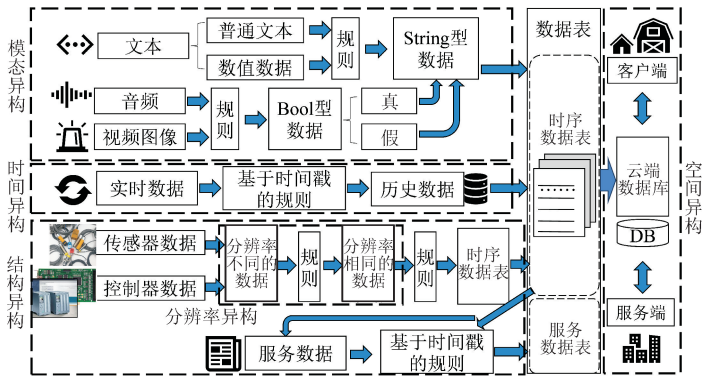


图 4 数字孪生远程运维服务数据异构融合

Fig. 4 Digital twin remote operation and maintenance service data heterogeneous fusion

远程运维过程中,模态异构是设备分布式传感器为了能够获取多维信息而采集的数据,包括文本数据、音频数据和图像数据。首先,将文本数据分为普通文本数据和数值数据,基于一定规则可使普通文本和数值数据转变为 String 型数据;然后,将音频数据和视频图像数据基于一定规则转换为 Bool 型数据,规则原理是某段时间内的音频是否表示设备异响或故障,视频图像中指示灯的状态或设备运行的姿态是否合理,再将 Bool 型数据同样转换为 String 型数据;最后,将实时采集的数据基于时序存储在数据库中,形成时序数据表。

结构异构为远程运维过程中,传感器数据、控制器控制数据、服务数据在存储之前存在的异构现象。首先,从设备获取各种传感器和控制器数据,基于一定规则存储在时序数据表中;然后,运维服务团队采用时序数据表中某段时间内的数据,对设备进行分析以产生服务数据,经过基于时间戳的规则形成针对某段时间的服务数据;最后,结合时序数据表和服务数据,将其存储在服务数据表中。

时间异构为客户设备运行中产生的历史数据和实时数据在时间维度存在的异构现象。采用基于时间戳的规则,将设备实时运行产生的时序数据按某个固定时间长度,分别存储在不同时序数据表中。不同时序数据表中存储着不同时间段内连续的设备运行数据,需要对设备分析时,可针对某一时间段,提取一张或多张时序数据表进行精准分析。

空间异构为远程运维服务的对象客户设备和运维服务提供者分处异地,在数据交互过程中存在的异构现象。客户端设备运行的数据和服务端服务产生的数据会上传至云端的数据库中,客户端和服务

端可实时更新必要的的数据,消除空间异构的影响。

分辨率异构为数据提取的频率难以保持一致,导致各个来源的数据存在精度和颗粒度上的差异。此时,对采集到的不同分辨率的数据,按一定规则进行处理,使其分辨率相同即可,规则可以是针对固定时间段的数据进行插补拟合等。

数字孪生远程运维服务过程中,数据的采集、融合处理、存储和获取的常用算法实现过程如图 5 所示。由图可见,数据采集阶段,通过 OPC UA 网关内置的协议转换模块统一接入 Modbus、CAN 等异构工业设备;数据集成工具 Apache NiFi 利用处理器链实现数据的格式转换与路由,并通过 Delta 编码压缩传感器变化量数据,以降低传输冗余;在边缘端部署轻量化深度学习框架运行自适应采样算法,动态调整传感器采样率,优化数据分辨率异构。数据处理阶段,采用开源流数据框架 Apache Flink 的事件时间机制与水印机制对齐乱序流数据,通过滚动窗口聚合实现数据的时间对齐;采用开源开发环境 PyTorch 搭建多模态 Transformer 模型,将预训练的特征提取器与时序编码层相结合,通过跨模态注意力机制实现文本、图像、传感器数据的语义融合;使用开源时序预测算法与孤立森林算法,实现跨模态联合异常分析。数据存储阶段,采用时序数据库 InfluxDB 存储高精度时序数据,采用图形数据库 Neo4j 以属性图模型持久化设备拓扑关系,采用对象存储系统 MinIO 托管列式文件及非结构化图像/视频。数据获取阶段,通过数据可视化与分析工具监控仪表系统关联时序库与关系库实现混合数据可视化,通过开源 AI 相似性搜索工具 FAISS 对 PyTorch 生成的多模态嵌入向量建立索引,支持“以图搜文”等跨模态检索,再将 Ceph 作为

统一存储池整合 InfluxDB、Neo4j、MinIO 的物理资源,构成多模态数据湖,最终形成从异构采集、动态对齐、融合分析到统一访问的完整闭环。

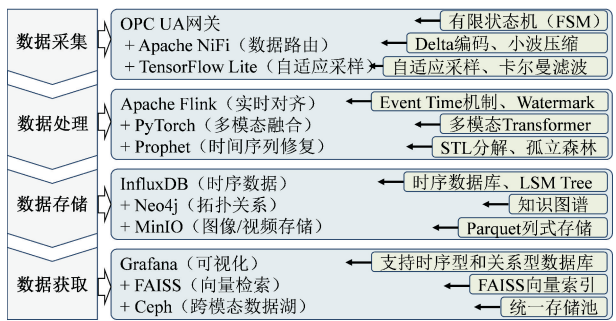


图 5 数字孪生远程运维数据处理流程

Fig. 5 Digital twin remote operation and maintenance data processing procedure

2.3 远程运维服务和设备故障诊断

当本地客户的设备产生服务需求时,异地运维服务商可通过设备的孪生模型提供远程运维服务。MRO 数字孪生远程运维服务过程如图 6 所示。

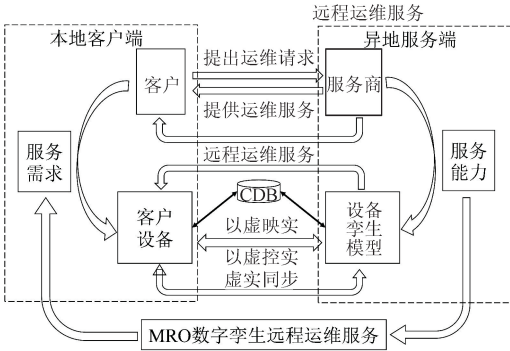


图 6 MRO 数字孪生远程运维服务过程

Fig. 6 MRO digital twin remote operation and maintenance service process

本地客户端的虚实同步运行环境与异地服务端的虚拟仿真运行环境通过云端建立起连接,本地设备的运行数据通过云端驱动异地的孪生模型运行,异地孪生模型的运行状态体现本地物理设备的运行状态,本地客户端设备和异地服务端孪生模型构成虚实同步关系。云端通信主要靠部署在云端的数据库实现,数据库中的数据可直接来自于客户端设备的运行,也可从客户端的本地数据库中提取历史运行数据。从本地客户的物理实体数据到云端再到异地的虚拟实体,经过运维服务商分析后再回到云端,最后再返回到本地客户,构成完整服务流程循环。

运维服务端的存在可以是 OEM 中的下属 MRO 服务部门,也可以是独立的 MRO 运维服务商。OEM 具备设备的全部生产资料,通常被认为是更理想的设备运维服务商。运维服务商要想实现对客户设备的 MRO 数字孪生远程运维服务,就需要在运维服务商所在地(以下简称异地)搭建设备的虚拟仿真环境。虚拟仿真环境中,孪生模型的驱动数据是从云端获取的本地设备运行数据,可被保留在异地的服务商服务器中,用于后续设备的更新迭代升级。异地运维服务商对从云端获取的数据进行深层次分析,再将得到的数据反馈到云端形成服务,该服务一方面直接反馈给客户本地设备,一方面通过网页端和移动端获取。

运维服务端中部署了与运维机电设备对应的故障诊断系统,其原理如图 7 所示。远程运维过程中,客户设备的运行数据存储在云端数据库中,服务端从云端获取经过异构数据融合处理的客户端本地设备运行数据,将其作为原始信息来源输入给故障诊断系统,对故障的类型、部位及原因进行诊断后,最终给出解决方案,实现故障恢复。

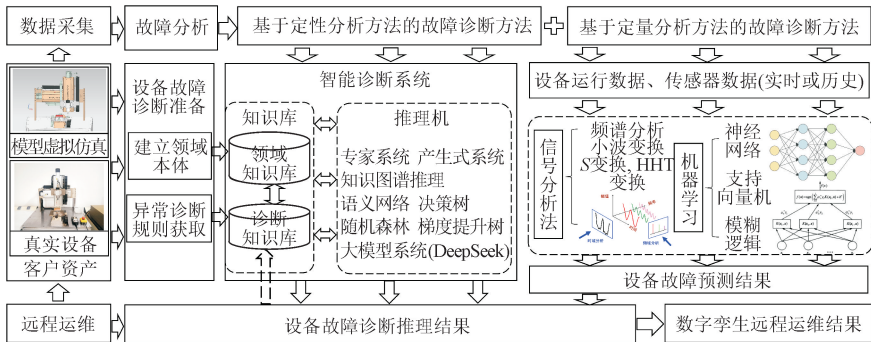


图 7 设备远程故障诊断系统原理

Fig. 7 Principle of the equipment fault diagnosis system

故障诊断系统采用的方法包括基于定性分析方法的故障诊断方法和基于定量分析方法的故障诊断

方法。基于定性分析方法的故障诊断方法主要由智能诊断系统实现。进行故障诊断前,对固定的机电设

备创建故障诊断领域的本体知识,建立异常诊断规则,本体知识构成知识库中的领域知识库,异常诊断规则构成诊断知识库,推理机使用包括传统的专家系统或前沿的大模型系统(如 DeepSeek),实现故障推理功能,知识库和推理机共同组成智能诊断系统。基于定量分析方法的故障诊断方法主要靠信号分析或机器学习实现。将设备的运行数据和传感器数据作为数据源,采用信号分析法或机器学习方法对数据进行分析处理,在实现对设备进行故障诊断的同时,也可对设备故障进行预测。智能诊断系统可以是 OEM 生产设备的配套数字资产,在设备运行初期即可使用,信号分析或机器学习则是在设备运行较长时间后积累了较多的设备运行数据,再采用这些数据对设备进行故障预测或故障诊断,诊断结果可作为智能诊断系统诊断知识库的补充,如此循环,实现数字孪生远程运维服务。算法的实现流程如图 8 所示。

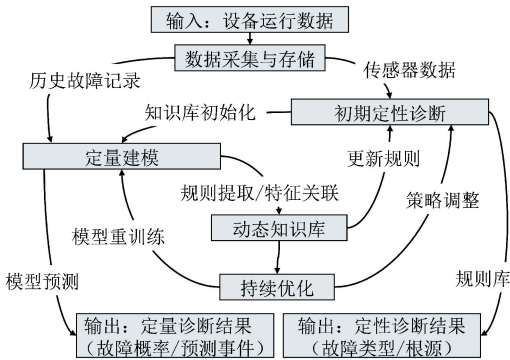


图 8 算法实现流程
Fig. 8 Algorithm implementation flow

具体过程为:通过融合传感器时序数据和历史故障记录的多模态数据融合技术,构建设备状态监

测体系;在设备运行初期,建立基于专家系统与模糊故障树分析相结合的定性诊断模型,采用隶属度函数量化不确定性知识;随着数据积累,构建融合监督学习与无监督学习的混合诊断模型;运用随机森林、XGBoost 算法等进行故障分类,采用长短期记忆网络实现退化预测,结合 K-means 聚类 and 主成分分析法降维实施异常检测;在构建定量诊断模型的基础上,通过 Apriori 算法挖掘故障关联规则,并运用 LIME、SHAP 等可解释 AI 技术解析模型决策逻辑;继而运用知识图谱,实现诊断知识的动态表征与推理,基于强化学习优化诊断策略的决策路径,通过贝叶斯网络进行概率参数的动态更新;最终构建“数据驱动建模-知识演化更新-模型在线学习”的闭环优化机制,即通过贝叶斯网络动态更新概率推理参数,利用强化学习优化诊断策略,结合增量式训练实现模型迭代,以及依托 A/B 测试框架验证系统升级的有效性。

3 案例研究

本文以三轴数控加工机电设备(以下简称设备)为例开展研究,该设备包括主体、主体下方的控制柜和一台工控机。设备主体包括结构体和 3 组丝杠滑台模组。控制柜中安装有电气控制元器件,包括开关电源、继电器和伺服驱动器等。工控机中安装有运动控制卡。采用该设备可完成三轴加工工作。

3.1 数字孪生远程运维服务部署 3 层架构

数字孪生远程运维服务 3 层架构是 M_{DTRS} 的具体部署,是服务端面向客户端的服务组织架构。如图 9 所示,数字孪生远程运维服务 3 层架构包括设备层、数据层和孪生模型服务层。

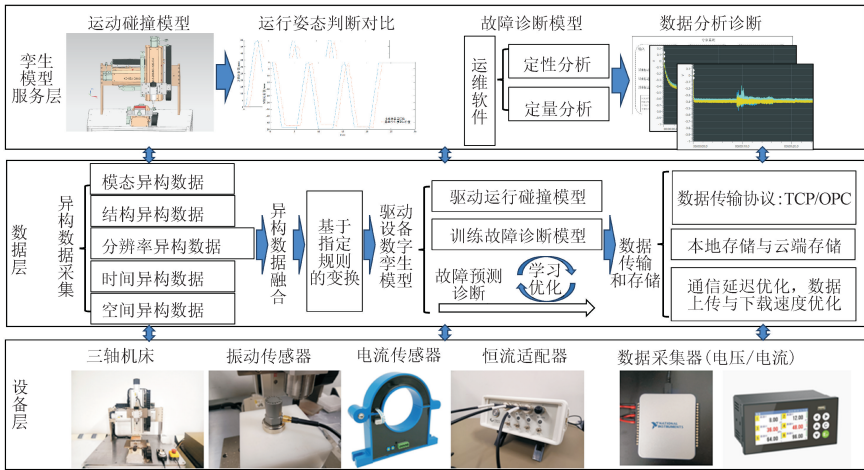


图 9 数字孪生远程运维服务部署 3 层架构
Fig. 9 Three-layer architecture for deploying digital twin remote operation and maintenance services

本案例中,设备层包括三轴机床、振动传感器、电流传感器、恒流适配器和数据采集器;数据层主要实现异构数据的采集和融合,并将融合之后的数据用于驱动数字孪生模型,实现数据的传输和存储;孪生模型服务层包括运动碰撞模型与故障诊断模型,两个模型均为设备的数字孪生模型,在数据驱动下能从不同角度反映设备的运行状态。

数字孪生远程运维服务3层架构在应用中并不局限于图中的元素。设备层中,对于不同的机电设备,针对不同的研究问题,所使用到设备的传感器可能不尽相同,例如监控机床环境和设备温度时需要温度传感器;数据层中可以增加更为复杂的处理过程,例如增加人工智能驱动的数据分析过程;孪生模型层中也可耦合设备的其他数字孪生模型,例如增加设备部件的多物理场耦合模型。

3.2 数字孪生驱动的远程运维实现

数字孪生驱动的远程运维实现过程为:将设备与工控机作为客户端,是服务的对象,再使用一台电脑作为MRO服务端,是服务的主体。运维过程主要包括两部分:第一部分通过MRO服务端和设备的客户端实现实时同步,以验证数字孪生远程运维服务运动碰撞模型的可行性;第二部分设计客户端设备运行过程出现故障,检验设备故障诊断模型的有效性。数字孪生远程运维服务3层架构中,设备层和数据层是孪生模型服务层的支撑,通过对两部分孪生模型的验证,验证数字孪生远程运维服务方法的有效性。

在案例研究过程中,按照数字孪生远程运维方法分别搭建本地服务对象和异地运维组织,然后设置数据库配置,之后运行案例。首先,操纵设备进行X轴和Z轴的连续点动,观察客户端设备的运行姿态和服务端孪生模型的运行姿态是否一致;然后,控制客户端设备进行平面铣削加工,并设计电路制造设备故障,查看运维软件的输出结果是否符合预期;最后,分析案例验证结果。具体过程如下。

步骤1 搭建本地服务对象,包括本地物理实体,本地虚拟实体和本地数据服务软件。本地物理实体即设备,设备数字孪生模型和数据服务软件均在工控机中。设备已和工控机中的运动控制卡建立连接,在NX MCD中创建设备数字孪生模型,主要包括孪生模型的机电属性添加以及控制信号的添加和映射。配置本地数据服务软件设置,使设备和设备孪生模型建立信号连接,运行时可实现虚实同步,并将异构数据经过处理上传至云端数据库。

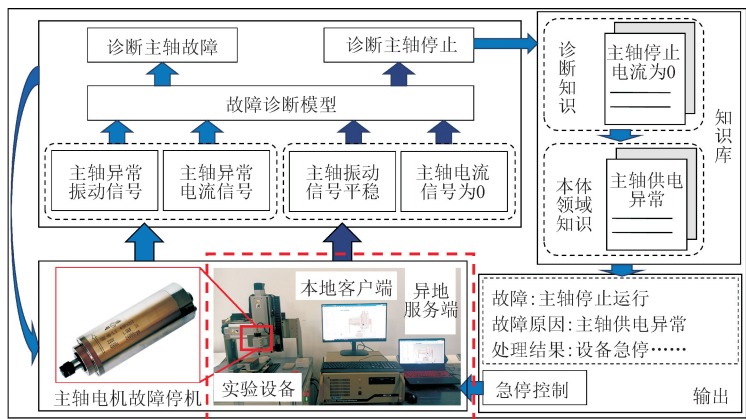
步骤2 搭建异地运维组织,包括异地设备数字孪生模型和异地数据服务软件。异地设备孪生模型和本地设备孪生模型类似,但在虚拟环境中添加的信号不同,本地设备孪生模型不仅有控制驱动信号,还有状态反馈信号,异地设备孪生模型则只有驱动控制信号。异地数据服务软件是和本地数据服务软件具有类似数据服务和传输功能的软件,使用异地数据服务软件连接云端数据库和异地设备孪生模型。同时,异地数据服务软件在本案例中还是一个运维软件,集成了故障诊断模型和专家系统,能够实现对设备运行状态的判断。

步骤3 云端数据库配置。在云端MySQL中添加客户端和服务端匹配的用户通道,添加数据库容器和信号表数据结构,使异构数据能够存储在统一的数据库框架中,并进行相应的设置,连接本地和异地的数据服务软件并获取和修改其中的数据。

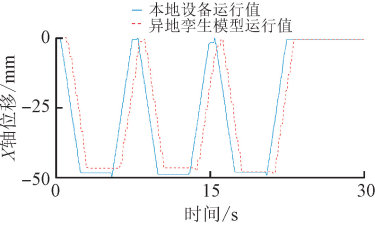
步骤4 运行实验。过程如图10(a)所示,图中实验设备是服务对象,工控机是客户端,客户端与设备构成虚实同步,笔记本电脑用来模拟异地服务端,运维团队在服务端的异地孪生模型和客户端的设备也构成虚实同步。服务端通过专家系统对客户端设备的运行状态进行判断,并输出解决方案。

步骤5 结果分析。在X轴与Z轴连续点动过程中,机床刀具在X-Z平面连续重复运行,得到图10(b)中客户端与服务端虚实同步过程中X轴的位移对比曲线。其中,蓝色实线是本地设备运行时的X轴位移曲线,红色虚线是异地孪生模型运行时的X轴运行曲线。由图可见,异地孪生模型的位移曲线与本地设备相仿,表明异地孪生模型能够映射出本地设备的运行状态。异地孪生模型的运行曲线整体滞后于本地设备,且在部分区域出现失真情况,这是由于实验过程中的通信延迟和数据采集频率较低叠加所导致的。无论是通信延迟还是数据采集频率,都能通过提升后期技术解决,因此可认为实验结果为异地服务端的孪生模型能够与本地设备同步运行,实现对本地设备的监控。

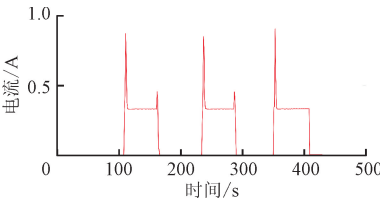
客户端设备进行平面铣削加工时,从设备出现故障到运维软件进行诊断并输出结果的过程如图10(a)所示。当设备主轴故障时,设备传感器会检测到主轴异常的电流信号和振动信号,电流信号用于观测电机每相的电流值,振动信号用于检测电机的振动情况,从而判断电机是正常运行还是存在故障情况。当信号输入故障诊断模型后,被诊断为主轴故障,



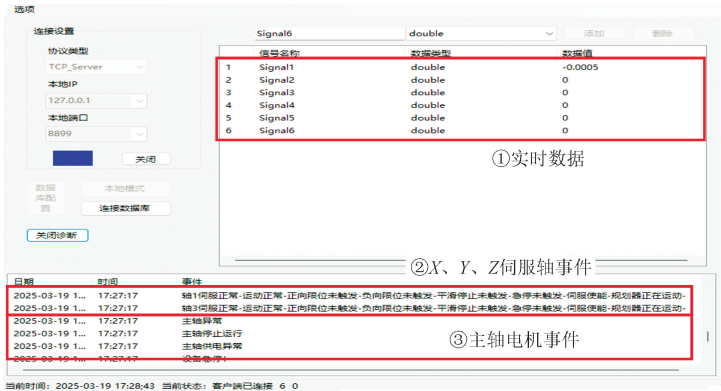
(a)故障诊断过程



(b)X 轴位移



(c)主轴电流



(d)故障诊断结果界面

图 10 数字孪生远程运维实验过程

Fig. 10 Digital twin remote operation and maintenance experiment

后续得到的主轴信号趋于平稳且电流信号为 0, 诊断主轴停止。经过诊断知识与本体领域知识后, 专家系统输出故障、故障原因和处理结果。实验结束后, 通过检查运维软件输出和查看设备是否急停, 判断实验是否成功。

实验过程中, 得到图 10(c)中的主轴电流曲线。图中存在 3 段“h”形曲线, 分别为主轴电机 3 次启停时电流传感器获得的电流数据。前 2 次电机启停为通过控制开关实现电机的启停, 第 3 次则是开关控制电机启动, 瞬间切断电机变频器与电机之间的三相接线, 模拟电机故障停机。3 段曲线的起始均出现了三相电机启动电流峰值, 在 0.80~0.90 A 之间, 随后均维持在 0.32 A。当电机停止时, 前两段

均出现了 0.40 A 的电流小峰值, 第 3 段则没有出现电流峰值, 直接从 0.32 A 降至 0。电机停止时, 是否出现电流小峰值即为判断电机是否正常停止的关键, 这也是设备主轴电机电流故障诊断模型的主要实现原理。

通过数据采集服务软件, 得到的故障诊断实验结果如图 10(d)中故障诊断结果所示。运维软件中的区域①显示为驱动孪生模型的实时数据, 区域②显示为 X、Y、Z 轴在设备运行过程中的故障诊断事件, 区域③显示为设备的主轴电机故障诊断事件。主轴的故障诊断事件内容显示包括主轴异常、主轴停止运行、主轴供电异常和设备急停。当控制设备出现主轴电源故障后, 运维软件即刻输出故障信息,

并控制设备急停。实验结果与预期相同,恢复故障后重启设备并清除运维软件报警状态后,设备即可开始重新运行。该故障诊断过程表明,MRO服务端的故障诊断系统能够对本地设备的运行过程进行故障诊断。该案例的实验过程展示了数字孪生远程运维服务模型的有效性和数字孪生远程运维服务方法的可行性。

4 结论与展望

本文对数字孪生驱动的机电设备远程运维模式进行了研究,构建了MRO数字孪生远程运维服务模式,提出了MRO数字孪生远程运维服务方法,并从数字孪生模型搭建、异构数据融合和设备故障诊断3个方面进行了深入研究,最后通过三轴数控加工设备的远程运维对理论模型和方法进行了案例验证。结果表明,MRO数字孪生远程运维模型能够有效指导数字孪生驱动的机电设备远程运维,MRO数字孪生远程运维方法可高效实现客户机电设备的数字孪生远程运维,切实提高了运维质量,有效降低了企业的运维成本。

本文的研究内容还有待进一步深入。案例研究过程中,数据上传至云端,服务端电脑再从云端下载数据,中间存在一定的通信时间延迟,因此如何降低通信延迟需要深入研究。在现有阶段,故障诊断模型已能够实现部分故障场景的准确识别,但在应对复杂多变的故障情景时仍存在一定局限性。为持续提升诊断能力,未来将重点开展算法架构优化与模型训练机制升级工作,引入更先进的深度学习框架,并结合设备历史运行数据进行多维度特征挖掘,通过迭代训练构建具有更强泛化能力的智能诊断系统,从而实现对设备全生命周期故障模式的精准研判与预测性维护。同时,通过历史数据驱动设备孪生模型实现故障再现,进而实现异步故障检测诊断也是今后研究的重点。此外,本文研究的数字孪生远程运维服务只局限于单台设备,如何处理和提升多设备场景中的服务能力同样有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 王建民,任良全,张力,等. MRO支持技术研究[J]. 计算机集成制造系统, 2010, 16(10): 2017-2025.
WANG Jianmin, REN Genquan, ZHANG Li, et al. Maintenance repair and overhaul/operations support technology[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2010, 16(10): 2017-2025.
- [2] 张敏,徐春雷,张琦兵,等. 基于微服务架构的变电站自动化装置远程运维技术[J]. 电力工程技术, 2022, 41(4): 177-182.
ZHANG Min, XU Chunlei, ZHANG Qibing, et al. Remote operation and maintenance technology of substation automation device based on micro-services architecture[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(4): 177-182.
- [3] 张传江,张方红,王兰,等. 基于大数据分析的海上风力发电机组远程运维云服务方法[J]. 船舶工程, 2019, 41(S1): 327-329.
ZHANG Chuanjiang, ZHANG Fanghong, WANG Lan, et al. Cloud service of remote operation and maintenance for offshore wind turbine based on big data analysis[J]. Ship Engineering, 2019, 41(S1): 327-329.
- [4] 江涛. 数控机床数据提取及其远程运维技术研究[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2023.
- [5] 叶轩宇. 数据驱动的电梯远程智能运维平台开发及运用[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2022.
- [6] 陶飞,刘蔚然,张萌,等. 数字孪生五维模型及十大领域应用[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(1): 1-18.
TAO Fei, LIU Weiran, ZHANG Meng, et al. Five-dimension digital twin model and its ten applications[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(1): 1-18.
- [7] 汪健,王华,戴天赐,等. 基于数字孪生的滚动轴承故障诊断方法研究[J]. 传感器与微系统, 2025, 44(3): 17-20.
WANG Jian, WANG Hua, DAI Tianci, et al. Research on fault diagnosis method of rolling bearing based on digital twin[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2025, 44(3): 17-20.
- [8] 张诚,马梓玮,刘斌,等. 数字孪生驱动的小样本旋转机械剩余寿命预测[J]. 西安交通大学学报, 2023, 57(12): 168-178.
ZHANG Cheng, MA Ziwei, LIU Bin, et al. Digital twin driven few-shot prediction of remaining useful life for rotating machinery[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2023, 57(12): 168-178.
- [9] 门松辰,周光辉,张超,等. 基于数字孪生的装配误差建模与溯源分析方法[J]. 西安交通大学学报, 2023, 57(1): 175-184.
MEN Songchen, ZHOU Guanghui, ZHANG Chao, et al. Assembly error modeling and traceability analysis method based on digital twin[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2023, 57(1): 175-184.
- [10] 胡天翔,叶辉,杨晓飞. 基于数字孪生的船舶制造车

间监视系统的构建 [J]. 系统仿真学报, 2025, 37(2): 517-528.

HU Tianxiang, YE Hui, YANG Xiaofei. Construction of a digital twin-based ship manufacturing workshop monitoring system [J]. Journal of System Simulation, 2025, 37(2): 517-528.

[11] 高丰, 赵宁, 庄存波, 等. 基于数字孪生的定制化士兵装备装箱生产过程优化方法 [J]. 兵工学报, 2025, 46(4): 369-383.

GAO Feng, ZHAO Ning, ZHUANG Cunbo, et al. Digital twin driven customized individual equipment packing production optimization [J]. Acta Armamentarii. 2025, 46(4): 369-383.

[12] 李琳利, 李浩, 顾复, 等. 基于数字孪生的复杂机械产品多学科协同设计建模技术 [J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(6): 1307-1319.

LI Linli, LI Hao, GU Fu, et al. Multidisciplinary collaborative design modeling technologies for complex mechanical products based on digital twin [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(6): 1307-1319.

[13] 王榕泰, 吴细秀, 冷宇宽, 等. 数字孪生技术在新型电力系统中的发展综述 [J]. 电网技术, 2024, 48(9): 3872-3889.

WANG Rongtai, WU Xixiu, LENG Yukuan, et al. Review of the development of digital twin technology in new type power systems [J]. Power System Technology, 2024, 48(9): 3872-3889.

[14] 牛广利, 李天旻, 杨恒玲, 等. 数字孪生水利工程安全智能分析预警技术研究及应用 [J]. 长江科学院院报, 2023, 40(3): 181-185.

NIU Guangli, LI Tianyang, YANG Hengling, et al. Research and application of safety intelligent analysis and early warning technology for digital twin water conservancy project [J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2023, 40(3): 181-185.

[15] 陈良斌. 数字孪生城市的治理变革与路径优化 [J]. 苏州大学学报(哲学社会科学版), 2024, 45(2): 52-60.

CHEN Liangbin. Governance transformation and path optimization of digital twin cities [J]. Journal of Soochow University (Philosophy & Social Science Edition), 2024, 45(2): 52-60.

[16] 王桢絮, 张波, 顾莺, 等. 数字孪生技术在医疗领域的应用进展 [J]. 中国医疗器械信息, 2023, 29(9): 77-81.

WANG Zhenxu, ZHANG Bo, GU Ying, et al. Advance of digital twin technology in medical field [J]. China Medical Device Information, 2023, 29(9): 77-81.

[17] 闫德林, 唐昊远, 王任翔, 等. 基于数字孪生的加油机器人远程运维系统设计 [J]. 轻工科技, 2023, 39(5): 117-119.

YAN Delin, TANG Haoyuan, WANG Renxiang, et al. Design of remote operation and maintenance system of refueling robot based on digital twin [J]. Light Industry Science and Technology, 2023, 39(5): 117-119.

[18] 洪学武, 李军, 曾骥, 等. 基于数字孪生的船舶远程运维系统分析 [J]. 船舶物资与市场, 2021, 29(7): 17-20.

HONG Xuewu, LI Jun, ZENG Ji, et al. Analysis of ship remote operation and maintenance system based on digital twin [J]. Marine Equipment/Materials & Marketing, 2021, 29(7): 17-20.

[19] APOSTOLIDIS A, STAMOULIS K P. An AI-based digital twin case study in the MRO sector [J]. Transportation Research Procedia, 2021, 56: 55-62.

[20] 王义军, 陈旭, 张志斌, 等. 基于数字孪生的桥式起重智能健康管理系统设计 [J]. 机械设计, 2024, 41(S2): 61-65.

WANG Yijun, CHEN Xu, ZHANG Zhibin, et al. Design of bridge health management system based on digital twin [J]. Journal of Machine Design, 2024, 41(S2): 61-65.

[21] YU Gang, WANG Yi, MAO Zeyu, et al. A digital twin-based decision analysis framework for operation and maintenance of tunnels [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 116: 104125.

[22] 李旭东. 基于数字孪生技术的电磁搅拌设备远程运维系统设计 [D]. 岳阳: 湖南理工学院, 2021.

[23] YU Bo, FANG Liaoliao, LUO Laibing, et al. A study on service-oriented digital twin modeling methods for weaving workshops [J]. Machines, 2024, 12(8): 542.

[24] 黄彬彬, 张映锋, 黄博, 等. 数字孪生驱动的复杂产品智能运维服务体系与核心技术 [J]. 机械工程学报, 2022, 58(12): 250-260.

HUANG Binbin, ZHANG Yingfeng, HUANG Bo, et al. Architecture and key technologies of digital-twin-driven intelligent operation & maintenance services for complex product [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(12): 250-260.

[25] SUN Peilu, LIU Xin. Research on remote operation and maintenance based on digital twin technology [J]. Machines, 2025, 13(2): 151.

(编辑 李慧敏)