

数字孪生船舶电力智能监测系统的设计

曾步辉^{1,2}, 麻炜晨¹, 姜箫恒¹, 尚文嘉¹, 陈宇¹

(1. 集美大学轮机工程学院, 福建 厦门 361021; 2. 国家级海上专业实验教学示范中心, 福建 厦门 361021)

[摘要] 为提高船舶电力设备管理效率, 预测船舶航行过程中电力设备存在的潜在风险并及时进行报警, 提醒船舶端工作人员进行处理, 搭建了数字孪生的可视化船舶电力智能监测系统。将船舶实体通过云计算、大数据技术分析、数字化模型和通信平台等同步到虚拟数字端进行可视化呈现, 调整和优化船舶电力系统虚拟模型, 实现对船舶电力系统进行全方位的实时监测, 降低人工检查的失误率, 提高监控效率。与人工摘抄数据监测反馈系统相比, 数字孪生船舶电力系统智能监测系统的实时数据管理成效提升13%, 监测精确度提升12.3%, 使系统安全性能、电力系统未来发展趋势和潜在问题的预测能力得到显著提升。

[关键词] 数字孪生; 船舶电力; 智能监测系统; 数据处理与分析

[中图分类号] U 665; TP 391.9

Design of Intelligent Monitoring System for Marine Power Based on Digital Twin

ZENG Buhui^{1,2}, MA Weichen¹, JIANG Xiaoheng¹, SHANG Wenjia¹, CHEN Yu¹

(1. School of Marine Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China;

2. National Marine Experimental Teaching Demonstration Center, Xiamen 361021, China)

Abstract: In order to improve the management efficiency of ship power equipment, the potential risks of power equipment in the course of ship sailing were predicted, and timely alarm was given to remind the staff at the ship end to deal with them. By building a visual ship power intelligent monitoring system based on digital twins, the ship entity was synchronized to the virtual digital end in real time through various emerging technologies such as cloud computing, big data technology analysis, digital model and communication platform for visualization, adjustment and optimization of the virtual model of the ship power system, and realization of the ship power system for all-round real-time monitoring. It showed that the error rate of manual inspection was reduced, and the monitoring efficiency was also improved; Comparing with those from the manual data extraction monitoring feedback system, the real-time data management effectiveness and monitoring accuracy of the intelligent monitoring system from the digital twin of the ship's power system were respectively increased by 13% and 12.3%, which significantly improved the performance of predicting the future development trend and potential problems of the power system.

Keywords: digital twin; marine electric power; intelligent monitoring system; data processing and analysis

[收稿日期] 2024-08-05

[基金项目] 国家大学生创新创业项目(202310390007)

[通信作者] 曾步辉(1973—), 硕士, 高级实验师, 从事数字船舶方向研究。E-mail: zengbuhui@126.com

0 引言

在海洋强国战略和全球航运业数字化转型的背景下，船舶综合电力系统的可靠性与智能化水平成为影响船舶安全运行和能效管理的关键因素。与此同时，面对复杂多变的海上作业环境，传统的船舶电力监控手段难以满足现代船舶对电力系统实时、准确监控的需求。

数字孪生是一个融合了多个学科、多种物理现象、多维数据和概率维度的仿真过程^[1-3]。目前，随着船舶综合电力系统的软件智能化、模型复杂化、数据多量化，船舶综合电力系统数字孪生应运而生^[4]。例如，有学者在船舶电力系统的数字孪生建模、仿真和优化方面开展了深入的研究，致力于优化电力系统的运行参数，进而提升系统能效与稳定性^[5]。虽有研究机构已经开发了相关的用于船舶电力设备实时监控和优化的数字孪生平台^[6]，但目前关于数字孪生对船舶电力系统实时、准确监控的研究还较少。因此，本文分析了数字孪生技术在船舶电力智能监测系统的总体架构设计、数字孪生体系的构建与数据处理，通过实时孪生的方式将电力系统的物理实体数据实时映射到虚拟模型中，对电力系统运行状态进行实时监控、预测和模拟分析，搭建可视化船舶电力系统岸基平台，实现对船舶电力系统数据的数字化监测和实时管理，为船舶综合电力系统的数字化和智能化提供参考。

1 数字孪生技术

数字孪生是一种通过构建物理系统的虚拟模型，实现对物理系统的实时监控、仿真分析和优化控制的新兴数字化技术。它最早由 Grieves 教授在密歇根大学提出^[7]，并随着云计算、物联网、大数据等新兴信息的出现，以及相关学者对数字孪生内涵的丰富与完善而不断发展。

根据数字孪生模型的相关研究，人们将其划分为物理实体、虚拟服务、服务系统、孪生数据和连接等 5 个关键维度^[8]，并提出 6 项关键准则^[9]以推动数字孪生技术的实际应用，使其能够即时精准地捕获物理系统的数据，建立动态更新的虚拟模型，实现对物理系统的实时监控与仿真分析。并对历史数据进行深入挖掘和分析，预见物理系统的未来走向和潜在问题，为预防性维护和优化控制提供有力帮助。数字孪生 5 维结构与 6 大应用准则如图 1 所示。

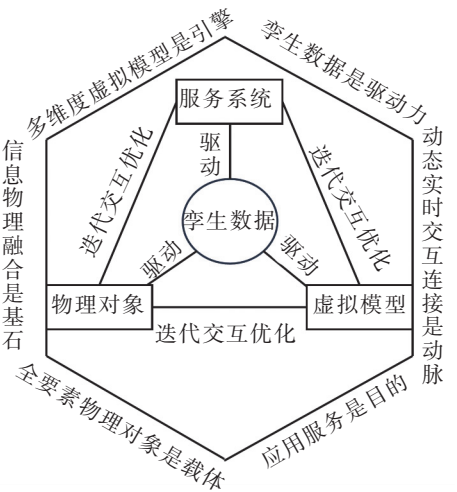


图 1 数字孪生 5 维结构与 6 大应用准则
Fig.1 Five-dimensional structure and six application criteria of the digital twin

2 船舶电力智能监测系统的搭建

数字孪生船舶电力系统的总体架构设计需要兼顾数字孪生技术和计算机集成制造系统^[10]。而且，船舶电力系统所处的工作环境对于确保智能监控数字孪生体系数据的真实性非常重要。

数字孪生技术的核心在于构建一个与实际系统高度一致的虚拟模型，即孪生体模型。对于船舶电力系统而言，孪生体模型包括电力系统的所有关键组件，如发电机、变压器、配电板之间连接关系和运行逻辑，以及船舶电力系统运行过程中的客观性因素。通过实时采集船舶电力系统的各项运行数据，包括电压、电流、功率等参数，严格遵守船级社各项规范，并将其作为动态参数实时嵌入到数字孪生模型中，构建高度仿真的工作环境，实现与实际系统的同步运行。通过算法模型与船舶电力系统数字孪生体进行交互，从而实现对船舶实体故障模式仿真和智能监测，提高电力系统的运行效率和安全性。

由此可见，船舶电力智能监测系统需要对数据采集模块、数据处理模块、故障诊断模块和监控决策模块进行调用和管理。因此，本文设计一个 4 层级的数字孪生船舶电力智能监测系统分层架构模型，包括数据采集层、数据处理分析层、监控决策层和数据可视化层，其总体架构设计如图 2 所示。

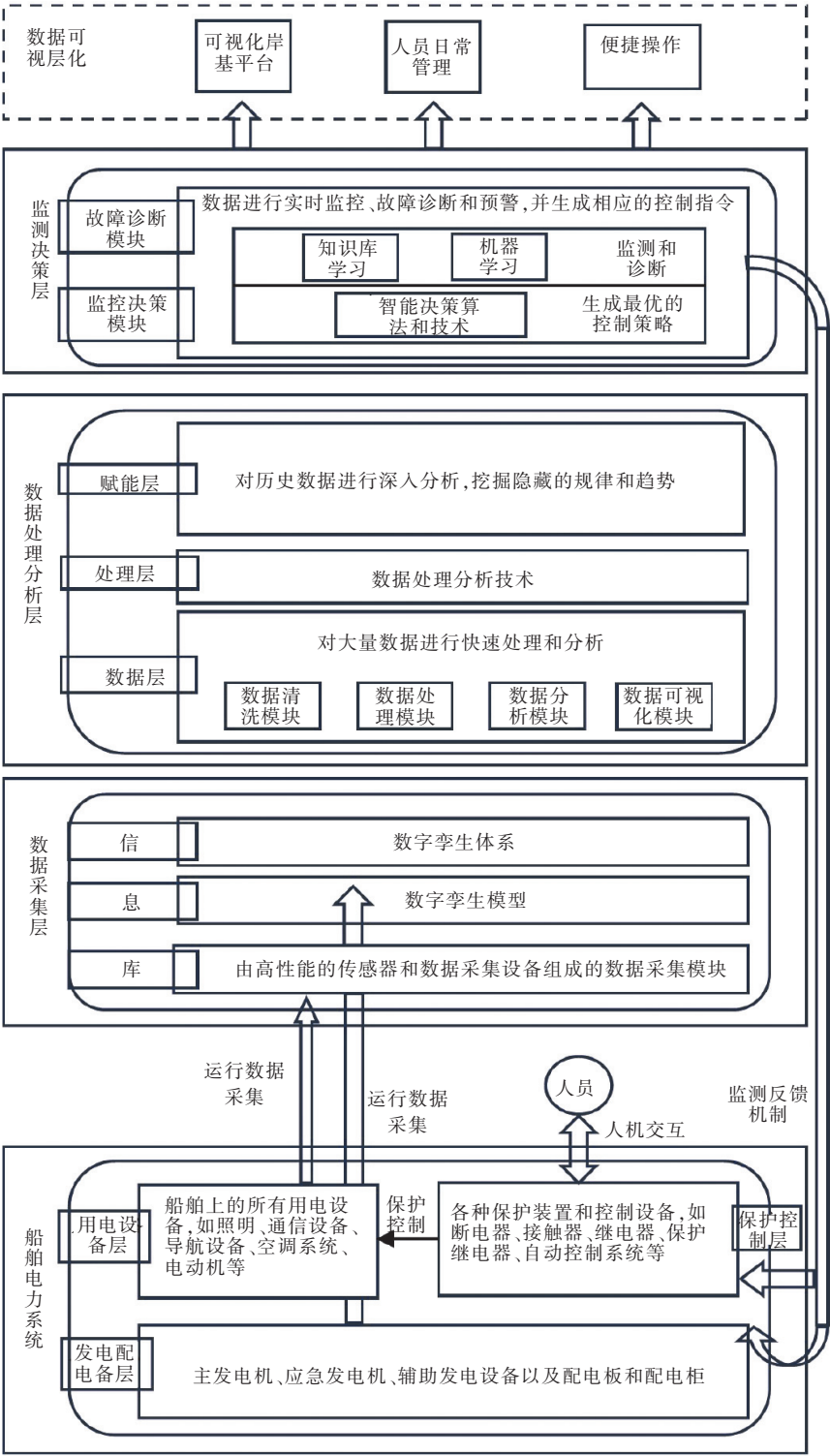


图 2 数字孪生船舶电力智能监测系统的总体架构设计

Fig.2 Overall architecture design of intelligent monitoring system of a ship power based on digital twin

2.1 数据采集层

数据采集层采用高性能的传感器和数据采集设备,从船舶电力系统中实时采集电压、电流、功率、温度等各种运行数据,以确保数据的准确性和实时性。

为了深刻理解船舶电力系统的复杂性与多样性并实现有效监控,可根据用途的不同将船舶电力系统划分为直流电力系统、交流电力系统、混合电力系统、频率变换电力系统和高压电力系统 5 种体系。基于这 5 种体系,船舶电力系统智能监控数字孪生体将物理实体电力系统的物理属性一一映射到虚拟空间中,形成与实体系统高度一致的虚拟镜像,以实时反映实体系统的运行状态,并为智能监测和决策提供强有力的支持。船舶电力系统智能监控数字孪生体的体系结构如图 3 所示。

2.2 数据处理分析层

数据处理分析层负责对采集的数据进行清洗、处理和分析,提取有价值的信息。其中,对所采集的数据进行噪声数据清洗可采用小波变换技术,该技术不仅可以提高数据的质量和可靠性,而且还能够更加准确地刻画信号的时频域局部特征^[11]。对任意函数或信号的连续小波变换公式可表示为

$$W_f(s,t) = \frac{1}{\sqrt{|s|}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \psi\left(\frac{x-t}{s}\right) dx。$$
 (1)

其中: $W_f(s,t)$ 为小波变换系数; s 表示伸缩因子; t 表示平移因子。

采集所要处理噪声的数据为一维信号,含噪信号数据模型为

$$s(x) = f(x) + \varepsilon e(x)。$$
 (2)

其中: $s(x)$ 是原始含噪的信号; $f(x)$ 是有用的信号; ε 是噪声系数的标准偏差; $e(x)$ 是随机的噪声信号, $x = 0,1,2,\cdots,n-1$ 。

使用小波变换处理噪声数据的算法流程如图 4 所示,通过此流程能够有效去除数据中的噪声和异常值。

数据运行特征提取采用特征提取技术,该技术能够为后续的故障诊断和监控决策提供有力支持。定义特征子集的提取向量 $L = [l_1,\cdots,l_j,\cdots,l_m] \times m$,若 $l_j = 1$,则表示 $R_i = [r_{i1},r_{i2},\cdots,r_{im}] \times m$ 中对应的第 j 个特征被提取,否则 $l_j = 0$ 。当向量 L 内非零元素为 Γ 时,表示选择 R_i 中 Γ 个对应的特征进行描述^[12],即

$$R_i L^T = [r_{i1},r_{i2},\cdots,r_{im}] \begin{bmatrix} l_1 \\ \vdots \\ l_m \end{bmatrix} = \sum_{j=1}^{\Gamma} r'_{ij}。$$
 (3)

其中: r'_{ij} 为 $l_j = 1$ 对应的特征,故有 $R'_j = [r'_{i1},r'_{i2},\cdots,r'_{i\Gamma}] \times \Gamma$ 为数据对应的特征提取子集。

利用特征子集的提取向量 L 对数据集 D 所有特征进行提取,可得到数据 D 的特征子集为

$$\begin{bmatrix} R_1 \\ \vdots \\ R_n \end{bmatrix} \times [L^T L^T \cdots L^T] = \begin{bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1m} \\ \vdots & & \vdots \\ r_{n1} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} l_1 & \cdots & l_1 \\ \vdots & & \vdots \\ l_m & \cdots & l_m \end{bmatrix}。$$
 (4)

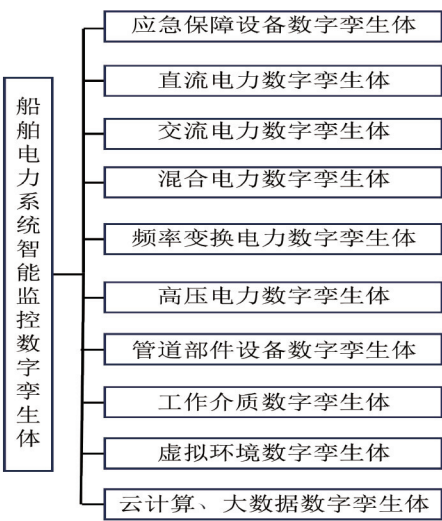


图 3 船舶电力系统智能监控数字孪生体的体系结构

Fig.3 Architecture of digital twin for intelligent monitoring of a marine power system

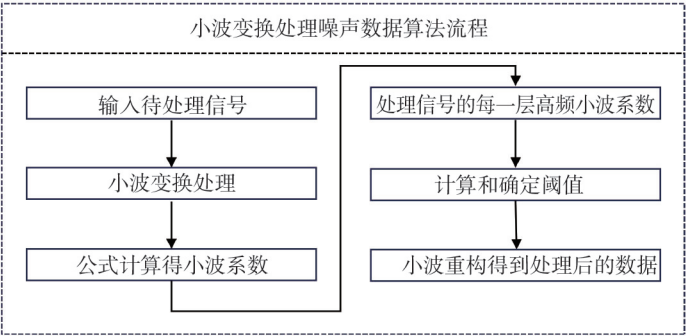


图 4 小波变换处理噪声数据算法流程图

Fig.4 A flow chart of an algorithm for processing noise data of wavelet transform

特征提取技术数据算法流程如图 5 所示。

采用时间序列分析预测可对数据进行深入挖掘,发现数据的潜在规律和趋势,为电力系统的优化控制和预防性维护提供科学依据。用 Y 表示数据的时间序列,结合不可抗因素如数据趋势 (T)、环境季节 (S) 和随机扰动项 (E)^[13],即可得到

$$Y = f(T, S, E)。$$

(5)

对数据进行探索性分析,根据数学公式得到数据的基本属性(如均值、方差、周期性、趋势性等)。再根据结果需要选择合适的信号处理方法(如傅里叶变换、小波变换、经验模态分解等)^[14]将处理后的数据输入智能监测系统中。

2.3 监控决策层

监控决策层根据数据处理分析层提交的实时数据信息进行实时监控、故障诊断和预警,它包含故障诊断模块和监控决策模块。其中:故障诊断模块将处理后的数据通过云计算和机器学习的方法,对电力系统运行状态进行实时监测与诊断,及时发现并预警潜在故障;监控决策模块则根据故障诊断结果生成相应控制指令,通过智能决策算法和技术,结合电力系统实际运行状态与故障情况,生成最优控制策略,实现对电力系统的智能监控和优化控制,包括系统实时监测、潜在问题识别及预警。

监控决策层的核心技术是数字孪生技术,在此层建立孪生模型对实体船舶进行模拟预测并给出反馈决策。本文采用“图扑软件”建立的船舶孪生模型概图如图 6 所示。

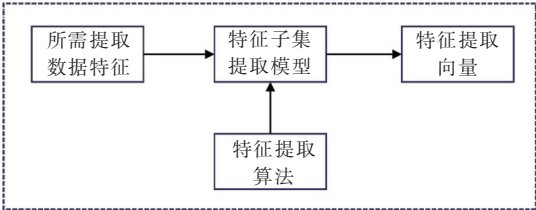


图 5 特征提取技术数据算法流程图
Fig.5 Algorithm flow chart of feature extraction technical data



图 6 数字孪生船舶概览
Fig.6 Overview of digital twin ships

2.4 数据可视化层

数据可视化层将经过底层数据收集与处理、中间层数据分析与整合后的信息,以直观和交互式的界面呈现给工作人员。该层的核心是构建可视化岸基平台,它有效汇总并展示前 3 层处理的数据信息,便于工作人员日常管理和操作。

数字孪生船舶电力智能监测系统依托 Web 技术,采用 B/S 架构进行设计,通过 NET 技术栈(如 ASP.NET Core 框架和 Visual C#语言)进行数字孪生船舶电力智能监测系统开发^[15],以确保系统稳定高效,监测数据能实时、准确地通过可视化岸基平台展示。以机舱上平台的监测反馈为例(见图 7),可见,工作人员可以直观掌握系统的运维状态。

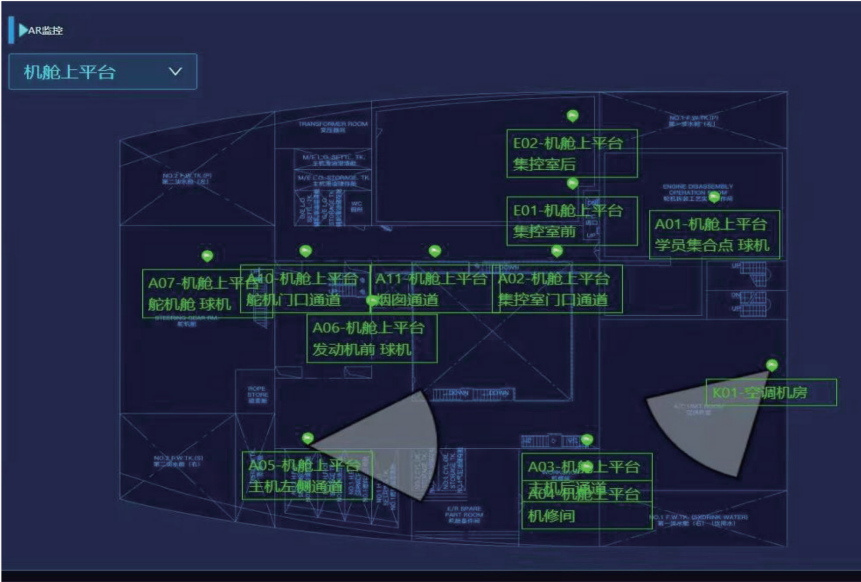


图 7 机舱上平台监测反馈

Fig.7 Onboard platform monitoring feedback

船舶综合电力系统数字孪生的实现方式是基于基础数据采集层到顶层应用层的分层结构设计。该结构由多个层次构成，从基础数据采集层出发，逐步向上推进至顶层应用层，涵盖了数据采集层、数据处理分析层、监控决策层和数据可视化层。这种分层架构的设计不仅使系统结构更加清晰、易于维护，而且通过各层之间的解耦，增强了系统的可扩展性和灵活性。不同层的功能模块构成了船舶电力智能监测系统的核心部分，实现对船舶电力系统进行全面、直观、高效地监测与管理。

3 案例分析

通过数字孪生模型的构建，系统能够实时采集船舶电力系统的各项运行数据，包括电压、电流、功率等参数。通过数据处理和分析，系统能够对这些数据进行实时监测，与数字孪生模型进行比对，可以发现异常情况并进行故障诊断。

本文以集美大学自有教学实验船“育德轮”上电力系统主配电板数据为例，对比数字孪生技术的智能监测系统与人工摘抄数据监测反馈成效，图 8 为可视化系统主配电板数据反馈图，案例数据分析比对结果如表 1 所示。不难发现，数字孪生船舶电力智能监测系统的管理成效提升 13%，监测精确度提升 12.3%，这验证了该系统在实际船舶运行中的有效性和可靠性。



图 8 可视化系统主配电板数据反馈图

Fig.8 Visualization of data feedback diagrams for the main distribution panel system

在本案例的育德轮实际运行过程中,该智能监测系统成功实现对电力系统中异常部件的即时智能监测。当系统监测到电力系统某一部件出现异常时,智能监测系统会在0.6 s内迅速发出警报,并通过数字孪生体系,精确分析出可能的故障原因和具体位置。据此,工作人员可迅速依据系统提供的详细诊断结果,准确锁定故障点,并即刻采取维修行动,最大限度地缩减船舶电力系统的停机时长,保障船舶的正常运维。

4 结论

本文设计的数字孪生技术船舶电力系统智能监测系统,可对电力系统进行全方位的实时监控,减少人工检查的需求。首先,根据该系统所需实现的功能进行总体架构设计,充分考虑了船舶电力系统的复杂性和实时性要求,确保系统能够全面、准确地反映电力系统的运行状态。其次,通过建立准确、全面的数字孪生体系,将电力系统的物理实体与虚拟模型一一映射,实现对电力系统运行状态的实时监测和模拟分析。最后,通过对比传统监控方式与智能监测系统在相同情况下的表现,结果显示:数字孪生船舶电力智能监测系统的管理成效提升13%,监测精确度提升12.3%,并实现全方位地实时监控船舶电力系统的运行状态,显著减少了人工检查的需求,提高了监控效率。同时,借助数字孪生模型,系统还能够模拟电力系统的运行状况及潜在故障,完成对故障精确定位和分析,为预防性维护和控制优化提供了强有力的支持。

[参考文献]

[1] BOSCHERT S,ROSEN R. Digital twin;the simulation aspect[M]. Cham:Springer,2016;59-74.

[2] HE X,CHU L,QIU R C,et al. A novel data-driven situation awareness approach for future grids;using large random matrices for big data modeling[J]. IEEE Access,2018,6;13855-13865.

[3] 贺兴,艾芊,朱天怡,等. 数字孪生在电力系统应用中的机遇和挑战[J]. 电网技术,2020,44(6):2009-2019.

[4] BARRICELLI B R,CASIRAGHI E,FOGLI D A. Survey on digital twin;definitions, characteristics, applications, and design implications[J]. IEEE Access,2019,7;167653-167671.

[5] 李响. 面向高压共轨柴油机运维管理的数字孪生建模研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2021.

[6] ERRANDONEA I,BELTRAN S,ARRIZABALAGA S. Digital twin for maintenance;a literature review[J]. Computers in Industry,2020,123;103316.

[7] GRIEVES M. Digital twin;manufacturing excellence through virtual factory replication[EB/OL]. (2014-05-06)[2024-08-01]. https://www.researchgate.net/publication/275211047_Digital_Twin_Manufacturing_Excellence_through_Virtual_Factory_Replication.

[8] 王哲. 地铁牵引供电数字孪生模型研究[D]. 北京:北京交通大学,2023.

[9] 陶飞,刘蔚然,刘检华,等. 数字孪生及其应用探索[J]. 计算机集成制造系统,2018,24(1):1-18.

[10] 周少伟,吴炜,张涛,等. 舰船动力系统数字孪生技术体系研究[J]. 中国舰船研究,2021,16(2):151-156.

[11] 刘行航. 基于神经网络的结构健康监测数据清洗及预警研究[D]. 海口:海南大学,2024.

[12] 胡声秋,吴玲丽. 一种云计算环境下海量数据安全特征提取算法[J]. 信息技术,2019,43(1):93-96.

[13] 阎坤. 基于时间序列模型的分析预测算法的设计与实现[D]. 北京:北京邮电大学,2008.

[14] 茅力文. 基于时域频域分析的时间序列预测算法的研究与实现[D]. 无锡:江南大学,2023.

[15] 李顺亮,王新辉,钟碧良,等. 基于鑫诺卫星的船岸综合监控系统的设计实现[J]. 中国航海,2008(3):210-213.

(责任编辑 马建华 英文审校 郑青榕)