

基于数字孪生的液压油泵车试验台监测系统

王坤, 王共冬

(沈阳航空航天大学 航空宇航学院, 沈阳 110136)

摘要: 针对液压油泵车试验台传统健康监测方法依赖周期性物理检查和维护、信息化程度低、生产效率不足等问题, 提出了一种基于数字孪生的液压油泵车试验台监测系统应用开发架构。该架构集数据、模型和通信于一体, 旨在提升设备的预测性维护水平和运行效率。通过构建设备数字孪生虚拟模型, 利用TCP/IP协议和统一JSON数据包格式, 实现物理设备与虚拟模型之间的实时数据交互与融合。在此基础上, 系统能够对液压油泵车试验台进行模拟仿真、数值预测、故障诊断和预警, 从而优化设备运行状态。试验结果表明, 该系统能够实现液压油泵车实现的健康监测和故障诊断, 在航空试验台应用方面有着广阔的前景。

关键词: 数字孪生; 液压油泵车试验台; 监测系统; 健康监测; 数值预测

中图分类号: TP391.9

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1248.2025.06.006

Monitoring system for hydraulic oil pump truck testbed based on digital twin

WANG Kun, WANG Gongdong

(College of Aerospace Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

Abstract: Aiming to address the limitations of traditional health monitoring methods of hydraulic oil pump truck testbed, such as reliance on periodic physical inspections and maintenance, low levels of informatization, and insufficient production efficiency, an application development architecture for a hydraulic oil pump truck monitoring system was proposed based on digital twin technology. This architecture integrates data, models, and communication to improved the predictive maintenance level and operational efficiency of the equipment. The research enabled real-time data interaction and fusion between the physical equipment and the virtual model by constructing a digital twin virtual model of the equipment and utilizing the TCP/IP protocol and a unified JSON packet format. On this basis, the system could perform simulation, numerical prediction, fault diagnosis, and early warning for the hydraulic oil pump truck testbed, thereby optimizing the equipment's operation status. Test results show that the system is able to perform health monitoring and fault diagnosis for the hydraulic oil pump truck, showing broad prospects in the application of aviation testbed.

收稿日期: 2025-02-18 修回日期: 2025-05-26 接受日期: 2025-05-30

基金项目: 国家自然科学基金(项目编号: 52374393); 辽宁省重点研发计划项目(项目编号: 2023JH2, 101300234)。

作者简介: 王坤(1999—), 男, 陕西宝鸡人, 硕士研究生, 主要研究方向为数字化制造, E-mail: 18791174677@163.com; 王共冬(1979—), 男, 江苏徐州人, 教授, 博士, 主要研究方向为数字化制造、智能复合材料, E-mail: cadcam119@126.com。

Key words: digital twin; hydraulic oil pump truck testbed; monitoring system; health monitoring; numerical prediction

21世纪以来,全球制造业正经历着一场以数字化、网络化、智能化为特征的深刻变革。新一代信息技术与制造业深度融合,正驱动着制造业生产方式、组织形态和价值链的重大变革^[1-3]。这些变革的挑战之一就是要实现制造的物理世界和信息世界的互联互通和智能化操作,进而实现智能制造,其共同的问题是制造的物理世界和信息世界之间的数据融合与交互^[4-6]。液压油泵车试验台的传统健康监测方法主要依靠周期性的物理检查和维护,对信息和数据的重视程度不够,导致整个系统对外部变化的反应较弱,生产效率低下。在非运行状态下检查设备,无法有效评估其在实际运行环境中的表现。此外,对于设备出现的故障,当前缺乏及时准确预测和诊断的有效手段。数字孪生是数字化转型和智能化升级的新兴关键技术,在数据和模型的驱动下,可以实现物理设备的监控、仿真、预测、优化等^[7]。对基于数字孪生的航空液压油泵车试验台进行1:1三维映射,使航空液压油泵车试验台实现工作过程可视化和设备参数的监控,并达到数据分析、模拟仿真、预测、自主决策等后续的集成化、智能化应用^[8-10]。利用数字孪生技术实现液压油泵车试验台的物理世界和虚拟世界的交互和仿真将是液压油泵车试验台在智能制造发展的一个重要方向。

数字孪生的核心是模型和数据^[11],本文针对液压油泵车试验台,以设备的三维模型为基础,对三维模型进行材质和环境渲染,借助数字孪生技术,构建数字孪生模型以准确地表示物理实体,利用TCP/IP通信技术和JSON数据包实现数据驱动孪生模型,开发相关信息模型和服务模块并进行测试,验证了所提方案的可行性和有效性。

1 整体架构

数字孪生是以模型和数据来驱动物理设备和数字设备的双向映射和交互,以达到对物理实体的数据监控、运动仿真、预测等应用需求^[12]。通过数据处理模型的不断迭代,实现设备优化。基于液压油泵车试验台数字孪生和数据通信的需求,设计数据驱动的液压油泵车试验台系统技术架构,如图1所示。

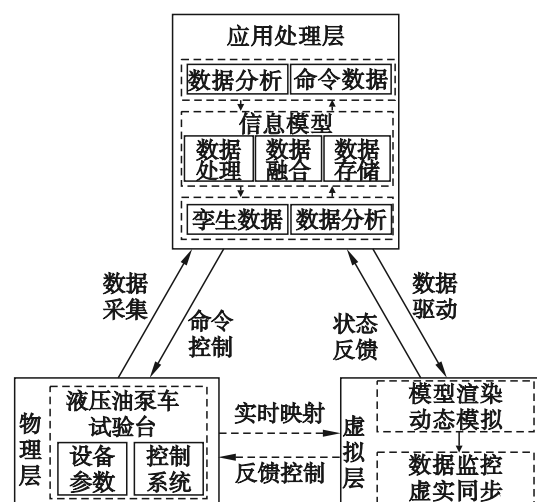


图1 系统技术架构图

以液压油泵车试验台设备为主要研究对象,从3个层面构建了基于数字孪生的试验台状态监测架构,分别为物理层、应用处理层、虚拟层。

物理层主要负责液压油泵车试验台的实时数据采集,由设备参数和控制系统组成,利用各种传感器和监测设备获取设备的运行状态参数,并传输到应用处理层。获取虚拟层发布的运行指令实现命令控制。

应用处理层是系统的核心部分,其主要负责接收、处理传输来的数据,并利用这些数据与虚拟模型进行交互。主要包括对处理完的数据实现处理、融合,以此实现虚拟模型的驱

动,并将最终的数据存储到数据库中。

虚拟层主要负责利用应用处理层处理的数据对孪生模型的数据驱动,渲染液压油泵车试验台虚拟模型,对设备进行动态模拟,可以监测设备的运行状态,并采集监控数据,实现数据的可视化显示。接着将实体状态和调节参数反馈到应用服务层,实现对物理实体的控制。

2 虚拟模型建立

虚拟模型建立是系统的重要部分,本文将基于数字孪生技术对液压油泵车试验台设备进行研究与分析。首先,根据上文中提出的系统整体框架,分析液压油泵车试验台系统的功能需求,设计其原理图。其次,需要选择合理的建模、渲染工具,并结合设备的几何参数、运行规则实现对虚拟模型的数据驱动,并实现虚拟数据融合交互,使虚拟模型反向控制真实的物理设备。首先搭建系统整体的框架;然后,建立设备的1:1三维模型;最后,对其进行材质渲染、添加环境光等,使其更加符合真实的物理环境。

2.1 物理模型

液压油泵车试验台为地面调试设备,用于为飞机在地面进行液压系统调试及检查时提供动力源,并具有为飞机油液系统地面调试及检查、飞机油箱加油等功能;此外,系统还具有在线颗粒物检测及油液含水量检测等功能。

为了满足液压油泵车试验台设备的使用需求,提出的系统设计需求如下:

- 1)采用的航空燃油介质为YH-15型号;
- 2)工作压力为28 MPa(连续可调),工作流量为140 L/min(连续可调);
- 3)电机功率为75 kW;
- 4)工作中燃油冷却采用风冷方式;
- 5)加油过程中压力 ≤ 0.5 MPa,流量为30 L/min。

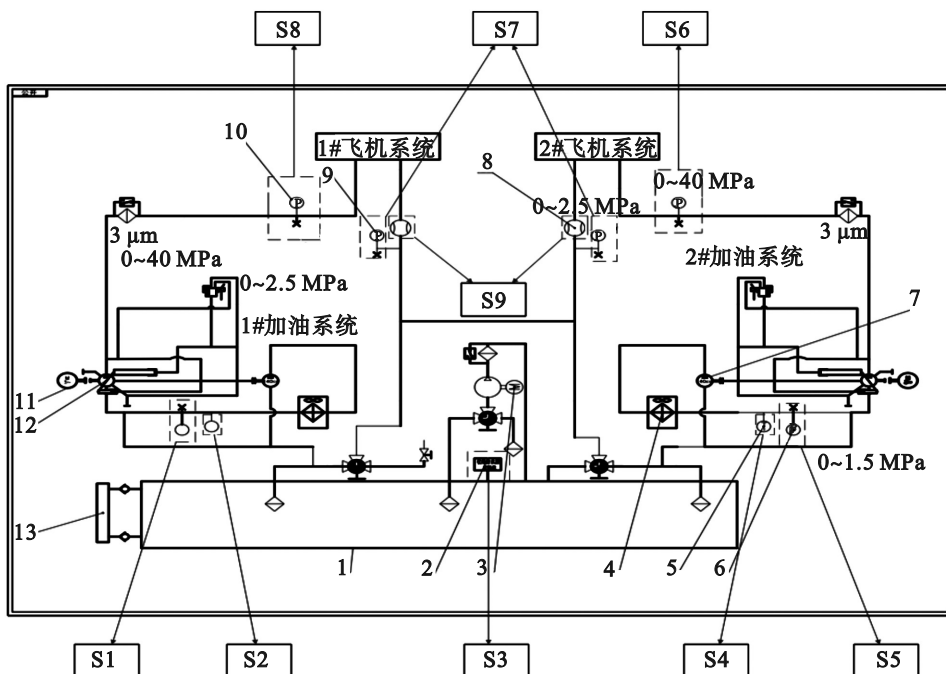
基于上述的设备系统设计需求,设计了液压油泵车试验台工作系统。该系统包含左右两个系统,分别为1#飞机系统和2#飞机系统,两个系统既可以独立工作,也可以同时工作,满足飞机的正常使用需求,其原理图如图2所示,图2中标记了传感器分布位置。

如图2所示,以系统2为例,系统启动后,供油泵电机驱动液压泵从油箱中吸油,并根据需求输出设定压力的油液。同轴连接的齿轮泵同时工作,将吸入的油液经过风冷散热后,为供油泵提供备用压力。输出油液经过过滤系统,确保油液清洁度。传感器实时检测供油压力,油液随后进入飞机液压回路实现回油,在这个过程中,通过流量计和压力传感器对回油的流量和压力进行检测,最终油液流回油箱,完成飞机液压回路的清洗过程。

本系统的PLC控制器采用西门子的S7_Smart200,支持多种运动控制功能。首先,通过控制开关控制设备和部件的开关状态,将信息传输到PLC控制中心。PLC控制中心接收到控制信息后将控制命令传输到对应的泵机上,从而控制相关部件工作。通过转化器控制比例阀和变频器的状态来改变系统的压力,并且将传感器实时采集的数据进行转化收集,通过液晶触摸屏显示液压系统信息。

2.2 虚拟模型

航空液压油泵车试验台是由多个部件组成的复杂系统,在数字孪生下的虚拟仿真中,三维建模及渲染如图3所示,使用CATIA对液压油泵车试验台进行1:1的三维建模。先建立各个零部件的模型,再将各个部件组装在一起,确保各部件之间的配合和相对位置准确,导出.stp格式,并导入blender模型渲染工具。为了使模型更加符合实际效果,对模型添加金属材料,最终保存为.obj格式。在Web环境下对数字孪生系统进行展示,利用three.js库对整个场景进行灯光和环境渲染,使其更加符合真实环境。



1. 油箱;2. 含水量检测传感器;3. 加油电机油泵组;4. 风冷却器;5. 温度传感器;6. 压力传感器;7. 供油齿轮泵;8. 涡轮流量计;9. 压力传感器;10. 压力传感器;11. 供油泵电机;12. 供油泵;13. 液位计;S1. 回油压力传感器;S2. 温度传感器;S3. 含水量检测传感器;S4. 温度传感器;S5. 回油压力传感器;S6. 系统压力传感器;S7. 吸油压力传感器;S8. 系统压力传感器;S9. 涡轮流量传感器。

图 2 液压油泵车试验台原理图

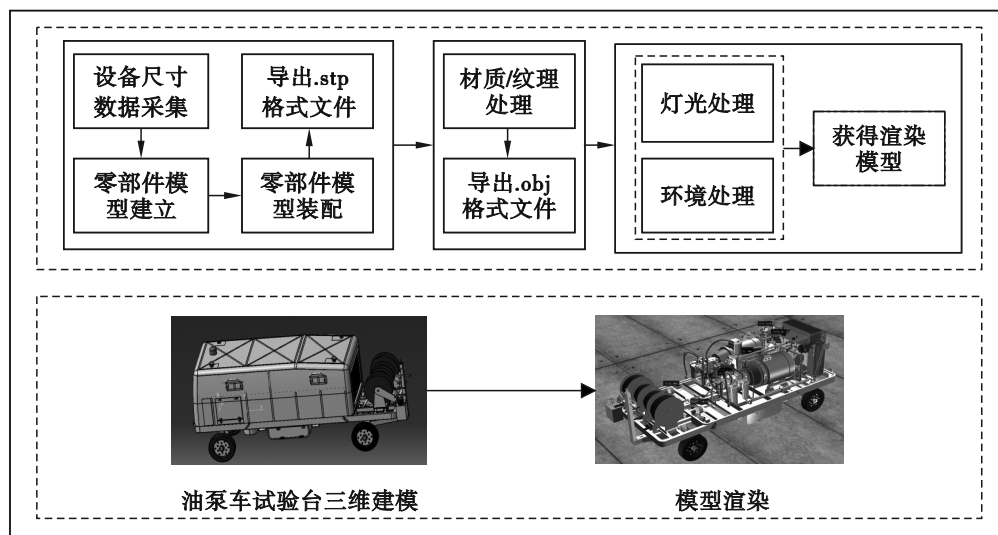


图 3 三维建模及渲染

3 虚拟现实数据融合

航空液压油泵车试验台实体采集 PLC 控制器内部运行数据,利用振动、温度、压力、流量传感器等对航空液压油泵车试验台进行全

方面的数据采集,随后在应用处理层利用 TCP/IP 协议进行数据交互,最后实现数据的双向映射及数据交互融合。

虚拟现实数据融合首先采集液压油泵车试验台的设备实体参数,对其进行数据采集、数据处理和数据融合等操作;然后,通过

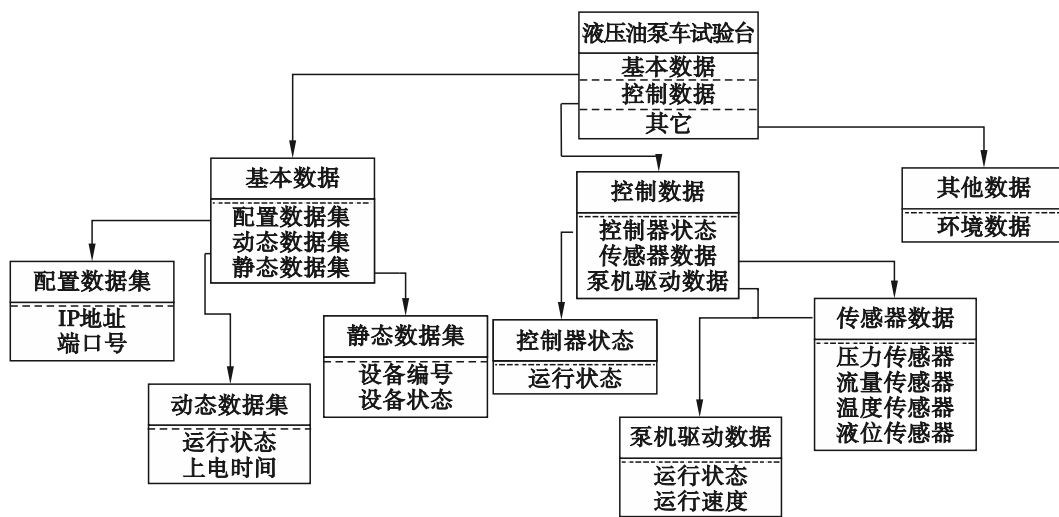
Socket. IO 协议传输到虚拟模型,虚拟模型通过读取数据并进行同步仿真;最后,通过故障诊断和数据预测算法对设备状态进行预测,并将结果反馈给数控系统,数控系统会对设备运行参数进行调节。

3.1 数据采集

数据采集是数字孪生航空试验台的基础环节,直接关系到试验数据的准确性和完整性。数据采集过程涉及传感器的布置、数据传

输网络的设计、数据预处理及数据融合等关键技术^[13-14]。

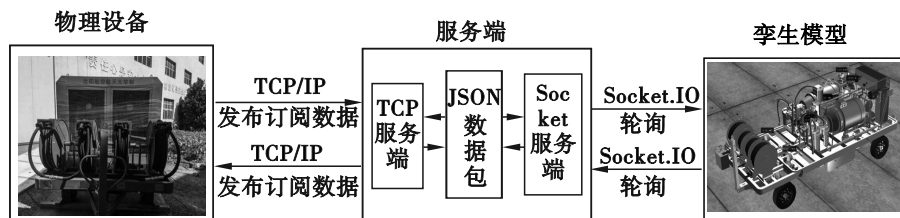
面对不同设备和传感器的数据格式存在的差异,需要对其进行统一清洗和管理,以提高数据的标准化、一致性和可用性,避免数据冗余和冲突^[15]。数据模型如图 4 所示,液压油泵车试验台数据模型主要包含基本数据、控制数据和其他数据。



3.2 数据传输

数据传输主要是将采集到的数据传输至数字孪生体,其设计需考虑传输速度、可靠性和抗干扰能力。TCP/IP 是最常用的网络通信协议,通信方式操作简单,传输数据量大^[16],被广泛应用在通信相关领域。Socket. IO 是基于

WebSocket 协议的 CS 实时通信库,主要用于浏览器和服务器之间的双向实时通信。因此本文基于 TCP/IP 协议和 Socket. IO 库实现服务端的数据交互,以此完成物理实体和虚拟模型之间的同步映射,达到虚实同步、以虚控实的目的。图 5 为数据传输流程图。



3.3 数据存储

使用关系数据库来组织该层中的数据,以满足数据存储模型所需的信息^[17]。因此本

文使用 MYSQL 数据库来存储数据,存储的数据主要包含模型数据、传感器的实时数据、试验过程的关键数据、系统操作日志、用户信息

等数据类型,设备运行过程中会实时将数据进行存储。

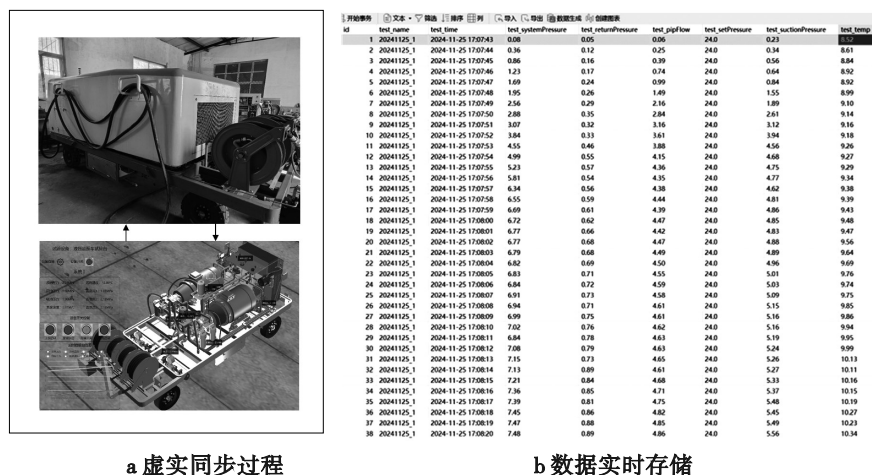
3.4 虚实映射

将液压油泵车试验台控制中心作为服务器端,仿真监控平台作为客户端,服务器端传输的数据包括系统压力、系统流量、系统温度、油箱液位、吸油压力、回油压力、监测点1压力、监测点2压力、监测点3压力、设备开关、调节参数和故障信息。通过定义标准化的通信协议,可以有效保障数据在传输过程中的完整性和可解析性,从而实现运行状态信息的即时交互与同步。

系统参数映射是将液压油泵车试验台物理实体数据映射到信息模型,信息模型对各种数据进行解析和处理,最后将传感器参数和控制参数映射到虚拟模型中的对应部位。

3.4.1 虚实同步

液态油泵车试验台运行过程中,传感器实时采集数据(如压力、流量、温度),并将采集的数据传输到虚拟层,更新数字孪生模型的参数。首先,连接液压油泵车试验台,并开启设备;然后,采集传感器数据和控制参数实时传输虚拟模型进行可视化显示,如图6所示。



a 虚实同步过程

b 数据实时存储

图6 液压油泵车试验台虚实交互示意图

图6a为液压油泵车试验台运行过程中的虚实同步过程,物理实体在运行过程中会将传感器采集的数据实时传输到可视化平台实时显示,并对模型同步仿真。图6b为虚实同步过程中的数据实时存储,确保物理实体和虚拟模型数据一致。

3.4.2 以虚控实

在虚拟层中,基于数字孪生模型模拟液压油泵车的运行状态,对相应的数值进行数值预测。若设备状态需要调整,则在虚拟层进行控制,并将控制指令发送到物理层的设备执行机构。物理设备根据指令运行,并实时反馈数据到虚拟层,图7为液压油泵车试验台结果图。

从图7a可以看出,试验过程中各个传感器监测点的数据整体先上升后趋于平稳。图7b和7c分别为系统流量和系统压力的预测曲线图,可以看出各个传感器采集点的预测值与实际值近乎一致,虽然存在一定的误差,但是在允许范围内。图7d为数值预测损失度曲线图,在训练迭代60次后即可看出故障预测损失度趋于收敛,最终损失度为0.0136。

综上所述,该系统的实时性、同步性较好,能够较好地对液压油泵车试验台进行三维可视化监控,同时可以有效地预测关键部位的数值,实现提前预警。

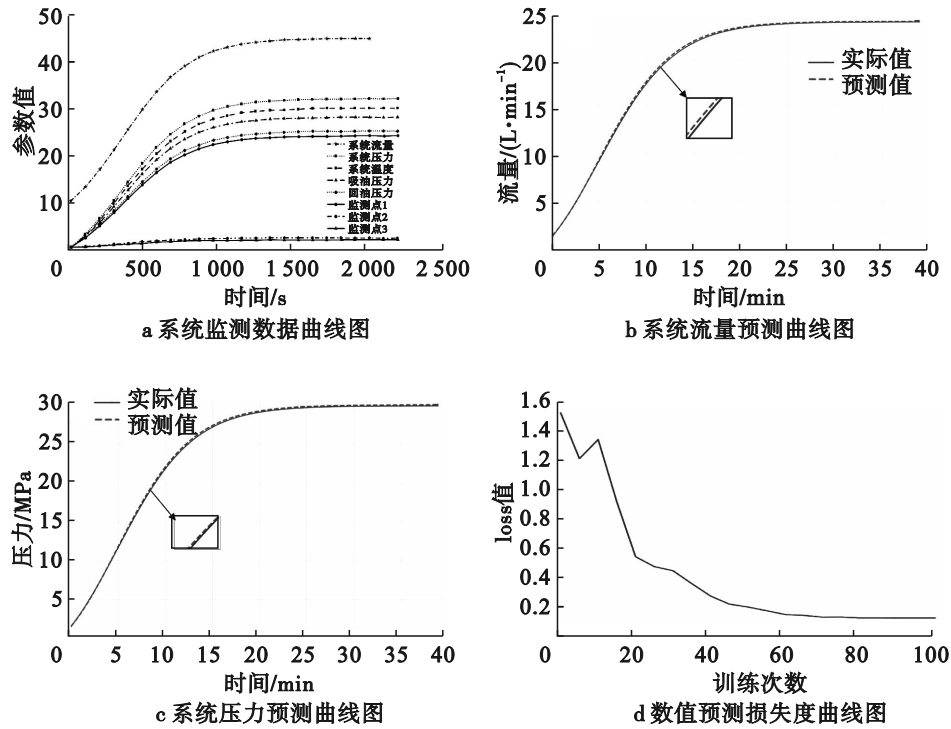


图7 液压油泵车试验台结果图

3.5 虚实数据交互融合

虚实交互是数字孪生的关键环节。虚拟实体通过传感器数据监测物理实体的状态,实现实时动态映射,然后在虚拟空间中通过仿真验证控制效果,通过控制过程实现物理实体的运行,图8为虚拟现实融合图。

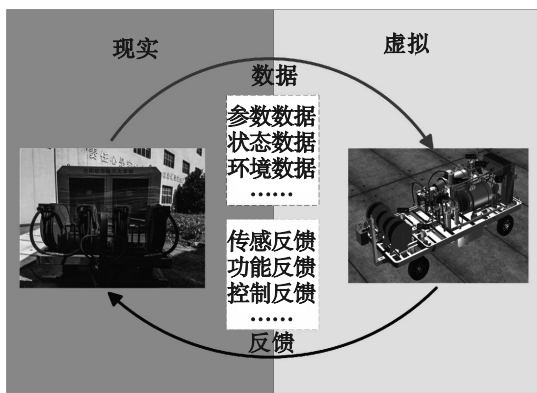


图8 虚拟现实融合图

如图8所示,液压油泵车试验台数字孪生体在信息化平台上反映液压油泵车试验台实体的真实状态和行为,实现虚拟的动态过程“复现”:一方面,虚拟模型需要实时接收物理

实体的状态数据,数字孪生体根据实体空间传递的数据进行自身数据完善、融合和模型优化构建来更新模型;另一方面,通过展示、统计、分析与处理这些数据,实现对实体设备及其周围环境的实时监控和反向控制,实现液压油泵车试验台的信息-物理域的闭环反馈,最终达到虚实结合、以虚控实的目的,对物理设备进行调整和优化。

4 数据驱动下的孪生实现

基于 Web 环境,选择液压油泵车作为应用对象,开发数字孪生展示与发布环境,定制整合浏览和数据汇聚显示的界面,有效展示运行数据、运行过程、物理设备状态数据等制造过程的相关信息,为生产管理者 and 工艺技术人员提供直观数据信息。

1)工作过程状态信息显示。工作状态信息展示部分作为前端页面,数字孪生系统交互界面如图9所示,该模块主要提供以下功能:①提供航空试验台设备数字孪生模型,并提供三

维可视化操作,比如旋转、放大和缩小,可以实时观察设备工作状态;②实时显示设备工作过程中的关键系统参数及设备在工作过程中的关键部位状态是否正常工作。



图9 数字孪生系统交互界面

2)加工过程实时监控。利用采集设备上的传感器数据及孪生模型的内部特征,对航空设备在运行过程中全程模拟,对设备工作过程中出现的系统压力过高/过低、系统温度过高/过低、油路堵塞、漏油等异常状况及时预警。

3)历史数据回溯。查找数据库中的数据,通过表格或者折线图展示,可以直观地看到整个工作状态过程中各个参数的变化状态,便于下次工作时及时调整设备的工作参数。

5 结论

数字孪生作为数字化转型和智能化升级的核心技术,在航空试验台领域展现出巨大的应用潜力和发展前景。本文以航空液压试验台设备为研究对象,构建了数字孪生虚拟模型,实现了物理实体与虚拟模型之间的高效数据通信,并利用MySQL数据库实现数据存储,形成了数据驱动的液压油泵车孪生系统。该系统实现了可视化监控、数据分析、数据融合等功能,显著降低了设备运行风险,提升了设备工作效率。综上,数字孪生技术在航空试验台设备管理中具有重要的工程应用价值,为设备全生命周期管理提供了新的技术路径和方法支撑。

参考文献(References):

- [1] 邢飞,彭国超,梁甜.基于工业大数据的制造企业变革管理模型研究[J].科技管理研究,2019,39(16):230-237.
- [2] 张梅芳.基于工业大数据的智能制造新模式研究[J].科技创新导报,2020,17(8):39-40.
- [3] Zhou G H, Zhang C, Li Z, et al. Knowledge-driven digital twin manufacturing cell towards intelligent manufacturing[J].International Journal of Production Research,2020,58(4):1034-1051.
- [4] 陶飞,程颖,程江峰,等.数字孪生车间信息物理融合理论与技术[J].计算机集成制造系统,2017,23(8):1603-1611.
- [5] 陶飞,张萌,程江峰,等.数字孪生车间:一种未来车间运行新模式[J].计算机集成制造系统,2017,23(1):1-9.
- [6] Tao F, Xiao B, Qi Q L, et al. Digital twin modeling[J].Journal of Manufacturing Systems, 2022, 64: 372-389.
- [7] Zhuang C B, Miao T, Liu J H, et al. The connotation of digital twin, and the construction and application method of shop-floor digital twin[J].Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2021, 68(4):102075.
- [8] 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.
- [9] 陈燕,王禹封,谯木,等.数字孪生在制造业中实现的关键技术及典型应用综述[J].航空制造技术,2024,67(11):24-45.
- [10] Eneyew D D, Capretz M A M, Bitsuamlak G T. Continuous model calibration framework for smart-building digital twin: a generative model-based approach[J]. Applied Energy, 2024, 375: 124080.
- [11] 胡飞,侯鹏,黄宇,等.“数据+模型”融合驱动的立加数字孪生监控系统应用研究[J].机械设计与制造,2025(4):380-384.

- [12] Lo C K, Chen C H, Zhong R Y. A review of digital twin in product design and development [J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2021, 48 (4) : 101297.
- [13] 李佳佳, 李嘉伟, 范成名, 等. 基于物联网技术的工业大数据采集与处理研究[J]. *长江信息通信*, 2023, 36(9):91-93.
- [14] Chen Z J, Surendraarcharyagie K, Granland K, et al. Service oriented digital twin for additive manufacturing process [J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2024, 74(4):762-776.
- [15] 林景山. ABB 机器人与西门子 S7-1200 PLC 的 TCP/IP 通信应用研究[J]. *电子产品世界*, 2023, 30(11):24-26.
- [16] 马常霞, 张占强. TCP/IP 网络协议分析及应用 [M]. 南京: 南京大学出版社: 2020.
- [17] Rosen R, Von W G, Lo G, et al. About the importance of autonomy and digital twins for the future of manufacturing [J]. *IFAC-PapersOnLine*, 2015, 48(6):567-572.

(责任编辑: 吴萍 英文审校: 程蕾)