

面向起重机运行状态实时监控的数字孪生系统构建方法

董青, 南方磊, 徐格宁

(太原科技大学 机械工程学院, 山西 太原 030024)

摘要: 为解决移动式起重机运行过程中监测力度不足、交互性差和数字化程度低等问题, 提出了起重机运行状态实时监控数字孪生系统构建方法。引入数字孪生五维模型, 建立起重机虚实互控的数字孪生框架。从服役场景和物理实体组成搭建物理空间, 从虚拟模型和可视化场景及行为动作控制方面建立虚拟空间, 基于MySQL数据库, 利用固有、采集和虚拟信息构建孪生数据库, 结合通信协议实现虚实交互、动态监测和可视化。以YDC20/30轻小型移动式起重机为例, 验证了该方法的可行性, 为全面管控起重机服役过程提供了新方案。

关键词: 数字孪生; 虚实交互; 可视化; 移动式起重机; 运行状态

中图分类号: TH 133.33 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-5581(2025)02-0334-06

Construction method of digital twin system for real-time monitoring of crane running state

DONG Qing, NAN Fanglei, XU Gening

(School of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China)

Abstract: In order to solve the problems of insufficient monitoring strength, poor interaction and low digitization degree during the operation of mobile crane, the construction method of digital twin system for real-time monitoring of crane operation status was proposed. A five-dimensional digital twin model is introduced to establish a digital twin framework for virtual and real control of cranes. Build a physical space from the service scene and physical entity; Establish virtual space from virtual model and visual scene and action control. Based on MySQL database, the twin database is constructed by using inherent, collected and virtual information. Virtual and real interaction, dynamic monitoring and visualization are realized in combination with communication protocols. Taking YDC20/30 light and small mobile crane as an example, the feasibility of this method is verified, and a new scheme is provided for comprehensively controlling the service process of the crane.

Key words: digital twin; virtual-real interaction; visualization; mobile crane; running state

起重机械作为支撑国民经济稳定向上和繁荣发展的“负重脊梁”, 其作为八大特种设备之一, 具有服役周期长、起重量大、载荷频繁交变、工作环境恶劣等特点, 因此不可避免地存在一定安全问题和事故隐患。运行状态监测是应对起重机械典型失效问题的重要手段, 需要科学有效的监测技术^[1]。因此, 建立一套合理高效的监测系统, 对设备健康管理、避免事故发生具有重要意义。

陶飞等^[2]在数字孪生车间研究过程中提出了数字孪生五维模型概念, 为各领域践行数字孪生理念与技术提供了参考。刘明浩等^[3]提出了基于数字孪生的铣刀状态实时监控方法, 阐述了实现数控机床的数字空间搭建、多源异构数据的传输及管理、数字孪生驱动的铣刀状态监测这3个关键技术。周成等^[4]提出一种基于数字孪生的车间三维可视化监控系统六维模型, 解决了制造车间监控透

取物区内存放所需搬运的货物,堆码区为货物堆放位置,工作场景划分为 x 轴和 y 轴组成的二维平面, O_1 点为设备初始位置。通过控制设备的平移将吊具移动至货物正上方后打开机械爪,根据取物区货物的摆放方向调整吊具角度,升降机构下降一定距离后机械爪闭合,完成货物抓取。通过控制设备的平移生成规避场地障碍物的无干涉搬运路径,

到达堆码区后调整吊具角度,升降机构下降一定高度机械爪张开,完成首次搬运,之后按原路径返回至坐标原点,循环往复直至完成所有作业。

2.1.2 物理实体组成元素及层级关系

物理实体由结构框架、升降系统、行走系统、吊具系统、传感系统、无线通信系统和驱动控制系统等要素组成,层级关系如图3所示。

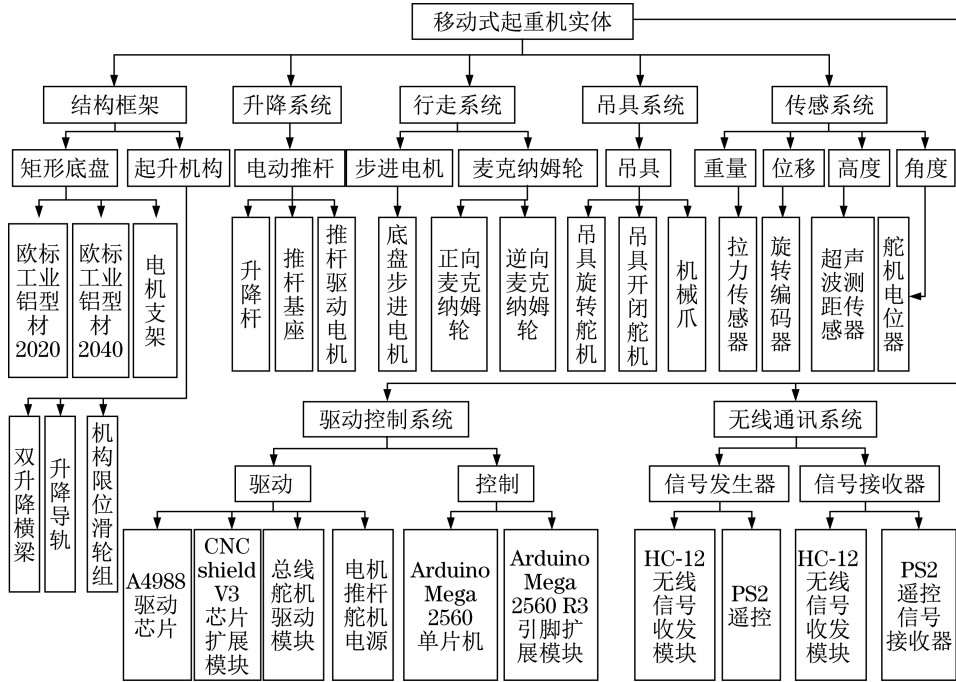


图3 物理实体的元素层级关系

Fig.3 Physical entity element level

以应用场景为基础,结合物理实体系统组成元素及各元素间的层级关系,给出关键部件(系统的元素)的分布情况,以此完成移动式起重机物理实体的搭建,结果如图4所示。

2.2 虚拟空间

虚拟空间搭建主要从虚拟实体构建、可视化场景搭建与行为逻辑控制方面展开,搭建流程如图5所示。

2.2.1 虚拟实体构建

以SolidWorks为基础,依据物理实体进行1:1虚拟实体场地和装配体构建。对于无相对运动的多个零部件,连接重组为一个零件,其目的是简化Unity 3d中总装配体父子关系树状图,总装配体以SLDASM格式导入3DS MAX建模软件后输出FBX格式文件,并将其加载至Unity 3d中Scene场景,完成虚拟实体的导入。

2.2.2 可视化场景搭建与行为动作控制

场景搭建主要是对移动式起重机工作场地、相机、光照进行调整,使其与物理实体场景高度一致,视觉上给予逼真效果。动作控制组件主要用于产生孪生数据,驱动虚实模型发生同步映射。Slider组件用于控制吊具旋转和开闭角度、升降机构升降、设备前后左右平移。Button组件用于数字孪生系统控制模式、监控模式激活等,可视化虚拟空间如图6所示。

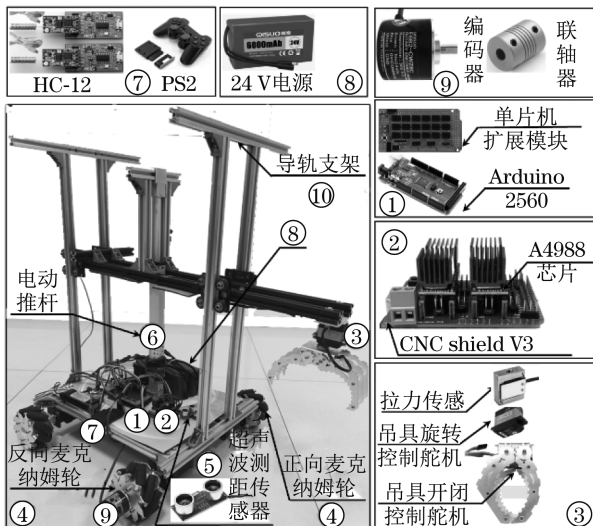


图4 物理实体元素分布

Fig.4 Physical entity element distribution

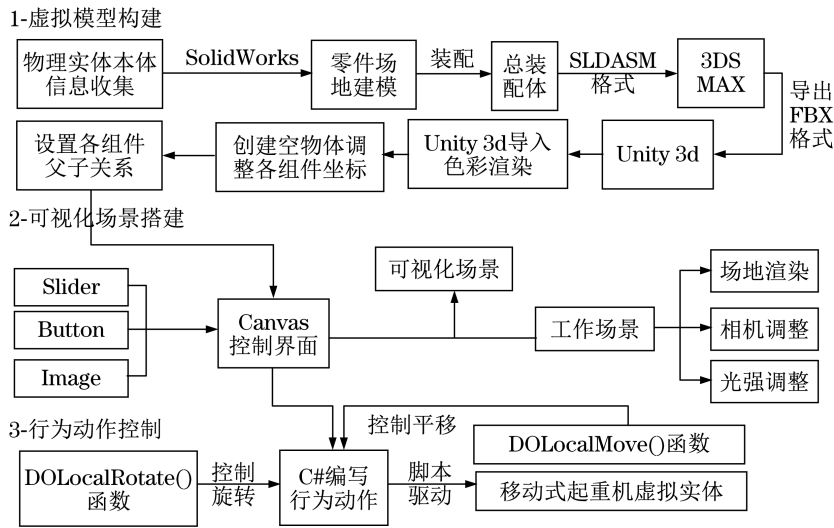


图5 移动式起重机虚拟空间构建流程

Fig.5 Construction of mobile crane virtual space

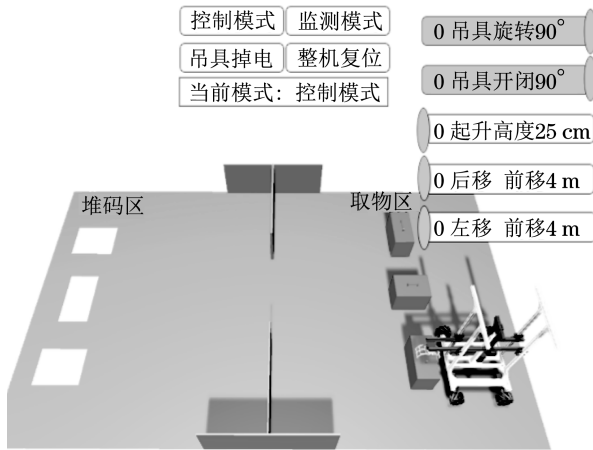


图6 移动式起重机虚拟空间构建

Fig.6 Mobile crane virtual entity construction

2.3 孪生数据

2.3.1 孪生数据的分类

孪生数据主要分为固有信息数据、采集信息数据和虚拟信息数据这3大类,具体的数字层次结构如图7所示。

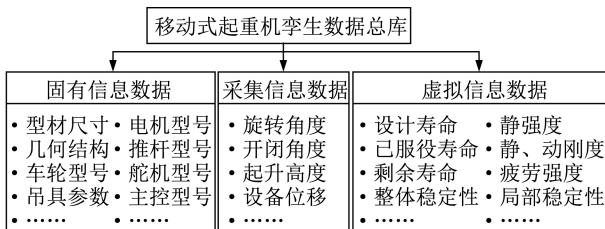


图7 移动式起重机孪生数据层次结构

Fig.7 Mobile crane twin data hierarchy

2.3.2 数据的存储

数据的存储需建立MySQL与Python服务端的连接,在Python主程序编写Navicat服务端,代码写入PC端IP地址、端口号、用户名、密码、数据

库名和编码方式,即可实现两者的连接。利用SQL语句将其写入MySQL对应数据库进行保存,具体过程如图8所示。

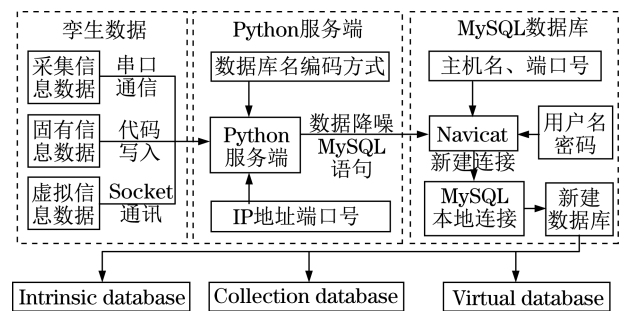


图8 数据库构建及数据存储

Fig.8 Database construction and data storage

2.4 连接

2.4.1 物理实体-虚拟实体

如图9所示,虚拟孪生数据由Unity 3d界面中Slider产生,孪生数据一方面传输至C#编写的虚拟实体动作控制脚本,驱动其发生相应的行为动作;另一方面通过Socket中TCP/IP网络通信协议将孪生数据传输至Python服务端,服务端接收数据后通过串口协议传输通道将孪生数据传输至主控单片机,单片机主控调用电控设备驱动程序驱动物理实体发生同步映射,完成物理实体与虚拟实体之间的连接。

2.4.2 物理实体-孪生数据

物理实体按其行为动作选择电控设备、传感器并加以安装,组成物理实体控制和感知系统;安装驱动模块完成物理实体的行为动作驱动,各传感器根据设备的行为动作变化采集并生成物理空间信息,即可完成物理实体和其孪生数据的连接,连接方式如图10所示。

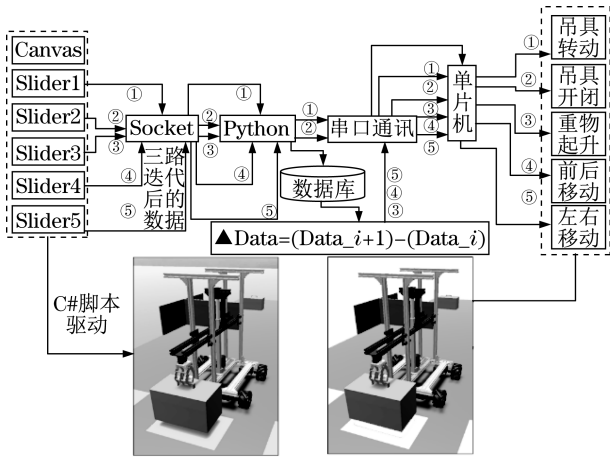


图9 虚控实的交互方式

Fig.9 Virtual control real interaction mode

2.4.3 虚拟实体-孪生数据

控制模式下,由Slider驱动虚拟实体实现平移和旋转。监测状态下,传感器采集数据经串口通信

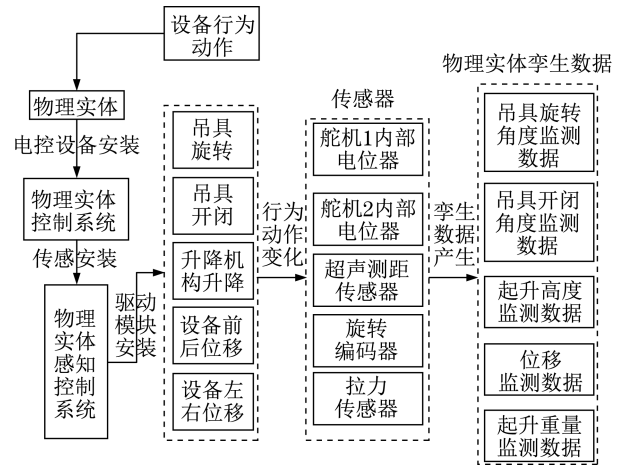


图10 物理实体-孪生数据

Fig.10 Physical entity-twin data

传至Python服务端,再经Socket通信传至各C#脚本,即可完成采集信息孪生数据连接并驱动虚拟实体,连接流程如图11所示。

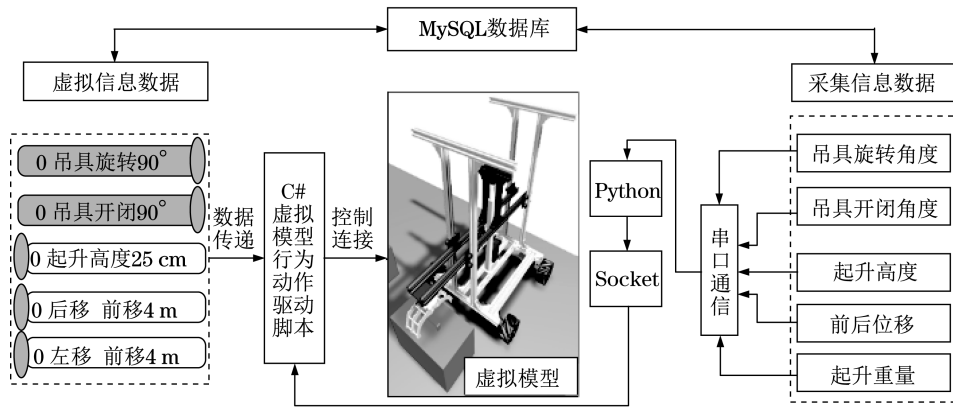


图11 虚拟实体-孪生数据连接流程

Fig.11 Virtual entity-twin data connection flow

2.4.4 可视化服务-孪生数据

作为连接桥梁的Python服务端,是实现虚实交互、全程监测和数据可视化的前提。利用Qt设计人机交互和孪生数据可视化界面,获得Ui格式文件以供Python加载,其中按钮作为触发器,点击后激活服务端相应封装程序,从而显示实时监测量的变化情况。

2.4.5 物理实体-可视化服务

在物理空间加装不同机位摄像头,利用Ui界面中按钮摄像头启动程序,即可完成物理实体可视化服务。

2.4.6 虚拟实体-可视化服务

根据物理空间摄像头机位,在虚拟空间设置一致的相机机位,利用人机交互界面按钮激活Unity 3d发布版本程序,使得虚拟相机拍摄的画面

与摄像头保持一致即可。

3 实验案例

以YDC20/30轻小型移动式起重机为实验案例,该起重机的额定起重量为10 kg,最大起升高度为0.3 m,移动式底盘长为0.44 m,宽为0.52 m,起升推杆最大推力220 N,吊具开闭最大扭矩3.43 N·m,吊具旋转最大扭矩3.43 N·m,起升速度0.002~0.012 m/s,运行速度0.02 m/s,设备结构材质为20 mm×20 mm和20 mm×40 mm欧标铝型材料,整机质量为12.6 kg。以图2中货物1的搬运路径为例,移动式起重机一个完整运行过程的监测结果如图12所示,图中序号为运行步骤,该结果与服役场景描述2.1.1节对应。

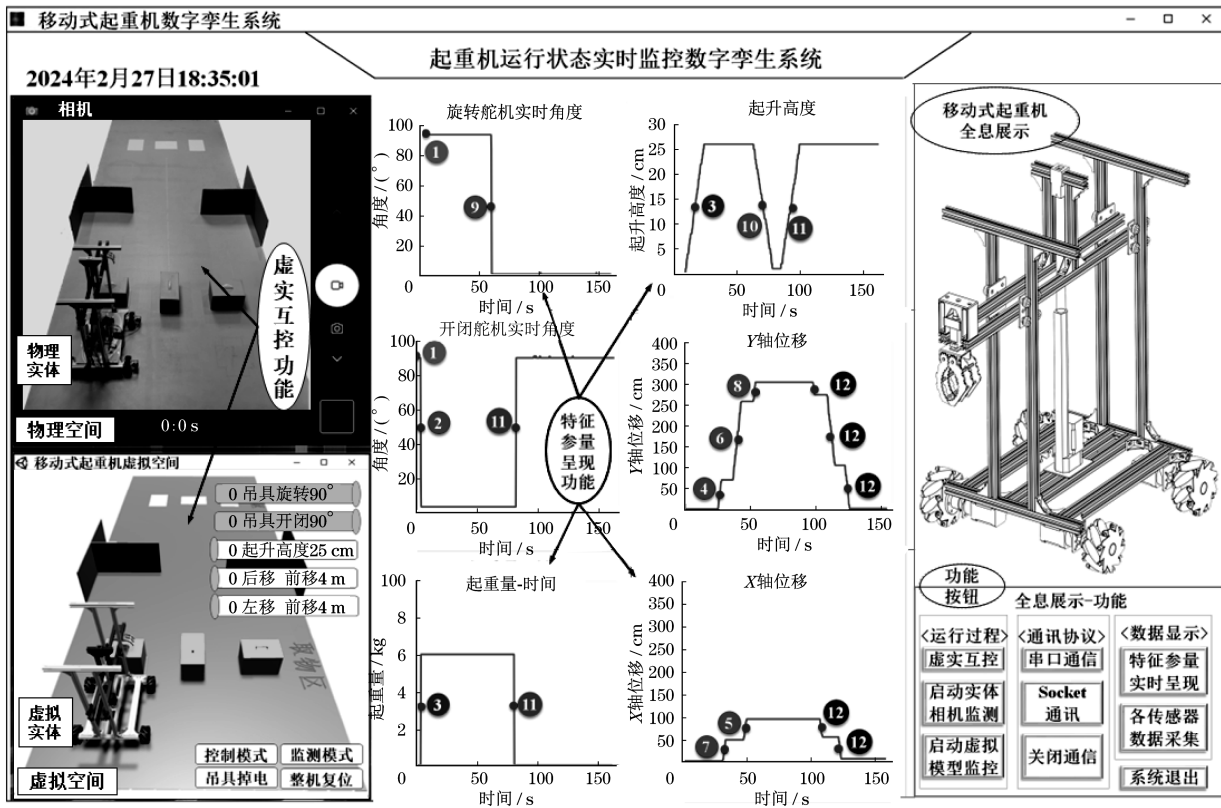


图 12 设备运行数据监测

Fig.12 Equipment operation data monitoring

4 结语

针对起重机运行状态监控等问题,搭建移动式起重机运行状态实时监控数字孪生系统。引入数字孪生五维模型,应用虚实模型和空间搭建、孪生数据驱动、工作过程及数据可视化和各部分之间连接等关键技术,实现了起重机运行过程中的数字化和可视化监控。YDC20/30 轻小型移动式起重机验证表明:系统运行稳定流畅,监测及可视化效果好,为传统起重机械行业数字孪生技术的应用做出了初步探索。

参考文献:

[1] 田凯. 起重机械事故风险及安全管理对策探究[J]. 安防科技, 2021(15): 1-18.
 [2] 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.
 [3] 刘明浩, 岳彩旭, 夏伟, 等. 基于数字孪生的铣刀状态实时监控研究[J]. 计算机集成制造系统, 2023(6): 2118-2129.
 [4] 周成, 孙恺庭, 李江, 等. 基于数字孪生的车间三维可视化监控系统[J]. 计算机集成制造系统, 2022, 28(3): 758-768.

[5] 柳林燕, 杜宏祥, 汪惠芬, 等. 车间生产过程数字孪生系统构建及应用[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(6): 1536-1545.
 [6] 刘琳. 基于数字孪生的龙门机床虚拟仿真系统构建与碰撞检测技术研究[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2021.
 [7] 李莎莎, 舒亮, 杨艳芳, 等. 逻辑与模型数据并行计算的数字孪生车间系统快速架构方法[J]. 机械工程学报, 2021, 57(17): 76-85.
 [8] HAVARD V, JEANNE B, LACOMBLEZ M, et al. Digital twin and virtual reality: a co-simulation environment for design and assessment of industrial workstations [J]. Production & Manufacturing Research, 2019, 7(1): 472-489.
 [9] VOGT A, SCHMIDT P H, MAYER S, et al. Production in the loop-the interoperability of digital twins of the product and the production system [J]. Procedia CIRP, 2021, 99(1): 561-566.
 [10] ALA-LAURINAHO R, AUTIOSALO J, NIKANDER A, et al. Data link for the creation of digital twins [J]. IEEE Access, 2020, 8: 228675-228684.
 [11] 何西旺, 来孝楠, 杨亮亮, 等. 机理与数据联合驱动的龙门起重机数字孪生设计[C]// 第十七届中国 CAE 工程分析技术年会论文集. 2021: 21-25, 33.
 [12] 杨斌, 张根保, 庾辉, 等. 基于数字孪生的机械产品运动性能调控方法[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(6): 1591-1599.