

机组式凹印机可视化监控平台的研究与开发

程倩¹, 侯和平^{1*}, 李征², 刘善慧¹, 徐卓飞¹, 孙玉香¹, 尹津宇¹

(1.西安理工大学 印刷包装与数字媒体学院, 西安 710054;

2.陕西北人印刷机械有限责任公司, 陕西 渭南 714000)

摘要: **目的** 为解决凹版印刷生产过程中监控系统功能单一、可视化程度低、信息利用率低等问题, 构建一种基于数字孪生的监控系统四层架构模型。**方法** 通过 SolidWorks、3DS Max、Unity 3D 三维建模软件搭建凹印机虚拟场景, 基于 Modbus TCP/IP 协议采集设备的实时数据, 使用 SQL Server 数据库对设备数据分类存储, 并结合凹印机虚实映射逻辑结构, 编写 C#脚本实现物理实体与虚拟模型间的同步映射, 完成监控系统的开发。**结果** 该监控平台实现了凹印机的虚实同步运行、状态监控、套准偏差监控和健康管理等功能, 为印刷企业智能化运维提供了可行方案。**结论** 与传统印刷装备监控相比, 基于数字孪生的监控系统突破了时间、空间、投入成本等条件的限制, 操作者可实时掌握凹印机的生产信息、运行状态、历史信息等, 极大地提高了设备稳定生产的效率, 降低了企业的成本。

关键词: 数字孪生; 监控系统; 实时数据; 凹印机

中图分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2023)19-0179-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.19.023

Research and Development of Visual Monitoring Platform for Unit-type Gravure Printing Machine

CHENG Qian¹, HOU He-ping^{1*}, LI Zheng², LIU Shan-hui¹, XU Zhuo-fei¹,
SUN Yu-xiang¹, YIN Jin-yu¹

(1. Faculty of Printing, Packaging Engineering and Digital Media Technology, Xi'an University of Technology, Xi'an 710054, China; 2. Shaanxi Beiren Printing Machinery Co., Ltd., Shaanxi Weinan 714000, China)

ABSTRACT: The work aims to construct a four-layer architecture model of monitoring system based on digital twin to solve the problems of single function, low visualization and low information utilization of monitoring systems in gravure printing production. On the visual monitoring platform, a virtual scene of the gravure printing machine was built with SolidWorks, 3DS Max and Unity 3D modeling software. The real-time data of the equipment were collected based on the Modbus TCP/IP protocol. The SQL Server database was used to realize classified storage of equipment data, and the virtual-real mapping logical structure of gravure printing machines was combined to write C# scripts to realize the synchronous mapping between the physical entity and the virtual model. Finally, the monitoring system was developed. The platform realized the functions of virtual-real synchronous operation, condition monitoring, register deviation monitoring and health management of gravure printing machines, which provided a feasible scheme for intelligent operation and maintenance of printing enterprises. Compared with the traditional printing equipment monitoring, the monitoring system based on digital twin breaks through the time, space, input cost and other conditions. Operators can grasp the production information,

收稿日期: 2023-03-02

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2019YFB1707200); 陕西省技术创新引导专项资助项目(2020QFY03-05); 陕西省教育厅协同创新中心项目(22JY047)

operation status and historical information of gravure printing machines in real time, which greatly improves the efficiency of stable production of equipment and reduces the cost of enterprises.

KEY WORDS: digital twin; monitoring system; real-time data; gravure printing machine

凹版印刷作为印刷行业主要印刷方式之一,被广泛用于烟包、化妆品包装、药品包装、装饰材料印刷等领域。机组式凹印机是凹版印刷中的主要设备,在我国印刷装备中占有很大市场。受创新能力和经济发展的制约,印刷装备发展基础薄弱,其数字化水平一直很低。随着新一代信息技术在设备制造行业的发展与应用,印刷装备亟须充分融合先进技术,实现印刷装备的数字化、信息化、智能化转型升级。

装备的运维与管控是印刷生产中的重要环节,也是实现装备数字化升级的关键过程。国内外学者在相关研究中也取得一些成果,日本小森公司推出 KP-Connect 云平台,可随时查看印刷机的运转信息^[1]。德国海德堡的“印通”平台,可使印刷企业对作业全流程进行实时监控与跟踪^[2]。德国曼罗兰公司通过 Rift 虚拟现实技术,使客户可以实时掌握印刷机印刷活件的信息^[3]。在国内,许倩^[4]基于云平台设计印刷设备远程监控系统,管理人员可通过监控界面高效管理印刷设备。东方精工联合 Fosber 集团研发出 PRO 系列智能化生产管理系统,可实时掌握瓦楞纸板的生产情况^[5]。安徽新华印刷公司建设的智能工厂,实现对生产订单状态数据、设备状态数据等实时管控^[6]。印刷装备智能化运维已取得一些成果,但仍存在着问题:系统功能单一,导致客户体验感较差,无法实现高质量运维;设备数据自动采集与联网程度较低,导致信息化孤岛问题;运维平台开发成本高、兼容性低,无法保证运维效率和运营灵活性。

数字孪生的出现与应用成为实现智能制造的关键技术之一,也为实现设备的智能化运维提供新的契机。数字孪生被广泛应用于生产车间^[7-9]、机器人^[10-11]、复杂设备^[12]、能源^[13]、医疗^[14]、航空^[15-16]等领域,但物理实体与虚拟模型间的实时映射成为实现数字孪生设备的核心问题。Luo 等^[17]研究了数控机床的数字孪生多领域建模方法,并分析了物理空间与信息空间的映射策略,有效改善了数控机床的运行模式。赵浩然等^[18]构建车间层次化映射规则,并通过实时数据驱动虚拟模型实现车间设备的同步运行。李莎莎等^[19]根据断路器生产车间的特点,构建车间递进式 Petri 网模型,并结合模型结构分析、物理引擎开发、系统平台优化等方法,实现了物理车间设备与孪生车间的实时融合与同步。多数研究通过实时数据直接驱动虚拟模型实现虚实映射^[20-22],缺少系统的数字孪生虚实映射方案,因此无法满足机组式凹印机因其内部运行机理复杂、组成结构复杂等情况下进行实时状态监测及运维管控的需求。

针对以上问题,借鉴数字孪生在其他领域的应用

思路,本文将数字孪生技术应用于凹印机实时监控与智能管控中,通过构建凹印机的虚拟模型,基于 Modbus TCP/IP 协议的以太网通信获取设备实时数据,并建立数据管理模型实现对数据的存储;基于 C#脚本事件驱动实现凹印机虚实映射,并通过 Unity 3D 引擎开发凹印机三维可视化监控平台,实现对凹印机的运行状态监控、关键部位监控、设备健康管理、套色偏差监控等功能,使设备生产过程更加透明高效。

1 数字孪生凹印机监控系统架构设计

数字孪生凹印机通过获取设备生产过程中的实时信息,通过数据驱动技术实现设备运行状态可视化和信息可视化,将结构复杂、行为逻辑复杂和运行状态不可见的设备清晰地展示给用户,便于设备用户充分掌握设备性能、运行状态、生产任务和产品质量等,更好地实现智能化运维与管控。本文依据数字孪生五维模型^[23],提出数字孪生凹印机监控系统 4 层架构,分别为凹印机实体、数据信息层、虚拟空间层和应用服务层,如图 1 所示。

1) 凹印机实体。机组式凹印机由收放卷单元、收放卷牵引装置、印刷单元、干燥装置和控制系统等主要部分组成,收放料卷、收放卷牵引辊分别由各自电机驱动,印刷单元的版辊通过主电机经过机械传动来驱动,该机组式凹印机也配备张力自动控制系统和套准自动控制系统,设备可以实现自动张力控制、套准偏差调节、收放卷自动裁切、网络互联等功能。

2) 数据信息层。数据信息主要有状态数据、驱动数据和动作信号 3 类,状态数据主要反映设备的内部状态,包括故障状态信息、运行状态信息、生产状态信息,如电机温度、负载、收放卷张力等。驱动数据主要反映设备的运转速度、刮刀位置及摆辊位置,如线速度、刮刀角度等。动作信号用来描述设备当前动作,如机器启动、联动动作等。数据信息层是实现虚实映射、设备可视化监控、设备健康管理等应用的基础。

3) 虚拟空间层。虚拟空间包括虚拟模型及其所处场景。虚拟模型真实描述凹印机实体的几何参数与关系,实现对凹印机实体几何层面的全面描述。为实现虚实之间的动态映射,虚拟空间具备信息自感知能力,可以实时感知数据信息的动态变化,以实现虚实同步。虚拟空间也具备数据统计分析能力,可对设备实时数据进行分析与处理,实现对设备印刷过程的优化管控。

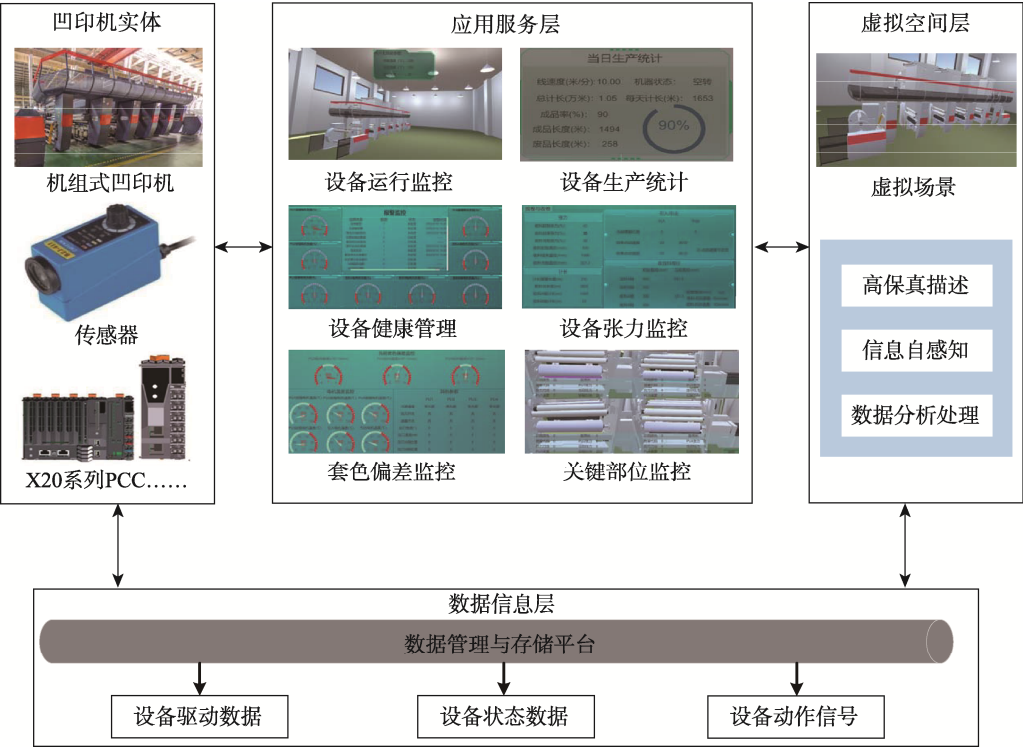


图 1 数字孪生监控系统 4 层架构
Fig.1 Four layer architecture of the digital twin monitoring system

4) 应用服务层。应用服务主要包括: 三维可视化监控, 在三维场景中对设备的运行状态进行实时显示与动态映射, 并为用户提供沉浸式体验感; 设备状态监控, 通过设计多种显示方式向用户展示设备生产信息与状态信息, 如弹窗展示、图表显示等; 设备健康管理, 实时监控设备的故障信息, 记录故障发生的时间与状态, 监控设备关键部位的健康状况, 为设备维修维护提供指导。

2 虚拟场景搭建

构建虚拟场景流程分为几何建模、模型处理和场景搭建等 3 步。

几何建模的工作主要在 SolidWorks 中完成, 首先绘制单个零件模型, 根据配合约束关系对零件进行组装, 得到物理实体的几何模型。模型处理在 3DS Max 中完成, 设置材质球的参数完成对几何模型的材料渲染, 并对部分模型进行重构与减面操作, 在保持模型形状不变的情况下尽可能减少组成模型的多边形数量, 优化前多边形数量为 1 698 602 个, 优化后的多边形数量为 1 356 078 个。使用 Unity 3D 搭建虚拟场景, 可通过 C#或 JavaScript 等高级语言实现系统功能。场景搭建的主要过程: 将处理后的三维模型以.fbx 格式导入 Unity 3D 中, 修改天空盒、材质等参数, 使得虚拟场景高度近似于真实场景; 为部分模型添加碰撞组件, 并绑定 C#脚本, 实现人机交互功能;

为主相机绑定 C#脚本, 实现场景漫游功能; 为实现物理实体与虚拟模型之间的实时映射, 为虚拟场景中各个模型设置“父子”关系。

3 基于 Modbus TCP/IP 的设备实时数据采集

实时数据是实现物理实体与虚拟模型实时同步的驱动源, 这些数据来自于传感器、变频器、控制系统等, 具有数据量大、更新频率高等特点, 为数据采集和管理带来很大困难。基于 Modbus TCP/IP 的以太网通信作为工业通信中的常用协议, 与 Modbus 串行通信相比, 优化了自身的通信速度、通信距离和通信稳定性^[24]。因此, 本文通过 Modbus TCP/IP 协议实现设备与 PC 上位机的连接, 获取设备控制部件的数据。

3.1 数据通信过程分析

如图 2 所示为数字孪生监控系统数据传输架构, PC 上位机与设备 HMI 人机界面通过以太网接口进行连接, 获取设备在生产过程中的实时数据。在 PC 机上搭建 OPC 服务器实现对数据源的整合, 通过 C#编写 OPC 客户端为用户提供相应的数据服务, 最终对数据进行存储与管理, 数字孪生监控系统从数据库获取实时数据。

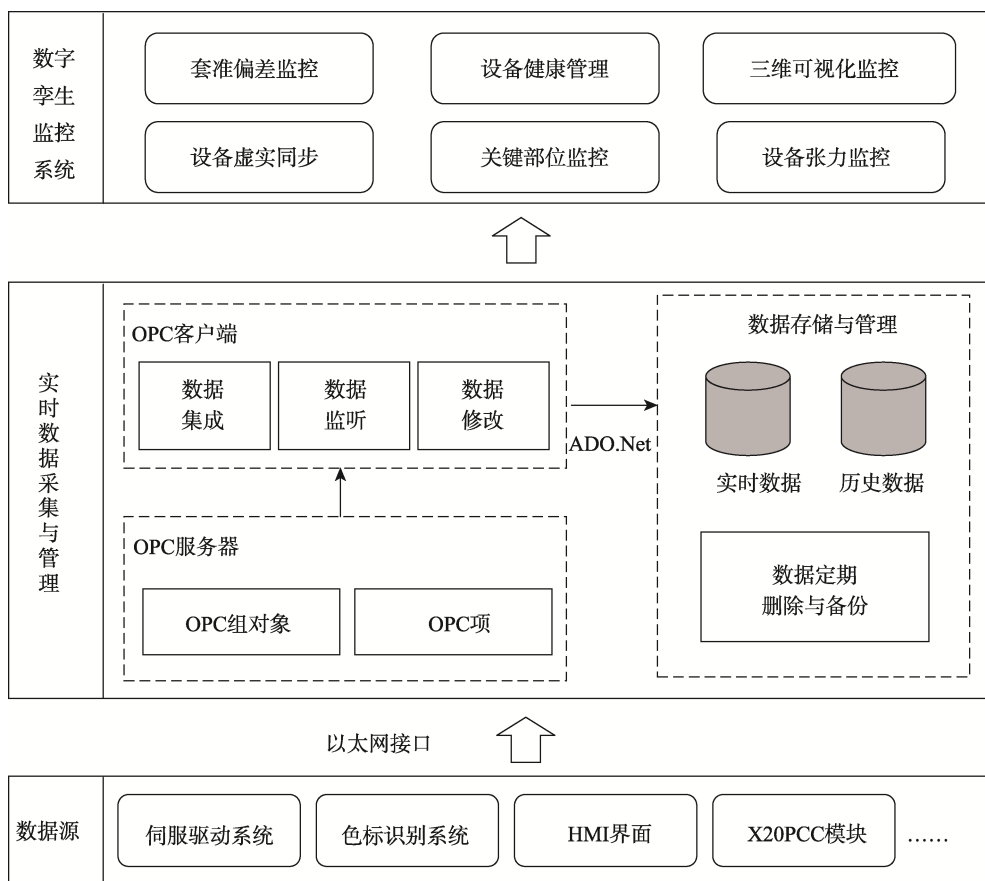


图 2 数据传输架构
Fig.2 Architecture of data transfer

3.2 实时数据采集流程

在印刷生产车间，一般通过上位机或服务器来实现与控制系统的通信，从而获取设备生产过程中的实时数据。数据采集主要流程如下：

1) 硬件连接。选择 CAT6 网线，将设备人机界面的 ETH2 网口与 PC 连接起来，并配置 PC 机以太网口的 IP 地址。

2) 搭建 OPC 服务器。通过 KEPServerEX 搭建

OPC 服务器，该服务器被配置在一台 PC 机上，实现 OPC 服务器与物理设备间的连接。搭建 OPC 服务器、组和数项，选择数据驱动源为 Modbus TCP/IP Ethernet 驱动，配置数据采集接口，通过数据通信地址找到设备上的数据源，并支持 OPC 客户端对数据的监听、修改等操作。设备部分实时数据、类型和 Modbus 通信地址如表 1 所示。

3) 数据库连接。通过 C#编写 OPC 客户端，将实时数据从 OPC 服务器记录到 SQL Server 数据库中，

表 1 设备部分实时数据、类型、通信地址
Tab.1 Partial real-time data, type, communication address of equipment

实时数据	类型	通信地址	实时数据	类型	通信地址
A 轴计长	float	40601	B 轴计长	float	40603
总计长	float	40605	当前速度	float	40607
放料当前直径	float	40613	放料报警直径	float	40615
放料 A 轴工作	float	40617	放料 B 轴工作	float	40619
收料当前直径	float	40625	收卷起始张力	float	40627
收卷结束张力	float	40629	收卷起始直径	float	40631
收卷结束直径	float	40633	收卷当前张力	float	40635
停机时间	float	40657	空转速度	float	40659

并将新的数据值、时间戳和质量测量值等发送到数据库。OPC 客户端开发可使用 OPCDAuto.dll 自动化接口来实现。

3.3 设备实时数据管理

根据设备虚实映射功能需求，设备生产过程中的数据可以分为驱动数据、动作信号和状态数据。围绕这 3 种类型数据进行数据库设计，定义数据的类型、标识符、约束等属性，并建立数据周期性更新维护计划，从而优化数据库存储结构，提高整个监控系统的实时性。数据管理模型见图 3。

4 基于脚本事件驱动的虚实映射实现

物理实体与虚拟模型之间的动态映射是实现设备三维可视化监控的核心，主要表现为设备运行状态可视化和数据可视化。如图 4 所示为脚本事件驱动的虚实映射方案。将所有数据分为运动驱动数据、动作信号和设备状态信息，设备状态数据可进一步细分为生产状态信息、设备故障信息和运行状态信息。为了充分利用实时数据驱动物理实体与虚拟模型间的同步映射，需要编写 C#脚本对不同类型的数据进行逻辑处理。

针对驱动数据，如设备当前速度、自动升降速度、自动加速时间等，可与动作信号结合，通过 C#脚本事件定义虚拟模型在感知到相应数据后所触发的行为和动作，并将脚本挂载于对应模型中。当凹印机实体动作发生变化时，数据感知脚本对设备数据信号进行感知与解析，并将数据传输至运动驱动脚本中，运动驱动脚本依据相关数据对运动控制变量进行赋值，进而驱动虚拟模型。此类运动驱动脚本包括模型旋转脚本、自动升速脚本、自动降速脚本等。

针对部分运行状态信息（如放料报警直径），在经过脚本对其解析后，传输至三维动画脚本中，三维动画脚本中定义了凹印机的复杂运动，如回转架旋转、放料自动裁切、收料自动裁切等动作，从而驱动模型实现复杂动作映射。针对其他运行状态信息、生产状态信息和设备故障信息，通过定义的脚本事件实现相应的功能，如总计长、非合格品计长、停机时间等，在通过数据分析脚本的运算后实现设备的生产统计。在此基础上完成凹印机印刷过程中的三维可视化监控及运行数据分析，从而进一步实现设备的优化管控与健康维护。

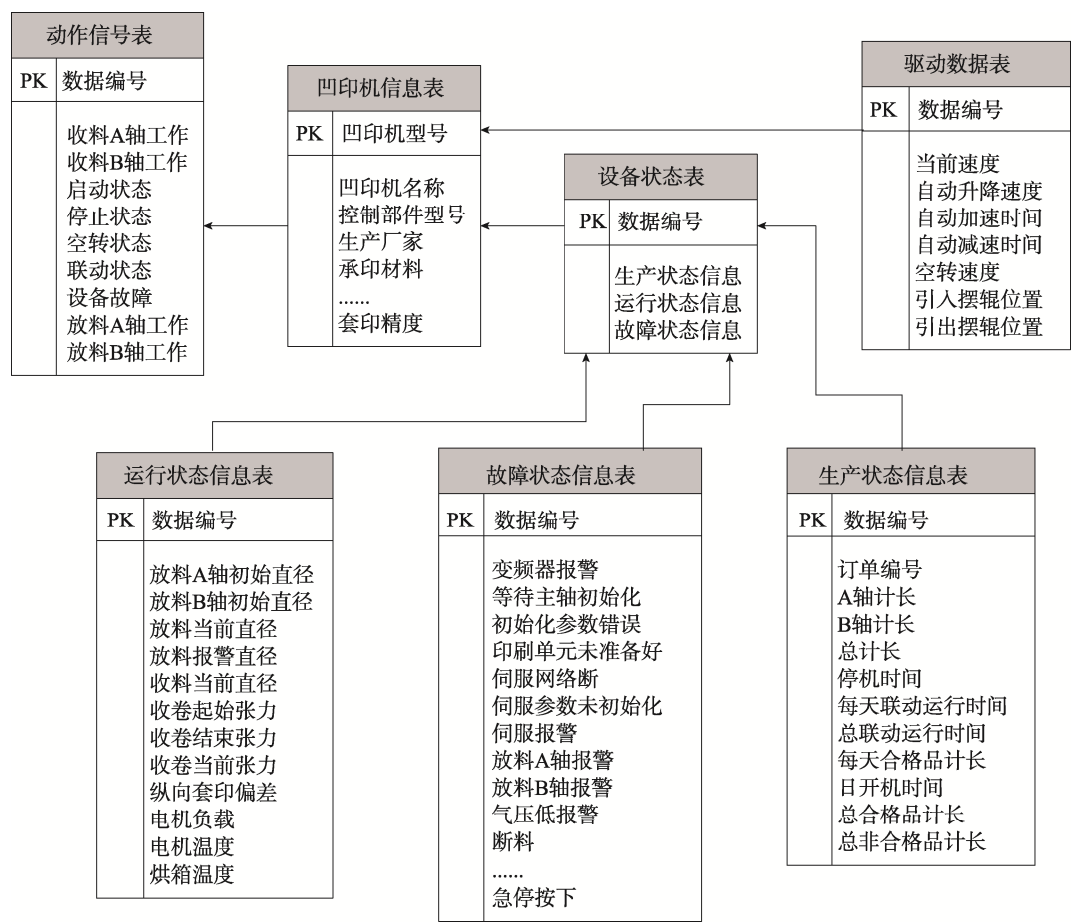


图 3 数据管理模型
Fig.3 Data management model

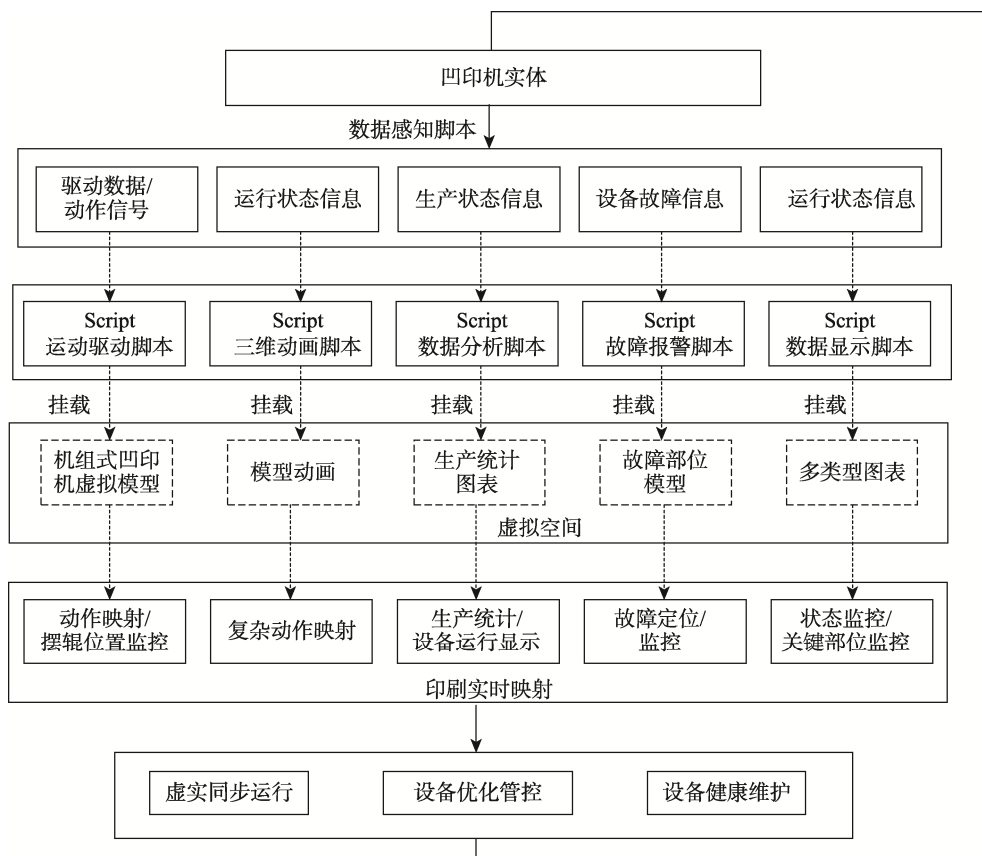


图 4 凹印机虚实映射逻辑结构

Fig.4 Virtual-real mapping logical structure of gravure printing machine

4.1 运行状态可视化

运行状态可视化可理解为在虚拟空间中实现虚拟模型与物理实体之间的动态同步。结合驱动数据与动作信号,通过控制父节点模型的动作实现子节点模型的同步运行,依次传递至末端的模型。因此在虚拟空间中,模型驱动有 2 种形式:将采集到的数据进行运算分析后,直接用于驱动模型;动作信号与简单的动画效果结合实现模型驱动。

一种模型驱动方式可由数据直接驱动,如滚筒模型旋转,可将设备当前速度与动作信号结合起来,驱动滚筒模型实现虚实同步运行。本文滚筒模型的运动主要实现绕自身 x 轴旋转,此功能通过旋转函数 $\text{transform.Rotate}(\text{Vector3.right} * \text{Time.deltaTime} * \text{speed})$ 来实现,编写脚本文件将该函数写入 Update 函数中,并挂载于模型下,实现滚筒模型旋转。

另一种模型驱动形式通过动画效果来实现,如当设备进行“放卷自动裁切”,即料卷当前卷径为 250 mm 时,设备开始进行“放卷自动裁切”动作,回转架、切刀大臂、新料卷、接纸压辊、切刀和切刀大臂共同配合完成换料,在正常印刷时切刀大臂的状态如图 5 所示。当切刀大臂感知到放料报警直径为 250 mm 时,切刀准备自动裁切动作,此时切刀大臂的状态如图 6 所示。在换料结束后,切刀大臂的状态恢复至图 5 状态。



图 5 放料裁切前切刀大臂的状态

Fig.5 State of cutter arm before unloading and cutting

4.2 数据统计与可视化

在数字孪生监控系统中,重点对设备状态信息进行分析处理,包括对设备运行时长统计、产品合格率分析、设备健康状况评价等,为用户进行智能化决策提供数据支持,并实现对设备透明化管理。

在虚拟空间中,数据可视化一般通过图表来实现,图表将设备的生产状态信息清晰直观地呈现给用户,创建 Canvas 画布以不同方式为用户展示设备数据。本文的数据可视化方案有弹窗显示、看板显示和大屏幕显示方案 3 种。信息弹窗可视化针对凹印机重要部分的状态信息,如烘箱温度、烘箱风量等,通过鼠标射线点击来实现,如图 7a 所示。看板显示针对

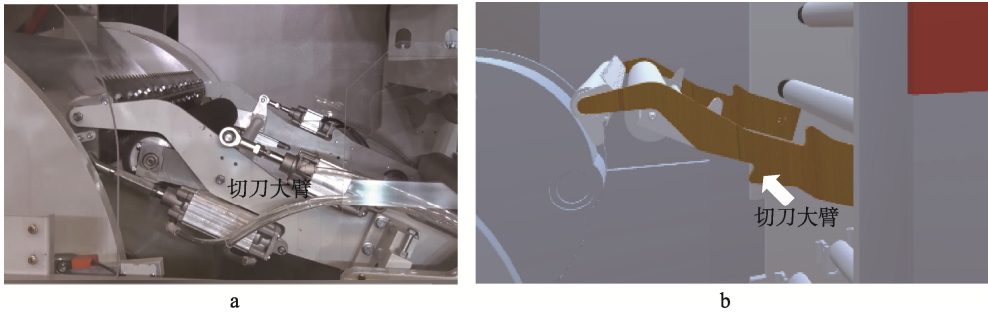


图 6 放料裁切时切刀大臂的状态
Fig.6 State of cutter arm when unloading and cutting

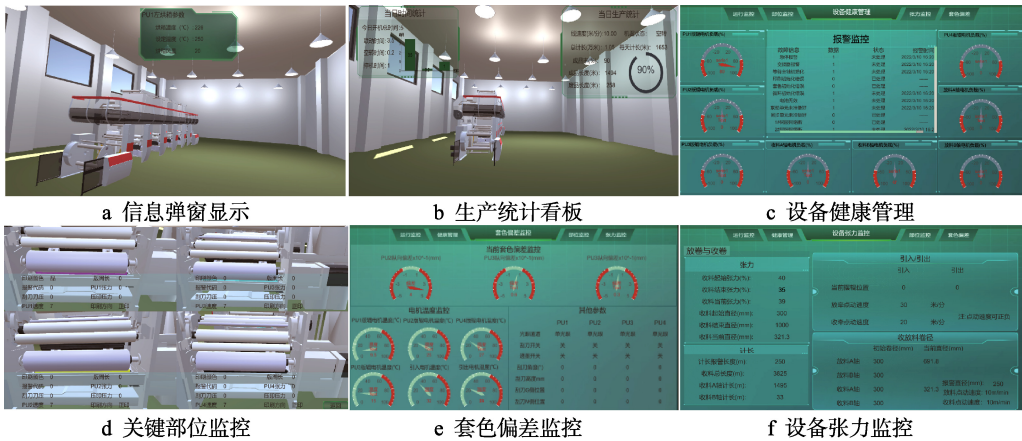


图 7 3 种数据可视化展示方案
Fig.7 Three data visualization solutions

设备生产信息, 点击按钮可以控制看板的显示时间, 在三维可视化监控的任意角度都可观察到设备的生产信息, 如图 7b 所示。大屏幕显示可实现设备张力监控、关键部位监控、套准偏差监控和健康管理等功能, 使用多种图表展现设备状态信息, 如图 7c~f 所示。通过对设备实时数据的统计分析与可视化, 使印刷车间的工作人员能对设备状态进行及时查看和处理。当设备印刷生产出现故障时, 及时向用户报警并提醒工作人员处理报警信息, 从而优化设备生产流程。

5 结语

本文针对印刷生产监控中的问题, 提出一种基于数字孪生的凹印机监控系统架构模型。该模型由凹印机实体、数据信息、虚拟空间和应用服务等 4 层架构组成, 利用 SolidWorks、3DS Max 三维建模软件构建高保真模型, 在 Unity 3D 中搭建虚拟场景, 并搭建 OPC 服务器采集设备的实时数据, 最终通过编写 C#脚本来实现物理实体与虚拟模型间的动态映射, 在此基础上设计多种图表, 实现对设备生产过程的优化管控。设备用户可以通过该系统实现设备状态监控、套准质量监控和设备健康管理等功能, 使设备运维管控过程更高效、更安全、更灵活。后续将重点研究设备异常状态下的信号特征提取方法和故障预测机理, 在虚拟空间中实现对凹印机反向控制、运行状态预测和智能化决策。

参考文献:

[1] 赵玮. 基于 LabVIEW 的印刷机故障诊断系统设计[D]. 西安: 西安理工大学, 2019: 1-2.
ZHAO Wei. Design of Printing Machine Fault Diagnosis System Based on LabVIEW[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019: 1-2.

[2] 郁智宏. 传统胶印企业数字化工作流程改造探析[D]. 广州: 华南理工大学, 2020: 2-3.
YU Zhi-hong. Analysis on the Reform of Digital Workflow in Traditional Offset Printing Enterprises[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020: 2-3.

[3] 佚名. 曼罗兰: 体验 EVOLUTION 的极致魅力[J]. 印刷工业, 2015, 10(11): 83.
Anon. Manroland: Experience the Ultimate Charm of EVOLUTION[J]. Print China, 2015, 10(11): 83.

[4] 许倩. 基于云平台的设备远程监控技术研究与应
用[D]. 西安: 西安理工大学, 2015: 1-79.
XU Qian. Research and Application of Remote Monitoring Technology for Equipment Based on Cloud Platform[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2015: 1-79.

[5] 宁廷州, 葛美芹. 智能印刷设备的历史回顾、发展现状
及有效战略[J]. 包装工程, 2019, 40(19): 230-238.
NING Ting-zhou, GE Mei-qin. Historical Review, Development Status and Effective Strategy of Intelligent

- Printing Equipment[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(19): 230-238.
- [6] 齐元胜, 高溯, 吴萌, 等. 印刷智能制造关键技术研究进展[J]. 数字印刷, 2021(3): 1-13.
- QI Yuan-sheng, GAO Su, WU Meng, et al. Research Progress on Key Technologies of Printing Intelligent Manufacturing[J]. Digital Printing, 2021(3): 1-13.
- [7] TERKAJ W, GABOARDI P, TREVISAN C, et al. A Digital Factory Platform for the Design of Roll Shop Plants[J]. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2019, 26: 88-93.
- [8] 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.
- ZHOU Cheng, SUN Kai-ting, LI Jiang, et al. Workshop 3D Visual Monitoring System Based on Digital Twin[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2022, 28(3): 758-768.
- [9] 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.
- LIU Lin-yan, DU Hong-xiang, WANG Hui-fen, et al. Construction and Application of Digital Twin System for Production Process in Workshop[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(6): 1536-1545.
- [10] 杨艳芳, 贺焕, 舒亮, 等. 断路器柔性装配数字孪生机器人及其运动控制[J]. 计算机集成制造系统, 2020, 26(11): 2915-2926.
- YANG Yan-fang, HE Huan, SHU Liang, et al. Digital Twin Robot and Its Motion Control for Flexible Assembly of Circuit Breaker[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2020, 26(11): 2915-2926.
- [11] BILBERG A, MALIK A A. Digital Twin Driven Human-robot Collaborative Assembly[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2019, 68(1): 499-502.
- [12] LUO W, HU T, YE Y, et al. A Hybrid Predictive Maintenance Approach for CNC Machine Tool Driven by Digital Twin[J]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 2020, 65: 101974.
- [13] 张旭辉, 张超, 王妙云, 等. 数字孪生驱动的悬臂式掘进机虚拟操控技术[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(6): 1617-1628.
- ZHANG Xu-hui, ZHANG Chao, WANG Miao-yun, et al. Digital Twin-Driven Virtual Control Technology of Cantilever Roadheader[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2021, 27(6): 1617-1628.
- [14] LIU Y, ZHANG L, YANG Y, et al. A Novel Cloud-based Framework for the Elderly Healthcare Services Using Digital Twin[J]. IEEE Access, 2019, 7: 49088-49101.
- [15] 刘蔚然, 陶飞, 程江峰, 等. 数字孪生卫星: 概念、关键技术及应用[J]. 计算机集成制造系统, 2020, 26(3): 565-588.
- LIU Wei-ran, TAO Fei, CHENG Jiang-feng, et al. Digital Twin Satellite: Concept, Key Technologies and Applications[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2020, 26(3): 565-588.
- [16] LI C, MAHADEVAN S, LING Y, et al. Dynamic Bayesian Network for Aircraft Wing Health Monitoring Digital Twin[J]. AIAA Journal, 2017, 55(3): 930-941.
- [17] LUO W, HU T, ZHANG C, et al. Digital Twin for CNC Machine Tool: Modeling and Using Strategy[J]. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 2019, 10(3): 1129-1140.
- [18] 赵浩然, 刘检华, 熊辉, 等. 面向数字孪生车间的三维可视化实时监控方法[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(6): 1432-1443.
- ZHAO Hao-ran, LIU Jian-hua, XIONG Hui, et al. 3D Visualization Real-Time Monitoring Method for Digital Twin Workshop[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(6): 1432-1443.
- [19] 李莎莎, 舒亮, 吴桂初, 等. 基于逻辑 Petri 网模型的断路器数字孪生车间系统[J]. 计算机集成制造系统, 2022, 28(2): 455-465.
- LI Sha-sha, SHU Liang, WU Gui-chu, et al. Digital Twin Workshop System of Circuit Breaker Based on Logic Petri Net[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2022, 28(2): 455-465.
- [20] REVETRIA R, TONELLI F, DAMIANI L, et al. A Real-Time Mechanical Structures Monitoring System Based on Digital Twin, IOT and Augmented Reality[C]// 2019 Spring Simulation Conference (SpringSim), IEEE, 2019: 1-10.
- [21] REDELINGHUYLS A J H, BASSON A H, KRUGER K. A Six-Layer Architecture for the Digital Twin: A Manufacturing Case Study Implementation[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2020, 31(6): 1383-1402.
- [22] 李小龙. 基于数字孪生的机床加工过程虚拟监控系统研究与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2020: 1-75.
- LI Xiao-long. Research and Implementation of Virtual Monitoring System for Machine Tools Process Based on Digital Twin[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020: 1-75.
- [23] 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 Wei-ran, ZHANG Meng, et al. Five-Dimension Digital Twin Model and Its Ten Applications[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(1): 1-18.
- [24] 习博方, 彦军. 工业以太网中网络通信技术研究[J]. 微计算机信息, 2005, 21(2): 148-149.
- XI Bo-fang, YAN Jun. The Development of Network Communication in Industrial Ethernet[J]. Microcomputer Information, 2005, 21(2): 148-149.