

# 基于数字孪生的包装车间监测平台研究

朱轩逸<sup>1,2</sup>, 鲁玉军<sup>1†</sup>, 辛昊<sup>1,2</sup>

(1. 浙江理工大学机械工程学院, 浙江 杭州 310018; 2. 浙江理工大学龙港研究院, 浙江 温州 325802)

**摘要:**在数字孪生技术迅速发展且与制造业结合愈发紧密的背景下,针对包装车间生产状态实时可视化监控、数据分析、故障诊断等需求,设计了一种基于数字孪生的包装车间监测平台。从车间元素、运行逻辑、生产状态多个方向对包装车间实体对象进行孪生建模。基于TCP/IP的数据采集传输,现实物理行为的虚拟环境仿真,孪生车间数据实时驱动等技术,实现了包装车间设备状态、包装工艺流程的三维可视化监测。最后通过某常温非化学小型物品包装生产车间验证了该方案的可行性,为数字孪生技术在包装制造领域提供了可参考的方案。

**关键词:**包装车间;数字孪生;孪生建模;数据实时驱动;可视化监测

**中图分类号:**TP391.9

**文献标识码:**A

## Research on Packaging Workshop Monitoring Platform Based on Digital Twins

ZHU Xuanyi<sup>1,2</sup>, LU Yujun<sup>1†</sup>, XIN Hao<sup>1,2</sup>

(1. School of mechanical engineering, Zhejiang Sci-tech University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China;

2. Longgang Research Institute of Zhejiang Sci-Tech University, Wenzhou, Zhejiang 325802, China)

**Abstract:** Under the background of rapid development of digital twin technology and increasingly close integration with manufacturing industry, a packaging workshop monitoring platform based on digital twin is designed to meet the needs of real-time visual monitoring, data analysis, and fault diagnosis of production status in packaging workshops. Twin modeling of packaging workshop entity objects from multiple directions including workshop elements, operational logic, and production status. Based on TCP/IP data collection and transmission, virtual environment simulation of real physical behavior, real-time driving of twin workshop data, and other technologies, three-dimensional visual monitoring of packaging workshop equipment status and packaging process flow has been achieved. Finally, the feasibility of this solution was verified through a certain room temperature non chemical small item packaging production workshop, providing a reference solution for digital twin technology in the field of packaging manufacturing.

**Key words:** packaging workshop; digital twin; twin modeling; real-time data driven; visual monitoring

包装是实现品牌创新、迅速提升市场占有率和占有率以及实现可持续发展的重要方法之一,其几乎与所有产业都有着强相关性。但包装环节目前存在数字化程度低、缺乏智能有效的远程监测运

维手段和难以有效掌握包装车间的实时状态等问题,影响了车间的生产效率与生产节拍。

数字孪生是能够将物理世界和信息世界融合交互的手段<sup>[1]</sup>。数字孪生技术的迅速发展,为实现

包装车间三维可视化监测提供了全新的思路,推动了智能车间在数字化和网络化的发展,实现了生产工作车间现场的透明、高效、智能<sup>[2-3]</sup>。

对于构建数字孪生车间,各领域的专家在自身的研究领域发表了大量与其相关的成果与进展<sup>[4-5]</sup>。陶飞等<sup>[6-7]</sup>详细阐述了数字孪生车间。段明峰等<sup>[8]</sup>针对发动机装配车间的孪生监控提出了有效的解决方法。周成等<sup>[9]</sup>和魏一雄等<sup>[10]</sup>将智能制造车间与数字孪生技术有效结合。赵浩然等<sup>[11]</sup>在多层次上对孪生监控进行了分析,提出了一种实时数据驱动的监控模式。刘志峰等<sup>[12]</sup>设计的数字孪生调度云平台通过实时监控和大数据分析有效解决了动态扰动问题。孙元亮等<sup>[13]</sup>提出了面向数字孪生的智能生产线监控系统。

上述研究在智能制造和孪生车间方面取得了丰硕成果。然而在制造业包装加工过程中的应用还处于早期阶段,缺失统一且可复用的数字孪生模型以及具体的建模方法,也缺乏统一的数据采集传输方案,造成数据管理和使用效率低下,产生“数据信息孤岛”,影响包装生产过程的实时交互和故障分析等。因此,针对上述问题,本文在已有研究基础上,以包装车间为对象,提出了一种基于数字孪生的包装车间实时状态监测平台,建立了包括三维模型、运行逻辑模型等工作车间数字孪生体,设计了以 TCP/IP 技术为基础的数据采集传输方案,实现了对包装车间运行过程的监测,为工作人员判断设备运行状态提供了数据支撑。最后通过某常温非化学的小型物品包装车间进行了应用验证。

## 1 包装车间数字孪生系统总体架构

为了实现对包装车间运行状态的实时监测和生产流程的有效管理,必须建立一个高效简明的监测平台。该平台将包装车间的多源异构数据进行整合监测,消除数据信息孤岛,并进行三维效果显示。生产管理人员可以依靠此系统充分把控车间生产状态和设备运行状况,即时调整生产策略。随着数字孪生技术在近几年的发展完善,且不断地与制造业进行融合,为生产车间建立三维可视化监控系统提供了新思路。

构建包装车间的数字孪生体需要构建相对应的三维模型,并对物理包装车间的状态数据进行采集,建立数据传输和交互机制,实现物理实体层到孪生虚拟层的数字实时映射。在此基础上,构建包

装车间的三维可视化监测平台,实现对物理实体高效、实时的监测。基于上述设计思路,本监测平台分为物理层、数据层、虚拟层、应用层,具体如图 1 所示。

(1)物理层:物理层由包装设备、多种传感器、数据采集卡、网络设施等组成。在物理层进行测量、采集得到相应的设备基本参数、运行数据、产线物料信息等,为搭建和驱动虚拟层提供前提条件。

(2)数据层:数据层是实现监测平台各部分互联互通的枢纽,是平台正常运行的关键。数据层用于包装车间数据的实时采集和数据预处理,这些收集到的数据一部分流入虚拟层作为孪生模型的数据源,一部分为应用层的故障警示和数据分析提供基础。

(3)虚拟层:虚拟层是物理层在虚拟空间的数字映射,主要包括包装设备的几何尺寸、各机构的约束关系、具体的颜色材质以及物理实体运动学特征、运行逻辑等。虚拟层通过基础执行层采集的数据,利用逻辑脚本实时驱动孪生模型,真实重现车间的种种生产活动,反映包装机车间的动态特征和静态特征。

(4)应用层:应用层基于实时数据驱动的虚拟孪生包装车间,用户通过应用层与孪生监测平台进行交互,进而实现包装车间三维可视化以及包装设备物理动作的仿真和实时监测。形成了面向包装车间的虚拟监测平台,满足了相应的数据分析、实时监控、故障警示、数据入库和历史数据查询等需求。

## 2 包装车间监测平台数字孪生场景的构建

### 2.1 基于 Petri 网的包装机工作车间运行逻辑建模

Petri 网(PN)最早由 Petri C A 于 1962 年在他的博士论文中提出<sup>[14]</sup>,Petri 网结合库所、变迁和有向弧等图形,通过可视化表达方式直观地构建和描述系统模型及其运行逻辑,特别是离散系统模型<sup>[15-17]</sup>,因此可以清晰地反映工业生产的各个环节,适合用来构建逻辑模型。本节基于逻辑 Petri 网理论,以某包装车间为对象,将其连续生产过程离散化,分成多个加工阶段,以面向对象的建模思想对各阶段分别建模。

逻辑 Petri 网模型依据包装车间的结构、加工逻辑和工艺等信息,基于库所、变迁等元素顺序递归组合,如图 2 所示。

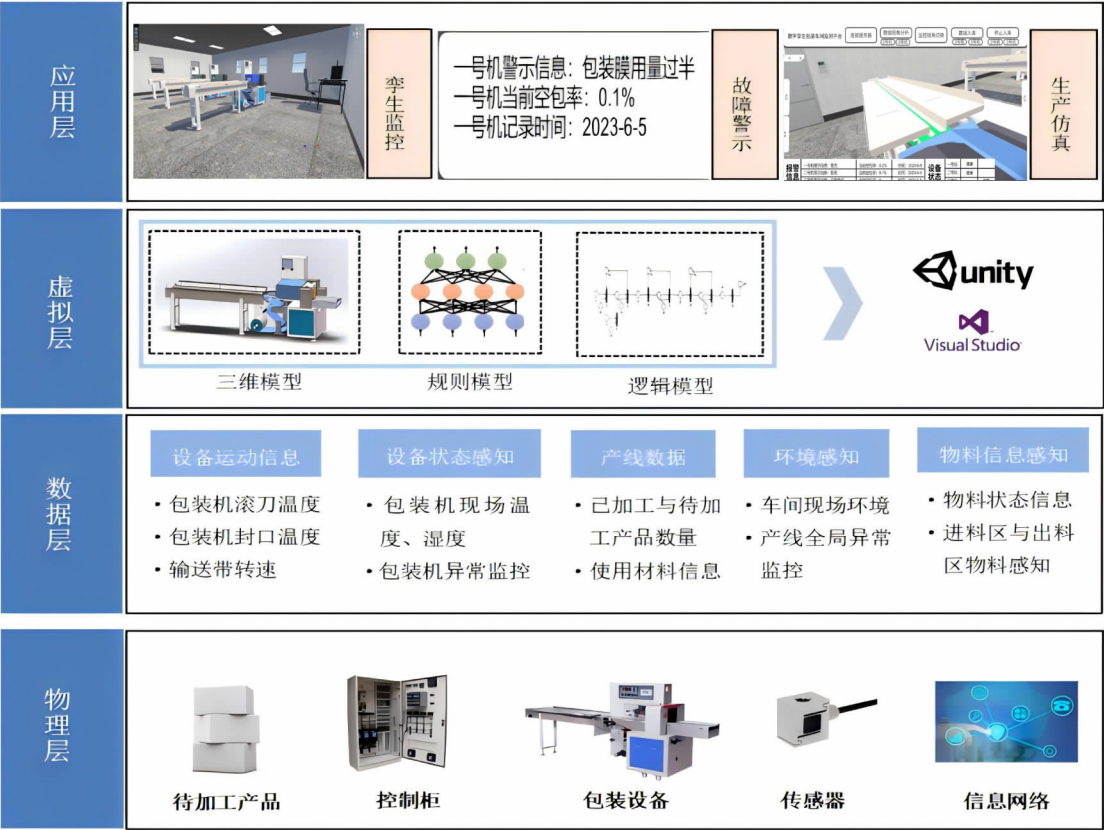


图 1 包装车间数字孪生监测平台体系架构

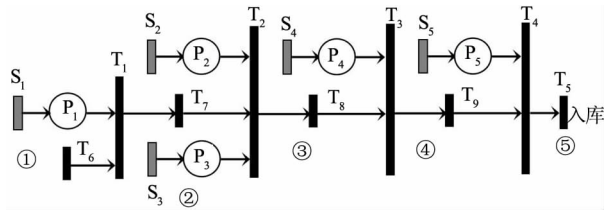


图 2 包装机物料包装流程 Petri 网模型

其中,①~⑤分别对应包装机生产的 5 个生产节点,库所 S、P 的集合表示生产线上各机械设备的状态。S1~S5 为包装机各系统的准备动作状态,S1 表示物料准备进料与分料,S5 表示切膜系统准备切膜;P1~P5 为包装机各系统的动作完成状态,P1 表示物料进料与分料完成状态,P5 表示切膜完成状态。变迁 T 的集合表示生产过程中引起待处理件相应变化的操作,T1~T5 表示待处理件进入不同包装节点时的变迁,T6~T9 表示生产节点间的缓冲传送带变迁,负责将上一节点中的加工件传送到下一生产节点。

当包装车间生产线开始运行时,物料准备进料与分料(S1),当物料与分料完成后(P1),物料感应进入包装区的过程 T1 才能进行,最后进入缓冲传

送带 T7,然后进行下一包装单元直到包装完成。依据包装车间构建的逻辑,Petri 网模型囊括了生产行为逻辑和相应的工艺流程,为物理工作车间与孪生包装车间的虚实映射提供了基础。库所和变迁的具体含义如表 1、表 2 和表 3 所示。

表 1 Petri 网模型库所 S 含义

| 库所 S | 含义          |
|------|-------------|
| S1   | 物料准备进料与分料   |
| S2   | 包装膜输送系统准备送膜 |
| S3   | 包装膜准备包裹物料   |
| S4   | 热收缩系统准备     |
| S5   | 切膜系统准备      |

表 2 Petri 网模型库所 P 含义

| 库所 P | 含义        |
|------|-----------|
| P1   | 物料进料与分料完毕 |
| P2   | 包装膜输送完毕   |
| P3   | 包装膜预包裹完毕  |
| P4   | 热收缩完毕     |
| P5   | 切膜完毕      |

表 3 Petri 网模型变迁 T 含义

| 变迁 T  | 含义          |
|-------|-------------|
| T1    | 推出进料与分料单元   |
| T2    | 推入预包装与热收缩单元 |
| T3    | 推入切膜单元      |
| T4    | 推入成品区       |
| T5    | 包装加工完成      |
| T6~T9 | 缓冲传送带变迁     |

2.2 包装车间三维场景模型

包装车间三维场景模型的搭建是包装车间监测平台的重要环节,由于工作车间物理设备数量众多、类型多样,不同模型间存在各种联系,本文为了提高模型的准确度和建模效率,降低模型管理的复杂性,对包装车间的场景模型进行梳理。以整体包装车间为父对象,在父对象的包含下将各模型以相应的单元进行分类,得到各子对象,在完成具有父子关系的场景层次分析后,使用 Solidworks 软件

从子对象开始建立模型并最终构建了具有父子层次关系的包装车间三维场景模型,具体分层如图 3 所示。由下图可知,包装车间三维模型可以形式化为:

$$3D_{pw} = \sum_{i=1}^n FD_i \cup \sum_{j=1}^o PF_j \cup \sum_{k=1}^p PP_k \cup \sum_{l=1}^q FC_l \cup \sum_{m=1}^r FU_m$$

式中: $3D_{pw}$ 表示包装车间三维场景模型, $FD_i$ 表示进料与分料单元, $n$ 表示该单元下所有模型的数量; $PF_j$ 表示包装膜输送单元, $o$ 表示该单元下所有模型数量; $PP_k$ 表示预包装与热收缩单元, $p$ 表示该单元下所有模型数量; $FC_l$ 表示切膜单元, $l$ 表示该单元下所有模型数量; $FU_m$ 表示控制单元, $m$ 表示该单元下所有模型数量。这种层级关系完美地与实际生产包装的层次关系相对应,方便了模型归类 and 后续模型。

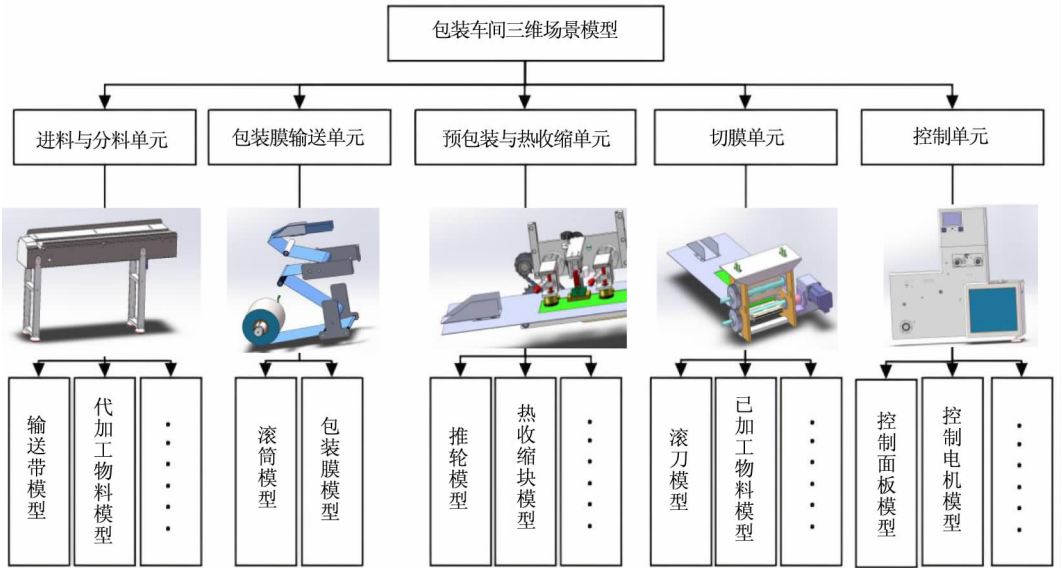


图 3 包装车间三维模型层次分析

2.3 基于物理产线与逻辑模型的包装车间数字孪生环境

孪生包装车间场景是物理包装车间的虚拟映射。通过逻辑 Petri 网模型剖析包装车间的运行逻辑,将模型中的库所、变迁与孪生模型相映照,并根据逻辑 Petri 网进行模型分组、分级,形成各设备间的位置关联和运行行为关联<sup>[18]</sup>。同时为了搭建具有较高真实感的孪生场景,选择 Unity 软件作为搭建平台。

在搭建孪生场景过程中,把 2.2 节中建立好的三维模型导入 3ds Max 中进行模型的轻量化处理,之后将处理好的模型放入 Unity 的应用场景,通过 Petri 网的运行逻辑进行相应的排列,构建各模型的父子层级关系,并为场景添加物理效果和光源,增强包装车间模型渲染效果和场景光照效果。完成初步的孪生场景搭建后,为改善数字孪生包装车间的可视化效果和流畅度,优化使用体验,通过包体积优化、Shader 优化、LOD 优化等技术,

降低每帧的渲染时间,合理分配模型面数,减少复杂计算,实现孪生系统的性能优化。最后依托 Unity 软件平台构建 UI 界面,实现包装车间监测

平台与用户的交互。具体的交互协同开发流程如图 4 所示。

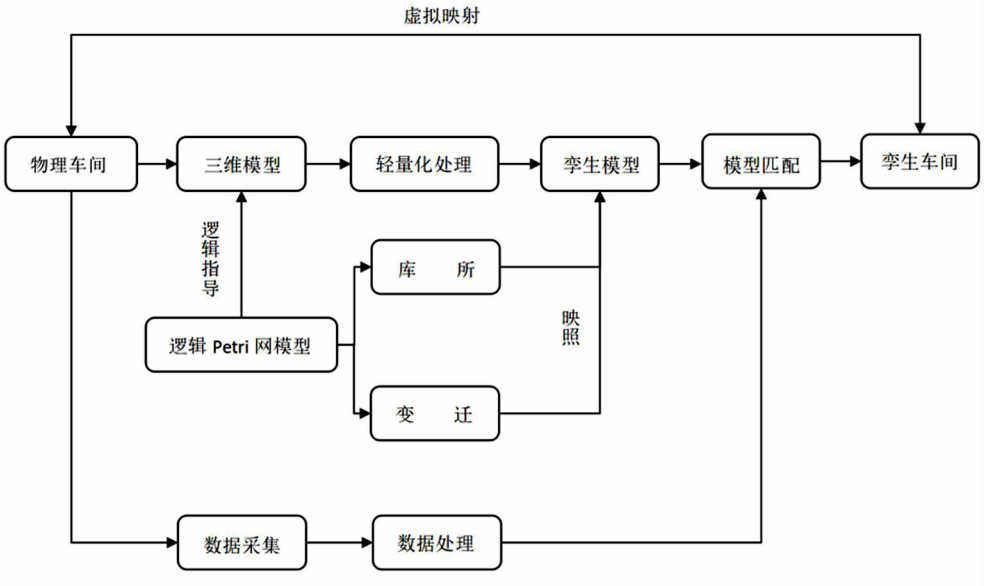


图 4 基于逻辑模型与物理车间的交互协同流程

3 实时数据驱动的可视化数字孪生平台

3.1 多源数据的实时采集与传输

针对车间数控设备常用的数据采集方法包括 PLC 点信号法、宏程序法、DNC 法、网络以及 OPC 规范等方法<sup>[19-21]</sup>。上述采集方法均能对相应的加工设备进行有效采集,但存在的一些缺陷使得这些方法并不适配本文的包装车间监测平台。因此在数据采集阶段,本文选择基于 SMACQ 开发包对 Smacq 数据采集卡进行二次开发得到数据采集与传输服务端。在数据传输阶段,考虑到数据传输的可靠性与稳定性,将采集到的多源数据通过 Socket 协议进行传输,实时驱动数字孪生模型,并将处理完毕的数据存储在 MySQL 数据库中。具体实时数据的采集与传输流程如图 5 所示。

3.2 虚实车间的数据映射

依据物理包装车间内的固有数据完成孪生模型的初步构建后,还需将包装过程中不断变化的动态数据,如传送带的传送速度、包装机封口的温度、封口刀具的滚动速度等实时地传输到虚拟监测平台。因此通过 C# 脚本运行 3.1 节中开发的数据采集与交互服务端来获取实时数据并传输到 Uni-

ty3D 中。然后基于逻辑模型和三维模型,在多个维度上完成包装车间生产活动的虚实映射,如图 6 所示。

1) 车间固有数据映射

通过数据层获取物理车间的固有数据,如车间结构布局数据、设备配置数据、包装设备的层次数据,对虚拟车间的结构和设备进行布局,实现虚实车间固有数据的映射。

2) 设备动态数据映射

以数据层传输的滚刀切膜转速、各传送带输送速度、包装封口温度等数据为孪生模型的数据驱动源,对孪生模型进行实时更新,实现虚实车间设备动态数据的映射。

3) 物料动态数据映射

物料在包装车间的不同加工阶段具有不同的动态数据,依据加工阶段和数据层采集的物料位置信息确定物料在虚拟车间所处的位置,并匹配相应的物料模型置于虚拟空间,实现虚实车间物料动态数据的映射。

3.3 监测平台的设计开发

进行实验验证的包装车间在常温环境下进行工作,包装对象主要为非化学小型物品,如小型铁盒、小型塑料物体、小型木制工艺品等。该包装车

间的包装设备主要由进料与分料单元、包装膜输送单元、预包装与热收缩单元、切膜单元和控制单元构成。进料与分料单元对物料进行分离、输送等一系列处理,输送包装膜单元完成包装膜在不同位置的流转和输送,预包装与热收缩单元实现物料的初

步封闭和物料的热收缩封闭存储,切膜单元实现包装成品的单独分离,控制单元控制包装设备的整体运行。多单元协同将物料和包装膜制成合格独立成品,孪生平台的具体实现过程如下,如图 7 和图 8 所示。

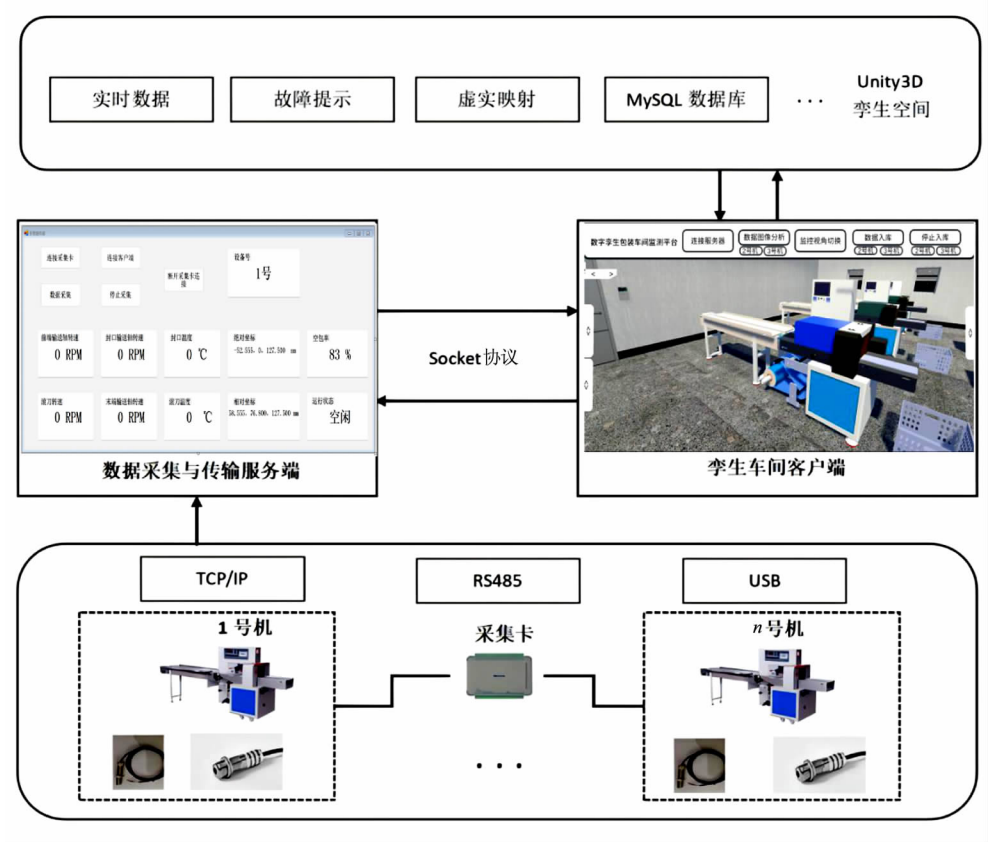


图 5 实时数据采集与传输流程

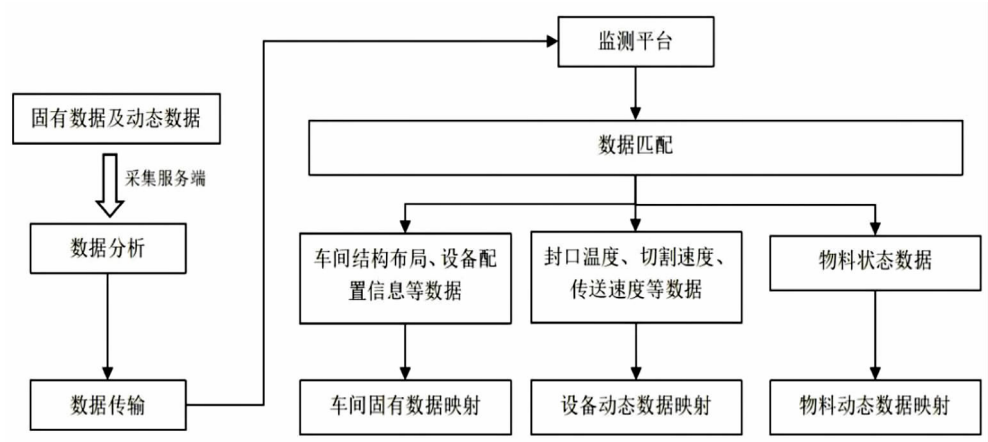


图 6 包装车间的虚实映射图

(1)首先在获得包装设备的设备尺寸、布局和工艺流程等信息,基于 Solidworks 软件建立输送带、加工设备、物料等车间元素的几何模型并进行

校准,确保模型在几何尺寸、内部结构关系等方面和物理实体的一致。其次,在 3DMax 软件内,对几何模型赋予表面颜色、材质等特征并转换为 U-

nity 兼容的 FBX 格式,导入 Unity 软件完成孪生场景的布局和优化。

(2)利用 TCP/IP 技术实现包装设备转速、物流单元坐标、包装封口的温度、刀具切割分离速度等数据的采集和传输。基于 C# 脚本语言定义虚拟层中各模型的运行逻辑、动作行为。设计 UI 界面和包装机整体监测、局部监测等多种监测模式。在此基础上,接入数据以驱动虚拟包装设备并展示包装车间状态信息。物理车间开始运行时,数据采集卡通过采集服务器将采集到的数据流传递到虚拟层,设备启动事件触发后,孪生模型在数据的驱动下开始运行。数据展示框将物料状态和设备的运行状态数据(转速、封口温度、控制参数等)以实时数据和图表的形式进行显示,并对数据进行入库存储以便随时查看。与此同时监测平台对数据进行分析,针对出现的设备运行异常情况以警告弹窗的形式显示。

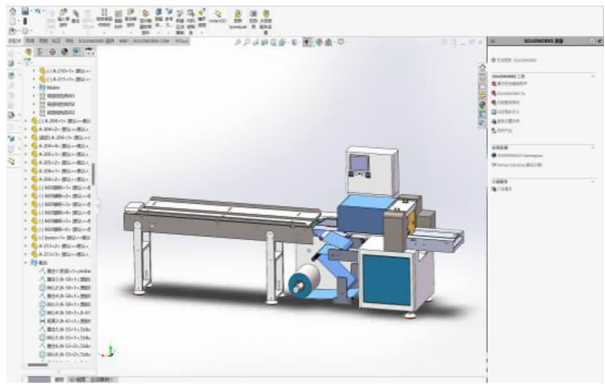


图 7 三维模型搭建图

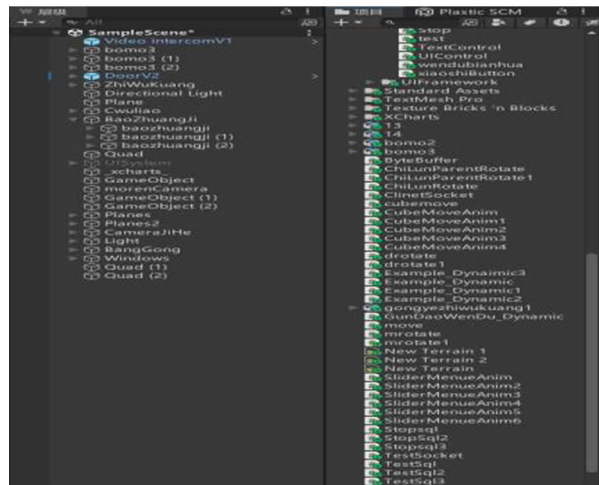


图 8 脚本挂载图

## 4 系统验证

研究对象为某常温非化学小型物品包装车间。本系统测试采用的计算机配置如下:CPU 为 AMD Ryzen7 5800H、内存为 16 GB、显卡为 NVIDIA GeForce RTX 3060。经上线测试,监控画面的帧率平均稳定在 30 FPS,CPU 占用率在 35% 以下。加工制造单元设备采集频率在 100 ms/次情况下,其孪生模型响应时间普遍在 750 ms 以下。物理车间到虚拟车间映射的整体延迟在 1 s 之内,监控画面可以流畅显示。其主要应用在以下几个方面。

### 1) 视频监控

监测平台提供了多个监控视角,能够有效地对包装车间进行监测。包括主体视角、左视角、右视角和入料视角、预包装视角和切膜视角。其中,整体监控视角对整个包装车间进行监控,实现工作车间的全流程监控;入料视角是针对物料进料流程进行监控;预包装视角是以预包装单元为监控对象;切膜视角是对切膜流程进行监控。整体监控视角如图 9 所示。

### 2) 数据可视化

将采集到的各个动态数据进行实时的可视化,以便工作人员观测数据的变化情况,为包装设备的状态进行有效评估,如图 10 和图 11 所示。

### 3) 数据存储

对实时数据进行入库存储,工作人员可随时查看历史数据,为包装设备的故障诊断提供基础,如图 12 所示。

### 4) 故障警示

当生产过程发生故障,基于传感器阈值、检测算法等约束对生产设备状态进行评估判断,如出现包装膜用量耗尽、生产空包率过高、皮带打滑等异常将发出警示,方便工作人员查找故障原因,如图 13 所示。

## 5 结 论

以某常温非化学小型物品包装车间为研究对象,运用三维建模软件建立并优化了包装车间三维模型,利用逻辑 Petri 网理论,构建了包装车间的逻辑模型,采用 Unity3D 构建虚实交互的包装车间监测平台。本监测平台将数字孪生技术与包装生产相结合,不仅还原了真实的物理场景,提高了包装车间的加工效率和生产节拍,而且能够及时地发现异常与故障,有效地避免了危险的发生。为包装车间远程监测提供了解决方案,而且对实现包装加工智能化升级具有积极作用。

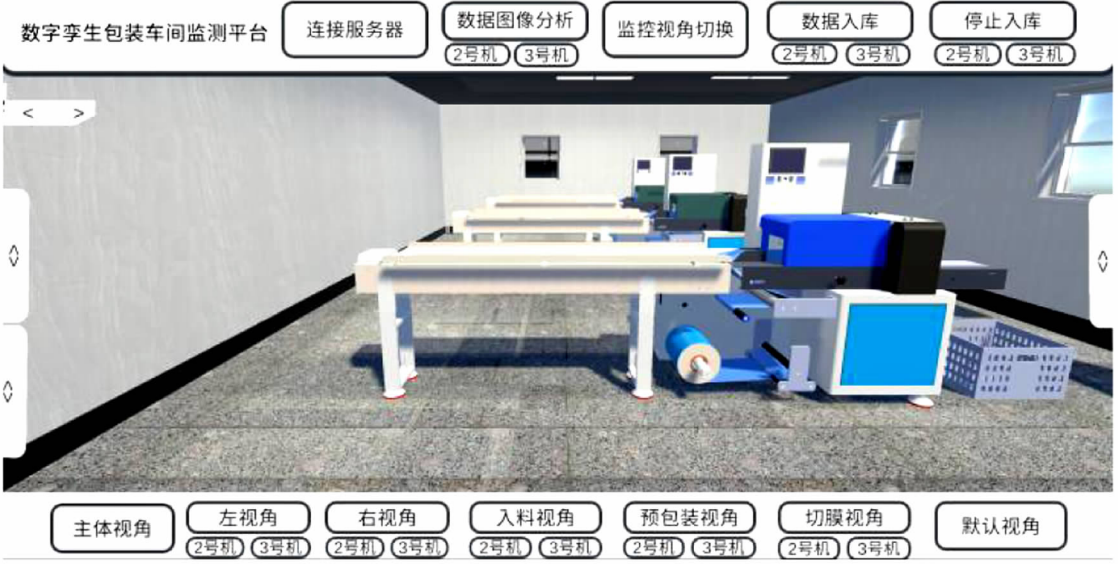


图 9 整体视角监控图

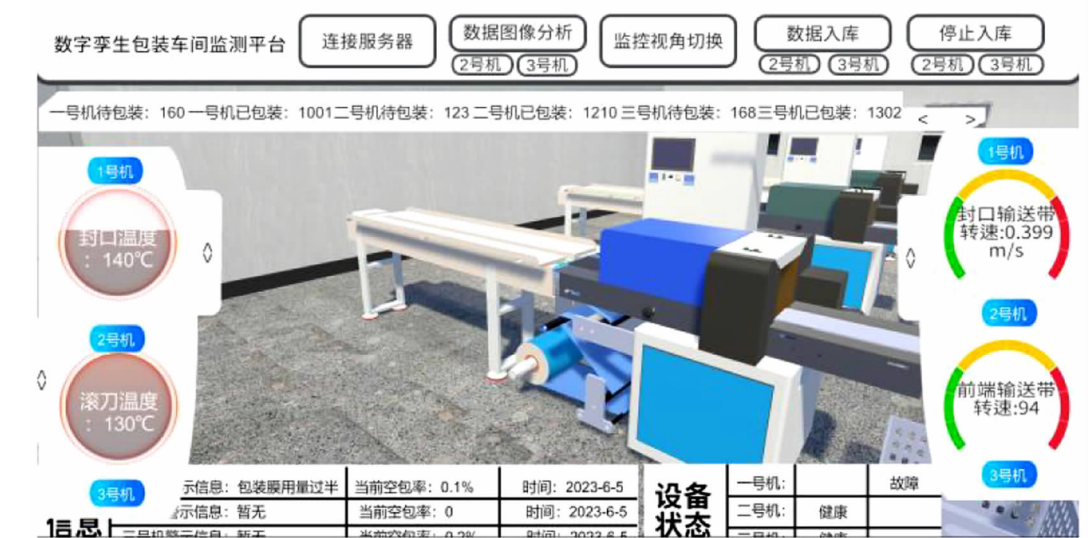


图 10 实时数据显示图



图 11 实时数据折线图

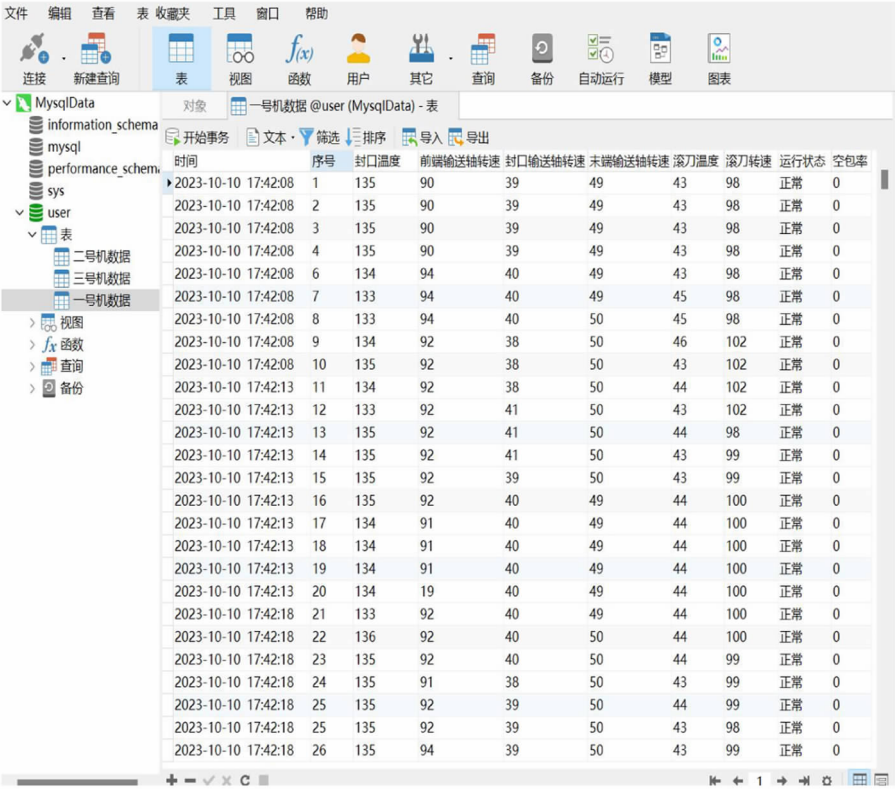


图 12 数据入库图

|                  |             |              |
|------------------|-------------|--------------|
| 一号机警示信息: 包装膜用量过半 | 当前空包率: 0.1% | 时间: 2023-6-5 |
| 二号机警示信息: 暂无      | 当前空包率: 0    | 时间: 2023-6-5 |
| 三号机警示信息: 后端输送带打滑 | 当前空包率: 0.2% | 时间: 2023-6-5 |

图 13 故障警示图

参考文献

[1] SCHLEICH B,ANWER N, MATHIEU L, et al. Shaping the digital twin for design and production engineering[J]. CIRP Annals Manufacturing Technology, 2017, 66 (1): 141—144.

[2] 刘大同,郭凯,王本宽,等. 数字孪生技术综述与展望[J]. 仪器仪表学报,2018,39(11): 1—10.

[3] 李欣,刘秀,万欣欣,等. 数字孪生应用及安全发展综述[J]. 系统仿真学报,2019,31(3): 385—392.

[4] MONOSTORI L,KADAR B,BAUERNHANSL T,et al. Cy-ber-physical systems in manufacturing [J]. CIRP Annals Manufacturing Technology,2016,65(2): 621—641.

[5] ROSEN R,VON WICHERT G,LO G, et al. About the im-portance of autonomy and digital twins for the future of man-ufacturing[J]. IFAC PapersOnLine, 2015, 48 (3): 567 — 572.

[6] 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.

[7] 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.

[8] 段明晖,张南,耿华,等. 基于数字孪生的装配车间实时监控-系统开发[J]. 制造业自动化,2021,43(12):110—112.

[9] 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/OL]. (2020—08—17)[2023—04—20].

[10] 魏一雄,郭磊,陈亮希,等. 基于实时数据驱动的数字孪生车间-研究及实现[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(2):352— 363.

[11] 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(6):1432— 1443.

[12] 刘志峰,陈伟,杨聪彬,等. 基于数字孪生的零件智能制造车间-调度云平台[J]. 计算机集成制造系统, 2019,25(6):1444— 1453.

[13] 孙元亮,马文茂,张超,等. 面向数字孪生的智能生产线监控系统-关键技术研究[J]. 航空制造技术, 2021,64(8):58—65.

[14] 唐伟强,何嘉洲,王建洲. 基于混合 Petri 网对热收缩膜包装系-统建模和控制[J]. 农业机械学报,2006,37(8):197—200.

[15] 苏国军,汪晋,田立国. 基于 Petri 网模型的柔性制造系统优化-调度[J]. 系统工程理论与实践,2014,34(10):2716—2721.

[16] HU H S,LI Z W. Modeling and scheduling for manufacturing grid workflows using timed Petri nets[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 42 (56):553—568.

[17] ULLAH H,BOHEZ E L J. A Petri net model for sequence optimization and performance analysis of flexible assembly systems[J]. Journal of Manufacturing Technology Manage-ment,2008,19(8):985—1003.

[18] 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.

[19] 刘劲松. 数控机床智能监控技术的研究与应用[D]. 沈阳:中-国科学院大学(中国科学院沈阳计算技术研究所), 2017.

[20] 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.

[21] 高罗卿,庄源昌. 基于 OPC 技术实现 WINCC 与 FANUC 数-控机床的监控系统设计[J]. 制造技术与机床, 2019(1): 169—172.