

1-20-2024

## Visual Monitoring System of Digital Twin Workshop for Process Manufacturing

Yanchao Yin

*Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China, yinyc@163.com*

Jiasheng Feng

*Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China, 3043784278@qq.com*

Bin Yi

*China Tobacco Yunnan Industrial Co. LTD, Kunming 650231, China*

Wang Li

*Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China*

*See next page for additional authors*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation. For more information, please contact [xtfzxb@126.com](mailto:xtfzxb@126.com).

---

# Visual Monitoring System of Digital Twin Workshop for Process Manufacturing

## Abstract

**Abstract:** To solve the problem of poor real-time and accuracy of process manufacturing monitoring, this paper proposes a visual monitoring system architecture of digital twin workshop based on production factor data, production process, and multi-process equipment entity object amid the rapid development of digital twin technology and increasingly close integration with the manufacturing industry. Twin modeling is conducted on multi-process coupling production line entity objects from multiple dimensions such as element, state, and operation logic. Based on key technologies of data collection and transmission of OPC UA (OLE for process control unified architecture) unified architecture and real-time drive of the virtual workshop, the three-dimensional visual monitoring of the process manufacturing equipment status and the whole process of production factors is realized. Finally, the application verification is carried out based on the silk production test line of a process manufacturing enterprise. This paper provides a method and realization way to improve the predictability, linkage, and autonomy of the whole production factors in the process manufacturing.

## Keywords

process manufacturing, digital twin, multi-process coupling production line, object-oriented timed Petri net(OOTPN), visual monitoring

## Authors

Yanchao Yin, Jiasheng Feng, Bin Yi, Wang Li, and Qingwen Yin

## Recommended Citation

Yin Yanchao, Feng Jiasheng, Yi Bin, et al. Visual Monitoring System of Digital Twin Workshop for Process Manufacturing[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(1): 120-130.

## 面向流程制造的数字孪生车间可视化监控系统研究

阴艳超<sup>1</sup>, 冯嘉胜<sup>1\*</sup>, 易斌<sup>2</sup>, 李旺<sup>1</sup>, 尹庆文<sup>1</sup>

(1. 昆明理工大学 机电工程学院, 云南 昆明 650500; 2. 云南中烟工业有限责任公司, 云南 昆明 650231)

**摘要:** 为了解决流程制造过程监控实时性差、准确性不足的问题, 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, 提出基于生产要素数据、生产工艺流程与多工序设备实体对象的数字孪生车间可视化监控系统架构。从要素、状态、运行逻辑等多个维度对多工序耦合生产线实体对象进行孪生建模, 基于OPC UA统一架构的数据采集传输, 虚拟车间的实时驱动等关键技术, 实现了流程制造设备状态、生产要素工艺全流程三维可视化监控。基于某流程制造企业制丝生产试验线开展了应用验证, 为提升流程制造过程中全生产要素的预见性、联动性、自治性提供了方法和实现途径。

**关键词:** 流程制造; 数字孪生; 多工序耦合生产线; 面向对象的赋时Petri网; 可视化监控

中图分类号: TP391.9 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X(2024)01-0120-11

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.22-1006

**引用格式:** 阴艳超, 冯嘉胜, 易斌, 等. 面向流程制造的数字孪生车间可视化监控系统研究[J]. 系统仿真学报, 2024, 36(1): 120-130.

**Reference format:** Yin Yanchao, Feng Jiasheng, Yi Bin, et al. Visual Monitoring System of Digital Twin Workshop for Process Manufacturing[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(1): 120-130.

## Visual Monitoring System of Digital Twin Workshop for Process Manufacturing

Yin Yanchao<sup>1</sup>, Feng Jiasheng<sup>1\*</sup>, Yi Bin<sup>2</sup>, Li Wang<sup>1</sup>, Yin Qingwen<sup>1</sup>

(1. Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;

2. China Tobacco Yunnan Industrial Co. LTD, Kunming 650231, China)

**Abstract:** To solve the problem of poor real-time and accuracy of process manufacturing monitoring, this paper proposes a visual monitoring system architecture of digital twin workshop based on production factor data, production process, and multi-process equipment entity object amid the rapid development of digital twin technology and increasingly close integration with the manufacturing industry. *Twin modeling is conducted on multi-process coupling production line entity objects from multiple dimensions such as element, state, and operation logic. Based on key technologies of data collection and transmission of OPC UA (OLE for process control unified architecture) unified architecture and real-time drive of the virtual workshop, the three-dimensional visual monitoring of the process manufacturing equipment status and the whole process of production factors is realized.* Finally, the application verification is carried out based on the silk production test line of a process manufacturing enterprise. This paper provides a method and realization way to improve the predictability, linkage, and autonomy of the whole production factors in the process manufacturing.

**Keywords:** process manufacturing; digital twin; multi-process coupling production line; object-oriented timed Petri net(OOTPN); visual monitoring

收稿日期: 2022-08-25 修回日期: 2022-11-07

基金项目: 国家自然科学基金(52065033); 云南省重大科技项目(202202AG050002)

第一作者: 阴艳超(1977-), 女, 教授, 博士, 研究方向为智能制造、工业大数据、知识工程。E-mail: yinyc@163.com

通讯作者: 冯嘉胜(1998-), 男, 硕士生, 研究方向为数字孪生、智能制造。E-mail: 3043784278@qq.com

## 0 引言

流程制造业包括了冶金、电力、石化、制药、烟草等在国民经济中占重要地位的行业<sup>[1]</sup>, 是国家从制造大国向制造强国迈进的重要战场。特点是其生产过程连续不间断, 需将不同设备和工艺流程连接为一个整体, 是一种全流程多单元协同生产方式, 对管理控制的可靠性, 实时性要求较高, 一旦生产线发生异常未及时处理, 会造成整批产品失效, 给企业带来巨大经济损失。因此对车间内生产过程进行高效监控十分必要。

流程制造过程中涉及复杂的物理化学反应, 物质流、能量流、信息流相互耦合, 相互关联, 而且车间存在声音、图像、数字等多种信息传输形式, 大大加深了监控<sup>[2]</sup>的难度。传统的监控模式数据流动较慢、可视化程度不高, 车间设备运行情况和生产产品状态特征信息无法及时传递给工作人员, 严重影响车间的生产管理。

近年来, 国内外许多学者针对建立一套高度可视化的虚拟监控系统开展了深入的研究, 取得了许多有意义的成果。在流程制造多业务监控方面, Ouelhadj D等<sup>[3]</sup>研究了一种基于MAS的柔性制造系统(flexible manufacturing system, FMS)智能分布式监控体系, 独创性的将监控功能完全分布在Agent上, 并通过合约网络协议让这些Agent合作进行实时监控, 提高了监控系统的灵活性、故障快速反应能力。侯迪波<sup>[4]</sup>将GIS(geographic information system)技术利用与流程工业综合自动化, 提高了系统地空间信息处理能力, 拓展了视频监控、火灾监控等功能。在可视化监控方面, 周泽伟等<sup>[5]</sup>使用三维仿真可视化技术建立了面向等离子体裂解煤工艺过程的全流程监控系统。庄存波等<sup>[6]</sup>通过引入电子流看板和工作流管理技术, 建立了一个面向复杂装备车间的监控系统, 可以实现对复杂产品装配车间现场的实时、动态、可视化监控和精细化管理。徐泉等<sup>[7]</sup>针对选矿工业特点, 结合可视化和可视化分析技术, 以组态方式

设计了监控平台, 在其他流程行业也有很高的通用性。

数字孪生技术的迅速发展<sup>[8]</sup>, 为实现流程制造车间的三维可视化监控提供了全新的思路。数字孪生技术<sup>[9]</sup>是一种集成多学科、多维度、多物理量的新型技术, 实现了信息世界和物理世界的融合与交互, 为构建车间的可视化监控奠定了技术基础。在基于数字孪生的车间监控方面, 文献[10-12]阐述了数字孪生车间的运行机制、系统组成、关键技术, 设计了数字孪生车间的参考系统架构。赵浩然等<sup>[13]</sup>分析了三维可视化监控和孪生车间之间的关系, 提出了一种由实时数据驱动的虚拟车间运行模式和多层次的监控模式。Qamsane Y等<sup>[14]</sup>提出了一种数字孪生架构, 用来实时监控和评估大型制造车间, 并在CNC加工车间得到应用。柳林燕等<sup>[15]</sup>对数字孪生车间系统的数据实时映射、物理实体的数据获取、车间生产过程关键要素建模这几项关键技术做出了阐述。

上述研究围绕车间监控系统、数字孪生车间体系架构<sup>[16]</sup>做出了许多有价值的成果, 但面向流程制造车间的建模未考虑到不同单元间的耦合, 无法解决流程工业的协同优化问题。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”, 影响虚拟车间的实时交互和故障诊断等。因此, 本文在已有研究基础上结合流程制造车间的实际特点, 提出了一种基于数字孪生的流程制造车间监控系统。构建了包括几何模型、逻辑模型等的车间数字孪生体, 设计了以OPC UA技术为基础的数据采集传输方案, 将物理单元间的耦合转换为各数字孪生体中参数的耦合, 建立物理实体和孪生体的精准映射关系, 实现流程制造车间的可视化监控, 最后通过某流程制造车间进行了应用验证。

## 1 流程制造过程可视化监控系统架构

为了实现对流程制造车间运行状态的实时监

控和生产流程的有效管理，必须要建立一套高效透明的监控系统。该系统将流程制造车间的多源异构数据进行整合监控，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，为车间建立三维可视化监控系统提供了新思路。

构建流程制造车间的数字孪生体需要建立和

物理实体完全对应的几何模型，采集车间的生产运行数据，建立数据交互机制，实现物理实体到孪生模型的实时映射。在此基础上，构建车间三维可视化监控系统，实现对物理实体高效、实时的监控。本文参考数字孪生五维模型结构<sup>[17]</sup>，以流程制造生产车间为对象，通过分层设计思路建立了三维可视化监控系统。分为物理实体层、数据层、虚拟层、应用层，具体如图 1 所示。

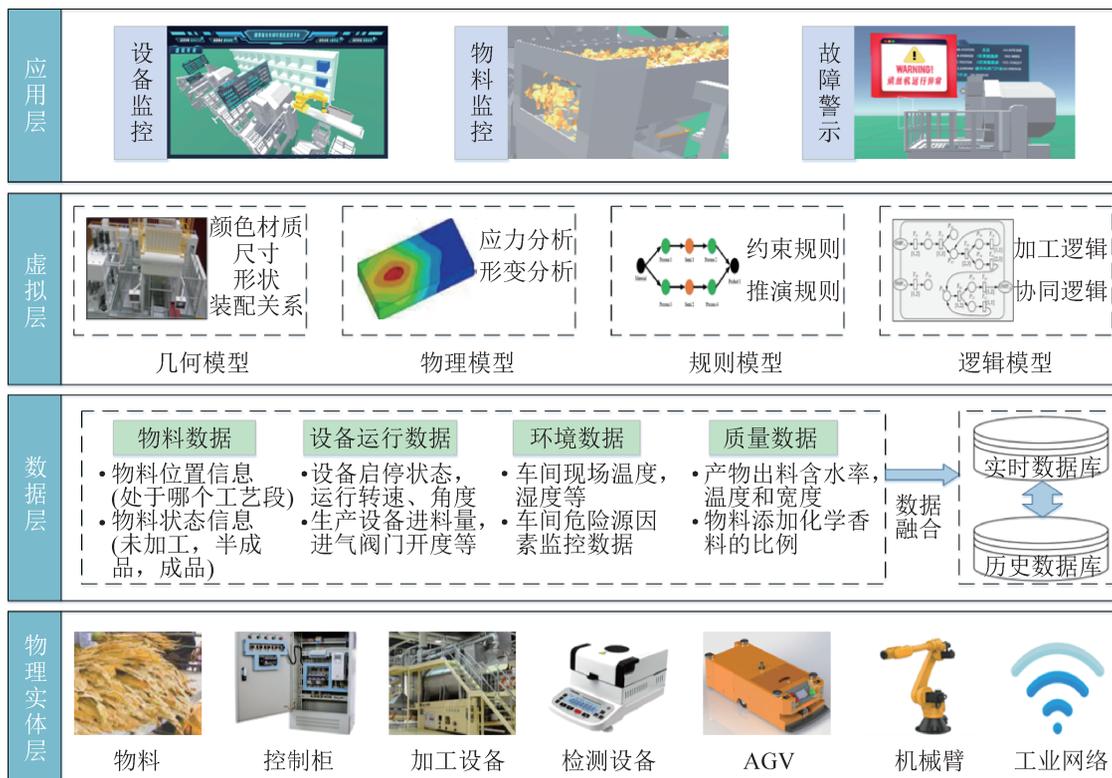


图 1 数字孪生车间监控系统体系架构  
Fig. 1 Architecture of digital twin workshop monitoring system

(1) 物理实体层

物理实体层是载体，监控系统的其余部分皆是建立在物理实体层的基础上的，它主要包括加工设备、计量设备、AGV 等物流设备，传感器等数据采集设备、车间网络设施、生产环境和操作人员等。在物理层测量、采集得到设备基本参数、运行数据、生产线物料信息、环境状态等，是构建和驱动虚拟层的必要条件。

(2) 数据层

数据层是实现监控系统各部分的互联互通的枢纽，是确保监控系统稳定运行的关键。数据采集系统把从物理实体层采集的数据上传存储于服务器，随之一部分数据流入虚拟层，作为驱动孪生模型的数据源，另一部分数据进行清洗处理和存储，为工业大数据的统计分析提供支持，实现应用层的故障警示和状态监控。

### (3) 虚拟层

虚拟层是物理实体层在虚拟空间的数字化重建,主要包括加工设备的几何尺寸、装配约束关系、颜色材质,还有物理实体运动学特征、运行逻辑和约束规则等。虚拟层通过物理实体层采集的数据,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,反映流程制造车间的动态特征和静态特征。同时基于数据层发出的分析与决策数据,使用与物理实体层的双向交互通道,控制物理车间的状态和行为。

### (4) 应用层

用户通过应用层与监控系统进行交互,实现生产车间设备状态、产品状态全要素全流程三维可视化监控,打通了整个监控系统的信息流与数据流,从而在生产方面达到了横向、纵向和端到端的集成。用户可以在交互界面发出指令,针对性的在虚拟层孪生模型上显示工艺参数信息,生产车间设备状态信息等。同时依靠数据层存储的海量数据,还可以实现历史情景重现、系统故障预警等功能。

## 2 流程制造可视化监控的孪生场景搭建

### 2.1 基于Petri网的车间生产业务运行逻辑建模

流程制造车间设备多、生产连续、变量间严重耦合,为实现孪生场景的精确搭建,需要对车间生产系统进行精准建模。Petri网模型利用托肯的流动描述系统的动态行为,可以清晰的反映工业生产的各个环节,适合用来构建逻辑模型。其中面向对象的赋时Petri网(object-oriented timed Petri net, OOTPN)在普通Petri网的基础上赋予时间信息,可以直观的展示事件和时间的关系,还能根据时间约束简化模型,使得网模型的规模大大降低。并使用面向对象的思想建模,提高了模型的重用性。本节基于面向对象的赋时Petri网理论,以某流程制造车间为对象,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,其中一个环节的具体建模如下。

物料干燥是制丝生产线的一个关键阶段,包含气流干燥和滚筒干燥两种加工方式。本文用库所P表示系统中加工设备和物料的状态,变迁T表示生产过程中引起物料状态变化的工序,信息位M表示系统中传输的信息。首先根据物料干燥的工艺流程,分析所需设备的种种状态和各工序功能,列举此单元需要重点研究的活动和资源,确定模型的输入和输出位。根据加工工艺优先约束关系将列举的活动排序,定义模型中的变迁集T、库所集P和信息位M,使用时间间隔表示此变迁发生所需要的时间。最后按顺序将建立各元素用有向弧连接,建立物料干燥单元的OOTPN模型,如图2所示。

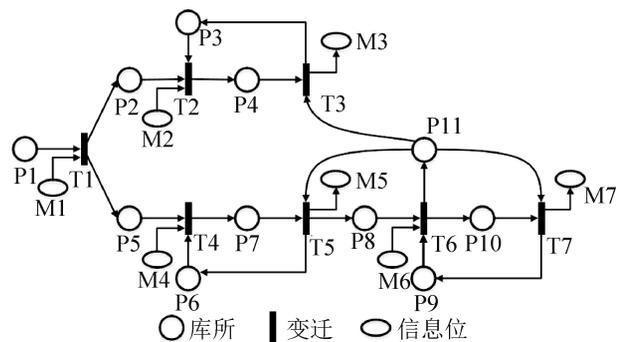


图2 叶丝干燥单元OOTPN模型  
Fig. 2 OOTPN model of leaf drying unit

当物料到达干燥单元时,依据产品加工要求选择干燥设备(T1),一部分接收到系统发送的气流干燥指令(M2)后,执行气流干燥(T2),一部分经增温增湿后接收到滚筒干燥指令(M6),执行滚筒干燥(T6),最后向系统反馈输送完成信息(M7),由物流设备(P11)实现不同环节间物料的转运。模型中元素具体的含义见表1和表2。上述搭建的OOTPN模型清晰的呈现了该单元的生产流程和生产逻辑,模型中的库所、变迁还可以与虚拟场景中的实体相映射<sup>[18]</sup>,使孪生场景的搭建更加精确、匹配。

表1 库所和信息位的物理意义

Table 1 Physical meaning of repository and information bit

库所P	含义	信息位	含义
P1	物料待筛选状态	M1	烟丝分类指令
P2	叶丝准备气流干燥	M2	气流干燥指令
P3	气流干燥设备空闲	M3	输送完成信息
P4	叶丝气流干燥完成	M4	增温增湿指令
P5	叶丝准备增温增湿	M5	输送完成信息
P6	增温增湿设备空闲	M6	滚筒干燥指令
P7	叶丝增温增湿完成	M7	输送完成信息
P8	叶丝准备滚筒干燥		
P9	滚筒干燥设备空闲		
P10	叶丝滚筒干燥完成		
P11	物流设备空闲		

表2 OOTPN模型中变迁代表物理意义

Table 2 Physical meaning of transition in OOTPN model

变迁T	含义	时间间隔
T1	选择干燥设备	[18,36]
T2	叶丝气流干燥	[0.1,1]
T3	送往下一环节	[18,60]
T4	叶丝增温增湿	[1.5,2]
T5	送往滚筒干燥	[18,30]
T6	叶丝滚筒干燥	[36,48]
T7	送往下一环节	[18,60]

在系统内可以通过信息位令牌驱动监控系统的运行，也为后续物理车间到虚拟车间的映射奠定了基础。例如当变迁叶丝滚筒干燥(T6)触发时，滚筒干燥设备做出滚筒门开、滚筒旋转、蒸汽阀门打开等生产行为，实现车间生产行为的实时映射。同时通过实时数据调节滚筒的旋转速度，开关门角度，实现设备动作的实时映射。经过干燥后物料的形态发生了变化，需要选择合适的物料模型进行替换，实现物料状态的实时更新。

## 2.2 孪生车间几何模型搭建

几何模型是监控系统虚拟场景中重要组成部分，流程制造车间物理设备数量众多、类型多样，且不同模型之间关系复杂。本文为了提高建模准确度和效率，且方便后续对模型的管理，采用场景树模式组织孪生模型。如图3所示，以整

个孪生场景作为根层次，依照根层次下各节点的关联关系进行分解得到枝层次。重复上述操作最终建立具有父子嵌套结构关系的制丝车间场景模型。

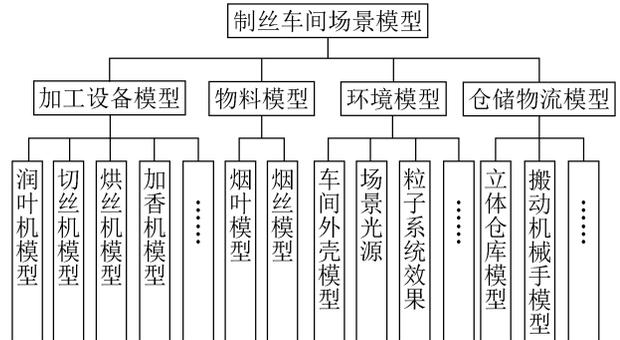


图3 制丝车间层次分析

Fig. 3 Hierarchical analysis of silk workshop

由图3可知，制丝车间孪生模型可以形式化描述为

$$DT_{ws} = \sum_{i=1}^n PEM_i \cup \sum_{j=1}^m MM_j \cup \sum_{k=1}^o EM_k \cup \sum_{l=1}^p WLM_l$$

式中： $DT_{ws}$ 为制丝车间场景模型； $PEM_i$ 为加工设备模型； $n$ 为所有加工设备的数量； $MM_j$ 为物料模型； $m$ 为所有物料模型数量； $EM_k$ 为环境模型； $o$ 为所有环境模型数量； $WLM_l$ 为仓储物流模型； $p$ 为所有仓储物流设备数量。

这种层级关系完美地与实际生产车间的层次关系相对应，方便了模型归类 and 后续模型驱动。在完成基于场景树的孪生场景层次分析后，使用Creo软件从叶节点开始建立模型，达到车间实景状态在几何维度上的精确还原。

## 2.3 融合物理产线与业务运行逻辑模型的孪生场景搭建

孪生车间场景作为物理车间的数字化映射，要有相当程度的沉浸感和真实感。2.1节建立的OOTPN模型中的库所和变迁与孪生场景中几何模型相对应，可以直观展示出各设备之间的关联关系和位置布局。在搭建孪生场景期间，还可以通

过OOTPN模型快速了解车间运行逻辑, 及时调节搭建的流程, 使其更加快速准确。同时选择Unity软件作为孪生场景搭建的平台有如下技术优势:

(1) Unity与其他虚拟软件相比拥有更强的兼容性, 可以发布在多种主流平台, 如Windows、Linux、MacOS、iOS等, 提高了系统的应用范围。

(2) Unity拥有丰富的脚本语言, 配合上内置的PhysX物理引擎, 可以高效、生动、逼真的映射物理车间的运行状态, 用户也可通过脚本语言, 对虚拟层进行控制, 实现和外部系统的交互。

(3) 在Unity平台编写的脚本以组件的形式挂载到模型上, 相当于给模型添加了一些属性。对于一个模型的多种行为, 可以依据行为的类型将它们分配到多个脚本中分管控, 提高了管理的便捷性和开发的自由性。

将几何模型导入Unity的场景中, 以逻辑模型为指导在场景中排列, 建立模型内各部件的父子层级关系, 在Unity中当父物体运动时, 其子级部分也会随之运动, 但当子级部分运动时, 父物体不受影响。逻辑模型中的变迁表示生产行为的发生, 将变迁与变迁发生所涉及的几何模型进行绑定。当逻辑模型运行时, 通过API接口驱动几何模型的运行, 实现业务逻辑模型和几何模型的融和。接下来为模型添加刚体、碰撞体, 赋予弹力、摩擦力等物理效果, 使模型更加真实。最后为场景添加光源, 增强车间模型渲染效果和场景光照效果。

监控系统在运行过程中, 对三维模型的渲染占用了一大部分的系统资源, 造成虚拟车间场景加载延迟过高, 有悖于监控系统的实时性原则。为了保证虚拟场景运行的流畅度, 提高用户体验。通过遮挡剔除、LOD等技术, 减少被渲染对象的数量, 降低每帧渲染时间, 实现对场景的优化。最后建立监控系统与用户的交互响应机制, 依托Unity平台开发UI界面, 完成孪生车间场景的

搭建。

## 3 实时数据驱动的可视化监控系统

### 3.1 数据的采集传输

流程制造车间生产设备种类多样, 不同设备的数据接口协议也不尽相同, 同时为确保对车间人、物、环境等生产要素数据的可靠获取, 还需额外布置温湿度传感器等感知设备。当数据应用模块连接不同的数据源时, 需要单独开发驱动程序, 使得监控系统开发成本上升且复杂度极高。建立一个统一的标准化通讯框架和协议显得尤为重要。OPC UA(OLE for process control unified architecture)是由OPC基金会主导, 多家厂商参与设计、开发、产品化的OPC标准, 是一套集合信息模型定义、通讯和服务标准为一体的标准化技术框架。OPC UA独立于各个制造商的编程语言、原始应用, 且不受操作系统约束, 可以实现各类信息在制造层级各个系统间的传递, 具有高可靠性、平台独立性、可扩展性等特点。基于上述优点, 本文建立了以OPC UA为基础的车间数据采集传输方案, 如图4所示。

OPC UA的服务器嵌入流程制造车间生产控制系统中, PLC和工业机械臂采用OPC UA协议直接采集, RFID设备常使用基于TCP/IP协议的中间件技术, 车间中的环境传感器可以使用Modbus协议采集数据, 采集工具配置如表3所示。车间数据采集完成后汇总到OPC UA服务器, 在服务器内整合多源异构数据, 统一格式存储于OPC UA服务器提供的地址空间中。

服务器提供数据通信接口, 通过客户端直接请求或订阅请求模式建立客户端和服务器的连接, 从而实现数据的读写。客户端将获取的数据传到虚拟层, 对设备模型进行驱动。同时对原始数据进行预处理, 剔除冗余和重复数据, 存储于MySQL数据库, 实现与故障诊断系统和MES系统的数据共享。

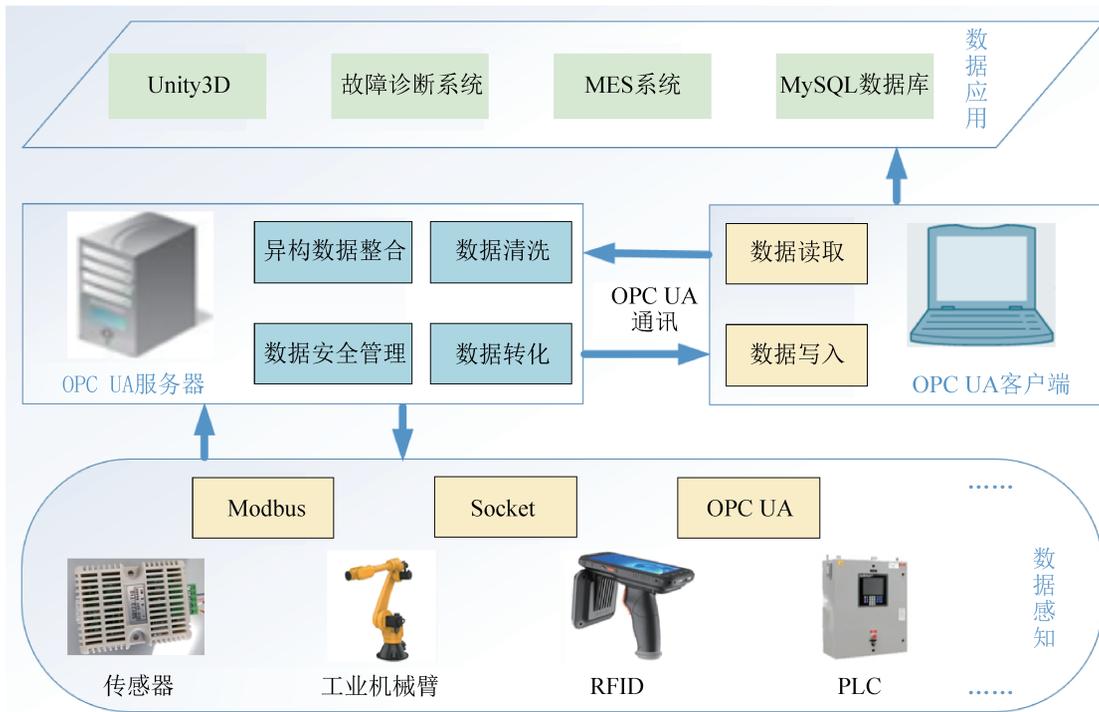


图4 数据采集传输架构图

Fig. 4 Data acquisition transmission architecture diagram

表3 温度传感器数据采集工具配置

序号	关键参数	取值
1	名称	Temperature sensor
2	地址	40001
3	扫描速率(次/s)	10
4	驱动程序	Modbus
5	连接媒体	COM 端口
6	COM ID	3
7	波特率	9 600
8	数据位	8
9	奇偶性	偶
10	停止位	1
11	流量控制	无

### 3.2 孪生数据映射

物理车间采集到的数据可分为静态数据和动态数据，静态数据是用来描述车间要素的固有属性，如产线布局信息、设备配置信息。动态数据是指在制造过程中不断变化的参数，如设备的转速、倾角，物料的温度和形态等。实现虚拟环境和物理环境的实时映射，关键是将动态数据及时传

送到虚拟场景平台。Unity3D 内有 Socket 封装好的接口，便于数据通道的建立，因此通过 C# 脚本运行基于 TCP/IP 协议的 Socket 通信，将 OPC UA 获取的实时数据传输到 Unity3D 中。然后基于几何模型，在多个维度上完成车间生产活动的虚实映射。车间虚实映射流程如图 5 所示。

#### (1) 生产行为实时映射

上文建立的 OOTPN 模型直观的展现了整个生产系统的作业逻辑，是实现行为映射的关键。当物理车间运行时，数据层采集的生产指令、设备启停等信息传输到 OOTPN 模型，通过信息位触发模型的变迁，驱动 OOTPN 模型的运行，实现物理车间到 OOTPN 模型的动态映射。同时逻辑模型利用应用程序接口驱动虚拟车间的几何模型，实现生产行为的实时映射。以数据为驱动源，以逻辑模型为媒介，实现物理空间到虚拟空间的行为映射。

#### (2) 设备动作实时映射

虚拟层中设备模型的运动基本可以看作多个平移和旋转动作的组合，模型在空间中的位置由坐标向量确定。以数据层传输的机械臂各轴角度、

AGV 小车坐标等数据作为模型的驱动源, 对模型的坐标向量实时更迭, 实现设备动作的实时映射。

### (3) 物料状态实时映射

物料在生产加工的不同阶段具有不同的形态, 为达到对物理生产线物料状态的实时映射, 根据工艺流程和采集的物料位置信息确定其所处的工艺阶段, 在模型库中选出相匹配的物料模型置于虚拟空间。同时依据采集到的压力、温度等数据对物料模型进行修正, 做到物料状态的实时更新。

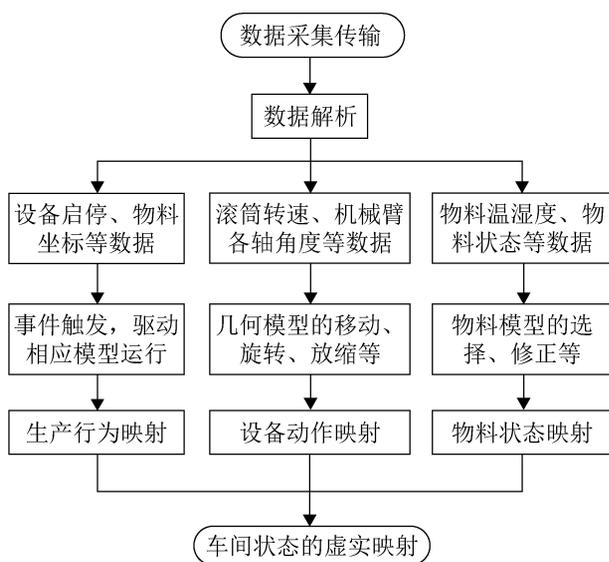


图 5 车间虚实映射流程图

Fig. 5 Flow chart of workshop virtual reality mapping

在虚拟同步映射的基础上, 在监控界面设置各种数据展示框、警告弹窗, 将制造车间的质量参数、故障诊断信息等予以展示, 为管理人员提供更加透明、多层次的视角。

### 3.3 监控系统的迭代优化

在数字孪生车间中, 物理层、虚拟层和应用层在孪生数据的支持下实时交互, 迭代优化。具体流程如下: 以孪生数据为核心, 从物理层采集到的生产任务信息、设备运行信息等数据传输到虚拟层, 虚拟车间在实时数据的基础上, 结合历史数据触发仿真优化过程, 仿真的结果也传输到数据层, 融合后得孪生数据用来驱动应用层的各

种服务, 如从故障预警、产品质量数据预测等。同时在融合后的孪生数据驱动下, 得到优化后的资源配置方案, 将其反馈到物理层执行, 实现虚实持续迭代优化, 提高监控系统的智能性、准确性。迭代优化原理如图 6 所示。

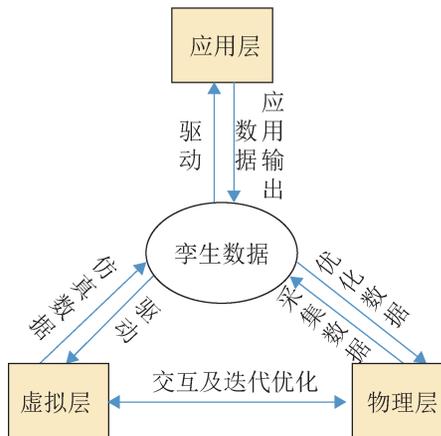


图 6 系统迭代优化原理图

Fig. 6 Schematic diagram of system iterative optimization

## 4 系统应用验证

某烟草制丝车间是典型的流程制造车间, 生产连续, 数据信息量大且机理复杂。由于车间的智能化水平不高, 存在生产车间中信息的传递无法跟上生产节拍的状况, 不仅影响了烟丝的生产效率, 而且给生产安全带来了隐患。针对上述问题, 以烟草制丝生产线为对象, 依据本文所述方法设计三维可视化监控系统, 将生产车间运行状态高度可视化地呈现给工作人员。

生产车间布局如图 7 所示, 该生产车间主要由加工制造单元、智能物流单元、仓储单元和控制单元构成。加工制造单元对物料进行松散回潮、加料、切丝、增温增湿等一系列处理, 智能物流单元完成物料在不同工位的流转, 仓储单元实现原料、半成品、成品的存储, 控制单元控制车间整体的运行。多单元协同将烟叶和烟梗制成合格烟丝, 监控系统的具体实现过程如下。

(1) 孪生场景搭建: 首先在获得制丝车间的设备尺寸、布局和工艺流程等信息, 使用 OOTPN 搭

建制丝车间的逻辑模型，基于Creo软件建立机械臂、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Unity兼容的FBX格式，导入Unity软件完成孪生场景的布局和优化。

(2) 虚实映射：利用 OPC UA 技术实现制丝车

间设备转速、物流单元坐标、烟丝的温度、物料累积量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界面和车间整体监控、局部监控等多种监控模式。在此基础上，接入数据驱动虚拟车间并展示制丝车间状态信息。如图8所示，以机械臂为例，展现孪生系统搭建的关键步骤。

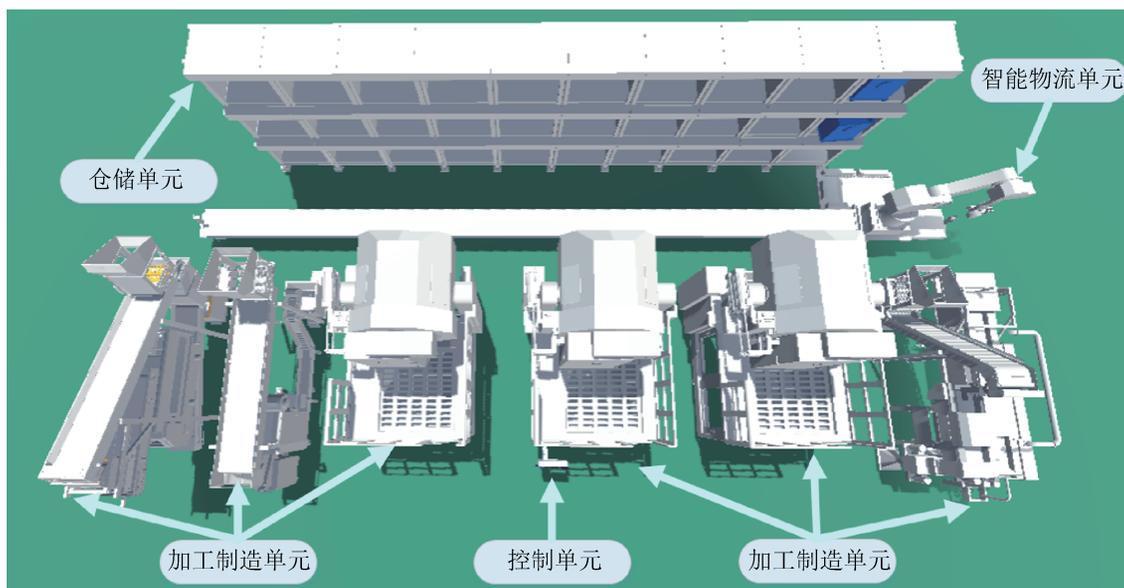


图 7 制丝车间布局  
Fig. 7 Silk workshop layout

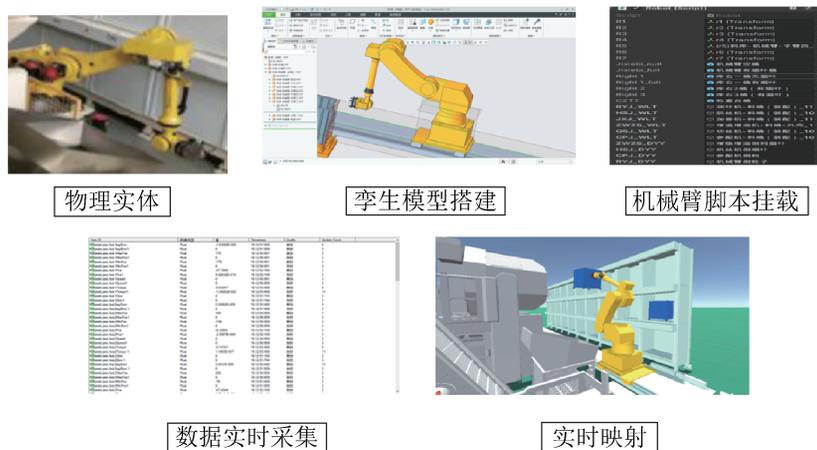


图 8 孪生系统的搭建  
Fig. 8 Construction of twin system

物理车间开始运行时，数据采集模块将数据流传递到虚拟层，系统依据物料所处的加工阶段

和加工状态，从模型库中选择相应的物料模型，物流系统将其运送到指定的加工设备。设备启动

事件触发后, 在数据的驱动下开始运行。数据展示框将物料质量参数和设备的运行状态数据(位置、角度、转速、控制参数等)加以显示, 此环节完成后, 根据工艺要求将加工后的物料运往仓储单元静置或下一个加工设备, 直至完成所有工序。与此同时故障诊断模块对数据进行分析, 针对出现的设备运行异常情况以警告弹窗的形式显示, 由车间工作人员立即采取相应措施。

系统测试采用的计算机配置为: Intel i7-12700H CPU @2.7GHz、16GB 内存、NVIDIA GeForce RTX 3050Ti。经上线测试, 监控画面的

帧率平均稳定在38FPS, CPU占用率在40%以下。机械臂数据采集频率在100 ms/次情况下, 机械臂孪生模型响应时间在400 ms以下, 加工制造单元设备采集频率在500 ms/次情况下, 其孪生模型响应时间普遍在800 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, 监控画面如图9所示。

该烟草制丝车间的可视化监控系统, 实现了物理车间的全要素、全流程的可视化监控功能。有效地解决了车间信息传递不及时的问题, 适应了企业信息化、智能化的发展潮流。

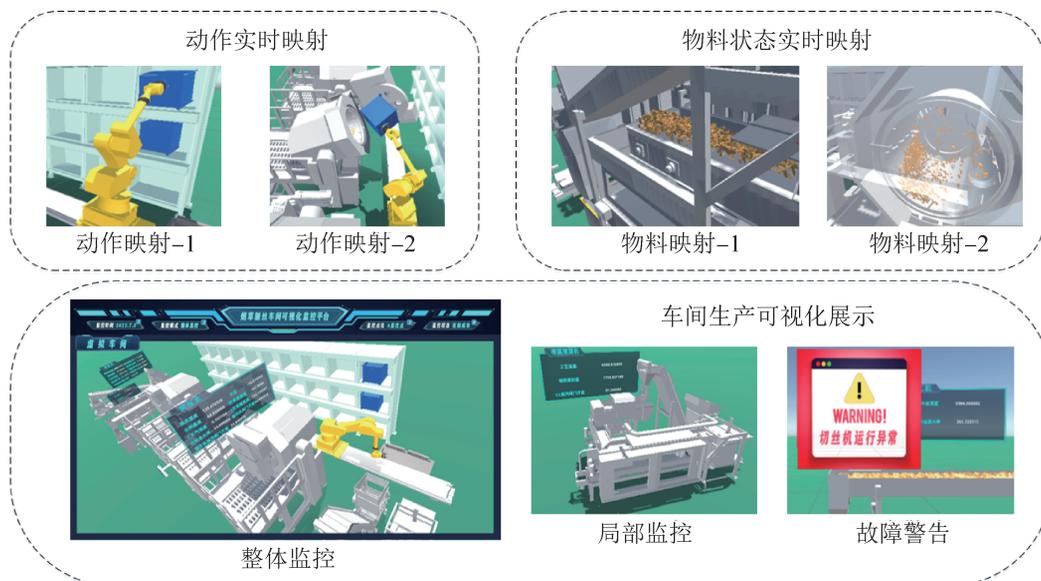


图9 可视化监控界面

Fig. 9 Visual monitoring interface

## 5 结论

本文针对流程制造车间生产过程复杂、数据信息多源异构等特点, 导致车间实时状态监控困难的问题。基于数字孪生技术, 设计了一套面向流程制造车间的可视化监控系统架构, 对孪生场景的搭建、数据的采集传输、工艺流程的建模、虚实同步映射的机制等做了研究阐述。最后通过某流程制造车间验证了系统的可行性。后续对于进一步提高数字孪生体的精度, 基于系统获取的大量数据实现车间生产智能决策等方面展开

研究。

## 参考文献:

- [1] Kadlec P, Gabrys B, Sibylle Strandt. Data-driven Soft Sensors in the Process Industry[J]. Computers & Chemical Engineering, 2009, 33(4): 795-814.
- [2] 肖通, 江海凡, 丁国富, 等. 五轴磨床数字孪生建模与监控研究[J]. 系统仿真学报, 2021, 33(12): 2880-2890. Xiao Tong, Jiang Haifan, Ding Guofu, et al. Research on Digital Twin-based Modeling and Monitoring of Five-axis Grinder[J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(12): 2880-2890.
- [3] Ouelhadj D, Hanachi C, Bouzouia B. Multi-agent

- Architecture for Distributed Monitoring in Flexible Manufacturing Systems (FMS) [C]//Proceedings 2000 ICRA. Millennium Conference. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Symposia Proceedings. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2000: 2416-2421.
- [4] 侯迪波. 流程工业CIMS中GIS技术的应用[J]. 仪器仪表学报, 2005, 26(增2): 717-720, 724.  
Hou Dibo. The Application of GIS in Process Industry CIMS[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2005, 26(S2): 717-720, 724.
- [5] 周泽伟, 冯毅萍, 荣冈. 等离子体裂解煤工艺过程的三维仿真与可视化监控系统[J]. 化工学报, 2011, 62(8): 2303-2311.  
Zhou Zewei, Feng Yiping, Rong Gang. 3D Process Simulation and Visualization Monitoring Platform for Process of Coal Pyrolysis to Acetylene[J]. CIESC Journal, 2011, 62(8): 2303-2311.
- [6] 庄存波, 刘检华, 熊辉, 等. 复杂产品装配现场动态实时可视化监控系统[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(6): 1264-1276.  
Zhuang Cunbo, Liu Jianhua, Xiong Hui, et al. Assembly Shop Floor Dynamic and Real-time Visual Monitoring System for Complex Product[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(6): 1264-1276.
- [7] 徐泉, 秦莹, 初延刚, 等. 选矿生产指标可视化监控平台研究[J]. 计算机集成制造系统, 2020, 26(1): 81-91.  
Xu Quan, Qin Ying, Chu Yangang, et al. Research on a Mineral Production Index Visual Monitoring Platform[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2020, 26(1): 81-91.
- [8] 李欣, 刘秀, 万欣欣. 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.  
Li Xin, Liu Xiu, Wan Xinxin. Overview of Digital Twins Application and Safe Development[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(3): 385-392.
- [9] Benjamin Schleich, Nabil Anwer, Luc Mathieu, et al. Shaping the Digital Twin for Design and Production Engineering[J]. CIRP Annals, 2017, 66(1): 141-144.
- [10] Tao Fei, Zhang Meng. Digital Twin Shop-floor: A New Shop-floor Paradigm Towards Smart Manufacturing[J]. IEEE Access, 2017, 5: 20418-20427.
- [11] Tao Fei, Zhang Meng, Nee A Y C. Digital Twin Driven Smart Manufacturing[M]. London: Academic Press, 2019.
- [12] Zhang Meng, Tao Fei, Nee A Y C. Digital Twin Enhanced Dynamic Job-shop Scheduling[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2021, 58, Part B: 146-156.
- [13] 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 Haoran, Liu Jianhua, Xiong Hui, et al. 3D Visualization Real-time Monitoring Method for Digital Twin Workshop[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(6): 1432-1443.
- [14] Qamsane Y, Chen C Y, Balta E C, et al. A Unified Digital Twin Framework for Real-time Monitoring and Evaluation of Smart Manufacturing Systems[C]//2019 IEEE 15th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2019: 1394-1401.
- [15] 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 Linyan, Du Hongxiang, Wang Huifen, et al. Construction and Application of Digital Twin System for Production Process in Workshop[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(6): 1536-1545.
- [16] 张霖. 关于数字孪生的冷思考及其背后的建模和仿真技术[J]. 系统仿真学报, 2020, 32(4): 1-10.
- [17] 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 Weiran, Zhang Meng, et al. Five-dimension Digital Twin Model and Its Ten Applications[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(1): 1-18.
- [18] 杨艳芳, 贺焕, 舒亮, 等. 基于时间Petri网的断路器虚拟装配系统研究[J]. 中国机械工程, 2019, 30(3): 310-317, 324.  
Yang Yanfang, He Huan, Shu Liang, et al. Research on Circuit Breaker Virtual Assembly Systems Based on Time Petri Net[J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30(3): 310-317, 324.