



## 特种变压器生产车间数字孪生系统构建方法

王大江 张学东 孙文磊 姜任奔 路程 岳媛

### Development of a digital twin system in a special transformer production workshop

WANG Dajiang, ZHANG Xuedong, SUN Wenlei, JIANG Renben, LU Cheng, YUE Yuan

引用本文:

王大江, 张学东, 孙文磊, 姜任奔, 路程, 岳媛. 特种变压器生产车间数字孪生系统构建方法[J]. *工程科学学报*, 2023, 45(11): 1948–1961. doi: 10.13374/j.issn2095–9389.2022.09.26.005

WANG Dajiang, ZHANG Xuedong, SUN Wenlei, JIANG Renben, LU Cheng, YUE Yuan. Development of a digital twin system in a special transformer production workshop[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2023, 45(11): 1948–1961. doi: 10.13374/j.issn2095–9389.2022.09.26.005

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2022.09.26.005>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 基于函数型数字孪生模型的转炉炼钢终点碳控制技术

Control technology of end–point carbon in converter steelmaking based on functional digital twin model  
*工程科学学报*. 2019, 41(4): 521 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2019.04.013>

#### 降压式18脉冲自耦变压器优化设计

Optimal design of a new step–down 18–pulse autotransformer  
*工程科学学报*. 2017, 39(3): 456 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2017.03.019>

#### 知识图谱的最新进展、关键技术和挑战

Recent advances, key techniques and future challenges of knowledge graph  
*工程科学学报*. 2020, 42(10): 1254 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2020.02.28.001>

#### 基于环境语义信息的同步定位与地图构建方法综述

Survey of simultaneous localization and mapping based on environmental semantic information  
*工程科学学报*. 2021, 43(6): 754 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2020.11.09.006>

#### 基于数据融合的智能医疗辅助诊断方法

Intelligent medical assistant diagnosis method based on data fusion  
*工程科学学报*. 2021, 43(9): 1197 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2021.01.12.003>

#### 面向显微影像的多聚焦多图融合中失焦扩散效应消除方法

Defocus spread effect elimination method in multiple multi–focus image fusion for microscopic images  
*工程科学学报*. 2021, 43(9): 1174 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2021.01.12.002>

# 特种变压器生产车间数字孪生系统构建方法

王大江<sup>1)</sup>, 张学东<sup>1)</sup>, 孙文磊<sup>1)✉</sup>, 姜任奔<sup>1)</sup>, 路程<sup>1)</sup>, 岳媛<sup>2)</sup>

1) 新疆大学智能制造现代产业学院, 乌鲁木齐 830017 2) 特变电工股份有限公司, 昌吉 831100

✉通信作者, E-mail: [sunwenxj@163.com](mailto:sunwenxj@163.com)

**摘要** 为解决特种变压器生产车间实时化管控弱、调度决策能力差、过程监控不直观、运行态势不明朗的问题,从特种变压器车间的数字孪生建模、知识信息融合、运行可靠性分析和可视化表达等方面入手,探讨了一种特种变压器车间数字孪生系统的新型体系架构;阐述了基于“5 维度-4 视角”模型、高性能算力孪生引擎及沉浸式可视化技术的数字孪生建模表达方法;研究了数字孪生车间指标体系的构建方法以及车间知识信息与数字孪生的融合方法;基于层次分析理论和关联熵方法,构建了一种基于复合物元信息熵的车间数字孪生系统可靠性分析模型;最后,以某特种变压器生产车间为应用案例,基于上述方法和模型,结合实际生产过程开发了原型数字孪生系统,实现了特种变压器车间的多维多尺度实时智能管控,验证了该方法的合理性和有效性.

**关键词** 数字孪生; 特种变压器; 构建方法; 数字化车间; 知识信息融合

**分类号** TP391.9

## Development of a digital twin system in a special transformer production workshop

WANG Dajiang<sup>1)</sup>, ZHANG Xuedong<sup>1)</sup>, SUN Wenlei<sup>1)✉</sup>, JIANG Renben<sup>1)</sup>, LU Cheng<sup>1)</sup>, YUE Yuan<sup>2)</sup>

1) School of Intelligent Manufacturing and Modern Industry, Xinjiang University, Urumqi 830017, China

2) Tebian Electric Apparatus Stock Co. Ltd., Changji 831100, China

✉Corresponding author, E-mail: [sunwenxj@163.com](mailto:sunwenxj@163.com)

**ABSTRACT** To address the weak real-time control, poor decision-making ability, nonintuitive process monitoring, and unclear operation situation problems in a special transformer production workshop, a new digital twin system architecture is discussed for the workshop, focusing on digital twin modeling, knowledge information fusion, operation reliability analysis, and visual representation. The modeling and expression of the digital twin were based on the “Five dimensions–Four perspectives” engine, where the “Five dimensions” refer to physical entities, virtual objects, twin data, connection mapping, and services and the “Four perspectives” refer to geometric, physical, behavioral, and rule models, with high-performance computing power and immersive visualization technology. This paper describes the method of 3D modeling, data mapping, computing power development, and visual expression for the digital twin. A deep fusion method between knowledge and digital twin was studied based on the principle of tree growth. This model includes two key parts. First, a design of the index system having a hierarchical structure based on the principle of tree growth was proposed. Indices were divided into four levels—workshop, production line, station, and equipment levels—based on the workshop scale, vertically constituting the main branches of the index tree model. From the perspective of the life cycle of production activities, indices were divided into planning parameters, process parameters, work order parameters, quality parameters, equipment parameters, and so on. Thus, a complete index system of the digital twin workshop was established. Furthermore, the photosynthesis and the transport of organic products in the tree were simulated by formally describing the deep fusion mechanism of knowledge and digital twin in transformer workshops, and diverse intelligent computing units were built to mine knowledge and identify information from disorganized workshop operation big

收稿日期: 2022–09–26

基金项目: 工业互联网标识解析全要素集成平台项目 (TC210A02E)

data. Finally, a multilevel and complex model was constructed to integrate the knowledge and digital twin of a special transformer workshop based on the computation model, and the real-time monitoring and control of the workshop were realized. An operational reliability analysis model of the digital twin system for special transformer workshops based on composite matter element information entropy was also proposed, which combines the analytical hierarchy process and the correlation entropy method. A composite matter element model was systematically built based on the historical operational data of the transformer workshop, which can be used for the real-time monitoring of the operational reliability and the evolution of any trends in the operational parameters. Thus, a prototype digital twin system was developed, and its rationality and effectiveness were verified using the special transformer workshop as the application case. The research results have an outstanding reference for the construction of digital twin systems and the intelligent management of transformer workshops.

**KEY WORDS** digital twin; special transformer; construction method; digital workshop; knowledge fusion

新一代信息技术与产业加速融合渗透,演化新产品、新模式、新业态.数字孪生作为智能制造和工业互联网的关键使能技术,赋能数字化车间的智能化转型意义重大.数字孪生是一种集合新型传感技术、数据采集技术、网络解析传输技术、工业大数据分析技术、虚拟现实、增强现实、三维可视化、智能人机交互、智能决策等技术,融合赛博系统理念、数字化治理理念、多对象协同运行、跨学科领域知识的新型智能化手段,能够有效满足数字化车间以虚控实、虚实同步、智能人机交互、远程实时监测、三维可视化管理、行为逻辑推理等多维多尺度管控需求.

国内外诸多学者基于数字孪生技术对数字化车间的智能化建设进行研究和实践,并取得了一定成果. Negri 等<sup>[1]</sup>对数字孪生的相关概念定义展开了阐述和分析.陶飞等<sup>[2-4]</sup>从不同维度统计分析了国内外数字孪生的相关文献,思考了数字孪生十大问题,提出了五维模型的概念及其在多个领域的应用思路.李浩等<sup>[5]</sup>探讨了工业数字孪生系统的概念、结构和运行模式. Qi 等<sup>[6]</sup>阐述了数字孪生关键技术,为数字孪生应用的开发实施提供了参考. Wu 等<sup>[7]</sup>构建了低时延的边缘云协同数字孪生系统. Schroeder 等<sup>[8]</sup>研究了基于 AutomationML 数据格式的数字孪生数据交换模型.丁凯等<sup>[9]</sup>研究了智能制造空间的虚实映射和过程数据建模方法.张超等<sup>[10]</sup>从数据和知识混合驱动视角出发,提出了一种数字孪生制造单元多维多尺度的高保真建模方法,并以航空发动机整体叶轮加工过程为例,验证了方法的可行性.魏一雄等<sup>[11]</sup>采用面向事件响应的数据管理方法构建模块化、通用化的数字孪生车间系统.侯正航等<sup>[12]</sup>搭建了基于数字孪生的飞机装配状态巡检机器人系统,实现了机器人可视化实时巡检.吴鹏兴等<sup>[13]</sup>提出了一种基于数字孪生的离散制造车间可视化实时监控方法,

并在航天产品机加车间进行了实地验证.江海凡等<sup>[14]</sup>提出了基于模型、投影和孪生3个阶段的数字孪生演进模型.孙学民等<sup>[15]</sup>、胡兴等<sup>[16]</sup>基于数字孪生解决了产品装配过程虚实脱节导致的效率低和质量差的问题.马靖等<sup>[17]</sup>分析了生产单元的可视化管控需求,提出了数字孪生驱动的生产单元可视化管控架构.刘娟等<sup>[18]</sup>提出了一种基于事件调度的车间数字孪生体系统仿真方法,实现物理车间全流程、全要素实时可视化监控.邓建新等<sup>[19]</sup>则从货物配送管理角度出发,将数字孪生和配送业务融合,开发了数字孪生配送管理原型系统,提升了货物配送全生命周期过程的优化管理.许敏俊等<sup>[20]</sup>借助数字孪生实现了钻削加工的实时监控和优化控制.王炎等<sup>[21]</sup>利用数字孪生建立了齿轮箱的孪生体模型,模拟了不同工况下的齿轮箱运行状态,实现了对齿轮箱的精准故障诊断. Tuegel 等<sup>[22]</sup>提出了一种基于数字孪生的飞机结构寿命预测方法. Uhlemann 等<sup>[23]</sup>基于数字孪生技术研究了生产过程的多模态数据采集方法. Söderberg 等<sup>[24]</sup>利用数字孪生仿真产品生产过程,对产品生产进行了实时控制和优化,促进了产品生产从大规模生产向个性化定制的转变.

综上所述,目前关于数字孪生的研究应用侧重于体系框架、模型构建和可视化监控,对各类数字孪生场景应用的建模实施具有一定指导意义.但是,特种变压器车间生产业务错综复杂、运行数据体量庞大、蕴含信息千变万化,简单的三维模型的可视化展示无法逼真反映车间状况,传统孪生体算力不强、车间知识信息挖掘困难、车间整体运行趋势不明确、虚实协同和以虚控实的交互能力不强,多维多尺度<sup>[25]</sup>监测管理势在必行.针对以上问题,本文提出了一套特种变压器生产车间数字孪生系统的构建方法,针对数字孪生系统的模型开发、指标体系建模、知识信息融合、系统运行

可靠性评估、过程和数据可视化表达等方面展开深入研究,最后以某特种变压器生产车间为例开展实验验证,实现了变压器车间多维多尺度的智能化管控,大幅提升了车间运行效率和管理水平。

### 1 特种变压器生产车间数字孪生体系架构

特种变压器生产的工艺流程复杂、作业离散程度高、业务逻辑交错,难以实现全要素、全流程的精益化管理,制约了变压器生产的效率和质量。

通过分析变压器车间的生产工艺特点和业务管控需求,本文提出了特种变压器生产车间数字孪生的新型体系架构,如图 1 所示,主要由物理车间层、多源数据映射层、数字孪生模型层和数字孪生应用层组成,分别从变压器生产车间的数字孪生建模,变压器生产车间的知识信息和孪生对象的融合,变压器生产车间的运行可靠性分析监测以及变压器生产车间孪生模型的可视化表达等方面着手,构建了变压器数字孪生系统模型,以实现

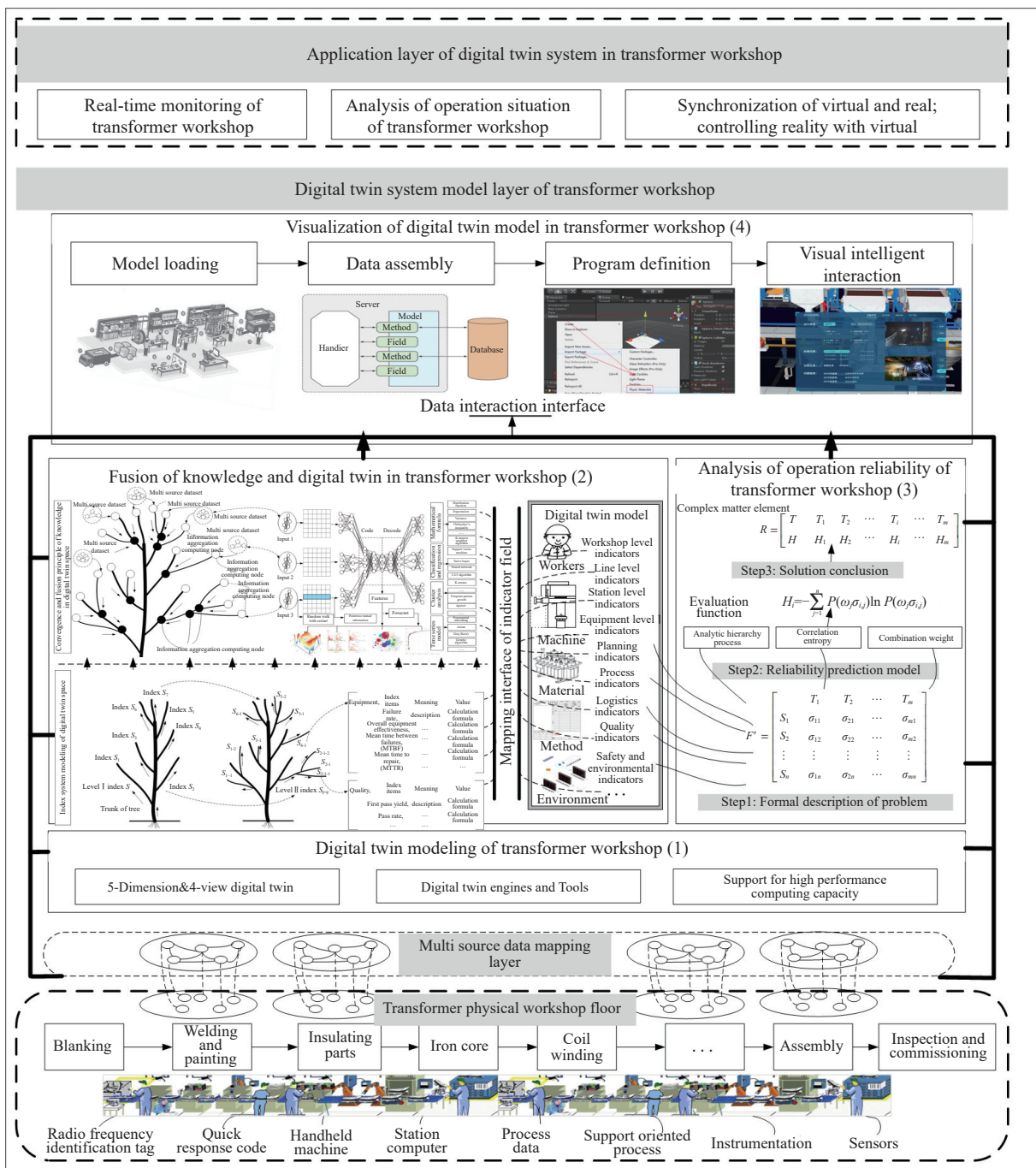


图 1 特种变压器生产车间数字孪生体系架构

Fig.1 Digital twin system architecture of the special transformer workshop

变压器生产车间的多维多尺度实时监控和运行态势预测分析等,进一步达到虚实同步、以虚控实的目的。

物理车间层,主要指特种变压器生产车间底层实际的加工设备、检验设备、立体仓库、自动导向车 (Automated guided vehicle, AGV)、现场工控机、移动终端、仪器仪表、作业指导书、生产工单、无线射频识别 (Radio frequency identification, RFID) 系统、快速响应二维码 (Quick response code, QR code)、标准作业规程 (Standard operating procedure, SOP) 以及生产过程中所产生的多元数据等组成的车间生产资源。它们贯穿产品全生命周期,提供生产、检测、监控等不同能力,支撑现场数据实时监控和生产事务灵活处理。多源数据映射层,主要是由智能网络网关、光纤交换机、路由器、可编程逻辑控制器 (Programmable logic controller, PLC) 组态等组成的数据交换通道和信息映射路径,具备通讯连接、协议适配、协议转换、信息物理映射、软件定义网络和物理寻址的基础功能。支持实时数据和控制指令的感知、解析与传递。数字孪生模型层,是在虚拟空间对实体车间的数字化克隆,基于变压器生产物理车间的几何结构、物理属性和行为逻辑,高度抽象和分析车间运行管控的机制和原理,从变压器生产车间数字孪生体建模、指标体系形式化建模、数据层次化汇聚、知识信息与孪生模型深度化融合、变压器生产车间运行可靠性预测分析、各类数据和模型的可视化表达等方面着手,系统地建立变压器生产车间的管控指标体系、运行逻辑规则、可视化智能交互等智能化机理模型,基于数据驱动和事件驱动双管齐下,打造变压器生产车间的智能化运行能力。数字孪生应用层,是在模型层的基础上,遵循软件即服务 (Software as a service, SaaS) 的思想理念,将变压器车间运行的机理模型高度封装集成,提供全面感知、综合研判、全局协同、科学预测和辅助决策的智能化能力,实现多维多尺度生产过程实时监控、优化自主决策和运行趋势分析预测等先进生产模式。

## 2 特种变压器生产车间数字孪生建模表达方法

特种变压器车间数字孪生系统的建模和开发应符合“5 维度-4 视角”的模型内涵。“5 维度-4 视角”模型中的“5 维度”分别指物理实体维、虚拟对象维、孪生数据维、连接映射维和服务维,“4 视

角”是指几何视角、物理视角、行为视角和规则视角。数字孪生系统的建模和开发主要包含数字孪生三维建模、数字孪生数据集成和数字孪生算力开发 3 个部分。数字孪生三维模型需要借助三维建模技术来表达模型的层次结构和几何关系,同时赋予模型静态属性和动态特性。数字孪生数据的集成,主要是实现多源异构数据采集、数据汇聚和数据接入,车间存在多种类型的 PLC 控制器、数控系统、上位机、仪器仪表、传感器等,各类设备支持的通讯协议不尽相同,为实现车间通讯协议的适配统一,采用开放性生产控制和统一架构 (Open platform communications unified architecture, OPC UA) 等通用标准协议采集包括产品、设备、人员、系统、环境等对象的运行数据<sup>[26]</sup>,并通过 WebService 和 Restful 等接口实现异构信息系统的集成和孪生数据的共享,如制造执行系统 (Manufacturing execution system, MES)、仓储管理系统 (Warehouse management system, WMS)、质量管理体系 (Quality management system, QMS)、产品生命周期管理系统 (Product lifecycle management, PLM) 等。数字孪生算力的开发,主要是基于专业仿真软件工具实现高保真的车间系统特性仿真分析,基于 Hadoop、Spark 等大数据分析平台实现车间海量数据的分布式、并行化计算,基于人工智能平台的机器学习、深度学习模型实现复杂逻辑的预测推理,基于 Unity 平台的动画求解重构能力实现低时延的运行动画仿真等,通过数据计算和仿真模拟赋予车间系统虚实同步和以虚控实的能力,辅助实现智能化决策。特种变压器生产车间数字孪生的建模和开发方法原理如图 2 所示。

传统数字孪生三维模型的表达深度较浅、交互能力较弱,变压器生产车间的运行监测和以虚控实能力有限。基于物理车间“人-机-物-环境”互联与共融技术、虚拟车间建模仿真运行及验证技术、孪生数据构建与管理技术、数字孪生车间运行技术、智能生产与精准服务技术五大类数字孪生车间关键技术<sup>[27]</sup>,能够很好地解决以上问题。其中,利用车间虚拟现实与增强现实技术能够在很大程度上提高虚拟车间和物理车间之间的虚实同步和以虚控实能力,在虚拟现实 (Virtual reality, VR) 应用方面,沉浸式可视化是一项新兴热点技术,能够提供高度逼真的沉浸感与参与感,有助于充分运用人的感知与操作能力,为数据分析推理和决策提供支持。因此,本文进一步研究了数字孪生模型的深度沉浸式可视化表达方法 (如图 3)。在车间运

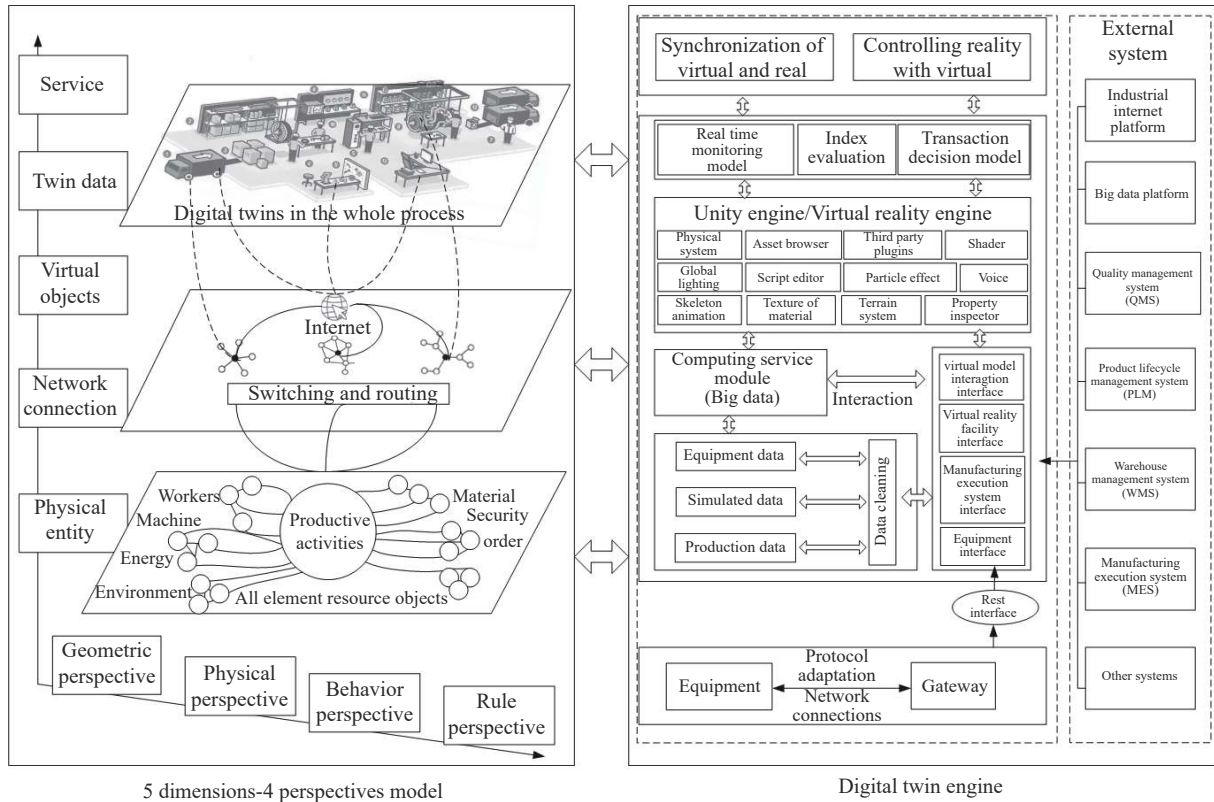


图 2 特种变压器生产车间数字孪生的建模和开发原理

Fig.2 Principle of the modeling and development of the digital twin in special transformer workshop

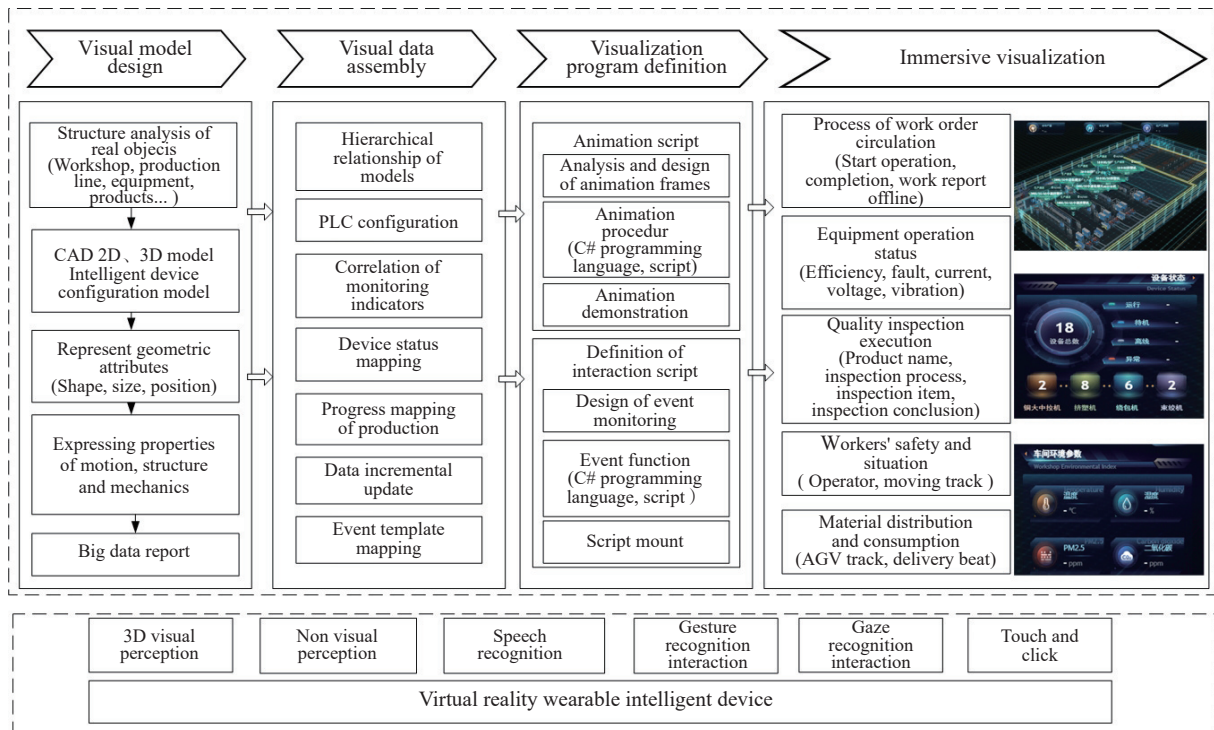


图 3 深度沉浸式可视化表达方法

Fig.3 Expression method of the deep immersion visualization

行大数据和车间可视化模型的基础上, 集成 Unity 等主流虚拟现实引擎、PLC 组态、大数据商业智能商业智能 (Business intelligence, BI) 平台等, 融合

三维视觉感知、非视觉感知辅助、语音识别、手势识别、眼球注视识别、触摸点击等新型虚拟现实辅助设备, 构建数字孪生车间的三维仿真动画、

3D 动态漫游、智能化人机交互、动态悬浮窗图等可视化应用,为孪生模型设计编制动画播放脚本和人机交互逻辑脚本,能够实时捕捉现实车间生产过程的数据和事件,快速分析生产现场的实际状态,辅助生产人员掌握和理解车间运行状况,提升决策的有效性。

特种变压器生产车间的深度沉浸式可视化表达实现过程主要包括 4 个步骤。一是基于三维建模技术和组态技术构建车间对象的可视化几何模型,并赋予模型应有的静态属性和动态特性;二是对可视化模型进行数据装配和关联关系映射,并依据现实世界物理车间的层次结构,为虚拟模型添加父子关系和重构逻辑;三是定义可视化智能人机交互的响应逻辑,基于虚拟现实设备的三维可视能力和人机交互能力,通过多种方式反映车间系统的实时状况和运行机理;四是实时加载车间多源数据、指标参数值、运行事件消息等进行仿真推演,对变压器车间的计划调度与执行、工单流转过程、设备运行状况、质量检验情况、能源消耗情况、安全环境态势、物料配送消耗等进行全流程、全要素的可视化管控,加强数据驱动的以虚控实能力。进一步地,融合专家知识图谱分析和大数据智能计算,在实时交互和不断迭代优化中赋予理论模型更加精准的复现能力和预测能力<sup>[28]</sup>,从而优化生产节拍、提升设备运维水平、改进质量控制和加工工艺、降低能源消耗、减少安全事故、优化 AGV 配送路径等。

### 3 仿生树生长的知识信息与特种变压器车间数字孪生融合方法

特种变压器车间生产过程中产生的海量运行数据蕴含丰富的信息知识,如何从多源异构大数据中抽象信息和凝聚知识,并映射在数字孪生空间,基于虚拟模型对物理车间进行实时监测和控制非常重要。指标参数是多源异构大数据蕴含知识信息的最佳描述,直观反映了车间的真实运行状况和变化趋势。为研究其在运行数据与指标参数的精准映射关系,以及知识信息与数字孪生空间的融合手段,本文提出仿生树生长的知识信息与数字孪生的融合方法,主要包含两个研究内容:一是仿生树木的结构和生长原理,形式化地描述变压器数字孪生车间的指标体系模型构建过程;二是仿生树木光合作用及其有机产物的汇聚输送机制,建立车间知识信息与数字孪生的深度融合模型。

#### 3.1 仿生树木生长的车间数字孪生指标体系形式化建模

特种变压器车间运行参数复杂多样、混乱无序,但是参数之间存在着千丝万缕的关联关系(包含因果关系、前置条件关系、促进关系、抑制关系、父子关系和平行关系等)。简单罗列车间运行参数指标无法层次化、精细化地体现指标之间的联系。仿生树木生长原理进行数字孪生车间的指标体系建模,能够很好地解决上述问题。分析树木结构的层次划分和构成模式可知,树木的生长,由树干开始,在树干的基础上不断分化出次级枝干,枝叶结构不断产生,层次不断加深,最终形成复杂树木结构。类比树木的层次结构和生长原理,设计和定义数字孪生车间智能管控的指标参数,特种变压器生产车间指标体系建模原理如图 4 所示。从车间的尺度视角分析,分为车间级指标、产线级指标、工位级指标和设备级指标等,如  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$ ... $S_7$  等代表车间不同尺度视角下的指标参数,纵向构成指标树模型的主体枝干。从生产活动的生命周期视角分析,在指标树模型主体枝干的基础上,衍生分化为计划类指标、工艺类指标、工单类指标、质量类指标、物流类指标、能源类指标、环境与安全类指标等,如  $S_{1-1}$ 、 $S_{2-1}$ 、 $S_{p-q}$  等代表在车间尺度视角指标参数  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$  等的基础上衍生出的生产活动生命周期视角下具有父子层级关系的不同指标参数,横向构成指标树模型的细分枝干。重复迭代以上步骤,直至构建完整的数字孪生车间智能管控的树形指标体系模型。

基于上述建模原理,针对某特种变压器生产车间的指标体系展开分析,尽可能全面地设计和收集了该车间的各类运行指标参数集,该指标参数集中的初始参数没有明确的层级关系和关联关系,尚不构成树形体系。首先,以车间尺度视角为依据将指标参数分为 4 个运营层级,然后以生产活动的生命周期视角为依据对每个运营层级下的指标参数进行分类,分别对应至工艺类、计划类、物流类、生产类、质量类、能源类、安全类与环境类。基于该树形指标体系模型,可以在虚拟空间中实时表征物理车间的运行状况。如图 5 所示,车间级指标主要包括车间整体运营层面所关注的参数,如车间立库的安全库存、产品的缺陷分布、产品质量检验合格率、车间总体的水电气消耗量、物料总消耗量、设备损耗程度、人工工时、计划达成率和库存周转率等;产线级指标主要包括产能负荷率、生产进度、质检及时率、质检合格率、物

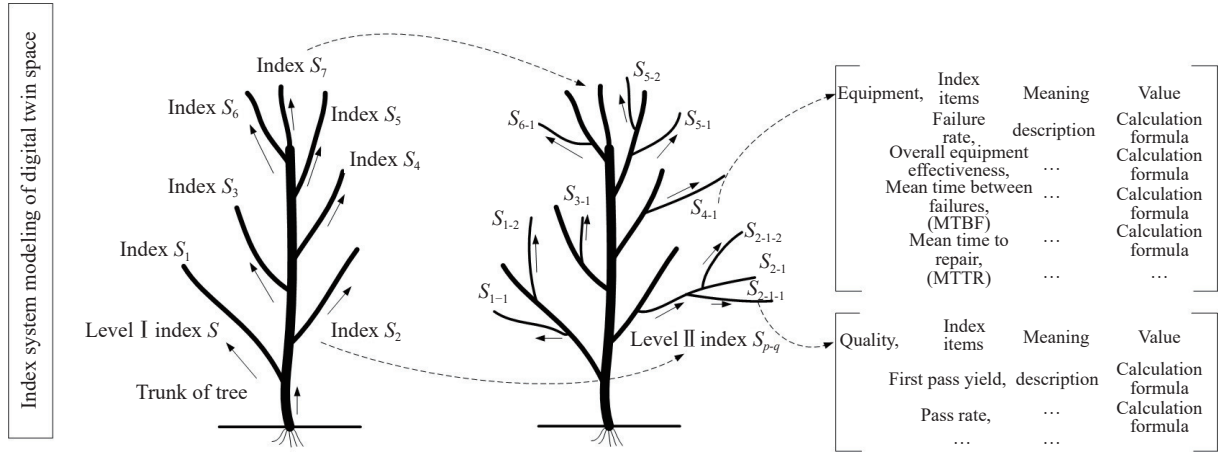


图 4 仿生树木生长的数字孪生车间指标体系形式化建模原理

Fig.4 Formal modeling principle of the digital twin workshop index system by imitating the growth of tree

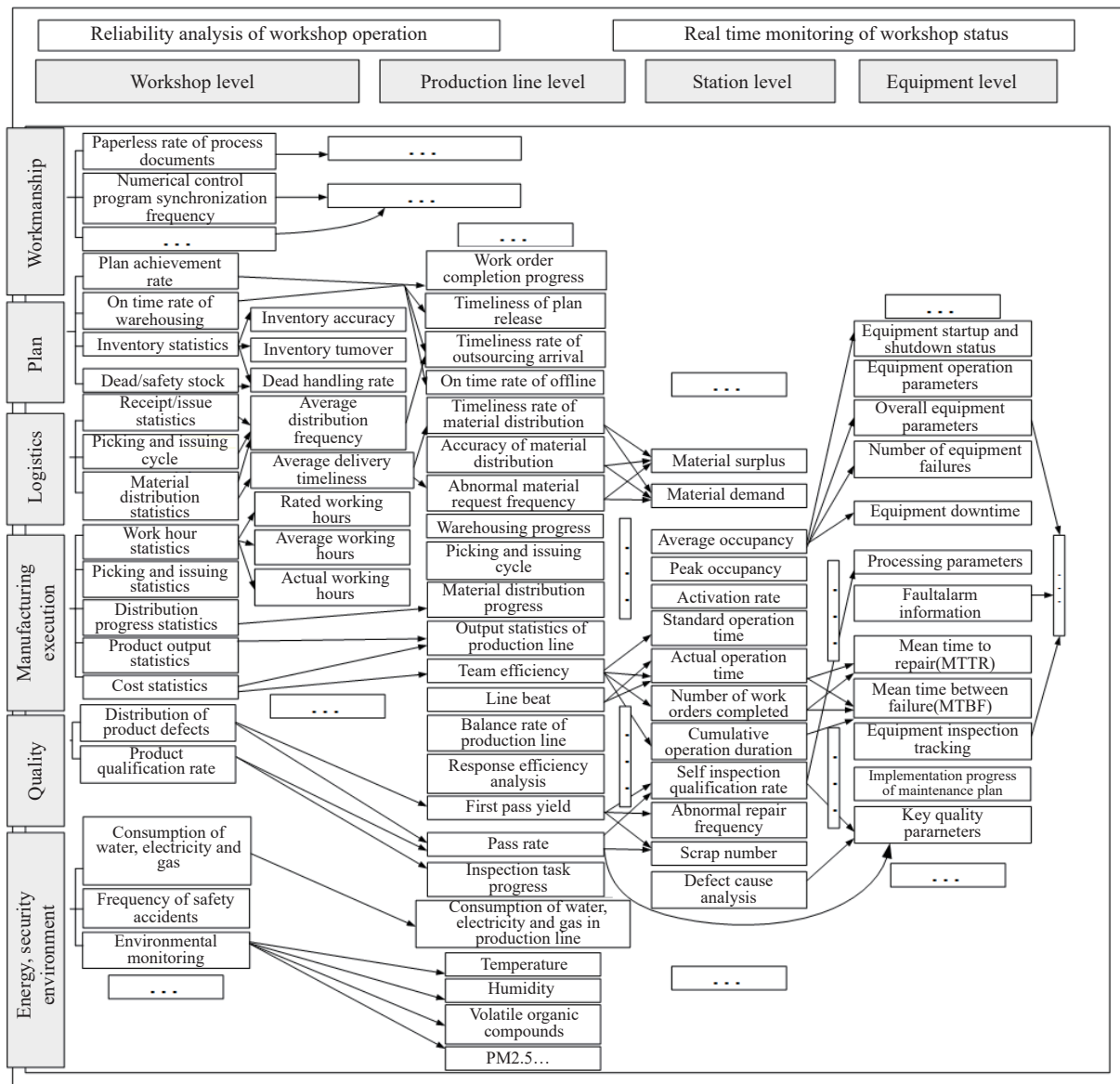


图 5 特种变压器生产车间的指标体系模型

Fig.5 Index system model of special transformer workshop



料配送进度、生产节拍和产线平衡率等; 工位级指标主要包括物料消耗和需求情况、平均占用率、峰值占用率、激活率、标准作业时间和实际作业时间等; 设备级指标主要包括设备启停状态、设备运行参数、设备综合效率(Overall equipment effectiveness, OEE)、设备故障次数、设备停机时间、加工工艺参数和故障报警信息等. 在上述指标参数的尺度视角划分和生命周期视角归类的基础上, 按照从左往右、由上到下的顺序依次评估指标之间的关联关系. 将存在关联关系的指标参数采用有向线段连接标记. 例如, 车间级的计划达成率指标与产线级的工单进度、计划下达及时率、外协到货及时率等指标存在一对多的父子关联关系. 产线级的节拍指标与工位级的标准作业时间和实际作业时间存在一定联系. 通过该种方式, 将变压器生产车间分散的指标参数形式化地描述为具有明确关联关系的树形模型, 为各级指标的计算模型

提供了依据.

### 3.2 仿生树木光合作用及其有机产物汇聚输送的车间知识信息与数字孪生融合

特种变压器车间的大数据资源是运行管控的新型驱动力. 但是原始数据对知识信息的归纳总结能力有限, 不能发挥数据驱动的理想作用, 需要基于数学手段从海量原始数据中挖掘知识信息, 指导车间运行决策. 知识信息的挖掘包含多个层次, 知识的信息密度越高, 对车间的智慧决策辅助能力越强. 应该在低信息密度指标和参数的基础上逐层提炼高密度信息的知识. 仿生树木光合作用及其有机产物的汇聚输送原理, 能够实现变压器生产车间知识信息与数字孪生的深度有机融合. 如图 6 所示, 依据树木光合作用及其有机产物汇聚输送的原理, 首先, 以变压器车间运行大数据为数据源, 基于指标计算数学公式、机器学习算法和深度学习模型构建复杂多样的智能计算单元, 从

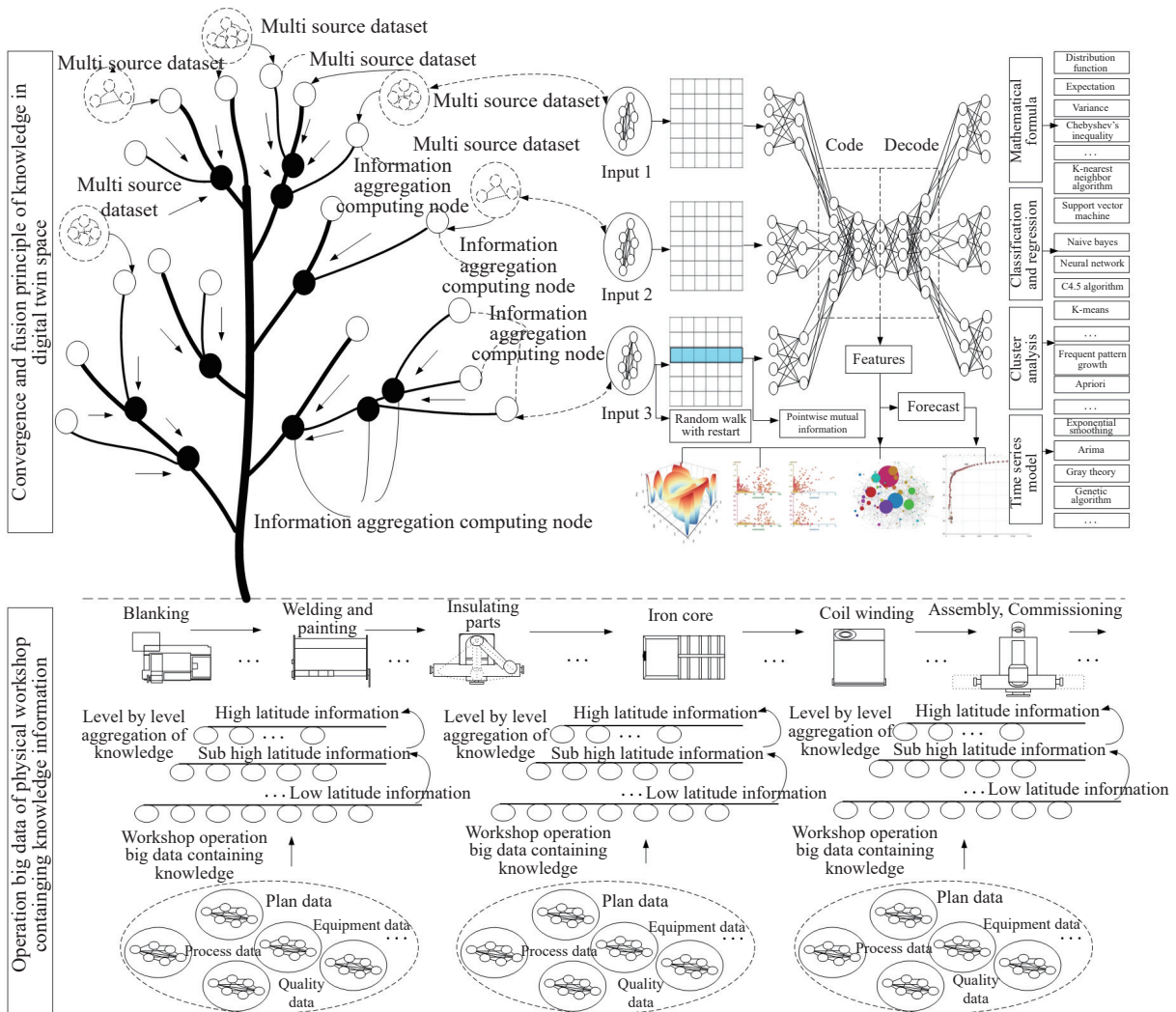


图 6 仿生树木光合作用及其有机产物汇聚输送的知识信息与数字孪生融合机制

Fig.6 Fusion of the knowledge and digital twin by imitating tree photosynthesis and transport of organic products

杂乱无章的车间运行大数据中挖掘知识和识别信息, 将计算结果作为数字孪生车间的指标量值输出展示. 然后, 将初步得到的基础指标和低维知识信息通过聚合节点的迭代计算实现知识信息的高度抽象和融合, 每项高等级指标都是若干低等级指标融合计算的结果, 知识和信息逐级向数字孪生车间指标体系主干收敛, 最终实现完整的孪生数据映射和知识信息汇集融合, 并通过虚拟可视化的手段在数字孪生空间呈现, 利用虚拟空间的数字模型实时指导物理变压器车间的智能化监控和调度.

基于上述建模原理, 针对特种变压器生产车间的知识信息和数字孪生融合的问题, 首先根据业务管控需求定义了数据采集的模板, 将车间运行大数据的关键字段与数据模型一一关联映射, 数据字段主要分为两类, 一是围绕车间人、机、料、法、环的业务运行数据, 如计划数据、工艺数据、工单数据、质量数据、设备数据和物料数据等; 二是围绕车间运行的关键事件消息, 配置事件监听机制, 实时感知和采集车间运行的异常报警信息、参数阈值越界消息、关键事件触发警告等. 然后, 通过分析具体业务的数据计算逻辑, 为每一项计算任务定义了计算模型, 该计算模型可能是单一的数学公式、人工智能(Artificial intelligence, AI)算法或者知识图谱, 也可能由多种算子按照一定的规律排列组合形成, 通过算子路由映射的方式为每项计算任务给定计算链路, 前项算子的输出结果往往会作为后项算子的输入参数, 以此类推构成特种变压器生产车间知识信息和数字孪生融合的树网状计算模型. 例如, 设备综合效率 OEE 的计算即为一个基于数学公式的多层路径汇聚计算过程, OEE 为设备时间开动率、性能开动率和合格率的乘积, 而时间开动率是设备开动时间和负荷时间的比值, 负荷时间是日历工作时间和计划停机时间的差值; 同样, 性能开动率为净开动率和速度开动率的乘积, 净开动率是加工数量和实际加工周期乘积与开动时间的比值. 此类计算无法一步到位, 需要通过多层参数的组合计算才能获得信息价值较高的监测指标. 基于振动信号的设备故障预警过程则为一个多步骤的 AI 算子组合计算过程, 首先通过特征提取算子(如 EMD 经验模态分解、VMD 变模式分解、小波变换等)依据振动数据的时间尺度特征进行信号分解, 提取特征向量. 然后, 以提取的特征向量作为下一步计算的输入, 基于支持向量机、随机森林、卷积神经网络

等机器学习和深度学习算子实现设备的故障形式预测, 进一步地, 基于数学公式构建设备健康度隶属函数算子, 以设备故障预测结果为自变量, 实时计算设备的健康度指数. 按照此种方式, 可以快速构建出特种变压器生产车间知识信息和数字孪生融合的多层次、复杂模型, 基于数据计算模型实现车间现场的实时监测和控制. 基本原理如图 7 所示.

#### 4 基于复合元信息熵的特种变压器生产车间数字孪生系统运行可靠性分析

特种变压器生产车间的指标体系庞大、关联关系复杂, 单一项或同类型指标无法定量描述整个车间的运行态势. 为解决变压器车间整体运行可靠程度和风险系数的描述问题, 本文提出基于复合元信息熵的车间系统运行可靠性分析模型, 在上文阐述的特种变压器生产车间数字孪生树形指标体系和车间知识信息与数字孪生融合模型的基础上, 深度结合层次分析法和关联熵分析法, 构建变压器车间运行态势的复合元模型, 实现变压器车间整体运行可靠性的量化评估和分析. 复合元是可拓学基元理论中的重要概念, 用来表达现实世界错综复杂的人、事、物之间的融合. 用  $B'$  表示一个复合元, 则复合元可以被认为物元  $B=(O_b, C_b, V_b)$  和物元  $B_1=(O_{b1}, C_{b1}, V_{b1})$  的组合形式  $B'=((O_{b1}, C_{b1}, V_{b1}), C_b, V_b)$ ,  $O$  为某个对象,  $C$  为该对象的特征,  $V$  为该特征对应的量值. 采集变压器车间  $m$  个运行时间周期  $T_i (1 \leq i \leq m)$  的  $n$  个监控指标  $S_j (1 \leq j \leq n)$  的量值  $V_{ij}$ , 构建数字化车间运行状况的复合元模型  $F$ , 然后对  $F$  中的元素  $V_{ij}$  进行归一化处理, 得到归一化的复合元模型  $F'$ ,  $\sigma_{ij}$  即为  $V_{ij}$  经过归一化计算后的结果, 如公式(1)所示.

$$F = \begin{bmatrix} & T_1 & T_2 & \cdots & T_m \\ S_1 & v_{11} & v_{21} & \cdots & v_{m1} \\ S_2 & v_{12} & v_{22} & \cdots & v_{m2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ S_n & v_{1n} & v_{2n} & \cdots & v_{mn} \end{bmatrix} \xrightarrow{\text{归一化处理}} F' = \begin{bmatrix} & T_1 & T_2 & \cdots & T_m \\ S_1 & \sigma_{11} & \sigma_{21} & \cdots & \sigma_{m1} \\ S_2 & \sigma_{12} & \sigma_{22} & \cdots & \sigma_{m2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ S_n & \sigma_{1n} & \sigma_{2n} & \cdots & \sigma_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

采用关联熵法确定各指标  $S_j$  的客观权重系数, 依据变压器车间各监控指标的标准数值建立理想状态下的参考集合  $Y=\{y_1, y_2, \dots, y_n\}$ , 则, 复合物

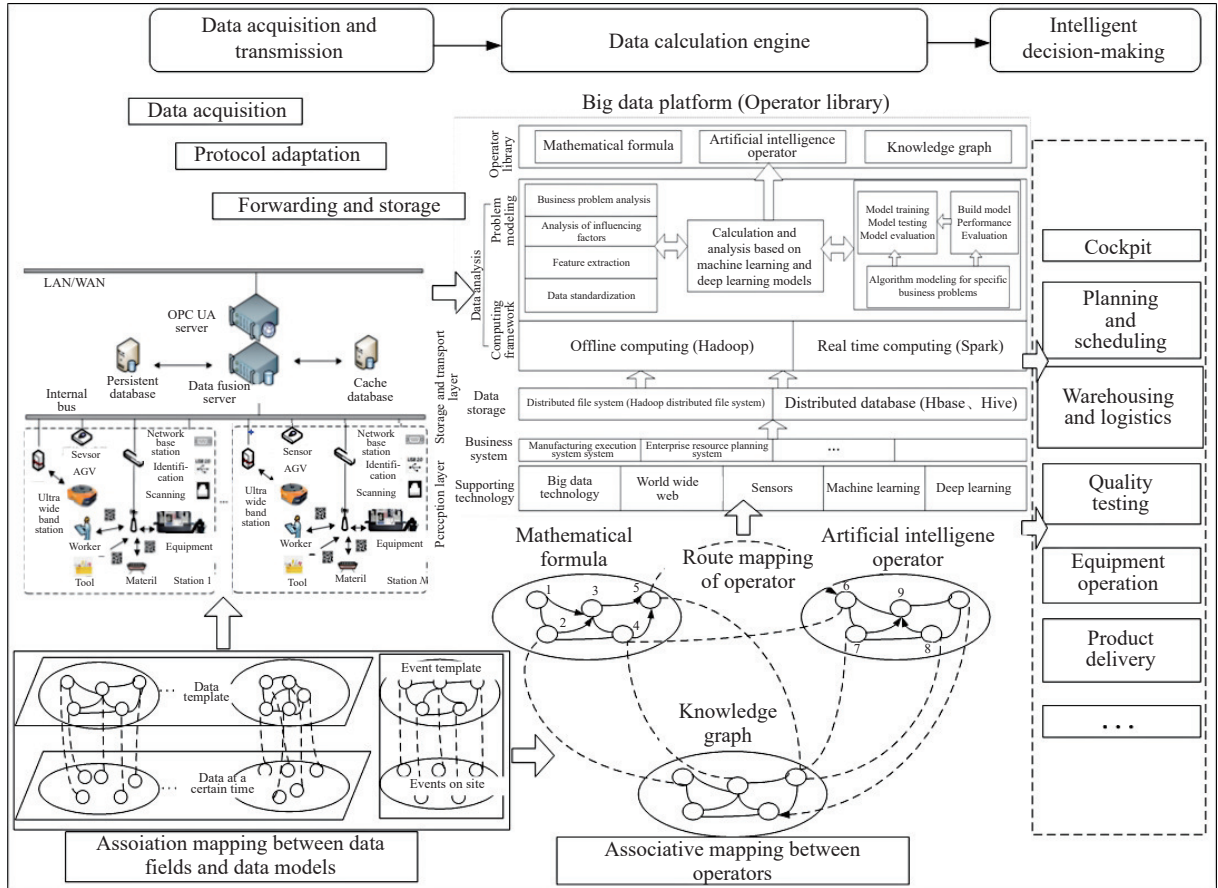


图7 特种变压器生产车间知识信息和数字孪生融合模型的构建

Fig.7 Fusion model of the knowledge information and digital twin in special transformer workshop

元  $F$  的第  $j$  项指标  $S_j$  的关联函数表示为:

$$\zeta_{ij} = \frac{\min_i \min_j |\sigma_{ij} - y_i| + 0.5 \max_i \max_j |\sigma_{ij} - y_i|}{|\sigma_{ij} - y_i| + 0.5 \max_i \max_j |\sigma_{ij} - y_i|} \quad (2)$$

第  $j$  项指标  $S_j$  的熵值为:  $F'_j = K \sum_{i=1}^m f_{i,j} \ln f_{i,j}$  (3)

其中,  $K = -(H_{\max})^{-1}$ ,  $H$  为不同时间周期的变压器车间运行可靠性系数的值, 其具体计算方式见公式(6),  $f_{i,j} = \zeta_{ij} / \sum_{i=1}^m \zeta_{ij}$ .

指标  $S_j$  的权重系数计算方法如公式(4)所示,

$$\omega''_j = \frac{e_j}{\sum_{j=1}^m e_j} \quad (4)$$

其中,  $e_j = 1 - F'_j$  为熵值偏差度.

融合层次分析法得到的权重  $\omega'$  和关联熵方法得到的权重  $\omega''$ , 构成复合物元信息熵综合权重为:

$$\omega_i = \frac{\omega'_i \omega''_i}{\sum_{i=1}^n \omega'_i \omega''_i} \quad (5)$$

复合物元的综合权重数列可表示为  $\bar{\omega} = \{(S_1 : \omega_1),$

$(S_2 : \omega_2), \dots, (S_n : \omega_n)\}$ , 则不同时间周期的变压器车间运行可靠性评价函数为:

$$H_i = - \sum_{j=1}^n P(\omega_j \sigma_{ij}) \ln P(\omega_j \sigma_{ij}) \quad (6)$$

其中,  $P(\omega_j \sigma_{ij}) = \omega_j \sigma_{ij} \left[ \sum_{j=1}^n \omega_j \sigma_{ij} \right]^{-1}$ .

最终, 构建了变压器车间若干周期内运行可靠性评价的复合关联熵物元  $R$ , 其中  $H_i$  代表  $T_i$  时间周期内的车间运行可靠性系数:

$$R = \begin{bmatrix} T & T_1 & T_2 & \dots & T_i & \dots & T_m \\ H & H_1 & H_2 & \dots & H_i & \dots & H_m \end{bmatrix} \quad (7)$$

现从特种变压器生产车间的计划调度、生产执行、设备运行、质量检验、物料配送、环境监测、能源消耗 7 个域, 人、机、料、法、环 5 个要素进行分析, 选取了 10 个典型核心指标, 并为指标的重要性进行标度. 以某个月的变压器车间运行历史数据为例, 如表 1 所示,  $S_1$  到  $S_{10}$  分别代表了计划达成率、平均节拍、产线平衡率、设备综合效率 (Overall equipment effectiveness, OEE)、平均修复时间 (Mean time to repair, MTTR)、平均无故障工作时间 Mean Time Between Failure, MTBF)、一次校

表 1 某月特种变压器车间的运行指标历史数据

Table 1 Historical data of special transformer workshop for a month

Time	$S_1/\%$	$S_2/\text{min}$	$S_3/\%$	$S_4/\%$	$S_5/\text{min}$	$S_6/\text{h}$	$S_7/\%$	$S_8/\%$	$S_9$	$S_{10}/\%$
$T_1$	85	350	92	65	60	100	93	70	3	100
$T_2$	90	340	96	67	60	100	95	98	5	99
$T_3$	95	340	95	66	55	100	95	100	4	100
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
$T_i$	95	335	97	70	57	101	96	100	3	100
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
$T_{30}$	96	330	97	71	50	101	95	100	3	100

验合格率、物料配送及时率、安灯报警次数和人员出勤率 10 个指标,  $T_i$  代表指标量值对应的时间. 采用九标度法根据专家经验对 10 个指标进行标度, 标度结果采用集合表示为  $B=\{(S_1: 9), (S_2: 3), (S_3: 7), (S_4: 8), (S_5: 6), (S_6: 5), (S_7: 6), (S_8: 8), (S_9: 6), (S_{10}: 5)\}$ . 由公式 (1) ~ (7) 计算得到复合

$$R = \begin{bmatrix} T & T_1 & T_2 & \dots & T_i & \dots & T_{30} \\ H & 1.32304308633086 & 2.50113855494051 & \dots & 3.46708471358999 & \dots & 3.4401979709751 \end{bmatrix} \quad (8)$$

通过上述模型, 不仅能够实时监测某一时间周期的车间系统运行可靠性, 展示跨越多个周期的车间系统运行可靠性变化趋势, 还能够若干历史周期的可靠性评分基础上, 基于大数据回归预测实时推理未来任意时刻的车间系统运行可靠性指数, 车间运营人员可以提前预知异常趋势并采取相应调控措施, 加强车间的态势感知和以虚控实能力, 助力智能化决策.

### 5 变压器数字化生产车间数字孪生系统实现

根据本研究提出的特种变压器车间新型数字孪生体系架构, 基于“5 维度-4 视角”模型和 Unity3D、大数据计算平台等核心引擎开发了变压器车间数字孪生平台, 利用主流三维建模技术绘制了层次化的车间数字三维模型, 集成了数据采集与监视控制系统 (Supervisory control and data acquisition, SCADA)、制造执行系统 (Manufacturing execution system, MES)、仓储管理系统 (Warehouse management system, WMS)、质量管理系统 (Quality management system, QMS)、AGV、工业互联网等现有的业务系统和平台. 同时, 采用智能传感器和智能网关对车间关键设备运行数据、车间环境监测数据等数据进行自动化采集和传输. 基于本文提出的变压器车间数字孪生建模表达方法、变压器车间知识信息和数字孪生融合方法以及变压器车间孪生系统运行可靠性分析模型, 完整地构建了特种变压器

物元信息熵的主观权重、客观权重和综合权重, 权重分析结果如表 2 所示.

在表 1 某月特种变压器车间的运行指标历史数据和表 2 各指标参数权重的基础上, 利用公式 (6) 的计算原理, 得到了变压器车间某 30 d 内的运行可靠性系数矩阵  $R$ , 如公式 (8) 所示.

生产车间数字孪生系统, 通过数字孪生虚拟空间的数字模型实时监测物理车间的运行数据, 基于智能调度模型实时调控现场运行, 如图 8 所示.

依据本文提出的仿生树生长的知识信息和数字孪生融合方法, 首先, 建立了变压器车间多维多尺度的监控指标体系. 然后, 在各类监控指标数据和原始运行大数据的基础上, 基于支持向量机、随机森林决策、K 最邻近 (K-Nearest neighbor, KNN) 聚类计算、卷积神经网络等机器学习和深度学习车间机理模型, 在 Spark 大数据平台展开计算, 对生产车间进行全流程、全要素、全周期的分析预测. 例如, 基于本文提出的复合物元信息熵模型,

表 2 复合物元信息熵权重

Table 2 Information entropy weight of the composite matter element

Index	Subjective weight	Correlation entropy weight $\omega''$	Comprehensive weight $\omega$
$S_1$	14.028	8.572	11.98
$S_2$	6.245	8.765	5.45
$S_3$	10.95	7.499	8.18
$S_4$	12.481	13.081	16.27
$S_5$	9.394	27.682	25.91
$S_6$	7.819	6.513	5.07
$S_7$	9.391	6.881	6.44
$S_8$	12.485	6.513	8.1
$S_9$	9.388	8.364	7.82
$S_{10}$	7.819	6.129	4.77

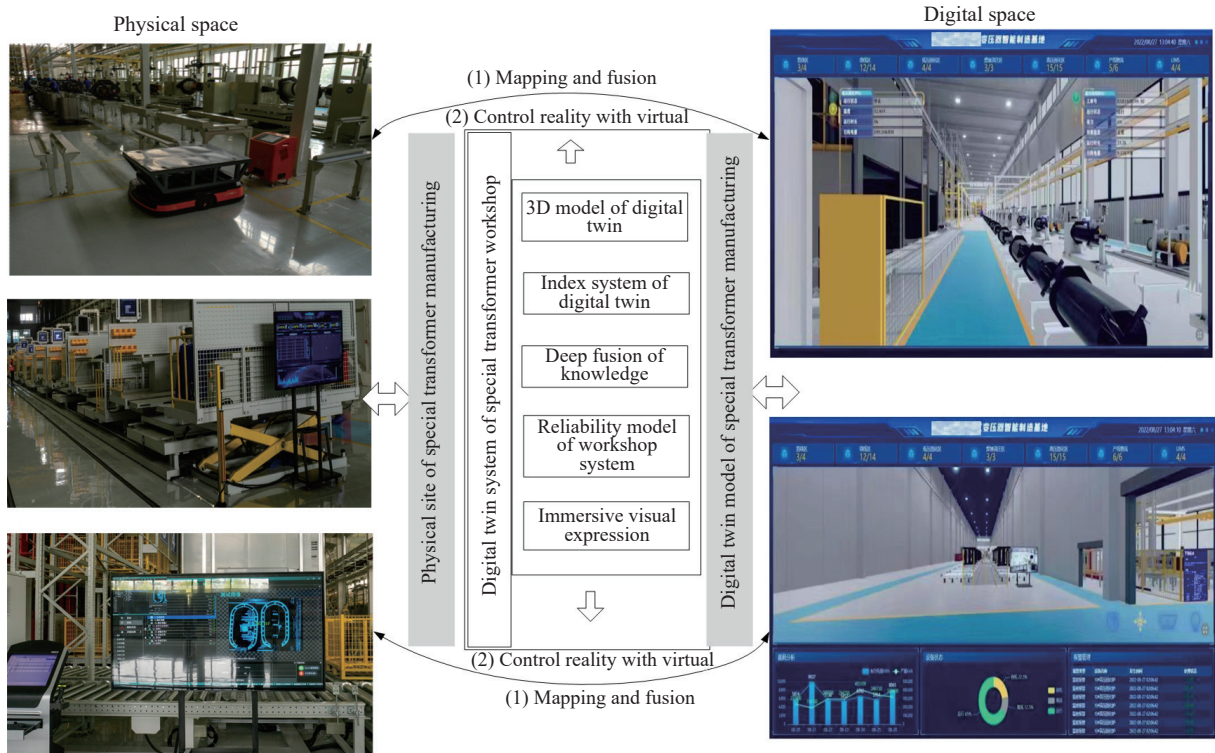


图8 特种变压器生产车间数字孪生系统

Fig.8 Digital twin system of the special transformer workshop

实时分析车间系统运行的可靠性指数,并对未来时刻的系统可靠性进行预测,提前识别异常并采取相应调整策略.在指标监控和大数据挖掘应用的基础上,开发了特种变压器生产车间数字孪生驾驶舱,通过大数据BI可视化报表和悬浮窗图等形式能够分层次、跨时空、可视化地分析展示车间级、产线级、工位级和设备级等不同结构层级,以及计划调度、生产执行、仓储物流、质量检验、设备运行等不同业务环节的实际状况,基于数字孪生应用实现了变压器车间的多维度、实时化监控,车间运行数据和趋势一旦发生异常,调度人员可以及时捕捉并处理异常,如图9所示.

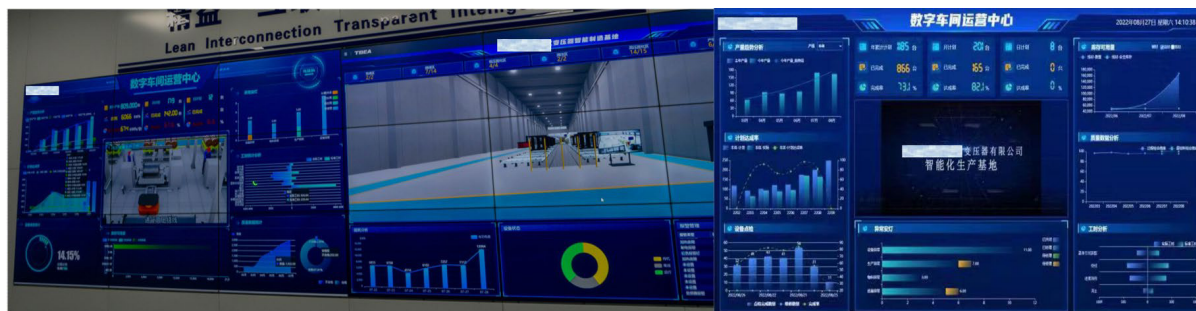
为进一步提升特种变压器车间的可视化、透明化和智能交互能力,根据本文提出的基于深度沉浸式三维可视技术的新型可视化表达方法,开发了特种变压器车间的数字孪生可视化3D漫游,借助新型智能化交互界面设备,工作人员可以通过屏幕点击事件、语音语义识别等方式,自动锁定关注焦点,实现在虚拟空间对车间现场的实时掌控和调度.如图10所示,通过车间3D漫游可以逼真反映变压器车间的设备、人员和建筑的布局,实时展示工位的设备监测信息、工单任务和检验信息等,还可以通过虚拟模型对生产设备运行和加工程序下发进行远程控制.

## 6 结论

(1) 分析了特种变压器生产车间生产离散程度高、业务逻辑和工艺流程复杂的特点,针对变压器生产车间实时管控困难、调度决策不精准、运行监控不直观的缺陷,基于数字孪生的技术和理念系统地展开了相关研究,提出了一套全新的特种变压器生产车间数字孪生系统构建方法.

(2) 在数字孪生“5维度-4视角”标准模型的基础上,融合高性能算力引擎和深度沉浸式可视化技术,详细分析和阐述了特种变压器数字孪生系统的建模开发和可视化表达方法.为解决特种变压器车间知识信息与数字孪生融合的问题,仿生树生长基本原理完成了数字孪生车间指标体系的形式化建模,提出了一种将特种变压器车间知识信息与数字孪生深度融合的方法,实现了变压器车间泛在运行数据向高维知识信息的转化.为准确反映和定量描述变压器车间整体实际运行态势,提出了一种基于复合物元信息熵的数字孪生系统运行可靠性分析模型,实现了车间运行可靠性的实时分析预测.

(3) 最后,结合上述特种变压器生产车间数字孪生系统的构建方法和模型,开发了变压器生产车间数字孪生原型系统,并在车间现场验证了本文所提方法的可行性和有效性.该方法对变压器



Digital twin cockpit of special transformer workshop



Analysis of planning, scheduling and manufacturing execution



Analysis of equipment operation performance



Statistics and analysis of warehousing and logistics



Monitoring of key equipments' parameters

图 9 特种变压器数字孪生车间多维多尺度实时监控

Fig.9 Multidimensional and multiscale, real-time monitoring of the special transformer digital twin workshop



图 10 特种变压器数字孪生车间深度沉浸式可视化 3D 漫游

Fig.10 Deep immersion visualization: 3D walkthrough of special transformer digital twin workshop

生产车间的数字孪生系统构建和智能化管控具有较好的参考价值。

参 考 文 献

[1] Negri E, Fumagalli L, Macchi M. A review of the roles of digital twin in CPS-based production systems. *Procedia Manuf*, 2017, 11: 939

[2] Tao F, Liu W R, Zhang M, et al. Five-dimension digital twin mode and its ten applications. *Comput Integr Manuf Syst*, 2019, 25(1): 1

(陶飞, 刘蔚然, 张萌, 等. 数字孪生五维模型及十大领域应用. *计算机集成制造系统*, 2019, 25(1): 1)

[3] Tao F, Zhang H, Qi Q L, et al. Ten questions towards digital twin: Analysis and thinking. *Comput Integr Manuf Syst*, 2020, 26(1): 1 (陶飞, 张贺, 戚庆林, 等. 数字孪生十问: 分析与思考. *计算机集成制造系统*, 2020, 26(1): 1)

[4] Tao F, Zhang C Y, Qi Q L, et al. Digital twin maturity model. *Comput Integr Manuf Syst*, 2022, 28(5): 1267 (陶飞, 张辰源, 戚庆林, 等. 数字孪生成熟度模型. *计算机集成制造系统*, 2022, 28(5): 1267)

[5] Li H, Wang H Q, Liu G, et al. Concept, system structure and operating mode of industrial digital twin system. *Comput Integr Manuf Syst*, 2021, 27(12): 3373 (李浩, 王昊琪, 刘根, 等. 工业数字孪生系统的概念、系统结构与运行模式. *计算机集成制造系统*, 2021, 27(12): 3373)

[6] Qi Q L, Tao F, Hu T L, et al. Enabling technologies and tools for digital twin. *J Manuf Syst*, 2021, 58: 3

[7] Wu Y, Chen X, Lyu F, et al. Guest editorial: Convergence of digital twin and 6G enabled edge intelligence: Theories, algorithms and applications. *China Commun*, 2023, 22(2): III

- [8] Schroeder G N, Steinmetz C, Pereira C E, et al. Digital twin data modeling with AutomationML and a communication methodology for data exchange. *IFAC PapersOnLine*, 2016, 49(30): 12
- [9] Ding K, Zhang X D, Zhou G H, et al. Digital twin-based multi dimensional and multi-scale modeling of smart manufacturing spaces. *Comput Integr Manuf Syst*, 2019, 25(6): 1491  
(丁凯, 张旭东, 周光辉, 等. 基于数字孪生的多维多尺度智能制造空间及其建模方法. *计算机集成制造系统*, 2019, 25(6): 1491)
- [10] Zhang C, Zhou G H, Xiao J C, et al. Multi-dimensional and multi-scale modeling and edge-cloud collaborative configuration method for digital twin manufacturing cell [J/OL]. *Computer Integrated Manufacturing Systems* (2021-06-01) [2022-09-26]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20210601.0907.004.html>.  
(张超, 周光辉, 肖佳诚, 等. 数字孪生制造单元多维多尺度建模与边—云协同配置方法 [J/OL]. *计算机集成制造系统* (2021-06-01) [2022-09-26]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20210601.0907.004.html>)
- [11] Wei Y X, Guo L, Cheng L X, et al. Research and implementation of digital twin workshop based on real-time data driven. *Comput Integr Manuf Syst*, 2021, 27(2): 352  
(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. *计算机集成制造系统*, 2021, 27(2): 352)
- [12] Hou Z H, He W P. Modeling and control of digital twin-based aircraft assembly state inspection robot. *Comput Integr Manuf Syst*, 2021, 27(4): 981  
(侯正航, 何卫平. 基于数字孪生的飞机装配状态巡检机器人的建模与控制. *计算机集成制造系统*, 2021, 27(4): 981)
- [13] Wu P Y, Guo Y, Huang S H, et al. Visual real-time monitoring method for discrete manufacturing workshop based on digital twin. *Comput Integr Manuf Syst*, 2021, 27(6): 1605  
(吴鹏兴, 郭宇, 黄少华, 等. 基于数字孪生的离散制造车间可视化实时监控方法. *计算机集成制造系统*, 2021, 27(6): 1605)
- [14] Jiang H F, Ding G F, Xiao T, et al. Digital twin evolution model and its applications in intelligent manufacturing [J/OL]. *Journal of Southwest Jiaotong University* (2021-07-06) [2022-09-26]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1277.U.20210706.1043.004.html>  
(江海凡, 丁国富, 肖通, 等. 数字孪生演进模型及其在智能制造中的应用 [J/OL]. *西南交通大学学报* (2021-07-06) [2022-09-26]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1277.U.20210706.1043.004.html>)
- [15] Sun X M, Liu S M, Shen X W, et al. Digital twin driven intelligent assembly method for high precision products. *Comput Integr Manuf Syst*, 2022, 28(6): 1704  
(孙学民, 刘世民, 申兴旺, 等. 数字孪生驱动的高精密产品智能化装配方法. *计算机集成制造系统*, 2022, 28(6): 1704)
- [16] Hu X, Liu J H, Zhang C B, et al. Digital twin based management method and application for the complex products assembly process. *Comput Integr Manuf Syst*, 2021, 27(2): 642  
(胡兴, 刘检华, 庄存波, 等. 基于数字孪生的复杂产品装配过程管控方法与应用. *计算机集成制造系统*, 2021, 27(2): 642)
- [17] Ma J, Wang Y C, Zhao M, et al. Visualization management and control methods of production cell based on digital twin. *Comput Integr Manuf Syst*, 2021, 27(5): 1256  
(马靖, 王译晨, 赵明, 等. 基于数字孪生的生产单元可视化管控. *计算机集成制造系统*, 2021, 27(5): 1256)
- [18] Liu J, Zhuang C B, Liu J H, et al. Online prediction technology of workshop operating status based on digital twin. *Comput Integr Manuf Syst*, 2021, 27(2): 467  
(刘娟, 庄存波, 刘检华, 等. 基于数字孪生的生产车间运行状态在线预测. *计算机集成制造系统*, 2021, 27(2): 467)
- [19] Deng J X, Wei S F, Shi X L, et al. Digital twin-based distribution management system. *Comput Integr Manuf Syst*, 2021, 27(2): 585  
(邓建新, 卫世丰, 石先莲, 等. 基于数字孪生的配送管理系统研究. *计算机集成制造系统*, 2021, 27(2): 585)
- [20] Xu M J, Liu S M, Sheng H, et al. Burr control of weak rigid drilling process driven by digital twin [J/OL]. *Computer Integrated Manufacturing Systems* (2021-06-18) [2022-09-26]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20210617.1730.014.html>  
(许敏俊, 刘世民, 沈慧, 等. 数字孪生驱动下的弱刚性钻削毛刺控制 [J/OL]. *计算机集成制造系统* (2021-06-18) [2022-09-26]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20210617.1730.014.html>)
- [21] Wang Y, Wei Y H, Liu G X. Gear box operation condition evaluation based on digital twin. *Modul Mach Tool Autom Manuf Tech*, 2022(7): 48  
(王炎, 魏永合, 刘光昕. 基于数字孪生的齿轮箱运行状态评估. *组合机床与自动化加工技术*, 2022(7): 48)
- [22] Tuegel E J, Ingrassia A R, Eason T G, et al. Reengineering aircraft structural life prediction using a digital twin. *Int J Aerosp Eng*, 2011, 2011: 1
- [23] Uhlemann T H J, Lehmann C, Steinhilper R. The digital twin: realizing the cyber-physical production system for industry 4.0. *Procedia CIRP*, 2017, 61: 335
- [24] Söderberg R, Wärmefjord K, Carlson J S, et al. Toward a digital twin for real-time geometry assurance in individualized production. *CIRP Ann*, 2017, 66(1): 137
- [25] Zhang H, Qi Q L, Tao F. A multi-scale modeling method for digital twin shop-floor. *J Manuf Syst*, 2022, 62: 417
- [26] Liu L Y, Du H X, Wang H F, et al. Construction and application of digital twin system for production process in workshop. *Comput Integr Manuf Syst*, 2019, 25(6): 1536  
(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. *计算机集成制造系统*, 2019, 25(6): 1536)
- [27] Tao F, Zhang M, Cheng J F, et al. Digital twin workshop: A new paradigm for future workshop. *Comput Integr Manuf Syst*, 2017, 23(1): 1  
(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. *计算机集成制造系统*, 2017, 23(1): 1)
- [28] Wang X C, Bai Q S, Wang P, et al. Research progress on digital twin modeling for micro milling. *Aeronaut Manuf Technol*, 2021, 64(20): 56  
(王旭初, 白清顺, 王鹏, 等. 微细铣削的数字孪生建模技术研究进展. *航空制造技术*, 2021, 64(20): 56)