

DOI: 10.13382/j.jemi.B2206032

面向生产线全生命周期的数字孪生模型应用^{*}

程 昊¹ 王红军^{1,2} 杨俊峰¹ 张明亮³

(1. 北京信息科技大学机电工程学院 北京 100192; 2. 高端装备智能感知与控制北京市国际科技合作基地 北京 100192;
3. 北京无线电测量研究所 北京 100854)

摘 要:针对传统生产方式存在的管理成本大,生产效率低的问题,为实现智能化生产,设计了基于数字孪生技术的生产线全生命周期管理应用框架。首先基于物理生产线的多元数据,通过建模技术构建了生产线数字孪生模型,分别从生产线的规划阶段、调试阶段、运行阶段,为物理实体生产线提供仿真预演分析、连通调试、生产状态监控、数据可视化等服务。通过孪生模型对实际生产线的规划到运行阶段进行指导和改进,使企业生产线平衡率提高了6.84%,年产量增加了792件,结果表明该方法有效。

关键词: 数字孪生; 全生命周期; 仿真预演; 连通调试; 状态监控
中图分类号: TP391.9 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.50

Application of digital twin model for the whole life cycle of production line

Cheng Hao¹ Wang Hongjun^{1,2} Yang Junfeng¹ Zhang Mingliang³

(1. School of Mechanical Electrical Engineering, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China;
2. Beijing International Science Cooperation base of High-End Equipment Intelligent Perception and Control, Beijing 100192, China;
3. Beijing Institute of Radio Measurement, Beijing 100854, China)

Abstract: Aiming at the problems of high management cost and low production efficiency in traditional production methods, in order to realize intelligent production, the application framework of production line lifecycle management based on digital twinning technology is designed. First, based on the multiple data of physical production line, the digital twinning model of production line is built through modeling technology, including the planning stage, commissioning stage and operation stage of production line, provide simulation preview analysis, connection debugging, production status monitoring, data visualization and other services for the physical entity production line. The twin model was used to guide and improve the planning and operation of the actual production line. The balance rate of the production line increased by 6.84% and the annual output increased by 792 pieces. The results showed that the method was effective.

Keywords: digital twin; full life cycle; simulation rehearsal; connection commissioning; status monitoring

0 引 言

薄壁零件被广泛应用于航空航天、军工等领域^[1],其生产过程的稳定性与产品的质量保证密切相关。一方面由于薄壁零件在装配过程易发生形变,另一方面中目前大部分的薄壁单元装配线采用人工和自动化设备相结合

的方式进行生产,存在产品一致性差,产品合格率低等问题。研究和开发薄壁零件装配生产线线的信息化、智能化转型,对提升生产过程稳定性以及生产效率具有重要意义。

数字孪生能够实现物理实体与虚拟模型之间的精准映射^[2]。对此,国内外学者进行了相关研究。Zhang等^[3]探索了数字孪生技术在车间设备管理方面的应用。

陶飞等^[4]提出了数字孪生五维模型的概念。同时许多学者对数字孪生的关键技术及其应用领域进行了深入探索^[5-8]。上述研究多侧重于数字孪生的理论层面,在孪生模型构建方面,Liu 等^[9]提出了一种云制造模式下制造资源的共享策略,通过构造函数来对不同粒度的制造资源进行分类,并利用聚类算法对物理资源进行虚拟映射。冯昊天等^[10]通过建模技术、OPC UA 技术实现了柔性生产线生产过程的状态感知。仇晓黎等^[11]以螺线管装配生产线为例,详细论述了其物理模型、行为模型、信息决策模型的 3 层建模机制。Garg 等^[12]提出了一个机器人数字孪生模型,通过创建真实环境映射的数字孪生模型,可以在线、远程编程,控制机器人。庞景月等^[13]通过构建航天器数字孪生模型,丰富了航天器故障样本数据并证明了其有效性。黄文德等^[14]将北斗与数字孪生结合设计了智能电网运维平台。孙国锋等^[15]搭建了模型与上位机间的通信,实现了组合秤的数字孪生。在孪生数据处理方面,熊伟杰^[16]从数据交互方式、孪生数据、孪生模型的角度分析了数字孪生车间的数据交互过程,并设计了数字孪生车间平台。Cai 等^[17]将传感器采集数据融合到数字孪生机床模型中,提高了物理机床的稳定性和可靠性。Negri 等^[18]提出了利用语义数据模型对来自生产现场的物理数据和操作数据进行分类存储,以实现特定行为孪生体的灵活启动。魏一雄等^[19]通过获取实时

的生产数据驱动孪生模型运动,实现了物理车间与虚拟车间的孪生同步运动。方圆等^[20]通过将孪生模型与生产现场的 PC 工控机建立连接,实时获取生产数据驱动孪生模型运动,实现了对加工设备运行状态的监测。

以上研究多数倾向于面向生产线的单一设备或单一环节,未能全面的揭示数字孪生在生产线规划、调试、运行阶段的应用。本文以薄壁壳体装配生产线为对象,论述了面向生产线全生命周期的数字孪生模型应用。

1 某薄壁壳体零件装配线数字孪生模型构建

本文提出一种面向生产线全生命周期的数字孪生模型应用系统架构,如图 1 所示,首先基于物理生产线的多元数据信息,通过一系列虚拟建模技术构建虚拟生产线,并将其应用于生产线规划、调试、运行 3 个阶段。在规划阶段,通过模型仿真预演,对工艺方案验证、生产能力分析、生产平衡优化。在调试阶段,借助模型对 PLC 程序和机器人程序虚拟调试,降低现场调试的时间。在运行阶段,开发了服务系统实现了生产线的实时工况监控和生产过程数据的可视化。通过数字模型对实际生产线建设过程进行指导和改进,提高生产质量。

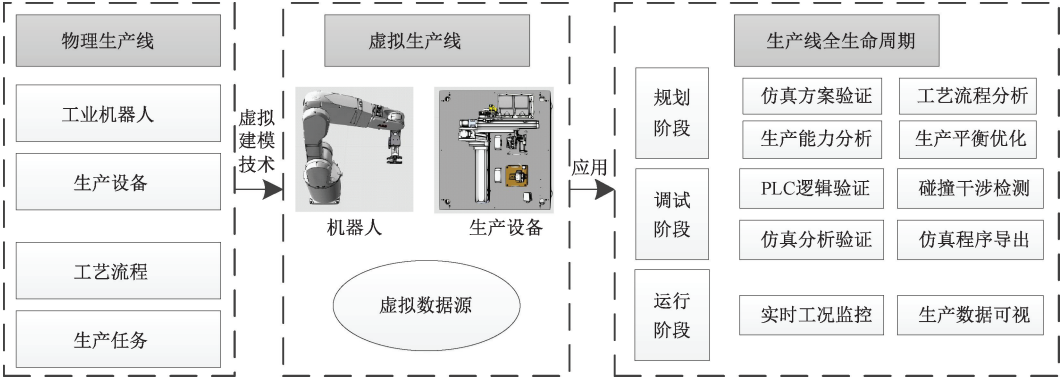


图 1 面向生产线全生命周期的数字孪生模型应用系统架构
Fig. 1 Digital twin model application system architecture
for the full life cycle of production line

实现数字孪生的关键在于建立能从多个维度真实反应物理生产环境的数字模型,针对某薄壁壳体零件装配线对其进行数字孪生模型构建。在横向上对生产线中的各制造资源进行建模需求分析,在纵向上对生产线各制造资源的几何物理、行为、状态、规则等特性进行映射,保证孪生模型可以真实的表达物理模型在现实世界中的特定运动。

如图 2 所示为构建的装配线数字模型,其中物理几

何模型可以通过 SolidWorks 三维建模软件构建,并将几何模型导入 VC(visual components)软件对模型中的各运动关节进行提取创建,使运动机构可以执行物理实体同样的行为。而后对每个运动关节添加对应的控制器,并创建相应的动作驱动信号及接口。同时对其各运动关节增加运动关系约束和运动范围约束,保证数字模型正常合理的工作。

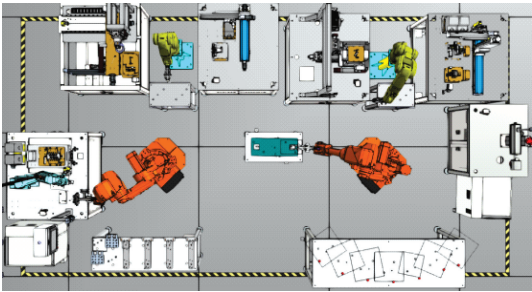


图 2 薄壁零件壳体装配线数字孪生模型

Fig. 2 Digital twin model of shell assembly line of thin walled parts

2 面向生产线全生命周期的数字孪生模型应用

2.1 面向“生产线-规划阶段”的数字孪生模型应用

基于已构建的薄壁零件壳体装配线数字孪生模型，对生产线规划阶段的工艺路线仿真分析，验证工艺路线及方案的合理性。通过对生产能力进行分析，确保满足生产任务需求。

1) 工艺流程分析

薄壁壳体装配线由上料区、打标工位、匹配块装配工位、间隙测量工位、连接器安装工位、电性能测试工位、点胶工位、下料区以及 4 台负责搬运物料、协助装配的工业机器人组成。在生产设计阶段可以基于构建的薄壁壳体装配线数字模型对工艺布局、路线、方案进行仿真验证。薄壁单元壳体工艺流程如图 3 所示，薄壁壳体经过打标、匹配块安装、匹配块间隙测量、连接器安装、电性能测试、底板合装、点胶、二次电性能测试完成后下线。

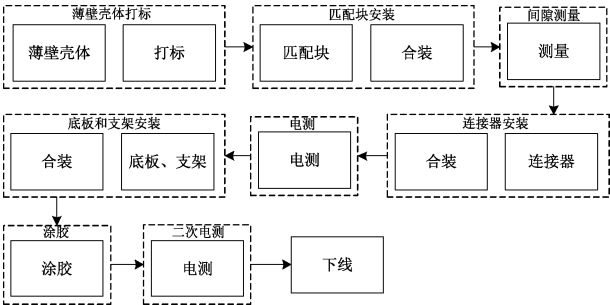


图 3 薄壁壳体装配线工艺流程

Fig. 3 Process flow of thin-walled shell assembly line

2) 生产能力分析

依据薄壁壳体装配线数字孪生模型对生产线的不同班制和不同搬运情况下的生产能力进行仿真预演分析。如表 1 所示，该装配线的瓶颈工位为匹配块安装工位，在

生产线三班制工作情况下，产能最高为每月生产 882 件产品，平均 48.97 min 生产 1 件产品。如表 2 所示，使用单工件搬运方式产能较高，每月可生产 882 件产品。通过上述生产能力分析，确定选择单工件搬运方式在三班制工作情况下，可以满足生产任务需求。

表 1 装配线不同班制下产能表

Table 1 Capacity of assembly line under different shift system

班制	月产能	瓶颈工位	生产节拍/min
一班制	289	匹配块安装	49.83
二班制	584	匹配块安装	49.32
三班制	882	匹配块安装	48.97

表 2 装配线不同搬运情况下产能对比表

Table 2 Capacity Comparison of Assembly Line under Different Handling Conditions

班制	搬运方式	月产能	生产节拍/min
三班制	单工件	882	48.97
三班制	托盘搬运	778	55.52

2.2 面向“生产线-调试阶段”的数字孪生模型应用

基于已构建的薄壁零件壳体装配线数字孪生模型，通过连通性协议，实现孪生模型与 PLC 程序之间的双向通信，借助数字孪生模型对 PLC 程序和机器人程序进行虚拟调试。在虚拟环境中对机器人进行轨迹规划仿真、碰撞干涉检测，通过仿真分析验证机器人在工作过程中不会发生碰撞或干涉。基于已开发的机器人后处理模块将模型中机器人动作脚本转换为机器人程序，在经过测试后，可应用在企业生产现场，降低生产现场实机调试带来的风险。

1) PLC 与机器人信号配置

在虚拟环境中 PLC 信号通过 Siemens PLCSIM Adv 虚拟 PLC 来模拟，将 PLC 程序中的变量以 EXCEL 表格的形式导出，并将 PLC 变量名称与机器人对应的动作信号接口进行绑定。VC 软件集成了西门子的 S7 通信协议，可以将 PLC 信号进行提取模拟真实环境下 PLC 驱动的机器人动作。如表 3 所示为部分通信变量对，完成数据接口与 PLC 变量对应后，可实现由 PLC 信号驱动虚拟模型运动。

2) 仿真虚拟调试

基于上述机器人动作设定以及 PLC 信号配置，通过虚拟模型仿真模拟机器人在真实物理空间的作业任务，对机器人的工作空间与轨迹进行分析，当机器人发生干涉事件时，存在控制程序不合理，导致多设备同时在相同区域工作发生的设备干涉，可以由通信过程的信号映射发现 PLC 程序错误位置，并对控制程序进行修正。当机

表 3 PLC 变量与机器人通信信号连通

Table 3 Connection between PLC variables and robot communication signals

变量名称	数据类型	数据接口	数据地址
PLC-Robot 允许去打螺钉位	布尔	326	%Q1104.1
PLC-Robot 允许离开打螺钉位	布尔	327	%Q1104.2
PLC-Robot 允许去夹拿产品位	布尔	328	%Q1105.1
PLC-Robot 允许离开夹拿产品位	布尔	329	%Q1105.2
PLC-Robot 允许放置待测产品	布尔	330	%Q1105.3
PLC-Robot 允许拿去测试完成产品	布尔	331	%Q1106.1
PLC-Robot 允许放置测试完成产品	布尔	332	%Q1106.2

器人发生碰撞问题时,是由于机器人点位设置不合理,可以通过修正点位或者增加过度点位解决碰撞问题。通过虚拟环境下的机器人仿真运行验证所设程序的合理性。其机器人碰撞干涉检测过程如图 4 所示。

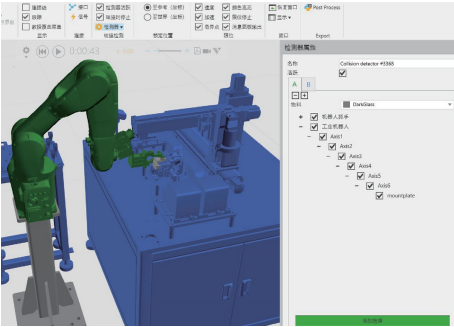


图 4 工业机器人仿真过程中的碰撞检测

Fig. 4 Collision detection in industrial robot simulation

3) 机器人程序导出

VC 软件提供了开放的 Python API 接口,基于 Python 脚本开发的机器人后处理模块,可以将虚拟模型中的机器人动作转换为真实机器人编程语言。再经过虚拟调试过程验证程序无误后,可基于后处理模块,将模型机器人动作脚本转换为机器人代码格式,在经过示教器测试程序无误后可应用于生产现场。

4) 生产现场应用

在完成虚拟生产线下的 PLC 程序以及机器人动作调试后,可以将 PLC 程序下载至实体 PLC 中。将已生成的机器人程序下载至机器人示教器中进行测试验证,确保机器人可以正常工作且动作轨迹与仿真过程保持一致。通过西门子 S7 通信协议将机器人与 PLC 间的信号关联,完成后运行物理生产线。在实验过程中,机器人的运行情况如图 5 所示,运行期间机器人各关节运行状况平稳,且在物理生产线中没有发生碰撞、干涉等事故,取料过程中的抓取点位较为准确,降低了实机调试的工作量与风险。

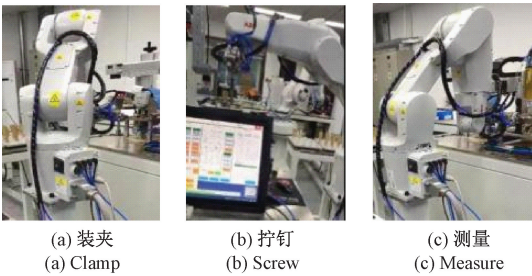


图 5 物理环境中机器人作业

Fig. 5 Robot operation in physical environment

2.3 面向“生产线-运行阶段”的数字孪生模型应用

基于已构建的薄壁零件壳体装配线数字孪生模型,通过连通性协议实现物理模型与虚拟模型间的双向同步运行,对生产线运行中的各设备工作状况进行监控,同时开发了服务系统实现对生产线的监控、数据的存储与分析、为生产线的智能化管理提供基础。

物理模型与孪生模型间实时准确的数据交互是实现精准映射的前提,需要实时采集物理装配线中多源异构数据并将其实时传输到对应的虚拟装配线中,使虚实系统在同一时间处于相同的工作状态,从而达到对物理装配线的映射和监控。在实时映射过程中,其连通技术需要支持大量数据的实时传输,保证其通信稳定性以及实时性。工业以太网通信协议的数据传输速率相对较高,可以满足虚实精准映射的需求。其虚实同步映射过程如图 6 所示,基于西门子 S7 通信协议将物理装配线与虚拟装配线中各制造资源的属性信息、行为动作以及状态等信号进行绑定,通过实时对物理装配线进行状态感知,并将所接受的数据传输到虚拟装配线,驱动孪生模型进行运动,达到物理生产线与虚拟生产线的孪生同步运行的效果,从而实现对生产现场的实时监控。

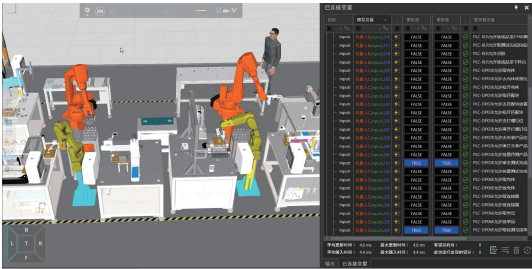


图 6 数据驱动的生产线数字孪生模型

Fig. 6 Digital twin model of data driven production line

3 应用案例

3.1 生产平衡优化

本文以最小化装配线节拍、最小化装配线平滑指数、最小化装配能耗为目标建立装配线优化的数学模型,模

型中的相关符号含义如表4所示。

表4 符号含义

符号	描述
k	工作站总数
n	作业任务总数
CT	装配线节拍时间
t_i	产品在作业任务 i 上的作业时间
c_{ip}	机器人 p 完成作业任务 i 所需的装配能耗
x_{ik}	若作业任务 i 分配到工站则 $k=1$, 否则 $k=0$
y_{kp}	若机器人 p 分配到工站则 $k=1$, 否则 $k=0$

所提数学模型如下：

$$\min CT = \max \left(\sum_{k=1}^k t_i \right)$$

(1)

$$\min SI = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (CT - t_i)^2}{k}}$$

(2)

$$\min Cost = \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K \sum_{p=1}^P c_{ip} x_{ik} y_{kp}$$

(3)

$$\sum_{k=1}^K x_{ik} = 1, i = 1, 2, \dots, N$$

(4)

$$\sum_{k=1}^K kx_{ik} \leq \sum_{k=1}^K kx_{jk}, i, j \in N$$

(5)

其中,式(1)为最小化装配线节拍;式(2)为最小化平滑性指数;式(3)为最小化装配能耗。式(4)表示1个作业任务只能分配到1个工站;式(5)表示*i*是*j*的紧前工序。

通过上述公式描述,在 MATLAB 软件中进行数学建模,得出各工位的最优装配时间,基于该企业装配线基本情况及相关数据,建立仿真预演模型,对优化方案进行验证。

如图7(a)、(b)所示优化前后,OP03 工作站繁忙率稳定在 92.42%左右,这是由于装配时间过长且作业任务不可拆解,OP06 工作站繁忙率由 26.94%提升到 36.3%。由表5可知,优化前的年产量是 10 582 件产品,优化后的年产量达到 11 374 件,装配线的平衡率由 63.13%提升到 69.97%,装配线变得更加平衡。

表5 产量和平衡率对比表

时间	年产量	装配线平衡率
优化前	10 582	63.13%
优化后	11 374	69.97%

3.2 服务系统开发

如图8所示,开发了薄壁壳体零件装配线数字孪生服务系统,通过传感装置对物理装配线进行状态感知以

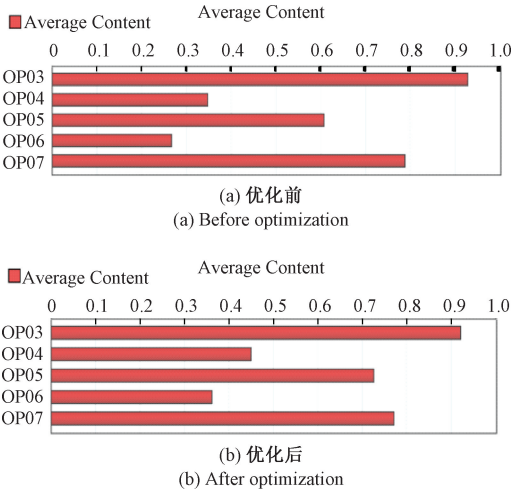


图7 优化前后各工站繁忙率
Fig. 7 Busy rate of each station before and after optimization

及二次开发获取虚拟装配线中的生产数据,将获取到的实时装配过程数据传输给服务系统。直观展示生产过程中的各工位状态、产能、生产瓶颈、设备利用率等指标参数。

4 结 论

本文以薄壁壳体装配生产线为研究对象,提出了面向生产线全生命周期的数字孪生模型应用方法,将数字孪生技术应用于生产线的设计规划阶段、调试阶段、运行阶段。其中在设计规划阶段,依托数字孪生模型对生产线进行工艺方案验证、生产能力分析、生产平衡优化。在调试阶段,通过将 PLC 程序与数字孪生模型连通,验证 PLC 程序的合理性。同时在验证机器人轨迹无误后,基于后处理模块将机器人程序导出,经过示教器验证后应用于生产现场,降低现场调试的时间。在运行阶段,开发了生产线数字孪生服务系统实现了生产线的实时工况监控和生产过程数据的可视化。将数字孪生技术应用于生产线的全生命周期管理,可提高生产线的智能化水平,该研究成果已经应用于某企业薄壁单元装配车间,后续将在此研究基础上对其系统进行深入开发,为企业的智能化管、控服务提供支持。

参考文献

[1] 岳彩旭,张俊涛,刘献礼,等. 薄壁件铣削过程加工变形研究进展[J]. 航空学报,2022,43(4):106-131.
YUE C X, ZHANG J T, LIU X L, et al. Research progress on machining deformation of thin-walled parts during milling [J]. Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica, 2022,43 (4): 106-131.
[2] SIEmens. The Digital Twin [M]. Advance,2015.



图 8 薄壁单元零件装配线数字孪生服务系统

Fig. 8 Digital twin service system of thin wall unit parts assembly line

[3] ZHANG M, ZUO Y, TAO F. Equipment energy consumption management in digital twin shop-floor: A framework and potential applications [C]. 2018 IEEE 15th International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC). IEEE, 2018:1-5.

[4] 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 F, LIU W R, ZHANG M, et al. Digital twin five dimensional model and its applications in ten fields [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25 (1): 1-18.

[5] 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.

TAO F, ZHANG M, CHENG J F, et al. Digital twin workshop-a new mode of future workshop operation [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23 (1): 1-9.

[6] 田凌,刘果,刘思超. 数字孪生与生产线仿真技术研究[J]. 图学学报,2021,42(3):349-358.

TIAN L, LIU G, LIU S CH. Research on digital twin and production line simulation technology [J]. Journal of Graphics, 2021, 42 (3): 349-358.

[7] 赵琦,郭晓燕,赵源. 数字孪生在卫星星座系统中的应用探索 [J]. 国外电子测量技术, 2021, 40 (2): 121-128.

ZHAO Q, GUO X Y, ZHAO Y. Application of digital twin in satellite constellation system [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2021, 40 (2): 121-128.

[8] 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.

LIU D T, GUO K, WANG B K, et al. Overview and prospect of digital twin technology [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39 (11): 1-10.

[9] LIU N, LI X P, SHEN W M. Multi-granularity resource virtualization and sharing strategies in cloud manufacturing [J]. Journal of Network and Computer Applications, 2014, 46: 72-82.

[10] 冯昊天,王红军,常城,等. 基于数字孪生的柔性生产线状态感知[J]. 电子测量与仪器学报,2021,35(2):17-24.

FENG H T, WANG H J, CHANG CH, et al. State perception of flexible production line based on digital twins [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35 (2): 17-24.

[11] 仇晓黎,朱睿,幸研,等. 螺旋管装配生产线数字孪生建模技术[J]. 计算机集成制造系统,2022,28(6):1696-1703.

QIU X L, ZHU R, XING Y, et al. Digital twin modeling technology for solenoid assembly line [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2022, 28 (6): 1696-1703.

[12] GARG G, KUTS V, ANBARJAFARI G. Digital twin for FANUC robots: Industrial robot programming and simulation using virtual reality[J]. Sustainability, 2021, 13(18):10336.

[13] 庞景月,赵光权. 数字孪生驱动多算法自适应选择的空电源系统故障检测[J]. 电子测量与仪器学报,2022,36(6):91-99.

- PANG J Y, ZHAO G Q. Fault detection of space power supply system based on adaptive selection of multiple algorithms for digital twin drive [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36 (6): 91-99.
- [14] 黄文德, 张晓飞, 庞湘萍, 等. 基于北斗与数字孪生技术的智能电网运维平台研究[J]. 电子测量技术, 2021, 44(21): 31-35.
- HUANG W D, ZHANG X F, PANG X P, et al. Research on smart grid operation and maintenance platform based on Beidou and digital twin technology [J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44 (21): 31-35.
- [15] 孙国锋, 丁金华. 一种数字孪生背景下的组合秤仿真技术[J]. 电子测量技术, 2021, 44(12): 144-148.
- SUN G F, DING J H. A combined scale simulation technology under the background of digital twins [J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44 (12): 144-148.
- [16] 熊伟杰. 基于 OPC UA 的数字孪生车间数据集成研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2020.
- XIONG W J. Research on data integration of digital twin workshop based on OPC UA [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020.
- [17] CAI Y, STARLY B, COHEN P, et al. Sensor data and information fusion to construct digital-twins virtual machine tools for cyber-physical manufacturing [J]. Procedia Manufacturing, 2017, 10: 1031-1042.
- [18] NEGRI E, FUMAGALLI L, CIMINO C, et al. FMU-supported simulation for CPS digital twin [J]. Procedia Manufacturing, 2019, 28: 201-206.
- [19] 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.
- WEI Y X, GUO L, CHEN L X, et al. Research and implementation of digital twin workshop based on real-time data drive [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2021, 27 (2): 352-363.
- [20] 方圆, 刘江, 吕瑞强, 等. 基于数字孪生的设备加工过程监测技术研究[J]. 航空制造技术, 2021, 64(4): 91-96.
- FANG Y, LIU J, LYU R Q, et al. Research on monitoring technology of equipment processing based on digital twins [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64 (4): 91-96.

作者简介



程昊, 2020 年于北京信息科技大学获得学士学位, 现为北京信息科技大学硕士研究生, 主要研究方向为智能制造与数字孪生技术。

E-mail: 2667946225@qq.com

Cheng Hao received his B. Sc. degree from Beijing Information Science and Technology University in 2020. He is now a M. Sc. candidate at Beijing Information Science and Technology University. His main research interests include intelligent manufacturing and digital twin technology.



王红军(通信作者), 2005 年于北京理工大学获得博士学位, 现为北京信息科技大学教授, 主要研究方向为高端装备智能感知与控制、智能制造与数字孪生、大数据分析。

E-mail: wanghj86@163.com

Wang Hongjun(Corresponding author), received her Ph. D. degree from Beijing University of Technology in 2005. She is now a professor of Beijing Information Science and Technology University. Her main research interests include intelligent perception and control of high-end equipment, intelligent manufacturing and digital twin, big data analysis.