

doi: 10.7690/bgzd.2026.04.003

# 基于实时数据驱动的装配车间数字孪生系统

徐曼菲, 谢竺妍, 邱枫, 刘治红

(中国兵器装备集团自动化研究所有限公司智能制造事业部, 四川 绵阳 621000)

**摘要:** 针对目前火工品产线数字化程度普遍不高的问题, 提出虚实车间与物理车间装备-模型-监控同步方法。以某国内火工品装配车间为应用对象, 设计其装配车间数据采集、数据管理、数字化建模、功能集成应用 4 层数字孪生架构, 围绕装配车间数据实时采集、装配车间数字化孪生模型构建、虚实车间与物理车间装备-模型-监控同步关键技术进行详细的阐述, 并基于 Unity3D 软件进行数字孪生系统的开发与实现, 验证所提方案的正确性和有效性。应用结果表明: 该技术实现了装配车间数字孪生体的构建, 为火工品车间生产过程数字孪生的实现提供了技术解决方案, 具有一定参考价值。

**关键词:** 数据驱动; 装配车间; 数字化建模; 数据采集

**中图分类号:** TB497; TP301.6 **文献标志码:** A

## Digital Twin System of Assembly Shop Based on Real-time Data-driven

Xu Manfei, Xie Zhuyan, Qiu Feng, Liu Zhihong

(Department of Intelligent Manufacture, Automation Research Institute Co., Ltd. of  
China South Industries Group Corporation, Mianyang 621000, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that the digitalization degree of initiating explosive device production line is generally not high, the equipment-model-monitoring synchronization method of virtual and real workshop and physical workshop is proposed. Taking a domestic initiating explosive device assembly workshop as the application object, the four-layer digital twin architecture of data acquisition, data management, digital modeling and function integration application is designed, and the key technologies of real-time data acquisition, digital twin model construction and equipment-model-monitoring synchronization between virtual and physical workshops are described in detail. Based on Unity3D software, the digital twin system is developed and implemented to verify the correctness and effectiveness of the proposed scheme. The application results show that the technology realizes the construction of digital twin in assembly workshop, and provides a technical solution for the realization of digital twin in the production process of initiating device workshop, which has a certain reference value.

**Keywords:** data-driven; assembly workshop; digital modeling; data acquisition

## 0 引言

随着信息技术的发展, 智能化越来越引起人们的关注, 在“中国制造 2025”与“工业 4.0”的大背景, 智能制造的应用研究如火如荼地展开<sup>[1]</sup>。随着制造业智能化的发展, 数字孪生技术作为实现智能制造重要技术, 成为了当前研究的热点方向<sup>[2]</sup>。车间数字孪生系统作为传统工厂向智能工厂升级的重点技术改造对象, 可以通过数字孪生与车间物理实体的深度融合, 实现车间的智能管控。数字孪生的引入可以使传统的车间管控系统更加具有开放性和可扩展性, 易于新一代信息技术的融入<sup>[3-4]</sup>。

为实现车间生产过程的数字孪生, 提高生产过程的透明度并优化生产过程, 笔者开展装配车间数据实时采集、数字孪生模型构建、虚实车间与物理车间装备-模型-监控同步等技术研究, 为车间生产

过程监控与优化提供基础服务, 形成基于数字孪生的火工品装配过程质量的精准、智能管控模式。

## 1 国内外现状

西门子高级副总裁 Zvi Feuer 先生认为: 生产管控中如果生产进展不顺利, 由于整个制造过程很复杂, 很难迅速地找出问题。在车间管控中引入数字孪生, 可以通过数字孪生对不同的生产策略进行仿真分析和评估, 结合工业大数据分析, 快速地找出生产问题。通过数字孪生仿真分析整个生产系统的绩效, 通过执行策略优化, 实现资源利用的最大化, 确保所有工序上的所有人都尽其所能, 实现企业盈利能力的最大化<sup>[5]</sup>。

针对数字孪生车间的构建, 国内学者在数字孪生车间体系架构理论、虚拟模型构建、产线数据采集、孪生车间监控系统等方面进行了深入的研究。

收稿日期: 2024-12-08; 修回日期: 2025-01-08

第一作者: 徐曼菲(1991—), 女, 重庆人, 硕士。

陶飞等<sup>[6]</sup>把数字孪生概念应用到了数字孪生车间管控上,提出数字孪生车间的概念,明确数字孪生车间由车间服务系统、物理车间、车间孪生数据和虚拟车间组成,阐述了数字孪生技术在车间控制系统中的运行流程及运行机制。柳林燕等<sup>[7]</sup>建立了车间生产过程数字孪生系统体系架构,并对基于统一架构的车间生产过程物理实体数据获取以及车间生产运行实时映射方法进行了描述。陈振等<sup>[8]</sup>提出一种飞机数字孪生装配车间架构,并对物理装配车间数据的实时感知与采集、虚拟装配车间建模与仿真运行技术、数字孪生与数据驱动的装配车间生产管控等关键技术进行了研究。

## 2 技术架构

根据装配车间加工特点,搭建整体的数字化车间模型库,实现物理车间与虚拟车间深度融合。笔者从数据产生、采集、存储和应用的数据流为主线,分析了装配车间数字孪生模型各层次的内涵和组成,基于 Unity3D 与 3DMax 的混合技术,建立了 4 层装配车间数字孪生平台架构,如图 1 所示。

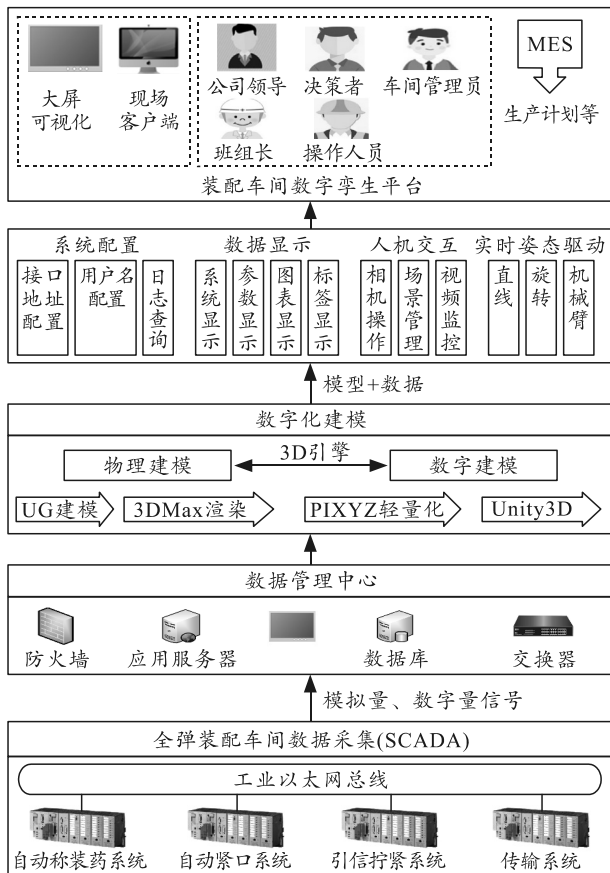


图 1 技术架构

某火工品装配车间数字孪生架构采用 4 层设计,分别是装配车间数据采集、数据管理、数字化

建模、功能集成应用。

1) 数据采集层: 主要包含自动称装药、自动紧口、引信拧紧、传输系统所涉及的现场工艺数据、物料数据、机构动作数据。

2) 数据管理层: 主要包含服务器、防火墙、数据库、交换机。

3) 数字化建模层: 主要包含针对装配整线物理模型,开展 UG 建模、3DMax 模型渲染、PIXYZ 轻量化、Unity3D 实时映射。

4) 集成应用层: 包含与业务相关的系统配置、数据显示、人机交互功能、实时姿态驱动,数据和模型通过统一的 Unity3D 引擎进行驱动。

## 3 关键技术途径

### 3.1 装配车间数据实时采集

在装配生产线的生产过程中要获取大量的现场数据以及进行高质量的传输,建立互联互通互操作机制,首先根据网络通信协议实现物理层中不同层次不同类型的系统和设备进行网络模型连接,根据设备的数据字典和设备行规等实现对传输数据的一致解析,由于装配生产线控制系统采用西门子 PLC 控制系统。主控系统采用西门子 400 系列 CPU,子系统采用 1 500 系列及 1 200 系列 CPU,搭配 ET200SP 和 ET200MP 分布式 IO 系统,配以相应的 IO 输入输出模块控制主控柜,通过 PROFINET 接口进行网络通信,该系列 PLC 具有标准的以太网接口,故采集方式选用 TCP/IP 方式,通过部署在工控网的数据采集软件模块实现现场设备的数据采集,采集架构如图 2 所示。

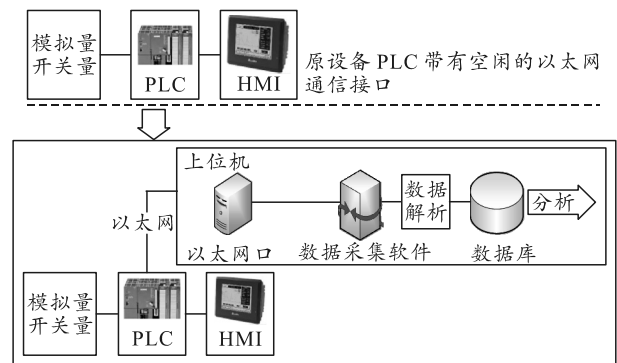


图 2 弹装配生产线数据采集架构

在采集软件中配置采集驱动程序,整线 IP 地址分布如表 1 所示,运行 cmd 完成网络的 ID 匹配,即可获取到相应的装配产线数据源信息,该装配线通过按照动作机构需求进行拆分成 36 类设备共计 600 余项信息,以机械气爪为例。

表 1 采集信息表(部分)

序号	状态	地址
1	设备状态	DB90.DBX0.0
2	设备故障状态	DB15.DBX0.1
3	机械手 X 位移	DB15.DBD26
4	机械手 Y 位移	DB15.DBD30
5	机械手 Z 位移	DB15.DBD34
6	1 号上料车缺料	Q200.5
7	2 号上料车缺料	Q200.6
8	药筒抓取气爪 1 松开	Q20.0
9	药筒抓取气爪 1 夹紧	Q20.1
10	药筒抓取气爪 2 松开	Q20.2
11	药筒抓取气爪 2 夹紧	Q20.3
12	药筒抓取气爪 3 松开	Q20.4
13	药筒抓取气爪 3 夹紧	Q20.5
14	药筒抓取气爪 4 松开	Q20.6
15	药筒抓取气爪 4 夹紧	Q20.7

### 3.2 装配车间数字化孪生模型构建

建立装配 3 维数字化车间专用模型库，支持数

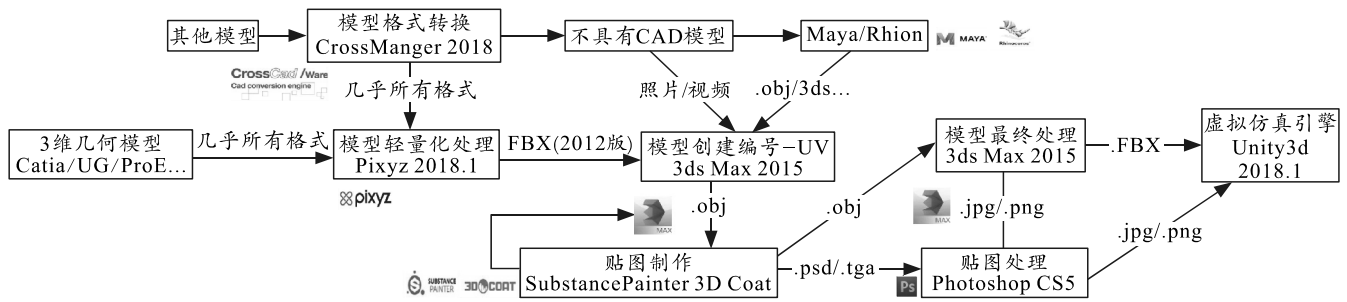
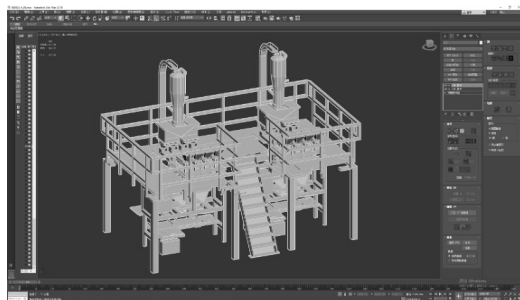


图 3 几何 3 维模型构建流程

将 3 维模型主要参数录入模型库中，仿真平台可调用模型库中 3 维模型，随后自动生成 3 维几何模型，完成生产线 3 维建模。以自动称装药单元模型为例，如图 4 所示。



(a) 原始模型



(b) 处理后模型

图 4 自动称装药单元数字化建模

字车间的快速构建，通过构建虚拟传感网络和指令通道，利用 Unity3D 在可视的条件下进行数字孪生的场景布局和数据驱动的设计，将物理空间中的物理实体映射到数字空间中的虚拟体上，形成物理实体数据驱动下具有执行展示能力的数字孪生体。

装配车间 3 维仿真模型库的建立主要包括模型的形状、颜色、材质、装配关系、位置、尺寸等，孪生模型几何物理模型的建模范围包括装配产线中所有的设备和工具，根据其外观形状以及组合方式，对设备和工具建立其 3 维模型，包括装配、检测设备、工装夹具、机械臂等，采用 3 维图形软件，可利用 Deep Exploration、3Dvia Composer 等对其进行轻量化处理，然后在导入到 3DMax 中进行模型 UV 展开和漫反射、凹凸贴图制作，如图 3 所示。

基于预设体技术实现，通用外部 Unity3D 编辑器进行动态模型预设计及编辑，实现对装配生产线单元模型(设备、机器人等)及通用模型(气缸、电机、传送带、传感器等)的预制及保存，主要包括运动组件、碰撞组件、对象控制组件等。典型控制组件是实现机器人、模组定义的组件集合。3 维静态物体通过绑定类型定义组件和关节定义组件，可以实现机器人、模组自定义。针对父臂带动自臂的运动，采用反向动力学插件 Final IK，如图 5 所示。

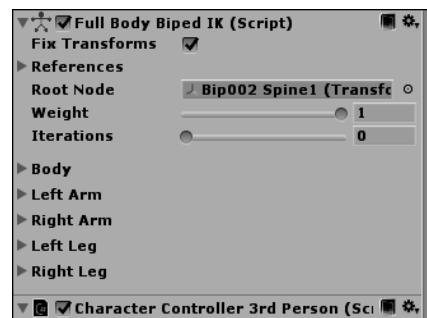


图 5 机械臂控制组件配置

主要步骤如下：

- 1) 给模型添加该组件脚本。
- 2) 填入根节点。

3) 要控制某个 IK 就增加权重, 运行时就出现有一个立方体控制器, 通过它可控制对应的 IK。

4) 脚本控制:

```
public FullBodyBipedIK ik;
//枚举变量, 自己选择
public FullBodyBipedEffector effector;
//给右手 IK 控制点赋位置, 即让右手移动到指
```

定点

```
ik.solver.leftHandEffector.position=
```

```
leftHandTarget.position;
```

```
//给指定部位赋目标
```

```
ik.solver.GetEffector(effector).position=
target.position.
```

### 3.3 虚实车间与物理车间装备-模型-监控同步

#### 3.3.1 实时映射驱动机制

虚拟车间与物理车间的实时映射主要利用数据库作为中间件, 如图 6 所示。

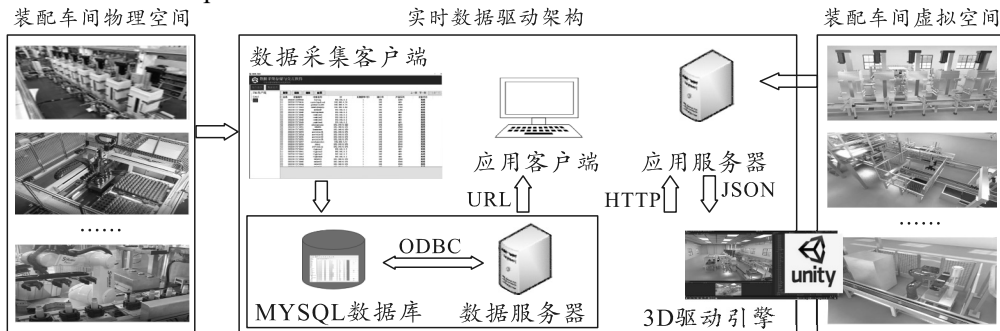


图 6 虚实空间实时映射架构

由数据采集客户端通过远程连接设备, 将设备上传感器所采集到的数据信息实时的存储到本地计算机的 MySQL 数据库中, 数字孪生系统连接数据库进行实时数据的获取, 通过脚本二次开发建立虚拟 WebSocket 通信接口, 通过数据协议解析后进行模型机构的绑定, 实现设虚实空间的一一映射, 支

撑功能模型的有机连接与运行。

针对装配设备主要是包含了装配设备和辅助设备, 其中装配设备包含了药筒上料单元、自动称装药机单元等多个单元, 辅助设备主要为转线机械手, 其数字空间映射及驱动信号如表 2 所示。

表 2 装配数字空间映射及驱动信号(部分)

设备名称	数字空间模型映射	驱动信号	驱动信号名称
药筒上料单元		MacMotion YTZQ01R	药筒抓取气爪 1 松开
		MacMotion YTZQ01C	药筒抓取气爪 1 夹紧
		MacMotion YTZQ02R	药筒抓取气爪 2 松开
		⋮	⋮
自动称装药单元		MacMotion YTZQ04C	药筒抓取气爪 4 夹紧
		MacMotion ZYZK1	装药罩口升降气缸(TURE=下降)
		MacMotion CLT1	出料推托盘气缸
合格品剔除防爆机械人单元		⋮	⋮
		MacMotion THC1	推缓存托盘气缸
		MacMotion YTZQ01R	药筒抓取气爪 1 松开
		MacMotion YTZQ01C	药筒抓取气爪 1 夹紧
		MacMotion YTZQ02R	药筒抓取气爪 2 松开
MacMotion YTZQ01R	药筒抓取气爪 1 松开		

利用数据库进行数据的耦合, 现实设备运行过

程中将数据实时的更新存放在对应的数据库中, 在

实时可视化的数字孪生系统中需要进行设备的查看时，连接数据库，生成相应的 SQL 语句，从数据库中获取所需要提取的设备驱动信息，并对数据进行判断，将最新数据值读取出来后赋值到相应设备的驱动函数中，虚拟设备根据数据改变当前的运行状态，并利用 Unity 引擎将结果在系统中实时渲染出来，从而实现数据驱动下的实时可视化。

### 3.3.2 驱动程序架构设计

1) 配置装配控制系统采集服务端 Message。定义装配车间控制系统中表征的数据量 Message，基于 C#Winform 封装为一个服务端 Form1，按照前期的装配数据采集表进行映射信号的配置，统一采用 Json 格式进行数据传输推送，通过设置按钮可手动

设置推送数据频率，配置过程如图 7 所示。



图 7 装配车间数据推送服务端界面

2) 配置装配车间模型驱动程序。驱动程序架构如图 8 所示。

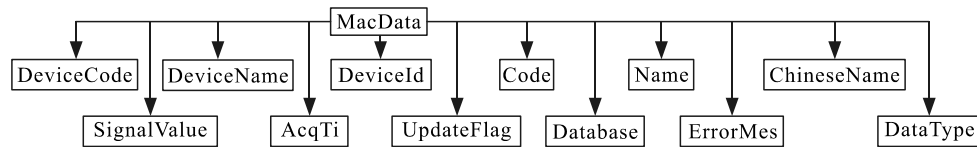


图 8 驱动程序架构及说明

以 WebSocketClient 作为驱动中心，MacData 和 DataDeviceInfo 作为与采集封装服务端数据 Message 同步的桥梁。首先，根据传输数据格式，将传输数据解析为 MacData 类数组，然后，根据数组内容使用 DataDeviceInfo 中的方法对 DataDevice 进行修改，其中 DataDevice 映射所有的装配生产线数字化表征信息，通过 {GET, SET} 方法对模型进行 DataMac00X 类下的参数的可读可写，DataMac00X 下定义了：设备状态、标签、动作 3 类属性，最后通过在 DataDriveXX1 中调用驱动函数 DataDriveFun00X()，实现数据的向数字孪生系统的批量实时推送。

3) 数字孪生车间模型-数据同步绑定。在 Unity 开发环境中，将整个装配车间场景定义为 SceneData，将所有的驱动函数 DataDrive 逐一绑定到场景对象上，同时动态标签附属在 3 维模型的信息显示框，位置跟随模型移动，显示生产现场对象当前运行的一些状态信息，展示 3 维模型对象的静态属性和动态属性信息。图 9 为装备-模型-监控同步配置界面，基于图形化界面引擎，采用 GUI 界面组件进行监控界面设计，针对全局或局部产线参数进行关键数据的标签显示和实时动作展示，实现虚拟可视化系统的视频流显示、3 维动作监控等交互操作。

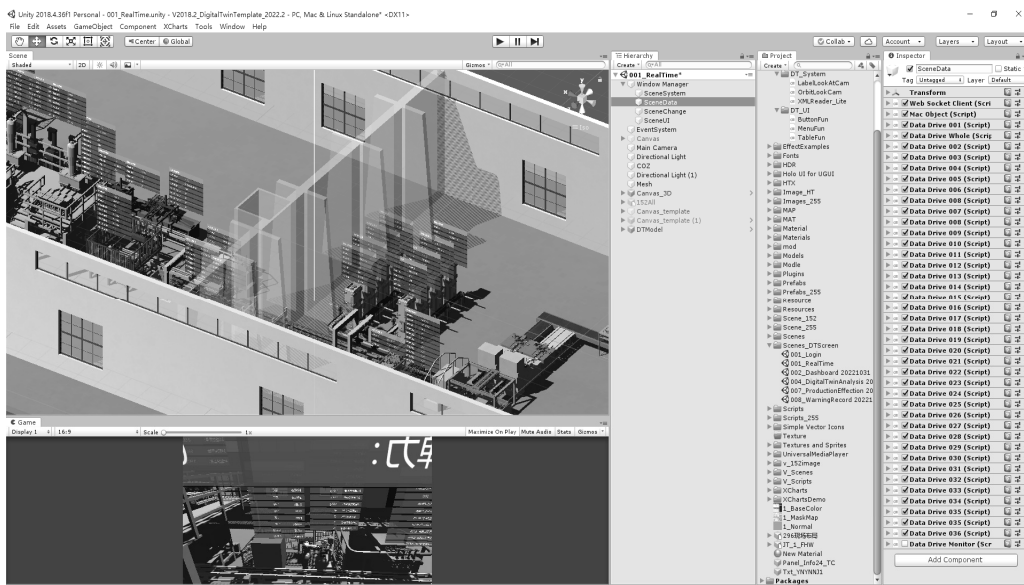


图 9 装备-模型-监控同步配置界面

## 4 系统实现

在上述驱动建立的基础上, 基于 Unity2018.4.36f1 软件开发平台, 图形化 3D 引擎, 采用 GUI 界面组件进行界面设计, 通过构建车间实时数据通信与孪生模型的同步快速通道, 设计命令同步及异构数据库同步机制, 以车间运行活动过程为主线, 进行数据获取、通信建立、数据传输及实时数据同步模型。

数据处理在实时映射过程中, 数字孪生系统获取现实设备数据时, 通过脚本 `WebSocketClient` 一个专用的线程与远程设备进行连接, 读取设备信息, 从而构建其上下指令通道, 将读取到的设备信息传递到数字孪生虚拟设备的驱动函数中, 并写入 MySQL 数据库进行持久化存储, 数据库与 Unity 虚拟开发平台的通信接口的连接, Unity 连接 MySQL 数据库时需要用到 `I18N.dll`、`I18N.CJK.dll`、`I18N.West.dll` 和 `MySQL.Data.dll` 动态链接库文件的支持, 将这些动态链接库放入到 Unity 资源文件夹下, 通过 `SendMessage` 方法调用, 将采集到的实时数据发送给模型驱动程序 `DataDriveFun00X`, 实现装配车间运行过程信息与模型的多线程低时延同步实现虚拟监控系统的信息显示、功能流程等交互操作, 实现车间不同粒度的属性全粒度匹配, 实现物理车间与孪生车间实时同步映射, 数字孪生平台效果如图 10 所示。



图 10 装配车间数字孪生平台

装配车间数字孪生平台以动态实时的方式通过

数据和孪生模型对实体车间装备状态进行远程分析、诊断、展示, 重点解决了装配车间质量一致性水平不高、影响质量的关键工装状态掌控难、车间综合效率低等问题, 形成了基于数字孪生的弹药装配过程质量的精准、智能管控模式, 全面提升产品质量一致性、车间资源管控精准性, 促进装配质量管控从被动模式向自主智能管控模式转变。

## 5 结束语

笔者依据智能车间建设“先数字化、后孪生化”的原则, 在某装配生产车间自动化、数字化的基础上, 通过“虚实融合、以虚控实”的手段, 对产品、资源、设备等物理车间模型与数字空间模型进行一一映射, 形成装配车间数字孪生模型, 设计了面向装配车间资源数字孪生 4 层架构体系, 提出了虚实车间与物理车间装备-模型-监控同步方法, 通过定制的驱动数据程序架构, 实现物理空间数据向装配数字孪生系统的批量实时送。

## 参考文献:

- [1] 汪林生. 虚实融合技术在智能制造中的应用研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2018.
- [2] 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[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(12): 18.
- [3] 杨一帆, 邹军, 石明明, 数字孪生技术的研究现状分析[J]. 应用技术学报, 2022, 22(2): 176-184.
- [4] 张新生. 基于数字孪生的车间管控系统的设计与实现[D]. 郑州: 郑州大学, 2018.
- [5] 庄存波, 刘检华, 熊辉. 产品数字孪生体的内涵、体系结构及其发展趋势[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(4): 753-768.
- [6] 陶飞, 张贺, 戚庆林, 等. 数字孪生模型构建理论及应用[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(1): 1-15.
- [7] 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.
- [8] 陈振, 丁晓, 唐健钧, 等. 基于数字孪生的飞机装配车间生产管控模式探索[J]. 航空制造技术, 2018, 61(12): 46-50.