

基于数字孪生的电子装备车间智能 管控方法

史建成，林晨阳，李明贵

（中国电子科技集团公司第二十九研究所，四川 成都 610036）

摘要：数字孪生技术的应用为车间智能管控提供了新的解决途径。本文提出了基于通信策略的电子装备车间数字孪生架构，采用制造执行系统边代理的方式解决业务网和工控网数据贯通的问题。开展数字孪生车间高保真建模研究，提出面向多级管控需求和面向多类应用需求的多尺度多维度建模方法，针对多源制造信息与数字孪生模型映射的问题，提出对象级、时空级数据融合方法，探讨了孪生数据驱动下的车间智能监控、综合分析、重调度等三个应用场景和应用方法，并在电子装备车间进行了应用验证。

关键词：数字孪生；高保真建模；数据融合；车间管控；智能制造

中图分类号：TP13 **文献标志码：**A

1 引言

随着电子装备车间固有复杂性和动态复杂性的提高，其制造过程的不确定性随之增加，给制造车间管控带来很大的挑战。通过多年建设，电子装备车间在信息化、自动化水平方面有了较大的提高，但是由于电子装备制造的设备仪器种类多、工艺路线串并行共存等特点，车间管控的精细化、智能化方面仍不能满足电子装备优质高效生产的需求，成为电子装备行业亟需解决的共性问题。近年来，随着数字孪生理念和技术的兴起，将数字孪生技术应用于车间成为研究热点^[1-3]。数字孪生车间是

车间数字空间和物理空间同步映射的系统，通过在数字空间同步映射物理空间车间、设备设施、物流等状态，并通过数字空间的分析、仿真和运算，进而进行车间的优化反馈控制，使制造过程透明、有序和可控，给电子装备制造车间管控提供了新的解决途径。

国内外学者和机构在数字孪生车间领域展开了大量研究和探索。陶飞^[4]等提出了数字孪生车间架构和主要系统组成。数字孪生技术用于制造车间，可支持进行实时监控、仿真优化、运营决策等，进而实现透明化管理、低成本试错、智能化决策的目的。目前，数字孪生技术

基金项目：国家自然科学基金（52275472），四川省重大科技专项（2024ZDZX0003）

在车间的应用主要集中在虚实互联和映射机制等方面，柳林燕^[5]等阐述了加工装配车间生产过程关键要素建模、物理实体数据获取及生产运行实时映射机制。赵浩然^[6]等提出一种基于实时信息的生产车间三维可视化监控方法。物联网、人工智能技术与数字孪生的融合应用，进一步提升数字孪生在车间的价值，李浩^[7]等提出基于多智能体的工业数字孪生系统云端架构，梁野^[8]等基于工业物联网技术对车间能源进行管控，都是在此方面有益的探索。在行业应用方面，郭具涛^[9]等提出了航天领域数字孪生车间的基本组成和虚实融合的制造车间分层管控模式，陈振^[10]等提出飞机数字孪生装配车间架构，基于车间数字孪生模型以提高车间运行的效率。

本文针对电子装备车间效能持续提升的需求，提出了基于通信策略的电子装备车间数字孪生架构，研究了数字孪生车间高保真建模方法和车间数据采集与融合方法，探讨了数字孪生技术在车间的三个应用场景，最后

基于上述架构和方法构建了电子装备车间数字孪生系统，并在电子装备车间进行了应用验证。

2 电子装备数字孪生车间架构设计

电子装备制造车间在业务网和工控网采取物理隔离措施，给车间数据的传递带来很大的障碍。为了构建车间数字孪生系统，并使必要的数据能够上下贯通，本文在数字孪生车间架构基础上，提出了一种基于通信策略的电子装备车间数字孪生架构，如图 1 所示。基于 ISA-95 标准，架构分为四层。管理层实现车间的经营管理，包括 ERP 和 PLM。执行层实现车间的生产管理和执行，包括 MES 和车间数字孪生系统。控制层实现数字空间和物理空间的连接，包括自动测试系统、仓储物流系统、数据采集与监控系统等。设备层是车间生产活动的基础，构成电子装备车间的物理空间，包括测试仪器、生产车间、工位、传感器和条码设备等。

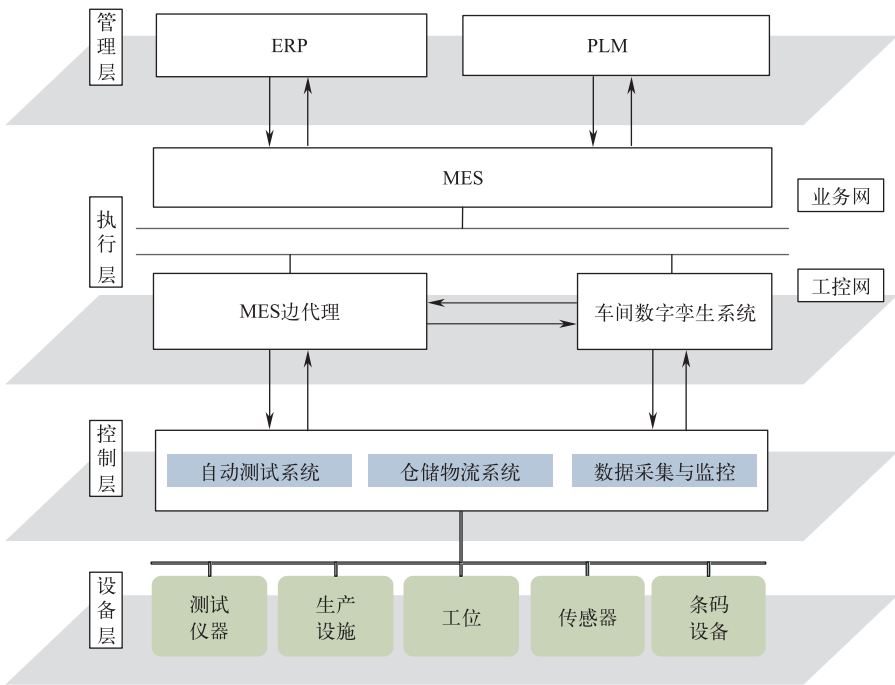


图 1 基于通信策略的电子装备车间数字孪生架构

业务网和工控网之间通过通信策略技术进行数据的双向传输，在一定程度上可解决业务网和工控网数据不通的问题。为了实现车间数字孪生系统对车间状态的同步映射，需要在工控网上构建 MES 边代理。MES 边代理是直接面向工控网的作业执行，业务网的计划、质量、

物料、设备和人员等相关管理数据将镜像到 MES 边代理，进行车间级生产过程管理和控制；并将 MES 边代理采集的进度、质量等生产执行数据通过通信策略反馈到 MES，支撑工厂级的生产决策。将控制层自动测试系统等下位机系统中状态及控制数据、传感器采集数据、管

理数据等三类数据在车间数字孪生系统中进行数据融合，驱动虚拟车间的状态更新和优化决策。构建电子装备车间数字孪生架构，建立生产数据与虚拟模型的关联映射机制，使得虚拟车间模型能够真实映射物理车间的工作进展和运行状态，从而为实现基于三维模型的全要素、全过程三维可视化监控及生产过程优化反馈控制奠定基础。

3 数字孪生车间高保真建模

车间数字孪生系统需要为车间中的各种生产设备、生产要求及生产过程建立结构层次清晰、高保真的模型。根据车间实际需求，规划车间建模的尺度，不同尺度模型的建模要求和价值也相应不同。针对每个具体尺度分别从几何、物理、行为和规则等多维度对车间进行建模，以满足模型不同的功能需求。在此基础上将各维度模型进行关联、组合与集成，从而在信息空间级联与融合为一个完整的、具备高真实度的虚拟车间模型。

3.1 面向多级管控需求的多尺度建模

车间数字孪生模型建模是一个工作量较大的过程，为了快速产生价值，所构建的数字孪生模型应服务于管控需求。通常，车间管控可分为车间整体运行态势、工位运行情况、各生产资源运行情况等层次。因此，将电子装备车间的数字空间分为车间、工位、资源三个尺度层级，各层级之间为逐层包含关系，分别与不同等级的制造实体相对应。

不同尺度的建模要点不同：①车间尺度，为了整体地映射车间的信息，车间尺度的模型重点关注车间物流、任务调度、生产态势和生产环境方面，可通过车间孪生模型，进行环境监控与分析，车间物流路线优化，生产任务排程、生产态势监控等，②工位尺度，工位是车间生产任务执行的最小生产单元，以工位为对象，对工位能力、输入输出、工位状态、所用资源等进行统一管理；③资源尺度，资源尺度主要为车间的基本生产资源，包括设备、仪器、产品和工装夹具等，在资源尺度，主要对资源的状态进行建模和管理。

通过车间、工位、资源等三个尺度进行建模，同时通过上下之间的联系，使物理生产过程中在数字模型中能够实现映射，进而在算法驱动下进行交互和仿真。

3.2 面向多类应用需求的多维度建模

以往建模方法都是从单一维度去描述车间的某个属

性，如几何建模是从几何维度描述车间几何属性，逻辑建模是从逻辑维度描述车间运行逻辑属性，信息建模是从数据维度描述车间数据属性等，而上述建模方法对构建车间数字孪生体来说都是不完备的，车间数字孪生体应具备物理车间的所有必要属性。为实现车间高度保真建模，从几何形状、物理属性、行为响应及规律规则等多方面对物理车间进行真实刻画和描述建模。

几何建模涵盖了建模对象的三维模型及零部件装配结构关系。物理建模涵盖了建模对象的速度、工作范围、温湿度和能源消耗等。行为模型涵盖了建模对象的工艺行为（如工位模型中按工艺流程完成测试工序）、与智能制造空间其他模型的竞争、协作行为模型（如确定竞争合作关系及业务协同逻辑）和故障行为（用于仪器设备健康管理的故障报警及故障诊断响应）。规则模型涵盖了车间运行过程中用到的各类推理、关联、决策规则模型，以及生产过程中的各类约束条件模型，以实现生产过程中对状态及事件在规则约束下即时响应，包括测试项匹配规则可用于推理生产排程的合理顺序，温度湿度阈值约束可用于触发报警行为。

需要指出的是上述数字孪生模型具有动态性，各模型随着其生命周期过程的演变而动态完善。具体体现在模型集内的模型数量可更新，各模型在不同阶段可以动态更新其参数或规则，实现面向不同应用的模型调用。

4 车间多源数据采集与融合

数据采集和融合是进行车间“以虚映实”的前提和基础。基于采集数据，对多源制造信息关系进行预处理，进而进行对象级、时空级数据融合，形成统一的数据服务后对外发布。对多源异构数据融合包括两个步骤。

1) 步骤 1：基于本体的对象级融合。对象级融合拟采用数据本体建模方法。将车间各要素，包括仪器设备、物料、工位等，按对象进行虚拟建模，将来自信息系统的数据和来自物理车间采集的数据进行融合。对象级的融合主要实现信息系统对要素描述和物理车间对要素描述的统一，如图 2 所示，对于具体设备，通过本体将数字模型的虚拟编码与物理空间的序列号进行关联，形成数字空间、物理空间的虚实映射。

2) 步骤 2：基于时序对准的时空数据融合。时空数

据模型是包括时间和空间要素在内的数据模型，有效记录了历史变化。针对电子装备车间数据采集的特点和数据的形式，采用基于栅格的离散格网单元列表模型。若想获得某时刻状态，只需提取相应时刻各个格网单元列表的元素。如图3所示，描述了二维空间沿着时间维演变的过程。通过切取模型中的截面，可获得时间轴上纪实数据。任何一个空间实体的演变历史都是时空立方体中一个实体。

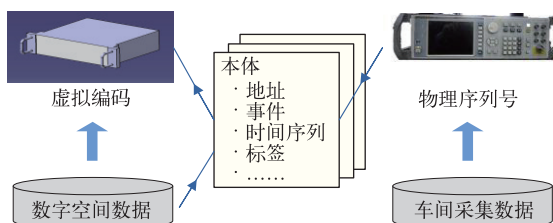


图2 基于本体的对象级融合

电子装备车间时空模型进行车间时空数据融合分析的基础，它刻画了物理车间中时空实体各组成要素的信息范畴及其相互之间的关系，是对物理车间的抽象和表示，不仅描述了物理车间空间对象随时间的变化，而且表达了特征对象随时间的变化。

基于车间数字孪生系统，将物理车间采集的相关信息和信息系统数据进行融合后，在孪生模型或者通过图表的方式进行呈现展示，支撑车间的计划、质量、设备、人员和环境等方面的优化决策。

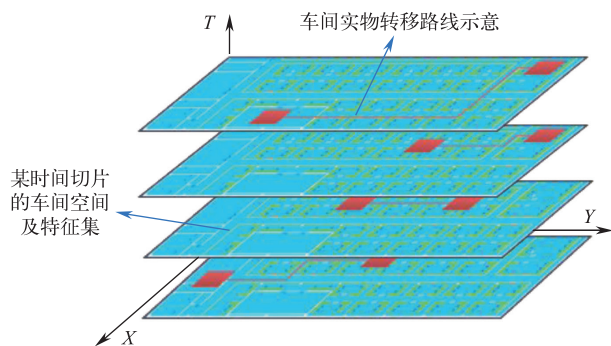


图3 电子装备车间的时空模型

5 数字孪生车间综合管控

5.1 数据驱动的车间智能监控

数字孪生车间实时运行可视化是基于数字孪生模型，在车间虚实融合数据的驱动下进行以直观、形象的方式

在虚拟环境中展现车间的工作情况。基于多尺度、多维度的车间孪生模型在不同尺度的模型上展现不同的信息。在车间尺度，进行整个车间生产任务状态、质量状态、仪器利用情况、车间温湿度、人员情况和物料齐套情况等综合监控。当状态数据触发规则模型中的相应预警条件时，则通过警示框或蜂鸣等进行告警。在工位尺度，进行工位任务进展完成度、物料齐套情况、工位运行情况等进行综合监控。在资源尺度，主要根据仪器、设施、产品和人员相应特征进行状态监控，如仪器主要进行工作状态、故障状态、空间位置的监控，以及仪器工作数据监控。

5.2 基于融合数据的车间综合运行态势分析

以提高车间的效益和管理水平、实现车间的持续改进为目标，对车间开展综合运行态势分析，以提高车间的效益和管理水平、实现车间的持续改进。可采用模糊层次分析法等方法对车间运行综合态势进行评价，通过分析车间的功能、结构和环境，根据评价的目的，按照一定的逻辑层次建立车间运行态势指标体系、车间数据分析指标。通过建立车间运行态势指标体系，将车间多层面的运行状态指标计算公式集成管理形成算法库，结合历史数据和实时数据进行指标运算，通过实时数据流更新指标计算，根据评判分数确定车间整体及各评价维度的运行情况，将实时动态更新的指标以可视化方式展示，实现车间实时运行态势分析，支撑车间持续改进决策。

5.3 基于孪生数据的重调度

电子装备车间由于定制化、多品种、小批量的特点，生产过程中经常有扰动发生，包括上游物料未齐套、设备资源不到位及设备仪器故障等情况，对生产计划造成干扰，影响每日生产任务的完成。基于孪生数据的重调度是在MES排程计划的基础上，实时采集物理车间的扰动情况，对车间当前的排程计划进行局部和小范围的调整，使生产扰动带来的不利影响尽可能降低。采用遗传算法作为重调度算法，以车间当前的排程计划作为初始种群，以当日生产任务完成时间最短为目标函数，经过选择、交叉、变异、子序列变异和染色体修正等步骤获得新的排程计划，既保证当前排程计划不做大幅调整，又降低扰动影响。将排程计划转化为车间当日作业计划，经过车间管理人员确认后，传输给MES边代理进行派工和物料配送，减少人员换岗和物料转运次数，提高生产效率和资源利用率。

6 应用验证

本文提出的数字孪生车间架构及建模方法、数据融合方法、综合管控方法在电子装备车间进行应用验证，构建了车间数字孪生系统，主要由车间数字孪生软件系统、车间可视化展示系统、交互控制平台及现有信息系统、物理车间等构成。

通过孪生车间、物理车间及MES边代理等信息系统的虚实映射，实现电子装备车间的车间级、工位级、要素级的智能监控与分析，如图4所示，基于各尺度孪生模型，支持了解车间及每个工位、设备、产品的生产信息。以数据图表、弹窗、全三维环境下的车间、厂房、设备和工位可视化展现，综合反映车间现场工况，并依据孪生车间中的融合数据进行数据分析、实时预警、生产评价和重调度，提高生产效率和资源利用率。



图4 电子装备车间数字孪生模型

7 结束语

数字孪生技术的应用是智能车间建设的重要抓手，通过数字孪生车间和物理车间的交互融合，在数字空间进行分析、学习、决策，反馈作用于物理车间进行精准

执行，使数字孪生成为车间的大脑。本文提出了网络隔断条件下车间数字孪生架构，通过多尺度、多维度车间建模和多层次数据融合，探讨车间的智能监控、综合分析、重调度等应用场景，在电子装备车间应用过程中，已经初步发挥成效。随着数字孪生技术在智能车间的深化应用，开展基于高保真车间孪生模型的高置信仿真，将是实现车间智能管控的重要途径。■

参考文献

- [1] 陶飞, 刘蔚然, 刘检华, 等. 数字孪生及其应用探索[J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(1): 1-18.
- [2] 庄存波, 刘检华, 熊辉, 等. 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.
- [3] 陶飞, 张贺, 戚庆林, 等. 数字孪生十问: 分析与思考[J]. 计算机集成制造系统, 2020, 26(1): 1-17.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 李浩, 邢志远, 李琳利, 等. 基于多智能体的工业数字孪生系统云边端架构与关键技术[J]. 计算机集成制造系统, 2024, 30(11): 3755-3770.
- [8] 梁野, 张贺, 陈杰, 等. 基于工业物联网技术的汽车发动机厂智慧能源管理研究[J]. 智能制造, 2023, 6: 56-60.
- [9] 郭具涛, 洪海波, 钟珂珂, 等. 基于数字孪生的航天制造车间生产管控方法[J]. 中国机械工程, 2020, 31(7): 808-814.
- [10] 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): 46-58.

收稿日期: 2024-11-21