

# 数字孪生技术在轨道交通车辆全生命周期管理中的应用思路

都青华

(中车长春轨道客车股份有限公司国家轨道客车工程研究中心, 130113, 长春//正高级工程师)

**摘要** 为将数字孪生技术应用于轨道交通车辆全生命周期管理各业务,实现作业效率和作业质量的进一步提升,结合数字孪生在其它产业的应用情况,从数字孪生的定义、特征、关键支撑技术出发,阐述了数字孪生技术在轨道交通车辆行业产品研发、工艺设计、采购物流、生产制造及检修运维等业务板块的应用场景。对于建立理想状态的轨道交通车辆数字孪生体,从开展MBD(基于模型的工程定义)技术的协同应用、产品构型管理、产品健康管理,以及构建多物理场、多学科的协同仿真等方面提出建议。

**关键词** 轨道交通;数字孪生技术;全生命周期管理

**中图分类号** F530.7

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.04.029

## Application Approach for Digital Twin Technology in Rail Transit Vehicle Full Lifecycle Management

DU Qinghua

**Abstract** To apply digital twin technology in all business of rail transit vehicle full lifecycle management, so that the operation efficiency and quality can be further improved. Considering the application situation of digital twin in other industries, from the perspectives of its definition, characteristics and key supporting technologies, application scenarios of digital twin technology in rail transit vehicle industry product research and development, process design, procurement and logistics, production and manufacturing, overhaul and maintenance are expounded. For building rail transit vehicle digital twin in an ideal state, suggestions are put forward from aspects such as developing synergistic application, product configuration management and product health management with MBD (model based definition) technology, and the construction of multi-physical field and multi-disciplinary collaborative simulation.

**Key words** rail transit; digital twin technology; full lifecycle management

**Author's address** National Engineering Research Center of Railway Vehicle, CRRC Changchun Railway Vehicles Co.,

Ltd., 130113, Changchun, China

随着大数据、云计算、人工智能、物联网等新信息技术的高速发展,数字孪生技术的实施应用范围日益广泛。除了最早的航空航天领域外,数字孪生技术现已应用于电力、船舶、城市管理、农业、建筑、制造、石油天然气、健康医疗、环境保护等多个行业。数字孪生技术在智能制造领域被认为是一种实现制造信息世界与物理世界交互融合的有效手段。轨道交通车辆全生命周期各业务板块都可根据其业务特点和业务需求,采用先进的信息化技术,实现本领域数字孪生技术的典型应用,从而提升作业效率和作业质量<sup>[1]</sup>。为此,本文对数字孪生技术在轨道交通车辆全生命周期管理中的应用展开研究。

## 1 数字孪生技术

### 1.1 数字孪生的定义

在标准化组织中,数字孪生是具有数据连接的特定物理实体或过程的数字化表达。该技术能保证物理状态和虚拟状态之间的同速率收敛,并提供物理实体或流程过程的整个生命周期的集成视图<sup>[2]</sup>。

目前学术界普遍认为,数字孪生技术通过创建物理实体的数字化虚拟实体,借助历史数据、实时数据及算法模型来模拟、验证、预测或控制物理实体的全生命周期过程。

### 1.2 数字孪生技术的特征

数字孪生技术具有5个维度的特征<sup>[3-4]</sup>:

1) 模型维度。数字孪生模型涉及几何模型、物理模型、行为模型、规则模型等多维、多时空、多尺度模型。

2) 数据维度。数字孪生的核心驱动力是数据,

强调数据的融合。

3) 连接维度。数字孪生技术既要支持跨接口、跨协议、跨平台的互联互通,又要强调实时性,且强调不同维度间数字孪生的双向连接、双向交互、双向驱动。

4) 服务或功能维度。数字孪生技术可针对不同的对象及需求,在研发设计、运用维护、智能控制、故障预测与诊断、设备健康管理、节能环保等方面提供一系列功能与服务。

5) 物理维度。物理世界的实体对象是数字孪生技术的重要组成部分,数字孪生的模型、数据、服务与功能均同物理实体对象密不可分。

### 1.3 数字孪生技术的关键支撑技术

数字孪生技术的实现和落地应用离不开新信息技术的支持。只有与新技术深度融合,数字孪生技术才能实现全面真实感知物理实体,精准构建多维多尺度模型,深度融合全要素、全流程、全业务数据,实现全面、动态、实时的交互<sup>[5]</sup>。

1) 物联网技术。实现数字孪生的重要基础和前提是全面感知物理世界,物联网为物理世界的整体感知提供了技术支持。

2) 3R(AR(增强现实)、VR(虚拟现实)、MR(混合现实))技术。数字孪生技术的核心部分是虚拟模型。VR技术可实现对物理实体属性、行为、规则等方面层次细节的可视化动态逼真显示;AR与MR技术的实时跟踪及反馈,可实现虚拟模型与物理实体在时空上的同步与融合。

3) 边缘计算技术。边缘计算技术将部分从物理世界采集到的数据在边缘侧进行实时过滤、规约与处理,从而实现了用户本地的即时决策、快速响应与及时执行。

4) 云计算技术。云计算可以为复杂的系统级数字孪生提供庞大的云计算资源与数据中心,从而动态地满足数字孪生的不同计算、存储与运行需求。

5) 5G(第五代移动通信技术)。5G能满足虚拟模型与物理实体的海量数据低延迟传输要求,实现设备的互通互联。

6) 大数据技术。大数据能够从孪生数据集成海量数据中进行数据提取、分析,预测现实事件的结果和过程。

7) 区块链技术。区块链技术可确保孪生数据不可篡改、全程留痕、可跟踪、可追溯等,对数字孪

生的安全性提供可靠保证。

8) AI(人工智能)技术。AI通过智能匹配最佳算法,自动执行数据准备、分析、融合对孪生数据进行深度知识挖掘,从而生成各类型服务。

## 2 轨道交通业数字孪生技术应用场景

为进一步提升作业效率和作业质量,需根据各业务板块的特点和业务需求,梳理轨道交通车辆全寿命周期中各业务板块的数字孪生技术应用场景。

### 2.1 产品研发板块

1) 虚拟装配。轨道交通行业可开展基于MBD(基于模型的工程定义)技术的全三维设计及三维评审,通过虚拟现实技术,突出轨道交通产品模型可视化的作用,基于模型进行动态、静态干涉检测,以提升设计质量;模拟仿真轨道交通产品的装配、维护过程,提升产品的可制造性和可维护性<sup>[6]</sup>。

2) 虚拟验证。轨道交通产品功能、性能的虚拟验证利用结构、电磁、流体、热学和控制等仿真软件模拟产品运行状况,从而指导、简化、减少甚至取消借助实物的实验,以提高设计效率。如:开展轨道交通产品电气功能原理图虚拟调试验证。

3) 优化设计。通过先进的数据交互和检测技术,实时动态采集产品的运行数据,借助多维虚拟模型,映射轨道交通车辆真实的物理运行状态。整合轨道交通车辆的实时以及历史数据(数据知识库)进行分析、评估、处理,从轨道交通车辆的材料性能、结构变化、性能变化以及功能运行等多方面进行仿真,对轨道交通车辆运行状态进行精准预测与可靠评估,从而不断地迭代优化设计<sup>[7]</sup>。

### 2.2 工艺设计板块

1) 虚拟产线设计。构建与物理轨道交通产品生产车间完全映射的虚拟制造系统,对各轨道交通产品生产区域、产线设备、车间环境进行三维建模,系统地规划轨道交通产品生产工艺、设备及资源,仿真分析、评估生产过程、生产节拍、制造能力及布局的合理性。通过模拟生产线,不断优化产线设计,以提升轨道交通产品的产线效率。

2) 产品工艺优化。开展基于MBD技术的轨道交通产品三维定义、三维工艺、生产以及质量检测等。结合工位和工序,模拟仿真轨道交通产品的加工、焊接、涂装、装配、调试等制造过程,优化轨道交通产品工艺方案、工艺流程、工艺方法,提升轨道

交通行业产品的制造效率以及制造质量。借助三维结构化工艺文件辅助工人操作,将工人装配经验和知识储存为知识库,用于后续的工艺优化和仿真训练。

### 2.3 采购物流板块

1) 数字立体仓库。建立与立体仓库完全映射的虚拟模型,结合各类算法方法,实现实时模拟立体仓库,以及对其进行优化仿真,对库位、库存、物料状态、资金费用、物料需求等进行实时状态的信息监控与预测<sup>[8]</sup>。

2) 物料精准配送。构建虚拟配送地图及系统(模拟配送线),结合建设工位制节拍化流水生产线的的需求,集成生产作业系统,自动按需配送物料至工位,优化物料输送路径,监控物料配送位置及状态,实现轨道交通产品厂区内物料的精准配送监控。

### 2.4 生产制造板块

1) 优化计划排产。构建标准、完整、透明、共享的轨道交通行业计划管控体系,固化排程逻辑,与轨道交通产品模拟生产线和模拟配送线联动,通过模拟仿真优化高级计划与排程的匹配度,提高轨道交通行业排产准确性、合理性、高效性,实现轨道交通行业营销、计划、生产、仓储全业务链端到端的打通。

2) 能耗监测优化。构建轨道交通行业智慧能源管理系统,对轨道交通企业内生产设备及配套设施进行能源数据的采集、检测、分析、评估和预警轨道交通企业能耗状态。可通过虚拟模型实时仿真迭代优化轨道交通设备参数、工艺流程及人员行为等以降低能耗。

3) 设备健康管理。构建轨道交通产品数字孪生模型,对轨道交通产品生产设备虚拟映像同步,实时获取设备运行数据及参数,结合历史数据,实现及时捕捉轨道交通产品生产车间设备性能退化,准确定位故障原因,以及合理验证维修策略。

4) 生产异常监控。对轨道交通行业工艺流程、资源配置、参数设置、质量管理和追溯、能效管理、生产排程、物料配送等各个环节进行实时监控,及时发现和应对轨道交通产品生产过程中的各种异常和不稳定因素,通过仿真进行优化提升,从而智能化实现降本、增效。

### 2.5 检修运维板块

1) 故障预测及健康管理。借助轨道交通产品

传感器数据及运行数据,通过物理与仿真状态交互与对比、物理与仿真数据融合分析,以及虚拟模型验证,实现轨道交通车辆的远程监控、状况评估、故障预测,定位故障原因并制定维修策略。上述功能可封装成服务,并以应用软件的形式提供给用户。

2) 虚拟维修维护。借助 AR 技术,当轨道交通车辆运行异常或发生故障时,运维人员能够快速掌握故障部件的当前情况和故障数据;结合 IETM(交互式电子技术手册),进行故障诊断和分析评估,快速展示相关维修过程和工作要点,从而大幅缩短轨道交通行业实际维护维修用时。

## 3 轨道交通车辆数字孪生体的建立

从数字孪生的定义本身出发,从轨道交通车辆产品的角度讲,通过历史数据经验分析,采用模型算法和多场景的协同仿真,通过构建轨道交通车辆的数字孪生体,捕捉轨道交通车辆运行的实时数据,反馈轨道交通车辆产品运行状态及工况环境,实现虚实数据的实时互通,从而不断地迭代优化轨道交通产品设计是最重要、最理想的应用场景。要建立理想状态的轨道交通车辆数字孪生体,需要重点开展一系列工作。

### 3.1 开展与 MBD 技术的协同应用

MBD 技术是数字孪生的基础。目前,轨道交通行业的三维技术存在诸多短板,如设计模型不完整、不规范、不准确,后端应用不足等。开展数字孪生技术与 MBD 技术的协同应用可弥补这些短板,实现虚拟模型与物理实体保持一致,继而实现三维技术的体系化应用。

### 3.2 开展基于 MBD 技术的产品构型管理

目前,轨道交通车辆初步构建了构型管理框架,并通过构型承载业务关键数据,实现了部分结构化履历数据的贯通。通过履历数据与构型项(物料)的关联,构型管理实现了对图纸或模型、技术规范、技术数据、检测数据和试验记录等的统一管理,满足人工调取、查阅和分析的需求;然而,工艺、制造、检测及试验等各项业务的数据仍未完全贯通<sup>[9]</sup>。

为全面实现产品构型管理,必须通过 MBD 技术,将轨道交通车辆的特征数据及技术参数等结构化,建立与物理产品状态一致且能够实时变化的数据孪生体,实现与工艺、质量、制造、运维等业务进行全过程全要素的数据关联,从而保证最终的物理

产品构型同需求、设计、制造和交付的融合,实现对轨道交通车辆整个寿命周期的闭环管理。

### 3.3 开展 PHM (故障预测及健康管理) 典型功能拓展

PHM 为数字孪生技术的典型应用。在 PHM 中,涉及数据采集、传输、存储、分析及挖掘等业务的机理模型及数据驱动模型,都是支撑数据孪生体的关键技术及必要基础。

建议在现有基础上,进一步拓展 PHM 模型的功能,着重于采集、积累及分析轨道交通车辆行业的多维数据(轨道谱、振动、载荷、温度等),关联轨道交通产品特征数据、技术参数与机理模型,关联运行数据与数据驱动模型等,实现虚拟世界真实模拟及与现场实物的互动,从而在虚拟环境下迭代优化设计,不断提升轨道交通产品的安全性与可靠性。

考虑到轨道交通车辆行业正处于关键部件及系统逐步实现国产化生产的过程中,故建议在影响车辆安全性且我国具有自主知识产权的系统,开展 PHM 的实施和试用。

### 3.4 开展多物理场、多学科的协同仿真

实现轨道交通车辆数字孪生技术的前提,是建立轨道交通车辆产品运行工况模型,基于轨道交通复杂、真实、动态的车辆运行现场环境,采集轨道交通的多维运行数据和工况数据,开展数字孪生体同结构、动力学、流体、电磁等学科多物理场的实时高效协同仿真。因此,加快轨道交通行业相关领域协同仿真能力的建设迫在眉睫。

## 4 结语

采用数字孪生技术可构建轨道交通产品的数字孪生体,捕捉轨道交通产品运行的实时数据,反馈轨道交通产品运行状态及工况环境,实现虚实数据的实时互通,从而不断地迭代优化轨道交通产品设计,可以实现对轨道交通产业各项工作的有效提升。目前,轨道交通行业设计、工艺、制造、检测、试验等各项业务没有贯通,要实现轨道交通行业的数字孪生应用,相关业务的整合和相关领域协同仿真能力的建设还有一段路要走。

## 参考文献

[1] 赵波,程多福,贺东东,等. 数字孪生应用白皮书[M]. 北京:

中国电子技术标准化研究院,2020:2.

ZHAO Bo, CHENG Duofu, HE Dongdong, et al. White paper on digital twin application[M]. Beijing: China Electronics Standardization Institute, 2020: 2.

[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.

ZHUANG Cunbo, LIU Jianhua, XIONG Hui, et al. Connotation, architecture and trends of product digital twin[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(4): 753.

[3] 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.

TAO Fei, LIU Weiran, LIU Jianhua, et al. Digital twin and its potential application exploration[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2018, 24(1): 1.

[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.

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.

[5] 安筱鹏. 数字孪生:通向零成本试错之路[J]. 今日制造与升级, 2020(增刊1): 78.

AN Xiaopeng. Digital twin: the road of trial and error to zero cost[J]. Manufacture & Upgrading Today, 2020(S1): 78.

[6] 刘婷,张建超,刘魁. 基于数字孪生的航空发动机全生命周期管理[J]. 航空动力, 2018(1): 52.

LIU Ting, ZHANG Jianchao, LIU Kui. Aero engine life cycle management based on digital twin[J]. Aerospace Power, 2018(1): 52.

[7] 陶剑,戴永长,魏冉. 基于数字线索和数字孪生的生产生命周期研究[J]. 航空制造技术, 2017, 60(21): 26.

TAO Jian, DAI Yongchang, WEI Ran. Study on production lifecycle based on digital thread and digital twin[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(21): 26.

[8] 苗田,张旭,熊辉,等. 数字孪生技术在产品生命周期中的应用与展望[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(6): 1546.

MIAO Tian, ZHANG Xu, XIONG Hui, et al. Applications and expectation of digital twin in product lifecycle[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(6): 1546.

[9] 于勇,范胜廷,彭关伟,等. 数字孪生模型在产品构型管理中应用探讨[J]. 航空制造技术, 2017, 60(7): 41.

YU Yong, FAN Shengting, PENG Guanwei, et al. Study on application of digital twin model in product configuration management[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(7): 41.

(收稿日期:2022-08-01)