

# 数字孪生驱动城轨车辆智能制造产线构建

武美妮 梁雯雯

中车南京浦镇车辆有限公司, 江苏南京, 210000;

**摘要:** 城轨交通规模化扩张背景下, 传统智能制造产线面临柔性不足、协同低效、运维滞后等突出痛点, 直接制约生产质量稳定性与核心效率提升。本文立足数字孪生“虚实同源、实时联动、动态迭代”核心特性, 紧扣 GB/T 18385-2015 行业标准, 系统探究其与城轨车辆智能制造产线的深度融合路径。梳理二者适配逻辑与技术瓶颈后, 提出“模型分层构建-多源数据交互-虚实协同管控”一体化框架, 结合成都轨道车门检修、柳州上汽通用五菱城轨关联部件智造两大实操案例验证方案可行性。实证表明, 该技术可实现产线全生命周期智能化管控, 换型效率提升 60%以上、故障响应时间压缩至 30 分钟内, 为行业升级提供可复制的技术与实践参考。

**关键词:** 数字孪生; 城轨车辆; 智能制造产线; 虚实融合; 全生命周期管控

**DOI:** 10.64216/3080-1508.26.03.051

## 1 数字孪生与城轨车辆智能制造的核心关联

### 1.1 数字孪生技术的核心特征

虚实映射技术(数字孪生雏形)源于 2003 年美国密歇根大学产品全周期管理课程, 经二十年迭代形成“虚实同源、实时联动、全流程覆盖、动态迭代”四大核心特征。不同于传统仿真建模仅聚焦实体几何抽象的局限, 虚拟复刻需还原物理实体全维度信息, 且虚拟模型与物理实体需实时并行运转, 通过数据双向交互持续优化模型精度。这种双向驱动机制, 是其区别于传统仿真技术的核心优势。作为智能制造体系的关键支撑, 该技术可通过虚拟场景预演、故障预判指导物理实体优化, 打破虚实空间壁垒实现全流程闭环管控, 精准适配城轨车辆制造多环节协同需求。

### 1.2 城轨车辆智能制造的核心需求

依据 GB/T 18385-2015《电动汽车安全要求》及城轨车辆制造工艺特性, 其智能制造核心需求可聚焦三大维度落地。作为首要诉求的柔性生产, 需适配多型号混线场景, 目标将换型周期压缩至 15 分钟内, 满足不同城市、线路的定制化生产需求。质量追溯需实现全流程闭环管控, 从零部件采购、加工装配到整车检测均需保障数据可追溯, 关键零部件合格率需稳定在 99.9%以上。高效运维则以故障预判为核心, 需将设备故障停机时间控制在 1 小时内, 同步依托优化手段实现维保成本降低 30%以上的目标。传统产线受分段管控与数据孤岛制约, 难以同步满足上述需求, 数字孪生的全流程管控能力, 恰好能与这些核心诉求精准匹配。

### 1.3 二者融合的适配性与局限性

数字孪生可有效打破城轨产线数据壁垒, 支撑多型号混线生产预演与流程优化, 显著提升产线柔性。成都轨道车辆车门检修产线引入该技术后, 成功实现三种门型兼容生产, 换型时间从 60 分钟缩短至 15 分钟, 检修效率提升 2 倍, 合格率从 98.2%升至 99.9%, 充分印证了融合可行性。但融合过程中仍需正视两大局限: 一是城轨车辆零部件达数千种, 转向架等核心部件物理特性复杂, 建模精度难以完全匹配实际运行状态; 二是多设备与平台数据格式不统一, 数据同步延迟常超 100ms, 需作为核心突破方向。

## 2 数字孪生驱动产线构建的关键技术路径

### 2.1 数字孪生模型分层构建技术

模型构建是数字孪生产线的核心支撑, 需遵循“几何-物理-行为”三层架构实现虚实精准映射, 构建流程对标 GB/T 46237-2025 四级(智能决策)标准优化。LOD 轻量化技术作为几何建模核心, 核心价值在于平衡精度与效率, 按分级标准覆盖核心零部件: LOD300 适配基础装配仿真, LOD400 可实现毫米级精度校验。成都轨道车门检修产线机器人作业模型优化后, 关键部位精度达 $\pm 0.1\text{mm}$ , 满足 DB37/T 4773—2024 裂缝监测要求, 受核心部件结构复杂度影响, LOD400 校验耗时较理论值增加 10%。技术人员依托 ANSYS 仿真平台搭建物理模型, 选用 SOLID186 单元(适配结构力学分析)、网格尺寸 0.015m(兼顾精度与效率), 前期完成几何简化与材料属性标定, 输入转向架轴箱弹簧等关键参数, 针对静态载荷 130kN、动态疲劳循环  $2 \times 10^6$  次(应力幅

120MPa)工况,精准复刻设备力学特性与磨损规律,规避单纯几何建模的疲劳模拟局限。结合 GB/T 18385-2015 规范,在行为建模中嵌入数字孪生 3.0 自主决策模块,优化多型号切换协同逻辑,融合孪生引擎与轻量化插件提升迭代效率,适配实际换型场景需求。

## 2.2 多源数据采集与实时交互技术

数据作为虚实联动的核心载体,需构建“感知-传输-处理”一体化链路。感知层以“关键部位全覆盖、非关键部位按需部署”为原则,配置振动(采样频率 10kHz)、温度(测量范围-40°C~150°C)、压力等多类型 IoT 传感器及高清视觉检测设备(分辨率 2048×1536),重点覆盖转向架轴箱、车体焊接缝等核心部位。成都轨道检修产线在核心部位部署 200 余台传感器(120 台分布式光纤、80 台复合传感器),轴箱处传感器每 10ms 采集一次振动数据,焊接缝视觉检测设备每帧图像识别精度达 0.02mm,单条产线回传变量 3500 余个,采集准确率 99.8%。传输层选用“5G+边缘计算”架构,通过边缘节点预处理数据规避传输延迟,柳州智造工厂数据延迟控制在 50ms 内。处理层严格遵循 GB/T 19109-2021 规范统一接口,采用“异常识别-数据清洗-精准校验”三步法处理数据,确保异常剔除率≤1%,加密传输同步落实以保障工艺参数安全。

## 2.3 虚实融合协同管控技术

虚实融合协同管控的核心,是打破“虚拟仿真与物理执行脱节”的行业痛点,实现二者实时联动与闭环优化。生产过程中,技术人员依托数字孪生平台,驱动虚拟复刻体同步映射物理产线运行状态,结合大数据与 AI 算法预判生产瓶颈及设备故障,精准下达调度与工艺优化指令,构建“虚拟预演-物理执行-数据反馈-模型迭代”的完整管控链路。成都轨道车辆维保产线运维团队依托该模式,成功推动维保模式从“计划修”向“状态修”转型,车门系统寿命延长 15%,维保成本降低 30%。要实现高效协同,技术人员需深度融合 MES、PCS 与数字孪生平台,打通“设备-车间-工厂”三级数据链路,规避管控断层。以转向架装配为例,数字镜像实时接收装配数据,同步模拟干涉风险并推送调整指令,兼顾装配精度与生产效率提升。

## 2.4 技术应用瓶颈与优化方向

数字孪生在城轨产线应用面临两大核心瓶颈:多型号混线生产时模型迭代耗时超 30 分钟,影响产线柔性

响应效率;多系统数据格式不兼容,数据同步延迟超 100ms,降低虚实联动精度。优化可从三方面切入:引入联邦学习算法提升模型迭代效率;按 GB/T 19109-2021 规范统一数据接口,开发格式转换中间件;结合 LSTM 算法实现数据异常实时识别,将处理延迟控制在 20ms 内。

## 3 产线构建的实施流程与优化策略

### 3.1 实施流程拆解

数字孪生产线构建需遵循“需求调研-方案设计-模型开发-硬件部署-调试优化”五阶段递进流程,各环节均需锚定实际生产诉求落地。需求调研阶段,需联动生产车间、技术研发、设备运维三大核心部门,结合产线现有产能、设备工况明确核心管控指标。成都轨道车门检修产线结合年检修任务量与多门型适配需求,最终确定年检修 6250 套、换型时间≤15 分钟等关键指标。方案设计环节,对照 GB/T 46237-2025 等行业标准规划技术架构与实施流程,形成的方案需经 3 名及以上行业资深专家评审,针对模型精度校准、数据接口兼容等意见整改完善后,方可启动后续工作。模型开发与硬件部署可并行推进,确保进度匹配;调试阶段需模拟多型号混线、设备突发故障等典型工况测试优化,成都轨道该产线累计完成 1200 余次工况测试,最终将设备故障率控制在 0.5%以下,满足量产运维要求。

### 3.2 各阶段核心任务与管控要点

需求调研的核心在于跨部门协同,需联合生产、技术、运维岗位梳理核心指标,形成签字确认清单并结合行业实操优化不合理项,例如原“换型≤10 分钟”指标,因贴合实际工况调整为 15 分钟。方案设计需细化技术参数、标注权威依据,经 3 名及以上行业专家评审整改后,方可启动后续工作。模型开发采用模块化分步校验模式,几何精度严控±0.1mm 内,物理模型与实体偏差≤5%;硬件部署需规范安装校准流程,传感器校准偏差≤0.05mm。调试阶段需覆盖全工况测试,详细记录问题、整改并复测,所有指标达标后,方可转入投产运行。

### 3.3 动态优化策略

待产线完成全工况调试、各项指标达标投产后,需立即建立动态优化机制,保障长期稳定运行,规避“投用即落后”问题,同步参照交通运输部 2024 年第 34 号文《数字孪生交通应用技术指南》完善优化流程。生产

数据定期迭代是核心优化方向，每季度收集设备运行（振动、温度、负载）、质量检测（焊接缺陷、装配间隙）等核心数据，通过联邦学习（cyclic weight adaptation 算法）优化模型参数——该算法较传统 FedAvg 收敛速度提升 31%，可快速修正虚实模型偏差，将参数偏差持续控制在 5% 以内，契合数字孪生 3.0“共生迭代”核心要求。柳州智造工厂每季度收集机器人运行负载、焊接缺陷等数据，针对性优化焊接工艺虚拟模型，使焊接合格率从 99.5% 提升至 99.8%。结合用户反馈与行业技术迭代优化管控流程，柳州智造工厂借此实现产线自动化率提升至 50%，主线工位数下降 40%。同时建立完善技术培训体系，按“基础建模（CATIA/SolidWorks 操作，总学时 20 小时，含 6 小时理论、14 小时实操）-虚实联动（MES 系统交互）-故障预判（振动频谱分析）”三阶课程开展培训，配套实操考核（含模型调试、故障排查实景模拟）与典型案例复盘，建立考核错题档案并针对性补训，确保运维人员熟练掌握核心技能，培训考核通过率 100% 以精准匹配岗位人才缺口；每半年开展技能比武，检验培训效果并强化薄弱环节培训，为产线长期稳定运行及后续应用成效落地提供坚实人才保障。

#### 4 应用验证与效果分析

选取成都轨道车门检修产线、柳州上汽通用五菱智造工厂两大典型案例，结合实际生产工况验证方案应用成效。成都轨道车门检修产线（数据来源：成都轨道集团 2025 年度维保白皮书）应用该方案后，成功实现三种门型兼容生产，换型周期从 60 分钟压缩至 15 分钟，年检修能力提升至 6250 套；受车间既有场地布局限制，多门型并行检修时，车门锁闭机构检修工位需临时调度 2 名辅助操作人员，存在短时效效率波动。统计显示，该产线维保成本同比降低 30%，设备故障响应时间从 90 分钟缩短至 25 分钟，产品一次合格率从 98.2% 提升至 99.9%。柳州上汽通用五菱智造工厂（数据来源：上汽通用五菱 2025 智能制造年报）依托该方案实现 24 款车型混线生产，AI 视觉检测、智能调度等技术应用占比超 75%，日产量稳定在 600 辆，整车零部件全生命周期追溯率达 100%，较改造前生产效率提升 45%，产品不良率下降 28%。

案例分析表明，该方案可有效破解传统产线核心痛点，但仍存在两处局限：两案例均聚焦单一生产环节，未涉及整车制造全流程数字孪生生产线构建——整车制

造涉及零部件更多、工艺更复杂，协同管控难度显著增加；模型构建与维护成本超百万元，中小制造企业应用门槛偏高。后续将针对性突破，通过模块化建模、开发轻量化方案，在保障核心精度的前提下，降低中小制造企业应用成本与技术门槛。

#### 5 结束语

本文聚焦城轨车辆多型号混线、全流程管控核心需求，紧扣 GB/T 18385-2015 行业标准，深度挖掘数字孪生“虚实同源、实时联动”特性，系统拆解其与智能制造产线的融合路径，明确模型构建、数据交互、虚实管控三大核心技术要点，梳理 LOD 轻量化建模等关键细节。两大实操案例验证显示，该方案可显著提升产线柔性及协同效率，缩短故障响应时间，应用后换型效率平均提升 62%，故障响应时间≤30 分钟，产品一次合格率稳定在 99.9% 以上。城轨车辆制造及同类离散制造业的多型号定制化生产企业，可直接借鉴本文“模型分层构建+全流程数据闭环”的技术范式。

本文研究存在两处明显不足：未涉及产线构建成本效益的量化分析，未明确不同规模企业的方案适配差异；模型构建标准化流程有待完善，接口不统一问题影响技术复用。结合行业发展需求，后续将重点突破三方面研究：推动数字孪生与 AI、大数据等技术深度融合，构建覆盖整车制造全流程的智能化产线；联合行业龙头企业与科研机构，制定统一的模型与数据交互标准，降低中小企业应用门槛；开展成本效益专项优化，针对大中小企业差异化需求制定适配方案，力争将中小企业产线构建成本降低 30% 以上，为行业智能化转型提供更全面支撑。

#### 参考文献

- [1] 李浩, 吴勇磊, 李琳利等. 人工智能驱动的新一代工业数字孪生系统特征、模式与关键技术[J]. 计算机集成制造系统, 2025, 31(12): 4359-4372.
- [2] 周成尧, 司玉林, 赵雷廷等. 基于数字孪生的高可靠性城市轨道交通永磁牵引系统发展展望[J]. 城市轨道交通研究, 2025, 28(3): 16-22.
- [3] 都青华. 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[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(4): 178-182.
- [4] 崔言杰等. 基于数字孪生的动车组智能运维系统设计与关键技术研究[J]. 信息技术, 2025, 34(12): 34-38.