

# 高速铁路轨道“零状态”数据体系构建与智能运维应用研究

杨晋龙 李亚洲 张豪

大秦铁路股份有限公司太原高铁工务段 山西太原 030031

DOI:10.32629/ems.v8i3.18683

**[摘要]** 为满足高速铁路全生命周期数据管理需求,针对建设与运维阶段数据断层、竣工资料难以直接支持智能运维的问题,创新性地提出了“零状态”数据理念,并以集大原铁路为工程载体,系统性构建了轨道专业从数据采集、治理、建模到融合应用的全流程解决方案。研究首次明确了以“锁定轨温”为核心的轨道设备初始服役状态(即“零状态”)的完整内涵与数据构成,开发了基于 Python 的自动化数据处理流水线,实现了原始技术卡片的高效转换。在数字建模层面,突破传统粗放模型划分方式,利用 BIM 技术和脚本语言,首创了以物理实体“轨条”为最小管理单元的高精度 BIM 精细化建模与自动化切分方法。通过数据与模型的属性关联,成功构建了轨道“零状态”三维数字资产库,并实现了 Web 端可视化查询。本研究形成了以运维为导向、贯穿建设期的标准化数据体系构建范式,为打通数据闭环、实现轨道状态精准溯源与智能运维决策提供了可靠的数据基底与可复制的技术路径,对推动高速铁路乃至基础设施领域的数字化转型具有重要示范价值。

**[关键词]** 高速铁路; 智能运维; 提前介入; 零状态数据; 建筑信息模型; 轨条单元; 数据治理; 数字资产库

## 1 引言

高速铁路建设与运维阶段在数据需求上存在结构性错位。建设阶段产生的设计图纸与竣工资料多为静态文档,侧重于验收归档;而在运维阶段则需支撑设施长期运营、状态演化与科学维护的动态数据体系,包括完整的设备组织结构、精细化单元划分规则及全过程施工记录。这些数据是状态评估、病害溯源、维修决策与全生命周期成本优化的基础,但目前缺乏系统化的采集与组织机制。当前研究虽在 BIM 与施工信息关联方面取得进展,但仍存局限<sup>[1]</sup>:一方面,BIM 应用<sup>[2]</sup>多侧重平台功能与数据展示,对竣工阶段完整数据采集缺乏系统设计,导致“有模型无数据”或“有数据无关联”;另一方面,“提前介入”<sup>[3]</sup>多聚焦管理流程与现场监督,尚未形成以运维为导向、覆盖建设全过程的数据采集、治理与交付体系<sup>[4]</sup>。数据链断裂使施工过程与初始状态参数难以转化为可继承的数字资产,制约了全生命周期数据连续性与精细化的管理。

为此,本文依托“高速铁路线桥设备提前介入智能数据体系研究”项目,聚焦轨道专业,以集大原铁路为实例,

开展从数据定义、采集治理、BIM 精细化建模到数据一模型融合的全流程实践,整体框架如图 1 所示。本文主要贡献如下:

(1) 首次系统性提出并界定了轨道“零状态”数据体系的内涵与构成,明确以“锁定轨温”为核心,涵盖身份谱系、几何空间、物理材料、工艺环境四个维度的数据要素,为轨道全生命周期管理提供了清晰、可操作的数据基准与逻辑起点。

(2) 创新性地构建了以“轨条”为最小管理单元的精细化 BIM 建模与数据组织方法,结合 BIM 软件和脚本语言实现模型自动化切分与属性关联,实现了物理实体与数字模型的高度统一,为轨道设施的精准管理与状态追溯提供了技术支持。

(3) 研发了一套基于 Python 的自动化数据治理流水线与三维数字资产库,有效解决了建设阶段非结构化数据向运维结构化数据的转换难题,实现了轨条级高保真、可追溯的数字资产构建与 Web 端可视化应用,为智能运维决策提供了可靠的数据基底与可复制的技术路径。

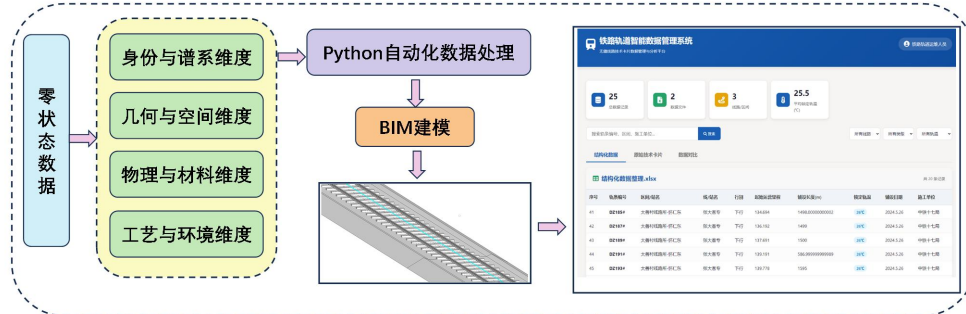


图 1 “零状态”数据库框架图

## 2. “零状态”的内涵与数据构成

本文提出并实践了一种基于提前介入工作中轨道“零状

态”智能数据体系的构建方法。将轨道设备的“零状态”明确定义为:明确提出并定义轨道设备的“零状态”,即设备在

通过精调、验收并具备正式服务条件时的初始物理状态、几何状态及相关环境参数的集合。这组数据是后续所有状态变化的基准和参照系。包含四个维度的数据要素: (1) 身份与谱系维度; (2) 几何与空间维度; (3) 物理与材料维度; (4) 工艺与环境维度。

### 3. 数据采集与治理方法

针对高速铁路建设与运维阶段数据断层导致的运维决策缺乏基准、病害溯源困难等问题, 首先明确定义了以“锁定轨温”为核心的轨道“零状态”数据内涵与采集标准<sup>[5]</sup>; 继而构建高精度轨道 BIM 模型, 并创新性地采用脚本语言将其精细化切分为物理意义明确的“轨条”单元<sup>[2]</sup>; 最终, 通过开发的 Python 数据处理流程与属性映射技术, 将标准化的“零状态”数据与轨条几何模型深度融合, 构建了国内首个轨条级轨道三维数字资产库。

#### 3.1 工程概况

集宁经大同至原平铁路(简称: 集大原铁路), 新建线路长度 268.27km, 新设怀仁东、应县西、山阴南、朔州东、代县西 5 座车站。研究重点围绕集大原铁路太原局管段的轨道专业实践展开。

#### 3.2 数据治理

在高速铁路提前介入阶段, 采集的核心原始数据无缝线路技术卡片, 通常以非结构化或半结构化的表格形式呈现。这类数据通常存在格式不统一、信息记录分散、关键字段缺失、表述规范性差等典型问题<sup>[6]</sup>, 严重影响了数据的直接利用与分析价值。为实现原始数据向机器可读、可计算、可分析的高质量数据的转化, 研究设计并研发了一套基于 Python 的自动化数据处理流水线<sup>[7]</sup>。

该流水线采用模块化架构, 运用了自然语言处理、正则表达式模式匹配、领域关键词映射、规则推理引擎以及实体关系建模等多项技术。核心流程: 首先, 对原始技术卡片进行智能解析与特征识别, 提取文本、数值及位置信息; 其次, 通过预定义的语义规则和行业知识库, 对碎片化信息进行清洗、归并与逻辑校验; 然后构建轨条、焊缝、锁定记录等实

体间的关联关系网络; 最终输出为标准化的结构化数据表, 并持久化存储于关系型数据库中, 形成可供后续建模与分析的“洁净数据源”。

在集大原铁路项目中的实际验证, 该自动化处理流程展现出卓越的性能。单批次数据处理时间从传统人工处理所需的 40 小时以上大幅压缩至 2 分钟以内, 且信息提取准确率接近 100%, 在显著提升效率的同时, 彻底解决了人工处理容易出错、一致性差的问题。这一高效可靠的数据治理能力, 为后续构建高保真数字资产与孪生模型奠定了坚实的数据基础。

结构化数据的主要字段包括:

基础信息: 单位、区间/站名、线/站名、行别(上行/下行)、类型(线路/道岔);

里程信息: 起始/终止运营里程、铺设长度、设计里程等;

轨道参数: 轨条编号、铺设日期、锁定轨温、设计锁定轨温范围、轨条长度;

技术参数: 轨枕类型、道床、扣件、钢轨类型、焊接接头数量;

事件记录: 多个事件字段记录施工和维护信息;

位移观测点: 观测点里程(距离)。

### 4. 以轨条为单元的BIM模型精细化构建

为实现轨道设施在数字空间中的高精度复现与可计算化管理, 研究抛弃传统按线路区间或里程段落划分模型的粗放方法<sup>[8]</sup>, 首创性地提出以“轨条”为最小物理与管理单元的 BIM 精细化建模与组织体系<sup>[2]</sup>。

依据线路平纵等设计数据建立轨道模型, 开发专用的自动化模型切分脚本, 对初始的连续轨道模型执行批量、自动化分割操作。最终, 生成了多个在几何上独立、在逻辑上完整的轨条 BIM 构件。每个构件在创建时即被赋予全局唯一且具有明确语义的编码标识, 确保其与结构化数据表中的对应记录形成严格的一一映射关系。这一以“物理实体”驱动“数字模型”的精细化建模, 是研究实现轨道设施数字化精细表达与全生命周期可追溯管理的核心技术突破。

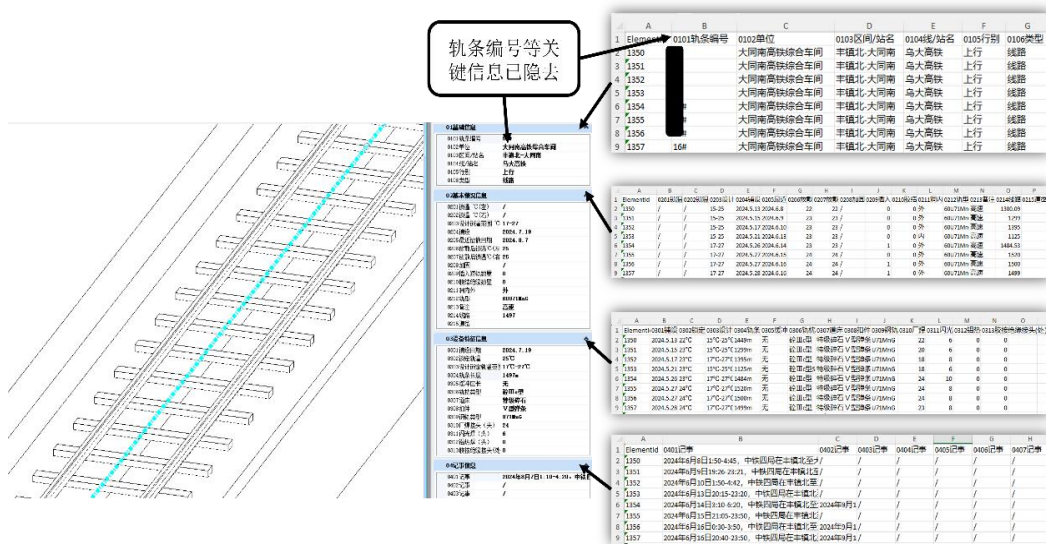


图 2 基于 BIM 的轨条三维数字资产

### 5. 数字资产库构建与可视化应用

在完成几何模型的精细化构建与数据的结构化治理后,研究通过深度集成实现数据与模型的融合,构建真正“形神兼备”的三维数字资产。具体而言,是开发了专用的数据-模型关联映射引擎,将标准化、语义化的“零状态”数据集(如锁定轨温、钢轨生产信息、焊接参数、铺设日期等)与每一个具有唯一编码的轨条 BIM 几何对象进行精确、稳固的绑定。

这一过程使得原本仅有空间形态的 BIM 模型,转变成为承载丰富属性、历史与状态信息的“智能对象”。最终,成功

构建了覆盖集大原铁路(太原局管段)全线的轨条级“零状态”三维数字资产库<sup>[9]</sup>,如图2所示。

该资产库不仅实现了在专业 BIM 环境中的管理与应用,更进一步通过开发轻量化的 Web 可视化平台,如图3所示,提供了基于 Web 浏览器的三维场景浏览、属性信息查询、条件筛选定位及基础空间分析等功能。这一平台将复杂的专业数据与模型转化为直观、易用的数字化工具,直接服务于一线工务段的日常设备管理、技术档案查询与维修辅助决策,标志着轨道设施运维管理向可视化、信息化、智能化迈出了关键一步。

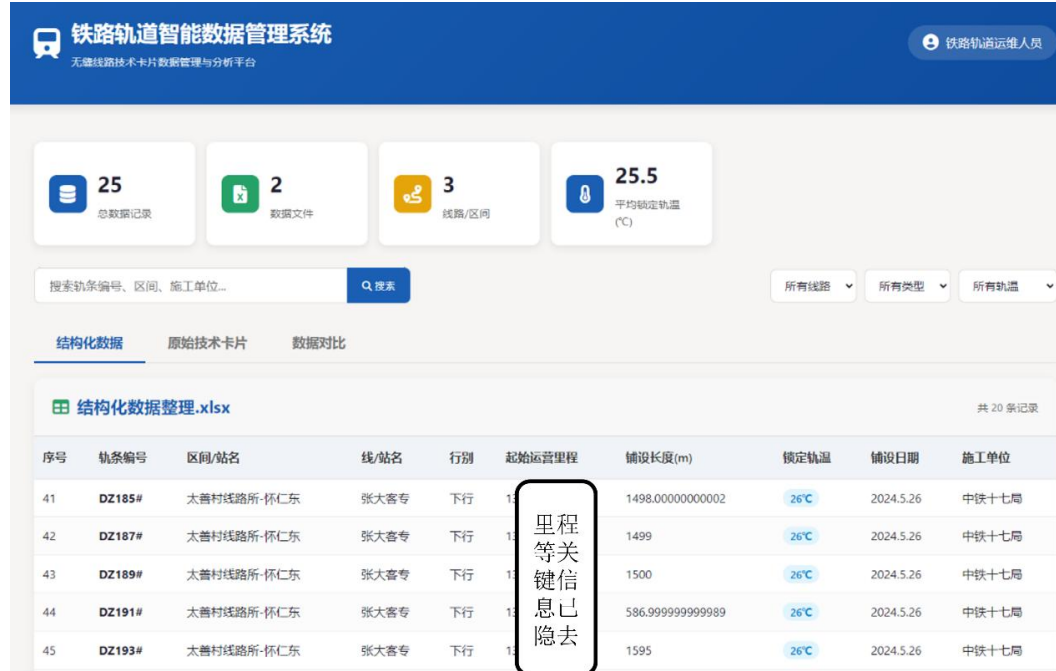


图3 “零状态”数据 Web 可视化查询平台界面

### 6. 结论

本研究成功将提前介入的管理理念转化为一套可落地的“零状态”智能数据体系构建技术方案,并在集大原高铁轨道专业得到完整实践。提出的以“轨条”为最小单元的 BIM 精细化建模与数据组织方法,实现了数字模型与物理实体、管理单元的高度统一,为轨道设施的精细化管理提供了全新方法。以“锁定轨温”为核心的“零状态”数据是轨道全生命周期管理的逻辑基础。建立“零状态”数据库,能够显著提升轨道病害溯源、状态评估和维修决策的科学水平,其长期价值和经济效益是巨大的。

研究的成功实践,为我国高速铁路乃至整个基础设施领域的数字化转型提供了一个宝贵的范例。它所形成的一整套理论、方法和技术流程,具有很强的复制性和推广价值。

#### 【参考文献】

- [1]雷斌,温岩,李佳晨,等. BIM 技术在轨道车辆运维方面研究综述[J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(6): 106-123.
- [2]薛宇腾,黄新文. 基于 BIM 的铁路路基三维建模方法

研究[J]. 铁道勘察, 2020(1): 123-126.

[3]张华. 高速铁路接触网隧道预埋槽道全生命周期提前介入策略研究[J]. 科技创新与应用, 2025, 15(08): 172-175.

[4]马宇杰. 中国高铁建设项目关键成功因素研究[D]. 石家庄铁道大学, 2025.

[5]孟鑫,王一干,杨宜谦,等. 高速铁路桥梁动力性能评价指标研究[J]. 铁道工程学报, 2025, 42(07): 50-54.

[6]刘泽洋. 铁路工程的信息模型建模技术研究与应用[D]. 中国铁道科学研究院, 2024.

[7]McKinney W. Python for data analysis: Data wrangling with pandas, NumPy, and I Python[M]. O'Reilly Media, Inc., 2017.

[8]高杰,刘飞,乔洪磊,等. 重载铁路隧道既有有线多维协同实施的数智化建设[J]. 科技与创新, 2025, (24): 1-4+11.

[9]汤珂,李金璞. 数据资产的界定、估价与交易机制研究综述[J]. 经济学动态, 2022, (8): 115-129.