引文格式：何伟,许书影. 数字孪生与数据治理下轨道交通全生命周期数据基底构建[J]. 地理空间信息, 2026, 24(7): 101-104. doi:10. 3969/j. issn. 1672-4623.2026.07.019

数字孪生与数据治理下轨道交通全生命周期数据基底构建
——以上海市为例

何　伟[1,2]，许书影[1,2*]
（1. 上海市测绘院，上海 200063；2. 自然资源部 超大城市自然资源时空大数据分析应用重点实验室，上海 200063）

摘　要：在智慧城市与交通强国战略背景下，超大城市轨道交通系统的数字化转型面临数据体系碎片化、全生命周期业务协同困难的核心挑战。融合数字孪生与数据治理理论，构建了“理念—框架—实施”三层理论模型，并提出“全时空、全要素、全周期”的轨道交通数据基底构建方法。以上海轨道交通为实证对象，系统阐述了统一时空基准建立、多源异构数据融合、语义关联知识图谱构建和动态服务封装等关键技术路径。实践表明，该数据基底有效贯通了规划、设计、建设、运维各阶段，在科学选址、施工风险主动预警、资产预测性维护等场景中取得显著成效，推动了管理效率提升与决策模式变革，不仅为超大城市复杂基础设施的数字化提供了可复制的系统性解决方案，也为拓展数字孪生在工程管理领域的理论内涵提供了实践范例。

关键词：数字孪生；数据治理；全生命周期管理；空间信息基础设施；智慧地铁
中图分类号：P208　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2026）07-0101-04

Full Lifecycle Data Foundation Construction in Rail Transit Under Digital Twin and Data Governance Background: A Case Study of Shanghai City, China

HE Wei[1,2], XU Shuying[1,2]
(1. Shanghai Surveying and Mapping Institute, Shanghai 200063, China;
2. Key Laboratory of Spatial-temporal Big Data Analysis and Application of Natural Resources in Megacities, MNR, Shanghai 200063, China)

Abstract: Under the strategic background of constructing smart cities and strengthening the transportation sector, the digital transformation of rail transit systems in megacity faces core challenges such as a fragmented data landscape and difficulties in cross-phase business collaboration throughout the full lifecycle. Integrating theories of digital twin and data governance, we constructed a three-layer theoretical model of “concept-framework-implementation”, and proposed a methodology for constructing a rail transit data foundation characterized by “full spatio-temporal scope, comprehensive element coverage, and full lifecycle integration”. Taking Shanghai’s rail transit system as a case study, we systematically elaborated on key technical pathways, including the establishment of a unified spatio-temporal reference framework, the integration of multi-source heterogeneous data, the construction of a semantic knowledge graph, and the encapsulation of dynamic services. Practice has shown that this data foundation effectively bridges the planning, design, construction, operation and maintenance stages, delivering significant results in scenarios such as scientific site selection, proactive construction risk warning, and predictive asset maintenance, and enhances management efficiency and transforms decision-making models. This research not only provides a replicable, systematic solution for the digitalization of complex infrastructure in megacities, but also offers a practical exemplar for expanding the theoretical depth of digital twin applications in the field of engineering management.

Key words: digital twin, data governance, full lifecycle management, spatial information infrastructure, smart metro

上海市轨道交通网络运营里程突破800 km，日均客运超千万人次，其数字化转型受《交通强国建设纲要》等战略驱动。然而，系统长期积累的海量多源异构数据在时空基准、语义定义、管理主体上存在差异，形成“数据壁垒”与“信息孤岛”，面临三重矛盾：数据资源丰富与价值低效、业务需求协同与系统割裂、技术先进与体系碎片。现有研究多集中于BIM与GIS集成或智慧地铁框架设计，近年来数字孪生研究兴起，但数据治理研究仍缺乏系统科学视角的顶层框架以及超大城市复杂轨交系统的实证验证[1-7]。

本文试图回答3个核心问题：如何融合数字孪生精准映射与数据治理有效管控构建理论框架？数据基底建设需攻克哪些关键技术和实现路径？数据基底如何赋能业务场景并带来管理变革？因此，以上海市

项目来源：上海市2021年度社会发展科技攻关项目（21DZ1204100）。
第一作者简介：何伟（1968—），本科，工程师，主要从事重大工程测量相关工作，E-mail：weihe@smsmi.com。
通信作者：许书影（1987—），硕士研究生，高级工程师，主要从事实景三维、地理信息相关工作，E-mail：597355907@qq.com。

轨道交通为实证对象，旨在提出并验证支撑全生命周期协同的数据基底，为同类基础设施数字化转型提供参考[8-11]。

1 理论框架：数字孪生与数据治理的融合模型

1.1 核心理念融合：从数字映射到数智治理

数字孪生的本质是构建物理实体的虚拟映像，强调真实性、实时性、闭环性[12]。将其应用于轨道交通，创建一个与实体路网“形神兼备”，并能进行仿真、预测与优化的数字副本。然而，轨道交通系统的复杂性体现在：多层次空间结构（地下、地表、地上）、多类型专业系统（线路、供电、通号、环控）、多主体协同管理（规划、建设、运维、管理）以及多尺度时空演化（从秒级监测到百年设计寿命）。高质量孪生体的创建前提是高质量、一体化的数据供给，这正是数据治理的核心使命，即通过建立组织、政策、标准与流程，确保数据的可用性、一致性、可信性与安全性[13]。

轨道交通的数字化转型，不能止步于建立静态的“数字镜像”，而应迈向动态的数智治理。为此，本文提出了一个“理念—框架—实施”三层融合模型，将数字孪生的目标导向与数据治理的过程管控有机结合。

理念层确立了全时空覆盖、全要素集成、全周期贯通的总体目标，要求数据基底不仅能描述设施的几何形态（全要素），还能嵌入其时空演变过程（全周期），并置于统一的城市空间参考系中（全时空），为高阶的模拟分析与决策支持奠定基础。

框架层是理论落地的枢纽，构建了“1+F+N”的治理与服务体系。“1”代表统一的数据基底，是经过标准化治理的“唯一真相源”；“F”代表贯穿数据采、治、管、用的全流程服务能力；“N”代表支撑规划、建设、运维等N个业务场景的柔性应用。该框架明确了数据从资源到资产再到资本的价值转化路径。

实施层聚焦于具体的业务闭环，即数据采集融合→服务封装供给→场景智能应用→反馈优化基底。这一闭环确保了数据基底的持续演进与生命力，使其从静态的数据库转变为能够吸收新知识、适应新需求的“活体”。

1.2 全时空、全要素、全周期数据基底的内涵解构

数据基底是本文的核心概念，指一个统一、权威、可扩展的数字化基础设施，通过融合多源异构数据、建立语义关联、封装标准服务，为轨道交通全生命周期管理提供“唯一真相源”。数据基底不同于传统的数据库或数据平台，本质特征在于：①统一性，所有数据在同一时空基准和语义框架下集成；②权威性，是跨业务协同的单一数据来源；③可扩展性，能够持续吸纳新数据、支撑新应用。

全时空维度：超越传统GIS对地表空间的关注，构建了超大城市轨道交通地下、地表、室内一体化的三维空间基准，并纳入时间维，形成可记录设施历史状态、呈现实状况、推演未来变化的四维时空框架。

全要素维度：超大城市轨道交通要素体系涵盖物理实体、环境实体与业务实体。物理实体包括线路、轨道、车站结构、设备等；环境实体包括地质体、地下管线、周边建筑等；业务实体包括资产卡片、维修工单、监测警报等。通过语义关联，将这些要素连接成有机整体。

全周期维度：打破阶段壁垒，确保轨道交通数据在规划、设计、施工、竣工、运营、更新/废弃各阶段的可继承、可追溯与可联动。例如，设计阶段的BIM模型能够无缝传递至施工阶段用于进度管理，并最终成为运维阶段的设备资产模型。

2 数据基底构建的关键技术路径

数字孪生轨道交通的实现依赖于高质量数据基底的支撑，而数据基底的构建需要攻克一系列关键技术。本节阐述的四大关键技术——统一时空基准建立、多源异构数据融合、语义关联知识图谱构建、动态服务封装——正是数字孪生精准映射、实时同步、智能反馈能力的技术实现路径。

2.1 统一时空基准与多源异构数据融合

本文涉及的数据源类型繁杂，涵盖传统测绘产品（如数字线划图、数字高程模型）、工程地质勘察数据、多平台设计阶段的BIM、施工过程中的物联网（IoT）时序监测数据、激光点云与实景三维模型以及运营阶段的业务管理属性数据等。这些数据在坐标参照系、空间尺度、时间粒度及更新频率等方面存在显著差异，构成了数据融合的底层障碍。

因此，本文提出了“基准统一—语义对齐—冲突消解”的三阶段融合方法体系。在基准统一阶段，构建了以上海地方坐标系为基准、支持与2000国家大地坐标系及各类工程独立坐标系动态转换的高精度服务框架，实现了多源空间数据在统一参考框架下的集成

管理，奠定“一张网”空间数据基盘。在语义对齐阶段，聚焦BIM与GIS两大系统的融合瓶颈，研发了基于工业基础类（IFC）与城市地理标记语言（CityGML）的语义映射规则库，实现了从建筑构件到地理实体的信息无损转换与结构化集成[14]。在冲突消解阶段，针对不同时期、不同精度数据在空间重叠区域可能出现的几何或属性不一致问题，建立了以高精度优先、高现势性优先、权威数据源优先为原则的智能冲突检测与自适应消解规则引擎，保障了融合后数据的一致性、准确性与可靠性。

2.2　面向轨道交通的语义关联模型与知识图谱构建

数据融合解决了“物理拼图”，而语义关联旨在实现“逻辑理解”。本文构建了轨道交通领域本体，定义了“车站”、“隧道”、“盾构机”、“风机”等核心概念类及其层级关系（如“车站” is Part of “线路”），以及对象间的空间关系（如“连接”）、功能关系（如“监测”）、业务流程关系（如“触发维修工单”）。

基于该本体，利用图数据库技术，将融合后的空间图形数据、设备资产台账数据、历史运维记录、实时传感器读数等，抽取为“实体—关系—属性”的三元组，构建大规模轨道交通知识图谱（图1）；再将静态空间数据与动态业务数据（如资产信息、维修记录）进行关联，形成了可查询、可推理的轨道交通全要素知识图谱，为智能应用提供语义支撑。不仅支持“某个车站有哪些消防设备”这类简单查询，还能支持“历史上在类似地质条件下，某型号盾构机出现姿态异常的前兆传感器数据模式是什么”等复杂推理与知识发现，为预测性维护提供依据。

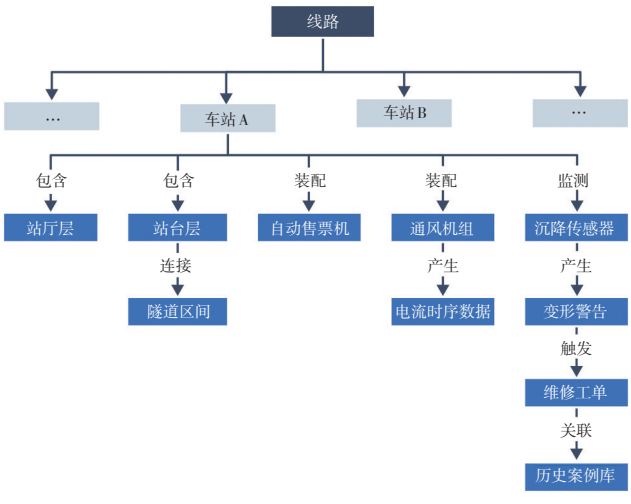


图1　面向轨道交通的语义知识图谱示意图

2.3　“一张图”动态服务封装与供给模式

为支撑N个多样化的业务应用，本文设计了数据中台+服务总线的轻量化服务供给模式[15]。核心是将处理后的数据封装为标准化、可复用的Web服务：①基础空间服务，如电子地图（WMS）、要素查询（WFS）、三维场景（3D Tiles/glTF）服务；②专题分析服务，如缓冲区分析、土方计算、网络分析、空间统计服务；③数据访问服务，提供统一标准的API，供前端应用按需获取最新的资产、监测、客流等业务数据。

这些服务通过API网关统一管理和发布，业务部门（如规划、建设、运营部门）无需关注数据底层细节，即可通过“一张图”门户或API接口，按需调用所需的空间基础服务（如电子地图、影像、三维白模）与轨道交通专题服务（如线路专题图、安全保护区、实时监测态势），实现了“数据赋能业务”的敏捷响应。

3　实证应用与成效分析

数据基座的构建价值最终体现在业务赋能上。本节通过规划、建设、运维3个阶段的具体应用场景，展示数据基底如何支撑全生命周期协同。

3.1　规划与设计阶段

在新线规划选址中，传统方法严重依赖专家经验。基于数据基底，集成了人口热力、就业中心、土地利用规划、地质风险分区、生态控制线、历史文化遗产等多源数据层。通过构建多准则决策分析（MCDA）模型，对多个比选线路方案进行自动化评分与可视化对比（图2）。应用结果表明，该方式将方案初步评估周期由传统的2～3个月缩短至2周内，且分析维度更全面，某延伸线方案因规避了高密度地下管线区和软土地基区，预计降低潜在工程风险与成本超过10%。

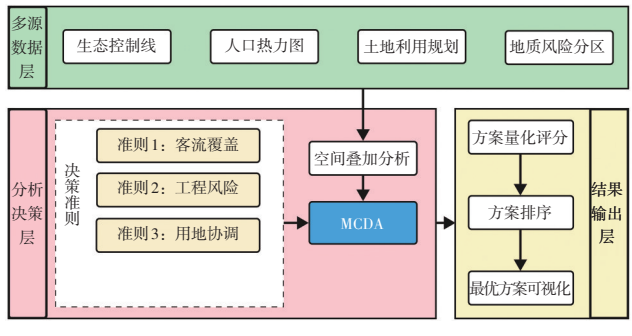


图2　基于多源数据与MCDA模型的规划选址分析

3.2　建设阶段

系统可以接入盾构机实时数据、摄像头监控数

据、其他各类智能监测数据（沉降、变形、位移、应力、压力、地下水位等）、人工监测报表数据等信息源，以实现轨道交通隧道盾构环境的可视化展现、施工现场的安全风险管控，提供多源地质建模、地质预判、盾构安全风险管理、指导施工等应用[16]。以某下穿运营地铁隧道的盾构工程为例，系统通过机器学习模型，对历史掘进参数与地表沉降数据进行训练，建立了该区域地质条件下的沉降预测模型。在实际掘进中，当实时数据与预测趋势发生显著偏差时，系统提前12 h发出黄色预警，提示可能遭遇未勘测到的地质异常。经人工核查，确认为局部空洞，项目立即启动预案，调整注浆参数，最终将运营隧道的沉降值严格控制在设计允许范围内，实现了风险的“事前预防”而非“事后补救”。

3.3 运维与管理阶段

在设施设备运维方面，数据基底整合了设备静态台账、历史故障库以及振动、温度、电流等实时状态监测数据。通过趋势分析、异常检测算法，识别设备的早期退化征兆。例如，在对某线路数百台通风空调机组的数据分析中，模型通过对比相同工况下各机组的电流与效能曲线，自动标记出3台“亚健康”设备。经线下检查发现，其中2台存在滤网严重堵塞，1台风机轴承存在初期磨损，均在性能严重下降或故障发生前完成了维护，提升了设备可靠性，并降低了能耗。

在资产可视化与全生命周期管理方面，基于移动激光扫描建立的站内设施实景三维数据库，与资产管理系统联动[17]。管理者可在三维场景中直接点击任一消防箱或售票机，即刻查看其资产编号、生产厂家、安装日期、维修历史、保修状态等全生命周期信息，实现了资产“看得清、查得明、管得住”，大幅提升了大型资产盘点的效率与准确性

4 结 语

本文提出面向超大城市轨道交通全生命周期管理的“理念—框架—实施”三层融合数据基底模型，将数字孪生与数据治理有机结合，围绕统一时空基准、多源数据融合、知识图谱构建和服务封装四大关键技术形成可复制方案，以上海市轨道交通为实证验证了其对管理效率与决策模式的驱动作用。未来将向“感知泛在、智能内生、进化自主、生态开放”演进，重点深化AI自主决策、拓展与城市CIM等平台联动、创新隐私计算与区块链等数据要素流通机制，推动从“智慧轨交”迈向“轨交智慧城市”。

参考文献

[1] 蔡佳妮. 城市轨道交通车站数字化转型思考及实践[J]. 城市轨道交通研究,2023,26(12):6-10

[2] 杨珂,郭晓飞. 城市轨道交通大数据治理体系架构与关键技术研究[J]. 信息技术与标准化,2025(6):82-89

[3] 刘纯洁,王大庆. 超大规模城市轨道交通线网全寿命周期健康管理系统研究[J]. 城市轨道交通研究,2019,22(5):7-11

[4] 张瑞卫. 上海轨道交通空间数字底座建设探索[J]. 地理空间信息,2024,22(2):97-101

[5] 陈鸿,王勇. 深圳地铁三维地理信息系统建设与研究[J]. 测绘通报,2013(增刊2):10-12

[6] Liu X, Wang J, Liu S, et al. Integration of BIM and GIS for Sustainable Transportation Infrastructure Planning:A Review[J]. Journal of Cleaner Production,2022,367:133005

[7] 刘纯洁. 上海智慧地铁的研究与实践[J]. 城市轨道交通研究,2019,22(6):1-6

[8] 俞光耀. 上海地铁运营维护保障数字化转型实践与思考[J]. 城市轨道交通研究,2021,24(5):1-5

[9] Boje C, Guerriero A, Kubicki S, et al. Towards a Semantic Construction Digital Twin:Directions for Future Research[J]. Automation in Construction,2020,114(6):1-16

[10] Khatri V, Brown C V. Designing Data Governance[J]. Communications of the ACM,2010,53(1):148-152

[11] 孟柯. 上海轨道交通17号线全生命期BIM技术应用研究[J]. 土木建筑工程信息技术,2020,12(3):50-58

[12] Tao F, Zhang H, Liu A, et al. Digital Twin in Industry: State-of-the-Art[J]. IEEE Trans. Industrial Informatics,2019,15(4):2405-2415

[13] DAMA International. DAMA-DMBOK:Data Management Body of Knowledge (2nd Edition)[M]. Technics Publications, 2017

[14] Deng Y, Cheng C J, Anumba C. Mapping Between BIM and 3D GIS in Different Levels of Detail Using Schema Mediation and Instance Comparison[J]. Automation in Construction, 2016,67:1-21

[15] 钟华. 企业IT架构转型之道:阿里巴巴中台战略思想与架构实战[M]. 北京:机械工业出版社,2017

[16] 黄天印,尤江,林桓桓. 数字地铁信息资源集成研究[J]. 城市轨道交通研究,2020,23(5):154-158

[17] 许书影,何伟,童彤. 三维实景技术在数字地铁建设中的应用[J]. 测绘通报,2024(8):141-144