引文格式：肖婧仪,肖剑平,刘美春. 基于数字孪生的地铁隧道智能监测系统建设探讨[J]. 地理空间信息, 2024, 22(5): 111-115. doi:10. 3969/j. issn. 1672-4623.2024.05.024

基于数字孪生的地铁隧道智能监测系统建设探讨

肖婧仪[1]，肖剑平[2*]，刘美春[2]
（1. 武汉工程大学，湖北 武汉 430074；2. 武汉市测绘研究院，湖北 武汉 430022）

摘　要：地铁隧道是城市轨道交通重要的组成部分，由于地质环境复杂，其挖掘与运营成本高、安全隐患大。为实现地铁隧道科学养护和智能化运营管理，迫切需要全息全生命周期的智能化监测系统做支撑。以数字孪生技术为基础，探讨了地铁隧道智能监测系统建设的关键技术、系统架构和主要建设内容，提出了将数字孪生、智能算法调度引擎、激光雷达与视频融合技术相结合的建设思路，对指导隧道智能监测系统建设具有一定的参考价值。

关键词：地铁隧道；数字孪生；AI算法；智能监测；激光雷达；视频融合
中图分类号：P208　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2024）05-0111-05

Discussion on Subway Tunnel Intelligent Monitoring System Construction Based on Digital Twin Technology

XIAO Jingyi[1], XIAO Jianping[2], LIU Meichun[2]
(1. Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China;
2. Wuhan Geomatics Institute, Wuhan 430022, China)

Abstract: Subway tunnel is an important part of urban rail transit, because of the complex geological environment, it has high cost and large safety hazards. In order to meet the scientific operation and safety management of subway tunnel, there is an urgent need for holographic and full life cycle intelligent monitoring system. Based on digital twin technology, we discussed the key technologies, system architecture and main construction contents of subway tunnel intelligent monitoring system construction, and put forward the solution idea of combining digital twin technology, intelligent algorithm scheduling engine, LiDAR and video fusion technology, which had certain reference significance for guiding the tunnel intelligent monitoring system construction.

Key words: subway tunnel, digital twin, AI algorithm, intelligent monitoring, LiDAR, video fusion

随着轨道交通建设的发展，我国成为世界上城市隧道数量最多、建设规模最大的国家。通常隧道周边环境复杂、内部空间封闭且狭窄，极易受地质、环境、灾害、天气、光照、空气和人为等因素影响，引发安全事故。我国地铁隧道建设规模大、发展速度快，地铁隧道施工建设与运营安全风险状况十分严峻。目前，由于地铁隧道信息化建设不足，导致隧道安全风险感知薄弱、监测系统滞后、应急救援效率低下等问题日益凸显。随着信息化技术的提高，借助传感、人工智能和数字孪生等技术加强地铁隧道安全风险感知，构建隧道智能监测系统，保障隧道监管运营，降低运营成本等方面的需求越来越迫切。

1　关键技术

为满足系统智能化、精细化和轻量化的要求，实现高效、高精度、高质量监测，促进数字经济快速发展，系统建设主要利用以AI算法和基于三维场景的视频融合为核心的数字孪生技术，结合卫星遥感、无人机、大数据、物联网、云计算等，实现地形、影像、图片和运维管理等多源数据的采集、分析处理与场景构建，建立各级子系统，搭建智能隧道数字孪生监测管理平台。数字孪生技术架构（图1）以GIS+BIM+IoT、轨道交通运营状态数据等海量异构数据为数据源，对轨道交通时空大数据进行自动识别、数据挖掘与三维重建，为数据赋予空间特性和用途，构建现场运营线

收稿日期：2024-01-02。
第一作者简介：肖婧仪（2002—），本科，研究方向为城市研究、区域规划、数据库研究、数字孪生技术研究、三维建模及场景设计等，E-mail：2683417674@qq.com。
通信作者：肖剑平（1975—），硕士，正高级工程师，研究方向为数字孪生平台建设与推广、大数据研究、地理信息、CIM以及测绘信息系统研发等，E-mail：326505917@qq.com。

路的数字孪生虚拟空间，建立涵盖地上地下、室内室外、二三维一体化的全息高精数字空间底板，真实映射线路运营的实体状态，利用AI计算引擎刻画运营实体状态变化，仿真推演系统的演化和发展趋势。

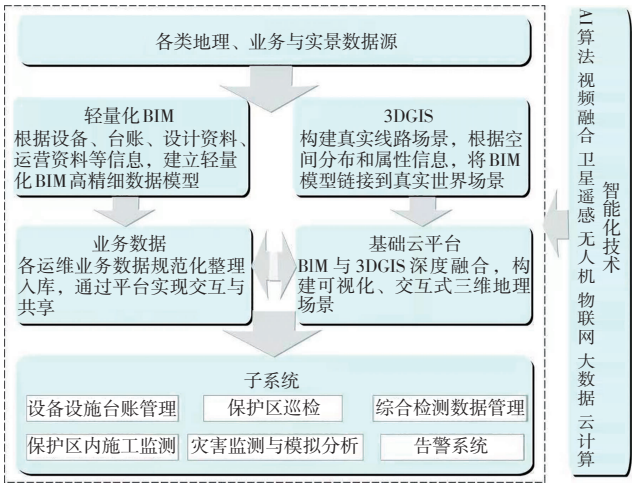


图1 数字孪生技术架构

1.1 AI算法核心技术

利用智能算法调度引擎技术，深入研究不同轨道交通运营场景的AI算法群，建立轨道交通时空数据挖掘、视频图像分析、状态时序数据分析、预测发展趋势、识别风险异常、发现堵点失衡等深层次决策规律智能知识推理平台。在轨道交通运营场景中，智能算法调度引擎发挥着重要作用。时空数据挖掘通过分析车辆的运行时间、速度、位置等数据发现可能的延误、拥堵或故障模式；视频图像分析监控车站和车辆的安全状况，如检测是否有未经授权的人员进入禁止区域或是否有物体落在轨道上；状态时序数据分析监控车辆和设备的运行状态，通过分析电机的电流和温度识别可能的设备故障；利用统计和机器学习技术预测未来事件，如乘客流量、设备故障率等，以便提前进行调度和维护；识别风险异常用于发现可能的安全风险，如通过分析车辆的运行数据识别可能的故障或事故；通过分析系统的运行数据发现可能的瓶颈和不平衡，如通过分析乘客流量发现哪些车站或时间段的乘客流量过大，需增加车辆的运行频率。这些功能共同作用使得智能算法调度引擎能提高轨道交通的运行效率和安全性，降低运营成本，提高乘客的满意度。

1.2 基于三维场景的视频融合技术

根据视点自动调度相关相机，将视频监控图像融合到虚拟三维环境中，形成三维全景视频融合监控。同时，通过全场景相机的同时间轴控制，实现全场景中所有相机任意时刻的视频同步。在地铁隧道智能监测系统中实现了三维环境中虚拟与显示融合过程涉及的多个关键步骤。首先通过部署在隧道内的多个摄像头和传感器收集实时的视频流和环境数据，并根据预设规则或实时的分析结果自动调整视点，以便捕捉到最关键的信息；然后利用数字孪生技术，根据收集的数据构建隧道的三维模型，该模型可精确反映隧道的实际结构和当前状态；再通过计算机视觉和图像处理技术，将收集的视频图像融合到构建的三维模型中，如使用图像配准、融合等技术将二维视频图像映射到三维模型上，视频图像融合后可进行三维全景视频融合监控，系统可实时监控和分析融合后的视频流，以便及时发现并处理可能的问题；最后为了保证监控的连续性和完整性，通过时间戳同步、帧率控制等技术，实现全场景所有相机任意时刻的视频同步。这些步骤共同实现了三维环境中虚拟与显示的融合，从而有效检测和预防隧道的安全问题，不仅可以提高监测的准确性和效率，而且可以大大降低人工巡检的成本和风险。

2 系统架构设计

本文利用以数字孪生为主体的智能化技术，高度融合地理信息技术的多源海量数据管理能力与三维技术的精细化模型构建能力，打造基于数字孪生技术的隧道智能监测系统，实现地铁隧道运维数字化、智能化管理。系统采用可扩展分布式并行技术搭建软硬件一体化计算框架，自下而上设计硬件层、网络层、数据层、能力层、应用层5个层级和运维管理子系统。

1）硬件层分为配套基础设施和智能分析计算的硬件算力设施两部分。配套基础设施为智能分析平台提供数据采集能力。算力设施主要包括各种计算存储设备，初期是单机高性能服务器，随着业务量的增加，可搭建可扩展易定制的计算资源集群；数据采集设备如传感器和摄像头，用于收集地铁隧道的实时数据，计算设备如CPU、GPU和存储设备，用于处理和存储数据。数字孪生技术在该层的应用主要体现在数据采集设备的选择和部署上，需确保设备能够准确、高效地收集隧道的各种数据。

2）网络层主要为链接隧道和运维中心之间的网络通信提供5G网络、有限承载网和WiFi等多种网络。数字孪生技术在该层的应用主要体现在数据的实时传输上，需确保数据能够快速、准确地从隧道传输到运维中心。

3）数据层主要负责管理和存储构建地铁隧道数字孪生底座的各类基础数据，包括地铁运营数据、服务类

数据、维修维护数据、检验监测数据、资产数据、设备数据、业务数据以及数字孪生数据等。数字孪生技术在该层的应用主要体现在数据的组织和管理上，需构建一个能够有效管理和查询海量数据的数据库系统。

4）能力层分为大数据平台、AI计算平台和数字孪生平台3个部分。大数据平台主要负责整个系统的元数据管理、存储管理、计算调度、数据库管理等底层管理，为上层的算法模型和任务调度提供并行分布式计算存储能力。AI计算平台主要包括各类机器学习、深度学习、科学计算、图像处理、信号处理等框架以及业务处理所需的专用算法库，为上层提供算法和模型运行能力，根据业务功能需求，实时高效调度各种分析检测任务、数据处理任务，提供高效的业务并行处理能力。数字孪生平台依赖系统各类数据、主题应用，叠加各种资源空间进行一张图展示，是数据资源应用案例的展示窗口，利用场景渲染、动态加载和云渲染等核心技术实现对基础地理信息数据、城市三维模型数据、倾斜摄影数据和POI数据的承载。数字孪生技术在该层的应用主要体现在数字孪生平台的构建和管理上，需确保数字孪生模型能够准确反映隧道的实际状态，并能实时更新和交互。

5）应用层主要面向业主的隧道管理业务需求，设计实现监控系统、检测系统、识别系统、预测系统、预警系统和决策系统等应用系统。数字孪生技术在该层的应用主要体现在各种应用系统的设计和实现上，需确保这些系统能够有效利用数字孪生模型和数据，提供准确、高效的服务。

6）运维管理子系统是一个垂直组织的子系统，负责整个系统的运维管理。数字孪生技术在其中的应用主要体现在运维策略的制定和执行上，需确保运维策略能够有效利用数字孪生模型和数据，提高运维效率，降低运营成本。

为实现系统搭建、运维与监控，与数据采集、数据处理、数据传输、数据分析、报警以及运维监控等相配套的硬件必不可少，硬件架构见图2。系统运行过程中，通过前端探测设备（视频监控、激光雷达等智能设备）采集数据，获取原始图片、视频以及其他物联网感知数据；再利用前端边缘计算设备进行数据预处理和初始分析，并将分析结果通过有线网络/无线/5G上传至后端服务器。后端服务器上部署并启动了整套智能数据分析软件，对数据进行综合处理、分析、缺陷和故障识别、结果生成等处理，并以服务的方式提供给隧道智能监测综合管控平台的运维中心服务器。在运维中心服务器上部署隧道智能监测综合管控平台，后端通过服务接口向后台服务器发出各种获取数据和信息的请求，获得所需的数据和图片，并通过组织、统计、渲染等发布到前端系统；前端系统直接面对业主用户，与用户交互，为用户提供所需的应用功能，完成智能化监测和管理的业务。

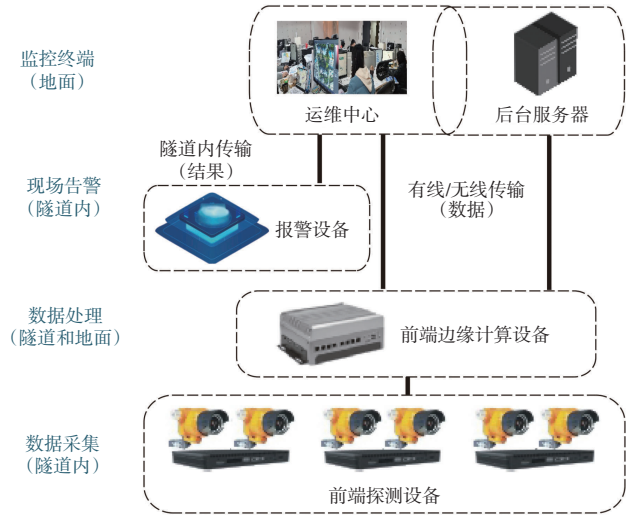


图2　硬件架构

3　主要建设内容

系统建设主要包括数据库建设、平台建设和激光雷达布设3个主要内容，数据库建设是基础，平台建设是核心，激光雷达是保障。

3.1　数字孪生隧道底座数据建设

利用数字孪生场景高渲染平台将矢量栅格、激光点云、倾斜摄影、BIM、手工模型等，尺度从地上、地下到室内，涉及规划设计、施工建设和运维管理的全生命周期数据，构建隧道沿线的数字孪生虚拟空间，建立涵盖地上地下、室内室外、二三维一体化的全息、高清的数字空间底板。

1）基础数据采集与集成。利用多种现代化的数据采集与处理手段采集地铁周边遥感影像、沿线地形数据和三维实景模型数据，并进行规范化整理，获取系统搭建的基础数据；同时将已建系统数据接入数据服务。为了获得逼真的三维模拟效果，提供三维模拟对象，利用三维激光扫描技术采集点云信息，快速建立精确的隧道设施设备以及设备BIM精细三维模型，效果见图3、4。



图3　采集的激光点云数据



图4　点云数据建模

2）业务数据采集与集成。分析现有地铁隧道运维中的各项业务需求，对业务中的数据进行梳理，制定数据存储和交换标准规范；再依据规范对线路与里程数据、保护区数据、用地红线数据、车站范围数据、设备设施台账和隧道模型数据等进行采集、分析处理与入库。

3）数字孪生隧道底座数据库建设。采用数据库系统管理方式，通过数据表及其关系反映模型的分层、分区和分类信息，搭建数字孪生隧道底座数据库。在统一的规范标准下，选择先进的数据组织架构和数据库管理引擎完成数据库建设（图5）。

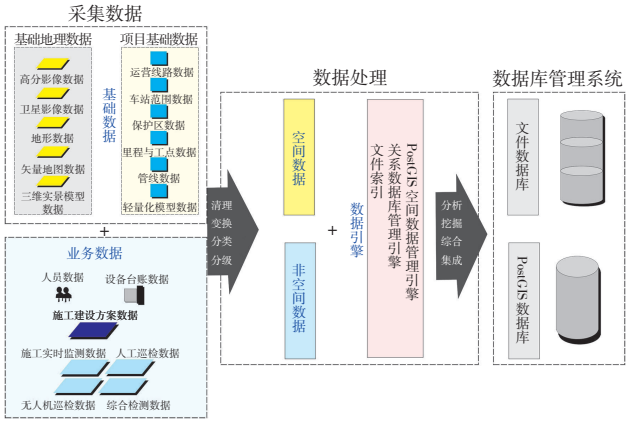


图5 数据库建设

3.2 隧道智能监测系统建设

3.2.1 综合管控平台

以数字孪生、三维重建为导向，对地铁隧道内场景1∶1还原可实现隧道的三维可视化管理，一键获知设备信息；充分利用物理模型，通过传感器更新、运行历史数据的集成仿真过程，在虚拟空间中完成映射，从而反映相应实体装备的全生命周期。以孪生模型为载体，海量接入智能终端数据，构建多状态感知能力，为未来的隐患分析、状态标识提供数据支撑，有效辅助运维决策。

3.2.2 隧道行为安全监测

行为安全监测包括人员闯入沿线轨道区域预警、人员入侵危险区域与物品掉落预警、隧道设施损坏检测、隧道设施侵界检测。传统视频监控覆盖范围受采光等多种环境因素影响，无法捕捉目标物细节信息，无法实现24 h主动目标定位、目标跟踪、目标三维信息、特征图片抓拍等。现有的监控摄像头装置将激光雷达与摄像头相结合，采用先进的点云分析算法和图像处理技术，可实现7×24 h无间断严密的自动化监测。系统通过触发声光报警器来减少潜在事故，大大提高了准确度和实用性，保障运营人员生命安全和交通运输安全，降低由基础设施损坏导致的误工误产。

1）人员闯入沿线轨道区域预警。若有人员进入监测范围，激光雷达可自动监测识别其位置信息，并通过摄像头进行聚焦抓拍，将图像传输到管理中心，在管理中心输出报警信号。

2）人员入侵危险区域与物品掉落预警。自动识别目标物的位置、大小等信息，动态抓取入侵物体轨迹信息，实时预警区域内人员入侵或异常事件，判断是否直接影响列车运行安全，不仅可以检测入侵人员，还可以在大场景范围内锁定微小目标物。系统前端的智能算法可检测自定义区域中是否存在人员或物品，如有则立即发出警报通知。

3）隧道设施损坏检测。将三维地图匹配结合多传感器检测隧道内设备设施状态，如设备脱落和损坏等问题，并定位设备设施位置，将其报告给运维中心。

4）隧道设施侵界检测。基于激光雷达与长、短焦摄像头探测隧道内的步行板、线缆、设备箱等设备设施是否侵界，判断是否直接影响列车运行安全。

3.2.3 隧道结构变形安全监测

按照一定间距布设雷达设备，并与移动式激光雷达进行配合，对隧道结构形变进行动态监测，激光雷达采集数据见图6。点云数据经过预处理后，采用算法对隧道断面进行拟合，得到较光滑的曲线；再通过对比前后时间的隧道断面曲线拟合图，分析隧道形变情况。

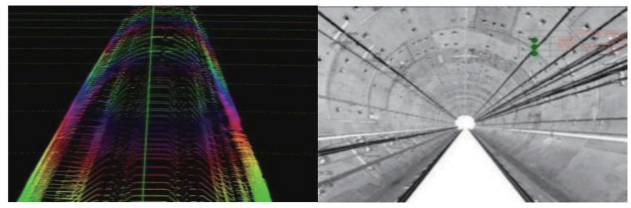


图6 激光雷达采集数据

3.2.4 视频分析与融合

通过对接隧道视频系统，实时监测隧道内的交通、车辆、环境状况，精准识别隧道内的水位、异物入侵、火灾、烟雾等事件，并及时对安全问题发布预警，包括区域入侵监测、烟雾与火焰监测、水位监测、视频融合。

1）区域入侵监测。对于重点治安防控区，可在三维场景中划定禁止进入的区域，人、车或其他运动物体进入禁区将自动报警，同时关联对应的视频摄像头以提醒监控管理人员进行识别和处置。

2）烟雾与火焰监测。基于智能视频分析，一旦监测到烟雾或火焰，系统将报警提醒监控管理人员予以识别和应急处置。

3）水位监测。对隧道内的积水点进行实时的水位监测，利用视频、图像监控分析，实现数据越限自动预警提示，通过4G/5G/NB-IoT/光纤网络传输至监控中心软件。借助该系统可掌握隧道内涝状况，及时进行排水调度，避免人员、车辆误入深水路段造成重大损失。

4）视频融合。系统以视频监控为基础，采用视频融合的方式实现动态场景的三维再现。面向海量的视频监控资源，对每路视频监控探头的位置进行匹配，并对每路视频照射范围进行标注。视频监控探头具有分层、分区、分组等分类显示管理和检索查询定位功能，实现三维站点场景视角关联，通过多窗口视频点选方式实现视频浏览、联动控制等应用。

3.2.5　智能巡检养护

系统实现隧道远程7×24 h动态自动监测，分级预警；对管养人员日常巡查、定期检查、维修管养等重点工作进行记录、管理和分析，并可辅助移动设备随时随地查看监测信息和结论参考，现场核实处理问题；通过隧道智能设备，对隧道内路面异物、墙壁、顶部渗漏水等异常情况进行检测并预警。同时，根据每日安全监测数据生成统计分析和预警报告，实现隧道病害趋势预测，为制定科学的隧道养护计划、巡检计划提供重要支撑。系统可定期比对监测数据，形成监测报告和隧道健康状态走势，为养护工作提供数据支撑，助力桥隧的异常情况后评估。

3.2.6　智能决策支持

通过常态化智能化监测数据的长期积累，为隧道定期巡检和特殊检查提供了更全面的数据分析，为隧道整治设计提供了可靠的数据支撑，包括隧道设施可视化管控、辅助应急决策、历史数据分析、隧道安全风险判别等。

3.3　激光雷达的布设

根据国家对地铁隧道指标要求，从抗震动、辐射干扰、高低温与湿热、盐雾、电磁兼容、人眼安全等方面严格控制激光雷达参数。为减少误报、漏报和重复报告，雷达需兼具三维和二维的探测功能并集成智能点云算法，可探测10~150 m范围内的目标物，光源绝对保障人眼安全，支持厘米级物体识别，精度在3~20 mm。三维激光雷达监测系统由前端监测模块（三维激光雷达，提供三维点云数据）、数据处理模块（主控板，软件集成算法SDK接口，方便客户二次集成，硬件由通信航插接口、220V电源接口、电路板组成）、整体工装模块（吊顶安装支架，结构化设计使安装便捷，客户可定制设计）3部分组成。激光雷达布设方案见图7，将监测模块安装在隧道的横梁支架上，可一次性覆盖地铁隧道区域，垂直向下探测，对隧道进行全方位探测。以长度80 m、高度8 m的隧道为例，对激光雷达水平和垂直角度进行计算，仅需两个激光雷达即可全覆盖整个隧道面积。

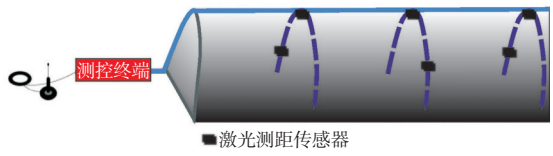


图7　激光雷达布设

与传统监测过程不同，数字孪生技术通过创建物理实体的虚拟副本实时反映物理实体的状态。在地铁隧道智能监测系统中，首先需部署各种传感器和摄像头来实时收集温度、湿度、震动等地铁隧道各种数据；然后将这些数据送入数字孪生模型，模型将实时更新以反映隧道的当前状态。因此，运营人员能实时监控隧道状态，及时发现并处理可能的问题。系统可利用历史数据和机器学习算法训练得到一个预测模型，并将其集成到数字孪生模型中，通过预测模型可预测隧道的未来状态，若能预测出隧道某个部分未来可能出现的问题，运营人员就可提前采取措施，避免问题的发生。

4　结　语

数字孪生技术是一种基于物理对象、过程和系统进行数据化建模、仿真和优化的技术。隧道工程作为一个复杂的物理系统，在建设过程中涉及设计、施工、监理、检测等多个环节，因此在隧道智能监测系统建设时需考虑海量数据轻量化技术、BIM技术等，明确网络反应速度、各类BIM分级标准，只有这样，才能使系统运行流畅、真正利用数字孪生技术实现对隧道工程从建设规划到运营管理全生命周期的数字化管理与智能化决策。

参考文献

[1]　《中国公路学报》编辑部. 中国交通隧道工程学术研究综述·2020[J]. 中国公路学报,2022,35(4):1-40

[2]　中国铁道学会智能铁路委员会,中国铁道科学研究院集团有限公司科学技术信息研究所. 数字孪生技术研究与应用进展[J]. 铁路计算机应用,2023,32(10):85-88

（下转第126页）