

# 施工隧道变形监测与预警原型系统设计与实现

吴京泽<sup>1</sup>, 薛晨兴<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 云南云岭高原养护工程有限公司, 云南昆明, 中国

<sup>2</sup> 西南交通大学信息科学与技术学院, 四川成都, 中国

**【摘要】**为解决隧道施工安全监测问题, 针对施工过程中变形监测实时性与预警有效性的不足, 设计并实现了一套施工隧道变形监测与预警原型系统。系统支持多源传感器数据的统一接入与集中存储, 提供沉降、收敛等关键指标的动态可视化展示, 具备基于阈值的多级超限自动预警与信息推送机制, 并集成完善的项目管理体系。通过功能验证、性能测试及实际工程应用表明, 该系统能够实现对隧道变形状态的实时、准确监测, 及时识别并预警潜在风险, 有效支撑施工安全的信息化决策, 显著增强了隧道施工过程的安全保障能力。

**【关键词】**隧道施工; 数据存储; 安全预警; 数据可视化; 信息化管理

## 1. 引言

随着我国城市地下空间开发和交通基础设施建设的快速推进, 隧道工程规模不断扩大, 施工环境日益复杂, 安全风险显著增加。隧道在开挖过程中易受地质条件、支护结构、施工扰动等多重因素影响, 发生沉降、收敛等变形现象[1], 若未能及时监测与预警, 可能引发塌方、支护失效甚至重大安全事故。因此, 建立一套高效、可靠、智能化的变形监测与预警系统, 对保障施工人员安全、控制工程风险、提升项目管理水平具有重要意义。

目前, 传统隧道监测多依赖人工定期采集数据, 存在时效性差、数据分散、分析滞后等问题[2]; 部分工程虽已部署自动化传感器, 但常因缺乏统一的数据管理平台, 导致“信息孤岛”现象突出, 难以实现多源异构数据的融合分析与实时响应[3]。近年来, 国内外学者在隧道监测信息化方面开展了诸多探索, 如基于物联网的监测网络构建、基于阈值或统计模型的预警方法[4]、以及 BIM 与监测数据融合的可视化平台[5]等。然而, 现有系统在功能集成度、预警智能化水平及工程适用性方面仍有不足, 尤其在资源有限的中小型隧道工程中, 亟需轻量化、低成本且易于部署的原型系统支撑。

针对上述问题, 本文设计并实现了一套面向施工阶段的隧道变形监测与预警原型系统。该系统聚焦多源监测数据的统一接入与集中管理[6], 支持沉降、收敛等关键指标的动态可视化展示, 集成基于阈值规则的多级自动预警机制, 并配套完善的项目管理体

系, 旨在为现场管理人员提供实时、直观、可操作的决策支持。通过在实际隧道工程中的部署与测试, 验证了系统的有效性与实用性。

## 2. 系统总体设计

### 2.1 系统设计目标

为有效应对当前隧道施工过程中变形监测存在的数据孤岛、响应滞后、管理粗放等突出问题, 本文所设计的施工隧道变形监测与预警原型系统, 旨在构建一个集“存储—分析—预警—管理”于一体的轻量化信息化支撑平台。

### 2.2 系统整体架构

在系统架构设计上, 支持多源传感器的统一接入[7], 包括但不限于静力水准仪、收敛计、全站仪、倾角传感器以及光电图像位移传感器等, 兼容 HTTP、MQTT 等主流工业通信协议[8]。本文将上述各类传感器在工程管理中的逻辑监测单元统称为“测点”, 即一个测点对应一个物理传感器实例。在当前原型系统阶段, 优先部署了光电图像位移传感器(即测点)作为主要感知单元。该传感器基于视觉测量原理[9], 可非接触式获取隧道断面关键点的二维位移变化, 具有安装便捷、抗电磁干扰、适合狭长空间等优势, 适用于隧道的收敛与沉降监测需求。

系统平台采用前后端分离架构。前端基于 Vue2 框架开发, 结合 ECharts 可视化库, 实现监测数据的动态可视化展示。后端服务采用 SpringBoot 构建, 提供统一的 RESTful API 接口, 负责数据查询、业务逻辑处理等功能。在数据存储方面, 系统采用 MySQL

与 TDengine 混合数据库方案[10]。系统整体架构图如图 1。

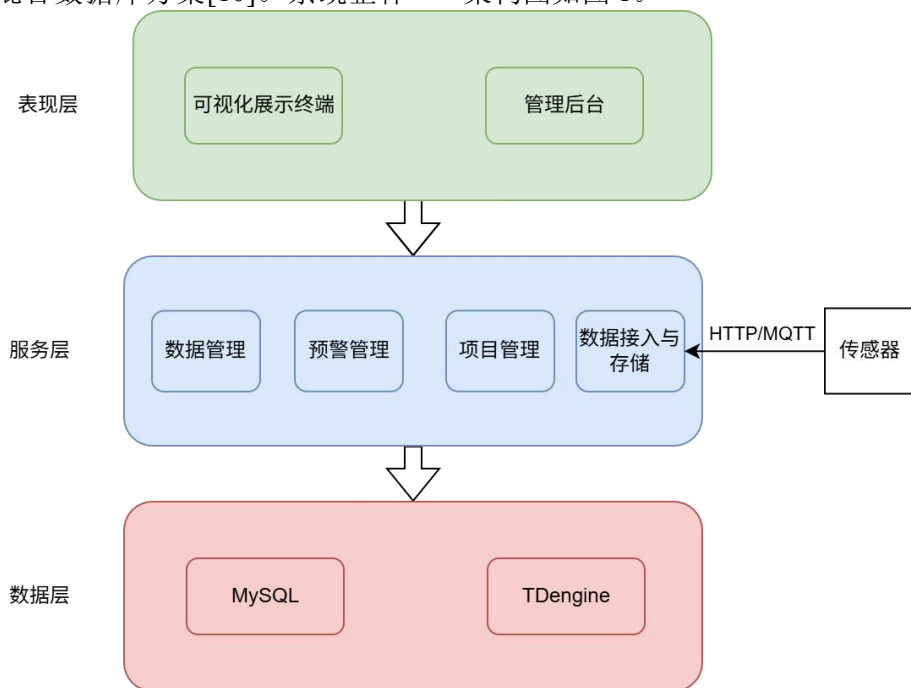


图 1. 系统整体架构图

### 2.3 系统功能设计

本系统由多源数据接入与存储服务、管理后台和隧道可视化展示终端三部分构成，形成“支撑—管理—展示”三位一体的功能体系。

多源数据接入与存储服务作为系统的底层支撑组件，负责接收来自各类传感器的监测数据，并完成数据的标准化解析与持久化存储，不直接面向用户交互，为上层功能模块提供可靠的数据来源。

管理后台面向工程管理人员，支持全功能操作，包含以下三大核心模块：

(1) 数据管理模块：该模块涵盖数据监测与数据分析。数据监测支持各测点的实时动态展示及历史数据条件查询；数据分析聚焦于断面拱顶沉降位移与周边收敛位移的趋势计算（基于对应测点数据）与可视化，并将结果同步推送至可视化终端。

(2) 预警管理模块：该模块由预警阈值与预警记录组成。预警阈值支持用户可依据监测内容及具体传感器信息，灵活设置黄、橙、红三级预警阈值；预警记录支持系统自动记录所有触发的预警事件，区分“已处理”与“未处理”状态，并支持处理意见填写。相关预警记录信息同步展示于可视化终端，便于现场快速响应。

(3) 项目管理模块：用于构建和维护隧道项目的层级化管理体系，主要包括项目结

构管理、结构物管理和断面管理。项目结构管理负责对工程项目组织结构树进行全生命周期管理，支持用户对多级节点（如“工程公司→管理处→某某区县→隧道项目→具体隧道”）进行新增、编辑、删除和查询操作。系统以树形结构可视化展示项目层级关系，并在结构树旁提供统计信息展示，包括各级节点的数量（如当前共有多少个管理处、路段及隧道），以及所关联的传感器总数，便于管理人员快速掌握项目整体规模与监测覆盖情况。结构物管理用于维护具体隧道（即结构树的最后一个节点）的基本属性信息，包括隧道名称、地理位置、施工单位、起止里程、总长度等关键元数据，确保工程实体信息的完整性与可追溯性。断面管理支持在指定隧道结构物下，对监测断面进行增、删、改、查操作；同时可为每个断面配置对应的测点，实现“隧道—断面—测点”的逐级关联。所定义的断面与测点信息需与传感器上报的数据标识保持一致，以保障后续数据查询与展示的准确性。该模块构建的工程元数据体系，为数据管理、预警分析及可视化展示提供了基础支撑。

可视化展示终端聚焦于隧道施工状态的集中呈现，主要展示当前所选隧道的结构物信息、断面布局、测点分布，以及对应测点的实时监测数据、变形趋势分析结果和多级预警记录等，为现场值班人员提供直观、全

局的安全态势感知。

### 3.系统关键技术实现

为支撑第二章所述功能需求，系统在工程建模、数据接入与存储、数据分析及预警管理等环节采用了多项关键技术，具体实现如下。

#### 3.1 工程层级建模技术

采用 MySQL 邻接表模型[11]存储多级项目结构树，关联结构物、断面与测点表。前端使用 Vue2 Tree 组件渲染层级结构，测点信息与传感器上报标识严格一致，保障监测数据能准确映射至对应工程位置。

#### 3.2 多源数据接入与存储技术

系统通过标准化接口实现多源传感器数据的统一接入。当前以光电图像位移传感器为主，其通过 HTTP 协议定期向后端发送 JSON 格式数据包，包含测点唯一标识、时间戳、X/Y 方向位移值等字段；同时预留 MQTT 接入通道，支持未来扩展其他类型传感器。后端基于 SpringBoot 构建 RESTful 接口，对接收到的数据进行合法性校验（如时间有效性、数值范围）与格式标准化处理。

在存储层面，采用 MySQL+TDengine 混合架构。MySQL 存储系统所有的基础信息；TDengine 作为时序数据库，按“超级表+子表”模型组织数据，每个测点对应一个子表，高效写入高频位移时序数据。该设计显著提升大规模监测场景下的写入吞吐量（实测达 10 万点/秒）与按时间段查询性能，为实时监测与预警提供底层支撑。

#### 3.3 数据管理与可视化技术

后端通过 SpringBoot 提供 REST 接口，从 TDengine 查询测点实时/历史数据以及断面沉降位移、周边收敛数据。前端基于 Vue2+ECharts 根据查询到的数据实现动态折线图。支持按项目—结构物—断面三级联动筛选，确保数据与工程实体一致。

#### 3.4 预警管理与信息推送技术

预警阈值存储于 MySQL，后端启动定时任务线程（基于 Spring Task）进行比对 TDengine 最新数据与阈值规则。超限时生成预警记录并通过 WebSocket 实时推送前端[12]，同时调用短信 API 通知责任人，实现“判别—记录—推送”闭环。

### 4.系统应用与验证

为验证所设计原型系统的可行性与有效性，本文将其部署于云南某隧道施工区间进行实地测试。该隧道区间全长近 2km，共布

近 20 个监测断面，每个断面部署 3 到 7 个测点，用于非接触式采集测点数据，采样频率为 30 分钟/次。

系统上线后，管理人员通过管理后台完成项目结构树配置、隧道结构物信息录入及断面-测点绑定，确保传感器上报的测点信息与系统元数据一致。监测数据经 HTTP 协议上传至 SpringBoot 服务，解析后存入 TDengine 数据库，写入延迟低于 500ms。

运行测试期间，系统累计接入有效监测数据逾 4.5 万条。数据管理模块成功实现关键指标的动态可视化：管理人员可通过管理后台查看任意断面的沉降时程曲线，隧道大屏终端同步展示全隧道预警状态与重点断面变形趋势。预警管理模块依据工程规范设置了三级阈值。期间，某断面因邻近降水作业导致沉降速率骤增，系统在数据入库后 1 分钟内动触发三级黄色预警，通过 WebSocket 实时推送至大屏，并短信通知责任人。项目团队及时采取措施，48 小时内变形趋于稳定，未造成安全事故。

用户反馈表明，相比传统人工记录方式，系统显著提升了数据查询效率（从分钟级缩短至毫秒级）、预警响应速度（从数小时降至 10 分钟内），并实现了项目组织、监测对象与数据的统一管理。验证结果表明，本原型系统功能完整、运行稳定，能够有效支撑中小型隧道工程的变形监测与风险预警需求。

### 5.结论

本文针对隧道施工中变形监测存在的分散、响应滞后与管理粗放等问题，设计并实现了一套轻量化的施工隧道变形监测与预警原型系统。系统围绕四大核心模块——多源数据接入与存储、数据管理、预警管理及项目管理，构建了从传感器接入、工程建模、实时监测到自动预警的完整业务闭环。通过在实际隧道工程中的部署验证，系统有效实现了监测数据的统一管理、关键变形指标的动态可视化、多级阈值驱动的自动预警以及项目层级结构的数字化组织，显著提升了现场安全管控的时效性与协同效率，为中小型隧道工程提供了可行的信息化支撑工具。

### 参考文献

- [1]杨晨.联络通道开挖对地表沉降和既有隧道影响及控制措施研究[D].安徽建筑大学硕

- 士学位论文, 2024.
- [2]吴灿鑫, 胡雷鸣, 付和宽.地铁隧道自动化监测精度分析[J].测绘通报, 2015 (1): 137-138.
- [3]陈淼新, 郑建雷.隧道拱顶沉降监测多源数据融合分析[J].勘察科学技术, 2025, (4): 7-11+60.
- [4]于维刚, 胡鹏, 宋浪.基于概率统计下白马隧道监控量测预警阈值研究[J].现代隧道技术, 2019, 56 (S2): 285-290.
- [5]吴冬, 安彬, 南宏峰等.基于 BIM 的隧道工程预警可视化应用研究[J].现代交通技术, 2022, 19 (4): 34-38.
- [6]周文博.地铁隧道工程施工信息化管理与应用研究[J].科技与企业, 2014, (23): 61.
- [7]张姗姗, 李家平, 张明.基于微服务的地铁隧道多源异构传感器自动化监控系统建设与实践[J].城市勘测, 2024, (3): 59-63.
- [8]汪世琳.基于物联网平台的通讯协议设计及应用研究[D].安徽理工大学硕士学位论文, 2022.
- [9]王晓东.精密微小装配中的传感器与测量技术[J].计测技术, 2021, 41 (5): 10-22.
- [10]张粤磊, 刘未昕, 胡振兴等.数据库应用实战[M].电子工业出版社, 2024.
- [11]李龙.流程工业实时数据库分布式服务框架的设计与开发[D].浙江大学硕士学位论文, 2015.
- [12]杜明远.基于 WebSocket 的即时通信系统设计与实现[D].大连理工大学硕士学位论文, 2016.