

交通基础设施结构群综合监测系统设计及应用

袁佳锋¹, 回恒酉^{2,*}

1. 诸暨市交通基础设施建设有限公司, 浙江 诸暨, 311800

2. 中交上海航道局有限公司绍兴分公司, 浙江 绍兴, 312000

摘要: 针对交通基础设施结构群监测中多系统独立部署、不同结构监测指标难以统一配置, 以及感知数据与预警管理脱节等问题, 依托 235 国道杭州至诸暨段改建工程, 设计并实现了一套“感知—数据—应用”三层架构的综合监测预警系统。感知层按结构类型确定差异化的监测指标、轻量化传感器选型与测点布设; 数据层采用“端—边—云”三级处理架构, 经边缘预处理后以 MQTT 协议接入云平台; 应用层实现结构状态评估、三级预警发布与移动端处置闭环。针对桥梁挠度、隧道拱顶沉降与边坡表面位移, 分别建立了基于规范限值与统计控制限的三级阈值。以溪口示范区 2025 年 4 月 (隧道处于施工扰动期) 的实测数据为例, 隧道拱顶累计沉降 37.344 mm、进入蓝色预警区间, 桥梁主梁挠度幅值最大 11.506 mm、边坡水平位移幅值最大 3.610 mm, 均处于正常范围。结果表明, 三类结构的差异化位移响应可在统一监测框架下得到区分, 所建阈值与实测数据匹配良好, 可为同类山区公路结构群监测系统的设计与实施提供参考。

关键词: 交通工程; 结构健康监测 (SHM); 监测系统设计; 轻量化感知

Design and Application of an Integrated Monitoring System for Transportation Infrastructure Structural Clusters

Jiafeng Yuan¹, Hengyou Hui^{2,*}

1. Zhuji Transportation Infrastructure Construction Co., Ltd., Zhuji Zhejiang 311800, China

2. Shanghai Navigation Bureau Co., Ltd. (CCCC) Shaoxing Branch, Shaoxing Zhejiang 312000, China

Abstract: To address issues in the monitoring of transportation infrastructure clusters—such as the independent deployment of multiple systems, difficulties in uniformly configuring monitoring indicators for different structures, and the disconnect between sensing data and early warning management—a comprehensive monitoring and early warning system with a three-tier “sensing–data–application” architecture was designed and implemented based on the reconstruction project of the Hangzhou–Zhuji section of National Highway 235. The sensing layer determines differentiated monitoring indicators, selects lightweight sensors, and lays out measurement points according to structural types; the data layer employs a three-tier “endpoint–edge–cloud” processing architecture, with data transmitted to the cloud platform via the MQTT protocol after edge preprocessing; the application layer implements structural condition assessment, three-level early warning issuance, and a closed-loop response process via mobile devices. For bridge deflection, tunnel crown settlement, and slope surface displacement, three-level thresholds were established based on code limits and statistical control limits, respectively. Taking actual measurement data from the Xikou Demonstration Zone in April 2025 (when the tunnel was in the construction disturbance phase) as an example, the cumulative settlement of the tunnel crown was 37.344 mm, entering the blue warning zone, while the maximum deflection amplitude of the bridge main girder was 11.506 mm and the maximum horizontal

displacement amplitude of the slope was 3.610 mm—both within normal ranges. The results indicate that the differentiated displacement responses of the three types of structures can be distinguished within a unified monitoring framework. The established thresholds align well with the measured data and can serve as a reference for the design and implementation of monitoring systems for similar groups of mountainous highway structures.

Keywords: Transportation engineering; Structural Health Monitoring (SHM); Monitoring system design; Lightweight sensing

1 引言

交通基础设施结构健康监测 (Structural Health Monitoring, SHM) 由单一结构的应用逐步向区域路网级的规模化应用发展。随着监测设备性能及数据采集、传输与分析处理技术的不断进步, SHM 已在大跨桥梁、长大隧道等重点结构中得到较为广泛的应用^[1]。然而, 山区公路的桥梁、隧道与边坡常在较短里程内密集分布, 单处结构物发生病害或失稳时, 其影响易波及相邻设施。现有监测系统多按单一结构类型独立建设, 不同结构的监测指标与精度要求难以在统一框架下协调^[2]; 山区监测点普遍存在供电与公网覆盖不足的问题, 有线布设及高功耗设备的部署与运维成本较高^[3]; 感知数据与预警管理之间亦常相互脱节, 缺乏由数据分析直接驱动的分级响应机制^[4]。结构安全预警作为 SHM 系统的核心功能之一, 其有效性直接取决于预警阈值的科学性和分级响应机制的完整性。现行规范对结构承载能力极限状态已有明确规定, 但针对结构健康状态的分级预警阈值尚缺乏统一的划定方法^[5]; 已有研究多通过有限元计算、历史数据统计或二者结合来确定阈值, 而不同结构类型的变形机理差异显著, 单一阈值难以适用于多结构场景^[6]。就预警分级而言, 已有研究虽提出了面向特定结构的预警等级划分方法, 但面向桥—隧—坡结构群的系统性分级预警体系仍有待完善。

针对上述问题, 本文依托 235 国道杭州至诸暨段改建工程的溪口段, 设计并实现了一套面向桥—隧—坡结构群的综合监测预警系统。首先, 按结构类型建立差异化的监测指标与感知配置, 以视觉形变仪、多功能监测站和压电式雨量计为核心设备构建轻量化感知网络; 其次, 采用 LoRa 低功耗组网与“端—边—云”三级数据处理链路, 以适应山区供电与传输受限的现场条件; 进而针对桥梁挠度、隧道拱顶沉降与边坡表面位移, 分别建立基于规范限值与统计控制限的三级预警阈值体系, 并制定统一的分级响应流程; 最后, 利用溪口示范区的实测数据, 验证系统在桥—隧—坡三类场景中的工程适用性, 以期为山区公路结构群监测系统的设计与实施提供参考。

2 结构群差异化监测需求与感知配置

交通基础设施结构群研究选取 235 国道杭州至诸暨段改建工程的溪口段。作为监测示范区, 溪口段边坡为强风化岩质陡坡, 节理裂隙发育, 可用于考察轻量化监测对浅层滑坡的识别能力; 隧道段围岩较破碎, 可反映围岩应力重分布与衬砌变形的发展; 桥梁段主要承受车辆动载与基础环境作用, 可观测主梁挠度随荷载和环境的变化。该段在较短里程内同时具备三类结构, 地质条件与防护型式各异, 其监测结果对浙闽丘陵区同类地质条件下的风险点布设具有一定参考价值。

溪口隧道桩号为 K40+702~K40+892, 全长 190 m, 为连拱式隧道, 下伏基岩为熔结凝灰岩; 隧道出口边坡桩号为 K40+892~K41+008.5, 表部为残坡积含砾粉质黏土, 一、二级坡采用柔性网和厚层基材防护, 三、四级坡增设系统锚杆; 溪口大桥中心桩号为 K41+142, 上部结构为 30 m 跨预应力混凝土箱梁, 下部结构采用桩柱式墩、桩基础。三类结构在约 450 m 范围内相邻分布, 且地质条件与防护型式各异, 适合作为结构群综合监测的验证对象。由于三类结构在监测参数类型、量级范围、采样频率及预警判断上均存在差异, 难以采用统一的感知配置^[7], 故监测方案按结构类型分别设计,

并在数据层与应用层统一汇聚。差异化监测需求与感知配置见表 1。

表 1 桥—隧—坡差异化监测需求与感知配置

Table 1 Differentiated monitoring requirements and sensing configuration for bridge-tunnel-slope structures				
结构	主要病害/风险	关键监测指标	感知设备	常态采样/上传策略
桥梁	裂缝、沉降、线形变化、超载冲击	主梁挠度、桥墩倾斜、控制截面应变	视觉形变仪+靶标、应变计	形变 10 min/次；应变连续采集、10 min 聚合上传
隧道	衬砌开裂、拱顶下沉、周边收敛、中墙偏压	拱顶沉降、周边收敛、断面相对位移	视觉形变仪+靶标	30 min/次，施工扰动期加密至 10 min/次
边坡	坡面滑移、深部变形、降雨型浅层滑坡	坡表位移、三轴倾角/加速度、降雨强度与累计雨量	视觉形变仪+靶标、多功能监测站、压电式雨量计	形变 30 min/次；倾角阈值触发采集；雨量 5 min/次，降雨期加密

3 结构群综合系统总体架构

系统采用“感知—数据—应用”三层逻辑架构，与物理部署上的“端—边—云”三级链路相对应，总体架构如图 1 所示。感知层负责多类型参数的现场采集与就地预处理，数据层负责数据的汇聚、存储、清洗与特征提取，应用层负责结构状态评估、分级预警与处置闭环。平台采用 B/S 架构并配套移动端应用，各子平台按结构类型定制功能，并通过统一数据接口与主平台交互。

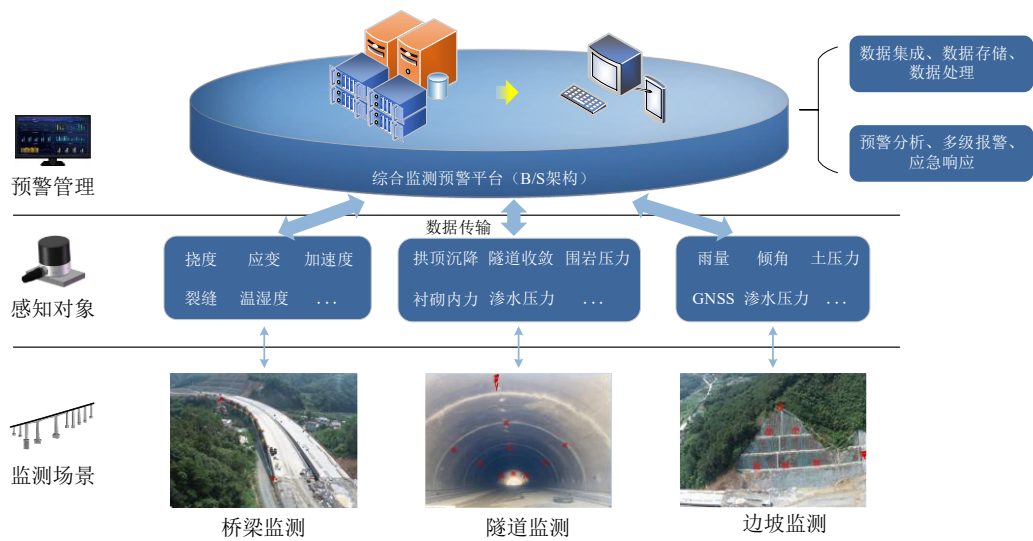


图 1 综合监测预警平台框架

Fig. 1 Framework of the Integrated Monitoring and Early-Warning Platform

3.1 感知层设计

（1）传感器选型依据。传感器选型主要遵循以下四项要求：一是量程与分辨率须覆盖表 1 中关键指标的预期变化范围，并留有不小于 2 倍的余量；二是设备须适应山区潮湿、温差大的环境，工作温度满足 -40℃~85℃、防护等级不低于 IP 67；三是功耗足够低，在无市电条件下可依靠太阳能与储能长期自持运行；四是通信协议与数据格式统一，便于在数据层归一化接入。据此，系统选用自研的三类轻量化设备，其主要技术指标见表 2。

（2）测点布设原则与密度。桥梁按“控制截面优先”原则布设，每跨跨中断面与桥墩顶部为必设点位，应变计布设于箱室顶板轮迹线附近与底板靠近腹板处；隧道按最不利、对称、扰动加密原则布设，沉降沿纵向全线控制、受力变形选取代表性断面，环向采用 4 点法或 8 点法对称布设，断层

破碎带、覆土厚度突变段与连拱中墙部位加密断面；边坡按沿主滑方向成线、各级平台成排的原则布设，测线平面呈“井”字形，坡脚稳定处设基准靶标用于系统自校准，雨量站置于开阔无遮挡处。测点密度以能够反映结构整体变形趋势且相邻测点变形差可辨识为准，桥梁每跨不少于 1 个断面、隧道每 50~70 m 不少于 1 个断面、边坡每级坡面不少于 1 条测线。

(3) 分级采样策略。为兼顾数据完整性与设备能耗，感知层采用分级采样策略：常态下按表 1 所列间隔定时唤醒采集；当倾角变化率、位移增量或雨强超过预设触发阈值时，设备自动切换至高频采集模式，主动上报事件报文，异常解除后恢复常态模式。实测表明，采用该策略后设备在连续阴雨条件下可维持 30 天不间断工作。

(4) 通信组网。经 ZigBee、NB-IoT、SigFox 与 LoRa 等方案比选，系统采用 LoRa 作为现场组网协议。LoRa 在开阔地形下传输距离可达 8 km，接收功耗约 0.0495 W，且不依赖运营商基站，更适应山区无公网覆盖的场景。终端经 LoRa 将数据汇聚至网关，网关内置边缘计算单元，经 4G/NB-IoT 以 MQTT 长连接将 JSON 报文推送至云平台；网络中断时数据在本地循环存储，恢复后自动补传。节点发射功率按通信距离自适应调节，实测平均发射功率较统一采用 20 dBm 的定功率方案降低 25%~30%。采集单元自带时钟并定期与平台时钟服务器同步，累积漂移不大于 5 s/d。

表 2 轻量化感知设备主要技术指标
Table 2 Key Technical Specifications of Lightweight Sensing Devices

设备	型号	主要指标	功耗与供电	适用对象
视觉形变仪	RU-B03-S200	测距≤500 m；精度 0.2 mm@50 m、1 mm@500 m；分辨率 0.001 mm；单机同步跟踪靶标≤30 个；最高采样频率 50 Hz	太阳能板和蓄电池；支持本地存储与断网续传	桥梁挠度与墩倾、隧道断面变形、边坡坡表位移
		MEMS 三轴倾角/加速度一体化集成，核心敏感元件	阈值触发采集、休眠机制，待机功耗≤3.5 mW	
多功能监测站	RU-B01-M202	尺寸 6 mm×6 mm×6 mm；倾角精度±0.005°，加速度精度±0.5 mg，振动量程±3g；平均无故障工作时间 25,000 h	内置电池支持连续阴雨 30 d 续航	边坡坡体倾斜与振动
压电式雨量一体机	RU-B02-Y100	分辨率 0.01 mm；无机械翻斗结构，压电直测雨滴冲击；工作温度-40℃~85℃；支持秒级采样		边坡降雨诱因监测

3.2 数据层设计

(1) 数据接入与统一建模。平台为接入设备建立统一物模型，将设备能力抽象为属性、服务与事件三类描述：属性用于上报测值并定义数据类型、取值范围、步长与单位；服务用于下发远程重启、主动采集、参数配置等指令；事件用于上报告警与故障，并按信息、告警、故障区分优先级。不同厂家、不同类型的设备经物模型映射后统一为结构化信息，新增设备仅需配置相应物模型即可接入，无需改动平台已有代码。

(2) 存储方案。针对监测数据高频写入、按时间检索的特点，系统采用混合存储架构：关系型数据库存储设备台账、测点信息、预警阈值库、处置工单与用户权限等静态与业务数据；时序数据库存储动态监测数据，按“时间戳—设备编号—测点编号—测值”组织索引，支持高速写入与区间查询；视觉形变仪的原始图像帧与现场影像等非结构化数据存入对象存储，库内仅保留索引与关键帧，以控制存储增长。时序数据实行分级留存，云端长期保留经预处理后的标准采样序列与事件片段。

(3) 数据预处理流程。原始监测数据受环境干扰、设备漂移与瞬时工况扰动影响，须经统一流

程处理后方可用于预警判定，处理过程依次是：数据清洗、缺失值插补、异常值剔除、去趋势项、信号降噪、特征提取。其中降噪根据信号类型选择方法：位移、雨量等缓变量采用 Savitzky-Golay 平滑与小波降噪，应变等含强时变荷载成分的信号采用卡尔曼滤波进行递推估计^[8]。视觉类数据先经霍夫圆变换检测靶标并完成亚像素定位，获得靶标中心在图像平面内的二维像素坐标序列。对于桥梁挠度与隧道沉降监测，靶标主变形方向已知为竖向，直接以 dy 作为位移时序；对于边坡水平位移监测，直接以 dx 作为位移时序。为降低随机振动和图像噪声对单一方向位移测量的影响，同时采用主成分分析对二维坐标序列做去相关处理，取第一主成分方向上的投影作为主位移信号，该方向与已知主变形方向的一致性经人工标定验证，偏移角度小于 $\pm 2^\circ$ ，偏差对位移幅值的影响小于 1%^[9]。

(4) 远程校准。平台以稳定基准靶标或相邻测点为参照，支持对传感器测值进行在线修正，以减少长期运行中的累积误差，降低现场人工标定频率。针对精度下降、偏移与漂移 3 类典型故障，系统自动启动校准程序并记录校准过程；对已失效的传感器予以隔离并发出更换提示。

(5) 对外接口。数据层通过 RESTful/Web Service 标准接口对外提供数据服务，支持向上级管理平台推送标准化监测数据与预警信息，并预留新增设备类型与新增算法模块的扩展接口。

3.3 应用层设计

应用层面向管理与运维人员提供业务功能，主要涵盖设备管理、监控运维、数据展示与预警管理四个部分。设备管理模块以列表形式展示接入设备的台账信息，支持多维度筛选与检索，当前系统接入设备 7 台、在线率 100%；监控运维模块通过设备在线率时序看板展示近 7 天的在线率变化，便于快速识别断连等异常；数据展示模块采用“设备—测点—时程曲线”三级下钻结构，用户可从设备列表中选择目标设备，在右侧面板查看各测点的实时数据，并通过时间轴切换 24 h、72 h 或自定义时段的历史曲线；预警管理模块依据三级预警阈值库对实时数据进行自动超限判定，当某测点触发预警时，平台高亮标记对应设备，并通过弹窗、短信、APP 推送等多通道发布通知，按分级响应流程自动生成处置工单并推送至责任人，超时未响应时自动向上一级督办升级；所有预警事件均归档管理，支持按结构类型、预警等级与处理状态检索历史记录。

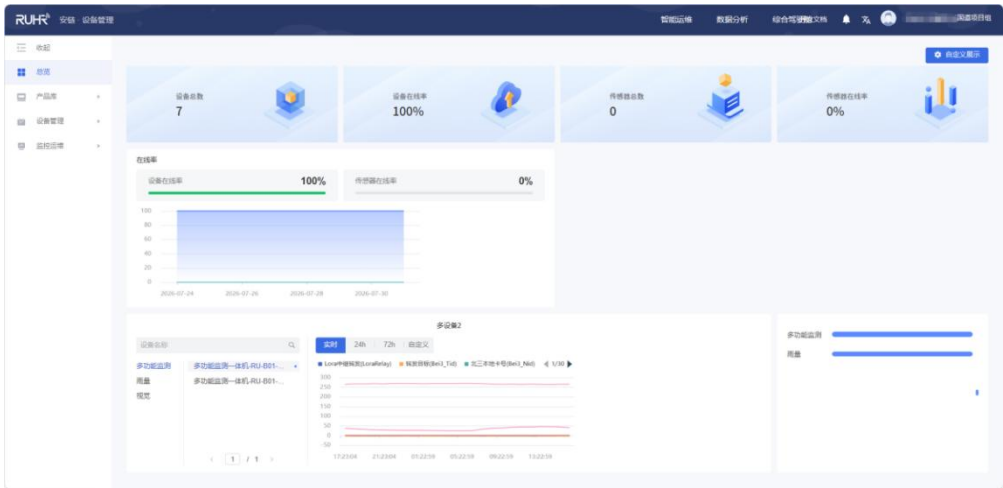


图 2 系统平台展示
Fig. 2 Overview of the System Platform

4 预警阈值体系与分级响应流程

桥梁、隧道与边坡三类结构在位移响应特征上存在本质差异：桥梁以主梁挠度为关键控制指标，反映结构整体刚度与承载能力；隧道以拱顶沉降与周边收敛为主要控制指标，表征围岩—支护体系

的稳定性；边坡以坡表水平位移及其日变化速率为核心判据，反映坡体失稳的演化阶段。由于变形机理不同，三类结构在位移阈值的划定依据、预警等级划分与响应措施上亦各不相同。

4.1 桥梁主梁挠度预警阈值设计

桥梁以主梁挠度为控制指标，其预警阈值采用分级设定。红色预警阈值依据《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》（JTG 3362—2018）第 4.3.3 条，即汽车荷载（不计冲击系数）与人群荷载频遇组合作用下，梁式桥主梁的最大挠度不应超过计算跨径的 1/600；本桥主跨 $L=30\text{ m}$ ，故取 50 mm 。黄色预警阈值参考付雷^[10]基于国内外多座连续刚构桥长期下挠数据的统计拟合结果，按红色阈值的 67.8%设定。蓝色预警阈值采用统计控制限方法，取健康状态下连续监测挠度的均值加减 3 倍标准差为上下控制限，该区间可覆盖健康状态下约 99.7%的正常波动；实测挠度超出该限时，即视为出现统计意义上的显著偏离。以溪口大桥主跨预应力混凝土箱梁为例，各级阈值计算结果见表 3。当挠度超过蓝色阈值时系统持续跟踪其趋势，超过黄色阈值时应专项检测并提高监测频率，超过红色阈值时应封闭交通并启动应急抢修。

表 3 桥梁主梁挠度三级预警阈值
Table 3 Three-Level Early-Warning Thresholds for Bridge Main-Girder Deflection

预警等级	挠度阈值/mm	预警颜色
蓝色预警	[13.96, 33.91)	蓝色
黄色预警	[33.91, 50)	黄色
红色预警	[50, +∞)	红色

4.2 隧道拱顶沉降预警阈值设计

隧道拱顶沉降与周边收敛是评价围岩稳定性及支护结构安全状态的关键指标。拱顶沉降预警阈值主要依据《公路隧道施工技术规范》（JTG/T 3660—2020）中关于监控量测的管理等级规定，并结合围岩级别与同类隧道工程经验确定。溪口隧道为连拱式隧道，围岩以IV级为主，参照同类IV级围岩隧道的变形控制经验，拱顶沉降控制值取 50 mm ；在此基础上，分别以累计沉降控制值的 60%、80%、100%作为蓝色、黄色、红色预警的触发线，蓝色预警下限同时参考健康状态下监测数据的统计分布确定。

拱顶沉降采用视觉形变仪与靶标进行非接触式测量，监测频率为 30 min/次 ，施工扰动期加密至 10 min/次 ，拱顶沉降累计值达到相应阈值即触发对应等级预警。其中，三级预警提示围岩变形开始加速，应加密监测并加强现场巡查；二级预警表明变形接近控制值，应分析变形原因并制定处治方案；一级预警表示变形已超过控制值，应立即停工并启动应急预案。

表 4 隧道拱顶沉降三级预警阈值
Table 4 Three-Level Early-Warning Thresholds for Tunnel Crown Settlement

预警等级	累计沉降阈值/mm	预警颜色
蓝色预警	[30, 40)	蓝色
黄色预警	[40, 50)	黄色
红色预警	[50, +∞)	红色

4.3 边坡表面位移预警阈值设计

边坡表面位移预警阈值依据《建筑边坡工程技术规范》（GB 50330—2013）确定，以坡表水平位移为判定指标，按位移量级划分为蓝、黄、红三级预警，各级阈值结合同类工程经验与本工程监测数据分布特征确定，并依据边坡位移的演变规律进行分级管控。

三级阈值区间及对应措施如下：累计位移在 15 mm 至 25 mm 时为蓝色预警，坡体位移开始显现但尚无明显失稳趋势，应加密监测、关注位移速率方向并加强人工巡查；在 25 mm 至 35 mm 时为黄

色预警，位移进入相对活跃阶段，须组织技术人员现场勘查，评估裂缝发展、支护状态与排水功能，据此制定处治方案。累计位移达到 35 mm 时为红色预警，坡体位移较大、存在失稳破坏可能，须立即启动应急预案，疏散受威胁人员、封闭对应路段，并组织抢险队伍采取临时加固、削方减载等措施。

当坡表水平位移累计值达到相应阈值时即自动触发对应等级预警，以捕捉由降雨或施工扰动引发的突发性变形加速。坡表位移采用视觉形变仪与多功能监测站联合监测，监测频率为 30 min/次，数据实时上传至平台，以保证预警响应的及时性与可靠性。

表 5 边坡表面位移三级预警阈值

Table 5 Three-Level Early-Warning Thresholds for Slope Surface Displacement		
预警等级	累计位移阈值/mm	预警颜色
蓝色预警	[15, 25)	蓝色
黄色预警	[25, 35)	黄色
红色预警	[35, +∞)	红色

4.4 分级响应流程

三类结构虽阈值设计各异，但预警发布与处置采用统一的分级响应机制。系统以蓝、黄、红分别对应三级、二级、一级预警，预警触发后由系统按预设模板自动生成通知，内容包括预警级别、预警原因、受影响部位、当前监测值与建议措施，并通过平台弹窗、短信、APP 推送、语音电话等多通道下发；接收人须回执确认，未确认则通过备用方式重发。

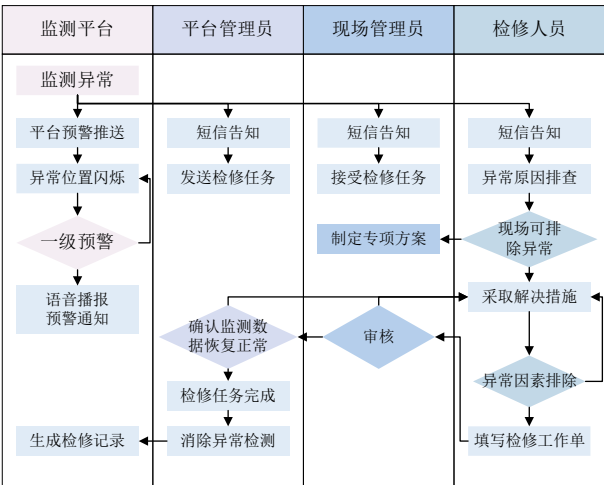


图 3 预警处理流程

Fig. 3 Early-Warning Response Workflow

三级预警触发时，内业组通过通讯平台将预警信息通报外业巡查组，外业组赴现场核查设备状态与结构外观，将结果反馈内业组存档。二级预警触发时，内业组在通知外业组的同时以正式渠道上报管理部门并抄送养护单位；外业组须在 30 min 内携专业设备抵达现场详查。一级预警触发时，内业组通过紧急渠道发布红色预警，管理部门立即启动应急响应、实施交通管制或封闭措施，并组织专业队伍抢修。

5 案例分析

5.1 数据来源与结果处理说明

实测数据来源于溪口示范区，三类结构的数据均采用视觉形变仪配合靶标采集，采样间隔 30 min/次，采集时段为 2025 年 4 月 1 日至 4 月 30 日（隧道处于施工扰动期）。其中，桥梁在各跨跨中断面布设靶标，视觉形变仪置于桥台稳定处；隧道于 K40+780（中段）与 K40+850（出口段）两断面

布设测点；边坡在三级坡、五级坡与坡顶布设测点，并辅以多功能监测站联合监测。三处视觉形变仪均安装于相对稳定的参照位置，以初始时刻为位移基准。

本实验采用固定式图像采集相机和人工视觉靶标构建非接触式位移监测测点。桥梁场景选取安装于主梁 4#桥墩第 6 个靶标处的方形靶标，提取其挠度变化，用于表征靶标安装位置处主梁的局部挠度幅值，如图 4(a)所示；隧道场景选取位于隧道 3/4 断面处上部衬砌区域的 2#方形靶标，提取其竖向沉降位移，用于表征靶标所在拱顶区域的沉降变化，如图 4(b)所示；边坡场景选取一级平台主靶标，该靶标为圆环靶标，安装于坡表监测立柱上，提取其水平方向位移，用于表征该坡表测点的水平变形，如图 4(c)所示。

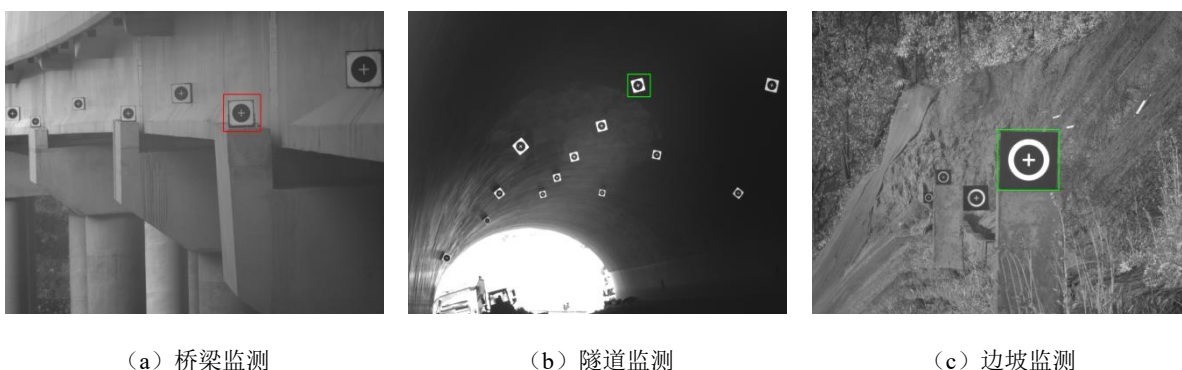


图 4 监测靶标位置选取

Fig. 4 Selection of Monitoring Target Locations

三类靶标的实际特征尺寸均为 300 mm，但由于拍摄距离不同，其图像像素尺寸不同，因此分别建立独立的像素—毫米尺度系数。处理流程如图 5 所示，核心步骤包括靶标感兴趣区域 (Region of Interest, ROI) 提取、亚像素中心定位、位移换算与结果平滑，最终输出位移时程曲线。

(1) 图像预处理与靶标 ROI 提取

视觉形变仪采集的原始图像首先进行灰度化转换，将三通道彩色图像降维为单通道灰度图以减少计算量。随后采用限制对比度自适应直方图均衡化 (Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization, CLAHE) 增强图像局部对比度，提升靶标与背景的区分度；最后通过高斯滤波抑制高频噪声。预处理后的图像由人工在首帧中框选靶标所在区域作为初始 ROI，该 ROI 信息被保存作为后续跟踪的模板。三类场景在 ROI 提取阶段的预处理策略存在差异：边坡场景因背景复杂、光照变化大，采用较强的 CLAHE 增强以突出靶标特征；桥梁与隧道场景中靶标对比度相对较好，采用适度预处理即可满足识别要求。

(2) 局部模板匹配与中心定位

在后续帧中，系统以上一帧靶标中心位置为中心建立局部搜索窗口，采用归一化互相关模板匹配算法在当前帧的搜索窗口内定位靶标位置。模板匹配的相似度阈值和搜索窗口尺寸根据三类场景的靶标特征分别设置。匹配成功后，在 ROI 区域内采用亚像素级定位算法精确计算靶标中心坐标。传统像素级定位精度受限于图像分辨率，难以满足毫米级位移监测需求。本系统采用灰度质心法结合椭圆拟合实现亚像素定位，通过计算靶标区域内所有像素灰度值的加权质心作为中心位置，定位精度可达 0.01 pixel。

(3) 位移换算

将当前帧靶标中心坐标与初始帧坐标进行差值计算，即可得到靶标在图像平面内的像素位移量，分别对应水平方向和竖直方向。为将像素位移转换为实际空间位移，需借助相机标定参数。标定系

数（单位：mm/pixel）通过已知尺寸的基准靶标成像或现场测距数据预先确定，该系数反映了单个像素在监测距离下对应的实际物理尺寸。将像素位移量乘以标定系数，即可得到水平向和竖向的实际空间位移值。

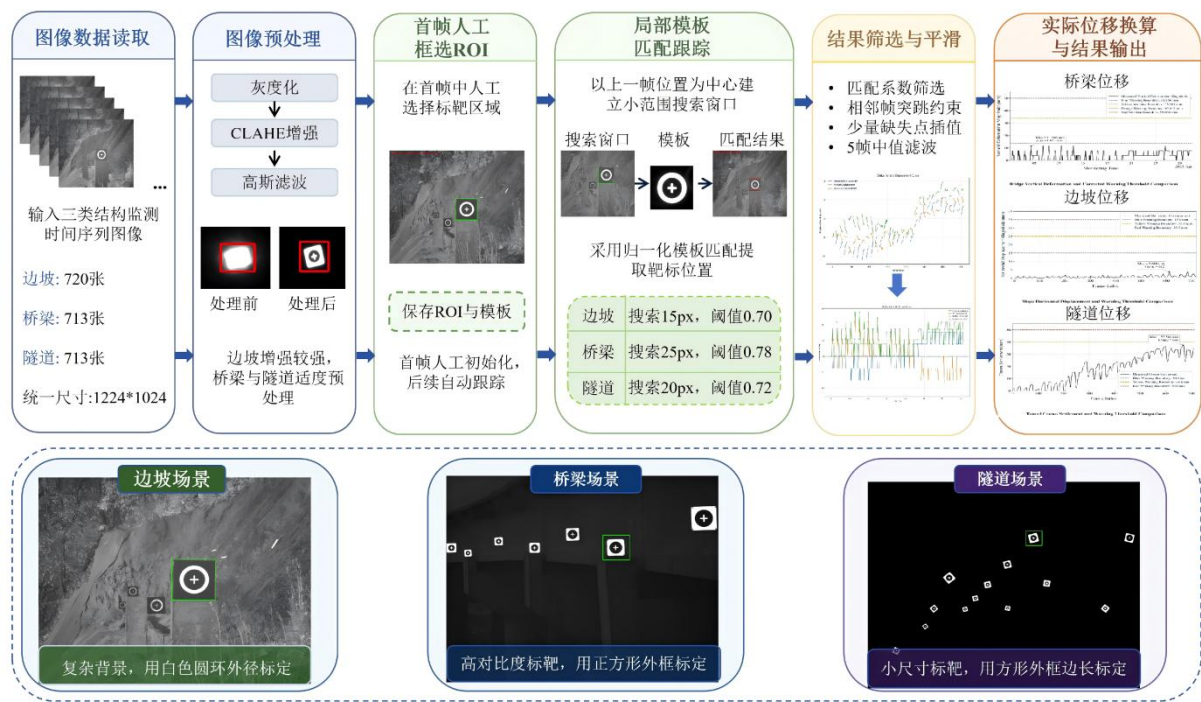


图 5 视觉形变仪位移数据处理流程

Fig. 5 Displacement Data Processing Workflow of the Vision-Based Deformation Monitoring System

5.2 桥梁主梁挠度监测结果

溪口大桥主梁挠度与预警阈值的对比结果如图 6 所示。由于桥梁实测位移明显小于蓝色预警阈值，为同时清晰地展示实测曲线与各级阈值，图中下部坐标区间用于显示实测变形，上部坐标区间用于显示各级预警边界。

由图 6 可见，监测期内主梁挠度幅值主要分布在 0~7.671 mm 范围内，个别时刻出现短时增大，但整体未呈现持续、单向的累积增长趋势；曲线呈一定的阶梯状变化，这与图像位移经像素—毫米尺度换算后的离散特征相对应。4 月下旬部分时段的变形幅值较监测初期有所增大，但仍明显低于蓝色预警边界。监测期内最大挠度幅值为 11.506 mm，低于蓝色预警下限 13.96 mm，未进入任一预警区间。因此，按主梁挠度幅值判据，溪口大桥在本监测期内处于正常状态。

监测期内主梁变形以间歇性波动为主，局部峰值出现后均能回落，未见峰值连续抬升或变形持续加速。这表明在本监测序列内，桥梁按主梁挠度判据处于正常状态。

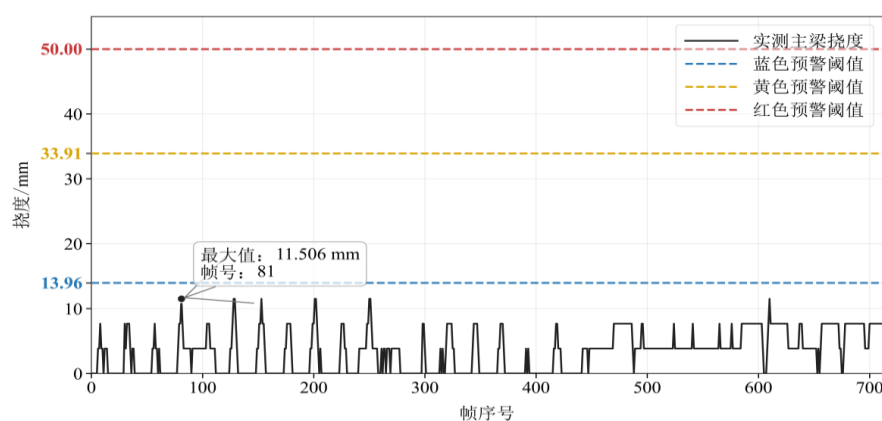


图6 桥梁主梁挠度幅值与预警阈值对比

Fig. 6 Comparison of Bridge Main-Girder Deflection Amplitudes with Early-Warning Thresholds

5.3 隧道拱顶沉降监测结果

溪口隧道拱顶沉降与预警阈值的对比结果如图7所示。拱顶沉降在监测初期总体较小,随监测时间推进呈逐步上升趋势;曲线中虽存在一定幅度的短时回落与波动,但中后期沉降基准水平持续抬升,说明监测靶标相对于初始稳定位置发生了较明显的沉降累积。

监测期内最大拱顶沉降为37.344 mm,超出蓝色预警下限30 mm达7.344 mm,但仍低于黄色预警下限40 mm,低2.656 mm。因此,按拱顶沉降判据,隧道在监测期内达到蓝色预警等级,尚未进入黄色或红色预警区间。与桥梁曲线相比,隧道曲线具有更明显的累积趋势,说明三类结构即便采用相同的视觉监测与数据接入方式,其位移响应特征仍存在明显差异。对该场景应按蓝色预警响应要求加强趋势跟踪与现场巡查,重点关注沉降是否继续向黄色预警边界发展。

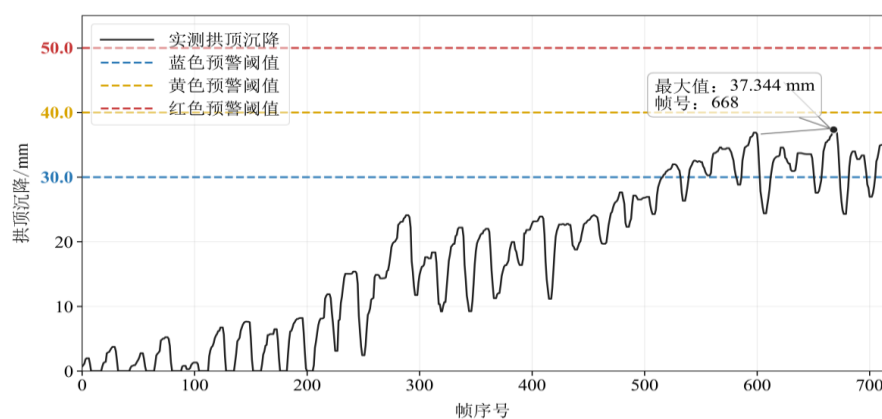


图7 隧道拱顶沉降与预警阈值对比

Fig. 7 Comparison of Tunnel Crown Settlement with Early-Warning Thresholds

5.4 边坡水平位移监测结果

溪口隧道出口边坡水平位移与预警阈值的对比结果如图8所示。本文以边坡靶标相对初始稳定位置的水平位移绝对值作为评价指标,左右两个方向的水平运动均计入变形幅值。

边坡水平位移曲线在监测初期整体处于较低水平,主要表现为小幅往复波动;监测中后期波动幅度有所增大,但仍未形成连续、单向且快速增长的累积过程。最大水平位移幅值为3.610 mm,仅为蓝色预警下限15 mm的24.06%,整个监测序列均未达到15、25、35 mm三条预警边界,故按坡表水平位移判据,边坡在本监测期内处于正常范围。与隧道沉降曲线相比,边坡水平位移未表现出

明显的持续累积特征；与桥梁相比，其监测后期波动幅度略有增大，但最大值仍明显低于蓝色预警阈值。这表明在本监测序列覆盖的时段内，边坡靶标水平位置总体稳定。

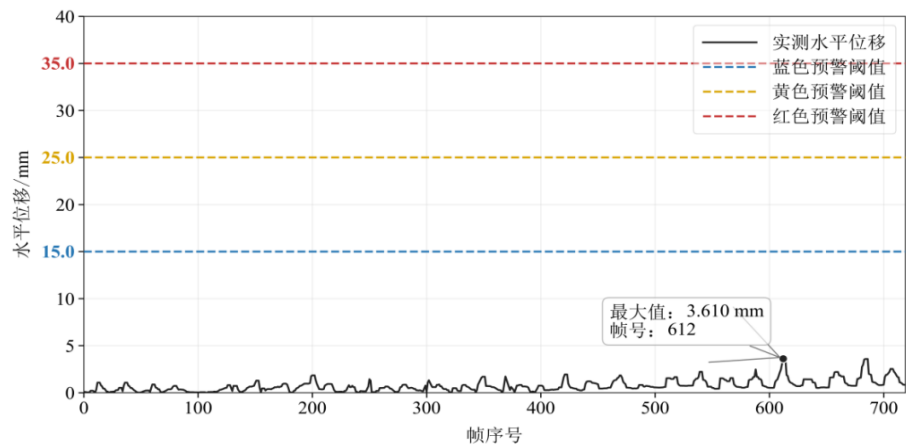


图 8 边坡水平位移幅值与预警阈值对比

Fig. 8 Comparison of Slope Horizontal Displacement Amplitudes with Early-Warning Thresholds

5.5 三类场景监测结果对比

三类结构的实测位移结果与累计位移阈值判定见表 6。为避免将不同物理意义的指标直接混合比较，表中桥梁采用主梁挠度、隧道采用拱顶沉降、边坡采用坡表水平位移幅值；阈值利用率定义为最大实测值与相应场景蓝色预警阈值之比，用于表征实测变形接近蓝色预警线的程度。

表 6 三类场景实际位移监测结果与蓝色预警阈值对比

Table 6 Comparison of Measured Displacements with Blue Early-Warning Thresholds for the Three Monitoring Scenarios

结构类型	有效数据点	控制指标	最大位移/mm	蓝色预警阈值/mm	累计位移判定
桥梁	713	主梁挠度	11.506	13.96	正常
隧道	713	拱顶沉降	37.344	30	蓝色预警
边坡	718	边坡水平位移	3.610	15	正常

由表 6 可见，在相近监测时段与采样间隔条件下，三类结构表现出明显不同的位移响应特征：桥梁主梁挠度的阈值利用率最低，且曲线呈间歇性波动、未形成持续累积趋势；边坡水平位移的阈值利用率为 24.1%，监测后期波动虽有增大，但仍远低于蓝色预警边界；隧道拱顶沉降的阈值利用率达 124.5%，为三类场景中唯一超过蓝色预警阈值者，判定为蓝色预警。

隧道触发蓝色预警、桥梁与边坡处于正常范围，除结构型式、受力机理与服役环境的差异外，还与监测期间溪口隧道正处于施工阶段有关。隧道开挖与支护改变了围岩初始应力场，爆破振动、岩体卸荷与支护滞后等因素叠加，使拱顶沉降较运营阶段明显加剧，累积沉降达 37.344 mm；连拱隧道的中墙偏压在施工期尤为突出，进一步加大了衬砌变形。相比之下，溪口大桥主梁刚度较大，施工期间无大吨位机械直接作用，挠度受扰动有限；出口边坡已完成锚杆框架梁防护，施工集中于洞口，对边坡深层变形影响较小，故两者均处于正常范围。可见，地下工程受施工扰动的影响较桥梁、边坡更为直接，这一差异在“感知—数据—应用”统一框架下得到了区分。

综上，桥梁与边坡在本监测期内均处于正常范围，隧道已进入蓝色预警区间，应按第 4.4 节蓝色预警的响应要求加强趋势跟踪与现场巡查。结果表明，三类结构的变形响应差异在系统的统一监测框架下得到了清晰识别，各场景的阈值设置与实测数据匹配良好，验证了差异化监测指标与分级预警阈值设计的工程适用性。

6 结论

本文从山区公路桥—隧—坡结构群监测的实际约束出发,设计了一套“感知—数据—应用”三层架构的综合监测预警系统,并在235国道杭州至诸暨段改建工程的溪口示范区完成了部署,取得以下成果:

(1) 按结构类型制定了差异化的监测指标与布设方案,以视觉形变仪、多功能监测站和压电式雨量计构成轻量化感知网络,并采用常态低频、事件触发高频的分级采样与LoRa低功耗组网。现场依靠太阳能与储能供电,多功能监测站待机功耗约3.5 mW,可在连续阴雨条件下维持约30 d采集,适用于山区无市电、无公网的场景。

(2) 构建了“端—边—云”三级数据处理链路,通过统一物模型解决了多厂家、多类型设备的异构数据接入问题,时序数据库和关系数据库混合存储兼顾了高频写入和结构化查询的需求,为后续的数据分析和预警判定提供了可靠的数据基础。

(3) 针对桥梁挠度、隧道拱顶沉降与边坡表面位移,分别建立了基于规范限值与统计控制限的三级预警阈值,并将预警发布与处置工单、责任人确认、现场核查、超时督办等环节对接,设计了预警的分级响应与闭环管理。

以溪口示范区2025年4月的实测数据为例,在隧道处于施工扰动的条件下,其拱顶沉降进入蓝色预警区间,桥梁与边坡则处于正常范围,三类结构的差异化响应在统一框架下得到区分,各场景阈值与实测数据基本匹配,初步验证了系统的工程适用性。

本文的实试验证仅覆盖单个月度且隧道处于施工阶段,后续将结合长期监测数据,进一步检验阈值在运营期的适用性并完善多结构协同预警方法。本系统可为同类山区公路结构群监测系统的设计与实施提供参考。

参考文献

- [1] 《中国公路学报》编辑部. 中国桥梁工程学术研究综述·2024[J]. 中国公路学报, 2024, 37(12): 1-160.
- [2] 王代君, 傅俊敏, 周天图, 等. 区域交通基础设施群监测系统设计与应用关键技术研究[J]. 公路交通科技, 2022, 39(6): 124-135.
- [3] 陈振. 高速公路基础设施智能监测预警系统开发与应用[J]. 交通世界, 2026(17): 26-29.
- [4] 屈军平, 肖薄. 地铁施工安全管控双重预防信息化应用研究与实践[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(S2): 31-37.
- [5] 韩流, 陈祥宸, 王胆, 等. 露天矿边坡监测预警体系及变形速率阈值确定方法[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(2): 329-338.
- [6] 包含, 李晓光, 刘力, 等. 公路边坡灾变机理与轻量化监测预警研究进展[J]. 中国公路学报, 2025, 38(10): 1-20.
- [7] 秦宁宇, 吴杰, 张其林. 基于集成神经网络的超高层结构异常监测数据诊断[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2025, 53(12): 1837-1847.
- [8] 董是, 龙志友, 毕洁夫, 等. 基于Savitzky-Golay平滑-小波降噪处理的桥梁结构监测数据分析方法[J]. 测绘通报, 2023(9): 100-106.
- [9] 修晟, 张愿, 单伽程. 基于视觉和振动监测数据融合的结构动态位移识别及其试验验证[J]. 工程力学, 2023, 40(11): 90-98.
- [10] 付雷. 挠度监测数据驱动的大跨连续刚构桥安全状态分级评估方法研究[D]. 重庆交通大学, 2022.

基金项目:浙江省交通运输厅科研计划项目(No.2023012-2)。

第1作者简介:袁佳锋(1979-),男,高级工程师(公路工程),土木工程专业。E-mail: 49540943@qq.com。

***通讯作者简介:**回恒酉(1993-),男,大学本科,中级职称,勘查技术与工程专业。E-mail: 17376506573@163.com。