

基于物联网技术的高铁站台变形监测与分级预警

—以乾县高铁站为例

裴喜良^{1,2} 李正阳¹ 赵花花²

1. 西安建筑科技大学土木工程学院 陕西 西安 710055

2. 西安建筑科大工程技术有限公司 陕西 西安 710055

摘要: 高铁站台长期承受列车振动与复杂环境作用, 结构变形与路基沉降风险日益凸显, 传统人工监测方法难以满足实时性与连续性要求。为此, 本文基于物联网技术, 构建了一套高铁站台结构变形监测与分级预警系统, 并以乾县高铁站为例开展应用研究。系统集成倾角传感器、无线传输网络与云平台, 实现对接触网支柱倾斜、风雨棚柱顶位移、站台墙位移及路基沉降的实时自动化监测, 并依据规范建立三级预警机制。监测数据显示, 各监测点位移、倾角及沉降均未超预警阈值, 结构整体安全, 其中第二风雨棚区域位移接近一级预警限值, 需持续跟踪。本研究验证了物联网监测系统的有效性, 可为同类工程提供技术参考。

关键词: 高铁站台; 物联网; 传感器; 变形监测; 预警

引言: 高速铁路作为国家综合交通运输体系的重要组成部分, 其运营安全直接关系到人民群众生命财产安全和经济社会发展大局。高铁站台作为列车停靠与旅客集散的核心枢纽, 长期承受列车振动、客流荷载及复杂自然环境的多重作用, 结构变形、路基沉降等风险逐渐显现。近年来, 随着“八纵八横”高速铁路网络的不断完善, 站台结构安全状态监测已成为保障高铁运营安全的关键环节^[1]。

国内学者围绕高铁站台安全状态监测开展了许多研究工作。在监测技术方面, 传统方法主要依赖人工测量或巡检手段, 存在监测频率低、数据连续性差、难以实现实时预警等固有局限。随着传感技术与信息通信技术的发展, 部分学者开始将光纤光栅传感器、机器视觉、神经网络算法等应用于高铁站台安全监测。徐思亮^[2]对站台门关键部位加装传感器, 采集并处理相关数据, 建立对应的数学模型, 实现对站台门关键设备的实时检测与预警, 提高了运维效率。蒋尧等^[3]利用传感器对时速250km地下高铁站开展全高站台门气压荷载和结构响应现场试验, 分析了气动荷载、结构弹性变形和振动特性^[3]。王焰^[4]采用静力水准仪和自动化监测系统对近运营线高铁站房施工沉降变形进行了监测, 实现了多种监测项目数据的即时采集和分析。杨博璇^[5]构建了基于多重交叉验证的回归神经网络模型, 用于列车运行工况下站台门结构变形预测, 取得了良好的效果。

上述研究为高铁站台安全监测提供了有益探索, 但现有研究多聚焦于站台门结构的安全监测, 或针对施工

期站台的变形监测, 而涉及运行多年站台的长期变形监测研究相对较少。为此, 本文基于物联网技术, 构建了一套高铁站台变形监测与分级预警系统, 并以乾县高铁站为工程实例, 开展为期14个月的连续监测, 验证系统的有效性与可靠性, 以期同类工程的结构健康监测提供技术参考。

1 基于物联网的变形监测系统构建

1.1 监测系统及原理

监测系统基于物联网监测云平台, 实时收集、传输、存储和分析各种传感器数据, 提供及时的反馈和预警。监测系统由传感器节点、数据传输网络、数据处理与存储、监控与管理平台组成。监测流程为数据采集-数据传输-数据存储与处理-数据展示与报警。

传感器节点包括各类传感器及数据采集模块, 传感器检测物理或环境参数, 并将其转换为电信号。数据采集模块将传感器的电信号进行采样和数字化处理; 数字化的数据通过无线或有线网络进行传输; 边缘计算设备对本地数据初步处理和过滤, 云服务器用于数据的存储和深度分析; 监控与管理平台用于将数据进行可视化展示, 当监测数据超出预设阈值时, 系统会自动发出报警通知。

通过布置的倾角传感器实时监测结构角度、位移、倾斜变化。计算公式如下:

$$\Delta = H \tan \alpha \quad (1)$$

式中: Δ 为位移; H 为监测高度; α 为监测对象的角度。

自动化监测系统监测数据每秒采集一次，每十秒上传平台一次，确保系统及时反映所测参数的重要变化过程。人工监测路基频次为每月一次，防汛、暴雨时期，应适当加密监测次数。

1.2 分级预警机制

1.2.1 监测预警预报值

监测报警值是判断结构正常、异常和危险状态的重要依据。根据项目特殊情况和《客运专线铁路变形观测评估技术手册》^[6]，设计三级预警值。取监测控制标准值的90%为一级预警值；以监测控制标准值的70%定为二级预警值；以监测控制标准值的50%定为三级预警值。

路基变形累计沉降控制标准值：根据《铁路路基设计规范》^[7]取30mm/年。

接触网支柱倾斜累计控制标准值：根据《铁路电力牵引供电工程施工质量验收标准》^[8]，接触网支柱倾斜斜率限值为1%，接触网支柱监测高度取6.0m，计算可得接触网支柱倾斜累计控制标准值为60.0mm。

风雨棚柱顶位移累计控制标准值：根据《民用建筑可靠性鉴定标准》^[9]，单层混凝土结构不适于承载的侧向位移为H/150，风雨棚柱监测高度取5.5m，计算可得风雨棚柱顶位移累计控制标准值为36.7mm。其中 27-30/C-D轴区域风雨棚柱（第二风雨棚）现状已倾斜超限，需重点监测短时间内风雨棚柱的倾斜变化情况，根据《建筑变形测量规程》^[10]将该区段风雨棚柱顶位移任意10天内累计超过3.7mm（10%的控制标准值）时，定义为一级预警。

站台墙位移累计控制标准值：站台墙与风雨棚柱距离较近，且风雨棚柱侧移时可能会对站台墙存在挤压情况，因此站台墙位移累计控制标准值取值方法参考风雨棚柱取值方法。站台墙监测高度取2.0m，计算可得站台墙位移累计控制标准值为13.3mm。

路基、接触网支柱、风雨棚柱及站台墙监测报警值如表1所示。

表1 路基、接触网支柱、风雨棚柱、站台墙监测预警值

监测结构	一级预警值/mm	二级预警值/mm	三级预警值/mm
路基	27.0	21.0	15.0
接触网支柱	54.0	42.0	30.0
风雨棚柱	33.0	25.7	18.4
站台墙	12.0	9.3	6.7

1.2.2 监测报警分级

根据本工程实际情况，监测预警级别按变形破坏的发展阶段、变形速度、发生概率和可能发生的时间排序采用三个级别。依据结构损伤的严重性和紧急程度，预

警信号颜色依次为黄色、橙色、红色，分别代表结构处于异常状态、警戒状态和危险状态三种级别（三级、二级、一级）。监测预警分级及预警响应如表2所示。

表2 监测预警分级及预警响应表

序号	预警级别	预警条件	预警响应
1	三级黄色	实测累计值达到三级预警值且未达到二级预警值时	发送预警快报，加密监测并协助分析原因
2	二级橙色	实测累计值达到二级预警值且未达到一级预警值时	发送预警快报，通知运营单位停止使用或采取有效措施
3	一级红色	实测累计值达到一级预警值时	发送预警快报，通知运营单位停止使用

1.2.3 报警机制与程序

监测单位的监测预警应通过短信、电话、邮件等快捷方式报送到委托方，并于两个工作日内报送纸质预警通知单。当变形量达到预警值或接近允许值或变形量出现异常变化时，应第一时间电话向委托方和相关管理部门报告，并于三个工作日内提交书面报告，同时加密观测频率及人工巡视。

一般险情（黄色级）下，由委托方组织相关单位、部门召开联系会议，商讨处理措施；较大险情状况（橙色级）下，监测项目负责人电话紧急通知委托方，由委托方根据情况启动应急预案；在重大险情状况（红色级）下，监测项目负责人第一时间通知委托方并发出警报，由委托方根据情况启动应急预案。

预警信息发布后，委托单位应立即采取措施控制风险，迅速组成监测预警风险处理小组，分析监测预警原因及其危险性，研究处置措施并及时实施，启动相应级别的应急预案。

2 工程应用—以乾县高铁站为例

2.1 工程概况

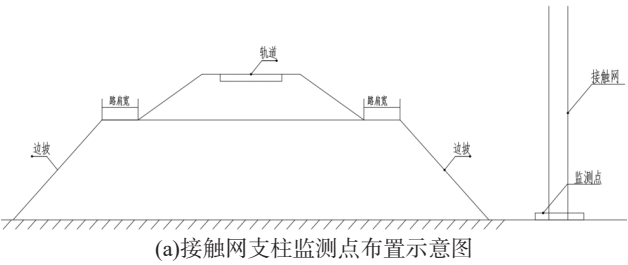
乾县高铁站位于咸阳市乾县乾姜路草谷村，于2018年建成投运，车站站台位于黄土台塬填方路段，填方高度2~8m，基床表层厚度为0.7m，填料为级配碎石；基床底层厚度为2.3m，采用6%水泥改良土填筑；基床以下采用4%水泥改良土填筑。车站雨棚采用站台中间立柱、两侧悬挑的钢筋混凝土结构形式，柱高、柱距分别为5.50m、8.00m，该站台由多个结构单元组成，每个结构单元间均设有伸缩缝。

2.2 监测内容与点位布置

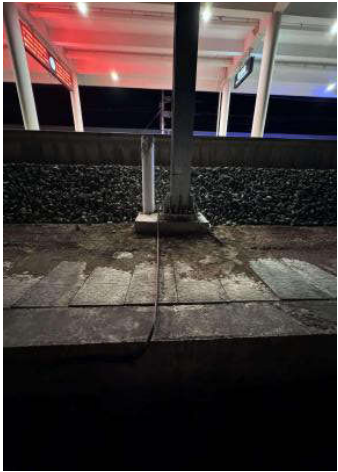
为评估站台的安全状态，根据工程特点、《结构健康监测系统设计标准》^[11]、《建筑工程施工过程结构分析与监测技术规范》^[12]、《铁路工程沉降变形观测与评估技术规程》^[13]，对站台12-35轴区域结构单元的接触

网支柱、风雨棚柱、站台墙、路基分别布置测点进行监测，其中接触网支柱、风雨棚柱、站台墙采用监测系统自动化监测，路基监测采用人工监测。

2.2.1 接触网支柱倾斜监测：监测点设置于支柱上适当安全位置，共布置5个倾角传感器监测点。接触网支柱监测点布置图如图1所示。



(a)接触网支柱监测点布置示意图



(b)接触网支柱监测点布置现场图

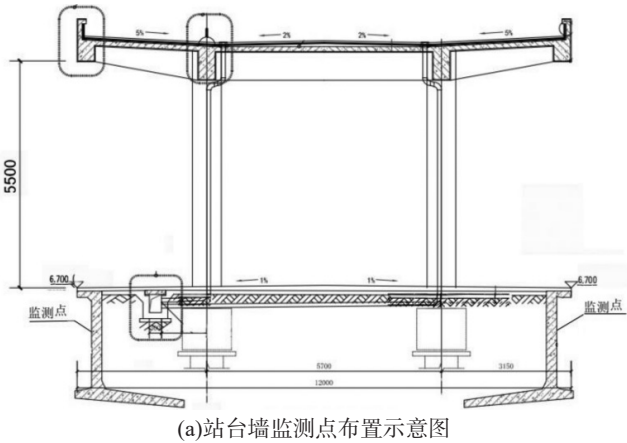
图1 接触网支柱监测点布置图

2.2.2 风雨棚柱顶位移监测：监测点设置于每个结构单体的对角梁上且并靠近柱的位置，每个风雨棚南北各设置一个监测点，针对27-30轴区域，增加监测密度，共布置12个倾角传感器监测点。风雨棚柱顶位移监测点布置图如图2所示。

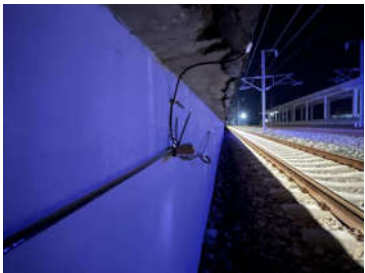


图2 风雨棚柱顶位移监测点布置图

2.2.3 站台墙沉降监测：监测点设置于每段结构单元南北两侧墙身适当位置，共布置12个倾角传感器监测点。站台墙沉降监测监测点布置图如图3所示。



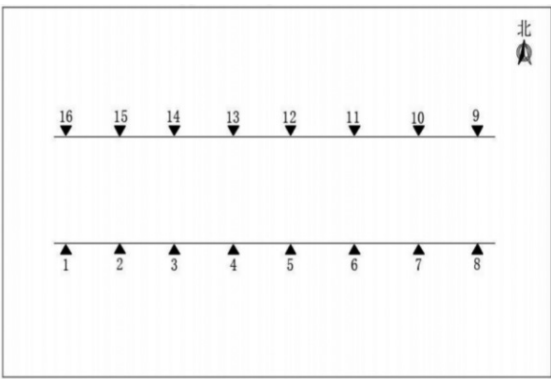
(a)站台墙监测点布置示意图



(b)站台墙监测点布置现场图

图3 站台墙监测点布置图

2.2.4 路基沉降变形监测：监测点设置于南北两侧各8个路基沉降测点，共布置16个监测点。铁路路基监测点布置图如图4所示。



(b)铁路路基监测点布置示意图



(b)铁路路基监测点布置现场图

图4 铁路路基监测点布置图

监测传感器平面布置示意图如图5~图9所示。

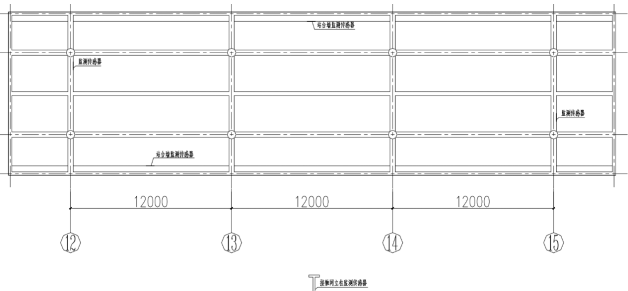


图5 12-15轴区域传感器布置示意图

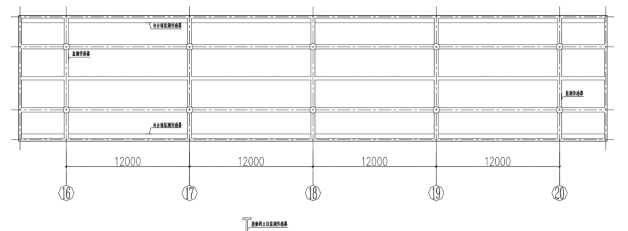


图6 16-20轴区域传感器布置示意图

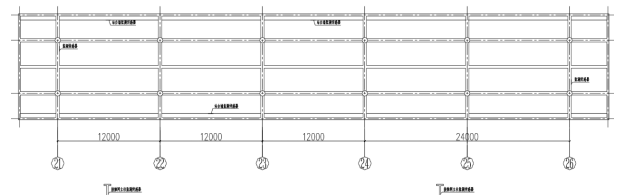


图7 21-26轴区域传感器布置示意图

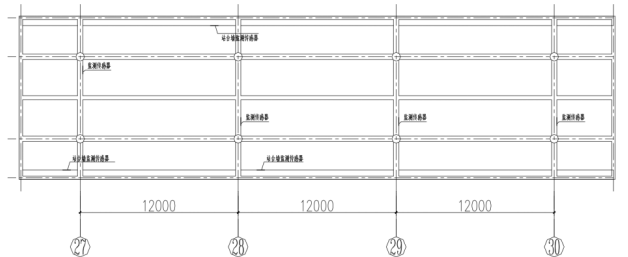


图8 27-30轴区域传感器布置示意图

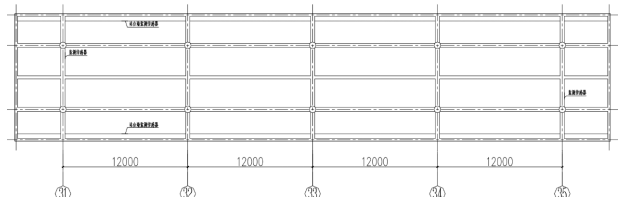


图9 31-35轴区域传感器布置示意图

3 监测结果与分析

本次监测历史超1年，3、4站台12-35轴区域结构单元的风雨棚、站台墙、接触网数据极值如下表3所示。

表3 风雨棚、站台墙、接触网数据

序号	位置	传感器 编号	东西 方向 (mm)	南北 方向 (mm)	预警值/ 级别	比较 结果
1	第一雨棚-风 雨棚北侧	7	0.2	0.6	18.3/三级	未超预 警值

续表：

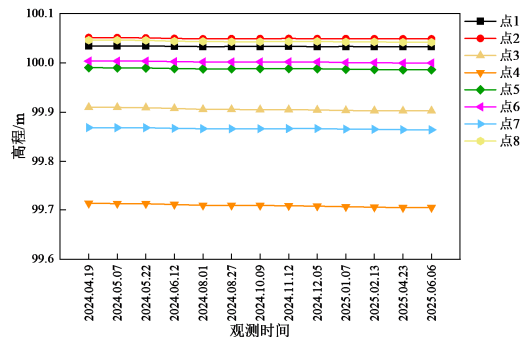
序号	位置	传感器 编号	东西 方向 (mm)	南北 方向 (mm)	预警值/ 级别	比较 结果
2	第一雨棚-风 雨棚南侧	13	-0.5	2.1	18.3/三级	未超预 警值
3	第一雨棚-南 侧站台墙	19	-0.1	-1.2	6.7/三级	未超预 警值
4	第一雨棚-北 侧站台墙	1	0.3	0.5	6.7/三级	未超预 警值
5	第二雨棚-风 雨棚北侧	8	0.2	2.8	任意10天 内累计超 过3.7mm (10%的 控制标准 值)/一级	未超预 警值
6	第二雨棚-风 雨棚南侧	9	0.4	-2.9		未超预 警值
7	第二雨棚-风 雨棚南侧	14	0.4	3.3		未超预 警值
8	第二雨棚-风 雨棚南侧	15	-2.9	2.5		未超预 警值
9	南侧接触网 支柱	25	0	-1	30.0/三级	未超预 警值
10	第二雨棚-南 侧站台墙	21	-1	-1.1	6.7/三级	未超预 警值
11	第二雨棚-南 侧站台墙	20	-0.2	-1.7	6.7/三级	未超预 警值
12	第二雨棚-北 侧站台墙	2	-0.1	0.4	6.7/三级	未超预 警值
13	第三雨棚-风 雨棚北侧	10	0.3	1.5	18.3/三级	未超预 警值
14	第三雨棚-风 雨棚南侧	16	-1	0.7	18.3/三级	未超预 警值
15	第三雨棚-北 侧站台墙	3	-0.1	0.3	6.7/三级	未超预 警值
16	第三雨棚-北 侧站台墙	4	-0.2	-0.4	6.7/三级	未超预 警值
17	第三雨棚-南 侧站台墙	22	0.1	-1	6.7/三级	未超预 警值
18	南侧接触网 支柱	26	-0.2	-3.8	30.0/三级	未超预 警值
19	南侧接触网 支柱	27	2.6	0.5	30.0/三级	未超预 警值
20	第四雨棚-风 雨棚北侧	11	-1.2	0.9	18.3/三级	未超预 警值
21	第四雨棚-风 雨棚南侧	17	-1.2	1.3	18.3/三级	未超预 警值
22	南侧接触网 支柱	28	1.5	-1.2	30.0/三级	未超预 警值
23	第四雨棚-北 侧站台墙	5	0.5	0.6	6.7/三级	未超预 警值
24	第四雨棚-南 侧站台墙	23	-1.1	-1	6.7/三级	未超预 警值
25	第五雨棚-风 雨棚北侧	12	-0.6	-0.1	18.3/三级	未超预 警值

续表:

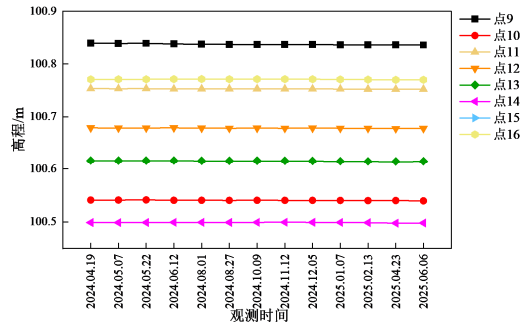
序号	位置	传感器 编号	东西 方向 (mm)	南北 方向 (mm)	预警值/ 级别	比较 结果
26	第五雨棚-风 雨棚南侧	18	0.5	1.2	18.3/三级	未超预 警值
27	南侧接触网 支柱	29	0.3	-1	30.0/三级	未超预 警值
28	第五雨棚-北 侧站台墙	6	0.2	1.9	6.7/三级	未超预 警值
29	第五雨棚-南 侧站台墙	24	0.6	0.1	6.7/三级	未超预 警值

注:负号表明偏移方向向东或向北。

路基高程、沉降量、沉降速率、累计沉降量监测结果如下图10~图13所示。



(a)观测点1~8路基高程曲线



(b)观测点9~16路基高程曲线

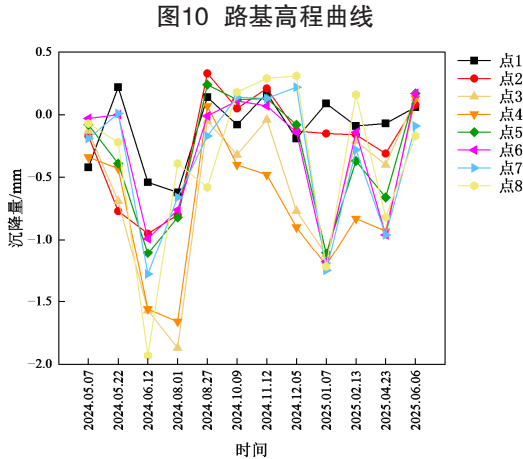
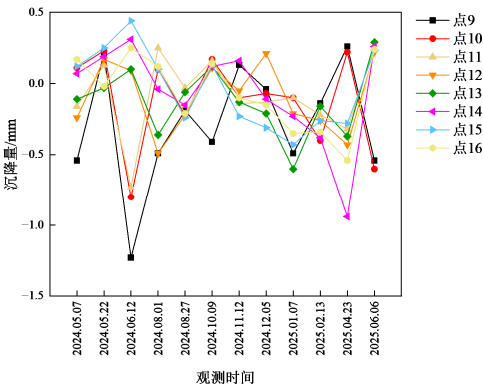
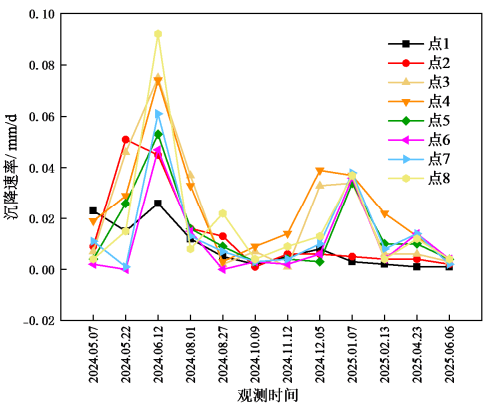


图10 路基高程曲线

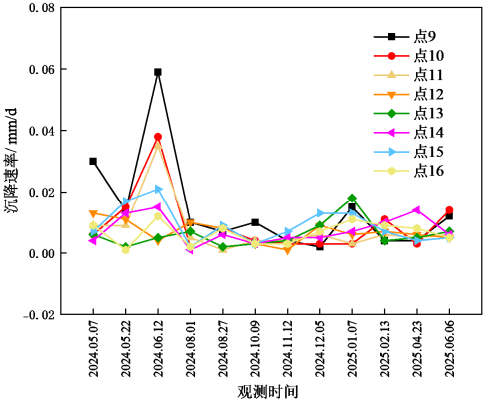


(b)观测点9~16路基沉降量曲线

图11 路基沉降量曲线

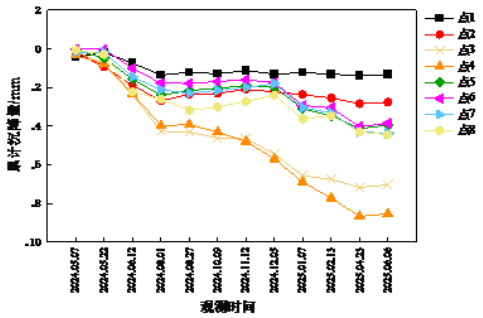


(a)观测点1~8路基沉降速率曲线

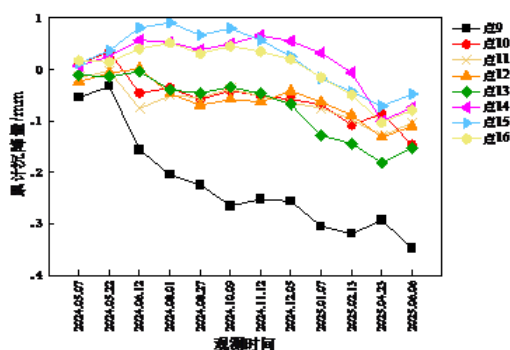


(b)观测点9~16路基沉降速率曲线

图12 路基沉降速率曲线



(a)观测点1~8路基累计沉降量曲线



(b)观测点9~16路基累计沉降量曲线

图13 路基累计沉降量曲线

自动监测数据显示风雨棚柱顶位移各监测点位移极值为3.3mm, 低于其三级预警值18.3mm, 其中重点监测的27-30/C-D轴区域风雨棚(第二风雨棚)区域, 任意10天内累计位移未超3.7mm预警值, 倾斜发展速度缓慢, 无变形加速趋势。站台墙各区域位移极值为1.9mm, 低于其三级预警值6.7mm, 无明显沉降与侧向变形。接触网支柱倾斜位移极值为3.8mm, 低于其三级预警值30.0mm, 倾斜位移未超限值, 结构稳定。

路基沉降监测数据显示16个监测点的高程、沉降量、沉降速率及累计沉降量曲线呈平稳变化趋势。其中4号监测点为路基沉降最大值点, 累计沉降量为8.54mm, 低于其三级预警值15.0mm, 其余监测点累计沉降量未超预警值, 路基整体结构稳定。

此次监测期内, 根据物联网自动监测数据及路基沉降人工监测数据, 乾县高铁站3、4站台12-35轴区域的风雨棚、站台墙、接触网立柱及路基各监测点数据均未超过三级预警值, 各结构均未进入预警级别, 站台结构整体处于安全稳定状态。

结束语

本文对咸阳市乾县高铁站3、4站台12-35轴区域结构单元的接触网支柱、风雨棚、站台墙和路基分别布置测点进行监测。根据2024年5月至2025年7月物联网平台自动监测数据及13次路基沉降人工监测数据, 结论如下:

(1) 本次监测期内, 12-35轴区域风雨棚、站台墙、接触网立柱和路基各监测点均未超预警值, 各结构均未进入预警级别, 结构整体安全; 后期需继续监测路基、接触网、风雨棚、站台墙和路基, 定期进行结构的检查

和维护, 以保证建筑物长期的稳定和安全。

(2) 本次监测采用基于物联网技术的监测系统, 构建了数据采集、传输、处理及预警的自动化体系, 改善传统人工监测实时性差、频率低等局限。分级预警机制分级识别结构安全风险并快速响应, 构建了安全的预警体系。物联网自动监测系统实现对高铁站台复杂环境的高效监测和管理, 为同类基础设施的结构监测与风险防控提供了的工程参考与技术借鉴。

参考文献

- [1]潘毅,刘扬良,黄晨,等.大型铁路站房结构健康监测研究现状评述[J].土木与环境工程学报(中英文), 2020, 42(1):11.
- [2]徐思亮.轨道交通站台门智能运维系统方案研究[J].交通世界, 2022, (Z1): 27-29.
- [3]蒋尧,刘舫泊,杨吉忠,等.时速250km高铁全高站台门气动荷载与结构响应特性试验研究[J].铁道标准设计, 2025, (5): 1-9.
- [4]王焰.近运营线高铁站房施工沉降变形智能监测研究[J].铁路工程技术与经济, 2024, 39(1):50-54.
- [5]杨博璇.基于多模态信息融合的高速铁路站台安全防护关键技术研究[D].中国铁道科学研究院,2025.
- [6]工管技〔2009〕77号 客运专线铁路变形观测评估技术手册[M].北京:铁道部工程管理中心, 2009.
- [7]TB 10001-2016 铁路路基设计规范[S].北京:中国铁道出版社, 2016.
- [8]TB 10421-2018 铁路电力牵引供电工程施工质量验收标准[S].北京:中国铁道出版社, 2018.
- [9]GB 50292-2015 民用建筑可靠性鉴定标准[S].北京:中国建筑工业出版社, 2015.
- [10]JGJ 8-2016 建筑变形测量规程[S].北京:中国建筑工业出版社, 2016.
- [11]CECS 333:2012 结构健康监测系统设计标准[S].北京:中国计划出版社, 2012.
- [12]JGJ/T 302-2013 建筑工程施工过程结构分析与监测技术规范[S].北京:中国建筑工业出版社, 2013.
- [13]Q/CR 9230-2016 铁路工程沉降变形观测与评估技术规程[S].北京:中国铁道出版社, 2016.