

# 基于物联网的高架桥梁超载自动化监测预警技术

李鹏<sup>1</sup>, 王飞<sup>2</sup>

(1. 昆山交通发展控股集团有限公司 工程管理部, 江苏 昆山 215335;

2. 中建七局第二建筑有限公司 昆山外环节点项目, 江苏 昆山 215300)

**摘要:**为延长高架桥梁的使用寿命,提高桥梁的整体稳定性和安全性,需要研究高架桥梁超载监测预警方法。采用物联网技术建立了高架桥梁远程监测系统,该系统用于采集车辆经过桥梁时的荷载数据,并对数据展开归一化处理,提高数据采集精度。然后利用动态称重技术实现超载预警,将采集的车辆荷载数据输入动力分析程序中,分析高架桥梁在车辆超载作用下的结构动力特性,划分车辆超载预警级别以及高架桥梁承载力安全状况预警级别,通过结构动态校验系数完成高架桥梁超载的自动化监测预警。实验结果表明,所提方法的监测精度较高、预警精度较高,为桥梁的安全运行提供了保障。

**关键词:**物联网技术;高架桥梁;动态称重技术;超载监测预警

中图分类号:TP277 文献标识码:A 文章编号:1003-7241(2025)05-0075-05

## Elevated Bridge Overload Automatic Monitoring and Early Warning Technology Based on the Internet of Things

LI Peng<sup>1</sup>, WANG Fei<sup>2</sup>

(1. Kunshan Transportation Development Holding Group Co., Ltd., Engineering Management Division, Kunshan 215335 China;

2. The Second Construction Co., Ltd., of CSCEC 7th Division; The Kunshan Outer Ring Node Project, Kunshan 215300 China)

**Abstract:** In order to prolong the service life of viaducts and improve the overall stability and safety of bridges, it is necessary to study the overload monitoring and early warning methods of viaducts. A remote monitoring system for viaduct bridges is established using the Internet of Things technology. This system is used to collect the load data when vehicles pass the bridge, and normalize the data to improve the accuracy of data collection. Then use the dynamic weighing technology to achieve overload warning, input the collected vehicle load data into the dynamic analysis program, analyze the structural dynamic characteristics of the viaduct under the action of vehicle overload, divide the vehicle overload warning level and the viaduct bearing capacity safety warning level, and complete the automatic monitoring and warning of viaduct overload through the structural dynamic verification coefficient. The experimental results show that the monitoring accuracy of the proposed method is high and the early warning accuracy is high, which provides a guarantee for the safe operation of the bridge.

**Keywords:** internet of things technology; elevated bridge; dynamic weighing technology; overload monitoring and early warning

### 0 引言

经济的发展推动了我国运输业的发展,运输车辆的数量不断增多,在此背景下车辆超载的现象也随之增加,当超载的车辆经过高架桥梁时,容易对桥梁的路面结构产生破坏,不仅增加了桥梁日常维护所需的成本,同时降低了桥梁的稳定性,对交通安全产生了严重的威胁,因此需要开展高架桥梁超载监测管理工作,人工检查方式是国内外检查车辆超载的主要方式,但这种方式的时效性和准确度较低,在此背景下亟须一种有效的高架桥梁超载监测预警方法。

邢梦婷等人<sup>[1]</sup>首先建立了桥梁的数值模型,在不同激

振频率条件下利用桥梁模型分析车辆在行驶过程中产生的位移响应,以此实现桥梁超载监测预警,该方法无法准确地监测车辆在高架桥梁中的行驶速度,存在监测精度低的问题。邓露等人<sup>[2]</sup>建立了车辆数值模型和桥梁有限元模型,利用上述模型分析车辆质量、车速、桥梁基频以及桥面平整度与动力冲击系数之间的关系,根据车辆的动力冲击系数实现超载监测预警,该方法的桥面沉降量监测结果存在误差,导致预警精度无法得到保障。Miccinesi等人<sup>[3]</sup>提出通过单/双基地干涉雷达进行桥梁监测,能够检索动态三维位移矢量,该雷达适合动态测试,能够在高采样频率下检测分量。该方法在受控场景中使用垂直钢筋作为目标进行了实验测试,可以及时检测三维位移矢量,并估计每个部件的模态频率。但该方法未

\*基金项目:云南省建设项目(5825KG)

收稿日期:2023-11-16

考虑实时检测的效果。

为了解决上述方法中存在的问题,提出基于物联网的高架桥梁超载自动化监测预警技术。该技术的创新点是利用采集数据建立高架桥梁运动方程和车辆运动方程,根据车辆和高架桥梁作用力的平衡关系以及两者之间的位移协调条件获得高架桥梁系统与车辆系统之间存在的耦合关系,获得运动方程的最优解,以此为依据获得车辆-桥梁系统的响应。

## 1 物联网下高架桥梁超载自动化监测预警

### 1.1 物联网技术在高架桥梁超载监测中的应用

根据高架桥梁超载监测预警的需要,采用物联网技术<sup>[4]</sup>设计超载远程监控系统,物联网技术下自动化监测预警框架如图1所示。

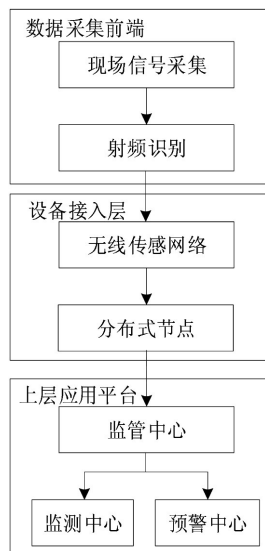


图1 基于物联网的自动化监测预警框架

在高架桥梁超载自动化监测过程中,监测目标包含大量不同类型的设备,主要监测内容有母线电压、逆变电流和整流电流。整个监测过程包括数据采集前端、设备投入层和上层应用平台三个部分。通过基站将接收到的数据传输到监测中心,上传到网络上,技术人员可以通过网络查看高架桥梁超载情况,也可以通过移动终端获取监测信息。在上述监测预警框架方案支持下,设计基于物联网技术的远程监测系统的实现流程。

以公路桥梁桩基承载力预测的关键影响因素属性值为网络输入,对应的实测值为输出,以物联网技术训练网络,修正小波系数与网络权重。通过训练网络,分析不同因素对公路桥梁桩基承载力预测结果的影响,利用简单的拓扑结构完成函数近似,在训练好的网络内输入检验样本,输出公路桥梁桩基承载力预测结果,构建得到基于物联网技术的远程监测系统,实现流程具体步骤如下所示:

步骤一:在数据采集前端,根据射频识别技术确定高架桥梁超载检测数据采集位置;

步骤二:利用物联网技术优化设备接入层,确定分布式节点,设计信息支撑系统;

步骤三:根据该系统,结合物联网数据标准规范,通过远程实时在线监测、超载状态分级预警、交通数据统计分析、车辆超载执法管理、超载历史信息查询的功能分别分析超载状态;

步骤四:采用传感器网络判断车辆超载状态,在传感器网络内解码每个车辆个体,求解超载误差值,利用式(1)解决误差值问题:

$$S_{12} = \begin{cases} C_{\max} - M_m & M_m < 0 \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中, $S_{12}$ 表示车辆动态位移适应值; $M_m$ 表示经过高架桥梁时车辆的目标函数; $M_m$ 的最大值是 $C_{\max}$ 。

步骤五:利用误差值结果选取模态质量,操作结束后,得到包含多个可能解,输出传感器网络参数结果,通过物联网技术进行公路桥梁承载力监测,得到全局最优解,即为公路桥梁远程监测结果。

根据上述流程,通过数据采集系统采集车辆在高架桥梁中的荷载信息,并利用移动通信网络和互联网传输和交互荷载信息,得到基于物联网技术的高架桥梁远程监测系统如图2所示。

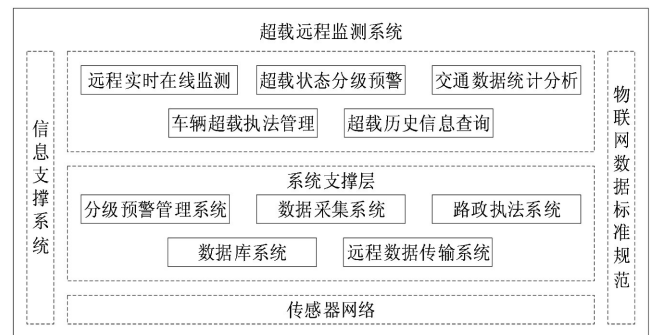


图2 基于物联网技术的高架桥梁远程监测系统

### 1.2 数据分析处理

用 $b(x, t)$ 表示 $t$ 时刻桥梁上 $x$ 点在超载车辆作用下产生的位移,用 $I$ 表示高架桥梁横截面对应的惯性矩;通过下式描述经过高架桥梁时车辆的运动方程<sup>[5]</sup>:

$$\rho \frac{\partial^2 b(x, t)}{\partial t^2} + V \frac{\partial b(x, t)}{\partial t} + I \frac{\partial^2 b(x, t)}{\partial x^4} = \varepsilon(x - vt)g_f(t) + \varepsilon(x - vt + Z_s)g_R(t) \quad (2)$$

式(2)中, $\rho$ 表示高架桥梁对应的密度; $V$ 表示粘性衰减系数; $E$ 表示高架桥梁对应的弹性模量系数; $\varepsilon(t)$ 表示单位冲击函数; $g_f(t)$ 表示车辆通过高架桥梁时前轴对桥面产生的压力; $Z_s$ 表示车辆前轴和后轴之间存在距离,即轴距; $g_R(t)$ 表示车辆通过桥梁时,车辆后轴对桥面产生的压

力作用。

车辆动态位移 $b(x, t)$ 可通过式(3)计算得到:

$$b(x, t) = \sum_{i=1}^{\infty} \Gamma_i(x) \times w_i(t) \times \psi_n \times \xi_n \quad (3)$$

式(3)中, $w_i(t)$ 、 $\Gamma_i(t)$ 分别表示第*i*模态对应的幅值函数和形状函数; $i$ 描述的是模态总数量; $\psi_n$ 表示第*n*模态对应的衰减比率; $\xi_n$ 表示第*n*模态对应的衰减频率。

假设 $m_n$ 表示第*n*模态对应的模态质量,高架桥梁模型中的参数可通过下式计算得到:

$$\begin{cases} \xi_n = \frac{n^2 \pi^2}{Z^2} \\ \Gamma_n(x) = \sin \frac{n\pi x}{Z} \\ m_n = \frac{\rho Z}{2} \end{cases} \quad (4)$$

获得*t*时刻桥梁中存在的点*x*对应的加速度 $\ddot{v}(x, t)$ :

$$\ddot{v}(x, t) = (S_a + S_b + S_c) \times m_n \quad (5)$$

式(5)中, $S_a$ 表示车辆后轴没上桥,前轴上桥的情况; $S_b$ 表示车辆前轴都上桥的情况; $S_c$ 表示车辆后轴在桥上,前轴没在桥上的情况。

为了提高数据采集精度,基于物联网的高架桥梁超载自动监测预警技术通过下式对上述信号展开归一化处理<sup>[6-7]</sup>:

$$\begin{bmatrix} S_1 / \|\ddot{v}_1\| \\ S_2 / \|\ddot{v}_2\| \\ \vdots \\ S_n / \|\ddot{v}_n\| \end{bmatrix} \begin{bmatrix} g_F \\ g_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_1 / \|\dot{v}_1\| \\ v_2 / \|\dot{v}_2\| \\ \vdots \\ v_n / \|\dot{v}_n\| \end{bmatrix} \quad (6)$$

式(6)中, $S_i$ 表示第*i*个传感器在物联网系统采集系统中对应的系数矩阵; $\dot{v}_i$ 表示第*i*个传感器在桥梁超载监测过程中采集的加速度测量信号; $\|\dot{v}_i\|$ 表示信号 $\dot{v}_i$ 对应的范数。

### 1.3 高架桥梁超载监测预警

利用上述采集数据建立高架桥梁运动方程和车辆运动方程,对高架桥梁超载状况进行监测预警。首先获得车辆-桥梁系统的响应,依据该响应结果制定高架桥梁超载标准,根据标准判断桥梁的超载状况,若超载则需提前设置预警级别,通过所得级别结果设计具体的高架桥梁超载自动化监测预警流程,具体内容如下所示:

#### 1.3.1 车辆-桥梁系统的响应

在车辆和高架桥梁作用力,根据两者平衡关系以及两者之间的位移协调条件,可知高架桥梁系统与车辆系统之间存在的耦合关系,计算运动方程的最优解,以此为依据获得车辆-桥梁系统的响应,具体步骤如下:

步骤一:初始迭代值选取桥道在前一时步的运动状态 $(\ddot{v}_b^{t-1}, \dot{v}_b^{t-1}, v_b^{t-1})$ ,并统计路面在*t*时刻的粗糙度;

步骤二:根据上述统计的粗糙度计算车辆在高架桥梁上受到的作用力;

步骤三:在*t*时刻通过Newmark积分法<sup>[8-9]</sup>计算车辆在高架桥梁中的响应 $(\dot{v}_v^t, \dot{v}_v^t, v_v^t)$ ;

步骤四:对高架桥梁结构在*t*时刻产生的响应展开计算;

步骤五:根据步骤四的计算结果进行迭代训练,当高架桥梁与车辆的力学和几何耦合关系符合条件时,停止迭代。

#### 1.3.2 超载标准

依据上述响应结果制定高架桥梁超载标准,车辆在高架桥梁中的总荷载标准为:

- (1) 二轴车辆在高架桥梁中的总荷载>200 kN;
- (2) 三轴车辆在高架桥梁中的总荷载>300 kN;
- (3) 四轴车辆在高架桥梁中的总荷载>400 kN;
- (4) 五轴车辆在高架桥梁中的总荷载>500 kN;
- (5) 六轴以上车辆在高架桥梁中的总荷载>55 kN。

#### 1.3.3 桥梁的超载状况

根据超载标准可以判断桥梁的超载状况,同时桥梁的超载状况可根据《桥梁技术状况总评定标准》分为五类<sup>[10]</sup>,具体为:

- (1) 一类:承载能力满足高架桥梁的设计指标;
- (2) 二类:承载能力达到高架桥梁的设计指标;
- (3) 三类:承载能力比设计的高架桥梁设计标准低10%;
- (4) 四类:承载能力比设计的高架桥梁设计标准低10%~20%;
- (5) 五类:承载能力比设计的高架桥梁设计标准低20%以上。

#### 1.3.4 预警级别

依据上述桥梁的超载状况,设置高架桥梁超载预警级别。高架桥梁超载预警分级由车辆单轴轴载值确定,基准值选取标准轴载,对比基准值与车辆最大单轴轴载值确定预警分级,如表1所示。

表1 高架桥梁超载预警分级

预警级别	超限程度范围/%	最大单轴轴载范围/kN
I	0~10	100~110
II	10~25	110~125
III	25~50	125~150
IV	50~100	150~200
V	>100	>200

基于物联网的高架桥梁超载自动化监测预警技术在动态称重系统的基础上完成预警,当桥梁处于危险状态或发生危险时,将监测数据通过物联网技术传输到桥梁实时动力分析程序中,获得桥梁在车辆作用下的动力响应<sup>[11-12]</sup>。

利用物联网技术实时监测高架桥梁在车流作用下的

实际动响应,并对其展开分析,在上述高架桥梁超载预警级别的基础上计算结构动态校验系数 $\iota$ ,根据计算结果完成高架桥梁超载自动化监测预警, $\iota$ 的计算公式如下:

$$\iota = \frac{S_c}{L_j} \quad (7)$$

式(7)中, $L_j$ 表示高架桥梁动力响应的理论计算值; $S_c$ 表示高架桥梁动力响应的实测值。

### 1.3.5 预警过程

通过所得级别结果设计具体的高架桥梁超载自动化监测预警流程,具体内容如下:

步骤一:当结构动态校验系数 $\iota$ 小于1时,高架桥梁结构承载力安全,处于I级安全状态,状态良好;

步骤二:当结构动态校验系数 $\iota$ 为1时,高架桥梁结构承载力处于临界安全状态,属于II级临界预警;

步骤三:当结构动态校验系数在区间(1,1.1]内时,高架桥梁结构状态不佳,属于III级轻度预警;

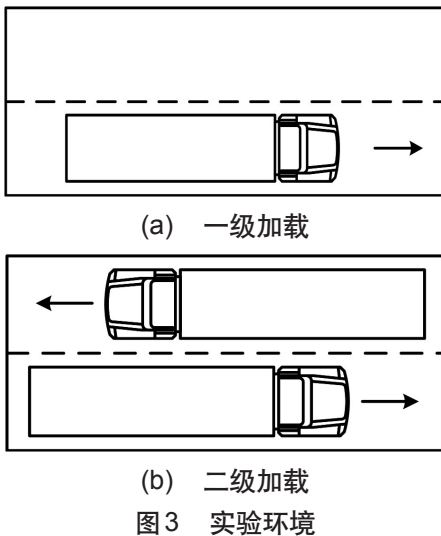
步骤四:当结构动态校验系数 $\iota$ 在区间(1.1,1.25]内时,高架桥梁结构受到严重威胁,处于IV级严重预警;

步骤五:当结构动态校验系数 $\iota$ 大于1.25时,高架桥梁结构处于危险状态,属于V级危险预警。

## 2 实验与分析

为了验证基于物联网的高架桥梁超载自动化监测预警技术的整体有效性,展开如下测试。

本次测试分两个阶段,第一阶段为一级加载测试,第二阶段为二级加载测试,实验示意图如图3所示。



### (1) 一级加载测试

在一级加载测试中,高架桥梁中只有一辆车通过,该车的轴重为4 700 N,车速是超载监测过程中的关键参数,现采用基于物联网的高架桥梁超载自动化监测预警技术、文献[1]方法和文献[2]方法对车辆的速度展开监测,

监测结果如图4所示。

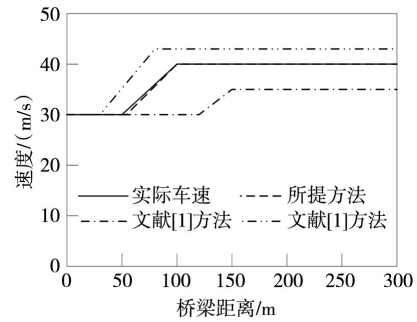


图4 不同方法的车速监测结果

根据图4可知,车辆上高架桥梁的初始速度为30 m/s,以30 m/s的车速运行50 m,然后在100 m处提升到40 m/s,并保持该速度匀速行驶,所提方法的车速监测结果与实际车速基本相符,文献[1]方法和文献[2]方法的车速监测结果与实际车速之间存在较大误差,经对比验证所提方法可精准地监测车辆在高架桥梁中的运行速度。

沉降量监测准确率可体现方法的预警精度,沉降量监测结果越准确,预警精度越高。在桥梁中设置5个监测点,监测在5个监测点处的沉降量,所提方法、文献[1]方法和文献[2]方法的监测结果如图5所示。

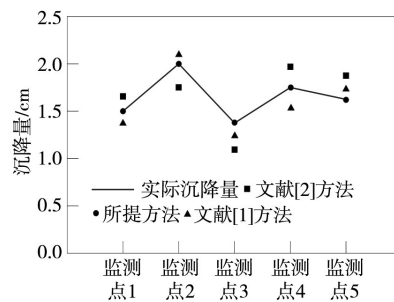


图5 沉降量监测结果

由图5可知,所提方法的沉降量监测结果与实际值相符,而文献[1]方法和文献[2]方法的监测结果存在误差,因为所提方法在监测预警过程中采用物联网技术采集车辆荷载数据,并对数据展开了归一化处理,提高了数据采集精度,进而提高了所提方法的预警精度。

### (2) 二级加载测试

二级加载测试环境中,存在两辆车辆经过桥梁,分别为车辆1和车辆2,其轴重分别为5 000 N和4 800 N,现采用所提方法、文献[1]方法和文献[2]方法对其速度展开监测,监测结果如图6所示。

由图6中的数据可知,所提方法可准确地监测车辆在桥梁中的速度,其他两种方法存在监测误差。其原因是所提方法采用物联网技术设计超载远程监控系统,采集车辆在高架桥梁中的荷载信息,并利用移动通信网络和互联网传输和交互荷载信息,一定程度上有利于减小监

测误差。

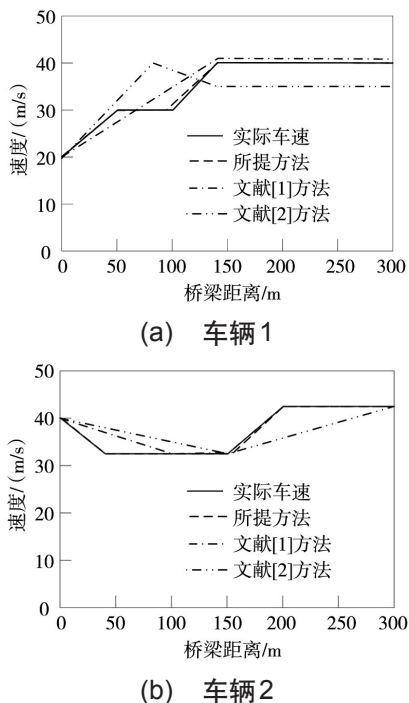


图6 不同方法的车速监测结果

所提方法、文献[1]方法和文献[2]方法在二级加载测试环境中的沉降量监测结果如图7所示。

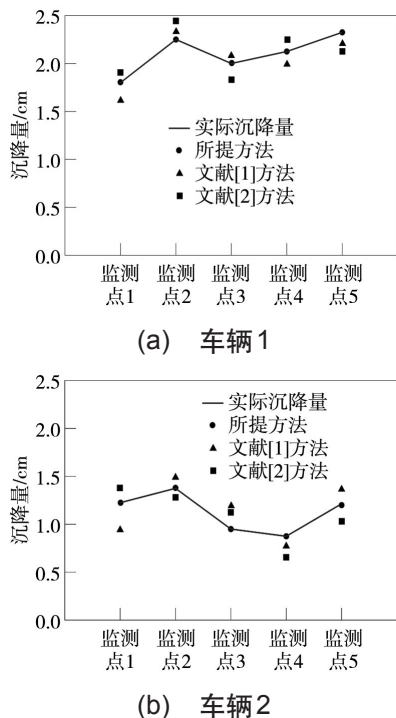


图7 不同方法的沉降量监测结果

分析图7中的数据可知,所提方法的沉降量监测精度高于文献[1]方法和文献[2]方法,验证了所提方法的有效性。其原因是所提方法利用物联网技术实时监测高架桥梁在车流作用下的实际动响应,并对其展开分析,在上述高架桥梁超载预警级别的基础上计算结构动态校验系

数,根据计算结果自动化监测预警高架桥梁超载情况,有利于提高监测精度。

### 3 结束语

当超载车辆经过高架桥梁时,会对高架桥梁的路面和结构产生一定的破坏,研究桥梁超载监测预警方法具有重要意义。目前桥梁超载监测预警方法存在监测精度低和预警精度低的问题,提出基于物联网的高架桥梁超载自动化监测预警技术,通过实验得到如下结论:(1)该方法利用物联网技术采集车辆数据,根据采集的数据获取桥梁的结构动力特性,以此为依据实现预警分析;(2)该方法有效解决了传统方法中存在的问题,为桥梁的安全运行提供了保障。

#### 参考文献:

- [1] 邢梦婷,杨飞,魏子龙,等.岩土地层高速铁路高架桥段环境振动特性分析[J].铁道建筑,2021,61(10):158-162.
- [2] 邓露,陈雅仙,韩万水,等.中小跨径公路混凝土简支梁桥冲击系数研究及建议取值[J].中国公路学报,2020,33(1):69-78.
- [3] Miccinesi L, Pieraccini M. Bridge Monitoring by a Monostatic/Bistatic Interferometric Radar Able to Retrieve the Dynamic 3D Displacement Vector[J]. IEEE Access, 2020, 8(11): 210339-210346.
- [4] 王晓兰,陈沙沙.物联网技术在煤矿设备异常故障监测中的应用研究[J].能源与环境,2021,43(7):182-188,214.
- [5] 崔雅博,王晓婷.基于IMM-UKF的协同式车辆运动状态跟踪算法[J].沈阳工业大学学报,2020,42(3):318-323.
- [6] 赵知劲,陈思佳.基于高斯核显性映射的核归一化解相关仿射投影P范数算法[J].电子与信息学报,2020,42(8):1896-1901.
- [7] 张瑞杰,闫磊.基于Newmark精细积分结合法的弹塑性结构地震碰撞反应分析[J].振动与冲击,2020,39(24):247-253.
- [8] 卢文碧,魏生灿,姜建国.深路堑开挖边坡稳定性自动化监测方法[J].自动化技术与应用,2023,42(11):125-128,141.
- [9] 郭德平,李铮,彭森林,等.基于Newmark隐式时间积分方案的裂纹动态扩展的数值计算方法[J].上海交通大学学报,2021,55(6):689-697.
- [10] 尹恒,王立娟,裴尼松,等.三维激光扫描技术在危旧桥梁健康监测中的应用研究[J].中外公路,2021,41(5):187-192.
- [11] 胡斯然,周博闻,张天宇.基于交通大数据的超限超载车辆时空分析[J].公路,2020,65(8):349-359.
- [12] 刘明.基于激光扫描的装配式建筑梁柱节点稳定性监测方法[J].自动化技术与应用,2023,42(3):55-59.

作者简介:李鹏(1978-),男,本科,高级工程师,研究方向:交通工程。