

基于响应灵敏度的桥梁下部结构损伤识别方法研究

刘志强¹, 潘大杰², 王 闯²

(1.国能朔黄铁路发展有限责任公司,河北 肃宁 062350;2.北京交通大学,北京市 100044)

摘 要:为实现桥梁下部结构横、竖向状态的同步识别,以多跨简支梁桥下部结构为研究对象,提出了基于响应灵敏度的桥梁下部结构损伤识别方法。首先,基于车桥耦合动力分析理论推导了桥梁下部结构响应灵敏度方程;其次,基于响应灵敏度模型修正算法和数值算例对所提方法的有效性和抗噪性进行了验证。结果表明:当梁体、墩身、基底约束同时受损时,所提算法可准确、有效地识别墩身单元刚度和基底约束刚度值;所提算法具有较强的抗噪性,在5%噪声影响下仍能有效识别墩底弹性支承的损伤,并能准确定位损伤桥墩单元位置和识别损伤值。

关键词:多跨简支梁桥;下部结构;响应灵敏度;损伤识别;车桥耦合

中图分类号: U441.3

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2023)12-0231-05

0 引 言

近年来中国铁路飞速发展,截至2022年底我国铁路里程已达15.5万km(其中高速铁路约4.2万km),铁路桥梁总量达20余万座(其中高铁桥梁超过3万座)。在铁路路网规模不断扩大,铁路重载化、高速化的背景下,老旧桥梁劣化、部分新桥在复杂环境下使用性能衰退等问题日益突出。相较于桥梁上部结构,桥梁下部结构的病害往往更为隐蔽,同时下部结构所受作用也更为复杂:列车动力作用、河水冲刷、洪水冲刷、泥石流、车船撞击、环境侵蚀等等,这就导致了桥梁下部结构病害要么不被发现,要么发展成了重大病害才为人所知,对桥梁运营的安全性和舒适性造成了极大的威胁。

任东华^[1]将小波分析理论引入到铁路桥墩损伤识别中,阐述了小波奇异性检测原理和基于模态参数的损伤识别方法,利用小波分析具有良好局部分析性能的特性,以结构振型变化为基础应用小波变换实现桥墩局部损伤识别。熊文等^[2]以提高桥墩冲刷深度检测的经济性和便利性为目的,构建了基于动力特征识别的桥墩冲刷状态分析理论。Ma等^[3]使用改进的动力瞬态响应方法(TRM)评估桥梁下部结构的竖向健康状态,采用桥梁下部结构的竖向动刚度作为主要的评估指标,建立了评估桥梁下部结构竖向刚度的三步法。卜建清等^[4]提出了基于车激响

应灵敏度的桥梁损伤识别方法,通过桥梁动力响应变化识别桥梁损伤,并使用数值模型验证了计算理论的正确性和损伤识别方法的有效性。PRENDERGAST等^[5]提出了一种利用实测桩基频率评估冲刷深度的方法,研究了冲刷对桩基频率的影响,并使用模型试验和现场测试结果研究验证了冲刷对桩基振动特性的影响。DAVIS^[6]使用运营荷载激励下的下部结构动应变和加速度值识别桥梁基础参数,利用频响函数确定基础参数并通过实桥案例验证了该方法的有效性。杨婷婷^[7]使用车辆制动力作为激励源,以小波包能量方差变化率为指标对下部结构损伤进行诊断。

就目前下部结构损伤评估方法而言,有关研究相对分散、关联度低,以桥墩横向振动或桥墩基础竖向承载力状态的单项研究为主,未形成完备的指标体系和综合的评估方法。考虑到下部结构的重要性及其损伤的隐蔽性,针对下部结构损伤识别的研究有待进一步深化。为此,本文提出了基于响应灵敏度的桥梁下部结构横、竖向损伤同步识别方法。

1 基于响应灵敏度的桥墩损伤识别方法

1.1 车桥耦合动力分析模型

车桥耦合模型由车辆模型、桥梁模型组成,两种模型之间通过轮对与桥梁接触点位移协调条件建立耦合关系,使用系统自激激励作为车桥耦合系统的激励源。

本研究采用四轴车辆模型,轮轨关系采用竖向密贴和横向蛇行假定,不存在独立的轮对自由度,车辆模型为15自由度模型,如图1所示。

收稿日期:2023-09-25

作者简介:刘志强(1992—),男,学士,助理工程师,从事铁路工务设施运营及管理工作。

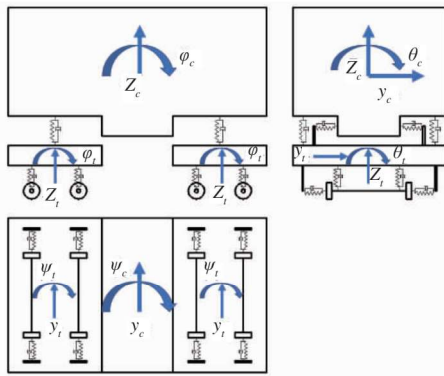


图 15 自由度车辆模型

采用有限元模型模拟桥梁,并假定桥上轨道和桥梁之间没有相对位移,将钢轨垫板和扣件视为刚体,即忽略二者的弹性变形。轮对蛇行运动描述如下^[8]:

$$y_s(x) = A_s \sin\left(\frac{2\pi x}{L_s} + \varphi_s\right) = A_s \sin\left(\frac{2\pi v}{L_s} t + \varphi_s\right) \quad (1)$$

式中: \$L_s\$ 为轮对蛇行运动的波长; \$\varphi_s\$ 是任一轮对的初相位,可以假定其为在 \$0 \sim 2\pi\$ 之间均匀分布的随机变量; \$A_s\$ 表示轮对蛇行运动的振幅值; \$v\$ 为轮对蛇行运动速度。

采用德国低干扰谱模拟轨道不平顺,将轨道不平顺随机函数视为平稳高斯随机过程,通过给定的轨道谱利用三角级数叠加法模拟得到不平顺样本。

联立车辆子系统运动方程和桥梁子系统运动方程,得到车桥耦合系统运动方程如下:

$$\begin{cases} M_v \ddot{X}_v + C_v \dot{X}_v + K_v X_v = F_v \\ M_b \ddot{X}_b + C_b \dot{X}_b + K_b X_b = F_b \end{cases} \quad (2)$$

式中: \$M_v\$ 为车辆质量矩阵; \$M_b\$ 为桥梁质量矩阵; \$C_v\$ 为车辆阻尼矩阵; \$C_b\$ 为桥梁阻尼矩阵; \$K_v\$ 为车辆的刚度矩阵; \$K_b\$ 为桥梁的刚度矩阵; \$F_v\$ 为车辆受力; \$F_b\$ 为桥梁受力。

1.2 响应桥墩损伤的灵敏度方程求解

本研究使用全过程迭代法计算车桥耦合振动响应,并推导使用全过程迭代法计算灵敏度响应的公式。采用全过程迭代法对方程(2)等号两侧同时对桥梁损伤求偏导得:

$$\begin{cases} \frac{\partial M_v}{\partial \alpha} \ddot{X}_v + M_v \frac{\partial \ddot{X}_v}{\partial \alpha} + \frac{\partial C_v}{\partial \alpha} \dot{X}_v + C_v \frac{\partial \dot{X}_v}{\partial \alpha} + \frac{\partial K_v}{\partial \alpha} X_v + K_v \frac{\partial X_v}{\partial \alpha} = \frac{\partial F_v}{\partial \alpha} \\ \frac{\partial M_b}{\partial \alpha} \ddot{X}_b + M_b \frac{\partial \ddot{X}_b}{\partial \alpha} + \frac{\partial C_b}{\partial \alpha} \dot{X}_b + C_b \frac{\partial \dot{X}_b}{\partial \alpha} + \frac{\partial K_b}{\partial \alpha} X_b + K_b \frac{\partial X_b}{\partial \alpha} = \frac{\partial F_b}{\partial \alpha} \end{cases} \quad (3)$$

将偏导数为零的项整理并将桥梁阻尼用瑞利形式 \$C_b = \alpha M_b + \beta K_b\$ 带入(3)得

$$\begin{cases} M_v \frac{\partial \ddot{X}_v}{\partial \alpha} + C_v \frac{\partial \dot{X}_v}{\partial \alpha} + K_v \frac{\partial X_v}{\partial \alpha} = 0 \\ M_b \frac{\partial \ddot{X}_b}{\partial \alpha} + C_b \frac{\partial \dot{X}_b}{\partial \alpha} + K_b \frac{\partial X_b}{\partial \alpha} = -\frac{\partial X_b}{\partial \alpha} X_b - \beta \frac{\partial X_b}{\partial \alpha} \dot{X}_b \end{cases} \quad (4)$$

必须指出,由于灵敏度方程初激力只有 \$-\frac{\partial K_b}{\partial \alpha} X_b - \beta \frac{\partial K_b}{\partial \alpha} \dot{X}_b\$ 这一项,因此,迭代必须从第二个方程即桥梁响应损伤的灵敏度 \$\frac{\partial \dot{X}_b}{\partial \alpha}\$、\$\frac{\partial X_b}{\partial \alpha}\$ 所在方程开始。

在不考虑单元间损伤耦合作用时,桥梁局部单元的损伤只会对该单元产生影响,对于有限元模型而言,只会对损伤单元的单元刚度矩阵产生影响:

$$K_i^e = K_{i0}^e (1 + \alpha_i) \quad (5)$$

式中: \$K_{i0}^e\$ 表示未损伤单元刚度矩阵, \$K_i^e\$ 为损伤后单元刚度矩阵,下标 \$i\$ 表示第 \$i\$ 单元; \$\alpha_i\$ 为单元刚度折减系数,其值为负值。桥梁总体刚度对桥梁损伤的灵敏度表现为对第 \$i\$ 单元的单元刚度折减系数的灵敏度 \$\frac{\partial K_b}{\partial \alpha_i}\$:

$$\frac{\partial K_b}{\partial \alpha_i} = \begin{bmatrix} \ddots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_{i0}^e & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \ddots \end{bmatrix} \quad (6)$$

弹性支承刚度劣化影响在有限元软件中体现为弹簧单元刚度 \$k\$ 变化,本文使用的弹簧单元均为一维弹簧单元,其单元刚度矩阵为

$$K^e = k \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

此时桥梁总体刚度对桥梁损伤的灵敏度 \$\frac{\partial K_b}{\partial \alpha}\$ 表现为对弹簧刚度的灵敏度 \$\frac{\partial K_b}{\partial k}\$ 为

$$\frac{\partial K_b}{\partial \alpha_i} = \begin{bmatrix} \ddots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \ddots \end{bmatrix} \quad (8)$$

至此,已经获得了两种损伤情况下桥梁整体刚度矩阵对桥梁损伤的灵敏度 \$\frac{\partial K_b}{\partial \alpha}\$,具体的灵敏度方程迭代求解过程如图2所示。

2 桥梁有限元模型建立

桥梁跨径布置为 \$2 \times 32\$ m,弹性模量为 35 GPa,泊松比为 0.3,密度为 3 800 kg/m³,阻尼比为 0.02;桥梁为等截面梁,截面面积 8.994 m²,截面惯性矩 11.200 m⁴。桥墩高 16 m,截面面积 19.018 m²,截面惯性矩 13.719 m⁴,弹性模量为 30 GPa,泊松比为 0.3,密度为 2 600 kg/m³,阻尼比为 0.02。各方向弹性支承刚度初始值为 \$1 \times 10^9\$ N/m。每跨桥梁沿桥长方向均匀划分为 20 个单元,桥墩沿墩高方向划分为 10 个单元。列车匀速通过桥梁,车辆模型为 15 自由度

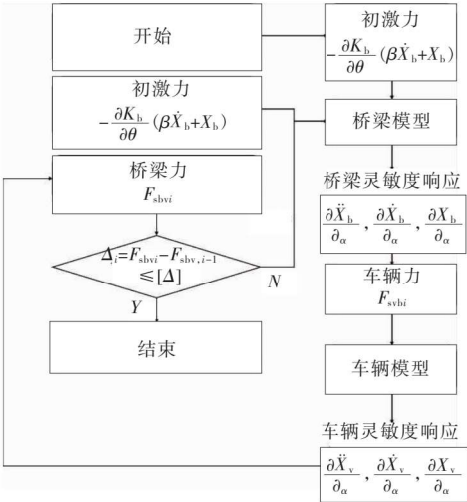


图2 灵敏度方程迭代求解过程图

空间车辆模型,列车编组情况为1节机车加4节拖车。两跨简支梁模型单元划分示意图如图3所示。

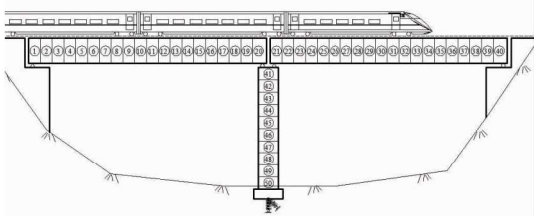


图3 两跨简支梁模型单元划分示意图

本研究将桥梁下部结构损伤分为两种类型,分别采用不同的方法进行模拟:一种是桥墩损伤,采用降低损伤位置单元刚度矩阵的方法进行模拟。另外一种弹性支承劣化,采用降低弹簧刚度的方法进行模拟。假定损伤部位阻尼随刚度线性变化,线性系数同瑞利阻尼系数;假定局部单元损伤不会对其它未损伤单元造成影响,即不考虑单元损伤耦合作用。

对于第一种损伤情况,采用单元刚度折减系数 α_i 来定量描述:

$$\alpha_i = \frac{k_{i0} - k_i}{k_{i0}}$$

(9)

式中: α_i 为单元刚度折减系数; k_{i0} 为未损伤单元的单元刚度; k_i 为*i*单元的损伤刚度。

对于第二种情况,则直接通过弹簧刚度的变化量来定量描述。

3 数值算例验证

3.1 仅墩身单元损伤

首先对只发生墩身损伤的情况进行讨论,设置墩身损伤工况见表1,测点布置及损伤单元位置示意图如图4所示。列车编组情况为1机车+4拖车,车速为80 m/s(288 km/h),观测响应为节点21、22和43的横桥向(UY)和竖桥向(UZ)加速度。

表1 仅墩身单元损伤工况设置

工况编号	桥墩单元损伤位置	单元损伤程度 /%
5.1		-30、-10、-10
5.2	49、45、42 单元	-10、-30、-10
5.3		-10、-10、-30

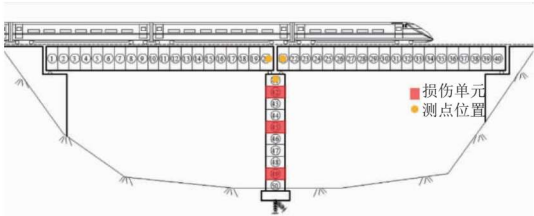


图4 测点布置及损伤单元位置示意图

桥墩多单元损伤的识别结果见图5和表2。在桥墩多个位置存在损伤的情况下,算法识别速度较快,各工况均迭代7步完成收敛,识别损伤值和实际损伤值基本一致,误差较小。这表明基于桥梁加速度响应灵敏度的损伤识别方法对多桥墩单元损伤的工况是适用的,具备较快的识别速度和较高的识别精度。

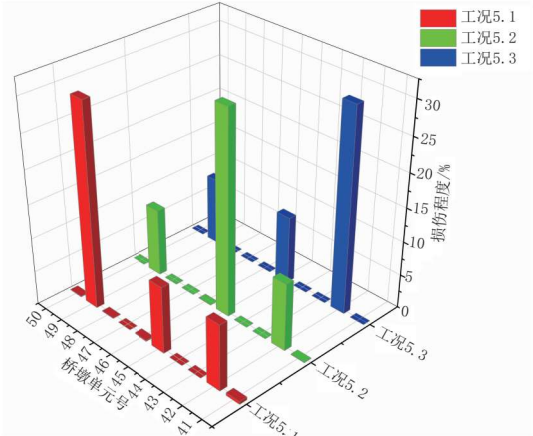


图5 多桥墩单元损伤识别结果

表2 多桥墩单元损伤识别结果表

工况编号	损伤位置	识别值	相对误差 /%	迭代步数
5.1	49 单元	-0.30	0.1	7
	45 单元	-0.10	1.3	7
	42 单元	-0.10	2.9	7
5.2	49 单元	-0.10	0.1	7
	45 单元	-0.30	0.1	7
	42 单元	-0.10	0.5	7
5.3	49 单元	-0.10	0.1	7
	45 单元	-0.10	0.1	7
	42 单元	-0.30	0.0	7

3.2 梁体、墩身、基底约束同时损伤

实际服役过程中,桥梁可能同时存在梁体、墩身

和基底约束的损伤。因此接下来讨论三者同时存在损伤时识别方法的有效性。列车编组情况及车速与3.1节相同,观测响应为节点20、21、22、23和43的横桥向(UY)和竖桥向(UZ)加速度。具体工况设置见表3。

表3 梁体、墩身、基底约束同时损伤工况设置

工况编号	梁体单元损伤	基底约束损伤	墩身单元损伤
7.1	10单元-20%	UY -10% UZ -30%	同工况 5.1
7.2			同工况 5.2
7.3			同工况 5.3
7.4		UY -30% UZ -10%	同工况 5.1
7.5			同工况 5.2
7.6			同工况 5.3

梁体、墩身、基底约束同时损伤时桥墩单元的损伤识别结果见图6和表4,弹性支承损伤识别结果见表5。计算结果表明,梁体、桥墩及弹性支承同时存在损伤的情况下,识别速度明显下降,但总体而言识别速度依然很快;所提损伤识别方法识别精度高,无论是识别的桥墩损伤值还是弹性支承刚度值均精确收敛到了实际值附近;识别墩身损伤时,均能准确定位桥墩损伤单元的位置。综上可知,该方法在同时存在梁体、桥墩及弹性支承损伤的情况下,仍能较快速、准确地识别损伤值,并可以实现损伤位置的准确定位。

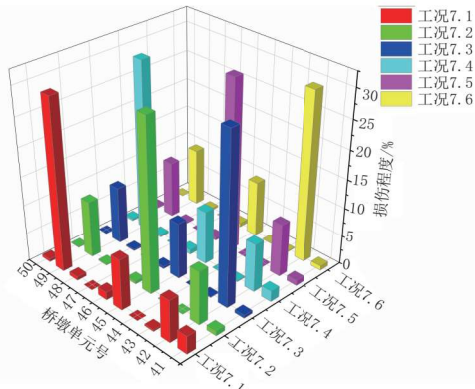


图6 梁体、墩身、基底约束同时损伤时桥墩单元损伤识别结果

3.3 噪声的影响

本节在3.2节的基础上进一步考虑测试噪声的影响,在测量信号中加入5%的噪声,得到工况8.1~8.6。分析计算得到噪声影响下桥墩单元和墩地弹性支承损伤识别相对误差如图7和图8所示。

从图7和图8的识别结果可知:当损伤较大时(30%),识别误差可以控制在13%以下,并且能够精确定位损伤单元位置;识别墩底弹性支承时,损伤值

表4 梁体、墩身、基底约束同时损伤时桥墩单元损伤识别结果表

工况编号	损伤位置	识别值	相对误差 /%	迭代步数
7.1	49单元	-0.30	0.8	10
	45单元	-0.09	11.1	10
	42单元	-0.07	26.4	10
7.2	49单元	-0.10	0.9	11
	45单元	-0.30	0.6	11
	42单元	-0.09	6.7	11
7.3	49单元	-0.10	0.2	10
	45单元	-0.10	1.8	10
	42单元	-0.30	1.3	10
7.4	49单元	-0.30	0.4	10
	45单元	-0.09	6.5	10
	42单元	-0.08	15.5	10
7.5	49单元	-0.10	1.0	10
	45单元	-0.30	0.7	10
	42单元	-0.09	7.5	10
7.6	49单元	-0.10	0.0	11
	45单元	-0.10	2.8	11
	42单元	-0.29	1.9	11

表5 弹性支承损伤识别结果表

工况编号	基底约束	实际值 $\times 10^8$	识别值 $\times 10^8$	相对误差 /%
7.1	UY	9.00	8.92	0.9
	UZ	7.00	7.00	0.0
7.2	UY	9.00	8.97	0.4
	UZ	7.00	7.00	0.0
7.3	UY	9.00	8.97	0.4
	UZ	7.00	7.00	0.0
7.4	UY	7.00	6.93	1.1
	UZ	9.00	9.00	0.0
7.5	UY	7.00	6.95	0.8
	UZ	9.00	9.00	0.0
7.6	UY	7.00	6.92	1.1
	UZ	9.00	9.00	0.0

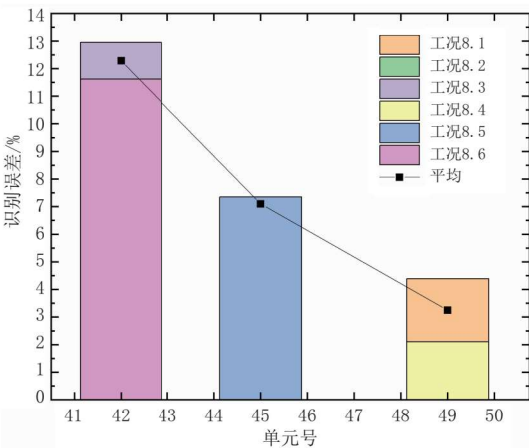


图7 桥墩单元损伤识别相对误差(仅大损伤单元)

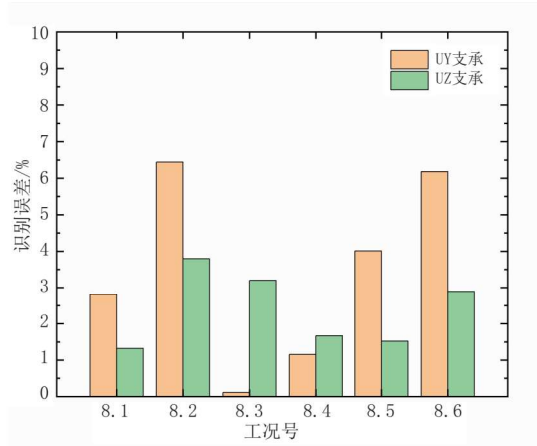


图 8 弹性支承损伤识别相对误差

的识别精度大大提高,最大不超过 7%,这表明在 5% 噪声影响下依然可以较为精准的得到实际损伤支承刚度值。此外,各工况的损伤识别速度受噪声影响不大,最多迭代 12 步即可达到收敛。

4 结 论

本文以铁路多跨简支梁桥下部结构为研究对象,提出了基于响应灵敏度的桥梁下部结构损伤识别方法。基于车桥耦合动力分析及数值算例验证了所提方法的有效性和抗噪性。主要结论如下。

(1)对于仅发生墩身损伤以及梁体、墩身、基底约束同时损伤,所提算法均可以有效识别墩身单元刚度和基底约束刚度值,使用基于桥梁加速度响应

灵敏度的模型修正方法识别下部结构损伤具备较高的精度。

(2)所提算法具有较强的抗噪性,在 5% 噪声影响下仍能有效识别弹性支承的损伤,对损伤较小的桥墩单元可以大致确定损伤单元位置,对损伤较大的桥墩单元可以精确的定位单元位置和识别损伤值。

参考文献:

[1] 任东华.基于模态参数小波变换的铁路桥墩损伤识别方法及试验研究[D].北京:中国铁道科学研究院,2014.

[2] 熊文,邹晨,叶见曙.基于动力特性识别的桥墩冲刷状态分析[J].中国公路学报,2017,30(5): 89-96.

[3] MA M, LIU J, ZHANG Z. Evaluating vertical conditions of bridge substructures of heavy-haul railway lines based on dynamic stiffness and pier vibration response [J]. Engineering Structures, 2021(235): 112037-112041.

[4] 卜建清,王树栋,罗韶湘.由车激响应识别桥梁损伤的灵敏度方法[J].振动与冲击,2007(7): 80-84.

[5] PRENDERGAST L J, HESTER D, GAVIN K, et al. An investigation of the changes in the natural frequency of a pile affected by scour[J]. Journal of Sound and Vibration, 2013,332(25): 6685-6702.

[6] DAVIS N T, SANAYEI M. Foundation identification using dynamic strain and acceleration measurements [J]. Engineering Structures, 2020(208): 109811-109816.

[7] 杨婷婷.基于变速行驶车辆激励的桥梁下部结构损伤诊断方法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2019.

[8] 张楠等.高速铁路车桥耦合动力学[M].北京:北京交通大学出版社,2018.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站: <http://www.csdqyf.com> 电话:021-55008850 联系邮箱: cdq@smedi.com