

# 实测车流荷载下斜拉索疲劳可靠度研究<sup>\*</sup>

王达<sup>1</sup>, 张明<sup>1,2</sup>, 鲁乃唯<sup>1</sup>

(1.长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410004; 2.珠海华发集团有限公司, 广东 广州 519000)

**摘要:** 为研究重载交通下既有斜拉桥斜拉索的疲劳安全水平, 提出基于实测车流数据的斜拉索疲劳可靠度评估方法, 在某高速公路桥梁重载车流监测数据的基础上建立随机疲劳车流模型, 加载至斜拉索的应力影响线, 由雨流计数方法计算提取疲劳应力谱, 采用高斯混合模型拟合疲劳应力概率密度函数; 以主跨 420 m 砼双塔斜拉桥为工程背景, 评估交通荷载增长情况下斜拉索的疲劳可靠度。结果表明, 当交通量年线性增长率由零增长到 0.5% 时, 斜拉索第 100 年的疲劳可靠度由 5.10 下降至 0.92; 当车重年线性增长率由零增长至 0.5% 时, 疲劳可靠度由 5.10 下降至 0.84。

**关键词:** 桥梁; 斜拉桥; 斜拉索; 疲劳可靠度; 随机车流; 车辆荷载

中图分类号: U442.5

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2018)04-0110-04

斜拉索是索塔与主梁的连接构件, 也是斜拉桥的关键受力构件。在重载车辆荷载与环境腐蚀的共同作用下, 既有斜拉索抗力退化与疲劳损伤问题突出, 持续增长的交通荷载作用也使斜拉索的疲劳问题日益突出, 如何评估现有交通荷载作用下斜拉索的疲劳安全水平值得研究。文献[1]基于桥梁健康监测数据研究了平行钢丝斜拉索的疲劳可靠度; 文献[2]研究了考虑风-车-桥耦合振动效应的斜拉索疲劳可靠性; 文献[3]研究结果表明短索的疲劳可靠度较大, 长索的疲劳可靠度较小; 文献[4]研究了斜拉索的微动疲劳效应及其对斜拉索时变疲劳可靠度的影响; 文献[5]研究了随机车流作用下斜拉索索力概率模型及可靠度评估; 文献[6]研究了随机重载车辆荷载作用下简支梁桥的疲劳可靠性。但缺少考虑实测重载交通车辆荷载作用下大跨斜拉桥斜拉索疲劳可靠度研究。

鉴于车辆荷载及超载的随机性, 基于概率统计理论的斜拉索疲劳可靠度分析可用于评估既有斜拉索疲劳安全性。该文基于四川某重载高速公路桥梁的长期监测车流数据建立随机疲劳车流模型, 提出随机车流作用下斜拉索疲劳应力谱模拟与分析方法, 以大跨双塔砼斜拉桥为例, 研究现有交通荷载及其增长模型对斜拉索疲劳可靠度的影响。

## 1 疲劳车流荷载模型

### 1.1 典型疲劳车辆荷载模型

现有桥梁疲劳应力分析所采用的车辆荷载模型

多为典型疲劳车辆。典型疲劳车辆是在长期车辆荷载调查(如 WIM 数据等)的基础上统计车型、车重、交通量等参数, 根据疲劳损伤等效原则将所有车辆等效为某个确定性的车辆。国内外设计规范均建议采用典型疲劳车辆荷载模型。英国 BS5400 规范采用 4 辆轴重为 80 kN 的货车作为典型疲劳车辆荷载模型[见图 1(a)]; 美国 AASHTO 规范采用总重为 240 kN 的三轴货车作为典型疲劳车辆荷载模型[见图 1(b)]; 中国采用总重为 550 kN 的货车荷载作为典型疲劳车辆荷载模型。考虑到中国地域辽阔, 不同地域的经济水平不同, 文献[9]建议按照地域划分疲劳车辆荷载模型。

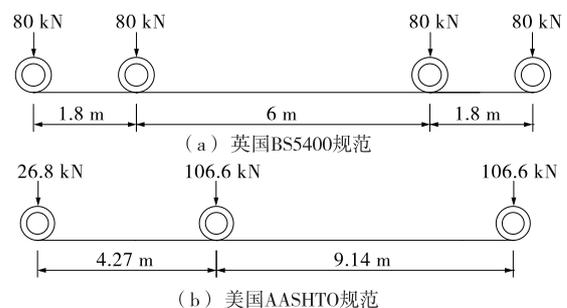


图 1 国外规范定义的典型疲劳车辆荷载模型示意图

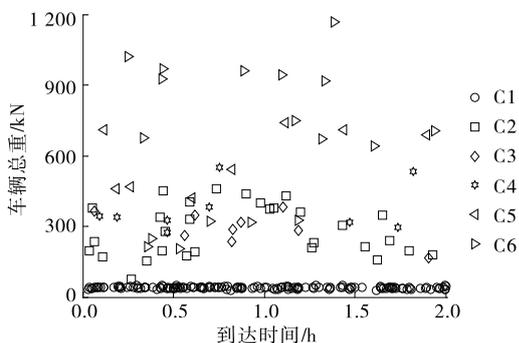
典型疲劳车辆荷载模型由多地的车流荷载统计分析得出, 具有一定的统计意义。但典型疲劳车辆荷载的车型、轴重、总重等均为固定值, 无法用于桥梁车辆荷载疲劳应力谱模拟。为解决该问题, 采用实测车流数据模拟随机疲劳车流模型, 用于分析斜

<sup>\*</sup> 基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2015CB057705)

拉索的疲劳应力谱。

### 1.2 随机疲劳车流模型

随机疲劳车流模型是在实测车流参数统计分析的基础上,考虑车型、车重、车距等随机变量生成的用于疲劳应力分析的随机车流模型。与常规随机车流模型相比,随机疲劳车流模型考虑了车辆轴重的概率特征,可捕捉车辆轮轴荷载对桥梁疲劳损伤的影响。图2为某高速公路桥梁行车道的随机车流模型,其中包含车型、车重、车距等3个随机变量,加入轴重的随机变量即形成随机疲劳车流模型。



C1表示轿车;C2~C6分别表示2~6轴货车。

图2 某高速公路桥梁行车道的随机车流模型

与典型疲劳车辆模型相比,随机疲劳车流模型不仅可用于模拟车辆多个参数的随机性,而且可用于研究车流变化对疲劳应力谱的影响。如:可通过调整车流的密集与稀疏程度研究行车间距对疲劳应力谱的影响,也可通过调整车流量的变化研究车流增长对桥梁疲劳应力谱的影响。

## 2 基于车流模型的拉索疲劳损伤分析

### 2.1 疲劳损伤模型

线性累积疲劳损伤理论是分析车流荷载作用下斜拉索疲劳损伤的基本依据。采用S-N曲线可将车辆荷载产生的疲劳应力转换为疲劳损伤,再将各损伤叠加即形成累积疲劳损伤。基于上述理论建立累积损伤的极限状态方程如下:

$$g(X) = \Delta - D(X) = \Delta - \frac{365nN_d S_{eq}^m}{C} \quad (1)$$

式中: $X$ 为随机变量; $\Delta$ 为临界损伤; $D(X)$ 为车辆荷载产生的累积损伤; $n$ 为以年为单位的时间参数; $m$ 为S-N曲线的对数斜率; $N_d$ 、 $S_{eq}$ 分别为日等效应力循环次数和日等效应力范围,其概率模型是求解该极限状态方程可靠指标的关键所在; $C$ 为疲劳强度系数。

考虑车流量年线性增长系数 $a$ 和车重年线性增长系数 $b$ ,分析交通量与车辆载重增长率对疲劳可靠度的影响。相应的疲劳损伤极限状态方程为:

$$g_n(X) = \Delta - D_n(X) = \Delta - \frac{365 S_{eq}^m N_d e \sum_{i=1}^n [1 + (i-1)a] [1 + (i-1)b]^m}{C} \quad (2)$$

式中: $e$ 为轮迹横向分布系数,即考虑车辆荷载在车道内横向位置的偏差影响。

### 2.2 车流荷载下桥梁疲劳损伤概率分析方法

由于疲劳应力谱(包含等效疲劳应力 $S_{eq}$ 与应力循环次数 $N_d$ )是研究车载下斜拉索疲劳可靠度的关键所在,采用随机车流模型建立斜拉索疲劳应力谱。为高效而准确地建立疲劳应力谱概率模型,采用“随机车流-索力影响线-雨流计数-高斯混合模型”的方法实现由随机车流的概率模型到桥梁疲劳应力谱模型的转换。分析流程:1)根据实测车流数据建立车流参数概率模型,采用Monte Carlo抽样方法生成随机车流模型;2)再根据桥梁有限元模型提取索力影响线,找到最不利斜拉索力影响线;3)将随机车流荷载加载至桥梁索力影响线,生成索力应力时程曲线;4)采用雨流计数方法提取疲劳应力与日循环次数,根据S-N曲线和线性累积损伤准则建立累积疲劳损伤概率模型(见图3)。

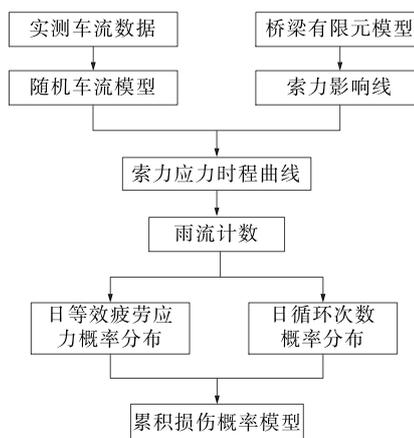


图3 拉索疲劳应力概率分析流程

建立斜拉索累积疲劳损伤概率模型后,即可根据式(1)疲劳损伤功能函数计算斜拉索的疲劳可靠指标,由式(2)分析考虑交通量或车重增长的拉索疲劳可靠指标。

### 2.3 高斯混合模型

在不存在车辆超载的情况下,车重多服从单一

的正态分布或对数正态分布;在超载车辆存在的情况下,车重多服从多峰分布。针对多峰分布情况,可采用高斯混合模型拟合其分布函数。

高斯混合模型是将多个正态分布函数按照一定的比例叠加而形成的一种概率模型,数学表达式为:

$$P\{\omega | (a_i, \mu_i, \sigma_i^2)\} = \sum_{i=1}^m a_i \cdot \frac{\exp[-1/(2\sigma_i^2)(\omega - \mu_i)^2]}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} \quad (3)$$

式中: $\omega$  为随机变量,表示车重; $a_i, \mu_i, \sigma_i$  分别表示第  $i$  个高斯分布函数的权重、均值和标准差; $m$  为高斯模型的数量。

为选择最优高斯模型数量,采用优化算法通过

似然函数值最优得到  $m$  的最优值。

### 3 工程实例

#### 3.1 斜拉桥概况

以四川泸渝(泸州—重庆)高速公路上某双塔砼斜拉桥为工程背景,研究重载车流下斜拉索的疲劳可靠度。该斜拉桥的跨径布置为  $210+420+210=840$  m(见图4)。主梁为 C60 砼,斜拉索为钢绞线,每个塔均为 34 对拉索。桥面为双向四车道,公路 I 级汽车荷载。

#### 3.2 随机车流模拟

采用四川省宜宾市某高速公路 WIM 系统采集的数据。该系统运营时间约 5 年,在此期间监测了

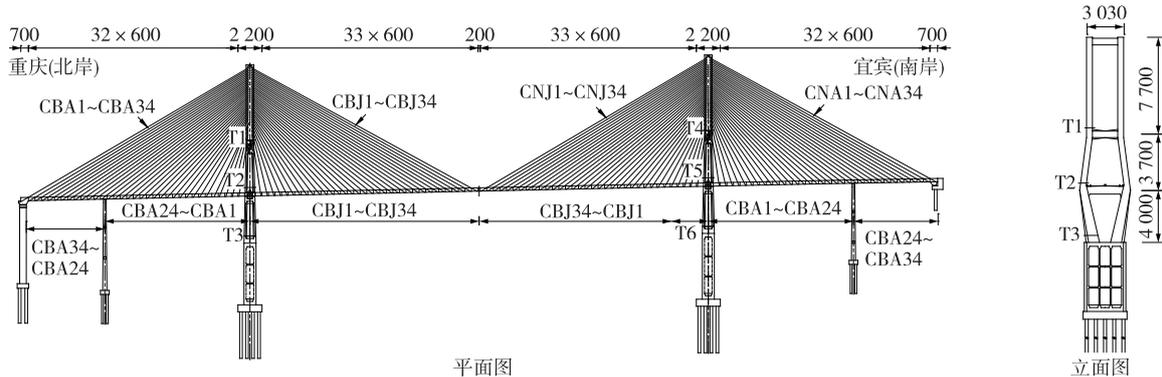


图4 某双塔砼斜拉桥桥型布置(单位:cm)

大量车流数据。图5为该系系统采集的 C6 车型总重概率分布。

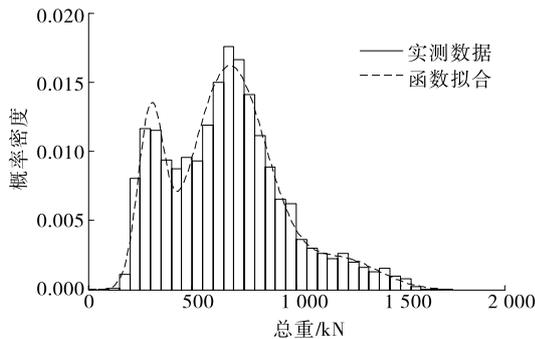


图5 C6车型的总重概率分布

根据图5, C6 车型总重服从多峰分布,基于 GMM 的概率分布拟合函数可捕捉到该概率分布特征。基于 Monte Carlo 抽样方法,模拟随机车流,结果见图2。

#### 3.3 疲劳应力时程分析

移动集中力取 1 000 kN,从桥梁一端移动至另一端,对比 3 根斜拉桥拉索的应力变化情况(见图

7)。从中可见,长索的应力幅较大。

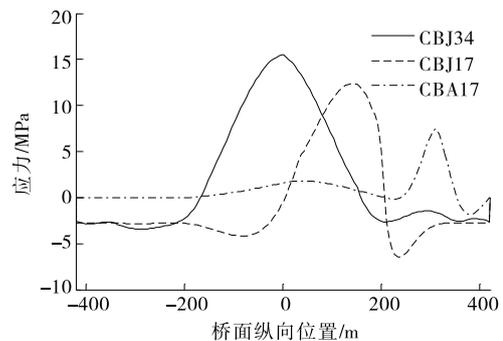


图6 拉索应力影响线

#### 3.4 随机车流作用下斜拉索时程曲线

取 1 h 随机车流,1 条车道,区分密集车流(车距小于 100 m)、稀疏车流(车距大于 100 m),CBJ34 斜拉索的应力时程见图7、图8。

#### 3.5 疲劳应力谱模拟

采用随机车流加载至斜拉索索力影响线,采用雨流计数方法提取疲劳应力幅与循环次数,得到斜拉索的疲劳应力谱。采用 1 h 随机车流模型所得到

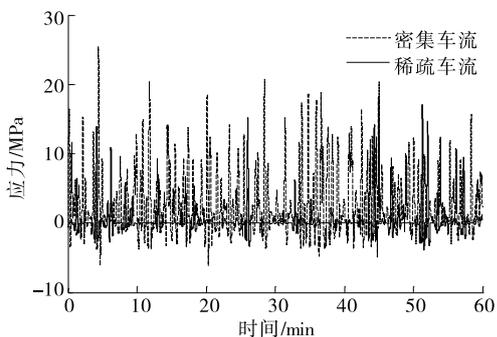


图 7 稀疏与密集车流作用下斜拉索 CBJ34 的应力时程

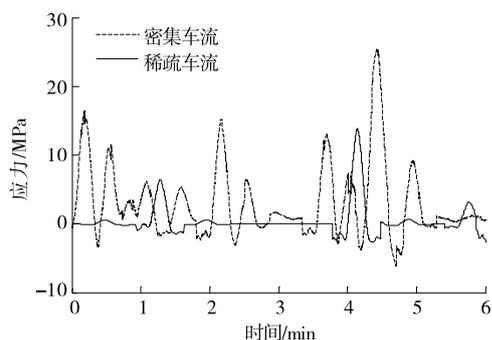


图 8 稀疏与密集车流作用下斜拉索 CBJ34 的应力时程局部放大

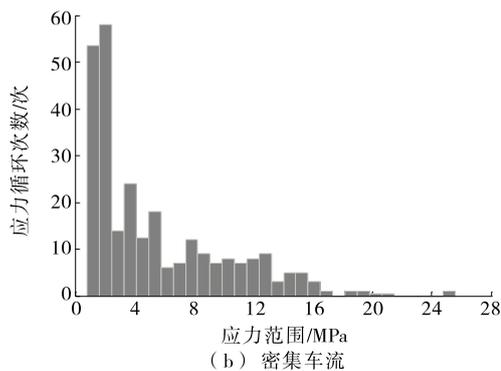
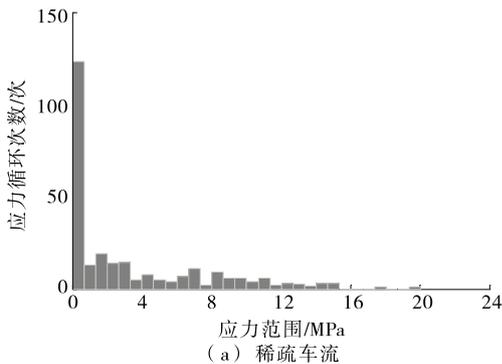


图 9 1 h 随机车流作用下拉索应力谱

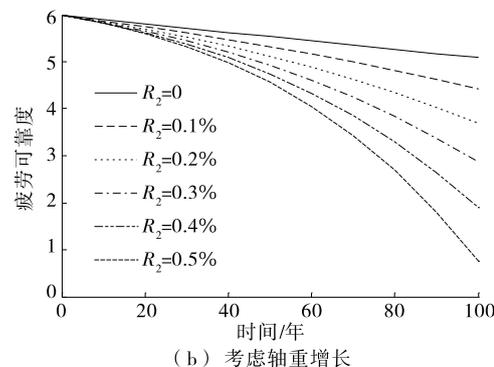
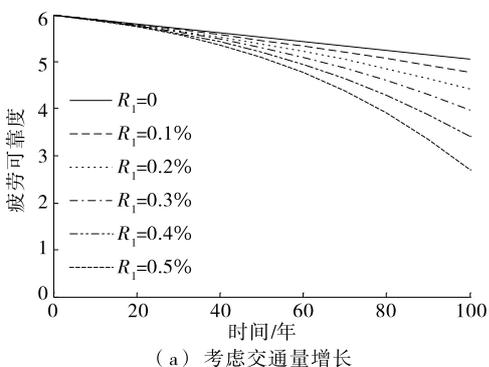


图 10 桥梁运营期的斜拉索疲劳可靠度

的疲劳应力谱见图 9。

由图 9 可知:稀疏车流作用下斜拉索疲劳应力范围相对较小,而应力循环次数相对较多;密集车流作用下斜拉索疲劳应力幅值较大,而应力循环次数相对较少。

### 3.6 疲劳可靠度

考虑交通量或交通荷载的增长水平,估计桥梁运营期的疲劳可靠度。取交通量率  $R_1$  与车辆荷载增长率  $R_2$  分别为  $0 \sim 0.5\%$ ,分析结果见图 10。

由图 10 可知:当交通量增长率  $R_1$  由零增长到  $0.5\%$  时,斜拉索在第 100 年的疲劳可靠度由 5.10 降至 0.92;当车重增长率  $R_2$  由零增长至  $0.5\%$  时,斜拉索在第 100 年的疲劳可靠度由 5.10 降至 0.84。可见车重的增长对斜拉索疲劳可靠度的影响较大。

## 4 结论

以某高速公路桥梁长期监测车流数据为基础建立随机疲劳车流模型,采用基于影响线加载的响应面分析方法,以主跨 420 m 砼斜拉桥斜拉索为背景,评估交通荷载增长情况下斜拉索的疲劳可靠度。结论如下:当交通量增长率由零增长到  $0.5\%$  时,斜

拉索在第 100 年的疲劳可靠度由 5.10 下降至 0.92;

(下转第 144 页)

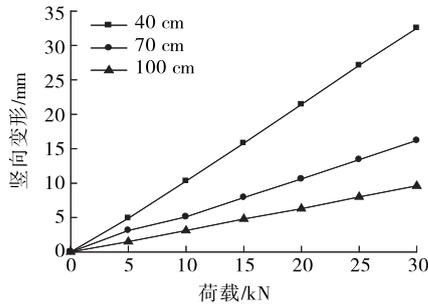


图5 不同长度玻璃钢夹砂管荷载—竖向变形曲线对比

的抵抗变形能力,玻璃钢夹砂管的长度是影响管环向刚度的重要因素。

### 3 结论

通过环刚度试验对比分析,得到同一直径不同长度玻璃钢夹砂管环刚度、刚度因子和变形率,结论如下:玻璃钢夹砂管在承受相同等级荷载时的环向刚度和刚度因子随着管道长度的增加而增大,变形率随管道长度的增加而降低;玻璃钢夹砂管的竖向变形随着荷载等级的增加而线性增大,两者具有一定的线性关系;管道的变形趋势随着管道长度的增加而减缓,玻璃钢夹砂管的长度是影响管道环向刚度的重要因素。

### 参考文献:

[1] 李卓球,岳红军.玻璃钢管道与容器[M].北京:科学出版社,1990.

[2] 周仕刚,薛元德,沈碧霞.关于玻璃纤维增强塑料夹砂管标准中几个问题的讨论[J].玻璃钢/复合材料,2001(1).

[3] 周晓珍.浅析玻璃钢夹砂管道优点和运用[J].玻璃钢/复合材料,2001(1).

[4] 陈成林,周启源.玻璃钢顶管在高速公路涵洞工程的应用[J].公路,2007(5).

[5] Lee Y G, Kim S H, Park J S, et al. Full-scale field test for buried glass-fiber reinforced plastic pipe with large diameter[J]. Composite Structures, 2015, 120.

[6] Rafiee R, Amini A. Modeling and experimental evaluation of functional failure pressures in glass fiber reinforced polyester pipes[J]. Computational Materials Science, 2015, 96.

[7] Rafiee R, Reshadi F. Simulation of functional failure in GRP mortar pipes[J]. Composite Structures, 2014, 113.

[8] 杨建明,陈建中.玻璃纤维增强塑料夹砂管的环刚度分析[J].玻璃钢/复合材料,2013(6).

收稿日期:2017-09-14

(上接第 113 页)

当车重增长率由零增长至 0.5% 时,斜拉索在第 100 年的疲劳可靠度由 5.10 下降至 0.84。车重的增长对斜拉索疲劳可靠度的影响较大。基于实测车流数据的斜拉索疲劳可靠性评估结果可为桥梁的运营管理提供理论依据。

### 参考文献:

[1] 侯金生.基于健康监测的平行钢丝斜拉索疲劳可靠性评定[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2009.

[2] 李岩,吕大刚,盛洪飞.考虑随机车载—风载联合作用的斜拉桥拉索疲劳可靠性分析[J].中国公路学报,2012,25(2).

[3] 殷志祥,高哲,冯瑶.车辆荷载作用下斜拉索疲劳可靠度分析[J].工业建筑,2017,47(6).

[4] 刘沐宇,陈齐风,吴志强.考虑微动疲劳的斜拉桥钢绞线斜拉索时变可靠性分析[J].土木工程学报,2012,45(7).

[5] 杨晓艳,贡金鑫,张启伟.随机车辆荷载作用下斜拉索索力的概率模型及可靠度分析[J].建筑科学与工程学

报,2014,31(2).

[6] 罗媛,颜东煌,袁明,等.随机重载车辆作用下简支梁桥疲劳可靠度评估[J].中外公路,2017,37(3).

[7] Wang Y, Zong G, Wang Z, et al. A case study of traffic load for long-span suspension bridges [J]. Structural Engineering International, 2014, 24(3).

[8] 周泳涛,鲍卫刚,翟辉,等.公路钢桥疲劳设计荷载标准研究[J].土木工程学报,2010,43(11).

[9] 邓扬,李爱群,刘扬,等.钢桥疲劳荷载效应监测数据概率建模与疲劳可靠性分析方法[J].土木工程学报,2014,47(7).

[10] 鲁乃唯,罗媛,汪勤用,等.车载下大跨度悬索桥梁动力可靠度评估[J].浙江大学学报:工学版,2016,50(12).

[11] 鲁乃唯.随机车流下悬索桥加劲梁动力响应概率模型与可靠度研究[D].长沙:长沙理工大学,2014.

[12] 姚遥.基于实测数据的车辆荷载作用下部分斜拉桥拉索疲劳可靠度研究[A].2009 全国土木工程博士生学术论坛优秀论文集[C].2009.

收稿日期:2018-01-05