

基于 WIM 数据的公路斜拉桥拉索疲劳可靠度评估

王晓明¹, 吴润涵¹, 李鹏飞^{2†}, 杨文杰¹, 翟岸¹

(1. 长安大学公路学院, 陕西 西安 710064;

2. 浙江数智交院科技股份有限公司, 浙江 杭州, 310030)

摘要:针对我国超重车辆荷载频发导致现行规范难以反映真实桥梁安全的问题, 本文基于实测 WIM 数据构建了考虑冲击效应的车流荷载响应生成框架, 采用复合极值理论外推随机车流响应, 建立了一种考虑评估基准期影响的车流荷载效应概率模型, 提出了基于实测车流的斜拉索疲劳可靠度评估方法. 以某双向六车道高速公路 WIM 系统为期三个月的实测数据为基础, 对工程背景斜拉桥的拉索疲劳可靠度进行了评估, 结果表明: 在基于实测 WIM 数据外推的概率模型下, 斜拉桥重载侧拉索的疲劳可靠指标在 3.93 ~ 6.12 之间, 而其承载能力极限状态抗拉强度可靠指标在 7.74 ~ 11.04 之间; 而采用规范荷载概率模型的疲劳可靠指标在 4.35 ~ 6.18 之间. 对比说明: 疲劳可靠度远低于抗拉强度可靠度, 拉索评估基准期内的安全性主要受疲劳控制; 相对基于实测 WIM 数据外推的评估基准期荷载, 采用规范荷载会明显地高估斜拉索的疲劳可靠度.

关键词:斜拉桥拉索; 动态称重系统; 车辆荷载模型; 车辆荷载效应; 可靠度评估

中图分类号:U441.4; U448.27

文献标志码:A

Fatigue Reliability Evaluation of Highway Cable-stayed Bridge Cables Based on WIM Data

WANG Xiaoming¹, WU Runhan¹, LI Pengfei^{2†}, YANG Wenjie¹, ZHAI An¹

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. Zhejiang Institute of Communications Co., Ltd., Hangzhou 310030, China)

Abstract: In response to the problem that the current specifications are difficult to reflect the actual bridge safety due to the frequent occurrence of overweight vehicle loads in China, this paper constructed a framework for generating traffic load response considering the impact effect based on measured data from a weight-in-motion (WIM) system. The response of random traffic flow was extrapolated using the compound extreme value theory, and a model for traffic load effect probability that considers the influence of the evaluation benchmark period was established. Moreover, a fatigue reliability assessment method for cable-stayed bridges based on measured traffic flow was proposed. Taking a cable-stayed bridge with the measured data of three months from a WIM system as a background, the reliability of the cables was evaluated. The results show that, in the case of using the load probability

* 收稿日期: 2023-10-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52178140), National Natural Science Foundation of China(52178140); 长安大学中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(300102214901), Fundamental Research Funds for the Central University, CHD(300102214901)

作者简介:王晓明(1983—), 男, 山西朔州人, 长安大学教授, 博士

† 通信联系人, E-mail: 1124386370@qq.com

model extrapolated based on the measured WIM data, the fatigue reliability index of the cables ranges from 3.93 to 6.12, and the reliability index of the ultimate limit state strength for carrying capacity ranges from 7.74 to 11.04. The fatigue reliability index ranges from 4.35 to 6.18 when using the standard load probability model, which indicates that the fatigue reliability is significantly lower than the strength reliability, indicating that the safety of the cables in the assessment benchmark period is mainly controlled by fatigue. Compared with load benchmark periods extrapolated based on measured WIM data, the standard loads will significantly overestimate the fatigue reliability of the cables.

Key words: cable-stayed bridge cable; weigh-in-motion; vehicle load model; vehicle load effect; reliability evaluation

汽车荷载作为在役桥梁最基本的可变荷载,对桥梁结构的运营安全起着至关重要的作用.而随着经济的发展和各地经济合作增加,我国货运车辆的数量和载重量呈现出明显增长的趋势.近年来,因极端车辆荷载导致的桥梁垮塌事件频发^[1-4],引起了研究者对公路车辆荷载模型的关注.由于我国现行公路桥涵设计规范参考了20世纪90年代的车辆荷载调查结果^[5],可能并不能反映在役桥梁真实的运营荷载状况,因此,根据最新实测数据建立符合实际情况的车辆荷载模型,对于桥梁结构的可靠度评估、剩余寿命预测及维修加固策略的制定,都具有重要意义.

动态称重(weigh-in-motion, WIM)技术可以采集车辆到达时间、车辆总重及各轴轴重、轴间距、车速等信息,恰能够为车辆荷载模型的建立提供实测数据.我国“公路桥梁车辆荷载研究”课题组^[5]在20世纪90年代开始对车辆荷载模型进行研究,根据全国4个代表性地区的车辆荷载实测数据,通过统计分析给出了车辆荷载和荷载效应的截口分布和设计基准期内的最大值概率分布及分布参数.贡金鑫等^[6-7]对非治超地区、计重收费地区和治超地区的车辆荷载数据进行统计分析,结果表明3类地区的车辆荷载概率密度曲线均呈多峰特性,车辆荷载在不同时段内的最大值概率分布均可由极值I型分布描述.阮欣等^[8-9]以最高八车道的WIM数据为基础,研究了车辆的车道选择和荷载的空间分布特性,结果表明各分车道的车辆及荷载分布具有显著差异,提出了考虑多车道的荷载模型,建议修正规范的车辆荷载模型.林诗枫等^[10]基于南京长江三桥车辆荷载实测数据,采用参数估计和非参数估计方法,建立了车型、车辆质量、轴距、轴重等参数的概率模型,基于泊松过程理论、马尔可夫过程理论和车辆跟驰模型,建立了该斜拉桥的车辆荷载模型.宗周红等^[11-12]基

于WIM系统的监测数据,建立了重车疲劳荷载谱和标准疲劳车模型,并基于江苏省高速桥梁的大基数车辆荷载实测数据,建立了全省高速公路桥梁汽车荷载特性的概率分布模型,以此建立了高速公路桥梁汽车荷载模型,确认该实际荷载是规范荷载的1.46倍.邓露等^[13]基于湖南省某地区的WIM数据,建立了不同轴限值约束下的随机车流模型,并研究了桥梁轴限值与年均加固费用的关系.

从目前研究现状来看,对汽车荷载模型的研究已初具规模,但并未形成统一的车辆荷载效应概率模型构建方法.因此,本文以某双向六车道高速公路WIM系统为期三个月的实测数据为基础,对公路桥梁的车辆荷载模型开展研究,提出了一种车辆荷载效应概率模型的构建方法以及一种实测车流作用下在役桥梁可靠度评估流程.以某斜拉桥为背景,建立了实际车流作用下斜拉索索力的概率模型,并对斜拉索的可靠度指标进行了评估.

1 基于WIM数据的车辆荷载效应概率模型

本文选取某双向六车道高速公路WIM系统为期三个月的实测数据,运用数理统计方法得出了影响车辆荷载效应的各参数的分布规律.

1.1 WIM数据统计分析

1.1.1 各车道车型分布

公路上运行的车辆种类较多,根据车轴数,本文将车辆类型划分为6类,分别为二轴车、三轴车、四轴车、五轴车、六轴车、六轴以上车辆.由于六轴以上车辆在总车流中占比小于0.01%,并且其车重与六轴车相当,因此在统计分析中忽略了六轴以上车辆的影响.根据车辆运行方向和运行车道,分别统计车型分布,结果如图1和表1所示.

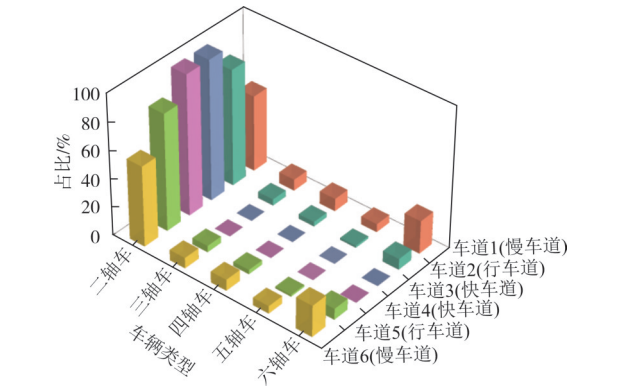


图 1 各车道车型分布
Fig.1 Distribution of vehicle type in lanes

表 1 各车道车型占比统计表						
Tab.1 Proportion of vehicle type in each lane						
方向	车道	占比/%				
		二轴	三轴	四轴	五轴	六轴
上行	快车道 (车道 4)	99.95	0.02	0.01	0.01	0.01
	行车道 (车道 5)	83.17	4.60	3.11	1.32	7.80
	慢车道 (车道 6)	57.13	7.51	7.85	5.35	22.16
下行	快车道 (车道 3)	99.90	0.05	0.02	0.01	0.02
	行车道 (车道 2)	82.92	4.54	3.31	1.50	7.73
	慢车道 (车道 1)	54.01	7.98	8.91	5.74	23.36

1.1.2 各车型总重分布

实测数据表明,各车型总重呈现多峰分布特点,对实测数据进行统计分析并参考已有研究后得出结论,可以采用 1 个对数正态分布和 $n-1$ 个正态分布的加权组合来描述车总重分布,拟合的分布参数如表 2

所示.表 2 中,每种车型的 μ_1 、 σ_1 分别为对数正态分布的对数均值和对数标准差; μ_i 、 σ_i ($i=2,3,\cdots,n$) 分别为第 i 个正态分布的均值和标准差.以六轴车为例,车辆总重的拟合情况如图 2 所示.

表 2 车辆总重分布参数				
Tab.2 Distribution parameters of total wight of vehicle				
车型	方向	权重系数	μ_i/h	σ_i/h
二轴	上行	0.857	0.566	0.256
		0.143	9.641	5.496
	下行	0.858	0.252	0.336
		0.142	10.124	5.974
三轴	上行	0.728	2.878	0.265
		0.272	22.243	6.558
	下行	0.710	2.942	0.367
		0.290	23.613	6.838
四轴	上行	0.345	2.969	0.201
		0.564	31.860	6.239
		0.091	35.612	10.306
	下行	0.161	2.833	0.182
		0.823	31.793	8.908
		0.016	62.656	5.351
五轴	上行	0.223	2.996	0.115
		0.618	29.623	5.834
		0.159	46.795	4.571
	下行	0.232	2.983	0.173
		0.728	33.300	10.535
		0.040	47.697	15.166
六轴	上行	0.279	3.043	0.151
		0.301	52.551	3.277
		0.420	46.385	13.057
	下行	0.335	3.143	0.297
		0.125	59.886	4.154
		0.164	65.780	23.135
		0.376	46.881	4.458

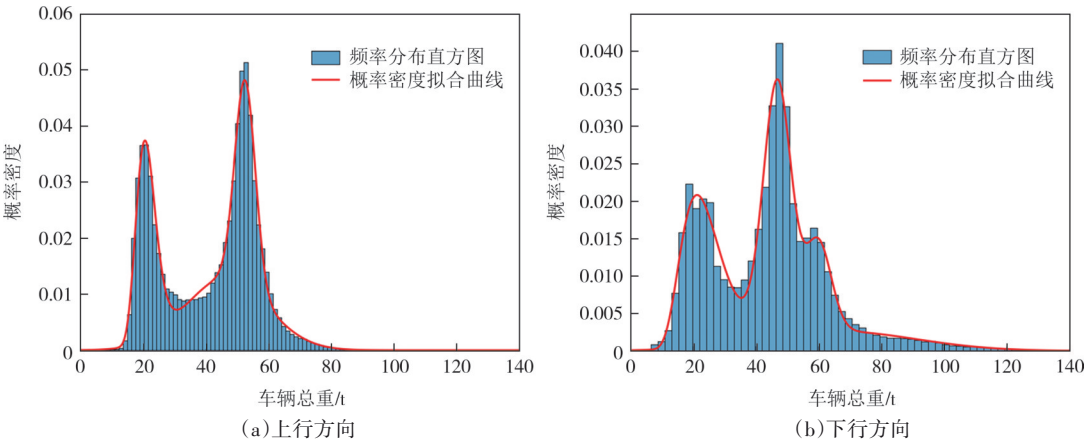


图 2 六轴车总重分布
Fig.2 Distribution of six axle vehicle

1.1.3 各车型轴间距及轴重

由于本文采用的 WIM 系统并未对车辆的轴距信息进行采集,因此轴距信息通过参考已有文献确定,轴重分配系数根据实测数据中各个轴重占车辆总重比例的平均值确定.最终确定各类车型的典型车辆荷载模型如表3所示.

表3 典型车辆荷载模型

Tab.3 Classical model of vehicle load

车型	车辆荷载模型(车辆总重 W/t)
二轴	
三轴	
四轴	
五轴	
六轴	

1.1.4 车辆时距和间距

“公路桥梁车辆荷载研究”课题组将车流的运行

状态分为一般运行状态和密集运行状态,根据对本文数据的统计分析,发现处于密集运行状态的车辆极少,因此可认为本文所分析的车流运行状态为一般运行状态.统计分析表明,采用对数正态分布来描述车辆时距和间距的分布具有较好的拟合效果.分布参数如表4所示.

表4 车辆时距和间距分布参数

Tab.4 Distribution parameters for time intervals and clearance of vehicles

车道	时距/s		间距/m	
	μ	σ	μ	σ
车道1	2.727	0.838	5.625	0.848
车道2	2.183	0.891	5.318	0.887
车道3	2.027	0.947	5.278	0.952
车道4	2.072	0.968	5.308	0.978
车道5	2.147	0.925	5.323	0.926
车道6	2.475	0.623	5.513	0.929

1.2 随机车流模拟方法

随机车流的模拟通常采用蒙特卡罗法,对于单峰分布的随机变量,可通过已有命令直接生成;对于多峰分布的随机变量,采用反函数法进行抽样.随机车流模拟的流程如图3所示.

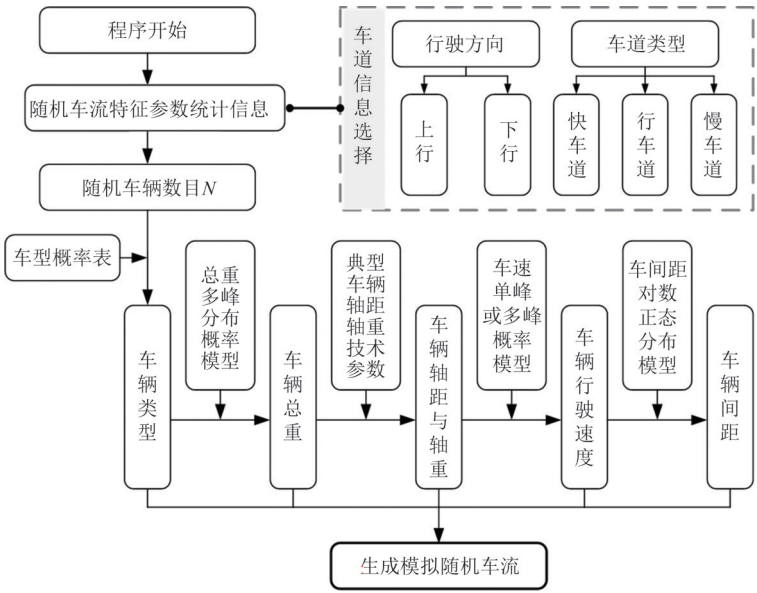


图3 随机车流模拟流程图

Fig.3 Chart of simulating randomized traffic flow

1.3 车辆荷载效应计算方法

随机车流作用下的荷载效应计算,一般采用影响线(面)加载的方法,但该方法为静力学方法,并不能考虑车辆荷载的动力效应.本文提出了一种能考虑车辆荷载动力效应的影响线(面)加载方法,其主

要流程如图4所示.

1.4 基于复合极值理论的车辆荷载及效应外推方法

该方法选取一天内最大的 n 个样本.其中 n 的值是每天能通过 K-S 检验的汽车数目,是一个随机变量,能有效提高数据利用率.

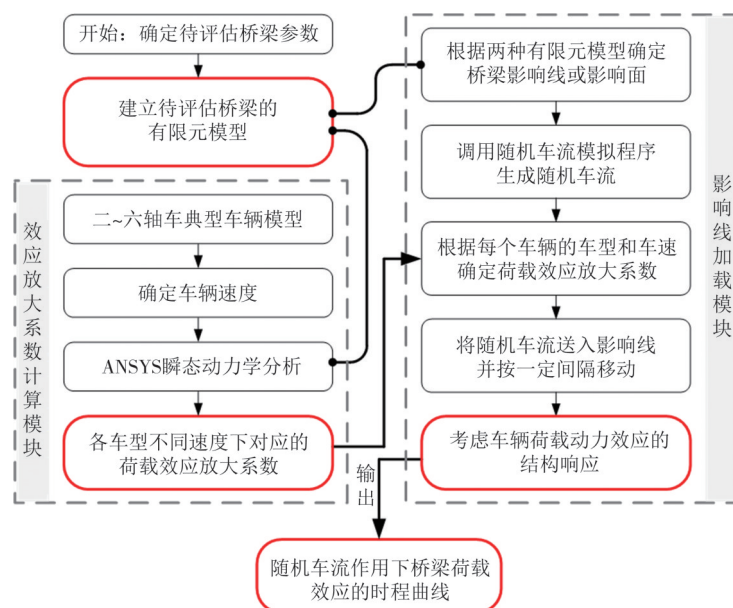


图4 车辆荷载效应计算流程

Fig.4 Computation of vehicle load effect

设采用 L 天实测数据进行极值外推, 每天通过 K-S 检验的汽车数目为 $k_j (j=1, 2, \dots, L)$ 个, $w_j (i=1, 2, \dots, k_j)$ 为采集到的汽车荷载数据, 为独立同分布的随机变量且分布函数为 $F(x)$, 设 k_j 相应的取值概率为 p_j , 则 $\sum_{j=1}^L p_j = 1$. 如果记 $u_n = \max_{1 \leq i \leq k_j} w_i$, 则可知 u_n 的分布函数为:

$$p = Q(x) = P(u_n < x) = \sum_k p_k [F(x)]^k \quad (1)$$

对于给定的 p 值, 设 $x_{k,p}$ 为 $p = [F(x)]^k$ 的解, 则式(1)的近似解为:

$$x_p = \sum_k \frac{p_k x_{k,p}}{b_k} / \sum_k \frac{p_k}{b_k} \quad (2)$$

b_k 可按式(3)计算:

$$b_k = 1 / \sqrt{2 \ln k} \quad (3)$$

则基于 L 天实测数据, 采用复合极值理论外推得到的评估基准期 T 内的汽车荷载极大值及置信概率 95% 的置信区间半长分别为:

$$w_p = e^{\mu + x_p \times \sigma} \quad (4)$$

$$\Delta w_p = 2 \times w_p \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \sqrt{1 + 0.5 x_p^2} \quad (5)$$

式中: N 为 L 天通过 K-S 检验的数据量的总和; μ 、 σ 分别为 N 个汽车荷载数据取对数后的平均值与标准差.

由上述计算过程可知, 当给定评估基准期 T 后, 根据对应的重现期 R_t 求出对应的 p 值, 便可外推出评估基准期内的汽车荷载极值.

1.5 考虑评估基准期的车辆荷载效应概率模型

假设指定重现期 R_t 下的荷载效应最大值为 $x(R_t)$, 其在评估基准期 T 内不被超越的概率为 p_k , 则根据极值外推理论, 可以构建出 $x(R_t)$ 和 p_k 一一对应的关系, 其对应的曲线便为 $x(R_t)$ 的分布曲线. 荷载效应极大值概率模型具体构建步骤如下:

1) 在 MATLAB 中生成足够多 (假设为 n) 个在 $[0, 1]$ 上均匀分布的随机数, 并按从小到大排列为 $p_k(1), p_k(2), \dots, p_k(n)$;

2) 指定评估基准期 T , 计算每个 p_k 对应的 R_t ;

3) 根据极值外推理论, 计算 R_t 对应的荷载效应外推值 $x(R_t)$, 分别记为 $x(R_t(1)), x(R_t(2)), \dots, x(R_t(n))$;

4) 根据 $x(R_t)$ 与 p_k 一一对应的关系, 在坐标系中以 $x(R_t)$ 为横轴、 p_k 为纵轴描点, 便可绘制出用于拟合评估基准期 T 对应的荷载效应极大值分布函数 $F_T(x)$ 的散点图;

5) 对分布函数 $F_T(x)$ 进行拟合, 并采用 K-S 检验的方法检验效应的极大值服从何种分布类型.

2 基于实测车流的疲劳可靠度评估方法

2.1 可靠度评估主要步骤

基于实测车流的桥梁可靠度评估, 主要分为以下几个部分: 随机车流的模拟、车辆荷载效应极值概率模型的建立、抗力及恒载效应模型的建立、桥梁承载力可靠度的评估. 其主要步骤如下:

步骤1 根据实测数据获得车流参数的分布规律,依据2.2节流程图和蒙特卡罗法模拟随机车流.

步骤2 根据1.3节方法准确计算车辆荷载效应,并基于Rice公式外推理论,按照1.5节方法建立车辆荷载效应极值的概率模型.

步骤3 根据已有成果或实际情况,计算外推拉索应力脉频谱,根据线性累积疲劳损伤理论计算拉索平均寿命.

步骤4 基于外推应力脉频谱及拉索平均寿命,根据拉索疲劳寿命的威布尔分布和其概率密度累积函数计算拉索疲劳可靠度:

$$L(N) = R(N) = \exp\left[-\left(\frac{N}{c}\right)^k\right]$$

(6)

式中: N 为疲劳寿命, c 为特征寿命, k 为形状因子.

2.2 可靠度评估流程

可靠度评估流程图如图5所示.

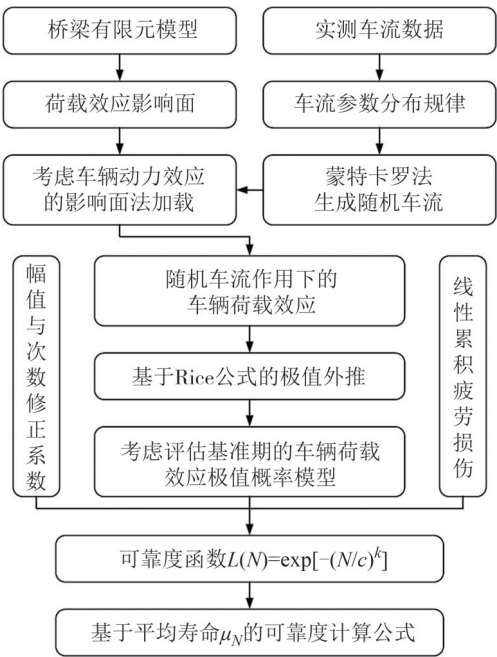


图5 桥梁可靠度评估流程图

Fig.5 Reliability evaluation of bridges

3 算例分析

3.1 工程概况

某双塔双索面斜拉桥,桥梁全长940 m,主跨跨

径500 m,边跨各设置一个辅助墩,总体跨径布置为(60+160+500+160+60)m,结构体系为半漂浮体系,100年.主桥总体布置如图6(a)所示.

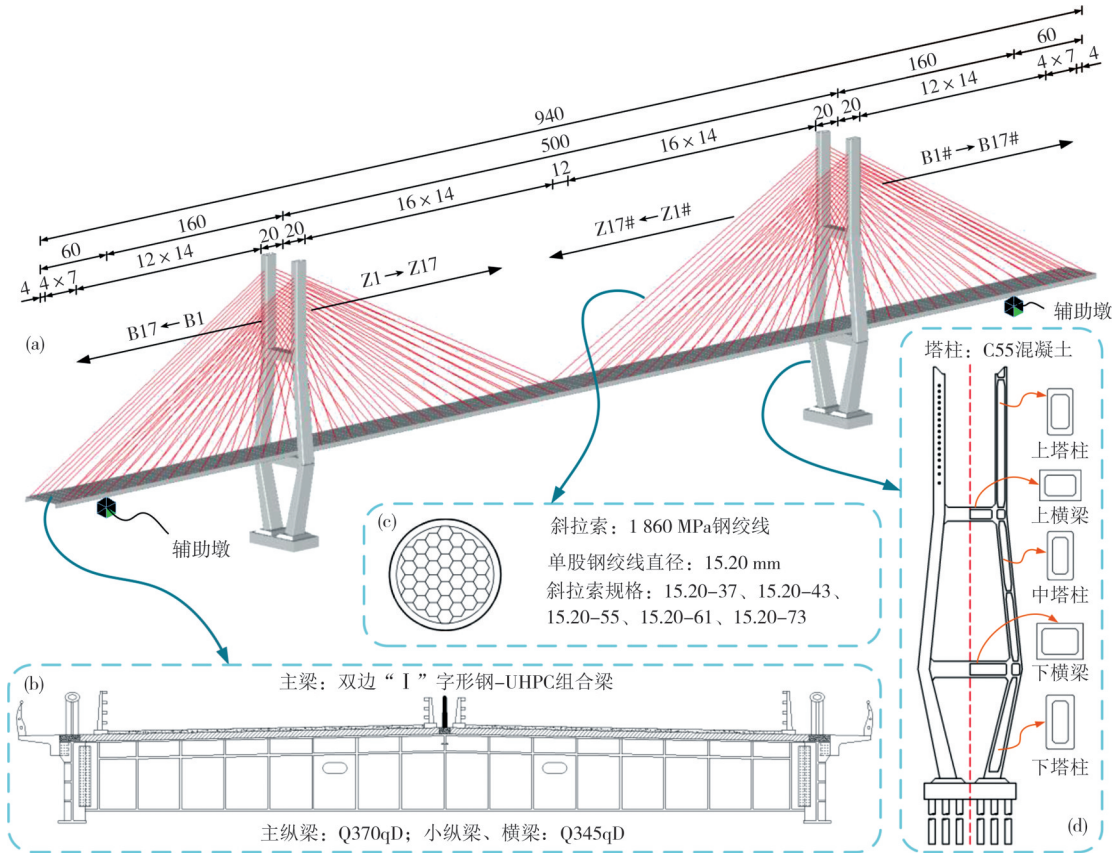


图6 某斜拉桥工程概况图(单位:m)

Fig.6 Project overview of a cable-stayed bridge(unit:m)

主梁采用双边“工”字形钢纵梁、“工”字形钢横梁与 UHPC 桥面板组合而成的整体式断面.其中双边钢纵梁采用 Q370qD 钢材,桥梁中心线处设置一道小纵梁,钢横梁及小纵梁均采用 Q345qD 钢材.主梁标准横断面如图 6(b)所示.

斜拉索平行双索面对称布置,采用环氧涂层喷涂型钢绞线,标准抗拉强度 1 860 MPa,采用五种规格共 $17\times4\times2=136$ 根斜拉索,如图 6(c)所示.

主塔采用 H 形桥塔,如图 6(d)所示.上塔柱为竖直的双肢塔柱,中塔柱向外倾,下塔柱向内收拢.主梁位于中塔柱之间,设置上、下两道横梁.塔柱及横梁采用 C55 混凝土,塔座采用 C45 混凝土,承台及桩基分别采用 C35 及 C30 混凝土.

3.2 有限元模型及影响面

3.2.1 有限元模型

斜拉桥 ANSYS 有限元模型如图 7 所示.斜拉桥主梁采用梁格方法建模,主纵梁、小纵梁、横梁及桥塔均采用 BEAM188 单元模拟,同时为了能使车辆荷载加载在主梁任意位置上,准确模拟车辆荷载的动力效应,采用 SHELL181 单元模拟 UHPC 桥面板,斜拉索采用 LINK10 单元模拟,并采用 Ernst 公式修正斜拉索的弹性模量,以反映斜拉索垂度效应.全桥的边界条件为:主塔根部约束全部自由度,辅助墩处设置竖向约束,过渡墩处设置竖向和横桥向约束.

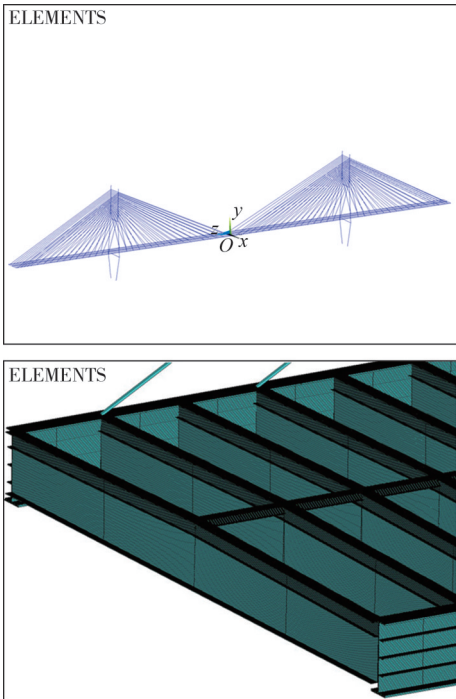


图 7 某斜拉桥 ANSYS 有限元模型
Fig.7 ANSYS model of the cable-stayed bridge

3.2.2 成桥索力

采用 ANSYS 模型计算得到斜拉索在自重作用下的成桥索力如图 8 所示.

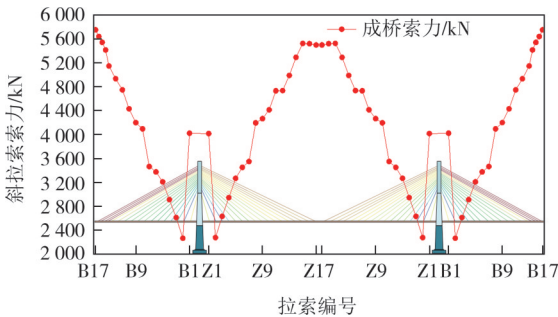


图 8 成桥索力云图及索力分布
Fig.8 Cloud map and distribution of cabel forces

3.2.3 拉索索力影响面

以中跨拉索 Z17 和边跨拉索 B8 为例,绘制拉索索力影响面如图 9 和、图 10 所示.

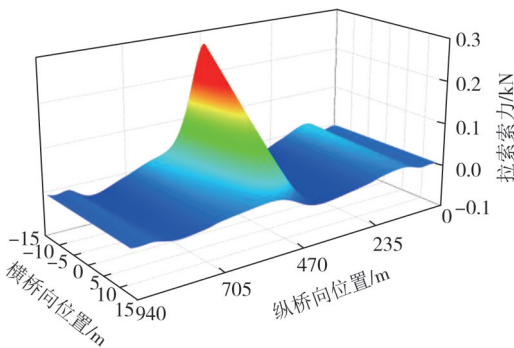


图 9 Z17 拉索索力影响面
Fig.9 Influence surface of cable force for Z17

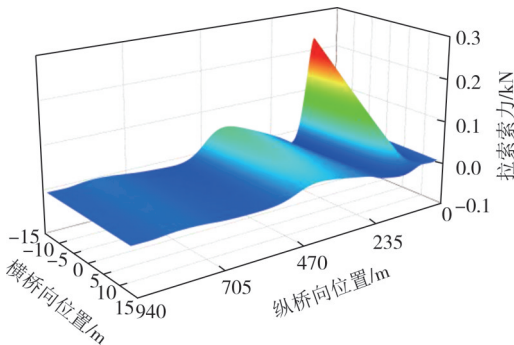


图 10 B8 拉索索力影响面
Fig.10 Influence surface of cable force for B8

3.3 车辆荷载效应概率模型

采用第 2 节方法计算随机车流效应并建立概率模型.以下行侧的中跨拉索 Z17、边跨拉索 B8 为例,在时长为 1 d 的双向六车道随机车流作用下,拉索索力的时程曲线如图 11 和图 12 所示.

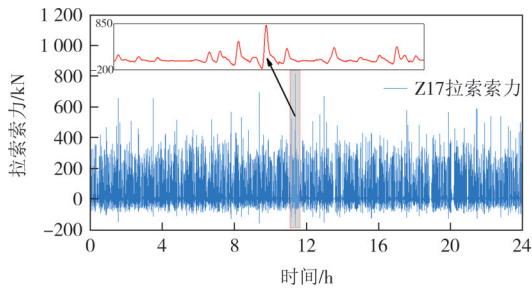


图 11 Z17拉索索力时程曲线

Fig.11 Time-history curve of cable force for Z17

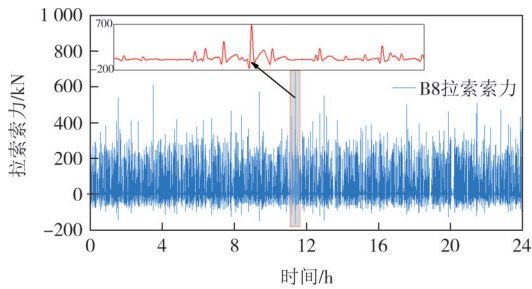


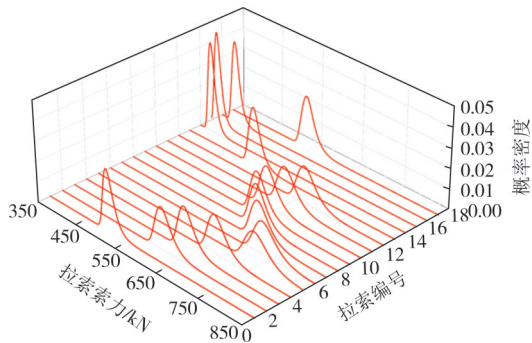
图 12 B8拉索索力时程曲线

Fig.12 Time-history curve of cable force for B8

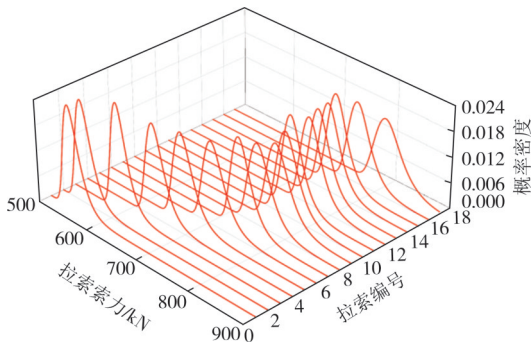
考虑拉索的使用寿命为 100 年,分别建立上、下行方向的各斜拉索车辆荷载效应的概率模型,如图 13、图 14 所示。

3.4 拉索可靠度评估结果

基于考虑评估基准期的车辆荷载效应概率模型



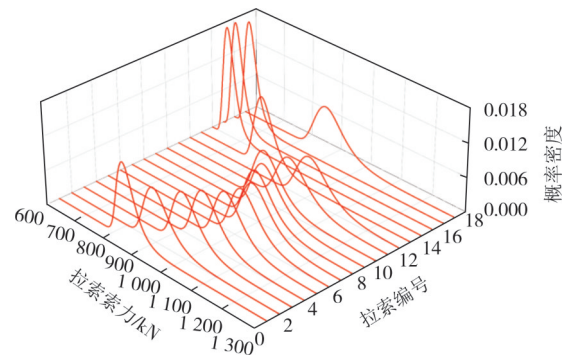
(a)边跨B1~B17索力概率模型



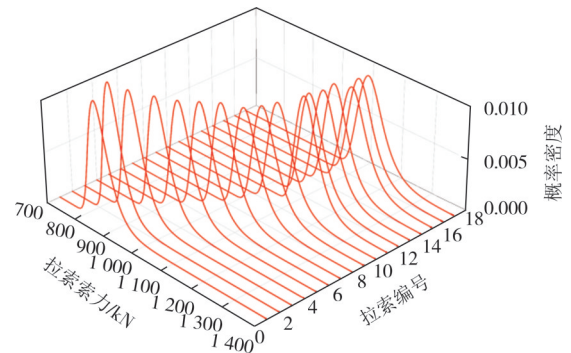
(b)中跨Z1~Z17索力概率模型

图 13 上行侧拉索索力概率模型

Fig.13 Probability model of cable force on upward side



(a)边跨B1~B17索力概率模型



(b)中跨Z1~Z17索力概率模型

图 14 下行侧拉索索力概率模型

Fig.14 Probability model of cable force on downward side

对大桥重载侧拉索展开抗拉可靠度评估及疲劳可靠度评估.根据拉索极限状态函数(7),采用JC法评估拉索可靠度.

$$Z_i = R_i - S_{G_i} - S_{Q_{T_i}} \quad (7)$$

式中: i 为拉索编号; R_i 、 S_{G_i} 、 $S_{Q_{T_i}}$ 分别为第 i 根拉索的抗力、恒载效应、评估基准期 $T=100$ 年对应的车辆荷载效应的概率模型.

根据大量研究认为拉索疲劳寿命符合威布尔分布,利用该分布的均值、标准差及变异系数对其中的特征寿命 c 、形状因子 k 做代换,即可获得疲劳可靠度的计算公式^[14].

考虑到本文应力时程有部分应力循环未回到均值即进入下一个循环,同时存在大量小幅应力循环极大地增加了循环次数,引入应力幅值修正系数 ρ 与应力循环修正系数 ψ ^[15]对疲劳可靠度计算公式进行修正:

$$P(N) = \left\{ - \left[\frac{\rho N}{\psi \mu_N} \Gamma(1 + V_N^{1.08}) \right]^{V_N^{1.08}} \right\} \quad (8)$$

式中: N 为循环次数,根据规范建议取 2×10^6 次; V_N 为拉索疲劳寿命分布函数的变异系数,一般取其均值0.53; $\Gamma(\cdot)$ 为Gamma函数; μ_N 为拉索平均寿命.通过雨流计数法获取应力脉频次表,检验其不拒绝服从 β 分布,再根据线性累积疲劳损伤理论令 $E[D]=1$,推

导得 μ_N 的计算公式如式(9):

$$\mu_N = \frac{C}{k_e S_0^b} \frac{\beta(q, r)}{\beta(b + qr)} \quad (9)$$

式中: q, r 为 β 分布的形状控制参数,由分布的均值方差计算获得。

针对荷载更大的重载侧拉索,分别利用1.5节所得车辆荷载概率模型及规范荷载谱,进行应力时程分析,经过雨流计数法获得应力脉频谱,其中拉索Z17应力频谱如图15所示。

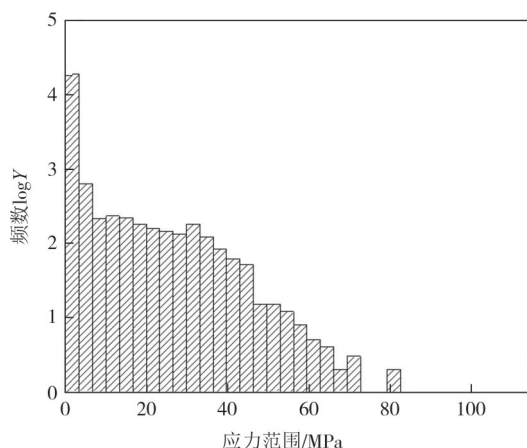


图15 Z17拉索应力频谱图

Fig.15 Stress range spectrum plot of cable Z17

根据式(7)及式(8)算得各拉索对应疲劳可靠度,最终换算得到重载侧拉索疲劳可靠指标,将抗拉强度可靠指标与疲劳可靠指标对比如图16所示,规范荷载谱及基于实测WIM数据外推的概率模型对应可靠度指标结果如图17所示。

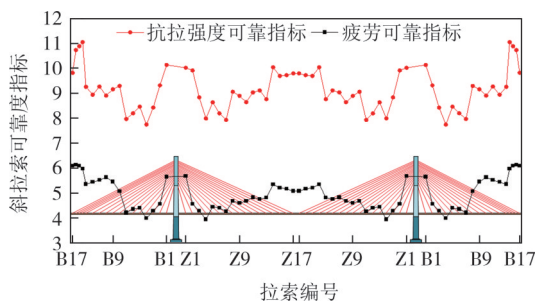


图16 外推法抗拉强度可靠度及疲劳可靠度结果

Fig.16 Result of tensile strength and fatigue reliability by extrapolation method

正如图16的结果所示,100年评估基准期内拉索的抗拉强度可靠度指标在7.74~11.04之间,远高于承载能力极限状态目标可靠指标5.2^[16],但其疲劳可靠指标在3.93~6.12之间,处于较低水平,部分拉索甚至低于4.0,表明拉索存在很高的抗拉强度储

备,但其评估基准期内的疲劳安全性较低.另外从图中的结果可以看出抗拉强度可靠度与疲劳可靠度之间有一定关联,两类可靠度变化趋势相近。

由图17可以看出,大桥各组相同规格的斜拉索,大多呈现拉索越长疲劳可靠度越低的趋势,对于同等截面拉索,索长越长其平均应力水平越高,且应力幅值更大,造成疲劳可靠度降低.大桥整体上各拉索疲劳可靠度还与拉索截面面积有关,总体而言大截面拉索疲劳可靠度越高,疲劳可靠度受索长变化影响越小,这一点在跨中及边跨桥头表现较为明显。

图17的结果还表明,由规范荷载谱计算所得疲劳可靠度指标在4.34~6.18之间,而采用本文提出的外推法所得荷载谱计算得到的拉索疲劳可靠度指标在此基础上都有所降低,其中大部分拉索可靠度降幅超过了0.2,截面较小的拉索降幅更大,显然在面对极端重载及未来交通流增大的情况下依据规范荷载评估部分小截面拉索疲劳可靠度准确度降低严重,而此类拉索面临的疲劳效应增大问题更为严峻。

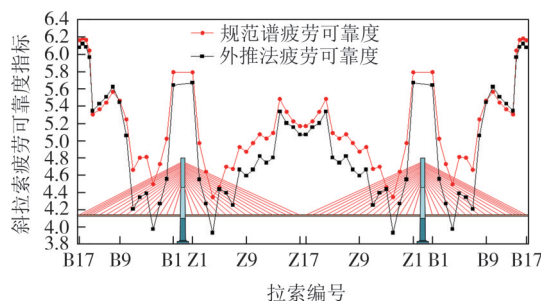


图17 拉索疲劳可靠度评估结果

Fig.17 Result of reliability evaluation of cables

4 结论

本文基于某双向六车道高速公路WIM实测数据,对该路段实际运行的车辆荷载进行了统计分析,提出了车辆荷载效应的计算方法以及考虑评估基准期的车辆荷载效应概率模型的构建方法,并以某斜拉桥为研究对象,建立了随机车流作用下斜拉索索力的概率模型并对拉索的可靠度进行了评估.主要结论如下:

1)车辆荷载具有较强的随机性,本文实测WIM数据中,上、下行方向的车辆荷载特性具有明显的差异,并且车辆超载现象频发,说明需根据实测数据建立新的车辆荷载模型对该斜拉桥的车流特性进行描述。

2)桥梁结构运营时间越长,出现更加极端的车辆荷载的可能性就越大.而车辆荷载效应分析仅仅

能得到一有限时长内的车辆荷载效应,并不能真实反映桥梁在整个服役期内的车辆荷载情况,因此,本文提出了一种基于WIM数据的车辆荷载效应概率建模方法,该方法可以考虑桥梁的评估基准期,更加准确地预测桥梁在服役期内的运营情况,从而做出更加合理、准确的运维决策。

3)本文以某斜拉桥为研究对象,对拉索可靠度进行了评估。结果表明,采用抗拉强度可靠度将高估拉索在服役期内的安全性,同时抗拉强度可靠度与疲劳可靠度具有相近趋势进一步表明进行疲劳可靠度分析之前需要有准确可靠的应力计算结果,说明了效应外推的必要性;外推法疲劳可靠度普遍比采用规范荷载计算的低,进一步说明了本文的车辆荷载效应概率建模方法更能体现当下交通中出现极端重载车辆对拉索造成的影响,同时也体现出了未来交通流增大对拉索造成的额外风险,用来评估拉索服役期内的疲劳可靠度比规范提供的荷载更为准确。

参考文献

- [1] 彭卫兵,沈佳栋,唐翔,等. 近期典型桥梁事故回顾、分析与启示[J]. 中国公路学报, 2019, 32(12): 132-144.
PENG W B, SHEN J D, TANG X, et al. Review, analysis, and insights on recent typical bridge accidents [J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(12): 132-144. (in Chinese)
- [2] 刘均利,张晋豪. 2007年~2015年超载导致桥梁垮塌案例的统计分析[J]. 公路, 2017, 62(4): 79-83.
LIU J L, ZHANG J H. Statistical analysis of bridge collapse caused by overload between year 2007 and 2015 [J]. Highway, 2017, 62(4): 79-83. (in Chinese)
- [3] 王枫,吴华勇,赵荣欣. 国内外近三年桥梁坍塌事故原因与经验教训[J]. 城市道桥与防洪, 2020(7): 73-76.
WANG F, WU H Y, ZHAO R X. Causes and lessons of bridge collapse accidents in past three years at home and abroad [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2020(7): 73-76. (in Chinese)
- [4] 吉伯海,傅中秋. 近年国内桥梁倒塌事故原因分析[J]. 土木工程学报, 2010, 43(增刊1): 495-498.
JI B H, FU Z Q. Analysis of Chinses bridge collapse accident causes in recent years [J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(Sup.1): 495-498. (in Chinese)
- [5] “公路桥梁车辆荷载研究”课题组. 公路桥梁车辆荷载研究[J]. 公路, 1997, 42(3): 8-12.
Research Group on Vehicle Load of Road and Bridges. Research on vehicle load of road and bridges [J]. Highway, 1997, 42(3): 8-12. (in Chinese)
- [6] 贡金鑫,李文杰,赵君黎,等. 公路桥梁车辆荷载概率模型研究(一): 非治超地区[J]. 公路交通科技, 2010, 27(6): 40-45.
GONG J X, LI W J, ZHAO J L, et al. Research on probabilistic model of highway bridge vehicle loads (1): non-controlling area [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27(6): 40-45. (in Chinese)
- [7] 贡金鑫,李文杰,赵君黎,等. 公路桥梁车辆荷载概率模型研究(二): 计重收费地区和强制治超地区[J]. 公路交通科技, 2010, 27(7): 56-60.
GONG J X, LI W J, ZHAO J L, et al. Research on probabilistic model of highway bridge vehicle loads (2): toll-by-weight area and overload controlling area [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27(7): 56-60. (in Chinese)
- [8] 阮欣,周可攀,周军勇. 某八车道高速公路车流特性及荷载效应[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2015, 43(4): 555-561.
RUAN X, ZHOU K P, ZHOU J Y. Vehicle flow characteristics and load effect of a eight-lane highway [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2015, 43(4): 555-561. (in Chinese)
- [9] 阮欣,周军勇,石雪飞,等. 公路桥梁长加载区间的多车道车辆荷载概念模型[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2015, 43(10): 1497-1502.
RUAN X, ZHOU J Y, SHI X F, et al. Conceptual traffic load model for multi-lane highway bridges with long loading length [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2015, 43(10): 1497-1502. (in Chinese)
- [10] 林诗枫,黄侨,任远,等. 基于南京长江三桥的车辆荷载模型[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2016, 46(2): 365-370.
LIN S F, HUANG Q, REN Y, et al. Traffic load model based on the Third Nanjing Yangtze River Bridge [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2016, 46(2): 365-370. (in Chinese)
- [11] 宗周红,陆飞龙,薛程,等. 基于WIM系统的京沪高速公路重车疲劳荷载模型[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2018, 48(5): 878-884.
ZONG Z H, LU F L, XUE C, et al. Fatigue load model of heavy vehicle for Beijing-Shanghai national highway based on WIM system [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2018, 48(5): 878-884. (in Chinese)
- [12] 宗周红,薛程,杨泽刚,等. 基于WIM的江苏省高速公路桥梁汽车荷载模型[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2020, 50(1): 143-152.
ZONG Z H, XUE C, YANG Z G, et al. Vehicle load model for highway bridges in Jiangsu province based on WIM [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2020, 50(1): 143-152. (in Chinese)
- [13] 邓露,王涛,何钰龙,等. 车辆轴限对钢筋混凝土桥梁可靠度和加固费用的影响[J]. 中国公路学报, 2020, 33(5): 92-100.
DENG L, WANG T, HE Y L, et al. Impact of vehicle axle load limit on reliability and strengthening cost of reinforced concrete bridges [J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(5): 92-100. (in Chinese)
- [14] 卢伟,强士中,蒋永林. 斜拉索抖振疲劳可靠度分析[J]. 中国公路学报, 2001, 14(4): 63-66.
LU W, QIANG S Z, JIANG Y L. Buffeting fatigue reliability analysis of cable-stayed bridge [J]. China Journal of Highway and Transport, 2001, 14(4): 63-66. (in Chinese)
- [15] 陈亮. 斜拉索疲劳可靠度分析[D]. 西安: 长安大学, 2007.
CHEN L. Fatigue reliability analysis of cable-stayed bridge [D]. Xi'an: Chang'an University, 2007. (in Chinese)
- [16] 公路工程结构可靠性设计统一标准: JTG 2120—2020[S]. 北京: 中国计划出版社, 2020.
Unified standard for reliability design of highway engineering structures: JTG 2120—2020 [S]. Beijing: China Planning Press, 2020. (in Chinese)