

考虑循环作用特征的公路桥梁荷载谱疲劳分析方法

孙良凤¹, 郑祥隆^{1,2*}, 沈明江¹

(1. 浙江大学建筑设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310027; 2. 浙江大学平衡建筑研究中心, 浙江 杭州 310058)

摘要:为了兼顾疲劳荷载谱的分析精度和实用性, 该文提出了适用于单车加载和车流加载的荷载模型损伤效应比例系数和循环作用特征长度指标, 通过研究典型疲劳车辆疲劳损伤效应一般规律, 构建从单车作用到车流随机作用的疲劳荷载谱损伤分析方法。结果表明: 单辆疲劳车引起的疲劳损伤可以在集中荷载效应基础上进行比例换算, 由影响线绝对面积换算的循环作用特征长度指标对单车疲劳分析有较好的适用性。随机车流引起的疲劳损伤受到桥梁跨径和车流密度的共同影响, 在短跨径桥梁中, 损伤效应对车流密度不敏感, 车流密度的增加甚至会造成一部分结构内力幅的减小; 当跨径超过一定临界值时, 车流密度的影响显著加剧; 由影响线积分面积换算的循环作用特征长度指标更适用于车流疲劳损伤效应分析。荷载谱等效应力幅结合交通流状态谱进行分析, 多车道损伤效应系数指标的构建应考虑车辆相遇概率、循环作用特征长度指标的影响。

关键词: 公路桥梁; 荷载谱; 疲劳荷载模型; 疲劳分析; 循环作用特征长度

中图分类号: U441

文献标志码: A

Fatigue Analysis Method through Load Spectrum Considering Cyclic Characteristics for Highway Bridges

SUN Liangfeng¹, ZHENG Xianglong^{1,2*}, SHEN Mingjiang¹

(1. The Architectural Design & Research Institute of Zhejiang University Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 310027, China;

2. Center for Balance Architecture, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310058, China)

Abstract: To consider the analysis accuracy and practicability of fatigue load spectrums, this paper proposed the proportional coefficient of damage effects and the cyclic characteristic lengths corresponding to single-vehicle loading and multi-vehicle loading. Through the investigation of general fatigue damage effects of typical fatigue vehicles, it constructed a damage analysis method of fatigue load spectrum from single-vehicle loading to multi-vehicle loading for load spectrum. The results show that the fatigue damage caused by a single fatigue vehicle can be scaled based on the concentrated load effects, and the cyclic characteristic length converted from the absolute area of influence lines has good applicability for the fatigue analysis of single-vehicle loading. The fatigue damage caused by random traffic flow is affected by both the bridge span and traffic flow density. In short-span bridges, the damage effect is not sensitive to traffic flow density, and the increase in traffic flow density may even lead to a decrease in the force amplitude in some cases. When the bridge span exceeds a certain critical value, traffic flow density shows a significantly increased influence, and the cyclic characteristic length converted from the integral area of influence lines is more suitable for the effect analysis of fatigue damage of traffic flow. The equivalent stress amplitude of the load spectrum shall be analyzed in combination with the traffic flow state spectrum, and the effects of vehicle encounter probability and cyclic characteristic length shall be considered for the formulation of multi-lane damage effect factors.

Key words: highway bridges; load spectrum; fatigue load model; fatigue analysis; cyclic characteristic length

收稿日期: 2024-06-10(修改稿)

基金资助: 国家自然科学基金青年科学基金资助项目(编号: 52208217)

作者简介: 孙良凤, 女, 高级工程师. E-mail: 110814830@qq.com

*通信作者: 郑祥隆, 男, 博士, 高级工程师. E-mail: zxlzju@zju.edu.cn

0 引言

疲劳设计是保障钢桥长期服役性能安全的关键环节。长期以来,工程界致力于如何减小疲劳车辆荷载随机性以及疲劳细节抗力分散性对疲劳设计带来的不确定性影响。自20世纪中叶起,随着大量钢结构、焊接节点疲劳试验数据的积累^[1-4],具有广泛接受度的疲劳细节分类标准在各国规范中得到普及和应用。但关于疲劳车辆荷载,迄今未提出普遍认可的荷载模型制定方法。中国幅员辽阔,地区交通荷载差异已使得现有统一疲劳荷载模型表现出代表性不足的问题^[5-6];在当前大力推进钢桥工业化进程的背景下,深入开展钢桥疲劳荷载理论编制方法研究,完善当前钢桥疲劳设计标准体系,对提升中国钢桥设计质量具有重要的理论指导和现实意义^[7]。

与桥梁静力分析(只关注最不利情形)不同,疲劳分析追求还原结构真实受荷响应,所制定的荷载模型具有频遇值属性^[8]。荷载谱模型是一类较能反映实际交通状况的疲劳荷载形式,常作为精细化疲劳分析的设计依据^[9]。与此同时,荷载谱也是简化标疲车模型的制定基础,后者是目前广泛采用的荷载形式^[10-13]。在现有标准体系中,荷载谱的编制和运用有两种思路:一种是采用较为详尽的车辆调查数据,疲劳分析时借助随机车流模拟和循环计数法获得应力幅分布,如英国BS-5400规范^[10]规定的标准荷载谱包含了25种车辆类型和8种道路类型,是现有规范中最详细的一类;另一种是对车辆模型及加载方式做简化处理,如欧盟Eurocode规范^[11]中规定的荷载谱FLM4,它只包含5种典型重车和3种不同运输距离的车型比例,应力幅采用单辆车单车道逐次加载、循环计数统计的方式获得。显然,上述两种思路均难以兼顾准确性和实用性。

近30年,大量学者针对中国各地公路桥梁、城市桥梁开展了广泛的荷载谱调查研究^[5-6,14-21],但主要侧重于荷载模型的参数化,对车辆加载方式及其损伤效应规律关注较少。本文从公路桥梁疲劳车辆损伤类型和影响因素入手,提出疲劳荷载损伤效应分析指标,研究单车作用、随机车流作用下的疲劳损伤效应一般规律,构建考虑多车效应的荷载谱疲劳分析方法,为疲劳荷载标准体系的完善提供依据和路线。

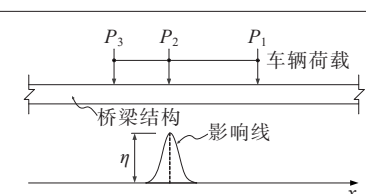
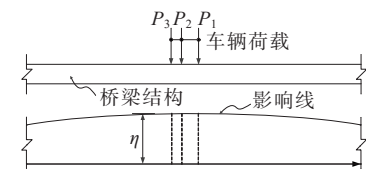
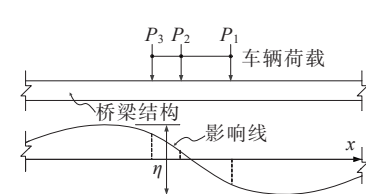
1 单车作用疲劳分析

1.1 单车疲劳损伤类型

车辆过桥产生的循环载荷通常具有较大的随机性,且这种随机性会随着车辆种类、车流密度和影响长度的增加而加剧。单车过桥疲劳损伤效应分析是随机车流损伤效应分析的基础。根据车辆和桥梁结构尺寸的相对比例,将单车疲劳损伤归类为表1所示的3种类型^[22]:①第一类为轴载损伤型,出现在影响线长度远小于轮距尺寸的情形,此时车辆相邻轴载产生的循环载荷不会相互影响,表现为“一轴一循环”的疲劳损伤累积特征;②第二类为车载损伤型,出现在影响线长度远大于车辆尺寸的情形,此时车辆所有轴载可以归并为一个集中荷载;当每次只有一辆车过桥时,表现为“一车一循环”的疲劳损伤累积特征;③第三类为复合损伤型,影响线长度介于前两者之间,车辆多个轴载同时对内力响应和循环次数产生影响,没有明显的单轴或单车循环特征。在实际工程中,复合损伤型是较为普遍的,前两种类型可看作该类型的两个极端情形。

表1 3种单车疲劳损伤类型

Table 1 Three types of single vehicle fatigue damage

损伤类型	车辆加载示意图	描述
轴载损伤型		影响线作用范围远小于车辆尺寸
车载损伤型		影响线作用范围远大于车辆尺寸
复合损伤型		影响线作用范围与车辆尺寸相当

1.2 循环作用特征长度

上述3种单车损伤类型中,轴载损伤型和车载损

伤型均可以直接给出等效应力幅计算公式,但复合损伤型疲劳分析则经历车辆加载、循环计数统计的烦琐过程。为了探究复合损伤型的一般规律,王荣辉等^[15]将实际车辆荷载近似为一种线荷载,推导了线荷载内力幅与集中荷载内力幅的比值公式,发现该公式包含了影响线绝对面积 A_T (影响线函数与长度坐标轴围成的面积和)和影响线幅值 η (影响线纵坐标最大值和最小值之差)的比值项,并将其定义为影响线等效长度 L_λ :

$$L_\lambda = \frac{A_T}{\eta} \quad (1)$$

虽然 L_λ 指标在某种程度上反映了影响线形状对实际车辆荷载损伤效应的影响,但没有体现影响线峰-谷值循环次数的影响。因此,尝试对该指标进行修正,推导过程如下:记车辆等效线荷载 p (其长度假设为跨径)引起的内力幅为 ΔF_R ,该内力幅值近似表示为影响线不同极值所在区间的响应总和(图1):

$$\Delta F_R = p \left| \int_{x_1}^{x_2} f_{\text{inf}}(x) dx \right| + p \left| \int_{x_1}^{x_2} f_{\text{inf}}(x) dx \right|$$
, $f_{\text{inf}}(x)$ 为影响线函数,其中 $A_T = \left| \int_{x_1}^{x_2} f_{\text{inf}}(x) dx \right| + \left| \int_{x_1}^{x_2} f_{\text{inf}}(x) dx \right|$;
 若该辆车简化为集中荷载 Q ,则所产生的等效内力幅为 $\Delta F_Q = \left[n_{\text{eq},\eta} (Q \cdot \eta)^m \right]^{1/m} = n_{\text{eq},\eta}^{1/m} \cdot Q \cdot \eta$,其中 $n_{\text{eq},\eta}$ 为对应于影响线幅值 η 的等效循环次数, m 为S-N曲线斜率。于是, ΔF_R 与 ΔF_Q 之比为:

$$\frac{\Delta F_R}{\Delta F_Q} = \frac{p}{Q} \cdot \frac{A_T}{n_{\text{eq},\eta}^{1/m} \cdot \eta} \quad (2)$$

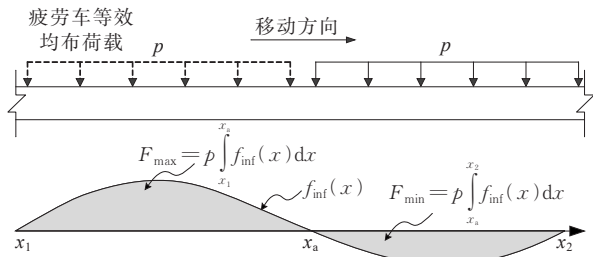


图1 车辆等效均布荷载加载示意图

Figure 1 Equivalent and uniform vehicle loading

从式(2)可以看出: ΔF_R 与 ΔF_Q 之比为两个具有长度量纲的参量(Q/p)和 $A_T/(n_{\text{eq},\eta}^{1/m} \cdot \eta)$ 之比。其中 $A_T/(n_{\text{eq},\eta}^{1/m} \cdot \eta)$ 部分为与荷载无关的量,它只取决于影响线的形状和尺寸,本文将将其定义为影响线循环作

用特征长度 L_{c1} :

$$L_{c1} = \frac{A_T}{n_{\text{eq},\eta}^{1/m} \cdot \eta} \quad (3)$$

相比于等效长度 L_λ , L_{c1} 中包含了循环次数参量 $n_{\text{eq},\eta}$,能更加全面反映影响线形状对车致疲劳损伤的影响。表2给出了几种典型影响线的 L_λ 、 $n_{\text{eq},\eta}$ 以及 L_{c1} 参数值;计算时采用双斜率S-N曲线中偏保守的第一段斜率 $m=3$ 。从表2可以看出:跨中弯矩影响线的各长度指标关系为 $L_{c1} \approx L_\lambda \approx 0.5L$;支座负弯矩影响线的各长度指标关系为 $L_{c1} \approx (1.1 \sim 1.2)L_\lambda \approx L$,其中, L 为跨径。

表2 几种等跨内力影响线特征参数

Table 2 Characteristic parameters of several equal-span internal force influence lines

名称及代号	影响线形状	L_λ	$n_{\text{eq},\eta}$	L_{c1}
单梁跨中弯矩M1		0.500L	1.000	0.500L
两跨连续梁第一跨跨中弯矩M2		0.498L	1.000	0.498L
三跨连续梁第一跨跨中弯矩M3		0.518L	1.000	0.518L
三跨连续梁第二跨跨中弯矩M4		0.584L	1.006	0.583L
两跨连续梁第二支座负弯矩M5		1.299L	2.000	1.031L
三跨连续梁第二支座负弯矩M6		1.057L	1.274	0.975L

注: $n_{\text{eq},\eta} = \sum n_i \eta_i^m / \eta^m$, (η_i, n_i)为采用雨流或泄水法从影响线历程中提取得到的各级响应幅值及循环次数。

1.3 典型车辆损伤效应

本节将通过典型车辆损伤效应分析,对提出的影响线循环作用特征长度 L_{c1} 进行应用,探究单车损伤效应的一般规律。首先,根据Miner损伤准则,给出3种单车损伤类型的等效内力幅(对应于单次循环)计算公式:

轴载损伤型:

$$\Delta F_{AD} = \left[\sum n_{eq,\gamma} (P_i \cdot \eta)^m \right]^{1/m} \quad (4)$$

车载损伤型:

$$\Delta F_{VD} = \left[n_{eq,\gamma} \left(\sum P_i \cdot \eta \right)^m \right]^{1/m} \quad (5)$$

复合损伤型:

$$\Delta F_{CD} = \left(\sum n_i \Delta F_i^m \right)^{1/m} \quad (6)$$

式中: P_i 为车辆各轴轴重; ΔF_i 为车辆引起的结构第 i 级内力幅; n_i 为对应的循环次数。

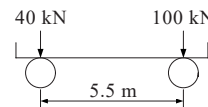
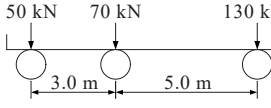
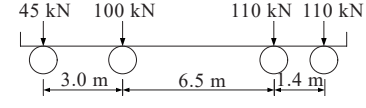
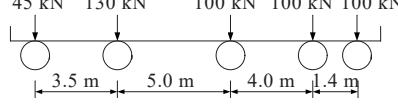
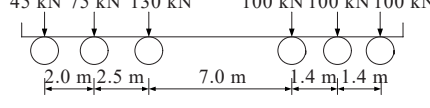
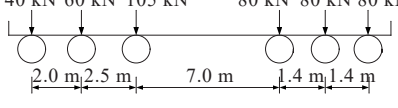
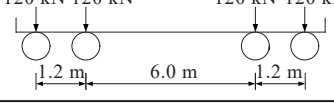
从上述公式可以看出: 车载损伤型等效内力幅 ΔF_{VD} 可以视为一种集中加载效应 ΔF_Q , 且理论上大于轴载损伤型等效内力幅 ΔF_{AD} 。考虑到复合损伤型为单车损伤的一般形式, 因此定义一种反映单车疲劳损伤效应的比例系数——车辆损伤集中系数 ω_v :

$$\omega_v = \frac{\Delta F_{CD}}{\Delta F_{VD}} \quad (7)$$

如表3所示, 选用7种典型疲劳车辆模型开展算例分析: 其中HV1~HV5为“公路桥梁疲劳设计荷载标准研究”课题组调查获得的中国辽宁省公路疲劳荷载谱车辆模型^[17]; FLM-II为《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64—2015)^[13]中规定的用于结构整体验算的标准疲劳车模型, 该模型主要由HV1~HV5简化而来^[18]; FLM-III为《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64—2015)^[13]中规定的用于桥面系局部验算的标准疲劳车模型, 同时也是Eurocode规范^[11]中用于结构整体验算的荷载模型 (FLM3)。为了获得复合损伤型等效内力幅 ΔF_{CD} , 本次计算编写了车辆移动加载程序和基于泄水法的循环载荷计数程序。计算时, 将影响线参数和车辆参数载入移动加载程序, 获得时程响应后, 进一步载入循环载荷提取程序得到车辆过桥的各级内力幅 ΔF_i 。计算工况包括表2中的6类影响线和7种跨径, 跨径具体取值为10 m、20 m、30 m、40 m、60 m、90 m和120 m。

表3 几种典型疲劳车模型

Table 3 Several typical fatigue vehicle models

模型编号	模型轴距及轴重参数	$\omega_{v,min}$	k	x_0/m	$N_{ax,eq}$
HV1		0.729	-2.483	4.163	1.40
HV2		0.555	-2.408	0.412	1.92
HV3		0.426	-2.383	-0.848	3.32
HV4		0.367	-2.375	-1.248	3.65
HV5		0.325	-2.370	-1.489	4.23
FLM-II		0.323	-2.370	-1.499	4.24
FLM-III		0.397	-2.379	-1.055	4.00

注: k, x_0 为拟合参数; $N_{ax,eq}$ 为车辆等效轴数。

图2给出了各车辆模型损伤集中系数 ω_v 与4种影响线长度指标的相关性。从图2可以看出:车辆模型的 ω_v 随各类长度指标的增大而增大,当长度超过一定范围时, ω_v 趋于稳定;相比于跨径 L 和总长 L_z , L_λ 和 L_{c1} 与 ω_v 的关联性相对更好。采用反比例函数对各图数据进行拟合,可得4种长度指标

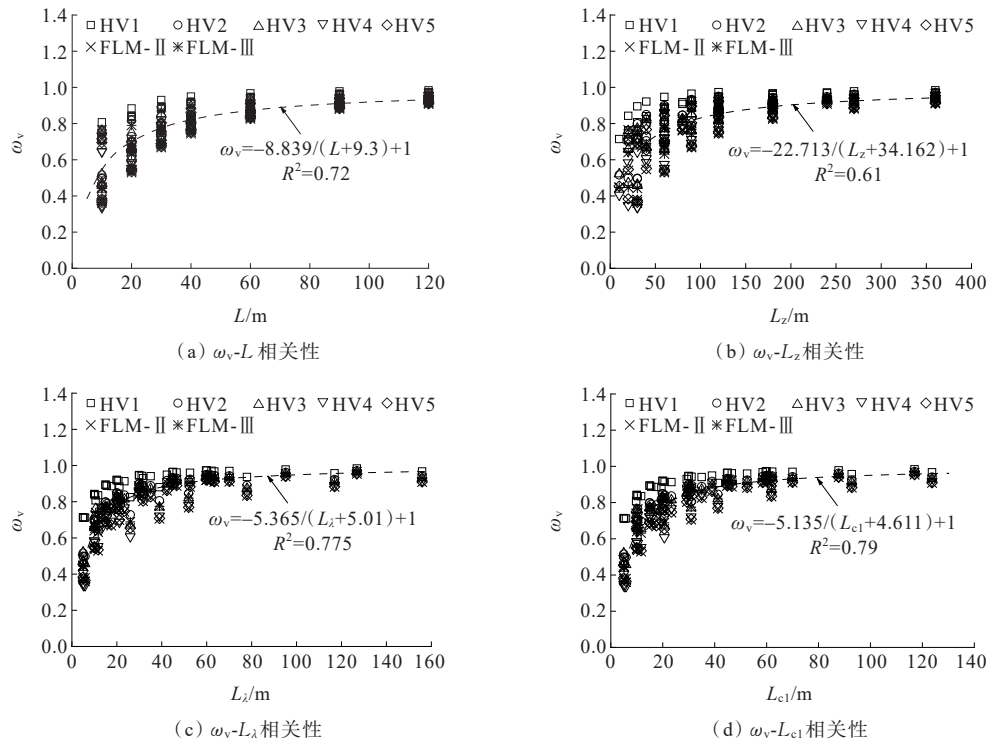


图2 车辆损伤集中系数与各影响线长度指标的相关性

Figure 2 Correlation between vehicle damage concentration factor and length index of each influence line

图3(a)、(b)给出了HV1和FLM-II模型的损伤集中系数 ω_v 关于 L_{c1} 的分布。从图3可以看出:两车的 ω_v 值基本落入以 $\omega_{v,max}=1$ 为上界、以 $\omega_{v,min}=\Delta F_{AD}/\Delta F_{CD}$ 为下界围成的区间;HV1中出现了少量数据略小于 $\omega_{v,min}$ 的现象,主要受到最小移动加载步长的影响,通过缩小移动加载步能够使这些数据逐渐靠近 $\omega_{v,min}$ 。为了对各车型 ω_v - L_{c1} 关系进行拟合,利用反比例函数的渐进性,假定拟合曲线符合式(8)形式,且经过 $L_{c1}=5$ m、 $\omega_v=\omega_{v,min}$ 和 $L_{c1}=120$ m、 $\omega_v=0.98$ 两点,由此得到关于式(8)中待定参数 k 和 x_0 的一般表达式[式(9)和(10)];图3(c)给出了各车型的拟合结果,可以看出:模型车辆轴数越少, $\omega_{v,min}$ 值越大;当车辆轴数超过3个时, ω_v 拟合结果十分接近;图3(d)显示了各车型 $\omega_{v,min}$ 与车辆等效轴数 $N_{ax,eq}=\sum P_i/\max(P_i)$ 的相关性,两者基本符合线性关系。

中, ω_v 与循环作用特征长度 L_{c1} 的相关度(R^2)是最高的;相对于等效长度 L_λ , L_{c1} 优化了M5负弯矩影响线的计算结果,使 ω_v 关于长度指标的离散性减小。虽然 L_{c1} 不能完全消除车辆模型差异带来的 ω_v 离散性,但整体表现出了对单辆疲劳车损伤分析的适用性。

各车型 $\omega_{v,min}$ 、 k 、 x_0 和 $N_{ax,eq}$ 的数值详见表3。实际应用中,式(8)具有普遍适用性;如不便进行车辆加载-循环计数统计时,可采用式(7)~(11)进行车辆等效内力幅的估算。

$$\omega_v = \frac{k}{(L_{c1} + x_0)} + 1 \quad (8)$$

$$k = -2.3 \times \frac{1 - \omega_{v,min}}{0.98 - \omega_{v,min}} \quad (9)$$

$$x_0 = \frac{5\omega_{v,min} - 2.6}{0.98 - \omega_{v,min}} \quad (10)$$

2 随机车流作用疲劳分析

由于多种影响因素的存在,建立精确的车流损伤效应预测方法是较为困难的。3种单车损伤类型中,理论上只有轴载损伤型不受车流相互干扰的影响,车载损伤型和复合损伤型均面临多车或者多轴

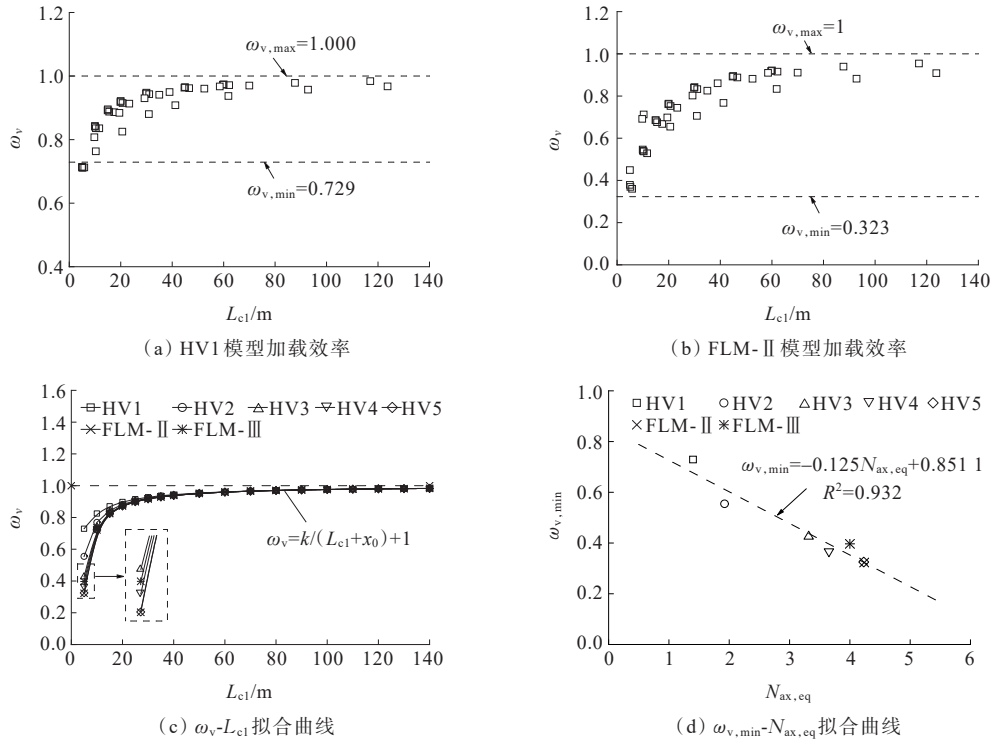


图3 荷载模型加载效率计算结果及拟合方程

Figure 3 Results and fitting equations of loading efficiency of load models

共同作用的情况。因此,随机车流损伤效应分析也需要借鉴疲劳损伤相对加载效率的分析方法。

2.1 随机车流模拟工况和方法

车流疲劳损伤效应的影响因素包括荷载谱车型比例、车流间距、影响线参数、车道数等。本节重点讨论单车道工况下车流间距和影响线循环特征长度的影响。其中车流间距采用文献[23]提出的对数正态分布概率模型 $\ln N(\mu, \sigma^2)$:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma x} \exp\left[-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (11)$$

式中: x 为前车后轴至后车前轴之间的距离(图4); μ 为随机变量 x 的对数均值; σ 为随机变量 x 的对数标准差。

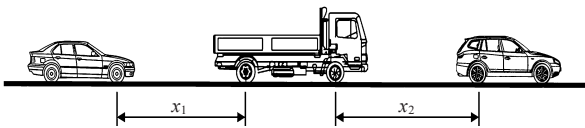


图4 车流间距示意图

Figure 4 Traffic flow spacing distance

车辆间距概率分布的参数取值与车流运行状态有关。实测统计时,通常将车流运行状态分为一般运行状态(自由流)和密集运行状态(跟驰流)两种。

表4为根据中国典型公路查得到两种车流运行状态车辆间距 μ 和 σ 估计值。

表4 两种车流间距概率分布参数^[23]

Table 4 Probability distribution parameters of two kinds of traffic flow spacing distance^[23]

车流运行状态	μ	σ
一般运行状态	4.828	1.116
密集运行状态	1.561	0.280

随机车流模拟及内力幅计算流程包括车型和车辆间距抽样生成车流载荷时空分布序列、车流荷载加载获得内力时程响应以及运用泄水法提取内力幅频谱等步骤。算例分析计算采用表3中HV1~HV5车型的辽宁省公路典型疲劳荷载谱,各重车出现相对频率分别为26.9%、7.9%、13.2%、19.3%和32.5%。由于实际车流中绝大部分为非重车车型,参照Eurocode规范制定标准^[8],重车混入率采用25%;非重车车型轴距统一采用2.6 m;当随机车型抽样得到非重车车型时,只计入其轴距对于车流长度的影响,忽略其重量。对于循环载荷的统计,以车辆过桥时没有发生应力响应干扰的一列车队(包括单辆车)为最小统计单元;每个车队的循环载

荷用一个等效内力幅表征。影响线参数选用表 2 中的 M1~M6,跨径范围为 10~120 m。

2.2 随机车流内力幅分布

以 M2 和 M5 为例,给出两种跨径下密集运行状态和一般运行状态下的内力幅相对频率分布(图 5);作为比较,同时给出了荷载谱单车等效内力幅频谱。由图 5 中可见:一般运行状态的内力幅分布和单车频谱重合度高,车辆运行较为独立,所引起的应

力响应相互干扰较少。密集运行状态的内力幅分布范围较大,与单车频谱的相关性小。随着跨径的增大,密集运行状态的内力幅分布整体右移、集中度减小,与单车频谱的重合区域减小。造成这一现象的原因为:一方面与车辆间距较密、应力响应干扰程度较大有关;另一方面与同一车队车辆内力幅合并有关,跨径的增大加剧了车辆间的干扰以及内力幅的合并。

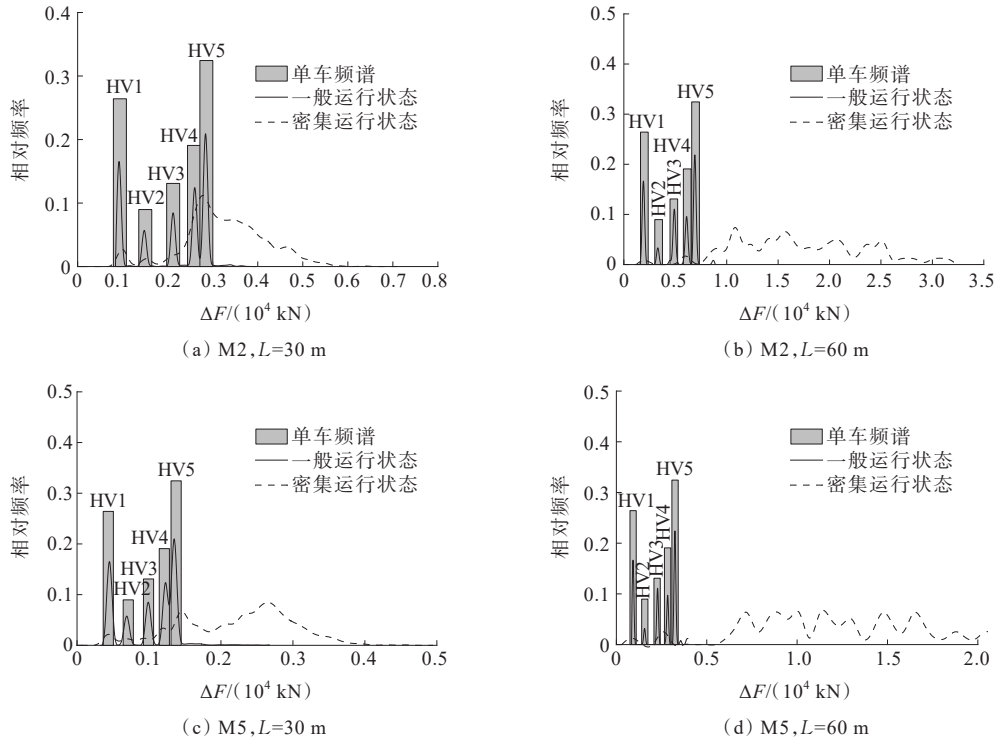


图 5 随机车流循环载荷分布

Figure 5 Cyclic load distribution of random traffic flow

2.3 随机车流疲劳损伤效应

为了表征随机车流疲劳损伤效应,定义一种单车道随机车流损伤效应系数 ω_f ,其值为车流等效内力幅与荷载谱内力幅频谱值等效内力幅的比值:

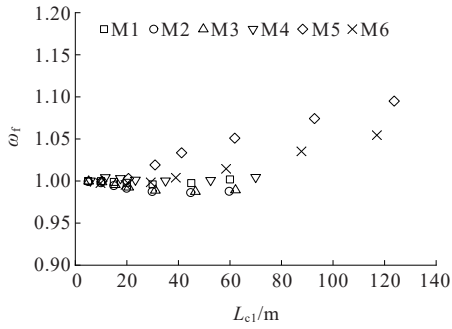
$$\omega_f = \left(\frac{\sum f_{i,i} \Delta F_{f,i}^m}{\sum f_{eq,j} \Delta F_{eqv,j}^m} \right)^{1/m} \quad (12)$$

式中: $\Delta F_{f,i}$ 为车流引起的结构第 i 级内力幅, $f_{i,i}$ 为对应的相对频率; $\Delta F_{eqv,j}$ 为第 j 种重车引起的结构等效内力幅,由复合损伤型公式(6)计算; $f_{eq,j}$ 为第 j 种重车的相对频率。

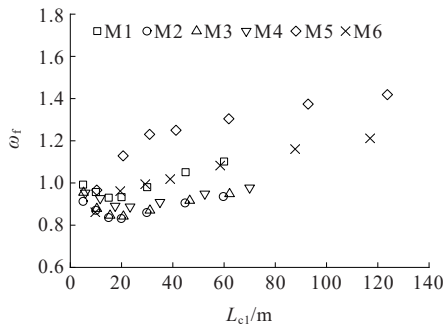
图 6 给出了单车道随机车流损伤效应系数 ω_f 随循环作用特征长度 L_{c1} 的变化规律。其中,一般运行状态的 ω_f 总体位于 1.0~1.1,多车效应并不显著;密

集运行状态的损伤效应系数 ω_f 在 0~40 m 区域总体位于 1 以下,当 $L_{c1} > 40$ m 时, ω_f 值明显高于一般运行状态,多车效应显著;但密集运行状态下 ω_f - L_{c1} 关系存在较大离散性,尤其当 L_{c1} 指标较大时,与随机车流疲劳损伤效应的关联性较差。

与单车过桥行为不同,随机车流作用下,多车效应在更大长度范围对结构内力响应产生影响,如图 7 所示。当桥上多辆重车位于影响线同号位置时,会加剧结构内力响应;而当多辆重车位于影响线异号位置时,会抵消一部分内力响应;这种长距离连续荷载叠加作用更适简化为车流线荷载和影响线积分面积 A_s 的乘积; ω_f 采用的参照载荷是车辆荷载效应频谱值,本身与 L_{c1} 指标所体现的集中荷载效应存在差异,需要一种修正的影响线参量进行表达。综上



(a) 一般运行状态



(b) 密集运行状态

图6 ω_f-L_{c1} 关系
Figure 6 ω_f vs. L_{c1}

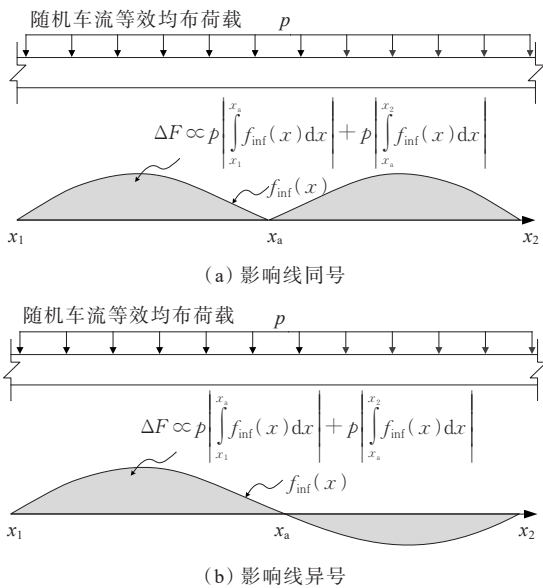


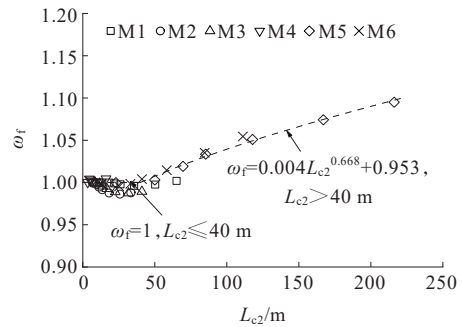
图7 车流作用对结构内响应的影响示意图
Figure 7 Effect of traffic flow on structural internal response

分析,提出一种针对随机车流作用的影响线循环作用特征长度指标 L_{c2} :

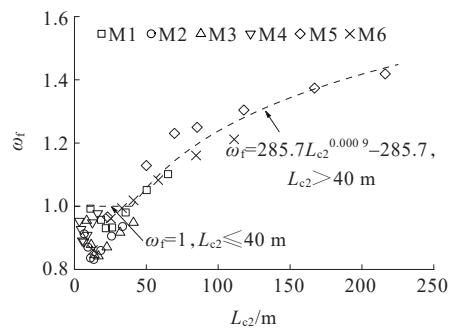
$$L_{c2} = \frac{n_{eq,\eta}^{1/m} A_s}{\omega_v \cdot \eta} \quad (13)$$

式中:车辆损伤集中系数 ω_v 对应于车流加权平均标准疲劳车,本次算例为FLM-II。

图8给出了车流损伤效应系数 ω_f 关于 L_{c2} 指标的数据点分布。相比于 L_{c1} 指标(图6), L_{c2} 指标与 ω_f 的相关性更好。在 L_{c2} 指标下, ω_f-L_{c2} 关系可以近似由两段直线体现;第一段直线对应于 $0 < L_{c2} \leq 40$ m, ω_f 主要集中在 $0.8 \sim 1.0$, 变化趋势不明显,近似表示为 $\omega_f = 1$ 的水平线段;第二段直线对应于 $L_{c2} \geq 40$ m 范围, ω_f 随 L_{c2} 的增加呈非线性递增,采用幂函数形式进行拟合。综上可知:本文通过理论分析指标的构建和大量数值模拟的验证,基本实现了从车辆疲劳损伤分析到车流疲劳损伤分析技术路线。其中, L_{c1} 为第一类循环作用特征长度(适用于单车作用疲劳分析), L_{c2} 为第二类循环作用特征长度(适用于车流作用疲劳分析)。这两类循环作用特征长度指标对荷载谱疲劳损伤的估算起着关键作用。



(a) 一般运行状态



(b) 密集运行状态

图8 ω_f-L_{c2} 关系及拟合结果

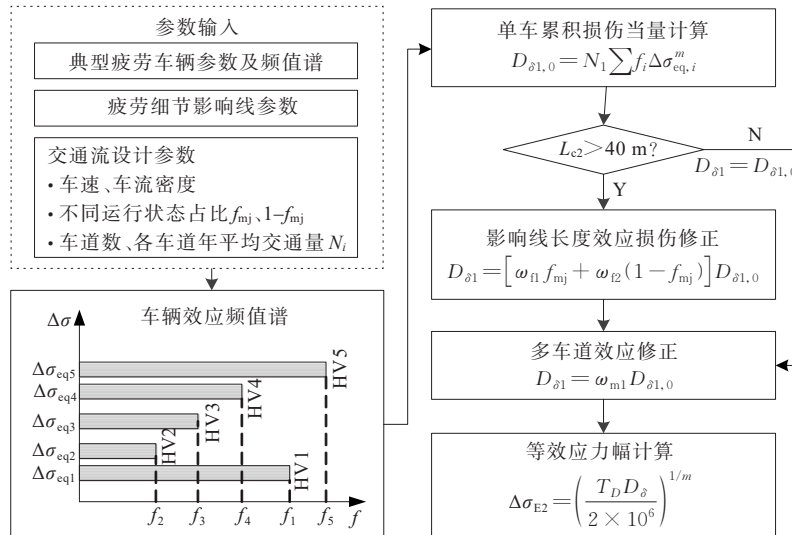
Figure 8 ω_f vs. L_{c2} relation and fitting results

3 载荷谱等效应力幅计算方法

通过对疲劳荷载谱在各类工况中的损伤效应分析表明,虽然不同车辆模型、桥梁跨径、影响线形状会导致不同的疲劳分析结果,但它们在影响线作用特征长度指标下表现出了一定的趋势性规律。这种趋势规律对于完善疲劳荷载模型制定方法,提高模型分析精度有较大的理论指导意义。对于标准疲劳

车模型,可以运用车辆损伤集中系数 ω_v 计算包含所有级别循环载荷的等效内力幅,将其作为参照载荷能更加真实反映车辆实际损伤效应;对于荷载谱模型,采用随机车流损伤效应系数 ω_l 修正各模型单独作用产生的内力幅频谱值,将有效提高大跨径桥梁的疲劳分析精度。根据本文分析结果,提出如图9所示的荷载谱等效内力幅计算流程。在该流程中,等

效内力幅的计算需要经历车辆内力幅频谱值计算、单车道车流效应修正、多车道效应修正等步骤。在制定疲劳设计荷载标准时,可以根据普遍的交通调查结果,拟定一系列适用于不同道路等级的交通设计参数,包括通行能力曲线、交通运行状态分布、车道年平均交通量、重车混入率等,通过大量数值计算制定适用于不同交通状况的随机车流损伤效应系数 ω_l 。



注: f_i 为第*i*种重车占有所有重车的比重,可以理解为相对频率; f_{mj} 为密集运行状态的交通量占比, $1-f_{mj}$ 则对应稀疏状态; $\Delta \sigma_{eq,i}$ 为第*i*种重车的等效应力幅, $\Delta \sigma_{eq,i}^m$ 为 $\Delta \sigma_{eq,i}$ 的*m*次方,*m*在公式(2)中出现过,指的是S-N曲线斜率; $\Delta \sigma_{E2}$ 为对应于200万次循环的等效应力幅。

图9 荷载谱等效内力幅计算流程

Figure 9 Calculation process of equivalent force range of load spectrum

多车道效应是影响荷载谱编制结果的重要因素。除了桥面系等与车轮直接作用的位置,其他部位疲劳细节内力响应一般来自不同车道的叠加作用。参考随机车流损伤效应系数 ω_l 的定义,可以将所有车道总损伤与单个参照车道损伤的比值 ω_{m1} 作为多车道效应系数的衡量指标,其在含义上与标准车设计方法中的多车道效应系数 λ_4 类似^[13,24]。目前公路桥规中的 λ_4 采用的是独立损伤累积法,各车道之间不考虑相互作用影响。研究表明^[25]:独立损伤累积法只适用于较短的跨径范围,随着跨径的增大,多车道叠加效应会使疲劳损伤产生的实际值高于各车道的独立损伤累积结果,且双向车道叠加作用更为明显;为此,提出了考虑相遇概率的两车道效应损伤等效系数 λ_4 计算公式:

$$\lambda_4 = \left[(1-c) + \left(\frac{N_2}{N_1} - c \right) \cdot \left(\frac{\eta_2 Q_{m2}}{\eta_1 Q_{m1}} \right)^m + c \cdot \left(1 + \frac{\eta_2 Q_{m2}}{\eta_1 Q_{m1}} \right)^m \right]^{1/m} \quad (14)$$

式中: c 为两个慢车道重车相遇概率; Q_{m1} 和 Q_{m2} 分别为车道1和车道2的损伤加权平均车重; η_1 和 η_2 分别为车道1和车道2的影响线幅值; N_1 和 N_2 分别为车道1和车道2的年平均重车交通量。

事实上,车辆相遇概率的概念最初始于多线列车铁路桥梁,由于铁路列车长度较长,通常将列车在桥上的相遇事件看成是完全相遇,式(15)与2线列车损伤等效系数计算公式类似。对于公路桥梁,车辆的相遇一般为不完全相遇,即产生部分叠加效应,式(15)只有在影响线循环作用特征长度较长的情况下才是适用的。因此,引入一个与循环作用特征长度相关的渐进函数 $f(L_{c2})$ 对多车道效应进行修正,并参考多线列车损伤等效系数的定义对式(15)进行推广^[26],提出荷载谱多车道损伤效应系数 ω_{m1} 计算公式:

$$\omega_{m1} = \left[\sum \left(\frac{N_{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n}}{N_1 \eta_1 Q_{m1}} \left(\sum_{i=1}^{n_i} \alpha_i \eta_i Q_{mi} \right)^m \right) \right]^{1/m} f(L_{c2}) \quad (15)$$

式中: n_i 为车道数; α_i 为第*i*车道组合因数,有1和0两种取值,1代表第*i*车道重车参与内力叠加,0代表不参与; $N_{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n}$ 代表各车道组合因子为 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ 时的年平均事件个数; η_i 为第*i*车道影响线幅值; Q_{mi} 为第*i*车道损伤加权平均车重。

4 结论

本文通过分析典型疲劳荷载谱的损伤效应,提出了适用于单车作用、随机车流作用疲劳总损伤分析的循环作用特征长度指标,构建了考虑随机车流效应、多车道效应的等效应力幅计算方法。主要结论如下:

(1) 单辆疲劳车引起的循环载荷可分为轴载损伤型、车载损伤型和复合损伤型3种类型;其中轴载损伤型产生的疲劳损伤最小,复合损伤型次之,车载损伤型最不利。随着跨径的增大,单车疲劳损伤效应逐渐增大。基于影响线绝对面积换算的循环作用特征长度指标对单车疲劳的分析有较好的适用性。

(2) 在随机车流工况下,单车道随机车流损伤效应系数 ω_i (车流等效内力幅与荷载谱内力幅频谱值等效内力幅的比值)随着车流密度的增加而增加;一般运行状态的内力幅分布更接近于荷载谱内力幅频谱值分布。

(3) 当跨径较短时,由于最小车距的限值以及一部分反向响应的叠加, ω_i 随跨径增大变化不明显,甚至出现减小的情况;基于影响线积分面积换算的循环作用特征长度指标更适用于车流疲劳损伤效应分析。

(4) 多车道效应系数 ω_m 的标定公式应考虑循环作用特征长度和车辆相遇概率的影响,关于该公式的参数校准以及适用性分析有待进一步研究。

参考文献:

References:

- [1] WILSON W M, MUNSE W H, SNYDER I S. Fatigue strength of various types of butt welds connecting steel plates[R]. University of Illinois at Urbana Champaign, College of Engineering. Engineering Experiment Station, 1950.
- [2] BRÜHWILER E, SMITH I F C, HIRT M A. Fatigue and fracture of riveted bridge members[J]. Journal of Structural Engineering, 1990, 116(1): 198-214.
- [3] FISHER J W. Resistance of welded details under variable amplitude long-life fatigue loading[Z]. Transportation Research Board, 1993.
- [4] HOBACHER A F. Recommendations for fatigue design of welded joints and components[M]. Cham: Springer International Publishing, 2016.
- [5] 翟慕赛, 王春生, 崔冰, 等. 基于WIM的钢桥面板疲劳荷载模型研究[J]. 桥梁建设, 2017, 47(2): 31-36.
ZHAI Musai, WANG Chunsheng, CUI Bing, et al. Study of fatigue load models for steel bridge decks based on WIM [J]. Bridge Construction, 2017, 47(2): 31-36.
- [6] 陈斌. 基于WIM的疲劳荷载模型和钢桥疲劳性能评估方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
CHEN Bin. Research on fatigue load model and fatigue performance evaluation method of steel bridge based on WIM data[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
- [7] 许红胜, 王智鸿, 颜东煌. 拉索钢丝双裂纹疲劳寿命试验研究[J]. 中外公路, 2023, 43(6): 127-132.
XU Hongsheng, WANG Zhihong, YAN Donghuang. Experimental study on double cracks fatigue life of cable steel wire[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(6): 127-132.
- [8] SEDLACEK G, MERZENICH G, PASCHEN M, et al. Background document to EN 1991: Part 2 - traffic loads for road bridges and consequences for the design[R]. JRC Scientific Technical Rep, 2008.
- [9] 郝苏. 国际现行钢结构公、铁路桥梁疲劳设计规范综述[J]. 世界桥梁, 2012, 40(6): 29-37.
HAO Su. An overview of current international fatigue design codes for steel highway and railway bridges[J]. World Bridges, 2012, 40(6): 29-37.
- [10] Steel, Concrete and Composite Bridges. Code of practice for fatigue (British Standard): BS 5400-10: 1980[S]. British Standards Institution, 1980.
- [11] European Committee for Standardization. EN 1991-2, Eurocode 1: Actions on structures - Part 2: Traffic loads on bridges[S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2002.
- [12] American Association of State Highway and Transportation Officials AASHTO LRFD bridge design specifications[S]. Washington, D C : American Association of State Highway and Transportation Officials, 2007.
- [13] 中交公路规划设计院有限公司. 公路钢结构桥梁设计规范: JTGD64—2015[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.

- CCCC Highway Consultants Co., Ltd.. Specifications for design of highway steel bridge: JTG D64—2015[S]. Beijing:China Communications Press Co.,Ltd.,2015.
- [14] 童乐为,沈祖炎,陈忠延.城市道路桥梁的疲劳荷载谱[J].土木工程学报,1997,30(5):20-27.
TONG Lewei, SHEN Zuyan, CHEN Zhongyan. Fatigue load spectrum for urban road bridges[J]. China Civil Engineering Journal,1997,30(5):20-27.
- [15] 王荣辉,池春,陈庆中,等.广州市高架桥疲劳荷载车辆模型研究[J].华南理工大学学报(自然科学版),2004,32(12):94-96.
WANG Ronghui, CHI Chun, CHEN Qingzhong, et al. Study on the model of the fatigue-loaded vehicles in Guangzhou trestle bridges[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science),2004,32(12):94-96.
- [16] 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):79-85.
ZHOU Yongtao, BAO Weigang, ZHAI Hui, et al. Study of standard fatigue design load for steel highway bridges[J]. China Civil Engineering Journal,2010,43(11):79-85.
- [17] 杨东晓,黄海云,张俊平,等.基于WIM实测数据的标准疲劳车模型研究[J].中外公路,2017,37(1):292-296.
YANG Dongxiao, HUANG Haiyun, ZHANG Junping, et al. Research on standard fatigue vehicle model based on WIM measured data[J]. Journal of China & Foreign Highway,2017,37(1):292-296.
- [18] 邓扬,颜巍,刘扬,等.基于WIM数据的公路桥梁车辆疲劳荷载模型研究[J].中外公路,2018,38(1):164-171.
DENG Yang, YAN Wei, LIU Yang, et al. Study on fatigue load model of highway bridge based on WIM data[J]. Journal of China & Foreign Highway,2018,38(1):164-171.
- [19] 王奇锐,徐亮,石晋涛,等.基于随机车流的等效疲劳车荷载研究[J].公路,2020,65(12):41-46.
WANG Qirui, XU Liang, SHI Jintao, et al. Study of equivalent fatigue vehicle load based on random traffic flow[J]. Highway,2020,65(12):41-46.
- [20] 陈振宇,谢波,鲁乃唯.基于深度置信网络的缆索桥梁结构体系可靠度分析方法[J/OL].中外公路,2024:1-9.(2024-01-25). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1363.U.20240124.1822.006.html>.
CHEN Zhenyu, XIE Bo, LU Naiwei. System reliability evaluation method for cable-supported bridges based on deep belief networks[J/OL]. Journal of China & Foreign Highway,2024:1-9.(2024-01-25).<https://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1363.U.20240124.1822.006.html>.
- [21] 马帅,杨力.轮载模型对钢桥疲劳损伤评估的影响分析[J].中外公路,2022,42(4):126-131.
MA Shuai, YANG Li. Influence analysis of wheel load model on fatigue damage assessment of steel bridges[J]. Journal of China & Foreign Highway,2022,42(4):126-131.
- [22] MADDAH N, NUSSBAUMER A. Analytical approach for improving damage equivalence factors[J]. Engineering Structures,2014,59:838-847.
- [23] 李扬海,鲍卫刚,郭修武,等.公路桥梁结构可靠度与概率极限状态设计[M].北京:人民交通出版社,1997.
LI Yanghai, BAO Weigang, GUO Xiuwu, et al. Reliability and probabilistic limit state design of highway bridge structures [M]. Beijing:China Communications Press,1997.
- [24] European Committee for Standardization. EN 1993-2. Eurocode 3-design of steel structures-part 2:Steel Bridges [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2006.
- [25] MADDAH N, NUSSBAUMER A. Evaluation of Eurocode damage equivalent factor based on traffic simulation[C]// Proc. of the 6th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management.2012 (CONF):3456-3463.
- [26] 朱宏光.三线铁路桥梁疲劳检算的三线系数[J].中国铁道科学,2005,26(6):80-83.
ZHU Hongguang. Research on the trilinear coefficients in fatigue check computation of triline railway bridges[J]. China Railway Science,2005,26(6):80-83.