

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2014.05.010

随机实测车辆荷载下大跨径斜拉桥钢箱梁的动力响应特征

杨沐野¹, 吉伯海¹, 傅中秋¹, 徐汉江², 陈 策^{1,3}

(1. 河海大学土木与交通学院, 江苏 南京 210098; 2. 苏州市航道管理处, 江苏 苏州 215000;
3. 泰州大桥有限公司, 江苏 泰州 225321)

摘要: 依据南京长江第三大桥的实测交通流统计数据, 结合等效疲劳损伤原理建立随机状态下的车辆荷载谱, 基于有限元数值仿真程序进行全桥动力响应分析。通过计算大桥在实测车流作用下主梁不同位置位移和内力的动力响应时程曲线, 分析车辆运营时程内主梁截面内力变化及动力放大系数。结果表明: 随机车流作用下大桥主梁塔根处弯矩及轴力绝对值最大, 跨中处弯矩及轴力变化幅值最大, 而在1/4跨位移动力响应最大。跨中、1/4跨和塔根附近截面在时程内的最大应力幅值处, 动力放大系数在1.00~1.03之间, 动力放大系数比单考虑弯矩或轴力时稳定, 且动应力放大系数与国内现行规范的动力放大系数较为吻合。

关键词: 钢箱梁; 实测车流; 车辆荷载谱; 振动响应; 动力放大系数; 南京长江第三大桥

中图分类号: U448.27; U441+.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2014)05-0427-06

Dynamic response characteristics of steel box girder under randomly measured vehicle loads in long-span cable-stayed bridge

YANG Muye¹, JI Bohai¹, FU Zhongqiu¹, XU Hanjiang², CHEN Ce^{1,3}

(1. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Suzhou Waterways Management Division, Suzhou 215000, China;
3. Taizhou Bridge Co., Ltd., Taizhou 225321, China)

Abstract: According to measured traffic flow statistics from the Nanjing Third Yangtze River Bridge, in Jiangsu Province, a vehicle load spectrum in a random state was developed based on the theory of fatigue damage equivalence, and a full-bridge dynamic response analysis was conducted using finite element numerical simulation. Through calculation of the displacements and vibration response time-history curves of internal forces in different sections of the main beam of the bridge under the influence of measured vehicle flow, the changes of internal forces and dynamic magnification factors were analyzed. The results show that, under the influence of random traffic, the absolute values of the bending moment and axial force were at their maximum at the bottom of the tower of the main beam. The mid-span bending moment and axial force changed most significantly. At one quarter of the span, the displacement vibration was most intense. The dynamic magnification factor ranged from 1.00 to 1.03 at the maximum stress amplitude at mid-span, one quarter of the span, and near the tower bottom. The dynamic magnification factor was more stable than in the case considering only the bending moment or the axial force, and was consistent with that of the current specifications in China.

Key words: steel box girder; measured vehicle flow; vehicle load spectrum; vibration response; dynamic magnification factor; Nanjing Third Yangtze River Bridge

收稿日期: 2013-09-25

基金项目: 国家自然科学基金(51278166); 高等学校博士学科点专项科研基金(20120094110009)

作者简介: 杨沐野(1989—), 女, 江苏常州人, 博士研究生, 主要从事钢桥疲劳研究。E-mail: ymy410@163.com

通信作者: 吉伯海, 教授。E-mail: hbbhj@163.com

钢箱梁因具有自重小、制作及施工便捷、抗弯扭和抗风性能优越等特点,已成为大跨径斜拉桥加劲梁结构的主流形式之一^[1]。随着国内交通事业的快速发展,交通量及负荷日益增加,桥梁结构尤其是钢箱梁的损伤问题日益突出。由于大跨径斜拉桥的柔性结构特征,钢箱梁在车辆荷载下的动力响应十分复杂。

国外很多规范(如 BS 5400^[2]、AASHTO^[3]、Eurocode 3^[4]等)均对公路桥梁疲劳荷载进行了明确规定,而我国公路桥梁规范仅对强度设计时不利布置的标准活荷载进行了规定。已有实测结果表明,标准活荷载与实际的车辆荷载对桥梁结构产生的损伤效应相差较大,全桥动力响应存在差异^[5]。国内已有部分研究针对局部地区交通状况给出了当地车辆荷载谱,然而由于架桥位置的不同,桥梁的日交通车流量亦存在明显差异,如东部沿海发达地区和西部欠发达地区同等级公路的车流量最大相差 10 倍之多^[6-7]。因此仅参考现有的国外规范或我国部分地区的车辆荷载谱很难精确反映实桥的受荷状况。

国内学者对中小跨径的各类桥型进行了车载作用下桥梁的动力响应研究,针对大跨径斜拉桥的动力响应分析,多以地震作用、单车荷载及缆索振动特性研究为主^[8-11]。本文依据南京长江第三大桥的实测交通流量数据建立车辆荷载谱,分析在随机实测交通流下大桥主梁不同位置截面的内力变化及动力放大系数。通过对位移和内力的变化规律分析,研究实测车流作用下大跨度悬索桥的动力响应特征。

1 车辆荷载及随机车流分析

1.1 车流分类统计与等效车辆模型建立

公路桥梁承受的车辆荷载为随机动力荷载。不同时段、路段上作用的车辆荷载各不相同,设计基准期内桥梁结构所承受的实际运营荷载即为车辆荷载谱。一般认为仅载重较大的车辆才会引起桥梁结构的疲劳损伤,因此本文参考英国桥梁设计规范 BS 5400^[2],选择载重大于 50 kN 交通流数据作为研究对象。

在南京长江第三大桥收费与称重系统中,根据 AxisID 中记录的 2006 年 8 月至 2010 年 8 月的车流数据,筛选掉荷载小于 50 kN 的车辆数据,得到桥梁交通流量的日变化趋势,如图 1 所示。

以南京长江第三大桥 2006 年 8 月、2010 年 8 月车辆总荷载 50 kN 以上的车流数据为例,按车辆轴数类型进行重新分类,得到不同类型的车辆数量。由统计数据可知,2006 年 8 月至 2010 年 8 月,各类型车辆均有不同程度的增加。其中,2 轴、3 轴车辆增幅明显,6 轴、7 轴车辆所占比例很小。根据 2010 年 8 月车辆总荷载 50 kN 以上的轴重数据,对各类车型的各个车轴进行轴重统计分析,得到各类车轴轴重与频次的关系。图 2、图 3 分别为 3 轴、4 轴车的频次与轴重统计,由图可知,车轴轴重的概率分布既有服从常见的单峰概率密度函数,亦有呈现双峰概率分布的特征。

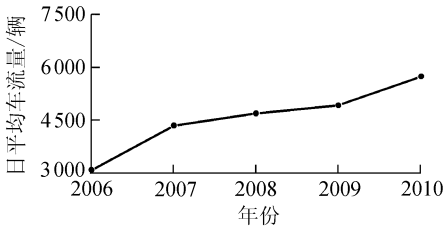


图 1 大桥日交通流量变化

Fig. 1 Changes of daily traffic flow on bridge

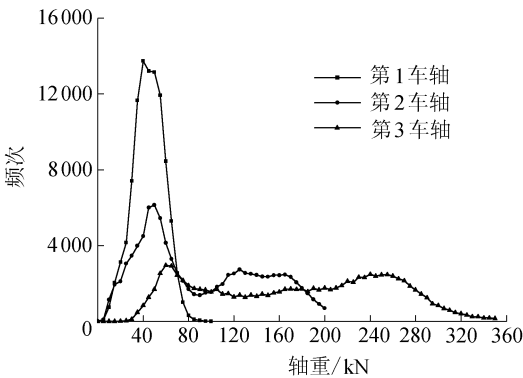


图 2 3 轴车各车轴对应轴重与频次

Fig. 2 Axle loads and frequencies of three-axle vehicles

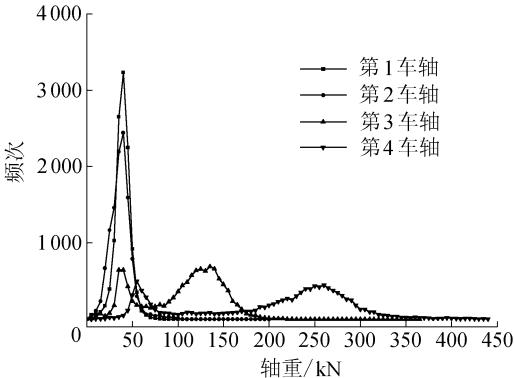


图 3 4 轴车各车轴对应轴重与频次

Fig. 3 Axle loads and frequencies of four-axle vehicles

按照等效疲劳损伤原理,求出每一类模型车辆中各个轴的等效轴重,各个等效轴重之和为模型车辆的等效总荷载^[12]。等效轴重的计算表达式为

$$W_{ej} = \left[\sum (f_i W_{ij}^3) \right]^{\frac{1}{3}}$$

(1)

式中： W_{ej} —— e 类车辆模型第 j 车轴的等效轴重； f_i ——在同一类车辆中第 i 车辆的相对频率； W_{ij} ——第 i 车辆第 j 车轴的轴重。

根据式(1)计算得到各类车辆的等效轴重。由于南京长江第三大桥上各类车辆的等效轴重并不符合一定的变化规律,因此,认为取等效轴重平均值作为计算等效轴重比较合理。车辆计算等效轴重以及车辆荷载见表 1。由于南京长江第三大桥上 6 轴车所占比例很小,本文未考虑。

表 1 大桥车辆计算等效轴重

Table 1 Equivalent axle loads of bridge vehicles

kN

车辆类型	轴重					车辆总荷载
	第 1 车轴	第 2 车轴	第 3 车轴	第 4 车轴	第 5 车轴	
2 轴车	35. 45	87. 70				123. 15
3 轴车	45. 92	76. 47	141. 44			263. 83
4 轴车	41. 38	79. 24	123. 70	125. 98		370. 30
5 轴车	39. 96	72. 47	97. 83	100. 10	110. 72	421. 08

1.2 随机车辆荷载谱的建立

基于南京长江第三大桥收费与称重系统中海量数据的处理分析,得到该桥的随机车流中车质量及轴重 2 个重要参数,并且将车型进行并归分类。为得到适合桥梁结构整体受力分析的随机车辆荷载谱,还应获得各车道上车型、车辆间距的分布情况。

通过桥梁的车流状态是一随机过程,其车型、轴重、车质量及车辆间距等随时间的变化而不同,但均服从一定的概率分布。李扬海等^[13]通过对国内大量公路车流数据进行统计与分析,确定了随机车流中车型、车质量、轴重及车辆间距等重要参数的概率分布特点及相关参数,认为车型符合均匀分布,车质量、轴重及车辆间距符合对数正态分布。其中,车辆间距在一般运行状态下的均值和标准差为 4. 828 m 和 1. 116 m,密集运行状态下的均值和标准差为 1. 561 m 和 0. 280 m。本文根据表 1 中各类车型的计算等效轴重,根据文献[13]查取各类车型的轴距尺寸,将轴重、轴距规整,轴重取 5 的倍数,轴距取 0. 5 的倍数,得到大桥等效车辆模型。

基于南京长江第三大桥 2010 年 8 月的车流数据统计结果,利用 MATLAB 编程语言及统计工具箱编制程序进行随机数列的抽取,得到车辆间距的随机样本,如图 4 所示。建立随机车流与车型及车辆间距间的对应关系,将各类车型的等效车质量与轴重与随机车流相结合,得到符合实际情况的车辆荷载谱,并将其用于随机车流下的钢箱梁整体动力响应分析。

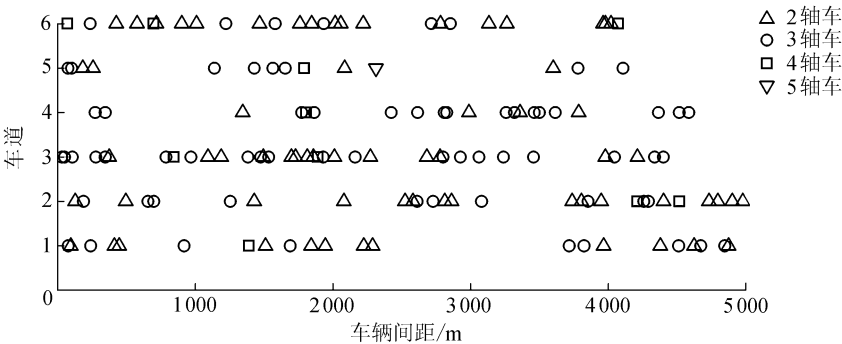


图 4 南京长江第三大桥各车道随机车流

Fig. 4 Radon traffic flow in each lane of Nanjing Third Yangtze River Bridge

2 钢箱梁动力响应时程曲线分析

2.1 位移时程曲线

在车辆动力荷载作用下,桥梁结构将产生振动、冲击等动力效应。为简化计算过程,将车辆荷载作为移动质量荷载进行讨论,采用本文得到的车辆荷载谱对全桥三维模型进行加载分析,其中计算车速取设计车

速^[14](80 km/h),随机车流过桥时间取 160 s。

图 5 为计算得到的主梁在随机车流作用下 1/4 跨的竖向位移时程曲线,跨中与主塔位置竖向位移时程曲线均与图 5 相仿,暂不复述。跨中、1/4 跨与主塔位置的竖向位移时程曲线均由若干个大的位移循环组成。

在钢主梁跨中,动力响应与静力响应变化趋势基本一致,动力响应曲线围绕静力响应曲线作小幅振动。数值计算得到跨中最大位移为 0.927 m,最大位移幅值达到 0.104 m。在 1/4 跨位置,钢主梁动力响应与静力响应变化趋势并不一致,动力响应曲线位移循环增加,振动更明显,最大位移为 0.533 m。在主塔根部位置,钢主梁动力响应围绕静力响应小幅波动,竖向位移值很小,位移放大系数为 1.03。综上所述,在相同的随机车流荷载作用下,主梁 1/4 跨处的竖向位移振动更明显,位移放大系数达到 1.18。

2.2 弯矩及轴力时程曲线

图 6 为随机车流作用下钢主梁跨中处的弯矩时程曲线,1/4 跨与靠近主塔位置的弯矩时程曲线暂不复述。这 3 个位置的响应曲线皆由若干个大的弯矩循环组成,弯矩动力响应绕静力响应曲线作小幅振动。由计算结果可知:主梁跨中处,主梁弯矩为正;在 1/4 跨处,主梁弯矩以正弯矩为主,部分时段出现负弯矩;在主塔处,主梁弯矩均为负值,虽然主塔根部处弯矩绝对值较大,但是主梁跨中处弯矩幅最大。

图 7 为钢主梁在随机车流作用下 1/4 跨截面沿纵桥向轴力时程曲线,跨中与靠近主塔位置的轴力时程曲线暂不复述。由计算结果可知:在主梁跨中,主梁轴力以拉力为主,局部时段出现压力;在 1/4 跨、主塔位置处,钢主梁的轴力时程曲线形状基本相同,主塔根部处所受轴向压力较大,但是所承受的轴力变化幅度较小。

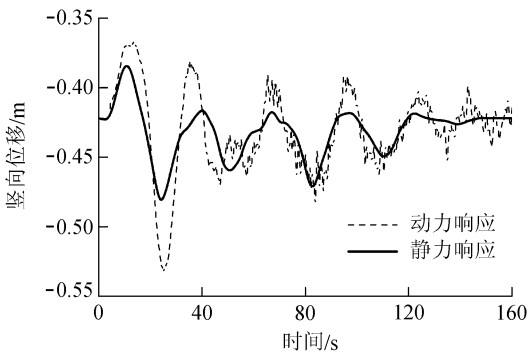


图 5 主梁 1/4 跨处竖向位移时程曲线
Fig. 5 Vertical displacement-time curve at one quarter of span of main beam

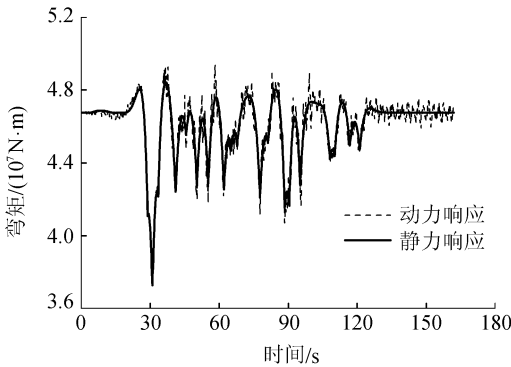


图 6 主梁跨中弯矩时程曲线
Fig. 6 Bending moment-time curve at mid-span of main beam

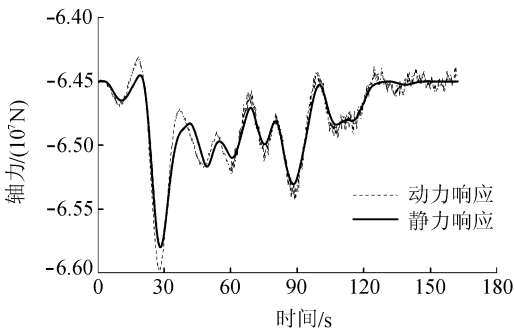


图 7 主梁 1/4 跨处沿纵桥向轴力时程曲线
Fig. 7 Axial force-time curve in longitudinal direction of bridge at one quarter of span of main beam

主梁不同位置截面在静力荷载下的最大弯矩、最大轴力、最大弯矩幅值、最大轴力幅值见表 2。钢主梁的弯矩变化是影响其应力幅的主要因素之一,以弯矩时程曲线作为评价标准,认为钢主梁跨中节段的受力较为不利。主梁轴力变化也是影响应力幅的因素之一,主梁跨中的轴力幅值较大,且轴力以拉力为主,因此,以轴力时程曲线作为评价标准,也认为钢主梁跨中节段的受力较为不利。

表 2 静力荷载引起的弯矩及轴力值

Table 2 Bending moment and axial force caused by static loads				
位置	最大弯矩绝对值/ (10 ⁶ N · m)	最大弯矩幅值/ (10 ⁶ N · m)	最大轴力绝对值/ 10 ⁶ N	最大轴力幅值/ 10 ⁶ N
跨中	49.30	12.0	22.9	25.20
1/4 跨	6.04	10.6	65.8	1.35
主塔根部	55.60	6.8	91.1	1.42

2.3 应力时程曲线

根据简单梁理论公式,将数值分析得到的钢箱梁弯矩动力响应值与轴力动力响应值转换为应力值叠加,分别得到跨中、1/4 跨、主塔根部处动力的应力时程曲线、静力的应力时程曲线,如图 8 所示。

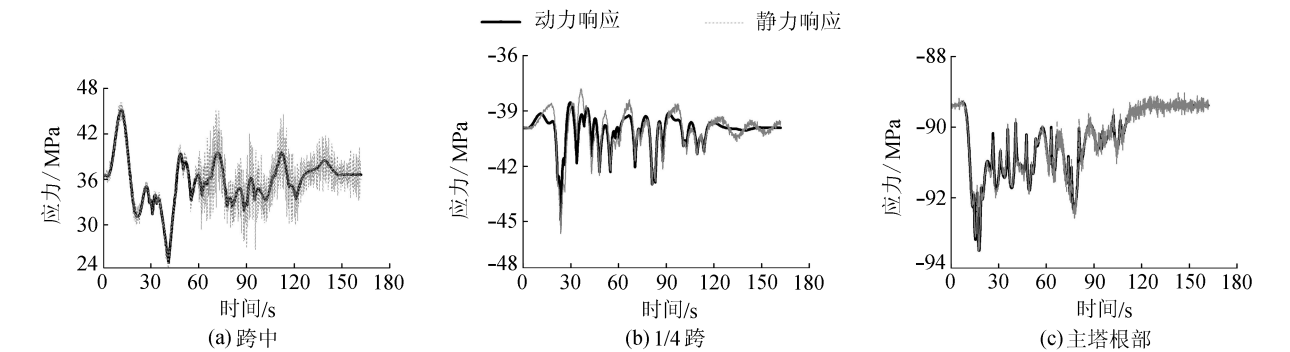


图 8 钢箱梁应力时程曲线
Fig. 8 Stress-time curves of steel box girder

分析图 8 可知,主塔根部处所受应力最大值要比其他部位大 1 倍左右,这是由斜拉桥自身受力特点决定的,主塔根部处受到的轴向压力大部分来自斜拉索的拉力。

3 主梁动力响应系数对比分析

随机车流荷载作用是引起桥梁结构动力响应的主要因素之一,主要受随机车流特性与桥梁结构自身特性的影响。动荷载引起结构响应大于静荷载产生的结构响应,一般采用放大系数对结构的动力响应进行描述^[15]。动力放大系数是指汽车通过桥梁时对桥梁结构产生的竖向动力增大系数:

$$\beta = \frac{\sigma_{d\max}}{\sigma_{s\max}} \tag{2}$$

式中: $\sigma_{d\max}$ ——效应时间历程曲线上最大静力效应对应的最大动力值; $\sigma_{s\max}$ ——效应时间历程曲线上最大静力效应对应的最大静力值。

根据图 6~8,得到一系列响应值及动力放大系数,见表 3。

表 3 钢箱梁上翼缘处的响应值及动力放大系数

Table 3 Dynamic magnification factors and response values at top flange of steel box girder

位置	应力/MPa		应力动力放大系数	弯矩/(10 ⁶ N·m)		弯矩动力放大系数	轴力/10 ⁶ N		轴力动力放大系数
	最大动力值	对应静力值		最大动力值	对应静力值		最大动力值	对应静力值	
跨中	45.89	44.74	1.03	49.36	47.53	1.04	24.81	22.88	1.08
1/4 跨	-45.64	-44.90	1.02	6.22	4.18	1.49	-65.99	-65.79	1.00
主塔根部	-93.52	-93.43	1.00	-55.65	-55.33	1.01	-91.29	-91.07	1.00

由表 3 可知,钢箱梁上翼缘除跨中截面受拉应力作用,1/4 跨和主塔根部截面都受压力作用;除 1/4 跨弯矩放大系数较大外,其他动力放大作用不明显。在 1/4 跨位置的主梁弯矩以正弯矩为主,动力响应峰值达到了 1.49,该弯矩动力最大值与对应的静力值本身很小,该处动力放大值不具有代表性。在主梁跨中位置,弯矩放大系数较小,轴力以拉力为主,动力响应曲线绕静力响应振动显著,轴力放大系数在动力响应峰值处达到了 1.08。

图 9 表明:在随机车流荷载作用下,跨中位置动力与静力响应导致的主梁应力值波动较大,时程内应力放大倍数介于 0.8~1.2 之间;在钢箱梁截面上,最大应力幅处的动力放大系数更能体现该截面受动荷载的影响。由表 3 可知,钢箱梁跨中、1/4 跨和主塔附近截面最大应力幅处的动力放大系数在 1.00~1.03 之间。考虑弯矩与轴力综合作用效应的应力动力放大系数与我国 JTG D60—2004《公路桥涵设计通用规范》^[16]规定的动力放大系数较吻合,且比单考虑弯矩或轴力时的动力放大系数更稳定,突变少。我国《公路桥涵设计通用规范》认为当桥梁结构基频小于 1.5 Hz 时,冲击系数取 0.05,折算成动力放大系数为 1.05。本文计算结果与之接近。

在有限元分析的 160 s 时程内,软件每 0.045 s 记录 1 次内力值。在跨中截面,约 5% 的动应力放大倍数

超过 1.1;与跨中位置相比,1/4 跨位置动力与静力响应导致的主梁应力放大倍数次之,呈波浪状起伏发展;主塔根部处应力动力放大倍数基本维持在 1.0 附近,波动很小。这说明大桥跨中截面对车辆动力荷载更加敏感,容易产生应力的变化,并对某些纵桥向的局部细节产生疲劳损伤等不良影响。在考虑斜拉桥钢箱梁动力响应时,综合考虑弯矩和轴力效应折算得到的应力时程曲线能更精确地表现主梁的受力状况。

4 结 论

- a. 由南京长江第三大桥车流统计数据可知,各类车型车辆数量逐年增加。笔者建立了车型与车辆间距的对应关系,得到适于实际应用的车辆荷载谱。
- b. 主塔根部弯矩及轴力绝对值最大,跨中截面弯矩及轴力幅值最大,而在主梁 1/4 跨位置的竖向位移值并非最大,振动却最为明显。跨中和 1/4 跨节段的受力情况值得关注。
- c. 在实测车流荷载作用下,钢箱梁跨中、1/4 跨和塔根截面的应力动力放大系数在 1.00 ~ 1.03 之间,系数值比单考虑弯矩或轴力时稳定。考虑弯矩与轴力综合效应的应力动力放大系数能够更精确地表现主梁受到的冲击荷载状况。

参考文献:

[1] 林广平, 黄卫, 刘振清. 正交异性钢桥面板第一体系受力状态对铺装层的影响[J]. 公路交通科技, 2006, 23(1): 63-66. (LIN Guangping, HUANG Wei, LIU Zhenqing. Effects of the first structural system stresses of the orthotropic bridge deck on its pavement[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23(1). (in Chinese))

[2] BS 5400—10—1980 Steel, concrete and composite bridges. Part 10: code of practice for fatigue[S].

[3] AASHTO. Guide specifications for fatigue evaluation of existing steel bridges[S].

[4] EN 1993-1-9:2005 Eurocode 3: design of steel structures. Part 1.9: fatigue[S].

[5] 贡金鑫, 李文杰, 赵君黎, 等. 公路桥梁车辆荷载概率模型研究[J]. 公路交通科技, 2010, 27(6): 40-45. (GONG Jinxin, LI Wenjie, ZHAO Junli, et al. Research on probabilistic model of highway bridge vehicle loads[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27(6): 40-45. (in Chinese))

[6] ZHANG Q L, VROUWENVELDER A, WARDENIER J. Dynamic analysis and behaviors of bridges under traffic flows[J]. Adv Struct Dyn, 2000, 10: 585-592.

[7] JI Bohai, CHEN Donghua, MA Lin, et al. Research on stress spectrum of steel decks in suspension bridge considering measured traffic flow[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2012, 26(1): 65-75.

[8] 丁南宏, 钱永久, 林丽霞, 等. 双链式悬索桥在单车荷载下的振动特征[J]. 振动与冲击, 2010, 29(7): 216-220. (DING Nanhong, QIAN Yongjiu, LIN Lixia, et al. Vibration character of a double cable suspension bridge under a single vehicle load[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(7): 216-220. (in Chinese))

[9] 瞿伟廉, 刘嘉, 涂建维, 等. 天兴洲公铁两用斜拉桥主梁纵向列车制动振动反应分析[J]. 地震工程与工程振动, 2008, 28(1): 130-138. (QU Weilian, LIU Jia, TU Jianwei, et al. Longitudinal response analysis of Tianxingzhou highway and railway combined cable-stayed bridge subjected to train braking and traffic[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration Chinese Edition, 2008, 28(1): 130-138. (in Chinese))

[10] CAIA C S, SHIA X M, ARAUJO A M, et al. Effect of approach span condition on vehicle-induced dynamic response of slab-on-girder road bridges[J]. Engineering Structures, 2007, 29(12): 3201-3226.

[11] JIA J, ULFVARSON A. Dynamic analysis of vehicle-deck interactions[J]. Ocean Engineering, 2006, 33(13): 1765-1795.

[12] 李永乐. 风-车-桥系统非线性空间耦合振动研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2004.

[13] 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.

[14] 吕磊, 吉伯海, 马麟, 等. 基于实测车流的大跨度悬索桥振动响应研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(增刊1): 102-108. (LYU Lei, JI Bohai, MA Lin, et al. Study on the vibration response of long span suspension bridge based on the measured traffic flow[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(Sup1): 102-108. (in Chinese))

[15] 陈策, 钟建驰. 三塔悬索桥垂跨比变化对结构静动力特性的影响[J]. 桥梁建设, 2008(6): 12-14. (CHEN Ce, ZHONG Jianchi. Influences of sag-to-span ratio variation on structural static and dynamic behavior of Three-Tower Suspension Bridge[J]. Bridge Construction, 2008(6): 12-14. (in Chinese))

[16] JTG D60—2004 公路桥涵设计通用规范[S].

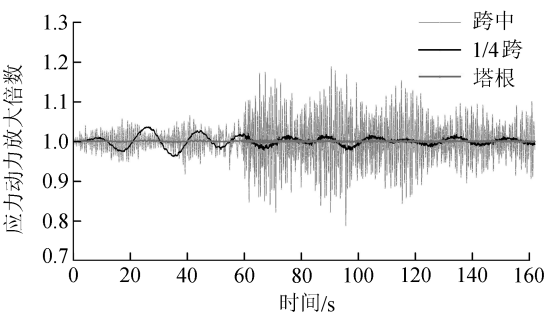


图9 主梁不同位置的应力动力放大倍数变化曲线

Fig. 9 Dynamic stress magnification factor curves at different positions of main beam