

# 随机车流作用下多塔斜拉桥总体荷载响应特性

阮 欣, 周军勇, 石雪飞

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

**摘要:** 结合车辆荷载研究技术, 以三塔斜拉桥为例, 分析了该结构在随机车流作用下的总体荷载响应特性, 深入研究了实际汽车荷载响应与规范荷载模型计算值差别, 探讨了车流随机特性参数对结构响应特性影响。结果表明: 我国《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2004) 的汽车荷载模型对多塔斜拉桥估计过高, 交通运营状态和日均交通量、重车混入率交通特性等参数对汽车荷载响应影响显著, 对不平衡加载敏感不同的效应显示出对随机车流不同的响应特性。说明现有规范基于影响面确定加载范围的极端加载方式及荷载取值无法反映多塔斜拉桥的实际汽车荷载响应状况, 建立反映实际状况的荷载模型可考虑引入多参数多级别的性能设计思想。

**关键词:** 多塔斜拉桥; 汽车荷载响应; 汽车荷载模型; 体系优化

**中图分类号:** U441.2

**文献标志码:** A

## Overall Vehicle Load Response Characteristic of Multi-span Cable-stayed Bridge Under Stochastic Traffic Flow

RUAN Xin, ZHOU Junyong, SHI Xuefei

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** A case study was made of a three-pylon cable-stayed bridge to investigate the overall vehicle load response of multi-span cable-stayed bridge under stochastic traffic flow by resorting to the advanced vehicle load research technology, and the differences between the actual and design load responses were also compared. Results show that the current bridge criterion (JTG D60—2004) overvalues the vehicle load response for multi-span cable stayed bridge; parameters such as traffic condition and traffic properties of average daily traffic volume and truck ratio affect the response indirectly; different load effects present different sensitiveness to stochastic traffic flow. The results indicate the current load model cannot reflect the actual vehicle load responses in load

value as well as loading range, thus, multi-parameter and multi-level performance based design can be taken into consideration to establish load model reflecting actual traffic condition.

**Key words:** multi-span cable-stayed bridge; vehicle load response; vehicle load model; system optimization

现代多塔斜拉桥的形成得益于 Ricardo Morandi 教授的概念体系<sup>[1]</sup>: 桥塔为刚度很大的刚架形式, 配以稀索形成悬臂结构, 悬臂中间通过挂孔相连。这一体系最早应用于委内瑞拉 Maracaibo Bridge, 后续很多多塔斜拉桥基本都是在该体系基础上的延伸。但随着跨径逐渐增大, 运营期间的不平衡汽车荷载越来越成为制约该体系安全与适用范围的关键, 提高多塔斜拉桥结构体系整体刚度成为解决这一问题的主要切入点, 形成了诸如提高中间塔刚度、设置塔间加劲索、改变塔梁约束方式等方案<sup>[2]</sup>。

应该注意到: 准确地估算汽车荷载响应是解决这一问题的另一个关键切入点。目前设计规范中的汽车荷载模型多采用一个区域的均布荷载与若干集中力组合的形式, 设计采用的最不利车辆荷载组合主要通过影响面确定。其中, 荷载取值虽然与加载长度相关, 但很难准确表达实际情况中车辆荷载的各种变化; 另外, 影响面加载方法主要考虑极端状态下汽车荷载隔跨满载、其余跨空载的加载工况, 这种情况在多塔斜拉桥实际运营中发生概率极低。

如今快速发展的性能设计方法精确考虑了结构特性与实际服役需求之间关系, 将结构设计定义为满足不同需求标准的设计过程, 形成了多目标多方法的设计方法。该设计理念以结构的服役需求定义结构设计目标, 能更加科学考虑小概率极端事件<sup>[3]</sup>。基于上述分析, 我国现有多塔斜拉桥汽车荷载模型是以小概率极端事件的高级别需求作为结构的总体

收稿日期: 2013-02-26

基金项目: 国家自然科学基金(51108338)

第一作者: 阮 欣(1977—), 男, 讲师, 工学博士, 主要研究方向为桥梁工程。E-mail: ruanxin@tongji.edu.cn

通讯作者: 周军勇(1990—), 男, 硕士生, 主要研究方向为桥梁工程。E-mail: zhoujunyong\_fly@163.com

设计要求,可能过于保守,需考虑采用更加精确的方法进行分析,以形成科学的设计对策。

因此,研究实际运营状态下车辆荷载引起的多塔斜拉桥结构响应特性,是车辆荷载模型改进以及多塔斜拉桥设计优化的重要基础工作。以下将尝试建立实际车辆荷载作用下桥梁结构响应分析方法,选取三塔斜拉桥典型结构效应,比较其与现有规范的差异,探讨可能的规范改进方向。

## 1 随机车流作用下结构响应特性的分析方法

近年来,越来越多的研究者开始尝试对实际运营中的车辆荷载状态进行准确模拟,并以其为基础建立评估荷载模型,称之为“特点地点车辆荷载模型”(site specific vehicle load model)<sup>[4]</sup>,并随之发展了相关车流模拟、极值推定等关键方法。这些方法可为多塔斜拉桥车辆荷载特性研究借鉴。

以实际运营车辆荷载进行结构响应特性分析有两个关键问题:实际车流形成(模拟)以及响应特征值的确定,这两问题也有一定程度的关联。

现场实测是形成实际车流的最为直接的方法,

目前的动态称重(weigh in motion, WIM)技术使得获取长时间、高精度的车流信息(包括荷载)成为可能,直接用 WIM 数据进行响应分析是一种直接、可靠的方法<sup>[5-6]</sup>。当 WIM 数据时长有限,则可能不能完全反映车辆、车流的各种变异,此时可通过研究 WIM 数据统计特征,基于数学理论建立车流模拟的微观模型,形成模拟的随机车流<sup>[7-8]</sup>。这种方法在不损失实际车流特性的情况下,可以更大程度地考虑车辆、车流的随机特性,是一种更加通用的方法。

当然,无论使用何种方法,都可能面临海量计算,尤其对于长加载长度的情况,计算量更加惊人,这也引出了另一个关键问题:响应特征值的确定。简言之,就是如何通过有限量的数据科学推定响应可能的极值。这方面也有一些研究成果,数据质量和来源不同时,适用的极值推定方法不同<sup>[9-11]</sup>。

文献[9]介绍了一种随机车流模拟方法(“合成车流”),它建立了模拟随机车流的数学方法,有效利用了收费站静态数据,本文以此方法为基础,以国内某运营高速公路车流为数据来源,模拟一定时长的随机车流,通过车流的加载计算,获取荷载响应时程,研究一定可靠度标准(或规定基准期的保证率)的荷载响应特征值(图 1)。

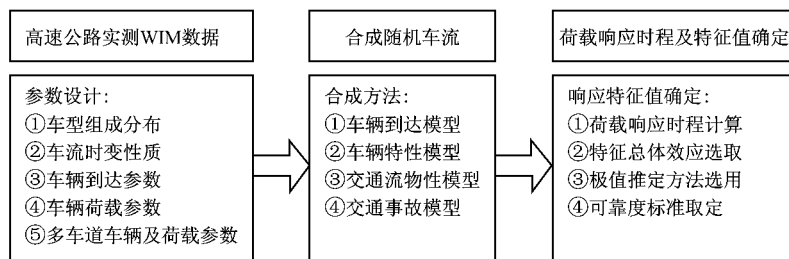


图 1 随机车流作用下结构响应分析过程<sup>[8,12]</sup>

Fig.1 Structural response analysis process under stochastic traffic flow<sup>[8,12]</sup>

## 2 汽车荷载作用下的特征效应

多塔斜拉桥汽车荷载效应多而复杂,应选用最具有代表性的效应(“特征效应”)进行分析<sup>[11]</sup>。特征效应的选取既要考虑结构本身的特性,也要能反映车辆荷载对多塔斜拉桥的特殊影响。

根据结构设计理论,可将影响结构整体适用、安全、稳定的效应称为总体效应;将只对局部造成影响,对结构总体影响不显著的效应称为局部效应。从结构效应的影响面分布情况看:总体效应的响应面区域与跨径密切相关,局部效应的响应面仅分布在某一局部区域。以三塔斜拉桥为例(图 2),主跨跨中

位移影响线(实质为影响面,为简化图形表述,选最外侧车道影响线,以下相同)主要分布于两主跨及一边跨范围,是典型的总体效应;而主跨跨中弯矩影响线窄小,主要影响区域分布于中跨附近,其余区域数值几乎为零,应视为局部效应(图 3)。基于上述方法,以效应影响线影响区域为衡量标准,关注结构的使用性与安全性指标,对三塔斜拉桥车辆荷载作用下主要的效应分类,见表 1。

多塔斜拉桥结构响应对汽车荷载作用方式的敏感性有很大差异,不对称车辆荷载作用是控制多塔斜拉桥设计关键因素。从响应面的特性看:响应面符号变化不大的效应对不平衡汽车荷载作用不敏感,响应面符号变化复杂的效应对不平衡汽车荷载敏感。

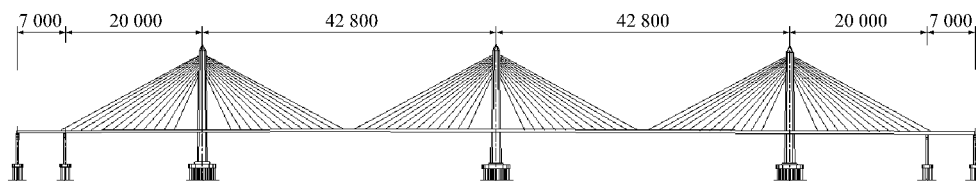


图2 主跨 428 m 钢主梁混凝土索塔三塔斜拉桥总体布置(单位:cm)

Fig.2 General layout of three-pylon cable stayed bridge with steel girder, concrete pylon and main span of 428 meter(units:cm)

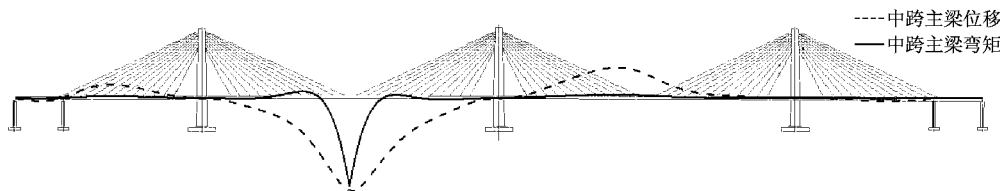


图3 总体与局部效应影响线比较

Fig.3 Comparison of influence lines for overall and local effect

表1 三塔斜拉桥的总体与局部效应

Tab.1 Overall and local effects of three-pylon cable-stayed bridge

设计标准	总体效应	局部效应
使用性	主梁:挠度;索塔:挠度	主梁:梁端转角、疲劳; 索塔:裂缝
安全性	主梁:轴力; 索塔:弯矩、扭矩、剪力	主梁:弯矩、剪力

以表1为例,中塔塔底轴力影响线大部分区域为同号,其响应水平主要决定于汽车荷载作用的平

均水平;中塔塔底弯矩影响线符号变化较大,且正负区域相当,其响应水平与加载方式直接相关,必须同时考虑车辆的平均荷载水平与分布形式(图4).根据上述思路,以效应影响线分布形状为标准,从对车辆荷载分布形式敏感性的角度,对三塔斜拉桥主要的效应分类如下:主梁挠度、索塔挠度、索塔纵横向弯矩、索塔扭矩、索塔剪力、主梁轴力等效应对不平衡加载敏感,索塔轴力则对汽车不平衡加载不敏感.

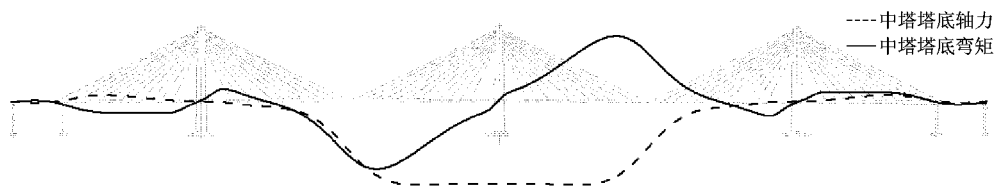


图4 敏感程度不同的效应影响线比较

Fig.4 Comparison of influence lines for effect with different sensitivities

对三塔斜拉桥按上述思路进行全面的分析表明:使用性的总体效应中,索塔位移与主梁位移有一定关联,但主梁位移更能反映车辆行驶的舒适性;安全性的总体效应中,索塔剪力、扭矩等相比索塔弯矩一般不控制设计,大跨径桥梁的索塔轴力中活载占有比例很低,亦不控制设计.为此,索塔弯矩、主梁轴力及主梁位移等效应反映了结构特性和车辆的影响,可作为特征效应进行后续的深入分析.

### 3 三塔斜拉桥随机车流作用下总体响应分析

针对上述三塔斜拉桥,分别计算了实际车流影

响下的中跨主梁挠度、中塔塔底纵向弯矩、中塔主梁轴力和中塔塔底轴力等响应特性.计算选取文献[12]中车辆荷载基础数据,采用文献[8]中随机车流模拟技术,模拟按日均交通量8万、超过21 t重车10%的通行水平,模拟生成桥跨范围内、为期1年的汽车荷载流,并进行全桥加载,获得特征效应的响应时程(图5a),然后通过荷载效应概率分布的拟合分析及优度检验,获取一定可靠度标准下的响应极值(图5b).计算表明,上述4种效应均满足Weibull分布,根据分布类型便可快速获取荷载响应特征值.

以下将以上述三塔斜拉桥为例,分别计算实际车流作用与设计规范<sup>[13]</sup>要求的车辆荷载模型作用值,将随机车流作用下的响应的标准值换算为与目

前我国设计规范相同的置信水平(设计基准期 100 年内 95%保证率),并与规范车辆荷载模型的计算结果进行比较,见表 2. 比较可知实际车流作用下响应

均小于规范计算结果,只有规范计算值 30%~35%,说明如果仅考虑正常运营状态,目前的规范对多塔斜拉桥的汽车荷载总体响应可能估计过高.

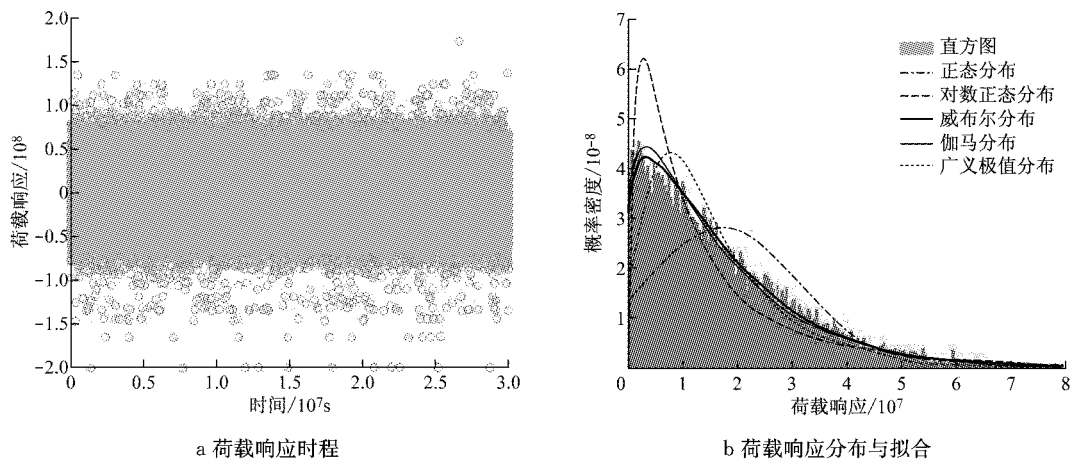


图 5 汽车荷载响应外推计算  
Fig.5 Extreme extrapolation of traffic load effect

表 2 随机车流作用下三塔斜拉桥总体响应

Tab.2 Overall responses of tree-pylon cable-stayed bridge under stochastic traffic flow				
荷载效应	中跨主梁挠度/mm	中塔塔底纵向弯矩/(kN·m)	中塔主梁轴力/kN	中塔塔底轴力/kN
实际车流	46.45	$9.54 \times 10^7$	$7.64 \times 10^5$	$6.43 \times 10^6$
规范荷载	131.36	$2.99 \times 10^8$	$2.54 \times 10^6$	$1.95 \times 10^7$
实际车流与规范荷载之比	0.35	0.32	0.30	0.33

4 车流随机性对响应特性的影响

汽车荷载受多种因素影响呈现高度随机性,其荷载响应不仅与结构特性相关,与车辆运营状况等也密不可分.日均交通量和重车混入率等交通特性参数直接反映一定加载长度上的平均荷载水平,车辆堵车、排队等交通状况则反映了荷载响应的极端状况.分析车流荷载随机性的影响是最终得到结论的关键步骤,以下将分析不同日均交通量、重车混入率等交通特性参数和不同交通状况对上述关键效应的影响情况.

4.1 交通特性影响

日均交通量和重车混入率是交通特性最为直观的反映,日均交通量反映了一定时长的车辆密集程度,重车混入率反映车辆载重的组成特性,两者的组合能够充分反映荷载平均水平的影响.计算在 5 种日均交通量(4 万、6 万、8 万、10 万、12 万)和 3 种重车混入率(10%、20%、30%)作用下响应极值并与规范计算结果比较,如图 6 所示.

由图可知,对于每个关键效应,响应均与日均交通量、重车混入率均呈正相关特性;关注不同日均交

通量和重车混入率下响应的增长幅度,在交通量低于 8 万时,响应随交通特性参数近似线性增加,高于 8 万时,除中塔塔底轴力外,响应增长幅度均有所降低.说明,对不平衡布载敏感的效应依赖于车辆运营的随机性,当交通量很大及重车混入率较高时,车辆运行的随机性降低,效应对交通特性参数的增加变得不敏感.

比较不同效应可知,各效应实际车流响应均远小于规范计算结果,为规范的 30%~50%,仅有中塔塔底轴力在日均交通量 12 万、重车混入率 30%时达到 70%左右;关注效应随交通特性参数的变化发现,中塔塔底轴力随交通特性参数变化显著,增长率稳定,主梁跨中挠度、中塔塔底纵向弯矩、主梁中塔处轴力效应随参数增加,变化较小且增长率不变甚至减小.说明,对布载方式不敏感响应完全依赖于整体平均车重水平,与交通特性参数线性相关.

分析表明,考虑实际状况的不同交通特性组合,荷载响应具有较大差别,但均显著小于规范值,即便是考虑荷载分项组合系数,以现有的汽车荷载模型设计多塔斜拉桥,具有很大的优化空间;不同类型的效应呈现出对交通特性参数不同的敏感程度,因此,单纯的调整荷载取值无法完全反映车辆荷载对多塔

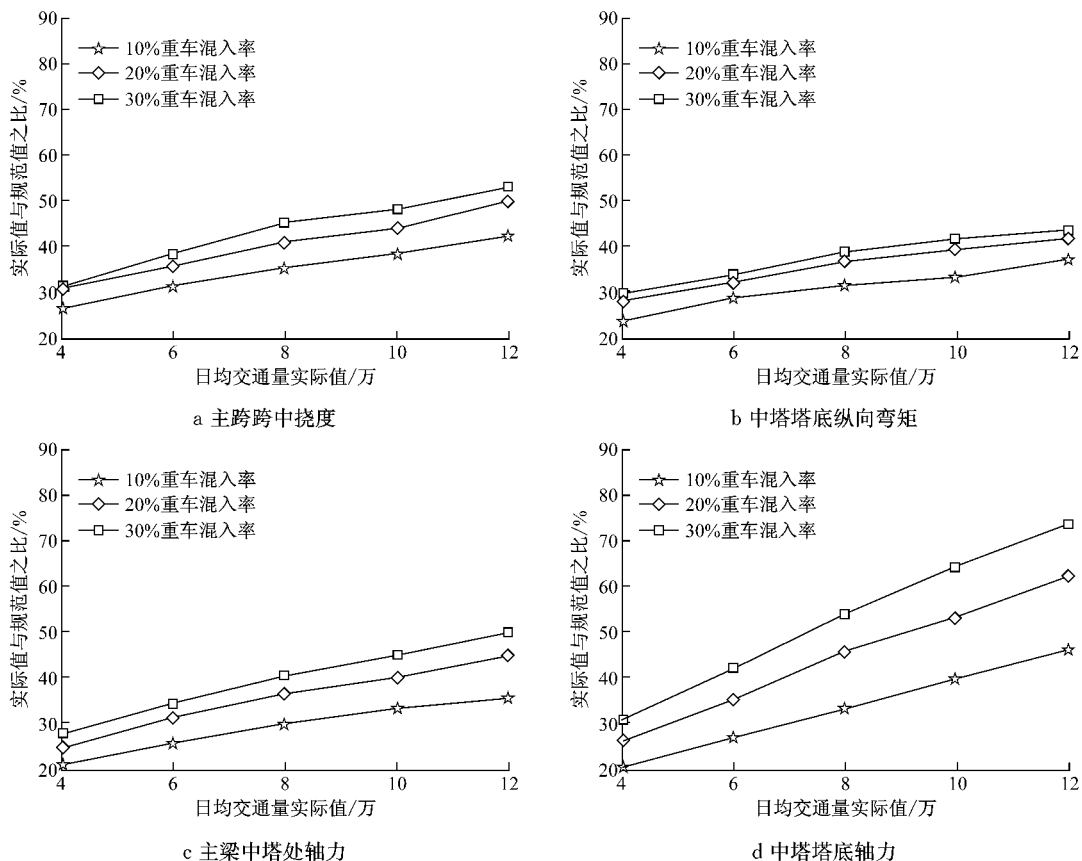


图6 正常运营状况汽车荷载总体响应

Fig.6 Overall traffic load responses on normal operation condition

斜拉桥的影响,还需对效应进行分类分析.

#### 4.2 交通状况

车辆的运营状况是影响荷载响应另一关键,车辆正常通行与堵车状况下,其响应特性差异显著,规范中. 前述荷载响应计算均是在正常交通运营状况下,对于极端堵车情形下的响应特点,有研究者考虑引入堵车状态的车辆排布模型进行研究<sup>[14-15]</sup>. 我国规范的汽车荷载计算方法是基于影响面确定加载范围,这是非常极端状况,考虑到与规范比较,这里将极端堵车交通状况的定义为随机车流在影响面的同号区域加载,将其计算得到的响应定义为实际车流作用下的严重堵车状态响应,计算得到相关结果如图7所示.

可知,所有荷载响应与交通特性参数呈正相关,对不平衡加载敏感程度不同的响应随交通特性参数变化规律一致(变化率及增长率),且均小于现有规范计算值. 比较正常运营和严重堵车状态的荷载响应差别可知,对不平衡荷载敏感的特征响应对布载方式及荷载取值均非常敏感,对不平衡荷载不敏感的特征响应只对荷载取值敏感.

综上所述,对于多塔斜拉桥此类荷载响应影响面复杂的结构体系,我国现行的汽车荷载模型在取值与加载方式上对汽车荷载总体响应估计过高,不能反映桥梁结构对实际车辆运营的响应状况,亟需改进,可以考虑结合反应车流随机性的多种特性参数,引入多性能需求目标的多参数设计方法科学考虑.

## 5 结论

(1)多塔斜拉桥荷载效应多而复杂,采用总体与局部效应、敏感程度的判断方法,可以在保证结构设计要求下选择若干特征效应分析,优化了计算效率.

(2)算例结果显示,三塔斜拉桥在实际车流的全桥加载计算中,相同可靠度水准的特征效应响应值仅为规范的30%~40%.

(3)车流随机特性的参数研究表明:日均交通量和重车混入率等交通特性参数及交通状况参数对响应值有显著影响,大致呈正相关关系;对车辆荷载敏感程度不同的效应,响应极值差别很大.

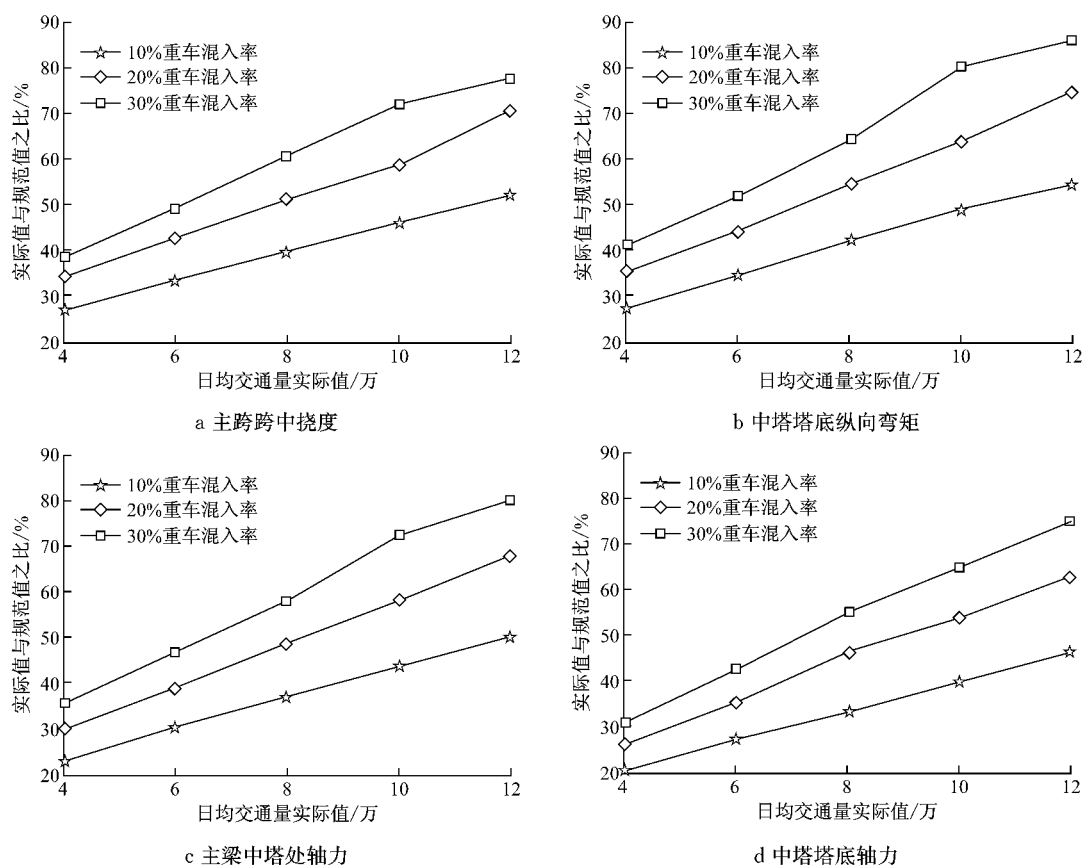


图 7 严重堵车状况汽车荷载总体响应

Fig.7 Overall traffic load responses on heavy traffic condition

(4)建立适用于多塔斜拉桥的汽车荷载设计模型,关注荷载取值和加载方式同时,可以考虑引入性能设计方法,形成多参数多需求级别的设计荷载模式,以反映多塔斜拉桥结构实际车辆运营状况。

#### 参考文献:

- [1] Virlogeux M. Bridges with multiple cable-stayed spans [J]. Structural Engineering International, 2001, 11(1):61.
- [2] 楼庄鸿. 多孔斜拉桥[J]. 公路交通科技, 2002, 19(2):79. LOU Zhuanghong. Multi-span cable-stayed bridges [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2002, 19(2):79.
- [3] Aven T, Zio E. Some considerations on the treatment of uncertainties in risk assessment for practical decision making [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2011, 96(1): 64.
- [4] O'Connor A, Eichinger E M. Site-specific traffic load modeling for bridge assessment [J]. Bridge Engineering, 2007, 160 (4): 185.
- [5] Ghosn M, Sivakumar B. Collecting and using weigh-in-motion data in LRFD bridge design [J]. Bridge Structures, 2009, 5 (4):151.
- [6] Getachew A. Traffic load effects on bridges statistical analysis of collected and Monte Carlo simulated vehicle data [D]. Stockholm: Royal Institute of Technology, 2003.
- [7] LAN Chengming, LI Hui, OU Jinping. Traffic load modeling based on structural health monitoring data [J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2011, 7(5):379.
- [8] 阮欣, 周小毅, 郭济. 基于合成车流的桥梁车辆荷载响应极值预测[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2012, 40 (10):1458. RUAN Xin, ZHOU Xiaoyi, GUO Ji. Extreme value extrapolation for bridge vehicle load effect based on synthetic vehicle flow [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2012, 40 (10):1458.
- [9] Cremona C. Optimal extrapolation of traffic load effects [J]. Structural Safety, 2001, 23(1):31.
- [10] Caprani C C, O'Brien J E. The use of predictive likelihood to estimate the distribution of extreme bridge traffic load effect [J]. Structural Safety, 2010, 32(2):138.
- [11] 公路桥梁车辆荷载研究课题组. 公路桥梁车辆荷载研究[R]. 北京: 中交公路规划设计院, 1997. Research Group of Vehicle loads research for Highway Bridge. Vehicle loads research for highway bridge [R]. Beijing: China Highway Planning and Design Institute, 1997.
- [12] 阮欣, 周军勇, 石雪飞. 中法高速公路车流及荷载特性对比 [J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2013, 41(9):1392. RUAN Xin, ZHOU Junyong, SHI Xuefei. Comparison on highway traffic flow and load properties of China and France [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2013, 41 (9):1392.