

考虑车桥间气动干扰的桥上车车辆行驶安全性分析

韩艳^{1†}, 刘叶¹, 黄静文¹, 蔡春声^{1,2}, 陈甦人^{1,3}

- (1. 长沙理工大学 土木与建筑学院, 湖南 长沙 410114;
2. 美国路易斯安那州立大学, 路易斯安那州 巴吞鲁日 LA70803;
3. 美国科罗拉多州立大学, 科罗拉多州 柯林斯堡 LA80523)

摘要:为了研究车桥间气动干扰对桥上车车辆行驶的影响,以重庆太洪长江大桥为研究背景,针对厢式货车和小轿车 2 种车型,对强风作用下车桥的动力响应和车辆的行车安全性进行了分析.首先基于风-车-桥耦合整体分析系统,分别获得考虑与不考虑车桥间气动干扰两种情况下车辆的竖向、俯仰、侧倾加速度响应以及桥梁侧向加速度响应,将获得的加速度响应导入 MATLAB 所编制的局部事故分析程序中,获得车辆侧滑位移和每个车轮反力比,根据行车事故判定准则,判断车辆是否发生事故;然后通过逐级增加车速和风速,得到了 2 种车型在不同车速下的临界风速.研究表明:考虑车桥间气动干扰对车辆动力响应影响较大,从而对桥上车车辆行驶安全性影响显著,不考虑车桥间气动干扰的行车安全性分析结果偏保守,此外,考虑车桥间气动干扰还影响车辆在桥上行驶时发生的事故类型.研究结果为强风气象条件下大跨度桥梁的运营安全和科学管理提供了合理的理论参考和数据支撑.

关键词:桥梁工程;风-车-桥系统;气动干扰;行车安全性分析;临界风速

中图分类号:U442

文献标志码:A

Traffic Safety Analysis of Vehicles on a Bridge Considering the Aerodynamic Interference between Vehicles and Bridge

HAN Yan^{1†}, LIU Ye¹, HUANG Jingwen¹, CAI Chunsheng^{1,2}, CHEN Suren^{1,3}

- (1. School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;
2. Louisiana State University, Baton Rouge, Louisiana LA70803, USA;
3. Colorado State University, Fort Collins, Colorado LA80523, USA)

Abstract: In order to investigate the effect of aerodynamic interaction between vehicles and a bridge on the driving safety of vehicles on a bridge, the Taihong Yangtze River Bridge of Chongqing in China was taken as an example, and the driving safety of vehicles and dynamic responses of vehicles and the bridge under strong wind were investigated for the two typical types of vehicles—a van and a car. Firstly, based on the wind-vehicle-bridge cou-

* 收稿日期:2018-05-04

基金项目:国家自然科学基金优秀青年基金项目(51822803), National Natural Science Foundation of China(51822803);湖南省杰出青年基金项目(2018JJ1027), Hunan Provincial Science Fund for Distinguished Young Scholars(2018JJ1027);湖南省教育厅优秀青年基金项目(16B011), Science Foundation for the Excellent Youth Scholars of Hunan Provincial Education Department(16B011)

作者简介:韩艳(1979—),女,江苏连云港人,长沙理工大学教授,博士生导师,工学博士

† 通讯联系人, E-mail: ce_hanyan@163.com

pling analysis system, the vertical, pitching and rolling accelerations of the vehicles, and the lateral acceleration of the bridge were calculated with and without consideration of the aerodynamic interference between the vehicles and bridge. Then, these acceleration responses of the vehicles and bridge were applied to the local accident analysis program built by MATLAB. The sideslip displacement and the reaction force ratio of each wheel of the vehicles were calculated. The accidents of the vehicles were assessed by comparing the calculated responses of the vehicles with the accident criteria. Further, the accident critical wind speeds of the vehicles at different traveling speeds were obtained by gradually increasing the traveling speed and wind speed, and the curves of the accident critical wind speed versus the traveling speed for the two types of vehicles with and without consideration of the aerodynamic interference were plotted. The results show that the aerodynamic interference between the vehicles and the bridge has a significant influence on the driving safety of vehicles on the bridge. The assess results are relatively conservative if the aerodynamic interference between the vehicles and bridge is not considered. In addition, the aerodynamic interference also affects the vehicle accident type. This paper can provide a reasonable theoretical reference and data support for the operation safety and scientific management of long-span bridges under strong wind weather conditions.

Key words: bridge engineering; wind-vehicle-bridge system; aerodynamic interaction; driving safety analysis; critical wind speed

我国公路交通进入跨海连岛时代,长大桥梁增多,此类桥梁桥址处的风荷载往往都比较大,车辆在桥面上通行的安全性问题比在道路上更加突出,合理评估桥上车辆行驶安全性是确保大桥安全、经济运营的保障.而准确预测桥上车辆的安全性不仅需要准确模拟风-车-桥间相互耦合作用还要准确模拟风-车-桥间的相互气动干扰.过去国内外学者对车辆在桥面上通行的事故分析进行了大量研究并取得了丰富的研究成果. Cai 和 Chen^[1-2]将驾驶员行为引入到风-汽车-桥梁耦合分析中,以整体分析和局部分析相结合的方式得到车辆侧滑位移、偏转位移和车轮反力,以此来判断车辆的行车安全性. 庞加斌等^[3]在考虑车速、车型、风速和路面等条件,分析了4种典型车辆的安全行车临界风速,建立了桥面行车高度的等效风速概率模型,提出了概率评估方法. Guo^[4]和韩万水等^[5]为能直接计算车辆侧滑位移,将车辆模型中轮胎与路面接触点定义一个独立的侧向自由度,轮胎的摩擦力表达为轮胎竖向力和侧滑速率的函数,通过风-车-桥分析计算轮胎侧滑位移,以位移量作为车辆事故判断标准. 马麟^[6]研究了考虑汽车运动时坐标转动特性的驾驶员行为模型和桥面车轮侧滑力模型,建立了考虑驾驶员行为的风-车-桥系统空间耦合振动分析框架及求解

策略. 李永乐等^[7]针对车辆侧倾事故和侧滑事故的评判准则,采用概率统计方法提高了风致车辆事故分析的可靠性. 殷新锋等^[8]综合考虑了车流随机性和路面等级退化等因素,分析了大跨度桥梁的振动及行车舒适性. 研究表明驾驶员座椅模型的各向振动可显著影响行车舒适度. 虽然国内外学者均建立了准确的车桥模型,但是其车辆气动力荷载直接采用 Baker^[9-10]的经验公式,没有考虑车桥间的气动影响. 近年来韩艳等^[11-14]采用数值计算和风洞试验方法对风-车-桥耦合系统的车辆和桥梁气动特性进行了研究,研究结果发现,车辆和桥梁间的相互气动干扰对车辆和桥梁的气动力有较大的影响. 韩艳等^[15]研究了桥梁抖振力空间相关性对侧风作用下桥梁和车辆耦合动力响应的影响,研究结果表明:桥梁抖振力空间相关性对桥梁动力响应有显著影响,对车辆的动力响应也有一定的影响. 韩万水等^[16]研究了气动干扰下大跨度斜拉桥动力响应和车辆安全性,结果分析表明气动干扰对桥梁动力响应和车辆安全性影响显著,但其只考虑了一种车型. 由此可见,非常有必要研究车桥间气动干扰对不同车型的桥上行驶安全性的影响.

鉴于以上研究现状,本文以重庆太洪长江大桥为工程背景,基于以前的车桥系统气动特性研究基

础,利用自编的风-车-桥耦合振动程序分别计算分析了不同车型下考虑与不考虑车桥间气动干扰的车桥动力响应,基于车辆事故分析模型编制车辆行车安全性评估程序,将风-车-桥耦合振动的车辆动力响应结果作为激励输入,分析研究了考虑车桥间气动干扰对桥上车辆行驶安全性的影响。

1 考虑车桥间气动干扰的桥上车辆行驶安全性分析方法

1.1 风-车-桥耦合振动

风-车-桥耦合系统模型包括车辆模型、桥梁模型和风荷载模型,其相互作用包括车-桥相互作用、风-桥相互作用和风-车相互作用,具体车辆模型和相互作用关系推导详见参考文献[1]。基于模态综合法建立风-车-桥耦合系统的运动方程,表示为:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_v \\ \bar{\mathbf{M}}_b \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{q}}_v \\ \ddot{\xi}_b \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C}_v' & \mathbf{C}_{vb} \\ \mathbf{C}_{bv} & \bar{\mathbf{C}}_b + \mathbf{C}_b^v + \mathbf{C}_b^{se} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{q}}_v \\ \dot{\xi}_b \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_v' & \mathbf{K}_{vb} \\ \mathbf{K}_{bv} & \bar{\mathbf{K}}_b + \mathbf{K}_b^v + \mathbf{K}_b^{se} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{q}_v \\ \xi_b \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{F}_v^r + \mathbf{F}_v^w + \mathbf{F}_v^G \\ \mathbf{F}_b^r + \mathbf{F}_b^w + \mathbf{F}_b^G \end{Bmatrix} \quad (1)$$

式中:下标 b、v 分别表示桥梁和车辆; \mathbf{M}_v 、 \mathbf{C}_v 和 \mathbf{K}_v 分别为车辆的质量、阻尼和刚度矩阵; \mathbf{F}_v 为作用在车辆的外荷载向量,由风车和车桥间相互作用产生; \mathbf{q}_v 为车辆的位移向量; $\bar{\mathbf{M}}_b$ 、 $\bar{\mathbf{C}}_b$ 和 $\bar{\mathbf{K}}_b$ 分别为桥梁结构的模态质量、阻尼和刚度矩阵,模态质量可以通

过 ANSYS 求得; ξ_b 为模态坐标向量; $\mathbf{C}_v' = \mathbf{C}_v + \mathbf{C}_v^{lower}$ 、 $\mathbf{K}_v' = \mathbf{K}_v + \mathbf{K}_v^{lower}$ 、 \mathbf{C}_v^{lower} 和 \mathbf{K}_v^{lower} 分别为下层阻尼和弹簧引起的车辆阻尼和刚度矩阵; \mathbf{C}_b^{se} 和 \mathbf{K}_b^{se} 分别为气动阻尼和气动刚度矩阵; \mathbf{C}_{vb} 和 $\mathbf{K}_{vb} = \mathbf{K}_{bv}$ 分别为车桥系统的耦合阻尼和刚度矩阵; \mathbf{C}_b^v 和 \mathbf{K}_b^v 分别为车辆作用引起的桥梁阻尼和刚度矩阵; \mathbf{F}_v^r 为桥面粗糙度引起的车辆外荷载向量,其中上标 r 表示路面粗糙度; \mathbf{F}_v^w 为风荷载引起的车辆外荷载向量; \mathbf{F}_v^G 为车辆自重引起的车辆外荷载向量; \mathbf{F}_b^r 为桥面粗糙度引起的桥梁广义外荷载向量; \mathbf{F}_b^{st} 和 \mathbf{F}_b^{db} 分别为桥梁系统的广义静风荷载和抖振力向量。

1.2 考虑桥梁气动影响的车辆气动力系数

本文主要分析小轿车和厢式货车在桥梁上的行驶安全性,图 1、图 2 分别为 2 种车型考虑桥梁与不考虑气动影响的气动力系数随着风偏角的变化情况。本文旨在研究考虑车桥间气动干扰对桥上行车安全性研究,在研究车辆气动力时没有考虑栏杆和风屏障的影响。厢式货车考虑气动相互影响的气动力系数参考文献[11],小轿车考虑气动相互影响的气动力系数参考文献[17],2 种车型的气动参数虽然取自不同文献,但是两文献中的桥梁断面均为流线型断面型式,与本文桥梁断面的型式类似,作者前期研究^[13]发现桥梁断面的局部细微变化对车辆气动力系数影响很小。厢式货车和小轿车不考虑气动相互影响的气动力系数根据韩万水试验结果^[5],其研究中采用的车型与文献[11]和文献[17]相同。

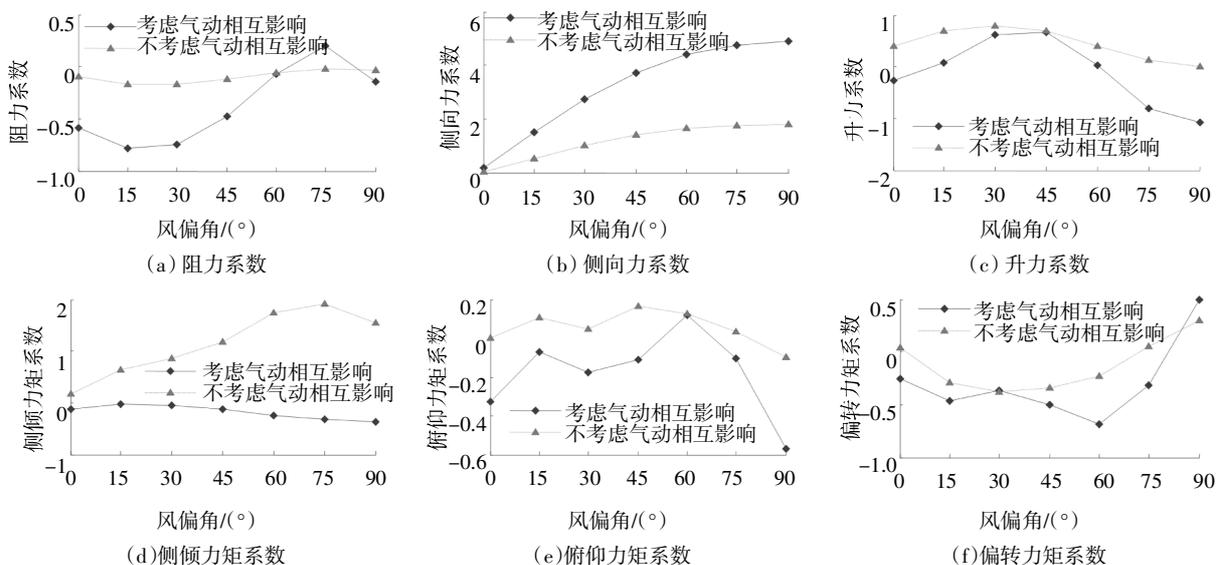


图 1 厢式货车气动力系数随风偏角变化规律

Fig.1 Aerodynamic coefficients of the van on the bridge vs the wind yaw angle

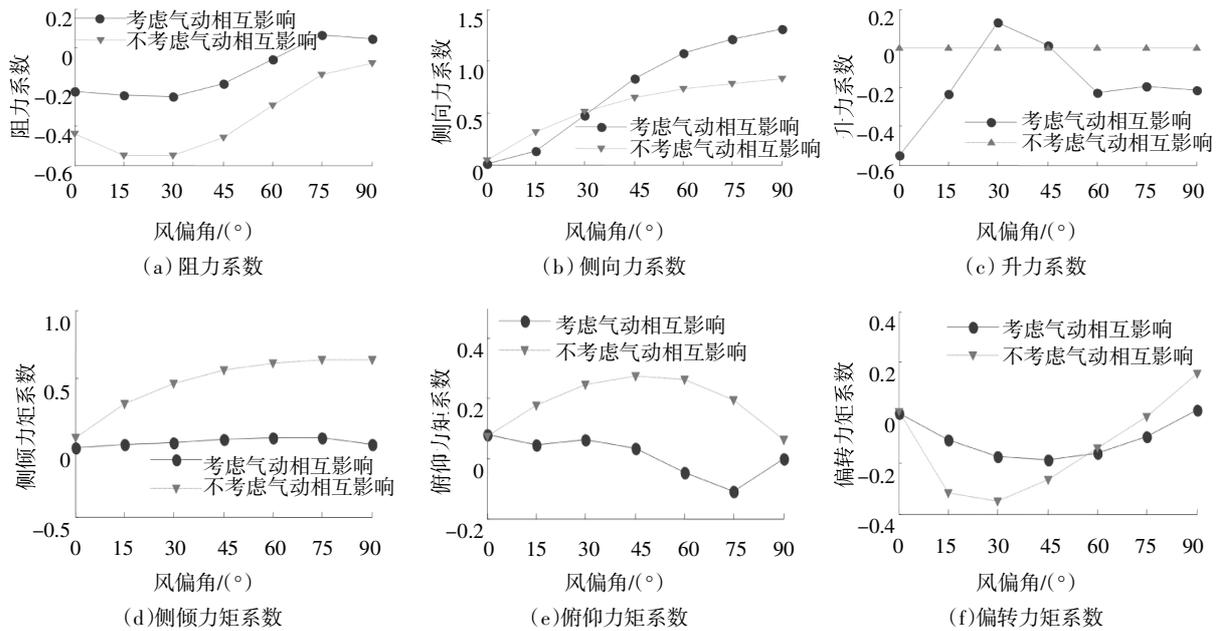


图 2 小轿车气动系数随风偏角变化规律

Fig. 2 Aerodynamic coefficients of the car on the bridge vs the wind yaw angle

从图 1 和图 2 可以看出,考虑与不考虑车桥气动干扰的结果相差较大,说明桥梁对车辆气动系数影响较大,因此进行桥上车辆行驶安全性分析时有必要考虑桥梁对车辆的气动影响。

1.3 车辆事故分析模型及评判标准

参考 Chen 等^[2]提出的车辆事故分析模型,如图 3 所示,假定车轮和桥面“密贴”。将风-车-桥耦合振动整体分析计算得到的车辆竖向、侧倾方向、俯仰方向和桥梁侧向的动力响应用到车辆事故分析模型中,从而计算出车辆侧滑位移和车轮反力。

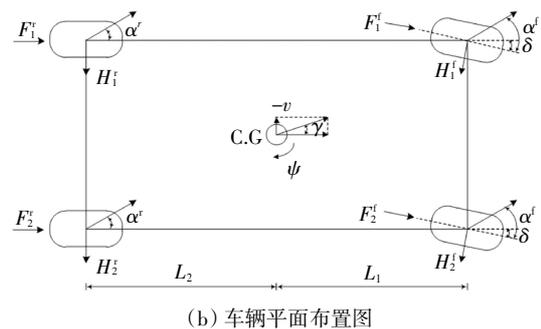
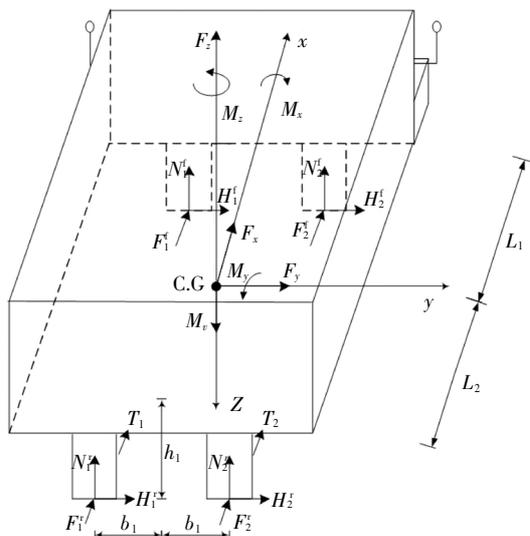


图 3 车辆事故分析模型

Fig.3 Accident analysis model of vehicle



(a) 车辆三维布置图

图 3(a)为事故分析的典型两轴四轮车辆坐标系,后轮为主动轮,前轮是转向轮,分析中牵引力 T 施加在后轮,偏转角 δ 存在于前轮. 翻转抗力 F_i 与车轮反力 N_i 相关,可以表示为:

$$F_i^f = n^{re} N_i^f, F_i^r = n^{re} N_i^r, i = 1 \sim 2 \quad (2)$$

式中: n^{re} 为滚动摩擦系数; f 和 r 分别表示前轮和后轮; N_i 为第 i 个车轮的反力,即竖向接触力。

由于侧滑角比较小,认为侧滑力 H_i 与车轮反力 N_i 是线性关系,可以表示为:

$$H_i^f = m^{la} \alpha^f N_i^f, H_i^r = m^{la} \alpha^r N_i^r \quad (3)$$

式中: m^{la} 为回转刚度系数; α^f 和 α^r 分别是前轮和后轮的侧滑角。

前后车轮的侧滑角可以表示为:

$$\alpha_i^f = \gamma - \frac{\psi L_1}{V} + \delta_i, \alpha_i^r = \gamma + \frac{\psi L_2}{V} \quad (4)$$

式中: ψ 是车辆重心绕 z 轴的偏转角; δ_i 是第 i 个轮的转向角(后轮为 0° ,前轮相等); L_1 和 L_2 分别是重心到前轮和后轮的距离; γ 是车体重心的侧滑角,可以表示为:

$$\gamma = -\arctan(v/V) \approx -v/V \quad (5)$$

其中: v 为车体重心相对与路面的侧滑速度,即 dY/dt , Y 为车体重心相对与路面的侧滑位移; V 是车辆纵向驾驶速度.

$$\delta = \frac{L_1+L_2}{R} - \lambda_1(Y+\psi L_1) - \lambda_2(\dot{Y} + \dot{\psi} L_1) \quad (6)$$

其中: R 为旋转半径; L_1 、 L_2 分别为车辆质心处到前轮和后轮的距离; λ_1 和 λ_2 为与驾驶员行为有关的参数.

根据力与力矩平衡,可以得到如下平衡方程:

$$\sum_{i=1}^2 (F_i^f \cos \delta_i - H_i^f \sin \delta_i) + \sum_{i=1}^2 (F_i^r + T_i) + F_{wx} - M_v g \sin \theta_g = M_v \ddot{V} \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^2 (F_i^f \cos \delta_i + H_i^f + H_i^f \sin \delta_i) + F_{wy} - M_v g \sin \phi = M_v [(\dot{v} + \ddot{Y}_{br}^v) - V \dot{\psi}] \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^2 (N_i^f + N_i^r) + F_{wz} + M_v (\ddot{Z}_{vr} - g \cos \phi) = 0 \quad (9)$$

$$M_{w\phi} + \sum_{i=1}^2 (-1)^{i+1} (N_i^f + N_i^r) b_1 + \sum_{i=1}^2 (H_i^f \cos \delta_i + F_i^f \sin \delta_i + H_i^r) h_1 = J_{vr} \ddot{\phi}_{vr} \quad (10)$$

$$M_{w\theta} + \sum_{i=1}^2 (N_i^f L_1 - N_i^r L_2) + \sum_{i=1}^2 (F_i^f \cos \delta_i + H_i^f \sin \delta_i + F_i^r + T_i) h_1 = I_{vr} \ddot{\theta}_{vr} \quad (11)$$

$$-M_{w\psi} + \sum_{i=1}^2 (F_i^f \cos \delta_i L_1 + F_i^f \sin \delta_i L_1 - H_i^r L_2) + \sum_{i=1}^2 (-1)^{i+1} (F_i^f \cos \delta_i - H_i^f \sin \delta_i + F_i^r + T_i) b_1 = \Theta_{vr} \ddot{\psi} \quad (12)$$

式中: M_v 为车辆总质量; g 为重力加速度; θ_g 为坡度; ϕ 为路面拱度; F_{wx} 、 F_{wy} 和 F_{wz} 分别为车辆 x 、 y 和 z 方向的气动力; $M_{w\theta}$ 、 $M_{w\phi}$ 和 $M_{w\psi}$ 分别为车辆绕 y 、 x 、 z 轴的气动力矩; J_{vr} 、 I_{vr} 、 Θ_{vr} 分别为侧倾惯性矩、俯仰惯性矩和偏转惯性矩; $\ddot{\phi}_{vr}$ 、 $\ddot{\theta}_{vr}$ 和 \ddot{Z}_{vr} 分别为车辆的侧倾角加速度、俯仰角加速度和竖向加速度; \ddot{Y}_{br}^v 为桥梁上车辆支承点的侧向加速度;由风-车-桥耦合整体分

析获得,将获得的 $\ddot{\phi}_{vr}$ 、 $\ddot{\theta}_{vr}$ 、 \ddot{Z}_{vr} 和 \ddot{Y}_{br}^v 作为激励输入到局部车辆事故分析模型中得到车辆侧向位移 Y 、偏转角 ψ 和车轮反力.

车辆交通事故类型有 3 种:侧滑、侧倾和侧偏.侧倾指车辆某车轮没有支撑力引起的翻车事故,侧滑和侧偏分别指车辆侧向位移 Y 和偏转角 ψ 过大,占用其他车道,引发其他事故.本文中只考虑侧滑和侧倾两种交通事故类型,根据 Baker 等^[18-21]提出的交通事故评判准则,即当侧滑位移超过 0.5 m 时发生侧滑事故,当车辆某个轮胎的车轮反力为 0 或小于 0 时发生侧倾事故,用重心的侧滑响应和车轮反力来判断侧滑和侧倾事故是否会发生.

1.4 程序实现

根据前面介绍的风-车-桥耦合振动理论和车辆事故分析模型,首先通过 ANSYS 软件建立桥梁有限元模型,获得桥梁结构的振动模态、固有频率以及模态质量等参数,然后利用 MATLAB 软件编制了桥上车辆行车安全分析程序,如图 4 所示,程序包括风-车-桥耦合振动整体分析和车辆安全性局部分析.运用 4 阶龙格库塔法求解风-车-桥耦合整体振动,整体振动计算所得到的车辆竖向、侧倾方向、俯仰方向和桥梁侧向的动力响应作为激励导入到车辆事故分析模型中,同样运用 4 阶龙格库塔法求解车辆局部事故分析程序从而计算出车辆侧滑位移和车轮反力.

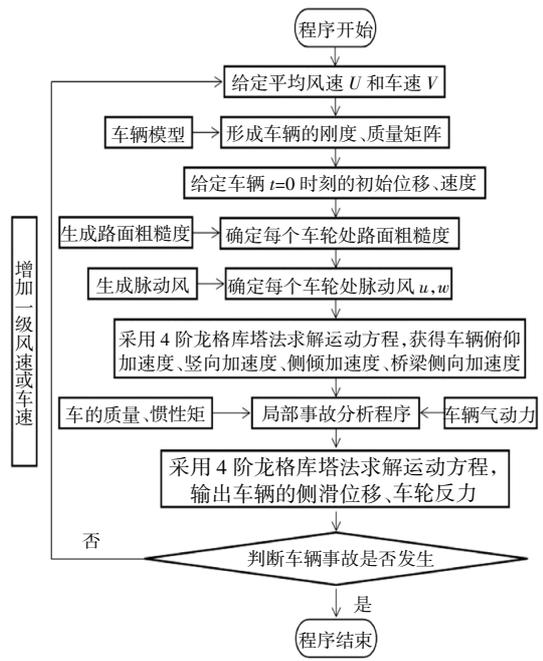


图 4 车辆安全性分析程序框图

Fig. 4 Flow diagram of driving safety assessment of vehicles

2 算例分析

2.1 工程背景及计算参数

本文以重庆太洪长江大桥为工程背景,重庆太洪长江大桥为重庆南川至两江新区高速公路上的关键控制性工程,主桥上部为主跨 808 m 的悬索桥,主缆矢跨比 1:10,主梁采用钢箱梁,加劲梁高 3.0

m,吊索标准间距 12 m.整体布置图如图 5 所示.重庆太洪长江大桥的桥梁气动参数取自文献[22],取用的是 0°攻角下的气动力系数,阻力系数为 0.576 71;升力系数为 -0.070 19;扭矩系数为 0.026 57.采用 ANSYS 建立桥梁有限元模型,桥梁模型取前 10 阶振型进行计算,计算得到的桥梁结构前 10 阶动力特性见表 1,结构阻尼比取 0.005.

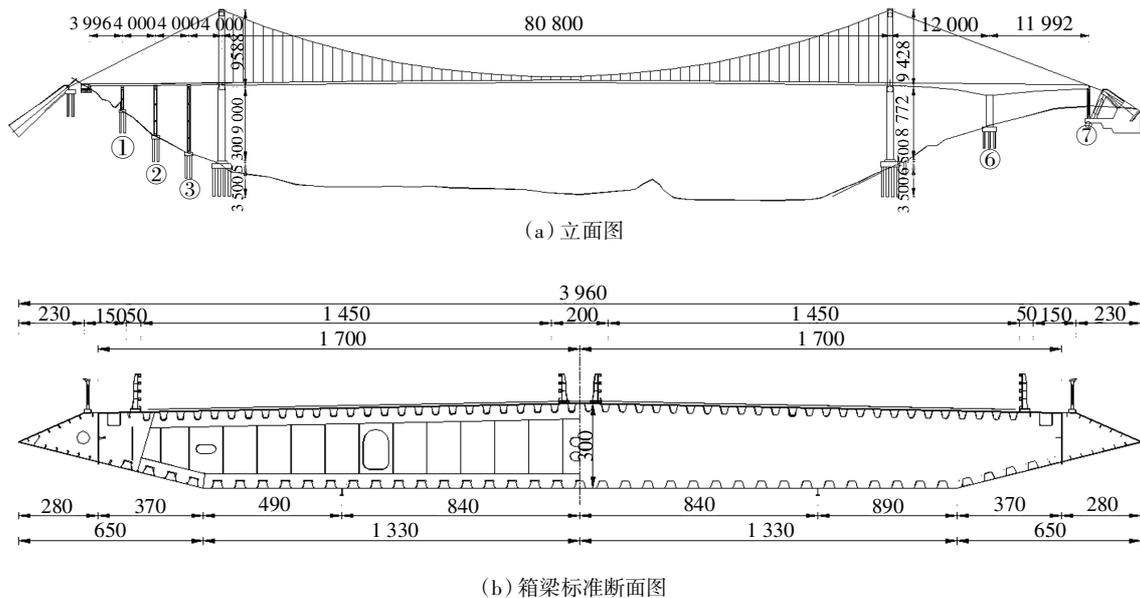


图 5 重庆太洪长江大桥的整体布置图(单位:cm)

Fig.5 Layout of Taihong Yangtze River Bridge of Chongqing (unit: cm)

表 1 重庆太洪长江大桥的前 10 阶动力特性

Tab.1 Dynamic characteristics of the first 10 modes for Taihong Yangtze River Bridge of Chongqing

阶次	固有频率 /Hz	模态质量 / (10 ⁶ kg)	阶次	固有频率 /Hz	模态质量 / (10 ⁶ kg)
1	0.109	30.63	6	0.297	11.57
2	0.110	11.39	7	0.345	3.85
3	0.154	18.54	8	0.364	2.12
4	0.181	6.02	9	0.373	2.78
5	0.244	9.43	10	0.384	5.57

本文采用厢式货车和小轿车作为分析对象,车辆的主要参数如表 2 所示.顺风向的功率谱采用 Kaimal 谱,竖风向采用 Lumley and Panofsky 提出的功率谱,采用 Davenport 相关函数,顺风向和竖风向的相关系数均取 16.频率采样点数为 1 024,截止频率为 2π.采用谐波合成法沿桥纵向共模拟了 135 个点的脉动风时程.路面粗糙度是影响车辆和桥梁动力响应的一个重要因素,通常情况下将桥面不平整

度视为平稳的、各态历经的零均值 Gauss 随机过程,利用给定的桥面不平度功率谱密度函数得到桥面不平度序列.公路路面粗糙度的功率谱密度函数^[23]表示为:

$$S(n) = S(n_0) \left(\frac{n}{n_0} \right)^{-2} \quad (13)$$

式中:S(n)为路面粗糙度的功率谱密度函数(m³/cycle);S(n₀)为粗糙度系数,其值由路况确定,本文主要是针对桥面为“干”的状况研究,取“良好”路面粗糙度样本,其值为 20×10⁻⁶ m³/cycle;n 为分散频率(cycle/m);n₀为截断频率,且等于 1/2π.

路面粗糙度可以用傅立叶逆变换生成成为:

$$r(x) = \sqrt{2} \sum_{k=1}^N \sqrt{S(n_k) \Delta n} \cos(2\pi n_k x + \theta_k) \quad (14)$$

式中:r(x)为模拟的路面不平度样本;θ_k为一组在 [0, 2π]上服从均匀分布的随机数;N 为采样点总数.图6是路面状况为“良好”的粗糙度模拟结果.

表 2 车辆参数

Tab.2 Vehicle parameters

参数	单位	厢式货车	小轿车	参数	单位	厢式货车	小轿车
车长	m	7.78	4.55	下层侧向弹簧刚度	kN/m	121	100
车体质量	kg	4 480	1 235	下层竖向阻尼	kN/(s·m ⁻¹)	0.8	0.43
俯仰惯性矩	kN·m ²	5 516	1 731	下层侧向阻尼	kN/(s·m ⁻¹)	0.8	0.43
侧倾惯性矩	kN·m ²	1 349	472	面积	m ²	19.2	1.32
偏转惯性矩	kN·m ²	100 000	25 000	车体质心到地面距离	m	1.5	0.72
前轴对质量	kg	800	200	体质心到后车轴距离	m	2.6	1.48
后轴对质量	kg	710	150	体质心到前车轴距离	m	3	1.14
上层竖向弹簧刚度	kN/m	399	300	车体质心到驾驶员位置距离	m	1.5	0.87
上层侧向弹簧刚度	kN/m	299	100	车轮横向间距之半	m	1.1	0.85
上层竖向阻尼	kN/(s·m ⁻¹)	23.21	6.228	车体质心到中央弹簧上平面的垂向高度	m	0.8	0.45
上层侧向阻尼	kN/(s·m ⁻¹)	23.21	6.228	车体质心到驾驶员位置垂向距离	m	1	0.18
下层竖向弹簧刚度	kN/m	351	302				

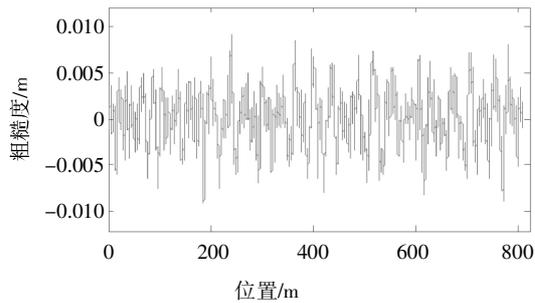
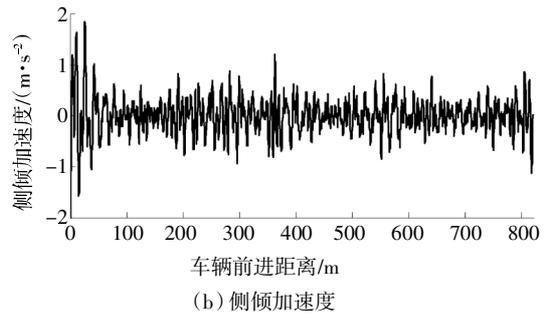
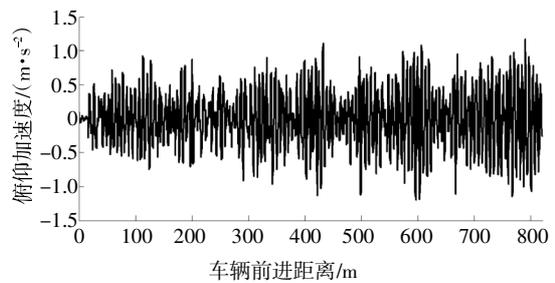


图 6 路面粗糙度
Fig.6 Road roughness



(b) 侧倾加速度



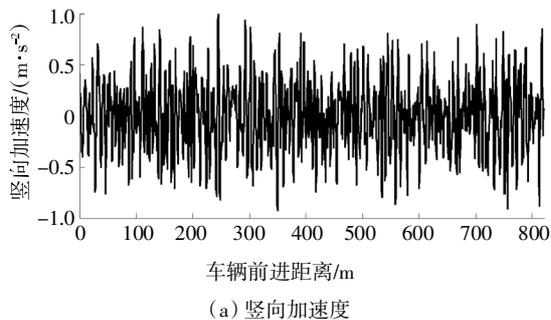
(c) 俯仰加速度

图 7 车辆加速度响应

Fig.7 Acceleration responses of vehicles

2.2 计算结果与分析

图 7 是车速为 20 m/s、风速为 28 m/s 时风-车-桥耦合振动整体计算分析得到的车辆竖向、侧倾和俯仰加速度响应. 图 8 是桥梁上车辆支承点的侧向加速度响应. 然后将这些加速度响应代入到局部分析程序中求得车辆侧滑位移和车轮反力.



(a) 竖向加速度

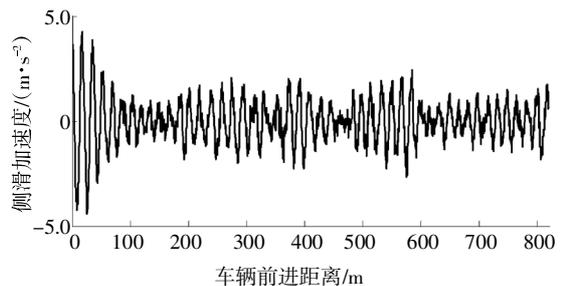


图 8 桥梁侧向加速度响应

Fig.8 Lateral acceleration response of the bridge

图 9 是车速 20 m/s 时,厢式货车考虑车桥间气动干扰后不同风速下的侧滑位移.可以看出当风速为 40 m/s 时车辆侧滑位移大于 0.5 m, 根据侧滑事故发生判断准则,可以断定当车速为 20 m/s 时考虑车桥间气动干扰车辆的侧滑临界风速 40 m/s.

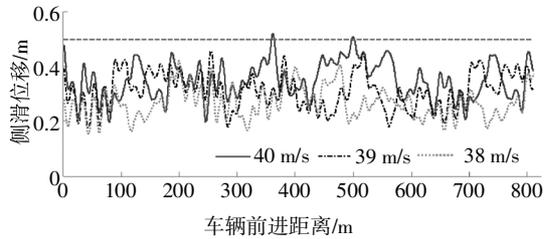


图 9 厢式货车考虑车桥气动影响不同风速下侧滑位移
Fig.9 The slip displacement of the van under the different wind speed considering aerodynamic interference

图 10 是厢式货车当车速为 20 m/s、风速为 40 m/s 时考虑车桥气动相互影响时迎风侧的车轮反力比,车轮反力比定义为实际车轮反力与静止状态下车轮反力的比值,如式(15)所示:

$$N_{r前} = \frac{\text{前轮车轮反力}}{M_v g L_2 / 2 (L_1 + L_2)}, N_{r后} = \frac{\text{后轮车轮反力}}{M_v g L_1 / 2 (L_1 + L_2)} \quad (15)$$

在车辆前进的过程中车轮反力比始终大于 0, 不会发生侧翻事故.结合图 9 和图 10,说明在车速 20 m/s,风速为 40 m/s 仅发生侧滑事故.

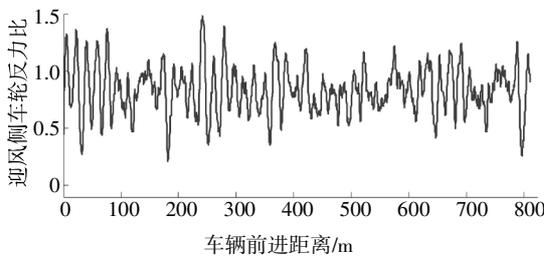


图 10 厢式货车考虑车桥气动影响车轮反力比(V=20 m/s,U=40 m/s)

Fig.10 Wheel reaction ratio of the van considering aerodynamic interference (V = 20 m/s, U = 40 m/s)

图 11 为不考虑车桥间气动干扰的车轮反力比.由图 11 可以判断车辆在车速为 20 m/s 时,车辆的临界风速为 24 m/s.可见考虑车桥间气动干扰的车辆临界风速大于不考虑车桥气动影响的车辆临界风速.

图 12 给出了车速为 20 m/s、风速为 24 m/s 时考虑与不考虑车桥气动影响的车辆车轮反力比.从图 12 可以看出,背风侧的车轮反力比值整体上大

于迎风侧的值,尤其是对于没有考虑车桥间气动干扰的情况,这说明车辆迎风侧较车辆背风侧更容易发生侧倾.另外可以看出,对于车辆迎风侧,没有考虑车桥气动影响时,车辆行驶过程中已经出现车轮反力比小于零的情况,即车轮与路面瞬时“脱空”,从而会发生侧翻事故,但考虑车桥间气动干扰时,车轮反力比远大于零,从而不会发生侧翻事故.

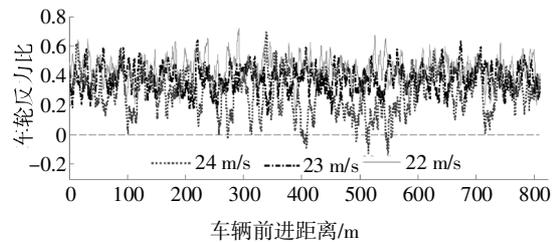
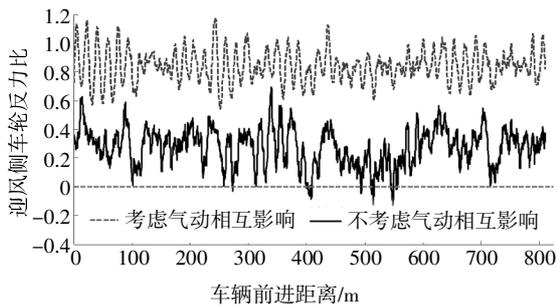
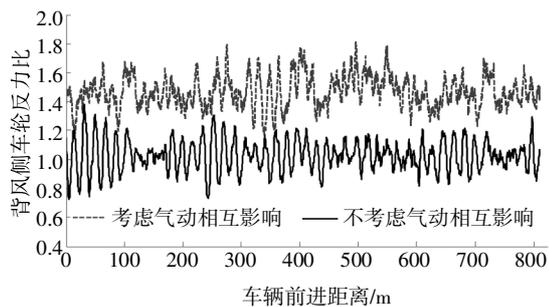


图 11 厢式货车不考虑车桥气动影响车轮反力比(V=20 m/s)

Fig.11 Wheel reaction ratio of the van without considering aerodynamic interference between vehicle and bridge(V=20 m/s)



(a) 迎风侧车轮反力比



(b) 背风侧车轮反力比

图 12 厢式货车车轮反力比

Fig.12 Wheel reaction ratio of the van

结合图 9~图 12 可以得出结论:在同一车速下,车辆的临界风速和事故发生的类型都与是否考虑车桥间气动干扰密切相关.

图 13 和图 14 分别为小轿车和厢式货车考虑与不考虑车桥气动影响的车辆安全行驶的临界风速对比情况.从图中可以看出,车桥间气动干扰对

两种车型的行车临界风速均有较大影响,考虑车桥气动干扰的临界风速均大于不考虑车桥气动干扰的临界风速,而且差值几乎均超过 10 m/s. 分析原因,主要是由于气动干扰对车辆气动力产生了较大的影响,如图 1 和图 2 所示,而且气动干扰对车辆各个方向的气动力均产生了较大的影响,最终综合影响引起了其对临界风速的影响. 因此,车辆安全性分析中如果不考虑车桥气动影响将使评估结果偏保守,这并不有利于大桥的经济合理管理.

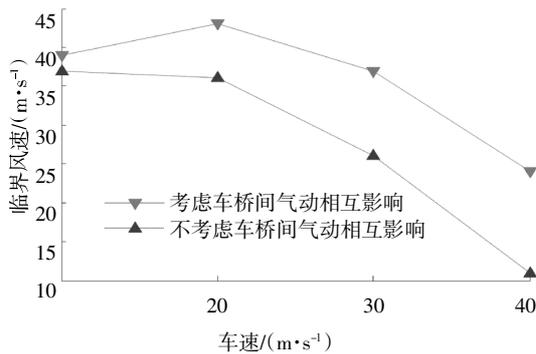


图 13 小轿车安全行驶的临界风速对比

Fig.13 Comparison of critical wind speed at different speeds of car

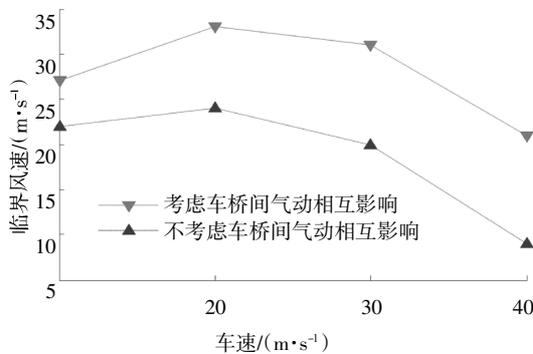


图 14 厢式货车安全行驶的临界风速对比

Fig.14 Comparison of critical wind speed at different speeds of the van

表 3 和表 4 分别给出厢式货车和小轿车考虑与不考虑车桥气动相互影响车辆事故临界风速对比情况. 从表中可以看出,对于本文两种车型,在某些车速下是否考虑车桥间气动干扰会使事故类型有所不同. 对于小轿车,在低速时考虑和考虑气动干扰的事故类型一样,较高风速时发生的事故类型不一致;而对于厢式货车,如果不考虑气动干扰,低风速时容易发生侧翻,高风速时容易发生侧滑,但是如果考虑气动干扰,发生事故类型正好相反.

表 3 小轿车不同车速下临界风速对比

Tab.3 Comparison of accident critical wind speed at different speeds of the car

车速 / (m·s ⁻¹)	不考虑车桥气动相互影响		考虑车桥气动相互影响	
	临界风速 / (m·s ⁻¹)	事故类型	临界风速 / (m·s ⁻¹)	事故类型
10	37	侧滑	39	侧滑
20	36	侧翻	43	侧翻
30	26	侧翻	37	侧滑、侧翻
40	11	侧滑、侧翻	24	侧滑

表 4 厢式货车不同车速下临界风速对比

Tab.4 Comparison of accident critical wind speed at different speeds of the van

车速 / (m·s ⁻¹)	不考虑车桥气动相互影响		考虑车桥气动相互影响	
	临界风速 / (m·s ⁻¹)	事故类型	临界风速 / (m·s ⁻¹)	事故类型
10	22	侧翻	27	侧滑
20	24	侧翻	33	侧滑
30	20	侧滑	31	侧翻
40	9	侧滑	21	侧翻

3 结论

本文基于车桥系统气动特性研究基础,以重庆太洪长江大桥为研究背景,编制了考虑车桥气动影响的车辆安全行驶评估程序,分析研究了考虑车桥气动影响对桥上车辆行驶安全性的影响,得到了以下研究结论:

1) 不论是对于小轿车还是厢式货车,考虑车桥气动干扰的临界风速均大于不考虑车桥气动干扰的临界风速,而且差值几乎均超过 10 m/s. 因此,桥上车辆行驶安全性分析时如果不考虑车桥气动影响会使评估结果偏保守,不利于大桥的合理经济管理.

2) 车桥间气动干扰不仅会影响车辆行驶的临界风速,还会影响车辆发生安全事故的类型.

总之,对于文中类似的流线型桥梁断面,考虑车桥间气动干扰可以更全面地分析桥梁上的车辆事故发生,能让相关部门采取更合理的措施来应对强风情况,在强风条件能够做出更合适的应急措施和疏散计划.

参考文献

- [1] CAI C S, CHEN S R. Framework of vehicle-bridge-wind dynamic analysis[J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2004, 92(7/8): 579-607.
- [2] CHEN S R, CAI C S. Accident assessment of vehicles on long-span bridges in windy environments[J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2004, 92(12): 991-1024.
- [3] 庞加斌, 王达磊, 陈艾荣, 等. 桥面侧风对行车安全性影响的概率评价方法[J]. 中国公路学报, 2006, 19(4): 59-64.
PANG J B, WANG D L, CHEN A R, *et al.* Probability evaluating method of bridge deck side wind effects on driving safety[J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(4): 59-64. (In Chinese)
- [4] XU Y L, GUO W H. Safety analysis of moving road vehicles on a long bridge under crosswind [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2006, 132(4): 438-446.
- [5] 韩万水, 陈艾荣. 风-汽车-桥梁系统空间耦合振动研究[J]. 土木工程学报, 2007, 40(9): 53-58.
HAN W S, CHEN A R. Three-dimensional coupling vibration of wind-vehicle-bridge systems[J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(9): 53-58. (In Chinese)
- [6] 马麟. 考虑驾驶员行为的风-汽车-桥梁系统空间耦合振动研究[D]. 西安: 长安大学桥梁工程系, 2008: 28-54.
MA L. Three-dimensional coupled vibration of wind-vehicle-bridge system considering driver's behavior[D]. Xi'an: Department of Bridge Engineering, Chang'an University, 2008: 28-54. (In Chinese)
- [7] 李永乐, 赵凯, 陈宁, 等. 风-汽车-桥梁系统耦合振动及行车安全性分析[J]. 工程力学, 2012, 29(5): 206-212.
LI Y L, ZHAO K, CHEN N, *et al.* Wind-vehicle-bridge system coupling vibration and traffic safety analysis [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(5): 206-212. (In Chinese)
- [8] 殷新锋, 丰锦铭, 杨小旺, 等. 风与车流联合作用下在役桥行车舒适性研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2016, 43(1): 46-52.
YIN X F, FENG J M, YANG X W, *et al.* Ride comfort of existing bridges under combined loads of traffic and wind [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2016, 43(1): 46-52. (In Chinese)
- [9] BAKER C J. The quantification of accident risk for road vehicles in cross winds[J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 1994, 94: 93-107.
- [10] BAKER C J. Measures to control vehicle movement at exposed sites during windy periods[J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 1987, 25(2): 151-161.
- [11] 韩艳, 胡揭玄, 蔡春声, 等. 横风下车桥系统气动特性的风洞试验研究[J]. 振动工程学报, 2014, 27(1): 67-74.
HAN Y, HU J X, CAI C S, *et al.* Wind tunnel measurement on aerodynamic characteristics of vehicles and bridges under cross winds [J]. Journal of Vibration Engineering, 2014, 27(1): 67-74. (In Chinese)
- [12] 韩艳, 胡揭玄, 蔡春声, 等. 横风作用下考虑车辆运动的车桥系统气动特性的数值模拟研究[J]. 工程力学, 2013, 30(2): 318-325.
HAN Y, HU J X, CAI C S, *et al.* Numerical simulation aerodynamic characteristics of vehicle and bridge under cross winds with the consideration of vehicle moving [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(2): 318-325. (In Chinese)
- [13] 韩艳, 陈浩, 沈炼, 等. 气动力参数对风-车-桥系统耦合动力响应的影响[J]. 中国公路学报, 2015, 28(9): 57-66.
HAN Y, CHEN H, SHEN L, *et al.* Effect of aerodynamic parameters on coupled dynamic responses of wind-vehicle-bridge system[J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(9): 57-66. (In Chinese)
- [14] HAN Y, CAI C S, ZHANG J, *et al.* Effects of aerodynamic parameters on the dynamic responses of road vehicles and bridges under cross winds [J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2014, 134: 78-95.
- [15] 韩艳, 陈浩, 刘跃飞, 等. 桥梁抖振力空间相关性对风-车-桥耦合动力响应的影响[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2015, 42(9): 83-88.
HAN Y, CHEN H, LIU Y F, *et al.* Effect of the coherence of buffet forces of bridges on the coupled dynamic responses of wind-vehicle-bridge system[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2015, 42(9): 83-88. (In Chinese)
- [16] HAN W S, LIU H J, WU J, *et al.* Dynamic analysis of long-span cable-stayed bridges under wind and traffic using aerodynamic coefficients considering aerodynamic interference[J]. Wind & Structures an International Journal, 2017, 24(5): 405-430.
- [17] 陈浩. 侧风作用下桥梁和车辆气动参数数值模拟研究 [D]. 长沙: 长沙理工大学土木与建筑学院, 2017: 48-52.
CHEN H. Numerical simulation on aerodynamic characteristics of vehicle and bridge under cross wind[D]. Changsha: School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, 2017: 48-52. (In Chinese)
- [18] BAKER C J. A simplified analysis of various types of wind-induced road vehicle accidents [J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 1986, 22(1): 69-85.
- [19] BAKER C J. Ground vehicles in high cross winds part I: Steady aerodynamic forces[J]. Journal of Fluids & Structures, 1991, 5(1): 69-90.
- [20] BAKER C J. Ground vehicles in high cross winds part III: The interaction of aerodynamic forces and the vehicle system[J]. Journal of Fluids & Structures, 1991, 5(2): 221-241.
- [21] COLEMAN S A, BAKER C J. High sided road vehicles in cross winds [J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 1990, 36(1): 1383-1392.
- [22] 韩艳, 李春光, 董国朝, 等. 太洪长江大桥主梁节段模型抗风性能研究报告[R]. 长沙: 湖南大学风工程试验研究中心, 2015: 8-11.
HAN Y, LI C G, DONG G C, *et al.* Research report on wind resistance performance of Yangtze River bridge main girder section model of Tai Hong [R]. Changsha: Hunan University Wind Engineering Experimental Research Center, 2015: 8-11. (In Chinese)
- [23] DODDS C J, ROBSON J D. The description of road surface roughness[J]. Journal of Sound and Vibration, 1973, 31(2): 175-183.