

# 多荷载作用下上海长江大桥列车走行性

吴定俊,陈 锐,李 奇

(同济大学 桥梁工程系,上海 200092)

**摘 要:**为研究上海长江大桥在风、汽车荷载、温度、道路不平顺多因素影响下的列车走行性,将其视作温度变形、公路与轨道不平顺作用下的风-车-桥耦合动力系统。建立桥梁、列车车辆、不同类型汽车的有限元模型,采用模态叠加法进行车-桥动力计算。计算中运用随机交通流模型模拟公路交通流,采用文献中针对该桥风洞试验测定的主梁及车辆的气动参数,并将年温差引起的桥梁变形叠加到轨道和路面随机不平顺中。采用自编车-桥耦合计算软件 VBC 进行风-车-桥耦合动力分析。分别考虑了有无风荷载作用下温度荷载、汽车车流类型和列车运行方式的影响,并对多荷载作用组合下的极限状况进行讨论,分别考虑了列车空员、定员和满员 3 种不同载重的影响。最后,根据不同车速和风速组合下的计算结果,确定轮对横向力为列车走行性的控制指标,并提出了列车安全、舒适运行的管理原则。研究结果表明:年温差和汽车车流对列车动力响应的影响并不明显,列车响应随车速、风速的增大而增大;列车相对于风向的运行方式对列车走行性也有很大影响;在较高风速下,单线列车迎风侧行驶为列车的最不利运行方式;当风速小于 20 m/s 时,最高运营车速可达到 90 km/h;当风速大于 20 m/s 且不超过 25 m/s 时,运营车速应小于 70 km/h;当风速超过 25 m/s 时,应当封闭轨道交通。

**关键词:**桥梁工程;风车桥系统;耦合振动;走行性;斜拉桥;模态叠加法;随机车流

**中图分类号:**U441.2

**文献标志码:**A

**DOI:**10.19721/j.cnki.1671-8879.2019.03.008

## Ride quality of trains moving on Shanghai Yangtze River Bridge considering effect of multiple loads

WU Ding-jun, CHEN Rui, LI Qi

(Department of Bridge Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** In order to investigate the ride quality of trains moving on the Shanghai Yangtze River Bridge subjected to multiple environmental loads, the wind, road irregularity, temperature, highway and railway loads were taken into account in the wind-vehicle-bridge coupled system. Finite element models of the bridge, railway vehicles, and the different types of highway vehicles were developed and their modal results were then extracted for the vehicle-bridge dynamic interaction analysis using the mode superposition method. A random traffic flow model was applied to simulate the highway traffic flow, the test aerodynamic parameters of the train and bridge reported in other literature were used. The deformation of the bridge induced by annual temperature variation was added to the random irregularities of the rail and road. The self-

complied vehicle-bridge coupling software VBC was used to calculate the responses of the wind-vehicle-bridge dynamic interaction system. The effect of temperature load, highway vehicle types, train operation mode, with wind load or not, and train operation modes with respect to the wind direction were considered. The effects of extreme load combinations were investigated by considering the situations of trains with empty, capacity, and full passenger loads. Based on calculations at different train speeds and wind speeds, it was found that the lateral forces of the wheelsets control the ride quality of train. The guidelines for the safe and comfortable operation of the train were proposed. The results show that the annual temperature variation load and highway traffic flows have negligible effect on the ride quality of the trains. The dynamic responses of the trains increase with an increase in the train and wind speeds. The mode of operation relative to the direction of wind of the trains also has a significant effect on the ride quality of the trains. At high wind speeds, a single train traversing on the windward side is the most unfavorable operation mode, when the wind speed is less than 20 m/s, the maximum allowable operation speed can reach 90 km/h. When the wind speed is more than 20 m/s, the operation speed should be less than 70 km/h. And when the wind speed exceeds 25 m/s, the rail traffic should be closed. 5 tabs, 19 figs, 35 refs.

**Key words:** bridge engineering; wind-vehicle-bridge system; coupled vibration; ride quality; cable-stayed bridge; mode superposition method; random traffic flow

## 0 引言

为了避免深水基础施工且满足通航要求,大跨度斜拉桥成为跨江海工程的有力竞争者。在强风作用下,运行在振动桥梁上列车的安全性和舒适性不仅是研究者关心的科学问题,也是影响交通效率、交通安全的经济与社会问题<sup>[1]</sup>。为了减少大风天气下的列车安全事故,国内外通常制定大风天气下的列车行驶限制车速,并在自然风达到一定风速等级时关闭交通。如果列车运营风速上限定的过高,会增加行车安全事故发生的几率;反之,过低的列车运营风速限值,又会影响桥梁的通行效率。为节约投资和桥位资源,公轨合建桥梁成为大跨度桥梁的主要形式。对于公轨合建桥梁,列车的走行性能受到列车荷载、风荷载、汽车荷载及温度等多种作用的共同影响<sup>[2-3]</sup>,在制定强风环境下的行车管理准则时有必要较为全面地考虑上述作用。

国内外学者关于风-车-桥耦合振动问题进行了大量研究。Diana 等最先研究了汽车横向平均风压对桥梁结构的激振效应<sup>[4]</sup>。王荣辉等采用空间相关的侧向脉动风速场,考虑作用于车-桥耦合系统的静风荷载和准定常脉动荷载作用,但是未计入竖向脉动风场的影响,且其车-桥的气动参数未考虑相互的气动影响<sup>[5-6]</sup>。夏禾等对香港青马大桥在风和列车荷载同时作用下的振动特性进行了分析,研究了桥

梁风致振动对车-桥耦合振动特性的影响,但因列车从结构内部通过,故未计入风荷载对列车的作用<sup>[7]</sup>。Chen 提出了一套公路桥梁的风-车-桥耦合振动分析理论,集中分析了脉动风作用下车-桥的耦合振动响应,但是由于缺少实测数据,其并未考虑车辆和桥梁间的气动影响<sup>[8]</sup>。早期的研究通常假定桥梁所受风荷载不受车辆影响,车辆所受风荷载也没有考虑到桥梁的几何外形特点,这与实际不符<sup>[8-9]</sup>。韩万水等研究发现,不同交通状态车辆将引起桥梁气动力和局部风压的变化<sup>[10-11]</sup>。Wu 在之后的研究中发现:随机车流在桥上时间和空间的不确定性会影响桥梁的气动弹性特性<sup>[12]</sup>。Han 等研究也表明,前后汽车干扰、车辆横向距离对气动力系数以及桥梁静三分力系数有较大的影响<sup>[13]</sup>。在公轨合建桥梁方面,李永乐等建立风-车-桥耦合系统,研究了列车车速、风速、列车车辆运行方式以及入桥距离对列车、桥梁响应的影响,但其并未考虑汽车车流的影响<sup>[14-18]</sup>。郭向荣等建立风-车-桥耦合振动系统,研究了横风风场下满载和空载下货物列车通过大跨度铁路斜拉桥时的走行安全性,但也未考虑随机汽车车流的影响<sup>[19]</sup>。李小珍等以沪通铁路公铁两用长江大桥主桥为背景,将公路活载作用及温度作用产生的附加变形叠加到轨道不平顺中,计入了附加变形曲线对列车走行性的影响,但其并未考虑风荷载的影响<sup>[20]</sup>。张骞等以沪通长江大桥为例,考虑轨道

不平顺的影响,计算风速激励下不同速度列车通过桥梁时的耦合系统动力响应,但未考虑随机汽车车流的影响<sup>[21]</sup>。综上,当前研究中,全面地考虑多种荷载因素下列车走行性的研究较少。

上海长江大桥位于长江入海口,主航道桥为主跨 730 m 的扁平钢箱梁斜拉桥,目前已开通公路交通<sup>[22-24]</sup>。最近,针对上海长江大桥拟改建为公轨合建桥梁展开了广泛讨论,讨论焦点在桥梁刚度是否能满足列车通车-桥梁的安全性。对此,本文以上海长江大桥为研究对象,考虑确定性年温差和轨道不平顺、风荷载和汽车荷载作用对列车走行性的影响,采用车-桥耦合计算软件 VBC 进行风-车-桥耦合动力分析<sup>[25]</sup>。

## 1 风-车-桥系统振动计算模型

### 1.1 列车模型

本文研究中的车辆为地铁 B 型车,列车编组为 1 动车+6 拖车+1 动车(共 8 辆),车载状态分别考虑空员、定员、满员 3 种情况<sup>[25]</sup>。每节车辆可以分成 7 个刚体部件:1 个车体、2 个转向架及 4 个轮对。刚体部件采用刚度较大的梁单元模拟,其有限元模型如图 1 所示。刚体之间通过弹性元件和阻尼元件相互连接。轮轨法向接触采用密贴接触假定,即不考虑轮轨脱离和弹性变形,切向接触采用非线性蠕滑理论。

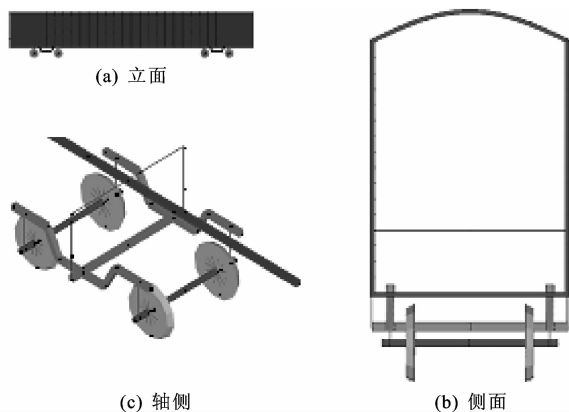


图 1 列车有限元模型

Fig. 1 Finite element model of train

基于车辆有限元模型,其运动微分方程可表示为<sup>[25]</sup>:

$$\mathbf{m}_v \ddot{\delta}_v + \mathbf{c}_v \dot{\delta}_v + \mathbf{k}_v \delta_v = \mathbf{f}_{vn} + \mathbf{f}_{vc} + \mathbf{f}_{ve} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{m}_v$ 、 $\mathbf{c}_v$ 、 $\mathbf{k}_v$  分别为车辆的质量矩阵、比例阻尼矩阵、线弹性刚度矩阵; $\delta_v$ 、 $\dot{\delta}_v$ 、 $\ddot{\delta}_v$  分别为车辆位移、速度和加速度向量; $\mathbf{f}_{vn}$  为车辆非比例阻尼力及其他非线性内力向量; $\mathbf{f}_{vc}$  为通过轮轨相互作用施加于车

辆上的激振力向量; $\mathbf{f}_{ve}$  为风荷载向量。

### 1.2 汽车模型

汽车模型和列车模型的基本假定和建模方法类似,仅考虑轮胎与路面的竖向弹性接触,不计车辆与桥梁的横向相互作用。选取的汽车模型和参数包含 4 种代表车型。第 1 车型为五轴大货车,第 3 车型为中型客车,与 Guo 等采用的车辆参数一致<sup>[26-27]</sup>。第 2 车型为两轴货车,与 Fafard 等采用的车辆参数一致<sup>[28]</sup>。第 4 车型为小汽车,各车型的详细参数见文献<sup>[29]</sup>。第 2~4 车型为两轴汽车,其有限元模型如图 2 所示。第 1 车型为五轴汽车,有限元模型如图 3 所示。

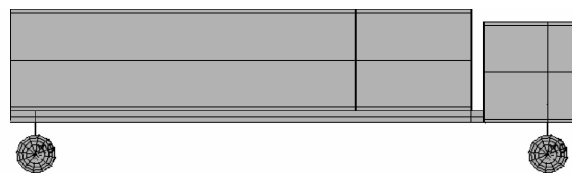


图 2 二轴汽车车辆有限元模型

Fig. 2 Finite element model of two-axes vehicle

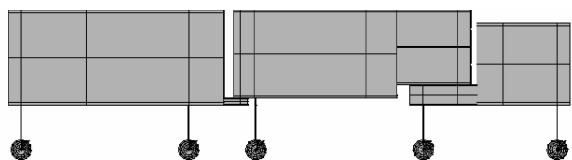


图 3 五轴大货车车辆有限元模型

Fig. 3 Finite element model of five-axes truck

### 1.3 汽车车流模型

汽车车流考虑如下 3 种状态:①自由流,最大车速 80 km/h,道路利用率低,车辆运行不受前后车干扰,变道、超车自由;②密集流,最大车速 60 km/h,道路利用率高,车辆逐渐处于跟车状态,但变道、超车自由;③拥挤流,最大车速 40 km/h,流量仍较高,车辆跟车行驶,超车困难。采用 Xu 等的方法将车道中的相邻车辆的间距看作泊松过程<sup>[30]</sup>,参考周鸣的研究获取本桥车流量<sup>[31]</sup>,参考王硕得到上海地区各车道各类车型在总流量的比例(车型 1:车型 2:车型 3:车型 4)为 0.008:0.118:0.220:0.654<sup>[32]</sup>,并利用郝媛等的研究确定稳态交通流的车速与车流密度关系<sup>[33]</sup>。根据上述文献,得到上海长江大桥随机车流模拟结果如图 4~图 6 所示,各车道车流量和车速如表 1 所示。

### 1.4 计入温度变形的轨面和路面不平顺

轨道不平顺参考美国六级谱模拟空间样本。为考虑温度变形对列车走行性影响,将在年温差 30 ℃ 下的轨道变形值进行样条插值,然后与轨道不平顺

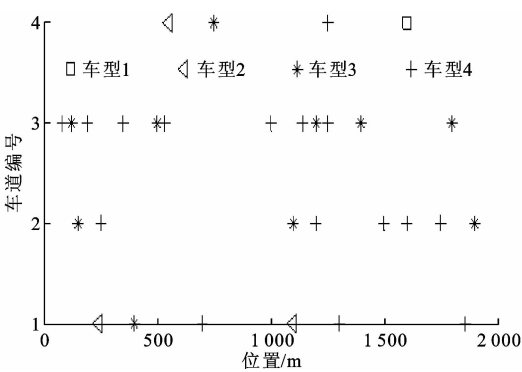


图 4 自由流  
Fig. 4 Free flow

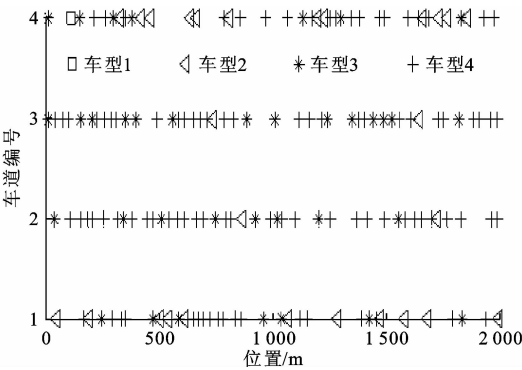


图 5 密集流  
Fig. 5 Dense flow

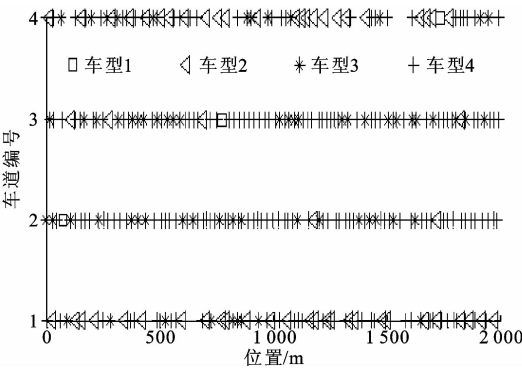


图 6 拥挤流  
Fig. 6 Congested flow

表 1 各车道车流量和车速汇总结果

Tab. 1 Summary results of traffic flow and vehicle speed of each lane

状态	车流量/ (veh · h <sup>-1</sup> )	车速/ (km · h <sup>-1</sup> )	内外车道 车流量比	内外车道 车速比
自由流	667	80	0.4 : 0.6	1.0 : 1.2
密集流	2 800	60	0.4 : 0.6	1.0 : 1.2
拥挤流	2 467	40	0.4 : 0.6	1.0 : 1.2

注:①车流量为单向 2 车道总车流量;②车速为最大车速,即车道 2 车速;③内外车道车流量比、车速比均为车道 1 : 车道 2。  
叠加,得到轨面不平顺如图 7 所示。

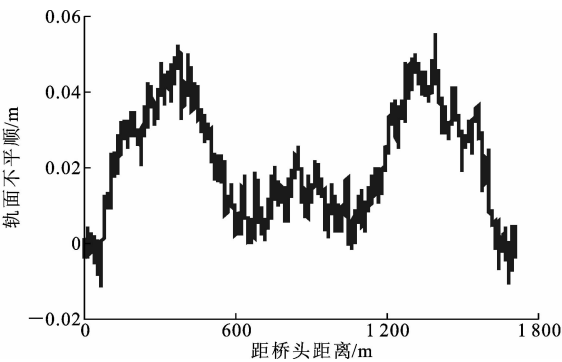


图 7 轨面不平顺样本  
Fig. 7 Track irregularity samples

公路路面不平顺空间样本按文献[34]中公路谱模拟,同样,叠加上年温差 30 ℃ 下的桥梁变形得到路面不平顺,如图 8 所示。

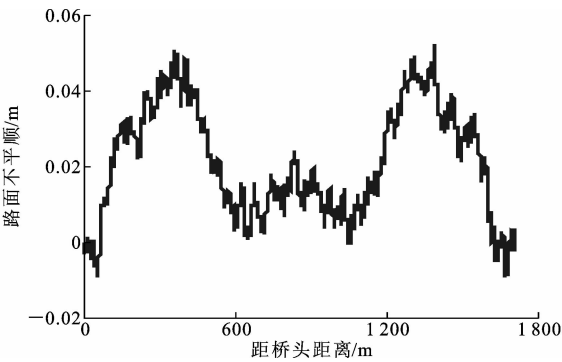


图 8 路面不平顺样本  
Fig. 8 Road irregularity samples

1.5 脉动风场模拟

作用在桥梁和列车上的风荷载分为静风力、抖振力和自激力,本文研究不计自激力的影响。风速时程可以是实测曲线,当风速不易得到时,也可以根据随机过程理论从统计风速功率谱模拟产生。本文所采用的脉动风谱依据中国《公路桥梁抗风设计规范》(JTG/T D60-01—2004)。高度  $z$  处平均风速为  $U(z)$  时的水平和竖向脉动风功率谱密度函数  $S_u(n)$ 、 $S_w(n)$  为

$$\begin{cases} S_u(n) = \frac{200f(z)u_*^2}{n[1+50f(z)]^{5/3}} \\ S_w(n) = \frac{6f(z)u_*^2}{n[1+4f(z)]^2} \end{cases} \quad (2)$$

$$u_* = \frac{KU(z)}{\ln((z-Z_d)/Z_0)} \quad (3)$$

$$Z_d = \bar{H} - Z_0/K \quad (4)$$

式中:参数  $f(z) = nz/U(z)$ ;  $n$  为风的频率;  $u_*$  为摩阻风速(亦称剪切风速);  $K$  为量纲为一的系数,  $K \approx 0.4$ ;  $\bar{H}$  为周围建筑物的平均高度;  $Z_0$  为地面粗糙高

度; $Z_d$  为零平面高度。

1.6 车-桥耦合模型

在运用拟力法<sup>[25]</sup>处理非线性右端项后,对车、桥分别建立运动方程,并运用模态叠加原理,得到左端项分离、右端项相互耦合的系统运动方程为

$$\begin{cases} \ddot{q}_v + 2\xi_v\omega_v\dot{q}_v + \omega_v^2q_v = f_v(q_v, \dot{q}_v, \ddot{q}_v, q_b, \dot{q}_b) \\ \ddot{q}_b + 2\xi_b\omega_b\dot{q}_b + \omega_b^2q_b = f_b(q_v, \dot{q}_v, \ddot{q}_v, q_b, \dot{q}_b) \end{cases} \quad (5)$$

式中: $q_v$ 、 $q_b$  分别为车辆和桥梁子系统模态坐标向量; $\xi_v$ 、 $\xi_b$  分别为车辆和桥梁子系统模态阻尼矩阵; $\omega_v$ 、 $\omega_b$  分别为车辆和桥梁子系统各阶模态对应的特征值矩阵; $f_v(\cdot)$ 、 $f_b(\cdot)$  分别为作用在车辆和桥梁子系统上的模态广义力,它是待求模态坐标响应的函数,由桥梁响应、车辆响应、风荷载及不平顺激励共同确定。

式(2)的左端项是解耦的,但其右端项的计算依赖于当前时刻待求车辆和桥梁响应量。这导致在某一时刻右端项的值是未知的,因此,都需要通过迭代计算使得初始假定的右端项逐步逼近真实的右端项。随机车流的每辆汽车和每节列车车辆均采用此车-桥耦合方程,见式(5)。仅所承受的轮轨力和外荷载不同,列车考虑横向的风荷载、竖向的轮轨力,汽车考虑轮胎与地面的竖向力激励。

2 列车走行性案例分析

上海长江大桥为双塔双索面分离式钢箱梁斜拉桥,塔梁横向设置限位装置,全长 1 430 m,主塔为变截面人字形桥塔,斜拉索采用双索面布置形式,全桥共 192 根斜拉索,如图 9 所示。该桥拟改建为公轨合建形式后,公路交通为双向 4 车道,轨道交通布置于桥面两侧。

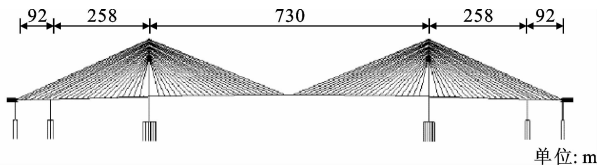


图 9 主桥结构总体布置

Fig. 9 General layout of main bridge

桥梁采用空间杆系有限元分析模型,如图 10 所示。斜拉索按两端铰接的空间杆单元建模,以弹性模量折减的方法考虑了缆索垂度的非线性影响,主塔、桥墩和桩基础均按其几何形状划分成梁单元,主梁为宽扁平箱梁,建模时采用双主梁结构模拟,为考虑引桥对主桥影响,在主桥两端设立两跨 70 m 引桥,全桥共划分 3 356 个单元,3 082 个节点。

在考虑索力影响的条件下,使用有限元软件

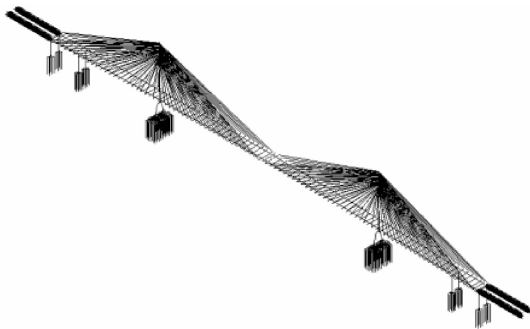


图 10 桥梁有限元模型

Fig. 10 Finite element model of bridge

ANSYS 计算得到的结构前 6 阶自振频率及振型,如表 2 所示。由表 2 可知,结构整体频率较低,容易发生较大振幅的风致振动。结构的阻尼采用瑞利阻尼,横向、竖向基频对应的阻尼比取 0.5%。

表 2 桥梁自振频率及振型

Tab. 2 Natural frequencies and modes shapes of bridge

阶次	频率/Hz	振型特点
第 1 阶	0.076	主梁纵飘+主塔纵向弯曲
第 2 阶	0.198	主梁对称一阶横弯
第 3 阶	0.241	主梁对称一阶竖弯
第 4 阶	0.246	两主塔同向横弯
第 5 阶	0.248	两主塔反向横弯
第 6 阶	0.377	主梁反对称竖弯

2.1 无风下多荷载因素的影响

在列车(定员)车速为 80 km/h,风速为 0 m/s 下,考虑年温差 30 ℃、不平顺、桥梁振动和汽车车流对列车走行性影响,车流类型分别为无汽车车流、自由流、密集流、拥挤流 4 种类型。计算得到响应结果如表 3 所示。

表 3 各车流类型下车辆响应结果

Tab. 3 Vehicle response results of each traffic type

荷载类型	车体竖向加速度/ ( $m \cdot s^{-2}$ )	车体横向加速度/ ( $m \cdot s^{-2}$ )	轮对减载率	跨中竖向挠跨比
①	0.03	0.00	0.03	
②	0.29	0.61	0.11	
①②	0.29	0.61	0.14	
①②③	0.29	0.61	0.14	1/514
①②③④	0.29	0.62	0.11	1/437
①②③⑤	0.30	0.61	0.11	1/467
①②③⑥	0.29	0.61	0.11	1/435

注:①为仅考虑温度,②为仅考虑不平顺,③为考虑桥梁振动,④为汽车自由流,⑤为汽车密集流,⑥为汽车拥挤流。

在仅考虑温度时,列车最大竖向加速度出现在列车刚入主桥时,其车体竖向加速度时程如图 11 所

示,此时的梁端转角为 0.015%;另外,从表 3 中可知,年温差和汽车车流引起的桥梁变形对列车加速度和轮对减载率的影响不明显。在下文的研究中,选取汽车密集流作为随机汽车荷载进行效应叠加考虑。

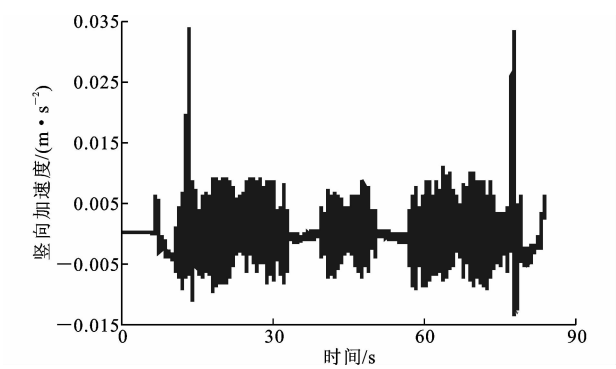


图 11 列车竖向加速度时程

Fig. 11 Time history curve for vertical acceleration of train-body

2.2 风荷载的影响

文献[17]在考虑桥梁和列车的三分力系数时明确地提出了双车在交会时,有明显的遮风效应,所以必须考虑运行方式对列车走行性的影响。本节在列车车速 80 km/h 下,设立 0、5、10、15、20、25、30 m/s 七档平均风速,分别计算列车在单开、对开时迎风侧、背风侧的动力响应。列车的轮对横向力、脱轨系数如图 12、图 13 所示。

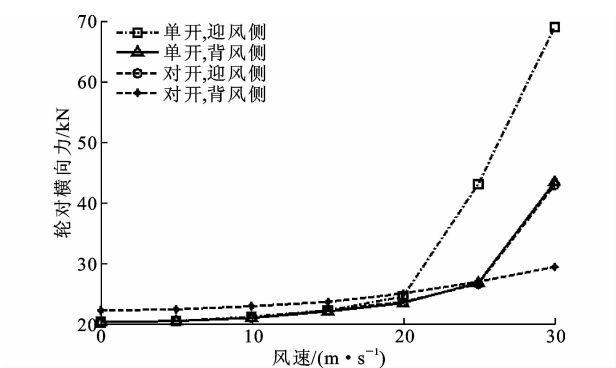


图 12 不同运行方式下的轮对横向力

Fig. 12 Lateral force of wheel under different operation modes

从图 12、图 13 可知:列车轮对横向力、脱轨系数均随风速增大而增大;在低风速下,运行方式对列车动力响应影响较小,在较高风速下,单开迎风侧列车响应值较大;对于车体横向加速度、竖向加速度、轮对竖向力等影响规律与轮对横向力、脱轨系数一致。所以,在下文极限状况分析中,均采用单线列车迎风侧行驶的运行方式。

2.3 极限状况

由上述分析可知,在考虑实际因素影响下,计入

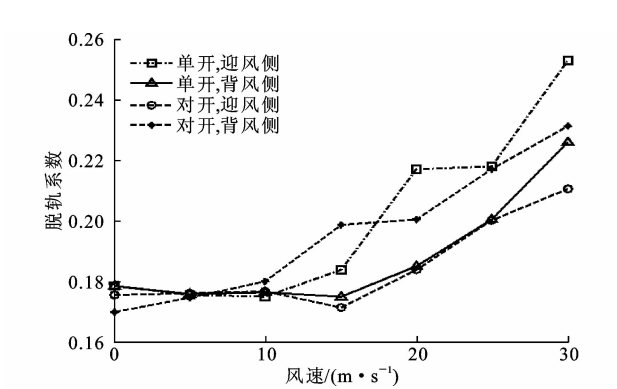


图 13 不同运行方式下的脱轨系数

Fig. 13 Derailment coefficients under different operation modes

年温差 30℃、汽车密集流后,着重考虑风速、车速对列车走行性的影响。在分别考虑列车空员、定员、满员下,设立 60、70、80、90 km/h 四档平均车速以及 20、25、30 m/s 三档风速,进行组合设立工况。列车空员、定员、满员的轴重信息见表 4。

表 4 不同车型轮对横向力限值

Tab. 4 Lateral force limits of different vehicle types 10<sup>4</sup> N

车型		轴重	轮对横向力限值
拖车	空车	4.120	3.134
	定员	5.944	3.684
	满员	6.394	3.824
机车	空车	4.484	3.254
	定员	6.284	3.784
	满员	6.764	3.934

综合结果表明,轮对横向力为列车走行性的控制指标,故下文给出了空员、定员、满员 3 种情况下的最不利车体响应,如图 14~图 18 所示,由于风速较大时,车体走行性主要受风荷载影响,本文并给出关键的时程图,见图 17~图 19,其中安全性限值参照《铁道车辆动力学性能评定和试验鉴定规范》(GB/T 5599—1985)和文献[35]。

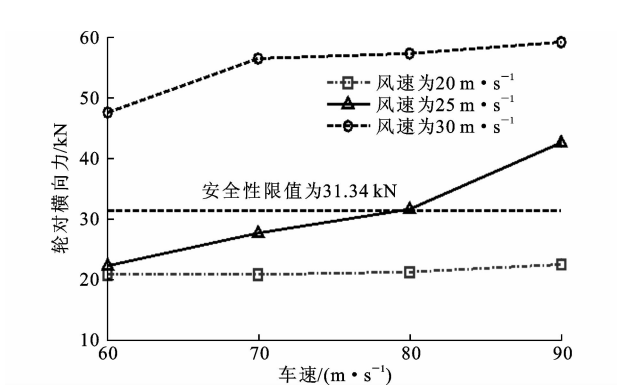


图 14 不同风速下的轮对横向力(空员)

Fig. 14 Lateral force of wheel under different wind speeds (empty car)

从图 14 可知:风速是影响列车轮对横向力响应的主要因素,风速越大,响应值越大;在较低风速下,车速对轮对横向力影响较小。在列车空员状态下,当风速为 25 m/s、车速为 80 km/h 时达到舒适度临界值,其列车轮对横向力时程如图 17 所示。分析表明,轮对横向力最大值与风荷载下主桥的横向振动有关。

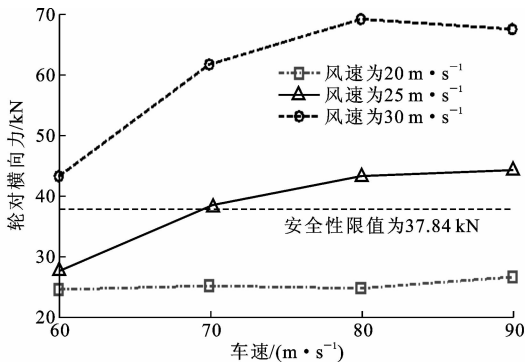


图 15 不同风速下的轮对横向力(定员)  
Fig. 15 Lateral force of wheel under different wind speeds (rated capacity)

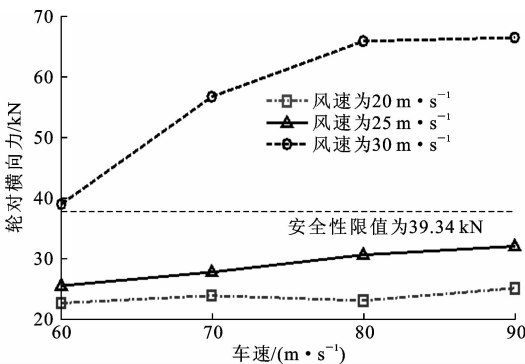


图 16 不同风速下的轮对横向力(满员)  
Fig. 16 Lateral force of wheel under different wind speeds (full capacity)

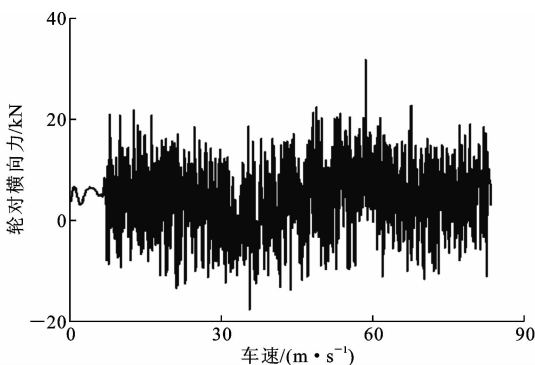


图 17 轮对横向力时程(风速 25 m·s<sup>-1</sup>、车速 80 km·h<sup>-1</sup>)  
Fig. 17 Lateral force time history curve of wheel (wind speed 25 m·s<sup>-1</sup>, vehicle speed 80 km·h<sup>-1</sup>)  
在列车定员状态下,当风速为 25 m/s、车速为 70 km/h 时达到安全性临界值,其轮对横向力时程

如图 18 所示。

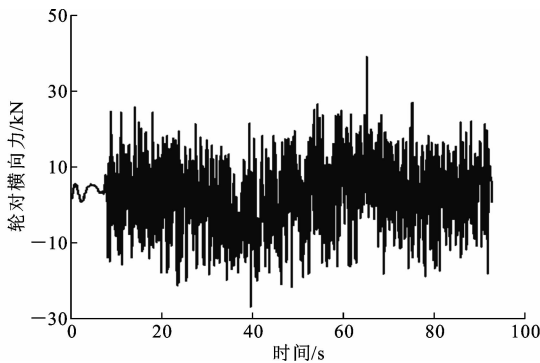


图 18 轮对横向力时程(风速 25 m·s<sup>-1</sup>、车速 70 km·h<sup>-1</sup>)  
Fig. 17 Lateral force time history curve of wheel (wind speed 25 m·s<sup>-1</sup>, vehicle speed 70 km·h<sup>-1</sup>)

在列车满员状态下,当风速为 30 m/s、车速为 60 km/h 时轮对横向力达到安全性临界值其时程如图 19 所示,此时轮对最大脱轨系数为 0.57,轮对减载率为 0.16,均未达到规范限值。

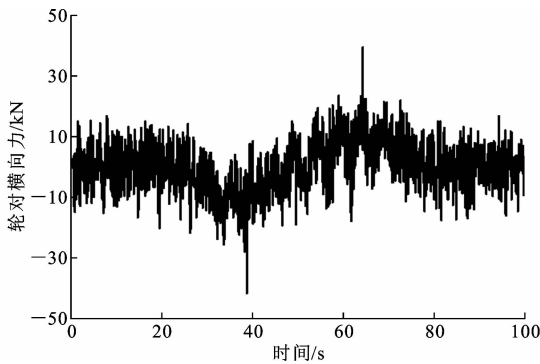


图 19 轮对横向力时程(风速 30 m·s<sup>-1</sup>、车速 60 km·h<sup>-1</sup>)  
Fig. 19 Lateral force time history curve of wheel (wind speed 30 m·s<sup>-1</sup>, vehicle speed 60 km·h<sup>-1</sup>)

综合图 14~图 19 可知,在空员、定员、满员的最不利状态下可得到列车安全性达到限值的临界工况,分别是列车在定员状态下风速为 25 m/s、车速为 70 km/h 和风速为 20 m/s、车速为 90 km/h,且上海长江大桥的列车运营车速不高于 90 km/h,故据此得到行车管理准则如表 5 所示。

表 5 不同风速条件下行车管理准则

已知风速的车速标准		已知车速的风速标准	
风速/(m·s <sup>-1</sup> )	车速/(km·h <sup>-1</sup> )	车速/(km·h <sup>-1</sup> )	风速/(m·s <sup>-1</sup> )
>25	封闭轨道交通		
20~25	<70	70~90	≤20
<20	可达设计车速 90	<70	≤25

### 3 结 语

(1)上海长江大桥虽然跨度较大,但年温差和汽

车引起的梁端转角较小,这 2 种作用对列车动力响应的影 响不明显。

(2)风荷载是影响列车安全性和舒适性的控制因素;当风速较高时,运行方式对列车走行性有较大影响,单线列车迎风侧行驶为最不利运行方式。

(3)考虑多荷载组合下的极限情况,轮对横向力是车体响应的最不利指标,此时风荷载对列车走行性起控制作用。

(4)建议的上海长江大桥行车管理准则为:当风速小于 20 m/s 时,最高允许运营车速可达到设计车速 90 km/h;当风速大于 20 m/s 且不超过 25 m/s 时,运营车速应小于 70 km/h;当风速超过 25 m/s 时,应当封闭轨道交通。

(5)本文仅考虑了列车和桥梁的风力特性,由于缺乏汽车相关的三分力系数,也未考察汽车的运行安全性与舒适性,后续为了尽可能模拟真实的风场情况,应考虑随机汽车车流对风场的影响。

## 参考文献:

## References:

- [1] LI Yong-le, QIANG Shi-zhong, LIAO Hai-li, et al. Dynamic of wind-rail vehicle-bridge systems [J]. Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2005, 93: 483-507.
- [2] 郭向荣, 曾庆元. 京沪高速铁路南京长江斜拉桥方案行车临界风速分析 [J]. 铁道学报, 2001, 23(5): 75-80.  
GUO Xiang-rong, ZENG Qing-yuan. Analysis of critical wind speed for running trains on a schemed Yangtze River Bridge at Nanjing on Jing-hu High Speed Railway Line [J]. Journal of the China Railway Society, 2001, 23(5): 75-80.
- [3] 刘德军, 李小珍, 马松华, 等. 沪通长江大桥主航道桥风-车-轨-桥耦合振动研究 [J]. 桥梁建设, 2015, 45(6): 24-29.  
LIU De-jun, LI Xiao-zhen, MA Song-hua, et al. Study of coupling vibration of wind-train-track-bridge system for main ship channel bridge of Hutong Changjiang River Bridge [J]. Bridge Construction, 2015, 45(6): 24-29.
- [4] DIANA G, CHELI F. Dynamics interaction of railway systems with large bridge [J]. Vehicle System Dynamics, 1989, 18(1/2/3): 71-106.
- [5] 王荣辉, 郭向荣, 曾庆元. 高速列车-钢桁架梁桥系统横向振动随机分析 [J]. 铁道学报, 1996, 18(1): 90-95.

WANG Rong-hui, GUO Xiang-rong, ZENG Qing-yuan. Transvers random vibration analysis for a system of high speed train-steel truss bridge [J]. Journal of the China Railway Society, 1996, 18(1): 90-95.

- [6] 曾庆元, 杨毅, 骆宁安, 等. 列车-桥梁时变系统的横向振动分析 [J]. 铁道学报, 1991, 13(2): 38-46.  
ZENG Qin-yuan, YANG Yi, LUO Ning-an, et al. Lateral vibration analysis of train-bridge time varying system [J]. Journal of the China Railway Society, 1991, 13(2): 38-46.
- [7] 夏禾, 阎贵平, 陈英俊. 列车-斜拉桥系统在风载作用下的动力响应 [J]. 北京交通大学学报, 1995, 19(2): 131-136.  
XIA He, YAN Gui-ping, CHEN Ying-jun. Dynamic responses of train and cable-stayed bridge system under wind action [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 1995, 19(2): 131-136.
- [8] CHEN S R. Dynamic performance of bridges and vehicles under strong wind [D]. Louisiana: Louisiana State University, 2004.
- [9] CAI C S, CHEN S R. Framework of vehicle-bridge-wind dynamic analysis [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2004, 92(7/8): 579-607.
- [10] 韩万水, 赵越, 刘焕举, 等. 风-车-桥耦合振动研究现状及发展趋势 [J]. 中国公路学报, 2018, 31(7): 1-23.  
HAN Wan-shui, ZHAO Yue, LIU Huan-ju, et al. Research and development trends of wind-vehicle-bridge coupling vibration systems [J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(7): 1-23.
- [11] 韩万水, 武隽, 马麟, 等. 基于微观交通流模型的风-车-桥系统高真实度模拟 [J]. 中国公路学报, 2015, 28(11): 37-45.  
HAN Wan-shui, WU Jun, MA Lin, et al. High-fidelity simulation of wind-vehicle-bridge system based on microscopic traffic flow model [J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(11): 37-45.
- [12] WU J. Wind-induced performance of long-span bridge with modified cross-section profiles by stochastic traffic [J]. Engineering Structures, 2012, 41: 464-476.
- [13] HAN Y, LIU S, HU J X, et al. Experimental study on aerodynamic derivatives of a bridge cross-section under different traffic flows [J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2014(133): 250-262.
- [14] 李永乐, 强士中, 廖海黎. 风-车-桥系统空间耦合振动研究 [J]. 土木工程学报, 2005, 38(7): 61-64, 70.



- LI Yong-le, QIANG Shi-zhong, LIAO Hai-li. 3-D coupled vibration of wind-vehicle-bridge system[J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(7): 61-64, 70.
- [15] 李永乐, 强士中. 风-车-桥系统非线性空间耦合振动研究[J]. 中国铁道科学, 2004, 25(3): 137-138, 141.
- LI Yong-le, QIANG Shi-zhong. Nonlinear three-dimensional coupling vibration of wind-vehicle-bridge system [J]. China Railway Science, 2004, 25(3): 137-138, 141.
- [16] 李永乐, 向活跃, 强士中. 风-列车-桥系统耦合振动研究综述[J]. 中国公路学报, 2018, 31(7): 24-37.
- LI Yong-le, XIANG Huo-yue, QIANG Shi-zhong. Review on coupling vibration of wind-vehicle-bridge systems[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(7): 24-37.
- [17] 李永乐, 朱佳琪, 赵凯, 等. 上海长江大桥风-轨道车辆-桥耦合振动及抗风行车准则研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(9): 108-114.
- LI Yong-le, ZHU Jia-qi, ZHAO Kai, et al. Couple vibration of wind-rail vehicle-bridge system for Shanghai Yangtze River Bridge and the wind-resistant criterion of running trains[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(9): 108-114.
- [18] 徐昕宇, 李永乐, 陈科宇, 等. 多线铁路桥双车交会的风-车-桥耦合振动研究[J]. 桥梁建设, 2017, 47(1): 41-46.
- XU Xin-yu, LI Yong-le, CHEN Ke-yu, et al. Study of wind-train-bridge coupling vibration of multi-track railway bridge under meeting of two trains[J]. Bridge Construction, 2017, 47(1): 41-46.
- [19] 郭向荣, 何玮, 朱志辉, 等. 横风作用下货物列车通过大跨度铁路斜拉桥的走行安全性研究[J]. 中国铁道科学, 2016, 37(2): 41-47.
- GUO Xiang-rong, HE Wei, ZHU Zhi-hui, et al. Running safety of freight train passing long-span cable-stayed railway bridge under cross wind [J]. China Railway Science, 2016, 37(2): 41-47.
- [20] 李小珍, 肖军, 刘德军, 等. 附加变形对沪通长江大桥行车性能影响[J]. 铁道工程学报, 2016, 33(11): 63-68.
- LI Xiao-zhen, XIAO Jun, LIU De-jun, et al. Performance influence of train driving in Shanghai-Nantong Yangtze River Bridge considering additional deformation [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2016, 33(11): 63-68.
- [21] 张骞, 高芒芒, 于梦阁, 等. 沪通长江大桥风-车-桥动力响应研究[J]. 中国铁道科学, 2018, 39(1): 31-38.
- ZHANG Qian, GAO Mang-mang, YU Meng-ge, et al. Reaearch on wind-train-bridge dynamic response of main bridge of Shanghai-Naitong Yangtze River Bridge[J]. China Railway Science, 2018, 39(1): 31-38.
- [22] 曾源, 卢永成, 蒋彦征, 等. 上海长江大桥主航道斜拉桥分离式钢箱梁设计[J]. 世界桥梁, 2009(增1): 18-21.
- ZENG Yuan, LU Yong-cheng, JIANG Yan-zheng, et al. Design of separated steel box girders for main shipping channel cable-stayed bridge of Shanghai Changjiang River Bridge [J]. World Bridges, 2009 (S1): 18-21.
- [23] 邵长宇, 黄少文, 卢永成. 上海长江大桥总体设计与构思[J]. 世界桥梁, 2009(增1): 6-9, 26.
- SHAO Chang-yu, HUANG Shao-wen, LU Yong-cheng. Overall design and design consideration of Shanghai Changjiang River Bridge[J]. World Bridges, 2009(S1): 6-9, 26.
- [24] 卢永成, 王天华, 张元凯. 上海长江大桥公轨合建桥梁设计标准与措施[J]. 城市道桥与防洪, 2008(2): 12-15.
- LU Yong-cheng, WANG Tian-hua, ZHANG Yuan-kai. Design standard and measure of highway and railway building jointly of Shanghai Changjiang River Bridge[J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2008(2): 12-15.
- [25] 李奇. 车辆-桥梁/轨道系统耦合振动精细分析: 理论及应用[D]. 上海: 同济大学, 2008.
- LI Qi. Refined analysis of vehicle-bridge/track dynamic interaction: Theory and applications [D]. Shanghai: Tongji University, 2008.
- [26] GUO W H, XU Y L. Fully computerized approach to study cable-stayed bridge-vehicle interaction [J]. Journal of Sound and Vibration, 2001, 248(4): 745-761.
- [27] XU Y L, GUO W H. Dynamic analysis of coupled road vehicle and cable-stayed bridge systems under turbulent wind[J]. Engineering Structures, 2003, 25(4): 473-486.
- [28] FAFARD M, BENNUR M, SAVARD M. A genneral multi-axle vehicle model to study the bridge-vehicle interaction[J]. Engineering Computations, 1997, 14(5): 491.
- [29] 于贞波. 人-车混合通行的外倾式钢系杆拱桥桥上行人舒适度研究[D]. 上海: 同济大学, 2015.