

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.214



车-桥耦合振动 2020 年度研究进展

李小珍, 王铭, 晋智斌, 朱艳, 邱晓为

(西南交通大学 土木工程学院, 成都 610031)

摘要:车-桥耦合振动的主要研究内容包括轨道不平顺作用下的车-桥耦合振动及随机振动、风-车-桥耦合振动、地震-车-桥耦合振动、新型轨道车辆-轨道梁耦合振动等方面。当前, 中国铁路桥梁建设面临更大跨度、高速度、高舒适度等新的挑战, 在风荷载及列车荷载等外部激励作用下, 车-桥间相互作用越发显著。如何准确预测实际复杂风环境下车-桥耦合系统动力响应及高速列车的行车走行性, 并为桥梁设计、线路运营、维护及管理提供技术指导, 成为 2020 年度车-桥耦合振动领域的研究热点和发展趋势。

关键词:铁路桥梁; 车-桥耦合振动; 研究进展

中图分类号: U446 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2022)01-0135-07

State-of-the-art review of vehicle-bridge coupling vibration in 2020

LI Xiaozhen, WANG Ming, JIN Zhibin, ZHU Yan, QIU Xiaowei

(School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, P. R. China)

Abstract: The main research contents of vehicle-bridge coupled vibration include vehicle-bridge coupled vibration and random vibration under the effect of track irregularity, wind-vehicle-bridge coupled vibration, earthquake-vehicle-bridge coupled vibration, new rail vehicle-track beam coupling Vibration and other aspects. At present, the construction of railway bridges in China is facing new challenges such as larger spans, high speeds, and high comfort levels. Under external excitations such as wind loads and train loads, the vehicle-bridge interaction is becoming more and more significant. How to accurately predict the dynamic response of the vehicle-bridge coupling system and the running performance of high-speed trains in the actual complex wind environment, and provide technical guidance for bridge design, line operation, maintenance and management, and become a research hotspot and development trends in the field of vehicle-bridge coupled vibration in 2020.

Keywords: railway bridge; vehicle-bridge coupled vibration; research progress

1 列车-桥梁系统风场模拟

开展风-车-桥耦合振动分析的风场模拟主要涉及桥梁结构风场模拟及列车风场模拟, 从风场模拟方法、桥址区风场模拟及移动列车风场模拟三个方面开展回顾。

1.1 风场模拟理论分析方法

在模拟分析方法方面, Pujari 等^[1]基于深度学习理论, 实现了长期记忆网络(LSTM), 提高了对风时间序列数据的处理效率; 周桐等^[2]采用 CDRFG 方法和被动模拟法生成大气边界层风场, 从统计特性、流场结构和计算效率等方面进行了对比分析; 包芸等^[3]建立风场 LES 模拟的并行直接求解

方法, 其并行计算效率达到 90%; 刘芸等^[4]在 nV-1D 平稳过程的谱分解降维模型基础上引入双索引频率, 进一步给出了各态历经随机风场的降维模型, 利用快速 Fourier 变换(FFT), 模拟了某大跨度桥梁水平向各态历经随机风场; Liu 等^[5]提出了一种改进的非高斯 LS 模型, 结合可控的非高斯随机变量, 以更精确的偏度和峰度模拟了目标非高斯速度分布。

1.2 桥址区风场监测及模拟

开展桥址区及桥梁风场模拟, 根据模拟方法不同, 可分为风场实测、风洞试验及数值模拟 3 个方面。在风场实测方面, 李永乐等^[6]以典型山区桥址为背景, 结合现场实测, 讨论了通过多种途径确定复合风速标准的可能性; 刘宗杰等^[7]对

收稿日期: 2021-08-05

基金项目: 国家自然科学基金(51878565)

作者简介: 李小珍(1970-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事风-车-桥耦合振动研究, E-mail: xzhli@swjtu.edu.cn.

荆岳长江大桥桥址风场特性进行监测,发现桥址平均风速的非平稳特性显著;李加武等^[8]以喇叭口河谷地形为研究对象,进行了为期 6 个月的现场实测,使用幂函数描述喇叭口河谷地形风剖面,为复杂地形下的风特性预测提供参考;Zhang 等^[9]观测了深切峡谷中包括平均、波动风特征,以及不同高度之间的连贯性在内的风特征参数,探明深切峡谷中测得的纵向、横向和垂直风的风能谱更适合 Karman 模型;Jing 等^[10]使用从位于山坡和底部的两个风塔获得的数据,研究了山谷风的特征,并提出了一个可以有效地描述垂直相干性的模型;汪磊等^[11]对某大跨悬索桥址的风特性进行了现场长期风观测,并在得到各样本的基础上对该桥进行了频域抖振响应分析;Zhou 等^[12]基于 6 年的风数据发现,桥梁现场的一般风表现出相对稳定的年度可重复性,且测得的风场参数与设计规范所建议的风场参数之间存在差异。

在风洞试验方面,王峰等^[13]通过地形模型风洞试验研究了峡谷地区桥位处的参数特性,分析了某峡谷地区不同风向来流时桥址处紊流强度和脉动风功率谱变化情况;Song 等^[14]研究了拟建的大跨度桥梁桥址的 Y 形山谷山区的风特征,从不同测试方向的结果分析了流入流场的影响;Zhang 等^[15]通过风洞试验的方法,对包括平均风向和湍流向在内的风向进行了研究,发现地形对风向的影响很大,主要风向通常与河流平行,且沿桥的风速和迎风角均不均匀。

在数值模拟方面,沈炼等^[16]基于 WRF 与 CFD 耦合模式对峡谷桥址风场进行精细化分析,得出了考虑脉动风速后的入口边界条件相比于无脉动入口风速其湍流特性与实测值吻合更好的结论;Chen 等^[17]在湘江大桥工地,采用了改进的边界过渡段(BTS)来减少地形模型中“人工悬崖”对山区地形上桥址风特征的影响;Xu 等^[18]使用进化功率谱密度(EPSP)以表征非平稳特征,改善了大跨度桥梁湍流风场的数值模拟。

1.3 移动列车风场模拟

在列车风场模拟方面,Su 等^[19]基于移动列车驱动系统测试了移动风场特性,并将实验结果与 Balzer 模型和 Cooper 模型的结果进行了比较;李小珍等^[20]利用多变量随机过程模拟,分别采用静止点脉动风谱模型以及基于相干函数推导得到的移动列车脉动风速谱,建立了高速铁路列车-桥梁联合系统的脉动风场模拟算法。该算法采用单双索引频率方法,通过显式分解代替 Cholesky 分解,利用 FFT 算法和频率截断技术对上述随机模拟算法进行了加速,极大地提高了风场的模拟效率。桥上静止点-列车联合风场模拟算例中的桥上静止点脉动风速谱及列车脉动风速谱拟合情况如图 1 所示。

2 列车-桥梁系统气动耦合机理

列车-桥梁系统气动参数测试直接关系到风-车-桥耦合系统的输入风荷载,对桥上移动列车的风致响应分析至关重要,国内外学者结合模型试验及数值模拟等多种方法,针对桥梁节段模型及列车气动参数测试进行了卓有成效的研究。

2.1 桥梁节段模型气动力

桥梁气动参数的测试通常基于桥梁节段模型风洞试验

获取。潘韬等^[21]通过风洞试验,研究超宽分体三箱梁的涡振性能以及不同形式风屏障、桥梁附属设施对其影响和设置槽间开孔盖板的气动措施对其改善效果;通过对某宽幅闭口箱梁悬索桥的节段风洞试验,童俊豪等^[22]得出该桥不会出现驰振的结论;李先进等^[23]以广东沿海强风区某在建中承式三主桁式大跨度钢拱桥为工程背景,通过风洞试验和理论分析,研究该桥梁施工状态和成桥状态风致响应特性;Ma 等^[24]以西侯门悬索桥为研究对象,对空气动力学系数和导纳进行了研究,充分揭示了双箱梁的空气动力学特性。

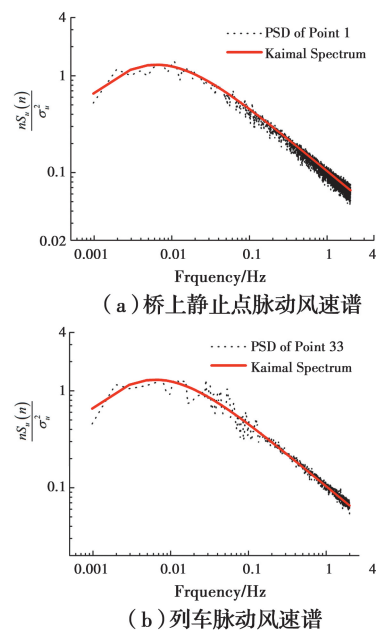


图 1 桥上静止点-列车联合风场模拟^[20]

2.2 列车模型气动参数

在列车气动特性测试方法方面,邹思敏等^[25]为研究高速列车在运营过程中的气动特性,开发了一套移动列车-桥梁风洞试验气动测试系统;Guo 等^[26]采用 DDES 方法,并结合风洞试验结果得出转向架的复杂性对高速列车模型在不同偏航角下的气动阻力和横摇力矩有显著影响;Li 等^[27]采用三种延迟分离涡模型对列车气动特性进行模拟,研究表明三种模拟均能较准确预测表面的压力系数,而其中剪切应力传输 $k-\omega$ 模型结果最精确;Wang 等^[28]采用 CFD 动网格技术模拟分析了不同基础结构物对移动列车气动参数的影响规律。

对列车气动力测试,He 等^[29]研究了桁架桥梁结构主要参数(包括桥梁迎风角、桁架坚固度比、桁架宽厚比等)对空气动力学的影响;张鹏等^[30]研究了桥梁防护墙及其结构参数对 CRH3 系列高速列车气动特性的影响;以金海大桥为研究背景,周旭等^[31]基于风洞试验,研究了公铁同层桥上列车横向布置对车桥系统气动特性的影响规律,并确定了列车轨道最优布置方案;Li 等^[32]采用风洞截面模型研究了横风作用下高速列车在流线型甲板的气动特性,发现高速列车模型的平均阻力和升力受风攻角影响显著;何佳俊等^[33]采用数值模拟方法,计算了 CRH3 型列车通过桥隧过渡段时受到的气动

力及车辆响应,结果表明,越靠近车头处的气动力突变越大。

受桥塔、风屏障遮蔽以及双车交汇等影响,桥面风环境及列车周身流场特性会发生突变,从而引起列车气动特性的突变效应,影响列车的运行平稳性和行车安全性。杨建新等^[34]通过数值模拟,研究了圆环形桥塔区行车风环境,研究发现桥塔周围存在明显的风速增大区域;袁涛等^[35]采用二维雷诺时均模型模拟了塔柱的气动干扰特性,研究发现塔柱截面的增大会导致上下游塔柱间气动干扰增大;李小珍等^[36]通过简支梁上移动列车风洞试验,研究了列车交会时气动特性的变化,结果表明,背风侧列车气动力在交汇时会发生突变,并采用公式拟合了交汇过程中气动力系数与偏航角的关系,如图 2 所示。

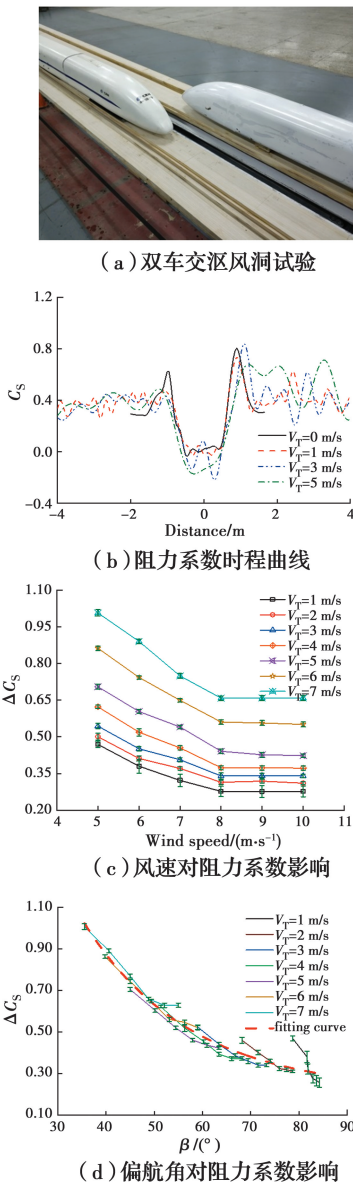


图 2 简支梁-移动列车风洞试验^[36]

3 风-车-桥耦合振动精细化模型

风-车-桥系统包含车辆系统动力学、桥梁结构动力学和与自然风有关的空气动力学问题,是一门多学科交叉的研究

课题。学者们针对不同的分析问题,建立了相应的分析模型,以指导列车的行车安全性及舒适性。Liu 等^[37-39]基于全尺寸模型试验和数值模拟研究了侧风作用下列车的振动特性及其气动力,并建立了半车振动-倾覆动力学分析模型,提出了列车倾覆系数的计算公式及列车安全行驶的风速阈值;Wang 等^[40]通过风-车-桥耦合振动分析发现,与轨道不平顺、桥梁振动相比,侧风作用是引起列车倾覆的主要原因,桥梁变形可以近似表达为列车自重作用下的静态变形,并提出了侧风作用下桥上移动列车倾覆危险性评估的简化分析框架。Montenegro 等^[41-42]采用风-车-桥耦合振动分析模型,并基于 CEN 离散阵风模型和随机脉动风模型,对侧风作用下列车运行安全性进行了分析,根据模拟结果提出了一种包含时、空相关特性的离散阵风模型,该模型可以应用于强风作用下不同桥上列车的行车安全性评价,其分析框架如图 3 所示。

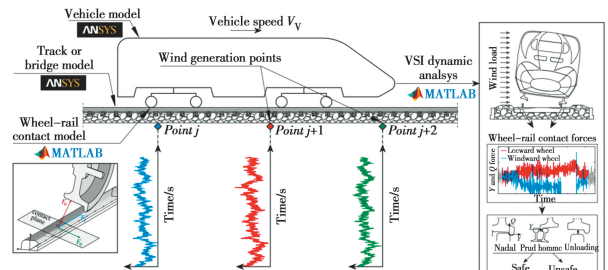


图 3 列车侧向安全性评估框架^[41]

随着计算机技术、有限元分析理论与多体系统动力学的发展,风-车辆-桥梁各子系统的精细化仿真分析及系统链接的实现成为了可能。韩艳等^[43-44]结合有限元软件 ANSYS 和多体动力学软件 SIMPACK,建立列车-轨道-桥梁三维多体系统模型,开展了非定常气动荷载对桥上列车行驶安全舒适性影响分析,其中,列车安全指数的最大值与桥上列车的行驶速度之间的关系如图 4 所示;为研究强风作用下交会列车的行车安全性问题,郭文华等^[45]采用有限元软件 ANSYS 和多体动力学软件 SIMPACK 联合建立了桥上列车交会三维动力分析模型,研究了侧风下列车在多跨简支梁桥上交会运行时的动力响应;崔圣爱等^[46]以平潭海峡的大小练岛水道斜拉桥作为工程对象,建立了列车和桥梁的气动模型和车-桥系统多体动力学模型,针对双线会车情况,仿真计算了横风作用下列车-桥梁系统的气动荷载和动力响应。

城市轨道交通近年来也得到快速的发展,使得风-车-桥耦合振动向新的领域拓展。郑晓龙等^[47]基于车-桥系统多体动力学模型,分析了不同风速激励下悬挂式单轨双线简支梁桥上列车交会的系统动力响应特性;李永乐等^[48]采用风-车-桥耦合振动分析方法,研究城市轨道交通专用桥的横向挠跨比限值,并基于车辆的行车性能评价桥梁的横向刚度,考查了车型、车辆安全性指标类型、不同桥型等因素的影响,为城市轨道交通专用桥的横向刚度指标的设定提供一定参考。

4 桥上列车防风措施

为保证大风环境及突变风场环境下列车的行车安全性

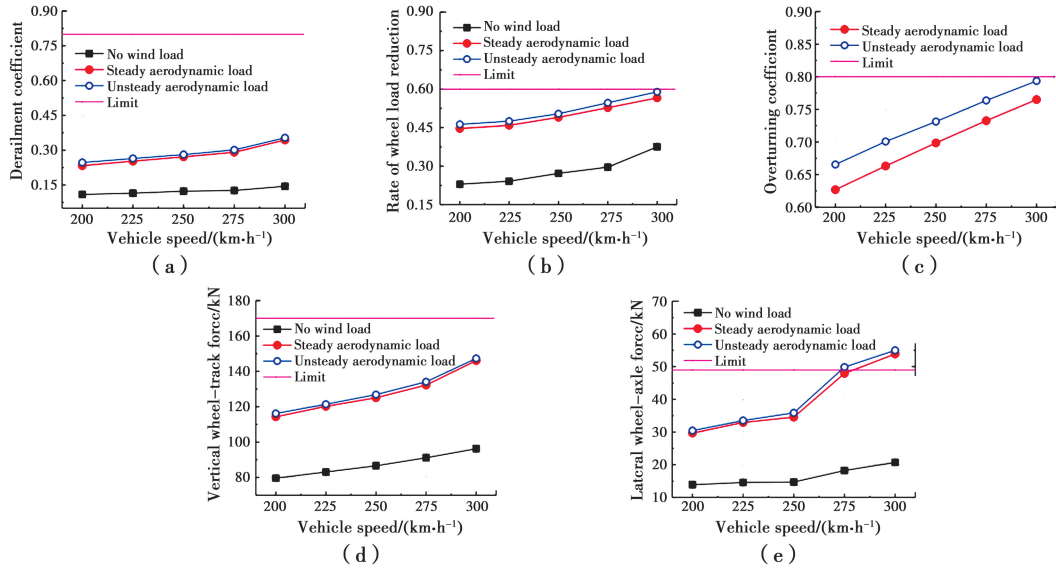


图 4 列车安全指数的最大值与桥上列车的行驶速度之间的关系^[44]

及舒适性,可通过布置风屏障等防风措施以减小列车的风致响应。风屏障的研究主要聚焦于风屏障的防风效果、风场分布以及对车辆气动特性和动力响应的影响。

Zhang 等^[49]以大渡河大桥为背景,开展了关于考虑风屏障典型特征对双箱梁桥面局部风特性影响的大型风洞试验研究,并与桁梁桥面风场特性做了对比,为高速列车安全性行驶提供了技术性参考;霍卿等^[50]基于三维数值模拟方法,开展了高速铁路桥梁挡风屏障遮蔽效应的研究;Gu 等^[51]采用风洞试验和数值模拟方法研究了高速铁路不同弯折型式波形风屏障的防风性能和流场特性;李小珍等^[52]为增加典型铁路基础结构风剖面评估精度,提高结构设计及行车安全性评价的可靠性,基于最小二乘法原理确定测点风速比,以变异

系数作为风速非一致性指标对不同测点高度下的风速比进行评价,提出了一种确定典型铁路基础结构风剖面等效风速比的方法。

强风作用下,当车辆进出风屏障区段时,由于风屏障的遮风效应,列车所受的风荷载存在突变,对列车动力响应会产生不利影响。徐昕宇等^[53]以高速铁路简支梁桥为研究对象,对不同透风率下车桥系统的气动性能进行风洞试验测试,基于风-车-桥耦合系统分析模型,研究了风屏障透风率对桥上列车走行性的影响;Yang 等^[54-55]、Deng 等^[56]施成华等^[57]建立了 CFD 数值模型和风-车-桥耦合系统分析模型,研究了侧风环境下隧道-桥梁-隧道线上高速列车的气动特性和行车安全指标的变化特性,如图 5 所示。

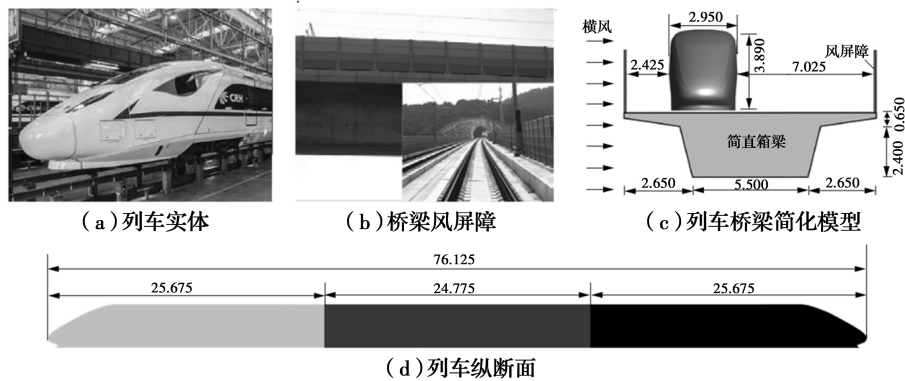


图 5 几何模型(单位:m)^[57]

当在强风区柔性大跨桥梁上设置风屏障时,桥梁原有的气动外形同样会发生改变,因其自身刚度小、跨度大等特点,其气动稳定性对结构外形极其敏感,喻宝金等^[58]采用节段模型风洞试验手段,对比研究了条形孔风屏障和圆形孔风屏障对扁平箱梁气动稳定性的影响;潘韬等^[21]以甬舟铁路西堠门公铁两用大桥(斜拉-悬索协作体系桥)为背景,通过节段模型风洞试验,研究了主梁的涡振性能以及不同形式风屏障、桥梁附属设施对其影响。Yang 等^[59]以某超长跨径悬索桥为

背景,基于风洞节段模型试验和理论分析,研究了风屏障对不同纵横比箱梁颤振性能的影响;为降低风屏障对桥梁自身抗风性能的影响,Dai 等^[60]提出了一种自适应 GFRP 铁路桥梁防风结构。

5 研究热点与展望

笔者比较系统地回顾了国内外有关高速列车风环境的模拟、气动特性测试、风-车-桥耦合振动分析及防风措施等

方面对侧风作用下高铁桥上列车行车安全性的影响研究。尽管近年来上述各方面的研究得到了长足的发展,但受铁路桥梁的高速发展及气动参数测试技术的限制,仍需在以下几个方面开展更进一步的研究工作,以确保恶劣风环境下列车的行车安全性及列车的全天候运营。

1)移动列车气动参数测试技术

当前桥上移动列车的气动参数测试技术并不成熟,难以模拟高速运动过程中车体周围流场的实际变化形态,因此需进一步提升气动参数测试技术以真实把握移动列车气动特性。

2)参数不确定性影响分析

实际风场中存在众多的参数不确定性和突变因素,需结合现场实测的方式优化仿真模型中的风场模型,尽可能地还原真实的风场信息,以反映真实的列车走行性。

3)大跨度桥梁附加轨道不平顺影响分析

大跨度铁路桥梁在温度、风及列车等荷载作用下易产生较大的变形,对高速铁路列车走行性而言,除需要考虑列车与桥梁间耦合振动影响之外,还需考虑桥梁结构受载静态变形及动态变形引起的附加轨道不平顺对列车走行性的影响。

参考文献:

- [1] PUJARI K N, MIRIYALA S S, MITTAL P, et al. Optimal Long Short Term Memory Networks for long-term forecasting of real wind characteristics [J]. IFAC-PapersOnLine, 2020, 53(1): 648-653.
- [2] 周桐, 闫渤文, 杨庆山, 等. 大气边界层大涡模拟入口湍流生成方法研究[J]. 工程力学, 2020, 37(7): 68-76.
- [3] 包芸, 习令楚. 高雷诺数湍流风场大涡模拟的并行直接求解方法[J]. 力学学报, 2020, 52(3): 656-662.
- [4] 刘芸, 何承高, 刘章军. 各态历经随机风场的降维模拟[J]. 应用力学学报, 2020, 37(5): 2079-2085, 2325.
- [5] LIU C, FU L, YANG D, et al. Non-Gaussian Lagrangian stochastic model for wind field simulation in the surface layer [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2020, 37(1): 90-104.
- [6] 李永乐, 喻济昇, 张明金, 等. 山区桥梁桥址区风特性及抗风关键技术[J]. 中国科学: 技术科学, 2021, 51(5): 530-542.
- [7] 刘宗杰, 祝志文, 陈魏, 等. 跨长江特大桥拉索涡激振动与风特性观测[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(7): 1760-1768.
- [8] 李加武, 徐润泽, 党嘉敏, 等. 喇叭口河谷地形基本风特性实测[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2020, 40(6): 47-56.
- [9] ZHANG J Y, ZHANG M J, LI Y L, et al. Comparison of wind characteristics at different heights of deep-cut canyon based on field measurement [J]. Advances in Structural Engineering, 2020, 23(2): 219-233.
- [10] JING H M, LIAO H L, MA C M, et al. Field measurement study of wind characteristics at different measuring positions in a mountainous valley [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2020, 112: 109991.
- [11] 汪磊, 张志田, 谭卜豪, 等. 实测与规范风谱下某悬索桥抖振响应定性比较[J]. 中外公路, 2020, 40(2): 67-73.
- [12] ZHOU Y, SUN L M, XIE M W. Wind characteristics at a long-span sea-crossing bridge site based on monitoring data [J]. Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control, 2020, 39(3): 453-469.
- [13] 王峰, 何晗欣, 白桦, 等. 峡谷地区桥位处风参数特性[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2020, 42(3): 351-357.
- [14] SONG J L, LI J W, FLAY R G J. Field measurements and wind tunnel investigation of wind characteristics at a bridge site in a Y-shaped valley [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2020, 202: 104199.
- [15] ZHANG M J, ZHANG J X, LI Y L, et al. Wind characteristics in the high-altitude difference at bridge site by wind tunnel tests [J]. Wind and Structures an International Journal, 2020, 30(6): 548-557.
- [16] 沈炼, 华旭刚, 韩艳, 等. 高精度入口边界的峡谷桥址风场数值模拟[J]. 中国公路学报, 2020, 33(7): 114-123.
- [17] CHEN X Y, LIU Z W, WANG X G, et al. Experimental and numerical investigation of wind characteristics over mountainous valley bridge site considering improved boundary transition sections [J]. Applied Sciences, 2020, 10(3): 751.
- [18] XU Z D, WANG H, ZHANG H, et al. Non-stationary turbulent wind field simulation of long-span bridges using the updated non-negative matrix factorization-based spectral representation method [J]. Applied Sciences, 2019, 9(24): 5506.
- [19] SU Y, LI M S, YANG Y, et al. Experimental investigation of turbulent fluctuation characteristics observed at a moving point under crossflows [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2020, 197: 104079.
- [20] ZOU Q Y, LI X Z, LI X X, et al. Simulation of fluctuating wind of high-speed vehicle-bridge united system [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Transport, 2021: 1-13.

- [21] 潘韬, 肖海珠, 赵林, 等. 大跨度桥梁超宽分体三箱梁抗风性能及控制措施研究[J]. 桥梁建设, 2020, 50 (Sup2): 29-35.
- [22] 童俊豪, 陈鑫. 某宽幅箱梁悬索桥气动特性节段模型风洞试验[J]. 广东公路交通, 2020, 46(4): 47-52.
- [23] 李先进, 卿仁杰, 朱强, 等. 三主桁式大跨度钢拱桥气动特性与风振性能研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(3): 628-636.
- [24] MA C M, PEI C, LIAO H L, et al. Field measurement and wind tunnel study of aerodynamic characteristics of twin-box girder [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2020, 202: 104209.
- [25] 邹思敏, 何旭辉, 王汉封, 等. 横风作用下高速列车-桥梁系统气动特性风洞试验[J]. 交通运输工程学报, 2020, 20(1): 132-139.
- [26] GUO Z J, LIU T H, CHEN Z W, et al. Aerodynamic influences of bogie's geometric complexity on high-speed trains under crosswind [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2020, 196: 104053.
- [27] LI T, DAI Z Y, ZHANG W H. Effect of RANS model on the aerodynamic characteristics of a train in crosswinds using DDES [J]. *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 2020, 122(2): 555-570.
- [28] WANG M, LI X Z, XIAO J, et al. Effects of infrastructure on the aerodynamic performance of a high-speed train [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 2021, 235(6): 679-689.
- [29] HE X H, ZUO T H, ZOU Y F, et al. Experimental study on aerodynamic characteristics of a high-speed train on viaducts in turbulent crosswinds [J]. *Journal of Central South University*, 2020, 27(8): 2465-2478.
- [30] 张鹏, 杜礼明. 高速列车气动特性对桥梁防护墙的分析[J]. 大连交通大学学报, 2020, 41(6): 35-40.
- [31] 周旭, 李的平, 何旭辉, 等. 公铁同层桥梁列车轨道优化布置风洞试验研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2020, 44(1): 126-129.
- [32] LI H, HE X H, WANG H F, et al. Aerodynamics of a scale model of a high-speed train on a streamlined deck in crosswinds [J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2019, 91: 102717.
- [33] 何佳俊, 向活跃, 龙俊廷等. 大风攻角下桥隧过渡段CRH3型列车气动特性和安全性分析[J/OL]. 西南交通大学学报, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1277.U.20200320.1138.004.html>.
- [34] 杨建新, 吴蕊恒, 倪志军, 等. 圆环形桥塔区域行车风环境数值模拟[J]. 公路, 2020, 65(7): 170-174.
- [35] 袁涛, 祝志文, 陈魏, 等. 增设观光电梯的超大跨桥梁塔柱风荷载与气动干扰特性[J]. 工业建筑, 2020, 50 (4): 138-144.
- [36] LI X Z, TAN Y L, QIU X W, et al. Wind tunnel measurement of aerodynamic characteristics of trains passing each other on a simply supported box girder bridge [J]. *Railway Engineering Science*, 2021, 29(2): 152-162.
- [37] LIU D R, TOMASINI G M, CHELI F, et al. Effect of aerodynamic force change caused by car-body rolling on train overturning safety under strong wind conditions [J]. *Vehicle System Dynamics*, 2020: 1-21.
- [38] LIU D R, MARITA TOMASINI G, ROCCHI D, et al. Correlation of car-body vibration and train overturning under strong wind conditions [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2020, 142: 106743.
- [39] LIU D R, WANG T T, LIANG X F, et al. High-speed train overturning safety under varying wind speed conditions [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2020, 198: 104111.
- [40] WANG M, LI X Z, CHEN X Z. A simplified analysis framework for assessing overturning risk of high-speed trains over bridges under crosswind [J]. *Vehicle System Dynamics*, 2020: 1-11.
- [41] MONTENEGRO P A, HELENO R, CARVALHO H, et al. A comparative study on the running safety of trains subjected to crosswinds simulated with different wind models [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2020, 207: 104398.
- [42] MONTENEGRO P A, BARBOSA D, CARVALHO H, et al. Dynamic effects on a train-bridge system caused by stochastically generated turbulent wind fields [J]. *Engineering Structures*, 2020, 211: 110430.
- [43] 韩艳, 刘叶, 胡朋. 非定常气动荷载对桥上列车行驶安全舒适性影响分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(1): 118-128.
- [44] HAN Y, LIU Y, HU P, et al. Effect of unsteady aerodynamic loads on driving safety and comfort of trains running on bridges [J]. *Advances in Structural Engineering*, 2020, 23(13): 2898-2910.
- [45] 郭文华, 洪新民, 陈春霞. 侧风下高铁列车交会运行时车-桥耦合振动[J]. 中国铁道科学, 2020, 41(4): 48-56.
- [46] 崔圣爱, 刘品, 晏先娇, 等. 横风环境下跨海大桥列车-桥梁系统耦合振动仿真研究[J]. 铁道学报, 2020, 42(6): 93-101.
- [47] 郑晓龙, 徐建华, 鲍玉龙, 等. 悬挂式单轨筒支梁风车

- 桥耦合动力分析[J]. 铁道工程学报, 2020, 37(2): 53-58.
- [48] 李永乐, 龙俊廷, 向活跃, 等. 基于风-车-桥的城市轨道交通桥横向挠跨比建议值研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(24): 211-217.
- [49] ZHANG J Y, ZHANG M J, LI Y L, et al. Local wind characteristics on bridge deck of twin-box girder considering wind barriers by large-scale wind tunnel tests [J]. *Natural Hazards*, 2020, 103(1): 751-766.
- [50] 霍卿, 许建林, 梅元贵. 高速铁路桥梁挡风屏障遮蔽效应分析[J]. 空气动力学学报, 2020, 38(1): 73-81.
- [51] GU H Y, LIU T H, JIANG Z W, et al. Research on the wind-sheltering performance of different forms of corrugated wind barriers on railway bridges [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2020, 201: 104166.
- [52] 李小珍, 邱晓为, 郑净, 等. 一种确定典型铁路基础结构风剖面等效风速比的方法: CN112163259A[P]. 2021-01-01.
- [53] 徐昕宇, 李永乐, 陈星宇等. 风屏障的突风效应对桥上列车走行性的影响[J/OL]. 西南交通大学学报, 2021: 56(5): 1050-1055, 1093.
- [54] YANG W C, DENG E, ZHU Z H, et al. Deterioration of dynamic response during high-speed train travelling in tunnel-bridge-tunnel scenario under crosswinds [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2020, 106: 103627.
- [55] YANG W C, Deng E, Zhu Z H, et al. Sudden variation effect of aerodynamic loads and safety analysis of running trains when entering tunnel under crosswind [J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(4): 1445.
- [56] DENG E, YANG W C, HE X H, et al. Transient aerodynamic performance of high-speed trains when passing through an infrastructure consisting of tunnel-bridge-tunnel under crosswind [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2020, 102: 103440.
- [57] 施成华, 王昂, 邓镔, 等. 桥隧段风屏障对高速列车气动荷载及行车安全的影响[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2020, 48(6): 58-68, 76.
- [58] 喻宝金, 乔张旺, 付丽. 风屏障对扁平箱梁气动稳定性的影响[J]. 中外公路, 2020, 40(2): 99-102.
- [59] YANG Y X, GE Y J, ZHOU R, et al. Aerodynamic countermeasure schemes of super long-span suspension bridges with various aspect ratios [J]. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 2020, 20(5): 2050061.
- [60] DAI Y Q, DAI X W, BAI Y, et al. Aerodynamic performance of an adaptive GFRP wind barrier structure for railway bridges [J]. *Materials*, 2020, 13(18): 4214.

(编辑 王森卉)