

文章编号: 1005-0523(2025)05-0083-10



横风作用下桥上更高速度列车行车安全性分析

王雄标¹, 刘军华¹, 颜建鹏¹, 唐清华¹, 龚 凯², 郭文杰²

(1. 东南沿海铁路福建有限责任公司, 福建 福州 350013; 2. 华东交通大学交通运输工程学院, 江西 南昌 330013)

摘要:为揭示横风作用下桥上更高速度列车行车安全机理, 基于流体力学与车辆动力学理论, 采用 CFD 流体力学软件建立高速列车-桥梁气动模型, 计算列车及桥梁气动载荷; 利用多体动力学软件 UM 和有限元分析软件 Ansys 进行联合仿真, 建立高速列车-轨道-桥梁系统动力学模型; 将气动载荷作为外部激励, 输入该模型中, 实现横风作用下高速铁路桥上更高速度列车行车姿态的仿真计算, 进而分析风速、车速对其行车安全的影响。研究表明: 横风作用下, 车体横向位移、轮轴横向力、轮轨垂向力、脱轨系数、轮重减载率、桥梁跨中横向位移较无风时均显著增大; 当风速小于 12 m/s、车速 350~400 km/h 时列车行车安全指标较小, 桥梁跨中横向位移幅值变化较缓; 当风速大于 15 m/s、车速 350~420 km/h 时列车各项安全指标急剧增大, 尤其是时速 400 km 以上时, 轮轴横向相互作用明显, 桥梁跨中横向位移增幅呈倍数增长。本研究结果可为控制横风作用下高速列车桥上行车安全提供理论依据和基础数据。

关键词:铁道工程; 高速铁路桥梁; 横风作用; 行车安全性

中图分类号: U270.1+1

文献标志码: A

本文引用格式: 王雄标, 刘军华, 颜建鹏, 等. 横风作用下桥上更高速度列车行车安全性分析[J]. 华东交通大学学报, 2025, 42(5): 83-92.

Analysis of Train Safety Under Crosswind Effects at Higher Speeds on Bridges

Wang Xiongbiao¹, Liu Junhua¹, Yan Jianpeng¹, Tang Qinghua¹, Gong Kai², Guo Wenjie²

(1. Dongnan Coastal Railway Fujian Co., Ltd., Fuzhou 350013, China; 2. School of Transportation Engineering,
East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: In order to reveal the safety mechanism of higher speed trains on the bridge under crosswind, a high-speed train-bridge aerodynamic model was established using CFD software to calculate the aerodynamic loads on the train and bridge based on fluid dynamics and vehicle dynamics theories. Using the co-simulation technology of multibody dynamics software UM and finite element analysis software Ansys, a high-speed train-track-bridge system dynamic model was developed. The aerodynamic loads on the train and bridge were applied as external excitations and input into the train-track-bridge system dynamics model to simulate the entire operational process of high-speed trains on bridges under crosswind conditions. The study analyzed the impact of wind speed and train speed on the operational safety of higher-speed trains. The results show that under crosswind conditions, the lateral displacement of the train body, lateral wheelset force, vertical wheel-rail force, derailment coefficient, wheel load reduction rate, and lateral displacement at the mid-span of the bridge all increase significantly

收稿日期: 2024-12-16

基金项目: 江西省自然科学基金项目(20224BAB204065)

compared to no-wind conditions. When the wind speed is slower than 12 m/s and the train speed is 350~400 km/h, the safety indicators for train operation remain relatively low, and the lateral displacement at the bridge mid-span shows moderate variation. When the wind speed is faster than 15 m/s and the train speed is between 350~420 km/h, the safety indicators of the train increase sharply, especially for trains traveling at speeds above 400 km/h, where the lateral interaction between the wheel and rail becomes more pronounced, resulting in an exponential increase in the lateral displacement at the bridge mid-span. The above research results can provide a theoretical basis and basic data for ensuring the running safety of high-speed trains on bridges under the influence of crosswinds.

Key words: railway engineering; high-speed railway bridges; crosswind effect; running safety

Citation format: WANG X B, LIU J H, YAN J P, et al. Analysis of Train safety under crosswind effects at higher speeds on bridges[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2025, 42(5): 83-92.

近年来,我国高速铁路快速发展,截至2023年底高速铁路运营里程达4.5万km,“八纵八横”高铁通道已建成80%^[1]。面对规模庞大的高速铁路,安全运营是首要任务。桥梁在高速铁路基础设施中占比较大,桥上行车安全是人们关注的重点,尤其是横风作用下桥上高速列车的行车安全。研究及实践表明^[2-3],横风容易导致列车出现晃车、抖车现象,严重时甚至引起列车脱轨事故。

针对横风作用下桥上列车行车安全问题,许多学者从风洞试验和数值计算的角度开展了研究。在风洞试验方面,Xu等^[4]对车辆和桥梁的空气动力学系数进行了推导,研究了风非均匀特性对车桥系统动力响应的影响;Suzuki等^[5]研究了横风下桥型对列车周围流场的影响及风向角和车型状况下流场特征;戴金元等^[6]对大跨度钢箱梁铁路悬索桥进行了节段模型测力风洞试验,研究了风攻角、列车位置对车-桥气动力的影响;韩旭等^[7]从线路非对称布置、风攻角、双车交会的角度研究了大跨度公铁两用斜拉桥的气动特性;杨凌波等^[8]研究了分离式三箱梁气动特性和主梁-列车系统的气动干扰效应;郭薇薇等^[9]对某大跨度公铁两用桁架斜拉桥进行了节段模型风洞试验,研究了桥塔、公路车流、双车及三车交会对车辆和桁梁三分力系数的影响。在数值计算方面,Wu等^[10]基于风-车-轨道-桥梁耦合模型,研究了列车和桥梁在侧风作用下的动力学响应;Montenegro等^[11]研究了桥梁横向性能、轨道条件和列车类型对列车抗侧风稳定的影响;Liu等^[12]探讨了大跨度桥梁涡振对车-轨-桥动力响应的影响,发现其对脱轨系数、轮重减载率、车体垂向加速度和桥

梁垂向加速度变化影响较大;郭向荣等^[13]研究了满载和空载列车作用下横风对大跨度铁路斜拉桥及列车振动响应的影响;张骞等^[14]探讨了强横风作用下桥上高速列车的运行安全性,提出风速25 m/s时行车安全性和舒适性满足要求;李小珍等^[15]以五峰山长江大桥为例,研究了侧风下列车脱轨系数、轮重减载率、轮轴横向力等响应的变化规律,提出了不同风速下的车速阈值;邱晓为等^[16]研究了横风作用下泉州湾跨海大桥主桥的行车安全,提出风速大于20 m/s时列车限速;张云飞等^[17]研究了阵风环境下高速列车驶过独塔斜拉桥时的耦合振动特性,研究了风攻角、行车速度对车辆安全运行的影响;龚凯等^[2]建立了大风作用下货车-轨道-桥梁系统振动模型,实现了大风环境下列车脱轨全过程计算。

高速铁路正朝着更高速度发展,基于既有高铁基础设施条件,实现时速400 km及以上的列车运营是交通强国规划纲要的主要内容之一^[18]。本文基于流体力学理论、多体动力学理论和有限元法,实现横风作用下桥上更高速度列车行车仿真计算,分析风速、车速对更高速度列车行车安全的影响,揭示横风作用下桥上更高速度列车行车安全机理。为控制横风作用下高速列车桥上行车安全提供理论依据和基础数据。

1 高速列车-桥梁气动模型

1.1 计算域设定

基于流体力学理论,采用CFD流体力学软件,利用标准化的 $k-\varepsilon$ 湍流模型,对高速列车在侧风作用

下的运行特性进行数值模拟。按照《列车空气动力学性能数值仿真规范》(TB/T 3503.4—2018),通过指定来流速度的方法对列车运行状态进行仿真,以准确再现实际运行环境中的气动特性。为确保计算域内流场范围足够大,计算域尺寸设定为 $400\text{ m}\times 130\text{ m}\times 55\text{ m}$,如图1所示。由于中间车的截面形状一致,气动特性相对稳定,且缩短模型长度对列车周围流场的基本结构无显著影响^[19],为提高计算效率并节约计算资源,模拟中采用了简化的3节车厢动车组模型,头车和尾车的长度均为 27.91 m ,中间车长度为 25.65 m ,列车宽度为 3.36 m ,高度为 4.05 m 。桥梁结构采用通桥(2023)2322A-II,桥跨 32.00 m ,主梁宽 12.60 m 、高 3.00 m 。

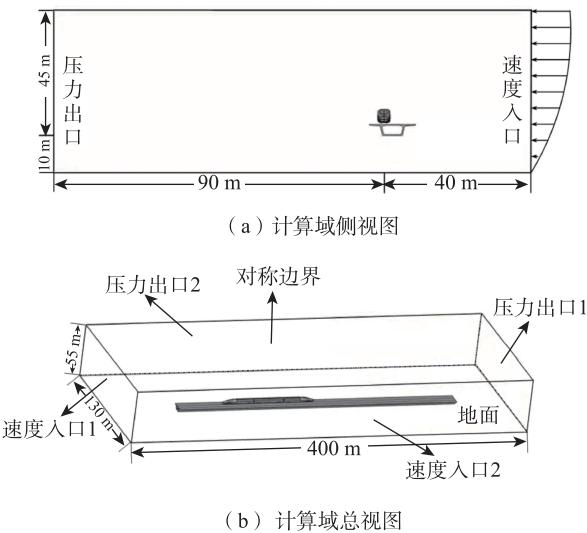


图1 计算域设定
Fig. 1 Computational domain setting

1.2 网格划分及网格无关性验证

使用Fluent Meshing软件对列车模型进行网格划分,结合多面体和六面体网格对车体及计算域进行精细化处理。为验证网格数量对结果的无关性,选取列车运行速度为 350 km/h 、风速为 15 m/s 的计算工况,划分了3种不同数量的网格,并保持边界层数量不变。在三维流动数值模拟中,最密网格的单元数量应至少为最粗网格单元数量的 1.3^3 倍^[20]。根据表1所列的计算结果,在相同运行条件下,采用实验网格数的计算结果与密网格和粗网格结果相比,列车头车所受侧向力和升力的差异较小,表明3种网格方案均达到了精度要求。因此,为平衡计算精度与效率,在后续数值模拟中以实验网格数作为参考标准。

表1 网格数量对计算结果的影响			
Tab.1 The impact of grid size on calculation results			
网格类型	网格数量/万	侧向力/kN	升力/kN
粗网格	1 000	41.95	19.48
实验网格	1 800	42.69	19.02
密网格	2 500	42.03	19.73

列车截面的网格划分如图2所示,在靠近列车壁面区域设置10层高精度的边界层网格,其中,第一层网格高度为 2 mm ,网格增长比例为 1.2 ,以更好地捕捉流动特性,确保列车壁面附近湍流结构的精确分辨。整个计算域网格总数约 $1\,800$ 万。

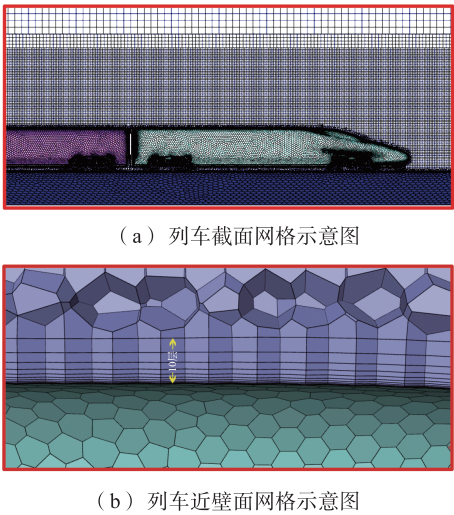


图2 网格划分示意图
Fig. 2 Grid division diagram

1.3 计算模型验证

通过将相同条件下得到的计算数据与风洞试验数据相对比,验证数值计算的准确性。Niu等^[21]采用 $1:8$ 的两节编组(包括头车和尾车)列车缩尺模型,在尺寸为 $15\text{ m}\times 3\text{ m}\times 3\text{ m}$ 的风洞中进行实验,测量了列车在来流速度为 60 m/s 、无侧风工况下的气动系数。为确保对比的科学性和一致性,本文模拟了与风洞试验相同的工况,并提取头车及尾车的气动阻力系数与风洞试验数据进行对比分析,结果如表2所示。由表2可知,数值计算结果与风洞试验数据误差均在 6% 以内,表明采用的数值计算方法在描述列车气动性能方面具有较高的可靠性和准确性,符合计算模拟要求。

1.4 计算结果

研究表明,横风作用下头车气动载荷最大^[3]。因

此,本文提取了车速(V)350~430 km/h,风速(V_m)8~17 m/s 时头车气动载荷,包括阻力 F_x 、侧向力

F_y 、升力 F_z 、侧滚力矩 M_x 、点头力矩 M_y 、摇头力矩 M_z ,如表3所示。

表2 数值验证与风洞实验结果对比
Tab.2 Comparison of numerical validation and wind tunnel test results

计算方法	头车	尾车
风洞试验	0.145	0.114
数值仿真	0.139	0.112
误差	4.14%	5.88%

2 横风作用下高速列车-轨道-桥梁动力学模型

设某一时刻列车在桥上高速行驶,图3为行车时的高速列车-轨道-桥梁动力学模型。

对于列车动力学模型,以CR400-AF 车型为例,

表3 车辆气动载荷计算结果
Tab.3 Calculation results of vehicle aerodynamic loads

$V/\text{km/h}$	$V_w/\text{m/s}$	F_x/kN	F_y/kN	F_z/kN	$M_x/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$M_y/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$M_z/(\text{kN}\cdot\text{m})$
350	8	-10.199	21.529	1.688	-16.668	122.184	-109.308
	10	-10.016	27.823	5.735	-21.226	141.005	-137.964
	12	-9.711	33.809	11.243	-24.718	160.210	-161.837
	15	-9.211	42.694	19.020	-30.604	193.806	-192.526
	17	-8.098	48.704	25.857	-34.806	225.035	-209.333
380	8	-12.071	23.179	1.384	-18.139	119.280	-119.280
	10	-11.929	29.987	4.998	-22.951	151.625	-151.625
	12	-11.402	36.785	10.733	-27.294	177.452	-177.452
	15	-11.108	46.107	19.187	-33.168	215.849	-215.849
	17	-10.887	52.691	25.865	-37.698	242.215	-236.345
400	8	-13.298	24.950	1.250	-19.738	147.393	-126.769
	10	-13.112	31.437	4.105	-24.323	166.958	-157.733
	12	-12.986	38.765	10.284	-29.244	191.671	-186.112
	15	-12.176	49.218	18.267	-34.674	228.512	-221.298
	17	-11.723	55.254	24.443	-40.122	254.734	-244.157
430	8	-15.678	27.334	0.975	-21.386	152.344	-134.543
	10	-15.417	33.482	3.346	-26.109	184.902	-169.685
	12	-15.117	40.955	8.605	-31.299	212.487	-203.901
	15	-14.728	52.028	18.570	-38.398	252.666	-247.518
	17	-14.384	60.569	24.744	-43.220	267.223	-272.861

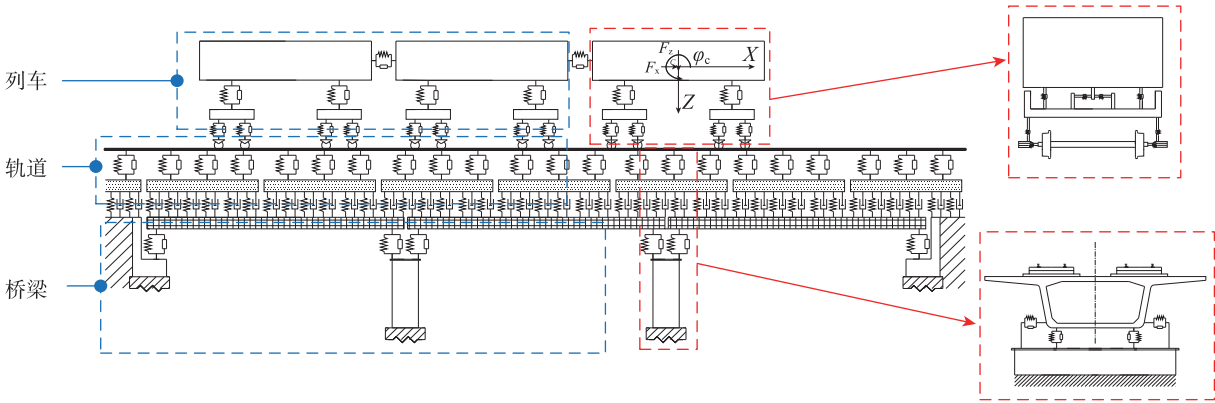


图3 高速列车-轨道-桥梁动力学模型
Fig. 3 Dynamic model of high-speed train-track-bridge

列车编组为1TC+6M+1TC,每辆车作为1个车辆单元,每个车辆单元假定为多刚体系统,由车体、转向架、轮对组成,转向架与轮对、车体与转向架之间的悬挂系统分别为一系、二系悬挂,采用线性弹簧和黏滞阻尼器模拟。车体、转向架、轮对均考虑纵向、横向、垂向、侧滚、点头和摇头6个方向的自由度,车辆模型共计50个自由度。车辆参数见表4(头车尾车参数一致)。

表4 车辆参数
Tab.4 Vehicle parameters

车辆部件	参数类型	参数值	
		头车	中间车
车体	质量/kg	35 360	36 630
构架	质量/kg	2 480	4 820
轮对	质量/kg	1 490	1 740
一系弹簧	横向刚度/(kN/m)	980	
	垂向刚度/(kN/m)	1 280	
二系弹簧	横向刚度/(kN/m)	173	
	垂向刚度/(kN/m)	290	

对于轨道-桥梁系统动力学模型,基于有限元方法,采用有限元软件建立 Ansys 实体有限元模型。轨道和桥梁分别采用CRTS III板式无砟轨道和通桥(2023)2322A-II,其中,钢轨、扣件分别采用空间梁单元 BEAM188 和线性弹簧单元 COMBIN14 模拟;轨道板、自密实混凝土层、底座板和主梁采用实体单元 SOLID45 模拟。计算参数见表5。

轮轨耦合模型是列车与轨道系统连接的纽带,本文基于非 Hertz 滚动接触算法和 Fastsim 算法模拟轮轨法向和横向接触。同时,基于 UM 与 Ansys 联合仿真技术,建立高速列车-轨道-桥梁动力学模型,其动力学方程如式(1)所示

$$M\ddot{\delta} + C\dot{\delta} + K\delta = F \tag{1}$$

式中: $\delta, \dot{\delta}, \ddot{\delta}$ 为车-轨-桥系统动力学模型的位移、速度、加速度向量, M 为质量矩阵, C 和 K 分别为阻尼矩阵和刚度矩阵; F 为荷载矩阵,包括轨道不平顺激励荷载等。

考虑到明线上列车所受气动载荷相较于隧道和挡风板处更加平稳,故选用稳态风载作为风载荷。将1.4节的气动载荷作为外部激励,以时程荷载引入式(1)右侧的荷载项,进而实现横风作用下高速列车-轨道-桥梁动力响应计算。为防止荷载施加在车体上产生的冲击,将风荷载曲线设置为无风载、常值加载、风荷载、常值卸载、无风载5个部分,如图4所示。

表5 轨道-桥梁模型参数 Tab.5 Parameters of the track-bridge model		
结构名称	参数类型	参数值
钢轨	弹性模量/Pa	2.059×10 ¹¹
	泊松比	0.3
	单位长度质量/(kg/m)	60.64
扣件	垂向刚度/(N/m)	6.0×10 ⁷
	扣件间距/m	0.645
轨道板	弹性模量/Pa	3.600×10 ¹⁰
	泊松比	0.2
	宽度/m	2.55
	厚度/m	0.20
自密实混凝土层	弹性模量/Pa	7.000×10 ⁹
	宽度/m	2.55
	厚度/m	0.03
底座板	弹性模量/Pa	3.250×10 ¹⁰
	宽度/m	2.95
	厚度/m	0.30
箱梁	弹性模量/Pa	3.000×10 ¹⁰
	宽度/m	12.60
	高度/m	3.03

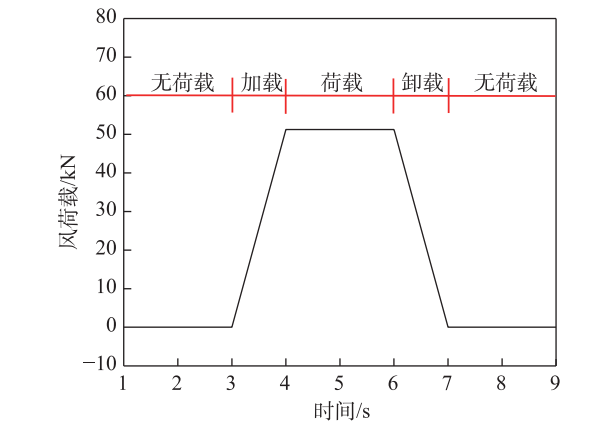


图4 横风加载模式
Fig. 4 Crosswind loading mode

3 横风作用对桥上更高速度列车运行安全的影响

3.1 横风作用下桥上更高速度高速列车行车全过程计算

本节主要分析风速12 m/s、车速400 km/h时高速列车通过桥梁全过程动力响应的变化规律。将1.4节中的列车气动载荷输入车体模型,计算高速列车通过桥梁动力响应。通过初步分析,第1节车辆振动响应最大,限于篇幅,主要列出第1节车辆的

车体横向位移、轮轨垂向力、轮轴横向力、脱轨系数及轮重减载率等时程曲线,如图5~图12所示。

由图5~图6可知,横风作用下,列车通过桥梁时,车体横向位移和轮轴横向力显著增大,车体发生了明显的偏移现象,车轮挤压钢轨,轮轨横向相互作用明显。横风作用下,车体横向位移和轮轴横向力最大值分别为59.74 mm和21.34 kN。

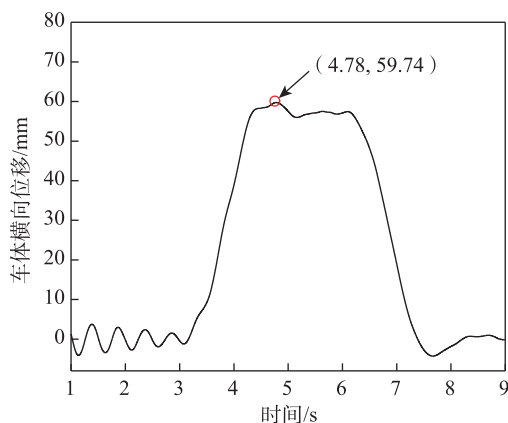


图5 车体横向位移时程曲线

Fig. 5 Time history curve of lateral displacement of car body

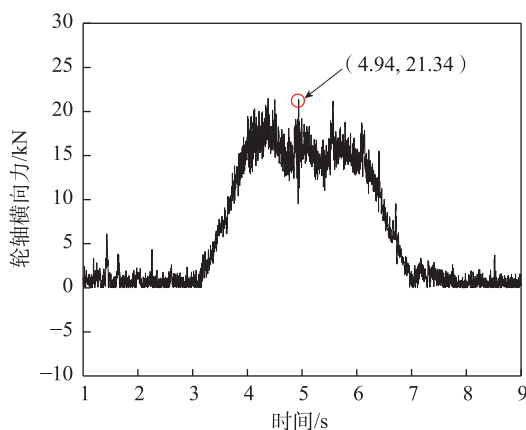
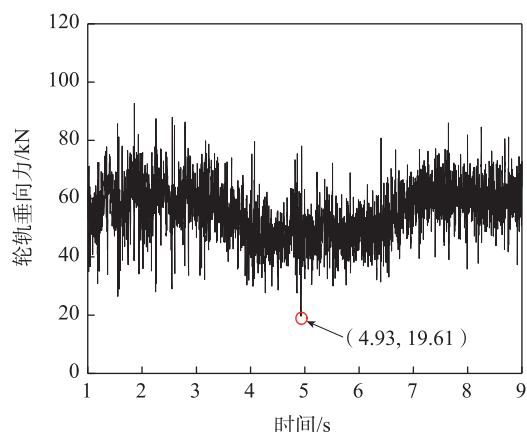


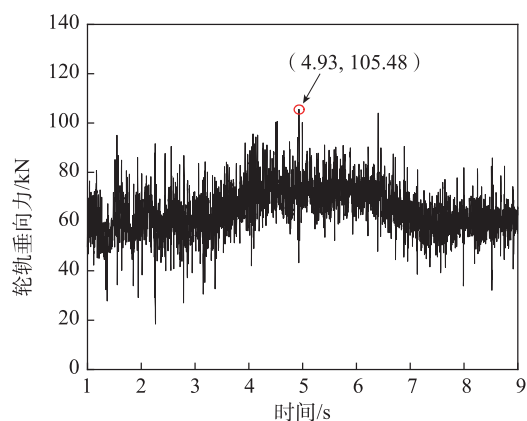
图6 轮轴横向力时程曲线

Fig. 6 Time history curve of axle lateral force

由图7~图8可知,迎风侧轮轨垂向力减小,而背风侧轮轨垂向力增大。这是因为横风作用下车轮横移使得轮轨接触在迎风侧逐渐减少,而在背风侧车轮挤压钢轨,轮轨作用增大所致。在迎风侧,轮轨垂向力最小值仅为19.61 kN;而在背风侧轮轨垂向力最大值为105.48 kN。虽然轮轨力未超出限值170.00 kN,但左右轮轨垂向力相差85.87 kN,可见,横风作用对轮轨垂向力影响显著。



(a) 迎风侧轮轨垂向力时程曲线



(b) 背风侧轮轨垂向力时程曲线

图7 轮轨垂向力时程曲线

Fig. 7 Time history curve of wheel-rail vertical force

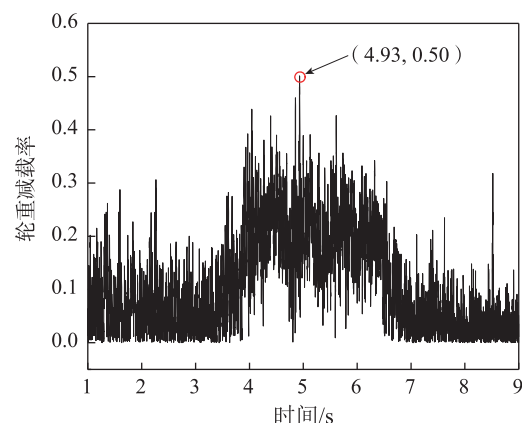


图8 轮重减载率时程曲线

Fig. 8 Time history curve of wheel load reduction rate

由图8~图9可知,在无风作用时,轮重减载率和脱轨系数变化稳定,且幅值较小;而在横风作用下,轮重减载率和脱轨系数均显著增大,其最大值分别为0.50和0.19,均未超过《机车车辆动力学

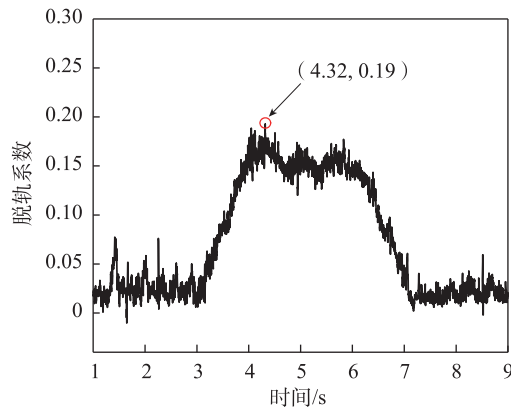


图9 脱轨系数时程曲线

Fig. 9 Time history curve of derailment coefficient

能评定及试验鉴定规范》(GB/T 5599—2019)限值。

由图 10 可知,横风作用下,桥梁跨中横向位移变化显著,最大值为 0.53 mm。

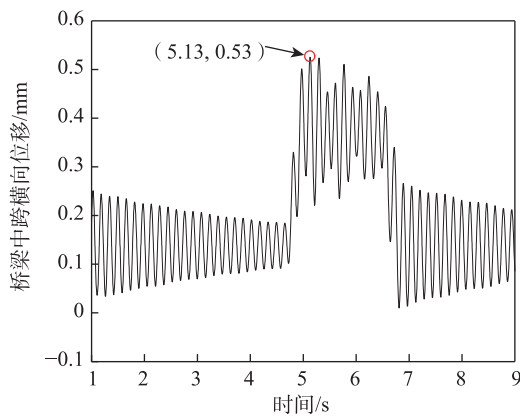


图10 桥梁跨中横向位移时程曲线

Fig. 10 Time history curve of bridge mid-span lateral displacement

3.2 横风作用对桥上更高速列车行车安全的影响

为进一步分析风速对桥上更高速列车行车安全的影响。计算车速设为 350、380、400、430 km/h, 风速为 8、10、12、15、17 m/s。计算得到了车-轨-桥系统振动响应。限于篇幅,提取轮轴横向力、轮轨垂向力、轮重减载率、脱轨系数、桥梁跨中横向位移的最大值,其随风速、车速的变化如图 11~图 15 所示。

由图 11 表明,车速 350~430 km/h 时,轮轴横向力随风速的增大显著增大,当车速小于 400 km/h 时,同一风速下,车速对轮轴横向力的影响较小,变化趋势不明显;当车速 430 km/h 时各风速下轮轴横向力显著增大,尤其风速 17 m/s 时的轮轴横向力相

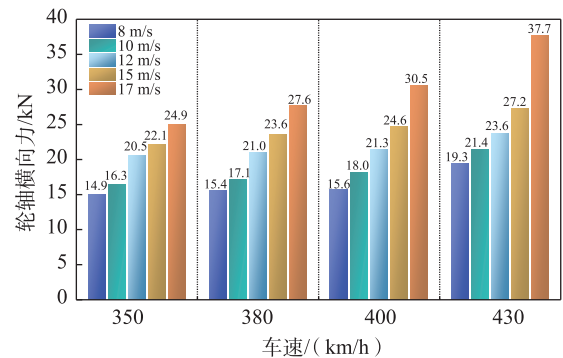
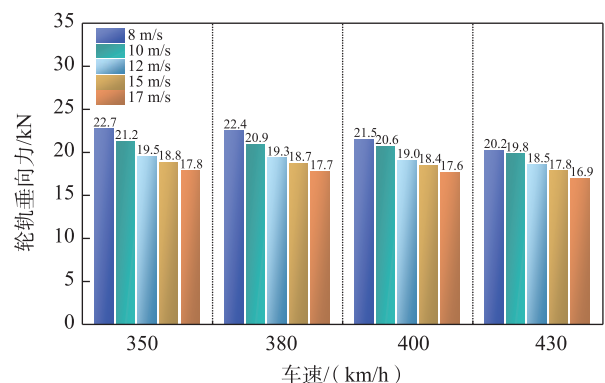


图11 轮轴横向力随车速和风速的变化

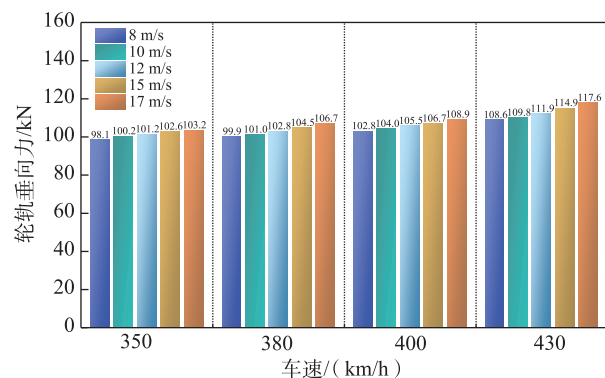
Fig. 11 Changes in lateral force on the axle with vehicle speed and wind speed

比车速 400 km/h 时的轮轴横向力增大了 1.2 倍,并与车速 430 km/h、风速 15 m/s 时的轮轴横向力相差近 10.0 kN,均接近限值 53.8 kN。可见,横风作用下,当车速大于 400 km/h 时,会导致轮轴横向力急剧增大。

图 12 分别为迎风侧轮轨垂向力最小值和背风



(a) 轮轨垂向力(迎风侧)最小值



(b) 轮轨垂向力(背风侧)最大值

图12 轮轨垂向力随车速和风速的变化

Fig. 12 Changes in vertical force on the wheel-rail with vehicle speed and wind speed

侧轮轨垂向力最大值。由图12可知,当风速为8 m/s时,随着车速增大,迎风侧轮轨垂向力最小值从22.7 kN降至20.2 kN,背风侧轮轨垂向力最大值从98.1 kN增至108.6 kN;当车速为430 km/h时,随着风速的增大,迎风侧轮轨垂向力最小值从20.2 kN降至16.9 kN,背风侧轮轨垂向力最大值从108.6 kN增至117.6 kN,且该最大值未超出限值要求170.0 kN。可见,车速350~430 km/h时,随着风速的增大,风荷载对列车迎风侧产生压力作用,导致车轮与轨道的接触力减少,轮轨力逐渐减小,而背风侧轮轨间的接触压力增大,轮轨垂向力增大将加剧钢轨服役性能的衰减。

由图13可知,随着风速的增加,轮重减载率普遍呈上升趋势。当车速350 km/h时,轮重减载率从风速8 m/s时的0.43逐步增加到17 m/s时的0.53;在车速430 km/h时,轮重减载率则从0.50增加到0.59。可见,风速较大时,车轮减载严重。而当车速增大时,尤其在车速430 km/h时,轮重减载率上升到0.59,呈现明显的增幅。尽管车速和风速的增大均使得轮重减载率增加,但车速350~380 km/h时轮重减载率的增幅较小。

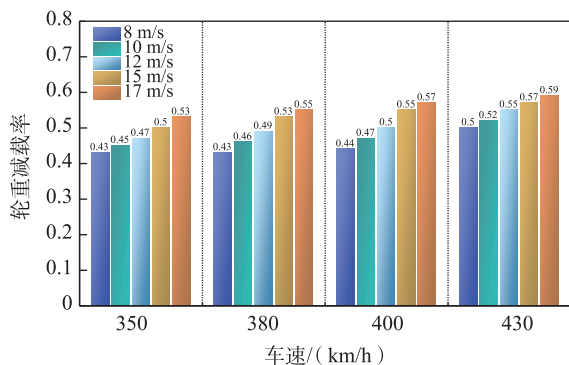


图13 轮重减载率随车速和风速的变化

Fig. 13 Changes in wheel load reduction rate with vehicle speed and wind speed

由图14可知,随着风速的增大和车速的增加,脱轨系数呈现出逐步上升的趋势。当风速8 m/s时,脱轨系数从车速350 km/h的0.13逐步增加到430 km/h时的0.15;而风速17 m/s时,脱轨系数从0.23逐步增加到0.30。可见,车速与风速的共同作用加剧了脱轨风险。

由图15可知,随着车速和风速的增大,桥梁的横向位移呈现出明显的增大趋势。在低风速(如8 m/s)下,车速的变化对桥梁横向位移的影响相

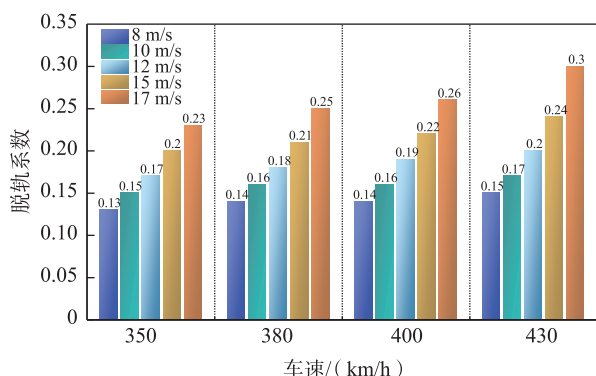


图14 脱轨系数随车速和风速的变化

Fig. 14 Changes in derailment coefficient with vehicle speed and wind speed

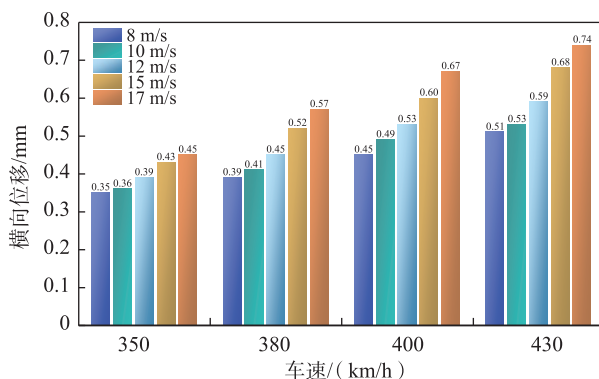


图15 桥梁跨中横向位移随车速和风速的变化

Fig. 15 Changes in lateral displacement at mid-span of bridge with vehicle speed and wind speed

对较小;而在高风速(如17 m/s)下,车速对横向位移的影响则更加显著。在车速为430 km/h时,桥梁在8 m/s风速下横向位移为0.51 mm,而在17 m/s风速下,横向位移增加至0.74 mm,增幅为0.23 mm;相比之下,车速为350 km/h时,横向位移的增幅仅为0.10 mm(从0.35 mm增加至0.45 mm)。可见,高风速和高车速条件下,桥梁所承受横向荷载作用对桥梁横向稳定性产生显著影响。

4 结论

本文通过建立横风作用下高速列车-桥梁气动模型和车-轨-桥梁系统动力学模型,实现了桥上时速350~430 km高速列车行车全过程计算,分析了车速、风速对桥上更高速列车行车安全的影响。主要结论如下。

1) 横风作用下,车体横向位移、轮轴横向力、轮轨垂向力、脱轨系数、轮重减载率和桥梁跨中横向

位移较无风时均显著增大。

2) 当风速小于 12 m/s, 列车以车速 350~430 km/h 行车时, 其轮轴横向力、轮轨垂向力和轮重减载率均在安全限值范围内, 列车行车安全性指标较小, 同时桥梁跨中横向位移随车速、风速的增大幅度变化较缓。

3) 当风速大于 15 m/s, 车速为 350~420 km/h 时, 车体的轮轴横向力、轮轨垂向力、轮重减载率以及桥梁跨中横向位移显著增大, 尤其车速大于 400 km/h 时车轮挤压钢轨, 轮轴横向力接近限值, 脱轨系数等列车安全指标急剧增大; 桥梁跨中横向位移增幅相较于低风速、低车速工况下, 呈倍数增长。

参考文献:

- [1] 王秀旗, 窦伟, 张志宇, 等. 高速铁路列控系统动态检测计划生成系统设计[J]. 铁路技术创新, 2024(6): 86-92.
WANG X Q, DOU W, ZHANG Z Y, et al. Design of dynamic inspection plan generation system for high speed railway train control system[J]. Railway Technical Innovation, 2024(6): 86-92.
- [2] 龚凯, 刘林芽, 向俊, 等. 横风作用对重载铁路桥上列车脱轨全过程的影响[J]. 铁道学报, 2022, 44(8): 125-134.
GONG K, LIU L Y, XIANG J, et al. Effects of crosswind on freight train derailment process on heavy haul railway bridge[J]. Journal of the China Railway Society, 2022, 44(8): 125-134.
- [3] 白鑫, 孙丽霞, 王友彪, 等. 风载作用下高速列车曲线通过性能研究[J]. 中国铁道科学, 2024, 45(2): 146-154.
BAI X, SUN L X, WANG Y B, et al. Research on the curve negotiation performance of high-speed trains under wind load[J]. China Railway Science, 2024, 45(2): 146-154.
- [4] XU X Y, LI Y L, ZHU S Y. Non-uniform wind excitation on dynamic responses of vehicle running on bridge[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2023, 233: 105301.
- [5] SUZUKI M, HIBINO Y. Field tests and wind tunnel tests on aerodynamic characteristics of train/vehicles under crosswinds[J]. Quarterly Report of RTRI, 2016, 57(1): 55-60.
- [6] 戴金元, 封周权, 万田保, 等. 大跨度钢箱梁铁路悬索桥车桥系统气动特性风洞试验研究[J]. 铁道建筑, 2024, 64(8): 78-83.
DAI J Y, FENG Z Q, WAN T B, et al. Wind tunnel tests on aerodynamic characteristics of train-bridge system for long-span steel box girder railway suspension bridge[J]. Railway Engineering, 2024, 64(8): 78-83.
- [7] 韩旭, 向活跃, 李镇, 等. 非对称线路车-桥气动特性风洞试验研究[J]. 振动工程学报, 2022, 35(6): 1388-1394.
HAN X, XIANG H Y, LI Z, et al. The effect of asymmetric layout of railway lines on the aerodynamic characteristics of vehicle-bridge system by wind tunnel tests[J]. Journal of Vibration Engineering, 2022, 35(6): 1388-1394.
- [8] 杨凌波, 华旭刚, 王超群, 等. 分离式三箱梁车-桥系统气动特性风洞试验[J]. 空气动力学学报, 2022, 40(2): 105-114.
YANG L B, HUA X G, WANG C Q, et al. Wind tunnel tests on aerodynamic characteristics of train-triple-box girder system[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2022, 40(2): 105-114.
- [9] 郭薇薇, 蔡保硕, 姜亚烽, 等. 某大跨度公铁两用桁架斜拉桥车桥系统三分力系数风洞试验研究[J]. 工程力学, 2021, 38(3): 192-201.
GUO W W, CAI B S, LOU Y F, et al. Wind tunnel test on tri-component force coefficients of the train-bridge system for a long-span rail-cum-road cable-stayed truss bridge[J]. Engineering Mechanics, 2021, 38(3): 192-201.
- [10] WU J F, CAI C S, LI X Z, et al. Dynamic analysis of train and bridge in crosswinds based on a coupled wind-train-track-bridge model[J]. Advances in Structural Engineering, 2023, 26(5): 904-919.
- [11] MONTENEGRO P A, CARVALHO H, ORTEGA M, et al. Impact of the train-track-bridge system characteristics in the runnability of high-speed trains against crosswinds-Part I: Running safety[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2022, 224: 104974.
- [12] LIU D J, LI X Z, MEI F L, et al. Effect of vertical vortex-induced vibration of bridge on railway vehicle's running performance[J]. Vehicle System Dynamics, 2023, 61(5): 1432-1447.
- [13] 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 X R, HE W, ZHU Z H, 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.
- [14] 张骞, 高芒芒, 于梦阁, 等. 沪通长江大桥主桥风一车一

- 桥动力响应研究[J]. 中国铁道科学, 2018, 39(1): 31-38.
- ZHANG Q, GAO M M, YU M G, et al. Research on wind-train-bridge dynamic response of main bridge of Shanghai-Nantong Yangtze River bridge[J]. China Railway Science, 2018, 39(1): 31-38.
- [15] 李小珍, 秦羽, 刘德军. 侧风作用下五峰山长江大桥列车行车安全控制[J]. 铁道工程学报, 2018, 35(7): 58-64.
- LI X Z, QIN Y, LIU D J. The safety control of train running on the Wufeng Mountain Yangtze River bridge under crosswind[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2018, 35(7): 58-64.
- [16] 邱晓为, 黄志斌, 王铭, 等. 福厦高铁泉州湾跨海大桥主桥风-车-轨-桥耦合振动研究[J]. 铁道标准设计, 2022, 66(12): 72-78.
- QIU X W, HUANG Z B, WANG M, et al. Study of coupling vibration of wind-train-track-bridge system for main bridge of Quanzhou Bay Sea-crossing bridge on Fuzhou-Xiamen high-speed railway[J]. Railway Standard Design, 2022, 66(12): 72-78.
- [17] 张云飞, 李莉, 雷震宇, 等. 阵风下高速列车-独塔斜拉桥耦合振动分析[J]. 中国公路学报, 2021, 34(4): 128-139.
- ZHANG Y F, LI L, LEI Z Y, et al. Analysis of high-speed train-single-tower cable-stayed bridge coupling vibration under gust[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(4): 128-139.
- [18] 王锋. 打造性能更优新一代CR450高速动车组助推中国高铁事业“十四五”更大发展[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(2): 10, 144-10, 145.
- WANG F. Creating a new generation of CR450 high-speed EMUs with better performance promoting greater advances of CHSR during the 14th Five-Year Plan period[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(2): 10, 144-10, 145.
- [19] 毛军, 郝艳红, 高亮, 等. 横风作用下高速列车气动阻力[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(11): 4059-4067.
- MAO J, XI Y H, GAO L, et al. Aerodynamic drag of a high-speed train under cross wind conditions[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, 45(11): 4059-4067.
- [20] CELIK I B, GHIA U, ROACHE P J, et al. Procedure for estimation and reporting of uncertainty due to discretization in CFD applications[J]. Journal of Fluids Engineering, 2008, 130(7): 078001.
- [21] NIU J Q, LIANG X F, ZHOU D. Experimental study on the effect of Reynolds number on aerodynamic performance of high-speed train with and without yaw angle[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2016, 157: 36-46.



第一作者:王雄标(1985—),男,高级工程师,研究方向为铁路工程建设技术。E-mail:289633949@qq.com。



通信作者:龚凯(1986—),男,副教授,博士,硕士生导师,研究方向为轨道交通安全运维及振动噪声。E-mail:gongkai1986@126.com。

(责任编辑:李根)