

文章编号: 1674—8247(2025)02—0104—06
DOI: 10.12098/j.issn.1674-8247.2025.02.017

Z型风屏障对大风环境下400 km/h高速列车 通过桥梁的防风效果研究

薛鹏 吕娜 张鹤 金怡新 钟洪军

(成都亚佳工程新技术开发有限公司, 成都 610083)

摘要: 本文采用风洞试验分析了Z型风屏障导风角、透风率、高度对简支梁桥上列车和桥梁气动性能的影响,通过风-车-桥耦合振动研究了不同风速下桥上列车运行的安全性问题。结果表明,(1)与不设置风屏障相比,安装Z型风屏障后列车高度范围内风速最小减少40%;适用于简支梁桥的Z型风屏障的最优参数为导风角度20°、透风率30%、高度3m;(2)对不设置风屏障的简支梁桥,桥面风速超过25 m/s时即应限速行驶,超过30 m/s时须停运;(3)设置Z型风屏障后,风速达到40 m/s列车仍可按设计速度400 km/h通过桥梁,风速达到60 m/s时,列车仍可按100 km/h的速度安全运行;(4)Z型风屏障合理的挡风、导风结构减小了大风对桥梁的影响。

关键词: 高速铁路;风屏障;风洞试验;数值模拟;安全阈值

中图分类号: TU352.2; U448.13 文献标志码: A

104

Study on the Wind-proof Effect of Z-type Wind Barrier on 400 km/h High-speed Train Passing through Bridge in Strong Wind Environment

XUE Peng LV Na ZHANG He JIN Yixin ZHONG Hongjun

(Chengdu Alga Engineering New Technology Development Co., Ltd., Chengdu 610083, China)

Abstract: This paper analyzed the impact of the wind deflection angle, air permeability, and height of Z-type wind barriers on the aerodynamic performance of bridges and trains on simply supported beam bridges through wind tunnel experiments. The safety implications of wind speeds on train operation on bridges were studied using wind-train-bridge coupled vibration analysis. The results indicate: (1) Compared to scenarios without wind barriers, the installation of Z-type wind barriers reduces wind speeds within the train height range by at least 40%. The optimal parameters for Z-type wind barriers suitable for simply supported beam bridges are a wind deflection angle of 20°, air permeability of 30%, and a height of 3 m. (2) For simply supported beam bridges without wind barriers, speed restrictions should be implemented when bridge deck wind speeds exceed 25 m/s, and train operations should be halted when wind speeds exceed 30 m/s. (3) After installing Z-type wind barriers, trains can safely traverse the bridge at the design speed of 400 km/h when wind speeds reach 40 m/s and can operate safely at 100 km/h even when wind speeds reach 60 m/s. (4) The reasonable wind blocking and deflecting structure of Z-type wind barriers mitigates the impact of strong winds on bridges.

Key words: high-speed railway; wind barrier; wind tunnel experiment; numerical simulation; safety threshold

收稿日期: 2024-03-19

作者简介: 薛鹏(1988-),男,工程师。

引文格式: 薛鹏,吕娜,张鹤,等. Z型风屏障对大风环境下400 km/h高速列车通过桥梁的防风效果研究[J]. 高速铁路技术, 2025, 16(2): 104-109.

XUE Peng, LV Na, ZHANG He, et al. Study on the Wind-proof Effect of Z-type Wind Barrier on 400 km/h High-speed Train Passing through Bridge in Strong Wind Environment[J]. High Speed Railway Technology, 2025, 16(2): 104-109.

随着铁路提速技术的不断研究与改进,高速列车速度也必然突破 350 km/h,提高到 400 km/h 甚至更高。伴随高速铁路网络不断扩展,在强风环境地区修建的高速铁路越来越多,高速列车在相同风速下遭受更大的风荷载,列车的轻量化降低了抗倾覆性能,高比例桥梁工程增加了桥上列车遭受强风作用的概率。以上因素对提速后列车在强风下的安全运行提出了更高的要求^[1-2]。

根据铁路线路调查,列车速度达到 200 km/h,桥面风速超过 25 m/s 时,列车会出现运行平稳性和乘坐舒适性的降低;桥面风速超过 30 m/s 时,就可能会出现脱轨、倾覆、侧翻等隐患^[3]。

于梦阁等^[4]通过数值模拟对平地上 CRH 型列车速度为 200~400 km/h 时,高速列车的气动荷载特性和运行安全性进行了分析,结果表明风速超过 25 m/s 时列车的脱轨系数等明显增加,得出平地上大风环境下高速列车的运行安全域。向活跃等^[5]采用 CFD 的方法分析了车速为 350 km/h、400 km/h 时列车周围压力的分布,得出 400 km/h 列车风荷载可按 350 km/h 列车风荷载的 1.31 倍放大取值。另有权海阳^[6]、邹云峰等^[7]等对 380 km/h、400 km/h 时速列车的风荷载性能进行了研究。

本文针对 32 m 跨度双线简支梁桥,通过风洞试验测试了设置不同参数 Z 型风屏障时列车、桥梁的气动力系数,并结合桥梁内外风速变化筛选出更有利于行车的设计参数;随后基于风车桥耦合震动分析研究设置风屏障工况下列车的动态响应,讨论风速对风屏障防风效果的影响,给出 Z 型风屏障在风环境下的风速-车速阈值。

1 Z型风屏障简介

根据导风屏障的理论研究与实际应用,有一定导风角的风屏障对列车的安全运行及桥梁平衡更有利。但在实际应用中导风屏障由于单根安装要求基座与导风叶片需完全对应,数量多,重量大。

本文研发了一种 Z 型风屏障,如图 1 所示。Z 型结构的斜面实现导风性能,直面方便安装,精简了导风叶片多次折弯的加工工艺,又保留了单叶片重量轻、方便搬运安装等特点;采用立柱与横向连接板相结合的连接方式,简化了基座的连接,减少了钢材用量。

2 风洞试验

2.1 风洞试验内容

风洞试验主要研究 Z 型风屏障导风角、透风率、高度对列车及桥梁气动性能的影响。选取导风角(与

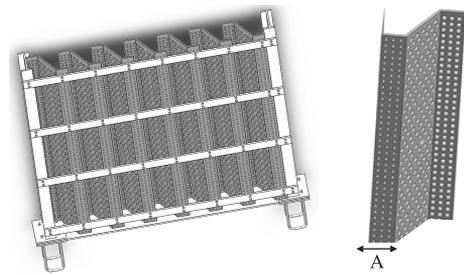


图1 Z型风屏障结构图

桥梁顺桥向角度)分别为 40°、30°、20°、10°、0°,透风率分别为 20%、30%,高度分别为 3.0 m、3.5 m、4.0 m,依次按导风角度、透风率、高度进行试验。基于已有试验,Z 型风屏障顺桥向直面尺寸 A 为 0.2 m。节段模型测力试验工况如表 1 所示。

表1 节段模型测力试验工况表

试验顺序	工况类型	工况参数
1	导风角度	40°、30°、20°、10°、0°
2	透风率	20%、30%
3	高度	3.0 m、3.5 m、4.0 m

2.2 风洞试验模型及简化

风洞实验模型采用 1:30 的缩尺模型,在中南大学高速铁路风洞试验系统高速试验段的均匀流场中进行节段模型试验。试验不考虑对桥梁气动力影响较小的附属设施,且节段模型取具有代表性的桥梁中间断面,长 2.10 m,宽 0.42 m,高 0.101 7 m,如图 2 所示。桥梁及列车测点布置如图 3 所示,其中桥梁共布置 3 个测压断面,分别位于 1/4 截面、1/2 截面、3/4 截面,每个断面 100 个测点。



图2 Z型风屏障模型图

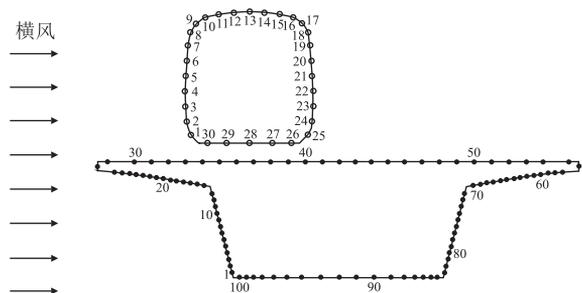


图3 桥梁与列车测点布置示意图

列车受到的三分力按式(1)~式(3)定义进行计算。

$$C_D = \frac{F_D}{0.5\rho U^2 A_x} \quad (1)$$

$$C_L = \frac{F_L}{0.5\rho U^2 A_y} \quad (2)$$

$$C_M = \frac{M}{0.5\rho U^2 B^2 L} \quad (3)$$

式中: F_D ——列车在风力作用下的阻力(kN);
 F_L ——列车在风力作用下的升力(kN);
 M ——列车在风力作用下的倾覆力矩(kN·m);
 ρ ——空气密度,取 1.225 kg/m^3 ;
 U ——来流风速,取 12 m/s ;
 A_x ——模型在 x 轴方向上的投影参考面积(m^2);
 A_y ——模型在 y 轴方向上的投影参考面积(m^2);
 B ——模型宽度(m);
 L ——模型长度(m)。

2.3 风洞试验结果及分析

2.3.1 导风角对列车、桥梁气动系数的影响

无风屏障以及Z型风屏障导风角为 40° 、 30° 、 20° 、 10° 、 0° 时列车、桥梁的三分力系数如图4所示。

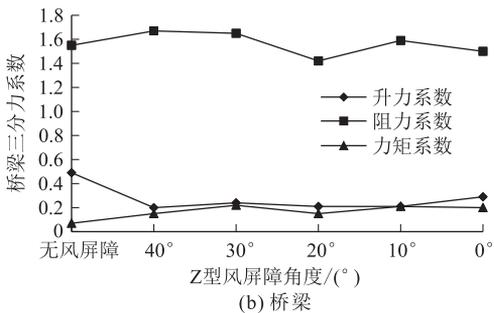
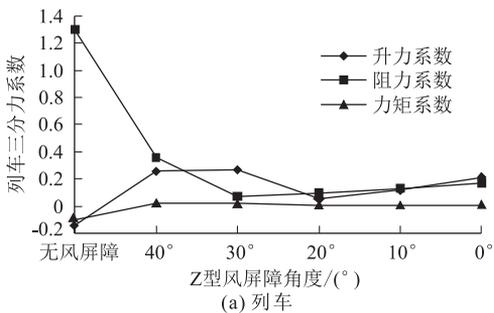


图4 角度对列车、桥梁的气动影响图

由图4可知,桥面设置Z型风屏障后,列车的阻力系数大幅衰减,升力系数和力矩系数稍有增大,阻力、升力系数随导风角的减小先减小再增大;桥梁的升力系数有一定程度的减小,弯矩系数稍有增大,阻力系数随Z型导风角的变化呈无规律变化。

从导风角对列车、桥梁的气动影响图可以看出,风角为 20° 时,列车三分力、桥梁三分力最小。

2.3.2 导风角对风速折减系数的影响

风速折减系数 R 反应了风屏障对桥梁内风速的衰减效果,具体指风屏障在近侧轨道中心线处,从列车轨底到列车车顶范围内风速减小的比例,计算公式为:

$$R = 1 - V_1/V_0 \quad (4)$$

式中: V_0 ——环境风速(m/s);

V_1 ——近侧轨道中心线处风速(m/s)。

测试时,Z型风屏障设置在桥梁两侧,测点布置于迎风侧线路中轴线上,高度方向列车轨底处(Z型风屏障底面)为第1个测点,每 0.5 m 取1个测点,取至 10 m 高。

无风屏障以及Z型风屏障导风角为 40° 、 30° 、 20° 、 10° 、 0° 时的风速折减系数如图5所示。由图5可知,在 $0 \sim 4 \text{ m}$ (列车高度约 3.8 m)高度范围内,Z型风屏障可大幅减小列车周围的风速,最低减小 20% 环境风速,对安全行车有积极作用;导风角为 20° 时,风速折减系数在列车顶部衰减很小,在列车高度范围内一直维持在 0.6 以上,减风效果最好;该结果与叶片式导风屏障导风角度为 20° 时导风性能最优^[8-9]的结论一致。

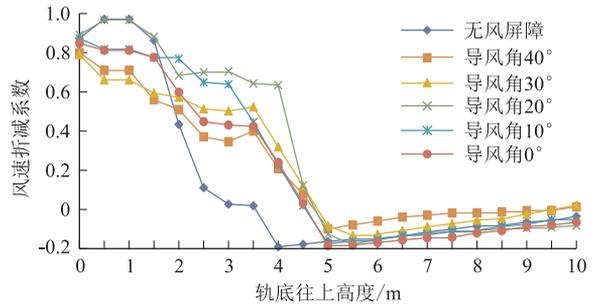


图5 导风角对风速折减系数的影响图

结合导风角对列车、桥梁气动系数、风速折减系数的影响,以及既有叶片式导风屏障的研究结论,本试验选 20° 导风角作为后续分析参数。

2.3.3 透风率及高度对列车桥梁气动系数的影响

无风屏障以及Z型风屏障透风率为 20% 、 30% 时列车、桥梁的三分力系数如图6所示。由图6可知,Z型风屏障透风率为 20% 、 30% 时列车、桥梁的三分力系数基本一样。

考虑到Z型风屏障透风率是通过开孔率来控制,透风率小,开孔少,结构自重,对桥梁附加荷载也大,因此可结合风速折减系数选择最有利于行车的透风率。

2.3.4 高度对列车、桥梁气动系数的影响

无风屏障以及Z型风屏障高度为 3.0 m 、 3.5 m 、

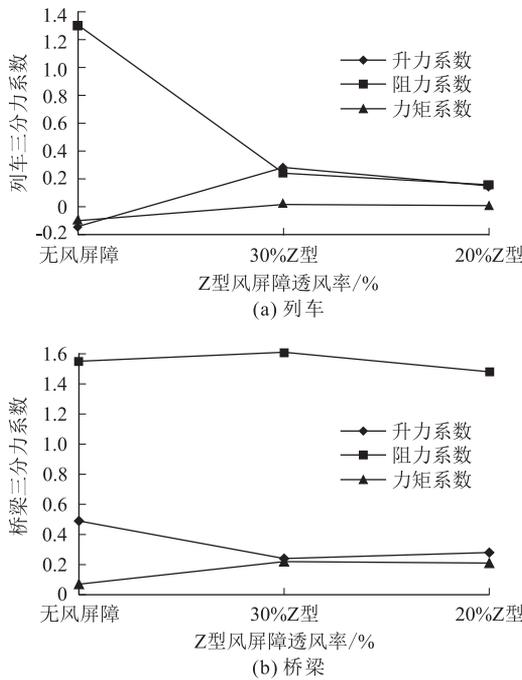


图 6 透风率对列车、桥梁的气动影响图

4.0 m 时,列车、桥梁的三分力系数如图 7 所示。

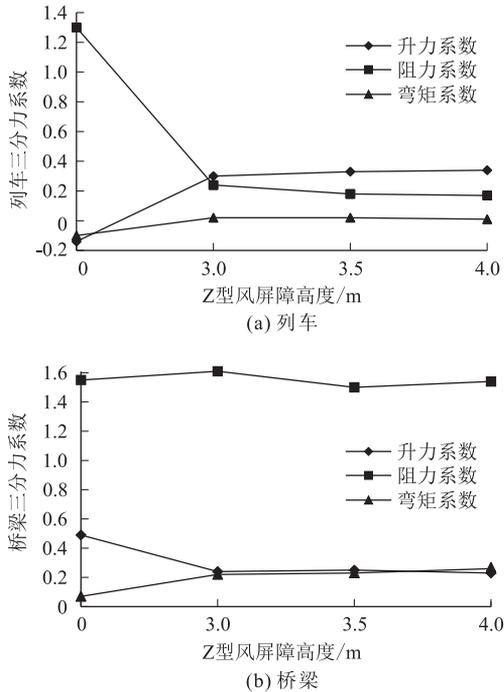


图 7 高度对列车、桥梁的气动影响图

由图 7 可知,Z 型风屏障高度从 3.0 m 增加到 4.0 m,列车的阻力系数降低 30%,升力系数增加 15%,弯矩系数不变;桥梁的三分力系数变化幅度很小。

仅从三分力判断,选择 3.0 m 高度更节约成本,且增加桥梁附加力最小。可进一步通过风速折减系数、

风车桥耦合确定挡风效果与经济性能兼顾的高度。

2.3.5 透风率及高度对风速折减系数的影响

无风屏障以及 Z 型风屏障透风率为 30%,3.0 m、3.5 m、4.0 m 高,透风率为 20%,3.0 m、3.5 m、4.0 m 高工况下的风速折减系数如图 8 所示。

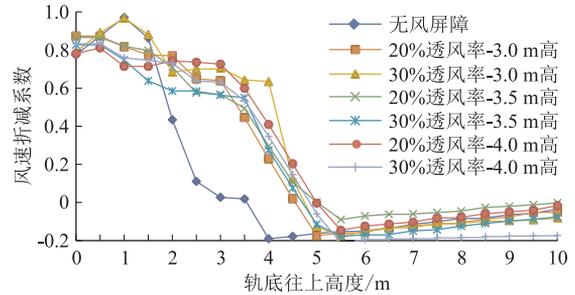


图 8 透风率及高度对风速折减系数的影响图

由图 8 可知,同等高度时,透风率对风速折减系数影响很小;高度对风速折减系数有一定影响,但并非高度越高,风速折减系数越小;总体上,透风率 30% 高度 3 m 时,风速折减系数在列车顶部衰减减小,在整个列车高度范围内一直保持在 0.6 以上。

列车、桥梁气动系数及风速折减系数作为 Z 型风屏障设计的初步判断参考,但其应用须完全满足 GB/T 5599 - 2019《机车车辆动力学性能评定及试验鉴定规范》^[10] 的评价指标。

3 风 - 车 - 桥动力耦合振动响应

3.1 风 - 车 - 桥耦合振动分析模型

采用数值模型对 CRH3 型客车通过 10 跨 32 m 简支箱梁桥的桥梁风 - 车 - 桥耦合振动动力响应进行计算,计算采用列车编组为 4 × (1 × 动 + 2 × 拖 + 1 × 动) 共 16 辆车,按德国低干扰谱模拟轨道不平顺随机样本作为系统激励。风 - 车 - 桥耦合振动分析方法及系统运动方程的求解详解参考文献[11 - 12]。

3.2 风速的影响

依据 GB/T 5599 - 2019《机车车辆动力学性能评定及试验鉴定规范》,需要对列车运行的安全性指标(包括脱轨系数、轮重减载率、车体振动加速度)进行评价,各项评价指标均须在规定的限值内。

考虑单线迎风、单线背风、双线行车 2 种工况,在 15 m/s、20 m/s、25 m/s、30 m/s、35 m/s、40 m/s、45 m/s、50 m/s、55 m/s、60 m/s 十种风速,采用不同的车速对无风屏障以及设置十种风屏障的 10 跨 32 m 简支箱梁桥模型进行分析。设计车速为 400 km/h,最高计算车速外延 20%,因此检算速度段车速为 400 ~ 480 km/h。

3.2.1 风速对列车的影响

不设置风屏障时列车的振动响应结果如表2所示。由表2可知,不设置风屏障,桥面风速 ≤ 20 m/s,列车车速为480 km/h时,列车的各项结果均小于规范限值,桥面风速 ≤ 25 m/s;列车车速为200 km/h时,轮重减载率已接近规范限值;车速达到225 km/h时,轮重减载率超过限值,说明列车仅能以200 km/h通过桥梁,桥面风速达到30 m/s时,须停运。

表2 无风屏障时列车振动响应结果表

风速/(m/s)	车速/(km/h)	脱轨系数	轮重减载率	竖向加速度/(m/s ²)	横向加速度/(m/s ²)
20	400	0.26	0.65	0.97	0.60
	480	0.29	0.79	1.16	0.70
25	200	0.23	0.63	0.69	0.46
	225	0.23	0.68	0.67	0.46
30	10	0.25	0.68	0.43	0.57
规范限值	车速 ≤ 400 km/h, 0.65		1.50	2.00	
	车速 > 400 km/h, 0.80				

透风率为30%时,3.0 m、3.5 m、4.0 m高的Z型风屏障以检算车速400~480 m/h计算得到的列车脱轨系数、轮重减载率、列车横向、竖向振动加速度的变化曲线如图9~图12所示(以迎风侧、背风侧、双线行车最大结果为例)。

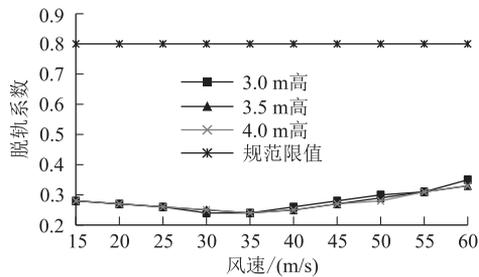


图9 列车脱轨系数图

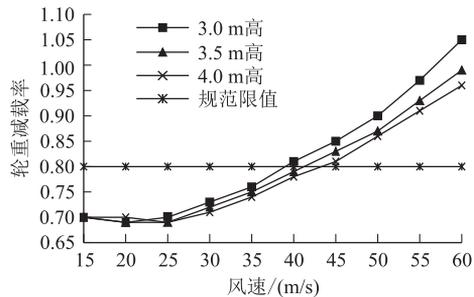


图10 列车轮重减载率图

由图9~图12可知,列车以检算车速400~480 km/h通过桥梁时,仅列车轮重减载率随Z型风屏

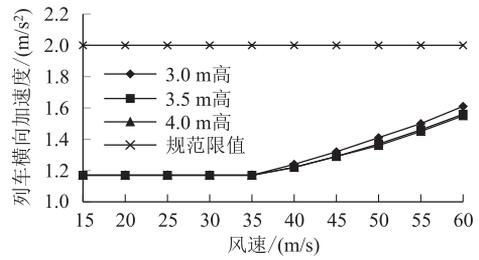


图11 列车横向加速度图

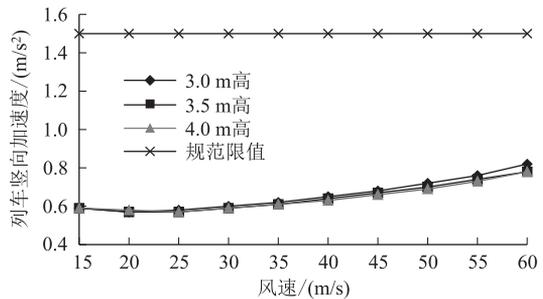


图12 列车竖向加速度图

障高度的增加稍有减小,脱轨系数、列车横向、竖向振动加速度不随高度的变化而变化。由图10可知,列车的各项响应总体上随风速的增大而增大;风速 ≤ 40 m/s,安装3 m高Z型风屏障,列车轮重减载率即可满足规范限值,该高度也有利于节约成本和减小桥梁附加力;风速达到45 m/s时,安装4 m高Z型风屏障可满足规范限值;风速超过45 m/s时,列车须考虑降速。

另外,列车横向加速度、轮重减载率递增的幅度明显比竖向加速度递增的幅度大,这是由于横桥向是风的主流方向,风对列车横向影响比竖向显著,且风速 ≥ 30 m/s时,响应更显著。由此可见,风速是影响行车安全性的主要因素。

3.2.2 风速对桥梁的影响

桥梁跨中横向、竖向振动位移随风速的变化曲线如图13、图14所示。

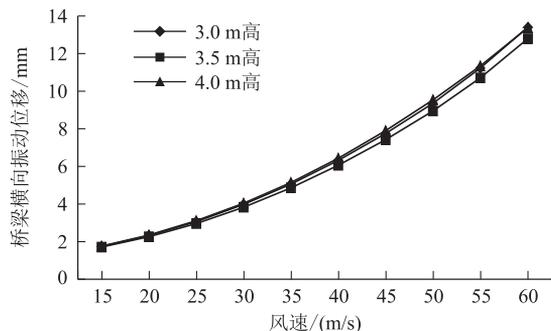


图13 桥梁横向位移图

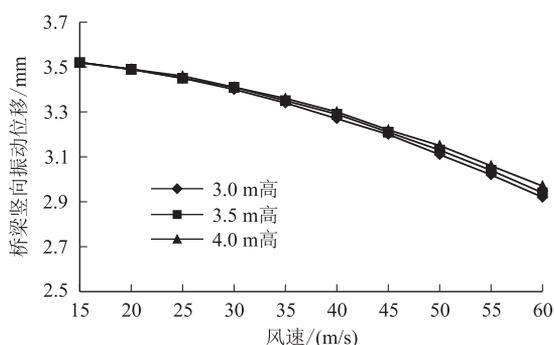


图 14 桥梁竖向位移图

由图 13、图 14 可知,桥梁跨中横向振动位移随着风速的增大而增大,但最大值仅 14 mm,竖向振动位移随着风速的增大而减小;横向、竖向振动位移均不随 Z 型风屏障高度的变化而变化。这是由于横桥向为风的主流方向,脉动风在横桥向对桥梁位移响应影响较大,而竖向主要受到列车重力加载的影响,风的影响较小。结合图 4 也可说明 Z 型风屏障对横风有良好的导向及分散作用,减小了桥梁的阻力系数、升力系数,及对桥梁的竖向振动作用。

3.3 风作用下列车抗风行车准则

风速小于 40 m/s 时,列车可按设计车速 400 m/h 通过桥梁。针对风速 > 40 m/s,透风率为 30%,3 m 高的 Z 型风屏障进行风车桥耦合分析,确定各风速下列车运行速度阈值。

保持风速不变,假定列车以恒定车速通过桥梁,计算列车各项运行安全指标,直至某一项指标超出规范限值,将此时的车速作为该风速下车辆能安全通过桥梁的临界车速,结果如表 3 所示。

表 3 安装 Z 型风屏障列车风速 - 车速阈值表

桥面平均风速/(m/s)	15~40	45	50	55	60
容许最高检算车速/(km/h)	480	275	250	200	125
容许最高运行车速/(km/h)	400	225	205	165	100

4 结论

(1) 与不设置风屏障相比,安装 Z 型风屏障后列车高度范围内风速最小减少 40%;列车的阻力系数明显降低,升力系数和倾覆力矩系数基本不受影响;桥梁三分力系数变化不大。

(2) 基于风洞试验、风车桥耦合分析结论,并考虑 Z 型风屏障成本、对桥梁的影响,适用于简支梁桥的 Z 型风屏障的最优参数为导风角度 20°、透风率 30%、

高度 3 m。

(3) Z 型风屏障显著降低了列车的脱轨系数、轮重减载率、横向、竖向加速度,显著改善列车的走行性。对不设置风屏障的简支梁桥,桥面风速超过 25 m/s 时即应限速行驶,超过 30 m/s 时须停运;设置 Z 型风屏障后,风速达到 40 m/s 列车仍可按设计速度 400 km/h 通过桥梁,风速达到 60 m/s 时,列车仍可按 100 km/h 的速度安全运行。

(4) 设置 Z 型风屏障后,桥梁的横向振动位移随着风速的增大而增大,但最大值仅 14 mm,竖向振动位移随着风速的增大而减小;横向、竖向振动位移均不随 Z 型风屏障高度的变化而变化。

参考文献:

- [1] 张田. 强风场中高速铁路桥梁列车运行安全分析及防风措施研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2013.
ZHANG Tian. Safety Analysis and Windproof Measures of High-speed Railway Bridge Trains in Strong Wind Field[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2013.
- [2] 何宝华. 风屏障透风率对侧风下货运专线简支箱梁桥车桥耦合振动影响研究[J]. 高速铁路技术, 2023, 14(4): 56-62.
HE Baohua. A Study on Effect of Ventilation Rate of Wind Barrier on Vehicle-bridge Coupling Vibration of Simply Supported Box Girder Bridge of Freight Dedicated Line under Crosswind[J]. High Speed Railway Technology, 2023, 14(4): 56-62.
- [3] 黄双林. 兰新高铁防风标准研究[J]. 铁道工程学报, 2019, 36(6): 14-17, 73.
HUANG Shuanglin. Research on the Wind Break Standard of Lanzhou-Urumqi High-speed Railway [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2019, 36(6): 14-17, 73.
- [4] 于梦阁, 张继业, 张卫华. 平地上高速列车的风致安全特性[J]. 西南交通大学学报, 2011, 46(6): 989-995.
YU Mengge, ZHANG Jiye, ZHANG Weihua. Wind-induced Security of High-speed Trains on the Ground[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2011, 46(6): 989-995.
- [5] 向活跃, 庞鹏飞, 胡浩, 等. 速度 400 km/h 高速铁路列车风作用的数值模拟研究[J]. 铁道技术标准(中英文), 2023(6): 10-16.
XIANG Huoyue, PANG Pengfei, HU Hao, et al. Numerical Simulation Study on Train-induced Wind Load of 400 km/h High-speed Railway [J]. Railway Technical Standard (Chinese & English), 2023(6): 10-16.
- [6] 权海阳. 时速 400 公里高速列车车体气动载荷及载荷谱研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2021.
QUAN Haiyang. Study on Aerodynamic Load and Load Spectrum of 400 km/h High-speed Train Body[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2021.

(下转第 115 页)

高速铁路技术, 2024, 15(2): 39-44.

QIANG Xingang, YUAN Dong, HE Ping, et al. Study on Characteristics and Formation Mechanisms of Tunnel Gas Outbursts [J]. High Speed Railway Technology, 2024, 15(2): 39-44.

[6] TB10027-2022 铁路工程不良地质勘察规程[S].

TB10027-2022 Specification for Unfavorable Geological Condition Investigation of Railway Engineering[S].

(上接第109页)

[7] 邹云峰, 何旭辉, 周佳, 等. 基于实测数据的CRH380列车风作用下风屏障风荷载多分辨率分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(2): 407-414.

ZHANG Zhengzhou, OUYANG Peng, HAN Yongjun, et al. A Study on Method for Workshop Process Design of EMU Depot [J]. High Speed Railway Technology, 2023, 14(4): 1-7.

[8] 吕娜, 刘伟, 谢海清, 等. 叶片式导风屏障挡风性能优化研究[J]. 高速铁路技术, 2022, 13(1): 78-82, 88.

LV Na, LIU Wei, XIE Haiqing, et al. Study on Optimization of Wind-Proof Performance of Vane-type Wind Deflector [J]. High Speed Railway Technology, 2022, 13(1): 78-82, 88.

[9] 吕娜, 张英虹, 谢海清, 等. 基于风-车-桥耦合振动的导风屏障防风效果研究[J]. 高速铁路技术, 2023, 14(3): 32-36.

LV Na, ZHANG Yinghong, XIE Haiqing, et al. A Study on the Windproof Effect of Wind Deflector Based on Windvehicle-bridge Coupled Vibration [J]. High Speed Railway Technology, 2023, 14(3): 32-36.

[10] GB/T 5599-2019 机车车辆动力学性能评定及试验鉴定规范[S].

GB/T 5599-2019 Specification for Dynamic Performance Assessment and Testing Verification of Rolling Stock [S].

[11] 张楠, 夏禾, 郭薇薇, 等. 京沪高速铁路南京大胜关长江大桥风-车-桥耦合振动分析[J]. 中国铁道科学, 2009, 30(1): 41-48.

ZHANG Nan, XIA He, GUO Weiwei, et al. Analysis on the Wind-vehicle-bridge Coupling Vibration for Nanjing Dashengguan Yangtze River Bridge of Beijing-Shanghai High-speed Railway [J]. China Railway Science, 2009, 30(1): 41-48.

[12] 许自强, 何德华, 于卫东. 大风工况动车组运行速度限值研究[J]. 铁道机车车辆, 2016, 36(1): 39-43.

XU Ziqiang, HE Dehua, YU Weidong. Research on Limit Operational Speed of CRH Train under High-speed Wind Condition [J]. Railway Locomotive & Car, 2016, 36(1): 39-43.