

悬挂式单轨交通柔性吊杆拱桥 风-车-桥耦合仿真分析*

曾 敏

(中铁第四勘察设计院集团有限公司, 430063, 武汉)

摘 要 [目的] 悬挂式单轨交通柔性吊杆拱桥因具有结构刚度小、轨道梁梁体宽跨比小的特点, 易受风荷载作用从而影响桥梁结构的安全性和列车的舒适性, 需对风-车-桥耦合结构进行研究。[方法] 以我国首条悬挂式单轨交通线路为工程背景, 通过 ANSYS 有限元软件建立长度为 80 m 的柔性吊杆拱桥模型, 通过 Fluent 有限元软件以及多体动力学软件 UM 进行风-车-桥耦合分析, 并通过平稳性指标判断行车情况。[结果及结论] 在风荷载作用下, 列车的横向平稳性指标变化较竖向更剧烈, 其平稳性处于列车运行合格的边缘。当车速和风速增大时, 列车的横向振动明显提升; 车速 40 km/h 下, 20 m/s 风速相比于 10 m/s 风速的最大桥梁横向位移增幅达 159.5%, 最大竖向位移增幅达 11%; 15 m/s 风速相比于 10 m/s 风速的最大桥梁横向位移增幅达 70%, 最大竖向位移增幅达 24.1%。

关键词 悬挂式单轨交通; 柔性吊杆拱桥; 风-车-桥耦合系统

中图分类号 U232

DOI:10.16037/j.1007-869x.2025.01.007

Wind-Vehicle-Bridge Coupling Simulation Analysis of Flexible Hanger Arch Bridge in Suspended Monorail Transit

ZENG Min

(China Railway Fourth Survey and Design Institute Group Co., Ltd., 430063, Wuhan, China)

Abstract [Objective] Due to the characteristics of small structural stiffness and small width-span ratio of the track beam, the flexible hanger arch bridge in suspended monorail transit is vulnerable to wind loads, thus influencing the safety of the bridge structure and the ride comfort of trains. Therefore, it is necessary to conduct research on the wind-vehicle-bridge coupling structure. [Method] With the first suspended monorail transit line in China as the engineering background, a flexible 80-meter hanger arch bridge model is established by the ANSYS finite element software. The wind-vehicle-bridge cou-

pling analysis is carried out through the Fluent finite element software and the multi-body dynamics software UM, and the running condition of the vehicle is judged by the ride comfort index. [Result & Conclusion] Under the action of wind loads, the lateral ride comfort index of the train changes more drastically than the vertical one, and the ride comfort is on the verge to the train operation requirements. When the train speed and wind speed increase, the lateral vibration of the train will be significantly enhanced. At the train speed of 40 km/h, compared with the wind speed of 10 m/s, the maximum lateral displacement of the bridge increases by 159.5% with a wind speed of 20 m/s, and the maximum vertical displacement increases by 11%. While the maximum lateral displacement of the bridge increases by 70% with a wind speed of 15 m/s, the maximum vertical displacement increases by 24.1%.

Key words suspended monorail transit; flexible hanger arch bridge; wind-vehicle-bridge coupling system

近年来我国单轨式交通系统迅速发展, 为城市现代化交通建设提供了多样化的选择。作为中、低运量的城市轨道交通(以下简称“城轨”)系统, 悬挂式单轨交通系统具有投入成本低, 建设周期短, 地形适应能力强, 节能环保等特点, 与未来发展趋势十分契合。悬挂式单轨交通系统具有较大的发展和研究空间, 目前已在国内外得到了广泛应用。

文献[1]针对悬挂式单轨交通系统, 考虑风载荷的流体特征并且运用计算流体力学和有限元法, 建立风载荷流体-轨道梁流固耦合模型, 分析风致振动引起的轨道梁动力响应。文献[2]对悬挂式单轨交通系统的车辆和简支梁桥施加静力风和脉冲风力, 分析了不同风速激励下双线列车交会时的系统动力响应, 研究结果表明气动三分力系数在不同车桥组合下变化明显, 双车交会时背风侧车辆受气动三分力系数变化的影响, 横向加速度在交会前后变

* 中铁第四勘察设计院集团有限公司自立项目(2020K005)

化明显,风载突变效应显著。文献[3]对比分析了悬挂式单轨列车在离心风及向心风作用下车-梁的动力响应差异,并以平稳性指标对行车情况进行判断,结果表明横风对车辆横向平稳性影响较大,风-车-桥中离心风相比向心风更加加剧了车-桥的动态响应。另外还有诸多学者研究了风-车-桥的耦合问题^[4-17]。

由于悬挂式单轨交通系统桥梁结构的类型多样,针对不同桥型的车-桥耦合及风-车-桥耦合研究不充分,而此内容对悬挂式单轨交通系统的结构安全和行车舒适性十分重要。为了更好地保障悬挂式单轨交通列车的安全性和舒适性,为设计和施工提供参考依据和技术支撑,本文以某旅游专线项目中的柔性吊杆拱桥为工程背景,通过 ANSYS 有限元软件建立长度为 80 m 的柔性吊杆拱桥模型,通过 Fluent 有限元软件及 UM 多体动力学软件进行风-车-桥耦合分析,为将来悬挂式单轨交通系统中的桥梁结构设计提供参考。

1 工程背景

该旅游专线是我国首条悬挂式单轨交通线路,梁体采用的是半封闭式箱梁构造,设计速度为 60 km/h,按照 2 辆车编组运行。本文以 1 座长度为 80 m 的柔性吊杆拱桥为研究对象,其梁体采用半封闭式开口箱梁,外箱截面宽度 1 216 mm,内箱截面开口宽度 836 mm,悬挂式单轨交通线路中心距 580 mm。吊杆拱桥标准结构断面如图 1 所示。悬挂式单轨吊杆拱桥有限元模型如图 2 所示。

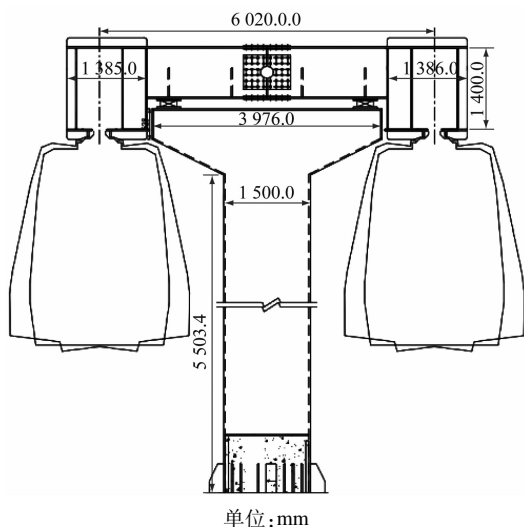


图 1 吊杆拱桥标准结构断面

Fig. 1 Standard structural section of hanger arch bridge

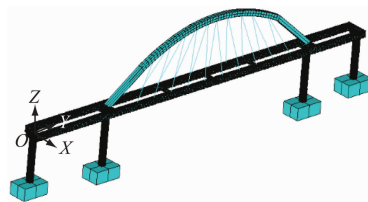


图 2 悬挂式单轨吊杆拱桥有限元模型

Fig. 2 Finite element model of suspended monorail hanger arch bridge

2 风-车-桥耦合系统

2.1 风荷载模型

作用于车-桥系统的风荷载通常可以被分为三部分:由平均风引起的静风力,由脉动风引起的抖振力,以及桥梁结构与流体之间产生的自激力。

静力风荷载参数的选取结构的截面形状、气流作用方向等确定的三分力系数决定了作用在桥梁和车辆上的单位静力风荷载。静力三分力系数是表征各类断面结构在平均风作用下受力大小的量纲一系数,它反映了风对结构的定常气动力作用。风轴坐标系如图 3 所示。风轴坐标下阻力系数 C_D 、升力系数 C_L 及升力矩系数 C_z 定义如下:

$$C_D = F_D / \left(\frac{1}{2} \rho v^2 H \right) \quad (1)$$

$$C_L = F_L / \left(\frac{1}{2} \rho v^2 B \right) \quad (2)$$

$$C_z = M_z / \left(\frac{1}{2} \rho v^2 B^2 \right) \quad (3)$$

式中:

F_D 、 F_L 和 M_z ——单位长度结构的阻力、升力和升力矩;

ρ ——空气质量密度,取 $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$;

v ——来流风速;

H 、 B ——结构的水平投影高度和竖向投影高度。

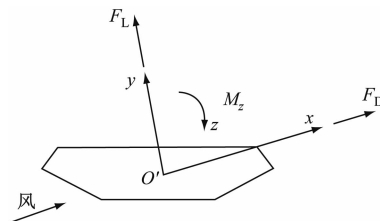


图 3 桥梁结构断面风轴坐标系

Fig. 3 Wind axis coordinate system of bridge structure section

主梁气动力系数计算时, H 和 B 分别取 1.89 m

和 7.14 m;列车气动力系数计算时, H 和 B 分别取 3.4 m 和 2.4 m。

典型桥梁结构断面计算模型(见图 4)位于开放流场中:流场左边界为速度入口边界,采用远场均匀流边界定义;右边界为压力出口边界,采用压强边界定义;其他边界为远场均匀流边界。

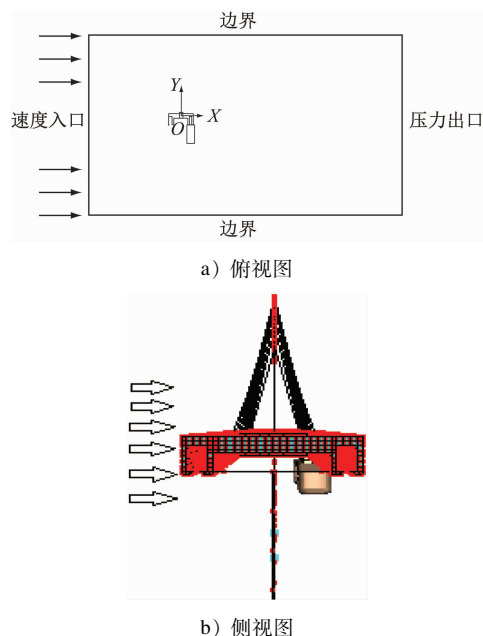


图 4 典型桥梁结构断面计算模型

Fig.4 Calculation model of typical bridge structure section

2.2 静力三分力系数计算结果

主梁断面的静力三分力系数见表 1。悬挂式单轨列车的静力三分力系数见表 2。

表 1 主梁断面的静力三分力系数

Tab.1 Static three-component force coefficients of the main girder section

攻角/(°)	C_D	C_L	C_z
0	2.211 1	2.086 3	-0.122 6

表 2 悬挂式单轨列车的静力三分力系数

Tab.2 Static three-component force coefficient of suspended monorail train

攻角/(°)	C_D	C_L	C_z
0	2.039 0	-0.290 7	-0.057 2

2.3 风场模拟

列车和桥梁受到脉动风场作用,因缺乏实测风速数据,采用模拟脉动风速谱作为风荷载输入。风场沿线路方向共模拟了 40 个风速点,样本长度为 100 s 左右。表 3 仅列出了部分脉动风速谱。图 5 为平均风速为 25 m/s 时测点 1、测点 20 和测点 40 处横桥向脉动风速时程。本文未考虑桥塔等所受风荷载的作用。

表 3 部分脉动风速谱

Tab.3 Partial fluctuating wind speed spectra

测点	不同时间下的风速/(m/s)				
	1 s	5 s	10 s	15 s	20 s
测点 1	1.71	6.16	2.61	4.48	5.16
测点 20	7.99	5.22	3.58	4.92	-4.21
测点 40	-4.57	0.72	0.43	0.54	1.44

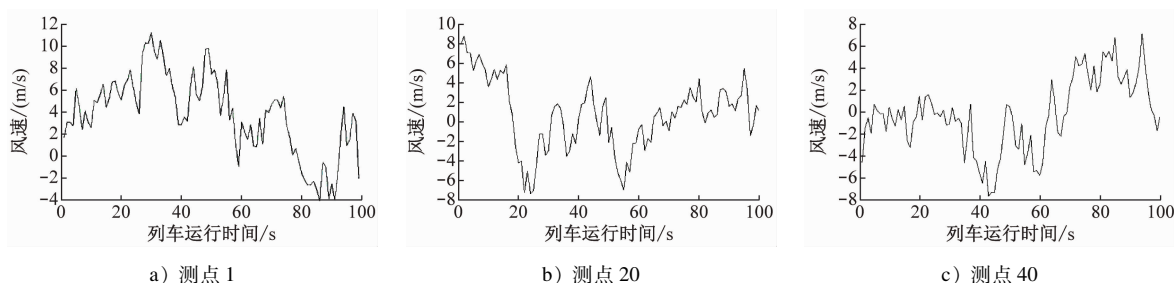


图 5 测点 1、测点 20、测点 40 处横桥向脉动风速时程

Fig.5 Time history of the fluctuating wind speed at the 1st, 20th and 40th measuring points along the bridge lateral direction

基于风速各个模拟点的风场模拟,可以得到沿轨道梁离散模拟点的脉动风场。当列车沿着风速模拟点匀速前进时,列车的脉动风速应采用对应于不同风速模拟点的风速时程,因此列车所受的脉动风速时程是与车速有关的一个时空分布函数。当车速和风速模拟点位置确定后,可以通过模拟的离

散风场方便地得出作用在列车上的脉动风速时程。

3 风-车-桥耦合系统动力响应分析

悬挂式单轨交通系统采用两辆编组列车,包括 1 辆 Mc(带司机室的动力车)和 1 辆 M(无受电弓的动力车),Mc 质量 ≤ 13.5 t,M 质量 ≤ 12.5 t。

在 UM 多体动力学软件中悬挂式单轨交通系统的车辆有限元模型主要可以简化为刚体约束、轮轨约束、铰接约束三种约束,以及力元之间的结合。单车体由 1 个车体、2 个转向架、8 个走行轮、8 个稳定轮和 16 个导向轮组成。转向架主要包括 2 个吊架、1 个构架、1 个摇枕、2 个齿轮箱、1 个牵引拉杆,以及减振弹簧装置。

车体直接连接吊架,吊架通过非线性空气弹簧与摇枕相连,摇枕通过铰接连接转向架构架,左右两侧布置减振止挡以控制车辆与摇枕的最大偏角。

轮对通过铰接约束与构架相连,通过释放局部坐标系 z 轴转动自由度,约束其余 5 个自由度来实现车轮转动。走行轮连接齿轮箱,齿轮箱与构架之间通过一系弹簧相连。

车辆轮胎模型采用 FIALA 非线性模型,将胎面视为弹性且将胎体视为刚性,轮轨之间通过多点接触协调变形实现力的传递。

悬挂式单轨交通线路中的单轨梁不平顺问题,主要是由于轨道梁加工制作、安装误差、残余变形,以及运行阶段的基础不均匀沉降等因素引起,这些因素是该系统振动的主要因素之一。

截至目前,悬挂式单轨交通系统在我国还没有较为完整的轨道不平顺谱,因此在实际工程中,通常使用在建的试验运行线路,通过现场测定的方法进行采集。

在 UM 多体动力学软件中悬挂式单轨列车以速度分别为 40 km/h、60 km/h、80 km/h 通过长度为 80 m 的吊杆拱桥,同时考虑了 10 m/s、15 m/s、20 m/s 的风荷载作用效果。本文利用 ANSYS 有限元软件与 UM 多体动力学软件相结合进行风-车-桥耦合动力分析计算。图 6 为风-车-桥耦合动力计算模型。风-车-桥耦合动力计算模型前两阶振型见图 7。计算模型频率与最大位移见表 4。

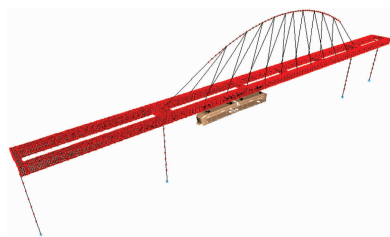
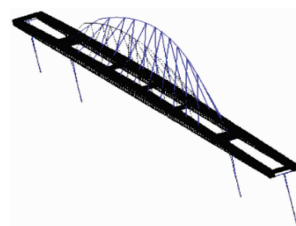
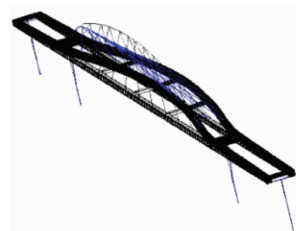


图 6 风-车-桥耦合动力计算模型

Fig. 6 Wind-vehicle-bridge coupling dynamic calculation model



a) 一阶振型



b) 二阶振型

图 7 风-车-桥耦合动力计算模型前两阶振型

Fig. 7 First two vibration modes of the wind-vehicle-bridge coupling dynamic calculation model

表 4 计算模型频率与最大位移

Tab. 4 Calculation model frequency and maximum displacement

振型	频率/Hz	最大位移/m
一阶	0.740 132	0.003 816
二阶	1.140 470	0.002 740

3.1 平稳性指标

根据 GB/T 5599—2019《机车车辆动力学性能评定及试验鉴定规范》,平稳性指标是评价车辆安全舒适的关键性指标之一。在风荷载作用下长度为 80 m 吊杆拱桥上列车横向、竖向平稳性指标如图 8 所示。

由图 8 可知:当车速为 40 km/h 时,列车平稳性指标在竖向上属于优秀,横向上基本属于良好的范围;但当风速达 20 m/s 时,横向平稳性指标有达到临界值的危险,因此在风速较大情况下应减速通行,以减小乘客对列车振动的不适感。当车速达 60 km/h、80 km/h 时,列车竖向平稳性指标最大不超过 2.3 时运行品质较好;但横向平稳性指标接近 3.0,并且在风速增加的同时逐渐增大并超出 3.0,达到了列车运行合格的边缘,应当采取减速或停车等方式保证行车安全和乘客的舒适度。由此可知,在行车过程中,横向平稳性指标变化较竖向更剧烈,应着重考虑。

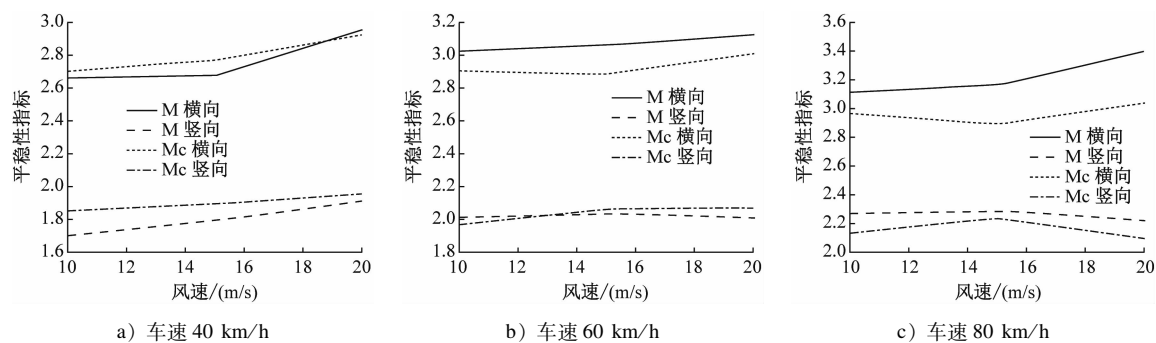


图 8 列车平稳性指标-风速关系曲线

Fig. 8 Relationship curve between train ride comfort index and wind speed

3.2 不同风速下的列车振动加速度

3.2.1 横向振动加速度

在不同风速作用下,列车通过柔性吊杆拱桥时的横向振动加速度如图 9 所示。由图 9 可见:当车速和风速增大的情况下,列车的横向振动加速度明显提升;当风速为 10 m/s 和 15 m/s 时,列车的横向振动加速度均处于 2.0 m/s^2 内,只有极少时刻车体

最大横向振动加速度接近 2.5 m/s^2 ,接近规范限值;而当风速达到 20 m/s 时,车体振动提升较大;当车速为 40 km/h 时,列车的最大横向振动加速度接近 2.5 m/s^2 ;当车速为 60 km/h 时,列车的最大横向振动加速度接近 3.0 m/s^2 ,超过了规范限值;当车速为 80 km/h 时,列车的最大横向振动加速度超过 3.0 m/s^2 ,远超规范限值。

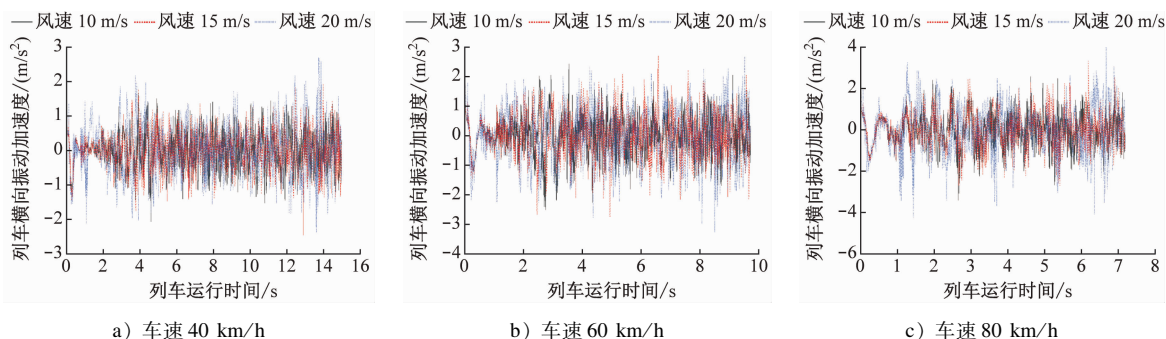


图 9 列车横向振动加速度动力响应

Fig. 9 Dynamic response of train lateral vibration acceleration

3.2.2 竖向振动加速度

在不同风速作用下,列车在单轨交通上运行的竖向振动加速度动力响应如图 10 所示。由图 10 可见:当车速为 40 km/h 时,风速的增大对列车竖向

振动加速度振动略有提升;当车速达 60 km/h、80 km/h 时,车体振动明显提升;列车在 3 种车速下的最大竖向振动加速度分别为 0.80 m/s^2 、 0.90 m/s^2 、 1.25 m/s^2 ,均小于规范限值 2.50 m/s^2 ,满足行车品

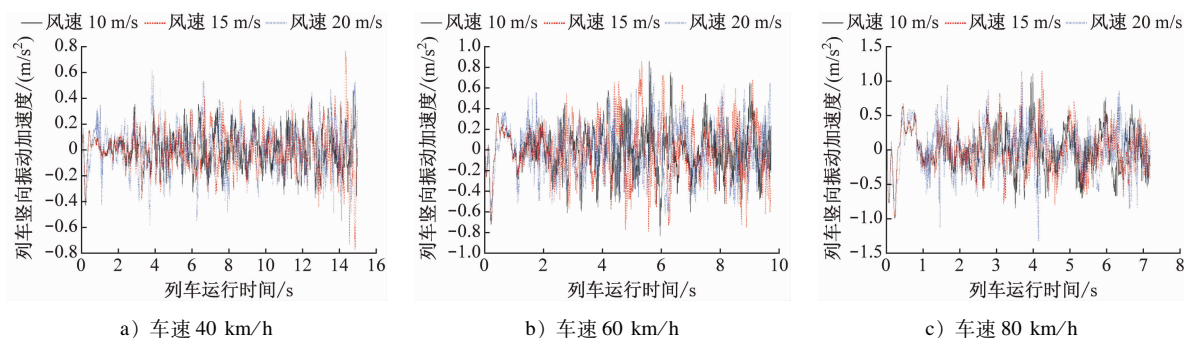


图 10 列车竖向振动加速度动力响应

Fig. 10 Dynamic response of train vertical vibration acceleration

质要求。

3.3 桥梁振动加速度

桥梁横向和竖向振动加速度动力响应如图 11 和图 12 所示。由图 11 和图 12 可知:桥梁的动力响应变化规律与列车基本一致,随着风速和车速的增大,桥梁的竖向及横向振动提升明显,当车速为 40 km/h 时,桥梁的最大横向振动加速度为 1.25

m/s^2 ,最大竖向振动加速度为 0.80 m/s^2 ;当车速为 60 km/h 时,桥梁的最大横向振动加速度增至 1.75 m/s^2 ,最大竖向振动加速度增至 2.00 m/s^2 ;当车速为 80 km/h 时,桥梁的最大横向振动加速度为 1.50 m/s^2 ,最大竖向振动加速度为 2.50 m/s^2 。由此可见,上述桥梁动力响应均满足规范要求。

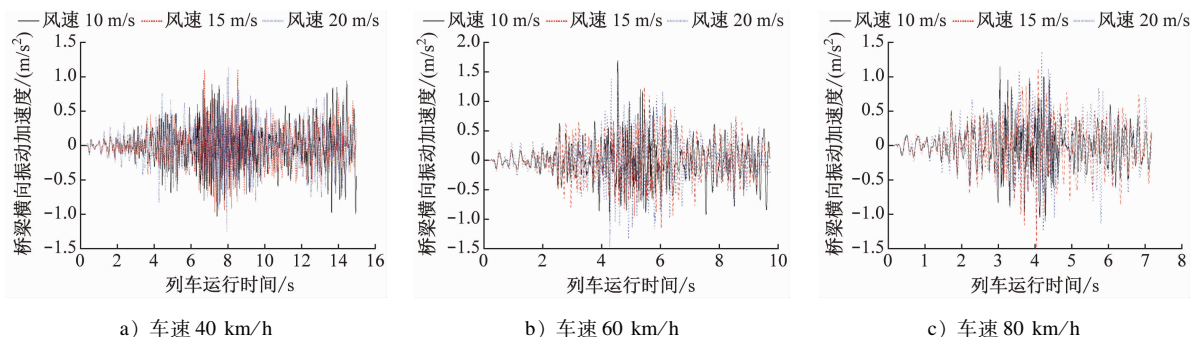


图 11 桥梁横向振动加速度动力响应

Fig. 11 Dynamic response of bridge lateral vibration acceleration

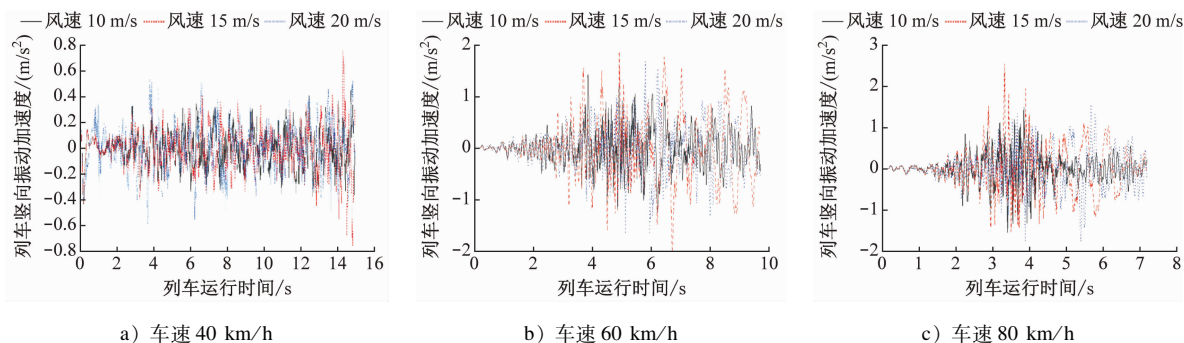


图 12 桥梁竖向振动加速度动力响应

Fig. 12 Dynamic response of bridge vertical vibration acceleration

3.4 不同风速下的桥梁跨中位移

3.4.1 横向位移

相较于车速对桥梁位移响应的影响,风速对桥梁位移响应的影响极为明显,本文在车速 40 km/h 下进行分析。桥梁中跨跨中横向位移如图 13 所示。由图 13 可知:随着风速的增大,桥梁横向位移明显增加。由于本文研究的吊杆拱桥的跨度较大,因此跨中横向位移较大。在车速为 40 km/h 时,10 m/s 风速下的桥梁最大横向位移为 13.25 mm,挠跨比为 $1/6\ 038$;15 m/s 风速下的桥梁最大横向位移为 20.20 mm,挠跨比为 $1/3\ 960$;20 m/s 风速下的桥梁最大横向位移为 34.36 mm,挠跨比为 $1/2\ 328$ 。20 m/s 风速比 10 m/s 风速的最大桥梁横向位移增幅

达 159.5%,比 15 m/s 风速的最大桥梁横向位移增幅达 70%。

3.4.2 竖向位移

桥梁中跨跨中竖向位移如图 14 所示。由图 14 可见:

1) 在车速 40 km/h 下,20 m/s 风速比 10 m/s 风速的最大桥梁竖向位移增幅达 11%,比 15 m/s 风速的最大桥梁竖向位移增幅达 24.1%。

2) 10 m/s 风速下的桥梁最大竖向位移为 31.05 mm,挠跨比为 $1/2\ 576$;15 m/s 风速下的桥梁最大竖向位移为 27.77 mm,挠跨比为 $1/2\ 881$;20 m/s 风速下的桥梁最大竖向位移为 34.46 mm,挠跨比为 $1/2\ 322$ 。

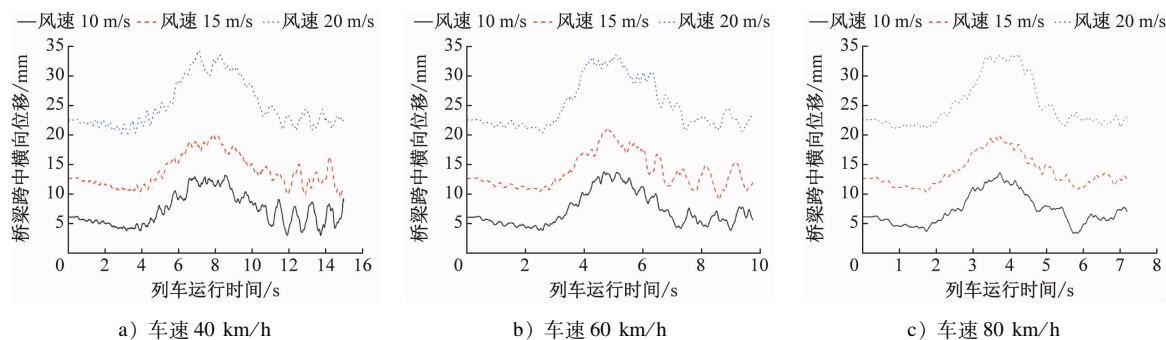


图 13 桥梁中跨跨中横向位移

Fig. 13 Lateral displacement at the bridge mid-span of the central span

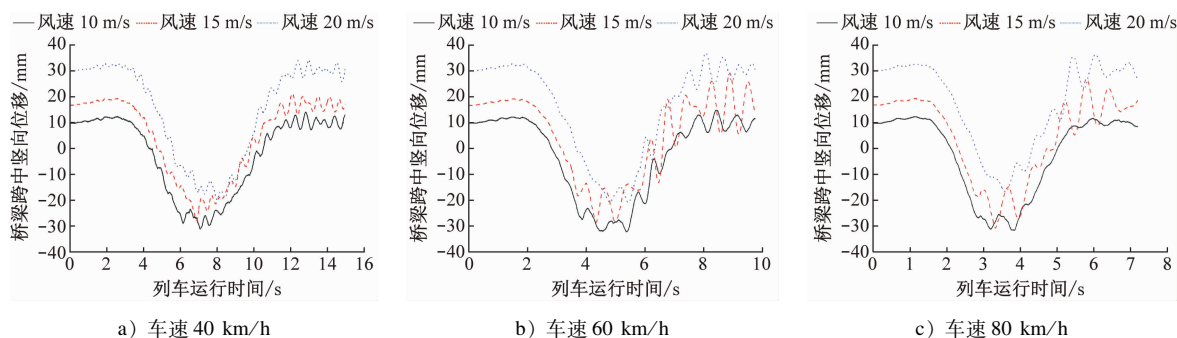


图 14 桥梁中跨跨中竖向位移

Fig. 14 Vertical displacement at the bridge mid-span of the central span

4 结语

1) 本文结合 ANSYS、Fluent 有限元软件以及 UM 多体动力学软件进行了悬挂式单轨交通系统风-车-桥耦合计算分析,评估了悬挂式单轨列车的安全性和舒适性,并为设计和施工提供了参考依据和技术保障。

2) 考虑了车辆平稳性指标、列车及桥梁的横竖向振动加速度等响应,证明了吊杆拱桥在车速 60 km/h 下的合理性,列车各项指标均满足规范要求且评级优秀,但在风速 20 m/s 下临近边界线,建议当风速超过 15 m/s 时,悬挂式单轨列车应采取减速或停运等措施保障乘客的舒适和行车的安全。

3) 通过分析桥梁及列车的动力响应发现,当车速和风速增大的情况下,列车的横向振动明显提升,竖向振动小幅波动。列车在 60 km/h 下的动力响应评级较好,由于本文研究的吊杆拱桥的跨度较大,20 m/s 风速相比于 10 m/s 风速下的桥梁最大横向位移增幅达 159.5%,最大竖向位移增幅达 11.0%;15 m/s 风速相比于 10 m/s 风速下的桥梁最大横向位移增幅达 70.0%,最大竖向位移增幅达 24.1%。

参考文献

- [1] 赵威,刘艳,李秋彤,等. 侧风作用下悬挂式单轨轨道梁动力响应分析及减振措施设计[J]. 铁道标准设计, 2022, 66(7): 88.
ZHAO Wei, LIU Yan, LI Qiucong, et al. Study on dynamic response and vibration reduction measures of suspended monorail beam under crosswind[J]. Railway Standard Design, 2022, 66(7): 88.
- [2] 郑晓龙,徐建华,鲍玉龙,等. 悬挂式单轨简支梁风车桥耦合动力分析[J]. 铁道工程学报, 2020, 37(2): 53.
ZHENG Xiaolong, XU Jianhua, BAO Yulong, et al. Dynamic analysis of wind-vehicle-bridge coupling system for suspended monorail simply supported beam[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2020, 37(2): 53.
- [3] 曾敏,祝兵,张振,等. 悬挂式单轨小半径弯桥风-车-桥耦合动力分析[J]. 铁道标准设计, 2022, 66(12): 66.
ZENG Min, ZHU Bing, ZHANG Zhen, et al. Wind-vehicle-bridge coupling dynamic analysis of suspension monorail small radius curved bridge[J]. Railway Standard Design, 2022, 66(12): 66.
- [4] 鲍玉龙. 悬挂式单轨交通系统车桥耦合振动仿真研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
BAO Yulong. Simulation study on vehicle-bridge coupling vibration of suspended monorail traffic system[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.

- [5] 沈锐利, 杨忠明, 郭日强, 等. 超大跨径斜拉桥纵向极限风荷载作用下约束体系研究[J]. 世界桥梁, 2022, 50(1): 59. SHEN Ruili, YANG Zhongming, GUO Riqiang, et al. Study of restraint systems for super-long-span cable-stayed bridge to resist extreme longitudinal wind load[J]. World Bridges, 2022, 50(1): 59.
- [6] 李永乐, 张明金, 胡朋, 等. 车辆运动对车-桥系统气动特性的影响研究[C]//中国土木工程学会桥梁与结构工程分会风工程委员会. 第十四届全国结构风工程学术会议论文集(中册). 成都:西南交通大学桥梁工程系, 2009:6. LI Yongle, ZHANG Mingjin, HU Peng, et al. Study on the influence of vehicle motion on the aerodynamic characteristics of vehicle-bridge system[C]//Wind Engineering Committee of Bridge and Structural Engineering Branch of China Civil Engineering Society. Proceedings of the 14th National Structural Wind Engineering Academic Conference (Volume II). Chengdu: Department of Bridge Engineering, Southwest Jiaotong University, 2009: 6.
- [7] 高宇琦, 王浩, 徐梓栋, 等. 大跨度高铁连续梁桥箱梁断面静力三分力系数的数值模拟[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2020, 42(3): 358. GAO Yuqi, WANG Hao, XU Zidong, et al. Numerical simulation of static tri-component coefficients of girder sections of a long-span high-speed railway continuous beam bridge[J]. Journal of Nanjing Tech University (Natural Science Edition), 2020, 42(3): 358.
- [8] 郭俊峰. 大跨度拱桥箱梁静力三分力系数研究[J]. 四川建筑, 2021, 41(2): 204. GUO Junfeng. Study on static three-component coefficient of box girder of long-span arch bridge[J]. Sichuan Architecture, 2021, 41(2): 204.
- [9] 杨威, 朱尔玉, 张波, 等. 风荷载作用下跨座式单轨交通系统导向轮受力和变形分析[J]. 北方交通大学学报, 2002, 26(4): 1. YANG Wei, ZHU Eryu, ZHANG Bo, et al. Interaction analysis between track beam and vehicle for over-seat single-track transit systems under transverse load[J]. Journal of Northern Jiaotong University, 2002, 26(4): 1.
- [10] 姚龙龙, 刘清. 基于风速风向联合分布理论的梁桥风荷载分析[J]. 四川建材, 2022, 48(2): 161. YAO Longlong, LIU Qing. Revision of beam bridge wind load analysis based on the joint distribution theory of wind speed and direction [J]. Sichuan Building Materials, 2022, 48(2): 161.
- [11] 王旭, 袁波, 陈红鸟, 等. 三维风场下的不同桥梁断面形式的气动特性数值分析[J]. 应用力学学报, 2019, 36(2): 473. WANG Xu, YUAN Bo, CHEN Ghongniao, et al. Aerodynamic selection research of bridge girder section in three-dimensional wind field[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2019, 36(2): 473.
- [12] 吕铭泉. 山区高墩大跨桥梁静力三分力系数参数影响研究[J]. 公路工程, 2018, 43(3): 241. LYU Mingquan. Research on the effect of the parameters of the aerostatic coefficients to the mountainous high-pier and large-span bridge[J]. Highway Engineering, 2018, 43(3): 241.
- [13] 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, 2016. CHEN Hao. Numerical simulation on aerodynamic characteristics of vehicles and bridges under cross wind[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2016.
- [14] 孙富强. 风荷载作用下大跨度桥梁颤振数值仿真研究[D]. 保定: 河北大学, 2020. SUN Fuqiang. Numerical simulation of flutter of long span bridges under wind load[D]. Baoding: Hebei University, 2020.
- [15] 王少钦. 风及列车荷载作用下大跨度桥梁振动响应研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012. WANG Shaoqin. Dynamic Analysis of Long-span Bridge Subjected to Corss Wind and Train[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012.
- [16] ZOU Y, LIU Z, SHI K, et al. Experimental study of aerodynamic interference effects for a suspended monorail vehicle-bridge system using a wireless acquisition system[J]. Sensors, 2021, 21(17): 5841.
- [17] HE Q, CAI C, ZHU S, et al. Key parameter selection of suspended monorail system based on vehicle-bridge dynamical interaction analysis [J]. Vehicle System Dynamics, 2020, 58(3): 339.
- 收稿日期:2022-09-21 修回日期:2022-11-21 出版日期:2025-01-10
Received:2022-09-21 Revised:2022-11-21 Published:2025-01-10
· 通信作者:曾敏,高级工程师,121653316@qq.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

欢迎投稿《城市轨道交通研究》

投稿网址:tougao. umt1998. com