

文章编号:1671-1637(2015)06-0017-09

三线合一、三塔悬索桥风-车-桥耦合振动性能对比

李永乐,徐昕宇,严乃杰,邓江涛,向活跃

(西南交通大学 土木工程学院,四川 成都 610031)

摘要:以某三线合一、三塔悬索桥的2种设计方案(钢箱桁和钢桁方案)为工程背景,通过车桥系统节段模型风洞试验,测试了车辆和桥梁的三分力系数,并基于风-车-桥系统空间耦合动力学模型,采用自主研发的桥梁分析软件 BANSYS,对比分析了该桥的结构动力特性与风-车-桥耦合振动性能。分析结果表明:三线合一、三塔悬索桥结构自振频率较低;车辆气动力受轨道位置的影响较大,钢桁方案迎风侧车辆阻力系数约为钢箱桁方案的2.2倍;当风速为0时,桥梁、车辆的动力响应总体上是随车速的增大而增大,在同一车速下,钢桁方案的桥梁位移较钢箱桁方案大,主要是由于钢桁方案的桥梁整体刚度略弱于钢箱桁方案;当考虑风速影响时,桥梁的横向响应随风速的增大而显著增大;车辆位于迎风侧,风速为 $25\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,钢箱桁方案和钢桁方案的桥梁横向位移约分别为风速为 $15\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时的位移的2.4倍和3.8倍,横风对桥梁的横向响应起主导作用;同一风速时钢桁方案的桥梁响应总体上较钢箱桁方案大;同一方案时车辆响应随风速的增大而增大,当风速达到 $25\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,车辆动力响应显著增加,相比 $15\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时最大增加幅度为71.6%。

关键词:桥梁工程;风-车-桥系统;耦合振动;三线合一、三塔悬索桥;不同断面形式;风荷载

中图分类号:U441.3

文献标志码:A

Comparison of wind-vehicle-bridge coupling vibration characteristics for three-line three-tower suspension bridge

LI Yong-le, XU Xin-yu, YAN Nai-jie, DENG Jiang-tao, XIANG Huo-yue

(School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China)

Abstract: Taking the two design schemes (steel-box-truss and steel-truss schemes) of a three-line three-tower suspension bridge as the research object, the three-component coefficients of forces for vehicle and bridge were obtained by the wind tunnel tests of vehicle-bridge system section model. Based on the spatial dynamics model of wind-vehicle-bridge(WVB) system, the dynamic characteristics of bridge and the coupling vibration characteristics of WVB system were analyzed by using the self-developed software BANSYS. Analysis result indicates that the natural frequencies of three-line three-tower suspension bridge are comparatively low. The aerodynamic characteristics of vehicle were greatly affected by track position, and the drag coefficient of windward vehicle for the steel-truss scheme is about 2.2 times that for the steel-box-truss scheme. When wind speed is 0, the dynamic responses of bridge and vehicle increase with the increase of vehicle speed. The displacements of bridge for the steel-truss scheme are bigger than those for the steel-box-truss scheme at the same vehicle speed, which is resulted from the weaker whole stiffness for the steel-truss scheme. When wind speed is considered, the lateral responses

收稿日期:2015-07-08

基金项目:国家自然科学基金项目(U1334201,51278434)

作者简介:李永乐(1972-),男,河南洛阳人,西南交通大学教授,工学博士,从事大跨度桥梁风致振动及车桥耦合振动研究。

of bridge greatly increase with wind speed increasing. When vehicle is running on the windward side and wind speed increases from $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ to $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, the lateral displacements of bridge for the steel-box-truss and steel-truss schemes enlarge to approximate 2.4 times and 3.8 times respectively, and crosswind is dominant to the lateral responses of bridge. On the whole, the bridge responses for the steel-truss scheme are larger than those for the steel-box-truss scheme under the same wind speed. As for the same scheme, vehicle responses increase with wind speed increasing. When wind speed reaches $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, the dynamic responses remarkably increase, and the maximum response index increases by 71.6% compared with that at the wind speed of $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. 4 tabs, 18 figs, 22 refs.

Key words: bridge engineering; WVB system; coupling vibration; three-line three-tower suspension bridge; different section form; wind load

Author resume: LI Yong-le(1972-), male, professor, PhD, +86-28-87601119, lele@swjtu.edu.cn.

0 引 言

随着过江(河)通道的增加,过江桥位资源越来越有限,公铁两用或多线合并已逐渐成为发展趋势,以多塔悬索桥的方式跨越大江、海峡,是一个经济、可行的选择^[1-3]。目前,已建成一些公铁两用大跨度悬索桥为双塔形式,尚无三塔形式。与双塔悬索桥相比,三塔悬索桥因多了一个中塔和一个主跨,桥梁结构特性显著不同,对风和列车的作用可能更加敏感^[4-7]。

大跨度悬索桥结构轻柔,对风的作用敏感,而列车质量较大,列车作用下的悬索桥响应比一般桥梁要大,风的作用下列车行车的安全性和舒适性已成为大桥动力设计的重要内容之一,因此,有必要对公铁两用悬索桥的结构特性与风-车-桥系统耦合动力响应进行研究^[8-9]。近些年,研究人员主要以双塔悬索桥为背景,对风-车-桥耦合振动问题进行了研究。Xu 等研究了在风荷载作用下列车通过香港青马大桥的动力性能,但由于列车本身运行于大桥箱梁内部,车体未直接承受风荷载,因此,列车行驶时,风仅与桥梁产生相互作用^[10-11];Diana 等研究了单主跨为 3 300 m 的墨西哥海峡大桥在风作用下的响应和列车的走行性^[12-13];Kwon 等分析了在风荷载作用下磁悬浮列车通过主跨为 404 m 的悬索桥时桥梁

与车辆的动力响应^[14];刘清江以几江长江大桥推荐方案为背景进行风-车-桥耦合振动分析,评判了列车通过桥梁时的安全性^[15];李永乐等提出了较为完善的风-车-桥耦合振动模型,针对某钢箱梁悬索桥进行了耦合振动研究,讨论了风速、列车速度与轨道布置位置等因素对车辆和桥梁的影响,并对桥上列车双车交会过程进行了分析^[16-17];张敏等分析了一跨三塔公铁两用悬索桥风-车-桥耦合振动,结果表明风荷载对系统起控制作用^[18]。但目前国内外针对三线合一、三塔悬索桥的不同桥梁断面形式情况下的车辆气动特性、桥梁动力响应与车辆走行性的一系列对比性研究较为少见。

本文以某三线合一(1 条铁路线与 2 条公路线)、三塔悬索桥为研究对象,通过车桥系统节段模型风洞试验测试桥梁 2 种设计方案下的车辆与桥梁三分力系数,采用自行研发的桥梁结构分析软件 BANSYS (Bridge Analysis System) 分析了风-车-桥耦合振动性能与风速、车速、断面形式的影响。

1 工程概况

三线合一、三塔悬索桥是一座 6 车道高速公路、6 车道城市主干道和双线市郊铁路三线共建的桥梁,总体布置见图 1。2 种设计方案为钢箱桁方案与钢桁方案:钢箱桁方案的跨径布置为 $52 \text{ m} + 2 \times$

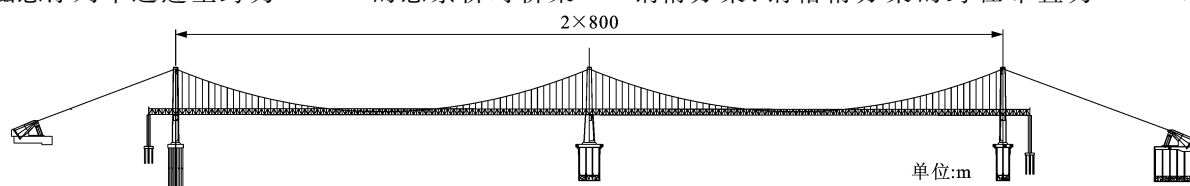


图 1 桥梁总体布置

Fig. 1 General layout of bridge

800 m+52 m,桥面宽度为 45.7 m,加劲梁下层桥面为 2 个分离式钢箱梁,通过横梁相连,铁路线路布置于加劲梁中间(图 2);钢桁方案的跨径布置为

94 m+2×800 m+94 m,桥面宽度为 50.66 m,铁路线路布置于加劲梁下层桥面外侧,以伸出的挑臂支承(图 3)。

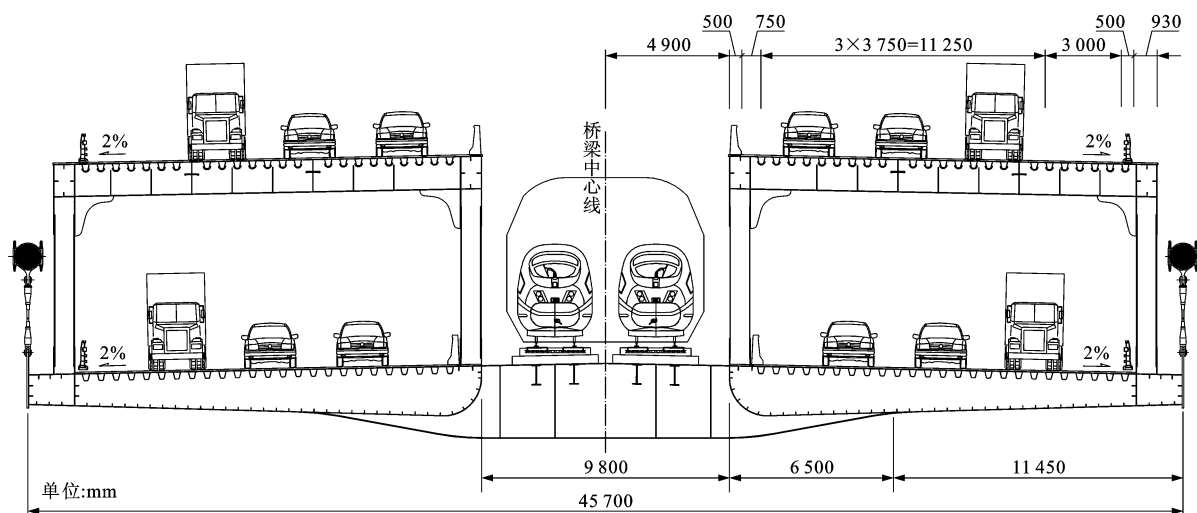


图2 钢箱桁方案加劲梁横断面

Fig. 2 Cross-section of stiffening girder for steel-box-truss scheme

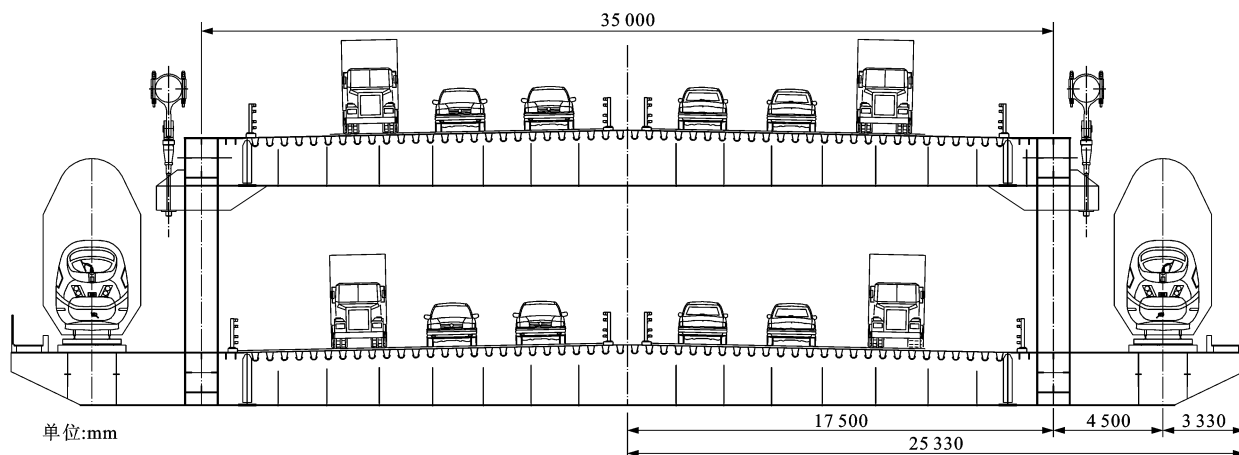


图3 钢桁方案加劲梁横断面

Fig. 3 Cross-section of stiffening girder for steel-truss scheme

2 风-车-桥耦合振动分析模型

在风-车-桥耦合振动模型中,将风场视作空间相关的平稳随机过程,采用质点-弹簧-阻尼器模型模拟车辆(图 4),采用有限元方法建立桥梁结构模型,采用梁单元模拟桥梁主梁、桥墩和桥塔,采用杆单元模拟大缆和吊杆,钢箱桁方案有限元模型见图 5。

风作为系统的激励源之一,本文采用谱方法模拟脉动风场。根据桥梁结构形式、振动型态与自然风特性,将与桥梁整体相关的脉动风场简化为沿桥塔和加劲梁分布的独立的一维脉动风速场,提高了计算效率。对于钢箱桁方案,沿加劲梁从左至右等间距(12 m)分布了 140 个风速模拟点;对于钢桁方

案,沿加劲梁从左至右等间距(12 m)分布了 148 个风速模拟点。整个加劲梁基本位于同一高度处,桥梁沿跨向的地貌特征变化不大,认为沿加劲梁布置的各模拟点具有相同的平均风速和脉动风速谱。

本文采用的车辆模型分为 7 个刚体(包括 1 个车体、2 个转向架、4 个轮对),刚体之间通过弹簧和阻尼器连接,整个车辆具有 23 个自由度。选取 CRH2 动车组,列车编组为 2×(拖+动+动+拖)(共 8 辆车)。采用德国低干扰谱模拟轨道不平顺,考虑垂向与水平向不平顺,模拟的垂向不平顺样本见图 6。动力时程分析的空间步长为 0.2 m。

风-车-桥系统由风车系统、风桥系统以及车桥系统组成。风车系统间的相互作用仅考虑定常力和

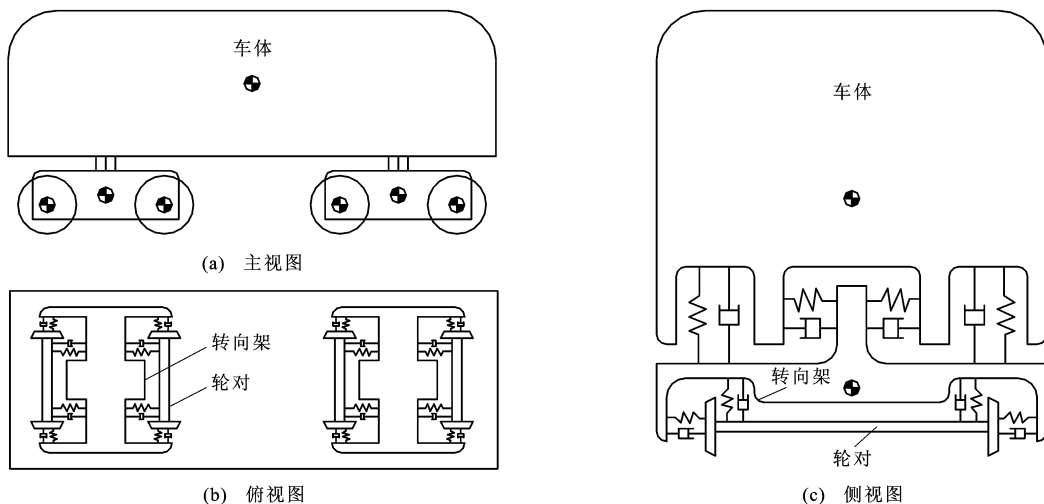


图4 车辆模型

Fig. 4 Vehicle model

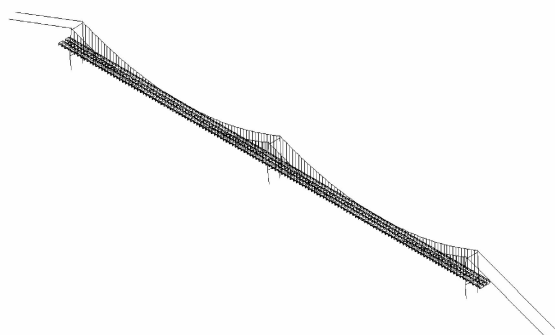


图5 桥梁有限元模型

Fig. 5 Finite element model of bridge

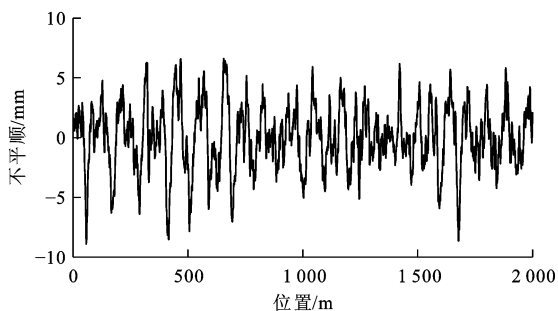


图6 垂向轨道不平顺

Fig. 6 Vertical track irregularity

准定常力,忽略了自激力作用;风桥系统间的耦合通过对非线性风荷载的迭代来实现;车桥系统间的耦合通过车辆与桥梁间的分离迭代来实现,风-车-桥系统运动方程为^[19]

$$\mathbf{M}_b \ddot{\mathbf{u}}_b + \mathbf{C}_b \dot{\mathbf{u}}_b + \mathbf{K}_b \mathbf{u}_b = \mathbf{F}_{1b} + \mathbf{F}_{2b} + \mathbf{F}_{3b} + \mathbf{F}_4 \quad (1)$$

$$\mathbf{M}_v \ddot{\mathbf{u}}_v + \mathbf{C}_v \dot{\mathbf{u}}_v + \mathbf{K}_v \mathbf{u}_v = \mathbf{F}_{1v} + \mathbf{F}_{2v} + \mathbf{F}_5 \quad (2)$$

式中: \mathbf{M}_b 、 \mathbf{C}_b 、 \mathbf{K}_b 分别为桥梁的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; \mathbf{M}_v 、 \mathbf{C}_v 、 \mathbf{K}_v 分别为车辆的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; \mathbf{u}_b 、 \mathbf{u}_v 分别为桥梁和车辆的位

移; \mathbf{F}_{1b} 、 \mathbf{F}_{2b} 、 \mathbf{F}_{3b} 分别为桥梁的静风荷载、抖振风荷载与自激风荷载; \mathbf{F}_{1v} 、 \mathbf{F}_{2v} 分别为车辆的静风荷载与抖振风荷载; \mathbf{F}_4 、 \mathbf{F}_5 分别为通过轮轨接触点列车作用于桥梁和桥梁作用于列车的相互作用力。

对于风-车-桥系统,在满足车辆、桥梁的几何与力学耦合关系情况下,采用分离迭代的方法单独进行车辆、桥梁的动力方程的求解。

3 结构动力特性对比

根据设计资料,分别建立 2 种方案的空间杆系有限元模型,使用 BANSYS 软件进行动力特性分析,2 种方案前 10 阶自振频率与对应振型见表 1,可以得出以下结论。

(1)与常见的公铁两用斜拉桥低阶模型频率(约为 0.3~0.5 Hz)相比^[20-21],该桥自振频率较低,容易发生振动,结构整体较为柔性,有必要进行风-车-桥耦合振动分析。

(2)振型规律一致,同阶振型下钢桁方案的自振频率低于钢箱桁方案的自振频率。

4 车桥系统三分力系数对比

风轴坐标系下作用在桥梁或车辆的静风力为

$$F_D = \frac{1}{2} \rho U^2 C_D H \quad (3)$$

$$F_L = \frac{1}{2} \rho U^2 C_L B \quad (4)$$

$$F_M = \frac{1}{2} \rho U^2 C_M B^2 \quad (5)$$

式中: F_D 、 F_L 、 F_M 分别为作用在结构物上的静风阻力、静风升力和静风力矩; ρ 为空气密度; U 为来流

表 1 桥梁自振频率与振型描述
Tab. 1 Natural frequencies and vibration mode descriptions of bridge

阶次	频率/Hz		振型描述
	钢箱桁方案	钢桁方案	
1	0.113	0.104	加劲梁单跨正对称与双跨反对称竖弯
2	0.170	0.165	加劲梁单跨正对称与双跨反对称横弯
3	0.185	0.184	加劲梁单跨反对称与双跨反对称竖弯
4	0.196	0.182	加劲梁单跨正对称与双跨正对称横弯
5	0.191	0.198	加劲梁单跨反对称与双跨正对称竖弯
6	0.212	0.206	加劲梁单跨正对称与双跨正对称竖弯
7	0.318	0.306	加劲梁单跨正对称与双跨反对称竖弯
8	0.327	0.338	加劲梁单跨正对称与双跨正对称竖弯
9	0.369	0.381	加劲梁单跨扭转与双跨反对称扭转
10	0.406	0.443	双跨主缆同向交错摆动

平均速度; C_D 、 C_L 、 C_M 分别为风轴坐标系下的阻力系数、升力系数与扭矩系数; H 、 B 分别为车辆或桥梁断面的高度与宽度。

在西南交通大学单回流串联双试验段工业风洞(XNJD-1)第 2 试验段中进行试验,采用交叉滑槽系统实现车辆和桥梁气动力的分离,车桥系统节段模型见图 7。当进行车桥系统中车辆或桥梁的气动力测试时,将待测节段模型与测力天平相连,天平信号经放大后采集^[22]。最后,通过式(3)~(5)计算三分力系数。交叉滑槽系统能方便地改变车辆和桥梁的相对位置,可适应不同断面形式的测试。

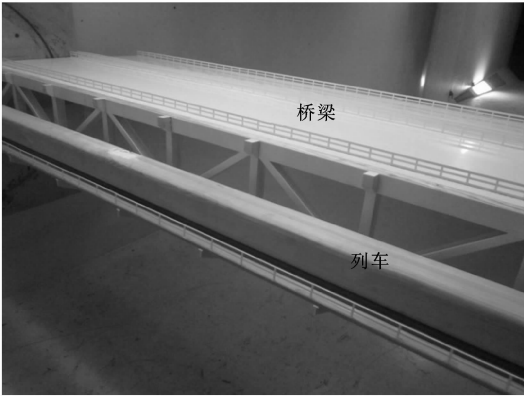


图 7 车桥系统节段模型
Fig. 7 Section model of vehicle-bridge system

4.1 车辆三分力系数

列车模型的尺寸为:长度为 2.095 m,宽度为 0.073 m(实车宽度为 3.380 m),高度为 0.076 m(实车高度为 3.500 m,未包括车轮),模型缩尺比为 1:46.3。通过风洞试验,测试了列车位于 2 种方案桥梁模型迎风侧与背风侧轨道时的车辆的三分力系

数,见表 2。

表 2 车辆三分力系数
Tab. 2 Three-component coefficients of vehicle

三分力系数	钢箱桁方案		钢桁方案	
	迎风侧	背风侧	迎风侧	背风侧
C_D	0.446 5	0.446 2	0.977 9	0.569 2
C_L	0.613 8	0.755 6	0.489 2	0.958 2
C_M	-0.072 8	-0.039 7	-0.051 1	-0.021 7

在同一方案下,迎风侧车辆的阻力系数和力矩系数比背风侧的要大,这是由于列车位于迎风侧时车辆所受气动力较大引起的。迎风侧车辆升力系数比背风侧的小。对比 2 种方案,迎风侧车辆阻力系数相差较大,这与轨道布置形式有关,钢箱桁方案的轨道布置在加劲梁中间,由于加劲梁桁架的遮风效应,有效地减小作用在车辆上的阻力。钢桁方案的轨道布置在加劲梁外侧,当车辆位于迎风侧时,车辆由于直接承受风荷载,其阻力系数很大,约为钢箱桁方案车辆的 2.2 倍;当其在背风侧时,可能由于绕过车辆后方的气流的吸入作用,使其阻力系数较钢箱桁方案位于加劲梁中间的车辆阻力系数要大,但比钢桁方案直接承受风荷载的迎风侧车辆阻力系数降低了 41.8%。

4.2 桥梁三分力系数

风洞试验中测得风攻角从 -12° 变化到 12° 时,钢箱桁方案、钢桁方案加劲梁的静力三分力系数见图 8, C_{D1} 、 C_{L1} 、 C_{M1} 分别为钢箱桁方案的阻力系数、升力系数与扭矩系数, C_{D2} 、 C_{L2} 、 C_{M2} 分别为钢桁方案的阻力系数、升力系数与扭矩系数。2 种方案的三分力系数存在一定差异,风致变形可能对耦合振动分析有不同程度的影响。

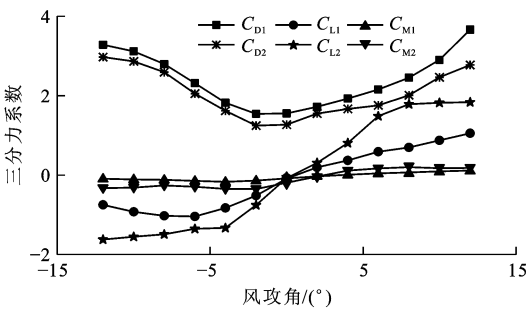


图 8 加劲梁三分力系数
Fig. 8 Three-component coefficients of stiffening girder

5 风-车-桥耦合振动性能对比

通过 BANSYS 软件计算不同风速下的车辆与桥梁响应。当风速为 0 时,即仅考虑车辆在桥梁上

运行时的车桥耦合振动,分别计算了 CRH2 动车组以 4 种车速(100、150、200、250 $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)通过桥梁时的桥梁与车辆的响应分别见表 3 和图 9~13。桥

梁方案为三塔两主跨悬索桥,跨中响应计算结果均采用桥梁左主跨跨中的响应值。

桥梁与车辆的各种响应总体上是随车速的增大

表 3 不同车速下的桥梁响应

Tab. 3 Bridge responses at different vehicle speeds

方案		钢箱桁方案				钢桁方案			
车速/($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)		100	150	200	250	100	150	200	250
主跨跨中位移/mm	竖向	205.13	214.52	237.95	250.51	246.46	265.38	297.36	306.15
	横向	0.89	0.72	0.97	0.92	7.31	6.72	7.17	7.14
主跨跨中加速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	竖向	0.021	0.037	0.064	0.083	0.070	0.538	0.310	0.374
	横向	0.020	0.043	0.054	0.070	0.014	0.030	0.033	0.032
最大梁端竖向折角/ 10^{-3}rad		0.161	0.164	0.161	0.157	0.433	0.511	0.537	0.520

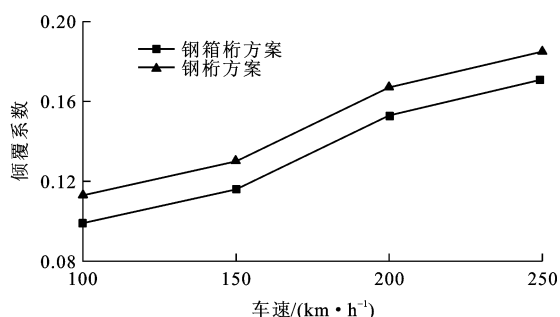


图 9 不同车速下的倾覆系数

Fig. 9 Overturning coefficients at different vehicle speeds

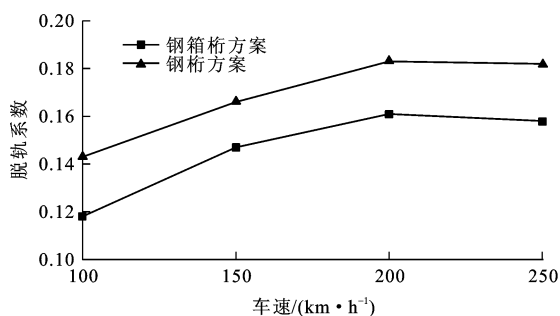


图 10 不同车速下的脱轨系数

Fig. 10 Derailment coefficients at different vehicle speeds

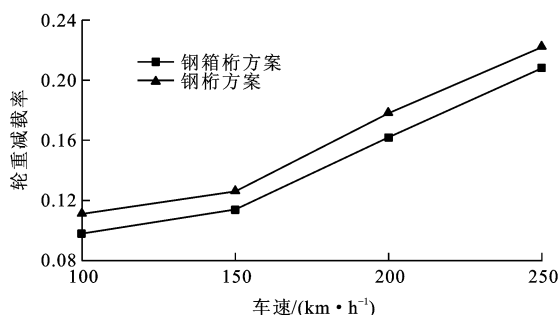


图 11 不同车速下的轮重减载率

Fig. 11 Wheel unloading rates at different vehicle speeds

而增大,2 种方案的车辆响应均满足安全性与舒适性要求,说明车辆具有较好的走行性。桥梁跨中竖

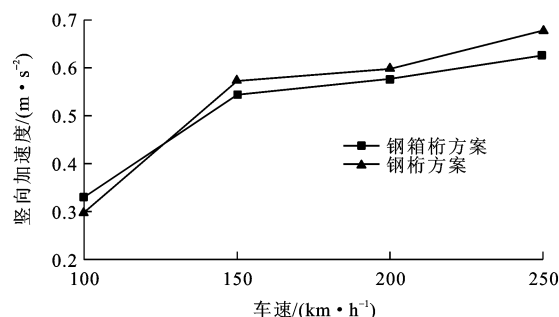


图 12 不同车速下的竖向加速度

Fig. 12 Vertical accelerations at different vehicle speeds

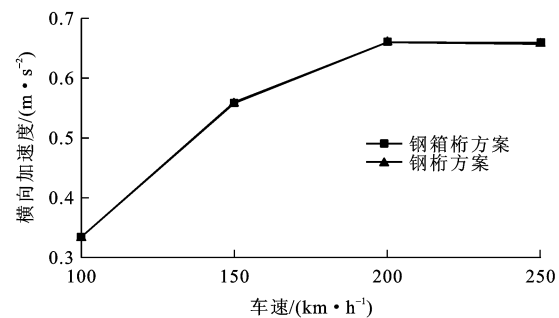


图 13 不同车速下的横向加速度

Fig. 13 Lateral accelerations at different vehicle speeds

向响应随车速变化明显,表明随着车速增大,车辆对桥梁的冲击作用增大。在同一车速下,钢桁方案的桥梁跨中位移较钢箱桁方案大,主要是由于钢桁方案的桥梁整体刚度略弱于钢箱桁方案;钢桁方案的桥梁横向响应比钢箱桁方案的明显要大,主要由于钢桁方案轨道布置在加劲梁两侧,列车过桥时产生较大的偏心作用。

在 CRH2 动车组以 150 $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的车速过桥时,分别计算了 3 种风速(15、20、25 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)时迎风侧和风速为 25 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时背风侧桥梁与车辆的响应分别见表 4 和图 14~18,结论如下。

(1)在同一方案下,桥梁的竖向响应随风速变化

表 4 不同风速下的桥梁响应
Tab. 4 Bridge responses at different wind speeds

方案		钢箱桁方案				钢桁方案			
风速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)		迎风侧			背风侧	迎风侧			背风侧
		15	20	25	25	15	20	25	25
主跨跨中位移/mm	竖向	221.98	208.88	277.84	275.74	294.28	309.19	262.31	237.93
	横向	15.68	29.52	37.94	37.89	21.09	41.50	79.71	86.76
主跨跨中加速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	竖向	0.051	0.062	0.098	0.098	0.540	0.530	0.546	0.524
	横向	0.046	0.047	0.063	0.061	0.037	0.057	0.115	0.115
最大梁端竖向折角/ 10^{-3}rad		0.187	0.210	0.245	0.257	0.532	0.538	0.564	0.543

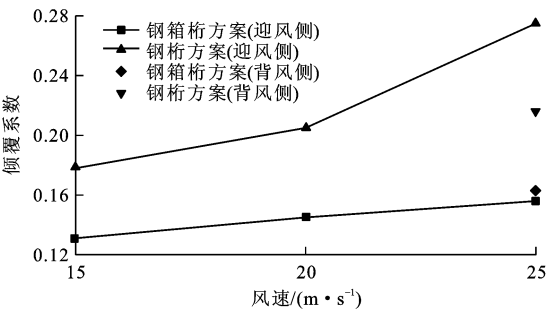


图 14 不同风速下的倾覆系数
Fig. 14 Overturning coefficients at different wind speeds

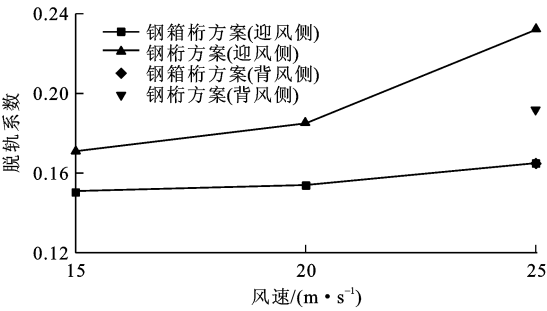


图 15 不同风速下的脱轨系数
Fig. 15 Derailment coefficients at different wind speeds

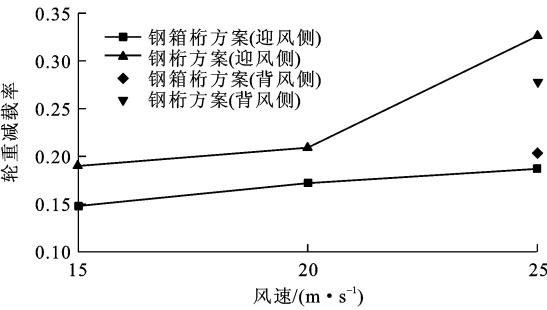


图 16 不同风速下的轮重减载率
Fig. 16 Wheel unloading rates at different wind speeds

没有明显规律。桥梁的横向响应随风速的增大而显著增大,当车辆位于迎风侧时,钢箱桁方案和钢桁方案在风速为 $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时的桥梁横向位移比风速为 $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时的分别增大至约 2.4 倍和 3.8 倍,横风对桥梁的横向响应起主导作用,列车偏心作用弱化。

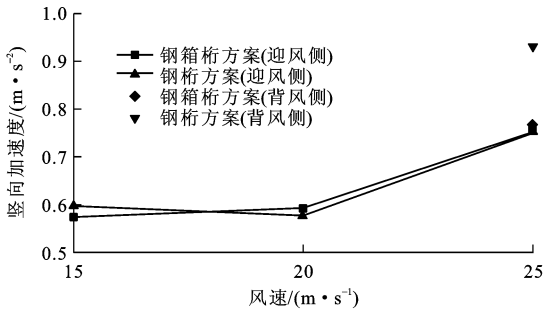


图 17 不同风速下的竖向加速度
Fig. 17 Vertical accelerations at different wind speeds

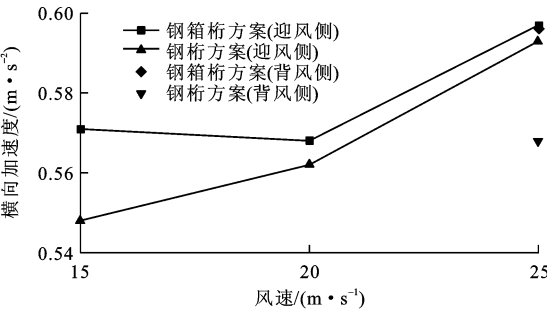


图 18 不同风速下的横向加速度
Fig. 18 Lateral accelerations at different wind speeds

(2)在同一方案下,车辆响应随风速的增大而增大。在 $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的风速下,车辆响应变化较小,响应最大增幅为 15.2%(倾覆系数);当风速达到 $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,车辆响应显著增大,响应比 $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时最大增加了 71.6%(轮重减载率)。

(3)风-车-桥耦合振动分析结果可见钢桁方案的桥梁动力响应总体上较钢箱桁方案大,这与动力特性分析中钢桁方案刚度略弱于钢箱桁方案较吻合。

(4)在同一风速下,钢桁方案的车辆横向加速度比钢箱桁方案小,钢桁方案的其他车辆响应比钢箱桁方案大,这与轨道位置关系和气动力系数有关。

(5)在同一风速下,迎风侧的车辆与桥梁响应总体上要比背风侧的大,其中横向响应表现明显。对

于车辆竖向加速度,由于车辆三分力系数中背风侧的升力系数大于迎风侧的升力系数,背风侧的车辆竖向加速度较迎风侧的要大。

6 结 语

(1)与常见的公铁两用斜拉桥低阶模型频率(约为 0.3~0.5 Hz)相比,三线合一、三塔悬索桥自振频率较低,同阶振型下钢桁方案的自振频率相对于钢箱桁方案的要低。

(2)车辆三分力系数受轨道位置影响较大。车辆气动力受轨道位置的影响较大,钢桁方案迎风侧车辆阻力系数约为钢箱桁方案的 2.2 倍,这是由于钢桁方案轨道布置在桥梁外侧,迎风侧的车辆直接承受横风荷载。

(3)当风速为 0 时,桥梁、车辆的各项响应总体上是随车速的增大而增大。钢桁方案的车辆响应与桥梁响应总体上比钢箱桁方案的要大,主要是由于钢桁方案的桥梁整体刚度略弱于钢箱桁方案。

(4)在同一方案下,桥梁的竖向响应随风速变化没有明显规律,桥梁的横向响应随风速的增大而显著增大,车辆响应随风速的增大而增大。同一风速下钢桁方案的桥梁响应总体上较钢箱桁方案大,这与桥梁动力特性分析结果较吻合;钢桁方案的车辆响应总体要大,这与轨道位置关系和气动力系数相关。

参 考 文 献 :

References :

- [1] YOSHIDA O, OKUDA M, MORIYA T. Structural characteristics and applicability of four-span suspension bridge[J]. Journal of Bridge Engineering, 2004, 9(5): 453-463.
- [2] 肖汝诚,姜 洋,项海帆. 缆索承重桥的体系比选[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2013, 41(2): 179-185, 207.
XIAO Ru-cheng, JIANG Yang, XIANG Hai-fan. Comparison between structural systems of cable supported bridges[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2013, 41(2): 179-185, 207. (in Chinese)
- [3] NAZIR C P. Multispan balanced suspension bridge[J]. Journal of Structural Engineering, 1986, 112(11): 2512-2527.
- [4] WANG Hao, TAO Tian-you, ZHOU Rui, et al. Parameter sensitivity study on flutter stability of a long-span triple-tower suspension bridge[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2014, 128: 12-21.
- [5] 万田保,王忠彬. 泰州长江公路大桥三塔两跨悬索桥总体稳定性分析[J]. 桥梁建设, 2008(2): 17-19, 26.
WAN Tian-bao, WANG Zhong-bin. Analysis of global stability of three-tower and two-span suspension bridge of Taizhou Changjiang River Highway Bridge[J]. Bridge Construction, 2008(2): 17-19, 26. (in Chinese)
- [6] 张文明,葛耀君. 三塔双主跨悬索桥动力特性精细化分析[J]. 中国公路学报, 2014, 27(2): 70-76.
ZHANG Wen-ming, GE Yao-jun. Refinement analysis of dynamic characteristics of suspension bridge with triple towers and double main spans[J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(2): 70-76. (in Chinese)
- [7] 梁 鹏,吴向男,李万恒,等. 三塔悬索桥静动力特性与中塔选型[J]. 交通运输工程学报, 2011, 11(4): 29-35.
LIANG Peng, WU Xiang-nan, LI Wan-heng, et al. Static and dynamic properties of three-tower suspension bridge and structural type selection of mid-tower[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2011, 11(4): 29-35. (in Chinese)
- [8] 李加武,王 新,张 悦,等. 桥梁风致振动的混沌特性[J]. 交通运输工程学报, 2014, 14(3): 34-42.
LI Jia-wu, WANG Xin, ZHANG Yue, et al. Chaos characteristics of wind-induced vibrations for bridge[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2014, 14(3): 34-42. (in Chinese)
- [9] LIU M F, CHANG T P, ZENG D Y. The interactive vibration behavior in a suspension bridge system under moving vehicle loads and vertical seismic excitations[J]. Applied Mathematical Modelling, 2011, 35(1): 398-411.
- [10] XU Y L, XIA H, YAN Q S. Dynamic response of suspension bridge to high wind and running train[J]. Journal of Bridge Engineering, 2003, 8(1): 46-55.
- [11] CHEN Z W, XU Y L, LI Q, et al. Dynamic stress analysis of long suspension bridges under wind, railway, and highway loadings[J]. Journal of Bridge Engineering, 2011, 16(3): 383-391.
- [12] DIANA G, FIAMMENGHI G. The Messina Strait Bridge: major problems affecting the design[C]//STEFFEN A. 34th International Symposium on Bridge and Structural Engineering: Large Structures and Infrastructures for Environmentally Constrained and Urbanised Areas. Zurich: International Association for Bridge and Structural Engineering, 2010: 1-24.
- [13] ANDERSEN P K, ANDERSEN J E, BORDONARA G, et al. Runability analysis for the planned Messina Strait Bridge[C]//ROECK G D, DEGRANDE G, LOMBAERT G, et al. Proceedings of the 8th International Conference on Structural Dynamics. München: European Association of Structural Dynamics, 2011: 1503-1509.
- [14] KWON S D, LEE J S, MOON J W, et al. Dynamic interaction analysis of urban transit maglev vehicle and guideway suspension bridge subjected to gusty wind[J]. Engineering Structures, 2008, 30(12): 3445-3456.
- [15] 刘清江. 公轨两用悬索桥风-车-桥耦合振动研究[J]. 武汉理工大学学报, 2014, 36(3): 107-113.
LIU Qing-jiang. Coupled vibration research of wind-vehicle-

- bridge of light rail-cum-road suspension bridges[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2014, 36(3): 107-113. (in Chinese)
- [16] 李永乐,董世赋,臧 瑜,等.大跨度公轨两用悬索桥风-车-桥耦合振动及抗风行车准则研究[J].工程力学,2012,29(12): 114-120.
- LI Yong-le, DONG Shi-fu, ZANG Yu, et al. Coupling vibration of wind-vehicle-bridge system for long-span road-rail suspension bridge and resistant-wind criterion of running train[J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(12): 114-120. (in Chinese)
- [17] LI Yong-le, XIANG Huo-yue, WANG Bin, et al. Dynamic analysis of wind-vehicle-bridge coupling system during the meeting of two trains[J]. Advances in Structural Engineering, 2013, 16(10): 1663-1670.
- [18] 张 敏,张 楠,夏 禾.大跨度铁路悬索桥风-车-桥耦合动力分析[J].中国铁道科学,2013,34(4):14-21.
- ZHANG Min, ZHANG Nan, XIA He. Analysis on wind-vehicle-bridge dynamic interaction for long-span railway suspension bridge[J]. China Railway Science, 2013, 34(4): 14-21. (in Chinese)
- [19] LI Yong-le, QIANG Shi-zhong, LIAO Hai-li, et al. Dynamics of wind-rail vehicle-bridge systems[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2005, 93(6): 483-507.
- [20] 孟 莎,高芒芒.武汉天兴洲公铁两用长江大桥动力计算分析[J].桥梁建设,2008(1):1-3.
- MENG Sha, GAO Mang-mang. Analysis of dynamic force calculation of Wuhan Tianxingzhou Changjiang Rail-Cum-Road Bridge[J]. Bridge Construction, 2008(1): 1-3. (in Chinese)
- [21] 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. Coupled 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. (in Chinese)
- [22] 李永乐,廖海黎,强士中.车桥系统气动特性的节段模型风洞试验研究[J].铁道学报,2004,26(3):71-75.
- LI Yong-le, LIAO Hai-li, QIANG Shi-zhong. Study on aerodynamic characteristics of the vehicle-bridge system by the section model wind tunnel test[J]. Journal of the China Railway Society, 2004, 26(3): 71-75. (in Chinese)