

悬挂式单轨交通大跨度桥梁轨道梁间 横向联系影响分析*

刘阳明

(中铁第四勘察设计院集团有限公司, 430063, 武汉)

摘要 [目的] 通常, 悬挂式轨道交通左右幅轨道梁都是独立工作的, 仅在桥墩处与桥墩联系在一起, 跨中轨道梁相互之间没有联系, 这对于小跨径轨道梁来说影响不大。然而, 当出现大跨度轨道梁时, 由于轨道梁截面较小, 刚度较弱, 主跨的两根轨道梁之间是否存在横向联系会极大地影响系统的动力响应。对此, 有必要分析悬挂式单轨交通大跨度桥梁轨道梁间横向联系的影响。[方法] 为探究桥梁主跨不同横系梁对悬挂式单轨交通系统的动力响应以及行车舒适度的影响, 基于 ANSYS 有限元软件与 Universal Mechanism 多体动力学软件建立了 80 m 长的柔性吊杆拱桥及车辆模型进行联合仿真计算。分析了轨道梁间横系梁截面形式以及跨中左右幅横系梁数量为 0 根、1 根、3 根工况下系统的动力响应。[结果及结论] 轨道梁横系梁截面的横向刚度对轨道梁的纵向位移贡献不大, 但横系梁限制竖向位移的能力与竖向刚度成正比; 轨道梁的动力响应与轨道梁主跨的横系梁密度呈负相关的关系; 而主跨是否设置横系梁则对悬挂式单轨列车及桥梁的竖向动力响应影响更大; 列车车速较低时, 横系梁对列车横向响应优化较明显, 而车速较高时则对列车竖向响应优化较明显。

关键词 悬挂式单轨交通; 拱桥; 车-桥耦合振动分析; 横系梁

中图分类号 TU311.3:U232

DOI:10.16037/j.1007-869x.2025.04.037

Influence Analysis of Lateral Connection between Track Beams of Suspended Monorail Transit Large-Span Bridges

LIU Yangming

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

Abstract [Objective] Generally, the left and right track beams of suspended rail transit work independently, and are only connected at the piers. The track beams in mid-span are not connected to each other, which has little effect on small-span track beams. However, when there are large-span track

beams, due to their small cross-section and weak stiffness, whether there is a lateral connection between the two track beams of the main span will greatly affect the dynamic response of the system. In this regard, it is necessary to analyze the influence of the lateral connection between track beams in suspended monorail transit large-span bridges. [Method] In order to explore the influence of different transverse beams in the bridge main span on the dynamic response and driving comfort of the suspended monorail transit system, based on Ansys finite element software and Universal Mechanism multi-body dynamics software, an 80 m long flexible suspender arch bridge and vehicle model is established for joint simulation calculation. The cross-sectional form of the transverse beam between track beams, and the dynamic response of the system under working conditions with 0, 1, and 3 transverse beams on the midspan left and right sides are analyzed. [Result & Conclusion] The lateral stiffness of the transverse beam section of the track beam has little contribution to the longitudinal displacement of the track beam, but the ability of transverse beam to limit the vertical displacement is proportional to the vertical stiffness; the dynamic response of the track beam is negatively correlated with the transverse beam density of the main span track beam; and whether the main span is equipped with transverse beams has a greater impact on the vertical dynamic response of the suspended monorail vehicle and the bridge; with a lower vehicle speed, the transverse beam has a more obvious optimization on the vehicle lateral response, while with a higher vehicle speed, it will optimize the vehicle vertical response more obviously.

Key words suspended monorail transit; arch bridge; vehicle-bridge coupling vibration analysis; transverse beam

悬挂式单轨交通系统具有投入成本少、地形适应能力强、能耗低等优点, 目前在国内外已经得到了广泛的应用。国内外学者对悬挂式单轨交通进行了诸多研究^[1-3]。

* 中铁第四勘察设计院集团有限公司科研项目(2020K005)

文献[4]针对悬挂式单轨钢箱轨道梁和钢桁轨道梁,研究了轨道梁顶、底、腹板厚度及横向加劲肋间距变化对轨道梁挠度的影响,确定了最优截面形式及尺寸,节省了用钢量。文献[5]发现,悬挂式单轨的曲线轨道梁的横系梁结构可大幅增加曲线轨道梁的适用跨径。文献[6]等基于多体动力学和模态叠加法建立模型分析了轨道梁布置方式、曲线半径和跨度对车-桥动力响应的影响。文献[7-12]从多方面研究了的单轨通车-桥耦合问题。然而,上述研究都是针对小跨径简支轨道梁结构,对于大跨轨道梁的研究少之又少。

悬挂式单轨交通的左右幅轨道梁均与桥墩连接,而其他部分的左右幅轨道梁之间没有联系,都是独立工作的。这对于小跨径轨道梁来说影响不大。然而,对于大跨度轨道梁而言,由于轨道梁截面较小,刚度较弱,主跨的两根轨道梁之间是否存在横向联系会极大地影响轨道梁系统的动力响应。

为了更好地分析跨中横系梁对车-桥系统的安全、舒适性问题。本文以 80 m 长的柔性吊杆拱桥为工程背景,采用 ANSYS 有限元软件和 UM 多体动力学软件建立车-桥耦合振动模型,模拟悬挂式单轨列车通过大跨轨道梁的工况,探究桥梁与列车的横、竖向动力响应,并根据评价模型的动力特性研究横系梁密度变化的影响,以期对悬挂式单轨交通的桥梁结构设计提供参考。

1 车-桥耦合动力模型

1.1 车辆模型

车辆模型采用 UM 多体动力学软件建立。每节车辆由车体、转向架及轮对等刚体组成,车体与转向架之间、转向架与轮对之间通过悬挂系统及其他弹性元件连接。每个刚体有 5 个自由度,分别为横摆、浮沉、侧滚、摇头、点头。由于车体、转向架及轮对沿列车运动方向的振动对桥梁的横向和竖向振动影响较小,所以将车辆的纵向刚度设为无穷大。在仿真模拟过程中,减震器等非线性力学行为按黏滞阻尼模拟,其余按线性模拟。

悬挂式单轨列车的轮胎采用 FIALA 模型,即轮胎与轨道梁接触面呈矩形,且接触面上压力均匀分布。每节车辆拥有 2 组转向架,每组转向架配备 4 个走行轮,4 个稳定轮,8 个导向轮。悬挂式单轨列车设计运行速度为 60 km/h,按照 2 节编组运行,编组列车模型如图 1 所示。其中单节车辆长 9.85 m,

宽 2.40 m,高 2.60 m;车体质量为 44 000 kg(超员)。

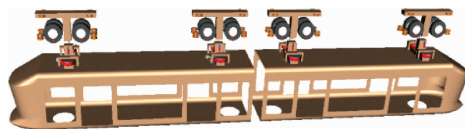


图 1 悬挂式单轨列车模型

Fig. 1 Suspended monorail vehicle model

车体的振动方程可以表示为:

$$\begin{cases} m_c \ddot{U}_x + \sum_{i=1}^2 (F_{Li} + F_{Ri}) = m_c g \\ m_c \ddot{U}_y + \sum_{i=1}^2 (F_{Li} + F_{Ri}) = m_c g \\ m_c \ddot{U}_z + \sum_{i=1}^2 (F_{Li} + F_{Ri}) = m_c g \end{cases} \quad (1)$$

式中:

m_c ——车体的质量;

U_x ——车体在纵向上的位移;

U_y ——车体在横向上的位移;

U_z ——车体在垂向上的位移;

F_{Li} ——第 i 个转向架与车体之间的左侧纵向、横向和垂向力;

F_{Ri} ——第 i 个转向架与车体之间的右侧纵向、横向和垂向力;

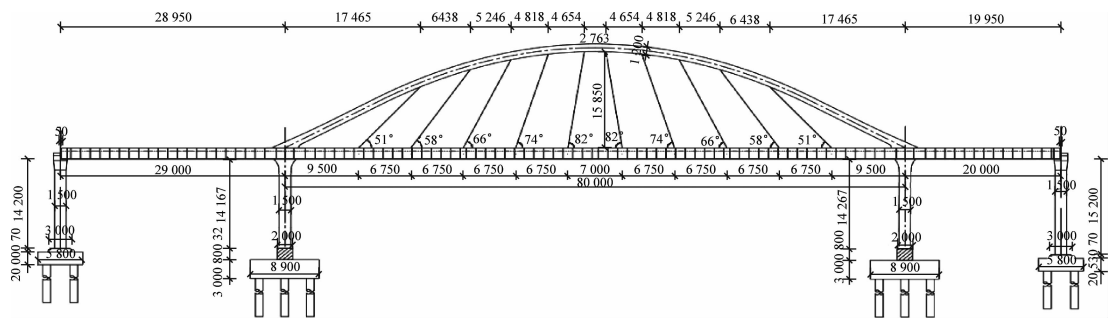
g ——重力加速度。

1.2 桥梁模型

以长度为 80 m 的柔性吊杆拱桥为研究对象建立桥梁模型。该桥轨道梁线间距为 5.8 m,梁体为下部开口钢箱梁。轨道梁纵向每隔 1.25 m 布置 1 组加劲肋。拱肋线形采用二次抛物线,左右两侧对称布置 20 根吊杆(每侧 10 根)。桥梁立面图与横断面图如图 2 及图 3 所示。轨道梁钢箱梁的梁高度为 1 808 mm,外箱截面宽度为 1 216 mm,内箱截面开口宽度为 230 mm,其余尺寸见图 4。使用 ANSYS 有限元软件建立桥梁模型。轨道梁及墩柱采用 shell63 单元,吊杆采用 link10 单元,承台采用 solid45 单元。分别建立了 3 种不同主跨横系梁密度的模型。其中:吊杆钢材弹性模量为 195.0 GPa,泊松比为 0.30,密度为 7.80 t/m³;其余钢材弹性模量为 206.0 GPa,泊松比为 0.30,密度为 7.80 t/m³;承台弹性模量为 32.5 GPa,泊松比为 0.24,密度为 2.30 t/m³。该桥有 2 个主墩和 2 个边墩。桥墩支撑横系梁,桥墩处横系梁连接左右幅轨道梁,如图 5 所示。

轨道梁的振动方程可以表示为:

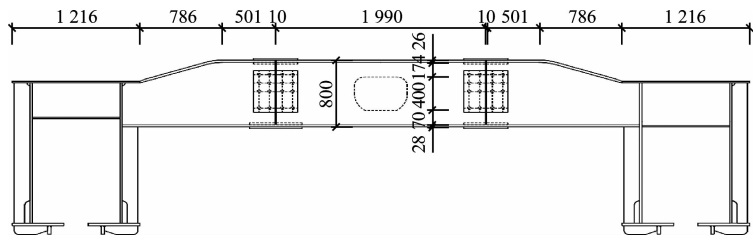
$$M\ddot{d} + C\dot{d} + Kd = P \quad (2)$$



尺寸单位: mm

图 2 桥梁立面布置图

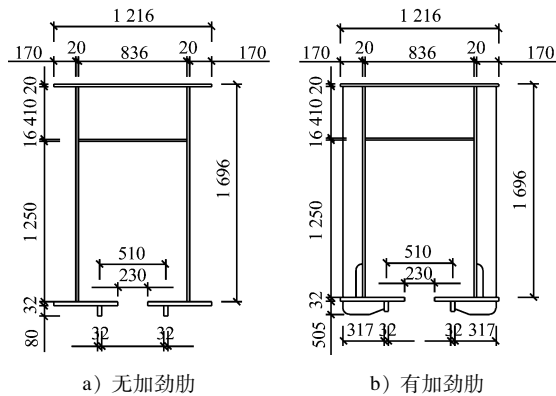
Fig. 2 Bridge beams elevation layout



单位: mm

图 3 桥梁梁端横断面图

Fig. 3 Cross section diagram of bridge beam end



单位: mm

图 4 轨道梁截面构造图

Fig. 4 Cross section structural diagram of track beams

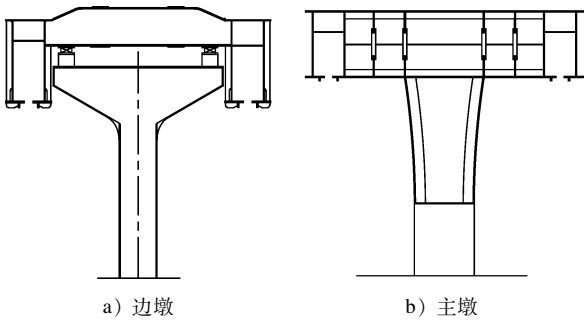


图 5 墩梁连接处横断面

Fig. 5 Cross section of pier-beam connection

式中:

M 、 C 、 K ——轨道梁的质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵;

d ——轨道梁的竖向位移向量;

P ——车辆通过轮胎传递到轨道梁上的轮轨相互作用力向量。

轨道梁阻尼矩阵采用 Rayleigh 阻尼,为刚度矩阵和质量矩阵的组合,即:

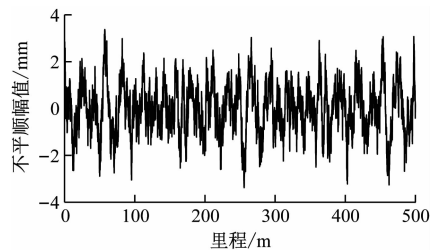
$$C = pM + qK \quad (3)$$

式中:

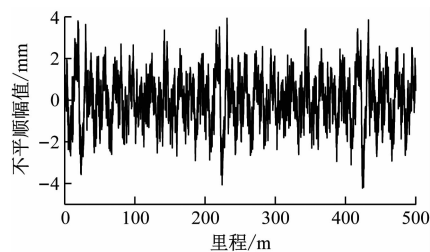
p 、 q ——与两种桥梁振动模态相关的结构阻尼贡献系数。

1.3 轨道不平顺

轨道不平顺是引起轨道交通系统振动的主要因素之一^[13]。目前我国关于悬挂式单轨交通系统轨道不平顺的研究较少^[14]。本文关于悬挂式单轨交通的轨道不平顺谱,来自我国试验线的试验数据^[15],现场测定轨道水平向和竖向的不平顺。其中,走行轮采用竖向的不平顺作为轨道激励,导向轮和稳定轮采用水平向的不平顺作为轨道激励。图 6 及图 7 分别为水平向和竖向的轨面不平顺样本。



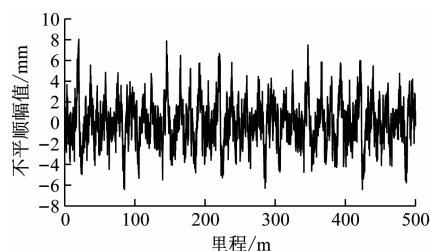
a) 左导向轮与左稳定轮



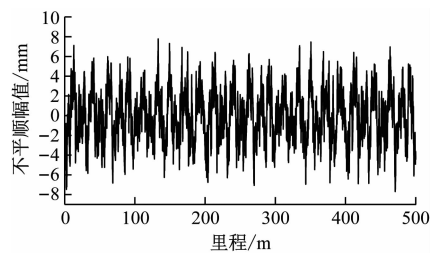
b) 右导向轮与右稳定轮

图 6 轨道水平向不平顺

Fig. 6 Horizontal track irregularity



a) 左走行轮



b) 右走行轮

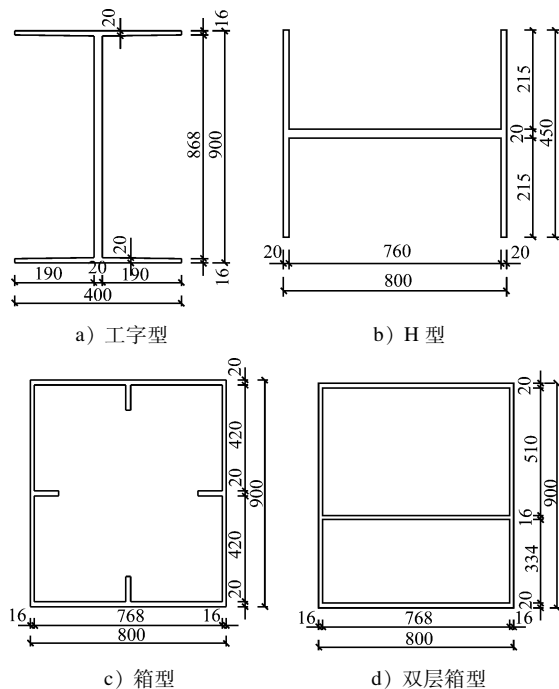
图 7 轨道竖向不平顺

Fig. 7 Vertical track irregularity

2 横系梁截面形式比选

为了研究横系梁截面形式对轨道梁响应的影响,结合现有的各类研究经验^[16-23],提出工字型、H型、箱型和双层箱型 4 种截面形式。各型横系梁截面示意图如图 8 所示。各型横系梁截面惯性矩如表 1 所示。

在车-桥耦合动力模型中,在主跨设置 1 根横系梁,使列车以 80 km/h 的速度分别通过 4 种截面形式横系梁的轨道梁,模拟计算可得轨道梁主跨跨中位置的动力响应。列车行驶模型如图 9 所示。



单位:mm

图 8 各型横系梁截面示意图

Fig. 8 Cross section diagram of various types of transverse beams

表 1 各型横系梁截面惯性矩

Tab. 1 Cross-sectional inertia of various types of transverse beams

横系梁截面类型	横向惯性矩/mm ⁴	竖向惯性矩/mm ⁴
工字型	5.06×10^{10}	5.06×10^{10}
H 型	32.70×10^{10}	6.37×10^{10}
箱型	65.30×10^{10}	51.50×10^{10}
双层箱型	11.40×10^{10}	50.90×10^{10}

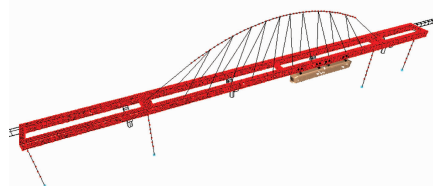


图 9 列车行驶模型

Fig. 9 Vehicle running model

轨道梁纵向位移(向前为正)时程曲线如图 10 所示。由图 10 可看出,箱型截面具有最大的横向刚度,但在列车经过主跨的过程中,纵向位移却最大;4 种截面形式横系梁的纵向位移都很小,说明横系梁的横向刚度对限制轨道梁纵向位移贡献不大。

轨道梁主跨跨中截面横向位移(向外侧为正)时程曲线如图 11 所示。由图 11 可见,H 型截面与双层箱型截面的响应最优且几乎一致。

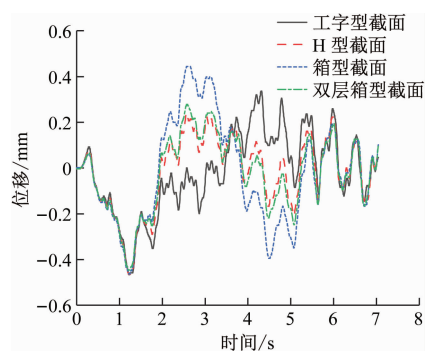


图10 轨道梁纵向位移时程曲线

Fig. 10 Longitudinal displacement time-history curves of track beams

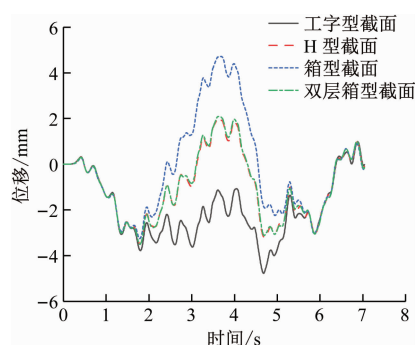


图11 轨道梁主跨跨中截面横向位移时程曲线

Fig. 11 Lateral displacement time-history curves of mid-span section of track beams main span

轨道梁主跨跨中位置竖向位移(向上为正)时程曲线如图12所示。由图12可见,从截面响应来看,箱型截面与双层箱型截面最好,H型截面其次,工字型截面表现不佳。结合表1可知,横系梁限制竖向位移的能力与竖向刚度成正比。

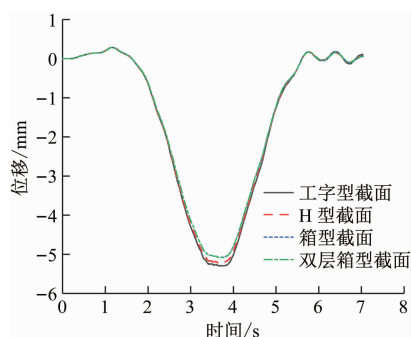


图12 轨道梁主跨跨中截面竖向位移时程曲线

Fig. 12 Vertical displacement time-history curves of mid-span section of track beams main span

对比图11与图12可见:双层箱型截面性能最优;工字型横系梁的横向响应几乎全程偏向轨道梁内侧,竖向响应也不理想;其余3种截面形式横系梁的响应,在列车行驶到跨中位置时偏向轨道梁外侧。从计算结果来看:工字型截面只适合单一方向

的受力,并不适用于受力复杂的轨道梁横系梁;箱型截面虽然与双层箱型截面一样有着优秀的竖向响应结果,但横向响应却不理想;与双层箱型界面相比,H型截面的竖向响应不够优秀。

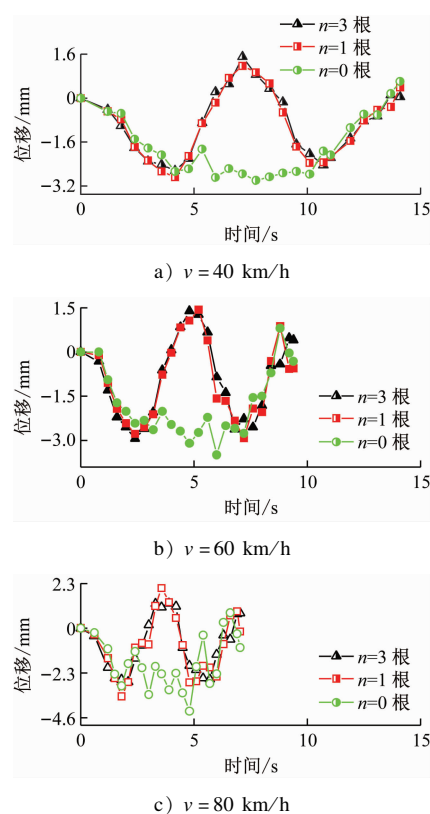
进一步分析图10—图12可知:4种截面的位移时程曲线变化规律高度一致;振动周期接近一致,意味着横系梁截面形式不会对轨道梁结构的振动基本频率产生显著影响;列车驶入中跨段时才开始产生较明显的差距,说明横系梁截面形式改变了轨道梁中跨的振型,从而使桥梁中跨的位移不同。

3 横系梁分布密度分析

经过对比,选取双层箱型截面为横系梁截面。在车-桥耦合动力模型中,在长度为80 m的主跨上,横系梁根数 n 分别取0根、1根和3根,计算列车以不同速度 v 通过桥梁时的车-桥动力响应。由于纵向位移太小,本文只提取横竖向计算结果进行分析。

3.1 轨道梁动力响应

不同横系梁数量和列车行驶速度时轨道梁跨中截面横向位移时程曲线如图13所示。

图13 不同 n 的轨道梁跨中截面横向位移时程曲线Fig. 13 Lateral displacement time-history curves of mid-span section of track beams with different n

由图 13 可知:有横系梁和无横系梁的轨道梁主跨跨中位置横向响应相差很大;在没有横系梁(横系梁数量 $n=0$)的情况下,跨中几乎都朝外侧偏移;设置横系梁(横系梁数量 $n=1$ 根,或 $n=3$ 根)时,虽一开始跨中位移偏向外侧,但在头车进入主跨后,跨中位移开始回位,然后朝内侧偏移。经分析,横系梁限制了轨道梁的横向位移,进而使横向位移由外侧单向偏移转变为内外侧交替偏移。

不同横系梁数量和列车行驶速度时的轨道梁跨中截面竖向位移时程曲线如图 14 所示。

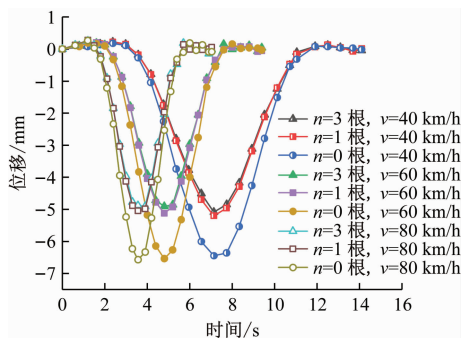


图 14 不同 n 和 v 时轨道梁跨中截面竖向位移时程曲线

Fig. 14 Vertical displacement time-history curves of track beams mid-span section with different n and v

由图 14 明显可见,主跨跨中截面竖向位移有明显差别:当列车行驶在跨中位置时,跨中截面竖向位移达到最大值;有横系梁的轨道梁竖向位移均优于没有横系梁的轨道梁。经分析,这是因为设置横系梁能增大轨道梁的整体性,从而拥有更优的竖向位移响应。

经计算,不同 n 及 v 下的横竖向响应的幅值见表 2。

由表 2 可得:与 $n=0$ 的情况相比,在 $n=1$ 根情况下的轨道梁跨中截面最大横向位移大幅减小—— v 取 40 km/h、60 km/h、80 km/h 时,位移减小值分别为 0.75 mm、0.88 mm、1.49 mm;与 $n=1$ 根的情况相比,在 $n=3$ 根情况下的轨道梁跨中截面最大横向位移仅略有减小—— v 取 40 km/h、60 km/h、80 km/h 时,位移减小值仅分别为 0.12 mm、0.12 mm 和 0.31 mm;与 $n=0$ 的情况相比,在 $n=1$ 根情况下,3 种车速下的轨道梁跨中截面竖向位移幅值平均减小 1.37 mm;与 $n=1$ 根的情况相比,在 $n=3$ 根情况下,3 种车速下的轨道梁跨中截面竖向位移幅值平均仅减小 0.14 mm。对比可见,在轨道梁动力响应的优化中,横系梁从无到有对其影响较

大,而继续增设横系梁带来的收益较小,性价比不高。

表 2 不同 n 及 v 下的轨道梁横竖向响应幅值

Tab. 2 Lateral and vertical response amplitudes of track beams under different n and v

n /根	v /(km/h)	横向响应幅值/mm	竖向响应幅值/mm
0	40	3.85	6.47
	60	3.97	6.54
	80	5.00	6.57
1	40	3.10	5.20
	60	3.09	5.18
	80	3.51	5.08
3	40	2.98	5.09
	60	2.97	5.00
	80	3.20	4.96

3.2 轨道梁模态分析

采用有限元法,对不同横系梁数量的轨道梁进行模态分析,前 10 阶频率及模型如表 3 所示。对比前 10 阶模态可以看出:增设横系梁之后,主梁扭转振型出现的阶次较晚;主梁竖弯振型出现的阶次没变,但对应的频率增大。这说明增设横系梁能提升结构的抗扭和竖向抗弯能力。此外,随着扭转振型出现的推后,在前 7 阶振型中,横弯振型占比增大,轨道梁的横向变形会变得更复杂。这与车-桥耦合动力模型仿真计算结果基本一致。

3.3 车辆动力响应

在列车运行过程中的车体振动主要由车速、车辆自身结构和轨道不平顺引起的桥面激励决定。横系梁可以改善轨道梁的变形,进而间接影响车辆的动力响应。

列车在不同横系梁数量的轨道梁上行驶时,车体平稳性指标如表 4 所示。

由表 4 可知,无论横向还是竖向,车体最大瞬时加速度及 Sperling 系数均随着横系梁数量的增多而减小。与横系梁对轨道梁响应的优化大致相同,车体平稳性影响的主要区别还是在没有横系梁与 1 根横系梁之间,1 根横系梁与 3 根横系梁之间的差别不大。

由表 4 还可看出,横系梁对列车动力响应的影响与 v 也有一定关系。与 $n=0$ 的情况相比,当 v 取 40 km/h、60 km/h、80 km/h 时, $n=1$ 根对应的车体横向加速度分别减小 0.1154 m/s^2 、 0.1103 m/s^2

和 $0.036\ 6\ \text{m/s}^2$, $n=3$ 根的车体横向加速度分别减小 $0.161\ 7\ \text{m/s}^2$ 、 $0.085\ 0\ \text{m/s}^2$ 和 $0.024\ 4\ \text{m/s}^2$; $n=1$ 根的车体竖向加速度分别减小 $0.055\ 3\ \text{m/s}^2$ 、 $0.073\ 6\ \text{m/s}^2$ 和 $0.166\ 5\ \text{m/s}^2$, $n=3$ 根的车体竖向加速度分别减小 $0.094\ 0\ \text{m/s}^2$ 、 $0.074\ 5\ \text{m/s}^2$ 和 $0.167\ 4\ \text{m/s}^2$ 。此外,随着 v 的增大,横系梁对车辆

横向振动加速度的影响逐渐减小,对竖向振动加速度的影响逐渐增大。虽然三种密度横系梁数量的情况下的横竖向 Sperling 系数均小于 2.5,同属于优秀等级,但增设横系梁后的 Sperling 系数明显更小,对应乘客舒适度更高。

表 3 模态分析前 10 阶频率及振型

Tab.3 Top 10 order frequencies and vibration modes of modal analysis

阶数	0 根横系梁		1 根横系梁		3 根横系梁	
	频率/Hz	振型	频率/Hz	振型	频率/Hz	振型
1	0.678	拱肋摇摆	0.684	拱肋摇摆	0.711	拱肋摇摆
2	0.931	中跨横弯	0.993	中跨横弯 + 拱肋摇摆	1.146	中跨横弯 + 拱肋摇摆
3	1.002	中跨横弯 + 拱肋摇摆	1.618	主梁横弯 + 拱肋摇头	1.695	主梁横弯 + 拱肋摇头
4	1.473	主梁横弯 + 拱肋摇头	1.793	主梁纵漂	1.787	主梁纵漂
5	1.796	主梁纵漂	2.458	主梁横弯	2.614	主梁横弯
6	2.385	主梁扭转	2.608	中跨横弯	2.875	中跨横弯
7	2.397	中跨横弯	2.803	主梁横弯 + 一侧边墩摇摆	2.972	主梁横弯 + 一侧边墩摇摆
8	2.529	主梁横弯 + 一侧边墩摇摆	2.898	主梁扭转	3.329	主梁扭转
9	3.03	主梁竖弯	3.246	主梁竖弯	3.750	主梁竖弯
10	3.234	主梁横弯 + 两侧边墩摇摆	3.253	主梁扭转伴随横弯	4.038	主梁扭转伴随横弯

表 4 不同横系梁数量时的车体平稳性指标

Tab.4 Vehicle body stability index with different number of transverse beams

列车行驶 速度/ (km/h)	最大瞬时加速度/(m/s^2)						Sperling 系数					
	横向			竖向			横向			竖向		
	$n=0$ 根	$n=1$ 根	$n=3$ 根	$n=0$ 根	$n=1$ 根	$n=3$ 根	$n=0$ 根	$n=1$ 根	$n=3$ 根	$n=0$ 根	$n=1$ 根	$n=3$ 根
40	1.110 7	0.995 3	0.949 0	0.522 9	0.467 6	0.428 9	2.015 6	1.976 0	1.916 9	2.028 4	1.770 2	1.711 8
60	1.309 2	1.198 9	1.224 2	0.745 4	0.671 8	0.670 9	2.081 2	1.966 9	2.002 4	2.125 8	2.000 0	1.835 7
80	1.505 1	1.468 5	1.480 7	1.389 7	1.224 2	1.222 3	2.359 7	2.265 0	2.283 5	2.454 9	2.378 4	2.175 2

4 结论

1) 轨道梁间连接横系梁截面的横向刚度对轨道梁的纵向位移贡献不大,但横系梁限制竖向位移的能力与截面竖向刚度成正比。

2) 轨道梁间有、无横系梁连接时的桥梁动力响应差距较大,没有横系梁时可以通过增设主跨横系梁来有效优化动力响应,但提高横系梁设置密度的性价比不高。其中横向响应在没有横系梁的情况下,几乎全程偏向一侧,这种偏移如果遇见横风作用,可能会进一步加重。所以大跨度悬挂式单轨系统应考虑在主跨设置横系梁以提升轨道梁整体刚度。

3) 轨道梁间连接横系梁的设置也对车体振动

性能产生影响。车速较低时,横系梁对列车横向振动响应优化较明显;而车速较高时,横系梁则可明显减小列车的竖向振动响应。

参考文献

[1] 邱靖权, 郑凯锋, 熊籽跃. 悬挂式单轨交通系统连续轨道梁桥静力分析与截面参数比较研究[J]. 铁道标准设计, 2020, 64(11): 73.
QIU Jingquan, ZHENG Kaifeng, XIONG Ziluo. Static analysis and section optimization of continuous track girder bridge in suspension monorail traffic system[J]. Railway Standard Design, 2020, 64(11): 73.
[2] 王玉华, 王孟君, 谢宇杰. 悬挂式单轨系统结构方案研究[J]. 科学技术创新, 2022(6): 147.
WANG Yuhua, WANG Mengjun, XIE Yujie. Research on the

- structure scheme of suspended monorail system[J]. Scientific and Technological Innovation, 2022(6): 147.
- [3] 寇峻瑜, 余浩伟, 谢毅, 等. 缓和曲线线型对悬挂式单轨车辆动力响应的影响[J]. 北京交通大学学报, 2020, 44(4): 102.
- KOU Junyu, YU Haowei, XIE Yi, et al. Influence of transition curve types on dynamic response of suspended monorail vehicles[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2020, 44(4): 102.
- [4] 王臣, 高静青, 邹永伟. 悬挂式单轨轨道梁研究[J]. 铁道勘察, 2021, 47(5): 81.
- WANG Chen, GAO Jingqing, ZOU Yongwei. Research on guide beam of suspended monorail[J]. Railway Investigation and Surveying, 2021, 47(5): 81.
- [5] 赵晓梅, 吴琰, 马磊. 悬挂式单轨双线曲线轨道梁的设计研究[J]. 铁道标准设计, 2021, 65(1): 65.
- ZHAO Xiaomei, WU Yan, MA Biao. Research on the design of suspended monorail double curved track beams[J]. Railway Standard Design, 2021, 65(1): 65.
- [6] 杨泽钰, 蔡成标, 凌亮, 等. 悬挂式单轨列车通过曲线段的动力性能[J]. 铁道建筑, 2020, 60(10): 146.
- YANG Zeyu, CAI Chengbiao, LING Liang, et al. Dynamic performance of suspended monorail vehicle passing through curve section[J]. Railway Engineering, 2020, 60(10): 146.
- [7] 李小珍, 葛延龙, 晋智斌. 跨座式单轨车辆-轨道梁耦合振动的计算分析[J]. 铁道工程学报, 2018, 35(1): 78.
- LI Xiaozhen, GE Yanlong, JIN Zhibin. Calculation and analysis of the straddle-type monorail vehicle-track beam coupling vibration[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2018, 35(1): 78.
- [8] 彭华春, 李靖. 跨座式单轨交通(100+160+100)m钢箱梁刚构矮塔斜拉桥设计研究[J]. 铁道标准设计, 2022, 66(1): 74.
- PENG Huachun, LI Jing. Research and design of (100+160+100)m low tower cable-stayed bridge with steel box girder rigid frame of straddle type monorail transit[J]. Railway Standard Design, 2022, 66(1): 74.
- [9] 马继兵, 蒲黔辉, 霍晋晋. 跨座式单轨交通PC轨道梁车桥耦合振动分析[J]. 西南交通大学学报, 2009, 44(6): 806.
- MA Jibing, PU Qianhui, HUO Xuejin. Vehicle-bridge coupling vibration analysis of PC rail beam of straddle-type monorail transportation[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2009, 44(6): 806.
- [10] 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.
- [11] 蔡小杨, 李小珍, 王雷, 等. 大跨度公轨两用钢桁梁斜拉桥车桥耦合效应及影响参数研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(8): 2097.
- CAI Xiaoyang, LI Xiaozhen, WANG Lei, et al. Vehicle-bridge dynamics and its influencing factors for long-span cable-stayed truss bridges carrying both highway and light rail[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(8): 2097.
- [12] 王江浩. 悬挂式单轨轨道梁桥在列车制动力作用下的动力响应[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(6): 39.
- WANG Jianghao. Dynamic responses of suspended monorail beam bridge under vehicle braking forces[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(6): 39.
- [13] 郭士永, 黄成名, 胡江民, 等. 基于舒适度的悬挂式单轨平面曲线参数研究[J]. 铁道标准设计, 2019, 63(7): 46.
- GUO Shiyong, HUANG Chengming, HU Jiangmin, et al. Research on plane curve parameter of suspended monorail based on comfort[J]. Railway Standard Design, 2019, 63(7): 46.
- [14] 余浩伟, 谢毅. 悬挂式单轨纵断面设计标准取值研究[J]. 铁道标准设计, 2020, 64(8): 1.
- YU Haowei, XIE Yi. Study on the design standard of line profile of suspension monorail[J]. Railway Standard Design, 2020, 64(8): 1.
- [15] 王洛. 梁缝不平顺激励下悬挂式单轨车桥耦合振动特性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2023.
- WANG Luo. Research on coupled vibration characteristics of suspended monorail vehicle and bridge under the excitation of beam joint irregularity[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2023.
- [16] 薛钰宇, 王伯铭, 黄海凤, 等. 悬挂式单轨吊架强度分析[J]. 机械工程与自动化, 2021(5): 25.
- XUE Yuyu, WANG Boming, HUANG Haifeng, et al. Strength analysis of suspension monorail hanger[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2021(5): 25.
- [17] 卫军, 陈涛, 黄敦文, 等. 悬挂式单轨交通系统墩-梁整体分析[J]. 桥梁建设, 2019, 49(1): 36.
- WEI Jun, CHEN Tao, HUANG Dunwen, et al. Pier-beam integral analysis of suspended monorail traffic system[J]. Bridge Construction, 2019, 49(1): 36.
- [18] 黄海东, 张扬波, 陈桂成, 等. 轨道车辆作用下桥梁应力时程实用算法研究[J]. 世界桥梁, 2021, 49(6): 64.
- HUANG Haidong, ZHANG Yangbo, CHEN Guicheng, et al. Research on practical algorithm for stress time history of bridge under rail vehicles[J]. World Bridges, 2021, 49(6): 64.
- [19] 何庆烈, 蔡成标, 翟婉明, 等. 悬挂式单轨列车与轨道梁桥系统动力性能试验研究[J]. 铁道学报, 2018, 40(10): 57.
- HE Qinglie, CAI Chengbiao, ZHAI Wanming, et al. Experimental research on dynamic performance of suspended monorail vehicle-bridge coupled system[J]. Journal of the China Railway Society, 2018, 40(10): 57.
- [20] 谢毅, 寇峻瑜, 余浩伟, 等. 悬挂参数对悬挂式单轨车横向稳定性影响分析[J]. 铁道工程学报, 2019, 36(12): 35.

(下转第 216 页)

- [2] 上海市住房和城乡建设管理委员会. 基坑工程技术标准: DG/TJ 08—61—2018 [S]. 上海: 同济大学出版社, 2018.
Shanghai Municipal Commission of Housing and Urban Rural Development Management. Technical code for excavation engineering: DG/TJ 08—61—2018 [S]. Shanghai: Tongji University Press, 2018.
- [3] 王洪新. 基坑的尺寸效应及考虑开挖宽度的抗隆起稳定安全系数计算方法[J]. 岩土力学, 2016, 37(增刊2): 433.
WANG Hongxin. Size effect of foundation pit and calculation method of anti-uplift stability safety factor considering excavation width[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(S2): 433.
- [4] 夏霄. 基坑工程稳定与变形分析的若干问题研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
XIA Xiao. Research on some problems of stability and deformation analysis of foundation pit engineering[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.
- [5] 刘杨镔, 夏才初, 徐晨, 等. 窄基坑围护墙插入深度优化解析及离心试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(3): 593.
LIU Yangbin, XIA Caichu, XU Chen, et al. Analytical solution and centrifugal test for the optimization of retaining wall insertion depth in narrow foundation pits[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(3): 593.
- [6] 阳吉宝, 黄星. 窄基坑隆起破坏模式及抗隆起稳定性验算研究[J]. 建筑结构, 2021, 51(增刊2): 1495.
YANG Jibao, HUANG Xing. Study on uplift failure mode and antiuplift stability checking calculation of narrow foundation pit[J]. Building Structure, 2021, 51(S2): 1495.
- [7] 徐莞蕾. 基坑宽度对围护结构及周边土体性状的影响分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
XU Yuanlei. Analysis of the influence of foundation pit width on the characteristics of retaining structure and surrounding soil[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [8] 胡敏云, 苟长飞, 严显翔, 等. 基坑宽度效应对基坑稳定性影响的有限元分析[J]. 地基处理, 2020, 2(1): 1.
HU Minyun, GOU Changfei, YAN Yuxiang, et al. Finite element analysis of the effect of foundation pit width on its stability [J]. Chinese Journal of Ground Improvement, 2020, 2(1): 1.
- [9] 马元, 刘亚竞, 侯永茂, 等. 杭州狭长软土基坑支护侧移规律与解析预测方法研究[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(11): 1797.
MA Yuan, LIU Yajing, HOU Yongmao, et al. Support wall lateral deflection rule and prediction of deep narrow foundation in Hangzhou soft clay [J]. Tunnel Construction, 2019, 39(11): 1797.
- [10] 郑刚, 俞丹瑶, 程雪松, 等. 考虑土体强度不均匀性时宽窄基坑坑底隆起稳定研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(增刊1): 1.
ZHENG Gang, YU Danyao, CHENG Xuesong, et al. Basal heave stability of wide and narrow excavations considering non-homogeneous features of soft clay [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(S1): 1.
- [11] 李林, 黄奕鹏, 苏宁川. 狭窄基坑抗隆起稳定性计算方法的改进研究[J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18(增刊1): 74.
LI Lin, HUANG Yipeng, SU Ningchuan. Study on improvement of calculation method for uplift stability of narrow foundation pit [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2022, 18(S1): 74.
- [12] MANA A I, CLOUGH G W. Prediction of movements for braced cuts in clay[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1981, 107(6): 759.
- [13] 臧延伟. 软土层厚度和基坑宽度对地铁车站基坑变形的影响[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(9): 105.
ZANG Yanwei. Influence of soft soil layer thickness and foundation pit width on metro station foundation pit deformation[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(9): 105.
- 收稿日期:2023-03-01 修回日期:2023-07-11 出版日期:2025-04-10
Received:2023-03-01 Revised:2023-07-11 Published:2025-04-10
• 第一作者:姚任行, 正高级工程师, 102183997@qq.com
通信作者:邱豪磊, 工程师, qiuhl223@163.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

(上接第 208 页)

- XIE Yi, KOU Junyu, YU Haowei, et al. Analysis of the influence of suspension parameters on lateral stability of suspended monorail vehicle [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2019, 36(12): 35.
- [21] 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.
- [22] BAO Y, ZHAI W, CAI C, et al. Dynamic interaction analysis of suspended monorail vehicle and bridge subject to crosswinds[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 156: 107707.
- [23] JIANG Y, WU P, ZENG J, et al. Researches on the resonance of a new type of suspended monorail vehicle-bridge coupling system based on modal analysis and rigid-flexible coupling dynamics [J]. Vehicle System Dynamics, 2021, 59(1): 135.
- 收稿日期:2023-01-11 修回日期:2023-04-18 出版日期:2025-04-10
Received:2023-01-11 Revised:2023-04-18 Published:2025-04-10
• 通信作者:刘阳明, 高级工程师, 187385980@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