

文章编号:1671-6833(2008)03-0113-04

连续型浮置板的长度变化对轨道梁振动的影响

杨广军, 董晓马, 李广慧, 谢晓鹏

(郑州航空工业管理学院 土木建筑工程学院, 河南 郑州 450015)

摘 要:在对具有浮置板结构的无碴轨道的分析基础上,针对预制式浮置板结构的特点,建立了连续整体型浮置板结构的力学模型,即弹性支撑的 Bernoulli-Euler 梁模型.通过连续型浮置板结构不同的纵向布置对轨道梁系统振动响应影响的分析,认为当连续型浮置板的长度为箱梁跨度的2倍时,钢轨的位移、加速度,以及箱梁的动挠度、加速度值均相对较小;在对浮置板式无碴轨道进行初始设计时,建议连续型浮置板的长度可取为箱梁跨度的2倍.

关键词:浮置板;车桥系统;耦合振动;高架桥

中图分类号: U 213.2⁺44 **文献标识码:** A

0 引言

随着经济基础水平的提高,近年来轨道交通在我国发展迅速.少维修、高稳定性的无碴轨道的开发应用,是城市轨道交通轨道结构发展的必然趋势.但无碴轨道结构刚性大,同时反射部分噪声,因此减振降噪是无碴轨道结构必须解决的问题.而轨道结构的振动质量、结构尺寸可根据轨道结构动力学原理进行合理选择,以适应减振降噪的要求,使结构体系有最大的减振降噪效果,并能减缓轮轨之间的冲击荷载,减轻钢轨的磨耗和波磨.

在车桥系统动力相互作用问题研究的长期发展进程中,人们建立了从简单到复杂的各种分析模型.在国外,比较完善的力学模型和运动方程是由朱光汉(K. H. CHu)^[1]等人建立的,但模型中未考虑桥上线路结构在整个动力体系中的作用.鉴于上述欠缺,1989年意大利学者 Diana^[2]建立了考虑轨道弹性、轮轨作用力影响的车-轨-桥动力相互作用系统模型.在我国,许多科研院校的科研人员对车桥动力响应问题进行了大量的研究和实测工作.1998年以来,北京交通大学、西南交通大学、铁道科学研究院、长沙铁道学院合作研究秦沈客运专线桥梁动力特性及列车走行性,研究成果为我国第一条客运专线的桥梁设计提供了重要

的动力参数^[3-10],2002年参加了铁道部组织的秦沈客运专线桥梁动力性能综合试验,成功地进行了对狗河大桥的动力测试^[3].

由于无碴轨道结构是随着轨道交通的发展而发展起来的结构型式,且轨道结构复杂,目前采用的大多数车桥系统动力分析模型都没有对桥上的轨道结构进行建模以及轨道与桥梁结构的动力耦合作用做详细的考虑^[5].因此笔者建立了高架轨道交通中浮置板式无碴轨道结构的振动模型,并通过对整体连续型浮置板结构(其结构形式可参见相关文献[4])的不同纵向布置对轨道振动响应的分析和比较,总结出浮置板结构的布置方式对车桥耦合振动的影响规律,求得合理的高架轨道结构布置方式,使轨道的固有频率降低,减振效果好.

1 计算模型

笔者采用了二维的车桥系统耦合动力学模型,通过动力分析求得列车运行时钢轨、浮置板和箱梁(Box Beam)的动力响应,找出浮置板结构纵向的不同布置对车桥耦合振动的影响规律.

1.1 二系悬挂系统的车辆模型及振动方程

整车附有二系悬挂系统的车辆模型见图1,二系悬挂系统的车辆模型及振动方程具体的表达形式可参见相关文献[4,5,7].

收稿日期:2008-06-14;修订日期:2008-07-11

基金项目:国家自然科学基金项目资助(50508040)

作者简介:杨广军(1969-),男,河南长葛人,郑州航空工业管理学院副教授,博士,主要从事轨道交通工程与装备、新型路面材料的研究工作.

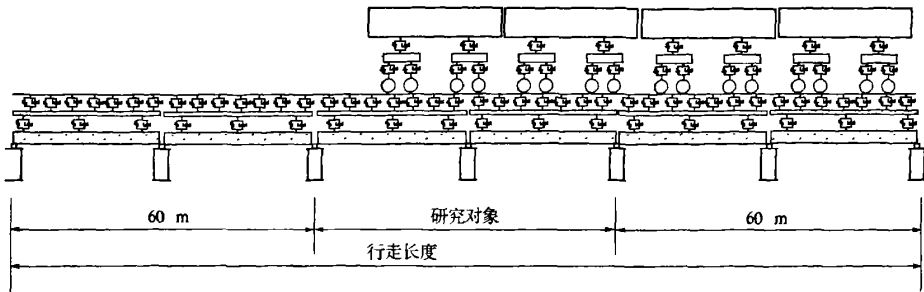


图1 车-桥耦合作用及整体型浮置板结构的计算模型

Fig.1 The model of a coupling vehicle, box beam and continuous track slab

1.2 钢轨、浮置板和桥梁模型及振动方程

笔者采用了振型叠加的模态分析法,将钢轨、浮置板、箱梁均视为 Bernoulli - Euler 梁,它们之间分别通过橡胶垫(钢轨与浮置板之间)和橡胶支座(浮置板与箱梁之间)连接,橡胶垫和橡胶支座视为弹簧阻尼器。浮置板下橡胶支撑无论采用什么方式,模型上都可处理为间距相等的分布式弹簧阻尼器结构。

由于篇幅关系,笔者仅列出浮置板的振动方程,浮置板上面的钢轨和下面的箱梁的振动方程可参见相关文献[5,7,8]。浮置板的振动方程为:

$$EI_s \frac{\partial^4 y_s(x_s, t)}{\partial x_s^4} + m_s \frac{\partial^2 y_s(x_s, t)}{\partial t^2} + c_s \frac{\partial y_s(x_s, t)}{\partial t} = - \sum_{k=1}^{NK} \delta(x_s - x_s^k) [P_{5k} + P_{6k}] + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{NJ} \delta(x_s - x_s^j) [P_{7j} + P_{8j}] \quad (1)$$

式中: $0 \leq x_s \leq N \cdot L_b$; y_s 为浮置板的振动位移; EI_s 为浮置板的抗弯刚度; m_s 为浮置板的单位长度质量; c_s 为浮置板的黏性阻尼系数; NJ 为单跨箱梁与浮置板之间的橡胶支座的数目。

$$P_{5k} = K_p [y_s(x_s, t) - y_r(x_r, t)] \quad (2)$$

式中: P_{5j} 为橡胶垫由于钢轨与浮置板所在位置的相对位移而产生的弹性力; K_p 为橡胶垫刚度; y_r 为钢轨的振动位移; y_s 为浮置板的振动位移;

$$P_{6k} = C_p [\dot{y}_s(x_s - x_s^k) - \dot{y}_r(x_r, t)] \quad (3)$$

式中: P_{6j} 为橡胶垫由于钢轨与浮置板所在位置的相对速度而产生的阻尼力; C_p 为橡胶垫阻尼系数; \dot{y}_r 为钢轨的振动速度; \dot{y}_s 为浮置板的振动速度;

$$P_{7j} = K_{pp} [y_{bi}(x_{bi}, t) - y_s(x_{si}, t)] \quad (4)$$

式中: P_{7j} 为橡胶垫由于第 i 跨箱梁与浮置板所在对应位置的相对位移而产生的弹性力; K_{pp} 为橡胶垫刚度; y_{bi} 为箱梁的振动位移; y_s 为浮置板的振动位移;

$$P_{8j} = C_{pp} [\dot{y}_{bi}(x_{bi}, t) - \dot{y}_s(x_{si}, t)] \quad (5)$$

万方数据

式中: P_{8j} 为橡胶垫由于第 i 跨箱梁与浮置板所在对应位置的相对速度而产生的阻尼力; C_{pp} 为橡胶支座阻尼系数; \dot{y}_{bi} 为箱梁的振动速度; \dot{y}_s 为浮置板的振动速度。

2 浮置板长度尺寸布置的优化设计

在动力学仿真时车辆借鉴了上海市轨道交通明珠线的列车、无碴轨道及桥梁的设计参数。用计算机来模拟列车过桥的全过程并进行计算: 列车按 1 节、2 节、3 节、4 节 4 种情况编组, 由研究对象前两跨处开始运行, 直到车尾行出研究对象两跨后为止。车辆运行速度 $v = 70 \text{ km/h}$, 时间步长 0.001 s 。轻轨列车和轨道梁的计算参数见文献[8]。

为了系统地分析连续型浮置板纵向的不同布置对钢轨和箱梁振动的影响规律, 关于轨道板的纵向布置(纵向长度尺寸的变化), 笔者设定长 120 m 的钢轨下, 分别布置了 1 ~ 12 块轨道板, 则轨道板的长度为 $L_s = 120 \text{ m}/N_s$, $N_s = 1 \sim 12$, 为轨下轨道板的数目。而对于箱梁跨度的选择, 笔者分别选取了梁跨长度 20 m、24 m 以及 30 m 3 种情况来分析, 即钢轨下分别有 6 跨、5 跨和 4 跨箱梁, 而钢轨的长度不变(120 m), 共计 36 种轨道结构用来进行分析。由于篇幅所限, 笔者仅举出了单跨钢轨(120 m 长)、钢轨下两跨浮置板(每个浮置板长 60 m)和四跨箱梁(箱梁长 30 m, 每个浮置板下有两跨箱梁)在轻轨列车作用下的振动响应。图 2 的(a)、(b)为钢轨跨中的位移和加速度的时程曲线, 图 3(a)、(b)分别为第三跨箱梁跨中的位移和加速度的时程曲线。

图 4、5 反映了上述 36 种轨道结构在轻轨列车作用下的钢轨和箱梁的最大的振动位移、加速度, 图中横坐标为钢轨(120 m)下轨道板(FS)的数目。

图4(a)为上述36种轨道结构在轻轨列车作用下钢轨跨中位移的时程曲线图,可以看出,当钢轨下轨道板的长度和钢轨长度相等时,钢轨的振动位移最大;钢轨下轨道板为2跨或3跨时,钢轨的振动位移最小;之后随着钢轨下轨道板数目的增加,或者轨道板的长度减小,钢轨的振动位移增加。

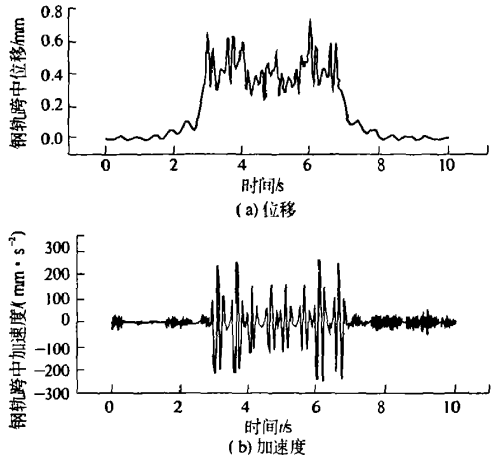


图2 钢轨下2跨浮置板4跨箱梁时钢轨跨中振动的时程曲线
Fig.2 Calculated time history of mid-span vibration for the rail

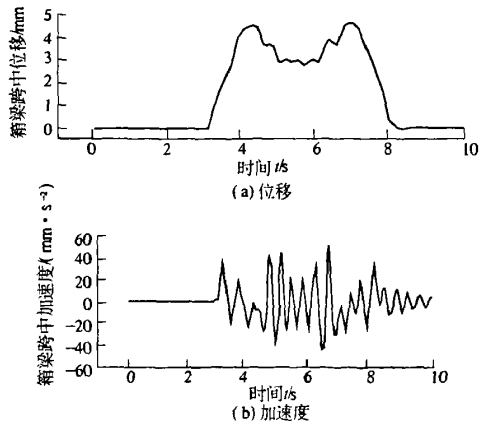


图3 钢轨下2跨浮置板4跨箱梁时第三跨箱梁跨中振动的时程曲线
Fig.3 Calculated time history of mid-span acceleration for box beam of the third span

图4(b)为上述36种轨道结构在轻轨列车作用下钢轨跨中加速度的时程曲线图.可以看出,当钢轨下轨道板的长度和钢轨长度相等时,钢轨的振动加速度较大;钢轨下轨道板为2跨时,钢轨的振动加速度最小;之后随着钢轨下轨道板数目的增加,或者轨道板的长度减小,钢轨的振动加速度

增加。

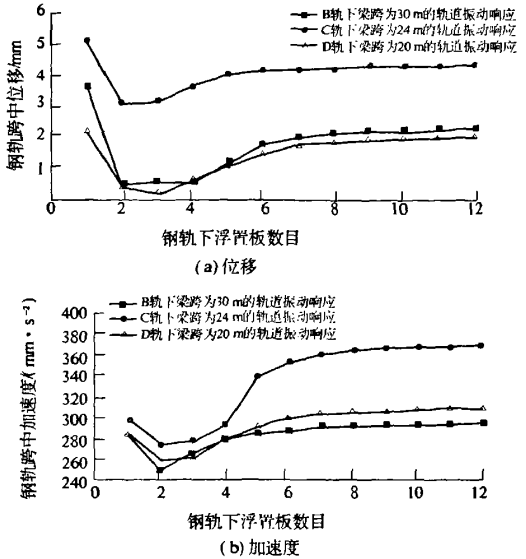


图4 连续型轨道板不同布置对36种轨道钢轨跨中的最大振动响应的分布图
Fig.4 The mid span vibration of the rail - longitudinal layout of 36 types of continous slabs

图5(a)为上述36种轨道结构在轻轨列车作用下第三跨箱梁跨中位移的时程曲线图.可以看出,轨道板的不同布置对箱梁的动挠度影响不大,

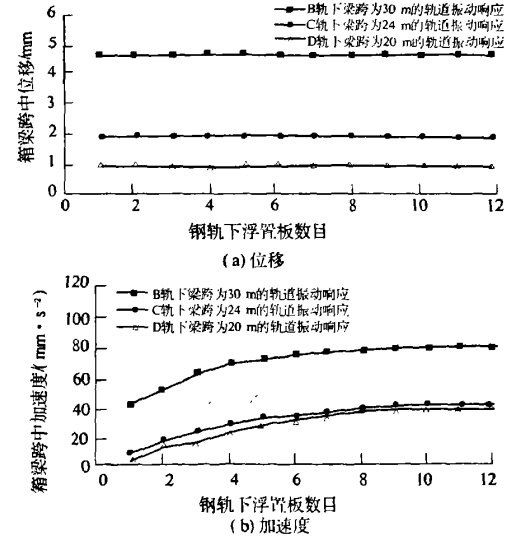


图5 连续型轨道板不同布置对36种轨道结构第三跨箱梁跨中最大振动响应的分布图
Fig.5 The mid span vibration of the beam - longitudinal layout of 36 types of continous slabs

但是箱梁的跨度对箱梁的动挠度的影响是很显著的,跨度减少1/4(30 m、24 m及20 m),箱梁的动

绕度要降低 1 倍左右。从曲线 D 轨下的振动响应看出,当单跨浮置板下有 2 或 3 跨箱梁,即浮置板的设计长度是箱梁跨度的 2 或 3 倍时,箱梁跨中的位移相对较小。

图 5(b)为上述 36 种轨道结构在轻轨列车作用下第三跨箱梁跨中加速度的时程曲线图。可以看出,随着钢轨下轨道板数目的增加,或者浮置板的长度越小,箱梁的振动加速度有增加的趋势;当钢轨下轨道大于 6 跨时,箱梁跨中的加速度增幅减缓。

由于桥梁的动力性能评定及标准中专门指出了限制桥梁竖向加速度的标准^[2],无疑图 4、5 中反应加速度变化趋势的图 4(b)、5(b)是最重要的。综合以上分析,现浇连续型浮置板的长度的初始设计可以取为箱梁长度的 2 倍,此时车桥耦合振动中箱梁和钢轨的振动响应相对较低。

3· 结论

(1)笔者采用的机车、具有浮置板结构的无碴轨道以及桥梁系统耦合动力学模型能够比较全面、准确的反映系统各部分之间动力的相互作用,在对不同的轨道结构进行分析比较的基础上,可以实现无碴轨道的优化设计;

(2)随着连续型浮置板长度的的增加,车体振动的响应有降低的趋势,即浮置板的长度增加对钢轨和箱梁的振动有抑制作用;

(3)当连续型浮置板的长度为箱梁跨度的 2 倍时,钢轨的位移、加速度,以及箱梁的动绕度、加速度值均相对较小;在对浮置板式无碴轨道进行

初始设计时,笔者建议连续型浮置板的长度可取为箱梁跨度的 2 倍。

参考文献:

- [1] WIRIYACHAI A, CHU K H, GARG V K. Impact study by various bridge models [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 1982, 10(1): 31 - 45
- [2] DIANA G, CHELI F. Dynamic interaction of railway systems with large bridges [J]. *Vehicle System Dynamics*, 1989, 18(1-3): 71 - 106
- [3] XIA H, ZHANG N. Experimental analysis of railway bridge under high speed trains [J]. *Sound and Vibration*, 2005, (280): 1233 - 1242
- [4] 练松良. 轨道动力学[M]. 上海: 同济大学出版社, 2003.
- [5] 夏 禾. 车辆与结构动力相互作用[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [6] 翟婉明. 车辆-轨道耦合动力学[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2002.
- [7] 李广慧, 杨广军. 轮轨作用力计算分析及其校核[J]. *铁道车辆*, 2007, 12(4): 5 - 7.
- [8] 蔡成标, 翟婉明, 王其昌. 高速列车与高架桥上无碴轨道相互作用研究[J]. *铁道工程学报*, 2000, 67(3): 29 - 32.
- [9] 李广慧, 杨广军. 车辆-无碴轨道-桥梁系统振动特性及其工程应用[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2007.
- [10] 陈 淮, 杨 磊, 郭向荣. 列车通过连续钢桁梁桥时的动力响应研究[J]. *郑州大学学报: 理学版*, 2004, 36(4): 80 - 85.

Effect of the Longitudinal Layout of Floating Slabs on the Overhead Railway

YANG Guang - jun, DONG Xiao - ma, LI Guang - hui, XIE Xiao - peng

(Department of Civil Engineering, Zhengzhou Institute of Aeronautical Industry Management, Zhengzhou 450015, China)

Abstract: A dynamic model for the continuous floating slabs is presented in this paper on the basis of an analysis of floating slab track system. In the model, the floating slabs are regarded as the Bernoulli - Euler beams supported by elastomer bearings. By exploring the effect of the layout of floating slabs on the train - bridge coupled vibration characteristics, a reasonable layout configuration of floating slabs on the floating slab track system is obtained. The length of continuous floating slabs should be twice as much as that of box beam when ballastless tracks are designed initially.

Key words: floating slab; vehicle - bridge system; coupled vibration; viaduct