

文章编号:1005-0523(2013)06-0001-05

高架轨道结构振动特性分析

曾钦娥¹,毛顺茂²,雷晓燕¹

(1. 华东交通大学铁路环境振动与噪声教育部工程研究中心,江西 南昌 330013;2. 南昌轨道交通集团有限公司,江西 南昌 330038)

摘要:目前高架轨道是城市轨道交通的主要结构型式之一,为分析其结构振动特性,通过建立高架轨道垂向振动解析梁模型和有限元模型,采用动柔度法计算高架桥速度导纳和轨道速度导纳,并分别考虑桥梁支座刚度、桥梁截面形状对高架桥振动的影响以及高架桥基础和扣件刚度对轨道结构振动的影响。结果表明,桥梁支座刚度和截面形状在低频段对高架桥的振动有较大的影响,在高频段影响较小;高架桥结构对轨道的振动在20 Hz以下有明显的影 响,在20 Hz以上基本没有影响;提高扣件刚度有利于减小轨道的竖向振动,但同时增大了轨道的固有频率。

关键词:高架轨道;速度导纳;支座刚度;截面形状;扣件刚度

中图分类号:U491.9+3

文献标志码:A

高架轨道是我国城市轨道交通的主要结构型式之一,大多穿越或者位于居民区,相关研究表明,与普通路面轨道相比,高架轨道交通线路侧15 m处的总噪声级可增加2~20 dB(A)^[1]。因此,高架轨道产生的振动与噪声对周围环境的影响变得十分突出,有必要对高架轨道的振动特性进行分析,这将有利于优化桥梁结构设计,促进城市轨道交通的发展。

针对高架轨道引起的环境振动与噪声问题,国内学者已进行了一定的研究工作,文献[2-5]采用有限元法建立了轨道-高架桥三维振动模型,分析了轨道垂向动力传递特性和桥梁的动力响应;杨广军^[6]建立了车辆、轨道和桥梁系统方程,分析了轨道板结构参数对车桥系统振动的影响;李晶^[7]通过数值计算研究了钢轨扣件刚度、阻尼参数以及车辆速度对传递到高架桥的振动功率流的影响;李增光,吴天行^[8]对城市轨道交通车辆引起桥梁振动和辐射噪声进行理论分析和数值模拟。为分析高架轨道垂向振动特性,文章分别建立了高架桥和轨道-高架桥耦合系统的解析梁模型与有限元模型,讨论了桥梁支座刚度、桥梁截面形状对高架桥振动特性的影响以及高架桥基础和扣件刚度对轨道振动特性的影响,期望对高架轨道结构设计起到一些参考作用。

1 理论分析与模型建立

高架轨道结构模型如图1所示,钢轨由扣件直接连接于高架桥上,钢轨简化为无限长的Euler-Bernoulli梁,扣件简化为离散分布的带结构阻尼的弹簧^[8],桥梁视为有限长自由梁,由4个弹性支座置于桥墩,桥墩假设为刚性。仅考虑一跨结构,桥上铺设双线轨道,忽略两条轨道之间的相互影响,仅取右侧轨道和高架桥作为研究对象。采用动柔度法研究轨道的垂向振动,动柔度即单位简谐载荷 $F(\omega)$ 作用下在其作用点处引起的位移 $Y(z)$ 。即

$$r = Y(z)/F(\omega) \quad (1)$$

收稿日期:2013-08-04

基金项目:国家自然科学基金项目(U1134107);江西省普通本科高校科技落地计划项目

作者简介:曾钦娥(1990—),女,硕士研究生,研究方向为铁路环境振动与噪声。

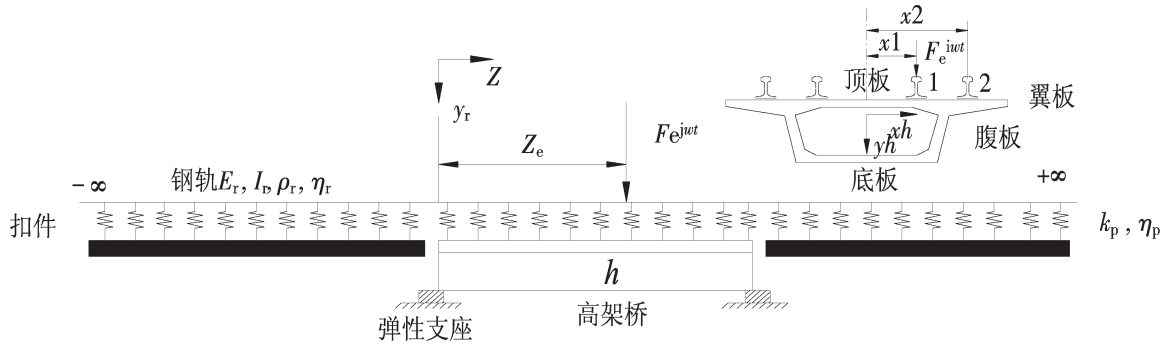


图1 轨道-高架桥耦合系统模型

Fig.1 Model of the directly fastened track-viaduct coupled system

如图1所示,简谐载荷 $F e^{i\omega t}$ 作用于钢轨1上 $z=z_e$ 处,则根据动柔度法和位移叠加原理,则钢轨1和钢轨2的垂向位移幅值可表示为

$$Y_{r1}(z) = F\alpha(z, z_e) - \sum_{n=1}^N F_{1n}\alpha(z, z_{1n}) \quad (2)$$

$$Y_{r2}(z) = - \sum_{n=1}^N F_{2n}\alpha(z, z_{2n}) \quad (3)$$

式中: F 为激励幅值; ω 为圆频率; i 为单位虚数; t 为时间; Y_{rj} 为钢轨 j 的垂向位移幅值; F_{jn} 和 z_{jn} 分别为钢轨 j 下第 n 个钢轨扣件中力的幅值和扣件纵向位置, $j=1$ 和 2 ; z_e 为荷载作用位置处; $N=N_r \times N_v$ 为一根钢轨下所有扣件的数目, N_r 为单跨高架桥内单根钢轨的扣件数目, N_v 为高架桥跨数; $\alpha(z_1, z_2)$ 为钢轨(无限长 Euler-Bernoulli 梁)的动柔度函数,见参考文献[8]。

同理,高架桥 h 的垂向位移幅值为

$$Y_h(x_h, z_h) = \sum_{j=1}^2 \sum_{m=1}^{N_r} F_{jhm} \gamma(x_h, z_h; x_j, z_{jhm}) \quad (4)$$

式中: F_{jhm} 为高架桥 h 上钢轨 j 对应的第 m 个钢轨扣件中力; z_{jhm} 为其在高架桥 h 高架桥坐标系中第 m 个钢轨扣件的纵向位置; x_j 为钢轨 j 在高架桥坐标系中的横向位置, $j=1$ 和 2 ; γ 为高架桥的动柔度函数,见参考文献[8]。

当 $n=(h-1)N_v+m$ 时, F_{jn} 和 F_{jhm} 对应同一钢轨扣件,则扣件的位移为

$$Y_{kpn} = \frac{F_{jn}}{k_p(1+i\eta_p)} = \frac{F_{jhm}}{k_p(1+i\eta_p)} = Y_{rj}(z_{jn}) - Y_h(x_j, z_{jhm}), j=1, 2 \quad (5)$$

将式(2)(3)和(4)分别代入式(5)可得

$$\frac{F_{1n}}{k_p(1+i\eta_p)} = \frac{F_{1hm}}{k_p(1+i\eta_p)} = F\alpha(z_{1n}, z_e) - \sum_{n=1}^N F_{1k}\alpha(z_{1n} - z_{1k}) - \sum_{j=1}^2 \sum_{l=1}^{N_p} F_{jhl}\gamma(x_1, z_{1hm}; x_j, z_{jhl}) \quad (6)$$

$$\frac{F_{2n}}{k_p(1+i\eta_p)} = \frac{F_{2hm}}{k_p(1+i\eta_p)} = - \sum_{n=1}^N F_{2k}\alpha(z_{2n} - z_{2k}) - \sum_{j=1}^2 \sum_{l=1}^{N_p} F_{jhl}\gamma(x_2, z_{2hm}; x_j, z_{jhl}) \quad (7)$$

将式(6)和(7)合并整理后可以写成矩阵:

$$RF=Q \quad (8)$$

式中: R 为高架桥-轨道动柔度矩阵,由钢轨动柔度 α 、扣件动柔度 $1/k_p(1+i\eta_p)$ 以及高架桥动柔度 γ 组成; F 为由钢轨1和钢轨2所有扣件中力组成; Q 前 N 个元素为 $F\alpha(z_{p1n} - z_e)$, $n=1, 2, \dots, N$, 其余元素为0。

根据(8)可求出钢轨扣件中力,代入式(2)求得钢轨在荷载作用位置处的垂向位移幅值 $Y_{r1}(z_e)$, 根据速度导纳的定义推出钢轨速度导纳幅值为

$$\dot{Y}_{r1}(z_e) = i\omega Y_{r1}(z_e) \quad (9)$$

2 高架桥结构振动特性分析

2.1 高架桥解析模型与有限元模型对比

为分析高架桥对轨道振动特性的影响,首先分析高架桥的特性,建立了高架桥解析梁模型和有限元模型,解析梁模型即将桥体假设为自由边界的Euler梁,支座简化为带结构阻尼的线性弹簧,考虑桥梁的扭转和弯曲振动。有限元模型采用有限元分析软件Ansys建立,桥体采用实体单元(Solid45)进行划分,支座采用弹簧-阻尼单元(Combin14),对其进行谐响应分析,模拟列车运行时轮轨间实际冲击,研究其在简谐荷载作用下的振动特性。

高架桥为单箱单室箱梁,截面积 $A=8.7925\text{ m}^2$,垂向弯曲截面惯性矩 $I=9.3395\text{ m}^4$,桥体跨度为32 m,弹性模量 $E=36.2\text{ GPa}$,密度 $\rho=2500\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,泊松比 $\nu=0.2$,阻尼比 $\zeta=0.05$,弹性支座刚度 $k_{vb}=3.38\times10^9\text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$,其损耗因子 $\eta_{vb}=0.25^{[8]}$ 。

根据以上参数分别计算高架桥梁模型和有限元模型的结构速度导纳,作用点位于桥梁跨中钢轨1下的扣件处,响应点分别取激励点以及距激励点2.5 m处,对应为桥梁原点和跨点速度导纳。城市高架轨道交通噪声的频率范围主要是中低频,其中1000 Hz以下部分是最主要的频率范围^[9],故文中只取1000 Hz以下的计算结果,见图2。

从图2可以看出,在13 Hz以下,两种模型的区别不明显,梁模型的幅值比有限元模型的稍大,两者在6 Hz左右都出现一阶峰值,在13 Hz左右出现二阶峰值,在13 Hz以上,两种模型出现显著的差异,有限元模型的振动幅值明显大于梁模型,梁模型的幅值迅速衰减,而有限元模型原点衰减不明显。

2.2 桥梁支座刚度的影响

为分析桥梁支座刚度对高架桥振动的影响,采用了5种不同的支座刚度, $k_{vb}=3.38\times10^7\text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$,其余4个为 $2k_{vb}$, $5k_{vb}$, $10k_{vb}$, $100k_{vb}$ 计算结果如图3所示。

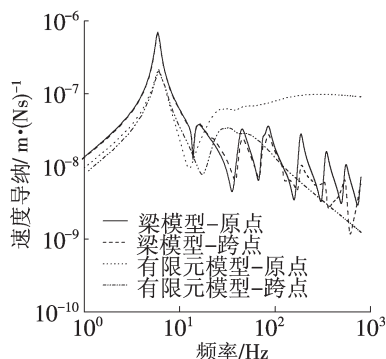


图2 两种高架桥模型速度导纳对比分析

Fig.2 Velocity admittance analysis of two viaduct models

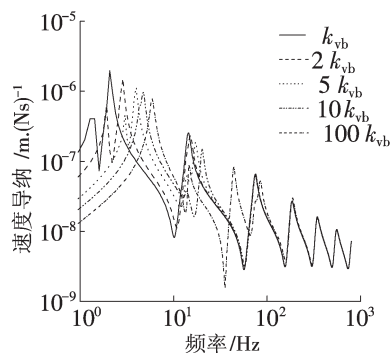


图3 桥梁支座刚对桥梁速度导纳的影响

Fig.3 Influence of bridge support stiffness on bridge velocity admittance

分析结果表明,桥梁振动的一阶频率随着桥梁支座的刚度增大而增大,其振动幅值则降低;随着频率的增大,支座刚度对速度导纳的影响越来越小,在100 Hz以上,桥梁支座刚度对其振动特性基本没有影响。

2.3 桥梁截面形状的影响

利用Ansys分别建立箱型梁和U型梁有限元模型,分析桥梁截面形状的变化对桥梁动柔度的影响。计算了两种截面形状的原点动柔度,分析结果见图4。

有限元分析结果表明,在25 Hz以下,U型梁的动柔度幅值比箱型梁明显大,U型梁的一阶频率在3 Hz左右,箱型梁的在6 Hz左右,这主要是由于U型截面的单位长度的质量要小于箱型截面。而25 Hz以上,两种截面形状的幅值基本一致。因此,在低频段桥梁的垂向振动受截面形状的影响,在几十赫兹到几百赫兹

频段内,桥梁截面形状的变化对桥梁的振动影响较小。

3 轨道振动特性分析

3.1 高架桥基础的影响

高架桥假设为刚性基础,与轨道位于高架桥上的轨道速度导纳进行对比分析,扣件刚度为 $60 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-1}$,采用60钢轨,其参数为:截面积 $A_r = 7.745 \times 10^{-3} \text{ m}^2$, (垂直弯曲)截面惯性矩 $I_r = 3.217 \times 10^{-5} \text{ m}^4$,杨氏弹性模量 $E_r = 2.06 \times 10^{11} \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$,密度 $\rho_r = 7830 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,泊松比 $\nu_r = 0.3$,损耗因子 $\eta_r = 0.01$ 。钢轨扣件损耗因子 $\eta_p = 0.25$,间距 $d_p = 0.625 \text{ m}$ 。计算结果如图5所示。

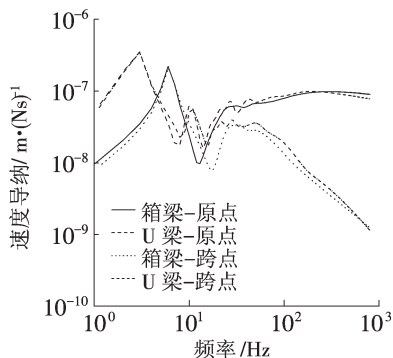


图4 不同截面形状的原点速度导纳

Fig.4 The origin velocity admittance of different cross section shapes

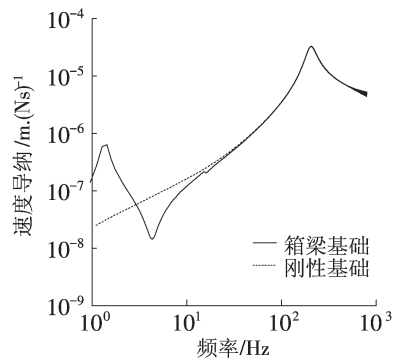


图5 轨道速度导纳对比

Fig.5 The comparison of track velocity admittance

从图5可以看出,在20 Hz以下,两者的幅值差别较大,说明高架桥对轨道振动特性影响较大,而在20 Hz以上两条曲线基本吻合,说明此时高架桥对轨道的振动基本没有影响,同时,两种基础形式在200 Hz处都出现了明显的峰值,对应为钢轨-扣件的固有频率。

3.2 钢轨扣件刚度的影响

钢轨扣件刚度的大小会直接影响轨道和高架桥之间的耦合作用,所以有必要分析不同扣件刚度下轨道速度导纳的变化,分别取扣件刚度为20,30,60,100,200 $\text{MN} \cdot \text{m}^{-1}$ 总共5个进行对比分析。计算结果如图6所示。

从图6可以看出,高架轨道的共振频率与钢轨扣件有直接的关系,扣件刚度越大,轨道出现的共振频率越大,轨道速度导纳的幅值随着扣件刚度的增大反而减小。也即在低频,扣件刚度越小,轨道与高架桥结构的耦合作用越大,而在高频,不同扣件刚度对轨道导纳的影响逐渐减小,20 $\text{MN} \cdot \text{m}^{-1}$ 和30 $\text{MN} \cdot \text{m}^{-1}$ 在高频处出现较大的波动。

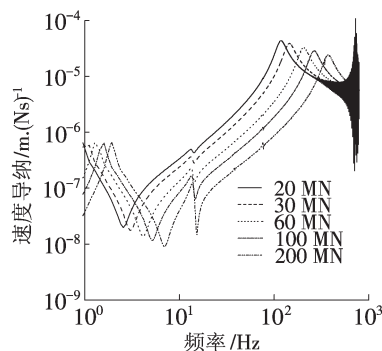


图6 扣件刚度变化对轨道速度导纳的影响

Fig.6 Influence of fastener stiffness change on track velocity admittance

4 结论

1) 在20 Hz以下,两种桥梁模型的区别不明显,有限元模型的幅值比梁模型的稍大,两者在6 Hz左右都出现了一阶峰值,在13 Hz左右出现二阶峰值。20 Hz以上,两种模型出现明显的区别,有限元的模型的振动幅值明显大于梁模型,说明在高频段 Euler-Bernoulli 梁模型低估了高架轨道结构的振动响应。

2) 随着频率的增大,支座刚度对桥梁动柔度的影响越来越小,在 100 Hz 以上,桥梁支座刚度对其动柔度基本没有影响。在低频段桥梁的垂向振动受截面形状的影响,在几十赫兹到几百赫兹频段内,桥梁截面形状的变化对桥梁动柔度影响较小。

3) 在 20 Hz 以下高架桥基础对轨道振动特性影响较大,而在 20 Hz 以上高架桥基础对轨道振动的影响很小。扣件刚度越大,轨道出现的共振频率就越大,其速度导纳的幅值反而减小,说明扣件刚度的增大有利减小轨道的竖向振动。

参考文献:

- [1] KURZWEIL L G. Prediction and control of noise from railway bridges and tracked transit elevated structures[J]. Journal of Sound and Vibration, 1977, 51(3): 419-439.
- [2] 谷爱军,刘维宁,张厚贵,孙鑫. 地铁扣件刚度和阻尼对钢轨异常波磨的影响[J]. 都市快轨交通, 2011, 24(3): 17-21.
- [3] 彭宏. 城市高架轨道交通无砟轨道振动特性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2008: 67-69.
- [4] 高飞,夏禾,曹艳梅,等. 城市轨道交通高架结构振动与声辐射研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(4): 72-76.
- [5] 罗文俊,雷晓燕,练松良. 车辆-高架桥耦合系统竖向振动分析车辆轨道新模型[J]. 华东交通大学学报. 2013, 30(2): 1-8.
- [6] 杨广军. 车辆-无砟轨道-桥梁系统竖向耦合振动特性的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007: 38-50.
- [7] 李晶. 城市轨道交通高架桥梁振动与结构噪声研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012: 35-43.
- [8] 李增光,吴天行. 铁道车辆-轨道-高架桥耦合系统振动功率流分析[J]. 振动与冲击. 2010, 29(11): 78-82.
- [9] 贺建良,万泉,蒋伟康. 高架城市轨道交通的噪声特性分析[J]. 城市轨道交通研究. 2007, 10(8): 57-60.

Analysis on Vibration Characteristics of Elevated Track Structure

Zeng Qin'e¹, Mao Shunmao², Lei Xiaoyan¹

(1. Engineering Research Center of Railway Environment Vibration and Noise of the Ministry of Education, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2. Nanchang Railway Trains Group, Nanchang 330038, China)

Abstract: At present, the elevated rail is one of the main structure forms in urban rail transit. In order to analyze the structure's vibration characteristics, this paper, through establishing the viaduct vertical vibration model of analytical beam and finite element model and by using the dynamic compliance method to calculate the viaduct velocity admittance and orbital velocity admittance, studies the influence of bearing stiffness and the bridge cross section shape on the viaduct bridge vibration. Meanwhile, it probes into the influence of the viaduct foundation and fastener stiffness on track structure vibration. Results show that, at low frequency, the bearing stiffness and cross section shape have a larger effect on the viaduct vibration, while at high frequency, it has little influence; Under 20 Hz, viaduct structure on the vibration of the rail has obvious effects, and it has no effect when above 20 Hz. This paper concludes increasing the stiffness of fastener is beneficial for reducing the vertical vibration of the rail, but may increase the natural frequency of the orbit at the same time.

Key words: elevated trackway; velocity admittance; bearing stiffness; cross section shape; fastener stiffness