

文章编号:1006-1355(2015)03-0010-05+28

嵌入式轨道结构的声振特性参数优化研究

江小州¹, 焦洪林², 杨 刚², 罗 炯², 赵 悦^{1,2}, 温泽峰¹

(1. 西南交通大学 牵引动力国家重点实验室, 成都 610031

2. 新筑路桥机械股份有限公司, 成都 611430)

摘 要: 为了研究现有嵌入式轨道在某型城际有轨电车以 60 km/h 速度运营时的声振特性, 分别建立嵌入式轨道结构的振动和声辐射计算模型, 对嵌入式轨道振动声辐射特性进行分析, 了解轨道振动规律与轮轨力激励的关系。轨道振动产生的声辐射水平在中频段总体很高, 在低频和高频处水平较低。通过改变轨道结构尺寸, 预测各个工况下嵌入式轨道的振动和声辐射。轨道的声振特性主要表现在 20 Hz~160 Hz 和 160 Hz~5 000 Hz 两个频段内, 辐射声功率级在 200 Hz~1 200 Hz 频段内表现尤为突出, 应该予以特别关注。若设现有嵌入式轨道板长度为 l , 高为 h , 承轨槽宽度为 w , 现有 PVC 管直径为 d , 相关的参数优化表明取轨道板长度为 $0.75 l$, 高为 $1.25 h$, 承轨槽宽度为 w , PVC 管直径为 $0.88 d$ 或者 $1.15 d$ 时, 轨道结构具有最优的声振特性。相关的计算能为结构设计提供很好的指导。

关键词: 声学; 城际有轨电车; 嵌入式轨道; 结构振动; 声辐射; 参数优化

中图分类号: U270.1*6

文献标识码: A

DOI 编码: 10.3969/j.issn.1006-1355.2015.03.003

Parameters Optimization Research on the Acoustic and Vibration Characteristics of an Embedded Track Structure

JIANG Xiao-zhou¹, JIAO Hong-lin², YANG Gang²,
LUO Jiong², ZHAO Yue^{1,2}, WEN Ze-feng¹

(1. State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. Chengdu Xinzhur Road & Bridge Machinery Co. Ltd., Chengdu 611430, China)

Abstract: In order to study the acoustic and vibration characteristics of an embedded track structure when inter-city streetcars traveling at 60 km/h in the track, a model for structure vibration and noise radiation analysis was developed. The vibration and noise radiation characteristics of the embedded track were analyzed, and the relation between the vibration law and the wheel-rail force excitation was learned. The results show that the radiated sound power level induced by the track vibration is much higher in the medium frequency range than that in the low and high frequency ranges. Changing the dimensions of the track structure, the vibration and noise radiation in different working conditions were forecasted. It is found that the acoustic and vibration characteristics of the track mainly perform in two frequency ranges of 20 Hz-160 Hz and 160 Hz-5 000 Hz. The radiation sound power level appears obviously high in the range of 200 Hz-1 200 Hz, which should be cared specially. Considering an existing track structure with the slabs of length l and height h , the rail supporting groove of width w and the PVC tube of diameter d , parameters optimization shows that the structure which has slabs with $0.75 l$ length and $1.25 h$ height, rail supporting groove of w width, and PVC tube of $0.88 d$ or $1.15 d$ diameter has optimal acoustic and vibration characteristics. The concerned results can guide the design of embedded track structures.

Key words: acoustics; inter-city streetcar; embedded track; structure vibration; noise radiation; parameters optimization

面对目前交通堵塞和环境恶化等诸多问题, 城

市各种新型轨道交通的兴起对于解决这些问题发挥着重要的作用。但是它们引发的振动与噪声问题也直接影响到周边居民的生活。有轨电车结合嵌入式轨道的应用很好地适应了人们对于便捷、经济、环保和低噪声的需求, 因而得到了广泛关注。薛美根^[1]等通过速度、灵活性和舒适性等对现代有轨电车的主要特征进行了分析, 介绍了国内外的研究并提出了建议; 瞿海波^[2]等结合技术经济特点和应用

收稿日期: 2015-01-13

基金项目: 国家自然科学基金(U1434201, 51105318);

教育部博士点基金(20130184110005)

作者简介: 江小州(1992-), 男, 陕西安康人, 硕士研究生, 目前从事高速列车振动与噪声研究。

E-mail: jiangxz0509@163.com.

通讯作者: 温泽峰, 男, 教授, 博士生导师。

E-mail: zefengwen@126.com

实践,总结了现代有轨电车的三种应用模式和四种发展地区;黄涛^[3]等对浮置板轨道的轮轨振动进行了仿真分析,模拟了轨道在列车动荷载作用下的振动响应;陶洪敏^[4]等分析了轨道结构的噪声源,建议从隔振和吸振等方面采取减振降噪措施;高江宁^[5]等着重针对应用广泛的Translohr有轨电车的轨道结构进行了介绍;黄悦^[6]等对嵌入式板式轨道系统系统地进行了详细剖析;秦超红^[7]建立了嵌入式钢轨结构的单元模型,利用有限元法对嵌入式轨道线路的稳定性进行了研究,以寻求其影响参数;牛月明^[8]等在现有嵌入式轨道结构的基础上,分析其设计理念,并对设计优化进行了初步研究;何远鹏^[9]等则着重研究了嵌入式轨道弹性材料对钢轨振动声辐射的影响,具有重要的参考价值。

由于目前基于嵌入式轨道参数对其结构声振特性的影响的研究较少,本文着重针对嵌入式轨道结构的四个结构参数展开讨论。在建立相应的模型基础上,分析其声振特性,为轨道结构的参数优化设计提供参考。

1 仿真模型

列车在运行过程中速度的不同引发的结构振动和声辐射也不尽相同,基于现代城际有轨电车的运营情况,建立列车速度为60 km/h时嵌入式轨道的振动计算模型和声辐射计算模型。利用PATRAN有限元软件和SYSNOISE声学有限元软件进行相应的振动和声辐射分析。

1.1 嵌入式轨道的振动计算

嵌入式轨道的实际轨道结构如图1所示,与传统的轨道结构中离散的扣件连接方式有很大不同。它在混凝土浇筑的整体道床上预留凹形槽,在凹形槽内铺设弹性的轨下垫板,将钢轨放置在凹形槽内部,周围敷设高分子弹性材料,从而使轨道固定并降低轨道的振动。在分子弹性材料中通体贯穿两根空心PVC管道,减小高分子弹性材料体积以及优化轨道结构竖向和水平的刚度。

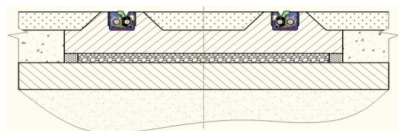


图1 轨道结构横截面

在实际的轨道线路中,可以将之视为一无限长的系统。在该系统中输入某一力激励时,基于结构阻尼的影响,该力激励只会在有限长的范围内产生影响,因此在计算模型中只截取了嵌入式轨道的一部分作为研究对象。根据轨道结构的对称性,在三

维实体建模过程中,只选取一半进行分析,如图2所示,结构中的PVC管道采用壳单元进行划分,钢轨、弹性材料、轨下垫板、轨道板、土壤和路基等均采用实体单元划分。

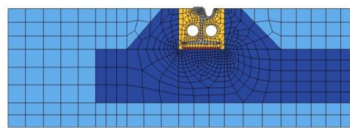


图2 嵌入式轨道有限元模型

在轨道中心处沿 x 方向设为对称的边界面,同时在轨道结构的纵向边界 z 方向设为对称边界面,模型的底部为固定边界面,如图3所示。

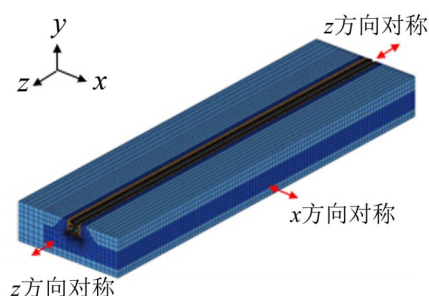


图3 轨道结构整体模型

列车车轮与钢轨接触点如图4中的 C_0 所示,轮轨力激励轨道振动,周围的弹性材料将轨道传递的振动能量耗散,从而达到减振降噪的效果。本文选取轨道轨头上的一点 C_0 作为振动计算模型的研究对象,通过单位力作用下的振动位移响应计算轮轨力,利用直接法求解其垂向振动响应。

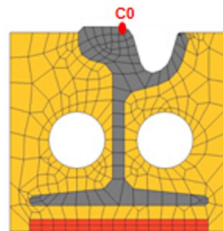


图4 钢轨截面

嵌入式轨道结构相关的材料参数如表1所示。

且已知嵌入式轨道结构轨道板长度 L 为 l (m),轨道板高度 H 为 h (m),承轨槽宽度 W 为 w (m),PVC管直径 D 为 d (m)。

1.2 轨道声辐射计算

取空气的密度 ρ 为 1.21 kg/m^3 ,空气中声速 c 为 344 m/s 。分析频率范围为 $20 \text{ Hz} \sim 5\,000 \text{ Hz}$,其中在 $20 \text{ Hz} \sim 1\,000 \text{ Hz}$ 频率范围内计算步长为 20 Hz ,在 $1\,000 \text{ Hz} \sim 5\,000 \text{ Hz}$ 频率范围内计算步长为 40 Hz 。将根据轨道结构振动计算模型算得的振动响应的结果输入到轨道结构边界元模型中去,采用直接边界

表1 嵌入式轨道结构材料参数

材料	弹性模量/ (Pa)	泊松比	密度/ (kg/m ³)	阻尼损耗 因子
钢轨	2.1×10^{11}	0.3	7 850	-
PVC管	3.14×10^9	0.35	1 350	-
轨道板	3.6×10^{10}	0.2	2 400	-
土壤	5×10^6	0.2	1 340	0.1
路基	3.25×10^{10}	0.2	2 400	-

元法计算结构振动声辐射。

2 轨道振动和声辐射特性

嵌入式轨道的振动特性如图5所示。

由图5可见,轨道结构振动与轮轨力的变化趋势基本一致。在200 Hz以下的低频处,振动位移幅值比较大,这是由于较大的轮轨力激励所导致。随着频率的增加,振动位移幅值迅速降低,且在660 Hz、1 680 Hz和3 000 Hz处出现三个峰值,这与轮轨力出现的峰值吻合。

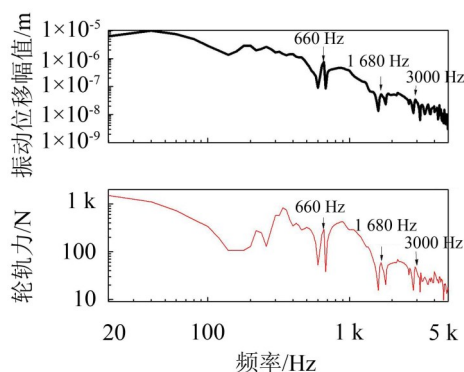


图5 嵌入式轨道的振动特性

参考何远鹏^[9]等人的研究结果,由图6可见,在200 Hz以下时,辐射声功率级总体很低,这是由于轨道振动的能量被周围的弹性材料和阻尼耗散导致。其辐射声功率级在200 Hz~1 200 Hz频段表现尤为突出,总体很高且均在75 dB以上。在这一频段钢轨和弹性材料一起振动,能量向外辐射,噪声水平明显提高。在高于1 200 Hz以上时,由于轮轨力较小,引起的轨道振动很小,因而噪声辐射水平就很低。

3 参数优化及结果分析

3.1 轨道板长度

轨道板长度分为0.5 l 、0.75 l 和 l 三类。不同长度轨道板下的振动特性如图7所示。

由图7可见,在20 Hz~160 Hz频率范围内,长 l 的轨道板结构在降低轨道结构振动上更有优势,长0.5 l 的轨道板结构振动位移幅值与长 l 的振动位移

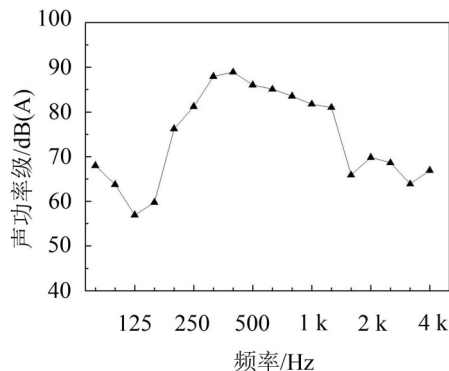
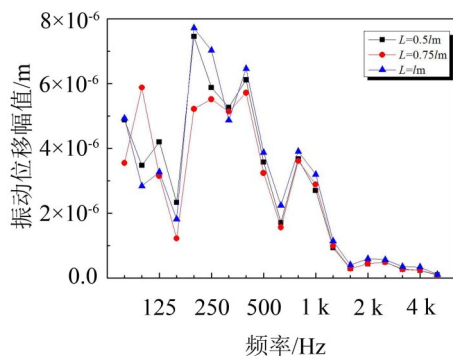
图6 嵌入式轨道的声辐射特性^[9]

图7 轨道板长度对轨道振动特性的影响

幅值相差不大,长0.75 l 的轨道板在降低轨道结构振动上的性能略微差一点,尤其表现在125 Hz以下,随着频率的增加,长0.75 l 的轨道板的振动位移幅值不断减小,并且低于长0.5 l 和 l 的轨道板,逐渐显示出其在减振方面的优势。在160 Hz~5 000 Hz频率范围内,长0.75 l 的轨道板轨头垂向振动位移幅值要小于长0.5 l 和 l 的振动位移幅值,在减振方面为最优。这是因为缩短轨道板长度,可在一定程度上降低轨道板弯曲振动,但是轨道板长度过短会降低轨道板整体质量,可能会引起其振动偏大,且不利于现场施工安装。

图8和表2给出了各个工况下轨道结构的三分之一倍频程下的辐射声功率级和A计权辐射总声功率级。在160 Hz以下,长0.75 l 的轨道板辐射声功率级要远高于长0.5 l 和 l 的轨道板,平均值在65 dB以上。在200 Hz~1 200 Hz频段,三种工况总体辐射声功率级很高,均在70 dB以上。在高于160 Hz时,长0.75 l 的轨道板辐射噪声水平都是最低的,且辐射噪声总声功率级相比标准工况即 l 时,减小了5个dB,而长0.5 l 的轨道板只降低了2.2个dB。因此选取长0.75 l 的轨道板最优,可以有效地降低轨道振动和声辐射。

3.2 轨道板高度

轨道板高度分为0.75 h 、0.88 h 、1.10 h 和1.25

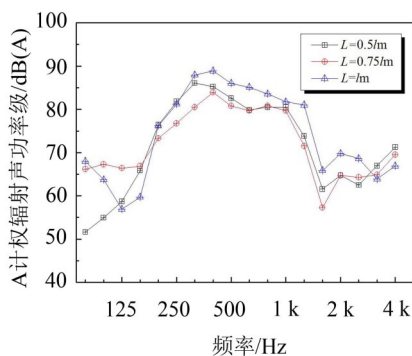


图8 轨道板长度对轨道声辐射特性的影响

表2 轨道板长度对辐射总声功率级 L_w (dB)的影响

工况/(m)	0.51	0.751	1
L_w /(dB)	91.7	89.6	94.5

h 五个工况。轨道在不同高度轨道板下的振动特性如图9所示。

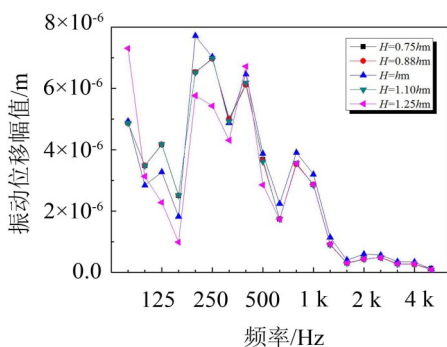


图9 轨道板高度对轨道振动特性的影响

由图9可见,在20 Hz~160 Hz频率范围内,轨道板越高,其振动幅值越小。但是高1.25 h 的轨道板在低于100 Hz的低频处表现出最大的振动位移幅值。根据隔振原理推断,这有可能是因为增加轨道板的高度之后,轨道整体的质量增加,其轨道的固有频率改变,其频率比即激振频率与固有频率之比会存在一个临界值,在该临界值以下,其振动特性在低频处可能反而得以放大,表现出异于正常规律的特性,而在高频处会逐渐恢复,不会产生该现象。对于高 h 的轨道板来说,超过160 Hz以后,增加或者减小轨道板的高度都能有效地降低轨道结构的垂向振动,其中以增大轨道板高度的结构减振性能更好。

如图10和表3所示,在160 Hz以下,高1.25 h 的轨道板具有最大的辐射声功率级。当频率大于160 Hz以后,高 h 的轨道板辐射声功率级最大,增加或者减小其高度都能有效减少噪声的辐射,尤其以增加轨道板高度的减噪效果更佳,且与其振动特性相一致,其中高1.25 h 的轨道板辐射总声功率级为最低,降噪性能最好,最高达到4个dB。因此选取高1.25

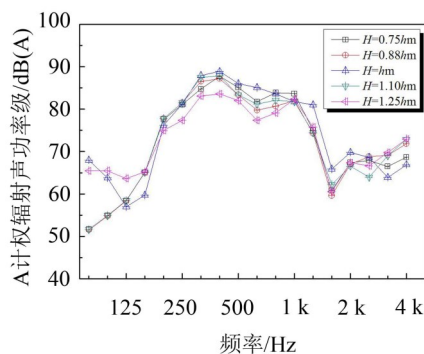


图10 轨道板高度对轨道对声辐射特性的影响

表3 轨道板高度对辐射总声功率级 L_w (dB)的影响

工况/(m)	0.75 h	0.88 h	h	1.1 h	1.25 h
L_w /(dB)	93.2	92.7	94.5	93.2	90.3

h 的轨道板可以有效的降低轨道结构的振动与噪声辐射。

3.3 承轨槽宽度

承轨槽宽度分为0.90 w 、0.95 w 、 w 、1.05 w 和1.10 w 五类。轨道在不同宽度承轨槽下的振动特性如图11所示。

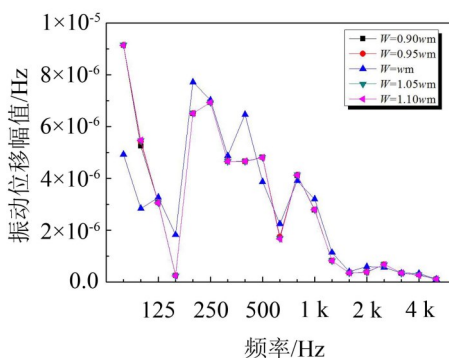


图11 承轨槽宽度对轨道的振动特性的影响

由图11可见,在20 Hz~160 Hz频率范围内,宽 w 的承轨槽的振动位移幅值均为最小,减振性能最优;在160 Hz~160 Hz频率范围内,宽 w 的承轨槽的振动位移幅值反而最高,高于或者低于宽 w 的承轨槽表现出较小的振动位移幅值,减振性能优于宽 w 的承轨槽。超过400 Hz以后,高于或者低于宽 w 的承轨槽围绕宽 w 的承轨槽的振动位移幅值曲线上下波动,但相差不大。这说明承轨槽的宽度在低频处对于轨道结构振动的影响较为显著,在中高频处承轨槽的宽度对轨道结构振动的影响很小。

如图12和表4所示,当承轨槽的宽度为 w 时,在200 Hz~400 Hz频段范围内,辐射声功率级较大,但是其整体辐射声功率级比较小,增加或者减小宽度的大小都将增大轨道结构的噪声辐射,而且其总声

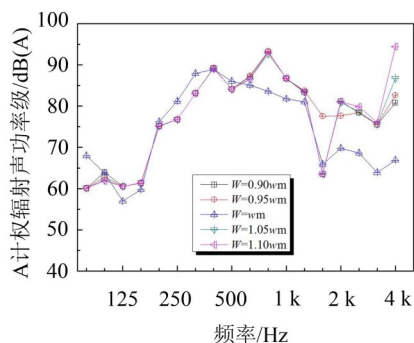


图 12 承轨槽宽度对轨道声辐射特性的影响

表 4 承轨槽宽度对辐射总声功率级 L_w (dB)的影响

工况/(m)	0.90 w	0.95 w	w	1.05 w	1.10 w
L_w /(dB)	97.0	97.1	94.5	97.1	98.8

功率级至少增加2个dB,因此保持承轨槽宽度为 w 为最好。在整个频段内,噪声辐射仍以200 Hz~1 200 Hz最为突出。因此应着重控制该频段的辐射噪声水平。

3.4 PVC管直径

PVC管直径分为0.70 d 、0.88 d 、 d 、1.15 d 和1.20 d 五类。轨道在不同直径PVC管下的振动特性如图13所示。

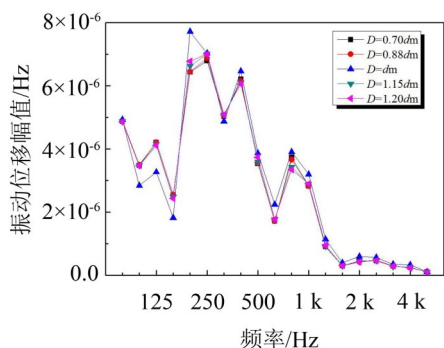


图 13 PVC管道直径对轨道振动特性的影响

从图13中可以看出,总体上五个工况的振动位移幅值相差不大,160 Hz以下,直径为 d 的PVC管的性能稍优,但是超过160 Hz以后,增大或者减小PVC管的直径都能降低振动位移的幅值。但是基本上降低的不多,在整个频段曲线几乎重合。

如图14和表5所示,在160 Hz以下,直径为 d 的PVC管辐射声功率级较高,在160 Hz以上频段,增加或者减少其直径的长度可以有效削减辐射噪声功率级,就总声功率级而言,其中以0.88 d 和1.15 d 削减的幅值为最大,都达到了2个dB以上,减噪效果最好。

4 结 语

本文选取了轨道板长度、轨道板高度、承轨槽宽

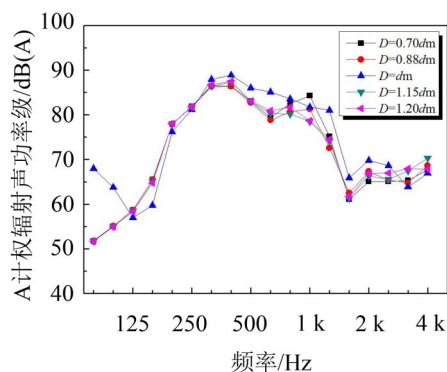


图 14 PVC管道直径对轨道声辐射特性的影响

表 5 PVC管道直径对辐射总声功率级 L_w (dB)的影响

工况/(m)	0.70 d	0.88 d	d	1.15 d	1.20 d
L_w /(dB)	92.8	92.1	94.5	92.4	92.7

度和PVC管直径四个参数,对嵌入式轨道参数下的各个工况进行分析,从而为进一步地优化设计提供参考,得到的结论如下。

(1) 嵌入式轨道振动位移幅值出现了三个峰值,分别对应的频率为660 Hz、1 800 Hz和3 000 Hz,与轮轨力峰值吻合,其总体变化趋势也与轮轨力相同,说明嵌入式轨道振动规律与轮轨力激励有关。且嵌入式轨道辐射声功率级在20 Hz~1 200 Hz比较显著,因此可以采取相应的减噪措施控制该频段的噪声水平;

(2) 仿真结果表明,嵌入式轨道的振动特性主要表现为两个频段,分别为20 Hz~160 Hz和160 Hz~5 000 Hz,进一步的参数研究结果表明,轨道结构在这两个频段内的振动特性随结构典型尺寸参数变化规律是不相同的;

(3) 轨道板长度为0.75 l 时的振动位移幅值和声辐射相比于0.5 l 和 l 时都是最优的,因此选取0.75 l 长的轨道板为好;

(4) 增加或者减小轨道板的高度都能降低轨道的振动位移幅值,其中增加轨道板高度的效果更好,结合轨道的声辐射特性,选取高1.25 h 的轨道板为最优;

(5) 承轨槽宽度对于轨道结构的振动的影响不大,但是对噪声辐射影响很大,其中增大或者减小承轨槽的宽度都提高了噪声的辐射水平,因而保持承轨槽的宽度 w 不变为最好;

(6) 增加或者减小PVC管的直径都能减小轨道振动位移幅值,参考辐射声功率级的大小,其中以直径为0.88 d 和1.15 d 长的PVC管降低的分贝数最大,降噪效果最好。

(下转第28页)