

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.03.005

集装箱岸桥的轮轨箱梁噪声控制研究^{*}

徐志超¹, 张振京¹, 孙 杰², 刘 斌², 黄震宇¹

(1. 上海交通大学 电子信息与电气工程学院, 上海 200240; 2. 上海振华重工集团有限公司, 上海 200125)

摘要:针对集装箱岸桥的小车在轨道上运行时引起轮、轨和岸桥箱梁的辐射噪声问题,同时为了从噪声源及其主要传递路径上控制岸桥噪声,结合有限元和统计能量法建立了包括轮轨激励力、轮轨箱梁阻抗关系和轮轨箱梁声辐射估算的噪声预计模型。基于该模型的噪声预计分析,确定了轮轨粗糙度和轨下胶垫刚度是有效的噪声控制参数,并在某一典型岸桥上对这两种不同噪声控制参数进行了试验。研究结果表明,若轨道表面粗糙度降低到原来的30%,则钢轨、箱梁振动可减少44%;若岸桥起重机前大梁胶垫刚度降低到原来的33%,则钢轨振动增加6%,而箱梁振动可减少26%。同时采用上述两种减振降噪控制策略后岸桥起重机整体噪声降低44%,对工程实践中岸桥轮轨-箱梁噪声的预计及控制具有一定的工程价值。

关键词:集装箱岸桥; 噪声控制; 轮轨激励; 胶垫刚度; 轨道粗糙度

中图分类号:TB53;TH113.1

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)03-0271-05

Noise control of wheel-rail and box girder in a container crane

XV Zhi-chao¹, ZHANG Zhen-jing¹, SUN Jie², LIU Bin², HUANG Zhen-yu¹

(1. Shanghai JiaoTong University, School of Electronic Information and Electronic Engineering, Shanghai 200240, China;

2. Shanghai Zhenhua Co., Ltd, Shanghai 200215, China)

Abstract: Aiming at the radiate noise of wheel, rail and box girder when the carriage pulling the container ran along the rail, in order to reduce the noise from the sources and the transmission path, based on finite element and statistical energy method, a noise prediction model which consists of the wheel-rail contact forces, impedance relationship between the rail and box girder, and the noise radiation calculation was established. According to the prediction results from the model, it was shown that the roughness of the wheel and rail contact surface, and the stiffness of the rubber pad under the rail were effective parameters. Experimental study with two different parameters were carried out on a typical container crane. The results indicate that the experiment of polishing the roughness of the rail to 30% showed that the vibration of the rail and box girder can be reduced to 56%. The other experiment of reducing the stiffness of the rubber pad to 33% showed that the vibration of the rail increase 12%, but reduce 74% for the box girder. When the two experiments were both carried out, the whole noise of the container crane can be reduced to 56%. In engineering practice, noise prediction and control of wheel-rail and box girder have a certain engineering value.

Key words: container crane; noise control; wheel-rail contact forces; stiffness of the rubber pad; rail roughness

0 引 言

随着远洋运输业的快速发展,大型集装箱岸桥越来越多,这些岸桥日夜工作产生的巨大噪声带来了严

重的环境问题。

工程实践表明,集装箱岸桥噪声主要由机器房噪声和轮轨箱梁噪声组成。机器房噪声属于静态噪声源,控制该噪声源可参考建筑隔声方法^[1-2]。轮轨箱梁

收稿日期:2015-11-23

基金项目:上海交通大学振动与噪声控制研究资助项目(14H300000113)

作者简介:徐志超(1991-),江苏常州人,男,主要从事振动与噪声控制方面的研究. E-mail:13378216665@163.com

通信联系人:黄震宇,男,副教授,硕士生导师. E-mail:13388359036@163.com

噪声由小车在轨道上运行时产生的轮轨激励力引起,因此属于动态噪声源。岸桥的轮轨箱梁噪声控制目前国内外尚无公开文献可参考。与该噪声源相似的是火车经过钢桥产生的轮-轨-钢桥噪声^[3],其控制策略:①降低轮轨激励力^[4];②降低轨道传递至钢桥作用力,减小作为主要声辐射部件钢桥的噪声辐射^[5-6]。

本研究以控制岸桥轮轨箱梁的振动和噪声辐射为目标,建立包括轮轨激励力、轮轨箱梁阻抗关系和轮轨箱梁声辐射估算的噪声预计模型;通过优化轮轨粗糙度和轨下胶垫刚度实现对集装箱岸桥轮轨箱梁噪声控制。研究中以某一典型岸桥为试验对象(以下称为“试验岸桥”),采用的岸桥结构参数及振动噪声试验均在该岸桥上进行,并在岸桥上开展试验验证。

1 轮轨箱梁噪声预估模型

1.1 轮轨箱梁噪声产生机理

岸桥轮轨箱梁系统由车体、车轮、轨道、轨下胶垫和箱梁组成,其中轮-轨-箱梁相互作用力如图 1 所示。

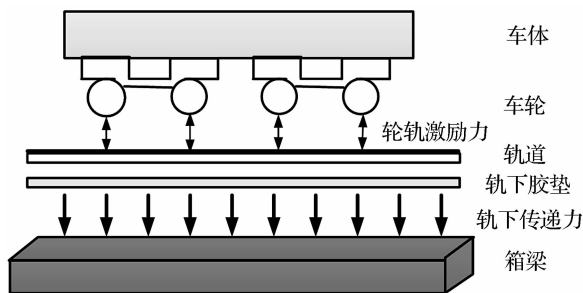


图 1 岸桥的轮-轨-箱梁受力示意

车轮和轨道表面存在一定的不平整,用粗糙度表征。当小车运行时,车轮和轨道表面的不平整引起轮轨间相互作用,从而产生轮轨激励力。轮轨激励力同时作用在车轮和轨道上,引起车轮和轨道的振动,并产生车轮和轨道的噪声。同时,轮轨激励力通过轨下胶垫传递到箱梁,引起箱梁振动并产生箱梁噪声。车轮、轨道和箱梁噪声构成了轮轨箱梁总噪声。

轮轨箱梁噪声预计模型包括轮轨激励力、轮轨箱梁阻抗关系和轮轨箱梁声辐射估算,其相互之间的关系如图 2 所示。首先将车轮、轨道有效粗糙度谱输入车轮、轨道和接触弹簧构成的动力学分析模型,计算出轮轨激励力。并将轮轨激励力输入轨道-胶垫-箱梁的阻抗(导纳表示)分析模型,利用阻抗法计算出经过胶垫传递至箱梁的力。根据各部件所受作用力,分别通过边界元法(BEM)计算出车轮的噪声辐射和统计能量法(SEA)计算出轨道和箱梁的噪声辐射,其噪声能量的总和为轮轨箱梁系统总噪声。

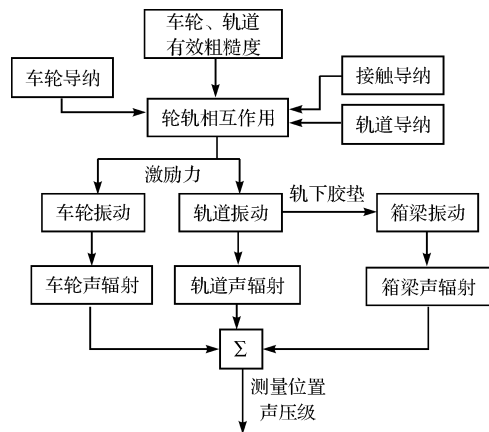


图 2 岸桥轮轨箱梁系统噪声预计

1.2 轮轨激励力

根据 D. J. Thompson^[7] 轮轨激励力计算模型,在竖直方向上的轮轨激励力计算模型可简化,该计算模型如图 3 所示。车轮在受到额定静负载 F_0 作用下,在车轮与轨道的接触面处产生刚度为 K_H 的弹簧(称“接触弹簧”)。轨道系统包括轨道本身及下方箱梁,二者间存在隔振橡胶垫。当车轮在水平方向运行时,粗糙度 r 作为激励,导致车轮与轨道之间产生动态激励力。

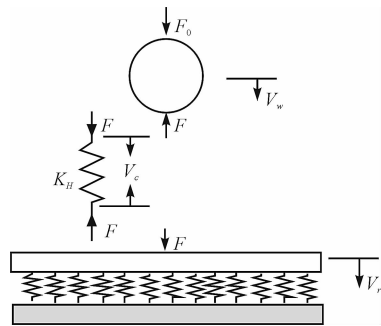


图 3 岸桥轮轨激励力计算模型

根据图 3,轨道竖直方向上的速度响应幅值 $V_r(\omega)$ 可由粗糙度速度振幅 $i\omega r$, 车轮的速度响应幅值 $V_w(\omega)$ 和轮轨接触面速度响应幅值 $V_c(\omega)$ 来表示:

$$V_r = i\omega r + V_w - V_c \quad (1)$$

又根据轨道箱梁系统、车轮、轮轨接触面的速度响应的导纳关系式,可得轨道箱梁系统的速度响应:

$$V_r = YF \quad (2)$$

式中: Y —轨道箱梁系统导纳; F —轮轨激励力幅值。

车轮的速度响应:

$$V_w = -Y_w F \quad (3)$$

式中: Y_w —车轮模态导纳。

对于接触弹簧,其接触面的速度响应:

$$V_c = Y_c F = \frac{i\omega F}{K_H} \quad (4)$$

式中: Y_c —接触弹簧导纳, K_H —接触弹簧刚度。

根据上述导纳关系式,将式(1)改写可得轮轨激励力:

$$F = \frac{i\omega r}{Y + Y_w + Y_c} \quad (5)$$

根据接触斑滤波效应,假设椭圆形接触斑运行方向的轴半径为 a ,其滤波效应传递函数:

$$|H(k)|^2 = (1 + \frac{\pi}{4}(ka)^3)^{-1} \quad (6)$$

式中: k —小车运行方向上的钢轨波数。

考虑接触斑滤波效应,实际有效轮轨激励力为:

$$F_k = F \cdot |H_k| \quad (7)$$

根据式(5)可得,轮轨激励力与轨道粗糙度成正比关系,轨道粗糙度降低一半,轮轨激励力降低一半,可使轨道箱梁辐射声功率降低6 dB。

1.3 轨道箱梁阻抗关系

轮轨激励力通过轨下胶垫从轨道传递至箱梁,当轮轨激励力一定时,调整胶垫刚度会同时引起轨道和箱梁受力变化。轨道箱梁系统竖直方向上的阻抗分析如图4所示,从轨道上方看,胶垫和箱梁串联(导纳相加)后再与轨道并联(阻抗相加)。

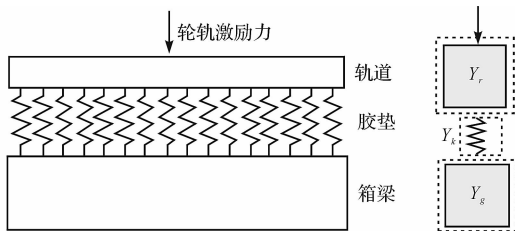


图4 轨道-胶垫-箱梁阻抗模型

Y_r, Y_k, Y_g —轨道、胶垫、箱梁导纳

轨道-胶垫-箱梁总导纳为:

$$Y = \frac{1}{\frac{1}{Y_k + Y_g} + \frac{1}{Y_r}} \quad (8)$$

轨道速度:

$$V_r = Y \cdot F \quad (9)$$

箱梁速度:

$$V_g = Y_g \cdot F_g \quad (10)$$

轨道受力:

$$F_r = \frac{1}{1 + \frac{Y_r}{Y_k + Y_g}} F \quad (11)$$

联立式(5, 8 ~ 11)可得箱梁受力:

$$F_g = \frac{Y_r}{Y_r + Y_k + Y_g} \cdot F \quad (12)$$

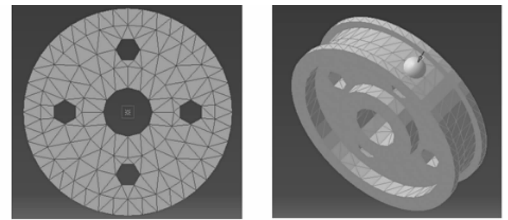
由式(11 ~ 12)可得:若降低胶垫刚度(即胶垫的

机械导纳 Y_k 增大),轨道受力和速度响应增大,但箱梁受力和速度响应减小。

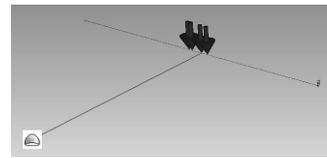
1.4 轮轨箱梁声辐射估算

利用基于有限元法的商用软件可估算车轮的声辐射,而对于大型结构部件则利用基于统计能量法的商用软件估算轨道和箱梁的声辐射,相关研究工作详见文献^[8]。由于轮轨箱梁结构复杂,边界条件难以获取,仅通过轮轨箱梁声辐射初步估算结果可知,轨道和箱梁声功率在数量级上接近,而车轮声功率远小于轨道和箱梁,差值在30 dB以上。岸桥小车运行速度较慢,仅为4 m/s,难以激发车轮1 000 Hz以上的高频模态,且岸桥车轮数量较少。所以轮轨箱梁噪声控制主要考虑轨道和箱梁。

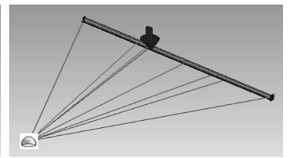
车轮、轨道和箱梁噪声预估模型如图5所示。



(a) 车轮(边界元)



(b) 轨道噪声(统计能量法)



(c) 箱梁噪声(统计能量法)

图5 噪声预估模型

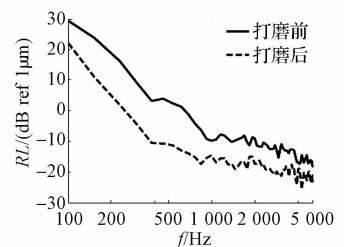
2 轮轨箱梁噪声控制策略

2.1 轨道粗糙度控制

本研究根据轨道粗糙度测量原理设计的轨道粗糙度测试仪器^[9]如图6(a)所示。打磨轨道能显著降低轨道表面粗糙度,可降低到原来的30%(即10 dB)左右,打磨前后的轨道表面粗糙度谱(roughness level, RL)如图6(b)所示。



(a) 粗糙度测试仪



(b) 粗糙度谱

图6 轨道粗糙度控制

轨道打磨前后,钢轨和箱梁的振动响应(vibration amplitude,VA)如图7所示。为将振动响应与噪声级等值比较(即将打磨后的振动响应与打磨前的比值取10的对数乘以20),故振动响应单位均为(dB ref. 1 m/s²)。

试验表明:打磨轨道能有效降低轨道和箱梁的振动,可减少44%(即5 dB)左右。对轨道在整个频段和箱梁的主要发声100 Hz~500 Hz的低频段都有很好的抑制效果。

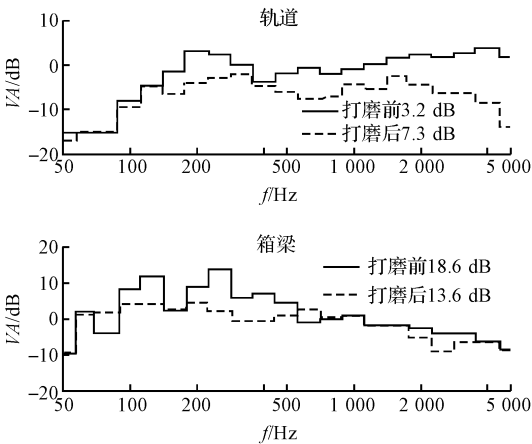


图7 轨道打磨前后,轨道、箱梁的振动响应

2.2 轨下胶垫刚度控制

胶垫测试样品共2种,分别为“硬胶垫”和“软胶垫”,本研究根据ISO 10846“声学及振动弹性元件振动-声传递特性实验室测量方法”测试胶垫的动刚度,胶垫置于上、下质量块之间。轨下胶垫动刚度测试如图8所示。其中,动刚度测试仪如图8(a)所示,测得的动刚度曲线如图8(b)所示。

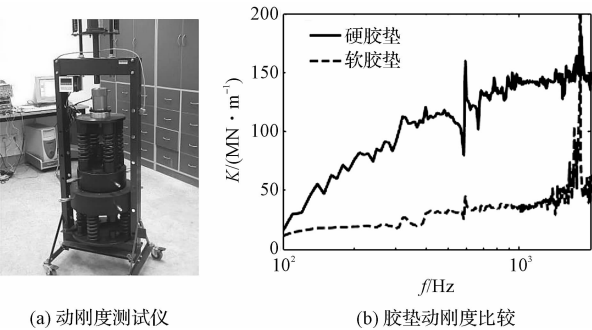


图8 轨下胶垫动刚度测试

胶垫更换前后,轨道和箱梁的振动响应如图9所示。试验表明:硬胶垫换为软胶垫,轨道振动增加6%(即0.5 dB),而箱梁测点处振动减少26%(即2.6 dB)。

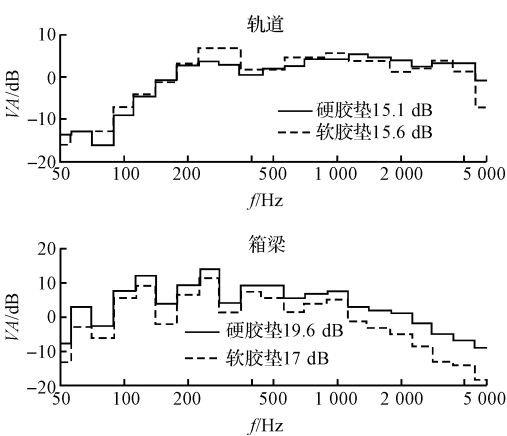


图9 胶垫更换前后,轨道、箱梁的振动响应

3 噪声测试结果

岸桥声压级测点示意如图10所示,其中,测点1位于岸桥海面中心,距离海面6 m;测点2位于岸桥侧面中心,距离侧面22 m处。

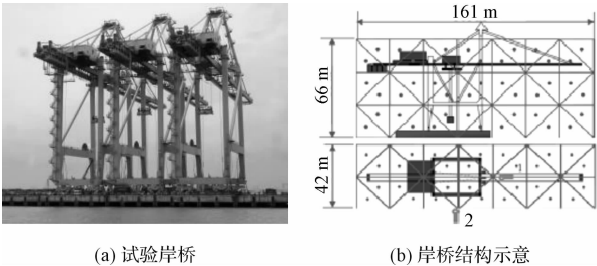


图10 岸桥声压级测试示意

本研究岸桥声压级测试时间为21点,背景噪声声压级为56 dBA,满足测试要求。由于小车全速运行一个周期分进程和回程两个阶段,每个运行阶段时间约为20 s。故将小车运行整个周期的声压级定义为平均噪声,每个运行阶段2 s最大噪声定义为峰值噪声。

两侧点处轨下胶垫更换及轨道打磨后岸桥的整体声压级如图11所示。

不同工况下岸桥声压级比较如表1所示。

由表1可得,轨道打磨和更换胶垫后,测点1的峰值噪声由75.7 dBA降低至70.8 dBA,降噪效果为4.9 dB;测点2的峰值噪声由74.7 dBA降低至70.3 dBA,降噪效果为4.4 dB。同时,采用上述两种减振降噪控制策略后岸桥起重机整体噪声降低44%(即5 dB)左右。

表1 不同工况下岸桥声压级比较

测试工况	峰值噪声/dBA		平均噪声/dBA	
	控制前	控制后	控制前	控制后
测点1	75.7	70.8	74.1	69.5
测点2	74.7	70.3	73.7	69.0

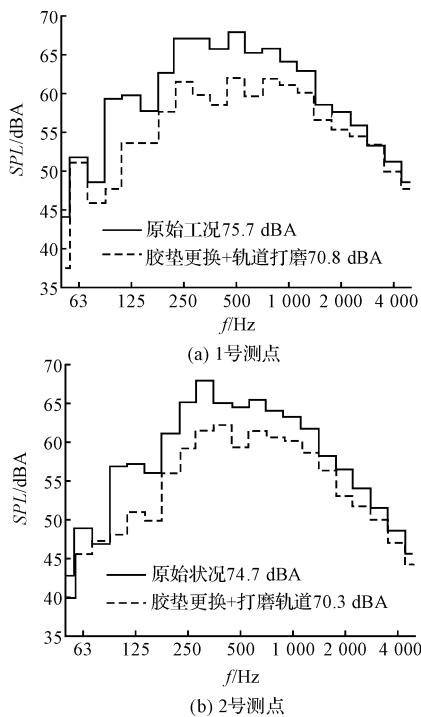


图 11 岸桥声压级比较(峰值噪声)

4 结束语

本研究针对控制轮轨箱梁噪声建立包括轮轨激励力、轮轨箱梁阻抗关系和轮轨箱梁声辐射估算的噪声预计模型,并基于该模型的噪声预估分析,确定两种噪声控制措施:①通过打磨轨道粗糙度可降低轮轨激励力,从而降低轨道箱梁噪声;②降低胶垫刚度从而优化轨道和箱梁受力情况,使得轮轨箱梁噪声辐射总和下降。并通过试验验证该噪声预计模型的正确性和有效性。

在试验岸桥上的振动噪声试验也表明:①轨道表面粗糙度降低 10 dB 以后,轨道振动降低 4.9 dB,箱梁

振动降低 5 dB;②岸桥前大梁胶垫动刚度降低至原来的 1/3,钢轨振动增加 0.5 dB,箱梁振动降低 2.6 dB。③采用上述两种减振降噪控制措施后集装箱岸桥整体噪声降低 5 dB 左右。

参考文献(References):

[1] 孙 杰,刘 斌,任志强,等. 岸边集装箱起重机司机室隔声控制策略的研究[J]. 起重运输机械,2011,(3):59-61.

[2] 冯 盟. 基于 SEA 分析原理的岸桥司机室振动与噪声控制研究[D]. 济南:山东大学机械工程学院,2012.

[3] M. H. A. JANSSENS, D. J. THOMPSON, C. J. C. JONES. The calculation of noise from railway bridges[J]. **Journal of Sound and Vibration**,1996;193(1):295-305.

[4] DINGS P. C. , DITTRICH M. G. Roughness on Dutch railway wheels and rails[J]. **Journal of Sound and Vibration**,1996,193(1):103-112.

[5] THOMPSON D. J. , JONES C. J. C. , WU T. X. , et al. The influence of the non-linear stiffness behavior of rail pads on the track component of rolling noise[J]. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F: Journal of Rail and Rapid Transit**,1999,213(4):233-241.

[6] VINCENT N, BOUVET P, THOMPSON D. J, et al. Theoretical optimization of track components to reduce rolling noise[J]. **Journal of Sound and Vibration**, 1996, 193(1):161-171.

[7] Thompson D. J. Railway noise and vibration[M]. Netherland: Elsevier Science,2008:536.

[8] 张振京. 岸桥轮轨箱梁系统噪声预计及控制[D]. 济南:山东大学机械工程学院,2014.

[9] 张德水. 轨道不平顺的测量与数据处理[D]. 上海:上海交通大学机械工程学院,2012.

[编辑:李 辉]

本文引用格式:

徐志超,张振京,孙 杰,等. 集装箱岸桥的轮轨箱梁噪声控制研究[J]. 机电工程,2016,33(3):271-275.

XV Zhi-chao, ZHANG Zhen-jing, SUN Jie, et al. Noise control of wheel, rail and box girder in a container crane[J]. **Journal of Mechanical & Electrical Engineering**, 2016,33(3):271-275.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>