中南剧场隔振措施分析

谢伟平[1]，常 亮[1]，杜 勇[2]

(1.武汉理工大学土木工程与建筑学院，湖北 武汉 430070；2.中国轻工业武汉设计工程有限责任公司，湖北 武汉 430060)

摘 要：中南剧场作为第八届中国艺术节演出场地之一，对剧场声环境有较高的要求。环评报告指出：轨道交通引起的剧场内的结构噪声不满足噪声评价曲线NR-25小于30 dB（A）的规定。使用线性回归分析方法，得到了拟建场地环境振动的振级衰减回归曲线，使用 Ansys 有限元软件对拟建场地的环境振动进行了三维有限元数值模拟，利用桥墩处的振动数据作为输入载荷，模拟结果的振动衰减规律与实测结果相同，证明模型是可靠的。根据工程实际情况，分别建立了三种减振隔振措施的有限元模型。数值计算结果表明，连续墙加减振材料的隔振效果较好。

关键词：轨道交通；振动；隔振

中图分类号：X593 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－4548(2007)11－1720－06

作者简介：谢伟平(1965－)，男，江西赣县人，教授，博士生导师，主要从事车－线－桥系统的环境振动评价与控制策略研究。E-mail: wpxie@sina.com。

Analysis on vibration isolation of Zhongnan Theater

XIE Wei-ping[1], CHANG Liang[1], DU Yong[2]

(1. Institute of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. China Light Industry Wuhan Design Engineering Co., Ltd., Wuhan 430060, China)

Abstract: As one of the arenas of the Eighth China Art Festival, Zhongnan Theater is of stringent stipulation in the respect of acoustic environment. It was shown in the environmental evaluation report that structural noise in the theater induced by rail transit exceeded 30 dB(A), which didn't satisfy the noise evaluation curve NR-25. The attenuation formula of environmental vibration in the field of Zhongnan Theater was derived by the linear regression method. Numerical simulation of environmental vibration around the projected field was carried out by Ansys three-dimensional FEM program, in which the exciting force was input from the vibration data measured at the foot of the pier. That the simulation results were consistent with the measured data indicated the reliability of the numerical model. According to the practice, three kinds of vibration isolation models were established. And it was indicated by the simulation results that the effect of combination of continual walls and vibration alleviation materials was satisfactory.

Key words: rail transit; vibration; vibration isolation

0 引 言

第八届中国艺术节于2007年在湖北省举办，作为主会场的武汉市制定了第八届中国艺术节场馆建设规划，中南剧院作为演出场地之一，对剧场声环境有较高的要求。

拟建中南剧院距京汉大道15 m，距轨道交通一号线约30 m，高架轻轨列车在运行过程中产生的振动通过桥梁传至地面后，再由土壤传递到建筑物基础，可以产生二次结构噪声。目前有资质的环评单位是根据拟建场地的环境振动预测待建建筑物因环境振动而产生的二次结构噪声[1]。

环评报告[1]指出：

（1）拟建剧场处轨道交通环境振动值在 60.1～65.4 dB，其引起的剧场内的结构噪声将超过30～33 dB(A)，不满足噪声评价曲线 NR-25 小于 30 dB(A)的规定。

（2）道路交通噪声振动对中南剧场基本没影响。

因此，需要采取有效的隔振措施，降低轻轨运行时所引起的中南剧场的环境振动，以达到降低剧场内的二次结构噪声的目的。

香港葵青剧院[2]等采用隔振弹簧系统来防止列车通过时对剧院的振动影响，其原理是利用设立在建筑物基础上的弹簧的弹性变形来承担建筑物的荷载及来自外部的振动。同时为避免因垂直方向柔度增大可能

收稿日期：2006－09－28

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

引起的摇摆振动将弹簧浸入黏度系数较大的黏性液体中，起阻尼作用，用来抵抗和吸收振动的能量，上部结构相对不受影响从而达到抵抗振动的目的。目前较常用的隔振装置还有用钢板与橡胶交互夹层相接的多层橡胶支承垫与各种形式的阻尼器配合起来使用的形式。以上两种隔振装置对隔振材料和隔振性能有较高的要求，而且维护费用也高，价格较贵。因此，在满足剧场使用要求的前提下，应当采用一种经济合理的隔振措施，这样可以降低工程造价。

连续墙、排桩、空沟等隔振措施不仅施工方便，更重要的是造价低，而且几乎不需要维护，隔振效果也可满足工程要求，因此，根据工程实际情况，对这三种隔振措施进行了计算比较，计算结果表明：采用连续墙加减振材料的隔振效果较好。

1　工程概况

中南剧场采用三层的形式，即地上二层及地下一层，其中地上一层设置 810 座的中型剧场，地上二层设置 300 座的小型剧场，地下一层安排设备用房，功能用房和部分地下停车位。总建筑面积 7600 m^2，中型剧场以话剧为主，兼顾歌舞及戏剧；小型剧场以儿童剧、木偶剧为主，兼顾小型音乐会和电视演播厅等功能。

对于中南剧场的隔振减振设计，环评报告[1]建议采用双排错列粉喷桩，但地下室外墙距建筑红线仅 1.5 m，无法施工，因此，该方案不可行。考虑到以上因素，同时为了比较粉喷桩的隔振效果，最后确定了三种减振隔振措施：①隔振墙加减振材料；②隔振墙加空沟；③双排错列粉喷桩。为了评价隔振措施的隔振效果，首先使用有限元分析软件对实测现场进行模拟，考虑到实测现场影响因素较多，需要根据实测结果对有限元模型进行修正，当计算的测点振动级的衰减规律与实测结果比较吻合后，作为评价隔振效果的初始状态。再分别对采取隔振措施后的状态进行计算，并与初始状态进行比较，选择其中较好的隔振措施，作为中南剧场隔振设计的依据。

2　环境振动现状

拟建中南剧场处于京汉大道和城市规划道路的交叉口，见图 1。

剧场在投入使用之后，除受到轨道交通振动噪声的影响之外，不可避免地还要受到道路交通振动噪声的影响。作为评价隔振效果的依据，本次测量得到的中南剧场周围环境振动的振动级并未去除本底振动的影响。各测点振动级测量结果，见表 1，各测点布置情况见图 2。

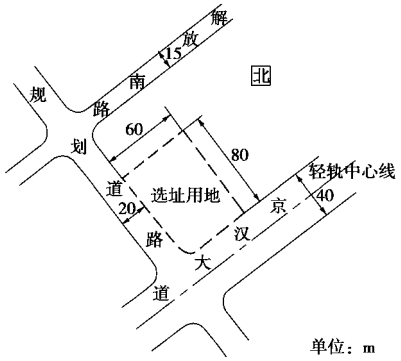


图 1 拟建中南剧场区域位置

Fig. 1 Location of projected Zhongnan Theater

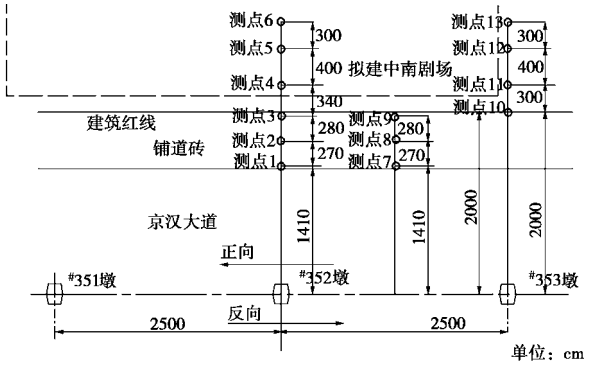


图 2 测点布置

Fig. 2 Layout of measuring points

表 1 测点测量结果

Table 1 Measured results

测点	R^*/m	车速 /(km·h^{-1})	正向行车/dB	反向行车/dB	正反向会车/dB
1	14.1		68.437	68.699	72.564
2	16.8		74.975	72.964	75.867
3	19.6		66.671	65.614	68.714
4	23.0		69.419	69.647	72.919
5	27.0		63.634	62.523	66.223
6	30.0		61.406	61.588	65.306
7	14.1	50	66.229	65.975	69.865
8	16.8		66.080	67.454	69.311
9	19.6		65.950	65.651	68.745
10	20.0		65.106	62.428	66.865
11	23.0		65.569	63.154	67.814
12	27.0		68.731	65.443	71.722
13	30.0		61.376	60.550	64.781

*R 为测点距离轨道中心线距离。

从以上的数据统计结果可知：

（1）列车正向运行所引起的场地测点的振动大于

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

列车反向运行时所引起的场地测点的振动，振动级大致相差 0.5～3 dB。

（2）正反向列车会车时在场地测点产生的振动大于列车正向运行时在测点处产生的振动，振动级大致相差 3 dB 左右。

（3）从减小振动的角度考虑，建议采用线路控制的方法，避免在该地段出现正反向列车会车的现象。

通过《环境影响评价大纲》[3]中的振动预测公式，只能得到某点的预测范围，不能很精确地得到其振动级。为了更好地预测轻轨所引起的振动，可以建立合适的数学模型来计算其振动预测公式，作为评价后期采用隔振措施后，隔振效果的好坏。

由于列车正向运行时所引起的振动大于列车反向运行时所引起的振动，正反向列车交汇的现象可通过采用线路控制的措施加以避免，所以采用列车正向运行时，场地测点的测量数据进行回归拟合。在整个测量的过程中，列车速度基本相当，且中南剧场周围地质情况大致相同，因此振动波在土中的传播特性基本相同。所以在忽略其它次要现场因素的影响下，根据振动实测结果，振级 VL_z 与距轨道中心线的距离 R 的对数值 lg$R$ 的关系接近于线性关系。参照日本铁路技术研究所用于预测铁路高架区间振级的经验公式[4]，对实测数据利用线性回归方法[5−7]进行拟合，得到基础开挖前轻轨列车正向运行时，所引起的中南剧场周边环境振动的预测公式：

$$VL_z = 70.887 - (5.514/\lg 2)^{*} \lg(R/10), \quad (1)$$

式中，R 为测点距轨道中心线的距离（m）。

此公式相关系数 R=−0.85，回归模型较好。拟合曲线如图 3 所示。

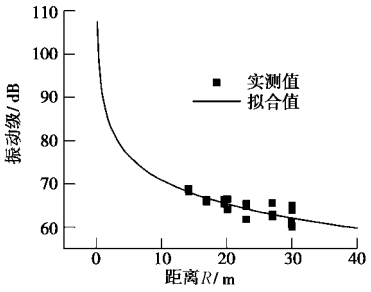


图 3 振动级衰减回归曲线

Fig. 3 Regression curve of vibration level

3 环境振动现状数值模拟

使用 Ansys9.0 软件建立采取隔振措施前中南剧场周围环境土体的有限元模型，并与实测结果进行对比。

3.1 土体计算参数

有限元计算时采用的土体参数见表 2。

3.2 人工边界的引进与模型简化

实际高架轨道交通引起的地面振动可认为是一个半无限体，在用有限元进行近场波动分析时，只能将感兴趣的部分人为地切割出来进行离散化，而不可能将计算范围取得无限大，切割面即称为人工边界。人工边界实际上在原连续介质中并不存在，它与周围土体存在着相互作用力，因此，设置的人工边界要反映波动能量在原连续介质中的辐射现象，必须保证波动从切割区内部穿过人工边界时不会产生反射效应。所以对人工边界的处理会直接关系到模型的计算精度，如果对其只是进行简单的固定或干脆作为自由边界，振动波向无限远处传播的性质就得不到满足。有限区域的边界必然引起波的反射，波动能量被限制在模型内部，而不能向外辐射。为了解决这个问题，本模型利用黏性边界单元。黏性边界就是在边界设置阻尼器，最先是由 Lysmer[8]提出的，其原理是利用边界上阻尼器产生的与运动速度成正比的黏性阻尼力来吸收逸散波的能量。Deeks[9]采用与黏性边界推导类似的方法，在假定二维散射波以柱面形式向外发散的前提下提出了黏－弹性人工边界。其基本方法是在截断的边界上施加黏性阻尼器和线性弹簧，边界不仅能更好地模拟半无限地基的弹性恢复性能，同时也模拟地基的辐射阻尼。黏性阻尼器和线性弹簧的力学参数分别为：

正应力方向：

表 2 土体参数

Table 2 Soil parameters

层号	土层	层厚/m	层底深度/m	密度/(kg・m^{-3})	压缩模量/MPa
1	杂填土	2	2	1890	
2	灰褐色粉质黏土	3	5	1920	5.2
3	灰色粉质黏土	4	9	1880	4.7
4	粉砂，粉土夹粉质黏土	3	12	1700	5.8
5	青灰色粉砂	11	23	1800	16.0
6	灰色粉细纱	10	33	1850	20.0
7	青灰色细砂	10	43		
8	灰色含砾细砂				

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$\left.\begin{aligned} C_{\mathrm{b}} &= \rho V_{\mathrm{p}}, \\ K_{\mathrm{b}} &= \frac{2G}{r}, \\ m &= 2\rho\gamma; \end{aligned}\right\} \tag{2}$$

剪应力方向：

$$\left.\begin{aligned} C_{\mathrm{b}} &= \rho V_{\mathrm{s}}, \\ K_{\mathrm{b}} &= \frac{G}{2r}, \end{aligned}\right\} \tag{3}$$

式中　r 是坐标系中人工边界的坐标，C_{b} 和 K_{b} 分别是施加在人工边界上的黏性阻尼器和线性弹簧，V_{P} 是介质压缩波波速，V_{s} 是介质剪切波波速，G 是土的剪切模量，ρ是介质密度，m 是外加质量。其中黏性阻尼器和线性弹簧用弹簧阻尼单元来模拟，m 用质量单元来模拟。一般土在弹性范围内的典型阻尼值取为 0.05。

由于实际模型尺寸较大，以目前计算机现有的处理水平，使用 Ansys 有限元软件计算将会耗费大量资源，因此，需要对模型进行合理地简化。从表 2 可知：中南剧场周边的地质情况是：4 层及以下土体为砂质土，该类土对振动波能量的衰减较大。伍兹（Woods）、米勒（Miller）[10-12]，根据弹性半空间理论，得出了集中扰力作用下半空间内的波场特征：在弹性半空间内部，瑞利波是以垂直于半空间表面半径为 r 的柱面波的形式传播的，引起的地面位移振幅与水平距离呈 $r^{-1/2}$ 的比例衰减，与深度呈指数衰减关系。纵波和横波是以扰力作用点为球心的球面波形式传播的，引起的位移振幅与球面半径呈 r^{-1} 的关系衰减，但体波沿地基表面传播却是与球面半径呈 r^{-2} 的关系衰减，纵波和横波的振幅与水平距离呈 r^{-2} 的比例衰减，并且瑞利波能量占总能量的 67%，因此，以柱面波形式传播的瑞利波比以球面波形式传播的纵波和横波衰减要慢得多，所以远场隔振主要针对瑞利波。由于远场振动波基本以地面瑞利波传播为主，地下 2 m 深土层的振动加速度为地表的 20%～50%，4 m 深时则减少到 10%～30%[13]。基于以上原因，有限元模型只是建立到第四层土体，底部边界采用黏－弹性人工边界。

由于所关心的是振动能量在土中传播的衰减规律，因此，并未考虑第四层土体下桩与土的相互作用，长度方向上以桥墩为中心取 25 m，通过在截断边界处采用黏－弹性人工边界，来保证人工边界处不产生波的反射效应。这样简化也保证了模型中土体的扰动源是线性的，符合工程实际。

3.3　网格划分

根据上面的参数与简化进行建模，其中桥墩、承台、桩和土体采用 Solid45 实体单元，边界采用弹簧阻尼 Combin14 单元。

3.4　激励力的输入

将采集得到的桥墩测点处的加速度时程数据作为原始的激励输入，根据牛顿第二定律

$$F = ma \quad , \tag{4}$$

式中，m 为一跨梁的质量与一根桥敦的质量之和，a 为加速度时程数据。

桥墩振动情况的测量结果见表 3，测点布置见图 4 所示。

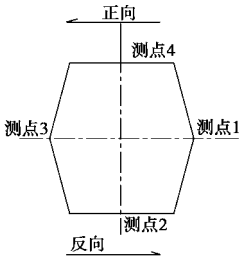


图 4 桥墩测点布置

Fig. 4 Layout of measuring points for the pier

表 3 桥墩测点测量结果

Table 3 Measured results of pier

地点	测点	车速 /(km • h^{-1})	正向行车/dB	反向行车/dB	正反向会车/dB
#353	1	50	94.151	91.600	94.158
	2		94.486	93.803	97.052
	3		93.166	91.978	94.419
	4		97.082	95.228	97.710
#352	1	50	88.602	93.020	92.629
	2		90.168	90.057	88.474
	3		88.091	90.930	89.151
	4		91.258	93.651	92.486
#351	1	50	90.279	88.800	91.013
	2		99.140	94.365	98.253
	3		91.751	88.172	98.812
	4		94.211	92.661	93.957

从以上的数据统计结果知道：桥墩测点振动级在 88～99.5 dB，由于#352 桥墩距中南剧场中心的距离较近（见图 2 所示），对中南剧场的环境振动影响较大，因此在有限元模型中建立的是#352 桥墩的模型，并且将现场实测中振动能量最强的一组加速度数据作为激励输入。

3.5　实侧值与模拟值的对比

实测值与模拟值的对比见图 5。

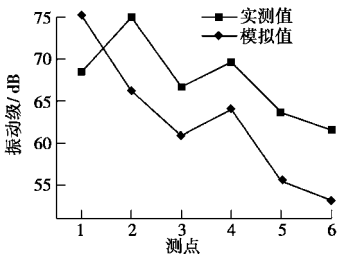


图 5 实测结果与模拟值的对比

Fig. 5 Comparison between measurement and simulation

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

根据图 5 中模拟结果与实测结果的对比可知：数值模拟 6 个测点的振动级与实测结果振动级衰减曲线的总体规律是一致的，但数值上有一定的误差，考虑到实测现场的复杂性以及模型简化所引起的误差，认为所建的计算模型是可靠的，能够反映振动级随距离的衰减变化规律，同时也说明模型的简化是合理的。

4 隔振减振措施的数值模拟

轨道交通引起的环境振动属于低频振动。低频人工振源产生的瑞利波波长较大，有时高达 50 m，甚至上百米[14-15]，大部分瑞利波能量在半空间中传播深度范围约等于一个瑞利波波长[10-11]，要想获得较好的隔振效果隔振沟深必须很大，但实际施工时很难达到，同时拟建中南剧场地下室底板标高为−0.45 m，考虑到瑞利波影响深度小，影响范围大这一特点，并尽量减少从屏障底部和侧面绕射过去的振动波，屏障隔振措施的平面布置形式为 U 字形，屏障深度取为 5 m，具体布置形式见图 6。

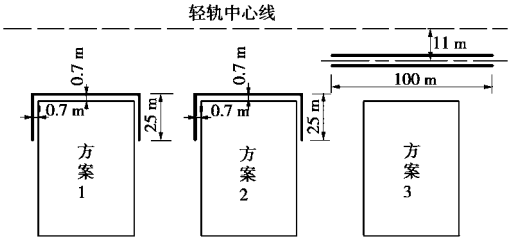


图 6 隔振措施平面布置示意图

Fig. 6 Arrangement of vibration isolation

方案 1：0.7 m 宽减振材料+0.3 m 宽混凝土连续墙+0.3 m 宽减振材料,（深度均为 5 m）隔振墙距地下室外墙 0.7 m。

方案 2：0.7 m 宽 2.5 m 深空沟+0.3 m 宽 5 m 深混凝土连续墙，隔振墙距地下室外墙 0.7 m。

方案 3：双排错列粉喷桩，桩半径为 0.25 m，桩间距为 1 m，桩排距为 2 m，桩长 20 m。双排粉喷桩的中心距轻轨中心线 11 m。

为了达到较好的减振与隔振效果，从中选择一种较好的隔振减振措施指导设计，分别对三种措施进行了三维有限元数值模拟。三种措施的数值模拟均以上述建立的有限元模型为初始状态,通过修改材料特性、实常数等，分别建立了三种隔振减振措施的有限元模型。

三种隔振减振措施的模拟结果与初始状态的模拟结果对比见图 7。

从图 7 的对比结果可知：采取隔振措施后，处于中南剧场建筑场地的测点 4、测点 5、测点 6 处的振动强度均有大幅度的降低。分别降低了 20.5，17.2，5.4 dB。第二种方案和第三种方案的减振效果均不如第一种效果明显，第一种方案较好，减振效果最明显。说明屏障深度取 5 m 时，能够满足该工程的隔振要求。因此该工程采用第一种隔振方案。

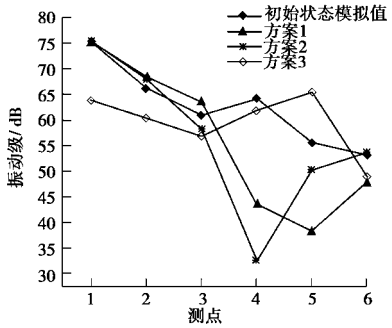


图 7 隔振效果比较

Fig. 7 Comparison of vibration isolation

5 结 论

（1）本文所建 Ansys 有限元模型与实测结果的振动级的衰减趋势是一致的，能够反映剧场周围环境振动现状。

（2）对初始状态的有限元模型进行修改，（材料属性和实常数）得到的三种隔振措施的有限元模型也是可靠的，计算结果也表明：采用连续墙加减振材料的隔振方案后，中南剧场的环境振动强度降低值达到预期要求（5 dB），对隔振设计能够起到指导作用。

（3）该工程所采用的隔振方案目前正处在施工阶段，振动强度降低的分贝数需要下一阶段的测试得出。

由于受到场地空间的限制，该工程能够采用的隔振减振措施有限，因此，数值模拟比较研究的方案较少。

参考文献：

[1] 铁道第四勘察设计院. 建设项目环境影响报告表——中南剧场易地新建项目[R]. 2006. (The Fourth Survey and Design Institute of China Railway. The report prepared for the influence of building on environment—new building project of Zhongnan Theater[R]. 2006. (in Chinese))

[2] 杨 光, 庞定慧. 隔振技术在建筑中的应用[J]. 华北水利水电学院学报, 2001, **22**(2): 38－41. (YANG Guang, PANG Ding-hui. Base isolation measure used in the field of building[J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 2001, **22**(2): 38－41. (in Chinese))

[3] 铁道第四勘察设计院环境评价所. 武汉市轨道交通一号线

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

一期工程环境影响评价大纲[R]. 武汉：铁道第四勘察设计院, 1999. (Environmental Quality Assessment Institute of the Fourth Survey and Design Institute of China Railway. The outline for the influence of the first phase of Wuhan rail transit on environment[R]. Wuhan: The Fourth Survey and Design Institute of China Railway, 1999. (in Chinese))

[4] 张　昕. 高架轨道交通引起环境振动的实测和理论分析研究[D]. 上海：同济大学, 2002. (ZHANG Xin. Practical and theoretical research on the environmental vibration caused by elevated railroad traffic[D]. Shanghai: Tongji University, 2002. (in Chinese))

[5] 王学仁, 温忠嶙. 应用回归分析[M]. 重庆：重庆大学出版社，1990. (WANG Xue-ren, WEN Zhong-lin. Applied regression analysis[M]. Chongqing: Chongqing University Press, 1990. (in Chinese))

[6] 张启锐. 实用回归分析[M]. 北京：地质出版社，1988. (ZHANG Qi-rui. Practical regression analysis[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1988. (in Chinese))

[7] 方开泰. 实用回归分析[M]. 北京：科学出版社，1988. (FANG Kai-tai. Practical regression analysis[M]. Beijing: Science Press, 1988. (in Chinese))

[8] LYSMER J, KULEMEYER R L. Finite dynamic model for infinite media[J]. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 1969, **95**(4): 859 – 877.

[9] DEEKS A J, RANDOLPH M F. Axisymmetric time-domain transmitting boundaries[J]. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 1994, **120**(1): 25 – 42.

[10] RICHART F E, HALL J R, WOODS R D. 土与基础的振动[M]. 徐攸在，徐国彬，曾国熙，等译. 北京：中国建筑工业出版社, 1976. (RICHART F E, HALL J R, WOODS R D. Vibration of soil and foundation[M]. XU You-zai, XU Guo-bin, ZENG Guo-xi, et al, trans. Beijing: China Architecture & Building Press, 1976. (in Chinese))

[11] 严人觉，王贻荪，韩清宇. 动力基础半空间理论概论[M]. 北京：中国建筑工业出版社, 1981. (YAN Ren-jue, WANG Yi-Sun, HAN Qing-yu. Half space theory introduction of dynamic foundation[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1981. (in Chinese))

[12] WOODS R D. Screening of surface waves in soils[J]. J Solids Mech and Found Div, ASCE, 1968, **94**(4): 951 – 979.

[13] 邱俊杰. 高架轨道交通引起环境振动的实测与评价方法研究[D]. 武汉：武汉理工大学，2005. (QIU Jun-jie. Practical and evaluation research on the environmental vibration caused by elevated railroad traffic[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2005. (in Chinese))

[14] PRAKASH Shamsher, PURI Vijar K. Foundation for machines: analysis and design[M]. New York: John Wiley and Sons Inc, 1988.

[15] 高广运. 非连续屏障隔振的理论分析和试验研究[D]. 长沙：湖南大学, 1992. (GAO Guang-yun. Theoretical analysis and experimental investigation of vibration isolation by discontinous barriers[D]. Changsha: Hunan University, 1992. (in Chinese))

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net