

文章编号:1673-2049(2012)01-0008-07

地铁环境下既有建筑结构的减隔振方法研究

屈文俊,夏 倩

(同济大学 建筑工程系,上海 200092)

摘要:针对地铁产生的振动造成周围环境的振动污染问题,从振源、传播途径和建筑结构 3 个方面研究了既有建筑结构的减隔振方法,探讨了各种方法的有效程度。结果表明:通过降低振源的激振强度、切断振动的传播途径或在传播途径上削弱振动、合理规划使建筑物避开振动影响区等措施可以降低振动的不利影响;对于不同的既有建筑结构,可根据实际情况并权衡经济效益与施工难易程度,有选择地采用减隔振措施。该研究为解决相关环境振动影响下的减隔振问题提供了参考。

关键词:地铁;振动;既有建筑物;隔振方法;轨道交通

中图分类号:TU352.1

文献标志码:A

Research on Mitigation Methods of Vibrations Caused by Metro Environment for Existing Building Structures

QU Wen-jun, XIA Qian

(Department of Building Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Based on the vibration pollution to the surrounding environment caused by the metro, authors studied the mitigation methods of vibration for existing building structures from three aspects, such as vibration source, transmission way and building structure, and discussed the effective degrees of different kinds of methods. The results show that lessening vibration sources from the vibration intensity, cutting off the transmission way of vibration or weakening vibration in the transmission way, reasonable planning to make buildings avoid vibration effect area can reduce the adverse effects of vibration. For the different existing building structures, vibration isolation measures should be chosen selectively through considering actual situation, balance economic benefits and degrees of difficulty of construction. This study can provide reference for related vibration isolation problem caused by environment vibration.

Key words: metro; vibration; existing building; vibration isolation method; rail transit

0 引言

自 1863 年伦敦建成并开通了世界上第 1 条地铁以来,由于其快速、准时、舒适、运输量大、覆盖面广、节能环保和占地面积小等优点,世界上许多主要城市相继建设了地铁。为缓解城市交通压力,建设地铁的城市也越来越多,中国北京、上海、天津、香港

等城市已建设或已规划建设。就上海市而言,根据上海市地下空间规划,到 2010 年上海市轨道交通数目将达到 13 条,5 年内,里程数有望突破 600 km。由于地铁建设规模的不断扩大,距离建筑物越来越近,有的就在建筑物正下方运行。地铁运行引起的振动虽不致造成建筑物结构破坏,但由于其具有长期性和反复性,可能造成装饰物开裂脱落、地基变

收稿日期:2011-11-16

基金项目:“十一五”国家科技支撑计划项目(2006BAJ03A07-04);国家自然科学基金项目(50178050)

作者简介:屈文俊(1958-),男,河南辉县人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:quwenjun@online.sh.cn。

形、下沉等,从而影响建筑物的安全性和使用寿命;较大振动会影响人们的生理及生活,据日本建设省对 600 户居民的调查^[1],在交通引起的环境振动影响中,对睡眠的影响是最大的,约占总投诉率的 45%,其次是对精神的损伤和房屋的破坏,分别占 22%和 20%;另外,轨道交通振动也会对精密仪器等对振动敏感设备的正常使用造成潜在影响^[2-3]。因此地铁振动对环境等的影响以及减振措施引起人们越来越广泛的关注,也引起各国研究人员的高度重视。分析研究地铁对既有建筑结构的减隔振方法

至关重要,对提高地铁邻近建筑物的安全性和适用性,具有重要的理论意义和实用价值。

1 轨道减振技术在地铁中的应用

1.1 既有的减振技术

轨道减振技术的原理是利用“质量-弹簧”体系,根据弹性元件插入的位置不同,得到不同的减振效果,可分为:扣件减振、轨枕减振和整体道床减振,见表 1。

有许多隔振技术和产品可用于轨道交通,已经

表 1 轨道减振主要措施

Tab. 1 Main Measures of Track Vibration Reduction				
减振措施	扣件减振		轨枕减振	
示意图				
代表性减振产品	科隆蛋(轨道减振器扣件)		橡胶浮置板	
减振量	减小振动强度 8~9 dB		与普通整体道床相比,可以对 35 Hz 以上的振动强度减小 13~32 dB	
减振级别	低档		中档	
造价/(万元·km ⁻¹)	384		902	
维护	维修方便		施工速度快,施工误差小,但可维修性较差	
实际应用工程	德国科隆地铁、美国华盛顿地铁、法国巴黎地铁、中国上海地铁(1,2 号线)、广州地铁(1 号线)、澳大利亚(悉尼港口桥)地铁等		美国亚特兰大地铁、新加坡地铁、中国广州地铁(1,2 号线)、深圳地铁(1 号线)、上海地铁(9 号线)、香港地铁等	

注:造价数据源自文献[4]。

成熟应用的隔振技术有:科隆蛋、弹性套靴、橡胶浮置板和钢弹簧浮置板等。钢弹簧浮置板道床隔振技术的隔振效果是最好的。

科隆蛋(轨道减振器扣件)能够较充分地利用橡胶的剪切变形,弹性好,较一般扣件的振动减少 4~5 dB,减振效果良好,但应严格控制橡胶配方及质量,延长使用年限。

橡胶浮置板的隔振效果虽然明显低于钢弹簧浮置板隔振效果,但优于科隆蛋和弹性套靴,可以满足 10~15 dB 的中档减振要求。可是橡胶作为隔振元件存在如下缺点:各向刚度相互制约,横向刚度低,不能满足道床的横向稳定性要求,因此除竖向支撑的橡胶支撑块外,还需横向支撑的橡胶支撑块,且结

构复杂;橡胶支撑块隐藏于浮置板下面,很难调平、检修和更换,尤其是无法从浮置道床侧面或顶面检修;此外,橡胶对材料和工艺要求高,易老化,寿命有限,更换橡胶支撑块对列车运营和市民的出行影响较大。对于更高的减振要求,橡胶浮置板在技术上难以实现。

中国的广州地铁 1 号线在有特殊减振降噪要求的某地段铺设了橡胶浮置板,取得了一定的隔振效果,但该地段隧道内的噪声有所加大,另外,今后橡胶垫的更换将是难题。

钢弹簧浮置板道床是将轨道车辆运行的道床用高弹性隔振器支撑起来,使道床与隧道仰拱和隧道壁之间留有一定间隙,两者之间仅通过隔振器相接,

使隔振器上部结构所受的车辆动扰力通过隔振器传递到结构底部。在此过程中由隔振器进行调谐、滤波、吸收能量,当隔振器上部的结构质量足够大时,可以达到隔振减振的目的。

轨道减振的原理如图 1 所示^[5],其中, ζ 为阻尼比,一个“质量-弹簧”系统,即“上部结构-隔振器元件”系统,只有当频率比大于 $\sqrt{2}$ 时,才有隔振效果。当减振轨道的自振频率很低,便可以获得很宽的隔振频段。

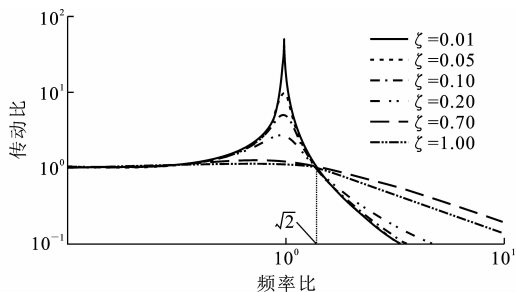


图 1 轨道减振原理

Fig. 1 Theory of Vibration Reduction of Track

钢弹簧浮置板的主要技术特点有:系统固有频率低(4~8 Hz),隔振效果好,振动强度减小 25~40 dB^[6];弹簧隔振器寿命长,设计寿命 50 年;同时具有三维弹性,水平方向位移小,无需附加限位装置;施工简单,可现场浇注;检查或更换弹簧十分方便,不用拆卸钢轨,不影响地铁运行;基础沉降造成的高度变化可以方便快速地进行调整。基于以上这些特点,钢弹簧浮置板技术在世界范围内得到了广泛应用。

大量研究表明,目前浮置板道床结构减振降噪效果最为显著,是轨道交通振动控制领域的核心技术,是敏感地段减振的首选方案,可以广泛应用于地铁、高架、桥梁等不同类型轨道结构之中。

中国北京、上海、广州、深圳、南京等城市已有十几条地铁线路上的几十处敏感地段采用了钢弹簧浮置板技术,如上海地铁 6 号线高架穿越高档住宅区降噪、广州地铁 3 号线珠江电影制片厂下隔振、广州地铁 4 号线华帝古庙下隔振、深圳地铁 1 号线市民中心下隔振、南京地铁 1 号线鼓楼医院下隔振等,均很好地解决了振动与噪声问题,达到预期效果,取得了良好的社会效益和经济效益。

1.2 目前存在的问题与今后研究发展方向

钢弹簧浮置板技术在国外应用已经有了很长时间,在中国也已经有了 8 年的实际应用经验,正在形成一套完整的设计、施工、运营维护的理论和经验。

由于钢弹簧浮置板技术目前存在造价较高的问题,并不是地铁所有路段都采用了该技术,同时对于对振动要求极为严格的精密仪器,也可能有钢弹簧浮置板技术解决不了的隔振问题,导致对振动敏感区段的既有建筑结构的环境问题仍未解决,针对本文中研究的既有建筑结构的隔振问题,只能另辟其他途径和隔振减振方法。

2 隔振技术在传播路径上的应用

2.1 屏障隔振及弹性地基板隔振方法

振动污染的实质是振动波沿地表的传播,因此可以通过设置屏障对振动波进行拦截,从而达到治理振动污染的目的,这就是屏障隔振的基本原理。屏障隔振具有造价低、不易损坏、耐久性好、施工简单和可以作为结构一部分等优点。

屏障隔振是通过设置屏障来减少地面振动对基础和上部结构的危害,着重探讨自由场的运动响应和在土体中设置屏障隔振,其设计方法是在振源和被保护结构之间设置一个或多个垂直于地面的屏障隔离层,利用屏障的散射效应和波导效应消耗波能和吸收波能,当振动波在传播过程中遇到这种屏障时,波就会发生反射、折射或衍射,或在两层屏障之间多次反射和折射形成波导效应,在屏障后形成振动降低的区域,达到减振的目的。它既可用于主动隔振又可用于被动隔振。目前在工程中广泛应用的屏障有空沟、填充沟(如用膨胀土泥浆、锯屑、砂子和粉煤灰等作为填充物)、钢筋混凝土墙、连续柔性墙(气胀垫)^[7]、弹性板、圆柱形孔列、桩排和板桩等。高广运^[8]根据屏障隔振的形式将屏障分为 2 类:①连续屏障(空沟、填充沟、混凝土板梁等,见图 2);②非连续屏障(孔列、桩排、板桩以及短墩状混凝土板凳,见图 3)

连续屏障主要针对高频人工振源,而低频人工振源会出现瑞利波波长较长的情形,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^[9-10]。大部分瑞利波能量在半空间中传播深度约等于一个瑞利波波长^[11-12],要想获得较好的隔振效果,隔振沟必须很大,但实际施工时很难做到,而且如果地基本身是软基或地下水位较高,更不适合做连续屏障。

连续屏障在选取材料、形状和位置时应慎重,以避免出现振幅放大现象,特别是空沟和柔性屏障,因为波的迭加使振幅放大尤为明显,在这方面非连续

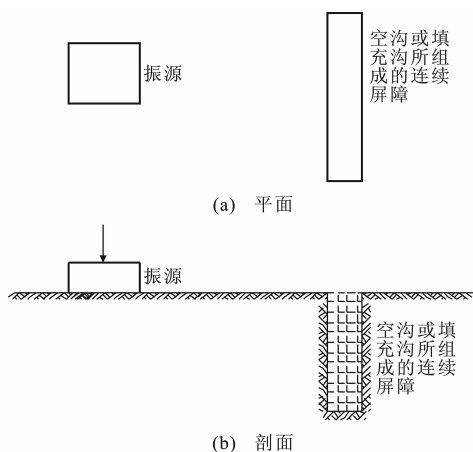


图 2 连续屏障隔振系统

Fig. 2 Continuous Barrier Vibration Isolation Systems

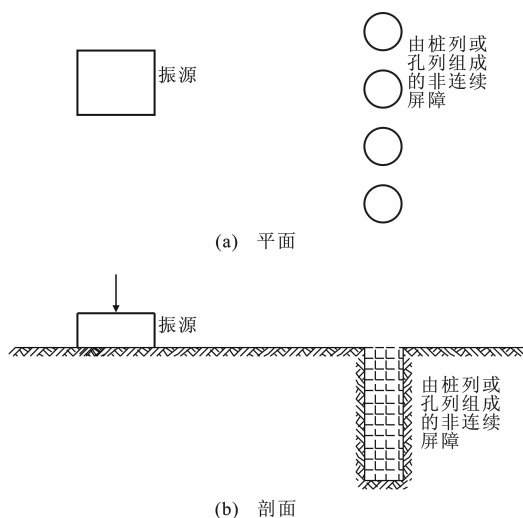


图 3 非连续屏障隔振系统

Fig. 3 Non-continuous Barrier Vibration Isolation Systems

屏障比连续屏障的放大倍数小。在非连续屏障的试验研究、理论分析和数值计算等方面,各国学者做了大量工作,并取得了一定的研究成果。研究的一致结论为:列车移动轴荷载引起的竖向地面振动比横向振动大,隔振能对竖向地面振动起到较好的减振效果;对于非连续屏障的单排桩隔振,得出了单排桩桩深、桩径和材料的变化对隔振效果的影响较大,桩身截面形式对隔振效果影响不大的结论。

针对轨道交通引起的振动问题,主要为低频振动,非连续屏障对低频振动的隔振效果较好,地面屏障隔振设计的 3 个准则分别为:①屏障的透射效应——隔振效率;②屏障的衍射效应——隔振范围;③屏障的吻合效应——隔振效果。

(1) 屏障的透射效应——隔振效率

排桩桩距 S_p 以及屏障的厚度(或当量厚度) B 应满足下式

$$\left. \begin{aligned} S_p &\leq 2d \\ B &\geq 0.125\lambda_R \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: λ_R 为地面波长; d 为木桩直径。

屏障具有有效的隔振效率,式(1)是依据波的透射理论及多项室内、现场模型及工程原则实测研究的结果,其厚度不宜大于 $0.35\lambda_R$ 。根据已有工程实测,一般能隔离 $70\% \sim 75\%$ 的地面振动。

(2) 屏障的衍射效应——隔振范围

① 屏障的深度 H

近场(主动隔振)

$$H > (0.8 \sim 1.0)\lambda_R \quad r \leq 2.0\lambda_R$$

远场(被动隔振)

$$H \geq (0.7 \sim 0.9)\lambda_R \quad r > 2.0\lambda_R$$

式中: r 为振源与屏障间的距离。

② 屏障的宽度 W

近场(主动隔振)

$$W > (2.5 \sim 3.125)\lambda_R \quad r \leq 2.0\lambda_R$$

远场(被动隔振)

$$W \geq (6.0 \sim 7.5)\lambda_R \quad r > 2.0\lambda_R$$

(3) 屏障的吻合效应——隔振效果

土体内具有一定刚度的屏障,有可能被弹性波激发而产生强烈振动,此时,屏障不仅不隔振,反而形成另一波源而产生振害,文献[13]中依据声学原理称之为屏障的吻合效应。吻合效应常造成屏障工程失效甚至反效。

考虑吻合效应控制屏障的弯曲频率,其临界吻合频率 f_{cr} 为^[14]

$$f_{cr} = 0.551 \frac{V_p^2}{C_p B}$$

式中: V_p 为土中纵波波速; C_p 为屏障的纵波波速。

近年来出现的另一种形式的屏障隔振方法是使用埋置在振源或被保护结构下的弹性板进行隔振,如图 4 所示。

这种隔振思想来自于表面激振的层状地基波的传播存在截止频率,当激振频率低于截止频率时,地基中不存在波的传播现象。利用这个效应,一些学者建议用一个刚性层来形成有限尺寸的人工基岩,并将这个人工基岩称为波阻板,根据国外学者的研究^[15],使用弹性地板屏障隔振更有利于屏蔽低频振动,而轨道交通产生的振动频率多在 $2 \sim 80$ Hz 之间,因而通过在轨道下方埋置刚性弹性地板对列车产生的环境振动在理论上具有较好的隔振减振效果。鉴于移动轨道以及重新布轨的费用较为昂贵,在具体施工工艺上国外比较成熟的是向地基土高压

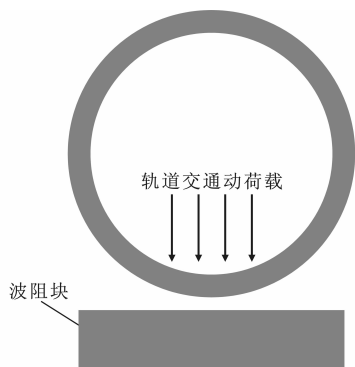


图 4 波阻块减振示意

Fig. 4 Vibration Reduction Schematic of Wave Impedance Block

喷射注浆,通过加固地基的方法在地基中形成人工硬壳层,增加地基刚度,从而形成理论计算中的刚性弹性地基板,故而也可将弹性地基板屏障隔振称为地基处理隔振方法^[16]。在中国,最新的《隔振设计规范》(GB 50463—2008)也已收录了弹性板屏障隔振技术。

2.2 目前存在的问题与今后研究发展方向

目前,铁路减振主要采用主动减振方式,但对于某些振动环境标准要求比较高的敏感点或本文中研究的既有建筑结构,在采取减振措施仍不能达到要求的情况下或无法采取主动减振措施时,则需要考虑被动减振技术,采用屏障隔振的研究则日益受到重视。

传统的屏障隔振方法如空沟、连续墙等对高频振动具有良好的隔振效果,而对衰减较慢的低频振动则需要足够的深度,施工往往难以实现;波阻板可以有效减少地表荷载产生的低频振动,对于高架轨道、高速铁路等是比较理想的隔振措施,但是否能减少地铁引发的低频振动却少有研究,因此,研究屏障隔振和波阻板应用于地铁引发低频振动的隔振具有非常现实的意义。对于本文中研究的既有建筑结构隔振问题,在传播途径中的隔振是行之有效的措施。

3 隔振技术在建筑结构上的应用

3.1 浮置地板隔振

在房间结构地面上再做一层可浮置的混凝土板,用隔振元件予以支撑浮置,构成浮置地板。浮置混凝土板的厚度一般在 130~200 mm 之间,与房间结构地面的间隙一般为 30~50 mm,隔振元件一般采用钢弹簧隔振器或者橡胶垫,墙壁采用吸隔声处理。这种隔振方式具有良好的撞击声隔声性能,可以有效隔离来自地面的固体传声。主要应用于剧院

和音乐厅等对撞击声隔声要求较高、跨度较大的空间。该隔振方式施工简单,性价比较高。目前中国已有不少工程实例,如东方艺术中心、苏州科技文化中心和武汉大剧院等就采用了该技术,隔振元件采用的是可调平的钢弹簧隔振器。上海音乐厅则采用了浮置地板,直接将观众席楼板通过钢弹簧隔振器支撑于牛腿上。

浮置地板隔振技术对房屋的净空要求很高,对本文中研究的既有建筑结构,尤其是住宅结构,净空要求难以满足,所以该技术的适用范围是具有局限性的。

3.2 房中房隔振

当使用空间要求具有更高的隔声性能时,可在使用空间中再建一个具有独立墙壁、地板和顶板的内层房间,将内层房间支撑在隔振元件上,隔振元件一般为可预紧、可调平的钢弹簧隔振器,四周墙壁及顶棚与外部墙壁和顶板之间没有任何刚性连接或接触,留有一层空气层,其厚度以人可通过为宜。

房中房隔振技术可以有效地隔离来自各个方向的振动和固体传声,从而保证局部空间的声学性能。国家大剧院中 5 个高档录音室就采用了房中房隔振降噪技术。但是房中房隔振技术同样对房屋的空间尺度有很高要求,对本文中研究的既有建筑结构,尤其是住宅结构,该技术不再适用。

3.3 建筑物整体隔振

主要用于对固体传声要求非常严格、附近有明显振源的建筑。隔振方式是将整个建筑物支撑在隔振元件上面。隔振元件一般采用可调平、可预紧、寿命较长的钢弹簧隔振器。建筑物下方要设有安装和检修空间。建筑物整体隔振技术可以有效地隔离来自各个方向的振动和固体传声,可以保证建筑物内所有空间的声学性能。正在设计中的中国某交响音乐厅将采用建筑物整体隔振技术。

建筑物整体隔振技术对地铁引起的振动具有很好的隔振效果,但主要是对拟建建筑而言,对既有建筑结构,该方法的实施需要巨大的经济支持,使该技术又受到很大的限制。

3.4 室内隔振

3.4.1 既有建筑物隔振的特点和难点

所谓结构隔振,就是通过降低隔振器与结构构成的隔振系统的频率,从而降低结构对高于(包括等于)这一频率的输入振动的反应。隔振系统振动频率和系统质量的关系为

$$f_n=\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{K_z}{M}} \tag{2}$$

式中: f_n , M , K_z 分别为隔振系统的频率、质量和动刚度。

住宅楼室内地面必须保持日常稳定,即要求隔振系统应具备相当的刚度。由式(2)可见,频率一定时,质量越大,则系统的刚度越大。在结构水平面积一定时,系统竖向高度由其质量决定。在对既有建筑进行隔振设计时,结构和基础已成为一个不可更动的整体。为保持结构的整体性以及不增加基础的负重,室内可供给隔振处理的空间高度就非常有限。另外,为保持室内地面的平衡和稳定,一般需要构建由多个隔振器组成的隔振系统。而隔振系统的质量一般与隔振器的数目成正比,这就进一步加剧了结构空间对隔振系统质量配置的限制。由于行人走动及地铁引起的水平振动,住宅内隔振有别于对其他场所的隔振,还在于对地面结构的横向稳定性和竖向稳定性要求高。

3.4.2 既有建筑物的室内隔振方案

基于隔振的动力学原理,考虑结构的平衡和稳定,结合工程实际,提出既有结构房屋地面隔振方案,见图 5,6。由图 5,6 可知,每个房间自成一个独立的隔振系统,由一块地板和一组隔离器共同组成。

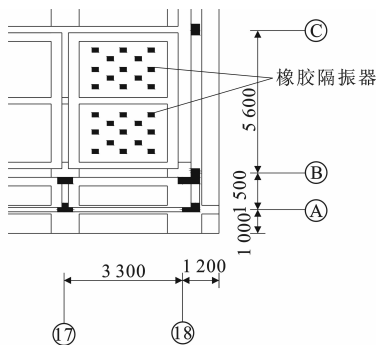


图 5 隔振系统隔振器平面布置(单位:mm)
Fig. 5 Plane Layouts of Vibration Isolators in Vibration Isolation System (Unit:mm)

文献[17]中采用既有建筑物的室内隔振方案后,中心频率 2.5 Hz,1/3 倍频程的最大加速度级,比《住宅建筑室内振动限值及其测量方法标准》(GB/T 50355—2005)中相应限值降低 86 dB,隔振效率达 91%。可见,该室内隔振技术对既有建筑结构的隔振效果是明显的,尤其对住宅结构,该技术能够满足其对净空的高要求,所以是值得推荐的技术。但该技术的研究目前还不够成熟,对于既有建筑,尤其是净空要求严格的住宅建筑,相关理论研究文献

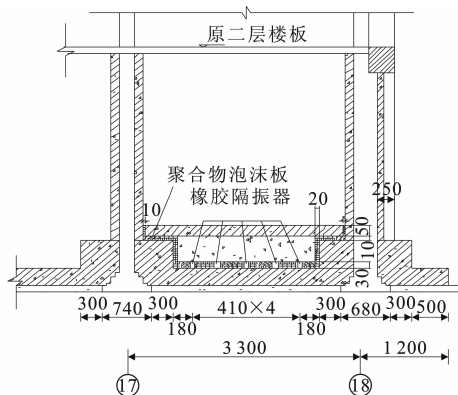


图 6 隔振系统剖面(单位:mm)
Fig. 6 Cross-section of Vibration Isolation System (Unit:mm)

很少,有待研究人员的进一步研究。

4 结 语

(1)针对环境引起的振动问题,隔振措施很多,但多数都是针对拟建建筑的隔振措施,而针对既有建筑隔振措施的研究甚少,本文中讨论了几种隔振措施,针对不同的既有建筑结构的隔振问题,可以依据具体既有建筑结构的实际情况,有选择地采用隔振措施,但是要权衡经济与施工难易程度等多方面因素。

(2)主动隔振措施中的钢弹簧浮置板技术隔振效果明显,但是造价过高,限制了该技术的推广。

(3)屏障隔振技术与室内隔振技术都属于被动隔振,效果略低于主动隔振,但是 2 种隔振技术可以结合起来,共同对环境问题引起的既有建筑的振动起到隔振作用。

(4)地铁运行区既有建筑结构室内隔振尚未见先例,还有待进行深入研究。结构隔振设计需以充分、可靠的振动测试数据为基础。但上海地区目前可参阅的有关资料十分缺乏,建议有关部门加强支持振动测试、分析和评价以及隔振技术研究等基础性工作。

参考文献:

References:

[1] Japanese Institute of Noise Control. Regional Vibrations of Environments[M]. Tokyo: Gihodo Shuppan Co., Ltd, 2001.
[2] 马 蒙,刘维宁,丁德云,等. 地铁列车振动对精密仪器影响的预测研究[J]. 振动与冲击, 2011, 30(3): 185-190.
MA Meng, LIU Wei-ning, DING De-yun, et al. Pre-

- diction of Influence of Metro Trains Induced Vibrations on Sensitive Instruments[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(3): 185-190.
- [3] 向俊, 赫丹. 高速列车与博格板式轨道系统竖向振动分析模型[J]. 交通运输工程学报, 2007, 7(3): 1-5.
- XIANG Jun, HE Dan. Analysis Model of Vertical Vibration of High-speed Train and Bögle Slab Track System[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2007, 7(3): 1-5.
- [4] CHANG D S, ZHAO Z P. Low-vibration Track Forms Evolve on Chinese Metros[J]. Metro Report, 2011(3): 41-44.
- [5] CHOPRA A K. Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering[M]. 3rd ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2006.
- [6] 尹志刚. 地铁引起建筑物振动及辐射噪声研究[D]. 上海: 同济大学, 2008.
- YIN Zhi-gang. Environmental Vibration and Noise Induced by Railways[D]. Shanghai: Tongji University, 2008.
- [7] MASSARCH K R. Man-made Vibrations and Solutions[C]//PRAKASH S. Proceedings of the 3rd International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering. St. Louis: Missouri Southern College Press, 1993: 1393-1405.
- [8] 高广运. 非连续屏障地面隔振理论与应用[D]. 杭州: 浙江大学, 1998.
- GAO Guang-yun. The Ground Vibration Isolation Theory and Application of the Continuous Barrier [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 1998.
- [9] PRAKASH S, PURI V K. Foundation for Machines: Analysis and Design[M]. New York: John Wiley & Sons, 1988.
- [10] 高广运. 非连续屏障隔振的理论分析和实验研究[D]. 长沙: 湖南大学, 1992.
- GAO Guang-yun. The Continuous Barrier Isolation Theoretical Analysis and Experimental Research[D]. Changsha: Hunan University, 1992.
- [11] 小理查特 F E, 伍兹 R D, 小霍尔 J R. 土与基础的振动[M]. 徐攸在, 徐国彬, 曾国熙, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1976.
- RICHART F E, WOODS R D, HALL J R. Vibrations of Soils and Foundations[M]. Translated by XU You-zai, XU Guo-bin, ZENG Guo-xi. Beijing: China Architecture & Building Press, 1976.
- [12] 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. The Theory Introduction of the Power Foundation in Half Space[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1981.
- [13] 徐建. 隔振设计规范理解与应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- XU Jian. The Understanding and Application of Vibration Isolation Design Specification[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009.
- [14] 机械工程手册、电机工程手册编辑委员会. 机械工程手册——机器基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 1979.
- Mechanical Engineering Manuals, Electrical Engineering Manual Editing Committee. Mechanical Engineering Manuals: Machine Foundation[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1979.
- [15] PELOW A T, JONES C J C, PETYT M. Vibration Transmission in a Layered Ground with a Wave Impedance Block[C]// SHIPP B O. Ground Dynamics and Man-made Processes: Prediction, Design and Management. London: the Institute of Civil Engineering, 1999: 57-67.
- [16] MADSHUS C, KAYNIA A M. High-speed Trains on Soft Ground: Track-embankment-soil Response and Vibration Generation[C]// KRYLOV V V. Noise and Vibration from High-speed Trains. London: Thomas Telford Limited, 2001: 315-346.
- [17] 周巍, 吴永红, 屈文俊, 等. 城市轨道交通环境中既有建筑室内振动隔振方法研究[J]. 工业建筑, 2008, 38(增1): 307-311, 446.
- ZHOU Wei, WU Yong-hong, QU Wen-jun, et al. The Research of Indoor Vibration Isolation of Existing Building in the Environment of Urban Rail Transit System[J]. Industrial Construction, 2008, 38(S1): 307-311, 446.