

文章编号:1006—2106(2002)04—0012—04

浮置板轨道设计

颜华·姚力

(铁道第二勘察设计院;成都 610031)

提 要:随着城市轨道交通在国内的快速发展,运营所产生的振动及噪声污染问题将越来越突出,本文简述了地铁减振降噪的必要性,以及世界各国所采用的减振轨道类型,并着重介绍了浮置板减振轨道的设计和在广州地铁的应用情况。

关键词:减振降噪;浮置板轨道;自振频率;设计

中图分类号:U212 **文献标识码:**A

1 概述

地下铁道是城市现代化必然的交通运输工具,具有运量大、速度快、安全可靠、时间准确的优点,已成为解决城市交通拥挤、噪声和大气污染的一项可行性措施。另一方面,地下铁道产生的振动对环境的影响又是世界各国普遍重视的一个问题。地铁列车运营时产生的振动和噪声,均来自于轮轨系统中各结构不同频率的振动。这些振动,一部分通过空气或周边结构物的反射,以噪声的形式扩散;另一部分,主要是低频振动,则通过轨道结构向轨下基础及周边结构物传播,对地面建筑物产生影响。如果建筑结构的自振频率与所传来振动的频率相近,则振动的危害尤其显著。一列地铁列车通过时在建筑物上引起振动的持续时间大约为10 s。在一条地铁线路上,高峰时在两个方向1 h内可以通过30对列车或更多一些。因而,振动作用持续的时间,可以达到地铁总工作时间的15~20%。运营列车通过时产生的振动和噪声,容易引起人疲劳和精力不集中,给工作和生活带来不利影响,因此,地铁运行中对环境产生的影响不能忽视。

根据国家环保标准《城市区域环境振动标准》(GB10070-88),凡振动超标地段均应采取可行的减振措施,把地铁列车运营产生的振动控制在国家环保标准以内。

2 国内外减振轨道结构型式

减振按对象可分为主动减振和被动减振,我们对地铁轨道采取减振措施则属于主动减振;按减振形式可分为缓冲减振和隔离减振两种形式。缓冲减振通常是仅对轨道上部建筑,如钢轨、扣件和轨枕等用弹性体来缓冲和衰减车辆运行传来的振动;隔离减振通常是把轨道的道床与结构基础用弹性体整体隔离车辆运行传来的振动。

2.1 缓冲减振结构形式

1) 埋入式轨道

埋入式轨道即把钢轨用弹性体置入混凝土轨道槽内,埋入深度至轨头下部,通过弹性体的弹性变形来获得减振降噪性能。其结构特点是将轮轨振动能量转化为热能并予以吸收,从而降低轮轨噪声。在高架线路上,与普通钢轨相比较,其车外噪声级可降低4 dB(A),同时,也可降低对桥梁的振动。

2) 普通道床高弹性扣件轨道

高弹性扣件使钢轨在车轮荷载作用下有较大的挠曲,从而降低上部建筑的力学阻抗,减小振动的激发,原西德地铁1978年研制的“科隆蛋”扣件就是这种扣件的典型。科隆蛋扣件充分利用橡胶圈的剪切变形,节点垂向刚度为12~20 kN/mm。减振效果在30~50 Hz频率范围内达6~10 dB。

3) 弹性短轨枕整体道床

这种轨道结构在地铁、轻轨交通和高速铁路应用较为广泛。由于枕下设有弹性很好的胶垫,垂直支承刚

度约为 $10 \sim 30 \text{ kN/mm}$, 在纵向和横向也由橡胶套提供了一定的弹性, 因而具有较好的振动、噪声衰减特性。弹性短轨枕整体道床在瑞士、法国、美国等城市地铁以及日本高速铁路、英吉利海峡海底隧道中广泛应用, 国内在广州地铁二号线也已研制成功, 减振性能可达 $8 \sim 12 \text{ dB}$ 。

2.2 隔离减振结构形式

1) 纵向轨枕式浮置板轨道

纵向轨枕式浮置板轨道是由原苏联学者克拉夫钦科建议在隧道中使用的新型轨道结构。这种结构的特点是把钢轨置于沿线路纵向排列的钢筋混凝土纵向轨枕上, 纵枕与基础间放置防枕垫板。由于纵向轨枕的重量较大, 有助于振动的衰减。这种轨道于 1983 年开始铺设, 经数年的使用证明: 线路状态良好, 减振效果明显, 与木枕混凝土整体道床相比, 隧道衬砌表面垂向振动频率在 $12.5 \sim 80 \text{ Hz}$ 范围内, 可减振 $10 \sim 20 \text{ dB}$ 。与板式浮置板轨道相比, 其最大优点是容易维修, 纵枕下防振垫板易于更换。

2) 浮置板轨道

浮置板轨道, 顾名思义就是通过弹性体把轨道结构上部建筑与基础完全隔离, 使其处于悬浮状态, 建立质量—弹簧的单自由度系统, 利用整个道床在弹性体上进行惯性运动来隔离和衰减列车运行产生的振动。目前采用的弹性体主要有螺旋钢弹簧和橡胶弹簧两种。由于其结构特点, 其减振性能目前是所有减振形式中最优越的, 适用于线路对敏感建筑物下面或附近通过, 且对建筑隔振要求较高的场合, 如住宅、音乐厅、医院、学校、宾馆等场所, 所以得以在全球城市轨道交通系统中广泛采用。浮置板轨道结构于 1968 年由德国科隆地铁首次采用, 后来在德国的波恩、汉堡、慕尼黑、法国的南特、鲁昂、美国的巴尔的摩、华盛顿、纽约、波斯顿、亚特兰大、加拿大的多伦多、新加坡、香港、广州地铁等城市地铁中都采用了这种浮置板轨道系统。

本文将主要介绍广州地铁一号线浮置板(橡胶弹簧)轨道的设计。

3 设计原理分析

3.1 设计原理

浮置板隔振轨道结构又称质量弹簧系统。其基本原理是在轨道上部建筑与基础间插入一固有振动频率远低于激励频率的线性谐振器, 即将道床板置于橡胶弹簧上, 通过质量—弹簧系统的惯性运动, 把列车运营产生的振动进行较大衰减后, 再传递给隧道主体结构,

以达到减振的目的。

3.2 浮置板减振系统自振频率计算

浮置板隔振轨道的设计要点, 是质量—橡胶弹簧体系自振频率 ν 的设计。将浮置板表示为如图 1 所示的单自由度体系, 其自振频率为:

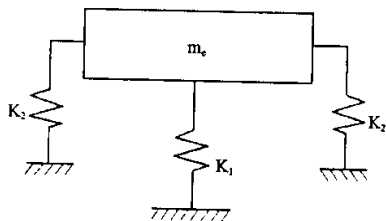


图1 单自由度体系示意图

$$\nu = (K/m_e)^{1/2} 2\pi$$

式中: K ——橡胶弹簧刚度;

m_e ——当量质量。

单自由度系统具有以下特点: 当激励频率与系统自振频率相近时会产生共振, 激励频率与自振频率的比值为 1.5 倍时, 激励振幅就小于系统静变形, 而且激励频率与自振频率的比值越大, 激励振幅就越小, 在二者比值达到 2.5~3 以上时, 激励振幅就远远小于系统静体变形。根据以上分析, 为了提高系统减振效果, 减小系统的激励振幅, 就必须使系统的自振频率尽可能的比激励频率小, 而人易感受到的振动和噪声的主要振幅在 $31.5 \sim 250 \text{ Hz}$ 之间, 其中中低频振动的影响最大。要提高浮置板轨道的低频隔振效果, 则应尽可能降低浮置板系统的自振频率。

由上式可知, 通过增加参振质量和减小减振弹簧刚度可降低浮置板系统自振频率, 但浮置板轨道往往受主体结构高度控制, 参振质量必然受限, 若延长浮置板长度, 又会增加施工难度。橡胶弹簧刚度值的大小, 也与轨道结构的安全性及使用寿命密切相关, 因此必须综合考虑各项因素的影响。

4 浮置板轨道结构设计

4.1 浮置板板长的选择

浮置板长度一般为 $0.65 \text{ m} \sim 20 \text{ m}$, 有就地灌注和预制两种施工方法。根据浮置板的长度一般可分为长型和短型两种结构型式。

4.1.1 长型浮置板轨道

长型浮置板轨道道床板是一个长约 $15 \sim 20 \text{ m}$ 的钢筋混凝土板, 板厚 300 mm , 在地铁隧道内现场浇

注,靠橡胶支座支承。浮置板的自振频率 ≤ 10 Hz。

长型浮置板自重较大,轨道结构横向稳定性较高。由于混凝土道床板须现场浇注,通常采用 GRC 永久性模板进行灌注。其施工工期长,与主体结构施工干扰大,施工计划缺乏灵活性,结构板下橡胶支座不具备维修和更换条件。

4.1.2 短型浮置板轨道结构

短型浮置板轨道由独立的短型浮置板单元组成,浮置板由橡胶支座支承。浮置板厚一般为 300 mm,长 1.5~7.0 m,宽度 2.4~3.0 m。自振频率在 12~15 Hz 之间。

另有一种更短的浮置板,长 0.65 m,其自重轻,施工维修方便,但自振频率大,过车时容易产生共振,使车厢内噪声水平增加。

在短型浮置板轨道结构中,由于道床板短,因而其稳定性降低,在需要更多侧向支座的同时,也增加了纵向缓冲隔板的数量,费用将有所增加。但短型浮置板使用钢模,在预制场预制,然后再运到工地进行拼装,施工费用较低,施工中又具有较大的灵活性。

考虑到地铁施工工期要求及板下橡胶支座更换和维修的可实施性,车辆转向架距离等因素,广州地铁采用短型浮置板轨道。

4.2 浮置板轨道结构设计

4.2.1 浮置板轨道设计

浮置板轨道结构见图 2,道床板为预制件,道床板垂向由橡胶支座支承,侧向亦靠弹性支座来约束道床板的横向位移,既提供了弹性,又解决了道床横向稳定问题。其上的承轨部分可采用纵向承轨台和钢筋混凝土轨枕两种结构。

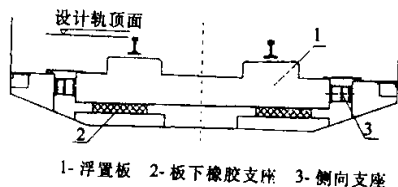


图 2 浮置板轨道结构

浮置板为一块 3 m×3 m 的预制钢筋混凝土板,板高 300~335 mm,在顶面形成 3% 的横坡,便于排水。浮置板的自振频率设计为 12~14 Hz。

浮置板底面、侧面及纵向端面均设有凹槽,用于放置橡胶垫。由于道床板前后左右均设置了橡胶垫支承隔离,因而与主体结构完全分离。

纵向承轨台方案,是采用 C30 混凝土现场浇注,可设置曲线超高和调整道床板安装误差,由于预制的

道床板凹槽内预留有伸出钢筋,承轨台能与道床板很好的联为一体。

混凝土轨枕方案,是在道床板顶面预留轨枕凹槽,安装好道床板后,再把混凝土枕放入轨枕槽内,调好轨枕的方向、轨距和水平后,再行灌浆。由于这种型式不能在道床板上预留连接钢筋,轨枕底部与道床板顶面仅靠水泥砂浆连接,容易出现薄弱面,一旦出现轨枕与道床板脱离现象,养护维修将很困难。因此,采用纵向承轨台式浮置板轨道结构型式。

承轨台高度主要考虑超高设置及施工误差调整的需要而定,分段长度则主要考虑方便养护维修,一般采以设置 4~5 套扣件为一段,段与段之间设置 200 mm 间隔,以利排水和扣件更换。由于承轨台的设置极大地降低了施工难度,使国内施工企业能胜任该项工程施工。

4.2.2 过渡段设计

过渡段采取逐步增加橡胶支座数量的方式达到浮置板轨道与普通整体道床之间刚度的过渡,过渡段长 15 m,板下橡胶支座由 4 个逐渐过渡到 9 个,以取得平稳过渡的效果。因此每个过渡段浮置板底部除设 9 个凹槽外,其余部分则与标准段浮置板相同。

4.2.3 橡胶支座的设计

橡胶支座是浮置板轨道结构中的重要部件,橡胶支座的性能是直接影响到减振效果及浮置板轨道结构的经久耐用性。由于橡胶支座位于浮置板下,维修、更换难度较大,所以橡胶支座均按 30 年寿命设计,橡胶支座的配方及生产过程必须进行严格控制,使用前必须对其各项技术指标进行测试以确定符合设计要求。

橡胶支座刚度选择也是浮置板轨道设计的关键技术,主要通过控制轨道变形量来确定。减振橡胶的疲劳寿命是由相对变形量大小确定的,小于 15% 时,期望寿命可达到 10^7 万次,小于 10% 时,期望寿命可达到 10^8 万次。此外,轨道的变形量还必须综合考虑车辆的动力性能、旅客的舒适度、钢轨的承受能力等因素,广州地铁按列车静载作用下浮置板最大位移不超过 3 mm 进行控制。

橡胶支座的刚度按下式计算:

$$K_c = E_{sp} \cdot A_L \cdot / h$$

式中: A_L —受压面积,

h —橡胶支座高度,

E_{sp} —表观弹性模量。

$$E_{sp} = 3(1 + 1.65S^2)G$$

式中: S —形状系数;

$$S = A_L / A_F,$$

A_F —自由表面积;

G —剪切弹性模量;

$$G = \frac{7.55H_s + 55}{100 - H_s}$$

式中: H_s —邵氏硬度。

广州地铁采用的浮置板下橡胶支座设计静态度 12~16 kN/mm,侧向缓冲胶垫横向静刚度 3.2~4.2 kN/mm。

4.2.3.1 橡胶支座的技术指标

(1)橡胶最小拉伸强度为 20 MPa;最小极限拉伸率为 600%;

(2)高温下恒定压缩橡胶永久变形<25%;

(3)热老化(70℃ 336 h):拉伸强度变化<±15%;伸长率变化<±20%;

(4)浸蒸馏水(100℃ 70 h):体积变化<±20%;重量变化<±10%;

(5)耐热水性能(70℃ 336 h):拉伸强度变化<±15%;伸长率变化<±20%;硬度变化<±10(邵 A);

(6)耐臭氧老化(25 pphm 40℃ 伸长率 20%):168 h 无裂纹;

(7)电阻率>10⁸Ω;

(8)反复荷载疲劳试验(20 kN/80 kN):1 000 万次永久变形<1 mm。

5 浮置板轨道现场动态参数测试

1999年6月,我们模拟运营条件对广州地铁新建的浮置板轨道进行了动态测试,测试结果如下:

(1)钢轨垂直振动加速度,实测平均值 37.4 g,最大可能值 47.8 g,相应的第一主频为 574 Hz;与普通弹性扣件整体道床钢轨加速度第一主频相比显著降低。

(2)浮置板的垂直振动加速度显著大于普通弹性扣件整体道床,平均值为 18.37 g,最大可能值 23.19 g,相应的第一主频为 237 Hz。

(3)隧道边墙垂直振动加速度,平均值为 0.039 g,最大可能值为 0.054 g,低于普通弹性扣件整体道床的平均值 0.462 g,相应的第一主频为 121 Hz,低于普通弹性扣件整体道床相应的第一主频 421 Hz。对于边墙振动加速度级 V_{AL} ,与普通弹性扣件整体道床相比减小 21 dB,减振效果明显。

(4)浮置板横向位移,平均值为 0.2 mm,最大可

能值为 0.254 mm。

(5)浮置板相对隧道基础的垂直位移,平均值为 0.48 mm,最大可能值为 0.56 mm,钢轨垂直位移平均值 1.13 mm,最大可能值 1.47 mm。

(6)浮置板轨道轨距动态扩大量平均值 3.11 mm,最大可能值 4.34 mm。

测试结果表明,浮置板轨道动态测试各项指标均在《铁路线路维修规则》允许范围之内,结构安全、可靠。浮置板轨道减振性能良好,基本能满足地铁从建筑物下方穿越时对建筑物的减振要求。

此外,现场动态测试还表明,浮置板轨道的垂向位移值较小,未达到设计期望值,同时车厢内部噪声依然能明显感觉,这与浮置板橡胶支座的实际刚度和系统自振频率有关,若通过优化改进,浮置板轨道的减振性能和乘坐舒适度可进一步提高。

6 结 论

浮置板轨道设计自振频率 12.6 Hz~14.7 Hz,对 中低频振动有良好的衰减作用,广州地铁动载测试也证明了浮置板轨道是目前减振效果最好的一种轨道型式,可用于地铁沿线建筑物振动响应值大于《城市区域环境振动标准》15 dB 地段。浮置板轨道已在世界上普遍采用,1997 年在广州地铁首次应用,取得了良好的社会效益,其设计、制造、施工均已趋于成熟。尽管这种初期投资高,但从长远发展考虑,其社会效益、经济效益明显,可在国内地铁及轻轨交通中推广应用。

参考文献

- [1] John R. V. Dickson, Mohammad Irshad, P. E. GROUND BORNE NOISE AND VIBRATION MITIGATION DESIGNS FOR WMATA'S MID-CITY E-ROUTE.
- [2] Patrick CARELS. LOW VIBRATION & NOISE TRACK SYSTEM WITH TUNABLE PROPERTIES FOR MODERN LRT/STREETCAR TRACK ON SURFACE IN URBAN AREAS.
- [3] HOMER M. CHEN. Retrofit Techniques for Floating Slab Track.
- [4] 机械工业出版社,弹簧手册[S].
- [5] 铁道部科学研究院铁道建筑研究所等.广州地铁一号线轨道减振工程减振性能动载测试与评价[R].

(下转第 11 页)

ANALYSIS ON NECESSITY OF REFORM OF RAILWAY DOWN DIRECTION SYSTEM AT SHANHAIGUAN STATION

NIU Hui-xiang

China Railway Third Reconnaissance and Design Institute

Abstract: In the research works on electrification reform engineering project of Tianjun-Qinhuangdao-Shenyang Railway, there were multi-opinions concerned with the problem having the necessity of reform the down direction system at Shanhaiguan Station for enlarging its capacity or not. From several aspects concerned with traffic organization, formation of car flow, capacity of station, etc, the paper analyzes the existing problems in which the down direction system should not be reformed and its solving scheme, so as to explain the necessity of its reform.

Key words: Shanhaiguan Station; reform, necessity

(上接第15页)

DESIGN OF TRACK LAYING WITH FLOATING PLATE

YAN Hua, YAO Li

China Railway Second Reconnaissance and Design Institute

Abstract: Accompanied with the rapid development of urban rail transit in home, the problems of vibration and noise pollution produced during operation became more and more conspicuous. The paper describes briefly the necessity of decreasing vibration and reducing noise in metro, as well as the types of anti-vibration track adopted in foreign countries in the world. The design of anti-vibration track with floating plate and its application in Guangzhou Metro are introduced emphatically also in this paper.

Key words: decrease of vibration and reduction of noise; track laying with floating plate; self-vibration frequency; design

(上接第19页)

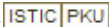
JAPANESE INSTITUTIONS OF URBAN RAILWAY TRANSIT

SUN Zhuang-zhi¹, ZHOU Xiao-qing², HU Si-ji¹

¹Institute of Transportation, Northern Jiaotong University; ²Department of Transportation, China International Engineering Consulting Corporation

Abstract: The urban railway transit of our country is now in a rapid developing period, but we are lack of a perfect institution system about it. Japan is one of the countries with the most developed urban railway transit system in the world. This paper introduces the Japanese institutions about financing, tax system, and ground exploitation along the railway line in the constructions of urban railway transit. This will be helpful in formulating the institutions of our urban railway transit constructions. According to the situation of our country, some corresponding suggestions are presented.

Key words: urban railway transit; institution

作者：[颜华](#)，[姚力](#)
作者单位：[铁道第二勘察设计院, 成都, 610031](#)
刊名：[铁道工程学报](#) 
英文刊名：[JOURNAL OF RAILWAY ENGINEERING SOCIETY](#)
年，卷(期)：[2002 \(4\)](#)
被引用次数：[16次](#)

参考文献(5条)

1. [John R V Dickson; Mohammad Irshad, P. E](#) [GROUNDBORNE NOISE AND VIBRATION MITIGATION DESIGNS FOR WMATA'S MIDCITY E-ROUTE](#)
2. [Patrick Carels](#) [LOW VIBRATION & NOISE TRACK SYSTEM WITH TUNABLE PROPERTIES FOR MODERN LRT/STREETCAR TRACK ON SURFACE IN URBAN AREAS](#)
3. [HOMER M CHEN](#) [Retrofit Techniques for Floating Slab Track](#)
4. [机械工业出版社](#) [弹簧手册](#)
5. [铁道部科学研究院铁道建筑研究所](#) [广州地铁一号线轨道减振工程减振性能动载测试与评价](#)

本文读者也读过(10条)

1. [郭亚娟](#). [杨绍普](#). [郭文武](#). [Guo Yajuan](#). [Yang Shaopu](#). [Guo Wenwu](#) [钢弹簧浮置板轨道结构的动力特性分析](#)[期刊论文]-[振动、测试与诊断](#)2006, 26(2)
2. [郭亚娟](#). [杨绍普](#). [李宏哲](#) [非线性弹簧浮置板道床的减振特性分析](#)[会议论文]-2004
3. [王阳](#) [浮置板式轨道动力设计参数研究](#)[学位论文]2008
4. [蔡成标](#). [刘增杰](#). [赵汝康](#) [浮置板轨道过渡段的动力学设计](#)[期刊论文]-[铁道建筑](#)2003(12)
5. [耿传智](#). [田苗盛](#). [董国宪](#). [Geng Chuanzhi](#). [Tian Miaosheng](#). [Dong Guoxian](#) [浮置板轨道结构的振动频率分析](#)[期刊论文]-[城市轨道交通研究](#)2007, 10(1)
6. [谷爱军](#). [范俊杰](#) [浮置板轨道竖向振动能量传递分析](#)[期刊论文]-[铁道学报](#)2004, 26(5)
7. [王炯](#). [吴天行](#). [WANG Jiong](#). [WU Tian-xing](#) [浮置板轨道隔振性能研究](#)[期刊论文]-[上海交通大学学报](#)2007, 41(6)
8. [刘俊涛](#). [唐俊](#) [弹簧隔振器道床钢筋构造设计研究与应用](#)[期刊论文]-[安徽建筑](#)2009, 16(5)
9. [谷爱军](#). [张宏亮](#). [GU Ai-jun](#). [ZHANG Hong-liang](#) [钢弹簧浮置板轨道结构在不同频段的隔振效率](#)[期刊论文]-[噪声与振动控制](#)2009, 29(1)
10. [孙晓静](#). [刘维宁](#). [翟辉](#). [郭建平](#) [钢弹簧浮置板低频隔振性能的研究](#)[会议论文]-2005

引证文献(16条)

1. [丁静波](#) [橡胶浮置板轨道在直线电机运载系统中的应用](#)[期刊论文]-[铁道标准设计](#) 2005(12)
2. [杨遂中](#) [无碴轨道结构中连续型轨道板质量变化对钢轨和桥梁系统振动的影响](#)[期刊论文]-[中国科技成果](#) 2009(18)
3. [吴川](#). [刘学文](#). [黄醒春](#) [浮置板橡胶减振支座疲劳老化特性试验研究](#)[期刊论文]-[噪声与振动控制](#) 2009(4)
4. [杨延军](#) [钢轨下橡胶垫阻尼特性对轨道交通中轨道梁的振动影响](#)[期刊论文]-[中国科技成果](#) 2009(19)
5. [杨广军](#). [谢晓鹏](#). [李广慧](#). [董晓马](#) [预制式轨道板质量对钢轨和桥梁的振动影响](#)[期刊论文]-[华中科技大学学报\(城市科学版\)](#) 2008(4)
6. [向俊](#). [王阳](#). [赫丹](#). [孔凡兵](#). [郭高杰](#) [城市轨道交通列车-浮置板式轨道系统竖向振动模型](#)[期刊论文]-[中南大学学报\(自然科学版\)](#) 2008(3)

7. [侯德军](#), [雷晓燕](#), [刘庆杰](#) [浮置板轨道系统动力响应分析](#)[期刊论文]-[铁道工程学报](#) 2006(8)
8. [刘克飞](#), [刘学毅](#) [橡胶浮置板轨道垂向动力特性分析](#)[期刊论文]-[铁道建筑](#) 2012(8)
9. [杨广军](#), [侯晓英](#), [李广慧](#), [董晓马](#) [轨道交通中无砟轨道动力模型分析](#)[期刊论文]-[华中科技大学学报（城市科学版）](#) 2008(4)
10. [王炯](#), [吴天行](#) [浮置板轨道隔振性能研究](#)[期刊论文]-[上海交通大学学报](#) 2007(6)
11. [黄守刚](#), [吴景龙](#) [地铁减振工程措施综述](#)[期刊论文]-[国防交通工程与技术](#) 2004(4)
12. [杨广军](#), [李广慧](#), [黄醒春](#), [郭昊](#) [预制式轨道板的纵向布置对轨道交通中车辆振动特性的影响](#)[期刊论文]-[振动与冲击](#) 2007(6)
13. [杨广军](#), [马卫东](#), [董晓马](#), [李广慧](#), [谢晓鹏](#) [轨道交通中无砟轨道连续型轨道板的质量对车辆振动影响](#)[期刊论文]-[河南科学](#) 2008(9)
14. [姜琳琳](#), [盖盼盼](#), [黄舰](#), [杨林](#) [地铁减振降噪技术研究进展](#)[期刊论文]-[上海涂料](#) 2012(9)
15. [王丹](#) [广州地铁二号线浮置板轨道振动特性分析](#)[学位论文]硕士 2005
16. [田立宗](#) [地铁轨道振动控制的波动干涉方法研究](#)[学位论文]硕士 2006

引用本文格式: [颜华](#), [姚力](#) [浮置板轨道设计](#)[期刊论文]-[铁道工程学报](#) 2002(4)