

A General Review on Mitigation Measures for Railway and Urban Rail Transit Vibration*

Yue Zhao, Xinbiao Xiao, Qinghua Guan, Xuesong Jin

State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu
Email: xsjin@home.swjtu.edu.cn

Received: Mar. 26th, 2013; revised: Jul. 20th, 2013; accepted: Aug. 20th, 2013

Copyright © 2013 Yue Zhao et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract: This paper gives a brief introduction to the standard measurement methods of environmental vibration at home and abroad, and characteristics of railway environmental vibration in China. Various mitigation measures for railway vibration are presented in detail. They include vibration source control, route control of vibration transmission and vibration isolation measures for protected objects near rail transport systems. Vibration source control mainly contains vehicle vibration control, reducing the track irregularity and rail vibration control. Vehicle vibration control mainly indicates the design of light-weight vehicle, rational wheelbase, suspension system, and resilient wheel, damped wheel, wheelset-turning repair, and optimizing the dynamic characteristics. Track irregularity and rail vibration control are related to the use of heavy rail, scientific strategies of rail grinding, treatment of rail joint and the use of damped rail. Route control of vibration transmission is involved in damping fastening, elastic pad, elastic damping sleeper, various vibration damping track structures and ground vibration isolation measures. The vibration isolation measures for the protected objects are mainly to consider setting their foundation isolation. The present paper provides the references and guides for how to choose mitigation measures for railway vibration.

Keywords: Railway; Urban Rail Transit; Vibration Mitigation; Vibration Isolation; Vibration Damping Fastening; Track Structures

铁路及城市轨道交通减振措施研究综述*

赵悦, 肖新标, 关庆华, 金学松

西南交通大学牵引动力国家重点实验室, 成都
Email: xsjin@home.swjtu.edu.cn

收稿日期: 2013年3月26日; 修回日期: 2013年7月20日; 录用日期: 2013年8月20日

摘要: 本文简单论述了国内外关于环境振动控制的标准、测量方法以及我国铁路环境振动特征。详细阐述了国内外铁路交通的各种减振措施及其减振性能, 包括轨道交通系统中振动源控制措施、传播途径控制和受振对象被动隔振措施。振动源控制措施主要是车辆振动控制措施、降低轨道不平顺和钢轨振动控制措施。车辆振动控制措施主要是关于轻型化设计、轴距合理设计、车辆悬挂系统的合理设计、弹性车轮、阻尼车轮以及车轮镟修等优化动力学特性的减振措施。轨道不平顺和钢轨振动控制措施是关系到重型钢轨的使用、钢轨科学打磨策略、钢轨接头处理和阻尼钢轨的使用。振动传播途径控制措施涉及到减振扣件、弹性垫层、弹性减振轨枕、多种减振轨道结构和大地传播隔振措施。受振对象被动隔振主要在建筑物基础进行隔振处理。相关内容可为铁路交通减振措施的选择提供借鉴和参考。

*基金项目: 长江学者和创新团队发展计划(IRT1178)、国家重点实验室自主研究课题(J0220602041101)、“十一五”国家科技支撑计划共性基础及系统集成技术课题(P024132C1117020008)、四川省2010年第二批科技支撑计划项目(2010GZ0226)。

关键词： 铁路交通；城市轨道交通；减振；隔振；减振扣件；轨道结构

1. 引言

随着我国高速铁路和城市轨道交通的蓬勃发展，而且列车运营速度越来越高，其引起的环境振动问题越来越明显，已逐渐影响到人们的日常生活和工作。人体长时间暴露在振动环境中，会引发各种运动病；而且，铁路及城市轨道交通引起的振动对建筑物的结构、安全以及对精密仪器的正常使用都会有一定的影响^[1]。因此，除了在线路选线时充分考虑对沿线建筑物和环境的影响及进行合理规划外，还需要对车辆结构、轨道结构、大地传播路径及其特性和特殊受振对象采取一定的减振措施，从而最大限度地降低铁路及城市轨道交通引起的振动对人体、建筑物以及精密仪器等的影响。

2. 铁路及城市轨道交通引起的振动

2.1. 振动的产生及传播

轮轨表面粗糙度、钢轨接头以及轨枕或扣件的离散支撑引起的各种不平顺，会导致列车在轨道上运行时轮轨系统产生振动，该振动经由扣件传递至轨枕和道砟上，再向更底层的路基和大地中传播，从而传递到沿线附近的建筑物上，对建筑物中的人、结构和精密仪器设备等产生影响。因此，轨道结构类型、扣件、轨枕、轨道板、路基和大地的动态特性，包括质量、刚度和阻尼特性等在铁路交通引起的振动的传播过程中有着非常重要的作用。

2.2. 振动的评价和标准

针对不同的评价目的，对振动的评价指标可包括

振动位移、速度、加速度、振动速度级、加速度级和振动频谱等^[1]。一般描绘振动对建筑物和机械结构的破坏和损伤时，常采用振动位移或速度来评价；描绘人体振动问题和环境振动问题时，因为加速度可有效表示振动能量的大小，所以常采用加速度描述振动的大小。由于人体感知及所能承受的振动变化范围较大，用加速度表示极为不便，因此国内外环境振动的标准通常采用振动加速度级作为描述振动大小的量，ISO 2631^[2]和国标 GB 10071-88《城市区域环境振动测量方法》^[3]均采用振动加速度级来评价轨道交通引起的环境振动；此外，速度级也可以用于描述振动的大小，美国铁路运输部(Federal Transportation Railroad Administration)采用速度级来评价轨道交通引起的环境振动^[4]。振动频谱通常是将测试测得的不同频率对应最大振动响应以频率为横坐标，以振动响应为纵坐标表示出来，用以分析环境振动的频率特性。

国标 GB 10070-88《城市区域环境振动标准》^[5]对城市各类区域的环境振动限值做出了相应规定，如表 1 所示。

2.3. 环境振动特征

我国铁路交通线路有客货共线铁路、重载线路、高速线路，城市轨道交通线路有地铁等，由于各类型线路上列车类型、运行速度不同，它们所引起的环境振动的特征是有所差别的。表 2 列出了典型线路的环境振动水平。可知，振动水平受到土壤条件的影响，且均随列车速度的提高和轴重的增加而增大，在一定程度上可能会超出表 1 所示的环境振动限值。

根据典型线路的环境振动测试结果^[6-11]，普遍地，

Table 1. Environmental vibration limits for various urban areas (unit: dB)
表 1. 城市各类区域环境振动限值(单位: dB)

适用地带范围	白天(6:00~22:00)	夜间(22:00~6:00)	适用地带范围的划定
特殊住宅区	65	62	指特别需要安宁的住宅区
居住、文教区	65	62	指纯居民和文教、机关区
混合区、商业中心区	70	67	指一般工业、商业、少量交通与居民混合区
工业集中区	75	72	指在一个城市或区域内规划明确确定的工业区
交通干线道路两侧	75	72	指车流量每小时 100 辆以上的道路两侧区域
铁路干线两侧	80	80	指据每日车流量不少于 20 列的铁道 30 m 外两侧的区域

Table 2. Environment vibration level of typical lines^[6-11]
表 2. 典型线路环境振动水平^[6-11]

线路	线路类型	轴重(T)	列车速度(km/h)	VL _z max (dB)	测点位置(m)
沪宁线 ^[6]	客货共线铁路(路堤)	23	150	96~98	15
广深线 ^[6]	客货共线铁路(路堤)	17.5	160	84~86	15
		17.5	200	85~88	15
	客货共线铁路(高架, 石龙大桥)	23	160	86~90	15
		23	160	79~82	15
环行线 ^[6]	试验线(路堤)	17.5	160	84~86	15
		17.5	200	87~89	15
京广线 ^[7]	客货共线铁路(路堤)	客车	92	96.0	30
		货车	54	94.7	30
京津线	高速线路(高架) ^[8]	15	320	73.4	30
	高速线路(路堤) ^[9]	15	300	71.3	30
武广线 ^[10]	高速线路(路堤)	14	300	68.5	30
		14	350	71.8	30
	高速线路(高架)	14	300	68.7	30
		14	350	70.8	30
大秦线 ^[9]	重载线路(路堤)	25	60~70	61.3~82.5	30
广州地铁 1 号线 ^[11]	城轨地铁(路堤)	14	60	87	0.5
天津地铁 ^[11]	城轨地铁(路堤)	14	60	87	0.5

铁路及城市轨道交通引起的环境振动，其高频成分随距轨道的距离的增加而衰减较快，而低频成分衰减缓慢。

轨道交通地下线(地铁列车速度在 60~80 km/h)和既有的普通线路(客车的速度在 120~160 km/h)，其环境振动的主要频率范围在 10~80 Hz，前者靠近轨道处的振动以 60 Hz 左右成分为主，远离轨道处以 20 Hz 左右成分为主^[12]，后者距离轨道较远处的振动基本以 5~30 Hz 成分为主^[8]；高速客运专线(高速动车组速度 350 km/h)附近振动主频在 40 Hz 左右，20~50 Hz 的中低频成分衰减较慢^[9]；既有普通线路(货运列车，120 km/h)和重载铁路，其环境振动主频大多出现在 12.5 Hz^[8,9]。这些频率之所以不同，主要是受到来自车辆、轨道结构、扣件道床形式、隧道结构、地质条件以及建筑物类别等因素的影响^[11]。

3. 铁路及城市轨道交通减振措施

对应铁路及城市轨道交通交通振动产生和传播

的机理，国内外现有常用的减振措施与技术主要可以分为三大类：振源控制、振动传播途径控制和受振对象被动隔振等。

3.1. 振源控制

轮轨系统是引起铁路振动的发生源头，控制其振动可以从源头上降低系统的振动强度，达到非常好的减振效果。对轮轨系统的振动控制主要有针对车轮方面的车辆振动控制、针对钢轨方面的钢轨振动控制以及针对轮轨系统激振源的表面不平顺控制三大方面。

3.1.1. 车辆振动控制

对车辆振动控制，主要措施包括车辆轻量化设计、轴距合理设计、车辆悬挂系统的合理设计、弹性车轮、阻尼车轮以及车轮镟修等优化动力学特性的减振措施^[1,11]。

日本新干线大量试验研究及调查的结果表明，车辆的总重量(轴重)是引起沿线振动的主要因素，在同

一速度情况下,有如下关系:

$$\Delta L = 20 \lg(W_1/W_0) \quad (1)$$

式中, W_1 和 W_0 分别为轻量化后、轻量化前的车辆轴重, ΔL 为轻量化后 Z 振级衰减量。300 系列(轴重 16 T)较 0 系列(轴重 11.3 T), 振级平均值在距轨道 12.5 m、25 m 处降低 3 dB 左右, 30 Hz 以下振级衰减基本维持在 2~3 dB, 而 40~53 Hz 无效果^[6]。

列车的轴重载荷呈几何排列, 在轨道上运行时会对轨道产生频率为 V/d_r 的周期性的动力作用, 当此频率接近或等于结构固有频率时会发生结构共振, 而轴距合理设计可以很好地避免此现象。车辆悬挂刚度和阻尼的合理设计, 也是为了避免车辆与轨道发生共振^[1]。车辆轻型化设计、轴距合理设计、车辆悬挂系统的合理设计等措施均适用于铁路及城市轨道交通。

弹性车轮主要是在轮毂和辐板之间嵌装橡胶隔离层, 它能将轮毂和轮辐的振动解耦, 同时也增加整个车轮的阻尼, 可降低轮轨之间的动作用力, 在 15~50 Hz 范围内起到减振作用^[1]。此外, 它也具有一定的降噪效果, 直线线路上运用可降低轮轨噪声 2 dB, 在小半径曲线上可降低高频啸叫噪声 10~20 dB。普通车轮价格约 700 美元/个, 弹性车轮约 3000 美元/个^[13]。但弹性车轮曾用在德国 ICE 高速列车上, 其疲劳引起的钢圈断裂导致了重大脱轨事故。因此, 基于安全性考虑, 其在干线列车及高速列车中的应用受到了限制, 目前主要应用于城市轨道交通。

阻尼车轮最常用的是在车轮上敷设约束阻尼结构, 也可以外挂 TMD 装置, 起到降低并耗散车轮振动能量的作用, 有较好的减振降噪效果。直线线路上运用可降低轮轨噪声 2 dB, 在小半径曲线上可降低高频啸叫噪声 5~15 dB, 阻尼车轮在普通车轮的基础上附加的费用约 500~1000 美元/个^[13]。目前, 阻尼车轮在城市轨道交通中使用更多, 出于安全性考虑, 其在干线列车及高速列车中的应用也受到了限制, 目前主要应用于城市轨道交通。

对现有大量车辆进行修改是非常昂贵的, 而对新设计车辆进行修改将会增大成本, 同时还可能遭到一些不愿改变已验证设计的人们之强烈反对。车辆振动控制中, 弹性车轮和阻尼车轮具有一定的减振降噪效果, 且设计安装相对较为方便、相对于车辆修改性价比更高, 值得进一步完善其使用安全性, 进而进行推

广使用。

3.1.2. 钢轨振动控制

对钢轨振动控制, 主要措施包括重型钢轨、钢轨接头处理及钢轨阻尼处理。

重型钢轨可以提高钢轨的垂向抗弯刚度, 其抗枕性能对软土路基更为有效。通过将 50 kg/m 的钢轨更换成 60 kg/m 的钢轨, 其抗弯刚性比约为 1.58, 可降低振动级 2~4 dB^[14]。重型钢轨适用于铁路交通和城市轨道交通。

钢轨接头处引起的冲击振动是非接头处的 3 倍, 其频率约在 20~100 Hz、521~1042 Hz。无缝钢轨可以最大限度地减少列车车轮对钢轨接头的冲击振动, 振动强度可降低 5 dB 左右^[15], 可延长轮、轨部件的使用寿命, 减少了维修费用。但是, 由于温度变化, 它在纵向受到更大的拉伸压缩应力, 有可能引起结构上的失效, 不适用于小半径曲线线路。而在小半径曲线线路上, 可以采用减振接头夹板(图 1), 其外侧夹板长度加高至与钢轨踏面相平, 当车轮通过轨缝时, 夹板顶面和钢轨顶面同时接触车轮, 可减小车轮通过轨缝的折角和台阶, 减缓车轮的冲击振动。石太线减振接头夹板测试结果表明, 减振接头夹板的轨底加速度较普通夹板要低 50%, 减振效果明显^[16], 且在多个铁路局及工务段的不同干线上使用效果很好。普通型接头减振夹板可以在现有的接头夹板基础上只更换外侧夹板即可, 价格在 320~330 元, 加强型的接头减振夹板需内外侧夹板一起更换, 一套价格在 880 元左右(包括螺栓等)。无缝钢轨、减振接头夹板均适用于铁路交通和城市轨道交通。

此外, 在道岔区段, 采用可动心辙叉可消除固定辙叉的有害空间, 降低轨道振动。瑞士的使用经验表明: 可动心辙叉在频率 16~80 Hz 频率范围内可降低

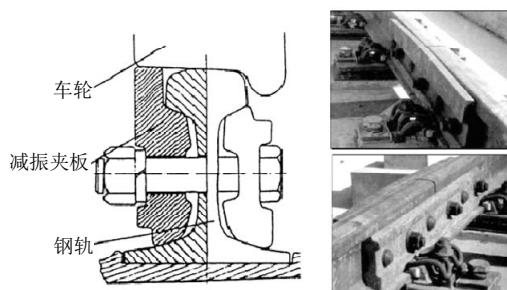


Figure 1. Rail vibration absorber joint plate^[16]
图 1. 减振接头夹板^[16]

振动速度级 0~3 dB, 减振效果较小, 且价格昂贵。而澳大利亚的使用经验表明: 可动心辙叉在频率 8~63 Hz 频率范围内可降低振动速度级 3~6 dB, 减振效果更大, 这可能与道岔区段的轨道的维护相关^[17]。可动心辙叉及其信号控制系统价格较高, 约 20 万美元/个。可动心辙叉适用于铁路交通和城市轨道交通。

目前的轨道结构通常都会采用减振扣件及垫层进行减振, 它们通常能较好地将钢轨的振动与下部基础隔离, 下部基础得到较好的保护, 而振动的能量却仍集中在钢轨上, 并没有耗散, 加剧钢轨的伤损, 缩短钢轨的使用寿命。添加约束阻尼和钢轨动力吸振器可以增加钢轨的阻尼, 提高其振动衰减率, 更好地耗散列车运行引起的钢轨振动的能量。前者主要是在钢轨轨腰两侧粘贴阻尼材料和约束层钢板, 当钢轨发生弯曲振动时, 带动阻尼材料内部摩擦和相互错动, 以及约束层钢板的拉压和剪切变形来耗散振动能量。文献[18,19]对该措施有过研究, 其对 100 Hz 以上的高频加速度减振效果比较明显, 并且对轨腰的振动控制最为明显, 振动加速度级可以降低约 5~6 dB^[19](测试条件: 高架线路, 4 节编组城市轨道交通列车, 列车速度 70 km/h)。而后者(图 2)是在钢轨轨腰两侧附加一个固有频率与钢轨振动显著频率重合的子系统(吸振器), 使得该频率的钢轨振动被吸振器“吸收”, 并通过吸振器中的阻尼材料的变形耗能。欧洲以及国内都对钢轨动力吸振器进行了设计研究及测试^[20,21], 其中 Wilson 设计的宽频带有效阻尼的钢轨动力吸振器, 其对钢轨垂向、横向振动速度级的降低量分别为 7 dB 和 10 dB^[21](测试条件: 隧道内半径 300 m 曲线段, LVT 轨道, 列车速度 60~70 km/h)。国内外的测试经验表明添加约束阻尼和钢轨动力吸振器都具有一定的减振降噪效果, 且安装方便, 不影响轨道的正常运营及维

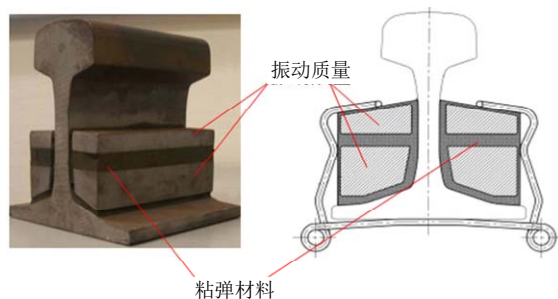


Figure 2. Rail dynamic absorber^[20]
图 2. 钢轨动力吸振器^[20]

护, 适用于铁路交通和城市轨道交通, 值得推广使用。

3.1.3. 轮轨表面粗糙度控制

车辆运行过程中轮轨表面可能出现不平顺, 如钢轨波磨、轮轨接触疲劳、裂纹和磨耗等, 它们是轮轨系统相互激励, 引起钢轨振动, 产生滚动(轰鸣)噪声的主要因素, 而车轮镟修、钢轨打磨可以将其打磨光滑, 降低轮轨间作用力, 从源头上减小振动强度。

车轮出现不圆及扁疤等缺陷或钢轨发生波磨等轮轨表面较为不平顺的情况下, 可使振动强度增加 10~15 dB^[22]。在此基础上, 定期镟修车轮, 保持车轮踏面光滑, 可使得 100 Hz 以上的地表振动降低量可以达到 10 dB^[11]; 经过钢轨和车轮打磨后, 8~100 Hz 内振动水平降低 4~8 dB, 站台上的振动水平下降 5~15 dB, 100 Hz 以上地面振动可降低 10 dB^[23]。通常钢轨打磨设备的打磨石的运动方向与钢轨的纵向轴线方向相互垂直, 若将打磨石的轴线与钢轨的纵向偏置一个角度, 甚至使打磨石的运动方向与打磨车运行方向一致, 这种方式打磨能将钢轨顶面被打磨得更为光滑, 减振效果更好^[24]。车轮镟修及钢轨打磨的设备价格较高, 均为约 100 万美元/台, 其维护操作费用也较高, 700 辆列车一年车轮镟修的费用约为 30 万~40 万美元, 钢轨打磨费用约为 1000 美元/英里(1.61 公里)^[13]。虽然车轮镟修、钢轨打磨的投入费用较高, 但是有效的车轮镟修、钢轨打磨可大大降低了轮轨间的激励, 减轻了轮轨间的振动, 从而更好的保护了车轮、钢轨以及轨下基础部分, 降低机车车辆及线路的维修费用, 延长各部分的使用寿命, 从而获得一定的经济效益, 适用于铁路交通和城市轨道交通。

此外, 增加钢轨轨头硬度, 可以减缓钢轨运行表面波磨的形成, 有利于降低轨道结构的振动^[15], 且适用于铁路交通和城市轨道交通。

3.2. 传播途径控制

列车在钢轨上运行产生的振动, 要通过扣件、垫层、轨枕、道床等轨下基础结构以及大地土壤组成的传播途径进行传播, 相对应地采取一定的减振措施, 可以起到明显的减振效果。

3.2.1. 减振扣件

扣件减振主要是通过降低扣件的垂向刚度, 提供较大的弹性, 缓冲列车荷载对钢轨的冲击振动, 并且

使钢轨的振动能够较好地与轨下基础部分隔离。扣件根据其垂向刚度,可分为一般减振扣件(20~60 kN/mm)和柔性扣件(10~25 kN/mm)。前者减振效果较小,而后者用于减振要求相对较高地段。表3列出了国内外各种类型减振扣件的结构特点、性能、价格及应用情况,其中我国的I型、II型轨道减振器扣件,是参考“科隆蛋”扣件(图3)设计基础上进行的,但轨道减振器扣件及Vanguard扣件在我国地铁中的应用并不理想,诱发了严重的钢轨波磨。柔性扣件的刚度过低,将大部分振动能量与下部基础隔离,振动能量集中在钢轨上,对钢轨的损伤较大,因此,采用柔性扣件对轨道进行减振需要谨慎,或辅助采用其他的降低钢轨振动的措施。目前柔性扣件主要适用于城市轨道交通。

3.2.2. 弹性垫层

弹性垫层是增加轨道弹性的重要组成部分,主要是通过采用橡胶等具有弹性的材料制成的垫层,置于轨下、轨枕下或道床下,缓冲列车通过时所产生的振



Figure 3. Cologne Egg
图3. 科隆蛋扣件

Table 3. Types and performance of damper fastener
表3. 减振扣件类型及性能统计

扣件类型	结构特点	垂向刚度 (kN/mm)	工作频率 (Hz)	减振效果 (dB)	价格 (元/组)	地铁应用情况	
一般减振扣件	WJ-2 ^[25]	轨下用复合小阻力垫板	40~60	>30	<3	160	上海
	DTIII ^[25]	双层橡胶垫板	21左右	>30	<5	暂无	上海
	DTIII2 ^[25]	双层橡胶垫板	20~30	>30	<5	138	上海
	DTV12 ^[26]	无T型螺栓	20~40	>30	<5	147	北京
	单趾弹簧扣件 ^[25]	双层橡胶垫板、单趾弹条、无T型螺栓	30~40	>30	<5	暂无	广州
柔性扣件	I, II型轨道减振器 ^[1]	利用橡胶剪切变形提供弹性,但其性能衰减较快	10~18	>15	3~10	300~400	北京、上海、广州等
	III型轨道减振器 ^[1,27]	双刚度,同时保证减振效果及运行安全	10	>10	10~15	暂无	北京
	Delkor Egg (减振器扣件) ^[28]	改善了橡胶的耐环境老化性能,利用橡胶剪切变形提供弹性	6~15	>40	10~12	较高	香港、台湾、北京、上海、深圳等
	GJ-III型扣件 ^[25] (图4)	双层非线性弹性垫板	10~20	暂无	<10	400	北京、上海、广州、成都等
	ALT.1 ^[28] (图5)	硫化粘结型,利用橡胶压缩变形提供弹性	12~30	>42	5~10	暂无	香港、台湾
	Lord扣件 ^[25,29] (图6)	硫化粘结型,利用橡胶压缩变形提供弹性	15~22.5	>19	5~7	300~400	华盛顿、芝加哥、温哥华、纽约、洛杉矶、台北等
	Vanguard扣件 ^[25,29] (图7)	支承钢轨头部,钢轨悬空,其振动与道床隔离	5~15	>10	7~15	800(国产)	广州

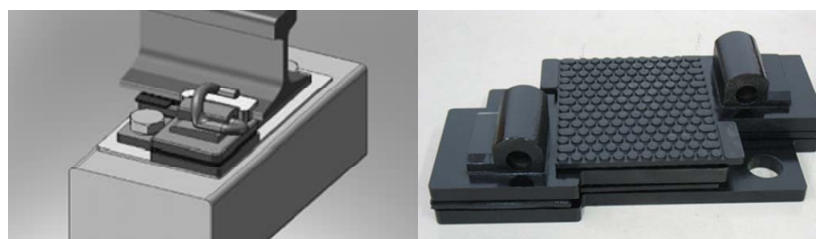


Figure 4. A noise- and vibration-damping fastener of GJ-III
图4. GJ-III型减振降噪扣件



Figure 5. ALT.1 fastener
图 5. ALT.1 减振扣件



Figure 6. Lord fastener
图 6. Lord 扣件

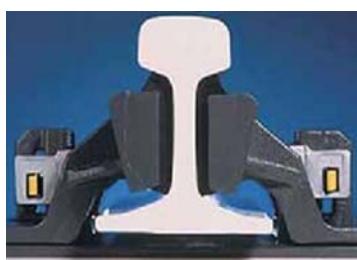


Figure 7. Vanguard fastener
图 7. Vanguard 扣件

动和冲击，减少铁路的动态负荷和振动，同时将振动与其下的基础部分隔离，减少振动的传递。

刚度为 20~25 kN/mm 的轨下弹性垫层较刚度为 500 kN/mm 的普通垫层，轨下支承块的振动加速度明显减小，最大减幅达 60%^[30]。弹性垫层的初期成本较高，但使用寿命更长，减振性能更好，从长远考虑，弹性垫层的技术经济性更好。在要求较高的减振地段，通常考虑在枕下或者道床下设置垫层，均适用于铁路交通和城市轨道交通。表 4 总结了轨枕垫、道砟垫减振性能的测试结果^[31]。由于轨枕垫、道砟垫减振效果好，我国也在沈阳、北京、上海铁路局等干线上进行了轨枕垫试铺，效果良好，但过于柔软的轨枕垫会使得轨道横向稳定性下降，引起钢轨更大程度的振动，其在高速铁路上的应用受到一定限制。道砟垫的使用寿命通常在 20~25 年以上，且不会缩短整个轨道系统的寿命周期，已在日本及欧洲地铁中广泛应用。

3.2.3. 弹性减振轨枕

弹性减振轨枕通常采用新型的复合材料制成，既有木枕易加工和便于处理、减振效果好的优点，又有混凝土枕的稳定性能和使用年限长的优点。比利时 CDM 公司研制的主要由聚氨酯橡胶材料制成的“安静式轨枕”^[32](图 10)，能够在 31.5~125 Hz 频段提供大于 20 dB(V)的插入损失，从而有效地减轻钢轨传递给道床的振动^[1]。日本也开发了玻璃长纤维和硬质发泡聚氨酯复合材料合成轨枕，用以解决振动噪声突出

Table 4. Types and performance of elastic pads/mats^[31]
表 4. 弹性垫层类型及性能统计^[31]

减振措施	轨道条件	测点位置	激扰	工程造价	工作频率 (1/3 倍频程)	插入损失(dB)
轨枕垫	有砟轨道, B70 混凝土轨枕(图 8)	德国干线 (距轨道中心 8 m)	ICE 列车 160 km/h	90 欧元/m [#] (新线) 250 欧元/m [#] (旧线改造)	>31.5 Hz	5~10 [*]
	有砟轨道	瑞士 (不同测点)	暂无	暂无	>31.5 Hz	5~15 [*]
	无	法国台架试验 (两类轨枕垫)	静载(90/120 kN) 动态激励(8~400 Hz)	暂无	>63 Hz/80 Hz (40 Hz 处产生共振)	5~15 ^{**}
道砟垫	有砟轨道(图 9)	瑞士、德国及 欧洲各国干线	列车 (其他信息暂无)	25~90 欧元/m [#] (德国)	>40Hz	5~15 [*]
	道砟下 混凝土板	德国干线 (距轨道中心 8 m)	城郊、货运列车 40 km/h	暂无	>8 Hz (16 Hz、31.5 Hz 处产生共振)	0 [*] (无道砟垫) 5~10, 部分 10~15 [*] (有道砟垫)
	道砟槽	德国干线 (距轨道中心 4、12 m)	城郊列车(ET 420) 60, 120 km/h	1200 欧元/m (短槽及地况条件差 的地方更高)	16~31.5 Hz, >63 Hz	5~10 [*]

注：表中[#]表示相对有砟轨道的额外支出；^{*}表示与有砟轨道相比；^{**}表示与没有轨枕垫的工况相比。

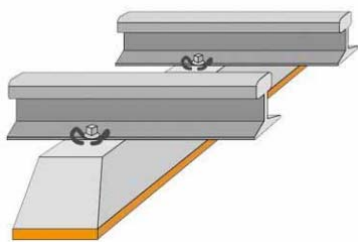


Figure 8. Under sleeper pads
图 8. 轨枕垫



Figure 9. Under ballast mats
图 9. 道砟垫



Figure 10. Silent sleeper
图 10. 安静式轨枕

的问题。我国研制的 TDZ III 型复合弹性轨枕，同时采用 TDR III 型复合轨下垫板，与普通轨枕和 TB60-10-17 型轨下垫板相比，道床竖向加速度较普通混凝土枕线路下降了 30%~70% (测试条件：胶济线，CRH2 动车组，列车速度 173 km/h)，起到良好的减振与隔振作用，并且使综合维修周期延长，减少维护成本，其投入产出基本持平，经济上也是可行的^[33]。弹性减振轨枕特别适用于填土厚度不足的涵洞路段，对其振动的降低有显著效果。其适用于铁路交通和城市轨道交通。

3.2.4. 减振轨道结构

有砟道床可吸收列车通过时的振动冲击能量，相比于无砟整体式道床可降低振 5~8 dB，但碎石道床稳定性较差、养护工作量大。无砟整体道床相比于有砟

道床的成本高 50%~75%，但因其维护费用远小于有砟轨道(约为其 1/5)，现代铁路尤其是高速铁路普遍使用了整体式道床。由于整体道床产生的振动更剧烈，因此各种新型的减振轨道结构也应运而生。

1) 弹性支承块轨道与弹性长轨枕轨道

弹性支承块式轨道(LVT, 图 11)通过在轨下、支承块下加设胶垫得到二次减振，并且在支撑块外设置弹性套靴，振动高频成分得到较大衰减，橡胶套靴和块下胶垫增加了轨道的纵横向弹性，在承载、动力传递和能量吸收等方面弥补了无砟轨道侧向刚度过大的不足。其适用于铁路交通和城市轨道交通。

弹性长枕轨道以弹性短枕轨道为基础，用一特殊的预应力混凝土轨枕(图 12)取代短支承块，并在轨枕两端设置开启式的橡胶套靴。较弹性支承块轨道该结构提高了枕距保持能力，更利于排除进入箱内的雨水污泥，枕下胶垫更换调整方便^[34]。但弹性长轨枕轨道需要在道床中间设排水沟，施工不便。由于参振质量大，减振效果优于弹性短轨枕式整体道床。其适用于铁路交通和城市轨道交通。

2) 减振板式轨道

为解决普通板式轨道的噪声振动问题，减振型板

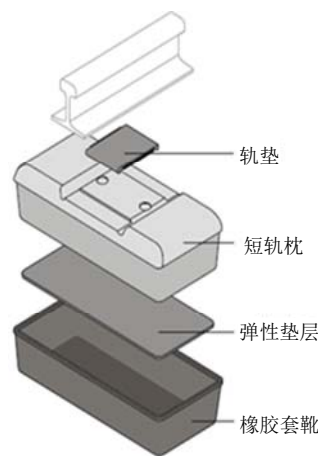


Figure 11. Low Vibration Track (LVT)^[31]
图 11. 弹性支承块^[31]

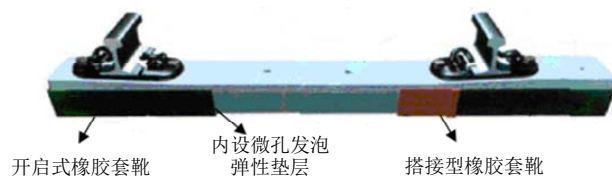


Figure 12. Long elastic sleeper^[34]
图 12. 弹性长轨枕^[34]

式轨道在普通板式轨道的轨道板下粘贴了一层约 20 mm 厚的微孔橡胶垫层和泡沫聚乙烯^[35], 利用其缓冲、隔离上部的振动和冲击, 达到一定的减振效果。在日本的山阳、东北、新干线等的桥梁、隧道和部分路基区段, 以及我国赣龙线、台湾的应用情况良好, 取得了较好的经济效益和社会效益。其适用于铁路交通和城市轨道交通。

3) 轨枕支承式无砟减振轨道

轨枕支承式无砟减振轨道, 直接将重型轨枕置于沥青层支承层上, 重型轨枕的采用可以减少轨枕自身的振动, 因而向下部基础传播的振动也减小。德国 GETRAC A3 型(图 13)和 SATO 型轨道都属于该轨道类型, 均以耐久性和经济性原则为设计基础, 建设速度快、施工简单、方便, 稳定性好, 使用寿命长, 几乎不需维护。其适用于铁路交通和城市轨道交通。

4) 埋入式轨道

埋入式轨道(图 14)是在混凝土整体道床中设置一个凹槽, 钢轨放置在凹槽内, 用一种叫 Corklast 的弹性体敷设在钢轨的轨头下方将钢轨固定^[24]。该沿纵向连续的支承方式大大降低了由于传统离散支承的不平顺性引起的轨道结构振动, 并通过钢轨周围的弹性材料变形耗能, 减振性能良好, 稳定性好, 养护维修量少, 特别适用于城市地铁、城市有轨电车轨道等城



Figure 13. GETRAC A3 track
图 13. GETRAC A3 型轨道^[31]



Figure 14. Embedded track
图 14. 埋入式轨道

市轨道交通。但对其中的钢轨位置、钢轨损伤的维护比较困难, 这也是该轨道结构的限制所在。

5) 纵向混凝土梁式板式轨道与梯形轨道

纵向混凝土梁式板式轨道在混凝土板上设置了两个纵向混凝土梁, 钢轨通过扣件固定在该纵向混凝土梁上, 适用于铁路交通。类似地, 梯形轨道(图 15)由梯形轨枕、弹性支墩、混凝土底座构成。梯形轨枕由 PC 纵梁和钢管连接而成。这样纵向连续的混凝土梁、PC 纵梁都降低了传统离散分布的轨枕引起的不平顺性, 纵梁承受的载荷能均匀地分布到下部基础上, 具有一定的减振效果。此外, 梯形轨道是轻量化轨道系统, 行车安全, 使用寿命长, 维护保养方便, 特别适用于桥梁、隧道等需要减少构造物振动传递以及维修养护困难地段^[36]。梯形轨道在我国主要适用于城市轨道交通, 但在北京地铁 4 号线等线路铺设中, 小半径曲线钢轨上形成了波磨, 减振效果不佳。

6) 浮置板轨道

浮置板轨道是在混凝土道床板与基础间插入一固有频率远低于激振频率的线性谐振器, 通过增大振动体的振动质量和弹性, 利用浮置板质量惯性来平衡列车运行引起的动荷载, 从而达到减振的目的。相对于其它减振轨道形式, 浮置板轨道固有频率低, 减振效果好^[37]。按板下弹性阻尼元件可分为橡胶浮置板轨道和钢弹簧浮置板轨道。橡胶浮置板中的橡胶老化后隔振性能不佳, 且不便于安装施工和更换维护, 因此很快被钢弹簧浮置板(图 16)所取代。钢弹簧浮置板使用寿命长, 施工简便, 检查更换十分方便, 不影响地铁列车运行。浮置板轨道在我国主要适用于城市轨道交通, 表 5 总结了各种减振轨道结构性能的测试结果。

3.2.5. 大地传播路径控制

大地振动传播路径隔振也就是在大地中设置某

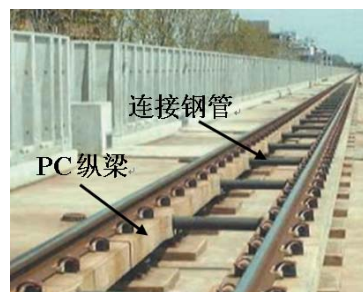


Figure 15. Ladder track
图 15. 梯形轨道

Table 5. Summary of the test results of various vibration damping tracks^[29,31,34-37]
表 5. 减振轨道结构减振性能测试结果总结^[29,31,34-37]

轨道结构	测点位置	激扰	工程造价 ^[29] (万元/km)	工作频率 (Hz)	减振效果 (dB)
弹性支承块轨道 ^[31] (LVT HA)	德国 EIFFAGE 铁路 (距轨道中心 0 m、 8 m、16 m)	“Dynaq”不平衡 质量激振器(10 Hz~100 Hz)	100 (普通弹性支承块 轨道)	>40	0~5*, 部分 5~10* (速度级)
弹性长轨枕轨道 ^[34]	首都机场线 T3 站 (扣件支承断面, 钢轨跨中断面)	落锤冲击 (轮对质量 1.2 t, 落高 15 mm)	暂无	40~160 >400 (1/3 倍频程)	0.4~13.4** (振动加速度级, 扣件支承断面) 3~11.6** (振动加速度级, 钢轨跨中断面)
减振板式轨道 ^[35]	暂无	暂无	有砟轨道的 1.3~1.5 倍	1000~4000	钢轨到结构物振动 传递损失明显
GETRAC A3 型轨道 ^[31]	德国 EIFFAGE 铁路 (距轨道中心 0 m、 8 m、16 m)	“Dynaq”不平衡 质量激振器 (10 Hz~100 Hz)	暂无	>40/50 (与载荷、测试 距离有关)	0~5*, 部分 5~10* (速度级, 100 Hz 处 振动可能反而增大)
SATO 型轨道 ^[31]	德国干线 (距轨道中心 8 m)	ICE 列车 160 km/h	暂无	40~160 (1/3 倍频程, 与载荷、测 试距离有关)	0~5*, 部分 5~10* (速度级, <40 Hz, 160~315 Hz 振动可能反而增大)
埋入式轨道 ^[31]	德国干线 (距轨道中心 8 m)	城郊列车 120 km/h	700~1000	63~250, 8~16 (1/3 倍频程)	5~15*, 0~10* (速度级)
纵向混凝土梁式 板式轨道 ^[31]	德国干线 (距轨道中心 8 m)	ICE 列车 160 km/h	暂无	20~100, >160	大部分 0~5* (速度级)
梯形轨道 ^[36]	浮置梯形轨道 (道床)	暂无	630	>30	最大达到 13.4** (速度级)
钢弹簧 浮置板轨道 ^[37]	柏林地铁 (隧道壁)	ICE-T 列车 轻轨 RE 列车	900	>10	0~30***

注: 表中*表示与有砟轨道相比; **表示与普通整体道床轨道相比; ***表示采用与不采用该措施相比。

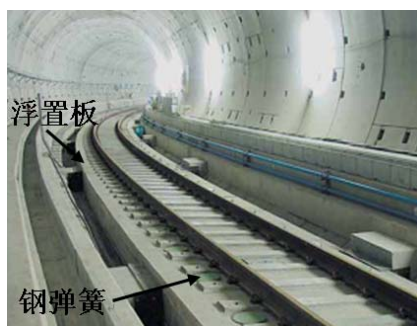


Figure 16. Steel spring supported floating slab track
图 16. 钢弹簧浮置板轨道

种类型的屏障, 列车在轨道上运行引起的振动波传播到隔振屏障时, 会发生透射和反射, 并在屏障两端和底部发生波的绕射, 一定程度上衰减了振动在大地中的传播。根据隔振屏障的形式可以将屏障分为连续屏障和非连续屏障。此外, 阻波块(Wave Impedance Block, 简称为 WIB)也是一种有效的隔振屏障。大地振动传播路径隔振不涉及车体及轨道结构的改变, 适用于铁路交通和城市轨道交通。

连续屏障的主要形式是隔振沟, 包括明沟、填充沟(填充物可采用膨润土泥浆、锯屑、沙子、粉煤灰及

泡沫材料等)及混凝土墙等。连续屏障的宽度对隔振效果影响不大(除非是非常窄的屏障), 其隔振效果主要取决于屏障的深度, 通常要求屏障深度要大于二倍的雷利波波长^[38]; 明沟和填充沟的有效隔振频率不小于 16 Hz^[39], 对高频的波隔振效果明显, 通常明沟比填充沟的隔振效果更好, 可以有效地屏蔽较低频的振动, 隔振范围约为 80 m, 隔振效果较稳定, 平均降幅 6~8 dB 左右^[40]。

连续屏障隔振效果好, 但由于土体中瑞利波波长一般较大, 要取得好的隔振效果, 必然要求较深的沟, 因此在实际应用中受到限制, 非连续屏障应运而生。非连续屏障类似于在连续屏障上进行截断, 形成孔列、桩列等, 土壤中传播的雷利波更容易发生绕射。国内外研究表明, 非连续屏障单体直径必须大于被屏蔽波长的 1/6 时^[38], 孔列、桩列具有一定的隔振效果, 若需获得好的隔振效果, 单体直径要大于 1/4 倍的雷利波长, 深度要大于两倍的雷利波长, 非连续屏障整体长度应为隔振区的 3 倍^[41,42], 这在实际应用中有一定的限制。因而, 提出了一种小截面、多排孔列或桩列的隔振方法, 多排孔列、桩列的隔振效果可

以与连续屏障的隔振效果相当^[43]，典型线路条件及运行工况下排桩、蜂巢桩两种地屏障隔振效果可达 5 dB 以上^[1]。

另外，在基岩单一土振动模型中，当简谐线载荷的频率低于土层中波传播的截止频率时，土层中没有波的传播。WIB (图 17)正是利用这一现象，在土层中人工设置一个类似于基岩的有限尺寸的板层来进行隔振，它对低频振动隔振效果很好，但对高频振动远场易出现放大现象，且场地性质对隔振效果有显著影响^[44]。新型的 WIB 隔振效果也非常明显，如蜂巢状截面的桩列组成的 WIB，对于频率在 3~5 Hz 的激励，有明显的隔振效果^[45]，其工程造价约 62,250 元/50m² (750,000 日本元/50m²)；高架桥系统的桥墩基础周围的地下设置环状的阻波屏障，环外地层的振动强度可下降 5~15 dB^[1]。

3.3. 受振对象被动隔振

受振对象被动隔振，通常也就是对建筑物的基础进行隔振，将建筑物浮置在弹性的基础之上，常用的有钢弹簧和者橡胶块(图 18)，它们的固有频率非常低，其中钢弹簧支承的固有频率约为 4 Hz，隔振效果很好，在国内外迅速发展起来，但价格也比较昂贵。我国上海音乐厅由于受到地铁振动的影响，遂将其一楼观众席置于弹簧阻尼隔振器之上，改造后的振动测试表明，地铁振动信号经过弹簧浮置系统后衰减达 70%，在隔离地铁振动影响上达到了满意的效果^[1]。受振对象被动隔振不涉及车体及轨道结构的改变，适用于铁路交通和城市轨道交通。

4. 总结

本文系统地阐述了铁路交通环境振动的产生及传播机理，国内既有线敏感地区由于铁路振动引起的

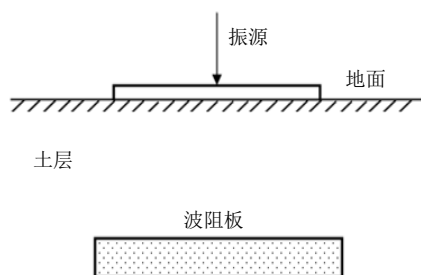


Figure 17. Wave Impedance Block (WIB)
图 17. 阻波块

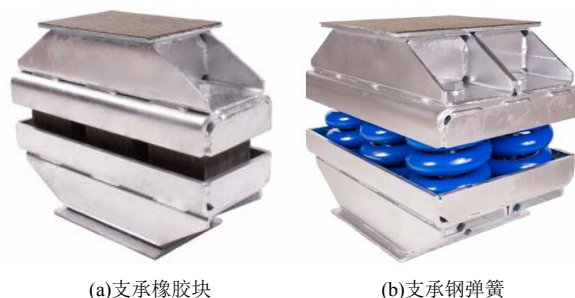


Figure 18. Vibration isolation foundation of building^[46]
图 18. 建筑物隔振基础^[46]

社会及环境影响现状以及我国有关环境振动控制的标准，全面收集并详细介绍了国内外铁路交通减振的相关措施，主要包括其有效工作频率范围及减振效果。

在减振目标值不同的地段，可以根据减振措施相应的工作频率范围及减振效果，且同时考虑减振措施的经济性对减振措施进行选择。如一般减振地段，可采用无缝钢轨、减振接头夹板、一般减振扣件、车轮镟修及钢轨打磨等措施；较高减振地段，可采用柔性扣件、轨枕垫、道砟垫、弹性支承块轨道、弹性长轨枕轨道、梯形轨枕轨道等措施；特殊减振地段，可以采用浮置板轨道、建筑物被动隔振等措施。

目前这些减振措施中，车轮镟修及钢轨打磨可作为铁路及轨道交通中日常维护必须环节，如何有效地进行车轮镟修及钢轨打磨以取得更好的减振降噪效果及经济收益，是今后发展的主要趋势；柔性扣件、梯形轨枕等措施目前在我国的使用效果并不理想，如何使其达到最佳的降噪效果也是今后的研究的一个方向；浮置板轨道、建筑物被动隔振等减振效果好，在我国的使用效果也比较好，但由于其价格昂贵，应根据特殊线路区段减振要求对其进行选择。

参考文献 (References)

- [1] 夏禾. 交通环境振动工程[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [2] ISO 2631/1, Mechanical vibration and shock-evaluation of human exposure to whole body vibration—Part 1: General requirements. 1997.
- [3] GB 10071-1988, 城市区域环境振动测量方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 1988.
- [4] High-speed ground transportation noise and vibration impact assessment. Washington DC: US Department of Transportation, Federal Railroad Administration (FRA), 2006.
- [5] GB 10070-1988, 城市区域环境振动标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 1988.
- [6] 邵龙海, 焦大化, 孙健. 京沪高速铁路环境影响评估(分报

- 告之二): 高速列车运行环境振动源强确定[R]. 北京: 铁道科学研究院环境评价与工程中心, 2002.
- [7] 陈建国, 夏禾, 肖军华, 曹艳梅. 列车运行对周围地面振动影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(11): 3113-3118.
- [8] 谭燕. 铁路交通引发场地振动的传播规律与隔振措施研究[D]. 华中科技大学, 2011.
- [9] 尹皓, 李耀增, 辜小安, 李晏良. 高速铁路环境振动特性研究[J]. 铁道劳动安全卫生与环保, 2010, 37(1): 32-36.
- [10] 中国铁道科学研究院. 武广客运专线联调联试及运行试验总报告[R]. 北京: 中国铁道科学研究院高速铁路系统试验国家工程实验室, 2009.
- [11] 孙家麟. 城市轨道交通振动和噪声控制简明手册[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2002.
- [12] 王福彤, 陶夏新, 崔高航, 郑鑫, 梁德勇. 地面城轨交通近轨道区域自由地表振动实测研究[J]. 振动与冲击, 2011, 30(5): 131-135.
- [13] C. E. Hanson, D. A. Towers and L. D. Meister. Transit noise and vibration impact assessment. Washington DC: Office of Planning and Environment, Federal Transit Administration (FTA), 2006.
- [14] 许国平. 高速铁路轨道减振降噪技术对策[J]. 铁道工程学报, 2004, 2: 26-30.
- [15] S. Lakušić, M. Ahac. Rail traffic noise and vibration mitigation measures in urban areas. Technical Gazette, 2012, 19(2): 427-435.
- [16] 董丙义, 刘彬. 钢轨减振接头夹板的研究与应用[J]. 铁道建筑, 2004, 8: 82-83.
- [17] B. Asmussen. Description of the vibration generation mechanism of turnouts and the development of cost effective mitigation measures. Railway Induced Vibration Abatement Solutions Collaborative Project (RIVAS), 2013.
- [18] M. Hansaka, K. Sato and S. Mamada. Development of rail noise isolating material. Quarterly Report of RTRI, 2007, 48(4): 215-220.
- [19] 魏鹏勃, 夏禾. 安装阻尼板的钢轨减振性能试验研究[J]. 北京交通大学学报, 2007, 31(4): 35-39.
- [20] D. Thompson. Railway noise and vibration: Mechanisms, modelling and means of control. Amsterdam: Elsevier, 2009.
- [21] W. Ho, B. Wong and D. England. Tuned mass damper for rail noise control. Nagahama: 10th International Workshop on Railway Noise, 2010: 85-92.
- [22] P. M. Nelson. Transportation noise reference book. London: Butterworths, 1987.
- [23] H. H. Moehren. The dynamics of low vibration track. Railway Track and Structures, 1991, 87(9): 39-40.
- [24] A. Bracciali, M. Pippert and S. Cervello. Railway noise: The contribution of wheels, basics, the legal frame, Lucchini RS products. Brescia: Lucchini 2009.
- [25] 韩义涛. 城市轨道交通减振降噪分析及工程措施[J]. 铁道工程学报, 2010, 2: 85-88.
- [26] 天津市市政工程设计研究院, 轨道建筑分院. 地铁轻轨线路设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
- [27] 李克飞, 刘维宁, 孙晓静, 丁德云, 袁扬. 北京地铁5号线地下线减振措施现场测试与分析[J]. 铁道学报, 2011, 33(4): 112-118.
- [28] <http://www.delkorrail.com>
- [29] 张慧慧. 轨道结构减振降噪技术综述[J]. 铁道建筑技术, 2011, S1: 171-175.
- [30] 练松良, 刘卫星. 轨道垫层振动特性的试验研究[J]. 城市轨道交通, 2001, 4: 9-14.
- [31] B. Asmussen. State of the art review of mitigation measures on track. Railway Induced Vibration Abatement Solutions Collaborative project (RIVAS), 2010.
- [32] P. Carels. R&D als economische hefboom: Geen overbodige luxe. VVBO Event, 2007.
- [33] 孙建安, 张传东, 朱德功. TDZIII型复合弹性轨枕的动力测试分析[J]. 铁道建筑, 2007, 1: 91-94.
- [34] 曾向荣, 郑瑞武. 弹性长轨枕在首都机场线的设计与应用[J]. 都市轨道交通, 2009, 22(3): 43-54.
- [35] 孙立. 减振型板式无砟轨道轨道板受力分析研究[J]. 铁道建筑, 2009, 8: 108-111.
- [36] K. Asanuma. Ladder structure and performance. Railway Technology Avalanche, 2004, 6: 35.
- [37] Th. Jaquet, R. Garburg. Measurements and investigations at the floating-track-bed system in the north-south tunnel in Berlin. Munich: 9th International Workshop on Railway Noise, 2007: 150-157.
- [38] R. D. Woods. Screening of surface waves in soils. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1968, 94(4): 221-314.
- [39] G. Segol, P. C. Y. Lee and J. F. Abel. Amplitude reduction of surface waves by trenches. Journal of Engineering Mechanics Division, 1978, 104(3): 621-641.
- [40] 罗锟, 雷晓燕. 地屏障在铁路环境振动治理工程中的应用研究[J]. 铁道工程学报, 2009, 1: 1-6.
- [41] J. Avilés, F. J. Sánchez-Sesma. Piles as barriers for elastic waves. Journal of Geotechnical Engineering, 1983, 109(9): 1134-1146.
- [42] J. Avilés, F. J. Sánchez-Sesma. Foundation isolation from vibration using piles as barriers. Journal of Engineering Mechanics, 1988, 114(11): 1854-1870.
- [43] G. Y. Gao, Z. Y. Li, Ch. Qiu and Z. Q. Yue. Three-dimensional analysis of rows of piles as passive barriers for ground vibration isolation. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2006, 26(11): 1015-1027.
- [44] H. Takemiya, A. Fujiwara. Wave propagation/impediment in a stratum and wave impeding block (WIB) measured for SSI response reduction. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1994, 13(1): 49-61.
- [45] <http://www.ed-techno.org/htm/jphtm/home.html>
- [46] <http://www.cdm.eu/home.html>