

文章编号: 1005-0523(2008)02-0001-05

# 高速列车诱发的环境振动研究综述

冯青松<sup>1,2</sup>, 雷晓燕<sup>2</sup>, 练松良<sup>1</sup>

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室 上海 201804; 2. 华东交通大学 土木建筑学院 江西 南昌 330013)

摘要: 高速列车诱发的环境振动是当今铁路交通领域的热点问题. 文中介绍了研究该问题的四种基本方法, 即解析的波数-频率域法、数值分析法、试验法和经验法. 按研究方法分类, 总结过去十多年里该领域的研究状况及进展, 提出了今后需进一步研究的若干问题.

关键词: 高速列车; 环境振动; 铁路交通

中图分类号: TB53

文献标识码: A

在过去几十年里, 高速铁路在世界各国获得高速发展. 然而随着列车速度的提高, 高速列车诱发的环境振动(包括大地振动和邻近建筑物振动)问题变得尤为突出. 高速列车沿铁路轨道运行, 其移动的轴荷载和由于轮轨接触表面不平顺而产生的轮轨动荷载激发车辆、轨道结构振动; 轨道振动经由轨道(以及高架桥梁和隧道)传入大地, 引起大地振动波; 当此振动波到达建筑物基础时进一步诱发邻近建筑物的二次振动和噪声. 这种振动对居民的日常生活、工作以及一些精密仪器设备的生产和使用产生很大的影响, 甚至危及到一些古建筑的结构安全. 因此在过去十余年里, 国内外针对此问题的研究非常活跃. 本文按照研究方法分类, 对该领域的研究成果进行系统的总结和介绍, 并提出今后需进一步研究的问题.

## 1 解析的波数-频率域法

这种方法利用空间傅立叶变换, 将轨道和大地在物理域内的偏微分方程转换到波数-频率域内的常微分方程. 在求解傅氏转换域内轨道和大地的振动解后, 再通过傅立叶逆变换得到物理域内的解. 当考虑层状大地时, 需采用传递矩阵(刚度或柔度矩阵)来表示傅氏转换域内各土层上下界面之间的应力和位移关系, 称为传递矩阵法. 当传递矩阵采用刚

度矩阵表示时, 土层分界面上应力和位移关系式中会出现指数项, 当自然土层厚度很大时指数项将变得很大, 这时只能将自然土层分成多个薄层, 然后用类似有限元的方法集成整体刚度矩阵或柔度矩阵, 即薄层法.

解析法以弹性波传递理论中的兰姆(Lamb)问题为基础. 兰姆问题研究点分布或线性分布的动荷载在半无限介质中产生的振动波传播问题. 随着高速铁路的兴起, 兰姆问题得到不断扩展, 被用来研究高速铁路引起的大地振动.

### 1.1 作用于大地表面的固定或移动谐荷载引起的三维层状大地振动

D. V. Jones 等采用以刚度矩阵表示的传递矩阵法研究了固定矩形分布谐荷载引起的层状大地振动响应, 并与部分实验结果比较, 吻合较好<sup>[1]</sup>. A. Ditzel 等采用以柔度矩阵表示的传递矩阵法计算了移动列车轴荷载引起的层状大地振动响应, 并分析了路基对大地振动的影响. 分析表明: 大地振动响应具有明显的多普勒效应; 轮轨不平顺激励下, 列车表现出振荡特性, 此时大地振动表面波的传播距离很远; 振动波在路基界面上具有明显的反射现象, 振动频率越高, 反射越显著<sup>[2-3]</sup>. 蒋通、程昌熟采用二次形函数表示的薄层法研究了层状大地振动, 得到薄层模型的合理设置指标, 显示了二次形函数薄层法比传统薄层法的优越性<sup>[4]</sup>.

收稿日期: 2008-01-10

基金项目: 973 项目(2007CB416607); 国家自然科学基金项目(50568002); 华东交通大学科研基金项目

作者简介: 冯青松(1978-), 男, 山西榆社人, 讲师, 博士研究生, 从事铁路环境振动研究.

## 1.2 轨道-层状大地的耦合振动

Victor V. Krylov 利用单层 Winkler 地基梁模型计算出移动列车轴荷载引起的轨枕下动反力,将此反力施加于大地表面,通过格林函数方法得到弹性半空间大地的振动响应.研究表明:当列车速度达到或超过大地中瑞雷波传播速度时,大地振动水平将有显著的增加<sup>[5]</sup>. Amir M. Kaynia 等将单根轨道梁与层状大地通过节点耦合,利用格林函数方法得到层状大地刚度矩阵,与轨道梁刚度矩阵组装形成系统整体刚度矩阵,分析移动轴荷载引起的大地振动响应,与实测结果吻合较好,并论证了加固路基对降低大地振动的有效性<sup>[6]</sup>. A. V. Metrikine 等将二维弹性土层模型与置于土层中的欧拉梁模型相结合,分析隧道中运行列车引起的大地表面振动响应,讨论了移动常荷载、谐荷载和固定随机荷载作用下大地的振动特性<sup>[7]</sup>.

X. Sheng<sup>[8]</sup>, B. Picoux<sup>[9]</sup> 等建立了轨道结构多层梁与层状大地耦合模型,分析了移动轴荷载引起的轨道、大地振动.国内谢伟平<sup>[10]</sup>、边学成<sup>[11]</sup>、雷晓燕<sup>[12-13]</sup>、聂志红<sup>[14]</sup>、和振兴<sup>[15]</sup>、李志毅<sup>[16]</sup> 等也都采用解析的波数-频率域法建立了轨道结构单层或多层梁模型,分析了高速列车引起的轨道和大地振动.研究表明:列车速度越高,轨道和大地的振动响应越大;当列车速度低于、接近和高于大地中表面波波速时,大地振动呈现出不同的特性;当列车速度达到某种临界速度时,将引起轨道和大地的强烈振动,高速列车通过软土地基线路时可能发生这种现象.

A. Karlstrom 等将钢轨考虑为 Euler-Bernoulli 梁,轨枕为各向异性的 Kirchhoff 板,有限宽度和高度的矩形路基置于三维层状大地上,建立了轨道-大地的耦合三维模型,分析了移动轴荷载引起的轨道和大地的振动响应,指出空沟对低频地面振动具有很好的隔振效果<sup>[17-18]</sup>.

台湾大学吴演声、杨永斌提出半解析模型分析高架铁路移动轴荷载引起的大地振动,利用弹性支承梁模型求得移动列车轴荷载引起的桥墩顶支反力,通过集总参数模型求出桥墩基础与周围土层间的相互作用力,由此作用力计算出弹性半空间大地的振动水平.研究显示,采用半解析法可有效分析高架桥梁振动、基础与土壤的耦合以及大地振动<sup>[19]</sup>.

## 1.3 车辆-轨道-层状大地系统的耦合振动

X. Sheng 等通过已建立的轨道-层状大地解析模型<sup>[8]</sup>得到轨道-大地柔度矩阵,利用轮轨接触点处车辆和轨道-大地的柔度矩阵,建立了车辆-轨道-大地耦合模型. G. Lombaert 等利用解析法和边界元法分别得到轨道柔度矩阵和大地柔度矩阵,组合形成轨道-大地的整体柔度矩阵,也利用轮轨接触点处的柔度矩阵建立了车辆-轨道-大地耦合模

型.利用各自模型, X. Sheng, G. Lombaert 等分析了移动轴荷载和钢轨表面竖向不平顺引起的轨道和大地振动响应.结果显示:由钢轨表面不平顺引起的车辆-轨道耦合振动对研究中高频率的大地振动是非常重要的<sup>[20-21]</sup>.

## 2 数值分析方法

解析的波数-频率域法适用于研究无限大弹性体的振动问题,但它对大地的几何形态有严格的限制,仅仅适用于具有平行界面的层状大地,而且仅限于线弹性问题.当大地具有复杂的几何形状或大地中包含有隧道、建筑物等异质结构物时,大地在纵向是不均匀的,这时准确地分析需采用数值分析法.数值分析法主要包括有限元法、边界元法、有限元和边界元混合法或其它的离散单元方法.

### 2.1 有限元法

有限元法可以方便地模拟复杂的材料参数和几何形状,但不能直接考虑无限边界问题,必须从无限介质中截取有限部分来离散研究.这时需引入人工边界条件,并保证该边界不阻挡波的传播,也不产生明显的反射波.在实际应用中,合理的人工边界很难建立,尤其对于三维问题来讲.解决的基本办法是使人工边界离荷载作用点尽量远,但这势必使所建立的有限元模型很大,增加计算成本,降低计算效率.由于研究问题的复杂性,当前采用的一般简化方法为将车辆-轨道-大地-建筑物系统分成几个子系统,利用有限元法和其它方法相结合分析大地振动,有限元模型大都采用二维平面模型或较小的三维模型.

L. Schillemans 通过实测传递函数的方法估算出列车激振力,利用土层-建筑物二维有限元模型研究了高速铁路穿越市区时产生的振动影响,并分析了减振型浮置板轨道<sup>[22]</sup>. Lars Hall 采用解析的 Winkler 地基梁模型求得移动列车轴荷载引起的激振力,采用二维和三维轨道-大地有限元模型研究地面高速列车引起的大地振动.研究显示:二维模型只适用于研究地面振动的某些特定方面,要获得更合理的解只能采用三维模型;在三维分析中由于路基和软土地基有较大的剪应变,故必须减小初始计算的土壤剪切模量<sup>[23]</sup>. R. Paolucci 等也采用 Winkler 地基梁模型求得移动列车轴荷载引起的激振力;利用土壤的二维或三维频谱单元方法分析地面高速列车产生的大地振动.结果表明:三维方法能较好的模拟振动波在大地中的衰减,二维分析结果仅仅在靠近轨道处或列车速度很高时才比较准确<sup>[24]</sup>.

台湾成功大学朱圣浩利用动轮单元模拟车辆,建立了车辆、轨道(以及高架桥梁)、大地为一体的

三维有限元模型,研究了地面和高架高速铁路引起的大地振动,并分析了土壤改良、隔振板、隔振墙、桩基础等隔振措施。分析显示:当列车速度超过土壤中瑞雷波波速时,大地振动将有显著的增加且其随距离的衰减变得很慢;振动波的方向和主频是列车速度、瑞雷波波速和车厢长度的简单函数;与其它隔振措施相比,土壤改良措施可更好的降低建筑物的竖向和横向振动<sup>[25-26]</sup>。Torbjorn等采用比例边界有限元法和普通有限元法相结合分析高速铁路引起的大地振动,证明了比例边界有限元法可有效解决无限大介质的振动问题<sup>[27]</sup>。

为了提高计算效率,浙江大学边学成采用2.5维有限元结合薄层单元研究了移动荷载引起的轨道和大地振动响应,指出大地振动不仅应考虑竖向振动,水平振动也不容忽视<sup>[28]</sup>。

## 2.2 有限元-边界元混合法

边界元法可自动考虑大地辐射阻尼,非常适合研究无限介质的振动问题,而不适用于研究具有不规则几何的结构振动。因此考虑土壤-结构耦合时,合适的方法为有限元-边界元混合法,近场中的隧道衬砌、轨道和建筑物结构采用有限元分析,远场中的大地采用边界元分析。

L. Auersch利用有限元法分析车辆-轨道结构子系统,边界元法分析大地子系统,各子系统间通过节点相互耦合,研究移动轴荷载、周期性轨枕支承、轮轨不平顺等对大地振动的影响。结果显示:移动轴荷载引起轨道和靠近轨道处大地低频振动;周期性轨枕支承引起轨道参数激振;大地高频振动主要由车轮不平顺引起,大地中频振动主要由轨道不平顺引起<sup>[29-30]</sup>。L. Andersen等采用有限元-边界元混合法,研究了高速列车移动轴荷载引起的大地振动,并分析了隔振沟和土壤改良的减振效果。分析显示:与填充沟和土壤改良措施相比,空沟可更有效降低大地振动<sup>[31]</sup>。

采用三维有限元-边界元混合法分析高速铁路环境振动需要巨大的计算工作量。为提高计算效率,G. Degrande等采用周期性有限元-边界元方法分析隧道-大地系统振动<sup>[32]</sup>;X. Sheng等假定结构沿轨道方向不变,提出波数有限元-边界元法研究地面和地下列车引起的大地振动<sup>[33]</sup>;台湾大学杨永斌提出2.5维有限元-无限元法分析地面列车引起的大地振动<sup>[34]</sup>。

## 3 试验和经验法

既有线路上运行列车引起的大地和已建结构物振动,可通过现场实测求得。然而要评估新建线路的环境振动或既有线路对新建结构物的振动影响时,

只能通过理论模拟或建立在试验基础上的经验方法求得。经验方法的基本思路为:已知既有线路上列车运行引起的参考振动水平,已知车辆、轨道、大地、建筑物各影响因素与振动水平的相关关系(通过大量实测或理论分析得出),根据评估的具体线路状况对参考振动水平进行合理修正,最后估计出铁路引起的大地和建筑物振动水平。

许多国家的铁路部门对高架、地面和地下常速铁路引起的大地和建筑物振动进行了大量实测,分析了铁路振动的产生和传播特性<sup>[35-40]</sup>。然而,针对高速铁路环境振动方面的试验却不多,典型代表为瑞典和比利时铁路部门的现场实测,通过试验着重分析了列车高速行驶对铁路振动的显著影响,并观测到高速列车以某临界速度行驶时引起的轨道和大地强振动现象<sup>[41-42]</sup>。在大量实测基础上,美国联邦铁路运输部门综合考虑了铁路环境振动振源、振动传播路径和受振体方面的各影响因素,提出了一套完整方法对高速铁路引起的噪声和振动进行预测评估<sup>[43]</sup>。C. Madshus, Christoffer With等也提出类似的经验方法用于线路初步设计阶段的铁路振动预测<sup>[44-45]</sup>。

## 4 需要进一步研究的若干问题

虽然人们在高速列车诱发的环境振动方面作了大量工作,取得了许多研究成果,但是还有许多问题需要进一步研究:

(1) 在各种解析模型中,车辆激振力大都考虑为移动谐波荷载或钢轨表面高低不平顺引起的竖向动荷载,轨道结构一般采用平面的多层梁模型,大地考虑为三维层状弹性介质,一般不考虑建筑物结构。今后应寻求建立车辆、轨道、路基、大地和建筑物为一体的三维解析模型,并考虑轮轨不平顺和各种可能引起振动的激振源。

(2) 当前解析法主要用于研究地面或高架列车引起的大地振动,今后可考虑对隧道、建筑结构物进行合理简化,利用解析法探讨地面或地下铁路列车运行引起的建筑物振动。

(3) 解析法仅适用于形状规则的状况,而且仅限于线弹性问题,正确有效的分析需借助数值分析方法。由于问题的复杂性,当前还没有专门的数值软件来考虑铁路环境振动。因此建立列车、轨道、路基、大地和建筑物为一体的三维数值模型,编制相应的专业软件是非常必要的。

(4) 有限元分析需引入人工边界条件,在二维分析中可采用一些成熟的边界如粘滞边界、透射边界等,今后需着重探讨三维分析中有效振动边界的设置。

(5) 有限元法和边界元法用于分析高速铁路环境振动问题时,都有其自身不可避免的缺点,有限元-边界元混合法将是今后研究中着重采用的方法。另外三维有限元-边界元数值分析需要巨大的计算工作量,故应研究更高效的数值算法,以提高计算效率。

(6) 在线路的初步规划、设计阶段需对线路两侧大量敏感点进行环境评估,若采用现场试验或理论分析,需花费大量的时间、资金,此时简便的经验方法将大有用处。今后需根据大量试验和理论分析结果,对既有的经验方法进一步简化、修正,提出满足工程设计要求的简化经验方法。

(7) 除了对高速铁路环境振动进行预测、评估外,对高速铁路环境振动的有效控制也是今后研究的重点。可从振源、振动传播路径和受振建筑物三方面入手,寻找有效降低高速铁路环境振动的减振、隔振措施,如设置弹性扣件、轨道弹性垫层、浮置板轨道等进行振源减振,在振动传播路径上设置隔振沟、隔振墙、波阻块、桩屏障等进行屏障隔振,通过受振建筑物基础设计达到基础隔振目的。

#### 参考文献:

- [1] D. V. Jones ,D. Le Houedec ,M. Petyt. Ground vibrations due to a rectangular harmonic load [J]. *Journal of Sound and Vibration* ,1998 212( 1) : 61 - 74.
- [2] A. Ditzel ,G. C. Herman ,G. G. Drijkoningen. Seismograms of moving trains: comparison of theory and measurement [J]. *Journal of Sound and Vibration* 2001 248( 4) : 635 - 652.
- [3] A. Ditzel ,G. C. Herman. The influence of a rail embankment on the vibrations generated by moving trains [J]. *Journal of Sound and Vibration* 2004 271: 937 - 957.
- [4] 蒋通 程昌熟. 用二次形函数薄层法分析弹性层状地基中的动力问题 [J]. *力学季刊* 2006 27( 3) : 495 - 504.
- [5] Victor V. Krylov. Vibrational impact of high - speed trains. I. Effect of track dynamics [J]. *J. Acoust. Soc. Am.* 1996 , 100( 5) : 3121 - 3134.
- [6] Amir M. Kaynia ,Christian Madshus ,Peter Zackrisson. Ground vibration from high - speed trains: prediction and countermeasure [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* ,JUNE 2000: 531 - 537.
- [7] A. V. Metrikine ,A. C. W. M. Vrouwenvelder. Surface ground vibration due to a moving train in a tunnel: two - dimensional model [J]. *Journal of Sound and Vibration* ,2000 234( 1) : 43 - 66.
- [8] X. Sheng ,C. J. C. Jones ,M. Petyt. Ground vibration generated by a load moving along a railway track [J]. *Journal of Sound and Vibration* ,1999 228 ( 1) : 129 - 156.
- [9] B. Picoux ,D. Le Houedec. Diagnosis and prediction of vibration from railway trains [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 2005 25: 905 - 921.
- [10] 谢伟平 胡建武 徐劲. 高速移动荷载作用下的轨道-地基系统的动力响应 [J]. *岩石力学与工程学报* 2002 21( 7) : 1075 - 1078.
- [11] 边学成 陈云敏. 列车荷载作用下轨道和地基的动响应分析 [J]. *力学学报* 2005 37( 4) : 477 - 484.
- [12] 雷晓燕. 高速列车诱发地面波与轨道强振动研究 [J]. *铁道学报* 2006 28( 3) : 78 - 82.
- [13] 雷晓燕. 高速铁路轨道振动与轨道临界速度的傅立叶变化法 [J]. *中国铁道科学* 2007 28( 6) : 30 - 34.
- [14] 聂志红 刘宝琛 李亮等. 移动荷载作用下轨道路基动力响应分析 [J]. *中国铁道科学* 2006 27 ( 2) : 15 - 19.
- [15] 和振兴 翟婉明. 高速列车作用下板式轨道引起的地面振动 [J]. *中国铁道科学* 2007 28( 2) : 7 - 11.
- [16] 李志毅 高广运 冯世进等. 高速列车运行引起的地表振动分析 [J]. *同济大学学报( 自然科学版)* ,2007 35( 7) : 909 - 914.
- [17] A. Karlstrom ,A. Bostrom. An analytical model for train - induced ground vibrations from railways [J]. *Journal of Sound and Vibration* 2006 292: 221 - 241.
- [18] A. Karlstrom ,A. Bostrom. Efficiency of trenches along railways for trains moving at sub - or supersonic speeds [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 2007 27( 7) : 625 - 641.
- [19] Yean - Seng Wu ,Yeong - Bin Yang. A semi - analytical approach for analyzing ground vibrations caused by trains moving over elevated bridges [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 2004 24: 949 - 962.
- [20] X. Sheng ,C. J. C. Jones ,D. J. Thompson. A theoretical model for ground vibration from trains generated by vertical track irregularities [J]. *Journal of Sound and Vibration* , 2004 272: 937 - 965.
- [21] G. Lombaert ,G. Degrande ,et. al. The experimental validation of a numerical model for the prediction of railway induced vibrations [J]. *Journal of Sound and Vibration* 2006 , 297: 512 - 535.
- [22] L. Schillemans. Impact of sound and vibration of the North - South high - speed railway connection through the city of Antwerp Belgium [J]. *Journal of Sound and Vibration* 2003 , 267: 637 - 649.
- [23] Lars Hall. Simulations and analyses of train - induced ground vibrations in finite element models [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 2003 23: 403 - 413.
- [24] R. Paolucci ,A. Maffei ,et. al. Numerical prediction of low - frequency ground vibrations induced by high - speed trains at Ledsgaard ,Sweden [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 2003 23: 425 - 433.
- [25] Shen - Haw Ju ,Hung - Ta Lin. Analysis of train - induced vibrations and vibration reduction schemes above and below critical Rayleigh speeds by finite element method [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* ,2004 ,24: 993 - 1002.
- [26] S. H. Ju. Finite element analysis of structure - borne vibration from high - speed train [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 2007 27: 259 - 273.

- [27] Torbjorn Ekevid ,Nils – Erik Wiberg. Wave propagation related to high – speed train A scaled boundary FE – approach for unbounded domains [J]. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* 2002 ,191: 3947 – 3964.
- [28] 边学成, 陈云敏. 基于 2.5 维有限元方法分析列车荷载产生的地基波动 [J]. *岩土力学与工程学报*, 2006 ,25 ( 11 ): 2335 – 2342.
- [29] L. Auersch. The excitation of ground vibration by rail traffic: theory of vehicle – track – soil interaction and measurements on high – speed lines [J]. *Journal of Sound and Vibration* 2005 284: 103 – 132.
- [30] L. Auersch. Ground vibration due to railway traffic – The calculation of the effects of moving static loads and their experimental verification [J]. *Journal of Sound and Vibration* , 2006 293: 599 – 610.
- [31] L. Andersen ,S. R. K. Nielsen. Reduction of ground vibration by means of barriers or soil improvement along a railway track [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 2005 , 25: 701 – 716.
- [32] G. Degrande ,D. Clouteau ,et. al. A numerical model for ground – borne vibrations from underground railway traffic based on a periodic finite element – boundary element formulation [J]. *Journal of Sound and Vibration* 2006 293: 645 – 666.
- [33] X. Sheng ,C. J. C. Jones ,D. J. Thompson. Prediction of ground vibration from trains using the wavenumber finite and boundary element methods [J]. *Journal of Sound and Vibration* 2006 293: 575 – 586.
- [34] Y. B. Yang ,H. H. Hung ,D. W. Chang. Train – induced wave propagation in layered soils using finite/infinite element simulation [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* , 2003 23: 263 – 278.
- [35] Kojiro FUJII ,Yasushi TAKEI ,Kiwamu TSUNO. Propagation properties of train – induced vibration from tunnels [J]. *QR of RTRI* 2005 46( 3 ): 194 – 199.
- [36] G. Degrande ,M. Schevenelsa ,et. al. Vibrations due to a test train at variable speeds in a deep bored tunnel embedded in London clay [J]. *Journal of Sound and Vibration* 2006 , 293: 626 – 644.
- [37] 夏禾, 张楠, 曹艳梅. 列车对周围地面及建筑物振动影响的试验研究 [J]. *铁道学报* 2004 26( 4 ): 93 – 98.
- [38] 蒋通, 张昕. 高架轨道交通引起环境振动的实测与数值模拟 [J]. *同济大学学报* 2004 32( 5 ): 565 – 569.
- [39] 闫维明, 聂晗等. 地铁交通引起的环境振动的实测与分析 [J]. *地震工程与工程振动* 2006 26( 4 ): 187 – 191.
- [40] 周云, 王柏生. 行驶列车引起的周边建筑物振动分析 [J]. *振动与冲击* 2006 25( 1 ): 36 – 41.
- [41] C. Madshus ,A. M. Kaynia. High – speed railway lines on soft ground dynamic behaviour at critical train speed [J]. *Journal of Sound and vibration* 2000 231( 3 ): 689 – 701.
- [42] G. Degrande ,L. Schillemans. Free field vibrations during the passage of a thalys high – speed train at variable speed [J]. *Journal of Sound and Vibration* 2001 247( 1 ): 131 – 144.
- [43] U. S. Federal Railroad Administration. High – Speed Ground Transportation Noise and Vibration Impact Assessment [R]. Washington D. C. : U. S. Department of Transportation 2005.
- [44] C. Madshus ,B. Bessason ,L. Harvik. Prediction model for low frequency vibration from high speed railways on soft ground [J]. *Journal of Sound and Vibration* ,1996 ,193( 1 ): 195 – 203.
- [45] Christoffer With ,Mehdi Bahrekazemi ,Anders Bodare. Validation of an empirical model for prediction of train – induced ground vibrations [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 2006 26: 983 – 990.

## A Review of Researches on Environmental Vibration Induced by High – Speed Trains

FENG Qing – song<sup>1, 2</sup> ,LEI Xiao – yan<sup>2</sup> ,LIAN Song – liang<sup>1</sup>

( 1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of Ministry of Education ,Tongji University ,Shanghai 201804 ,China;

2. School of Civil Engineering and Architecture ,East China Jiaotong University ,Nanchang Jiangxi 330013 ,China)

**Abstract:** Environmental vibration induced by high – speed trains is a hot issue in the railway traffic engineering. In this paper four fundamental methods developed for analyzing this problem ,i. e. analytical wavenumber – frequency domain approach ,numerical approach ,and experimental and empirical approach ,are introduced. The relevant literatures during the past decade are separated into these three categories and reviewed accordingly. The problems are presented for further investigation in the future.

**Key words:** high – speed train; environmental vibration; railway traffic

( 责任编辑: 王全金)