

城市轨道交通振动及噪声预测、
评估与控制技术丛书

地铁列车振动环境影响的 预测、评估与控制

刘维宁 马蒙 等 著



科学出版社

城市轨道交通振动及噪声预测、评估与控制技术丛书

地铁列车振动环境影响的 预测、评估与控制

刘维宁 马 蒙 等 著

本书得到北京交通大学研究生教育专项资金资助(No. 134185522)

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是国内首部专门针对地铁列车振动及其环境影响的著作。全书系统而全面地介绍了研究地铁振动环境影响的基本理论、基本方法及控制措施。全书共 10 章,内容涵盖研究背景及基础知识、地铁振动的产生与传播、地铁振动的评价与预测、地铁振动的环境影响及工程对策等。本书是作者及其研究团队近 20 年来研究成果的系统总结,同时也介绍了近年来国内外最新的科研成果。

全书注重基本概念和基本方法的引入和介绍,又紧密结合工程实践,对于从事轨道交通相关领域设计、环评和研究的科研人员及工程技术人员均具有指导和参考价值,同时也可作为高等院校土木工程、交通工程、振动工程、环境工程等专业的研究生教材和高年级本科生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

地铁列车振动环境影响的预测、评估与控制/刘维宁等著. —北京:科学出版社,2014

(城市轨道交通振动及噪声预测、评估与控制技术丛书)

ISBN 978-7-03-039704-1

I. 地… II. 刘… III. 地铁动车-列车振动-环境影响-研究 IV. U482.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 020109 号

责任编辑:魏英杰 杨向萍 / 责任校对:包志虹

责任印制:张 倩 / 封面设计:陈 敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014 年 1 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2014 年 1 月第一次印刷 印张:20 1/2

字数:413 000

定价:88.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



《城市轨道交通振动及噪声预测、评估与控制技术丛书》

编委会

主 编：

施仲衡(中国工程院,中国地铁工程咨询公司)

副 主 编：

刘维宁(北京交通大学隧道与地下工程系)

邵 斌(北京市劳动保护科学研究所)

编 委：（按姓氏笔画排序）

丁树奎(北京市轨道交通建设管理有限公司)

毛东兴(同济大学声学所)

任 静(北京城建设计研究总院有限责任公司)

刘 扬(北京地铁运营公司科技处)

刘加华(上海申通地铁集团有限公司技术中心)

孙 宁(中国铁道科学研究院工程咨询有限公司)

孙家麒(北京市劳动保护科学研究所)

吴永芳(深圳市地铁集团有限公司)

陈 骝(中国电子工程设计院)

陈文化(北京交通大学岩土工程系)

夏 禾(北京交通大学桥梁工程系)

辜小安(中国铁道科学研究院节能环保劳卫研究所)

程明昆(中国科学院声学研究所)

序

目前,我国已成为世界上地铁发展最迅速的国家,有两千余千米的线路正在建设。地铁在建设和运营期间应把对环境的影响降至最低,而地铁的振动及对环境的影响便是其中一个重要的课题。这一多学科交叉的复杂问题,近 20 年来逐步引起国内外学者的广泛关注。国外同行对地铁振动产生和传播的机理进行过深入的理论分析,并预见地铁运行产生的微振动会对各类敏感目标,如人、建筑物、仪器等造成潜在影响,然而对相关案例的研究却屈指可数。由于我国许多城市的地铁线路规划设计滞后于城市规划设计,因此近年来,随着北京、上海等城市大规模建造地铁,地铁环境振动影响问题日益凸显,一系列实际工程问题 and 研究课题摆在了国内地铁设计人员和科研人员面前。例如,振动标准的研究、地铁振动的预测与评价、解决振动问题的措施和手段等。可见,面向工程、解决问题是国内地铁振动研究的一大特点。

该书作者刘维宁教授及其研究团队长期从事地铁振动领域研究,参与过几乎所有北京地铁新线建设中遇到的环境振动影响研究,不仅有着深厚的理论基础,还具备丰富的工程经验。二十余年来,对地铁振动振源模型、传播模型的建立和发展,经验方法和测试方法的振动预测,新型减振轨道的试验和国产化等课题,他们都进行了深入的研究,很多研究成果直接用于北京地铁新线完成减振降噪设计。

该书是国内首部专门针对地铁环境振动的著作,编排合理、脉络清晰、内容翔实、案例丰富,同时全书论述清晰、理论严密。对地铁振动研究方法、振动控制标准、振动预测方法、振动控制措施等几个关键问题进行了详细总结、归纳和深入浅出的阐述。这是一本学术水平高、有重要工程参考价值的著作,不仅全面总结了作者以往的研究成就,还广泛借鉴了国内外同行的研究成果,并注重对基本概念和基本方法的介绍。

相信该书的出版将有助于我国轨道交通环境振动研究和年轻一代专业技术人员的培养。

中国工程院院士

施仲衡

前 言

随着我国各大城市地铁的飞速建设,地铁路网逐步加密,地铁列车引起的环境振动问题近年来受到广泛关注。地铁振动经由隧道结构、地层环境向外传播,进一步诱发临近建筑结构的二次振动和噪声。这种振动虽然振幅很小,但持续时间极长,不仅会对建筑物内居民的正常生活、工作、休闲娱乐造成影响,也会影响某些科研建筑内精密仪器设备的正常工作。此外,这种微振动可能诱发材料疲劳和地基沉降,这二者将对地面文物建筑、古旧建筑的安全性和完整性构成潜在威胁。由于一条地铁线路的规划要考虑吸引客流、缓解交通、促进周边经济发展等众多因素,因此城市区域地铁建设的需求与控制敏感建筑振动便构成一对矛盾体。近年来,环境振动问题常常成为制约地铁建设的瓶颈因素。

地铁引起的环境振动属于复杂的交叉学科问题,涉及轨道工程、隧道工程、岩土工程、土动力学、工程振动、测试技术等若干个学科领域,需要研究者了解不同学科的基本概念、基本理论和基本方法;对不同学科知识的掌握和融会贯通有助于深入理解地铁振动问题的基本理论。同时,本学科又具备应用性极强的特点,地铁振动的评价、预测、测试、实验和控制措施都需要将理论与工程实践紧密结合,解决实际问题。在我国地铁建设过程中,遇到一系列世界性的振动难题,我国学者和工程技术人员结合实际工程问题展开了相关科研工作,逐步完善了本领域的理论研究,找出了一套切实可行的评价预测地铁振动、解决振动问题的办法和措施,客观上大大促进了本学科的发展。

作者及研究团队长期从事轨道交通振动对环境影响的研究工作。自2000年以来,依托北京交通大学轨道减振与控制实验室,结合北京等城市地铁建设过程中遇到的实际振动问题,开展了一系列理论研究、现场测试与试验工作,并创新性地提出了一系列有效的预测方法和研究理念。研究工作先后得到国家自然科学基金:城市轨道交通引起的环境振动及防治对策研究(50538010),地铁列车运行引起隧道及自由场地动力响应(50848046),地下列车运行引起的环境振动预测模型研究(51008017),基于现场脉冲激励的地铁列车振动环境影响预测模型研究(51278043);中央高校基本科研业务专项资金:隧道结构新型减振措施研究(2013JBM061);教育部博士点基金:地下轨道交通新型减振措施的理论分析与试验研究(20110009120023)等项目资助。同时,研究团队还与比利时鲁汶大学、荷兰代尔夫特理工大学等高等院校进行了科研合作、学术交流、联合培养博士研究生等,研究成果得到国外同行的高度认可。近年来,课题组还与荷兰TNO研究院、

比利时 CDM 公司、英国萨尔福德大学、瑞典哥德堡大学等多家欧洲科研机构合作,进行货运铁路环境振动及有砟减振轨道的研究,并于 2011 年和 2012 年先后获得欧盟第七次框架计划科研项目(FP7:ACPO-GA-2011-266248)、科技部对欧盟科技合作专项经费(266248)的大力资助。

本书是在作者及研究团队研究成果的基础上经整合、加工、完善而成的,既注重介绍基本概念和基础研究方法,又注重理论与实际结合,在不少章节给出了相关工程案例。同时,本书纳入了课题组的最新研究成果,以及国内外最新的标准规范,各章后的参考文献可供感兴趣的读者就相关问题进行拓展阅读。期盼本书的出版能对读者有所裨益。

本书编写分工如下:刘维宁(北京交通大学)确定各章内容、制订全书大纲及负责全书的统稿和定稿工作,并撰写第 1 章、第 8 章主要内容及 9.3 节;马蒙(北京交通大学,中国铁道科学研究院)撰写第 4 章、第 5 章及 7.1 节、8.2 节,并参与全书统稿工作;刘卫丰撰写第 3 章主要内容及 6.3 节;孙晓静撰写第 10 章主要内容及 6.1 节、6.2 节;王文斌(中国铁道科学研究院)撰写第 7 章主要内容及 3.6 节;金浩、丁德云(北京城建设计研究总院有限责任公司)撰写第 9 章;李克飞(北京市轨道交通建设管理有限公司)、贾颖绚(北京经济管理职业学院)负责撰写第 2 章;张厚贵负责撰写 10.2 节;马龙祥、袁扬、吴宗臻参与第 5、6、10 章部分内容的撰写。

施仲衡院士、夏禾教授对本书的出版提出了许多宝贵的建议,施院士还在百忙之中为本书作序。

本书的出版离不开十余年来在研究团队奋斗过的每一位成员的努力,感谢张昀青、沈艳峰、由广明、翟辉、谢达文、苏宇、陈瑞春、王占奎、聂志理等已毕业的研究生。他们的研究成果在本书均有所体现。

限于作者水平,书中不足之处在所难免,诚盼读者不吝赐教。

作 者

2013 年 8 月

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 为什么要研究地铁列车振动问题	1
1.2 地铁列车振动环境影响的复杂性	3
1.2.1 列车振动产生机理	3
1.2.2 列车振动的影响因素	5
1.2.3 研究涉及的学科领域	5
1.3 研究地铁列车振动问题的一般方法	5
1.4 地铁列车振动环境影响敏感度与动态预测评价思想	7
1.4.1 环境振动敏感度及其评价方法	7
1.4.2 地铁环境振动影响的动态预测评价思想	12
1.5 振动与波动问题基础	15
1.5.1 描述振动的物理量	15
1.5.2 分析域	16
1.5.3 振动量的统计形式	19
1.5.4 振动量及减振量的评价方式	22
1.5.5 描述波动的物理量	24
1.6 本书编写说明	26
参考文献	27
第 2 章 地铁振源特性与列车动荷载模拟	28
2.1 地铁振源概述	28
2.2 地铁振源计算模型研究	31
2.2.1 车辆动力模型	31
2.2.2 轨道动力模型	32
2.2.3 轮轨系统激励模型	35
2.2.4 轮轨接触力学模型	36
2.2.5 分析求解方法	37
2.2.6 轨道不平顺	37

2.3 基于有限元法的车轨耦合计算模型	43
2.3.1 车辆模型	43
2.3.2 轨道模型	44
2.3.3 轮轨相互作用	46
2.3.4 算例分析	46
2.4 基于解析的车轨耦合动力模型	49
2.4.1 模型假设及分析思路	49
2.4.2 列车在直线轨道匀速行驶问题	53
2.4.3 列车在直线轨道变速行驶问题	56
2.4.4 列车在曲线轨道行驶问题	58
2.5 实测法与经验法	60
2.5.1 实测列车动荷载法	60
2.5.2 实测荷载数定法	61
2.5.3 经验分析法	63
参考文献	63
第3章 振动在土体中的传播	67
3.1 弹性波动问题概述	67
3.1.1 弹性波	67
3.1.2 波的描述方法及其在土体中的传播	69
3.1.3 波的反射与折射	70
3.2 阻尼及其对振动衰减的影响	72
3.3 地形对振动传播的影响	74
3.4 内部点源 Green 函数及其求解	75
3.4.1 基本运动方程	76
3.4.2 波动方程求解	78
3.4.3 刚度矩阵	83
3.4.4 形函数	86
3.4.5 三维水平成层半空间或全空间土体的位移 Green 函数	88
3.4.6 算例	91
3.5 移动荷载作用下的自由场动力响应	93
3.6 振动波动衰减现象与振动放大区问题	94
3.6.1 地表放大区研究概述	94
3.6.2 地表放大区产生原因分析	95
3.6.3 基于半空间模型的单频振动波动衰减特性	96
3.6.4 隧道内作用冲击荷载时地表振动响应特性	103
参考文献	107

第 4 章 环境振动评价与控制标准	109
4.1 振动对人体的影响	109
4.2 区域及不同类型建筑物振动控制标准	112
4.2.1 中国标准	112
4.2.2 国际标准	115
4.2.3 美国标准	117
4.2.4 英国标准	117
4.2.5 德国标准	118
4.2.6 荷兰标准	119
4.2.7 瑞典标准	120
4.2.8 丹麦标准	121
4.2.9 挪威标准	121
4.2.10 意大利标准	122
4.2.11 日本标准	123
4.2.12 西班牙标准	123
4.3 建筑结构的振动标准	124
4.3.1 国际标准	125
4.3.2 德国标准	125
4.3.3 英国标准	126
4.3.4 瑞士标准	128
4.3.5 美国标准	128
4.3.6 其他学者给出的建筑物容许振动建议值	129
4.4 古建筑结构振动标准	129
4.5 精密仪器设备的振动标准	133
4.5.1 通用振动标准	134
4.5.2 NIST 振动标准	139
4.5.3 中国振动标准	140
参考文献	142
第 5 章 地铁振动经验预测方法	147
5.1 基于实测的经验判断法	147
5.1.1 测试情况	147
5.1.2 地铁振动强度分析	150
5.2 经验预测公式与模型	153
5.2.1 描述振动衰减的经验公式	153
5.2.2 美国交通振动评价体系	156

5.2.3 瑞典的轨道交通振动评价预测模型	159
5.2.4 国外其他轨道交通振动预测模型	161
5.2.5 中国地铁建设环境振动评价方法	162
5.2.6 算例	165
参考文献	167
第6章 地铁振动数值预测方法	171
6.1 轨道基础-隧道衬砌-环境地层系统分析模型的基本理论	171
6.1.1 土层模型的基本假定	172
6.1.2 建立“隧道—地层系统”的控制方程	172
6.2 有限元法	174
6.2.1 动力有限元建模的若干问题分析	174
6.2.2 算例	184
6.3 周期性有限元-边界元法	187
6.3.1 周期性系统	187
6.3.2 移动轴荷载的计算表达	189
6.3.3 算例	192
参考文献	203
第7章 地铁振动测试预测方法	205
7.1 半数值半测试预测方法	205
7.1.1 方法概述	205
7.1.2 描述室内外两点振动传递的物理量及转换关系	207
7.1.3 测点位置的选择	212
7.2 通过实测传递率的预测方法	213
7.3 基于脉冲锤击试验预测建筑物内振动响应	215
7.3.1 原理和方法	215
7.3.2 实例分析	217
参考文献	224
第8章 地铁列车振动对特殊敏感目标的影响	225
8.1 地铁列车对精密仪器的振动影响分析	225
8.1.1 列车振动对精密仪器设备的影响及危害	225
8.1.2 国内外交通振动对精密仪器影响研究概况	226
8.1.3 案例分析	232
8.2 地铁列车对古建筑物的振动影响分析	244
8.2.1 交通振动对古建筑的影响	245

8.2.2 古建筑物的环境振动影响分析	248
8.2.3 案例分析	250
参考文献	257
第9章 振动测试与实验	262
9.1 压电式传感器	262
9.1.1 压电式传感器原理	262
9.1.2 压电式传感器使用注意事项	264
9.1.3 测振传感器的选择	264
9.2 测试和实验数据处理方法	265
9.2.1 自相关分析和互相关分析	265
9.2.2 互谱分析与相干函数	266
9.2.3 传递函数	266
9.3 振动测试	267
9.3.1 隧道振动测试	267
9.3.2 地表与敏感目标振动测试	268
9.4 振动实验	273
9.4.1 单频激振实验	273
9.4.2 落锤激振实验	276
9.4.3 模态实验	280
参考文献	283
第10章 减振与隔振	285
10.1 减振与隔振的基本原理	285
10.1.1 振源隔振基本原理	285
10.1.2 敏感目标被动隔振基本原理	286
10.2 振源减振技术	287
10.2.1 扣件减振	289
10.2.2 轨枕减振	291
10.2.3 道床减振	291
10.2.4 车辆	295
10.2.5 减振设计应避免的误区	297
10.3 传播路径的隔振	300
10.3.1 空沟隔振和连续桩墙隔振	301
10.3.2 波阻块	301
10.4 敏感目标被动减振与隔振	302
10.4.1 建筑物整体隔振方法	302

10.4.2 建筑构件减振设计方法	303
10.4.3 精密仪器隔振	304
参考文献.....	306
附录 北京交通大学轨道减振与控制实验室研究成果简介.....	309

第 1 章 绪 论

1.1 为什么要研究地铁列车振动问题

地铁列车振动及其环境影响是一门新兴的学科,它的产生和兴起直接源于城市对交通需求和沿线生活、生产对环境需求之间的矛盾。

随着我国工业化的迅速发展,城市规模逐渐扩大、人口持续增加,大城市道路交通条件严重恶化。城市轨道交通作为一种运量大、快捷、准时、方便的出行方式,同时具备低能耗、少污染等优点,在解决城市交通问题中具有特殊的地位和作用。截至 20 世纪末,全世界已有近 50 个国家和地区的 115 个城市建成了 200 多条地下铁道,线路总长超过了 7000 千米,每天有 4 万多辆客车往返于 3000 多个地铁站之间,运送着 5000 多万乘客。在国外,轨道交通已有 100 多年的历史,世界主要大城市基本形成了比较成熟与完整的轨道交通网,承担了城市大部分的客运量,缓解了城市交通拥挤的状况。例如,东京的轨道交通运输占全部客运量的 80%,巴黎占 70%,莫斯科占 55%。我国百万以上人口城市超过 48 座,截至 2011 年年底,已运营城市轨道交通的城市有 14 个,运营线路共计 56 条,总运营里程达到 1714 千米。此外,已经发展和规划发展城市轨道交通的城市总数超过 50 个,全部规划线路超过 400 条,总里程超过 1.3 万千米^[1]。

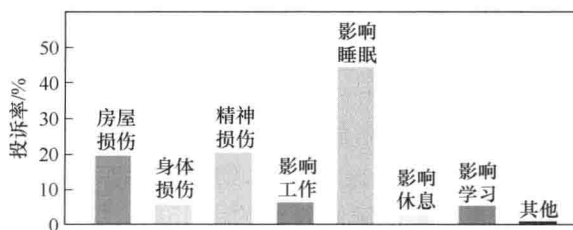
由于城市建设的需要,公路交通和轨道交通通常距离建筑物很近,有时甚至从建筑当中穿过,如图 1.1 所示。城市交通引起的振动问题也日益凸显出来。例如,地铁列车每天运行长达 20 小时,由此带来的振动问题对沿线居民、敏感建筑和精密仪器的影响必须得到重视。世界上很多国家经常出现由于列车的振动和噪声而引起沿线建筑物部分受损和附近居民投诉。图 1.2 为西班牙针对交通振动举行的主题为“No more vibrations! Solutions now!”的示威游行活动。

据有关国家统计,除工厂和建筑施工外,交通系统引起的环境振动(主要是建筑物的振动)是公众反映最强烈的振动污染,约占总投诉的 14.2%^[2]。日本的调查结果显示,交通引起的振动影响睡眠投诉约占 45%,其次是精神损伤和房屋破坏,分别占到 20%左右,如图 1.3 所示。

地铁列车振动的环境影响问题属于交通环境振动工程,许多交通振动研究的基本方法和基本理论适用于地铁振动问题。然而,地铁列车振动的研究又有其特殊性。由于地铁线路经常穿越城市的人流密集区,建筑物林立的闹市区、风景区和科技园区等,其上部或临近区域除了居民楼外,还常常会遇到歌剧院、音乐厅,带有精密



图 1.1 国内外各种城市交通近距离穿越建筑物

图 1.2 西班牙针对交通振动的示威游行活动^[4]图 1.3 交通振动污染的公众投诉率^[2]

仪器医院或科研单位的实验室,以及古建筑等对振动要求较高的敏感建筑物。如果地铁列车振动问题没有得到很好的解决,超过振动允许标准将会对这些建筑物内人们的正常生活和工作造成影响,干扰精密仪器的正常使用,严重时还可能造成不可估

量的经济损失。同时,对微振动极其敏感的古旧建筑物,由于地铁列车振动与周围地面交通振动的叠加,也会使其寿命大大降低,甚至使其安全受到潜在威胁。

由此可见,研究地铁列车振动具有非常重要的现实意义,其研究成果不仅可以直接指导地铁线路设计、轨道设计、建筑减隔振设计和房地产开发,还能最大限度地降低地铁运营对周边环境的影响、保证沿线居民的正常生活和工作。同时,也可以为建设绿色的城市轨道交通及其可持续发展做出不可估量的贡献。

1.2 地铁列车振动环境影响的复杂性

当地铁列车运行时,车辆轮轨产生的振动会经由隧道结构以及地层传递到附近建筑物内。这些振动多数属于低频有感振动,频率在 250Hz 以内,主要能量频段为 30~80Hz,地面峰值速度 0.1~1.8mm/s。当激励频率引起建筑构件共振时,建筑构件表面振动会向周围空气介质辐射声压波,这种固体噪声通常也被称作二次辐射噪声(secondary structure-borne noise),频率在 500Hz 以内。

因此,研究地铁环境振动问题并不是一件容易的事情,主要体现在:

- ① 地铁线路规划与被列车振动影响的建筑物之间矛盾较大。
- ② 影响因素众多,而且许多影响因素不确定性大。
- ③ 学科交叉性强,需要研究者掌握多学科的基础知识和研究方法。

1.2.1 列车振动产生机理

要研究地铁环境振动问题,了解地铁振动产生的机理尤其重要。

首先,地铁列车振动产生的机理与其他轨道交通(高速铁路、地面轻轨等)振动机理是相似的。列车行进移动所产生的行进波,在列车到达观察位置之前就已先期到达,这是移动荷载的波前作用所产生的振动,与列车轮轴分布和轨道支承方式无关。当列车通过时,由于钢轨在轨枕(扣件)上离散支承的特性,轮轨振动通过轨枕(扣件)转化成线状排列的分散定点式振动激励。这与离散间隔的振源激励作用在水面上引起水波的特性类似,如图 1.4 所示。轨枕将这种振动传入道床,再经由道床结构传递到隧道结构上,隧道结构将这些衰减后的振动波经由地层向周围传播。振动波的特性与轨道结构密切相关,也与行车速度、加减速度和曲线状态有关。研究表明,轮踏面不圆及钢轨表面不平顺是引起地铁列车振动的主要成分,所以对地铁列车振动特性研究的焦点也集中于此。

通常认为,列车振动主要由以下因素产生:

- ① 列车运行时的升沉、点头、摇头和蛇行,在曲线地段尤其明显。
- ② 轨枕离散支承,造成轨道结构刚度沿纵向的周期性变化,当车轮在钢轨上移动时,产生了周期振动荷载。

- ③ 车轮偏心产生连续不平顺。
- ④ 钢轨及车轮踏面不均匀磨耗引起的各种不平顺。
- ⑤ 列车各独立轮轴及其轴距变化在不同速度下,产生了不同频率的振动荷载。
- ⑥ 各种轨道连接处的刚度变化以及道岔等。

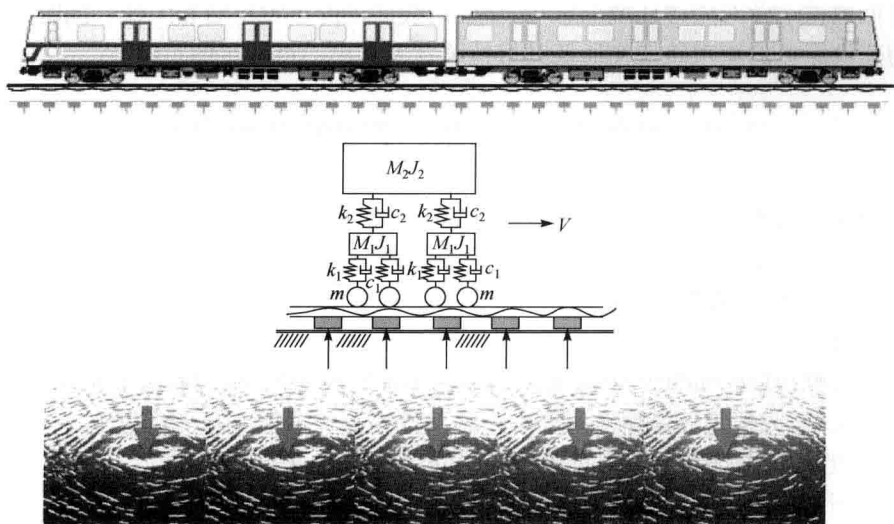


图 1.4 列车振动的线状排列的分散定点式振动激励示意图

其次,地铁列车在隧道内引起的环境振动与列车经过地面线路和桥梁结构所引起的振动有所不同。列车在隧道内产生的振动是来自地层深部的移动振源,依赖于隧道结构和地层结构的传播特性,如图 1.5 所示。这是地铁列车引发地面振动的主要特点,也是此类问题研究的困难所在,分析研究涉及至少 5、6 个子系统,

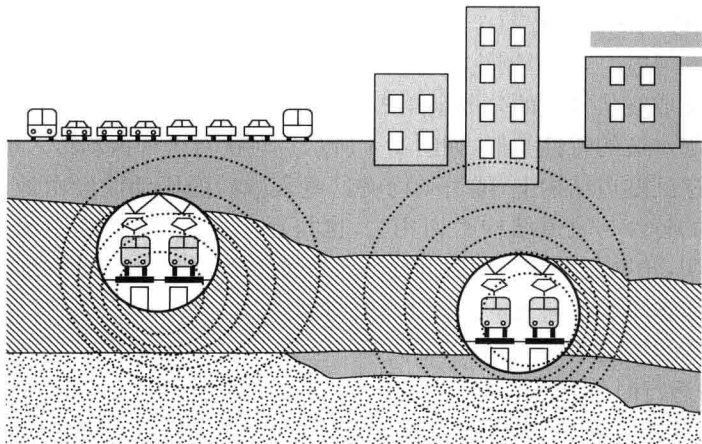


图 1.5 地铁引起的环境振动