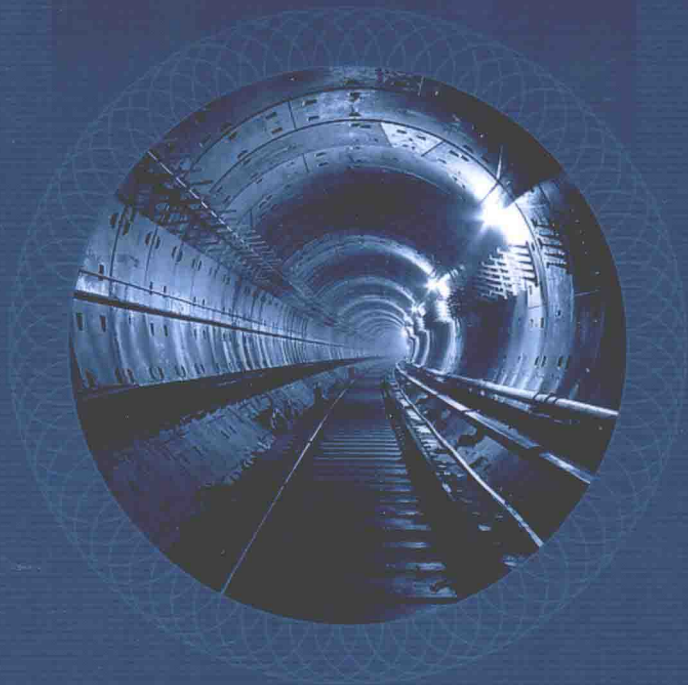


地铁地下结构施工新技术丛书



# 砂卵石地层盾构施工及 列车运行环境振动影响

苏艺 苏斌 陶连金 著

清华大学出版社

# 砂卵石地层盾构施工及 列车运行环境振动影响

苏艺 苏斌 陶连金 著

清华大学出版社  
北京

## 内 容 简 介

砂卵石地层在北京西北部地区广泛分布, 粒径大小及分布不均匀且时有胶结, 在地铁盾构施工及运营时会产生显著的环境振动效应, 导致邻近建筑的扰民及民扰问题。本书以北京地铁10号线工程为背景, 阐述了砂卵石地层盾构施工及运营阶段振动测试方法、传播与衰减规律、复杂条件下的数值分析方法等内容, 为地铁环境评价、减振降噪等突出问题提供了基础。

本书可供从事地铁设计、施工、运营及环境评价的科研、技术人员及相关专业的高等院校师生参考使用。

版权所有, 侵权必究。侵权举报电话: 010-62782989 13701121933

### 图书在版编目(CIP)数据

砂卵石地层盾构施工及列车运行环境振动影响/苏艺, 苏斌, 陶连金著. --北京: 清华大学出版社, 2015

ISBN 978-7-302-35406-2

I. ①砂… II. ①苏… ②苏… ③陶… III. ①卵石-地层-地下铁道-隧道施工-盾构法-研究-北京市 ②地铁动车-列车振动-环境影响-研究-北京市 IV. ①U231 ②U455.43 ③U482.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 033050 号

责任编辑: 秦 娜

封面设计: 陈国熙

责任校对: 赵丽敏

责任印制: 李红英

出版发行: 清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址: 北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编: 100084

社 总 机: 010-62770175 邮 购: 010-62786544

投稿与读者服务: 010-62776969, [c-service@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

质量反馈: 010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

印 装 者: 三河市中晟雅豪印务有限公司

经 销: 全国新华书店

开 本: 175mm×245mm 印 张: 9.5 字 数: 181千字

版 次: 2015年10月第1版 印 次: 2015年10月第1次印刷

定 价: 59.00元

---

产品编号: 052782-01

# 序



## PREFACE

城市轨道交通具有方便、高效、快速、舒适、节能等特点，使得许多大中城市把轨道交通列为首要的城市建设项目。但随着我国各地地铁建设的不断推进，地铁线网不断加密，正日益形成由多层高架道路、地下铁道等组成的立体空间轨道交通体系，从地下、地面和空中逐渐深入到城市中密集的居民点、文物、医院等环境敏感区，振动与噪声问题已经引起人们的广泛关注，成为新的社会问题。同时如何解决轨道交通的环境振动问题，提高轨道交通的服务水平，成为我国地铁建设的参建各方及科研人员的新课题和面临的新挑战。

目前，国内外学者都十分重视运营期地铁列车引起的环境振动问题。采取理论分析、数值计算、模型试验和现场实测等方法做了大量的工作，取得了丰硕的成果，研究成果极大地促进了地铁列车运营环境的评价与改进。但对于地铁项目建设施工期的振动问题，特别是盾构施工诱发的周围环境振动问题，国内外的研究工作还非常少见。

《砂卵石地层盾构施工及列车运行环境振动影响》就是以北京地铁 10 号线二期工程为背景，对浅埋砂卵石地层盾构施工及运营的振动问题进行了现场实测和理论分析，识别盾构施工期间的振动振源、振动传播规律并提出隔振降噪的主动控制措施，这些工作填补了盾构隧道在施工期间诱发振动的研究空白，获得了一些有应用意义的规律。研究成果提升了盾构施工环境振动的控制水平，为今后开展此类问题的研究积累了宝贵的数据和经验。

本书取材广博，内容丰富实用，是一本有理论、有实践、有测试、有分析的好书。我相信本书的出版将引领更多业界同仁关注地铁建设的环境安全问题，并推动在这一领域进行更加深入和广泛的研究，从而促进我国地下工程行业的技术进步。

中国工程院院士

# 前言



## FOREWORD

随着城市规模的扩大和城市人口的增多，地面交通日益拥挤，城市轨道交通已成为解决城市交通拥挤的有效途径。盾构法作为区间隧道开挖的成熟工法，具有对地层扰动小、地面沉降控制好、施工机械化程度高、安全性好等优点，但是在北京砂卵石地层浅埋区域，由于盾构施工引起的周围地面及邻近建（构）筑物的振动已经对人们的身体健康、生活工作环境质量以及精密仪器的正常使用造成了越来越严重的影响。所以轨道交通建设振动环境影响研究不仅仅关注运营阶段，更需延伸至建设阶段。在前人地铁运营振动问题研究的基础上，作者对浅埋砂卵石地层盾构施工及运营诱发环境振动在振源、振动传播等问题开展了重点研究工作，获得了一些有应用意义的认识和结论。

结合北京地铁 10 号线二期工程，分析了北京地区卵石层的物理、力学性质。分析卵石层浅埋条件下北京典型的成层地层振动波向不同性质介质透射、折射的规律。在现场开展盾构施工诱发振动的测试工作，识别出的振源为：刀盘掘进、电瓶运输车运行及后配套车设备振动，并对不同振源诱发振动时域、频域进行分析，得出对地表环境影响最大的为刀盘掘进，其次为电瓶运输车，后配套车设备振动对地表环境的影响可以忽略。

针对刀盘掘进诱发振动的时空复杂性，采用现场时间-空间同步的方式进行测试。通过对多个工点、不同粒径、不同形式盾构设备进行掘进振动测试试验，得到卵石地层刀盘掘进诱发环境振动特性及传播规律如下：刀盘掘进振动幅值在空间上存在较明显的规律，其中刀盘上方及前方幅值最大，并且水平幅值大于竖向值；其次为刀盘两侧振动幅值，水平向与竖向幅值相当；刀盘后方幅值最小，水平向与竖向幅值相当。掘进诱发地层振动频率在几赫兹到 100Hz 均有分布，振动传播过程中频率有所衰减，松散地层土体中高频衰减较快。刀盘附近地表振动感知明显，刀盘掘进振动影响范围在 20m 左右，刀盘附近地表最大 Z 振级超过 80dB，离刀盘 20~30m 振级低于 60dB。

在输入刀盘掘进诱发的环境振动波情况下，通过有限元模型分析了框架结构对掘进振动波的振动响应及传播规律，由于盾构掘进诱发振动以中高频为主，与结构自振频率具有较大差异，使振动峰值和频率不断衰减，其中水平向衰减较为明显，但水平向和竖向振级均有所放大，基于离散元原理对地表砌体结构进行振动响应分析，发现砌体结构对振动存在放大效应，并以低频为主。

将振动信号时频分析技术用于盾构诱发振动信号分析。在此基础上对刀盘掘进诱发振动的非平稳信号进行时频联合分析,结合盾构掘进试验过程中盾构刀盘转速、扭矩、推力等盾构参数,分析其与振动幅值的关系,以获取掘进过程主动减振措施依据,当盾构掘进通过较为敏感区域时,可以通过适当减小扭矩、推力及刀盘速度进行施工,以减小对地表振动的影响。

由于砂卵石浅埋使地层呈现“上软下硬”状态,振动波通过地层界面向上透射和折射而形成地表振动放大区,为此建立有限元-无限元耦合模型,分析单点、多点激振条件下地表振动衰减规律:单点激振分析中,中低频激振下地表放大区在20~80m范围,上下地层差异越小,加速度峰值放大越明显。上层土厚度对中低频影响较大。双孔隧道多点激振条件下,平行隧道之间或上方区域振动叠加效应明显,振动加速度幅值大于其他区域,隧道距离增加,远场放大区放大幅度有所增大。上下并行隧道则随下方隧道深增加,地表振动幅值逐渐减小,但远场放大区放大幅度增大。

对地铁10号线二期部分典型区段进行振动环境量测,通过对隧道内整体道床、地表、建筑物内进行振动量测,结果表明隧道道床及结构上振动响应的频率在0~120Hz均有分布,竖向加速度幅值大于水平向加速度幅值,其中幅值较大的主要为低频段0~10Hz和中频段30~80Hz,地表振动以20Hz中心频率振动为主,当振动在结构中传播时,幅值衰减不明显,由于结构形式不同,部分楼层甚至稍有放大,多以30Hz以下中低频振动为主。

通过对10号线二期典型砂卵石地层盾构施工诱发的振动监测及衰减规律研究,可以评价振动环境效应,在影响较大的区域,通过隧道内调整盾构施工参数及砂卵石地层改良可有效降低振动效应。通过在14号线大盾构施工地面振动测试,幅值小到可以忽略,证明地层土体的粒径及胶结状态是振动控制因素。运营阶段地面振动环境超标或扰民严重的地段无一例外地处于砂卵石地层中。这种规律和认识对于新线规划、设计、环境评价及振动控制提供了依据。

本书由苏艺、苏斌、陶连金著,汪国锋、郭飞、黄俊、胡友刚、张波、鲍艳、吴精义、武润利、孙希波、韩铁莲、贾大鹏、李积栋、侯森、董洪昌、刘璐、孟涛、蔡东明、周明科、闫冬梅、杨丁铭、边金、刘春晓等也参加了本书的编写工作。

在现场监测过程中,我们得到了中铁十六局、北京勘察设计研究院等单位的大力支持,没有他们的帮助和支持,现场监测工作不可能如此顺利。

由于施工期间盾构诱发的振动监测鲜有先例,本书中的测试方法及研究方法虽有新意,但研究结果仅供同行参考,加之作者水平及认识有限,书中难免有不当之处,恳请读者批评指正。

编者

2014年12月于北京

# 目录

## CONTENTS



第1章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.1.1 轨道交通环境振动影响	1
1.1.2 不同阶段轨道交通诱发振动影响的特点	5
1.2 盾构隧道引起环境振动问题的研究内容及研究方法	6
1.2.1 研究内容概述	7
1.2.2 研究方法概述	8
1.3 国内外研究现状	9
1.3.1 地层中振动传播及衰减规律研究	9
1.3.2 振源问题研究	14
1.3.3 减振、隔振方法研究现状	17
1.4 本书的主要内容	19
参考文献	19
第2章 北京地区砂卵石地层特征及盾构施工振源分解	25
2.1 北京砂卵石地层特征	25
2.1.1 砂卵石地层成因	25
2.1.2 北京地区砂卵石地层特征	27
2.1.3 砂卵石及其上覆土层力学特点研究	32
2.2 盾构施工过程中诱发振动振源识别及特性研究	34
2.2.1 施工过程振源识别	34
2.2.2 振动特性测试研究	35
2.2.3 盾构施工振动与常见振源诱发振动比较	47
参考文献	48
第3章 盾构掘进诱发环境振动的传播及衰减规律	49
3.1 盾构掘进诱发环境振动的实时监测	49
3.1.1 测试场地选择	49
3.1.2 盾构掘进诱发环境振动测试实施	54

3.1.3	振动实测方法及要求.....	57
3.2	环境振动数据处理、分析方法.....	58
3.2.1	振动数据处理方法.....	58
3.2.2	振动数据分析方法.....	61
3.3	A 区间盾构掘进诱发振动传播规律分析.....	63
3.3.1	地层—地表测点时域—频域分析.....	64
3.3.2	盾构掘进诱发振动空间传播规律分析.....	69
3.3.3	盾构掘进诱发环境振动的评价.....	72
3.4	B 区间盾构掘进诱发环境振动传播规律分析.....	74
3.4.1	地表测点时域-频域分析.....	74
3.4.2	地表振动传播、衰减规律分析.....	76
3.4.3	盾构掘进诱发环境振动评价.....	77
	参考文献.....	78
<b>第 4 章</b>	<b>盾构掘进诱发振动对建筑物的影响及主动控制措施</b> .....	<b>79</b>
4.1	框架结构环境振动响应研究.....	79
4.1.1	结构模型选择.....	79
4.1.2	振动波输入及阻尼矩阵.....	80
4.1.3	建筑物受环境振动影响分析.....	81
4.2	砌体结构环境振动响应.....	85
4.2.1	离散元原理.....	86
4.2.2	离散元在砌体结构环境振动评价中的应用.....	87
4.2.3	关于用耦合方法实现砌体结构地铁施工及运营环境影响评价的探讨.....	90
4.3	掘进振动的主动控制措施.....	91
4.3.1	盾构掘进参数选取与分析.....	92
4.3.2	地层振动与掘进参数的相关性.....	93
	参考文献.....	101
<b>第 5 章</b>	<b>地铁运营诱发环境振动影响的有限元-无限元分析</b> .....	<b>102</b>
5.1	地铁振动数值模拟原理及关键问题.....	102
5.1.1	有限元-无限元耦合原理.....	103
5.1.2	振动问题运动方程及解法.....	105
5.1.3	Newmark- $\beta$ 法及其稳定性.....	106
5.1.4	阻尼矩阵.....	107



# 目 录

5.2 成层土地铁振动地表放大区特性 .....	108
5.2.1 地表振动放大区现象.....	108
5.2.2 有限元-无限元耦合数值模拟模型 .....	110
5.2.3 成层半空间单点埋置振源地表振动衰减.....	113
5.2.4 成层半空间多点埋置振源地表振动衰减.....	116
5.2.5 列车荷载作用下地表振动衰减计算.....	122
5.3 砂卵石地层地铁运营振动环境影响实测 .....	125
5.3.1 测试目的及方案.....	125
5.3.2 测试结果及其分析.....	126
参考文献.....	137
结语.....	139

## 绪 论

### 1.1 研究背景

#### 1.1.1 轨道交通环境振动影响

地下轨道交通作为现代化城市重要的交通方式，具有大运量、安全、快捷、舒适的特点，同时轨道交通能有效减少污染排放而改善空气质量，这是其他交通方式所无法比拟的，正是由于这些特点，轨道交通在城市建设中得到了迅猛的发展，我国规划、准备建设和已建设轨道交通的城市有 20 多个，已规划城市轨道交通网总里程达到 3500 公里。以北京轨道交通建设为例，力争未来几年每年至少建成一条轨道交通线路，为落实规划目标，北京轨道交通建设已进入一个快速、跨越式发展的阶段。未来北京轨道交通在建线路将形成“三环、四横、五纵、七放射”的线网格局，如图 1-1 所示。如此庞大的建设规模和投资规模，在国内外轨道交通建设发展史上前所未有的。



图 1-1 北京地铁规划图

由于很多线路经过人口密集区域、重要单位及旅游景点等，特别是线路多离居民区、医院、学校、文物古迹等较近，甚至穿过该环境敏感区域，使得轨道交通线路改善人们出行方式的同时，对环境的负面影响也相继产生。其中振动对人们生活环境和工作环境的影响引起了普遍关注，国际上已把振动列为七大环境公害之一<sup>[1~5]</sup>，并开始着手研究振动的污染规律、产生原因、传播途径、控制方法以及对人体的危害等。据有关国家统计，除工厂、企业和建筑工程外，交通系统引起的环境振动（主要是引起建筑物的振动）是公众反映中最为强烈的一项。

北京地区砂卵石地层是一种典型的力学不稳定地层，其基本特征是级配良好、无胶结，卵石粒径大小不等，且卵石空隙多被中、粗砂充填，在无水状态下，颗粒之间点对点传力，地层反应灵敏。地铁区间隧道建设在条件允许情况下优选盾构掘进施工（图 1-2），但盾构机在砂卵石地层中施工刀盘（刀具）和螺旋输送机以及密封舱内壁磨损严重，而且盾构机掘进过程中产生的振动和噪声对周边环境影响较大。刀盘旋转切削时，刀盘与卵石层接触压力不等，导致刀头振动，引起地层及地表产生振动，地层中的大块卵石、砾石越多，粒径越大，这种振动程度就越大。

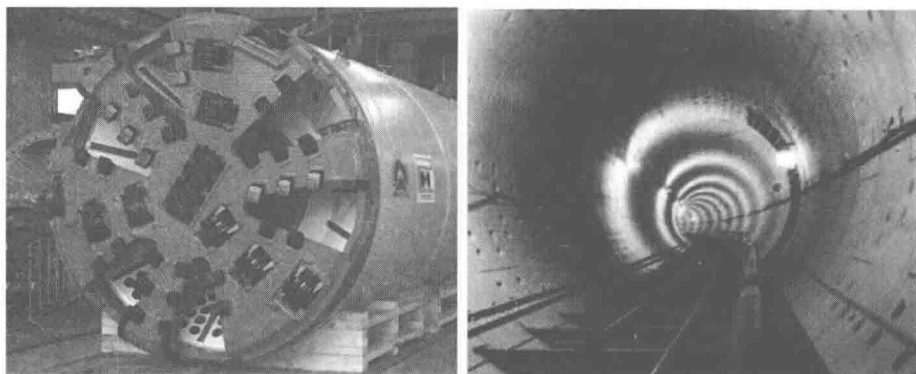


图 1-2 盾构设备及隧道

盾构掘进施工中除了刀盘与地层作用产生的振动还涉及渣土车辆轨道不平顺等诱发的振动，振源呈现多样性。盾构施工中管片运输及出渣车辆因临时铺轨平顺性远比运营时轨道差，虽然车辆运行速度较慢，但由于载重量大，车轮在钢轨上的滚动与撞击作用而激发轨道结构振动，经钢轨及金属轨枕直接向隧道结构传递，再经隧道结构通过地层传递至地表，并通过表层土向邻近的建筑物传播，从而诱发地面建筑物的振动响应（图 1-3），因此诱发的振动传至地表对地面影响同样明显。

当地铁线路近距离穿越地表建（构）筑物时，轨道交通诱发的振动易对地表环境产生不利影响。当盾构掘进近距离穿越对振动敏感的居民区时，地表振感明显。以北京地铁 10 号线二期工程为例，整条线路穿越区周边的居民楼房、平房等

更是数不胜数，全线区间下穿民房近 10 万平方米，由于盾构下穿期间的扰民及民扰事件时有发生，对盾构区间隧道的施工造成极大困难，这是在其他地层施工中没有见到的现象。

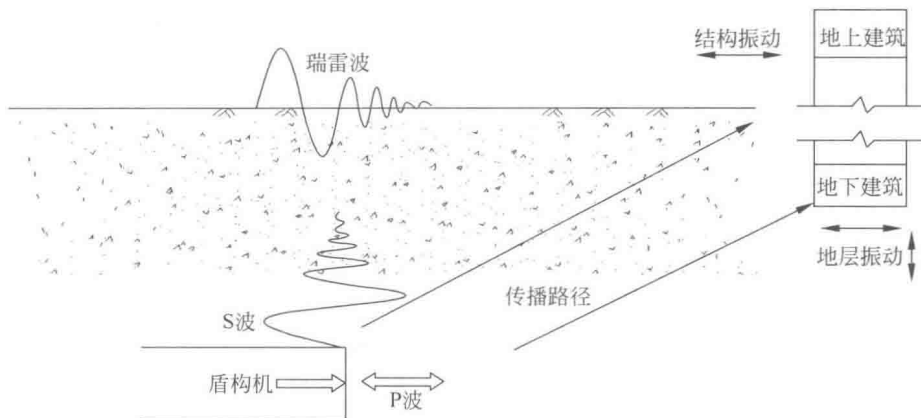


图 1-3 地铁施工引起的环境振动

砂卵石地层盾构隧道施工及运营中产生的振动对周围环境影响是多方面的，主要包括以下几个方面。

(1) 对居民正常生活、休息的影响

在振动对人体的影响因素中，振动频率、幅值是重要指标。人体能够感知的振动频率范围是 1~1000Hz，其中对 1~80Hz 的振动特别敏感，这主要是因为人的各种器官的共振频率集中在这个范围内(图 1-4)<sup>[6]</sup>，人对 4~8Hz 竖向振动以及 1~2Hz 的水平振动最为敏感。当身体各部分器官固有频率和外界传来的振动频率一致或接近时，就会引起器官的共振，此时对器官的影响和危害最大，特别是针对人体泌尿、消化、神经、运动等多个系统的影响和危害。

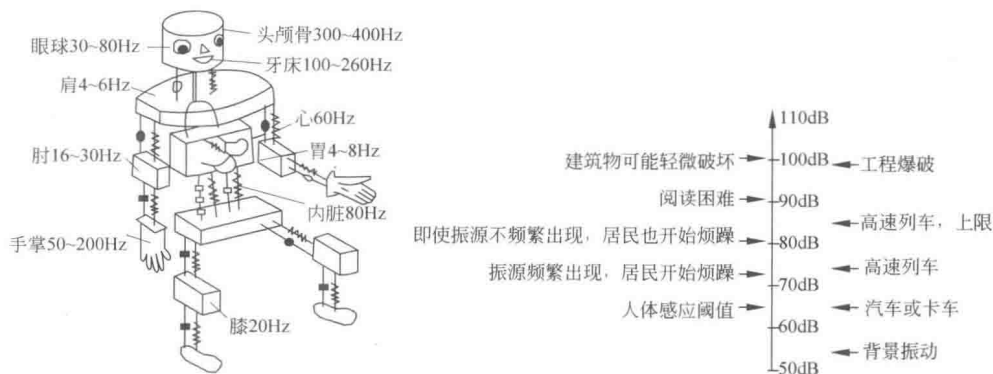


图 1-4 各种振源振级与人体反应关系

振动影响居民正常生活的表现除振动幅值、频率的大小外,振动的持续性也是影响因素之一,据盾构施工现场的报告,距开挖面 20m 范围内均清晰感知振动,掘进面附近振感强烈。在盾构掘进工程中陆续收到扰民指控,显然是由于振动的持续发生引起的。盾构掘进过程中引起的噪声持时达 30min/环,而运营阶段则持时短,但每间隔几分钟便出现振动响应,每个阶段对人的正常工作、休息产生干扰。

### (2) 对振动敏感区域的影响

振动敏感区域如医院、音乐厅、精密实验室等对振动控制有着最为严格的要求,是振动控制领域的重点和难点。目前轨道交通对敏感区域的影响主要体现在运营阶段,区间掘进阶段由于总体持时较短,从一般建筑物接收到振动到穿越建筑物一定距离总体时间为 50~100h,而运营阶段总体持时长,振动影响时间多与敏感区域工作时间相冲突。例如上海地铁 10 号线对上海音乐学院实验剧场、排演中心和教学楼工程的振动影响<sup>[7,8]</sup>,北京地铁 4 号线对北京大学物理实验基地的影响<sup>[9-13]</sup>,都是较为典型的轨道交通对振动敏感区域影响的案例。

### (3) 振动对地表建(构)筑物的影响

在砂卵石地层盾构掘进过程中,振动传到地表,当振幅较大、频率较低时可能会对地面建筑具有造成破坏、产生不均匀沉降等风险,特别是对线路穿越多层建筑、平房建筑以及对振动敏感的古建筑物时,问题显得更加突出。而地铁运营阶段产生的振动经土层传至建筑物会诱发结构的二次振动,结构二次振动实质为结构内部构件与外部激励中的与其自振频率相等或相近频段发生的共振反应。当振动的优势频率与结构构件的自振频率相差较远时,结构二次振动反应较小,当环境振动的优势频率与结构构件的自振频率相近或一致时,结构二次振动反应最强烈,危害也最严重,长期振动影响造成建(构)筑物建筑装饰破坏甚至结构疲劳破坏。

早在 20 世纪 60 年代国外便开展了交通诱发振动对古建筑的影响<sup>[14-18]</sup>研究,而国内 80 年代在轨道交通诱发振动对地表古建筑物等影响主要集中在洛阳、西安、北京等古都。洛阳龙门石窟位于河南省洛阳市郊 13km,有香山(东山)与龙门山(西山)两山对峙,著名的龙门石窟雕刻艺术群就密布于两山的崖壁上,20 世纪 80 年代就对石窟附近焦枝铁路及地表交通诱发振动对其影响进行研究<sup>[19,20]</sup>。为解决西安地铁 2 号线造成明古城墙、钟楼的振动影响,采取了使用钢弹簧浮置板轨道减振和古建筑加固等措施(图 1-5),许多学者对振动对明城墙和钟楼的影响进行了实测和理论研究<sup>[21,22]</sup>。在北京地区,地下直径线对正阳门城楼及箭楼等古建筑的振动影响<sup>[23]</sup>,北京地铁 4 号线下穿万松老人塔等<sup>[24]</sup>也引起了关注,随着国内主要城市内轨道交通的建设,轨道交通诱发振动与古建筑保护的矛盾不可避免,可靠的隔振、减振技术逐渐成为研究热点。



图 1-5 明城墙及钟楼保护措施

### 1.1.2 不同阶段轨道交通诱发振动影响的特点

砂卵石地层轨道交通诱发振动无论是建设阶段的盾构掘进还是运营阶段的列车荷载，一般都具有以下几个特点。

#### (1) 振源复杂性

盾构掘进阶段振源：刀盘切削砂卵石地层振动呈现随机性，难以用数学模型进行描述，而渣土运输车辆运行速度及轨道铺设受人为影响，不能完全套用传统铁路车辆-轨道系统振源形式。

运营阶段振源：车辆-轨道是一复杂系统，列车运行时轮轨间作用有撞击振动、滑动振动、滚动振动，振动振源随着车辆形式、轨道形式、车辆运行速度等因素的变化而变化。

#### (2) 传播途径影响因素多

轨道交通振动的基本传播途径就是振源—传播途径—受振动影响的对象，与噪声传播较为类似。当地层条件较为复杂，如上、下地层差异较大（类似浅埋砂卵石地层）时振动经土介质传播，传至地表进而引起地面建筑物振动，其弹性波具有横波、纵波、面波合成的复杂波动现象，在掘进阶段，传播途径中主要影响因素是地层特性，运营阶段传播途径则较为复杂，列车振动传播路径为钢轨—扣件—轨枕—道床—隧道结构—地层—地面—建筑物、人体、设备，传播过程影响因素多<sup>[25]</sup>。

### (3) 受振体振动响应差异大

地表建(构)筑物振动感应程度取决于地基弹性、建筑物基础形式和深度,建筑物设计和结构形式,甚至与建筑物内装饰及家具摆放位置等,随着振源传至建筑物基础的振动波幅、频率特性不同,建筑物内产生的振动响应又存在差异性。

### (4) 振动评估、控制难度大

轨道交通建设的目的是方便民众出行,所以线路连接居民区、商业区、工作场所及旅游休闲区,因此与这些区域环境问题多有冲突,以北京为例,作为国内首个修建地铁的城市,到2015年,运营总里程将达到666公里,形成三环、四横、五纵、八放射的轨道交通网络;到2050年将全部建成北京轨道交通线网,累计运营里程预计达到1053千米,城市中心区域科研单位、古建筑及剧院场馆多,地铁选线难度较大,单纯选择避让已经难以实现环境保护目的。由于各线路车辆、速度、轨道形式等存在差异,同时地表受振体均存在明显差异,合理、有效的振动评估工作难度大。现有的隔振、减振措施主要包括车辆振动控制、轨道结构振动控制等,传播路径中减振措施主要有空沟、填充沟、排桩、波阻板等,合理对各种隔振、减振措施进行组合运用及其减振效果预评估、后评估均有较大难度。

## 1.2 盾构隧道引起环境振动问题的研究内容及研究方法

城市轨道交通引起的环境振动机理如图1-6所示,包含建设期间盾构掘进产生的振动及线路运营期间列车荷载诱发的振动,通过地层向地表传播,进一步诱发

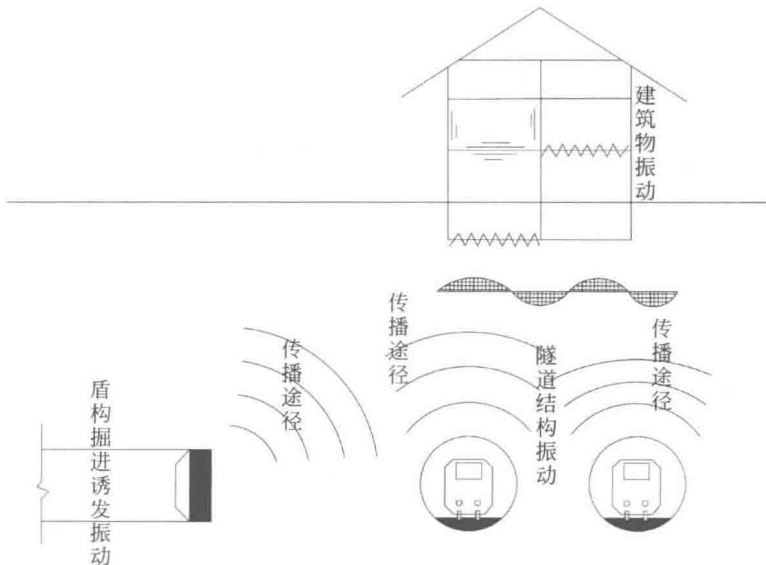


图 1-6 砂卵石地层盾构隧道穿越居民区诱发振动

地表建(构)筑物的二次振动,从振动机理来看,整个振动产生、传播、被响应过程包含三个部分<sup>[26]</sup>。

(1) 振源,建设阶段振源由刀盘系统、渣土车辆及隧道结构组成。振源特性由地层特性、刀盘形式、掘进参数、隧道埋深及临时铺轨不平顺性决定。运营阶段由列车、轨道支承结构及其基础组成。影响振源特性的重要因素包括车辆的类型、编组及动力特性、行驶速度,承载结构及其基础的结构形式,两者之间的接触状态等。

(2) 传播路径,即地面和地下土层,包括承载结构基础与土层、土层与建筑物基础的相互作用,振动在土层中的传播等。

(3) 地表响应,建(构)筑物、仪器设备和人对振动的响应和感知。

### 1.2.1 研究内容概述

根据振动产生及作用机理,砂卵石地层盾构隧道穿越居民区引起的环境振动问题研究内容包含以下四部分。

#### 1) 振源部分

该部分的主要研究内容包括:

- (1) 不同地层特性及设备的掘进过程振源分解及特性分析;
- (2) 运营阶段车辆诱发振动振源特性分析;
- (3) 轨道交通车辆-承载结构的动力相互作用分析。

#### 2) 传播规律

(1) 振动在介质中的传播分析理论与传播规律研究,包括地基土的动力特性及其对振动波传播的影响研究,三维层状地基和饱和层状地基上轨道交通的振动传播特性研究;

- (2) 盾构掘进振动传播衰减规律研究;
- (3) 移动荷载作用下地基内部响应的理论研究。

#### 3) 受振体振动响应

(1) 地基土-建筑物基础的动力相互作用分析;

(2) 轨道交通引起的振动对受振体的影响,包括对结构安全、仪器设备的使用功能、人体心理及生理健康等的影响。

#### 4) 振动预测及隔振、减振措施

(1) 掘进振源—地层—地表建(构)筑物振动体系模型建立;

(2) 列车荷载—承载结构—地层—地表建(构)筑物振动体系的建立;

(3) 预测模型的研究,该模型应能综合考虑地层性质、隧道埋深、地表建筑物类型等因素的影响进行环境振动时空分布预测;



(4) 针对不同阶段振源特点及其对不同地表环境的振动影响, 研究隔振、减振措施;

(5) 受振体(建筑物、仪器设备等)的隔振理论研究;

(6) 受振体自振特性的优化以及降低振动危害的研究。

## 1.2.2 研究方法概述

振动在地层传播特性及建筑物振动响应的研究方法主要有解析解法、数值方法、经验预测法、现场测试法, 下面对各种方法进行简介。

### (1) 解析解法

从理论上对振动传播进行分析, 同时能为数值方法和经验预测方法提供理论基础和参考, 但是轨道交通诱发振动问题的复杂性, 使问题的求解往往建立在大量简化和假设基础上, 在定量预测上存在难度。解析解法往往建立在弹性波动理论基础, 将地层看成是具有水平交界面和自由表面的半无限空间, 通过数学方法求解施加荷载时的动力响应, 早在 1904 年, Lamb<sup>[27]</sup>就对半空间简谐点荷载、简谐线荷载作用下的解析解进行研究, 随后 Sneddon<sup>[28]</sup>、Cole<sup>[29]</sup>和 Fryba<sup>[30]</sup>先后给出不同速度移动线荷载作用下的二维均匀弹性半空间的积分解, Metrikine<sup>[31]</sup>、Haak<sup>[32]</sup>先后将等代梁嵌入黏弹性地层, 研究高速列车在隧道内通过引起的地层振动。Kausel (1981)<sup>[33]</sup>等利用传递矩阵推导了分层土体的刚度矩阵, 随后用边界积分法推导了动荷载作用于成层介质的 Green 函数闭合解。Jones 和圣小珍<sup>[34,35]</sup>先后通过二维、三维层传递矩阵法研究弹性半空间上不同情况下施加无限线荷载和简谐荷载时动力响应。Lysmer<sup>[36]</sup>提出薄层法, 蒋通<sup>[37]</sup>、谢伟平<sup>[38]</sup>利用薄层法研究了土层在移动荷载作用下的动力响应。采用解析法只能求解个别的土层振动微分方程问题, 且常常只能用于简单的模型。

### (2) 数值方法

随着计算机技术的发展, 通过数值方法求解复杂的振动问题, 可以弥补解析解的不足。常用的数值方法包括有限元法、边界元法、无限元法、有限差分法及对上述各方法的混合使用, 其中发展了大批通用有限元软件和有限差分软件, 如 ABAQUS、ANSYS、Plaxis、Midas 及 FLAC 等, 其对复杂几何模型的适应性及强大的后处理能力为地铁振动研究提供了方便。

有限元法是应用最为广泛的数值方法, Zienkiewicz<sup>[39]</sup>(1971) 等较早地提出了动力有限元法, 动力有限元计算中模拟无限域而产生的截断边界的处理是其核心问题, 通常采用对模型施加人工边界的方法进行处理。其中应用较多的便是 Lysmer<sup>[40]</sup>提出的黏性边界、廖振鹏<sup>[41]</sup>提出的透射边界及刘晶波<sup>[42]</sup>提出的黏弹性边界。有限元发展过程中, 有学者提出无限元概念, 并实现有限元-无限元耦合求解波动问题。