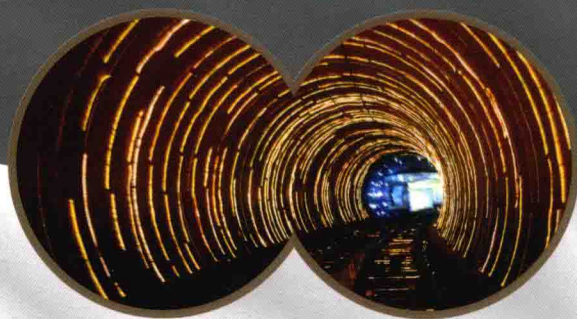


高速铁路隧道 底部结构动力特性

彭立敏 黄娟 丁祖德 著



科学出版社

高速铁路隧道 底部结构动力特性

彭立敏 黄娟 丁祖德 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书全面、系统地介绍了列车振动荷载作用下高速铁路隧道底部结构的动力响应特征、动力损伤分布规律及隧道基底围岩的动变形累积过程;通过研制的软岩循环三轴试验系统,建立了循环荷载作用下软岩的塑性累积变形预测模型,预测分析了列车荷载作用下隧道地基长期沉降;结合动力有限元数值方法和非线性疲劳累积损伤理论,研究了隧道底部基岩软化、基底脱空等基底状况对隧道结构受力状况和长期使用性能的影响,量化了基底状况对结构性能的影响程度,提出了改善高速铁路隧道使用寿命的工程措施。

本书所反映的研究成果可用于我国高速铁路隧道衬砌结构设计相关标准的制定,还可为从事相关领域的研究人员提供有益的帮助。

图书在版编目(CIP)数据

高速铁路隧道底部结构动力特性/彭立敏,黄娟,丁祖德著. —北京:科学出版社, 2016

ISBN 978-7-03-049551-8

I. ①高… II. ①彭… ②黄… ③丁… III. ①高速铁路—铁路隧道—底部结构—结构动力分析 IV. ①U459.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 188915 号

责任编辑:任加林 陈将浪 / 责任校对:刘玉靖

责任印制:吕春珉 / 封面设计:耕者设计工作室

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>

三河市骏杰印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 7 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2016 年 7 月第一次印刷 印张: 11 1/2

字数: 230 000

定价: 58.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈骏杰〉)

销售部电话 010-62136230 编辑部电话 010-62135319

版权所有,侵权必究

举报电话: 010-64030229; 010-64034315; 13501151303

前 言

进入 21 世纪以来,我国高速铁路的建设得到迅速发展。因其线路标准高,加之我国是一个多山的国家,高速铁路的发展必然导致大量隧道工程的出现。随着列车运行速度的提高,列车对轨道的冲击作用增大,作为轨下基础的隧道底部结构的动力响应将进一步加大。鉴于既有铁路隧道底部病害的高发性和严重性,我国现行高速铁路隧道设计对底部结构进行了加强,这对降低高速铁路隧道底部病害的发生率起到了一定的效果,但这种设计理念偏重于主观意识和经验判断,缺乏坚实的理论支持,有必要对高速铁路隧道底部结构的动力特性展开研究。

本书针对我国高速铁路隧道发展过程中亟待解决的动力学问题,在消化吸收已有相关研究成果的基础上,采用理论推导、室内试验,以及数值计算相结合的研究方法,系统地研究了隧道底部结构的动力响应、损伤演化、动变形累积规律,以及基底状况对高速铁路隧道底部长期性能的影响等问题。在结构体系上,全书分为计算理论、模型试验和数值分析三部分。在计算理论部分,构建了考虑混凝土和软岩刚度下降、强度劣化的弹塑性损伤本构模型,编制了相应的计算程序,并基于有限元软件提供的二次开发平台,实现了这两种材料本构模型的程序化。在模型试验部分,通过能考虑围压和地下水渗流的软岩循环三轴动力试验,确定了隧道基底富水软岩的累积变形规律,以及循环应力幅、静偏应力、围压、振动频率、地下水等因素对累积变形的影响程度,建立了列车振动荷载长期作用下的软岩塑性累积变形预测模型;还通过大型的动力模型试验,揭示了高速铁路隧道仰拱的应力状态,得到了高速铁路隧道仰拱动应力、动力系数、累积沉降与加载频率、加载次数之间的变化规律。在数值分析部分,对不同行车速度、不同仰拱矢跨比、不同仰拱厚度的高速铁路隧道底部结构的动力响应进行了计算分析,确定了隧道底部结构振动响应的影响因素,并对隧道底部基岩软化和基底脱空对隧道结构受力状态的影响进行了计算分析,预测了高速铁路隧道衬砌结构的疲劳寿命,探讨了基底状况对结构长期使用性能的影响。

本书由彭立敏、黄娟、丁祖德著。本书的研究成果可用于我国高速铁路隧道衬砌结构设计相关标准的制定,还可为从事相关领域的研究人员提供有益的帮助。

本书的出版得到了国家重点基础研究发展计划（“973”计划）项目（No.2011CB013802）、国家自然科学基金项目（No.51108461，No.51308270）的大力资助。同时，本书在完成过程中，参考了国内外的有关论文、著作，得到了诸多同志、友人的无私帮助，在此对他们均致以崇高的敬意和诚挚的感谢。

由于作者水平有限，书中难免有疏漏之处，敬请读者批评指正。

著 者

2015年8月

于长沙

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 目的与意义	1
1.2 隧道振动产生的原因及传播特点	4
1.3 铁路隧道振动响应研究概述	6
1.3.1 隧道衬砌结构振动响应	6
1.3.2 隧道地基土振动响应	10
1.3.3 环境振动响应及减振措施	12
1.4 岩土工程动力损伤研究概述	14
1.5 往复荷载下岩土体变形特性研究概述	16
1.5.1 土类材料循环变形特性	16
1.5.2 岩石类材料循环变形特性	17
1.6 隧道振动响应研究尚存在的问题	18
第 2 章 高速铁路隧道-围岩体系振动理论	20
2.1 高速铁路隧道结构形式	20
2.1.1 轨道结构	20
2.1.2 支护结构	20
2.2 结构体系振动方程	21
2.3 阻尼机制	22
2.4 列车荷载	23
第 3 章 隧道衬砌和基岩动力损伤模型	25
3.1 混凝土和岩土弹塑性损伤理论	25
3.2 基于双曲线 D-P 屈服准则的混凝土和软岩弹塑性损伤模型的建立	27
3.2.1 混凝土损伤变量及损伤演化方程	28
3.2.2 软岩损伤变量及损伤演化方程	29
3.2.3 双曲线 D-P 屈服准则和塑性势函数	30
3.3 混凝土和软岩弹塑性损伤模型二次开发	32
3.3.1 本构积分算法	33
3.3.2 二次开发环境	38
3.3.3 UMAT 子程序的编制	38
3.3.4 二次开发的关键技术及流程	40

3.4	混凝土损伤模型数值验证	41
3.4.1	单轴拉伸试验	41
3.4.2	单轴压缩试验	42
3.4.3	循环压缩试验	43
3.5	软岩损伤模型数值验证	44
第4章	高速铁路隧道底部结构动力响应数值分析	45
4.1	动力计算模型	45
4.1.1	计算网格划分	45
4.1.2	计算参数	46
4.1.3	动力边界	47
4.1.4	计算步骤	48
4.1.5	计算工况	48
4.2	计算结果及分析	49
4.2.1	不同行车速度下隧道底部基岩的动力响应	49
4.2.2	不同仰拱矢跨比下隧道底部基岩的动力响应	59
4.2.3	不同仰拱厚度下隧道底部基岩的动力响应	65
第5章	高速铁路隧道底部结构动力模型试验	72
5.1	试验目的与试验内容	72
5.1.1	试验目的	72
5.1.2	试验内容	73
5.2	模型设计	73
5.2.1	相似关系	73
5.2.2	相似材料	76
5.2.3	测试系统	77
5.2.4	加载系统	80
5.2.5	试验过程简介	81
5.3	静载试验结果与分析	82
5.3.1	仰拱应力	82
5.3.2	地基土压力	85
5.3.3	沉降位移	87
5.4	动载试验结果与分析	88
5.4.1	加速度	88
5.4.2	仰拱动应力	93

5.4.3 动力系数	96
5.4.4 地基动土压力	99
5.5 疲劳试验结果与分析	100
5.5.1 动应变与振动次数的关系	100
5.5.2 动力系数与振动次数的关系	103
5.5.3 累积沉降与振动次数的关系	105
5.5.4 破坏裂纹	106
第 6 章 高速铁路隧道基底软岩动变形特性试验	108
6.1 隧道基底软岩动变形特性试验简介	108
6.1.1 试件装置	108
6.1.2 试件制备	111
6.1.3 试验实施方案	112
6.1.4 试验步骤	115
6.2 软岩累积变形发展总体规律	116
6.3 循环动应力的影响	117
6.4 静偏应力的影响	121
6.5 振动频率的影响	125
6.6 围压的影响	127
6.7 地下水渗流的影响	128
第 7 章 高速铁路隧道地基长期累积变形预测	130
7.1 高速铁路隧道地基长期累积变形预测方法	130
7.1.1 循环累积应变计算模型	131
7.1.2 计算步骤	131
7.2 不同行车速度下高速铁路隧道地基长期累积变形分析	132
7.2.1 计算参数	132
7.2.2 计算结果及分析	133
7.3 不同仰拱矢跨比下高速铁路隧道地基长期累积变形分析	136
7.3.1 计算参数	136
7.3.2 计算结果及分析	137
7.4 不同仰拱厚度下高速铁路隧道地基长期累积变形分析	139
7.4.1 计算参数	139
7.4.2 计算结果及分析	141

第 8 章 基底状态对高速铁路隧道结构性能的影响	144
8.1 底部基岩软化对衬砌结构受力状态的影响	144
8.2 轨下基底脱空对衬砌结构受力状态的影响	152
8.3 基底状况对高速铁路隧道衬砌结构长期性能的影响分析	163
8.3.1 损伤累积准则	163
8.3.2 计算步骤	164
8.3.3 计算参数与损伤破坏指标	164
8.3.4 计算结果及分析	165
主要参考文献	167

第1章 绪 论

1.1 目的与意义

高速铁路是指列车最高运行速度在 200km/h 及其以上的铁路，它是铁路现代化的重要标志。自 1964 年第一条高速铁路——日本东海道新干线开通以来，高速铁路以其快捷、舒适、高效、安全可靠等优势在世界各国迅速发展。截至 2013 年年底，全世界已开通运营的高速铁路总营业里程约为 22 605km。根据国务院批准的《中长期铁路网规划》，到 2020 年我国铁路营业里程将不少于 120 000km，其中高速客运专线超过 16 000km，快速城际客运系统 2000km，实施时速 200km 既有线路提速改造里程 19 000km，最终形成的快速客运网络将覆盖我国大部地区^[1]。可以说，高速铁路已成为当今世界铁路建设发展的必然趋势。由于高速铁路建造技术标准高，线路曲线半径要求大，加上我国幅员辽阔，地形与地质条件复杂多样，因此在选线设计中必然涉及大量的隧道工程方案，目前我国已建、在建的高速隧道工程里程超过 1200km，相当于国外已通车运营的高速铁路隧道的总长度，其中长度大于 10km 的特长隧道就有 8 座。国内外具有代表性的高速铁路线路及相应隧道工程统计见表 1-1 和表 1-2。

表 1-1 国外具有代表性的高速铁路线路及相应隧道工程统计

国 家	线 别	线路长度/km	隧道长度/km	隧线比/%	建成年份/年
日本	东海道新干线	515.4	69	13.5	1964
	山阳新干线	553.7	281	50.7	1975
	东北新干线	496.5	112	24	1982
	上越新干线	269.5	106	39	1982
	北陆新干线	117.4	60	51	1997
	东北盛冈—八户段	96.6	70.6	73	2002
法国	大西洋线	282	20.8	7.4	1989
	北方线	333	10.7	3.2	1993
	巴黎地区联络线	128	9.6	7.5	1994
	东南延伸线	148	6.3	4.3	1994
	地中海线	250	12.7	5.2	2001
德国	汉诺威—维尔茨堡	327	121	37	1991
	曼海姆—斯图加特	99	31	31	1991
	科隆—法兰克福	219	47	21.3	2002
西班牙	马德里—塞维利亚	471	15.8	3.4	1992
韩国	汉城—釜山	412	189.4	46	2004
意大利	罗马—佛罗伦萨	237	71	30	1992
合 计		4955	1234	24.9	

表 1-2 我国具有代表性的高速铁路线路及相应隧道工程统计

线 别	线路长度/km	隧道数量/座	隧道长度/km	隧线比/%	速度目标值/（km/h）
武广	874	232	172.2	19.8	350
广深港	103	24	32	31.1	350
郑武	473	40	41.2	8.7	350
郑西	458	38	76.7	16.8	350
石太	190	32	74.9	39.4	250
甬台温	282	59	88.1	31.2	250
温福	298	59	149.4	50.1	250
福厦	256	37	40.4	15.8	250
厦深	502	80	118.4	23.6	250
合武	359	37	64.1	17.8	250
合宁	133	2	2.0	1.5	250
广珠	142	4	4.2	2.9	200
哈大	914	8	9.7	1.1	350
京沪	1318	18	14.4	1.1	350
合 计	6365	662	89.2	14.0	

我国已建的长度大于 5000m 的长大高速铁路隧道统计情况见表 1-3。

表 1-3 我国已建的长度大于 5000m 的长大高速铁路隧道统计情况

序号	隧道名称	隧道长度/m	所在线路	贯通日期/年.月	备注
1	太行山隧道	27 848	石太	2007.12	单线
2	璧板坡隧道	14 756	沪昆	2015.06	双线
3	大别山隧道	13 253	合武	2007.06	双线
4	霞浦隧道	13 099	温福	2008.01	双线
5	大南山隧道	12 701	厦深	2009.12	双线
6	雪峰山一号隧道	11 670	沪昆	2013.10	双线
7	南梁隧道	11 536	石太	2007.06	单双线
8	狮子洋隧道	10 800	广深港	2011.03	双线
9	金寨隧道	10 700	合武	2007.11	双线
10	浏阳河隧道	10 115	武广	2008.12	双线
11	大瑶山一号隧道	10 081	武广	2008.06	双线
12	梁山隧道	9888	厦深	2012.12	双线
13	鸡面山隧道	9763	温福	2007.05	双线
14	分水关隧道	9735	温福	2008.01	双线
15	栋梁坡隧道	9294	沪昆	2013.12	双线
16	双鹰顶隧道	9275	厦深	2010.04	双线
17	江门隧道	9185	广珠	2012.03	双线
18	黄龙寺隧道	8716	石武	2010.08	双线
19	梅林隧道	8607	厦深	2013.01	三线
20	张茅隧道	8483	郑西	2008.12	双线

续表

序号	隧道名称	隧道长度/m	所在线路	贯通日期/年.月	备注
21	大瑶山三号隧道	8289	武广	2008.12	双线
22	凤凰山隧道	7979	甬台温	2007.09	双线
23	红石岩隧道	7857	合武	2007.07	双线
24	函谷关隧道	7851	郑西	2008.09	双线
25	秦东隧道	7684	郑西	2008.04	双线
26	石板山隧道	7505	石太	2007.04	双线
27	太坤山隧道	7006	甬台温	2008.04	双线
28	飞鸾岭隧道	6718	温福	2007.07	双线
29	八仙仑隧道	6713	温福	2007.08	双线
30	乌岩山隧道	6208	甬台温	2008.01	双线
31	大瑶山二号隧道	6027	武广	2008.06	双线
32	黄晶岭二号隧道	5735	福厦	2007.12	双线
33	尧典隧道	5715	厦深	2011.03	双线
34	商浦山隧道	5500	厦深	2012.03	双线
35	大尖山隧道	5448	厦深	2010.08	双线
36	湖州隧道	5315	合宁	2011.06	双线
37	状元峰隧道	5025	甬台温	2008.04	双线

注：本表按隧道长度排序。

高速铁路的兴建把我国铁路隧道的建设规模和修建技术推到了新的高度，但同时也给铁路隧道的设计与施工带来了许多技术难题，如高速列车动载作用下隧道结构的动力稳定问题。一方面，列车速度的提高使轮轨间的冲击作用进一步加剧，当列车运行速度接近轨道系统的临界速度时，冲击荷载产生的能量无法及时逸散，在轮轨接触位置迅速积聚，致使列车产生更大振动，列车的这种振动反过来又将加剧轨道和隧道结构的动力响应；另一方面，高速铁路隧道内一般采用板式轨道结构形式^[2]，虽然板式无碴轨道具有整洁美观、稳定性好、维修量少等优点，但其整体刚度大，不利于振动波衰减，因此传递到隧道结构的振动强度要比在有碴轨道条件下大，这就要求隧道结构必须具有更高的动力稳定性。并且出于空气动力学、行车密度等方面考虑，高速铁路隧道一般设计为大断面或超大断面，这些隧道在列车动载下的受力情况不同于以往的普通线路隧道，其动力稳定性能否满足长期运营安全还有待全面、深入论证。

隧道底部结构是隧道支护体系的重要组成部分，也是隧道病害发生最为严重的部位。根据隧道病害现场调查结果，许多既有铁路隧道经过一段时间的运营之后，隧道底部结构出现不同程度的开裂、破损、下陷等病害，造成轨道不平顺，直接危及行车安全^[3]。究其原因，一方面是由于隧道底部作为一种混凝土结构，本身不可避免地存在初始裂隙缺陷，在列车振动荷载反复作用下，这些裂隙不断扩展、贯通；另一方面，隧道基底软弱围岩在列车动载及地下水的耦合作用下被

碾磨成泥浆,基岩破损,隧道底部基础条件逐渐恶化,导致隧道底部结构受力增大,加快了裂隙扩展和新裂隙的形成。两个方面的相互作用进一步加剧了底部结构的劣化程度,最终导致隧道底部结构破坏。由于高速铁路隧道振动响应增大,这类病害会越发突出。为了降低高速铁路隧道底部结构的运营风险,我国现有高速铁路隧道设计中对底部结构进行了加强,在Ⅲ级及以上围岩条件下的隧道底部均设置了仰拱,而且采用了较大的仰拱矢跨比和仰拱厚度,这对降低高速铁路隧道底部病害的发生率将会起到一定的效果。但这种设计是否可以优化,在围岩条件较好的条件下是否可将仰拱厚度减薄或不设置仰拱;在特殊的围岩条件下现有设计是否能够满足无碴轨道轨面的沉降要求,是否能保证隧道在使用年限内的安全运营,这些问题都亟待解决。开展列车振动荷载作用下高速铁路隧道衬砌结构及基底软岩的动力特性分析显得尤为重要。

高速铁路对轨道结构的平顺度要求更高,对轨道基础的沉降要求非常严格,因此隧道基底围岩长期沉降变形的收敛可控是保证轨道良好运营状态的首要条件。然而,既有工程实践表明,当隧道穿越软土、软岩等特殊地质地段,在长期列车荷载作用下软土和软弱基岩的累积变形及沉降问题一直未能得到有效解决,如法国高速铁路的路基就出现过工后沉降过大的问题^[4]。目前,国内外学者针对软黏土、砂土和道碴等开展了循环荷载作用下的累积变形特性研究,但主要考虑的是地铁和普通铁路列车的振动荷载,隧道基底软弱围岩在高速铁路列车荷载作用下的长期动变形特性及变形累积过程的研究还未见报道。

针对以上高速铁路隧道建造中有待解决的动力学问题,采用理论分析、室内试验和数值计算等手段,对高速铁路隧道底部结构在列车振动荷载下的动力响应特征、动力损伤和累积变形规律进行深入研究和了解,量化隧道基底的动力损伤量,评价基底状况对高速铁路隧道结构性能的影响,不仅可为我国高速铁路隧道的合理设计和施工提供科学依据,而且可为高速铁路建设和可持续发展提供重要技术支撑。

1.2 隧道振动产生的原因及传播特点

当列车穿越隧道时,车辆轮系与轨道之间产生动力相互作用,形成振动源,振动能量通过轨道、道床传递给隧道衬砌和周围地层,引起隧道结构和地层的振动响应。这种振动再由地层传递到地面或邻近建筑物,进而诱发结构物的二次振动。铁路隧道振动传播过程可用图 1-1 表示。

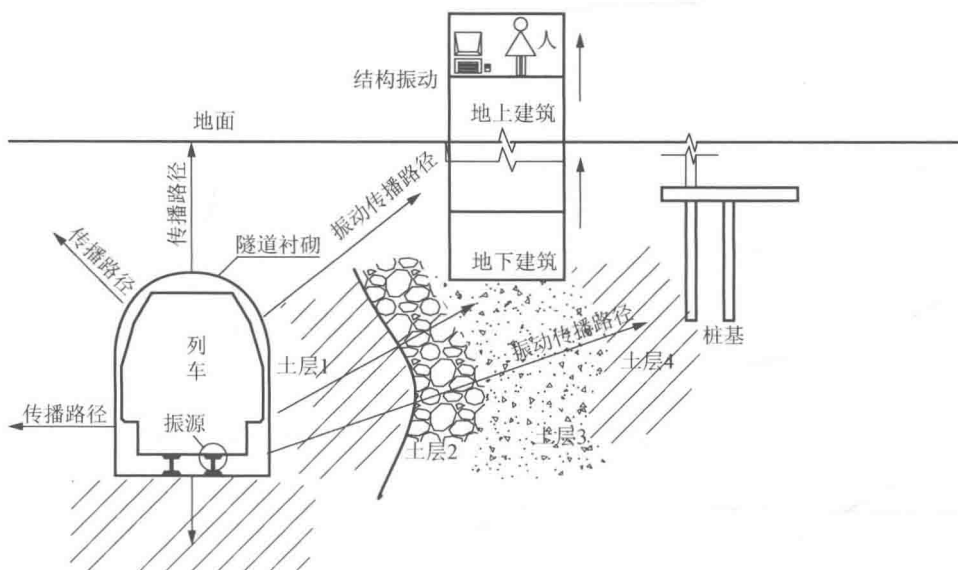


图 1-1 铁路隧道振动传播过程示意

(1) 引起隧道振动响应的因素

引起隧道振动响应的因素有很多，总体上可归结为三个方面：

- 1) 车辆方面，包括行车速度、列车轴重、车轮磨损程度等。
- 2) 轨道方面，包括轨道结构类型、轨下基础条件、轨道平顺条件等。
- 3) 隧道主体，包括衬砌类型、隧道基础、埋深及围岩条件等。

可知隧道的振动问题是非常复杂的，涉及多个研究对象和多门学科的交叉应用。Melke^[5]将地铁环境振动响应的影响因素归结为振源、传播路径和受振物这三个方面，如图 1-2 所示。

(2) 振动传播特点

在振动传播规律方面，研究方法多以数值模拟和试验测试为主，研究结果表明列车荷载作用下隧道结构的振动具有以下传播特点：

- 1) 振动频率以低频为主，其中 20~100Hz 的振动强度较大。
- 2) 振动传播过程中，高频部分比低频部分衰减得快，水平方向振动比垂直方向振动衰减得快。

3) 振动在地层中按幂函数衰减，但文献[6]的研究表明，振动在离开隧道轴线一定距离以外的地表存在振动放大区，这个距离因地层条件和隧道埋深而不同。

4) 振动以三种波的形式传播，即横波、纵波和表面波，其中表面波占主要地位。



图 1-2 地铁环境振动的影响参数

5) 在一定范围内，隧道振动加速度与列车行驶速度成正比。

1.3 铁路隧道振动响应研究概述

列车荷载是导致铁路隧道病害的重要原因之一^[3, 7, 8]，许多学者从不同角度对铁路隧道的振动响应进行了研究，采用的研究方法有理论分析、数值模拟、现场测试和模型试验等，研究内容主要集中于以下三个方面，即隧道衬砌结构振动响应研究、隧道地基土振动响应研究和环境振动响应及减振措施研究。

1.3.1 隧道衬砌结构振动响应

轮轨相互作用力即列车荷载的确定是分析隧道结构动力响应的前提和基础。因此，隧道结构振动响应的理论研究可以追溯到轨道模型研究上。

最早的轨道模型是由 Winkler 于 1867 年提出的，该模型将钢轨看成是常刚度

基础之上的无限长梁。Timoshenko^[9]和 Fryba^[10]验证了该模型的正确性,在以后的各种轨道系统(明线路基轨道系统或铁路隧道轨道系统等)的理论分析中,轨道结构一般用 Winkler 地基梁模拟,梁的运动方程主要采用 Euler-Bernouli 梁或 Timoshenko 梁描述。前者只考虑梁的弯曲,而后者还考虑梁的剪切变形和旋转惯性矩,对于低频激励,两者所得的结果十分相近;对于高频激励,后者所得的结果更为精确。

Filippov^[11]在研究匀速移动荷载作用下半无限弹性地基上 Euler-Bernouli 梁的稳态响应时,首次注意到地基梁临界速度的存在。Dieterman^[12]和 Metrikine^[13]推导了弹性半空间体与 Euler-Bernouli 梁的等效复刚度,认为等效复刚度主要与 Euler-Bernouli 梁的频率和波数有关。另外,他们还对弹性半空间上 Euler-Bernouli 梁在移动荷载作用下的稳态响应进行了研究,结果表明 Euler-Bernouli 梁存在两个临界速度,其中一个等于瑞利波速,另一个比瑞利波速小。随后,Chen 等^[14]推导了温克尔地基上 Timoshenko 梁的临界速度。Fryba^[15]通过傅里叶积分变换得到了移动点荷载作用下无限弹性体的动力响应,为铁路隧道振动响应的研究奠定了基础。

正如 Gutowski^[16]所说,地下结构振动预测是件极其复杂的事,涉及土体动力特性描述、土体和结构相关材料参数确定,以及振源准确表示等诸多问题,要得到结构响应的精确解析解是不可能的。但是,如果对研究对象进行适当简化处理,就能较为方便地求得相应的解析解,虽然这些解是简化后得到的,但透过它们仍可以发现问题的本质。因此,人们试图从解析法入手,建立隧道振动响应的分析模型。其中具有代表性的是 Metrikine 等^[17]提出的平面解析模型,该模型视隧道衬砌为黏弹性土层中的 Euler-Bernouli 梁,列车荷载用移动点荷载代替,分别考虑了不变点荷载、谐变点荷载及随机点荷载这三种荷载模式。此后,Metrikine 又对该模型做了改进:以两根平行 Euler-Bernouli 梁代替原来的单根梁,梁与梁之间用离散弹簧连接。显然这种解析模型是相当粗糙的。

Balendra 等^[18]针对地铁列车振动提出了一种半解析平面应变模型,该模型将隧道衬砌处理为弹性半无限体中的刚性结构,并采用子结构法,将整个问题分解为两个子问题:基础振动传播边值问题和隧道振动传播边值问题,这显著降低了问题的复杂程度。Hunt 等^[19]将列车车辆简化为双轮对模型,每个轮对拥有四个自由度,推导了弹性半无限空间体的频响函数,并在此基础上运用随机过程理论对地铁列车的振动进行了分析。

随着计算机性能的提高和计算方法的发展,隧道振动响应的数值模型越来越多。这些数值模型大多是将列车-轨道-隧道-地层系统分割成两个子系统,即首先通过现场测试或利用列车-轨道动力耦合模型求得作用于道床底部的荷载谱,然后将该荷载谱加在隧道-地层模型上,最终得到隧道结构的振动响应。在地下结构振

动响应分析与减振措施可行性评价方面,二维数值模型是一种常用的计算模型,然而二维模型不能同时考虑振动波沿结构轴向和径向的传播。Gardien^[20]、Andersen^[21]等相继发展了隧道振动的三维有限元和三维有限元-边界元耦合模型,克服了二维模型只能考虑波的单向传播问题。

三维数值模型,特别是三维有限元模型计算量大,对计算机性能要求极高,其实际应用往往受到限制。因此,Forrest^[22]和 Hussein^[23]针对地铁浮置板结构,开发了一种半解析半数值的三维模型——PIP 模型(Pipe-in-Pipe model)。该模型的解析过程是在频率-波数域内完成的,频率-空间域结果则通过傅里叶逆变换得到。模型中隧道衬砌和围岩用 2 个同心管表示,内层管代表隧道衬砌,采用薄壳理论描述;外层管半径设为无穷大,代表无限域地层,采用弹性连续介质理论描述,浮置板与仰拱之间通过弹簧连接。连接方式有 2 线弹簧支撑、3 线弹簧支撑及一致连续支撑。

隧道振动响应数值分析中采用的主要计算方法包括有限单元法、有限差分法及有限元-边界元耦合法等。其中,以有限单元法居多,相关的研究工作有:Thiede 等^[24]运用有限元法研究了不同频率激励下管片厚度对地铁结构响应的影响情况;Guan 等^[25]采用三维有限元模型研究了主隧道运营引起的主、辅隧道振动响应规律;Chua^[26]、潘昌实^[27]、王祥秋^[28]、李德武^[29]、高峰^[30]、张玉娥^[31]等基于现场测试数据得到列车荷载谱,并将其引入到有限元模型中对隧道衬砌的动力响应进行模拟分析,得到一些基本结论,如列车振动对基底及以下围岩影响较大,对隧道衬砌拱圈影响较小,衬砌上出现了不利的拉应力。

由于城市发展的需要和开发空间的限制,近距离交叠或重叠隧道、地下车站等复杂结构日益增多。基于有限元法针对该类结构开展的工作有:陈卫军^[32]、张璞^[33]利用商业软件 ANSYS 对南浦大桥近距离交叠隧道在列车振动荷载作用下的动力响应进行有限元分析,发现上下重叠段隧道在动载作用下相互影响显著;高峰、关宝树等^[34]采用有限元法分别研究在上行动载、下行动载和上下交会动载 3 种情况下,区间近距离重叠隧道的动力响应,指出边墙与隔板联结处为衬砌结构的薄弱部位。

此外,李德武、高峰等^[35]还研究了仰拱的结构形式、曲率、刚度,以及仰拱与边墙的联结方式对列车振动的影响规律,认为列车振动下的隧道基底结构应采用矢跨比较大的仰拱。

针对高速铁路隧道振动响应开展的研究有:张玉娥等^[36]采用弹塑性本构关系和莫尔-库仑屈服准则,应用有限元模型在时域内初步探讨了高速隧道结构及周围岩体的动力特性;李亮等^[37]采用激振函数模拟高速列车竖向振动荷载,运用弹塑性有限元方法对大断面隧道结构在列车振动荷载作用下的动响应进行分析,研究了不同断面形式、车速和阻尼比系数对振动响应的影响,并将结果与小断面隧道