

雷晓燕 著

高速铁路轨道动力学 ——模型、算法与应用

High Speed Railway Track Dynamics:
Model, Algorithm and Application

Lei Xiaoyan



科学出版社

高速铁路轨道动力学 ——模型、算法与应用

雷晓燕 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是雷晓燕教授带领的课题组十余年来关于高速铁路轨道动力学研究成果的系统总结。研究内容属现代铁路轨道动力学理论中的前沿问题,涉及高速列车-轨道耦合系统动力学理论、模型、算法及工程应用。全书共十五章,包括轨道动力学分析内容及相关标准、轨道结构动力分析的解析法、轨道结构动力分析的傅里叶变换法、高架轨道结构振动特性分析、轨道不平顺功率谱及数值模拟、车辆-轨道耦合系统竖向动力分析模型、车辆-轨道耦合系统动力分析的交叉迭代算法、动轮单元模型及算法、轨道单元和车辆单元模型及算法、车辆-轨道耦合系统动力分析的移动单元法、车辆-轨道-路基-大地耦合系统竖向动力分析模型、列车-有砟轨道-路基耦合系统动力特性分析、列车-板式轨道-路基耦合系统动力特性分析、有砟-无砟轨道过渡段动力特性分析、交叠地铁列车引起的环境振动分析。

本书可作为土木、交通、道路与铁道工程专业本科生、研究生、教师和工程技术人员教材和参考书。

图书在版编目(CIP)数据

高速铁路轨道动力学:模型、算法与应用/雷晓燕著. —北京:科学出版社,2015
ISBN 978-7-03-044437-0

I. 高… II. 雷… III. 高速铁路-轨道力学-动力学-研究 IV. ①U213-2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 114087 号

责任编辑:魏英杰 / 责任校对:桂伟利

责任印制:肖 兴 / 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

*

2015 年 6 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2015 年 6 月第一次印刷 印张:22 1/4 彩插 8

字数:448 000

定价:160.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

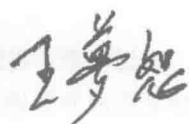
序

近年来,我国高速铁路的建设和运营取得了举世瞩目的成就,为国民经济又好又快地发展做出了重要贡献,得到了社会各界的广泛赞誉,成为世界高速铁路发展的又一示范。截至2014年年底,我国新建高速铁路运营里程已超过12 000公里,居世界第一位,已成为世界高速铁路系统技术最全、集成能力最强、运营速度最快、运营里程最长和在建规模最大的国家。

由于我国高速铁路的建设起步较晚,缺少实践经验的积累,在高速铁路建设和运营过程中无疑将会面临一系列技术难题与挑战,这就需要强有力的基础理论与技术支撑。高速铁路轨道结构由钢轨、扣件、轨道板、水泥乳化沥青砂浆填充层、混凝土支承层、路基和大地(或桥梁)等组成,材料属性差别大、结构层次多、科技难度跨度广、服役环境复杂、列车运行速度均为 $200\sim 300\text{km/h}$,这些因素都与轮轨动力学问题紧密相关。高速铁路轨道动力学是确保列车安全运营的关键基础学科。当列车速度提高后,机车车辆与轨道结构的相互作用显著加剧,动态系统环境更加恶化,高速列车的安全性、平稳性及轨道结构的可靠性面临着严峻考验。线路平纵断面条件和轨道不平顺对旅客舒适度的影响也在高速条件下被放大,同时列车运行对周围环境的影响在高速条件下也被放大,行车事故的后果在高速条件下更严重。这一切都需要以高速铁路轨道动力学为基础,深入研究高速铁路列车与轨道的相互作用机制,为高速铁路系统设计与高速列车安全运营提供必需的理论指导。

该书是作者和他的团队在本领域多年理论和紧密结合实践研究成果的基础上撰写而成的。重点围绕高速铁路轨道动力学理论、模型、算法和工程应用,系统介绍了他们取得的新成果。该书研究内容前沿、理论体系完整、模型算法正确有效,工程应用丰富。尤其是作者在轨道单元和车辆单元模型及算法、车辆-轨道耦合系统动力分析的移动单元法、车辆-轨道耦合系统动力分析的交叉迭代算法、有砟轨道-无砟轨道过渡段动力特性分析,以及交叠地铁列车引起的环境振动分析等方面的研究具有很大的创新性和应用性,这些成果先后发表在 *Journal of Vibration and Control*、*Journal of Transportation Engineering*、*Journal of Rail and Rapid Transit* 和 *Journal of Sound and Vibration* 等国际著名学术期刊上,被国内外同行学者广泛认可和引用。

我相信,该书的出版必将对我国高速铁路轨道结构设计、建设和运营提供重要的理论指导,对推动“铁道工程”学科发展、促进铁路的科技进步,以及实现我国高速铁路可持续发展做出重要的贡献。



中国工程院院士

2014年8月12日

前 言

从 1964 年世界第一条高速铁路建成并投入运营以来,高速铁路以其快速便捷、安全舒适、绿色环保、大运量、低能耗,以及全天候运输等优点,在众多交通工具中显示出极强的竞争力。据国际铁路联盟统计,截至 2013 年 11 月 1 日,世界其他国家和地区高速铁路总营业里程 11 605 公里,在建高铁规模 4883 公里,规划建设高铁 12 570 公里。我国高速铁路总营业里程达到 11 028 公里,在建高铁规模 1.2 万公里,总里程约占世界一半,成为世界上高速铁路投产运营里程最长、在建规模最大的国家。与此同时,目前我国已有 18 个大中城市(含香港)拥有城市轨道交通,总里程达 2100 公里,在建规模 2700 公里,居世界第一。如今,高速铁路和轨道交通已成为拉动社会经济发展的重要引擎,高速铁路技术的自主创新已成为国家重大战略需求。

然而,随着行车速度的不断提高,交通密度的日益增加,运输荷载的逐渐加重,列车与轨道的相互作用也随之加剧。为了适应铁路发展的这种变化,世界各国铁路加强了技术创新,在铁道工程中广泛采用新技术、新设计、新材料、新工艺和现代化的管理方法,并由此出现了现代铁路轨道的概念。现代铁路轨道是伴随着高速、重载铁路的出现而形成的,现代轨道必须适应客运快速、高速化,货运快捷、重载化的要求。与传统铁路轨道相比,现代轨道具有高标准的路基、新型轨下基础、重型超长无缝钢轨、轨道养护维修的科学管理、安全运营组织和铁路与环境的协调等特点。显然,传统的轨道力学和结构分析方法不能适应现代铁路轨道分析和设计的需要。由于近几十年来计算机和数值方法的迅猛发展,新理论和新方法不断被应用于轨道力学与轨道工程中,大量过去无法求解的,以及在铁路现代化进程中新出现的各种复杂的问题成为可能。

本书是雷晓燕教授研究团队十余年来关于高速铁路轨道动力学理论与实践研究成果的系统总结。在过去的十余年中,课题组先后得到国家自然科学基金(50268001、50568002、50978099、U1134107、51478184)、国际科技合作与交流专项(2010DFA82340)、江西省自然科学基金(0250034、0450012)、中-奥、中-日、中-英和中-美科研合作、教育部“高等学校骨干教师资助计划”(GG-823-10404-1001)、铁道部科技发展计划(98G33A)、江西省优势科技创新团队计划项目(20133BCB24007),及江西省主要学科学术和技术带头人培养计划(020001)等项目的支持,在高速铁路轨道动力学、轨道交通引起的环境振动与噪声,以及轨道动力学工程应用等三个方面进行了系统、深入的研究,并取得了许多新的研究成果。

研究内容均属轨道动力学理论中的前沿问题。参加项目研究工作的有雷晓燕、刘林芽、冯青松、张鹏飞、刘庆杰、罗锐、罗文俊、房建、张斌、涂勤明、曾钦娥、赖建飞、吴神花、孙茂棠、熊超华等。

本书共十五章,初稿曾在华东交通大学道路与铁道工程专业研究生的教学中使用过多年。全书内容包括轨道动力学分析内容及相关标准、轨道结构动力分析的解析法、轨道结构动力分析的傅里叶变换法、高架轨道结构动力特性分析、轨道不平顺功率谱及数值模拟、车辆-轨道耦合系统竖向动力分析模型、车辆-轨道耦合系统动力分析的交叉迭代算法、动轮单元模型及算法、轨道单元和车辆单元模型及算法、车辆-轨道耦合系统动力分析的移动单元法、车辆-轨道-路基-大地耦合系统竖向动力分析模型、列车-有砟轨道-路基耦合系统动力特性分析、列车-板式轨道-路基耦合系统动力特性分析、有砟轨道-无砟轨道过渡段动力特性分析、交叠地铁列车引起的环境振动分析。其中,“车辆-轨道耦合系统动力分析的交叉迭代算法”、“轨道单元和车辆单元模型及算法”、“车辆-轨道耦合系统动力分析的移动单元法”、“有砟轨道-无砟轨道过渡段动力特性分析”,以及“交叠地铁列车引起的环境振动分析”等五章内容是作者创新性的成果,与同类研究相比具有鲜明特色。

借本书出版之际,特别向资助、支持和关心过本研究工作及本书出版的各有关单位和个人致以诚挚的谢意!特别要感谢中国工程院院士杜庆华教授、王梦恕教授,上海铁路局管天保教授级高工,同济大学童大勋教授和王午生教授长期以来对作者的关心、指导与帮助,王院士还在百忙中为本书作序。最后要感谢我的同事和研究生们,以及科学出版社的魏英杰编辑,本书的出版是他们共同努力的结果。

雷晓燕

2015 年于孔目湖

Preface

Since its opening of the world's first high-speed railway line in 1964, with its advantages of high speed and convenience; safe and comfort; environmental-friendly and low energy; large carrying capacity and all-day transportation available, high-speed railway has shown its strong competitive power among many other modes of transport. According to the statistics by International Union of Railways, up to November 1 of 2013, there are total 11 605 kilometers high-speed railways in operation, 4883 kilometers in construction, and another 12 570 kilometers high-speed railways planning to be built in other countries of the world. While in China, we have 11 028 kilometers high-speed railways in operation, plus another 12 000 kilometers in construction, which has taken half amount of the world's total high-speed railways and become the country that owns the longest and the largest scale of high-speed railways both in operation and construction. Meanwhile, 18 cities (including Hong Kong) in China have urban rail transits that reach 2 100 kilometers in running, and 2 700 kilometers in construction, which has ranked the top one in the world. High-speed railways and urban rail transits have become the important engine to drive social economy's development, and the independent innovation for the technology of high-speed railways has turned to be the nation's crucial strategic demands.

It is well known that interactions between vehicles and railways become fiercer and fiercer as train speeds, operation density and axle loads increase. This has activated technical innovations by railway industries in every country by introducing new technologies, new designs, new material and modern management methods into railway infrastructures and equipments, and cultivated the emerge of the concept of modern railway track. Modern railway tracks are adapted for high-speed and heavy-haul railways in order to meet the requirements of fast and super-fast passenger transportations and heavy-haul freight transportations. In contrast to traditional railway tracks, modern railway tracks exhibit following features: (1) high standard subgrade; (2) new types of track bed; (3) heavy and very long continuously welded rails; (4) scientific management of track maintenance.

nances; (5) safe operations and environmental-friendly. It is obvious that traditional railway mechanics and structural analysis methods cannot meet the requirement in analysis and designs of modern railway tracks. Due to the rapid advances in computing technology in the past few ten years, new theories and methods have been continuously developed and applied to railway engineering and many old problems which were impossible to be solved in the past, and new ones which have emerged during the modernization of railways, become possible to seek a solution.

In the past ten years, a group of researchers led by Professor Xiaoyan Lei at East China Jiaotong University have endeavored to research into many issues associating with modern railway tracks, including high-speed railway track dynamics, environmental vibration and noise induced by railway, and engineering applications in modern railway tracks. Their research activities have been supported by the National Natural Science Foundation of China (50268001, 50568002, 50978099 and U1134107 and 51478184), the Natural Science Foundation of Jiangxi Province (0250034 and 0450012), the Foundation for University Key Teacher by the Ministry of Education (GG-823-10404-1001), the Project of International Cooperation and Exchanges NSFC (2010DFA82340), the Project of Science and Technology Development Plan by the Ministry of Railway (98G33A), the Program for Innovative Research Team (20133BCB24007) and the Training Program for Leading Scientists in Key Subjects by Jiangxi Province (020001). These activities were enriched through cooperation programs between China and Austria, China and Japan, China and UK, China and USA. All the issues they have investigated are cutting-edge problems in railway engineering and results from these research activities are expected to have significant impacts both academically and in practice. The aim of this book is to summarize these results.

This book consists of fifteen chapters and its manuscript as textbook has been used to post-graduate teaching in railway engineering major for many years. The contents include: track dynamic analysis contents and related standards; analytic method for dynamic analysis of the track structure, Fourier transform method for dynamic analysis of the track structure; dynamic characteristic analysis of the elevated track structure; track irregularity power spectrum and numerical simulation; model of vertical dynamic analysis for the vehicle and track coupling sys-

tem; cross iteration algorithm for dynamic analysis of the vehicle and track coupling system; moving element model and algorithm; track element and vehicle element model and algorithm; moving element method for dynamic analysis of the vehicle and track coupling system; model of vertical dynamic analysis for the vehicle, track, subgrade and ground coupling system; dynamic characteristic analysis of the train, ballast track and subgrade coupling system; dynamic characteristic analysis of the train, slab track and subgrade coupling system; dynamic characteristic analysis of the track transition between ballast track and ballastless track, and finally, environmental vibration analysis induced by overlapping subways. Among them, some innovative results are obtained by author's group in cross iteration algorithm for dynamic analysis of the vehicle and track coupling system, track element and vehicle element model and algorithm, moving element method for dynamic analysis of the vehicle and track coupling system, dynamic characteristic analysis of the track transition between ballast track and ballastless track, and environmental vibration analysis induced by overlapping subways. Compared with similar studies, these investigations have distinct characteristics.

Efforts have been made to present theories rigorously and systematically and equally, to explore their applications in practice. Chapters are relatively independent of each other, so that readers can read chapters of their interest without referring too much to other chapters. The authors are well aware that there are rooms for improvement and comments and criticisms from readers will be highly appreciated.

The author is grateful to those who involved in the research and made contributions; they are Linya Liu, Qingsong Feng, Pengfei Zhang, Qingjie Liu, Kun Luo, Wenjun Luo, Jian Fang, Bin Zhang, Qinming Tu, Qin'e Zeng, Jianfei Lai, Shenhua Wu, Maotang Sun, Chaohua Xiong and so on. The author also thanks those who were helpful in writing and publishing this book.

In addition, the author would like to thank the related departments and the staffs who supported the researches and the publication. Special thanks go to Professor Qinghua Du and Professor Mengshu Wang, both of them are members of Chinese Academy of Engineering, to Mr. Tianbao Guan, the Senior Engineer of Shanghai Railway Bureau to Professor Daxun Tong and Professor Wusheng Wang of Tongji University, for their long term support, supervision and help to

the author. In especial, academician Wang wrote the Preface to this book in the busy. Finally, sincere thanks give to my colleagues, to my post graduates, and to Mr. Yingjie Wei, the book editor of the Science Press, without their efforts without this publication.

潘晓燕

2015 in Kongmu Lake

目 录

序

前言

第一章 轨道动力学分析内容及相关标准	1
1.1 轨道动力学模型与方法研究回顾	1
1.2 轨道动力学分析内容	4
1.3 安全性平稳性限值与铁路环境标准	5
1.3.1 普通列车安全性限值	5
1.3.2 普通列车平稳性限值	6
1.3.3 提速列车安全性及平稳性限值	8
1.3.4 国内铁路噪声标准	9
1.3.5 国外铁路噪声标准	10
1.3.6 我国铁路机车和客车噪声限值	11
1.3.7 我国城市区域环境振动标准	12
1.3.8 我国城市轨道交通引起建筑物振动限值	15
1.4 高速铁路轨道维修管理标准	16
1.4.1 法国高速铁路轨道维修管理标准	16
1.4.2 日本新干线高速轨道维修管理标准	17
1.4.3 德国高速铁路轨道维修管理标准	17
1.4.4 英国高速铁路轨道维修管理标准	18
1.4.5 韩国高速铁路轨道几何状态检测标准	19
1.4.6 中国高速铁路轨道维修管理标准	20
1.4.7 欧洲高速列车-轨道耦合系统主频范围和敏感波长	21
1.5 古建筑结构容许振动标准	21
参考文献	25
第二章 轨道结构动力分析的解析法	30
2.1 高速列车诱发地面波与轨道强振动研究	30
2.1.1 轨道结构连续弹性基础梁模型	30
2.1.2 轨道等效刚度与轨道基础弹性模量的关系	32
2.1.3 轨道临界速度	32

2.1.4 轨道强振动分析	33
2.2 轨道刚度突变对轨道振动的影响	35
2.2.1 移动荷载作用下考虑轨道表面不平顺和刚度突变的轨道振动模型	36
2.2.2 轨道不平顺和轨道刚度突变对轨道振动的影响	38
2.2.3 轨道过渡段的整治原则	44
参考文献	45
第三章 轨道结构动力分析的傅里叶变换法	46
3.1 轨道结构连续弹性单层梁模型	46
3.1.1 傅里叶变换	47
3.1.2 快速离散傅里叶逆变换	48
3.1.3 Matlab 中的离散傅里叶逆变换定义	48
3.2 轨道结构连续弹性双层梁模型	49
3.3 高速铁路轨道振动与轨道临界速度分析	51
3.3.1 单层梁模型分析	51
3.3.2 双层梁模型分析	54
3.4 客货混运铁路轨道结构振动分析	60
3.4.1 轨道结构连续弹性三层梁模型	60
3.4.2 轨道随机不平顺的数值模拟	61
3.4.3 求解轨道结构连续弹性三层梁模型的傅里叶变换法	61
3.4.4 客货混运铁路轨道结构振动分析	63
3.5 软土地基沥青基础有砟轨道结构振动分析	65
3.5.1 轨道结构连续弹性四层梁模型	66
3.5.2 求解轨道结构连续弹性四层梁模型的傅里叶变换法	67
3.5.3 软土地基沥青基础有砟轨道结构振动分析	69
参考文献	73
第四章 高架轨道结构振动特性分析	74
4.1 导纳的基本概念	74
4.1.1 导纳的定义	74
4.1.2 计算方法	75
4.1.3 谐响应分析的基本理论	76
4.2 高架桥梁结构振动特性分析	76
4.2.1 解析梁模型	77
4.2.2 有限元模型	80
4.2.3 高架轨道桥梁解析模型与有限元模型对比	82
4.2.4 桥梁支座刚度的影响	82

4.2.5 桥梁截面型式的影响	83
4.3 高架轨道结构振动特性分析	85
4.3.1 高架轨道-桥梁解析模型	85
4.3.2 有限元模型	88
4.3.3 桥梁结构阻尼	88
4.3.4 高架轨道-桥梁系统参数分析	90
4.4 高架轨道结构振动衰减分析	94
4.4.1 振动传播衰减率	94
4.4.2 钢轨振动衰减系数	99
参考文献	99
第五章 轨道不平顺功率谱及数值模拟	101
5.1 随机过程的基本概念	101
5.1.1 平稳随机过程	102
5.1.2 各态历经	103
5.2 轨道结构随机不平顺功率谱	103
5.2.1 美国轨道不平顺功率谱	104
5.2.2 德国高速轨道不平顺功率谱	105
5.2.3 日本轨道不平顺 Sato 谱	105
5.2.4 中国干线铁路轨道不平顺谱	106
5.2.5 合-武客运专线轨道不平顺谱	108
5.2.6 轨道不平顺功率谱拟合曲线的比较	110
5.3 轨道结构随机不平顺的数值模拟	116
5.4 三角级数法	116
5.4.1 三角级数法 1	116
5.4.2 三角级数法 2	120
5.4.3 三角级数法 3	120
5.4.4 三角级数法 4	120
5.5 轨道结构随机不平顺样本	121
参考文献	121
第六章 车辆-轨道耦合系统竖向动力分析模型	123
6.1 动力有限元基本理论	123
6.1.1 动力有限元法概述	123
6.1.2 梁单元理论	126
6.2 轨道结构的有限元方程	132
6.2.1 基本假设与计算模型	132

6.2.2 轨道结构广义梁单元理论	132
6.3 移动轴荷载作用下轨道动力学模型	137
6.4 单轮附有一系弹簧阻尼的车辆模型	138
6.5 半车附有二系弹簧阻尼的车辆模型	140
6.6 整车附有二系弹簧阻尼的车辆模型	142
6.7 车辆与轨道结构参数	144
6.7.1 机车车辆基本参数	144
6.7.2 轨道基本参数	149
参考文献	153
第七章 车辆-轨道耦合系统动力分析的交叉迭代算法	156
7.1 车辆-轨道非线性耦合交叉迭代算法	156
7.2 算例验证及收敛性分析	160
7.2.1 算例验证	160
7.2.2 时间步长的影响	162
7.2.3 收敛精度的影响	163
7.3 列车-轨道非线性耦合系统动力分析	164
7.4 结论	171
参考文献	172
第八章 动轮单元模型及算法	173
8.1 动轮单元模型	173
8.2 单轮附有一系弹簧阻尼的动轮单元模型	175
8.3 单轮附有二系弹簧阻尼的动轮单元模型	178
8.4 单轮过桥动力分析模型及算法	181
参考文献	183
第九章 轨道单元和车辆单元模型及算法	184
9.1 有砟轨道单元模型	184
9.1.1 基本假设	184
9.1.2 三层有砟轨道单元	185
9.2 板式轨道单元模型	187
9.2.1 基本假设	187
9.2.2 三层板式轨道单元	188
9.2.3 板式轨道单元质量矩阵	189
9.2.4 板式轨道单元刚度矩阵	190
9.2.5 板式轨道单元阻尼矩阵	194
9.3 板式轨道-桥梁单元模型	195

9.3.1 基本假设	195
9.3.2 三层板式轨道-桥梁单元	196
9.3.3 板式轨道-桥梁单元质量矩阵	197
9.3.4 板式轨道-桥梁单元刚度矩阵	198
9.3.5 板式轨道-桥梁单元阻尼矩阵	201
9.4 车辆单元模型	202
9.4.1 车辆单元的势能	203
9.4.2 车辆单元的动能	207
9.4.3 车辆单元的耗散能	207
9.5 车辆-轨道耦合系统有限元方程	208
9.6 列车-轨道耦合系统动力分析	209
参考文献	213
第十章 车辆-轨道耦合系统动力分析的移动单元法	215
10.1 基本假设	215
10.2 板式轨道三层梁移动单元模型	216
10.2.1 板式轨道控制方程	216
10.2.2 板式轨道移动单元的质量、阻尼和刚度矩阵	218
10.3 车辆单元模型	228
10.4 车辆-板式轨道耦合系统有限元方程	228
10.5 算例验证	229
10.6 高速列车-板式轨道耦合系统动力分析	230
参考文献	237
第十一章 车辆-轨道-路基-大地耦合系统竖向动力分析模型	238
11.1 移动荷载作用下板式轨道-路堤-大地系统模型	238
11.1.1 板式轨道-基床系统动力方程及解	239
11.1.2 路堤本体-大地系统动力方程及解	241
11.1.3 板式轨道-路堤-大地系统耦合振动	243
11.2 移动荷载作用下有砟轨道-路堤-大地系统模型	244
11.2.1 有砟轨道-基床系统动力方程及解	245
11.2.2 有砟轨道-路堤-大地系统耦合振动	246
11.3 移动车辆-轨道-路基-大地耦合振动解析模型	247
11.3.1 移动车辆在轮对处的柔度矩阵	247
11.3.2 轨道-路基-大地系统在轮轨接触点处的柔度矩阵	249
11.3.3 考虑轨道不平顺的移动车辆-轨道-路基-大地系统耦合	250
11.4 高速列车-轨道-路基-大地耦合系统动力响应分析	251

11.4.1	列车速度和轨道不平顺对路堤本体振动的影响	251
11.4.2	基床刚度对路堤本体振动的影响	253
11.4.3	路堤土体刚度对路堤本体振动的影响	253
	参考文献	254
第十二章	列车-有砟轨道-路基耦合系统动力特性分析	255
12.1	车辆与轨道结构参数	255
12.2	列车速度效应分析	256
12.3	轨道基础刚度效应分析	259
12.4	过渡段不平顺效应分析	261
12.5	过渡段综合效应分析	266
	参考文献	269
第十三章	列车-板式轨道-路基耦合系统动力特性分析	271
13.1	算例验证	271
13.2	板式轨道结构参数	273
13.3	列车-板式轨道-路基耦合系统动力特性参数分析	273
13.3.1	轨下垫板刚度的影响	274
13.3.2	轨下垫板阻尼的影响	276
13.3.3	CA 砂浆刚度的影响	278
13.3.4	CA 砂浆阻尼的影响	281
13.3.5	路基刚度的影响	283
13.3.6	路基阻尼的影响	286
	参考文献	288
第十四章	有砟-无砟轨道过渡段动力特性分析	289
14.1	有砟-无砟轨道过渡段行车速度效应分析	290
14.2	有砟-无砟轨道过渡段轨道基础刚度效应分析	292
14.3	有砟-无砟轨道过渡段整治措施	294
	参考文献	296
第十五章	交叠地铁列车引起的环境振动分析	298
15.1	交叠地铁引起的大地振动分析	298
15.1.1	工程概况	298
15.1.2	材料参数	298
15.1.3	有限元模型	300
15.1.4	阻尼系数及积分步长	301
15.1.5	列车动荷载	301
15.1.6	环境振动评价指标	303