



MODERN RAILWAY TRACK (SECOND EDITION)

现代铁路轨道

(第二版)

[荷] Coenraad Esveld 著
王 平 陈 嵘 井国庆 译

中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE



014058206

C14058206

U213.2

10

铁路科技图书出版基金资助出版
国家自然科学基金委高铁联合基金资助
高速铁路轨道四川省科技创新研究团队资助

现代铁路轨道 (第二版)

[荷] Coenraad Esveld 著

王平 陈嵘 井国庆 译



中国铁道出版社

2014年·北京



北航

C1745413

U213.2

10

北京市版权局著作权合同登记 图字 01-2014-1252

图书在版编目(CIP)数据

现代铁路轨道:第2版/(荷)埃斯书尔德(Esveld,C.)著;
王平,陈嵘,井国庆译. —北京:中国铁道出版社,2014.7
书名原文:Modern railway track,second edition
ISBN 978-7-113-18467-4

I. ①现… II. ①埃… ②王… ③陈… ④井… III.
①轨道(铁路) IV. ①U213.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 084762 号

Copyright © Coenraad Esveld

书 名: 现代铁路轨道 (第二版)
作 者: [荷] Coenraad Esveld 著
王 平 陈 嵘 井 国 庆 译

责任编辑: 张 婕 编辑部电话: (010)51873141 电子信箱: crph_zj@163.com
封面设计: 崔 欣
责任校对: 龚长江
责任印制: 陆 宁

出版发行: 中国铁道出版社 (100054, 北京市西城区右安门西街 8 号)
网 址: <http://www.tdpress.com>
印 刷: 北京盛通印刷股份有限公司
版 次: 2014 年 7 月第 1 版 2014 年 7 月第 1 次印刷
开 本: 787 mm × 1092 mm 1/16 印张: 42.5 字数: 920 千
书 号: ISBN 978-7-113-18467-4
定 价: 220.00 元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版图书,如有印制质量问题,请与本社读者服务部联系调换。电话:(010) 51873174 (发行部)
打击盗版举报电话:市电 (010) 51873659,路电 (021) 73659,传真 (010) 63549480

译者序

现代轨道交通是现代科学与技术发展的结晶,是多种高新技术系统集成和融合的产物,具有典型的现代系统管理特征和较高技术水准包括主要技术指标达到世界先进水平的普速、高速铁路及重载铁路,同时又涉及具有较高的装备水平和一定运营管理、组织水平的城市轨道交通。铁路轨道是列车运行的重要基础设施,其结构性能对列车的安全、平稳运行有重要的影响。近年来,随着世界高速铁路和城市轨道交通的发展,出现了很多新型的轨道结构和新工艺、新技术,同时,列车-轨道相互作用、轨道结构维护管理等理论也不断完善和发展,丰富了现代铁路轨道的知识体系。而我国在当前轨道交通大发展的背景下,铁路建设业已取得了巨大的成就,在促进社会快速和持续发展中发挥了重要的作用。当然,在不断发展的过程中也遇到了一些问题,铁路轨道技术方面还有一些问题亟待完善和解决,比如复杂条件下新型轨道结构的优化,轨道质量评价,噪声和振动,轨道的智能识别检测和监测系统,轨道的全寿命周期维护和管理等等。很有必要引进和学习国外的现代铁路轨道技术,从理论源头开始梳理,支持和改进我国的铁路轨道建设,节约成本,提高我国的铁路轨道整体技术水平。

在国际铁道工程领域享有盛名的《现代铁路轨道》(第二版)一书,是荷兰代尔夫特工业大学的 Esveld 教授根据其多年来对铁路轨道知识体系的理解所著,本书将叙述的严谨性以及内容的深度和广度有机地结合了起来,对现代铁路轨道知识进行了归纳和提炼,并将其以基本原理和方法的形式融入全书的各个章节。本书详细地介绍了欧洲铁路轨道的最全、最新的理论和技术应用成果,进一步完善了轨道结构理论,汇入了轨道工程发展的新理论和新科技,形成了较完整的现代铁路轨道知识体系。同时,本书强调现代铁路轨道设计与运营实践的结合,具有针对性强、实用型强和系统性强的特点。内容涉及与现代铁路轨道相关的基本知识、轮轨相互作用理论、静态及动态轨道设计、轨道动力学、轨道稳定性、有砟与无砟轨道、道岔、线路维护和大修、轨道数值优化、振动和噪声、轨道检测与监测、高速铁路轨道、维护管理系统、资产管理系统以及寿命周期成本分析等内容,内容丰富而翔实;全书涵盖了

铁路轨道及其相关知识,系统且全面,可以称之为铁路轨道百科全书。

目前,我国铁路进入了加快发展的新阶段。以客运专线、区际干线、煤运通道、西部铁路为重点的大规模铁路建设全面展开,与此同时,我国已有40余个城市在建或在筹建城市轨道交通,到2015年,全国城市轨道运营总里程将达3000公里。在此背景下,编译出版《Modern Railway Track》中文版,将欧洲先进的轨道知识体系引入中国,发展完善我国的现代铁路轨道知识体系的重要意义就不言而喻。本书对现代铁路轨道相关理论和实践经验进行了较为系统的总结,为轨道设计技术的完善、铁路轨道的安全运营与维护、高速与城市轨道交通轨道技术问题的深化研究等提供重要参考,有利于相关科研、技术人员更全面准确地掌握铁路轨道相关技术,是一本不可多得的重要文献。本书的出版发行必将为总结梳理铁路轨道技术,完善我国铁路技术理论体系作出重要贡献。在此向国际铁道工程领域享有盛誉的学者和专家 Coenraad Esveld 先生致以最诚挚的敬意。

本书的翻译工作是由西南交通大学和北京交通大学长期从事铁路轨道教学与研究工作的三位老师:王平(第1~7章、9章、11章以及本书的前言部分)、陈嵘(第10章、12~18章),井国庆(第8章、19~20章)译校。全书的译文由王平负责统一定稿。

在《现代铁路轨道》(第二版)的编译出版过程中,得到了铁路科技图书出版基金、国家自然科学基金委员会高速铁路基础研究联合基金重点支持项目“高速铁路轨道结构检测关键理论与方法(U1234201)”、“高速铁路无缝线路状态演变机理及规律研究(U1334203)”、“高速铁路道岔轮轨接触理论与设计优化研究(51078320)”、“高速行车条件下铁路道岔典型损伤机理与性能演变诊控(51378439)”、青年基金项目“高速行车条件下车-岔-桥耦合系统的动力特性与低动力设计(51008256)”、铁道部科技研究开发计划重大项目“高速铁路道岔监测技术研究(2011G009)”、“道岔劣化机理、伤损标准和寿命研究(2012G013-A)”、重点项目“高速铁路无砟轨道环境振动评估及板上吸振技术研究(2012G008-D)”、四川省科技创新研究团队专项计划项目“高速铁路轨道结构理论与安全服役技术(2011JTD0008)”、四川省科技支撑计划项目“移动式钢轨空间廓形检测装置关键技术研究(2011GZ0241)”、“无砟轨道多功能无损检测车研究(2012GZ0104)”、“基于综合服役性能的轨道交通运营、维护及管理关键技术研究(2014GZ0009)”等项目的资助,得到了中国铁道出版社的大力支持和帮助。在此还要感谢西南交通大学高速铁路轨道研究团队各位同仁对文稿的审阅和建议,特别感谢参与了第11~18章校译工作的四川外国语大学成都学院教师张晓婷;在本书的编校过程中,译者所指导的

博/硕士研究生颜乐、徐金辉、徐井芒、蔡敦锦、汪力等在文字审校、图片及公式编辑方面倾注了大量的时间和精力,在此一并表示感谢。

本书译者对支持、帮助和关心本书出版的各位同行、出版者致以诚挚的谢意!

本书兼顾了通用性与系统性,面向科研一线的研究人员、大中专院校的高年级学生及研究生、铁路设计、施工、维护部门的技术人员,对于不同层次的铁道工程技术人员均具有相当大的指导意义。

在编译过程中,对书中专用名词、术语及相关问题进行定期讨论与商榷,但由于翻译水平有限,加之时间紧迫,书中不当之处,恳请读者批评指正,可发邮件至 xdtlgd@163.com。随时欢迎您的每一点意见。如果您在阅读中遇到问题,或者遇到铁路轨道的技术问题,可随时与我们联系,我们将尽力提供帮助。最后感谢关心本书成长的每一位读者!

王 平 陈 嵘 井国庆
2014 年 3 月

鸣谢

在第二版编制期间,许多专家协助提供和检查现有材料并编写其他章节。首先,我想感谢代尔夫特理工大学铁路工程组的同事们,他们是:Jan van 't Zand、Peter Scheepmaker、Gerard van der Werf、Anton Kok、Valeri Markine、Ivan Shevtsov、Pedja Joksimovic,以及 Jacqueline Barnhoorn 和 Sonja van den Bos 的秘书。我最想感谢的是我的博士生们,他们是: Akke Suiker、Amy de Man、Arjen Zoeteman、Søren Rasmussen、Stanislav Jovanovic 和 Jan Zwarthoed。他们的宝贵想法、建议和所作出的贡献使我获益良多。本书在一开始已明确提及起草本书重要章节的人员。在此,我还要特别感谢 Jan van 't Zand,是他使用 Framemaker 工具为本书进行整体排版。

在编制第二版的过程中,代尔夫特理工大学土木工程系道路与铁路工程部管理团队的同事们提供了帮助,我深表感激。他们是: André Molenaar、Peter Scheepmaker、Lambert Houben、Martin van der Ven 和 Abdol Miradi。

我还要感谢韩国高速铁路公司,他们提供了本书高速铁路一节中首尔—釜山高速铁路工程的相关信息。在这方面,我也想感谢国际轨道咨询专项委员会(SITAC),我在书中参考了委员会上许多有益的讨论。该委员会的成员包括: Kee-Dong Kang 博士、Yoshihiko Sato 博士、Serge Montagné 先生、Klaus Riessberger 教授、Gerhard Kaess 先生以及 Coenraad Esveld 教授,并且也要感谢 Arne Svensoy 先生、Bertold Pfeifer 先生和 Ki-Jun Son 先生的积极协助。

我从日本同事那里获得了很多宝贵的信息,包括来自铁路轨道系统研究所的 Yoshihiko Sato 博士、铁路技术研究所(RTRI)的 Katsutoshi Ando 博士和 Noritsugu Abe 先生以及日本铁路建设公司(JRCP)的 Tetsuhisa Kobayashi 先生。我向他们表示感谢。

对于加入荷兰运输和基础设施信息与技术中心铁路工程协调委员会(CROW))的相关企业和成员,我非常感谢他们所作出的间接贡献。

我也要感谢 Plasser and Theurer 公司的 Rainer Wenty 先生,感谢他修订线路维护和大修章节并提供各种其他相关主题的信息。

对于铁路管理局的 Peter McMichael 先生以及 AMEC Rail 的 David HillSmith 先生在吹砑技术这一章节所提供的帮助,我非常感激。

钢轨打磨的章节由 Wolfgang Schöch 先生审阅,对此我也想表示我的感激之情。

Voest Alpine Schienen 的 Norbert Frank 博士修订了钢轨这一章节大部分内容。对此,我非常感激。

我非常感激 NMBS/SNCB 的 Paul Godart 先生,感谢他提供 CEN 和 UIC 有关铁路新标准的工作信息。

感谢 TUC Rail 的 Hugo Goossens 先生,我们在线路维护方面进行了许多有益的讨论。VAE 的 Rainer Oswald 先生提出了修订道岔相关章节内容的建议,我深表感激。

感谢 Elektro-Thermit 的 Frank Kusters 博士审阅 ET 焊接章节。

感谢 Pfleiderer 的 Hans Bachmann 硕士、Jens Kleeberg 硕士和 Martin Kowalski 硕士 (FH),他们使我得以在板式轨道章节中编入 Rheda 系统的最新信息。

而且,许多供应商提供了有关轨道组成部分的必要信息,在这里我特别要感谢 Edilon 的 Gerrien van der Houwen 先生、Vossloh 的 Dirk Vorderbrück 先生、Phoenix Benelux 的 Chris Eckebus 先生、Pandrol 的 David Rhodes 先生、CDM 的 Patrick Carels 先生以及 Cronau 的 Olaf Unbehaun 先生。

对于本书中检查系统部分的内容,业界也给予了大量帮助。特别感谢 Eurailscout 的 Anton Weel 先生和 Han Wendt 先生、TNO-TPD 的 Jaap Roos 先生和 Erwin Giling 先生、Koninklijke BAM NBM 的 Aad van der Linden 先生和 Jan van der Schee 先生、Erdmann Softwaregesellschaft 的 Wido de Witte 先生、Ensco 的 Kevin Kesler 先生、Czech Railways (CD) 的 Danuše Marusicová 女士、Danuše Marusicová 的 Willem Ebersohn 教授、BalfourBeatty 的 Charles Penny 先生、S. E. I. Sistemi Energetici Integrati 的 Paolo Redi 先生以及 NS Rail Infrabeheer 的 Ted Slump 先生。

最后,感谢 Dior van Nieuwenhuizen 对审阅和校正本书英文版所作出的杰出贡献。

最后,我希望第二版能够再一次对培训学生和铁路工程师有所帮助。

Coenraad Esveld

前言

《现代铁路轨道》大获成功之后,本书(第二版)对原版内容进行扩充,同时也对原版内容进行了全面的修改,并加入了过去 10 年中铁路的发展情况。代尔夫特理工大学铁路工程组所开展的研究项目在本书的编制过程中发挥了核心作用。本书大幅度地强化了轮轨相互作用的理论,并且着重阐述了动力学方面的知识。毋庸置疑,本书中最重要的一个扩展内容是板式轨道结构部分,同时也更多地关注线路管理的系统方面。数值优化、轨道测试和工程验收是本书的新增内容。

在修订 1994 年~2000 年期间的代尔夫特理工大学土木工程系铁路课程讲义时,我们将第一版内容视为一个起始点。第一版、代尔夫特课程讲义、各种出版物以及研究报告(大部分来自于代尔夫特理工大学铁路工程组)构成第二版的基础。

代尔夫特理工大学铁路工程组成员对各章节的编写以及修订作出了极大的贡献。同时,业界也对本书作出了重要贡献,特别是有关钢轨制造、轨道组成部分、维修和大修以及检查系统等章节的内容。

前七章讨论了有关轮轨界面和轨道设计的基本原理。在设计部分,我们关注静态和动态因素,其中列举了从计算机模型(如 RAIL、GEOTRACK 和 ANSYS)中得出的大量结果实例。在稳定性和纵向力章节,我们就 CWERRI 程序开展了广泛的讨论。

轨道结构的讨论分为有砟轨道和无砟轨道章节。有砟轨道章节讨论了传统结构设计和现代有砟设计,而无砟轨道章节集中阐述了最近几十年的发展情况。本书也提出了将纵连板、预制单元板与点支承式或连续支承式钢轨结合使用的解决方案。

钢轨章节讲述了钢轨的最新发展水平并介绍了 EN 新标准,同时也讨论了最新的检查系统。本书中也加入了贝氏体钢轨钢的最新信息。

道岔章节讨论了高速道岔以及几何形位设计标准和用于道岔维护管理的现代检测系统。

线路维护和大修是铁路工程实践中的一个关键因素。本书阐述了有关线路维护的最新方法及相关设备,这是与第一版相比的一个主要扩展内容。本章节中也加入了轨道几何状态的内容。

铁路工程中过去往往忽视技术优化问题。优化技术不仅适用于部件和结构,同时也适用于决策支持系统以及资源配置。本书新增了数值仿真优化这一章,并主要讨论了结构部件优化。

从一开始,试验工作就一直是铁路工程的重要组成部分。因此本书新增了测试和验收内容,其中也提出了新的铁路轨道部件验收标准。

噪声和振动章节讲述了噪声和振动的基本原理,大部分来自于第一版内容,仅少数内容有所修改。

本书全面修订了检查和检测方法章节的内容。原章节主要基于荷兰铁路公司的经验,新章节新增了最新水平的检验系统。但是,我们完整地保留了第一版中的基本原理部分。

高速轨道章节包含高速工程的部分应用以及部分专项问题,例如隧道内的压力波。其中有一节还专门讲述了磁悬浮知识。

线路维护管理系统章节讲述了有关线路维护和更新决策支持的各种问题,以及有关各种维护过程的相关现象的监测。本书特别介绍了 ECOTRACK 系统,该系统在 UIC 的赞助下开发并由代尔夫特理工大学维护和支持。

铁路资产涉及大量的资金,且需要妥善管理。有关该问题的章节阐述了资产管理的一般基本原理以及建立此类系统的方法。

最后一章讲述了寿命周期成本分析。此章节在阐述一般基本原理的同时也讨论了大量的案例研究。

2001 年夏季,于扎尔特博默尔

Coenraad Esveld

目录

1 引 言	1
1.1 发展历程	1
1.2 铁 路	1
1.3 有轨电车和地铁	3
1.4 运营方面	4
1.4.1 铁路公司的职责	4
1.4.2 基础设施	4
1.4.3 机车车辆	5
1.4.4 人 员	5
1.4.5 电 气 化	6
1.4.6 接触网系统	6
1.4.7 平交道口	8
1.4.8 主要铁路基础设施工程	8
1.4.9 发展中国家	9
1.5 铁路线路的几何形位	10
1.5.1 限 界	10
1.5.2 铁路选线	12
1.6 传统轨道结构	13
1.6.1 轨道要求	13
1.6.2 轨道的承载能力	13
1.6.3 钢轨作用力和位移	14
1.6.4 轨道几何形位的组成	15
2 轮轨关系	16
2.1 轮轨导向	16
2.2 轮对与轨道尺寸	16
2.3 踏面锥度	17
2.4 直线轨道上轮对的横向运动	18
2.4.1 Klingel 理论	18

2.4.2 蛇行运动	19
2.5 等效锥度	20
2.6 磨耗型车轮踏面	20
2.7 轮轨接触应力	22
2.7.1 Hertz 理论	22
2.7.2 Hertz 弹簧刚度	23
2.7.3 轮轨间的单点和两点接触	23
2.7.4 横向推力	24
2.7.5 轮轨蠕滑	25
2.7.6 自旋	27
2.7.7 蠕滑系数	28
2.8 列车阻力	29
2.8.1 阻力种类	29
2.8.2 牵引力	30
2.8.3 黏着力	31
3 曲线和坡道	32
3.1 概 述	32
3.2 平面曲线的曲率和超高	32
3.2.1 曲线半径/曲率	32
3.2.2 曲线的影响	32
3.3 超 高	33
3.3.1 概 述	33
3.3.2 欠超高	34
3.3.3 悬挂系统对横向加速度的影响	35
3.3.4 车体倾斜对欠超高的影响	35
3.3.5 道岔和其他制约条件	36
3.3.6 过超高	36
3.3.7 最大超高	36
3.4 缓和曲线	36
3.4.1 一般要求	36
3.4.2 螺旋线	37
3.4.3 三次抛物线	37
3.4.4 曲线移位	38
3.5 顺坡扭曲	38
3.5.1 与缓和曲线的关系	38
3.5.2 常用缓和曲线的长度	39
3.5.3 邻近曲线	40

3.6	曲线阻力	40
3.7	坡 道	41
3.7.1	坡道阻力	41
3.7.2	坡度大小	41
3.7.3	竖 曲 线	41
3.7.4	准静态容许加速度指标	42
3.8	山区铁路选线	43
3.9	计算机辅助铁路线路设计	44
3.10	用 PASCOM 软件评估乘客舒适度	47
3.10.1	数值模型	48
3.10.2	算例 1:动态影响分析	48
3.10.3	算例 2:荷比高速轨道(NL 段)	50
4	轨道荷载	52
4.1	概 述	52
4.2	轴 重	52
4.3	线路分类	52
4.4	通过总重	53
4.5	速 度	54
4.6	轨道荷载的产生原因及性质	55
4.7	轨道竖向力	55
4.7.1	竖向总轮载	55
4.7.2	倾覆危险性	56
4.8	轨道横向力	57
4.8.1	总的车轮横向力	57
4.8.2	脱轨危险性	57
4.8.3	作用于轨道上的横向力	58
4.9	纵 向 力	58
4.9.1	产生原因	58
4.9.2	温 度 力	59
4.9.3	轨道爬行	59
4.9.4	制动荷载	59
4.10	速度和轴重增加的影响	59
4.10.1	速 度	59
4.10.2	轴重增大	60
4.11	车轮扁疤	64
4.12	焊接不平顺的作用力	66
4.13	轴箱加速度	67

5 轨道静力设计	68
5.1 引言	68
5.2 支承模型	68
5.2.1 文克尔支承模型	68
5.2.2 点支承梁模型	68
5.2.3 练习:钢轨支座刚度的确定	69
5.2.4 连续支承钢轨模型	70
5.2.5 点支承梁模型的近似模拟	71
5.3 弹性地基梁模型	71
5.3.1 微分方程的求解	71
5.3.2 轮群作用	73
5.3.3 二轴转向架	74
5.3.4 负挠度	74
5.3.5 铰接长梁(有缝线路)	75
5.3.6 特征长度 L 的另一种表达式	75
5.3.7 竖向弹性常数的快速求解方法	76
5.3.8 轨道参数量级	76
5.4 叠合梁模型	77
5.5 Pasternak 地基模型	78
5.6 轨道应力	80
5.6.1 轨底中心应力	80
5.6.2 动力放大系数	80
5.6.3 轨底中心处的最大弯曲应力	82
5.6.4 轨头内部应力	83
5.6.5 Q/Y 组合荷载所导致的钢轨应力	85
5.6.6 钢轨参数表	87
5.7 轨枕应力	87
5.8 道床和路基上的应力	88
5.8.1 引言	88
5.8.2 道床垂直应力	89
5.8.3 路基垂直应力	90
5.8.4 Odemark 等效法	90
5.8.5 土质分类	92
5.9 练习题	93
5.9.1 轨底疲劳	93
5.9.2 轨头疲劳	94
5.9.3 轨枕	94

5.9.4 道 床	95
5.9.5 温度效应	95
5.10 计算机模型	97
5.10.1 GEOTRACK 程序	97
5.10.2 ANSYS 程序	100
5.11 两种嵌入式轨道结构设计案例	102
5.11.1 UIC54 ERS 评估	102
5.11.2 SA42 ERS 评估	103
5.11.3 静态模型的输入和输出	104
5.11.4 结 论	104
6 轨道动力设计	106
6.1 引 言	106
6.2 动力学原理	107
6.2.1 概 述	107
6.2.2 单质点弹簧系统	108
6.2.3 钢轨低接头所产生的轮轨冲击力	111
6.2.4 轨道激振源	112
6.3 轨道建模	112
6.3.1 总 则	112
6.3.2 轨道荷载与位移间的传递函数	113
6.3.3 弹性地基梁	114
6.3.4 点 支 承	120
6.4 车轮竖向响应	120
6.4.1 赫兹接触弹簧	120
6.4.2 轮轨间的传递函数	121
6.5 车辆线性模型	122
6.5.1 车辆动力模型图式	122
6.5.2 水平不平顺响应	123
6.5.3 水平工况的结果组合	126
6.5.4 轨向不平顺响应	127
6.5.5 超高不平顺响应	127
6.5.6 超高工况的结果组合	128
6.5.7 ISO 加权的车体加速度	129
6.5.8 荷兰铁路检查车传递函数的计算	130
6.6 应用测试数据估算传递函数	134
6.6.1 一般概念	134
6.6.2 单输入单输出分析的基本原理	134

6.6.3	多输入单输出(MISO)分析法	137
6.6.4	统计可靠度	138
6.6.5	数值分析	139
6.6.6	应用	141
6.6.7	MISO 估算的传递函数和使用模型计算的传递函数之间的对比	148
6.7	车辆实时响应分析	149
6.8	Sperling 乘坐指数 W_z 和 ISO 加权加速度之间的关系	152
6.9	高级动力学模型的应用	154
6.9.1	引言	154
6.9.2	RAIL 模型	154
6.9.3	几种不同轨道结构类型的对比	156
6.9.4	路桥过渡段	160
6.10	移动载荷作用下的轨道响应	161
6.10.1	临界速度下的轨道响应	162
6.10.2	道砟层的动力响应	165
6.10.3	刚度过渡	166
6.10.4	简论	168
7	轨道稳定性和纵向力	169
7.1	引言	169
7.1.1	直线轨道与横向弹性阻力	170
7.1.2	轨道方向不良与横向抗剪常量	172
7.2	轨道稳定性:有限元模型	174
7.2.1	总则	174
7.2.2	有限元建模	175
7.2.3	结果	179
7.2.4	无缝道岔	182
7.3	纵向力:分析建模	182
7.3.1	一般考量因素	182
7.3.2	纵向受力模型	183
7.3.3	梁轨相互作用模型	184
7.4	纵向力:有限元模型	187
7.4.1	一般考量因素	187
7.4.2	有限元模型	187
7.4.3	纵向力计算示例	188
7.5	轨道挠曲的高级数值模型	192
7.5.1	引言	192
7.5.2	使用 CWERRI 分析轨道状态	193

7.5.3	纵向力分析	194
7.5.4	轨道的横向状态	196
7.5.5	轨道的垂向稳定性	197
7.5.6	臌曲机理	198
7.5.7	确定容许温度 TALL 的方法	198
7.5.8	案例研究:有轨电车轨道的稳定性	199
8	有砟轨道	201
8.1	引 言	201
8.2	路 基	202
8.3	道 床	203
8.4	钢 轨	204
8.4.1	功 能	204
8.4.2	钢轨断面	204
8.4.3	平底轨的几何形状	205
8.5	钢轨接头和焊缝	206
8.5.1	引 言	206
8.5.2	鱼尾板接头	206
8.5.3	伸缩接头和伸缩装置	206
8.5.4	桥梁过渡结构	207
8.5.5	绝缘接头	207
8.5.6	焊接接头	208
8.6	轨 枕	209
8.6.1	引 言	209
8.6.2	木 枕	210
8.6.3	混凝土枕	211
8.6.4	钢 枕	214
8.7	有砟轨道的发展	214
8.7.1	引 言	214
8.7.2	宽 枕	214
8.7.3	框架式轨枕	215
8.7.4	应用化学粘合剂实现道砟局部稳定	216
8.8	扣件系统	216
8.8.1	引 言	216
8.8.2	扣件分类	217
8.8.3	铁 垫 板	217
8.8.4	弹性扣件	218
8.8.5	轨下垫板	219