

翻译版

高等轨道岩土工程 ——有砟道床

布迪马·因卓拉特纳(Buddhima Indraratna)

[澳] 韦杜德·萨利姆(Wadud Salim)

著

乔拉查特·鲁吉齐亚特卡门乔恩(Cholachat Rujikiatkamjorn)

井国庆 陈嵘 王平 译

Advanced Rail Geotechnology ——Ballasted Track



 **CRC Press**
Taylor & Francis Group

 **机械工业出版社**
CHINA MACHINE PRESS

时代教育·国外高校优秀教材精选

高等轨道岩土工程——有砟道床

(翻译版)

布迪马·因卓拉特纳 (Buddhima Indraratna)

[澳] 韦杜德·萨利姆 (Wadud Salim)

著

乔拉查特·鲁吉齐亚特卡门乔恩 (Cholachat Rujikiatkamjorn)

井国庆 陈 嵘 王 平 译



机械工业出版社

Advanced Rail Geotechnology—Ballasted Track/by Buddhima Indraratna,
Wadud Salim, Chalachat Rujikiatkamjorn/ISBN: 9780415669573

Copyright © 2011 by Taylor & Francis Group, LLC

CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group, an Informa business

Authorized translation from English language edition published by CRC Press,
an imprint of Taylor & Francis Group LLC; All rights reserved.

本书原版由 Taylor & Francis 出版集团旗下, CRC 出版公司出版, 并经其
授权翻译出版, 版权所有, 侵权必究。

China Machine Press is authorized to publish and distribute exclusively the Chi-
nese (Simplified Characters) language edition. This edition is authorized for
sale throughout Mainland of China. No part of the publication may be reproduced
or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without
the prior written permission of the publisher.

本书中文简体翻译版授权由机械工业出版社独家出版并限在中国大陆地区
销售。未经出版者书面许可, 不得以任何方式复制或发行本书的任何
部分。

Copies of this book sold without a Taylor & Francis sticker on the cover are unau-
thorized and illegal.

本书封面贴有 Taylor & Francis 公司防伪标签, 无标签者不得销售。
北京市版权局著作权合同登记 图字: 01-2015-6663 号。

图书在版编目 (CIP) 数据

高等轨道岩土工程: 有砟道床: 翻译版/(澳) 布迪马·因卓拉特纳,
(澳) 韦杜德·萨利姆, (澳) 乔拉查特·鲁吉齐亚特卡门乔恩著; 井国
庆, 陈嵘, 王平译. —北京: 机械工业出版社, 2017. 12

书名原文: Advanced Rail Geotechnology-Ballasted Track

时代教育·国外高校优秀教材精选

ISBN 978-7-111-58318-9

I. ①高… II. ①布… ②韦… ③乔… ④井… ⑤陈… ⑥王… III. ①轨
道(铁路)-岩土工程-高等学校-教材 IV. ①U213.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 253799 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 李 帅 责任编辑: 李 帅 臧程程 马军平

责任校对: 肖 琳 封面设计: 张 静

责任印制: 张 博

三河市国英印务有限公司印刷

2018 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·17.5 印张·418 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-58318-9

定价: 79.80 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线: 010-88379833

读者购书热线: 010-88379649

网络服务

机工官网: www.cmpbook.com

机工官博: weibo.com/cmp1952

教育服务网: www.cmpedu.com

金书网: www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

本书译自澳大利亚布迪马·因卓拉特纳 (Buddhima Indraratna) 教授所著《Advanced Rail Geotechnology—Ballasted Track》，是“时代教育·国外高校优秀教材精选”系列之一。

本书为作者多年来对静态和循环荷载条件下轨道的艰辛观测和研究成果，这些研究使用了最先进的试验，并利用无损道砟试验对轨道状态进行了检测。本书探讨了地下排水及底砟层对轨道稳定的作用，轨道性能检测的现场仪器与道砟和轨道模型的结合，促成了适合现代铁路和高速及重载铁路道砟级配标准的出现。

本书不仅是对道砟力学特性的全面研究，也是对土工合成材料对加固道砟和改善轨道排水作用的研究，为利用现代化轨道检测设备对轨道不稳定性评估和性能测试提供了指导。

本书不仅可作为铁道工程专业研究生教材，也是一本优秀的教师、科研人员和工程技术人员的参考书。

译者序

道砟来源于压舱石，即英国运煤船舶返航时的配重碎石和砾石，随后废弃并铺设在运煤线路上，然后逐渐普及（20世纪30年代），乃至成为经典有砟道床结构，广泛应用于普通、高速、重载铁路，甚至城市轨道交通。然而，一方面，我们对有砟道床力学特性、变形和劣化机理、道砟与外部环境相互作用等理解还不够全面、深入、准确；另一方面，随着重载及高速铁路的发展，对有砟道床结构RAMS相关性能提出更高要求，新材料、新结构、复杂环境、养护维修、可持续发展等问题日益迫切。以上需求和挑战，需要对经典道砟散体材料和有砟道床结构系统进行再认识、再研究、再创新、再应用。

本书原著第一作者布迪马·因卓拉特纳（Buddhima Indraratna）教授是澳大利亚技术与工程科学院院士，是目前国际铁路岩土界最活跃的学者之一，有砟道床研究集大成者。本书是其研究成果的主要代表作，本书从有砟道床结构及影响因素分析入手，阐述了道砟最新试验和评估方法；系统揭示了土工格栅、土工织物、道砟垫与道砟相互作用力学特性及应用技术，包括设计与维修；深入探讨了有砟道床排水特性及底砟结构，量化分析了脏污道床排水特性及影响因素，提出了有效的改善措施，并对道砟、底砟级配的设计提出了具体指导意见。作者基于深厚的岩土力学功底，在有砟道床劣化模型基础上，提出了有砟道床连续力学模型，并进行了验证与解析，拓展了对道砟本构及其在轨道结构中应用的研究；本书将有限元及离散单元法系统引入到道砟及有砟道床研究与应用中，揭示了道砟受力与变形、破碎与磨耗、道砟-土工格栅的相互作用等，提供了设计和应用指导；在以上研究基础之上，作者通过道砟级配标准比较研究，提出了优化级配方案，以降低道床沉降与劣化。本书还对有砟道床施工与验收、养护维修机制与案例分析、有砟道床无损检测技术和应用以及铁路下部基础绿色环保固化技术等进行了阐述与总结。上述成果是作者20多年来研究与应用结果的集中展示。

译者希望中国铁路研究和技术人员继续深化有砟道床与实用技术相关研究，发展可靠、高效、绿色有砟道床结构。

井国庆

于北京交通大学上园村

2017年6月12日

序

在世界范围内，铁路正经历着一场全面复兴，包括城市轨道、高速铁路、重载铁路及联合运输。本书是关于有砟轨道设计的第二本书，它为减少养护维修成本，提高轨道可用性提供了实际方法，有助于铁路振兴。本书特别关注于利用土工合成材料改善铁路排水条件并延长铁路寿命。此外，本书注重于如何对道砟进行循环利用来减少进一步采石的需求。同时，本书为改善铁路轨道性能及铁路现代化建设提供了方法。

布迪马·因卓拉特纳、韦杜德·萨利姆和乔拉查特·鲁吉齐亚特卡门乔恩率先找到了有砟轨道的创新设计方法。澳大利亚伍伦贡大学推动了轨道岩土工程学科前沿的发展。伍伦贡大学是合作研究中心为铁路创新所创办的大学之一。合作研究中心与其他机构共同领导了这些研究，并提供了经费支持。

本书基于多年对静态和循环荷载条件下轨道的艰辛观测和研究所得。这些研究使用了最先进的试验，并利用无损道砟试验对轨道状态进行检测。本书探讨了地下排水对铁路轨道稳定的益处及底砟层的作用。轨道性能检测的现场仪器与道砟和轨道模型的结合，促成了适合现代铁路和高速及重载铁路道砟级配标准的出现。

澳大利亚对于重载铁路运营发展起到了主导作用。这包括对长 3km 列车的运营，净荷载大于 40000t 而轴重为 40t 的列车在极端天气条件下的运营。拥有世界领先的轨道结构和道砟认知是长期维持这种运营的关键。

本书不仅是对道砟力学特性的全面研究，也是对土工合成材料对加固道砟和改善轨道排水作用的研究。它为利用现代化轨道检测设备对轨道进行不稳定性评估和性能测试提供了指导。

这些世界领先的研究工作旨在为轨道工程师提供实践指导。考虑到如今运营条件更为严格，列车荷载引起的道砟劣化和变形十分严重，本书引入了道砟级配新标准。

本书的完成是合作研究的典范，为铁路行业竞争提供了开创性解决方案。它代表了研究人员、学生及工程师对铁路轨道学科的贡献。这项研究工作的顶点在于许多智能工具软件在轨道创新合作研究中心和伍伦贡大学的共同努力下，在未来有望实现商业化并为现场工程师的道砟管理提供指导。铁路创新合作研究中心提供经费和赞助是重要的，而且是开创性的。

David George

铁路创新合作研究中心首席执行官

澳大利亚

前 言

几百年来,虽然客货列车运载量和速度都有提高,但有砟轨道设计几乎保持不变。从本质上讲,铁路轨道是分层基础,由路基之上压实底砟层或覆盖层和底砟层之上的粗颗粒介质层(通常是硬质岩石道砟)组成。钢轨铺设在木枕或混凝土枕上并将动力传递给主要承载层——道砟。只能通过两侧砟肩和轨枕之间枕心道砟处施加围压来减少列车通过时道砟横向变形,与碎石力学常识不同的是,道砟层几乎是一个无侧限承载层。

道砟在缺乏足够约束条件下的横向移动,粉尘污染,翻浆冒泥形成的土颗粒(软黏土和粉土在饱和条件下液化)和货运列车掉落的煤炭以及道砟劣化(细颗粒迁移向下)都是造成铁路维修费用高昂的主要原因。为了改善铁路道砟状况,澳大利亚、北美和西欧一直致力于研究道砟开采环境控制技术、旧道砟回收与再利用技术,同时在铁路养护维修方面投入重点项目研究资金,用以寻找降低维修成本、延长维修周期的方法,以上已成为大多数运营繁忙的铁路公司的优先事项。在本书中,作者也强调了土工合成材料对回收再利用道砟的改善作用。据预计,土工合成材料的使用将促进废旧道砟的再利用,减少石料开采并节省宝贵的土地资源。

尽管目前对砂石、公路路基及碎石(坝)的研究十分广泛,但是对于单调加载条件下的道砟特性研究较少,而研究循环荷载条件下道砟特性的文献更是凤毛麟角。过去的数十年来,在设计中道砟层被铁路工程师认为是“弹性”的,而只是在近期,高速列车荷载条件下道砟特性被认为初始呈现弹塑性状态,当出现显著劣化包括破碎情况时道砟为完全塑性状态。维护期间对道砟的观测表明,劣化导致道砟粒径产生变化。轨道沉降和侧向变形可作为评估指标,用以研究循环加载后道砟的塑性变形。

在本书中,作者通过大型试验设备,即圆柱和棱柱三轴试验仪,来研究道砟的力学特性。由于很少有研究机构为道砟测试设计和搭建试验平台,作者对道砟在大型试验设备基础上的静载及动载试验研究是独一无二的。作者提出了多种本构模型来描述单调和循环荷载作用下道砟的力学特性。通过上述试验及现场实测,验证了力学公式及数值模型的正确性。本书研究了轨道设计中土工材料的应用工况,并为轨道设计及道砟颗粒劣化、脏污和排水跟踪监测提供了新视角;介绍了无损检测方法对有砟道床轨道状态的检测;讨论了排水与无缝线路稳定性之间的关系,并通过案例分析展示了研究成果。在道砟材质和级配选型方面,为适应现代重载和高速铁路,本书提出较小粒径分布均匀度道砟级配。

本书的完成离不开各组织及个人的鼓励与支持。首先,作者十分感谢铁路基础设施公司(新南威尔士州)高级岩土工程顾问 David Christie 不断的支持与宝贵建议;感谢前铁路工程和技术合作研究中心及现铁路创新合作研究中心(Rail-CRC)在过去十年的支持;感谢澳大利亚研究理事会和铁路创新合作研究中心在过去8~10年间所提供的各研究项目资金,感谢前博士研究生 Dominic Trani 博士、Daniela Ionescu 博士、Behzad Fatahi 博士、Joanne Lackenby 博士及 Pramod Thakur 博士的研究成果;感谢 Hadi Khabbaz 博士和 Mohamed Shahin 博士(前研究员)的重要贡献;感谢 Julian Gerbino 的不断支持;感谢 George Fannelli 的援助;感

谢伍伦贡大学 Alan Grant、Ian Bridge 和 Ian Laird 及澳大利亚前铁路服务公司（RSA）提供的专门试验支持与技术支持。特别感谢 Anisha Sachdeva 博士，她在伍伦贡大学的短暂时光中，帮助作者快速编辑。本书大部分章节由 Manori Indraratna 和 Bill Clayton 审稿与校对。

本书引用的众多图形、表格和一些技术研讨中的技术数据已获得各出版社许可。在此，作者特别感谢：

Coenraad Esveld 教授：《现代铁路轨道》作者，MRT Productions，荷兰，2001。

托马斯德福有限公司（英国），许可引用以下著作：《轨道岩土工程及地基管理》，E. T. Selig and J. M. Waters，1994，以及该作者曾发表在《岩土工程》上的著作。

爱思唯尔科技出版有限公司，许可引用以下书中的部分图表：《土工织物及土工膜手册》，T. S. Ingold，1994。

Akke S. J. Suiker 博士；《有砟铁路的力学性能》，代尔夫特理工大学出版社，荷兰，2002。

《加拿大岩土期刊》《岩土和地质环境工程国际期刊》《地质力学国际期刊》《美国材料与试验协会土工试验期刊》及《岩土力学和岩土工程》授权作者已发表的论文图表。

特别感谢：

感谢伍伦贡大学岩土力学和铁路工程中心 Sanjay Nimbalkar 博士、Jayan Vinod 和 Lijun Su 博士的贡献。他们在各研究项目中取得的突出成果，使本书在轨道岩土工程方面有广泛全面的视角。

布迪马·因卓拉特纳

韦杜德·萨利姆

乔拉查特·鲁吉齐亚特卡门乔恩

作者简介



和国际研究及咨询工作。

他多年的努力得到了国际认可。在其获得的众多奖项中，尤为突出的是：2009年由澳大利亚岩土力学学会举办的EH Davis纪念讲座，表彰其在岩土工程理论与实践方面的突出贡献，同年，由澳大利亚联邦政府举办的商业高等教育圆桌会议授予其轨道创新奖。除本书外，他还编著了4本书，在国际期刊和会议上发表350余篇论文，受邀进行全球主题演讲30余场。他的数篇作品已获得加拿大岩土工程学会和瑞典岩土工程学会组织的国际岩土力学计算方法与发展协会颁发的杰出贡献奖。



韦杜德·萨利姆博士是澳大利亚昆士兰黄金海岸市政府环境与交通部高级岩土工程师。毕业于孟加拉工程技术大学，于泰国亚洲理工学院获得岩土工程硕士学位，并获得伍伦贡大学岩土工程博士学位。他是伍伦贡大学岩土力学与铁路工程中心兼职研究员，曾是悉尼铁路公司的岩土工程师。他是一部关于轨道岩土工程书籍与多篇铁路现代化领域的各种国际期刊和会议的技术论文的合著者。



乔拉查特·鲁吉齐亚特卡门乔恩博士是伍伦贡大学土木工程高级讲师。他毕业于泰国孔敬大学土木工程专业，于泰国亚洲技术研究所获得硕士学位。之后他在伍伦贡大学获得了岩土工程博士学位。他的专业领域包括交通基础设施地基加固和软黏土工程。2009年，他获得了国际岩土力学计算方法与发展协会的优秀论文奖。此外，由于他在交通基础设施软土地基稳定方面的创新，于2006年获伍伦贡开拓者奖。他在国际期刊和会议上发表了50多篇文章。

目 录

译者序		参考文献	30
序		第3章 道床性能的影响因素	32
前言		3.1 单体颗粒的物理性质	32
作者简介		3.1.1 粒径	32
第1章 绪论	1	3.1.2 道砟颗粒形状	33
1.1 轨道下部结构性能	1	3.1.3 颗粒表面粗糙度	34
1.1.1 脏污	2	3.1.4 母岩强度	35
1.1.2 排水	2	3.1.5 颗粒抗压强度	35
1.1.3 路基失稳	4	3.1.6 耐磨和抗风化性能	35
1.1.4 道砟和轨枕劣化	4	3.2 道砟的散体特性	36
1.1.5 横向约束	5	3.2.1 粒径分布	36
1.1.6 荷载-变形	5	3.2.2 孔隙率(或密度)	38
1.2 碳足迹及其启示	6	3.2.3 含水量	38
1.3 研究领域	7	3.3 荷载特性	39
参考文献	7	3.3.1 围压	39
第2章 轨道结构和钢轨荷载	9	3.3.2 荷载历史	40
2.1 轨道结构类型	9	3.3.3 当前应力状态	40
2.1.1 有砟轨道	10	3.3.4 荷载循环次数	42
2.1.2 板式无砟轨道	10	3.3.5 荷载频率	43
2.2 有砟轨道结构组成	11	3.3.6 荷载幅值	44
2.2.1 钢轨	11	3.4 道砟颗粒劣化	46
2.2.2 扣件系统	12	3.4.1 颗粒破碎量化	46
2.2.3 轨枕	12	3.4.2 道砟破碎影响因素	47
2.2.4 道砟层	12	3.4.3 主应力比对颗粒破碎的影响	47
2.2.5 底砟层	15	3.4.4 围压对颗粒破碎的影响	48
2.2.6 路基	16	参考文献	51
2.3 轨道承受荷载	16	第4章 道砟室内试验和道砟劣化评估的 研究现状	54
2.3.1 垂向力	16	4.1 静三轴试验	54
2.3.2 横向力	20	4.1.1 大型三轴试验仪	54
2.3.3 纵向力	21	4.1.2 试验道砟介绍	55
2.3.4 冲击荷载	21	4.1.3 试样制备	56
2.4 荷载传递机理	23	4.1.4 试验过程	57
2.5 应力测定	25	4.2 道砟单体颗粒压碎试验	57
2.5.1 Odemark 法	25	4.3 动三轴试验	58
2.5.2 齐默曼法	25	4.3.1 棱柱体三轴试验仪	58
2.5.3 梯形估算法(2:1法)	27	4.3.2 试验材料	59
2.5.4 Arema 推荐方法	27		

4.3.3 试验材料准备	62	剪切	122
4.3.4 动三轴试验	63	7.3.2 循环加载模型	123
4.4 冲击试验	64	7.4 模型验证与讨论	126
4.4.1 落锤试验机	64	7.4.1 数值方法	126
4.4.2 测试仪器	65	7.4.2 模型参数计算	126
4.4.3 试验材料	65	7.4.3 单调加载模型预测	127
4.4.4 试样准备	67	7.4.4 分析模型与有限元预测值的对比 分析	129
4.4.5 冲击试验过程	67	7.4.5 循环加载模型预测	130
参考文献	68	参考文献	133
第5章 有无土工合成材料和减振垫的 有砟道床性能	70	第8章 轨道排水和土工织物的应用	135
5.1 单调荷载作用下道床的力学响应	70	8.1 排水	135
5.1.1 应力-应变特性	70	8.1.1 底砟排水	136
5.1.2 抗剪强度和刚度	74	8.1.2 排水要求	136
5.1.3 三轴剪切试验的颗粒破碎	76	8.2 脏污指标	137
5.1.4 道砟临界状态	78	8.2.1 脏污指数和脏污百分比	137
5.2 道砟单体破碎强度	79	8.2.2 孔隙脏污百分比	137
5.3 循环荷载作用下道砟的力学响应	80	8.2.3 相对脏污率	138
5.3.1 沉降响应	80	8.3 土工织物在轨道中的应用	139
5.3.2 应变特性	81	8.4 作为下部排水结构的竖向土工合成 材料排水管	142
5.3.3 颗粒破裂	83	8.4.1 试验仪器和过程	142
5.4 重复加载下道砟的力学响应	85	8.4.2 试验结果及分析	142
5.5 围压对道床性能影响	85	参考文献	143
5.6 能量吸收材料——减振垫	87	第9章 底砟层的作用——排水和 过滤	145
参考文献	90	9.1 底砟层设计标准	145
第6章 现有轨道结构的变形模型	92	9.1.1 过滤与透水标准	145
6.1 道床的塑性变形模型	92	9.1.2 底砟选择案例研究	147
6.2 其他塑性变形模型	94	9.2 颗粒过滤的经验研究	149
6.2.1 临界状态模型	94	9.2.1 自然资源保护服务 (NRCS) 方法	149
6.2.2 弹塑性本构模型	96	9.2.2 自过滤方法	151
6.2.3 边界面塑性模型	100	9.3 排水和过滤的数学公式	151
6.3 颗粒破碎模拟	102	9.3.1 几何概率模型	152
参考文献	104	9.3.2 颗粒渗透模型	155
第7章 道砟本构模型	106	9.4 收缩粒径分布模型	155
7.1 颗粒破碎的模拟	106	9.4.1 过滤层压实	155
7.1.1 计算道砟基本摩擦角 ϕ_f	109	9.4.2 过滤层厚度	156
7.1.2 颗粒破碎对摩擦角的影响	109	9.4.3 占主导地位过滤层的收缩尺寸	157
7.2 单调加载的本构建模	111	9.4.4 控制过滤层的收缩尺寸	157
7.2.1 应力应变参数	111	9.4.5 路基土参数的代表值	157
7.2.2 增量式本构模型	112		
7.3 循环加载的本构建模	121		
7.3.1 各向异性初始应力状态下的			

9.5 基于收缩标准的过滤有效性评估	
标准	158
9.5.1 D_{e95} 模型	158
9.5.2 D_{e35} 模型	159
9.6 设计准则的含义	159
9.7 多孔介质稳定状态下的渗流压力	160
9.7.1 基于康采尼-卡曼方程理论的发展	160
9.7.2 有效直径公式	161
9.8 循环荷载作用下底砟的过滤性能	162
9.8.1 室内模拟	162
9.8.2 循环荷载作用下底砟层的变形特征	165
9.8.3 循环荷载作用下底砟应变与孔隙率关系	166
9.8.4 循环荷载作用下底砟的水力渗流	169
9.9 循环荷载作用下颗粒迁移的时变地下水过滤模型	171
9.9.1 时变一维散体过滤层的压缩	171
9.9.2 累积因子	173
9.9.3 细颗粒累积导致孔隙率降低的数学描述	174
9.9.4 基于时间的水力传导模型	175
参考文献	176
第10章 轨道性能验证的现场试验	181
10.1 场地位置和轨道铺设	181
10.1.1 实地勘测	181
10.1.2 轨道铺设	182
10.2 现场测试设备	184
10.2.1 压力计	184
10.2.2 位移传感器	185
10.2.3 沉降桩	185
10.2.4 数据收集系统	186
10.3 数据采集	186
10.4 结果与讨论	186
10.4.1 钢轨下和轨枕边缘的道床竖向位移	187
10.4.2 道砟层的平均变形	187
10.4.3 道砟层的平均剪应变和平均体积应变	190
10.4.4 道床内不同层间的原位应力	190
10.4.5 试验结果与参考文献比较	191

参考文献	192
------	-----

第11章 道砟密实和破裂的离散

单元法建模	194
11.1 离散单元法和 PFC ^{2D}	194
11.1.1 计算法则	195
11.1.2 接触本构模型	195
11.2 颗粒破裂模拟	197
11.3 基于 PFC ^{2D} 的道砟力学特性数值模拟	198
11.4 道砟破裂行为	203
11.5 循环荷载作用下接触力链的发展机理	208
参考文献	209

第12章 轨道有限元模拟及应用

案例研究	213
12.1 轨道下部结构中土工复合材料的	
应用	213
12.1.1 有限元分析	215
12.1.2 现场测试与有限元预测结果对比分析	217
12.2 轨道下短预制竖向排水管的设计	
过程	217
12.2.1 初步设计	218
12.2.2 现场试验结果与数值分析预测结果对比	219
参考文献	220

第13章 轨道的无损检测和状态

评估	222
13.1 试验室轨道模型	222
13.1.1 轨道模型	222
13.1.2 道床断面准备	222
13.2 GPR 方法	224
13.2.1 GPR 的理论背景	224
13.2.2 GPR 数据采集和处理	226
13.2.3 天线频率的影响	227
13.2.4 雷达可探土工织物的影响	229
13.2.5 含水量的影响	230
13.2.6 利用介电常数确定道砟状态	230
13.3 表面波的多通道分析方法	231
13.3.1 表面波多通道分析法研究	232
13.3.2 清洁道床和脏污道床的剪切特性	232

13.3.3 数据分析	233	16.1 概述	249
参考文献	235	16.2 理论模型	249
第 14 章 轨道维修	237	16.2.1 土壤吸力	250
14.1 轨道维修技术	237	16.2.2 根系分布	250
14.1.1 捣固	237	16.2.3 潜在蒸腾	251
14.1.2 吹砟	238	16.3 根系吸水模型的验证	252
14.1.3 清筛和换砟	238	16.3.1 案例 1: Miram 村 (澳大利亚 维多利亚州西部)	252
14.2 寒冷地区轨道岩土工程和维修 技术	239	16.3.2 案例 2: 英国米尔顿凯恩斯	254
参考文献	241	参考文献	256
第 15 章 推荐的道砟级配	243	附录	257
15.1 澳大利亚道砟级配	243	附录 A 一阶线性微分方程的偏导数 推导	257
15.2 国际铁路道砟级配	244	附录 B 室内试验结果确定的模型参数	258
15.3 级配对道床沉降和道砟颗粒破碎 影响	245	B.1 单调荷载模型	258
15.4 推荐的道砟级配	246	B.2 循环加载模型	260
15.5 结论	247	附录 C 轨道加固、现场检测和仪器 指导	262
参考文献	247	附录 D 岩土和轨道专用试验设备	264
第 16 章 维持轨道稳定的生物 工程学	249		

第 1 章 绪 论

铁路网是国家运输系统中的重要组成部分，在运输系统中发挥着巨大的作用。除了在繁忙的城市交通网中输送乘客以外，它还负责在主要城市、港口和拥有大量矿物和农业产业的城市之间运输货物和大宗商品。近年来，铁路运输面临着公路、空路、海路运输在速度、运量和成本方面的持续竞争，不断提高列车的发车频率、轴重和运行速度。这一方面意味着列车系统的不断升级，另一方面迫使工作人员采用新技术以减少铁路建设和维修成本。包括美国、加拿大、印度和澳大利亚在内的多个国家每年的铁路建设和维修费用已超过数亿美元。因此，如何有效地、合理地使用这批资金是极富挑战的任务，而这这就要求在铁路工程中采用创新技术和先进技术。

传统铁路的基础或轨道下部结构一般由覆盖在土质路基表层的 1~2 层砂砾层组成。由于列车提速和轴重增加，传统基础结构已满足不了受力要求。特别是在不利地质条件下，其下部结构不能满足更高的设计要求，维修周期变短，费用增加。因此，找到能够提高下部结构稳定性和安全性的经济实用技术对铁路行业长期的可行性有重要作用，并确保路基有足够的承载能力来承受持续增加的轴重。

过去，人们对包括轨枕、扣件和钢轨的轨道上部结构进行了大量的研究，对轨道下部结构即道砟、底砟和路基层研究较少。但是，大量的研究结果表明：铁路维修预算主要花费在下部结构^[1,2]。Wheat 和 Smith^[3]对英国铁路基础设施的经济研究表明：轨道下部结构的维修费用超过了有砟轨道铁路网总维修费用的三分之一。美国铁路管理部门每年花费在道砟与相关维修的费用达数千万美元^[4]，加拿大铁路年维修费用大概是 10 亿美元，其中大部分是换砟和保养费用^[5]。高速列车线路，如日本新干线和法国 TGV-Sud-Est 线维修费用更高。在澳大利亚，轨道结构维修年花费超过 21 亿美元^[6]。如果能深入理解轨道下部结构，尤其是道砟层的物理、力学特性，轨道下部结构的巨额维修费将会显著减少。

1.1 轨道下部结构性能

轨道下部结构的性能比上部结构的性能更加多变且难以评估^[7]，其中轨道稳定性的重要关键问题是与道砟相关的问题。道砟层是传统有砟轨道结构的重要组成部分。随着轴重增加和列车提速，道砟层日益重要。道砟层通常由强度高且未风化的母岩破碎成的尖角颗粒组成，是下部结构的表层，其上铺设轨枕，用以支撑上部钢轨。然而，由于列车循环荷载作用，道砟会持续劣化，如图 1-1 所示。因此，减小道砟劣化对维持轨道下部结构的主要功能和整体工作性能是十分必要的。

由于对在大量循环周期荷载作用下，特别是周期数超过数百万次后的包含塑性变形及颗粒破裂的应力-应变本构模型和复杂道砟破裂机理缺乏理解，传统的轨道设计常常会忽略道砟劣化和相关的塑性变形。所以，在基于经验的简单轨道结构设计和轨道下部结构建设中，技术运用的不当会导致维修周期缩短和维修费用增加。鉴于此，为了降低过高的维修成本，需要恰当

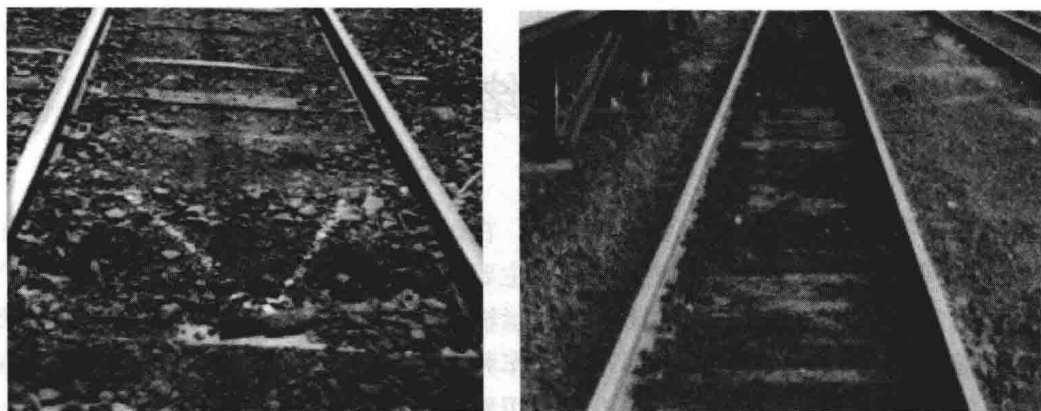


图 1-1 澳大利亚新南威尔士州的有砟道床劣化和脏污

地理解轨道下部结构中可预见的问题。本书后面的章节将解释和讨论这些问题。

1.1.1 脏污

道床脏污通常由细小污染物颗粒表征，是轨道几何形位劣化的主要原因之一。由于相邻颗粒接触点间的应力值高且应力集中，道砟颗粒尖角易折断，导致道砟尖角度和内摩擦角降低，从而降低了道砟的剪切强度。道床发生脏污的过程是连续的，在恶劣的野外环境中，道砟颗粒风化，道砟颗粒间产生细小颗粒，进入道床。道床脏污来源主要包括路基层泥浆渗入、空气或水携带的碎片以及列车掉落的货物，如煤和其他矿物矿石。在北美的大量现场试验和室内试验表明，道床脏污的主要原因是道砟破裂，如图 1-2 所示，而铁路公司认为道床表面的冒泥主要来自道床下层的路基土，以上两种说法相互矛盾^[8]。由于道床脏污降低了颗粒间的摩擦角，使道床产生不同位移，从而增加轨道不平顺，如图 1-3 所示。所以，脏污道床需要进行道床清筛或换砟来维持轨道刚度（弹性）、承载力、线形和安全性。脏污的有砟道床，如图 1-4 所示。

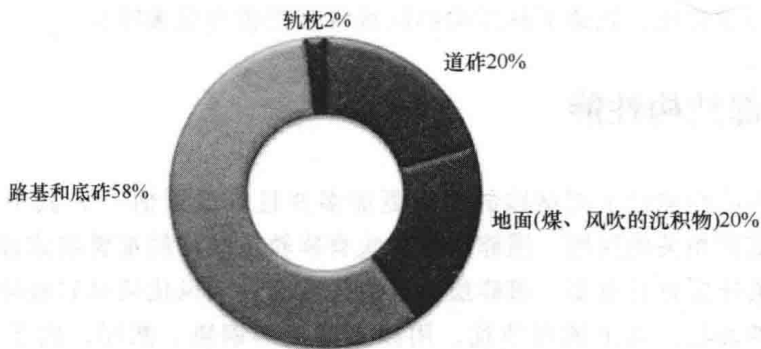


图 1-2 低洼运煤轨道中的脏污来源比较

1.1.2 排水

底砟层和路基层通常处于含水状态，但当其含水率介于干燥与饱水状态之间时，在循环荷载下有良好的力学性能^[7]。然而，道砟磨耗所产生的细小颗粒在重力作用下散落，堵塞

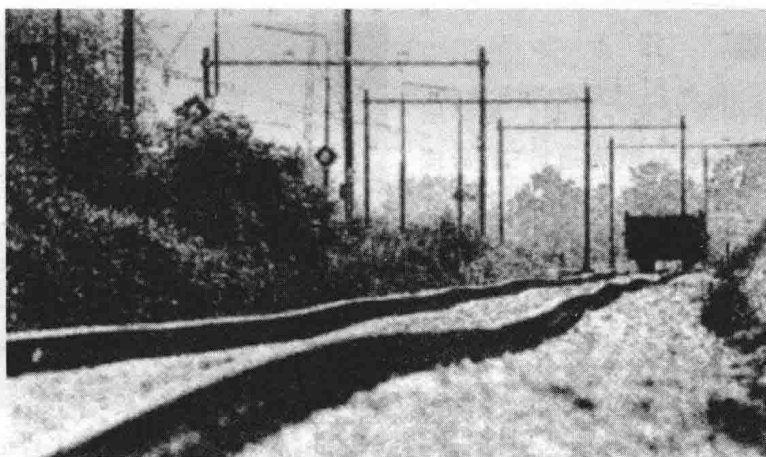


图 1-3 对列车行驶有危害的轨道不平顺 (Suiker^[9])



图 1-4 脏污的有砟道床

道砟颗粒间孔隙,降低道砟孔隙间体积并保留水分。随着时间的推移,颗粒磨耗加剧,当道砟颗粒间孔隙被填满,道砟层将失去排水能力(见图 1-5)。当下部结构含水过多时,特别是道砟层处于饱水状态时,如图 1-6 所示,会大大增加轨道维修费用。道砟颗粒间水分会增加道床孔隙水压力,降低道床剪切强度和刚度,且随着时间的推移,会降低轨道稳定性,导致轨道结构各部分持续劣化。



图 1-5 澳大利亚新南威尔士州排水不良的铁路线



图 1-6 澳大利亚悉尼的道砟层积水

1.1.3 路基失稳

当轨道下部结构没有底砟层时，道砟层将巨大荷载传给路基层，影响道砟-路基接触面的稳定性。如在低洼地区，路基一般处于饱和状态，路基土软化并与水混合，在道砟-路基层接触面形成泥浆（液化），在上部结构循环荷载作用下，会引起道床表面出现翻浆冒泥现象^[1,7]。

道床翻浆或道砟劣化作用使小颗粒粉末在大颗粒道砟表面形成覆盖层，增加了道床整体压缩率和变形。同时，小颗粒填充道砟颗粒间孔隙，降低道床排水性。随着时间的推移，道床翻浆可能会堵塞道床，加速道床不排水剪切破坏^[10]。澳大利亚维多利亚州的一条铁路线的翻浆冒泥情况，如图 1-7 所示。



图 1-7 澳大利亚维多利亚州一条铁路线的翻浆冒泥情况

1.1.4 道砟和轨枕劣化

英国铁路部门详细研究了道砟和轨枕劣化问题^[12]，研究表明石灰岩道砟易出现上述问题，原因有以下两点：

1) 与其他岩石骨料相比，石灰岩骨料更易磨损。

2) 石灰岩颗粒易吸水，其积聚于轨枕下表面阻碍排水，在高速列车荷载作用下易引起道床翻浆冒泥。

轨枕劣化和道砟磨耗与枕下动力幅值有关，其中，列车速度比轴重对轨枕劣化和道砟磨耗影响大。在列车动力荷载作用下，轨枕下沉，并向道床两侧及表面传递荷载，消散能量，同时，高速列车荷载使道床内产生较高水压力。道床内高应力与高动水压力是引起高速铁路道床发生不排水直剪破坏的主要原因，上述破坏很少发生在低速线路上^[7]。其他原因导致的道床脏污，也会使轨枕周围道砟层透水性降低，缺乏维修时，引起道床内脏污淤积。

道床翻浆冒泥时产生的粉末会取代轨枕周围道砟，降低轨枕-道砟间横向阻力；泥浆中的一些高侵蚀材料在极端情况下会造成混凝土劣化，暴露其内部预应力钢筋；而且当泥浆变干，泥浆中有侵蚀作用的粉末会降低轨枕周围的动力传导性能，道床翻浆冒泥问题进一步恶化。轨枕周围干泥浆如图 1-8 所示。其常见原因包括以下几方面：

1) 道床排水不良。

2) 混凝土轨枕与道砟接触应力过高。

3) 道砟材料的抗磨损能力差。

4) 枕下空吊板，导致不良冲击作用和水力作用。



图 1-8 轨枕周围的干泥浆