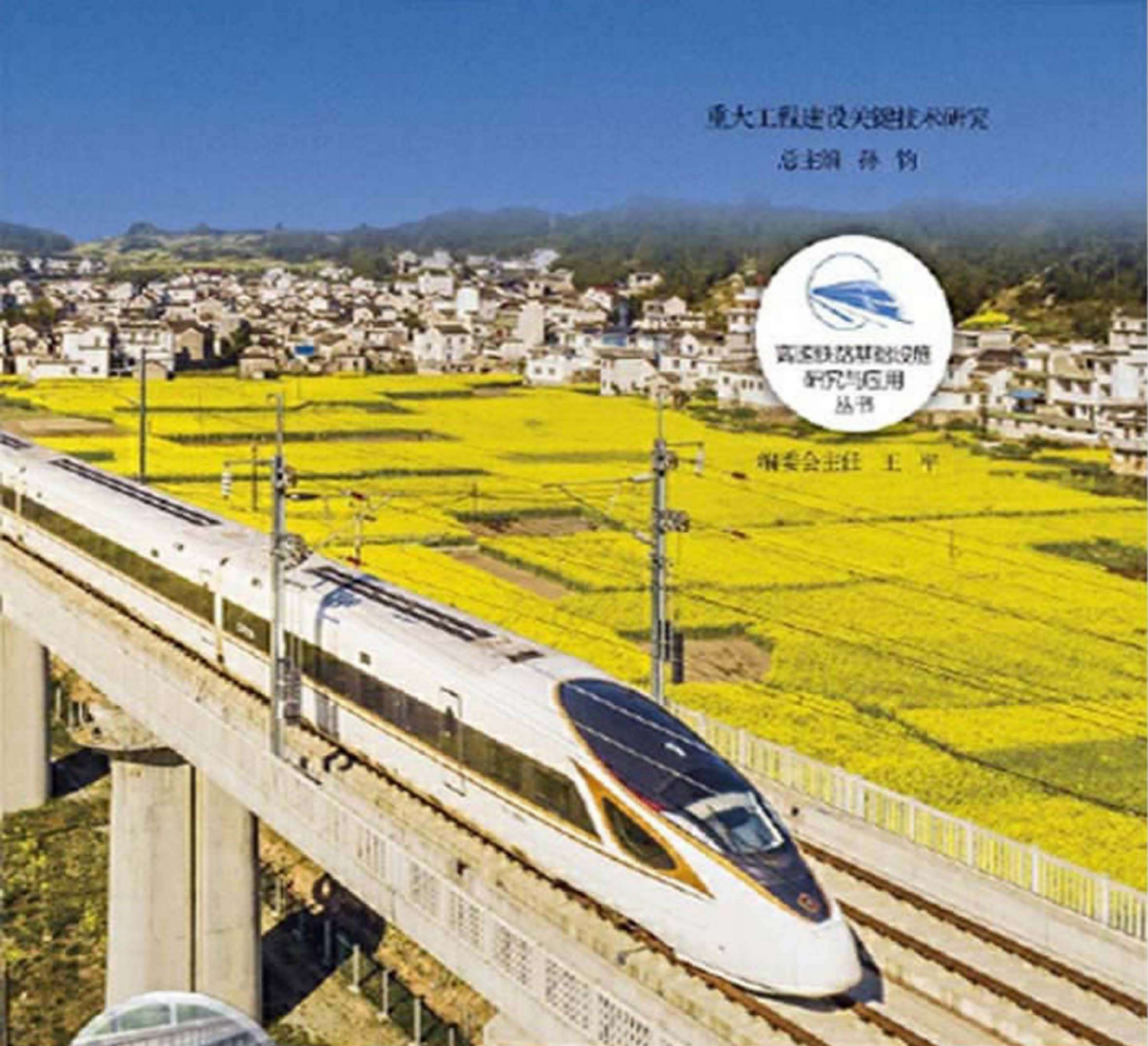


重大工程建设关键技术研究

总主编 孙 钧



编委会主任 王 平



高速铁路轨道平顺性检测 关键理论与技术

王 平 青杰灵 著

上海科学技术出版社

重大工程建设关键技术研究

总主编 孙 钧



高速铁路基础设施研究与应用



高速铁路轨道平顺性检测 关键理论与技术

王 平 肖杰灵

著



上海科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

高速铁路轨道平顺性检测关键理论与技术/王平, 肖杰灵著. —上海: 上海科学技术出版社, 2019.10
(高速铁路基础设施研究与应用)
ISBN 978-7-5478-4431-1

I. ①高... II. ①王... ②肖... III. ①高速铁路—轨道(铁路)—平稳—性能—检测—研究 IV. ①U238

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 153379 号

高速铁路轨道平顺性检测关键理论与技术

王平 肖杰灵 著

上海世纪出版(集团)有限公司 出版、发行
上海科学技术出版社
(上海钦州南路 71 号 邮政编码 200235 www.sstp.cn)

印刷

开本 787×1092 1/16 印张 25.25

字数 570 千字

2019 年 10 月第 1 版 2019 年 10 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5478-4431-1/U·87

定价: 200.00 元

本书如有缺页、错装或损坏等严重质量问题, 请向工厂联系调换

内 容 提 要

本书针对影响高速铁路轨道平顺性的检测与评估的若干关键问题,在总结现有轨道几何状态检测与监测技术、轨道刚度检测方法、无缝线路状态监测理论、无砟轨道病害检测方法和高速道岔状态监测技术的基础上,分析了我国高速铁路轨道平顺性检测与监测方面面临的主要挑战;系统介绍了轨道静态不平顺的高效检测理论与方法、轨道不平顺的动力学控制理论及评估技术、轨道宽频动刚度的检测理论与方法、基于模态的无砟道床伤损检测理论与方法、影响高速铁路高平顺性的无缝线路断轨与温度力监测技术,以及高速道岔钢轨裂纹监测技术等;提出了加强我国高速铁路轨道平顺性检测、监测与评估的若干建议。

全书共分 7 章:第 1 章系统总结了我国高速铁路轨道几何状态检测与监测技术的主要现状和挑战;第 2 章探讨了弦测理论的基本原理,建立了“一弦 N 点”的弦测优化方法及反演理论和相对与绝对结合的高效检测技术;第 3 章分析了轨道不平顺的敏感波长,提出基于动力学的轨道不平顺加权评价方法;第 4 章提出了轨道结构宽频动刚度的计算理论及测试、分析方法;第 5 章重点介绍了利用模态法和冲击回波技术检测无砟轨道典型伤损的理论与方法,提出了相应的系统设计方案;第 6 章分析了无缝线路温度应力测量的双向应变法等组桥方案及

误差,提出了基于异包层的光纤光栅传感监测方法及桥上无缝道岔监测应用方案;第7章主要介绍了高速道岔裂纹监测系统及基于声发射技术的道岔裂纹伤损监测解决方案。

本书可供从事铁道工程及工务管理的广大设计、科研和生产一线人员参考使用,也可供相关专业的高等院校师生学习和参考。

重大工程建设关键技术研究

总主编

孙 钧 同济大学教授,中国科学院院士

学术顾问

邱大洪 大连理工大学教授,中国科学院院士

钱七虎 中国人民解放军陆军工程大学教授,中国工程院院士

郑皆连 广西大学教授,中国工程院院士

陈政清 湖南大学教授,中国工程院院士

吴志强 同济大学教授,中国工程院院士

王 平 西南交通大学教授

刘斯宏 河海大学教授

杨东援 同济大学教授

高速铁路基础设施研究与应用

编委会

主任

王 平

副主任

苏 谦

委员(以姓氏笔画为序)

王玉泽 王英学 易思蓉 赵国堂

高 波 高宗余

重大工程建设关键技术研究

总 序

近年来,我国各项基础设施建设的发展如火如荼,“一带一路”建设持续推进,许多重大工程项目如雨后春笋般蓬勃兴建,诸如三峡工程、青藏铁路、南水北调、三纵四横高铁网、港珠澳大桥、上海中心大厦,以及由我国援建的雅万高铁、中老铁路、中泰铁路、瓜达尔港、比雷埃夫斯港,等等,不一而足。毋庸置疑,我国已成为世界上建设重大工程最多的国家之一。这些重大工程项目就其建设规模、技术难度和资金投入等而言,不仅在国内,即使在全球范围也都位居前茅,甚至名列世界第一。在这些工程的建设过程中涌现的一系列重大关键性技术难题,通过分析探索创新,很多都得到了很好的优化和解决,有的甚至在原来的理论、技术基础上创造出了新的技术手段和方法,申请了大量的技术专利。例如,632 m 的上海中心大厦,作为世界最高的绿色建筑,其建设在超高层设计、绿色施工、施工监理、建筑信息化模型(BIM)技术等多方面取得了多项科研成果,申请到 8 项发明专利、授权 12 项实用新型技术。仅在结构工程方面,就应用到了超深基坑支护技术、超高泵送混凝土技术、复杂钢结构安装技术以及结构裂缝控制技术等诸多创新性的技术革新成果,有的达到了世界水平。这些优化、突破和创新,对我国工程技术人员将是非常宝贵的参考和借鉴。

在 2016 年 3 月初召开的全国人大全体会议期间,很多代表谈到,极大量的技术创新与发展是“十三五”时期我国宏观经济实现战略性调整的一项关键性驱动因素,是实现国家总体布局下全面发展的根本支撑和关键动力。

同时,在新一轮科技革命的机遇面前,也只有关键核心技术上一个个地进行创新突破,才能实现社会生产力的全面跃升,使我国的科研成果和工程技术掌控两者的水平和能力尽早、尽快地全面进入发达国家行列,从而在国际上不断提升技术竞争力,而国力将更加强大!当前,许多工程技术创新得到了广泛的认可,但在创新成果的推广应用中却还存在不少问题。在重大工程建设领域,关键工程技术难题在实践中得到突破和

解决后,需要把新的理论或方法进一步梳理总结,再一次地广泛应用于生产实践,反过来又将再次推动技术的更进一步的发展,是为技术的可持续发展之巨大推动力。将创新成果进行系统总结,出版一套有分量的技术专著是最有成效的一个方面。这也是出版“重大工程建设关键技术研究”丛书的意义之所在。以推广学术上的创新为主要目标,“重大工程建设关键技术研究”丛书主要具有以下几方面的特色:

1. 聚焦重大工程和关键项目。目前,我国基础设施建设在各个领域蓬勃开展,各类工程项目不断上马,从项目体量和技术难度的角度,我们选择了若干重大工程和关键项目,以此为基础,总结其中的专业理论和专业技术使之编纂成书。由于各类工程涉及领域和专业门类众多,专业学科之间又有相互交叉和融合,难以单用某个专业来设定系列丛书,所以仍然以工程大类为基本主线,初步拟定了隧道与地下工程、桥梁工程、铁道工程、公路工程、超高层与大型公共建筑、水利工程、港口工程、城市规划与建筑共八个领域撰写成系列丛书,基本涵盖了我国工程建设的主要领域,以期为未来的重大工程建设提供专业技术参考指导。由于涉及领域和专业多,技术相互之间既有相通之处,也存在各自间的不同,在交叉技术领域又根据具体情况做了处理,以避免内容上的重复和脱节。

2. 突出共性技术和创新成果,侧重应用技术理论化。系列丛书围绕近年来重大工程中出现的一系列关键技术难题,以项目取得的创新成果和技术突破为基础,有针对性地梳理各个系列中的共性、关键或有重大推广价值的技术经验和科研成果,从技术方法和工程实践经验的角度进行深入、系统而又详尽的分析和阐述,为同类难题的解决和技术的提高提供切实的理论依据和应用参考。在“复杂地质与环境条件下隧道建设关键技术丛书”(钱七虎院士任编委会主任)中,对当前隧道与地下工程施工建设中出现的关键问题进行了系统阐述并形成相应的专业技术理论体系,包括深长隧道重大突涌水灾害预测预警与风险控制、盾构工程遇地层软硬不均与极软地层的处理、类矩形盾构法、水下盾构隧道、地面出入式盾构法隧道、特长公路隧道、隧道地质三维探测、盾构隧道病害快速检测、隧道及地下工程数字化、软岩大变形隧道新型锚固材料等,使得关键问题在研究中得到了不同程度的解决和在后续工程中的有效实施。

3. 注重工程实用价值。系列丛书涉及的技术成果要求在国内已多次采用,实践证明是可靠的、有效的,有的还获得了技术专利。系列丛书强调以理论为引领,以应用为重点,以案例为说明,所有技术成果均要求以工程项目为背景,以生产实践为依托,使丛书既富有学术内涵,又具有重要的工程应用价值。如“长大桥梁建养关键技术丛书”(郑

皆连院士任编委会主任、陈政清院士任副主任),围绕特大跨度悬索桥、跨海长大桥梁、多塔斜拉桥、特大跨径钢管混凝土拱桥、大跨度人行桥、大比例变宽度空间索面悬索桥等重大桥梁工程,聚焦长大桥梁的设计创新理论、施工创新技术、建设难点的技术突破、桥梁结构健康监测与状态评估、运营期维修养护等,主要内容包括大型钢管混凝土结构真空辅助灌注技术、大比例变宽度空间索面悬索桥体系、新型电涡流阻尼减振技术、长大桥梁的缆索吊装和斜拉扣挂施工、超大型深水基础超高组合桥塔、变形智能监测、基于BIM的建养一体化等。这些技术的提出以重大工程建设项目为依托,包括合江长江一桥、合江长江二桥、巫山长江大桥、桂广铁路南盘江大桥、张家界大峡谷桥、西堠门大桥、嘉绍大桥、港珠澳大桥、虎门二桥等,书中对涉及具体工程案例的相关内容进行了详尽分析,具有很好的应用参考价值。

4. 聚焦热点,关注风险分析、防灾减灾、健康检测、工程数字化等近年来出现的新兴分支学科。在绿色、可持续发展原则指导下,近年来基础建设领域的技术创新在节能减排、低碳环保、绿色土木、风险分析、防灾减灾、健康检测(远程无线视频监控)、工程使用全寿命周期内的安全与经济、可靠性和耐久性、施工技术组织与管理、数字化等方面均有较多成果和实例说明,系列丛书在这些方面也都有一定体现,以求尽可能地发挥丛书对推动重大工程建设的长期、绿色、可持续发展的作用。

5. 设立开放式框架。由于上述的一些特性,使系列丛书各分册的进展快慢不一,所以采用了开放式框架,并在后续系列丛书各分册的设定上,采用灵活的分阶段付梓出版的方式。

6. 主编作者具备一流学术水平,从而为丛书内容的学术质量打下了坚实的基础。各个系列丛书的主编均是该领域的学术权威,在该领域具有重要的学术地位和影响力。如陈政清教授,中国工程院院士,“985”工程首席科学家,桥梁结构与风工程专家;郑皆连教授,中国工程院院士,桥梁设计施工专家;钱七虎教授,中国工程院院士,防护与地下工程专家;吴志强教授,中国工程院院士,城市规划与建设专家;等等。而参与写作的主要作者都是活跃在我国基础设施建设科研、教育和工程的一线人员,承担过重大工程建设项目或国家级重大科研项目,他们主要来自中铁隧道局集团有限公司、中交隧道工程局有限公司、中铁十四局集团有限公司、中交第一公路工程局有限公司、青岛地铁集团有限公司、上海建工集团有限公司、上海城建集团、中交公路规划设计院有限公司、陆军研究院工程设计研究所、招商局重庆交通科研设计院有限公司、天津城建集团有限公

司、浙江省交通规划设计研究院、江苏交通科学研究院有限公司、同济大学、河海大学、西南交通大学、湖南大学、山东大学等。各位专家在承担繁重的工程建设和科研教学任务之余,奉献了自己的智慧、学识和汗水,为我国的工程技术进步做出了贡献,在此谨代表丛书总编委对各位的辛劳表示衷心的感谢和敬意。

当前,不仅国内的各项基础建设事业方兴未艾,在“一带一路”倡议下,我国在海外的重大工程项目建设也正蓬勃发展,对高水平工程科技的需求日益迫切。相信系列丛书的出版能为我国重大工程建设的开展和创新科技的进步提供一定的助力。



2017年12月,于上海

孙钧先生,同济大学一级荣誉教授,中国科学院资深院士,岩土力学与工程国内外知名专家。“重大工程建设关键技术研究”系列丛书总主编。

自序

高速铁路是中国乃至世界铁路建设的丰碑,成功打造了一张珍贵的“国家名片”,将世界高速铁路史提升到了一个新的高度。自 2005 年我国开建第一条高速铁路以来,轨道的高平顺性成为确保高速行车品质、安全的核心要素,引起了广泛的关注。中国在 2 万多 km 的高速铁路建设上采用了世界上最严格的平顺性控制体系,取得了举世瞩目的成就。为此,中国实施了以桥代路、路基结构化等技术措施,强化了对下部基础变形的控制;并通过 CP III 网精测精确控制轨道的空间定位,借助粗、精调二级调整和精心的钢轨表面打磨实现了轨道几何状态亚毫米级的高水平控制,创造了列车高速运营时“硬币立而不倒”的奇迹,将基础设施建设和管理水平推至前所未有的高度。

随着中国高速铁路运营规模的不断扩大,保持高品质高铁运输所必需的轨道高平顺性控制正面临着巨大的挑战。中国地域辽阔,气候变化大,地理环境复杂,铁路基础设施建造和运维难度大,高速铁路运营与维护标准高,在超高周、超高频率的列车荷载下长期保持轨道的高平顺性极其困难。一方面是下部基础的沉降等变形直接影响着轨面的平顺性;另一方面受轨道材料的多样性、结构分布的空间效应、服役过程的时间效应和多场多因素的耦合效应等影响,轨道自身的状态也在不断劣化。某种意义上的轨道平顺性已成为铁路轨道结构综合性能和承载能力的重要体现,其状态诊断与控制、能力保持是高速铁路维护管理的核心问题,涉及面广、要求高、难度大。由于轨道结构承受多场耦合的外荷载作用,结构呈长条形,精度要求高,具有散体性和组合性,工作环境及边界条件异常复杂,因此轨道结构的状态具有时变性,高精度、实时或高频率的准确检测与科学评估成为高速铁路运营安全的重要保障。在高速铁路高安全、高速度、高平稳、高密度行车及有限的“天窗”时间条件下,依靠大量的人力、物力和财力保障轨道结构安全服役并不科学,研究更高效、更可靠、更合理的检测理论与技术成为确保高速铁路轨道结构应用安全的当务之急。

中国既有铁路轨道结构维修的原则是“预防为主、防治结合、检修并重”，高速铁路因采用了无砟轨道、高速道岔等新型轨道结构，尚未全面掌握其性状变化与劣化规律，现以“勤检慎修”的维修原则为主。为把握高速铁路线路维护的主动权，需要尽快了解轨道结构的性能演变规律和对行车安全性、平稳性的影响，确定相应的评判标准、作业方法、维修手段和维修机制，发展和完善轨道结构检测理论及方法将是实现这一技术路线的关键。本书系作者及其团队近年来关于轨道平顺性研究的系统性总结。书中围绕影响我国高速铁路高平顺性的轨道几何状态、轨道刚度参数、无缝线路安全、无砟轨道病害和高速道岔安全等进行了大量的研究。对轨道动刚度检测理论、无砟轨道伤损检测的研究进展以及高速铁路无缝线路运营安全监测中的温度力及断轨监测技术等前沿性问题的研究进展进行了较为系统的介绍。

本书对我国高速铁路建设和运营实践有重要的参考价值，有助于提高轨道平顺性管理效率和质量，更有助于从多个维度、多个视角深入理解高速铁路的高平顺性要求。在运营过程中合理控制轨道及基础结构的缓慢变形，保持基础设施结构稳定可靠，保持高水平的平顺性状态，减少养护维护工作量和降低运维人员的劳动强度，对确保高速列车运行的平稳安全和高速铁路事业的长远发展意义重大，具有显著的社会效益。该书的出版必将对我国高速铁路工务维护技术的发展起到有力的推动作用，丰富我国高速铁路自主创新的内涵，增强我国高速铁路建设与管理的核心竞争力，也为“一带一路”倡议的实施贡献绵薄之力。

王 平 肖杰灵

2019 年于成都

前 言

高速铁路技术是现代中国一张靓丽的“国家名片”，承载着中华民族伟大复兴的梦想。高速铁路正以高速度、高安全性和高平稳性的高品质出行，高智能化的建设与运维管理，成为中国高端制造、高端运输的支柱。为实现高速铁路的建设、运营和维护目标，具有高平顺性、高稳定性和高可靠性的高速铁路轨道工程成为高速铁路基础设施子系统中最为关键的组成部分。不断发展和探索利用现代测试技术和信息处理技术，对影响高速铁路高平顺性、高安全性和高可靠性的轨道工程关键结构状态、典型病害分布、主要敏感参数等开展系统的检测、监测与分析，构建高速铁路轨道工程高平顺性的系统诊断与评估方法，是确保高速铁路安全、高效运行的重要保证。近年来，作者及其团队在国家自然科学基金委员会高铁联合基金项目“高速铁路轨道结构检测关键理论与方法”（编号：U1234201）、“高速铁路道岔轮轨接触行为、性能演化与损伤机理研究”（编号：U1734207）及国家自然科学基金委员会国家杰出青年科学基金项目“高速铁路轨道结构服役安全关键科学问题研究”（编号：51425804）的支持下，针对影响高速铁路线路高平顺性的若干重点难点问题，进行了大量探索。本书即为相关成果系统性、阶段性的总结，希望为中国高速铁路快速、健康、稳定的发展提供助力。

全书共分 7 章，重点围绕影响我国高速铁路高平顺性的轨道几何状态、轨道刚度参数、无缝线路安全、无砟轨道病害和高速道岔安全，介绍了相关研究成果。具体内容如下：

第 1 章主要针对我国高速铁路轨道维护检修体系、现代轨道几何状态检测与监测技术进行了综述，并提出了我国高速铁路轨道平顺性检测方面目前面临的主要挑战。

第 2 章深入推导了轨道静态几何不平顺的弦测法基本公式，建立了一弦 N 点弦测法的优化方法及反演理论，并提出了控制误差放大系数和提高检测波长、精度的相关途径，分析了惯性导航系统技术的工作原理，最后提出了相对与绝对结合的高效检测技术。

第 3 章主要介绍了高速铁路轨道不平顺动力学控制理论及评估技术，在全面总结国内外轨道不平顺评价方法的基础上，通过分析轨道不平顺与轮轨系统的频率响应关

系,梳理了高低、水平、轨向和轨距不平顺的敏感波长分布,提出基于动力学的轨道不平顺加权评价方法。

第4章重点介绍了轨道动刚度检测理论的研究进展,在概述轨道静、动刚度检测技术的基础上,从轨道结构动力特性的角度分析了轨道刚度的内涵,提出了轨道结构宽频动刚度的计算理论及测试、分析方法。

第5章主要介绍了无砟轨道伤损检测的若干研究进展,重点介绍了模态法检测理论中的固有频率检测法、曲率模态检测法和高斯曲率检测法,就应用冲击回波检测无砟轨道若干典型伤损进行了理论仿真和试验验证,提出了无砟轨道伤损检测的系统设计方案。

第6章重点针对高速铁路无缝线路运营安全监测中的温度力及断轨监测技术做了介绍,总结了无缝线路监测、检测的主要技术,分析了广泛使用的双向应变法及衍生方法的组桥方案、误差组成,提出了基于异包层的光纤光栅传感监测方法,并提出了针对高速铁路轨道结构中至关重要的桥上无缝道岔的系统监测方案。

第7章主要介绍了高速道岔裂纹监测系统,在总结道岔钢轨伤损及道岔监测系统应用现状的基础上,重点介绍了针对严重威胁高速道岔运营安全的钢轨裂纹开展监测研究的相关成果,深入研究了基于声发射技术的道岔裂纹伤损识别算法,并形成了符合我国国情、路情的高速道岔监测系统解决方案。

本书参考引用了西南交通大学轨道工程团队多年来的部分研究成果,也参考和引用了大量国内外其他研究者的研究成果,并尽可能地在参考文献部分列出,但也难免有所遗漏,在此向广大研究者和同仁谨致崇高的感谢!

在本书写作过程中,得到课题组李成辉、刘学毅、陈嵘、赵才有、徐井芒、韦凯、何庆、杨荣山、赵坪锐、任娟娟、郭利康和刘钰等老师的全力协助,得到了国家自然科学基金会、中国铁路总公司、中国铁路南昌局集团有限公司、中国铁路上海局集团有限公司和中国铁路成都局集团有限公司、成都地铁、深圳地铁等单位的大力支持,得到四川西南交大铁路发展股份有限公司、萨伏威(西安)导航技术有限公司等单位提供的宝贵素材,并得到历届研究生王源、徐金辉、谢铠泽、刘浩、胡志鹏、韦安祺、刘冬娅、温静、杨翠平、杨敏婕、刘鉴兴、李敏一、戴佳程等同学的鼎力帮助,在此表示衷心的感谢!

本书力求抛砖引玉,为铁道工程相关专业的研究人员、工务管理人员、大专院校老师及研究生提供参考。受作者水平所限,书中谬误和疏漏在所难免,恳请广大读者批评指正,作者将万分感激,并努力在今后的研究中不断改进与完善。

作 者

2019年于成都