

高速铁路无缝线路服役 状态监测理论与实践

余祖俊 史红梅 朱力强 许西宁 编著



科学出版社

高速铁路无缝线路服役状态 监测理论与实践

余祖俊 史红梅 朱力强 许西宁 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

无缝线路服役状态监测是高速铁路安全监测中的一环重要环节,本书针对无缝线路服役状态监测中的钢轨温度应力、钢轨完整性、路基沉降、轨道不平顺和砂浆脱空等监测内容,系统地介绍了其理论建模、移动监测和地面监测方法,相关理论和方法在高铁现场进行了实践和应用,形成了一整套适用于我国高速铁路无缝线路服役状态监测的理论方法和技术体系。

本书可作为高等院校相关专业研究生的科研参考书,也可供从事高速铁路安全监测等相关领域专业人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

高速铁路无缝线路服役状态监测理论与实践/余祖俊等编著. —北京:科学出版社, 2016.12

ISBN 978-7-03-051011-2

I. ①高… II. ①余… III. ①高速铁路-无缝线路轨道-设备状态监测-研究 IV. ①U213.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 302078 号

责任编辑:毛 莹 张丽花/责任校对:郭瑞芝

责任印制:徐晓晨/封面设计:迷底书装

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

北京教图印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 12 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2016 年 12 月第一次印刷 印张:15

字数:355 000

定价:88.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



前 言

近年来我国高速铁路飞速发展,不论是里程规模,还是技术水平都已经走在世界前列。由于列车运行速度高,机车车辆和轨道结构间的动态相互作用也日益增强,且中国铁路长期处于超负荷状态,再加上特殊的气候环境与地质条件以及运营条件的不确定性,高速铁路基础设施在服役过程中,其内部结构已暴露出系列病害,主要有锁定轨温改变、钢轨温度应力超限、断轨、扣件松脱、道床暗坑、道床板结、道床松散、轨道几何不平顺、路基沉降以及CA砂浆脱空等问题。因此,需要建立科学的无缝线路服役状态监测保障体系,以长期保持高速铁路基础设施优质的服役状态,这是高速列车安全、平稳和舒适运营的坚实基础,其中蕴含着许多亟待解决的重大科学问题,开展高速铁路设备服役状态感知与综合监测理论研究非常迫切。

本书将通过研究高速铁路设备在长期服役过程中的状态演变过程,建立全新的高速铁路服役状态模型,使其既可以描述高速列车及其运行环境的瞬时动态过程,又可以描述瞬态行为累积效应造成的参数长期演变过程。以此为基础,重点研究复杂分布参数系统的状态感知算法,采用地面监测和移动监测等多种监测方式,实现高速铁路设备状态参数的智能感知,形成设备服役状态综合评估方法,为构建我国高速铁路设备服役状态综合监测的基本理论奠定基础,为科学指导养护维修提供理论和方法的支持。

本书作者及其课题组长期从事轨道交通安全检测技术领域的科研与教学,近几年承担了国家“863”重大项目、国家自然科学基金重点项目以及多项省部级项目。攻克了多项轨道交通基础设施安全检测关键技术,在承担国家“863”计划课题“高速铁路基础设施服役状态检测技术(2011AA11A102)”期间,完成了钢轨温度应力、钢轨完整性地面监测方法和理论的研究工作。在国家自然科学基金课题“高速铁路线路安全状态评估理论与关键算法研究(60972092)”“高速铁路服役状态智能感知与综合监测(61134003)”的资助下,研究了高速铁路设备服役状态演变基础理论与建模方法,对前期的地面监测、移动监测研究工作进行了汇总,并进行了多方面的后续研究工作,完成了本书的全部内容。

全书共4章。第1章绪论,系统介绍高速铁路技术与装备体系,分析高速铁路各个环节的运营安全要素,重点分析无缝线路服役状态对铁路运营安全的影响,并提出基于理论与建模、地面监测和移动监测的服役状态综合监测方法。第2章介绍无缝线路服役状态演变基础理论与建模方法。主要研究高速铁路无缝线路、无砟轨道、路基、桥梁等设备在长期服役过程中,由于轮轨冲击、材料疲劳、环境和地质等因素的影响而发生的关键参数变化,通过综合运用机理分析和数据驱动等建模方法,描述设备关键参数的演化规律。第3章介绍无缝线路服役状态地面监测方法。重点研究跨多气候带无缝线路钢轨、路基,在扣件阻力变化、道床阻力变化、轨温变化、施工和养护、列车牵引力和制动力、桥梁的伸缩或挠曲变形、钢轨位移等因素的影响下,其服役状态变化规律。第4章介绍基于车载式的线路全断面、轨道

不平顺、CA 砂浆脱空、钢轨应力的移动检测方法，建立基于车载动态检测的感知理论。

在开展本书相关的关键技术研究过程中，得到了国家自然科学基金、国家“863”项目、中国铁路总公司科技管理部、北京市科委项目的大力资助，在此致以诚挚的谢意！感谢中国铁路总公司副总工程师赵国堂研究员、中国铁道科学研究院副院长叶阳升研究员、中国铁道科学研究院柯在田研究员，他们为作者的研究工作提出了宝贵的意见和建议，并为现场试验提供了大量的帮助。

本书由北京交通大学余祖俊、史红梅、朱力强、许西宁编著，具体编写分工如下：余祖俊编写第 1 章，并负责全书统稿和定稿工作；史红梅编写第 4 章；朱力强编写第 2 章；许西宁编写第 3 章。在本书撰写过程中，博士生郭一诗、石慧等提供了丰富的数据和算例，本书还参考了国内外相关文献，在此表示感谢。

由于作者水平有限，若书中存在疏漏之处，恳请广大读者批评指正。

余祖俊

2016 年 9 月于北京

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 高速铁路技术与装备体系	1
1.1.1 高速铁路固定设备	1
1.1.2 高速铁路移动设备	3
1.1.3 高速铁路运营控制	3
1.2 高速铁路运营安全要素分析	3
1.2.1 人员安全要素	4
1.2.2 机车车辆安全要素	4
1.2.3 线路安全要素	4
1.2.4 环境安全要素	4
1.2.5 管理安全要素	5
1.3 无缝线路服役状态对铁路运营安全影响的分析	5
1.3.1 无缝钢轨温度应力	5
1.3.2 轨道不平顺	6
1.3.3 无缝线路服役状态综合监测方法	7
1.4 本书主要内容	8
参考文献	10
第 2 章 无缝线路服役状态演变理论与建模	11
2.1 无缝线路的研究背景	11
2.1.1 桥上无缝线路基础理论与模型的发展	11
2.1.2 梁、轨纵向相互作用机理简介	16
2.1.3 长大线路应力分布模型的建立	20
2.2 长大线路无砟轨道应力分布模型	26
2.2.1 桥梁轨道结构的多尺度有限元模型	27
2.2.2 根据均匀化理论估算宏观性能	31
2.2.3 利用多尺度线路模型进行应力计算的数值方法	39
2.2.4 试验对比以及计算结果分析	42
2.3 钢轨纵向应力作用下的车辆轨道动力响应分析	56
2.3.1 纵向应力影响下板式轨道模型的振动特性	56
2.3.2 车轨耦合动力学模型	61

2.3.3 动态响应的数值分析	63
参考文献	70
第3章 无缝线路服役状态地面监测方法	73
3.1 无缝线路应力检测技术	73
3.1.1 背景与研究现状	73
3.1.2 超声导波技术	75
3.1.3 半解析有限元方法	78
3.1.4 仿真与分析	82
3.2 无缝线路完整性检测技术	96
3.2.1 背景与研究现状	96
3.2.2 技术方案	98
3.2.3 实验验证	103
3.3 路基沉降检测方法	107
3.3.1 研究现状	107
3.3.2 基于 PSD 技术的检测方案	109
3.3.3 路基沉降检测装置	113
3.3.4 实验与分析	117
参考文献	125
第4章 无缝线路服役状态移动检测方法	128
4.1 轨道交通线路全断面与形变检测技术	128
4.1.1 基于车路振动模型的惯性基准测量	128
4.1.2 线路全断面动态检测系统应用	165
4.2 基于车辆动态响应的轨道几何不平顺智能估计	176
4.2.1 基于微种群遗传算法和车轨耦合模型的轨道几何不平顺估计	176
4.2.2 基于 UKF 的轨道动态不平顺估计优化	193
4.3 轨道刚度参数突变识别算法	200
4.3.1 基于支持向量机和车辆动态响应的轨道刚度不平顺估计	200
4.3.2 基于车辆动态响应的 CA 砂浆脱空智能检测	218
4.4 基于车轨动态响应的钢轨应力识别算法	227
参考文献	232

第 1 章 绪 论

高速铁路始于 1964 年开通的日本东海道新干线,随后,法国、德国、意大利、中国等国家相继发展了高速铁路。我国自 20 世纪 90 年代中期开始高速铁路关键设计技术研究,在较短的时间内,已形成了具有自主知识产权的设计建设标准体系。京津城际铁路的开通标志着我国进入高速铁路时代,武广、郑西、沪杭、吉珲、津秦、湘桂等高速铁路陆续投入运营,截至 2015 年,中国高速铁路运营里程达 1.8 万多千米,位居世界第一位。我国高速铁路不论是里程规模,还是技术水平都已经走在世界前列。

高速铁路技术是当今世界铁路的一项重大技术成就,它集中反映了一个国家铁路牵引动力、线路结构、高速运行控制、高速运输组织和经营管理等方面的技术进步,也体现了一个国家的科技和工业水平。高速铁路在经济发达、人口密集地区的经济效益和社会效益尤为突出。高速铁路是用高新技术改造、更新传统铁路的一项创新工程体系,它凭借快速、安全、舒适、经济、高效的特点,在世界运输市场激烈的竞争中取得了较好的市场份额,推动了国民经济的发展与国土的开发,社会经济效益十分显著。

1.1 高速铁路技术与装备体系

高速铁路系统是一套人、车、路、环、管互相交融的动态复杂巨系统,高速铁路技术综合了工务工程技术、桥梁和隧道技术、轨道技术、信号技术、微电子技术、计算机应用技术、通信技术、控制技术、新型材料技术、安全保障技术、运输组织和管理等多学科、多方向、多系统的前沿技术,高速铁路技术与装备体系是融合固定设备、移动设备、运营控制于一体的高度集成化、技术复杂化、耦合程度高、组织一体化的现代系统工程体系。

1.1.1 高速铁路固定设备

高速铁路固定设备包括路基、桥梁、隧道、轨道、无缝钢轨、车站、接触网等。其中路基、桥梁、隧道都是轨道的基础,它们直接承受轨道的重量,在车辆通过时,还要承受机车车辆及其荷载的压力。路基工程主要由路基本体、路基防护和加固建筑物、路基排水设施三部分组成。路基是为了满足轨道铺设和运营条件而修建的土木工程建筑物,其修建的状态和质量直接决定了轨道线路的状态与质量,尤其对高速铁路而言,对轨道线路的平顺度、稳定性、耐久性要求极高,因此,高速铁路路基应按土工结构物进行设计,其地基处理、路堤填筑、边坡支挡防护以及排水设计等必须具有足够的强度、稳定性和耐久性。

当铁路通过江河、山谷,或要跨越公路、铁路既有线时,就需要修建桥梁、隧道建筑物。另外,随着我国高速铁路的不断发展和技术完善,逐渐形成了以桥代路、控制沉降的设计理

念,因此,与传统的既有线路相比,我国高速铁路线路将需要修建大量的长大桥梁。高速铁路全封闭的行车模式和轨道的高平顺性要求也导致桥梁比例明显增大,且以高架长桥居多,以中小跨度为主。

高速铁路隧道大多修筑在山中,从而避免开挖很深的路堑或者修建很长的迂回线,提高线路的平顺度和列车的通过速度。高速铁路隧道设计参数的特殊要求主要是由于车进入隧道诱发的空气动力学效应。当车速超过 200km/h 时,空气阻力成为行车总阻力的主要部分。在隧道中,这种阻力又比在明线运行时有明显的增加,其大小与车速、车头形状、隧道长度和断面大小有关。此外,由于气流的非恒定性,列车在隧道运行过程中,空气阻力并不是常数。通过采取如增大隧道断面尺寸、设置隧道口缓冲区等手段,最大限度地减小由于列车通过隧道而产生的不利情形。

在修建路基和桥梁、隧道建筑物之后,就可以铺设轨道了。轨道是指位于路基面以上、列车车轮以下的线路建筑物。轨道包括钢轨、轨枕、连接零件、道床、防爬设备及道岔等部件。高速铁路的行车特点是高速度、高密度和小编组,为实现列车的高安全性和高乘坐舒适性,轨道结构需具备高平顺性和高稳定性。其中,高平顺性通过建设初期的质量控制和开通运行后的养护维修控制来实现,高稳定性通过轨道部件的高可靠性、提高大机养修作业精度、增加养修作业后的安全储备量来实现。按照有无砟石,轨道可分为有砟轨道和无砟轨道,传统的有砟轨道容易变形,维修频繁且费用较高,列车运行速度受到限制,不适于高速列车行驶。因此,无砟轨道成为高速铁路工程技术的发展方向。其由铁轨、扣件、轨道板组成,具有平顺性高、刚度均匀性好、轨道几何形位保持性持久、维修工作量小等特点。

轨道是一个整体性工程结构,经常处于列车运行的动力作用下,轨道中的钢轨直接承受车轮的巨大压力,并引导车轮的运行方向。我国高速铁路均采用了无缝钢轨这种新的轨道结构形式,无缝钢轨是指在工厂将 25m 的钢轨焊接成长的长轨后,用专门的车辆运到工地,再将其焊接成更长的钢轨。通过将 25m 长的钢轨焊接起来连成几百米甚至几千米长,无缝线路减少了接头鱼尾板和螺栓,节省钢材的同时,消除了车轮对钢轨轨头的冲击,从而提高了列车运行的速度和平稳性,减少了环境污染和养护维修工作量,延长了线路设备和机车车辆的使用寿命,是高速铁路轨道结构现代化发展的重要方向。

高速车站的分布主要取决于城市分布和市场需求情况,并结合沿线城镇和重要居民点的分布。我国高速铁路的运输组织模式为本线旅客列车和跨线旅客列车共线运行,车站有与既有站分设和合设两种布置。我国现有火车站进站模式均为等候式,国外车站则是通过式,即到即走。高速铁路车站可分为越行站、中间站、始发站、终到站,以及通过兼始发、终到站。车站与既有客运站合设的布置方案的优点是吸引更多的旅客乘坐高速列车,充分利用既有客运站的站场、站房及其他旅客服务设施,节省工程投资和城市用地,有利于旅客换乘。其原则包括高、普速列车宜分场分线使用,在跨线列车车站需设联络线或渡线,客运站房共用。

高速接触网要求接触线受流、稳定、抗张、导电性能好及电流强度大。国外高速铁路的运营经验表明,复链形悬挂、弹性链形悬挂、简单链形悬挂均能满足高速运行要求,我国采用全补偿简单链形悬挂,采用综合接地系统,具有一级负荷的变配电所,采用 SCADA 系统对各供电设备进行一体化监控管理。

1.1.2 高速铁路移动设备

高速铁路移动设备主要有动车组和摆式列车两种。

动车组是指由两辆或两辆以上带动力的车辆和客车固定编组在一起的列车。动车组具有成组存在,由带动力的车辆和不带动力的客车组成,多用于客运,以固定编组进行运营,运营时不能解编,多采用电力牵引的特点。按最高运行速度分为准高速、高速和超高速动车组;按动力配置方式分为动力集中型和动力分散型高速动车组;按牵引动力分为高速电动车组、高速内燃动车组和磁悬浮动车组;按转向架连接方式分为独立式动车组和铰链式动车组。我国高速铁路线上运行的动车组是拥有完全自主知识产权、具有世界先进水平的国产“和谐号”高速列车,列车系统有很多关键技术的创新,在牵引系统、制动系统、高速转向架、车体空气动力学等方面的技术处于当今世界领先地位。

摆式列车是指一种车体转弯时可以侧向摆动的列车,以补偿列车不同的离心力,能够在普通路轨上的弯曲路段高速驶过而无需减速。摆式列车具有路途舒适度高、环境影响最小、使用灵活和拥有高效安全的刹车系统等特点。其原理就是将车体设计成能在不同速度条件下可实时倾摆的车体,当车辆向左转时,车体向左倾摆,让重力抵消向右推的离心力。摆式列车于20世纪70年代首先由英国研制成功,并成功运行在芬兰、德国、西班牙、瑞典、葡萄牙和意大利的高速铁路上。

1.1.3 高速铁路运营控制

高速铁路运营控制通过运营组织和列车运行控制等管理手段,实现高速列车的高效、稳定、安全、可靠运行。高速铁路运营组织系统覆盖旅客旅行服务的全过程,最大限度地满足不同层次的旅客出行需要,适应客流变化,制定运输计划和旅客列车开行方案,建立以高新技术为基础的安全保障体系和以调度中心为中枢的运营管理总体系统,实现了运营组织管理的高水平和高效益。

高速铁路基于运营调度指挥系统实现高速列车的运行控制,实现高速列车高效、安全运行。铁路运营调度指挥系统是集计算机、通信、网络等现代化技术为一体的综合系统,主要是帮助铁路管理部门对运力资源进行动态调配优化,并完成列车的计划、运行、设备维修等一系列任务,是完成高速铁路运输组织特别是高速铁路系统日常运营的根本保证。

1.2 高速铁路运营安全要素分析

与传统铁路相比,高速铁路的列车运行速度得到了极大提升,列车运营过程中潜在的不安全因素增多,安全问题尤为重要。高速列车运行速度高达300~350km/h,任何灾害的发生都可能引发较大的损失,威胁人民群众的生命和财产安全。以德国高铁为例,1998年6月3日早上10:59,德国高铁ICE884号列车行经接近艾须得路桥时,以200km/h的速度脱轨,第三节车厢撞击艾须得路桥右侧第一根梁柱,造成梁柱坍塌,引发后续车厢的连续撞击,共造

成 101 人死亡,这是高铁史上最为惨痛的一次事故。因此,安全管理是高速铁路运营管理的中中之重,通过分析高速铁路运营安全要素,充分了解和掌握各安全要素的特点和安全管理方法,是构建运营安全保障技术体系、实现安全运营的重要技术手段。

高速铁路运营体系是由多个子系统组成的复杂动态巨系统,它涉及铁路工作人员、线路、机车车辆、通信信号、监控、故障检测、维修等各个领域,根据系统工程原理,高速铁路运营安全要素可归纳为人员、机车车辆、线路、环境和管理 5 个方面。

1.2.1 人员安全要素

高速铁路运营安全贯穿了铁路建设、运营和管理的各个环节,从最初的勘测、设计,到施工、新技术的研究开发、设备的生产制造、运营管理和日常维护监测等都直接或间接与安全相关,而这其中的每个环节都需要人员的参与和管理。因此,人员安全要素渗透到了铁路的各个部门、专业和工种,可以说人员安全要素是一个复杂的综合性要素。根据日本高速铁路 30 多年安全运行的管理经验,为保证高速铁路的运输安全,必须要处理好人的问题、机器设备的问题以及人与机器两者间的协调问题。

1.2.2 机车车辆安全要素

影响机车车辆安全的因素有设计制造风险、维护保养风险以及机车车辆的运行风险等。设计制造风险包括是否有设计制造缺陷,是否采用了新技术和新材料。维护保养风险是指在维护保养过程中,是否能及时发现机车车辆内部早期缺陷,是否按照保养规定按时维护和保养,是否达到维护保养的技术水平等。机车车辆的运行风险是指车辆超载运行、机车车辆未按照线路规定的限速行驶,以及司机未按照操作规程操作机车等。

1.2.3 线路安全要素

高速铁路线路是由路基、桥隧建筑和轨道组成的一个复杂的整体工程结构,其中轨道又包含无缝钢轨、轨枕、连接零件、道床、防爬设备和道岔等。因此线路安全要素涉及路基沉降、桥梁裂纹、隧道形变、无缝钢轨应力超限、断轨、扣件缺失、CA 砂浆脱空以及轨道不平顺等多个方面。与传统铁路相比,高速铁路列车运行速度快,列车车轮与无缝钢轨间的作用力更大,列车对钢轨的冲击力又进一步传导至扣件、道床、路基和桥梁,当车辆对线路结构的动力破坏作用超过一定限度时,就会产生一系列病害问题。因此,必须加强对高速铁路线路服役状态的综合监测,在复杂多变的运行环境下准确感知车辆和线路的关键参数变化,从而保证高速列车持久、安全运行。

1.2.4 环境安全要素

环境安全要素包括社会环境要素和自然环境要素两方面。社会环境因素主要指社会政治和经济形势、安定团结的局面、社会治安情况等,良好的社会环境对高速铁路的运行安全起

到良好的促进和保障作用。自然环境因素中的自然灾害是影响铁路运输安全的重要因素之一,尤其对高速铁路而言更为突出。自然灾害种类繁多,如暴雨、冰雹、大风、暴风雪、台风、龙卷风、洪水、泥石流、山体塌陷以及地震等,都将严重危害高速铁路行车安全。除了灾害性天气,酷暑、严寒也会对高速铁路的场外作业和维护工作带来安全隐患,其他一些影响观察视野的情况,如大雾、沙尘暴、大雨、大雪等,也会严重影响行车安全。另外,我国国土辽阔,高速铁路具有跨多个气候带的特点,长达数十、上百千米的无缝线路,处于非常复杂的环境温度场作用下,因此,在环境安全要素中,温度场分布情况也是必须要考虑的一个重要环节。

1.2.5 管理安全要素

安全管理就是以安全为目的,进行有关的决策、计划、组织和控制方面的活动。控制事故可以说是安全管理工作的核心,而控制事故最好的方式就是实施事故预防,即通过管理和技术手段的结合,消除事故隐患,控制不安全行为,保障劳动者的安全。但由于受到技术水平、经济条件、客观因素等方面的制约,有些事故是难以避免的,因此,控制事故后果的另外一种手段就是应急措施,通过抢救、疏散、抑制等手段,在事故发生后控制事故的蔓延,把事故的损失减少到最小。建立完备的检修制度、制定预防灾害的措施、提高列车运行的可靠性、完善高速铁路应急管理体制等,均是保障高速铁路安全运营的重要管理内容。

1.3 无缝线路服役状态对铁路运营安全影响的分析

影响高速铁路运营安全的各因素可归纳为“人-车-路-环-管”关系的一个综合体系,其中“路”是高速铁路运行必不可少的线路基础,是高速铁路系统运营安全的重要安全因素。高速铁路无缝线路消灭了大量的钢轨接头,因而具有行车平稳、乘坐舒适、车辆和轨道寿命长、维修费用小等特点。但是,由于无缝线路受到扣件、道床的阻力约束作用而不能自由伸缩,当温度变化时在钢轨内部产生很大的温度应力。同时钢轨还要受到来自下部的轨道板、路基、桥梁等的作用力。在服役过程中,由于扣件阻力变化、道床阻力变化、轨温变化、施工和养护、列车牵引力和制动力、桥梁的伸缩或挠曲变形、钢轨位移等因素的影响,一根长距离无缝钢轨在长期服役过程中的纵向应力分布是非常复杂的,且我国国土辽阔,高速铁路具有跨多个气候带的特点。由于特殊的气候环境与地质条件以及运营条件的不确定性,高速铁路基础设施在服役过程中,其内部结构已暴露出系列病害,主要有锁定轨温改变、钢轨温度应力超限、断轨、扣件松脱、道床暗坑、道床板结、道床松散、轨道几何不平顺、路基沉降以及 CA 砂浆脱空等问题。下面将以钢轨应力超限、断轨以及轨道几何不平顺为例,分析相关病害的成因及对高速铁路运行安全的严重危害。

1.3.1 无缝钢轨温度应力

由于无缝线路轨缝的消失,钢轨无法在温度改变时自由伸缩,根据胡克定律计算可知,

长钢轨的温度相对于锁定轨温每变化 1°C , 钢轨固定区内纵向应力变化 2.478MPa , 若轨温变化 50°C , 则钢轨内应力变化为 123.9MPa 。以国内高铁普遍采用的 CHN60 钢轨为例, 其横截面积为 77.47cm^2 , 若轨温变化 50°C , 则在钢轨内部产生的温度力将达 960kN 。可见无缝线路长钢轨所承受的温度应力要比普通钢轨大得多, 当温度应力超过钢轨的承受限度时, 就会在扣件阻力小或路基条件差的区域释放能量, 当压应力过大时, 会发生胀轨、跑道; 当拉应力过大时, 会发生断轨。历史上胀轨、断轨导致的事故时有发生, 造成了巨大的生命财产损失。断轨事件除了与焊接质量等人为因素有关, 钢轨纵向温度应力也有着直接影响。

除了温度应力, 钢轨内部缺陷也是影响无缝线路运输安全的一个重要因素。随着我国铁路运输事业的发展, 提速、快速客运和重载线路的运营里程逐年快速增长, 列车运行速度快、密度大、轴重高这些特点使得服役钢轨在快速直线地段出现交替侧磨、波磨和斜裂纹等缺陷, 在重载曲线地段出现严重侧磨、压溃、斜裂纹、剥离掉块甚至断轨等伤损缺陷, 不同线路上的钢轨表现出了不同的伤损特点。这些内部缺陷在高速列车的动态载荷作用下不断发展, 直至出现较大的表面裂纹, 甚至断轨, 严重威胁高速列车的行车安全。

1.3.2 轨道不平顺

在无缝线路上运行的列车, 速度越高, 车辆对轨道的动态作用力越大, 运行安全性与平稳性问题越显突出, 既要保证列车高速安全通过各种复杂线路时不发生脱轨, 又要保证列车在轨道不平顺的作用下能有良好的运行平稳性和舒适性; 同时运载重量的增加也会使车辆与轨道结构的作用力增大, 导致线路下沉变形严重; 反过来线路系统对列车振动的影响增强, 列车运行动态环境恶化。根据国内外的计算机仿真和动态测试试验等研究, 幅值 10mm (波长 40m) 连续的高低不平顺, 在 120km/h 速度条件下引起的车体振动和轮轨动力作用都很小, 但是当速度达到 300km/h 时, 就可使车体垂向产生频率为 2Hz 、加速度幅值为 1.76m/s^2 的持续振动。又如, 幅值仅 5mm (波长 40m) 的方向不平顺, 在低速时引起的振动很小, 而在 300km/h 时, 可能使车体横向产生频率为 2Hz 、加速度为 0.65m/s^2 的振动。国际振动环境标准 ISO2631 规定, 对于振动频率为 $1\sim 2\text{Hz}$ 、累计持续时间为 4h 的车体振动环境, 保持舒适感不减退的允许加速度为: 横向 0.17m/s^2 , 垂向 $0.34\sim 0.49\text{m/s}^2$, 可以看出当速度提高时, 产生的振动加速度已经超过了标准规定值。

由于列车载荷的反复作用以及自然因素的影响, 线路经常发生永久性几何变形, 形成轨道几何偏差, 又称为轨道几何不平顺。轨道几何不平顺是车辆轨道振动的主要激励源, 使轮轨作用力发生变化, 是影响列车运行安全性和平稳性的控制因素, 也是轨道结构部件损伤和失效的重要原因。某些轨道不平顺会引起车辆轨道性能的快速恶化, 甚至运载货物的损坏。轨道不平顺的产生有很多原因, 既有轨道几何状态的影响, 如钢轨接头、列车运行作用下引起的钢轨波浪形磨耗、钢轨焊接不良形成的焊缝凸台、车辆动力冲击、路基不均匀沉降, 又有施工过程中带来的偏差以及轨下基础结构的缺陷, 其中很多因素都具有随机性。

轨道不平顺分为轨道几何不平顺和轨道刚度不平顺。轨道几何不平顺按检测方式分为静态不平顺和动态不平顺。无论载作用时, 人工或轻型测量小车测得的不平顺称为静态不平顺;

用轨检车测得的在列车车轮载荷作用下完全显现出来的轨道不平顺称为动态不平顺。轨道动态不平顺等于轨道静态不平顺与轨道的动态位移响应之和。另外,轨下基础结构发生变化或存在缺陷也会引起轨道沿纵向的弹性不均匀现象,称为轨道刚度不平顺。轨道刚度不平顺从表面上是无法获知的,当车辆通过刚度不平顺的区段时,会使钢轨、轨枕和道床产生不同于正常线路的振动位移和冲击,振动位移累积会使轨道产生局部永久变形,导致轨道几何不平顺条件恶化,反过来又作用给车辆,引起轮轨更大的振动。轨道不平顺会影响列车通过时的平稳性,给乘车人员带来不适,当不平顺超限严重时,还可能威胁行车安全,造成不可挽回的严重后果。

1.3.3 无缝线路服役状态综合监测方法

高速铁路的列车运行速度快,轮轨之间的动力作用加大,列车与线路、桥梁之间的动态相互作用加强,使得车辆对线路结构的动力破坏作用加大,同时车辆对于来自线路的各种约束力变化、不平顺激励更为敏感。因此,必须加强对高速铁路设备服役状态的综合监测,建立相应的状态评估理论,在复杂多变的运行环境下准确感知车辆和线路的关键参数变化,为保证大规模高速列车持久、安全运行奠定基础。

我国高速铁路经历了引进、消化、再创新的跨越式发展过程,在高速铁路设计、建造方面积累了丰富的经验,取得了一些世界领先的技术成果。目前,最为缺少的是在运营维护方面的经验,在列车、线路等设备的服役状态演变规律、状态监测、养护维修、能力保持等方面缺少理论和技术上的储备。目前还没有相关的理论和手段可以分析、预测、监测,给高铁运营安全带来隐患。虽然高速铁路已经安装了各种地面、车载监测设备,还有各种动态检测设备可以获取检测数据,但如何合理配置这些监测设备,如何利用这些海量数据准确获取需要的信息,目前还缺乏完整的理论和技术支持。我国高速铁路目前还广泛采用无砟轨道和以桥代路的结构形式,这些新的结构形式在提高线路平顺性、稳定性上具有明显优势,但长期服役过程中出现的基础沉降、疲劳损伤、环境侵蚀等会给这些结构带来不可逆转的伤害,造成参数劣化、服役性能持续下降。如何有效监测这些性能变化过程,目前也缺乏综合感知和监测理论的指导。

目前已有大量的学者利用较为细致的车-路-桥耦合模型理论研究高速铁路各种设计参数对系统性能的影响。车辆-无砟轨道-桥梁耦合动力学方程通常包含集中参数的车辆模型和分布参数的轨道桥梁模型,采用模态分解法化简后,又可以表示成: $[M]\{\ddot{X}\} + [C]\{\dot{X}\} + [K]\{X\} = \{P\}$, 其中, $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$ 分别为广义质量、阻尼、刚度矩阵; $\{X\}$ 为耦合系统的广义位移矢量; $\{\dot{X}\}$ 为耦合系统的广义速度矢量; $\{\ddot{X}\}$ 为耦合系统的广义加速度矢量; $\{P\}$ 为耦合系统的广义载荷矢量,难于显示表示,是与 $\{\dot{X}\}$ 、 $\{\ddot{X}\}$ 有关的非线性过程量。这是一个大型复杂非线性动力学微分方程组。例如,对于车辆轨道垂向耦合动力学问题,系统自由度一般在450~500,系统还具有悬挂非线性、轮轨接触几何非线性等多种复杂非线性因素。这类模型适合分析典型结构耦合特征,可以在一定程度上满足设计阶段的需求。在高速铁路运营期,需要分析长大铁路网设备的服役状态及其变化过程,而这类模型缺少对高速铁路设备服役状态演变的描述,

更无法描述这些状态变化与耦合系统的相互作用关系和过程。因此,需要建立全新的高速铁路服役状态模型,使其既可以描述高速列车及其运行环境的瞬时动态过程,又可以描述瞬态行为累积效应造成的参数长期演变过程,同时模型还需在复杂程度和计算量上可控,适合实际应用。

长期保持高速铁路基础设施优质的服役状态,建立科学的基础设施健康服役状态保障体系,是高速列车安全、平稳和舒适运营的坚实基础,其中蕴涵着许多亟待解决的重大科学问题,开展高速铁路设备服役状态感知与综合监测理论研究非常迫切。本书将通过研究高速铁路设备在长期服役过程中的状态演变过程,建立全新的高速铁路服役状态模型,使其既可以描述高速列车及其运行环境的瞬时动态过程,又可以描述瞬态行为累积效应造成的参数长期演变过程。以此为基础,重点研究复杂分布参数系统的状态感知算法,采用地面监测和移动监测等多种检测方式,实现高速铁路设备状态参数的智能感知,形成设备服役状态综合评估方法,为构建我国高速铁路设备服役状态综合监测的基本理论奠定基础,为科学指导养护维修提供理论和方法的支持。

1.4 本书主要内容

本书主要针对安全要素中的无缝线路服役状态这一环节,分析无缝线路服役状态对铁路运营安全的影响,并展开和深入论述高速铁路线路服役状态演变基础理论与建模方法,以及地面监测和移动监测方法。

全书分为4个章节。第1章绪论,系统介绍了高速铁路技术与装备体系,分析了高速铁路各个核心环节的运营安全要素,重点分析了无缝线路服役状态对铁路运营安全的影响,并提出了基于理论分析与建模、地面监测和移动监测的服役状态综合监测方法。

第2章介绍无缝线路服役状态演变基础理论与建模方法。主要研究高速铁路无缝线路、无砟轨道、路基、桥梁等设备在长期服役过程中,由于轮轨冲击、材料疲劳、环境和地质等因素的影响而发生的关键参数变化,通过综合运用机理分析和数据驱动等建模方法,描述设备关键参数的演化规律。将其引入车辆-无砟轨道-路基/桥梁动态耦合模型中,构建能够多尺度描述设备状态的仿真模型,主要包括以下3类模型。

(1) 线路设备服役状态演变模型:跨多个气候带的长距离无缝线路钢轨在温度、结构附加力、制动力等作用下位移爬行、纵向应力、刚度、阻尼系数等宏观参数分布的演变过程模型;无砟轨道在温度、弯曲荷载、基础约束等作用下的平顺度、刚度、阻尼系数等宏观性能参数演变模型。

(2) 车-路-桥动态耦合模型:研究基于高速列车集中参数系统模型、路桥分布参数系统模型和非线性轮轨关系模型的动态耦合模型建模。

(3) 多尺度混合模型及其仿真方法:综合线路设备服役状态演变模型与车-路-桥动态耦合模型,构建既可以描述高速列车及其运行环境的瞬时动态行为,又可以描述瞬态行为累积效应造成的参数变化行为的多尺度混合模型。

第3章介绍无缝线路服役状态参数智能感知地面监测方法。重点研究跨多气候带无缝线

路钢轨、路基,在扣件阻力变化、道床阻力变化、轨温变化、施工和养护、列车牵引力和制动力、桥梁的伸缩或挠曲变形、钢轨位移等因素的影响下,其服役状态变化规律。通过获取大量现场数据,为线路设备服役状态演变模型提供样本数据,为构建我国高速铁路设备服役状态综合监测的基本理论奠定基础。

地面监测方法的主要内容如下。

(1) 钢轨纵向应力地面监测方法。

基于超声波传播速度对材料内部应力的敏感性原理,研究无缝钢轨应力、温度、材质、残余应力等因素对超声波传播速度的影响,采用超声导波技术和光纤光栅温度补偿与应力检测方法,实现多传感器融合的钢轨纵向应力长期在线监测。

(2) 钢轨完整性地面监测方法。

超声导波具有传播距离远、可覆盖波导介质整个横截面、检测效率高的特点,基于超声导波方法,通过灵活运用反射式和对射式超声检测原理获得钢轨现场焊缝裂纹早期预警和大区间钢轨断裂报警,实现高速铁路无缝线路钢轨完整性在线监测。

(3) 路基沉降变形地面监测方法。

分析长期服役过程中路基与各结构物间过渡、特殊结构路基、特殊土路基以及桥梁桩基等工后沉降变形特性及其对上部轨道结构服役状态的影响规律,研究基于自动全站测量的智能移站沉降变形监测系统,研究针对高速铁路的全站测量方式、站间走行方式、动力及电源供给方式、观测标设置、远程控制和远程数据传输技术,完善线路沉降评估方法,开发工后沉降变形分析评估系统。

第4章介绍无缝线路服役状态参数智能感知移动检测方法。以线路全断面动态检测为例,详细论述线路几何安全状态的非接触式动态检测和高精度动态测量基准获取的原理方法。利用车辆动态响应来识别轨下缺陷,解决轨道安全服役过程中轨道几何不平顺、刚度不平顺、CA砂浆脱空及钢轨应力集中多种病害耦合关系复杂的问题。研究列车在轨道多种病害激励下的响应特性,研究病害解耦方法和智能识别算法,建立基于车载动态检测的感知理论,形成基于地面监测和移动检测一体化的高速铁路设备服役状态综合监测理论模型和综合评估方法。

移动检测方法的主要内容如下。

(1) 线路全断面与形变移动检测方法。

充分利用线路、车辆、陀螺仪和加速度计的已知特性,研究基于车路振动模型的惯性基准滤波算法,采用数学仿真研究算法的收敛性和鲁棒性。通过KF/UKF滤波算法,极大提高了传统惯性基准的测量精度。仿真数据表明,这种新算法具有收敛性好、实时性高等优点。利用惯性基准算法结合全断面动态检测的不同应用模式,研究轨道交通基础设施全断面的高精度动态检测系统方案,以及在铁路和城市轨道交通中的应用模式。

(2) 轨道几何不平顺移动检测方法。

为实现利用运营车辆的车辆振动响应感知轨道几何静态不平顺,提出一种基于微种群遗传算法和车辆轨道耦合模型相结合的轨道几何静态不平顺估计算法,将轨道几何静态不平顺看成车辆、轨道耦合模型非线性系统的一个参数,进而将轨道不平顺求解转换为模型参数的估计方法。参数估计准则采用车辆轨道耦合模型与车辆测量模型输出之差平方和最小,利用

遗传算法在解空间内直接搜索轨道静态不平顺的最优解。由于车辆轨道耦合模型动力学方程为大型非线性方程组,为缩短计算时间和计算量,研究改进的微种群遗传算法,摒弃一般微种群遗传算法中的重启步骤,增大变异概率,在进化过程中使用最优保留策略。

在获得了轨道几何静态不平顺的基础上,如果已知车辆参数,则可以构建较为真实的车辆轨道耦合模型,通过求解该模型可获得钢轨动态位移,与几何静态不平顺叠加即可获得列车通过时的轨道动态不平顺。由于测量模型和理论模型都存在误差,为了提高轨道不平顺的估计精度,提出了一种基于遗传算法和无迹卡尔曼滤波(UKF)技术相嵌套的轨道动态不平顺优化算法。借助车辆轨道耦合模型、测量传感器的已知特性,优化轨道振动响应,提高轨道动态不平顺的估计精度。

(3) 轨道刚度突变移动检测方法。

通过对轨道结构在列车载荷、轨道几何不平顺、环境温度场等多载荷场耦合作用下刚度不平顺、CA 砂浆脱空病害演化规律开展研究,建立适合仿真列车和轨道在刚度不平顺、CA 砂浆脱空病害激励下响应特性的车轨耦合模型,分析多载荷场病害激励下车辆和轨道动态响应时域、频域变化规律,对病害危害进行评估。并在此基础上提出一种基于支持向量机的利用车辆振动响应进行刚度不平顺、CA 砂浆脱空的车载动态检测感知算法,能够实现对刚度不平顺故障的识别和 CA 砂浆脱空故障的整体识别,建立基于车载动态检测的轨道运行安全综合感知理论。

(4) 钢轨应力移动检测方法。

钢轨的应力变化会改变轨道结构的固有振动特性,进而在一定程度上影响车辆通过时的动态响应。通过对应力作用下的轨道结构进行模态分析,再将受应力改变的轨道振动特性引入车轨耦合模型的计算中,就可以从模型动态响应的时域、频域分析中总结钢轨应力影响的规律性,从而为应力估计提供理论基础。

由于这种频域特征往往被由轨道不平顺引起的剧烈振动所干扰,尤其是在列车运行速度较高时,因此,将应力大小作为耦合模型的其中一个参数,利用非线性系统参数估计的方法,同时估计轨道不平顺和应力大小,再将轨道不平顺与已知轨道谱进行比较、修正。多次计算下,测量模型能够在一定程度上滤除不平顺引起的变化,实现对应力等级的粗略估计。

参 考 文 献

- 高亮. 2012. 高速铁路无缝线路关键技术研究与应用. 北京: 中国铁道出版社.
贾利民. 2013. 高速铁路安全保障技术. 北京: 中国铁道出版社.
卢耀荣. 2004. 无缝线路研究与应用. 北京: 中国铁道出版社.
佟立本. 2012. 铁道概论. 北京: 中国铁道出版社.