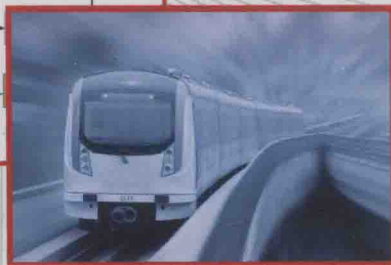
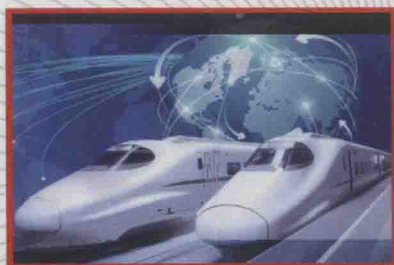


现代铁路轨道不平顺 与病害动态检测

魏秀琨 尹贤贤 刘丽华 刘峰 著



科学出版社

现代铁路轨道不平顺 与病害动态检测

魏秀琨 尹贤贤 刘丽华 刘 峰 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

轨道交通系统基础设施安全检测与预警对轨道交通系统安全运营具有重要的作用。本书介绍基于运营车辆的轨道交通钢轨在线检测的一些最新研究成果,重点介绍基于运营车辆的轨道不平顺检测技术,钢轨表面核伤、波浪形磨耗、道岔区以及低接头等病害的建模、检测算法和实验验证;同时,对轨道检测中用到的一些信号处理技术进行简单的总结,并介绍了轨道质量指数预测方面的探索性研究成果。

本书可以作为轨道交通基础设施检测、轨道交通系统安全保障、机电系统故障诊断领域研究生以及轨道交通专业高年级本科生的参考书,对于轨道交通行业的技术人员和故障诊断领域的科研人员也具有一定的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

现代铁路轨道不平顺与病害动态检测/魏秀琨等著. —北京:科学出版社, 2018.3

ISBN 978-7-03-055337-9

I. ①现… II. ①魏… III. ①轨道不平顺(铁路)-检测 IV. ①U216.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第276481号

责任编辑:张海娜 朱英彪 赵微微 / 责任校对:桂伟利

责任印制:张 伟 / 封面设计:蓝正设计

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>

北京九州迅驰传媒文化有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年3月第 一 版 开本:720×1000 B5

2018年3月第一次印刷 印张:17

字数:342 000

定价:98.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

随着中国城市化进程的不断深入,现代城市轨道交通运转日趋网络化和集成化,对网络化的运营指挥和维护保障的整体性协同提出了更高的要求,也对整个城市轨道交通网络的可靠性保证提出了更大的挑战。城市轨道交通线路侧的设施设备,如触网、轨道、桥梁、隧道等,在列车运行中形成了全息化的移动立体空间,为确保整个立体空间的有效、安全、持续运作,可采用移动在线监测、信息化、智能化等手段实现对城市轨道交通关键设施设备及系统的相关属性、参数和状态的全方位感知。

随着运营规模的不断扩大以及运营难度的不断增大,城市轨道交通的运营模式已逐渐从单线运营转变为网络化运营,既有的传统系统运作在网络化的背景下已不能满足新的需求,急需一个基于城市轨道交通基础设施全息化移动监测与运维的平台进行支撑,完善各类全息化在线安全监测手段,建立基于安全监测的后续优化整合以及实现安全策略的有效应用,从而实现城市轨道交通网络运营设施设备的科学维护、网络化运营资源配置的统筹集约、网络化系统运作的智能高效,有效提升网络化运营与维护质量,优化和提升城市轨道交通基础设施安全和维护保障水平,确保网络化运营的安全与效率。

为满足城市轨道交通网络化运营安全的新要求,实现自主创新,打破国外技术垄断,迫切需要研制城市轨道交通基础设施全息化移动监测设备与运维系统,这也是《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020年)》的优先发展主题。

针对基于运营车辆的轨道安全状态和病害检测这一主题,本书系统总结了项目组过去几年在该领域的研究成果。第1章对钢轨检测进行概述并介绍钢轨检测的国内外研究现状;本书重点讨论基于运营车辆的钢轨检测技术,该技术与列车车辆的动态特性有关,因此,第2章讨论列车车辆的动力学建模和SIMPACK软件实现;第3章对书中用到的各种信号处理算法进行简要的介绍;第4章对基于运营车辆的轨道不平顺检测系统进行研究;第5章从谱分析的角度来分析钢轨健康状态;第6章重点介绍钢轨核伤的建模与检测算法;第7章提出一种基于运营车辆转向加速度的钢轨波磨检测方法,利用经典信号分析方法(时、频分析)以及现代信号分析方法(小波分析、希尔伯特-黄变换),对检测信号进行分析,从而获取钢轨波浪形的时频特性,进而验证基于运营车辆转向加速度的钢轨波磨检测方法的可行性;第8章利用时域和频域分析、小波分析以及希尔伯特-黄变换等分析方法分别对轨缝低接头病害状态以及正常状态下的车辆转向架加速度数据进行对比分析;第9

章利用实验平台设备分析实验车辆经过道岔时的实际加速度信号,用时域分析和小波包分析方法分析尖轨不密贴病害对实验小车加速度的影响,验证 SIMPACK 仿真模型中关于车辆振动信号分析理论的正确性,提出两种工程实际中确定道岔具体位置的方法;第 10 章主要介绍 BP 神经网络、灰色神经网络、泛化回归神经网络和支持向量机神经网络对于预测轨道质量指数的效果对比,利用轨道质量指数历史数据,以通过不同神经网络对给定数据的拟合能力与泛化能力为标准,对不同神经网络的学习与预测效果进行评价。

本书主要由北京交通大学魏秀琨教授撰写,包括第 2 章、第 4~9 章。北京信息科技大学刘丽华副教授完成了第 1 章、第 3 章和第 10 章的撰写工作。尹贤贤完成了第 6 章的部分仿真工作。刘峰完成了第 5 章的部分仿真分析。

本书的研究成果得益于轨道交通控制与安全国家重点实验室自主课题“高速列车车辆主动安全控制模型和算法研究”(RCS2014ZT003)、“轨道交通列车悬挂系统智能监测与预警技术研究”(RCS2016ZT006)、国家“十二五”科技支撑计划“城轨交通轨道安全状态移动检测系统研制”(2011BAG01B04)、国家“十三五”国家重点研发计划“城市轨道系统安全保障技术”(2016YFB1200400-2)以及国家“十三五”国家重点研发计划“复杂环境下轨道交通系统全生命周期能力保持技术”(2017YFB1201202)等项目的资助。在本书的写作过程中,得到了北京交通大学研究生贺延芳、申丽、闫冬、陈军、程茗、吕又冉、张靖林、张晓中、王腾腾、朱明、李卓玥、刘玉鑫和李岩等的支持,他们在相关内容的研究及书稿编辑和纠错方面做了不少的工作,对他们所做的工作表示感谢。

由于作者水平有限,书中难免存在不妥之处,恳请读者不吝指教。

作 者

2017 年 11 月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 轨道检测概述	2
1.1.1 轨道不平顺的基本知识	2
1.1.2 轨道病害的基本知识	6
1.1.3 道岔的基本知识	9
1.1.4 轨道质量指数的基本知识	14
1.2 轨道检测技术的国内外研究现状	15
1.2.1 不平顺检测	15
1.2.2 轨道病害研究	16
1.2.3 道岔病害研究	17
1.2.4 TQI 预测	20
1.3 本书的主要内容	21
参考文献	22
第 2 章 城轨车辆动力学模型	27
2.1 城轨车辆垂向悬挂系统动力学建模	27
2.1.1 城轨车辆垂向悬挂系统的微分方程描述	27
2.1.2 城轨车辆悬挂系统的状态空间模型与频域响应分析	30
2.1.3 基于功率谱函数的轨道模拟及车辆模型时域响应仿真	34
2.1.4 模型的特点与局限	35
2.2 城轨车辆横向动力学分析	35
2.2.1 整车横向动力学系统的微分方程描述	35
2.2.2 整车横向动力学系统的状态空间模型	39
2.2.3 整车横向动力学系统的频域响应分析	43
2.3 SIMPACK 城轨车辆整车动力学仿真实验模型	48
2.3.1 SIMPACK 软件介绍	48
2.3.2 城轨车辆整车动力学仿真实验模型的搭建	50
2.4 本章小结	52
参考文献	53
第 3 章 轨道检测数字信号处理基础	54
3.1 时域分析理论	54

3.2 频域分析理论	55
3.2.1 频谱分析	55
3.2.2 频域特征值	56
3.3 小波分析的基本原理	57
3.3.1 连续小波变换	58
3.3.2 小波包分解	58
3.4 希尔伯特-黄变换	60
3.5 支持向量机的基本原理	65
3.5.1 支持向量机概述	65
3.5.2 支持向量机分类原理	66
3.6 本章小结	67
参考文献	67
第4章 基于运营车辆的轨道不平顺检测系统与超限等级标准	69
4.1 轨道不平顺检测系统的组成	69
4.2 传感器的选用标准	71
4.3 轨道不平顺检测系统数据采集设备	71
4.4 轨道不平顺检测系统数据处理设备	72
4.5 轨道不平顺检测系统软件	73
4.6 轨道动态不平顺超限等级标准概述	75
4.7 轨道不平顺检测数据及处理流程	76
4.8 轨道不平顺数据分析举例及超限等级标准制定	77
4.8.1 高低不平顺数据分析及超限等级标准制定方法	78
4.8.2 轨向不平顺数据分析及超限等级标准制定方法	80
4.9 轨道不平顺检测系统超限等级标准可用性验证	83
4.10 轨道不平顺检测系统检测可重复性验证	84
4.11 本章小结	94
参考文献	94
第5章 钢轨健康状态检测	95
5.1 各项轨道不平顺振动谱分析	95
5.1.1 轨道不平顺度简介	95
5.1.2 轨道不平顺的分类	96
5.2 基于转向架振动加速度谱的钢轨健康状态分析	100
5.3 基于均方根及峰峰值的钢轨健康状态分析	107
5.4 本章小结	110
参考文献	110
第6章 钢轨核伤建模与检测技术研究	111

6.1 钢轨核伤病害	111
6.1.1 钢轨核伤的产生机理及扩展	111
6.1.2 钢轨核伤拟合模型	113
6.1.3 SIMPACK 弹性体建模	114
6.2 基于核伤钢轨的整车动力学模型	115
6.2.1 刚性轮轨接触模型的建立	115
6.2.2 车辆仿真模型的建立	117
6.2.3 存在核伤病害的弹性钢轨建模	119
6.3 钢轨核伤处转向架加速度信号的时频分析	121
6.3.1 时域分析	121
6.3.2 频域分析	123
6.3.3 不同车速下的车辆转向架振动加速度信号时频特性	127
6.4 小波分析与希尔伯特-黄变换在钢轨核伤检测中的应用	131
6.4.1 小波分析在钢轨核伤检测中的应用	131
6.4.2 希尔伯特-黄变换在钢轨核伤检测中的应用	137
6.4.3 系统模态分析	143
6.5 本章小结	146
参考文献	147
第 7 章 波浪形磨耗建模与检测技术研究	149
7.1 基于 SIMPACK 的钢轨波浪形磨耗建模	149
7.1.1 钢轨波浪形磨耗病害	149
7.1.2 基于波磨钢轨的整车动力学模型	151
7.2 钢轨波磨处转向架加速度振动信号的时频分析	153
7.2.1 时域分析	153
7.2.2 频域分析	155
7.3 小波分析	156
7.4 希尔伯特-黄变换分析	160
7.5 本章小结	163
参考文献	163
第 8 章 轨缝低接头病害建模与检测技术研究	164
8.1 基于 SIMPACK 的轨缝低接头建模	164
8.1.1 轨缝低接头的形成	164
8.1.2 钢轨轨缝低接头拟合模型	164
8.2 轨缝低接头处转向架加速度振动信号的时域分析	166
8.3 轨缝低接头处转向架加速度振动信号的功率谱密度分析	168
8.4 轨缝低接头处转向架加速度振动信号的小波分析	169

8.5 轨缝低接头处转向架加速度振动信号的希尔伯特-黄变换	172
8.6 上海地铁 1 号线实际数据分析	174
8.7 本章小结	183
参考文献	183
第 9 章 车辆-道岔病害建模与检测技术研究	184
9.1 道岔建模	184
9.1.1 道岔的构造	184
9.1.2 道岔建模原理	185
9.1.3 道岔病害的模拟	190
9.2 转向架振动加速度信号分析	194
9.2.1 尖轨不密贴信号分析	194
9.2.2 尖轨轧伤信号分析	198
9.2.3 叉心沉落信号分析	202
9.2.4 导曲线反超高	207
9.3 基于 SVM 的道岔病害识别	211
9.4 模型验证及可行性分析	224
9.4.1 基于实验台的模型验证	225
9.4.2 工程应用可行性分析	235
9.5 本章小结	244
参考文献	244
第 10 章 神经网络预测 TQI	245
10.1 BP 神经网络预测 TQI	245
10.1.1 BP 神经网络简介	245
10.1.2 BP 神经网络输入、输出样本	246
10.1.3 BP 神经网络结构设计	247
10.1.4 BP 神经网络预测流程	249
10.1.5 BP 神经网络预测结果	249
10.1.6 网络输入样本优化及预测结果	250
10.2 灰色神经网络预测 TQI	252
10.2.1 灰色神经网络	252
10.2.2 遗传算法优化的灰色神经网络	255
10.3 泛化回归神经网络预测 TQI	258
10.4 支持向量机神经网络预测 TQI	260
10.5 本章小结	263
参考文献	264

第 1 章 绪 论

作为最具可持续性的交通运输模式,轨道交通是国民经济大动脉、大众化交通工具和现代城市运行的骨架,是国家的关键基础设施和重要基础产业,对我国经济社会发展、民生改善和国家安全起着不可替代的全局性支撑作用。轨道交通科技持续自主创新更是国家通过实施“创新驱动发展”战略全面支撑“新型城镇化”“区域经济一体化”“一带一路”“制造强国”和“走出去”战略的全局性重要基础保障;对建设创新型国家,构建现代综合交通运输体系,实现全面建成小康社会目标,具有重大意义。

2014 年,我国城市轨道交通建设和投资继续保持高增长,建设规模持续扩大。特别是国家发展和改革委员会连续出台了多个政策性文件,为城市轨道交通发展创造了更加有利的政策环境。新线投产规模创历史最高纪录,铁路营业里程突破 11.2 万公里。高速铁路营业里程超过 1.6 万公里,稳居世界第一。中西部铁路建设掀起高潮,营业里程达到 8 万公里,占全国铁路营业总里程的 62.3%。目前,以“四纵四横”为主骨架的高速铁路网已初具规模,并全部开工建设,其中京沪、京广深、哈大、沪杭深“四纵”高铁已建成通车;石家庄至太原、济南至青岛、郑州至西安至宝鸡、南京至武汉至重庆、杭州至南昌等“四横”部分段落已建成通车,未建成路段大部分在“十三五”期间全部建成。

截至 2014 年 12 月 31 日,全国开通运营城市快速轨道交通线路的城市共计 22 座,运营线路共计 83 条,运营线路总长为 2699.6km,运营车站共计 1770 座;全国开通运营现代有轨电车线路的城市共计 8 座,运营线路共计 13 条,运营线路总长为 180.3km,运营车站共计 202 座。2014 年全国新增开通运营城市快速轨道交通线路的城市 3 座(无锡、宁波、长沙),新增运营线路 9 条,新增运营线路长度 373.6km,新增运营车站 251 座;全国新增开通运营现代有轨电车线路的城市共 3 座(南京、苏州、广州),新增运营线路 5 条,新增运营线路长度 83.7km,新增运营车站 58 座。

2014 年 4 月 3 日,完全自主化的中国北车股份有限公司(简称中国北车)CRH5 型动车组牵引电传动系统通过了中国铁路总公司组织的行业专家评审;10 月 22 日,完全自主化的中国北车 CRH5 型动车组列车网络控制系统(“高铁之脑”)通过中国铁路总公司组织的技术评审,获准批量装车,成为国内首个获准批量装车运行的动车组列车网络控制系统。随后,装载中国北车自主化牵引系统的 CRH5A 型动车组在哈尔滨铁路局开展正线试验;11 月 25 日,装载“中国创造”牵

引电传动系统和网络控制系统的中国北车 CRH5A 型动车组进入“5000 公里正线试验”的最后阶段。这是国内首列实现牵引电传动系统和网络控制系统完全自主创新的高速动车组,标志着中国高铁列车核心技术正实现由“国产化”向“自主化”的转变,中国高铁列车实现由“中国制造”向“中国创造”的跨越,将大力提升中国高铁列车的核心创造能力,夯实中国高铁“走出去”的底气。

我国超过 14 万公里(其中高速铁路、城际快速 2 万多公里)的铁路总运营里程、超过 6000 多公里的城市轨道交通、不断加速的新型城镇化进程和众多经济圈、“走出去”和“一带一路”战略的实施,均使我国轨道交通国内外市场需求迅速扩大。

钢轨作为轨道的主要组成部件,与运营列车的车轮直接接触,为列车车轮的滚动提供连续平顺且阻力最小的环境,故钢轨工作状态的好坏对于城市轨道交通车辆的安全运营及乘坐舒适性至关重要。然而随着城市轨道交通运营年限及客运量的增加,钢轨必然会出现各式各样的伤损。目前,城市轨道交通检测主要通过人工检测或轨检车检测来完成。人工检测是通过弦线、轨道检查仪等对轨道几何形位进行的检测,因此工务人员的劳动强度极大,且效率极低;轨检车检测大多使用一些光学元件、位移传感器、伺服系统等组成轨道几何形位检测系统,自动化程度相对较高,但系统的复杂性使得其易受外界环境干扰且易失效,从而维修量大,同时轨检车的检测周期也较长,不能够实时地发现一些严重的轨道不平顺^[1-4]。因此在城市轨道交通高速发展的现状下,传统的人工检测及轨道检测车按固定周期检测线路的措施已远远无法满足未来轨道运营对安全状态检测的要求。

本书提出的基于运营车辆的轨道病害检测方法,可通过普通列车车载测量实现,大幅降低了检测成本。由于其同时具有相比于轨检车的成本优势及相比于轻型轨道检测小车的高速性,所以能够实现高密度线路上轨道平顺状态的高频率检测,从而能够更及时地为工务部门提供线路状态,了解轨道线路的平顺状态和变化规律及变化程度,为合理安排线路的养护和维修工作,及时做出维修决策具有重大意义,并具有十分可观的经济和社会效益。

1.1 轨道检测概述

1.1.1 轨道不平顺的基本知识

轨道线路的平直区段,钢轨在左右方向和高低方向相对于标准的平直轨道位置产生差异,这种几何参数的差异称为轨道的不平顺。轨道没有车轮载荷作用时的不平顺状态称为静态不平顺;当列车在轨道线路上运行时,列车载荷产生的轮轨作用将会引起轨道不同程度的弹性下沉,此时产生的轨道不平顺称为动态不平顺^[5]。由于轨道不平顺的随机性,列车运行过程中产生的不同程度的振动也是随

机分布的。轨道不平顺是导致列车振动的主要激励源,是影响列车安全运行的重要因素,如果任其长期累积恶化,将会对轨道线路的结构强度和稳定性产生重要影响。

就轨道系统而言,在列车运行过程中,随着时间的积累,列车车轮与轨道直接的相互作用必然导致轨道在几何形态上不断发生变化,这种变化即轨道的几何不平顺。通常来说,按照列车运行过程中轨道不平顺对机车车辆的激励方向不同可将轨道不平顺分为横向不平顺、垂向不平顺和复合不平顺;按照轨道不平顺的波长特征可将轨道不平顺分为短波不平顺、中波不平顺和长波不平顺^[6]。每种类型的轨道不平顺都会影响列车在运行过程中的安全运行、乘客的舒适度。长期的累积不平顺将会严重影响轨道设备的使用寿命,对轨道不平顺检测的实时性和准确性显得非常重要。

1. 按对机车车辆的激励方向分类

按对机车车辆的激励方向,轨道不平顺分为如下几种。

(1) 高低不平顺:沿着列车运行方向由路基或道床的不均匀沉降等造成的垂直方向上的凹凸不平,如图 1.1 所示。由于左右两个钢轨的起伏变化趋势不一定相同,高低不平顺还分为左轨高低不平顺和右轨高低不平顺。

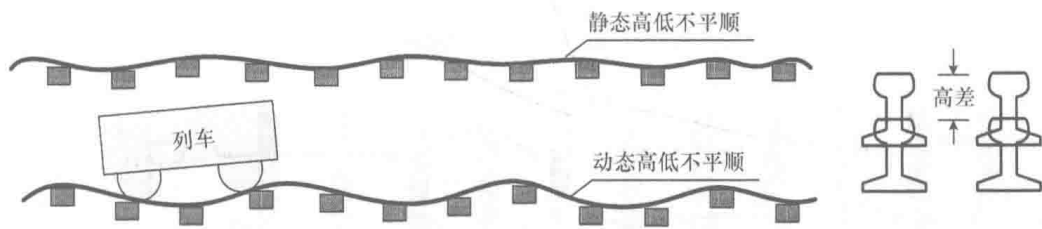


图 1.1 轨道高低不平顺

(2) 水平不平顺:在轨道的同一个截面上由轨道左、右轨的高低起伏不同造成的左、右两轨轨面的高度差。需要指出的是,在弯道时水平不平顺是指左右两轨轨面的高度差减去正常的超高值,而在直线轨道时是指两轨轨面的高度差(图 1.2)。造成水平不平顺的原因主要是左右轨道结构强度不同或左右轨道受力不均匀等。

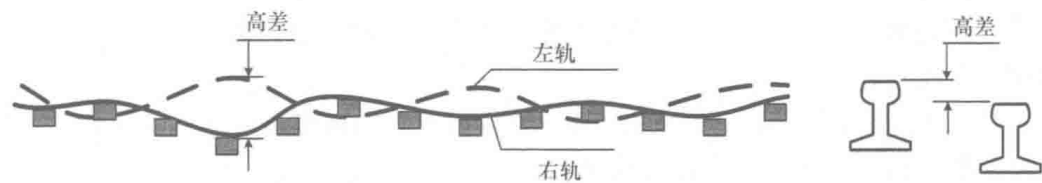


图 1.2 轨道水平不平顺

(3) 扭曲不平顺:左右两钢轨顶面相对于轨道平面的扭曲,又称三角坑(图 1.3)。可以由选定基长的两个水平截面水平不平顺的差值计算得到,轨检车通常采用 2.5m 的基长。本书采用的上海地铁 0117 号列车同一转向架的两轴距也为 2.5m。

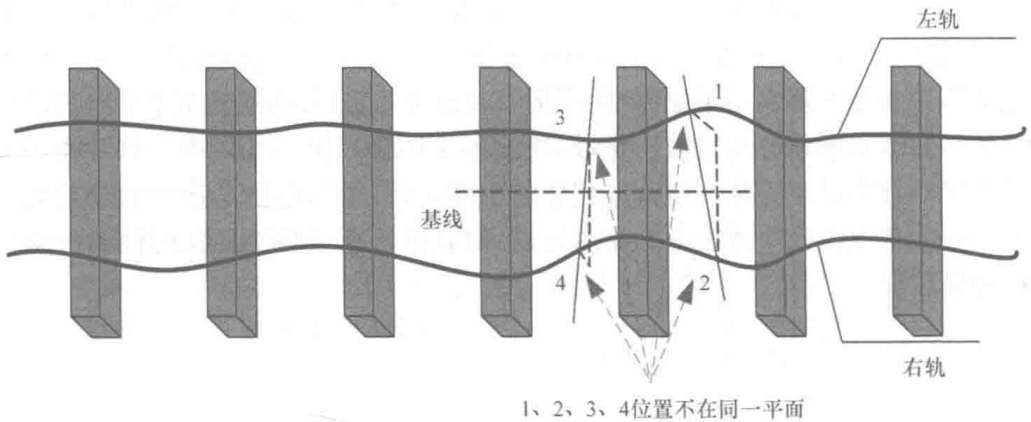


图 1.3 扭曲不平顺

(4) 轨距不平顺:轨道同一截面中,距离钢轨顶面下内侧 16mm 处左、右两钢轨间距与标准轨距(1435mm)的偏差,如图 1.4 所示。

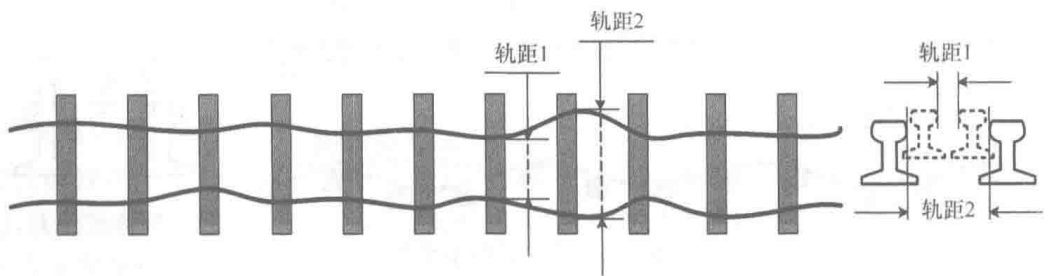


图 1.4 轨距不平顺

(5) 轨向不平顺:轨头内侧沿轨道长度方向的横向凹凸不平顺,即轨道方向不平顺。形成此类不平顺的原因可能是铺轨施工,整道作业的钢轨中心线存在位置偏差,轨排横向变形积累和轨头侧面的不均匀磨耗、扣件失效、轨道横向弹性不一致等。与高低不平顺一样,轨向不平顺也分为左轨轨向不平顺和右轨轨向不平顺,如图 1.5 所示。

(6) 复合不平顺:在一段轨道的某一位置或在影响列车运行性能的范围内,轨道横向和垂向不平顺同时存在的情况。横向不平顺包括轨向不平顺、轨距不平顺;垂向不平顺包括高低不平顺、水平不平顺、扭曲不平顺。通常来讲,列车运行线路的轨道不平顺都表现为复合不平顺类型。

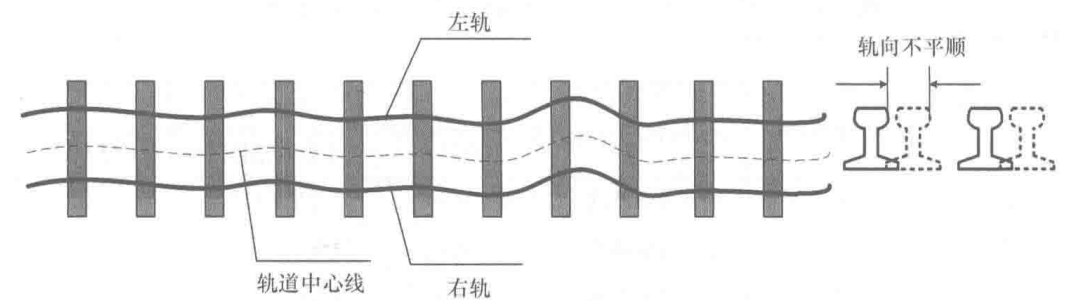


图 1.5 轨向不平顺

2. 按波长特征的轨道不平顺分类

轨道上存在着各种不同波长的不平顺,波长从几厘米到几十米都有,按照波长的长度可分为短波不平顺、中波不平顺、长波不平顺。对按轨道不平顺波长分类的详细描述见表 1.1^[7]。

表 1.1 轨道不平顺波长及特征^[8]

类型	波长范围	特征及成因
短波	数毫米至数十毫米	轨面擦伤、剥离掉块、波纹磨耗、焊缝
	数百毫米	波浪形磨耗
中波	2~3.5m 周期性	钢轨生产过程中形成的周期不平顺
	12.5m 和 25m 周期性	钢轨焊缝处道床沉降
	3~30m 非周期性	高低不平顺、水平不平顺、扭曲不平顺、轨向不平顺、轨距不平顺
长波	30m 以上非周期性	路基、道床不均匀沉降,桥涵两端刚度差异,单跨、多跨不等距桥梁挠曲变形
	30m 以上周期性	多跨等距桥梁挠曲变形,路基因素形成的长波不平顺,桥梁挠度形成的周期性不平顺

3. 轨道不平顺造成的影响

轨道不平顺是列车运行过程中主要的激扰源,也是造成轮轨作用力变大以及机车车辆强烈振动的主要原因,会严重影响列车运行的安全性和乘客的舒适性。另外,轨道不平顺也是导致轨道设备使用周期缩短的主要原因。国外的研究显示,各种不同类型的轨道不平顺对轨道设备都有着直接或间接的影响,同时不同类型的轨道不平顺也会导致不同类别和程度的差异,具体描述见表 1.2 和表 1.3。

表 1.2 按照车辆激扰作用方向划分的轨道不平顺及影响^[7,8]

不平顺种类	影响				
	车辆振动	轮轨力	性质		
			安全性	平稳舒适性	设备
高低	浮沉、点头	垂直力增减载	促进钢轨	垂直加速度大	寿命
水平	侧滚	垂直力增减载	促进钢轨	侧滚加速度大	寿命
扭曲	侧滚	垂直力增减载	引起悬浮脱轨	侧滚加速度大	寿命
轨向	侧摆、摇头	横向力增大	引起爬轨、脱轨	横向加速度大	状态
轨距			引起落下脱轨		
轨向水平复合 (扭曲)	侧摆、侧滚	横向力增大、垂直 力增减载	引起悬浮脱轨、 引起爬轨脱轨	垂直加速度大和 横向加速度大	寿命、状态

表 1.3 按波长划分的轨道不平顺及影响^[9,10]

不平顺种类	波长范围	幅值范围	不平顺种类	主要影响
短波	1~10mm	0.02~1.0mm	轨面擦伤、剥离掉块、 波纹磨耗、焊缝	轮轨作用力、噪声、运营成本 (高速时影响增大)
	10~100mm	0.1~2.0mm	波浪形磨耗、轨间距	
中波	2~3.5m, 周期性	0.1~2.0mm	新轨轨身不平顺	高速车振动舒适性、轮轨动 作用力、噪声、平稳、舒适性、 运营成本(高速时影响大增)
	3~30m, 非周期性	1~40mm	高低、轨向、水平、 扭曲、轨距	
	12.5m、25m 等, 与轨长有关的 周期性	1~30mm	接头、焊缝处道床沉 降形成的周期高低 不平顺	
长波	3~100m	1~60mm	路基道床不均匀沉降、 中跨桥梁挠曲变形等	快速、高速列车振动 舒适性

1.1.2 轨道病害的基本知识

钢轨作为城市轨道交通的重要组成部件,其工作形态是一根在点支撑或连续弹性基础上的无限长梁,主要承受机车轮载作用下的弯曲应力、轮轨接触应力,钢轨轨头与轨腰或轨腰与轨底连接处的局部应力,以及由温度变化引起的温度应力,并且起着引导机车车辆沿规定方向运行、将来自车辆的冲击和荷载传至轨枕及扣件上的作用,故钢轨的强度和安全状态直接影响城市轨道交通车辆运行的安全、平稳。钢轨各部位的受力类型如图 1.6 所示^[11],在承担繁重的运输压力时,钢轨在上述各种应力等作用下会产生各种形式的伤损。钢轨伤损是指钢轨发生裂纹、折

断或其他能够影响和限制钢轨使用性能的各种状态,是轨道交通中一个比较突出的问题。钢轨伤损主要分为两类:一类是内部伤损,另一类是外部伤损。出现在钢轨内部且肉眼看不见的钢轨伤损,即内部伤损,如钢轨头部会出现由残留杂质引起的核伤,这会引起钢轨出现横向裂纹,甚至导致轨头断裂。所谓外部伤损就是伤损在钢轨表面,如轨头压溃、轻微剥落、剥离掉块等。典型的钢轨伤损如图 1.7 所示。

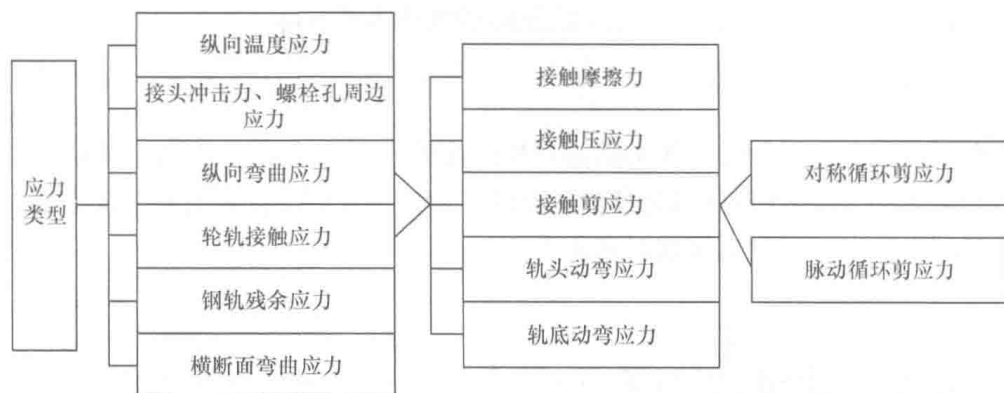
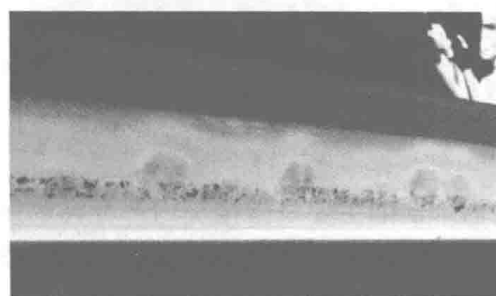
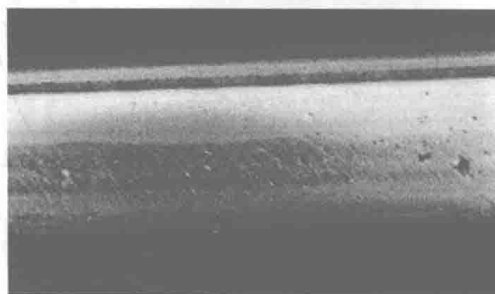


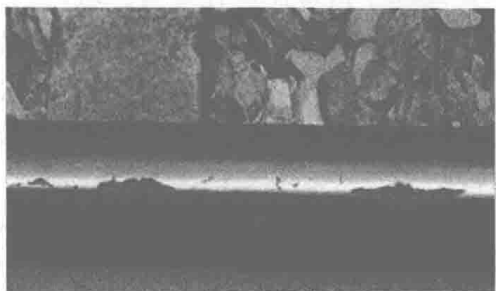
图 1.6 钢轨受力类型



(a) 钢轨塌陷



(b) 轻微剥落



(c) 剥离掉块



(d) 轨头压溃

图 1.7 典型钢轨伤损

高速铁路的常见伤损类型有波浪形磨耗、踏面接触疲劳裂纹、内部裂纹、焊接接头内部缺陷等。

1. 波浪形磨耗

波浪形磨耗是指钢轨轨头踏面沿长度方向出现周期性的不均匀塑性变形和磨耗,使钢轨全长呈现波浪形状的不平顺。波浪磨耗的波谷处有明显塑性变形,使踏面碾宽或出现碾边,轮轨接触光带变宽。波峰处踏面的塑性变形量明显小于波谷,接触光带变窄。波峰、波谷踏面光带的明暗程度也有差异。

2. 踏面接触疲劳裂纹

踏面接触疲劳裂纹是指轨头踏面在轮轨接触应力作用下形成的沿钢轨全长密集分布的表面裂纹,通常又称为鱼鳞状裂纹。裂纹的扩展方向与行车方向有关,用手指顺行车方向探摸剥离裂纹时有刺手感。

3. 内部裂纹

内部裂纹又称核伤,是指钢轨内部的制造缺陷(冶金缺陷、热处理缺陷等)在运行载荷作用下形成和扩展的疲劳裂纹或脆性裂纹。在内部裂纹未扩展到钢轨表面时,钢轨断裂的断口具有金属光泽,一般现场称为“白核”。当内部裂纹扩展到钢轨表面时,由于受氧化腐蚀作用,断口呈暗褐色,现场称为“黑核”。

4. 焊接接头内部缺陷

钢轨焊接接头内部缺陷分为闪光焊接头内部缺陷和铝热焊接头内部缺陷。

(1) 闪光焊接头内部缺陷。闪光焊接头内部缺陷主要是指接头内部存在的灰斑夹杂、疏松缺陷等,这些缺陷都有可能形成裂纹并引起钢轨断裂。灰斑夹杂是指位于焊缝处含有 Si、Mn 等元素的夹杂物。钢轨闪光焊时,对接焊口金属在高温熔化时形成的氧化物或硅酸盐夹杂物未能完全从焊缝中挤掉而留在焊缝区域,就会形成沿熔化线方向分布的不规则形状块状夹杂物。疏松缺陷是指钢轨对接处的局部金属高温熔化成液态金属,在顶锻时没有被挤出焊口,冷却凝固时发生收缩,由于没有液态金属的补充,就会形成收缩孔洞或分散分布的显微缩孔,又称为疏松裂纹。

(2) 铝热焊接头内部缺陷。铝热焊接头内部的伤损主要有因焊接工艺控制不良、焊筋边缘溢流飞边引起的疲劳断裂,焊肉组织异常、疏松、气孔、热裂纹和未焊合等缺陷及引起的疲劳和脆性断裂。

研究表明,钢轨核伤是钢轨各类伤损中出现比例最大的一种伤损形式,也是破坏性最大、最危险的钢轨伤损之一,当其发展到一定程度时,一方面只能通过磨削钢轨表面予以消除,这样既会增加轨道维保成本,又会降低路网能力;另一方面,钢轨横向裂纹(核伤)继续延伸,会直接导致钢轨断裂,甚至造成列车颠覆,这样就会