



列车轮轨位移图像检测 与运行安全评价

马增强 刘永强 宋颖 著



科学出版社

列车轮轨位移图像检测 与运行安全评价

马增强 刘永强 宋颖 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书主要介绍了列车运行安全过程中轮轨状态视频监测方法的原理及应用。全书共分为9章：第1章对列车运行安全监测的国内外研究现状作了介绍，第2章~第6章分别提出了轮轨冲角、摇头角、轮轨位移等轮轨接触状态参数的视频测量方法，并通过实验数据分析验证了各个方法的科学性和有效性。第7章~第9章通过组建机车运行模型对列车运行过程进行了仿真，为列车脱轨系数评判及列车脱轨预测提供了理论依据。

本书可供从事列车行驶安全监测方法研究的高等学校教师、研究生阅读，还可供该领域的其他科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

列车轮轨位移图像检测与运行安全评价/马增强, 刘永强, 宋颖著. —北京: 科学出版社, 2018.1

ISBN 978-7-03-056129-9

I. ①列… II. ①马… ②刘… ③宋… III. ①列车-位移-图像处理-安全评价-研究 IV. ①U270.33-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017) 第 316293 号

责任编辑: 刘信力 / 责任校对: 邹慧卿
责任印制: 张 伟 / 封面设计: 陈 敬

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

*

2018年1月第一版 开本: 720×1000 B5

2018年1月第一次印刷 印张: 8 1/4

字数: 154 000

定价: **58.00 元**

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

我国高速铁路技术发展迅速,实现了人们快捷方便的出行,给人们带来了巨大的方便。但在列车行驶中列车轮轨间作用逐渐变得剧烈,更容易引起轮轨的磨损,疲劳严重时还会出现脱轨事故。机车轮轨间复杂运动是由外界环境、轨道和机车共同作用的结果,到目前为止轮轨接触状态及安全性评价机理一直是各国相关领域专家关注和研究的热点。

本书结合列车安全行驶机理的研究现状,通过分章节的模式对轮轨接触的主要参数如轮轨冲角、摇头角、轮轨位移等,从系统设计、方法原理、处理算法、实验过程、数据分析及结论等方面分别进行了讲解,验证了本书所提出的轮轨接触状态参数视频检测方案的可行性和有效性。另外本书还通过车辆动力学建模与仿真,介绍了作者在基于轮轨位移的列车运行安全状态评价方面的探索。

本书共分为 9 章,第 1 章对列车运行安全监测的国内外研究现状作了介绍,使读者充分了解列车安全行驶监测的重要意义;第 2 章介绍了基于摄像机和激光源相结合的轮轨相对位移检测方法,包括实验原理及实验数据的对比;第 3 章介绍了基于双相机的车载式轮轨位移图像检测方法,主要通过双相机图像检测技术对轮轨位移进行了检测;第 4 章介绍了基于车载式相机的机车摇头角图像检测方法,通过计算机视角的变化结合图形图像学的知识实现了检测;第 5 章主要介绍基于激光线的轮轨冲角检测方法,利用图像处理技术和激光特性实现了轮轨冲角的准确检测;第 6 章介绍了基于双目视觉车轮姿态提取的轮轨位移检测方法,解决了机车运行过程中横向和纵向位移检测困难的问题;第 7 章建立了基于 VI-Rail 软件的车辆动力学模型,通过仿真获取了脱轨系数和轮轨减载率等参数,为列车运行安全评价提供必要的技术支持;第 8 章介绍了基于轮轨间几何位置关系的脱轨状态评价方法,初步形成了基于轮轨位置关系的列车运行安全评价准则;最后第 9 章又给出了列车脱轨系数的新定义,并对列车脱轨预测系数进行了研究和探索。

本书内容大部分来源于课题组近 3 年来在列车运行安全视频监控与评价领域的研究成果,这些成果都是在国家自然科学基金项目(资助号:11372199)和河北省自然科学基金项目(资助号:A2014210142)资助下完成的。研究生钟莎、柳兴龙、王永胜、宋子彬、张俊甲、校美玲、刘俊君、刘政等参与了书稿的整理工作,在此对所有贡献者表示感谢!

本书综合了图像处理、车辆动力学、计算机仿真等多学科知识,由于作者水平有限,本书疏漏之处在所难免,望广大读者批评指正。

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 列车运行安全监测与安全评价的研究背景及意义	1
1.2 列车运行安全监测与安全评价的国内外研究现状	2
1.2.1 列车轮轨相对位移产生的原因	2
1.2.2 列车运行安全监测的国内外研究现状	4
1.3 国内外脱轨研究现状	7
1.3.1 国外脱轨研究现状	7
1.3.2 国内脱轨研究现状	8
参考文献	9
第 2 章 基于激光源的机车轮轨相对横移图像检测	12
2.1 图像采集系统设计	12
2.1.1 图像采集系统	13
2.1.2 图像尺度变换	14
2.2 图像处理及特征提取	15
2.2.1 图像预处理	15
2.2.2 图像二值化分割	15
2.2.3 图像滤波	16
2.2.4 圆拟合	16
2.3 实验数据处理及误差分析	18
2.4 结论	19
参考文献	20
第 3 章 基于改进 Hough 变换的轮轨相对横移图像检测	21
3.1 系统组成和设计原理	21
3.1.1 系统组成	21
3.1.2 设计原理	22
3.2 基于精简粒子群优化的 Hough 变换算法原理与缺陷	23
3.2.1 Hough 变换算法	23
3.2.2 精简粒子群算法	26
3.2.3 基于精简粒子群优化的 Hough 变换算法结构图	28

3.2.4	原算法的局限性	30
3.3	基于粒子群优化的 Hough 变换算法的改进	31
3.3.1	改进算法的原理	31
3.3.2	车轮图像检测结果对比	34
3.4	激光点检测	36
3.5	实验数据处理及误差分析	38
	参考文献	43
第 4 章	基于车载式相机的机车摇头角图像检测	45
4.1	检测系统组成及原理	45
4.2	图像中车轮椭圆提取	49
4.2.1	采集图像预处理	49
4.2.2	基于 RED 算法的车轮椭圆特征检测	51
4.3	实验数据处理及误差分析	53
	参考文献	54
第 5 章	基于激光线检测的轮轨冲角检测	56
5.1	检测方法原理	57
5.2	轨道边缘线的检测算法	58
5.2.1	图像获取及校正	58
5.2.2	Meanshift 聚类平滑算法	59
5.3	激光线的检测	62
5.4	轮轨冲角检测	63
5.4.1	轮轨冲角的模拟仿真	63
5.4.2	手动测量与系统测量对比	65
5.4.3	测量精度分析	66
	参考文献	67
第 6 章	基于双目视觉车轮姿态提取的轮轨位移检测	69
6.1	双目视觉系统模型	70
6.1.1	三维特征点与图像坐标的映射关系	70
6.1.2	两正交相机坐标系的转换关系	71
6.2	轮轨位移检测模型	72
6.2.1	轮轨位移检测步骤	72
6.2.2	轮轨位移检测原理	73
6.3	相机系统的参数标定	74
6.4	车轮边缘的图像检测	76
6.4.1	车轮的内外边缘检测	76

6.4.2	基于改进型随机 Hough 变换的轮缘检测	77
6.5	实验结果分析	78
6.5.1	实验可行性分析	78
6.5.2	位移检测结果分析	80
6.5.3	实验误差分析	82
	参考文献	82
第 7 章	基于 VI-Rail 软件的车辆动力学建模与仿真	84
7.1	VI-Rail 软件简介	84
7.2	CRH2C 动车组拖车模型的建立	84
7.3	轨道模型的建立	91
7.4	轮/轨接触模型的建立	91
7.5	模型的验证	91
7.5.1	预载分析	91
7.5.2	线性分析	92
7.5.3	动力学仿真	93
7.6	非线性临界速度	100
	参考文献	101
第 8 章	基于轮轨间几何位置的脱轨状态评价	102
8.1	轮轨间几何位置关系与脱轨的静态分析	102
8.1.1	以轮轨接触位置的不同状态来分析	102
8.1.2	以车轮抬升量为分析源	103
8.2	基于爬轨的轮轨几何位置关系与脱轨的动态分析	104
8.2.1	轮轨间几何位置关系与脱轨机理的时域分析	104
8.2.2	轮轨间几何位置关系与脱轨机理的参数轨迹变化分析	106
8.3	基于跳轨的轮轨几何位置关系与脱轨的动态分析	109
8.4	轮轨间几何位置关系引为脱轨评判指标的分析	112
8.4.1	轮轨间几何位置关系引为脱轨评判标准的可行性探讨	112
8.4.2	轮轨间几何位置关系假定为脱轨评判标准的确定	116
	参考文献	122

第 1 章 绪 论

1.1 列车运行安全监测与安全评价的研究背景及意义

高速铁路技术的迅速发展给人们的生活带来了巨大的方便。同时，由于机车运行速度的不断增大，以及客运量的增加，导致列车轮轨间的互相作用更加剧烈，容易引发磨损、疲劳和脱轨等故障。轮轨接触状态是轮轨关系最基本的研究内容，而轮轨接触点位置变化是分析轮轨接触状态最直接的反映。所以，监测、分析轮轨接触点的位置对监测车辆运行的稳定性、安全性有着重要作用。

1825 年，英国采用了以机动车牵引车列在轨道上行驶以缩短各个城市之间的距离，来实现货物和旅客运送的目的，这就是铁路史的开始。经过 100 多年的发展，铁路在中国现代化建设中发挥了越来越重要的作用，铁路运输成为我国客货相结合的主导交通运输方式。为了提高铁路在运输市场中的竞争力，扩大运输能力，1997 年 4 月 1 日，中国的铁路运行速度进行了第一次大范围的提速，这标志着中国铁路迅速发展的开始。2002 年 12 月，由于铁路运输能力已经不能适应社会日益增长的运输需求，首次提出“铁路跨越式发展”的战略，以满足社会经济发展的需要。到 2014 年 10 月 26 日，中国高铁总里程已经达到 12 000 km，基本上完成了“四纵”干线。就高速铁路运营里程来说，中国约占世界的 50%，稳居榜首。

我国高速铁路技术发展迅速，它快捷、舒适的特性，给人们的生活带来了巨大的方便，也促进了国民经济的发展。但是，轮轨间的互相作用引发磨损、疲劳和脱轨等故障，给机车运行安全造成巨大的威胁，一旦机车发生脱轨，就会给人们的生命财产带来很大的损失，严重地破坏交通秩序。安全是交通运输业中一个永恒的话题，而脱轨是铁路运输中的一大安全隐患，20 世纪中后期，脱轨事故的不断增多，是由于轮轨的运动机理的发展还不成熟，不能准确地评判列车是否脱轨，影响了列车的安全性；同时，这也阻碍着铁路的向前发展。为了满足发展的要求和保障列车行驶的安全性，一些学者开始深入地研究轮轨运动状态及安全性机理^[1,2]，人们对其的认识也逐渐加深，但是仍然存在一些脱轨事故。机车轮轨间的复杂运动是由外界环境、轨道和机车共同作用的结果，这也决定了轮轨运动状态及安全性机理研究的多样性和复杂性。到目前为止，轮轨运动状态及安全性机理一直是人们讨论和关注的热点，其还有待完善，以用来评价列车运行的安全标准，这对防止、减少列车的故障发生和保障列车运行的安全性具有重要的意义。

在直线段, 货物列车脱轨的主要形式有车轮爬轨、钢轨偏转和车轮浮起, 与之对应的车辆蛇行、点头、浮沉、扭曲和侧滚等车辆走行状态以及轮轨横向、垂向响应, 都与轮轨接触状态^[3,4]有关, 分析轮轨接触状态是研究轮轨运动状态及安全性的基础。而轮轨接触状态最直接的反映就是轮轨接触点位置^[5,6], 因此, 轮轨接触点的位置分析也为轮轨脱轨检测提供重要的信息。在铁路运行中, 监测、分析轮轨接触点的位置对探索脱轨的机理和监测车辆运行的稳定性、安全性有着重要作用。

1.2 列车运行安全监测与安全评价的国内外研究现状

1.2.1 列车轮轨相对位移产生的原因

1. 车轮和钢轨的截面几何形状

作为铁路轨道的主要组成部件, 钢轨主要是用来承受列车车轮的压力, 与车轮相互作用, 引导列车前行。因此, 在整个轮轨结构中, 钢轨必须是一种连续、平顺的且阻力最小的滚动表面类型。以每米长的钢轨质量千克数来定义钢轨的类型。钢轨的断面形状采用具有最佳抗弯性能的工字形断面, 由轨头、轨腰以及轨底三部分组成。机车运行的载重很大, 钢轨必须要能承受其各方面的压力, 因此, 在设计钢轨的结构时, 保证其强度和高度满足一定的要求, 且钢轨的顶部和底部之间高度和面积足够大、中间部分和底部的厚度不宜过薄。图 1-1 为 50 kg/m 的钢轨截面图。

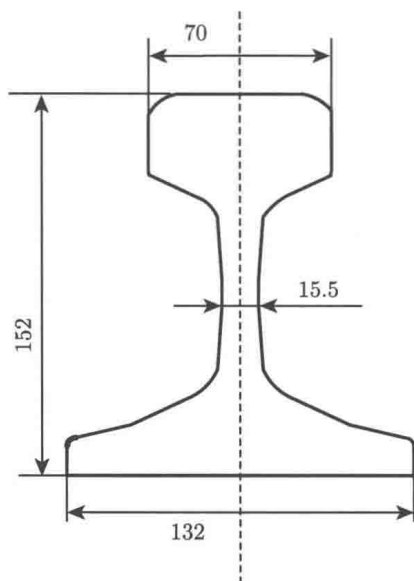


图 1-1 50 kg/m 的钢轨截面图 (单位: mm)

50 kg/m 的钢轨是与 TB 型车轮踏面形状相配合设计使用的, TB 锥型车轮踏面如图 1-2 所示。由图知, 车轮轮缘由四段圆弧组成, 且半径分别为 $R=23\text{ mm}$, $R=16\text{ mm}$, $R=16\text{ mm}$, $R=48\text{ mm}$, 轮缘与左边长 22 mm 的直线之间是用半径为 18 mm 的圆弧连接的, 再往左侧依次是斜度为 1:20 和 1:10 的直线段, 最后用一个小倒角与车轮外侧相连接。在车轮踏面中, 直线与轮缘连接处的一段圆弧因与钢轨侧面的圆角配合, 所以它的中心位置和半径对轮轨之间的状态影响很大, 可能导致轮轨之间两点接触的现象出现。

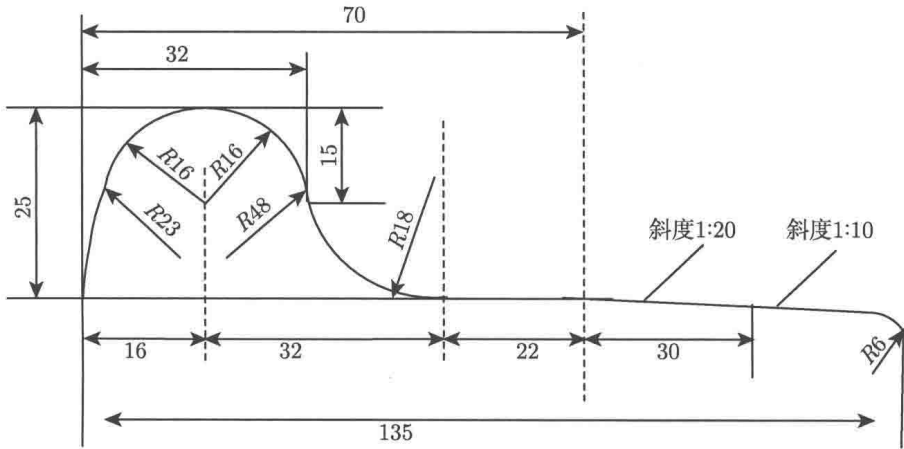


图 1-2 TB 锥型车轮踏面 (单位: mm)

2. 轮轨接触状态分类

轮轨接触状态一般有两种可能, 第一种情况就是如图 1-3(a) 所示的一点接触, 在这种情况下, 车轮相对于轨道的横移不大, 钢轨顶面与车轮踏面只有一点接触; 另一种情况就是如图 1-3(b) 所示的两点接触, 该情况是当车轮相对钢轨的横向位移和摇头角大于某个量时, 可能会导致轮缘和车轮踏面同时与钢轨的侧面和顶面接触, 这样就出现了两点接触。轮轨横向位移和摇头角越大, 其两点接触这种现象出现的可能性就越大。

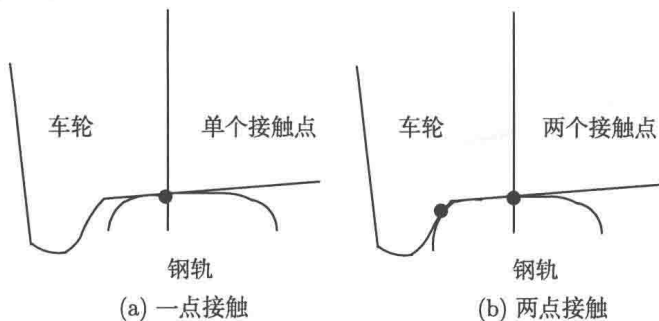


图 1-3 轮轨接触状态

经过研究,在一般情况下,把车轮对轨道的横向位移和摇头角都当作因子进行考虑时,则把轮轨的接触几何关系视为一个空间问题;然而仅仅只考虑横向位移,则是一个平面问题。本章把轮轨接触几何关系当作平面问题来考虑,用图像处理的方法来检测车轮相对于轨道的位移,为后续开展列车运行状态监测及运行安全性机理的探索和研究提供了重要的信息。

3. 轮轨相对位移产生的原因

列车在轨道上运行时,由于踏面锥形产生蛇形运动及在通过曲线线路时,车轮和钢轨间产生横向作用力。轨道机车在高速行驶的过程中,会摇摆产生类似蛇形的运动,而当轨道列车进行蛇形运动时,左右轮缘不断撞击钢轨,这不仅会恶化轨道列车的运行环境,使之运行时不平稳且轮轨之间产生相对位移,严重时,甚至会造成脱轨事故。轨道列车难以提速的主要技术难题,也是由于高速行驶时伴随的蛇形运动^[7]。所以计算出轮轨的相对位移对防止机车脱轨和提高机车速度有着至关重要的作用。

1.2.2 列车运行安全监测的国内外研究现状

1. 基于传感器的列车安全运行监测的研究现状

为了监测列车运行的状态及完善运行安全性机理,传统方法是研究轮轨系统分析计算机车动力学关键性能参数,而动力学关键性参数包括了脱轨安全性和蛇形安全性两大类参数指标。脱轨安全性参数指标包括脱轨系数、轮重减载率、倾覆系数等;蛇行安全性参数指标包括失稳速度、横向稳定性系数等,这些关键参数的测量主要采用基于传感器的测量方法,用以对机车运行状态进行评价和分析。

在基于传感器的测量方法中,美国国家运输试验中心的 Roberto^[8] 使用三维滚动接触理论计算蠕滑力代替 Nadal 公式中的摩擦力,推导了新的脱轨系数安全限值。伊朗学者 Mohammadzadeh Saeed^[9] 认为,轮攻角、摩擦系数、轴重和列车速度是决定列车脱轨的主要因素,并基于可靠性理论建立了脱轨概率模型。韩国的 Koo Jeong Seo^[10] 就基于轮轨间水平和垂直冲击力建立了一种脱轨理论模型,并提出了一套预测和评价轮轨碰撞诱导脱轨的方法。西南交通大学的翟婉明^[11] 根据车轮抬升量评判车辆脱轨,该方法以轮轨之间正常运行的约束关系为依据,回归了车辆-轨道系统接触运行的本质。西南交通大学的曾京^[12] 推导了轮对跳轨的临界速度,给出了速度、垂向力、轮缘高度等不同因素与脱轨状态之间的关系。罗马尼亚的 Sebesan Ioan^[13] 为了研究侧向位移、滚动等列车典型的蛇形运动,在考虑轨道踏面不规则因素的基础上,建立了一种描述蛇形运动的数学模型,提出了失稳临界速度的计算方法。罗仁等^[14] 通过计算单车的最低线性和非线性临界速度,近似得到了直线和大半径曲线轨道上列车的线性和非线性临界速度。邬平波等^[15] 利用

车辆系统蛇行振动的磁滞特性,通过引入速度参数为时间的慢变参数,计算得到了线性临界速度和非线性临界速度以及极限环。翟婉明、王开云等^[16]对车辆在弹性轨道上运行时的非线性稳定性的实际临界速度进行仿真分析研究,得出计算实际临界速度的方法。日本学者 Sato Yasuhiro^[17]设计了一种脱轨系数连续检测装置,该装置通过安装于转向架非旋转结构上的非接触式位移传感器来检测轮轨接触力,从而获得脱轨系数的统计值。西班牙的 Monje Pedro^[18]设计了一套基于光电二极管的仪器装置,该装置安装于机车转向架上,用于在线检测车轮在轨道上滚动和滑动的状态。Quan Yu^[19]基于光纤布光栅多种物理量同时检测的特点,设计了一套基于准分布式光纤布光栅的火车脱轨检测仪器,该仪器通过检测车速、脱轨系数最大值、轮重减载率等参数得出火车脱轨状态的综合评价。唐永康^[20]基于常规的应变片、位移计、加速度传感器,搭建了一种检测车辆脱轨倾向的脱轨预警系统。张昭英等^[21]基于安装于转向架上的六自由度惯性传感器 ADISI16 360 和常规的数据采集板,设计了一套转向架运行姿态在线检测系统,通过测量转向架三维角速度及加速度来进一步得出转向架点头角、横滚角及摇头角。

以上这些检测方法都以轮轨振动状态和轮轨作用力的测量为前提,存在以下问题:(1)轮轨间作用力的动态测量困难,零漂大、抗干扰能力差;(2)各种应变片、加速度等传感器作为“多余的附加物”,影响了轮轨系统固有的动力学特性,多个振动源信号的反射、叠加也增大了动力学性能检测的误差。

为了避免这些缺点,学者们开始转向用图像处理的测量方法来研究轮轨系统及运行安全理论机理。

2. 基于图像处理的机车安全运行监测的研究现状

轮轨的接触状态能直观地反映列车的运行状态,所以人们采用了基于图像处理的测量方法即用摄像机监控轮轨接触位置,然采用数字图像处理技术对每一帧图像进行特征信息的提取。所谓的数字图像处理(Digital Image Processing)技术是通过计算机对图像进行去噪、滤波、特征提取等处理的技术。

在基于图像处理的测量方法中,薛琴等^[22]提出了采用 CCD 方法测量火车轮对的偏心和磨耗,该方法在每一轮对左右两个车轮侧面的上下边缘处分别放置两个摄像头,用模式识别的方法提取出踏面轮廓线,完成偏心和磨耗的计算。肖杰灵等^[23]研制了一套轮轨接触状态可视化检测装置,该装置把两个摄像机安装在钢轨两侧,然后利用图形拼接的方法获得轮轨接触曲线。杨淑芬等^[24]建立了以 DSP(Digital Signal Processing)为核心的轮轨接触点硬件和软件检测系统,通过对轮轨图像进行预处理、边缘检测、形态学处理以及边缘连接得到轮轨边缘的轮廓,最终实现轮轨接触点位置的在线连续测量。

基于图像处理的测量方法的图像检测仪器虽然摆脱了对轮轨力测量的依赖,但

是仍然存在以下问题：(1) 为每个车轮配置单个摄像机的仪器方案存在轮轨接触关系参量测量不全面的问题；(2) 为每个车轮配置两个摄像机的仪器方案存在安装困难、图像拼接导致检测误差大等问题；(3) 仪器功能仅限于轮轨动态接触几何参数的检测，以判断列车的运行状态。

在轮轨接触相互作用的过程中，轮轨接触点的位置测量是一个空间问题，在准静力学和动力学仿真分析过程中，都有一定的复杂性。但是，机车在运行过程中，由于摇头角的摆动幅度比较小，因此增加了该角度测量的难度，然而从另一方面考虑，该摇头角一般较小，对轮轨接触几何关系的影响很小^[25]，因此可以把空间问题当一个平面问题来解决。

轮轨内外两侧的图像特征识别如图 1-4 所示，由于摄像机很难拍摄到轮轨接触点位置，但接触点位置的变化能导致机车车轮相对轨道发生偏移。因此，在考虑现有的实验条件情况下，本课题在研究过程中，一开始采用了基于摄像机和激光源相结合的轮轨相对横移检测方法，经过更深一步研究，提出了基于摄像机垂直拍摄的轮轨相对位移检测方法，实现了相对位移的测量，为以后研究分析其参数来监测列车的运行状态及评价其安全性能，开展监测列车运行的状态及运行安全性机理的探索和研究奠定了基础。

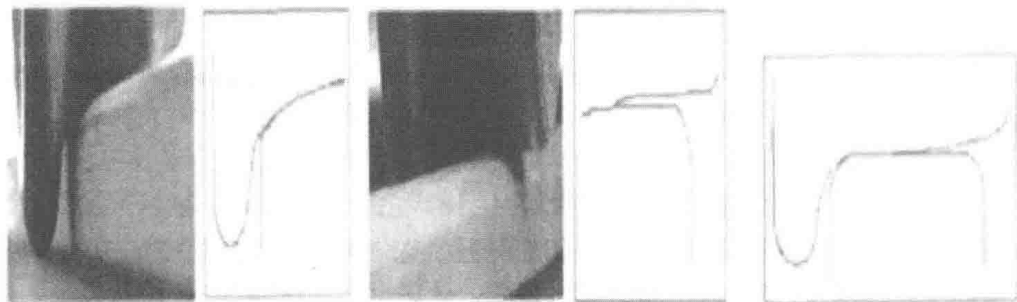


图 1-4 轮轨内外两侧的图像特征识别

基于摄像机和激光源相结合的轮轨相对横移检测方法，即将摄像机和激光源分别安装在转向架上并使其位于车厢底部，当发生横移时，可以利用激光点在轨道侧面的位移来反映轮轨的相对横向位移。基于摄像机垂直拍摄的轮轨相对位移检测方法，是将相机垂直安装在转向架上，利用相机相对于转向架保持相对静止的特点，通过轨道在图像中的横坐标变化来测量轮轨的相对横向位移；同时把激光源也安装在转向架上并与地面保持一定的倾角，使激光照到轨道上，利用激光点在轨道图像中的纵坐标变化来测量轮轨的相对垂直位移。

1.3 国内外脱轨研究现状

脱轨是指车轮离开轨道不能正常运行,对脱轨类型进行合理划分是准确进行脱轨研究的前提,经常见到的是爬轨脱轨,它发生在列车低速曲线运行情况下,而列车高速运行中轮轨产生很大的碰撞作用,会使车轮与钢轨侧面形成冲击作用并跃起造成跳轨脱轨,爬轨脱轨和跳轨脱轨是本章中要考虑的脱轨现象。

在我国,高速铁路发展迅速,铁路网密集,人们出行很方便,但是一旦发生脱轨事故就会造成巨大的损失,如何预防脱轨和有效地监督列车安全行驶显得尤为重要,目前各国都根据本国国情制定了一些策略。

本章用 VI-Rail 软件先建立整车模型,然后进行仿真分析。通过轮轨接触几何参数与脱轨安全性、平稳性、稳定性的联系来分析列车脱轨。

1.3.1 国外脱轨研究现状

19 世纪末,国外开始对脱轨问题进行研究,1896 年,Nadal 在做车轮爬轨试验时,通过静平衡分析得到了现在好多国家在用的与轮轨横向力、垂向力两者有关的计算公式 Q/P ^[26],这一公式,后来被称为脱轨系数,并逐渐地被各国所使用,但是它有一定的局限性。

归纳起来,Nadal 准则的局限性主要表现在以下方面:

- (1) 该标准仅考虑了脱轨侧车轮的运动状态,不考虑非轮缘接触侧摩擦系数对轮缘接触侧的影响;
- (2) 该准则的前提是爬轨车轮一直保持上升状态,但是在大多数情况下,实际有效摩擦系数较名义摩擦系数小,甚至为负,这样容易产生误判;
- (3) 脱轨的过程是持续的,然而该标准将脱轨看成是一个瞬时的时间点,不符合实际情况;
- (4) 通过实验研究表明,当小冲角存在时脱轨系数评价结果是不对的。

自从 Nadal 公式出现以来,世界各国都在采用它,后来有很多国家相继做过很多试验,试验发现,有时即使脱轨系数已经超过安全限值很多,但是列车仍可以平稳地行驶在轨道上,可见这种评价脱轨的标准很局限很保守,这就使得在脱轨研究方面还有很大的安全余量,后来好多国家的学者进行过研究,逐步完善了脱轨系数评价标准。

1984 年,美国国家运输试验中心的 Weinstock 博士研究了整个轴两个车轮的脱轨,他综合考虑轮缘两侧(即轮缘贴靠侧和非贴靠侧)的横向力和垂向力的比值,并把此作为一种评价标准,提出一根轴上两个车轮的脱轨系数的相加值不大于 Nadal 脱轨评价标准与轮轨间摩擦系数的相加值^[27]。

除了用脱轨系数来作为评价指标之外,现在好多国家还用到轮重减载率,然而关于动态轮重减载率的限值目前还没有足够的理论依据,只能参考实验线上的脱轨实验结果。

TTCI(美国运输技术中心公司)在 2000 年时提出了一项爬轨准则,该标准是首次将冲角明确包含在内的爬轨准则,实验和仿真结果均表明:脱轨的距离限值是冲角的函数。但是该准则局限于特定的车辆和轨道润滑状态,为了提高其对加装不同车轮的车辆进行脱轨安全评价时的通用性,TTCI 目前正致力于进一步完善其关于爬轨 Q/P 限值及车辆走行距离限值的研究成果^[28]。

20 世纪 70、80 年代间,Princeton 大学的 Sweet 教授和 Karmel 博士对关于直线上的脱轨现象做了很详细的研究,并且在试验研究方面使用了 1:5 单轮对模型,他们不仅建立了 2 自由度和 3 自由度的动态轮对模型,并且分析了非线性蠕滑现象,但是还有一些没考虑进去的因素。

20 世纪中叶,日本铁道部门在机车稳定行驶安全方面及脱轨机理理论方面做了大量的研究,并根据本国实际情况制定了一些安全策略^[29]。

1947 年 7 月,日本著名车辆专家松平精在研究日本 D51 蒸汽机车脱轨事故时发现了列车蛇行失稳后会造脱轨现象,并且认为失稳主要是由于车辆振动作用造成的,后来他用模型进行了验证。

1965 年,日本车辆专家 Keiji Yokose 用模型验证了单轮对脱轨问题^[30],应用滚动蠕滑理论以及实验结果分析提出了包含冲角在内的脱轨评价标准。

目前世界上研究脱轨的学者越来越多,但是很难找到一种标准来代替 Nadal 准则。脱轨不只是静态脱轨^[31],还要考虑动态情况下列车的脱轨情况,导致脱轨问题变得更加复杂,本章打算用轮轨接触几何参数和列车动力学性能相结合的方法来探究。

1.3.2 国内脱轨研究现状

1978 年,中国开始改革开放,经济才开始与世界接轨。在这之前国内的各方面都发展很慢,工业技术也很落后。由于工业的落后,国内对脱轨安全性的研究很晚才起步,直到 20 世纪 70 年代,杨国侦才开始进行研究,他把三种新转向架的脱轨事故和后面做过的脱轨试验连接起来,对低速下的列车脱轨情况进行了探讨。

20 世纪 80 年代初,郭荣生^[32]研究了轮对的导向能力,其定性分析认为,轮对在曲线上时的导向能力如果不大于钢轨的导向能力,那么会有列车脱轨的危险。另外,对车轮的导向能力有重要影响的几个因素是轮缘的接触角、轮轨的接触摩擦系数和轮重减载率等。

20 世纪 80 年代中期,李富达根据小曲线上的大量事故和脱轨试验,定性地分析了影响列车脱轨的各方面的因素,并且在研究中还考虑到冲角对脱轨系数的影响。

20 世纪 90 年代, 国内的车辆动力学方面研究才开始迅速发展起来, 此时的国内学者开始建立带自由度的单轮对或整节车辆的模型, 并用模型进行了仿真分析, 模拟出车辆脱轨的过程。

20 世纪 90 年代末, 薛弼一应用 1:1 单轮对脱轨试验装置在西南交通大学牵引动力国家重点实验室振动试验台上做了不同因素的脱轨试验^[33]。并且应用蠕滑理论知识分析轮轨接触临界状态时蠕滑力的变化情况^[34], 提出了关于蠕滑方面的脱轨系数和轮重减载率计算公式。

近年来, 国内一些高校和科研机构也开始关注列车脱轨情况, 进行了一些试验, 在脱轨研究方面取得了不错的进展。

西南交通大学的翟婉明教授, 通过分析大量的国内外脱轨研究试验和研究数据, 指出了传统脱轨评价指标的不足。他运用车辆-轨道耦合动力学理论, 对单个轮对进行研究, 还对爬轨脱轨和瞬时跳轨情况进行了仿真, 得出了车轮超限时间和车轮抬升高度之间的联系, 最后提出最大允许的安全超限时间为 35 ms。

中南大学的曾庆元院士的脱轨研究课题组从 20 世纪末就开始对列车脱轨理论进行大量的研究, 提出了一种列车脱轨能量分析理论。曾院士运用列车的自激特性和反馈理论等理论知识论证了横向失稳会造成列车脱轨现象发生^[35,36]。

车辆脱轨至今仍是难以解决的问题, 在脱轨试验中, 有时即使运行车辆大大超过现有评价标准, 也未发生脱轨事故。近年来国内外铁路学者对脱轨进行了大量的研究, 然而直到现在对脱轨机理的认识仍很模糊。

参 考 文 献

- [1] 肖新标. 复杂环境状态下高速列车脱轨机理研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2013.
- [2] 李呈祥. 高速列车运行横移及侧滚姿态主动控制研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
- [3] 钟浩. 基于改善轮轨接触状态的重载车轮型面优化 [D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
- [4] 魏云鹏, 吴亚平, 段志东, 等. 列车蛇形运动状态下轮轨接触特性分析 [J]. 铁道标准设计, 2015, 3: 37-40.
- [5] 程力. 基于轮轨表达式的轮轨接触坐标计算方法 [J]. 兰州工业学院学报, 2015, 2: 19-22.
- [6] 干锋, 戴焕云. 基于空间矢量映射的新型轮轨接触点算法 [J]. 机械工程学报, 2015, 10: 119-128.
- [7] 向俊. 列车脱轨机理与脱轨分析理论研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2006.
- [8] Barbosa R S. A 3D contact force safety criterion for flange climb derailment of a railway wheel[J]. Vehicle System Dynamics, 2004, 42(5): 289-300.
- [9] Saeed M, Soodabeh G. Estimation of train derailment probability using rail profile alterations[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2012, 8(11): 1034-1053.
- [10] Koo J S, Choi S Y. Theoretical development of a simplified wheelset model to evaluate

- collision-induced derailments of rolling stock [J]. *Journal of Sound & Vibration*, 2012, 331(13): 3172-3198.
- [11] 翟婉明, 陈果. 根据车轮抬升量评判车辆脱轨的方法与准则 [J]. *铁道学报*, 2001, 23(2): 17-26.
- [12] 曾京, 胡松. 轮轨摩擦碰撞及脱轨研究 [J]. *振动工程学报*, 2001, 14(1): 1-6.
- [13] Ioan S, Dan B. Mathematical model for the study of the lateral oscillations of the railway vehicle [J]. *UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering*, 2012, 74(2): 51-56.
- [14] 罗仁, 曾京. 列车系统蛇行运动稳定性分析及其与单车模型比较 [J]. 2008, 44(4): 184-188.
- [15] 高学军, 李映辉, 高庆. 高速客车蛇行运动稳定性与分岔研究 [J]. *动力学与控制学报*, 2008, 6(3): 202-207.
- [16] 王开云, 翟婉明, 蔡成标. 车辆在弹性轨道结构上的横向稳定性分析 [J]. *铁道车辆*, 2001, (7): 1-4.
- [17] Sato Y, Kurihara J, Mizuno M, et al. Development of continuous measurement method for rail-wheel contact forces by in-service trains [J]. *Japanese Railway Engineering*. 2012, (175): 5-8.
- [18] Monje P, Aranguren G, Martine Z B, et al. Using bogie-mounted sensors to measure wheel rolling and sliding on railway tracks [D]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 2012, 226(4): 371-380.
- [19] Quan Y, He D W, Wang T, et al. Detecting the possibility of train derailment based on FBG sensor system [J]. *Proceedings of SPIE, The International Society for Optical Engineering*. 2011, 8191(24).
- [20] 唐永康. 空载货运列车脱轨检测系统的研制 [J]. *工业控制计算机*, 2012, 25(8): 52-53.
- [21] 张昭英, 陈建政. 列车转向架运行姿态检测系统的研究 [J]. *中国测试*, 2012, 05: 59-61.
- [22] 薛琴, 陈玮. 双 CCD 轮对图像测量系统研究 [J]. *微计算机信息*, 2007, 23(19): 164-166.
- [23] 肖杰灵, 刘学毅, 张渝. 轮轨接触几何状态检测装置 [J]. *中国铁道科学*, 2008, 29(4): 141-144.
- [24] 杨淑芬. 轮轨接触点位置图像检测方法研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2009.
- [25] 金学松, 沈志云. 轮轨滚动接触力学的发展 [J]. *力学进展*, 2001, 31(1): 33-46.
- [26] Nadal M J. Theorie de la stabilite des locomotives. Part2: movement de lacet [J]. *Annla Mines*, 1896(10): 232-255.
- [27] Weinstock H. Wheel climb derailment criteria for evaluation of rail vehicle safety [C]. *Proceedings of the ASME Winter Annual Meeting*, 1984: 1-7.
- [28] Shust W C, Thompson R, Elkins J. Controlled wheel climb derailment tests using a force measuring wheelset and AAR's track loading vehicle [C]. *Proceedings of 12th International Wheelset Congress*, 1998: 5-15.