



“十二五”国家重点图书出版规划项目

机车车辆动力学

姚建伟 主编 / 孙丽霞 副主编



科学出版社

“十二五”国家重点图书出版规划项目
轨道交通科技攻关学术著作系列

机车车辆动力学

姚建伟 主 编
孙丽霞 副主编

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书紧紧围绕机车车辆动力学的关键知识和学科研究热点进行深入浅出的阐述,在内容编排上充分考虑知识结构的完整性和系统性。第一章介绍机车车辆动力学模型建立、求解及分析时的基础理论和方法;第二章阐述经典的轮轨滚动接触理论及其适用范围,并针对目前轮轨三维弹塑性滚动接触理论亟待解决的问题,描述了新的求解思路和方法,此外,还针对轮轨滚动接触疲劳及磨损问题提出摩擦综合管理的方法;第三章结合工程实例介绍机车车辆垂向动力学性能分析和评价方法;第四章系统介绍机车车辆横向运行稳定性分析方法,基于非线性的混沌和分岔理论,论述高速列车蛇行运动的极限环分岔形式,从理论分析与工程实践应用相结合的角度,探讨高速列车横向运行稳定性新的评价方法;第五章围绕机车车辆的稳态及瞬态曲线通过能力进行分析和评价方法的介绍,并介绍径向转向架和独立车轮转向架在提高机车车辆曲线通过能力时的优势;第六章从理论分析、仿真计算和试验研究的角度论述机车车辆脱轨安全性的最新研究成果;第七章论述机车车辆动力学试验技术,为设计、生产与试验工程技术人员提供可供借鉴的技术资料;第八章对国内外机车车辆动力学领域的最新研究动态进行综述和展望。

本书特别注重理论性、学术性和工程实用性,既可作为载运工具运用工程及车辆工程专业的研究生教学用书,也可作为机车车辆动力学科研及工程技术人员参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

机车车辆动力学/姚建伟主编. —北京:科学出版社,2014.7
(轨道交通科技攻关学术著作系列)
ISBN 978-7-03-041409-0

I. ①机… II. ①姚… III. ①机车-车辆动力学 IV. ①U260.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 155585 号

责任编辑:刘宝莉 张 宇 / 责任校对:李 影
责任印制:肖 兴 / 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>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014 年 7 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2014 年 7 月第一次印刷 印张:27 3/4

字数:539 000

定价:108.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



“轨道交通科技攻关学术著作系列”编委会

主任委员:康 熊

副主任委员:聂阿新 董守清 赵有明 叶阳升

委 员:王 澜 罗庆中 孙剑方 黄 强 王悦明

韩自力 江 成 柯在田 刘虎兴 杨志杰

段 武 熊永钧 杜旭升 李学峰 周清跃

史天运 王富章 朱建生 阮志刚 李耀增

朱少彤 傅青喜 常 山 贾光智 黎国清

王卫东 王俊彪 姚建伟 刘 越 周虹伟

孙 宁 刘国楠

“轨道交通科技攻关学术著作系列”序

“涓涓溪流，汇聚成河”，无数科技工作者不辍的耕耘，似在时刻诠释着这一亘古不变理念的真谛，成就着人类知识财富源远流长的传承与积累。

回溯新中国成立后中国铁路发展历程，特别是我国铁路高速、重载、既有线提速、高原铁路建设等一系列令世人瞩目的辉煌成就，无不映衬着“铁科人”励志跋涉的身影，凝聚了“铁科人”滴滴汗水与智慧结晶。历经六十多年的发展，中国铁道科学研究院充分发挥专家业务水平高、能力强，技术人才队伍集中，专业配套齐全，技术手段先进等综合资源优势，既历史性地开创了我国高速铁路联调联试、综合试验技术、无砟轨道技术，完成了重载运输、既有线提速和高原铁路等关键技术与试验，实现了互联网售票、运营调度、应急管理，以及高速动车组牵引、制动系统及网络控制系统等大批技术创新和成果转化，又在铁道行业重大技术决策信息支持、基础设施检测、产品认证、专业技术培训等技术服务领域发挥了重要作用，成为集科研、开发、生产、咨询、人才培养与培训等业务为一体的轨道交通高新技术企业，是全路当之无愧的科研、试验、信息、标准制修订的研发中心。业已完成的大量重大、关键技术攻关与试验研究，积淀了厚重的专业基础理论，取得了 2300 多项科研成果。其中，有 170 多项获国家科技奖，600 多项获省、部级科技奖。

此时，由中国铁道科学研究院（以下简称“我院”）统筹组织科研人员，深入系统梳理总结优质科研成果，编著专业技术专著形成系列丛书，既是驱动我院科研人员自我深入总结，不断追求提高个人学术修养的发展动力，也是传承我院多年科研积累的知识结晶，有效夯实提升人才培养与培训内在品质的重要举措，更是打造我院核心竞争力，努力建设铁路科技创新研发中心并做大做强，彰显责任与担当的真实写照。

本套专业技术系列丛书作为“十二五”国家重点图书出版规划项目，充分反映了我院在推动轨道交通领域技术进步与学科发展中取得的基础理论研究和最新技术应用成果，内容囊括铁路运输组织、机车车辆及动车组技术、工务工程、材料应用、节能环保、检测与信息技术、标准化与计量，以及城轨交通等专业技术发展。丛

书在院编委会的指导下,尊重个人学术观点,鼓励支持有为的“铁科人”将科技才华呈现于行业科技之巅,并为致力于轨道交通现代化发展的追“梦”者们,汇聚知识的涓流、铸就成长的阶梯。

中国铁道科学研究院常务副院长

丛书编委会主任



2013年12月

序

在中国铁路现代化发展的重要时期,机车车辆动力学基础理论的研究及创新,无疑对铁路技术进步起到积极的推动作用,也可以为机车车辆的设计和试验提供有力的技术支撑。对机车车辆运行品质及速度要求的不断提高,客观上促使机车车辆动力学不断创新发展,这本《机车车辆动力学》正是为了适应现阶段我国铁路大规模发展对机车车辆动力学理论和技术创新的迫切需求而编写的。该书将机车车辆动力学领域理论与实践的新成果融合到经典理论的阐述中,站在工程实际应用的角度追溯基础理论,以新的视角丰富和发展了机车车辆动力学的理论知识。

机车车辆动力学是分析和研究机车车辆动力学性能、改善和提高机车车辆运行品质、保证运行安全的一门力学专业与载运工具运用工程专业相结合的学科。我国每一次铁路提速、高速、重载等攻关试验,都特别注重机车车辆动力学性能的测试和评估。20世纪70年代末开始逐步建立起机车车辆动力学理论体系框架,随着铁路高速重载化进程的加快,诸如轮轨黏着、轮轨磨耗、车辆运行安全性和舒适性与行车速度的矛盾等问题亟待进一步解决和优化。该书以此为契机,针对机车车辆的轮轨相互作用、车辆横向运行稳定性、脱轨安全性、运行平稳性等关键动力学性能的分析、评价方法、评价指标等进行了新的思考和讨论,是铁道科学研究人员在实践中不断寻求理论和技术创新的集中体现。

该书作者在中国铁道科学研究院长期从事重大综合性科研项目工作,系统开展了机车车辆动力学理论与试验研究,具备深厚的理论功底和丰富的实践经验。通过梳理在机车车辆动力学研究生教学过程中取得的学术收获和总结在科研实践过程中积累的经验,在综述和提升国内外学者学科专业知识的基础上形成了该书。书中系统论述了机车车辆动力学的理论架构、理论模型、分析思路、仿真计算、试验设计、试验方法等,深入浅出地阐述了分析力学、混沌、分岔、元胞自动机、神经网络、遗传算法等理论与传统的机车车辆动力学相互碰撞与融合所产生的新思想和新技术。书中围绕机车车辆非线性动力学理论、轮轨滚动接触理论、机车车辆横向运行稳定性、机车车辆脱轨安全性、机车车辆试验技术、机车车辆曲线通过等多个国际上普遍关心的热点问题展开论述,构建了比较完备的机车车辆动力学基础理论体系,是我国铁路机车车辆动力学学科具有重要理论深度和工程应用实际意义的一本专著,对于进一步发展我国铁路机车车辆技术具有较高的参考价值。

该书不仅可以为我国机车车辆动力学学科建设提供浓郁的学术氛围和坚实的

理论基础,而且还可以以新的视角引导读者对机车车辆系统动力学的热点和难点问题探索,也为读者打开了一扇追求学术进步、积极思考、不断完善的大门。机车车辆动力学的发展,需要广大科研工作者站在世界铁路发展的理论和实践前沿,从中国铁路实际出发,为铁路的蓬勃发展提供更有科学价值的理论和技术支撑。机车车辆动力学是一门不断更新和发展的学科,已有的理论框架的正确性及完整性,还有待于铁路科技工作者投入大量的智慧和坚持不懈的努力去求证和完善。



2013年12月

前 言

当代科学技术飞速发展,呈现出知识爆炸的现象,一方面,诸如混沌、分岔、分形等非线性理论与传统的机车车辆动力学分析方法不断进行着新旧知识的融合,为机车车辆动力学分析手段注入新的血液;另一方面,在铁路向高速和重载方向发展的背景下,对机车车辆具备更优的动力学性能提出许多新的设计要求,从而引发一系列新的研究课题。随着人们对机车车辆动力学问题的认识逐渐加深,诸如神经网络、遗传算法、元胞自动机等智能计算理论也已经被用来解决机车车辆动力学领域的新问题,这些均促使新的研究方法和手段渗透到机车车辆动力学专业领域。

鉴于机车车辆动力学领域蓬勃发展的趋势,本书在继承机车车辆系统动力学已有著作的基础上,将机车车辆动力学领域的最新科研和试验成果纳入本书部分章节内容之中。本书注重将基本理论、分析方法、仿真计算实例和工程实际应用相结合,吸收和借鉴了国内外机车车辆动力学理论和实践的最新成果,内容紧扣学科前沿。本着对经典理论继承和发展的思想,本书在内容安排上既注重知识结构的完整性和系统性,又不局限于机车车辆动力学领域的传统议题,而是以新的视角以期引导读者对机车车辆系统动力学的热点和难点问题思考。

为了循序渐进地引导读者建立对机车车辆动力学体系的认识,本书第一章对机车车辆动力学的基本理论、建模方法、求解方法和分析手段进行了介绍,并引入了与机车车辆动力学相关的非线性动力学理论。作为对经典理论的继承,第三章和第五章分别围绕车辆的垂向动力学问题和曲线通过问题进行了介绍。第二章、第四章、第六章、第七章、第八章是本书比较有特色的章节,重点对轮轨滚动接触理论、机车车辆横向运行稳定性、机车车辆脱轨安全性、机车车辆试验技术、机车车辆动力学新发展进行了阐述。

轮轨相互作用问题作为机车车辆技术研究的重要环节,具有多重非线性的特点,一直是国际上机车车辆领域最活跃的议题之一,对于轮轨相互作用系统亟待解决的非稳态滚动接触问题、接触表面微观粗糙度、摩擦温度、接触表面“第三介质”等问题,近年来从微观及参变量变分原理的角度涌现出了一些新的研究手段及数值计算方法。本书第二章给出了考虑轮轨非线性几何关系及非线性接触力的机车车辆动力学求解思路;阐述了经典的轮轨滚动接触理论及其适用范围,并介绍了轮轨三维接触几何、轮轨法向接触问题、轮轨三维弹塑性滚动接触问题新的求解方法和思路。此外,还针对轮轨滚动接触疲劳及磨损问题提出进行摩擦综合管理的思

路和方法。

机车车辆的横向运行稳定性和脱轨安全性是国际上普遍关心的热点问题,是铁路研究学者常议常新的重大研究课题。目前高速列车横向运行稳定性问题的研究已发展到考虑高度非线性因素的混沌领域,本书第四章基于非线性混沌和分岔理论,论述了高速列车蛇行运动的极限环分岔形式,并将理论分析与工程实际应用相结合,探讨了高速列车横向运行稳定性新的评价方法。随着列车速度的不断提高,传统脱轨安全性评价方法的局限性日渐凸显。关于脱轨安全性的研究,目前已从传统的准静态分析方法发展到考虑轮轨瞬态作用力的动态分析方法。本书第六章将机车车辆的脱轨安全性作为分析对象,从仿真分析、实验室试验、线路试验的角度讨论了机车车辆准静态爬轨、动态跳轨及蛇行脱轨的过程和机理,并介绍了经典及最新的脱轨安全性评价方法,以期使读者能对脱轨安全性得到全面系统的认识。

试验技术是进行机车车辆动力学性能测试的重要且不可替代的研究手段。随着我国高速铁路综合试验的开展,新的试验手段和测试设备被应用到机车车辆动力学试验中,从而引发了机车车辆动力学试验技术的变革。本书第七章从机车车辆动力学试验方案设计入手,介绍了近几年来进行动力学试验的测试内容、测试方法、测试设备布置、数据采集、数据分析、试验结果评价等一系列流程,内容紧扣最新试验技术和国际评价标准。

机车车辆动力学是一门不断更新完善的学科。本书第八章围绕国际学术会议上机车车辆动力学领域的最新研究动态进行了综述和展望,重点介绍了刚柔耦合系统动力学、机车车辆主动控制技术、机车车辆故障监测及诊断技术、高速列车耦合大系统动力学研究体系、机车车辆动力学优化技术等。

本书力求深入浅出地引导读者在了解国内外最新研究进展的基础上,对机车车辆动力学领域新的发展方向 and 今后需要深入研究的内容进行思考。

本书由中国铁道科学研究院姚建伟主编,孙丽霞任副主编,姚建伟、孙丽霞、张可新、侯福国、赵鑫编著,康熊、刘金朝主审,参加部分章节编写及文稿编排工作的人员还有许聪、刘春雨、梁倩、王立乾、赵泽平、胡川、张亚楠、彭博等。

编写本书过程中引用、吸收和借鉴了大量国内外相关文献和书籍,凝结了国内外机车车辆动力学研究学者的智慧和成果,在此谨向这些文献和书籍的作者表示深深的感谢。同时感谢中国铁道科学研究院的康熊、刘金朝、王澜、王俊彪、刘越、周虹伟、周岩等在本书编写过程中给予的大力支持和帮助。

限于编者水平,书中难免存在疏漏之处,敬请读者与专家批评指正。

作者

2013年11月

目 录

“轨道交通科技攻关学术著作系列”序

序

前言

第一章 机车车辆动力学基本理论和方法	1
1.1 机车车辆动力学研究对象	1
1.1.1 机车车辆的基本特点及组成	1
1.1.2 轨道线路的基本特点及轨道不平顺	4
1.2 机车车辆动力学分析思路及流程	9
1.3 机车车辆多刚体动力学模型建立方法	10
1.3.1 多刚体动力学基础知识	11
1.3.2 牛顿-欧拉法	14
1.3.3 达朗贝尔原理	16
1.3.4 虚功原理及动能和势能	16
1.3.5 拉格朗日分析力学	20
1.3.6 哈密顿正则方程	22
1.4 机车车辆动力学求解方法	24
1.4.1 凯恩方法	24
1.4.2 振型叠加法	27
1.4.3 直接积分法	29
1.4.4 辛数学方法	36
1.5 理论模型的系统分析方法	41
1.5.1 阻尼对振动衰减的影响	41
1.5.2 幅频特性分析	43
1.5.3 频谱分析	47
1.6 机车车辆非线性动力学相关理论	53
1.6.1 非线性动力学的几个历史性突破	53
1.6.2 非线性振动与分岔理论	57
1.6.3 混沌	59
参考文献	63

第二章 轮轨滚动接触理论	64
2.1 轮轨滚动接触理论体系和架构	64
2.2 轮轨接触几何关系	66
2.2.1 轮轨基本特征及轮轨接触参数	66
2.2.2 轮轨接触几何求解方法	75
2.2.3 轮轨三维接触几何求解方法	78
2.3 轮轨蠕滑理论	92
2.3.1 黏着及蠕滑现象	93
2.3.2 蠕滑率的求解	95
2.4 轮轨法向接触理论	96
2.4.1 Hertz 接触理论的适用条件	97
2.4.2 椭圆接触斑的确定	98
2.4.3 Hertz 接触条件下的法向力计算	99
2.4.4 non-Hertz 接触条件下的法向力计算	102
2.5 轮轨滚动接触经典理论	106
2.5.1 轮轨滚动接触理论发展历程	106
2.5.2 Kalker 线性蠕滑率/力模型	107
2.5.3 Johnson-Vermeulen 无自旋三维滚动接触模型	110
2.5.4 Kalker 的 FASTSIM 算法	110
2.5.5 Polach 非线性滚动接触理论	113
2.5.6 经验公式	117
2.6 三维滚动接触问题求解方法	118
2.6.1 经典滚动接触理论的局限性	118
2.6.2 基于有限元法的轮轨接触力学	120
2.6.3 基于有限元参数二次规划法的接触理论	122
2.6.4 非稳态滚动接触力学	124
2.7 考虑接触表面特性的轮轨接触问题分析方法	125
2.7.1 表面温度对摩擦系数的影响问题	126
2.7.2 表面粗糙度对蠕滑力的影响研究	126
2.7.3 微观水平下的轮轨接触力分析方法	128
2.8 轮轨滚动接触摩擦管理思路和方法	132
2.8.1 轮轨黏着	132
2.8.2 轮轨磨耗	135
2.8.3 摩擦管理	137
参考文献	139

第三章 机车车辆垂向动力学	142
3.1 机车车辆自由振动	142
3.1.1 机车车辆简化的单自由度垂向振动模型	143
3.1.2 机车车辆简化的两自由度垂向振动模型	147
3.2 机车车辆强迫振动	150
3.2.1 机车车辆简化的单自由度强迫振动模型	150
3.2.2 机车车辆简化的两自由度强迫振动模型	152
3.3 机车车辆随机振动	155
3.3.1 随机振动基础	155
3.3.2 机车车辆的垂向随机振动分析模型	160
3.4 高速客车垂向振动响应的数值求解方法	165
3.5 车辆垂向振动对轨道结构动力性能的影响	171
3.5.1 车辆垂向振动影响轨道结构动力性能评定标准	171
3.5.2 轮轨动态作用力的影响因素分析	172
参考文献.....	173
第四章 机车车辆的横向运行稳定性	174
4.1 车辆蛇行运动与自激振动机理	174
4.1.1 机车车辆的蛇行运动	174
4.1.2 机车车辆的自激振动机理	180
4.2 车辆横向运行稳定性仿真分析方法	185
4.2.1 车辆横向运行稳定性线性分析方法	185
4.2.2 车辆横向运行稳定性非线性分析方法	193
4.3 车辆的蛇行失稳极限环分岔形式	209
4.3.1 机车车辆系统常微分方程的分岔	209
4.3.2 机车车辆 Hopf 分岔形式及影响因素	212
4.4 高速车辆横向运行稳定性评价方法	217
4.4.1 高速车辆稳定性评价方法案例比较分析	218
4.4.2 高速车辆稳定性评价方法的新建议	226
4.5 提高机车车辆横向运行稳定性的方法	228
4.5.1 合理的轴箱定位刚度	228
4.5.2 设置抗蛇行减振器和横向减振器	228
4.5.3 选择合理的车轮踏面斜率	230
4.5.4 其他方法	230
参考文献.....	232

第五章 机车车辆曲线通过分析方法 ·····	233
5.1 蠕滑力导向机理·····	233
5.1.1 轮对通过曲线时的纯滚线·····	233
5.1.2 曲线通过时作用在轮对上的蠕滑力·····	234
5.1.3 蠕滑力导向机理·····	236
5.2 车辆稳态曲线通过分析方法·····	237
5.2.1 线性稳态曲线通过·····	238
5.2.2 非线性稳态曲线通过·····	243
5.3 车辆动态曲线通过分析方法·····	248
5.3.1 轨道模型·····	249
5.3.2 蠕滑力-蠕滑率模型·····	250
5.3.3 轮对动态曲线通过的运动方程·····	251
5.3.4 转向架及车体动态曲线通过的运动方程·····	255
5.4 径向转向架·····	257
5.4.1 自导向径向转向架·····	257
5.4.2 迫导向径向转向架·····	258
5.4.3 动力学特性分析模型及运动方程·····	259
5.5 独立轮对·····	261
5.5.1 独立轮对的结构及特点·····	261
5.5.2 自调节独立轮对的导向原理·····	262
5.6 车辆曲线通过性能评价方法·····	265
5.6.1 轮对与轨道间的横向力·····	266
5.6.2 脱轨系数·····	266
5.6.3 离心加速度·····	266
5.6.4 冲角·····	267
5.6.5 磨耗数和磨耗指数·····	267
参考文献·····	268
第六章 机车车辆脱轨安全性 ·····	269
6.1 脱轨类型及原因分析·····	269
6.1.1 脱轨的过程及其分类·····	269
6.1.2 脱轨原因及影响因素·····	273
6.2 脱轨仿真研究·····	276
6.2.1 对准静态爬轨过程的仿真研究·····	277
6.2.2 高频轮重变化对脱轨影响的仿真研究·····	278
6.2.3 对蛇行失稳导致脱轨过程的仿真研究·····	279

6.2.4	动态脱轨过程的仿真研究	281
6.3	脱轨试验研究	287
6.3.1	脱轨试验简介	287
6.3.2	日本狩胜试验线上的货车脱轨试验	289
6.3.3	中国的货物列车脱轨试验	292
6.3.4	意大利实心车轴单轮对脱轨试验	294
6.4	现行脱轨评价方法	297
6.4.1	车辆爬轨脱轨准则	297
6.4.2	JNR 以及 EMD 的脱轨系数持续时间指标	303
6.4.3	由轨距扩大或钢轨翻转引起的脱轨的评价准则	305
6.5	脱轨评价新方法	307
6.5.1	根据车轮抬升量评判车辆脱轨的方法与准则	307
6.5.2	车辆脱轨安全评判的动态限度	308
6.5.3	列车脱轨能量随机分析理论	309
6.5.4	三维准静态脱轨准则的研究	309
6.5.5	高速列车动态脱轨评价方法	311
6.6	脱轨预防措施	311
6.6.1	车辆设计方面	312
6.6.2	轨道设计方面	312
6.6.3	运用维护方面	312
	参考文献	313
第七章	机车车辆动力学性能试验技术	316
7.1	试验方案设计	316
7.1.1	试验的必要性	316
7.1.2	试验方案选择	317
7.1.3	试验条件	317
7.1.4	试验线路的选定	319
7.1.5	试验主要参数	319
7.2	试验方案实施	329
7.2.1	一般方法及原理	330
7.2.2	测试用传感器	331
7.2.3	测点布置	339
7.2.4	测试设备	339
7.2.5	测试流程	341
7.3	试验数据采集与处理方法	341

7.3.1	数据采集	342
7.3.2	数据检验	343
7.3.3	数据的统计处理方法	348
7.4	试验结果评判标准	350
7.4.1	车辆安全性评判标准	351
7.4.2	轨道疲劳	355
7.4.3	平稳性(舒适性)评判标准	357
	参考文献	364
第八章	机车车辆动力学新发展	366
8.1	刚柔耦合系统动力学	366
8.1.1	机车车辆刚柔耦合系统建模方法	367
8.1.2	机车车辆刚柔体系统动力学应用实例	372
8.2	主动及半主动控制技术	377
8.2.1	主动及半主动控制技术的控制原理	377
8.2.2	主动及半主动控制在机车车辆性能优化中的应用	380
8.3	机车车辆状态监测及故障诊断技术	394
8.3.1	机车车辆监测诊断技术的发展趋势	395
8.3.2	状态监测及故障诊断方法	395
8.3.3	机车车辆故障诊断技术应用实例	398
8.4	高速铁路大系统耦合研究体系及其系统建模	406
8.4.1	高速列车耦合大系统的基本构成	406
8.4.2	高速列车耦合大系统的功能	410
8.4.3	高速列车耦合大系统服役模拟研究	413
8.5	优化技术在机车车辆中的应用	415
8.5.1	车轮型面优化的研究进展	416
8.5.2	遗传算法在机车车辆动力学性能优化中的应用	422
	参考文献	426

第一章 机车车辆动力学基本理论和方法

机车车辆动力学也称车辆系统动力学,主要是研究列车在线路上运行时机车车辆各个构件之间、各节车辆之间及列车与线路之间的力、加速度和位移等相互作用的一门学科。其研究内容主要包括垂向动力学、横向动力学、轮轨几何关系与轮轨蠕滑作用以及其运行平稳性、稳定性等。本章以机车车辆为主要研究对象,主要考虑车辆作为多刚体系统在轨道线路的外激励作用下的动力学特性。

1.1节介绍机车车辆动力学这门学科主要的研究对象及特点;1.2节阐述机车车辆动力学分析思路及流程;1.3节和1.4节就机车车辆多刚体动力学的力学模型建立及求解方法进行归纳;1.5节介绍如何根据理论分析结果对系统进行评价;1.6节简要介绍与机车车辆动力学有关的非线性动力学理论。

1.1 机车车辆动力学研究对象

铁路运输是依靠列车在线路上运行来实现的。其整体系统主要是由机车车辆和轨道线路组成,在这个复杂系统中,它们相互联系又相互作用。为了准确地建立动力学模型,其首要任务是明确机车车辆动力学的研究对象,了解其结构组成和特点,本节就机车车辆与轨道线路的特点与组成分别进行介绍。

1.1.1 机车车辆的基本特点及组成

1. 机车车辆的基本特点

绝大多数的机车车辆是沿专门为其铺设的钢轨运行,这种特殊的轮轨关系成为机车车辆的最大特征,并由此产生了许多其他特点^[1]。

(1) 自行导向:一般交通运输工具均具有操纵运行方向的机构,但机车车辆是通过轮轨结构使得车轮沿直线及曲线轨道运行,而无需控制方向。

(2) 蛇行运动:由于车辆轮对具有一定形状踏面,轮对沿着平直钢轨滚动时,产生一种特有运动——轮对横向移动的同时绕通过其质心的铅垂轴转动,即蛇行运动,如图1.1所示。

(3) 低运行阻力:与公路汽车、轮船等其他交通工具相比,机车车辆的运行阻力小。其运行阻力受线路条件的影响,主要包括走行部的轴与轴承以及车轮与接触面的摩擦阻力。机车车辆的轮对与轨道均为硬度较高的钢材,且轮轨接触变形