

翟婉明 著

车辆-轨道耦合动力学

(第三版)

Vehicle-Track Coupling Dynamics

(Third Edition)

by Zhai Wanming



科学出版社

www.sciencep.com

车辆—轨道耦合动力学

(第三版)

Vehicle-Track Coupling Dynamics

(Third Edition)

翟婉明 著

by Zhai Wanming



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书系统而全面地阐述了作者提出的车辆—轨道耦合动力学新理论及其在现代铁路工程中的应用实践。全书共十八章,分上、下两篇。上篇(前十章)完整论述了车辆—轨道耦合动力学的理论体系,包括学术思想、理论模型、求解方法、仿真方法、试验方法及试验验证等;下篇(后八章)介绍车辆—轨道耦合动力学理论的工程应用,以机车车辆与线路动态匹配设计为主线,重点围绕车辆与轨道动态作用安全问题,阐述该理论在现代高速、重载铁路及提速铁路工程中的应用,并选取有代表性的若干个具体工程应用实例予以介绍。

本书不仅理论方法先进,而且工程应用性强,适合于机车车辆和铁路轨道专业的科研、设计人员及工程技术人员阅读参考,并可兼作高等院校车辆工程、铁道工程、载运工具运用工程等专业相关方向的博士、硕士研究生教学用书。

图书在版编目(CIP)数据

车辆—轨道耦合动力学 = Vehicle-Track Coupling Dynamics/翟婉明著. —3版. —北京:科学出版社,2007

ISBN 978-7-03-018326-2

I. 车… II. 翟… III. 轮轨关系-耦合-动力学 IV. U211.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 004285 号

责任编辑:余 丁 田士勇/责任校对:张 琪

责任印制:安春生/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

1997年6月中国铁道出版社第一版

2002年1月中国铁道出版社第二版

2007年2月第三版 开本:B5(720×1000)

2007年2月第三次印刷 印张:26 1/2

印数:3 001—5 500 字数:504 000

定价:75.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换(科印))

序

铁路列车提速及客运高速化、货运重载化大大加剧了机车车辆与轨道结构的动态相互作用。中国铁路长期处于超负荷运输状态，导致了更为突出的车辆/轨道相互作用问题。传统的研究方法是将机车车辆和铁路轨道分离成两个相对独立的子系统，分别加以研究，不能解决这种复杂大系统动态相互作用问题。翟婉明教授运用系统工程的思想，将机车车辆系统和铁路轨道系统作为统一大系统，率先提出并系统建立了“车辆—轨道耦合动力学”新理论，从而打破了长期以来将车辆和轨道割裂开来研究的局面，开辟了铁路大系统动力学学科新领域，走到了国际轮轨系统动力学研究前沿。

该书第三版是作者在1997年出版的第一版、2002年出版的第二版专著《车辆—轨道耦合动力学》的基础上，根据近年来承担国家、铁道部、教育部、四川省和铁路应用部门的一系列相关科研课题研究取得的最新成果重新撰写、修订而成，对原著有了重要发展，主要体现在：理论体系更加完整，从学术思想、理论模型、求解方法、仿真方法、试验方法等方面进行了系统论述；试验研究及验证更加充分，不仅增加了现场试验内容，而且补充了近年来我国铁路列车提速试验、高速试验及小半径曲线轮轨动力学试验的验证内容；应用范例更加丰富，结合中国铁路发展实际，全面阐述了该理论在高速、重载铁路及提速铁路工程中的应用，并增加了若干个典型工程应用实例介绍。

该书的特色是不仅理论学术水平高，而且工程实用性强。

该理论成果自1993年在国际上陆续发表以来，已产生了较强的影响。其模型被著名专家 Knothe 教授在 *Vehicle System Dynamics* 述评论文中列为本领域四种代表性模型之一，曾被 Oscarsson、Peplow、Dahlberg 等学者在论著和研究报告中称为“翟—孙模型”，先后被德国、英国、瑞典、丹麦、澳大利亚、加拿大、日本等国及我国同行学者广泛引用和采用，居国际领先地位。

车辆—轨道耦合动力学作为崭新的理论体系，在现代铁路工程领域应用前景十分广阔，为实现机车车辆与轨道结构参数的最佳匹配及系统安全性设计与管理，提供了强有力的理论分析工具。近年来，该理论方法已被广泛应用于我国铁

路机车车辆开发设计、既有铁路提速改造、山区铁路安全改造、重载运输、高速客运专线建设等工程领域，为我国铁路现代化建设做出了积极贡献。

我相信，该书第三版的及时出版必将对我国铁路跨越式发展做出更大的贡献。

中国科学院院士

中国工程院院士



2006年10月21日

第一版序

，《车辆—轨道耦合动力学》是我国运用大系统观点研究铁路轮轨接触式运输系统相互作用的第一部著作，标志着我国机车车辆—轨道相互作用研究已经从独立子系统简化研究的初级层次跨入了完整大系统综合研究的高层次。毫无疑问，我们已经与国际系统铁路动力学站在了同一水平线上。

世界机车车辆—轨道系统动力学的发展，只有到了现代计算机技术日臻完善的今天，才有可能不完全依赖实验动力学的手段，而进入仿真模拟的高级阶段。借助于模拟方法的日益逼近真实，加之计算机可以包容庞大的自由度，系统的仿真模拟有可能完全取代昂贵的实验。当然，要实现这一最终目标，尚需经历相当长的艰苦历程。

仿真模拟取代实验的关键，除了必须的实验支持之外，还要从大系统的综合和概括的观点出发，对系统每一环节以及环节与环节之间相互联系的性状，用普遍成立的规则和定理予以逼真地描述。只要有效地控制系统的运作条件在科学界定的范围之内，这一前景无疑给我们的事业带来不可估量的效益。

传统的子系统简化研究是历史的局限，也是大系统综合研究的必由之路。无论是机车车辆子系统还是轨道子系统，我国的实验动力学和仿真模拟都已积累了丰富的和有效的经验。在这一基础上，学科必定要向大系统综合模拟的方向发展。

该书的贡献在于不失时机地迎接这种大趋势的挑战，有效地在子系统研究成果的基础上开发了大系统仿真模拟的模型，并取得一批有价值的基础成果。它不仅与国内实验动力学的结果有较好的一致性，而且 also 与国际现有的专业基础成果相容。无论是从学科建设的角度，还是从工程应用的角度，该书都显示了广阔的应用价值和发展潜力。尤其是重载货运和高速客运的历史使命，已为该书的出版提供了浓郁的环境氛围和坚实的社会基础。

著者作为机车车辆动力学领域内卓有成效的研究工作者，无疑拥有机车车辆动力学的深厚根基。问题是如何把轨道子系统真实地模型化，并有机地将其与机车车辆子系统对接，并构成反映真实物理过程的统一数学大系统，还不能不说是一件非常艰巨的工程。据我所知，德、英、日、美、瑞典、波兰、加拿大等国的许多著名学者都在试图建立这种物理真实的轨道数学模型，其中以德国的 Knothe 和英国的 Grassie 最为著名。因此，当著者翟婉明教授（孙翔教授为其导师）的博士论文一经在第 13 届 IAVSD 学术年会上发表之后，立刻就在国际铁

路动力学学术界引起反响,除了在 IAVSD 论文集、VSD 学报上刊载外,1994 年 9 月在捷克举行的“车辆/轨道相互作用”会议上被列入专题报告,其垂向统一模型被英、德、瑞典和加拿大等国学者广泛引用,并被誉为当代轮轨相互作用的四大典型模型之一。

模型的正确性首先取决于物理逼真性。显然,传统的集总参数法是出于人工计算的无奈,它与复杂分散参数体系的轨道结构相距甚远,集总参数描述的实际是一种理想的均匀分布条件。把钢轨作为连续均匀弹性基础梁来模拟,虽然比集总参数模型更接近真实,但却无法描述由轨枕间距所确定的分布支承特性,而轨下基础各组成部件,如轨枕、垫层、道床和路基在实现轨道功能中所扮演的角色是互不相同的。无疑,离散点支承的分层连续弹性梁模型最能逼近轨道结构的真实情况,现代计算机技术也完全有可能胜任如此庞大系统的仿真计算。

该书的研究表明,轨道模型的细化揭示了工程上早已公认的真理,即轨道柔度参数激励具有很强的动力学效应,因为它的响应频带很窄,而由轨道不平顺引起的动态作用力却有一个很宽的频率范围,因此,避开共振区将是轮轨耦合系统设计的重要课题。此外,作为一种启迪,能否利用有理分式函数,在充分研究了 0~2000Hz 频带内的响应特性的共性和个性之后,用一种既简单又真实的轨道模型取代细化的轨道模型,必定会有特殊的价值。西南交通大学的吴永芳在柏林工业大学的工作,已经取得了可喜的初步成果。

正确的模型需要正确的计算分析方法。如此庞大自由度的模型,无疑要耗费巨大的计算机机和内存。利用国外现成的方法,要在普通计算机上实施仿真,似乎是不可能的。尤其是,当时正值“七五”国家重载动力学攻关之际,极需适时输出分析结果,否则机车操纵模拟器就将无法实时运作。尽管显式法可以实现快速运算,但稳定性和精度稍差,而隐式法虽然稳定性和精度都好,但运算极慢。针对这种两难的选择,著者创造了一类新型显式两步数值积分方法,在质量矩阵为对角阵的条件下,可以省去高阶线性代数方程组的联立求解过程,大幅度地提高了计算速度,有效地节省了计算机内存。在此基础上,著者又构造了一类显—隐式预测—校正积分格式,既充分发挥了显式法快速运算的潜力,又保持了隐式积分的精度和稳定性功能。这种显—隐式预测—校正积分法是对著名 Newmark- β 法的创造性发展,在国际上具有十分重要的学术价值,尤其是在处理大型非线性动力学的系统分析方面,它显著地优于目前广泛使用的 Newmark- β 法、Wilson- θ 法、Park 法、Runge-Kutta 法以及 Gill 法。此两种方法被国际权威刊物《国际工程中的数值方法学报》刊载。

模型的正确仿真,还必须解决耦合系统激励源的数学和物理描述。著者对车轮和轨道不平顺激励源的所有可能形态都作了数学逼近描述。因此所得到的响应几乎包罗了铁路运用和维护的所有可能状态,而在此基础上提出的评价程序和判

据都具有强烈的工程应用针对性，物理概念一目了然，具体指标可操作性强。

应该说，该书的前五章是基础，而研究工作的指导意义在于后五章，体现了研究工作的归宿是应用的思想。后五章以常见轮轨激励源及曲线激扰所导致的耦合振动规律为纲，具体地对低动力作用的轮轨系统设计和系统维护、大轴重货车动态作用及其改善途径、高速机车车辆簧下质量控制和轨道结构减振措施，以及实际轨道结构不平顺安全限度等，提出了耦合大系统综合模拟的建设性建议，无疑会对我国重载货运和高速客运的系统规划起到指导和参考作用。当然，这些建议的普遍正确性以及理论框架的完善，还有待于未来实践和试验验证的不断积累和修正，对此，我们拭目以待。

必须指出，本书的学术和应用潜力相当大。至少在下列两个方面大有发展前景：

1. 在模型中进一步考虑轮轨表面的粗糙度。由于轮轨之间的干摩擦作用，高频接触振动和机车的张弛振动响应，有可能发展成一种稳定和不稳定极限环的交替或交错状态；

2. 高速条件的脱轨条件在本质上有别于低速的爬轨形态。当钢轨的横向阻抗受到大规模削弱时，有可能发展成为一种混沌状态。

当然，上述内容的研究将涉及更深层次的基础科学研究发展问题，模型的适用性将会受到更严峻的考验。但因为它们同属于耦合大系统，提出这些问题，在逻辑上是合乎情理的。

热忱地期望该书能对关心这一命题的读者有所教益。

铁道科学研究院研究员、博士生导师

詹斐生

1995年12月31日于北京

前 言

随着铁路列车提速及高速、重载铁路的迅速发展,机车车辆与轨道结构之间的动态相互作用日益增强,由此引发的动力学与振动问题更加严重,也更趋复杂。列车运行速度越高,机车车辆在线路上的行车安全性与运行平稳性问题越突出,既要保证机车车辆高速(快速)运行时不颠覆、不脱轨,又要确保提速列车、高速列车具有良好的乘坐舒适度;车辆运载重量越大,轮轨之间的动力作用越强,车辆对线路结构的动力破坏作用也越严重,这就要求减轻重载列车与线路之间的动态相互作用。中国铁路长期处于超负荷运输状态,导致了更为突出的车辆/轨道相互作用问题。显然,解决上述复杂、大系统、动态相互作用问题,单单从车辆系统或轨道系统本身研究,已难以奏效;而将车辆系统与轨道系统作为一个相互作用、相互依存的整体大系统加以考察,则为研究此类耦合动力学问题开辟了新途径,也使理论研究更能反映铁路轮轨系统实际。这便是本书所论述的车辆—轨道耦合动力学理论之初衷。

笔者提出开展车辆—轨道耦合动力学的研究设想始于1988年,并于次年得到国家自然科学基金的资助,1991年完成了博士学位论文《车辆—轨道垂向耦合动力学》。在随后几年中,笔者及其课题组在原国家教委“跨世纪优秀人才计划”首批专项基金资助下,着重开展了车辆—轨道横向耦合动力学的研究工作。1995年底,笔者完成了《车辆—轨道耦合动力学》书稿,于1997年夏由中国铁道出版社出版发行,1998年该书获得第11届“中国图书奖”。1996~2001年间,笔者带领课题组(包括研究生们)在国家杰出青年科学基金、高等学校博士学科点科研基金、霍英东教育基金、四川省青年科技基金、教育部“高等学校骨干教师资助计划”及铁道部科技研究开发计划等资助下,进行了多方面的后续研究工作,主要包括客车—轨道空间耦合模型、轮轨空间动态耦合模型及其试验验证、车辆—轨道随机耦合振动、车辆与道岔相互作用、轮轨相互作用脱轨等方面的研究,并于2002年1月由中国铁道出版社出版了本书第二版。

近年来,随着我国铁路跨越式发展,车辆—轨道耦合动力学得到了较好的应用与发展,特别是在列车提速工程、客运专线建设工程、山区铁路安全改造工程中的应用实践,使理论研究更加深入、更加系统,应用范围更加广泛。与此同时,在国家自然科学基金创新研究群体项目(50521503)、教育部“长江学者和创新团队计划”(IRT0452)及国家自然科学基金项目(50475111)资助下,作者又对车辆—轨道耦合动力学理论体系框架进行了研究与完善。在此背景下,才

诞生了这本新的、系统介绍理论体系和工程应用的《车辆—轨道耦合动力学》(第三版)。

与第二版相比,第三版在内容上有了大量增加,从而使理论体系更加完善,工程应用更加丰富。在理论研究方面增加的内容主要有:机车—轨道垂向统一模型及其空间耦合模型、无碴轨道动力学模型、道床修正模型、车辆—轨道耦合系统动力学性能评价方法、机车车辆与线路动态匹配设计原理与方法等;在试验研究方面,增加了车辆—轨道耦合动力学现场试验方法及典型现场试验,补充了高速运行试验验证及小半径曲线轮轨动态作用试验验证;在应用研究方面增加的内容主要有:高速铁路车辆与轨道横向动态相互作用、高速铁路轨道过渡段的动力作用、山区铁路小半径曲线轮轨动态相互作用等。此外,第三版还特别增加了车辆—轨道耦合动力学理论在若干个有代表性的具体工程中的应用实例介绍,包括:时速 200km“天梭”号电力机车动力性能优化设计,时速 170km 提速客运机车 SS_{7E} 动力性能改进设计,秦沈客运专线新型无碴轨道建设工程应用实践,京秦线时速 200km 提速改造工程动力分析应用,时速 200km 福厦客货共线铁路设计应用,时速 300km 广深港客运专线平纵断面设计应用等。

全书共十八章,分上、下两篇。上篇(前十章)论述车辆—轨道耦合动力学的理论体系,包括学术思想、理论模型、求解方法、计算机仿真方法、现场试验方法、模型验证及其与传统模型的分析比较、车辆与轨道的耦合振动特征等;下篇(后八章)介绍车辆—轨道耦合动力学理论的工程应用,以机车车辆与线路动态匹配设计为主线,重点围绕车辆与轨道动态作用安全问题,阐述该理论在现代高速、重载铁路及提速铁路工程中的应用,并选取有代表性的若干个具体工程应用实例予以介绍。书末附录还给出了常见铁道机车车辆和轨道结构基本参数。

借本书出版之机,作者向资助、支持和关心过本研究工作及本书出版的各有关单位和个人致以诚挚的谢意!首先要感谢国家自然科学基金、国家博士学科点基金、霍英东教育基金和教育部人事司、科技司、人才办,铁道部科技司、四川省科技厅及有关机车车辆工厂、铁道设计院、铁路局等应用部门对本研究工作所提供的大力资助。其次要感谢铁道科学研究院对作者的大力支持,特别是钱立新研究员、黄强研究员、康熊研究员、徐涌研究员、黎国清研究员、江成研究员、王卫东研究员、倪纯双研究员、黄成荣研究员、姚建伟研究员、韩自力研究员、张格明博士等,他们为作者提供了相关大型现场动力学试验报告及一些十分宝贵的第一手测试数据或为作者提供了现场试验上的帮助,为验证和完善车辆—轨道耦合动力学理论起到了十分关键的作用。特别要感谢中国科学院院士、中国工程院院士沈志云教授,中国工程院院士曾庆元教授和铁道科学研究院詹斐生研究员等长期以来对作者的关心、指导与帮助,沈院士还在百忙中为本书作序。最后要感谢我的同事及研究生们,特别是在职博士生王开云全程参与了本书的修订(包

括大量的算例分析)工作,为书稿的整理和最后完成付出了辛勤劳动,博士生高建敏、罗震等参与了书稿的文字整理和部分图表制作,本书的出版是他们共同努力的结果。

作 者

2006年9月16日于成都西南交通大学

目 录

序
第一版序
前言

上篇 车辆—轨道耦合动力学理论体系

第一章 车辆—轨道耦合动力学导论	3
1.1 车辆—轨道耦合动力学的研究背景	3
1.2 车辆—轨道耦合动力学的学术思想	4
1.3 车辆—轨道耦合动力学的基本范畴	6
1.4 车辆—轨道耦合动力学的研究方法	8
参考文献	11
第二章 车辆—轨道耦合动力学模型	12
2.1 论车辆—轨道耦合系统的模型化	12
2.1.1 轮轨动力分析模型的演进	12
2.1.2 关于轨道结构的建模问题	14
2.1.3 关于轮轨动力分析中机车车辆的模型化问题	18
2.1.4 车辆—轨道耦合系统建模的一般原则	19
2.2 车辆—轨道垂向系统统一模型	20
2.2.1 物理模型	20
2.2.2 数学模型	26
2.3 车辆—轨道空间耦合系统动力学模型	38
2.3.1 物理模型	38
2.3.2 数学模型	48
2.4 轮轨空间动态耦合模型	71
2.4.1 轮轨系统坐标系及其变换	71
2.4.2 轮轨空间动态耦合模型	73
参考文献	84
第三章 车辆—轨道耦合系统激励模型	88
3.1 脉冲型激励模型	88

3.1.1	车轮扁疤冲击模型	88
3.1.2	钢轨错牙接头模型	91
3.1.3	轨道低接头模型	93
3.1.4	道岔冲击模型	93
3.1.5	其他脉冲激励模型	95
3.2	谐波型激励模型	96
3.2.1	谐波激励位移输入函数	97
3.2.2	轨道常见几何不平顺的输入模式	100
3.2.3	周期性简谐力输入函数	101
3.3	动力型轨道刚度不平顺模型	102
3.3.1	轨道过渡段刚度不平顺	102
3.3.2	道岔区轨道刚度不平顺	104
3.3.3	轨下基础结构缺陷的模拟	105
3.4	轨道随机不平顺激励模型	106
3.4.1	美国轨道谱	106
3.4.2	德国高速轨道谱	107
3.4.3	中国干线轨道谱	108
3.4.4	几种典型轨道谱的比较	110
3.4.5	轨道随机不平顺时域样本的数值模拟方法	113
	参考文献	114
第四章	车辆—轨道耦合动力学数值求解方法	116
4.1	大型非线性动力学系统的数值求解问题	116
4.2	大系统动态分析的新型快速数值积分方法	117
4.2.1	新型显式积分法	117
4.2.2	新型预测—校正积分法	122
4.2.3	非线性问题的数值积分形式	124
4.2.4	新型数值积分方法的数值精度	125
4.2.5	结论	127
4.3	复杂非线性问题计算稳定性的数值试验方法	128
4.3.1	引言	128
4.3.2	数值试验方法	128
4.4	新方法在车辆—轨道耦合动力学数值分析中的应用	129
4.4.1	数值积分步长的确定	130
4.4.2	轨道计算长度的确定	131
4.4.3	钢轨模态阶数的确定	132

参考文献	132
第五章 车辆—轨道耦合动力学的计算机仿真	134
5.1 车辆—轨道垂向相互作用仿真分析系统 VICT	134
5.1.1 VICT 系统的结构	134
5.1.2 VICT 系统的仿真计算流程	135
5.1.3 VICT 系统的功能	137
5.2 车辆—轨道空间耦合动力学仿真分析系统 TTISIM	137
5.2.1 TTISIM 系统的结构	137
5.2.2 TTISIM 系统计算流程	139
5.2.3 TTISIM 系统的功能	139
5.3 机车车辆在线路上动态运行行为的可视仿真	141
参考文献	144
第六章 车辆—轨道耦合动力学现场试验	145
6.1 车辆—轨道耦合动力学现场试验方法	145
6.1.1 车辆在线路上运行动力学现场试验方法	145
6.1.2 车辆与轨道动态作用现场试验方法	147
6.2 车辆在线路上动态运行行为的典型现场试验	151
6.3 车辆与轨道动态作用的典型现场试验	154
6.3.1 秦沈客运专线高速列车轮轨动态作用现场试验	154
6.3.2 大秦重载铁路万吨列车对轨道动态作用现场试验	158
6.3.3 山区铁路小半径曲线轮轨动态相互作用现场试验	160
参考文献	164
第七章 车辆—轨道耦合动力学模型的试验验证	166
7.1 车辆—轨道垂向统一模型的试验验证	166
7.1.1 车辆振动的理论分析结果与试验结果对照	166
7.1.2 轨道结构振动的理论分析结果与试验结果对照	167
7.1.3 轮轨动态作用力的理论分析结果与试验结果对照	170
7.1.4 车辆—轨道垂向统一模型验证结论	172
7.2 车辆—轨道空间耦合模型的试验验证	172
7.2.1 京秦线时速 200km 提速试验验证	173
7.2.2 秦沈客运专线高速试验验证	176
7.2.3 货物列车直线段脱轨试验验证	178
7.2.4 山区铁路小半径曲线轮轨动态作用试验验证	179
7.2.5 车辆—轨道空间耦合模型验证结论	181
参考文献	181

第八章 车辆—轨道耦合模型与传统模型结果比较	182
8.1 车辆运动稳定性计算结果的比较	182
8.1.1 车辆运动稳定性的数值计算方法	182
8.1.2 耦合模型与传统模型计算的临界速度结果比较	184
8.1.3 小结	185
8.2 车辆运行平稳性计算结果的比较	185
8.3 车辆曲线通过性能计算结果的比较	187
8.3.1 车辆低速通过小半径曲线时动力性能计算结果的比较	187
8.3.2 车辆高速通过大半径曲线时动力性能计算结果的比较	190
8.3.3 几点结论	191
参考文献	191
第九章 车辆—轨道耦合振动的基本特征	192
9.1 车辆—轨道耦合系统的冲击响应	192
9.1.1 垂向冲击振动响应	192
9.1.2 横向冲击振动响应	195
9.2 车辆—轨道耦合系统对谐波型激励的振动响应	197
9.2.1 垂向谐波振动响应	197
9.2.2 横向谐波振动响应	200
9.3 轨道动力型不平顺对车辆—轨道耦合振动的影响	201
9.4 车辆—轨道耦合系统随机振动响应	202
9.4.1 车辆—轨道耦合系统随机振动分析方法	202
9.4.2 车辆—轨道耦合系统随机振动响应特征	203
9.4.3 轨道随机不平顺对车辆—轨道耦合系统横向随机响应的影响	208
参考文献	211
第十章 车辆—轨道耦合系统动力学性能评价	213
10.1 车辆—轨道耦合系统动力学性能评价指标体系	213
10.1.1 关于车辆运行安全性的评价	213
10.1.2 关于车辆运行平稳性的评价	214
10.1.3 关于车辆与轨道动态作用性能的评价	214
10.1.4 车辆—轨道耦合系统动力学性能评价指标体系	216
10.2 车辆运行安全性评价标准	217
10.2.1 脱轨系数	217
10.2.2 轮重减载率	217
10.2.3 倾覆系数	218
10.3 车辆运行平稳性评价标准	218

10.3.1	车体振动加速度	218
10.3.2	平稳性指标	220
10.3.3	车辆通过曲线时的舒适度标准	222
10.4	车辆与轨道动态作用性能评价标准	222
10.4.1	轮轨垂向力	222
10.4.2	轮轨横向力	223
10.4.3	轮轴横向力	223
10.4.4	线路横向稳定性系数	224
10.4.5	轮轨接触应力	224
10.4.6	道床应力	224
10.4.7	路基应力	225
	参考文献	225

下篇 车辆—轨道耦合动力学工程应用

第十一章	机车车辆与线路动态匹配设计原理和准则	229
11.1	机车车辆与线路动态匹配设计理念	229
11.2	机车车辆与线路动态匹配设计原理	230
11.3	机车车辆与线路动态匹配设计方法	231
11.3.1	基于匹配设计原理的机车车辆动态设计方法	231
11.3.2	基于匹配设计原理的线路动态设计方法	232
11.4	机车车辆与线路动态匹配设计基本准则	233
11.4.1	机车车辆的低动力作用设计准则	233
11.4.2	轨道结构的低动力作用设计准则	236
	参考文献	240
第十二章	列车提速对线路的动力影响及其对策	241
12.1	我国既有铁路列车提速概况及其意义	241
12.2	既有铁路列车提速给线路带来的动力问题	243
12.3	提速线路道岔处轮轨冲击作用问题及其对策	244
12.4	提速线路钢轨焊接区不平顺的动力效应及其控制	247
12.5	提速线路路桥连接段的动力问题及其对策	249
12.6	提速列车车轮擦伤对线路的动力影响及其对策	251
	参考文献	253
第十三章	高速铁路车辆与轨道的动态相互作用	254
13.1	高速铁路及其在中国的发展	254

13.2	高速铁路车辆与轨道垂向动态相互作用特征	256
13.2.1	高速铁路轮轨冲击振动响应特征	256
13.2.2	高速行车条件下偏心轮的动态效应	258
13.2.3	高速列车车轮不圆引起的轮轨动力作用及其控制	258
13.2.4	高速铁路钢轨波浪形磨耗引起的轮轨动力作用特征	260
13.3	高速铁路车辆与轨道横向动态相互作用特征	261
13.3.1	列车运行速度对轮轨横向动态作用性能的影响	261
13.3.2	曲线参数对高速列车与轨道横向动态相互作用性能的影响	263
13.4	高速铁道车辆簧下质量的动力学效应及控制	265
13.5	高速列车与轨道过渡段的动态作用问题及技术对策	269
13.5.1	高速铁路轨道过渡段常用技术方法	270
13.5.2	高速铁路轨道过渡段结构设计方案	272
13.5.3	高速铁路轨道过渡段长度的理论设计	272
13.5.4	高速铁路轨道过渡段折角的控制标准	273
	参考文献	275
第十四章	重载铁路车辆与轨道的动态相互作用	276
14.1	关于我国重载铁路运输及货车大型化问题	276
14.2	大型重载货车对线路的动力影响	277
14.3	减轻大型重载货车对线路动力作用的基本途径	280
14.3.1	减轻大型重载货车对线路动力作用的两种途径	280
14.3.2	英国低动力作用重载货车 LTF 的成功经验	281
14.4	我国新型重载货车设计及其轮轨动力性能评价	282
14.4.1	新型低动力作用重载货车转向架方案	282
14.4.2	SWJ 转向架轮轨动力作用性能预测与评价	285
14.4.3	我国 25t 轴重低动力作用货车转向架的研制	286
	参考文献	290
第十五章	山区铁路小半径曲线轮轨动态相互作用	291
15.1	我国山区铁路小半径曲线轨道动力问题	291
15.2	山区铁路小半径曲线轮轨相互作用特征	293
15.2.1	静态轮轨接触几何特征	293
15.2.2	轮轨动态相互作用特征	295
15.3	山区铁路小半径曲线安全改造对策及实践效果	297
15.3.1	强化前后轮轨动力性能的理论分析	298
15.3.2	强化前后轮轨动力性能的现场试验分析	303
15.3.3	工程应用实践效果	305