

翟婉明 著

# 车辆—轨道耦合动力学

(第四版)

下册

**Vehicle-Track Coupled Dynamics**

(Fourth Edition)

Volume 2

by Zhai Wanming



科学出版社

# 车辆—轨道耦合动力学

(第四版)

下册

**Vehicle-Track Coupled Dynamics**

(Fourth Edition)

Volume 2

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—轨道耦合动力学理论及其在现代铁路工程中的应用实践。全书共十九章,分上、下两册。上册(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、试验方法及评价方法等;下册(后九章)介绍车辆—轨道耦合动力学的工程应用,以机车车辆与线路动态性能匹配设计为主线,重点围绕机车车辆与轨道结构动态相互作用安全问题,紧密结合中国铁路发展实际,全面阐述该理论在现代高速铁路、重载铁路、提速铁路及城市地铁工程中的应用概况,并选取一系列典型工程应用实例予以介绍。

本书不仅理论学术水平高,而且工程实用性强,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(下册) = Vehicle-Track Coupled Dynamics  
(Volume 2)/翟婉明著. —4版. —北京:科学出版社,2015

ISBN 978-7-03-042600-0

I. ①车… II. ①翟… III. ①轮轨关系-耦合-动力学 IV. ①U211.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第275517号

责任编辑:余 丁 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:张 倩 / 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

\*

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月科学出版社第三版

2015年1月第四版 开本:720×1000 1/16

2015年1月第四次印刷 印张:18 3/4

字数:352 000

定价:120.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 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唯一手段,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,尚须经历相当长的艰苦历程。

仿真模拟取代实验的关键,除了必需的实验支持之外,是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的描述。只要有效地控制系统的运作条件在科学界定的范围之内,这一前景会确定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,学科发展的必然趋势,一定要向大系统综合模拟进军。

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,本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,已为本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)的博士论文在第十三届 IAVSD(国际车辆系统动力学协会)学术年会上一经发表,立刻在国

际铁路动力学学术界引起反响,除了在国际车辆系统动力学协会论文集、《Vehicle System Dynamics》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,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,恐怕会有特殊的价值。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,要在普通微机上实施仿真,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- $\beta$ 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- $\beta$ 法、Wilson- $\theta$ 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励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,将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,该书的学术和应用潜力还相当深广。至少在下列两个方面还大有发展前景:

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。但因为它们同隶属于耦合大系统,提出这些问题,在逻辑上是合乎情理的。

热忱地期望本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,由此而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显突出,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。中国铁路长期处于高负荷运输状态,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,已难以胜任;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1989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》,1992年在《铁道学报》上首次公开发表并阐述了车辆—轨道耦合动力学的基本原理,1993年在第十三届国际车辆系统动力学协会学术年会上宣读了相关研究论文并被收入《Vehicle System Dynamics》专刊。紧接着,笔者及其研究组在原国家教委“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年该书获得第十一届“中国图书奖”。1996~2001年间,笔者带领研究组(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不断资助下,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。在随后的几年中,笔者在该研究领域继续得到了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)的进一步资助,对车辆—轨道耦合动力学理论体系框架进行了研究与完善,于2007年2月诞生了系统介绍该理论体系和工程应用的第三版

《车辆—轨道耦合动力学》。

近年来,随着我国铁路跨越式发展,特别是高速铁路的迅猛发展,车辆—轨道耦合动力学有了更多、更广的应用需求。同时,新的问题也不断涌现,例如,既有线提速至 200~250km/h 后的行车安全问题、高速行车条件下轨道几何不平顺的影响及敏感波长问题、新一代时速 120km 重载货运机车通过小半径曲线的动态安全问题、30t 轴重货车对线路的动力作用问题、大运量重载铁路曲线钢轨侧磨问题、城市地铁线路轮轨动态相互作用相关问题等。通过对这些实际工程问题的广泛研究,一方面车辆—轨道耦合动力学理论研究更加深入、更加完善;另一方面,其应用范围更加广泛,应用范例更加丰富,而且紧密结合中国铁路工程实际。在此背景下,才催生了这本新的第四版《车辆—轨道耦合动力学》。

本书共十九章,分上、下两册。上册(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、动力性能评价方法、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;下册(后九章)介绍车辆—轨道耦合动力学的工程应用,以机车车辆与线路动态性能最佳匹配设计为主线,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铁路、重载铁路、提速铁路及城市地铁工程中的应用,并选取有代表性的一系列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,作者要向资助、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,科技部基础司,教育部人事司、科技司、人才办,铁道部科技司(现中国铁路总公司科技部),四川省科技厅以及有关机车车辆工厂、铁道设计院、铁路局和朔黄铁路公司等应用部门对本研究工作所提供的各方资助,尤其是近年来新获得的国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2013CB036200)资助和国家自然科学基金(高铁联合基金)重点项目(U1234209)资助。其次要感谢中国铁道科学研究院对作者的大力支持,特别是钱立新研究员、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、张格明研究员等,他们为作者提供了相关铁路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。还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已故的中国铁道科学研究院詹斐生研究员等前辈长期以来对作者的关心、指导与帮助。最后特别要感谢我的研究团队(包括历届研究生),特别是王开云研究员、蔡成标研究员、高建敏副研究员以及博士后韦凯、博士生刘鹏飞、硕士生涂贵军,他们全程参与了本书的修订(包括大量的算例分析)工



---

作,为书稿的整理和图表制作付出了辛勤劳动,本书的出版是大家共同努力的结果。

限于作者水平,书中不妥之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

翟婉明

2014年5月22日于成都西南交通大学

# 目 录

## 第一版序

## 前言

<b>第十一章 机车车辆与线路动态性能最佳匹配设计原理和准则</b> .....	255
11.1 机车车辆与线路动态性能匹配设计理念 .....	255
11.2 机车车辆与线路动态性能最佳匹配设计原理 .....	256
11.3 机车车辆与线路动态性能最佳匹配设计方法 .....	257
11.3.1 基于最佳匹配设计原理的机车车辆动态设计方法 .....	257
11.3.2 基于最佳匹配设计原理的线路动态设计方法 .....	258
11.4 机车车辆与线路动态性能最佳匹配设计准则 .....	258
11.4.1 机车车辆的低动力作用设计准则 .....	259
11.4.2 轨道结构的低动力作用设计准则 .....	262
参考文献 .....	267
<b>第十二章 列车提速对线路的动力影响及其对策</b> .....	268
12.1 我国既有铁路列车提速概况及其意义 .....	268
12.2 既有铁路列车提速给线路带来的动力问题 .....	271
12.3 提速线路道岔处轮轨冲击作用问题及其对策 .....	271
12.4 提速线路钢轨焊接区不平顺的动力效应及其控制 .....	274
12.5 提速线路路桥连接段的动力问题及其对策 .....	277
12.6 提速列车车轮擦伤对线路的动力影响及其对策 .....	279
12.7 200~250km/h 提速线路轨道几何不平顺的安全控制研究 .....	280
参考文献 .....	283
<b>第十三章 高速铁路车辆与轨道的动态相互作用</b> .....	285
13.1 高速铁路及其在中国的发展 .....	285
13.1.1 世界高速铁路及其发展 .....	285
13.1.2 中国高速铁路的发展 .....	287
13.2 高速铁路车辆与轨道垂向动态相互作用特征 .....	289
13.2.1 高速铁路轮轨冲击振动响应特征 .....	289
13.2.2 高速行车条件下偏心轮的动态效应 .....	291
13.2.3 高速列车车轮不圆引起的轮轨动力作用及其控制 .....	291
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 .....	293

13.3	高速铁路车辆与轨道横向动态相互作用特征 .....	296
13.3.1	列车运行速度对轮轨横向动态作用性能的影响 .....	296
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 .....	297
13.4	高速铁道车辆簧下质量的动力学效应及控制 .....	300
13.5	高速列车与轨道过渡段的动态作用问题及技术对策 .....	304
13.5.1	高速铁路轨道过渡段常用技术方法 .....	305
13.5.2	高速铁路轨道过渡段结构设计方案 .....	305
13.5.3	高速铁路轨道过渡段长度的理论设计 .....	306
13.5.4	高速铁路轨道过渡段折角的控制标准 .....	307
13.6	高速行车条件下轨道几何不平顺的敏感波长问题 .....	309
13.6.1	分析方法与分析对象 .....	309
13.6.2	高速铁路轨道几何不平顺波长对行车动力性能的影响规律 .....	310
13.6.3	高速铁路轨道几何不平顺的敏感波长分析 .....	314
	参考文献 .....	316
<b>第十四章</b>	<b>重载铁路车辆与轨道的动态相互作用 .....</b>	<b>317</b>
14.1	关于我国重载铁路运输及货车大型化问题 .....	317
14.2	大型重载货车对线路的动力影响 .....	319
14.3	减轻大型重载货车对线路动力作用的基本途径 .....	321
14.3.1	减轻大型重载货车对线路动力作用的两种途径 .....	321
14.3.2	英国低动力作用重载货车 LTF 的成功经验 .....	322
14.4	我国新型重载货车设计及其轮轨动力性能评价 .....	324
14.4.1	SWJ 转向架方案及轮轨动力作用性能预测与评价 .....	324
14.4.2	我国 25t 轴重低动力作用货车转向架的研制 .....	327
14.4.3	我国 30t 轴重货车轮轨动力作用分析 .....	330
14.5	重载铁路曲线钢轨侧磨问题及其对策 .....	335
14.5.1	重载铁路曲线段钢轨的磨耗问题 .....	335
14.5.2	基于轮轨动态相互作用的曲线段钢轨非对称打磨型面设计原理 .....	337
14.5.3	钢轨非对称打磨型面设计原理的数值实现 .....	341
14.5.4	工程实践及其效果 .....	346
	参考文献 .....	350
<b>第十五章</b>	<b>山区铁路小半径曲线轮轨动态相互作用 .....</b>	<b>352</b>
15.1	我国山区铁路小半径曲线轨道动力问题 .....	352
15.2	山区铁路小半径曲线轮轨相互作用特征 .....	353
15.2.1	静态轮轨接触几何特征 .....	355
15.2.2	轮轨动态相互作用特征 .....	356

15.3 山区铁路小半径曲线安全改造对策及实践效果 .....	359
15.3.1 强化前后轮轨动力性能的理论分析 .....	359
15.3.2 强化前、后轮轨动力性能的现场试验分析 .....	364
15.3.3 工程应用实践效果 .....	367
参考文献 .....	368
<b>第十六章 地铁线路轮轨动态相互作用 .....</b>	<b>369</b>
16.1 地铁线路的特点及其动力学问题 .....	369
16.1.1 地铁轨道结构的特点 .....	369
16.1.2 地铁线路的动力学问题 .....	381
16.2 地铁线路钢弹簧浮置板轨道的动力特性及减振适用性分析 .....	383
16.2.1 钢弹簧浮置板轨道的自振特性 .....	383
16.2.2 浮置板下钢弹簧支力点的特性 .....	387
16.2.3 钢弹簧浮置板轨道的适用性分析 .....	392
16.3 地铁线路钢轨焊接接头区的轮轨动力问题及其对策 .....	398
16.3.1 地铁线路钢轨焊接接头不平顺实测结果及分析 .....	399
16.3.2 地铁线路钢轨焊接接头不平顺引起的轮轨动力响应特征 .....	400
16.3.3 地铁钢轨焊接不平顺参数对轮轨动力响应的影响 .....	402
16.3.4 轨道弹性对焊接区轮轨动力作用的影响 .....	403
16.4 地铁线路极小半径曲线的行车安全分析评估 .....	407
16.4.1 极小半径曲线地铁行车安全性分析评估 .....	407
16.4.2 小半径复曲线地铁行车安全性研究 .....	412
参考文献 .....	415
<b>第十七章 车辆—轨道耦合动力学在行车安全研究中的应用 .....</b>	<b>417</b>
17.1 车辆—轨道耦合动力学在线路不平顺安全限值研究中的应用 .....	417
17.1.1 轨道几何不平顺安全限值的理论分析方法 .....	418
17.1.2 轨道方向不平顺安全限值分析 .....	418
17.1.3 轨距不平顺安全限值分析 .....	419
17.1.4 轨道高低不平顺安全限值分析 .....	420
17.1.5 轨道水平不平顺安全限值分析 .....	420
17.1.6 轨道三角坑不平顺安全限值分析 .....	421
17.1.7 轨道复合不平顺安全限值分析 .....	422
17.2 车辆—轨道耦合动力学在列车通过道岔安全性评估中的应用 .....	425
17.2.1 机车车辆侧向通过 12 号提速道岔时运行安全性分析 .....	425
17.2.2 行车速度对机车车辆侧向通过道岔安全性的影响 .....	426
17.2.3 评估结论 .....	427

17.3	车辆—轨道耦合动力学在脱轨评判研究中的应用	427
17.3.1	现行脱轨评判标准及其缺陷	428
17.3.2	根据车轮抬升量判定车辆脱轨的原理	433
17.3.3	单轮对脱轨仿真研究	434
17.3.4	整车脱轨仿真研究	440
17.3.5	评判车辆脱轨的新准则	442
17.4	车辆—轨道耦合动力学在重载列车脱轨研究中的应用	445
17.4.1	车钩纵向压力作用下车体的受力分析及振动方程	446
17.4.2	车钩大自由摆角状态下的轮轨动态相互作用性能分析	448
17.4.3	车钩自由摆角对重载机车运行安全性的影响及其安全设计	449
	参考文献	451
<b>第十八章</b>	<b>车辆—轨道耦合动力学在机车车辆设计中的应用</b>	<b>453</b>
18.1	提速客运机车 SS <sub>7E</sub> 动力性能改进设计	453
18.1.1	工程背景	453
18.1.2	SS <sub>7E</sub> 原型机车横向异常振动现象的理论模拟	453
18.1.3	改进 SS <sub>7E</sub> 机车横向振动性能的技术方案研究	455
18.1.4	改进设计后 SS <sub>7E</sub> 提速机车的实际效果及运用情况	457
18.2	时速 200km 天梭号电力机车动力性能优化设计	459
18.2.1	天梭号机车动力学参数优化设计	459
18.2.2	天梭号机车动力性能仿真预测与评估	461
18.2.3	天梭号机车对线路动力作用分析评估	463
18.2.4	天梭号机车实车运行试验考核结果	465
18.3	新一代重载货运机车 HX <sub>D</sub> 2C 动力学性能改进设计	466
18.3.1	工程背景	466
18.3.2	HX <sub>D</sub> 2C 原型机车通过小半径曲线的运行安全性分析	467
18.3.3	改善 HX <sub>D</sub> 2C 重载机车曲线通过性能的优化方案研究	467
18.3.4	HX <sub>D</sub> 2C 重载机车改进设计后的实际运用效果	470
	参考文献	473
<b>第十九章</b>	<b>车辆—轨道耦合动力学在铁路线路设计中的应用</b>	<b>474</b>
19.1	秦沈客运专线无砟轨道建设工程应用与实践	474
19.1.1	秦沈客运专线及其桥上无砟轨道结构概况	474
19.1.2	高速列车与桥上无砟轨道的动态相互作用模型	476
19.1.3	秦沈客运专线桥上无砟轨道动力特性及列车走行性能预测	477
19.1.4	秦沈客运专线桥上无砟轨道动力特性及列车走行性能预评估	480
19.1.5	秦沈客运专线桥上无砟轨道现场实际效果	481

19.2	京秦铁路时速 200km 提速改造工程应用与实践 .....	482
19.2.1	京秦铁路基本状况及提速改造初步方案 .....	483
19.2.2	京秦铁路提速试验列车及其参数 .....	483
19.2.3	试验区轨道几何不平顺状态 .....	485
19.2.4	列车与线路动力性能评定标准 .....	486
19.2.5	京秦铁路时速 200km 提速改造工程路基加固动力仿真计算结果 .....	487
19.2.6	对京秦铁路时速 200km 提速改造工程路基加固方案的预评估与建议 .....	490
19.3	福厦客货共线高速铁路设计应用与实践 .....	492
19.3.1	工程与研究背景 .....	492
19.3.2	平面曲线关键参数对高、低速行车动力性能的影响分析 .....	493
19.3.3	高低速客货共线铁路平纵面匹配设计 .....	496
19.3.4	高、低速列车对客货共线高速铁路轨道结构动力影响研究 .....	497
19.3.5	减轻货物列车对客货共线铁路轨道动力作用的技术措施研究 .....	500
19.3.6	工程实施与运营实践效果 .....	501
19.4	广深港高速铁路平纵断面设计应用与实践 .....	502
19.4.1	工程与研究背景 .....	502
19.4.2	沙仔岛长隧方案与桥隧方案高速行车性能对比分析 .....	504
19.4.3	海鸥岛长隧方案与桥隧方案高速行车性能对比分析 .....	506
19.4.4	沙仔岛与海鸥岛长隧方案比选 .....	507
19.4.5	工程实施与运营实践效果 .....	507
	参考文献 .....	508
	附录 .....	509
	附录 1 轮轨接触椭圆参数表 .....	509
	附录 2 Kalker 线性蠕滑理论之系数 $C_{ij}$ .....	511
	附录 3 常见铁道机车车辆基本参数 .....	512
	附录 4 常用轨道结构基本参数 .....	517
	索引 .....	521

# 第十一章 机车车辆与线路动态性能 最佳匹配设计原理和准则

上册系统阐述了车辆—轨道耦合动力学的理论体系,包括学术思想、理论模型、数值方法、仿真方法、试验方法及评价方法;下册将介绍车辆—轨道耦合动力学理论方法在工程实践中的应用,包括在铁路提速、高速铁路、重载铁路、山区铁路及地铁等工程领域中的应用,并对一些典型工程(产品)应用实例进行简要介绍。

作为贯穿整个工程应用始终的一种基本理念和共性技术,本章首先介绍作者提出的机车车辆与线路动态性能最佳匹配设计原理和方法,在此基础上,阐述运用这一最佳匹配设计原理研究得出的机车车辆与线路匹配设计中应遵循的七项基本准则。

## 11.1 机车车辆与线路动态性能匹配设计理念

现代铁路运输发展趋势是行车速度不断提高,运载重量不断增大,运行安全平稳性不断提高。由此而导致机车车辆与线路结构之间的动态相互作用日益增强。一方面,机车车辆对线路的动力破坏作用加剧;另一方面,轨道结构振动及线路几何状态对机车车辆运行品质(平稳性)乃至运行安全性的影响也越来越强。对于中国铁路而言,由于长期处于超负荷运输状态,反复提速和货运重载化更加剧了机车车辆与线路的动态相互作用,因此需要特别重视减轻这种有害作用。

中国铁路承担着全国客运总量的 1/3 以上、货运总量的 1/2 以上。而路网密度低(仅为 0.56km/万人),仅为美国的 1/10,德国、法国的 1/8;运输密度高(平均换算运输密度达 3217 换算万吨公里/km),居世界铁路之首。主要铁路干线长期处于超负荷状态,就这样也只能满足社会需求的 60%。在如此高的运输负荷下,中国铁路客、货运量仍以年均 8% 和 4% 的速率不断增长,据初步预测,到 2020 年,全国铁路旅客、货物运输需求将分别达 40 亿人次、40 亿吨。然而,对于如此高的运输负荷,中国既有铁路的技术装备水平却很低,线路标准又不高,与发达国家相比差距较大。对于既有铁路而言,双线里程仅占铁路总里程的 38.3%,电气化率仅为 28.6%,重载铁路比重仅为 9%。长期超负荷运输对机车车辆运行安全可靠构成严重威胁,线路几何状态日益恶化,养护维修工作量剧增。

众所周知,轮轨运输系统的功能中心是轮轨间的相互作用,而轮轨间的动作用力则是这种功能发挥得好坏的关键因素,它是引起机车车辆与轨道线路系统振动、冲击、疲劳、损伤的直接根源,从而也是导致轮轨系统状态破坏与功能丧失的主要原因。因此,最大限度地减轻轮轨间的动力作用,是确保铁路轮轨运输系统长期处于良好状态并高效运转的关键。我国发展现代化铁路,应以此作为技术突破口,发展低动力作用的高速、重载铁路轮轨系统。

影响轮轨相互动力作用的因素是多方面的,既有机车车辆的,如结构型式、悬挂参数;又有轨道结构的,如支承方式与基础弹性;而且牵涉到轮轨界面状态,如轨面几何不平顺、接头状态、车轮擦伤、踏面圆顺度等。由于车辆系统与轨道结构相互影响、相互制约,构成了一个相当复杂的动力学闭环反馈系统,因此,两个子系统的动态性能匹配关系是影响轮轨相互作用的关键。由此可见,要减轻轮轨相互作用,需要运用系统工程的方法,综合考虑轮轨大系统的结构、参数及其匹配关系。

为了最大限度地降低机车车辆与线路之间的动态作用,作者提出了机车车辆与线路动态性能最佳匹配设计理念<sup>[1]</sup>。这里所谓的“最佳匹配设计”,指机车车辆系统和线路系统在动态性能设计上要相互适应、相互匹配,以期实现现代铁路机车车辆和线路系统动态性能的最优设计。

## 11.2 机车车辆与线路动态性能最佳匹配设计原理

为了实现机车车辆与线路系统动态性能的最佳匹配,必须采用系统设计思想,将机车车辆系统和线路系统作为一个相互作用、相互耦合的整体大系统,以整体系统动态性能指标作为优化目标,进行综合优化设计。这是匹配设计的总体原理,但在具体设计过程中仍然是以某个子系统(机车车辆或线路)为主体设计对象,并非是两个子系统同时交互化设计(这还受限于目前专业划分和设计部门分工等因素)。与传统子系统设计不同的是,在设计某一系统时,并非是孤立考虑该系统,而是要充分考虑与之密切相关的另一系统的动态作用影响;在进行动态设计过程中,除了考虑自身系统动态性能之外,也必须考察该系统对另一系统的动态作用影响,即考察该系统是否与相关系统相匹配。为了实现上述匹配设计构想,需要借助于机车车辆—轨道耦合动力学理论及其计算机仿真分析平台。

图 11.1 给出了机车车辆与线路匹配设计基本原理。无论设计主体对象是机车车辆还是线路,都将对方视为主体对象的动态环境,通过机车车辆—轨道耦合动力学理论方法考虑对方的动态影响因素,进行主体对象动力性能优化设计,同时分析评估主体设计对象对另一系统的动态作用影响,再根据动态作用影响的评估结果改进主体对象结构设计参数,重新考察主体对象的动力性能,重新评估



主体对象对另一系统的动态影响指标,如此反复,直到整体系统动态性能最优为止。

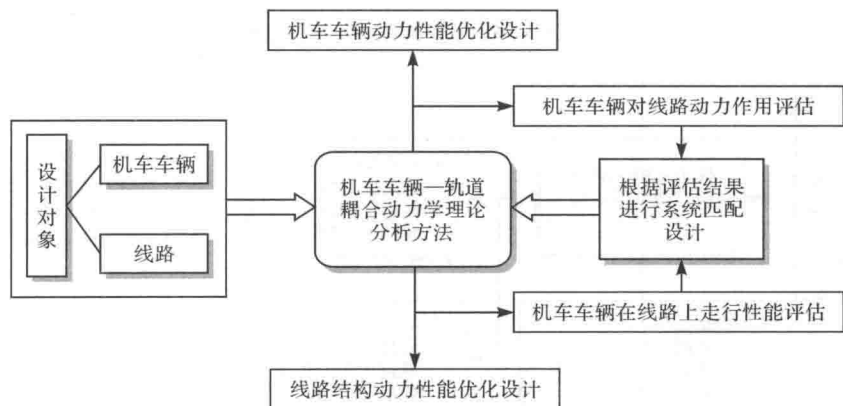


图 11.1 机车车辆与线路动态性能最佳匹配设计原理框图

需要进一步说明的是,当设计主体对象为机车车辆时,其对线路动态影响指标可主要考虑机车车辆对线路动力作用性能指标,即轮轨作用力及线路动态变形指标等;而当设计主体对象是线路时,其对机车车辆动态影响指标可定义为机车车辆在轨道上的走行性能指标,即运行平稳性及轮轨动态安全性指标。

### 11.3 机车车辆与线路动态性能最佳匹配设计方法

基于上述匹配设计原理,借助于机车车辆—轨道耦合动力学仿真设计技术平台,可以提出实现系统最佳匹配的机车车辆动态设计方法和线路动态设计方法。

#### 11.3.1 基于最佳匹配设计原理的机车车辆动态设计方法

如图 11.2 所示,将机车车辆初始设计方案(机车车辆动力学模型参数),连同该车将来运营的线路条件(轨道结构参数及线路平纵断面参数),输入到机车车辆—轨道耦合动力学仿真分析系统之中;分析预测机车车辆动态响应,包括运动稳定性、运行平稳性及曲线通过性能,同时分析得出机车车辆对线路的动力作用指标(轮轨作用力、轨道动态变形量及轨道动应力);根据有关机车车辆动力学性能评定标准及轮轨动力作用评价标准,对上述动态响应指标进行综合评估,并由此评价机车车辆设计的合理性;若非理想设计,找出动力性能较差的指标及对这些指标敏感的机车车辆结构参数(如机车车辆悬挂刚度、阻尼及簧下质量等参数);优化相关结构参数,重新输入仿真设计平台进行动力性能分析与评估;如此