

翟婉明 著

# 车辆—轨道耦合动力学

(第四版)

上册

**Vehicle-Track Coupled Dynamics**

(Fourth Edition)

Volume 1

by Zhai Wanming



科学出版社

# 车辆—轨道耦合动力学

(第四版)

上册

**Vehicle-Track Coupled Dynamics**

(Fourth Edition)

Volume 1

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(上册) = Vehicle-Track Coupled Dynamics  
(Volume 1)/翟婉明著. —4版. —北京:科学出版社,2015

ISBN 978-7-03-042601-7

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 278732 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:17

字数:320 000

定价:110.00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 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,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、大运力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,国家博士学位点基金,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

第一章 车辆—轨道耦合动力学导论 .....	1
1.1 车辆—轨道耦合动力学的研究背景 .....	1
1.2 车辆—轨道耦合动力学的学术思想 .....	3
1.3 车辆—轨道耦合动力学的基本范畴 .....	5
1.4 车辆—轨道耦合动力学的研究方法 .....	7
参考文献 .....	10
第二章 车辆—轨道耦合动力学模型 .....	11
2.1 论车辆—轨道耦合系统的模型化 .....	11
2.1.1 轮轨动力分析模型的演进 .....	11
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 .....	41
2.3.1 物理模型 .....	42
2.3.2 数学模型 .....	51
2.4 轮轨空间动态耦合模型 .....	77
2.4.1 轮轨系统坐标系及其变换 .....	77
2.4.2 轮轨空间动态耦合模型 .....	79
参考文献 .....	89
第三章 车辆—轨道耦合系统激励模型 .....	95
3.1 车辆—轨道耦合动力学模型中激励的输入方法 .....	95
3.1.1 定点激振输入法 .....	95
3.1.2 移动车辆激励输入法 .....	96
3.2 脉冲型激扰模型 .....	97
3.2.1 车轮扁疤冲击模型 .....	97

3.2.2	钢轨错牙接头模型	101
3.2.3	轨道低接头模型	102
3.2.4	道岔冲击模型	103
3.2.5	其他脉冲激励模型	106
3.3	谐波型激励模型	107
3.3.1	谐波激励位移输入模式	107
3.3.2	轨道常见几何不平顺的输入模式	113
3.3.3	周期性简谐力输入函数	115
3.4	动力型轨道刚度不平顺模型	116
3.4.1	轨道过渡段刚度不平顺	116
3.4.2	道岔区轨道刚度不平顺	118
3.4.3	轨下基础结构缺陷的模拟	119
3.5	轨道随机不平顺激励模型	120
3.5.1	美国轨道谱	121
3.5.2	德国轨道谱	122
3.5.3	中国轨道谱	123
3.5.4	中国轨道谱与国外典型轨道谱的比较	125
3.5.5	轨道随机不平顺时域样本的数值模拟方法	128
	参考文献	131
<b>第四章</b>	<b>车辆—轨道耦合动力学数值求解方法</b>	<b>133</b>
4.1	大型非线性动力学系统的数值求解问题	133
4.2	大系统动态分析的新型快速数值积分方法	135
4.2.1	新型快速显式积分法(翟方法)	135
4.2.2	新型预测—校正积分法	140
4.2.3	非线性问题的数值积分形式	141
4.2.4	新型数值积分方法的数值精度考核	142
4.2.5	结论	145
4.3	复杂非线性问题计算稳定性的数值试验方法	146
4.3.1	关于非线性系统的数值积分稳定性	146
4.3.2	数值试验方法	146
4.4	新方法在车辆—轨道耦合动力学数值分析中的应用	147
4.4.1	数值积分步长的确定	148
4.4.2	轨道计算长度的确定	149
4.4.3	钢轨模态阶数的确定	150
	参考文献	150

<b>第五章 车辆—轨道耦合动力学的计算机仿真</b> .....	153
5.1 车辆—轨道垂向相互作用仿真分析系统 VICT .....	153
5.1.1 VICT 系统的结构 .....	153
5.1.2 VICT 系统的仿真计算流程 .....	154
5.1.3 VICT 系统的功能 .....	155
5.2 车辆—轨道空间耦合动力学仿真分析系统 TTISIM .....	156
5.2.1 TTISIM 系统的结构 .....	156
5.2.2 TTISIM 系统计算流程 .....	158
5.2.3 TTISIM 系统的功能 .....	158
5.3 机车车辆在线路上动态运行行为的可视仿真 .....	160
参考文献 .....	164
<b>第六章 车辆—轨道耦合动力学现场试验</b> .....	165
6.1 车辆—轨道耦合动力学现场试验方法 .....	165
6.1.1 车辆在线路上运行动力学现场试验方法 .....	165
6.1.2 车辆与轨道动态作用现场试验方法 .....	166
6.2 车辆在线路上动态运行行为的典型现场试验 .....	171
6.2.1 典型高速动车组车辆运行动力学试验 .....	171
6.2.2 典型货车车辆运行动力学试验 .....	176
6.3 车辆与轨道动态作用的典型现场试验 .....	179
6.3.1 秦沈客运专线高速列车轮轨动态作用现场试验 .....	179
6.3.2 大秦重载铁路万吨列车对轨道动态作用现场试验 .....	184
6.3.3 山区铁路(成渝线)小半径曲线轮轨动态相互作用现场试验 .....	186
参考文献 .....	191
<b>第七章 车辆—轨道耦合动力学模型的试验验证</b> .....	192
7.1 车辆—轨道垂向统一模型的试验验证 .....	192
7.1.1 车辆振动的理论分析结果与试验结果对照 .....	192
7.1.2 轨道结构振动的理论分析结果与试验结果对照 .....	193
7.1.3 轮轨作用力的理论分析结果与试验结果对照 .....	196
7.1.4 车辆—轨道垂向统一模型验证结论 .....	198
7.2 车辆—轨道空间耦合模型的试验验证 .....	198
7.2.1 京秦线时速 200km 提速试验验证 .....	198
7.2.2 秦沈客运专线高速试验验证 .....	202
7.2.3 货物列车直线段脱轨试验验证 .....	204
7.2.4 山区铁路小半径曲线轮轨动态作用试验验证 .....	205
7.2.5 车辆—轨道空间耦合模型验证结论 .....	206

参考文献 .....	206
<b>第八章 车辆—轨道耦合模型与传统模型结果比较</b> .....	208
8.1 车辆运动稳定性计算结果的比较 .....	208
8.1.1 车辆运动稳定性的数值计算方法 .....	208
8.1.2 耦合模型与传统模型计算的临界速度结果比较 .....	209
8.1.3 小结 .....	211
8.2 车辆运行平稳性计算结果的比较 .....	211
8.3 车辆曲线通过性能计算结果的比较 .....	213
8.3.1 车辆低速通过小半径曲线时动力性能计算结果之比较 .....	213
8.3.2 车辆高速通过大半径曲线时动力性能计算结果之比较 .....	216
8.3.3 几点结论 .....	217
参考文献 .....	217
<b>第九章 车辆—轨道耦合振动的基本特征</b> .....	219
9.1 车辆—轨道耦合系统的冲击响应 .....	219
9.1.1 垂向冲击振动响应 .....	219
9.1.2 横向冲击振动响应 .....	222
9.2 车辆—轨道耦合系统对谐波型激励的振动响应 .....	224
9.2.1 垂向谐波振动响应 .....	224
9.2.2 横向谐波振动响应 .....	226
9.3 轨道动力型不平顺对车辆—轨道耦合振动的影响 .....	228
9.3.1 扣件失效的影响 .....	228
9.3.2 轨枕空吊的影响 .....	229
9.3.3 道床板结的影响 .....	229
9.4 车辆—轨道耦合系统随机振动响应 .....	230
9.4.1 车辆—轨道耦合系统随机振动分析方法 .....	230
9.4.2 车辆—轨道耦合系统随机振动响应特征 .....	231
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 .....	235
参考文献 .....	238
<b>第十章 车辆—轨道耦合系统动力学性能评价</b> .....	240
10.1 车辆—轨道耦合系统动力学性能评价指标体系 .....	240
10.1.1 关于车辆运行安全性的评价 .....	240
10.1.2 关于车辆运行平稳性的评价 .....	241
10.1.3 关于车辆与轨道动态作用性能的评价 .....	241
10.1.4 车辆—轨道耦合系统动力学性能评价指标体系 .....	243
10.2 车辆运行安全性评价标准 .....	243

---

10.2.1	脱轨系数	243
10.2.2	轮重减载率	245
10.2.3	倾覆系数	246
10.3	车辆运行平稳性评价标准	246
10.3.1	车体振动加速度	246
10.3.2	平稳性指标	248
10.3.3	车辆通过曲线时的舒适度标准	250
10.4	车辆与轨道动态作用性能评价标准	250
10.4.1	轮轨垂向力	250
10.4.2	轮轨横向力	251
10.4.3	轮轴横向力	251
10.4.4	线路横向稳定性系数	252
10.4.5	轮轨接触应力	252
10.4.6	道床应力	252
10.4.7	路基应力	253
	参考文献	253

# 第一章 车辆—轨道耦合动力学导论

车辆—轨道耦合动力学作为一种全新的理论体系,是在什么样的背景下开展研究的?其学术思想是什么?它的研究范畴及研究方法又是怎样?本章将一一予以阐述。

## 1.1 车辆—轨道耦合动力学的研究背景

铁路是交通运输的大动脉,对社会经济的发展起着十分重要的作用。铁路运输系统属轮轨接触式运输系统(简称“轮轨系统”),铁道机车车辆(本书统称为“车辆”)<sup>①</sup>和轨道是其核心组成部分,二者通过轮轨相互作用实现轮轨运输功能。轮轨相互作用是铁路运输区别于其他运输方式的本质特征。

长期以来,针对铁道车辆动力学和轨道结构振动问题的研究一直是分开进行的,由此形成了车辆动力学、轨道动力学两个相对独立的学科领域<sup>[1~6]</sup>。经典的车辆动力学<sup>[1~3]</sup>,以车辆系统为研究对象,将轨道结构视为“刚性支承基础”(即刚性固定边界),不考虑轨道系统振动对车辆系统的动态影响,而将轨面几何不平顺视为车辆系统的外部激励,研究车辆在刚性轨面上的运动稳定性、运行安全性与平稳性,其基本模型如图 1.1 所示;经典的轨道动力学<sup>[4~6]</sup>,常常将车辆简化为轨道系统的外部激励荷载  $Pe^{i\omega t}$ (简谐变化的车辆荷载  $P$  定点激励或以车速  $v$  移动激励),分析轨道结构振动响应特性及变形特性,其基础模型如图 1.2 所示。通过世界各国铁路科学工作者的长期研究与实践,车辆动力学理论和轨道动力学理论日臻成熟,在车辆动力学模型、轮轨接触几何学、轮轨蠕滑理论、车辆运动稳定性、车辆曲线通过性能及轨道结构振动特性、轨道受力与变形特性等方面取得了系统性研究成果,为揭示和认识车辆动力学性能、轨道动力特性奠定了理论基础,对铁路运输事业的发展起到了极大的推动作用。

现代轨道交通运输的飞速发展,特别是列车运行速度、运载重量和运输密度的大幅度提高,使得铁路车辆与轨道系统动力学问题更加突出,也更趋复杂。列车运行速度越高,车辆与轨道之间的动态相互作用越强,行车安全性与乘车舒适性问题越显突出,既要保证列车高速(快速)通过线路平纵断面曲线、道岔及桥头过渡段等关键路段时不颠覆、不脱轨,又要保证机车车辆在线路激励下能平稳运

<sup>①</sup> 按国际惯例,机车、车辆(包括客车和货车)常通称为“车辆”。

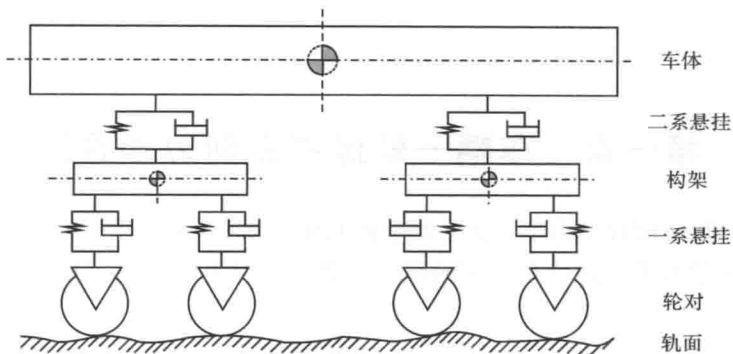


图 1.1 经典的车辆动力学模型

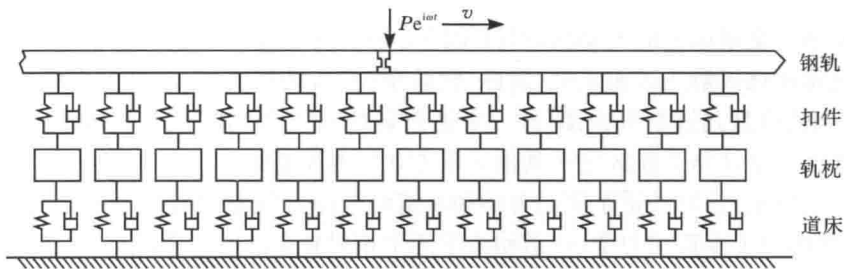


图 1.2 经典的轨道动力学模型

行、乘坐舒适；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，必须最大限度地减轻轮轨之间的动力作用。总之，客运高速化、货运重载化大大加剧了车辆与轨道的动态相互作用。中国铁路由于其自身特点及其发展需要导致了更为突出的车辆/轨道相互作用问题。

中国铁路长期处于高负荷运输状态。一方面，路网密度极低，仅为欧美发达国家的  $1/5 \sim 1/10$ ；另一方面，运量大、运输密度高，居世界铁路之首。目前，中国铁路以  $6\%$  的世界铁路营业里程，完成了世界铁路  $1/4$  的运量！就这样也只能满足社会需求的  $60\%$ 。而中国既有铁路<sup>①</sup>网的运输模式一直是“客货共线”，即客、货列车在同一线路上运营，且既有铁路设计标准低。为了适应社会经济快速发展的需要，中国铁路还不得不在结构薄弱的轨道上反复提速，并发展重载货运。其结果是，在有效提高运能的同时，严重加剧了机车车辆与线路结构之间的动态相互作用。一方面，列车对轨道的动力破坏作用加剧，直接影响线路结构疲劳寿命及养护维修成本；另一方面，线路几何变形及下沉增大，线路结构振动对列车系统的振动影响增强，从而恶化了列车运行动态环境；特别是，轮轨界面伤损及磨耗引发

① “既有铁路”泛指原有的旧铁路（不包含新建的高速铁路）。



的振动冲击问题更显突出,导致轮轨动态安全问题突出。

因此,深入细致地开展机车车辆与轨道系统动态相互作用研究,显得十分必要。只有深刻认识车辆—轨道动态作用机制,掌握车辆与轨道系统相互作用规律,才有可能获得最大限度地减轻轮轨动力作用的途径,实现现代铁路机车车辆与轨道结构的最佳匹配设计,确保列车安全、平稳、高效运营。由于经典的车辆动力学、轨道动力学理论体系采用的是将机车车辆和铁路轨道分离成两个相对独立的子系统的研究方法,不能解决上述复杂、大系统、动态相互作用问题,如机车车辆对轨道结构的动力作用问题。在此背景下,作者于20世纪80年代末、90年代初提出了从车辆、轨道整体系统的角度开展车辆—轨道耦合动力学研究的设想,并付诸实践<sup>[7~12]</sup>。1991年,作者完成了博士学位论文《车辆—轨道垂向耦合动力学》<sup>[7]</sup>;1992年首次公开发表并阐述了车辆—轨道耦合动力学的基本原理<sup>[8]</sup>;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<sup>[9]</sup>;1997年,出版了本领域第一本学术专著《车辆—轨道耦合动力学》(第一版)<sup>[12]</sup>。

## 1.2 车辆—轨道耦合动力学的学术思想

概括地说,车辆—轨道耦合动力学的基本学术思想是,将车辆系统和轨道系统视为一个相互作用、相互耦合的整体大系统,将轮轨相互作用关系作为连接这两个子系统的“纽带”,综合考察车辆在弹性(阻尼)轨道结构上的动态运行行为、轮轨动态相互作用特性,以及车辆对线路的动力作用规律。

事实上,铁道车辆与轨道是铁路轮轨运输系统中密不可分的两大组成部分,二者通过轮轨相互作用系统构成一个整体,如图1.3所示。车辆在轨道上的运动是一个复杂的动力学相互作用过程,牵涉众多因素,既有车辆方面的,又有轨道方面的,而且还相互渗透、互相影响。例如,轨道的几何变形会激起车辆系统振动,而车辆振动经由轮轨接触界面作用力的传递,又会引起轨道结构振动的加剧,反过来助长了轨道的几何变形。可见,影响和控制这一动态相互作用行为的根源在于轮轨之间的动态作用力。

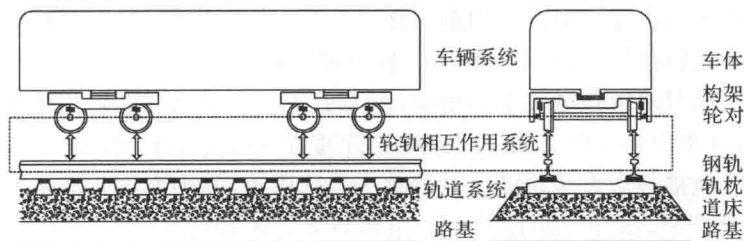


图 1.3 铁路轮轨运输系统构成