

规划图书

铁道车辆

系统动力学及应用

罗仁 石怀龙 / 编著



Dynamics of Railway Vehicle
Systems and Application

“十三五”规划图书

铁道车辆

系统动力学及应用

罗仁 石怀龙 / 编著

Dynamics of Railway Vehicle
Systems and Application

图书在版编目(CIP)数据

铁道车辆系统动力学及应用 / 罗仁, 石怀龙编著.

—成都: 西南交通大学出版社, 2018.1

高等教育“十三五”规划图书

ISBN 978-7-5643-6015-3

I. ①铁… II. ①罗… ②石… III. ①铁路车辆—系统动力学—高等学校—教材 IV. ①U270.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第008687号

高等教育“十三五”规划图书

铁道车辆系统动力学及应用

TIEDAO CHELIANG XITONG DONGLIXUE JI YINGYONG

罗仁 石怀龙 / 编著

责任编辑 / 李伟

封面设计 / 墨创文化

西南交通大学出版社出版发行

(四川省成都市二环路北一段111号西南交通大学创新大厦21楼 610031)

发行部电话: 028-87600564 028-87600533

网址: <http://www.xnjdcbs.com>

印刷: 四川煤田地质制图印刷厂

成品尺寸 185 mm × 260 mm

印张 26 字数 648 千

版次 2018年1月第1版 印次 2018年1月第1次

书号 ISBN 978-7-5643-6015-3

定价 89.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

车辆是在地面快速移动的载运工具，其性能，如稳定性、安全性、平稳性、维修性等，以前只能靠简化或拆分成一两个自由度的模型，用解析法，进行动力学计算，由此构成传统的车辆动力学学科，能分析 5 或 7 个自由度模型，就是最高水平了。20 世纪 60 年代，计算机问世，用数值法分析，几十、几百甚至无穷多个自由度模型都不在话下，用到车辆动力学上面，就可以考虑任意复杂的整个车辆系统，得到更多、更准确的车辆动力学参数。这就使 20 世纪 70 年代形成的车辆系统动力学，很快从理论与应用力学联盟（IUTAM）中分离出来，成为独立的车辆系统动力学国际协会（IAVSD）。

西南交通大学牵引动力国家重点实验室前期从 20 世纪 70 年代末、80 年代初就完成了从车辆动力学向车辆系统动力学的过渡，并着手研制 450 km/h 的整车动力学性能模拟试验台，90 年代建成，参与了 25 种高速列车动力学参数优化并进行了所有研制产品的整车模拟试验，同时把系统动力学计算结果与试验结果相比较，验证试验结果，提出试验车辆的改进方向，起到了不可替代的作用。在理论结合实践的研究过程中，不断完善和发展了铁道车辆系统动力学，包括车线耦合、弓网耦合、流固耦合、机电耦合等大系统动力学。到了 21 世纪初，西南交通大学牵引动力国家重点实验室在我国跨越式发展高速铁路的高潮和研制复兴号的创新发展中，大显身手，不仅参与了所有动车组的动力学参数优化，进行了所有型号动车组的整车实验研究，而且进行了几百万千米的高速列车运营中的跟踪试验，获取了海量数据，为动车组再设计、再制造提供了宝贵的资料。如今高铁成网，技术冠全球。我们的复兴号以世界最高运营速度 350 km/h 运行时，安全指标脱轨系数只有 0.2~0.3，比国际标准低得多；平稳性指标 2.0，低于标准 2.5。有外国人用竖立外币来测试，在我国车速 300 km/h 的动车上，长时间不

倒，在车速不超过 270 km/h 的日本东海道新干线上，根本立不起来。这些辉煌当然是整个国家高铁技术创新体系共同努力的成果，但在理论开路，试验兜底上，牵引动力国家重点实验室中车辆系统动力学研究的贡献是不可不提的。

罗仁副研究员全面总结了牵引动力国家重点实验室动力学课题组对我国铁道车辆系统动力学问题长期研究的成果，写成《铁道车辆系统动力学及应用》一书。这本书是我国近年来铁道车辆系统动力学研究的结晶，对动力学理论进行了深入浅出的阐述，系统总结了车辆系统动力学的边界条件、研究方法、评价体系、试验方法、典型动力学问题的解决方案和最新研究进展，是高速列车大系统耦合动力学中车辆系统动力学的核心内容。该书图文并茂、内容翔实、数据丰富、理论和工程紧密结合，是铁道车辆系统动力学研究不可多得的著作，可作为研究生教材和工程技术人员及科研工作者的参考书。相信该书的出版对提升和完善动车组系统动力学的研究具有重要的意义，也必将有利于我国高速铁路的发展。

沈志云

中国科学院院士，中国工程院院士

二〇一七年八月二十五日

我国铁路运输在 21 世纪取得了突飞猛进的发展。最近十年来,我国高速列车经历了一条从技术引进到消化吸收,最后自主创新的发展之路。最近具有自主知识产权的“复兴号”中国标准动车组投入运营,标志着我国高速列车技术进入了新阶段。近年来,城市轨道列车也取得了众多进展,开发出了各种城际列车、市域列车、地铁列车、低地板列车、跨座式列车和吊挂式列车。我国货车技术也在不断发展,包括各种稳定可靠的新型转向架、重载列车和提速快捷货车的深入研究和广泛运用。

车辆系统动力学是铁道车辆的重要基础理论,也是一门紧密结合工程实际的学科。我国在发展高速列车的过程中,车辆系统动力学发挥了重要作用,为高速列车悬挂参数优化、安全舒适地运行、减振降噪等相关动力学问题的解决提供了理论保障和研究平台,在车辆系统动力学的支撑下,我国高速动车组技术不断进步。不同形式的城轨列车补充了车辆系统动力学的研究内容,并且形成了具有特殊性的城轨车辆动力学评价体系、建模仿真方法和试验方法。我国货运列车除了向重载发展之外,近年来一直在研究高速快捷货运列车,这也离不开车辆系统动力学的支撑。在我国铁路运输不断发展的同时,车辆系统动力学也得到了大力发展,尤其是理论与工程结合,贯穿了每种车型的发展轨迹。我国铁道车辆在大量运营实践中发现了许多动力学现象和问题,为车辆系统动力学的研究提供了基础,大大丰富了车辆系统动力学的研究内容。

近年来,我国学者出版了多本关于轨道车辆系统动力学的书籍,包括很多专著和教材。在对我校研究生授课过程中,以及和工程技术人员交流过程中,发现大部分专著针对性太强,不太适合相关工程技术人员基础知识学习和解决车辆工程实际问题,也不适合用于研究生课程“车辆系统动力学”的讲授。现有的教材

要么内容过于宽泛，铁道车辆的专业知识篇幅较少；要么偏重于基础理论，缺乏与我国工程实践的结合，尤其是缺少我国高速列车领域最新的动力学研究成果和应用。在我国轨道交通快速发展的这十几年中，本书作者及所在团队有幸参与了这一过程并在车辆动力学领域做出了相应贡献，主研或参与了绝大部分动车组及大量货物列车、城轨列车的动力学研究，包括动力学仿真、台架试验和线路测试。为此，结合我们多年来在车辆系统动力学领域的部分研究进展和工程经验编写了这本书。本书既可用于研究生教学，也可以供相关工程技术人员参考。

本书分为三个部分：第一部分是车辆系统动力学和相关学科的基础知识，包括振动力学理论、轮轨接触关系和蠕滑理论、车辆系统动力学研究概述以及车辆系统动力学边界条件；第二部分是车辆系统动力学理论，包括蛇行运动稳定性理论、车辆系统随机振动理论、车辆曲线通过理论、列车动力学等；第三部分是工程应用，包括动力学性能评价体系、动力学台架和线路试验、动力学仿真和控制等。很多工程应用实例分布在相关章节中，限于篇幅没有深入探讨，仅给出了基本过程和基本结论。本书注重基础理论和工程应用的融会贯通，更注重基本概念和知识点的深入理解，力求做到深入浅出，适应不同层次读者的需求。

本书由罗仁编写了除第 10 章以外的章节，并最终统稿；石怀龙编写了第 10 章，并在后期对书稿进行了校正。本书部分内容引用了研究团队硕士和博士研究生的学位论文，特别是高浩、郝建华、干锋和李忠继的学位论文；部分工程应用实例参考了牵引动力国家重点实验室的相关报告，还有部分图片和示例来源于网络，在此一并致谢。

感谢牵引动力国家重点实验室曾京教授、邬平波研究员、张卫华教授、戴焕云研究员、池茂儒研究员、王勇副研究员、王建斌博士及动强组各位老师的指导或帮助。特别感谢沈志云院士不辞辛劳为本书作序，并积极推动本书的修订和出版，鞭策着我们不断前进。感谢国家自然科学基金（51475388，U1334206，51005189）为本书的相关研究和出版提供的资助。

限于作者水平，书中疏漏和不妥之处，敬请指正。

罗仁

2017年9月

基础篇

1 铁道车辆系统动力学概述	2
1.1 铁道车辆的发展	2
1.1.1 铁路运输的发展	2
1.1.2 机车车辆的发展	3
1.1.3 未来发展	5
1.2 车辆系统动力学发展概述	6
1.2.1 车辆系统动力学理论	6
1.2.2 车辆系统动力学仿真	10
1.2.3 车辆系统动力学试验	12
1.3 车辆系统动力学研究概述	13
1.3.1 车辆系统动力学主要研究方法	13
1.3.2 车辆系统动力学的重要应用	16
1.3.3 车辆系统动力学的难点	18
2 车辆系统动力学理论基础	20
2.1 多体系统动力学理论简介	20
2.1.1 多体系统简介	20
2.1.2 坐标系及姿态变换	22
2.1.3 动力学模型	25
2.1.4 数值积分	30
2.2 振动理论简介	31
2.2.1 线性振动	31
2.2.2 非线性振动	41
2.2.3 运动稳定性基本概念	45
2.2.4 常微分方程几何分岔理论	49
2.3 减振理论简介	55
2.3.1 基本概念和分类	55

2.3.2	两自由度系统	59
2.3.3	动力吸振器理论	62
2.3.4	Ruzicka 隔振系统	66
2.4	车辆运动姿态	70
2.4.1	车辆运动姿态	70
2.4.2	车辆悬挂模态	71
2.4.3	轮轨约束	73
3	轮轨接触和蠕滑理论	74
3.1	车轮与钢轨型面	74
3.1.1	车轮型面	74
3.1.2	钢轨型面	79
3.2	轮轨几何接触理论	81
3.2.1	轮轨接触几何关系的定义	82
3.2.2	轮轨接触几何关系的计算	90
3.2.3	Hertz 和非 Hertz 接触理论	101
3.3	轮轨蠕滑率	111
3.3.1	蠕滑率的定义	111
3.3.2	简化的蠕滑率公式	113
3.3.3	更完整的蠕滑率表达式	115
3.4	轮轨滚动接触经典理论	116
3.4.1	Kalker 线性理论	118
3.4.2	沈氏理论	120
3.4.3	Kalker 简化理论 (FASTSIM)	121
3.4.4	Polach 滚动接触理论	123
3.4.5	轮轨法向力的求解	125
3.4.6	各种蠕滑理论的比较和适用范围	127
4	车辆系统动力学边界条件	130
4.1	铁路轨道与线路	131
4.1.1	典型线路	131
4.1.2	轨道空间坐标描述	136
4.2	轨道不平顺	140
4.2.1	轨道不平顺类型	140
4.2.2	轨道不平顺描述及常用轨道谱	146
4.3	气动载荷	154
4.3.1	常用的风载荷获取方法	154
4.3.2	常用的风载荷类型	157

5	车辆系统蛇行运动稳定性	162
5.1	蛇行运动的基本概念	162
5.2	轮对蛇行运动	164
5.2.1	动力学方程	164
5.2.2	蛇行运动规律及数值验证	170
5.3	转向架蛇行运动	172
5.3.1	刚性转向架	172
5.3.2	柔性定位转向架	174
5.3.3	转向架蛇行运动特征	176
5.4	整车蛇行运动	180
5.4.1	车辆横向模型	180
5.4.2	车辆横垂耦合模型	185
5.4.3	车辆蛇行运动特征	189
5.5	蛇行运动分岔	193
5.5.1	分岔类型和特征	194
5.5.2	蛇行运动分岔图	198
5.5.3	临界速度	201
5.6	蛇行稳定性的影响因素	205
5.6.1	轮轨因素	205
5.6.2	一系、二系悬挂参数	207
5.6.3	车辆结构参数	210
5.6.4	车辆质量参数	212
5.6.5	车间减振器	214
6	车辆系统随机振动	216
6.1	随机振动简介	216
6.1.1	基本概念	216
6.1.2	随机变量	217
6.1.3	随机函数	219
6.2	车辆系统垂向随机振动	220
6.2.1	车辆垂向随机振动模型	220
6.2.2	车辆系统垂向随机振动规律	227
6.3	车辆系统横向随机振动	234
6.3.1	车辆横向动力学模型	235
6.3.2	轮轨蠕滑	235

6.3.3	车辆横向随机振动规律	236
6.4	乘坐性能的影响因素	238
6.4.1	轮轨因素	238
6.4.2	一系悬挂参数	239
6.4.3	二系悬挂参数	240
6.4.4	车辆结构参数	243
7	车辆系统曲线通过性能	244
7.1	蠕滑力导向机理	244
7.1.1	纯滚线	244
7.1.2	蠕滑力	245
7.1.3	蠕滑力导向	246
7.2	车辆曲线通过模型及分析	250
7.2.1	车辆曲线通过动力学方程	250
7.2.2	车辆稳态曲线通过	253
7.2.3	车辆动态曲线通过	255
7.3	车轮磨损和损伤	257
7.3.1	车轮磨损	257
7.3.2	车轮损伤	261
7.4	车辆曲线通过性能影响因素	263
7.4.1	动力学指标	263
7.4.2	车辆曲线通过影响因素	263
8	列车系统动力学	268
8.1	列车动力学因素	268
8.1.1	车钩缓冲装置	268
8.1.2	牵引制动	271
8.1.3	线路条件	274
8.2	列车动力学模型	276
8.2.1	采用单自由度车辆的列车纵向动力学模型	276
8.2.2	列车横向动力学模型	277
8.2.3	全自由度列车模型	278
8.3	列车动力学应用	279
8.3.1	列车连挂模拟	280
8.3.2	司机驾驶模拟	281
8.3.3	尾车晃动分析	284

实践篇

9 车辆系统动力学评价方法和指标	290
9.1 蛇行运动稳定性	290
9.1.1 渐进稳定性判断方法	290
9.1.2 线路评判蛇行稳定性的方法	293
9.2 运行平稳性	294
9.2.1 Sperling 平稳性指标	295
9.2.2 舒适度指标	296
9.2.3 ISO 2631 振动性能	299
9.2.4 运行品质	299
9.3 运行安全性	301
9.3.1 常规指标	301
9.3.2 扭曲线路通过	303
9.3.3 转向架转动系数	304
9.4 其余动力学指标	304
9.4.1 柔度系数	304
9.4.2 P_1 、 P_2 力	306
9.4.3 轮轨磨损指标	308
10 车辆系统动力学试验	310
10.1 比例模型及部件试验	310
10.1.1 轮对试验	310
10.1.2 悬挂元件试验	313
10.1.3 转向架及车体试验	319
10.1.4 弓网关系试验台	325
10.2 整车台架试验	325
10.2.1 整车滚动试验台	325
10.2.2 整车振动试验台	326
10.2.3 机车车辆滚动振动试验台	326
10.2.4 整车参数试验台	330
10.3 线路试验	332
10.3.1 线路常规试验	332
10.3.2 线路跟踪试验	336
10.3.3 线路研究性试验	339

11	车辆系统动力学仿真	340
11.1	动力学仿真基本方法	340
11.1.1	车辆动力学建模的基本方法	340
11.1.2	动力学仿真常用软件	349
11.2	动力学现象分析	353
11.2.1	常规动力学现象	353
11.2.2	车辆异常振动问题	353
11.2.3	车辆晃动	358
11.3	动力学性能预测和参数优化	364
11.3.1	车辆动力学性能预测	364
11.3.2	车辆系统参数优化	377
12	车辆系统动力学控制技术	380
12.1	铁道车辆半主动和主动控制	380
12.1.1	半主动控制	381
12.1.2	主动控制	384
12.2	摆式列车	386
12.2.1	摆式列车的基本原理	386
12.2.2	摆式列车类型	388
12.2.3	摆式列车工程应用	393
12.3	径向转向架	394
12.3.1	径向转向架的机理	394
12.3.2	径向转向架的种类	395
12.3.3	应用及效果	398
	参考文献	400

基础篇

本部分内容是铁道车辆系统动力学的基本概念、基础理论和框架体系，包含开展车辆系统动力学研究需要的相关学科理论基础和主要知识点。第1章对车辆系统动力学学科进行介绍，包括车辆系统动力学发展历程、主要研究领域、常用研究方法等。第2章是相关学科的理论基础简介，包括计算多体动力学、线性振动和非线性振动、减振理论等。第3章介绍轮轨接触和蠕滑理论，是车辆系统动力学的重要基础内容。第4章是铁道车辆动力学主要边界条件，包括铁道线路、轨道不平顺和气动载荷，是车辆动力学分析和仿真的必要条件。

本部分内容侧重于理论，适合车辆系统动力学基础知识学习和巩固，也可供工程技术人员参考。涉及的相关学科知识点都是经历了长期发展、比较成熟的理论，故本书仅作简单介绍，读者可参考相关文献进一步深入研究。



1 铁道车辆系统动力学概述

自铁路诞生后，铁道车辆系统动力学越来越受到重视^[1]，已经发展成为一门独立学科，并且延伸发展了多个分支学科。近年来，随着科学技术的飞速发展，尤其是我国高速铁路从迅速崛起到技术引领、城市轨道交通的快速发展、机车货车的不断进步，铁道车辆系统动力学在我国蓬勃发展，在车辆设计、运营、维护中得到了越来越广泛的应用。铁道车辆系统动力学不仅是一门理论科学，更是指导工程实践的重要工具，其来源于工程、发展于工程、服务于工程。本书也将车辆系统动力学简称为车辆动力学。为什么要研究铁道车辆系统动力学？有哪些研究手段和方法？怎么运用理论研究指导解决工程实际问题？这是我们关注的重点。

1.1 铁道车辆的发展

1.1.1 铁路运输的发展

铁路运输是以机车或动车提供的动力牵引列车在轨道上运行，运输旅客或货物的陆地有轨运输方式。铁路运输工具包括货物列车、旅客列车、动车组、城市轨道列车、特种车辆等，广义来说还可以包括磁悬浮列车和新型轨道交通工具。轨道是铁路运输的支撑基础，列车是铁路运输的载体和核心，而安全可靠地运送旅客和货物才是最终目的。铁路运输有众多优点，尤其是安全高效、节能环保适应了当今社会的发展需求。如图 1.1 所示，铁路运输具有独立、封闭、线路固定的特点，这一方面是其优势，另一方面也是其缺点。从火车发明以来，虽然铁路运输经历了诸多起伏波折，但一直是陆地交通的重要组成部分，在近年更是得到了快速发展。



图 1.1 铁路轨道和铁路运输

铁路运输在 19 世纪初被发明以后，在世界各国迅速发展。第二次世界大战以后，受到民航和汽车的冲击，铁路运输进入低谷。20 世纪 60 年代起，日本新干线的成功开行，刺激多个国家开始研究和建设高速铁路。但 20 世纪 80 年代之后中国铁路一度发展缓慢，直到进入 21 世纪，中国的铁路建设又焕发了盎然生机，带动了整个产业链的发展壮大。现在全球 200

多个国家和地区中，144 个有铁路运输，其中约 90 个国家提供客运服务。

我国铁路建设起步较晚，1876 年出现了第一条铁路——吴淞铁路，1881 年修建唐山至胥各庄铁路。1949 年中华人民共和国成立前，中国铁路里程为 2.18 万千米，到 2003 年年底中国铁路达到 7.3 万千米，到 2016 年年底全国铁路营业里程达到 12.4 万千米，高铁运营里程超过 2.2 万千米。预计到 2020 年，全国地铁总里程将达到 6 000 km。我国轨道交通正处于迅速发展时期，大量高速铁路、城际铁路、城市轨道交通线路正在建设或即将开通。

1.1.2 机车车辆的发展

19 世纪初蒸汽机车被发明后，火车成为重要的现代交通工具。1903 年，西门子与通用电气公司研制的电力机车投入使用。1924 年，德、美、法等国成功研制了柴油内燃机车。20 世纪 60 年代之后，随着日本新干线取得成功，各国相继研发了形式多样的铁道车辆，众多新技术也被不断采用（见图 1.2）。近年来，各国都大力发展高速列车，如法国巴黎至里昂的高速列车车速达 300 km/h，日本东京至大阪的高速列车车速达到 300 km/h 以上，我国也有多条高速铁路车速在 300 km/h 以上。



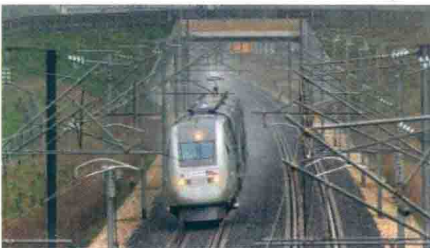
(a) 蒸汽机车



(b) 内燃机车



(c) 电力机车



(d) TGV-V150 试验列车



(e) 中国标准动车组

图 1.2 机车车辆的发展代表

我国的高速列车从 20 世纪末开始起步，但主要是试验列车和少量载客运营列车。2004 年以来，在“引进、消化、吸收、再创新”的思路下，我国发展了 CRH1、CRH2、CRH3、CRH5 系列车速 200 ~ 300 km/h 动车组，开发了 CRH380A、CRH380B 等车速 300 km/h 以上的动车组，以及城际动车组、高寒抗风沙动车组、双层动车组、卧铺动车组等多个系列动车组，近年来还研发了具有自主知识产权的中国标准动车组。

我国的重载铁路也在不断发展，国内货车轴重从 21 t 逐渐提高到 25 t 及以上，开通了大秦运煤专线等重载线路，开行了 2 万吨重载列车和 3 万吨试验列车（见图 1.3）。国内主机厂出口的重载货车轴重达到 30 t 以上，最大轴重 42 t。为了提高动力学性能，货车转向架也从传统的转 8A 转向架，通过引进技术和创新，发展了交叉支撑转向架、摆动式转向架、自导向转向架等多种形式^[2]。货车的运行速度从 70 km/h 发展到了 120 km/h，并且研发了车速 160 km/h 和 200 km/h 以上的高速快捷货车。

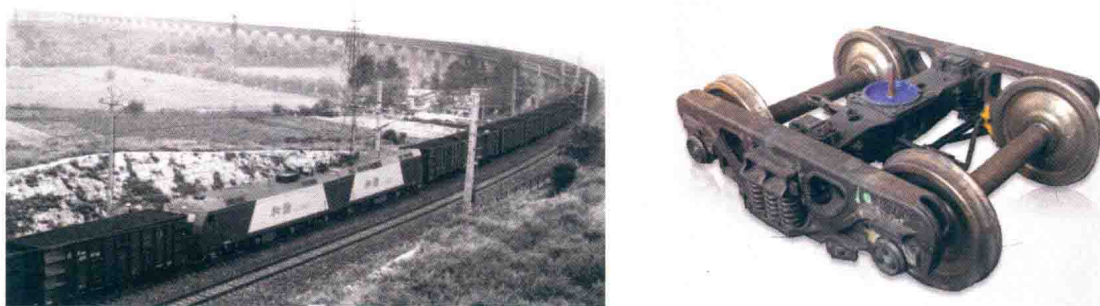


图 1.3 我国重载货物列车及货车转向架

在城市轨道交通领域，形式多样的地铁车辆、轻轨列车发展迅速，并且新技术在城轨列车中的应用也最活跃（见图 1.4）。地铁列车运营速度从传统的 80 km/h 逐渐提高到 120 km/h，还有 140 km/h 的市郊列车。采用铰接结构的低地板轻轨列车、直线电机牵引列车、跨座式单轨列车、悬吊式列车、储能式列车等也得到了广泛应用和研究。这些新的车辆结构、导向形式、牵引制动方式，对车辆系统动力学提出了更高的要求。我国城轨列车处于快速发展阶段，由于运行速度较低，其动力学问题还未引起足够重视，动力学研究还有待深入开展。



图 1.4 我国形式多样的城市轨道交通车辆

从铁道车辆的发展历程来看，速度和载重是发展的两大主题，围绕它们有诸多的问题需要研究，例如运行安全性、乘坐舒适性、运行可靠性等，这促使了车辆系统动力学不断发展。