



Fundamental Application Theory and
Engineering Technology for Railway High-speed Trains

铁路高速列车 应用基础理论与工程技术

张曙光 著

 科学出版社
www.sciencep.com

铁路高速列车

应用基础理论与工程技术

张曙光 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书从高速轮轨系统动力学、高速转向架技术、高速列车牵引与控制技术、高速列车制动技术、高速列车控制技术、高速列车车体、车内环境控制与人机界面技术、高速列车运用安全与维护技术、高速列车系统评价体系等方面系统阐述了中国高速列车的理论与技术, 及其在 CRH 系列高速动车组中的应用和实践。

本书可以供从事高速客车研究、设计与制造的轨道车辆专业人员学习, 也可以作为高等院校车辆工程、铁路机车车辆等专业高年级本科生和研究生的教材或参考书。

图书在版编目(CIP)数据

铁路高速列车应用基础理论与工程技术/张曙光著. —北京: 科学出版社, 2007

ISBN 978-7-03-018748-2

I.铁… II.张… III.高速列车 IV. U292.91

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 036505 号

责任编辑: 鞠丽娜 / 责任校对: 柏连海

责任印制: 吕春珉 / 封面设计: 三函设计

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>

新蕾印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2007 年 1 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2007 年 1 月第一次印刷 印张: 27

印数: 1—6 200 字数: 641 000

定价: 79.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈环伟〉)

销售部电话 010-62136131 编辑部电话 010-62138978-8002 (BZ08)

序

浮想一百多年前，当詹天佑开始修建京张铁路时，西方人对第一条中国人修建的铁路，目光中充斥着不屑与讥讽，但京张铁路的技术创新令西方人低下了傲慢的头颅；百年后，中国开始大规模客运专线建设的时候，西方发达国家仍在质疑中国人短时间内能否掌握高速铁路技术，能否研发和制造出集高新技术于大成的高速动车组。看到张曙光同志的专著《铁路高速列车应用基础理论与工程技术》，看到中国第六次大提速成功实施，我非常自豪，因为这本著作给出了答案：中国人也能造好高速铁路。

一百多年前瓦特发明了蒸汽机，英国人修建了世界上第一条铁路。一个世纪以来，铁路成为人类社会进步的标志。近半个世纪以来，世界铁路从夕阳产业重新焕发出勃勃生机，最为显著的标志是高速铁路的兴起。德国、法国、日本等发达国家修建高速铁路的经验表明，时速 200 km 以上高速铁路不仅是世界铁路发展的潮流，而且将带动经济社会的高速发展。进入 21 世纪，世界很多国家将高速铁路建设作为重要的发展领域，根据统计，到 2010 年世界各国计划建设的高速铁路营运里程将达到 3 200 km。2005 年发布的《中长期铁路网发展规划》明确我国将修建时速 200 km 以上的客运专线，营运里程将达到 9 800 km，将超过世界各国高速铁路的总和，未来 20 年不仅是我国铁路发展的重要黄金机遇期，而且也将掀开世界铁路发展史上史无前例的新篇章。

高速铁路技术是高新技术的集中代表，反映了一个国家的综合国力。德国的 ICE、法国的 TGV 以及日本的新干线都经历了半个世纪的探索，西班牙、我国台湾的高速铁路发展的经验教训也表明，掌握高速铁路技术是一个艰苦的过程，其技术复杂程度和难度与既有铁路不可同日而语。翻开世界高速铁路技术发展的历史，可以看到高速铁路技术与各个国家的国情紧密相关，中国铁路的实际情况与西方发达国家也有很大区别，因此，要在较短的时间跨越西方国家高速铁路半个世纪的发展历程，成为世界高速铁路的大国，并成为世界高速铁路的强国，就必须充分吸收人类文明进步的成果，站在世界高速铁路技术发展的前沿，坚持自主创新，创造中国高速铁路的自主品牌。

张曙光同志长期从事中国机车车辆的理论研究、技术创新和工程管理工作，不同岗位的历练使得他不仅洞悉世界高速铁路发展的技术前沿，而且深入了解中国铁路和机车车辆装备业的实际情况。多年来，张曙光同志还先后主持了我国空调客车、提速客车、青藏铁路高原客车等铁路机车车辆的开发工作，为提高我国铁路机车车辆装备水平做出了突出的贡献。

近些年来张曙光同志主持我国高速铁路时速 200 km 以上动车组的研发，负责铁路既有线 200 km/h 的提速工作，主持制定我国客运专线、提速线路技术标准体系，在高速铁路技术装备、运营、管理方面做了大量研究工作，并在理论和技术上提出了大量创见性思想，尤其是 2006 年进行了近 3 万 km 的提速试验验证，形成了一套颇有创造性的理论体系。这本著作是张曙光同志在高速铁路方面长期思考和深入研究的结晶，更是中国

高速铁路理论、技术自主创新的最新成果。本书内容突出地反映在:

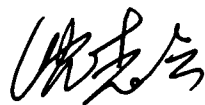
1) 创造性地发展了传统轮轨动力学理论, 创建了适合中国特点的高速轮轨系统动力学理论, 准确描述了高速条件下轮轨、弓网、流固耦合系统间的复杂动力学关系, 建立了路基-钢轨-车辆-受电弓-接触网-气流作用系统模型, 提出了高速列车的耦合关系处理、服役仿真评价等方法, 为确定高速条件下移动设备、固定设备、运行介质之间的相互关系提供了理论依据。

2) 提出了基于虚拟样机技术、试验研究和参数识别技术的高速转向架闭环综合性设计方法体系; 提出了高速列车主动防滑与被动防滑理论和减速度控制模式; 建立了高速列车牵引传动系统集成与控制技术体系; 给出了高速列车车体动态设计方法体系; 完整地阐述了基于系统生命周期的高速列车系统评价及持续改进体系。

3) 详细阐述了具有自主产权的我国高速列车运行控制系统的技术方案, 论述了满足既有线路要求的 CTCS2 系统, 适应高速铁路需要的 CTCS3 系统的基本原理和关键技术。书中还详细介绍了我国高速铁路技术的发展历程, 并以大量翔实的数据和丰富的实际案例对中国铁路建设的成果作了具体的诠释。

张曙光同志的这本专著首次系统总结和归纳了中国高速铁路理论和技术创新的最新成果, 是当今中国高速铁路理论、技术发展的代表之作, 同时丰富和发展了世界高速铁路的学术研究成果, 代表了中国高速铁路对世界铁路发展的贡献。因此, 这本专著对从事交通工程尤其是高速轨道交通的研究人员, 以及从事高速铁路工作的工程技术人员和管理人员都是一本难得的参考书。

我相信这本著作的出版不仅将推动我国轨道交通领域学术研究工作的开展, 指导我国大规模客运专线建设的实践, 而且对实现中国铁路又好又快的发展具有重大现实意义。



2006 年 12 月

前 言

生产力的发展,社会的进步,呼唤速度更快、容量更大的现代交通运输方式,这种需求为现代交通运输方式的发展提供了技术条件 and 市场;而现代交通运输的发展又大大促进了生产力的发展和社会进步。

运输市场的竞争,最主要的就是速度的竞争。各种运输方式要想在运输市场站稳脚跟,必须把速度作为参与市场竞争的主要手段,并努力提高自己的运行速度。这正是 21 世纪航空业大发展、高速公路异军突起、高速铁路方兴未艾的社会背景。

高速铁路在激烈的客运市场竞争中,以其突出的优势不但在其发祥地日本、法国、德国等国家已占据了城际干线地面交通的主导地位,并在世界诸多经济发达的国家和地区迅速扩展。时至今日高速铁路新线总长已逾 5 000 km。由于高速铁路与既有干线固有的兼容性,高速列车通过既有线服务的里程已扩展至 20 000 km 以上。高速铁路在不长的时期内之所以能取得如此的发展势头,根本原因是基于轮轨系的高速技术充分发挥了既先进又实用的特点,特别是在中长距离运输中的优势而深受欢迎。实践表明,高速铁路已是当代科学技术进步与经济发展的象征。高速铁路虽然源于传统铁路,但借助于多项高新技术已全面突破了常规铁路的概念,形成一种能与既有路网兼容的新型交通系统。

由于铁路运输具有速度快、运量大、能耗低、污染轻、安全性好等诸多优点,因此一直都是世界各国现代化交通运输体系中最为重要的运输手段,在国民经济的发展过程中起着“中流砥柱”的作用。世界上许多发达国家为了促进经济的发展,一直通过提升本国轨道交通技术装备现代化水平,不断地提高机车车辆的运行速度,打造本国特色的高速列车。

作者在长期从事铁路机车车辆的研究中,深感铁路机车车辆专业人员迫切需要一本比较系统的论述高速列车理论和应用的书,从而为中国品牌高速列车的设计与制造提供指导和借鉴。

高速列车是当今世界高新技术的集成,需要解决高速轮轨关系、高速转向架、大功率牵引、制动控制、列车运行控制、空气动力学工程、可靠性与安全性技术等铁路专业领域的一系列重大技术问题。

本书从高速轮轨系统动力学、高速转向架技术、高速列车牵引与控制技术、高速列车制动技术、高速列车控制技术、高速列车车体、车内环境控制与人机界面技术、高速列车运用安全与维护技术、高速列车系统评价体系等方面全面研究了中国高速列车设计理论和技术。

高速轮轨系统动力学理论与服役模拟方法是高速动车组转向架技术、牵引和制动技术以及运行控制技术的基础,本书建立了考虑线路、动车组、弓网和气流耦合的高速轮轨大系统动力学模型。

高速转向架是列车高速运行最重要的基础条件之一,作为执行机构,高速转向架在

保证列车高速稳定运行时承担列车的减振降噪作用；作为承载结构，高速转向架在各种振动工况下要确保结构的强度安全可靠。本书提出了基于虚拟样机技术、试验研究和参数识别技术的高速转向架闭环综合性设计方法体系。

高速列车牵引系统是列车的驱动系统，通过牵引控制系统不但可以向高速列车提供牵引力，而且可以提供电制动力。本书建立了高速列车牵引传动系统集成与控制技术体系。

列车速度不断提高的同时，还必须能在规定距离和时间之内停车，依靠传统的摩擦制动方法已经不能解决高速列车的制动问题，制动系统性能的好坏和制动能力的大小直接关系到列车能否安全运行，因此本书中讲述了高速列车主动防滑与被动防滑理论，建立了减速度控制模式。

本书的研究成果还体现在建立了具有中国特色的 CTCS 高速列车控制系统，研究了流线型、轻量化高速列车车体动态设计方法、高速列车车内空气压力波动控制技术、基于人机适配性和安全行为学等人因工程理论的车内设计方法，提出了基于系统生命周期的系统评价及持续改进体系。

书中全面介绍了上述理论在 CRH 系列高速动车组中的应用和实践成果，CRH 系列动车组分别是青岛四方-庞巴迪-鲍尔铁路运输设备有限公司生产的 CRH₁ 型、四方机车车辆股份有限公司生产的 CRH₂ 型、唐山机车车辆厂生产的 CRH₃ 型和长春轨道客车股份有限公司生产的 CRH₅ 型。这些动车组具有先进、成熟、经济、适用、可靠的技术特点，并在我国铁路第六次大提速中广泛应用。2008 年中国第一条时速 300 km 的客运专线——京津城际铁路将投入运营，CRH₂ 速度升级车型和 CHR₃ 将成为时速 300 km 的主型车。

作者衷心感谢著名机车车辆专家沈志云院士能在百忙中细读本书，并为之做序。

本书的研究成果是在国家自然科学基金、铁道部科技发展基金多年的资助下完成的，在研究过程中得到了北京交通大学、西南交通大学、同济大学、中南大学、铁道科学研究院相关同事的合作和支持，在高速动车组理论的实践过程中得到了铁道部、相关铁路工厂和铁路局同事的大力支持，在此对他们表示衷心的感谢。

本书浸透了作者十多年的心血，但作者深知自己能力和水平有限，谬误和不当之处恳请读者指正。

作 者

2007 年 1 月于北京

目 录

第 1 章 高速轮轨系统动力学	1
1.1 高速轮轨系统动力学体系	1
1.1.1 高速轮轨系统动力学体系结构	1
1.1.2 高速轮轨系统动力学与高速铁路技术的关系	2
1.2 高速轮轨系统动力学模型	3
1.2.1 高速轮轨系统动力学模型框架	4
1.2.2 各子系统数学模型	5
1.3 高速轮轨系统动力学服役模拟研究	24
1.4 高速轮轨系统动力学仿真研究——举例	26
1.4.1 列车系统动力学研究	26
1.4.2 线路不平顺对轮重减载率的影响研究	31
1.4.3 钢轨波浪型磨损研究和预测	36
1.5 结束语	39
第 2 章 高速转向架技术	40
2.1 高速转向架综合性能研究方法	40
2.1.1 引言	40
2.1.2 高速转向架研究过程	41
2.1.3 高速转向架综合性能研究	41
2.2 车辆系统动力学理论研究	42
2.2.1 车辆系统非线性运动稳定性	42
2.2.2 车辆系统运行平稳性	49
2.2.3 车辆系统脱轨安全性	57
2.3 高速转向架设计原则	63
2.3.1 高速转向架动态环境技术特征	63
2.3.2 高速转向架设计原则	64
2.3.3 高速转向架技术措施	69
2.4 高速转向架参数研究	77
2.4.1 稳定性和曲线通过性能的折衷考虑	77
2.4.2 悬挂参数对车辆平稳性的影响	78
2.4.3 二系悬挂参数对车体振动模态的影响	80
2.4.4 悬挂参数对车辆动力学性能影响规律的小结	83
2.5 高速转向架结构	84
2.5.1 CRH ₁ 型动车组转向架	84
2.5.2 CRH ₂ 型动车组转向架	86
2.5.3 CRH ₃ 型动车组转向架	87

2.6	高速转向架试验研究	89
2.6.1	高速转向架动力学性能的台架试验研究	89
2.6.2	线路动力学性能试验	94
2.7	高速转向架结构疲劳强度	99
2.7.1	概述	99
2.7.2	疲劳设计理论	100
2.7.3	焊接结构的疲劳强度	106
2.7.4	高速转向架焊接结构疲劳强度设计	109
第3章	高速列车牵引与控制技术	120
3.1	高速列车牵引控制基础	120
3.1.1	列车运行过程的数学描述	120
3.1.2	高速列车运行阻力的计算	121
3.1.3	列车牵引特性的计算	122
3.1.4	变频调速异步牵引电机的特性及基本理论	124
3.2	列车牵引传动系统	129
3.2.1	高速列车牵引传动系统概述	129
3.2.2	牵引传动系统的组成与能量变换的技术实现	130
3.2.3	牵引传动系统的优化匹配与容量选定	133
3.2.4	牵引电机设计时要考虑的几个特殊问题	135
3.3	列车牵引变流器技术方案	136
3.3.1	牵引变流器用电力电子器件	136
3.3.2	脉冲整流器工作原理及技术方案	137
3.3.3	牵引逆变器工作原理及技术方案	144
3.3.4	中间直流环节工作原理及技术方案	149
3.3.5	牵引变流器应用	151
3.4	列车牵引控制策略及其实现	152
3.4.1	瞬态直接电流控制策略及其实现	152
3.4.2	磁场定向矢量控制策略及其实现	153
3.4.3	直接转矩控制及其控制系统实现	157
3.5	列车牵引网络控制系统	161
3.5.1	列车网络控制系统概述	161
3.5.2	列车牵引网络控制系统结构	169
3.5.3	列车牵引网络控制系统功能	173
3.6	列车辅助供电系统	177
3.6.1	辅助变流器	177
3.6.2	直流供电系统	184
3.6.3	几种典型高速列车辅助供电系统简介	185
第4章	高速列车制动技术	188
4.1	列车制动原理	188

4.1.1 制动系统组成及原理	188
4.1.2 高速列车对制动系统的要求	193
4.2 列车制动计算	196
4.2.1 制动计算	196
4.2.2 制动系统可靠性计算	202
4.3 高速列车制动方式	206
4.3.1 列车动能转移方式	206
4.3.2 制动力获取方式	209
4.4 高速列车制动控制系统	210
4.4.1 空气制动控制系统	210
4.4.2 电气指令式制动控制系统	211
4.5 高速列车制动技术	217
4.5.1 制动指令传输技术	217
4.5.2 电空配合控制技术	218
4.5.3 减速度控制技术	219
4.5.4 防滑控制技术	220
4.5.5 制动系统的自动监测和故障诊断	222
4.6 高速列车制动系统试验	222
4.6.1 高速列车制动试验种类	222
4.6.2 地面室内静置试验	223
第 5 章 高速列车运行控制技术	226
5.1 概述	226
5.2 高速列控系统的基本原理和系统集成方法	228
5.2.1 国外典型高速列控系统原理分析	228
5.2.2 中国铁路运行控系统的基本原理及高速列车运行控制系统集成	231
5.2.3 高速列控系统集成	234
5.3 高速列控系统地-车信息传输技术	237
5.3.1 轨道电路传输技术	238
5.3.2 应答器传输技术	244
5.3.3 GSM-R 传输技术	248
5.4 高速列控系统定位技术	254
5.4.1 相对定位技术	255
5.4.2 绝对定位技术	260
5.4.3 基于多传感器数据融合的定位技术	261
5.5 列车制动模型	263
5.5.1 基于制动率控制的制动模型	263
5.5.2 基于减速度控制的制动模型	264
5.5.3 两种模型的相互关系	266

第 6 章 高速列车车体	268
6.1 高速列车空气动力学与车体外形	269
6.1.1 列车空气动力学	269
6.1.2 列车外形	274
6.2 车体结构	276
6.2.1 车体承载形式	276
6.2.2 车体结构特点	277
6.3 车体结构轻量化	278
6.3.1 车体轻量化的必要性	278
6.3.2 车体轻量化措施	279
6.3.3 车体静强度和动应力测试	284
6.4 高速列车密封性要求	285
6.4.1 压力波对旅客的影响	286
6.4.2 对车辆压力密封性的要求	287
6.4.3 提高高速旅客列车密封性的主要措施	287
6.4.4 密封性能试验	288
6.5 车体隔声降噪	289
6.5.1 列车噪声源	289
6.5.2 车外噪声及控制标准	289
6.5.3 车内隔声降噪技术措施	291
第 7 章 车内环境控制与人机界面技术	292
7.1 车内环境概述	292
7.1.1 车内环境构成及参数	292
7.1.2 车内空气环境的特点	294
7.1.3 车内空气环境的影响因素	294
7.2 车内环境控制技术	296
7.2.1 车内空气环境控制技术	296
7.2.2 车内空气压力波动控制技术	298
7.2.3 车内环境控制技术的发展趋势	301
7.3 车内空气环境控制系统	302
7.3.1 车内空气环境控制系统的总体构成	302
7.3.2 车内空气环境控制系统的类型	304
7.3.3 车内环境控制系统的组成	306
7.4 合理的气流组织及空气净化	312
7.4.1 气流组织的概念	312
7.4.2 气流组织的方式	312
7.4.3 车内空气净化	314
7.5 旅客界面技术	315
7.5.1 舒适度研究	315

7.5.2	车辆内饰及照明	320
7.5.3	车辆人机适配性	324
7.6	司机室界面技术	327
7.6.1	司机室作业空间	328
7.6.2	司机室的可见度与视野	333
7.6.3	司机室显示装置的选择与布置	335
7.6.4	司机室控制装置的选择与布置	338
7.6.5	司机室驾驶工效综合评定技术	340
7.7	碰撞及公共安全	342
7.7.1	碰撞安全	343
7.7.2	旅客避难与疏散	348
第 8 章	高速列车运用安全与维护技术	352
8.1	高速列车维修概述	352
8.1.1	高速列车维修的作用和意义	352
8.1.2	高速列车的维修特点及发展趋势	353
8.2	高速列车维修理论及应用	353
8.2.1	维修理论概述	353
8.2.2	高速列车故障与可靠性、维修性	356
8.3	故障的检测、诊断及分析	362
8.3.1	故障诊断技术	362
8.3.2	故障的可靠性分析	367
8.4	维修制度	370
8.4.1	基本概念	370
8.4.2	高速列车的维修制度及发展	374
8.4.3	以可靠性为中心的维修制度 RCM	376
8.5	高速列车维修组织与管理	380
8.5.1	维修相关政策法规	380
8.5.2	维修机构及布局	381
8.5.3	信息化的维修管理	382
第 9 章	高速列车系统评价体系	386
9.1	系统评价基础理论	386
9.1.1	系统工程及系统评价	386
9.1.2	系统评价的原则和步骤	387
9.1.3	系统评价方法	388
9.2	高速列车系统评价概述	389
9.2.1	高速列车系统评价的特征	390
9.2.2	列车速度的提高对系统 RAMS 性能的新要求	391
9.2.3	高速列车生命周期内系统评价的构成	392

9.2.4	高速列车系统评价的理念	393
9.3	高速列车系统评价指标分析	394
9.3.1	动车组 RAMS 指标分析	394
9.3.2	与外部系统接口及运行安全保障系统评价指标分析	397
9.4	高速列车评价指标体系及评价方法	399
9.4.1	指标体系递阶层次结构	399
9.4.2	评价指标权重测度方法	401
9.4.3	高速列车系统评价指标体系框架	402
9.4.4	系统分析及评价方法	403
9.5	基于生命周期的高速列车系统保障体系	406
9.5.1	系统保障体系中 RAMS 因素分析	407
9.5.2	高速列车系统保障体系的主要内容	409
9.5.3	系统保障体系的评价流程	413
9.5.4	系统保障体系 RAMS 风险分析及评价	414
主要参考文献		417

第1章 高速轮轨系统动力学

轨道交通有着自身运行规律的特殊性，也就是移动设备在固定设备上可控地运行。对于以轮轨为特征的铁路系统，移动设备就是机车车辆，对高速列车来说就是动车组，与列车运行相关的固定设备除了线路以外，由于高速列车一般采用电动车组，因此，固定设备中还有接触网系统。轨道交通移动设备的运动将受到固定设备状态和运动空间介质的影响和制约，也就是高速动车组运动将受到线路、接触网条件的影响和气流的作用，即受到轮轨关系、弓网关系和流固耦合关系的影响和制约（见图 1.1）。随着列车运行速度的提高，动力作用的加剧，这不仅对动车组和线桥隧的设计、制造、建设和运行管理提出了更高要求，同时需要有与高速列车运行相适应的车辆系统、轮轨关系、弓网关系和流固耦合关系。然而，这一切始于振动，动力学问题是根本。铁路以轮轨支撑为特点，车上的振动几乎都来自线路的扰动和轮轨相互作用。因此，对高速铁路而言，传统的车辆系统动力学（vehicle system dynamics）应该拓展到与列车运行相关的因素和领域，全面深入地开展高速轮轨系统动力学研究。

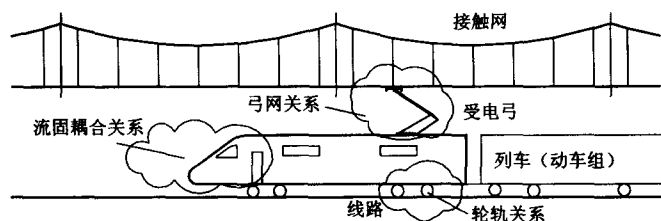


图 1.1 高速轮轨系统

1.1 高速轮轨系统动力学体系

1.1.1 高速轮轨系统动力学体系结构

高速轮轨系统动力学，研究的主体是高速列车（即高速动车组），其特点是要充分考虑高速动车组与线路、接触网和气流的相互作用。因此，高速轮轨系统动力学以轮轨相互作用模型为基础，以传统的车辆系统动力学为核心，向上研究牵引供电的接触网系统，以及与受电弓的匹配关系；向下研究线路，研究车-线耦合振动问题。轮轨相互作用模型的理论基础是轮轨接触力学和轮轨蠕滑理论，而且要考虑车-线耦合作用下的轮轨动态相互作用，轮轨相互作用的研究不仅是研究相互作用模型，还应涉及和轮轨服役相关的脱轨、粘着、疲劳和摩擦磨损的机理研究。由于路基线路和桥上线路的模型及研究内容不同，因此，车-线耦合动力学就分别发展了车-线耦合动力学和车-桥耦合动力学，研究列车和线路的耦合振动，特别是相互的高频动力作用。

对于高速轮轨系统动力学的核心——车辆系统动力学研究，主要要研究车辆系统动

力学三要素：运动稳定性、运行平稳性和安全性。为了提高车辆的动力学性能，可对车辆运动进行主动控制，主动控制的过程模拟和性能研究均是以车辆系统动力学为基础。对车辆系统承受较大载荷而产生较大变形的结构件，还要考虑它们刚柔耦合的作用效果。伴随动力学仿真，还可以进行结构动应力的仿真，这一研究使动力学研究拓展为广义的动力学问题研究。车辆系统动力学，通过车辆数的增加，就发展成为列车系统动力学。列车系统动力学研究不仅要研究列车编组状态下车辆动力学的三要素，更是要在列车牵引/制动控制中考虑列车的纵向动力学行为，包括基于轮轨粘着的列车运行控制、轮轨黏滑振动和轮轴扭振特性等。只有建立基于轮轨系统动力学为基础的列车牵引/制动控制，最终才能实现列车运行的自动化控制。由于高速列车的气动作用强烈，因此，在列车系统动力学和弓网系统动力学研究中应该考虑到空气动力学的作用，也就是要研究流固耦合动力学问题。

高速轮轨系统动力学不仅要研究移动设备的运动，还要考虑与固定设备和空气介质的相互作用，形成具有高速特征的线路-车辆-受电弓-接触网-气流耦合系统动力学，具体的高速轮轨系统动力学体系结构和相互关系如图 1.2 所示。

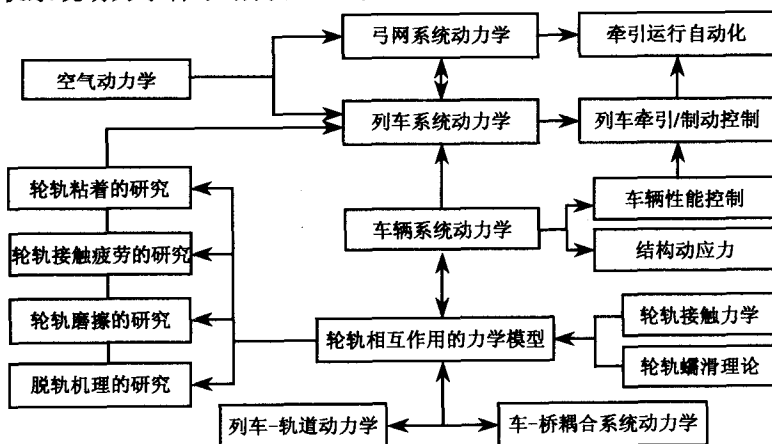


图 1.2 高速轮轨系统动力学体系结构

尽管高速轮轨系统动力学在研究内容上，较车辆系统动力学研究有大的扩展，但研究的基本范畴没有改变：一是研究系统响应，即研究列车在运行中所引起的轮轨系统动力响应特性；二是研究系统稳定性，即研究列车系统在不同运行条件下的运行稳定性问题。

1.1.2 高速轮轨系统动力学与高速铁路技术的关系

高速轮轨系统动力学研究已远远超过原来的以单车为研究对象的车辆系统动力学研究的范畴，所需要的基础理论不仅仅是车辆系统动力学研究所涉及的多刚体动力学，而且包括相关的控制理论、流体力学、接触力学、悬索动力学、结构动力学、土动力学等基础科学。高速列车所要研究的轮轨系统动力学问题，主要包括高速列车系统动力学及控制、轮轨相互作用及控制、轨道（桥梁）系统动力学、弓网系统动力学、高速列车空气动力学、高速列车运行自动控制等，这些力学问题和相关的基础科学的关系见图 1.3。

由于结构系统的原因，车轮之上的系统主要为低频振动，而车轮之下的系统主要为高频振动。

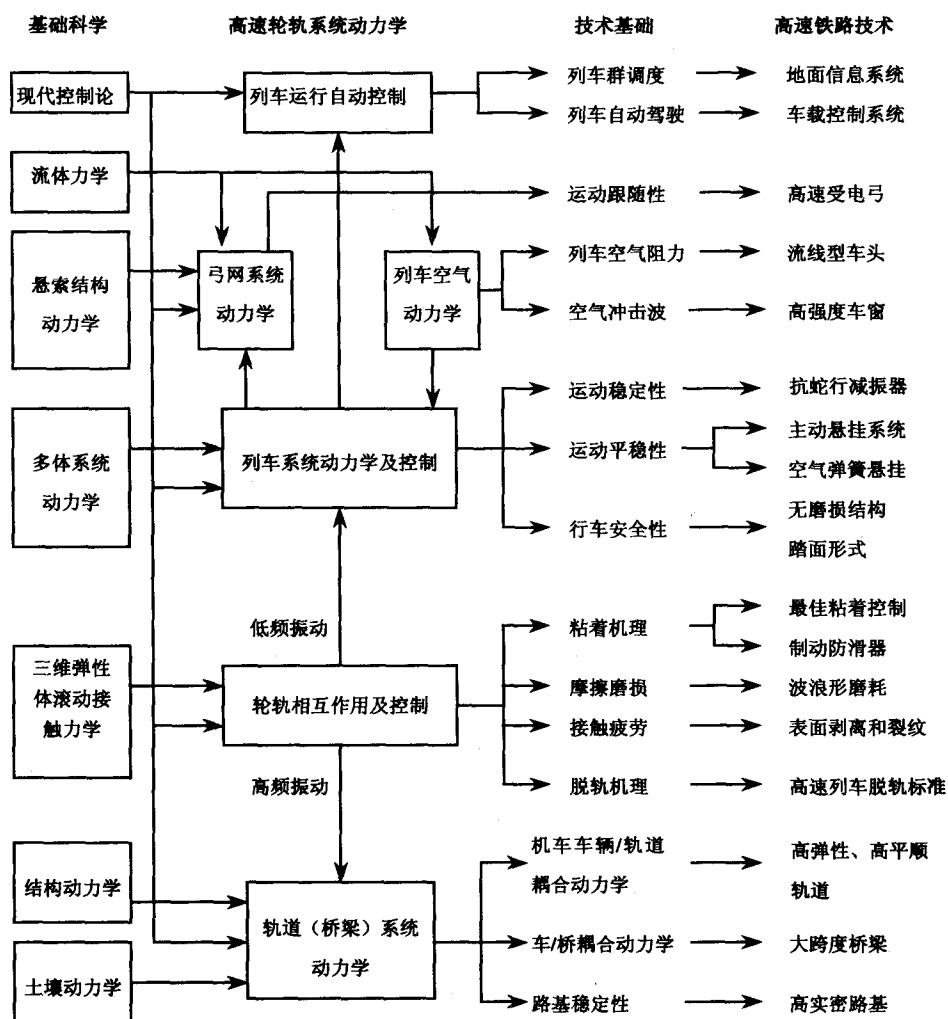


图 1.3 高速列车中的力学问题以及和相关技术的关系

轮轨系统动力学研究是为高速铁路技术服务的。因此，在图 1.3 中还列出了依托不同轮轨系统动力学研究内容的技术基础研究，以及具体与高速铁路技术相关研究课题的关系。从图 1.3 的关系中可以看到，要获得良好的高速铁路技术，就必须从基础的高速轮轨系统动力学研究入手，打好理论研究基础，并通过技术基础问题的研究，得到技术含量丰富、水平高的高速铁路技术。

1.2 高速轮轨系统动力学模型

对于高速轮轨系统来说，它是柔性体（接触网）、多刚体（车辆结构）、连续弹性体

(钢轨)、离散体(枕木)、非规则接触堆积体(石砟道床)和土结构(路基)组成的混合结构系统,而且它要和流体(空气介质)相互作用。因此,高速轮轨系统动力学研究,首先需要突破的是系统建模,即由多体和多态组成的混合耦合系统的系统建模问题。

1.2.1 高速轮轨系统动力学模型框架

由于列车是通过轮轨接触点和弓网接触点与线路和接触网实现耦合作用,在高速轮轨系统模型建立时,可以采用子结构方法,分别列出接触网、受电弓、动车组、钢轨、线路以及气流的运动微分方程,然后考虑各子系统之间的运动和力的耦合作用,构建成完整的轮轨系统的动力学模型。模型框架如图 1.4 所示。

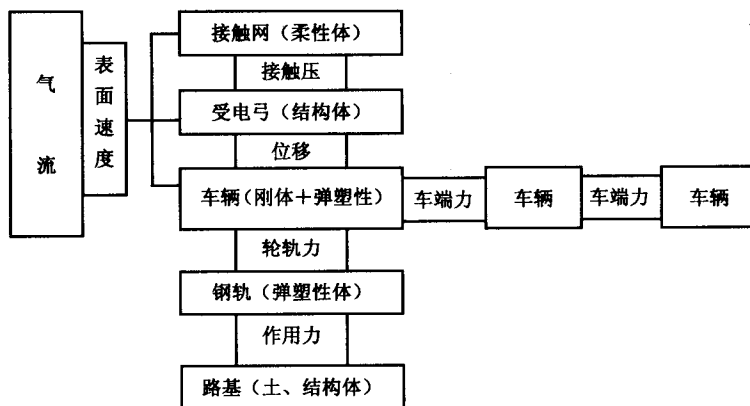


图 1.4 轮轨系统动力学模型框图

这里接触网模型采用弹性体结构模型,受电弓本身是机构体,但一般可采用等效化的多刚体模型,弓网之间通过接弓网触压力实现耦合作用;列车模型首先是车辆模型,尽管轮对、构架和车体等主要结构件均可以采用弹性体模型,但从实效性而言,车辆模型一般采用多刚体模型,当然可以考虑结构的弹性作用;高速动车组往往在车与车之间有耦合减振系统,因此,在建立车辆模型的基础上,通过车间力的耦合作用,形成列车系统的运动方程;虽然受电弓的质量很小,在车辆振动计算中可以忽略受电弓的作用,但由于受电弓基座固结在车体上,车辆振动很大程度上影响到受电弓的运动,利用受电弓基座位移和车体位移的一致性实现它们之间的耦合作用;车辆与钢轨之间是通过轮轨相互作用力实现耦合的,切向力一般采用具有非线性特征和考虑自旋影响的沈氏模型,为了考虑到轮轨材料的服役损伤,在垂向力作用模型中可以考虑到轮轨材料的局部摩擦磨损和局部变形等特征;钢轨一般采用弹性梁模型,目前一般采用欧拉梁模型,但随着列车速度的提高,尤其是高速列车高频振动作用强烈,应该采用更加合理的铁木辛柯梁模型;线路建模从目前的研究层面上看,除钢轨以外,一般简化成线性多体系统;实际上,高速铁路经常采用高架方式,也就是桥梁结构,这时的线路模型应改为考虑桥梁弹性结构的计算模型;这时,由于接触网架设在桥上,相应的接触网模型还应考虑与桥振动的耦合作用;空气模型采用三维 Navier-Stokes 方程描述,它与高速列车的耦合作用采用流体边界层和列车表面的运动速度一致关系来实现。

从以上的建模过程可以看到,高速轮轨交通系统动力学模型的建立,关键是建立线