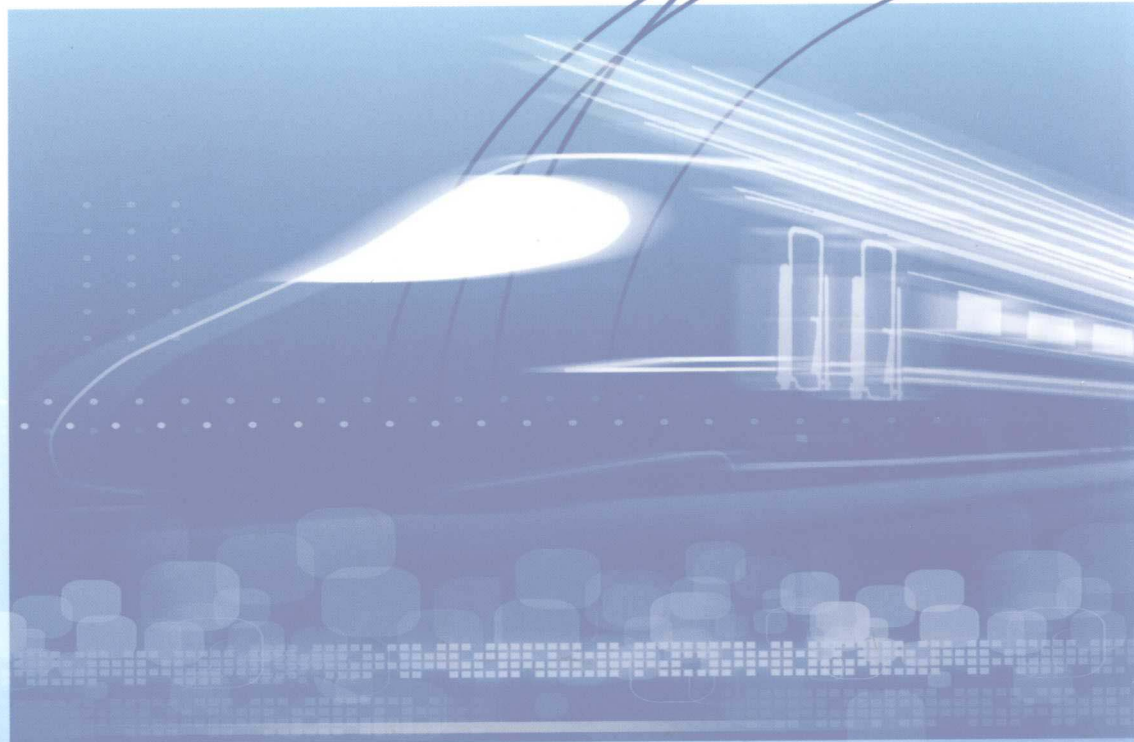




普通高等教育铁道部规划教材

动车组系统动力学 与结构可靠性

卜继玲 主编 张曙光 主审



中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

普通高等教育铁道部规划教材

动车组系统动力学与结构可靠性

卜继玲 主 编
张曙光 主 审

中国铁道出版社

2009年·北京

内 容 简 介

本书是普通高等教育铁道部规划教材,分为上下两篇。上篇为动车组系统动力学基础,主要介绍动车组系统动力学的主要研究内容、研究方法和相关试验等基础知识,包括绪论、动车组系统动力学理论基础、动车组系统动力学试验鉴定规范和动车组系统动力学仿真分析基础等章节。下篇为动车组结构可靠性基础,主要介绍动车组结构可靠性设计的基础知识,包括绪论、动车组结构可靠性理论基础、动车组强度设计规范和动车组结构设计基础等章节。

本书是高等学校铁道机车车辆类专业教材,也可供铁路高职院校机车车辆类学生和研究动车组的工程技术人员使用和参考。

图书在版编目(CIP)数据

动车组系统动力学与结构可靠性/卜继玲主编. —北京:
中国铁道出版社, 2009. 6
普通高等教育铁道部规划教材
ISBN 978-7-113-10059-9

I. 动… II. 卜… III. ①高速列车: 动车—系统动力学—
高等学校—教材②高速列车: 动车—结构可靠性—高等学校—
教材 IV. U266

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 076846 号

书 名: 动车组系统动力学与结构可靠性
作 者: 卜继玲 主编

责任编辑: 刘红梅 电话: 010-51873133 电子信箱: mm2005td@126.com
封面设计: 崔丽芳
责任校对: 孙 玫
责任印制: 陆 宁

出版发行: 中国铁道出版社 (100054, 北京市宣武区右安门西街 8 号)

网 址: <http://www.tdpress.com>

印 刷: 北京市彩桥印刷有限责任公司

版 次: 2009 年 7 月第 1 版 2009 年 7 月第 1 次印刷

开 本: 787 mm×960 mm 1/16 印张: 12.75 字数: 317 千

书 号: ISBN 978-7-113-10059-9/U·2508

定 价: 28.00 元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社读者服务部调换。

电 话: 市电 (010) 51873170, 路电 (021) 73170 (发行部)

打击盗版举报电话: 市电 (010) 63549504, 路电 (021) 73187

前 言

本书是普通高等教育铁道部规划教材,是由铁道部教材开发领导小组组织编写,并经铁道部相关业务部门审定,适用于高等院校铁路特色专业教学以及铁路专业技术人员使用。本书为铁道机车车辆类动车组系列教材之一。

高速动车组诞生近 50 年来,以其安全、快捷和舒适等特点在世界上多个国家得到了广泛的应用和快速发展。近年来,随着社会、经济的快速发展,我国掀起了高速铁路建设的热潮,相信不久以后我国高速铁路将成为世界高速铁路的主体。

具有优良的运行性能和结构可靠性是高速动车组成功应用的前提。高速动车组的运行性能不同于传统的机车车辆,涉及面更加广泛,影响因素众多,传统机车车辆不重要的和被忽略掉的因素成为了高速动车组技术需要解决的主要矛盾,如列车的空气动力学问题、车体轻量化技术、疲劳可靠性技术等,因此,研究高速动车组动力学性能和结构可靠性成为当代铁路技术发展的一门新兴学科。

促进高速动车组技术的发展和运用,需要培养一大批具有扎实专业基础知识和技能的人才,我国在高速动车组技术人才培养方面还刚刚起步,但有蓬勃发展之势,急需具有专业特色、难度适中、适合本科生教学和本领域相关技术人员参考的专业书籍,本书正是为了满足现实需要而编写的。

本书分为上、下两篇。上篇主要介绍高速动车组动力学性能的基础知识、基本理论和相关标准体系;下篇主要介绍高速动车组结构可靠性设计的基础理论、设计规范和典型的结构设计方法。在本教材的编写中,紧密结合我国现有动车组的基本结构,做到理论结合实际,使学生在轻松的环境中牢固掌握专业知识和技能。



本书由西南交通大学卜继玲主编,铁道部运输局张曙光主审;上篇由西南交通大学卜继玲和傅茂海编写,下篇由北京交通大学王文静编写,全书由卜继玲统稿。

由于编写时间仓促,加之编者知识水平的限制,本书中还有许多疏漏,望读者不吝指正。

编 者

2009 年 3 月

目 录

上篇 动车组系统动力学基础

第一章 动车组系统动力学绪论	2
第一节 车辆系统动力学概述	2
第二节 动车组系统动力学研究主要内容	7
第三节 动车组系统动力学性能	10
第四节 轨道随机不平顺概述	16
复习思考题	23
第二章 动车组系统动力学理论基础	24
第一节 引起动车组振动的原因	24
第二节 轮轨接触基本理论	29
第三节 动车组的蛇行运动	34
第四节 动车组的垂向随机响应	44
第五节 动车组的横向随机振动	50
第六节 非线性动车组系统的随机振动	53
第七节 动车组的曲线通过性能	57
第八节 动车组空气动力学基础	67
复习思考题	76
第三章 动车组动力学试验鉴定规范	77
第一节 动车组动力学性能试验概述	77
第二节 动车组动力学性能试验标准	80
第三节 动车组空气动力学性能试验标准	86
复习思考题	91
第四章 动车组动力学仿真分析基础	92
第一节 动车组系统动力学仿真分析模型	92



第二节 动车组系统动力学仿真分析软件	94
第三节 动车组系统动力学仿真基本过程	98
复习思考题	105

下篇 动车组结构可靠性基础

第五章 动车组结构可靠性绪论	108
第一节 结构可靠性基本概念	108
第二节 机车车辆可靠性指标	116
第三节 结构可靠性工程学科发展概述	118
复习思考题	122
第六章 动车组结构可靠性理论基础	123
第一节 有限元理论基础	123
第二节 结构疲劳强度理论基础	131
第三节 强度可靠性设计理论基础	140
复习思考题	150
第七章 动车组强度设计规范	151
第一节 动车组转向架焊接构架强度设计规范	151
第二节 动车组车体强度设计规范	154
第三节 动车组铝合金车体用材的机械性能与许用应力	162
复习思考题	164
第八章 动车组结构设计基础	165
第一节 动车组转向架主要零部件结构可靠性设计	165
第二节 车体结构设计	184
复习思考题	193
参考文献	195

上 篇

动车组系统动力学 基础

本篇主要介绍高速动车组系统动力学的主要内容和方
法。首先通过介绍车辆系统动力学的发展历史，阐明高速
动车组系统动力学的关键研究点；其次根据影响高速动车
组动力性能的各种因素出发，逐一介绍了高速动车组运行
稳定性、运行平稳性、曲线通过性能和空气动力学的基本
研究内容；再进一步介绍了高速动车组长途动力学的相关
试验鉴定规范；最后再对高速动车组系统动力学的仿真分
析情况进行介绍。

第一章

动车组系统动力学绪论

高速动车组在客运专线上运行,承担快捷、安全、正点、舒适运送旅客的任务。如何保证高速动车组在 200 km/h 以上速度运行时的安全性?如何改善高速动车组在 200 km/h 以上速度运行时的平稳性?如何保证旅客在车上感觉到舒适?如何保证动车组在高速运行时能够保持受电弓和接触网之间的良好接触以保障动力系统的良好受流?如何保证动车组能够在高速线路、桥梁或者隧道中保持高速运行?如何解决高速动车组在运行过程中对周围气流的冲击影响?这些都是高速动车组动力学性能研究的主要内容。

第一节 车辆系统动力学概述

一、车辆系统动力学的发展

铁路运输是依靠列车在线路上的运行来实现的。由机车和车辆组成的列车与铁路线路是一个整体系统,在这个复杂的系统中,它们互相联系又互相作用。列车在运行过程中,受到外界激励(包括线路不平顺、环境干扰、列车牵引、制动等)输入的影响,车辆与轨道之间、车辆各部件之间产生振动(出现加速度、速度、力、位移等),从而在这个系统中各组成构件会产生各种力和位移的动力相互作用过程,影响其运行性能。因为这些力和位移是由于机车车辆与线路的相互作用以及机车与车辆之间和各连接车辆之间的相互作用引起的,对这些过程进行研究的一门学科就是车辆系统动力学。

动车组车辆是由车体、转向架构架、轮对等基本部件组成的,由于这些部件的刚度较悬挂系统的刚度大很多,因此在高速动车组动力学研究中,通常把这些部件近似地视作刚体。车辆各基本部件之间有弹性约束或刚性约束,以限制车辆结构中各零部件之间的相对运动。车辆支撑在弹性元件(弹簧)上的零部件称为簧上质量,例如车体;车辆中与钢轨直接刚性接触的质量称簧下质量,例如轮对和轴箱装置等。

根据刚体运动学可知,在空间内任何一个自由刚体有六个自由度。车辆的各个刚体,一般来讲也有六个自由度,为了确定其位置,可用六个广义坐标来表示,如图 1-1 所示。通过刚体的质心作三个相互垂直的笛卡尔右手坐标系 $Oxyz$,每个刚体均可绕 x 轴、 y 轴、 z 轴作平行移动和回转运动。在车辆系统中, x 轴一般为前进方向, y 轴为水平方向, z 轴为垂直方向;通常



将系统中刚体沿 x 、 y 、 z 轴的平行移动分别称为伸缩、横移和浮沉运动,绕 x 、 y 、 z 轴的回转运动分别称为侧滚、点头和摇头运动。

由于车辆系统是由刚体和弹性悬挂系统组成的,各刚体之间有相互约束关系,因此刚体的有些运动方式是独立的,有些运动方式是受约束的。因此如果整个车辆系统由 n 个刚体组成,它们之间存在 R 个约束条件,那么整个车辆系统的自由度 DOF(Degree of Freedom)可表示为 $\text{DOF}=6n-R$ 。

机车车辆与线路之间的相互动力作用是随着机车车辆的诞生而诞生的,这是车辆系统动力学研究的根本问题,尤其是由于轮轨接触点的运动而引起的车辆与轨道系统间的动力学问题,即轮轨接触关系,是车辆动力学研究的基础。早在 1829 年就有文献中记载车辆“在运行中的持续振动主要是由于车辆和轨道的四个接触点在运行中几乎不可能连续保持在一个平面内引起的……”

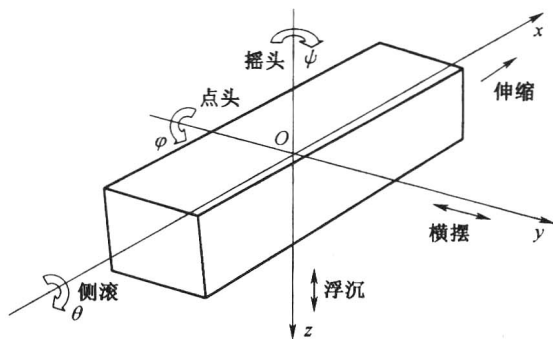


图 1-1 车辆系统动力学的坐标系和振型示意图

不过,当运行速度很低,且列车重量较小时,其动力学问题还不突出。随着社会经济的发展,社会的需求促使铁路运输不断要提高列车的行车速度和载重量,为此需要制造出具有良好结构和性能的机车车辆。另一方面列车运行速度和载重量的提高,使得作用于机车车辆与线路之间、列车中各连接车辆之间的动作用力增大,以及列车与线路各部分的振动加剧。为使机车车辆和线路具有足够的强度和稳定性,保证列车安全而平稳地运行,减小各运动部件的磨损和节约维修费用,提高车辆和轨道各部件的使用寿命,降低其寿命周期成本等,必须解决机车车辆与线路之间以及机车车辆本身的一系列重要课题。车辆系统动力学就是围绕着研究和解决这一系列课题而逐步发展起来的,并已发展成为一门内容丰富的学科。特别是 20 世纪 60 年代以来,随着科学技术的发展,世界铁路进入了高速化和重载化发展阶段,该学科的理论水平及其研究成果都已提高到了一个崭新阶段。下面就其发展过程作一简要的回顾。

二、历史的回顾

安全运行是所有运输模式的首要前提。早在 19 世纪 80 年代的欧洲,就对涉及运行安全的车轮脱轨问题开始了研究,并初步提出了各种计算车轮脱轨临界状态的理论公式,其中有至今尚在应用的简单而实用的 Nadal 公式。在其后的相当长时期,针对欧洲各国二轴货车脱轨问题,国际铁路联盟(UIC)的研究试验所(ORE)和欧洲各国就轨道的扭曲量、车体扭转刚度、弹簧装置挠度和摩擦力、轴距和轴重等许多参数对脱轨的影响进行了大量的理论探讨和试验研究。20 世纪 60 年代,针对新干线高速列车的开行,日本就车辆、线路、装载工况等方面的技



术状态和参数对脱轨的影响及脱轨的过程也进行了研究,提出了轮重的减载、货物偏载、装载高度、横向力与轮重比、车轮对钢轨的冲击速度等的允许极限值。应用这些研究成果,显著地减少了铁道机车车辆脱轨事故的发生。

机车车辆沿直线轨道运行时,在某个速度下要产生特有的蛇行运动,它威胁到列车运行的安全与平稳。尽管早在 1883 年由 Klinger 推导出了自由轮对几何学蛇行运动公式,但当时还未充分认识到这种运动的本质。Carter 认为轮对的蛇行运动是一种不稳定的自激振动,他在 1926 年首先研究了轮轨间的蠕滑现象,给出了纵向和横向蠕滑力的定义以及蠕滑力和蠕滑率之间的简化关系式,并以此来分析车辆在直线轨道上运行时的稳定性问题。1939 年, Davies 通过对轮轨间的蠕滑、轮对和转向架的蛇行运动的一系列模型和实物试验,得到的蠕滑力与蠕滑率之间的关系,证实了 Carter 的理论。模型试验中测得了轮对在不同速度、不同轴箱间隙情况下横向振幅的衰减、稳定和扩大的规律。实物试验表明了车轮踏面磨耗后将会导致车辆蛇行运动的临界速度降低这一事实。

20 世纪 40 年代末期,日本通过在滚动台上进行的一系列模型试验,观测到了车辆的一次和二次蛇行运动特征,并在此基础上设计了铁道货车防止蛇行运动失稳的装置,为日本在 60 年代开展的新干线高速动车组设计和研制中采用新型轴箱定位结构提供了经验。70 年代,欧洲国家也开始筹建高速铁路,为解决高速车辆的关键技术问题,以英国铁路 Derby 研究中心 Wickens 为代表的各国专家学者,又进一步对线性与非线性系统车辆的蛇行运动问题,在更深层次上作了理论和试验研究,并对车辆设计提出了改进结构和合理选择参数的措施,为实现车辆高速运行和防止蛇行失稳提供了保证。

20 世纪后期,对存在着干摩擦的弹性体之间的滚动接触理论的研究十分活跃。Johnson 将滚动接触的二维问题发展为三维问题,使蠕滑理论得到了进一步的发展。而 Kalker 的研究成果更有代表性,他的理论可以对存在着纵、横向蠕滑和自旋的轮轨接触普遍情况确定接触区的蠕滑力和力矩,并分析蠕滑对机车车辆蛇行稳定性、曲线通过和横向振动的影响。

蠕滑理论的建立促进了机车车辆曲线通过理论的发展。20 世纪 30 年代, Poter 完成了古典的适用于小半径曲线通过的摩擦中心理论。60 年代末, Newland 与 Boocock 几乎同时提出了曲线通过的新理论,即认为轮对在曲线上可借助蠕滑力而避免依靠轮缘力来导向。不过由于受到研究中所取线性条件的限制,它只适用于大半径曲线的情况。70 年代, Elkins 和 Gostling 等提出了非线性稳态曲线通过理论,可适用于各种半径曲线,使得在理论的应用上前进了一大步。80 年代, Nagurka 等人又进而研究了车辆通过曲线时的非稳态工况,其中也考虑了蠕滑和悬挂参数的非线性,这就使车辆通过曲线的理论研究更趋完善。

提高车辆蛇行运动临界速度和改善车辆通过曲线性能这两者对悬挂参数的要求是相互矛盾的。20 世纪 70 年代,南非 Scheffel 研制出自导向式货车转向架,成功地解决了这对矛盾,不仅使轮缘磨耗显著减小,而且同时提高了蛇行运动的临界速度。

最初在分析车辆的强迫振动时,把来自轨道的激励简化为简谐函数。20 世纪 50 年代,以



Koffman 为代表的学者研究了车辆在这种激励下的振动特性,并据此提出了关于转向架结构和参数的设计原则。后来,通过使用计算机和实测的轨道谱,应用随机振动理论来计算和评估车辆振动性能的方法更加切合实际。UIC 的 C116 委员会在研究中,将轮轨间蠕滑力和轨道横向不平顺组成车辆横向振动模型中的激励项,引起轮对和整个车辆产生随机性横向强迫振动。

列车运行中由于机车牵引力、线路纵断面外形和制动作用力等的变化以及货车的编组作业,都使整个列车产生动态过程。列车在非稳态运行工况下,可在各辆车之间产生很大的纵向作用力,影响到车辆的强度和使用寿命与安全。以 Жуковски 和 Лазарян 为代表的前苏联学者们在列车纵向动力学研究领域建立起了较完整的理论,可对列车在稳态和非稳态运行工况下及车辆在调车作业中,经受冲撞时所产生的车钩缓冲装置中纵向动载荷的数值和特性进行分析求解。

计算机的采用大大地推动了车辆系统动力学学科的发展。20 世纪末期,用于计算仿真分析车辆系统动力学的各种软件相继问世,这就使得动力学的理论研究成果直接用于合理选择车辆的参数、优化设计及预测动力学性能。随后又研制出用计算机来自动建立系统动力学模型的软件,这对长期以来用传统的人工方法来推导运动方程无疑是一次突破。车辆系统动力学的发展同样是和加强试验研究分不开的,法、德、英、美和日本等国都建有专用的试验线路或实物的振动与滚动试验台,或兼而有之。这是探索车辆动态过程的物理特性、验证数学模型和识别系统参数以及鉴定车辆动力性能所必需的。应用现代化的测量和分析仪器已能对实车现场试验的测试数据作实时处理。

我国对车辆动力学的系统研究是从 20 世纪 50 年代后期起步的。几十年来,广大车辆专业技术人员围绕着设计、研制新转向架和其零部件以及车辆动力学性能试验进行了大量的工作,取得了丰硕的成果并积累了丰富的经验。特别是近十多年来,有关高校和科研部门广泛地应用计算机和现代测试手段,开展了一系列的理论分析、软件开发和试验研究工作,例如车辆脱轨的理论和试验研究,轮轨接触几何关系的分析,磨耗型车轮踏面的设计,车辆随机振动的计算,车辆蛇行运动特性的模拟试验,车辆悬挂系统新型元件的应用,自导向和迫导向径向转向架的开发,高速动车组的研制及动力学性能的预测和试验等,同时开发了有关轮轨关系及机车车辆动力学的应用软件,可对轮轨蠕滑和接触理论、车辆横向运动稳定性、车辆随机响应与运行平稳性、车辆的稳态及动态曲线通过性能等进行计算和预测,其中有的结果已接近国外先进水平,并广泛应用在我国机车车辆的设计中。

三、发展趋势

自 20 世纪 60 年代开始实现铁路运输高速化和重载化以来,对车辆动力学的研究内容在深度和广度上都提出了新的要求。1964 年日本的新干线高速铁路投入运行以后,许多国家竞相修建高速铁路,而且从安全、舒适、高效、节能和环保等方面越来越显示出它的优越性。目前有不少国家都在建设高速铁路。其中欧洲和日本高速列车的成就是令人瞩目的。德国的 ICE



高速列车于 1988 年达到 407 km/h 的最高试验速度,目前其运营速度达 300 km/h。法国高速列车 TGV 大西洋线的最高运营速度已达 300 km/h,其中 TGV-A 型高速列车于 1990 年在大西洋线创下了 515.3 km/h 的世界纪录,V150 型高速列车于 2007 年 4 月 3 日在 TGV 东线创造了 574.8 km/h 的轮轨式铁路列车试验速度的世界纪录。TGV 和 ICE 是当今铁路高科技的典范,它们的开发过程同时也是高速车辆动力学有关课题的研究过程。例如:为了选择和设计 ICE 最佳的车端、横断面和侧墙的流线型外形以使运行阻力降至最小,曾进行了全面的空气动力学理论和风洞试验研究;为设计新型受电弓而进行了受电弓—接触网的动力学研究;为了使列车在全速范围内都具有良好的安全、稳定和平稳运行性能,以及使轮对在通过曲线时具有低的导向力、低的轮轨磨耗和减少走行部的维修量,曾对走行部分的结构和悬挂系统元件的参数进行了优化计算;对所用转向架在试验台上进行了试验,以考核其在高速运行时的稳定性和运行品质。又如为了保证 TGV 在高速时的平稳性和稳定性,基于动力学的研究而采用了 GV1/40 的车轮踏面,增大了横向减振器阻尼,采用了抗蛇行减振器和空气弹簧悬挂装置,研制了 Y231 型新转向架等。为了预测 TGV 的高速运行性能,事先进行了动态曲线通过性能的模拟计算,其考查的动态响应量包括车体和转向架构架上的横向加速度、导向轮对轮轨间的垂向力和横向力等,计算中还考虑了高速运行时转向架的空气动力增载作用和横向气流效应。TGV 的高速运行试验更是大规模地进行了多次,测试结果与模拟计算的对比表明,两者是比较一致的。这说明,只要所取的数学模型是可靠的,利用软件计算就可使得实车在试验前就能获得关于动力性能方面的基本估计。

现代货物列车的编组辆数和牵引重量以及车辆轴重都比过去大大地增加了,一般重载列车的载重量都在 5 000 t 以上,万吨列车也得到大力推广。一个典型例子是,南非在窄轨铁路于 1986 年用 200 辆货车组成了运煤列车,总重达 20 800 t。重载列车在加速、减速和制动过程中都要在各车辆之间、车辆各部件之间以及车辆与轨道之间产生很大的动载荷,因此在设计车辆的纵向承载结构、制动系统、车钩缓冲装置的强度和容量,以及研究列车操纵时,需探明在各种运行工况特别是最不利工况下纵向动载荷的数值和变化特性;这就要以列车纵向动力学理论为基础。长大货物列车通过曲线时的横向稳定性问题也是值得注意的,列车横向动力学的范畴中包括研究在轮轨间横向力和车钩纵向力的横向分量作用下的抗脱轨问题。列车垂向动力学中则包括研究列车运行中的车钩分离及车体与转向架的分离问题。

总之,随着铁路运输的发展,特别是进入高速化和重载化阶段以来,为了不断提高车辆的各种动力性能,各国在车辆及其零部件的结构型式方面出现了许多重大的技术改造和创新。而诸如摆式车辆的横向稳定机构、转向架的导向机构、主动悬挂装置和自动控制系统等更是原理新颖,与传统结构迥然不同。所有这些技术成就都是在车辆系统动力学的理论和试验研究成果的基础上取得的。车辆系统动力学的研究成果应用于实践,推动了车辆新结构和铁路运输的发展;而铁路发展的需要又向动力学的研究提出了新的课题,促进了这一学科的发展;如此相互推动,使车辆系统动力学学科的内容得以不断地丰富,并提高到新的水平。



第二节 动车组系统动力学研究主要内容

高速动车组系统动力学研究的主体是高速动车组,其特点是要充分考虑高速动车组与轨道、接触网和周围气流的相互作用。因此高速动车组系统动力学研究的主要内容是以高速轮轨相互作用模型为研究基础,以传统的车辆系统动力学为研究核心,在空间上考虑向上与接触网和向下与线路之间的耦合振动关系,在时间上考虑列车运行过程的牵引或制动过程中载荷变化与轮轨激励的相互影响和车辆运用过程各种磨损、磨损所造成动车组系统参数变化对动力学性能的影响。在空间上,向上是考虑动车组与接触网系统的振动耦合问题,即考虑受电弓与接触网之间的弓网关系,考查动车组高速运行过程中如何保持受电弓的振动与接触网之间的良好匹配,确保受电弓的受流正常和弓网磨损小;向下是考虑动车组与线路的振动耦合问题,即研究轮轨的相互作用,此时轮轨的相互作用的理论基础是轮轨接触力学和轮轨蠕滑理论,其研究方向是考虑车辆与轨道耦合振动下的轮轨动态相互作用,因此涉及了轮轨相互作用过程中的黏着、疲劳、摩擦磨损和波浪型磨耗等因素对轮轨接触动力学的影响,即需要考虑高速动车组在整个服役环境下的动力学性能。总而言之,高速动车组系统动力学将研究动车组整个力学体系结构,如图 1-2 所示。

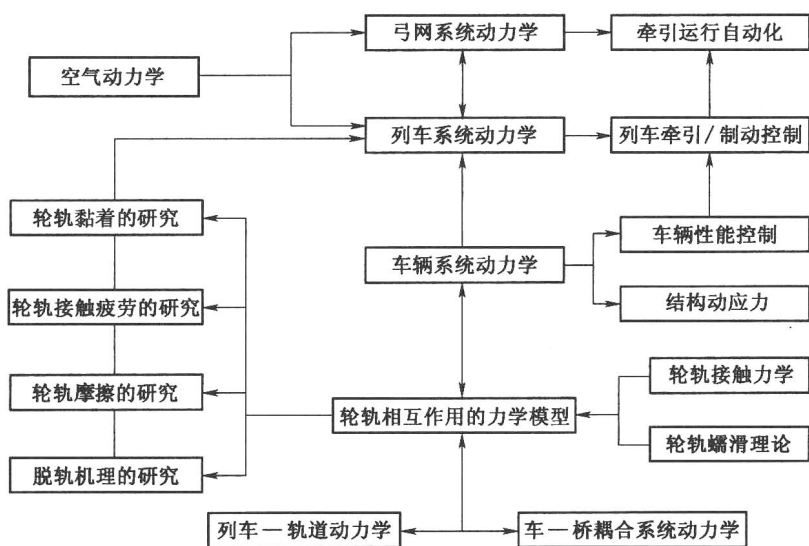


图 1-2 高速动车组系统动力学体系结构

以下便从这几个方面简单介绍高速动车组系统动力学的主要研究内容。



一、高速车辆系统动力学

以轮轨接触动力学为基础的车辆系统动力学是高速动车组系统动力学研究的核心内容。这里主要研究车辆系统动力学的三要素:运行稳定性、运行安全性和运行平稳性。尤其是在高速动车组的研发阶段,需要根据动车组的基本配置情况,运用车辆系统动力学对转向架的悬挂参数进行优化选择,通过理论研究、计算机仿真分析等手段得到合理配置的转向架一、二系悬挂参数,确保动车组的高速运行稳定性、安全性和平稳性。在这个研究领域中,由于需要考虑某些车辆结构在承受较大载荷时出现大变形的情况,有时还要考虑车辆系统中的刚柔耦合的相互作用。为了提高车辆的动力学性能,充分控制车辆接受外界(线路、气流等)的激励时产生的振动响应,可能需要对车辆的运动进行主动控制,因此有时还需要在车辆系统动力学中考虑采用主动悬挂(或半主动悬挂)技术的过程控制仿真和性能研究。由于高速动车组都是成列固定编组,在车辆与车辆之间还布置有耦合悬挂装置,因此为了进一步分析动车组运行过程中车与车之间的相互作用,需要考虑多车辆组合在一起进行研究,即成为列车动力学。在列车动力学中,还需要进一步考察列车在牵引/制动控制中的纵向动力学行为。

二、高速车一线耦合动力学和高速车一线一桥耦合动力学

由于线路模型的不一样,在考虑高速动车组和线路的耦合振动分析中,需要针对实际情况考虑车一线耦合模型和车一线一桥(隧)模型。由于高速铁路线路中存在着连续弹性体(钢轨)、离散体(轨枕)、非规则接触堆积体(石砟道床)和土结构(路基)等不同特性的结构,在空间结构中又有地面线路、桥梁和隧道等区别,因此在考虑车辆一线路的耦合动力学时通常将车一线耦合模型和车一桥耦合模型分开。由于组成轨道系统的材料本身就是非弹性、各向异性和几何形状不规则的,因此轨道系统本身就是一个复杂的随机系统,要将其进行精确建模基本上是不可能的,一般要将其进行合理的简化。通常将钢轨考虑为弹性梁模型,目前一般采用欧拉梁模型。但是随着列车运行速度的提高,尤其是高速动车组高频振动作用强烈,更多的要求采用更加合理的铁木辛柯梁。线路的道岔、轨枕和路基等一般简化为线性多体系统。在这方面比较有名的是我国的“翟一孙”模型(如图 1-3 所示)。该模型中钢轨采用连续欧拉梁模型、轨枕简化为刚

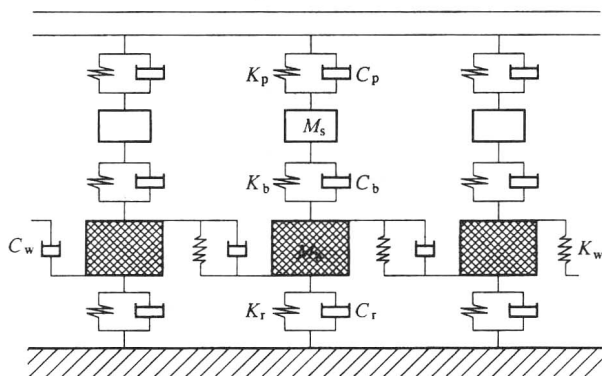


图 1-3 轨道结构模型



体、路基简化为相互之间有耦合作用的等效质量体,所有的质量体之间存在垂向剪切作用的等效弹簧和等效阻尼。

三、高速弓网耦合动力学

受电弓和接触网之间的耦合振动研究是保证高速动车组高速运行时具有良好的受流和动力来源的重要条件。受电弓本身的质量较小,因此在一般的考虑车辆系统动力学中,将不考虑受电弓建模。但是受电弓是支撑在车体上的,由此车体的振动将很大程度上影响受电弓的振动。因此一般采用将受电弓基座与车体之间位移一致性作为车体与受电弓之间的耦合关系。接触网的基本结构是由承力索、接触线和吊弦等组成,其中接触线与受电弓弓头上的滑板接触,达到受流的目的。为保证有足够的滑动波速,接触线一般都需要施加预紧力使其悬线张力维持在 $10\sim 20\text{ kN}$,也有一些接触线的张力更大,以提供更大的接触刚度。承力索一般呈自然悬垂形,以承担接触线的垂向重量。吊弦只承受单向拉力。接触网的结构有简单链型悬挂、弹性链型悬挂和复链型悬挂 3 种,我国一般采用简单链型悬挂接触网,如图 1-4(a)所示。这时一般可忽略吊弦质量,而仅考虑弹性力。由于弓网接触的振动多属于低频振动,因此承力索和接触线均考虑采用欧拉梁模型,如图 1-4(b)所示。值得一提的是,随着列车运行速度的提高,对弓网接触振动的要求提高,以保证受电弓在高速运行条件下的平稳受流。因此对接触线的垂向刚度一致性要求更高,而弹性链型悬挂则具有这方面的技术优势,因此在我国的高速客运专线上也逐步开始应用弹性链型悬挂接触网,如图 1-4(c)所示。复链型悬挂主要用在日本新干线上,即在承力索和接触线之间增加一条辅助承力索,如图 1-4(d)、(e)所示。这种悬挂方式使系统的弹性大大降低,并且保持好的弹性均匀性。但是在锚段关节处和线岔处理时过于复杂,并且费用很高。

当高速动车组在地面线路运行时,接触网架设在地面上,通常不考虑接触网与路基等的振动耦合情形。但是当高速动车组在桥梁上运行时,由于接触网也架设在桥梁上,相应的接触网模型还应考虑与桥梁的耦合作用。

四、高速动车组空气动力学

空气动力学问题是高速动车组系统动力学中不可避免的一个问题。随着列车运行速度的提高,气流对列车运行的影响就越大。在车辆系统动力学中,可以简单考虑气流对列车运行的空气阻力和侧向载荷的影响等,但实际上高速动车组运行时,高速气流对动车组(包括受电弓)的作用不仅是阻力和噪声,还会引起车辆运行姿态的改变、引发振动,因此一般应进行基于流固耦合作用的高速空气动力学分析。其中空气模型一般采用三维 Navier-Stokes 方程描述,高速动车组设定为刚体,它们之间的耦合作用采用流体边界层和车辆表面的运动速度一致性关系来实现。

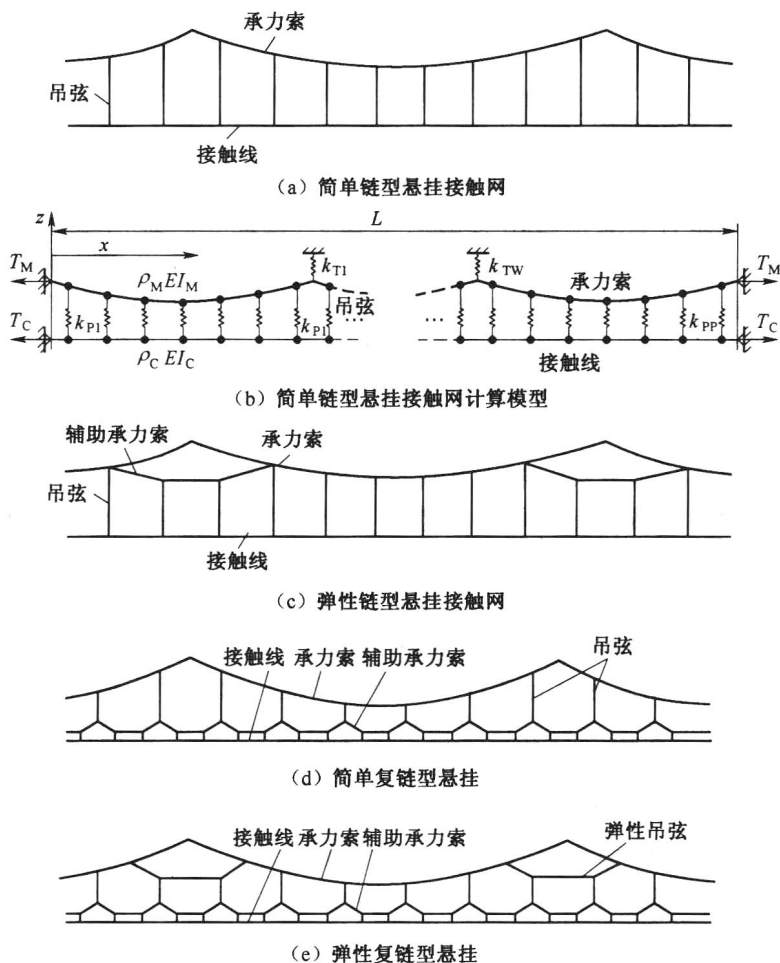


图 1-4 接触网结构模型

第三节 动车组系统动力学性能

如前所述,当高速动车组在轨道上高速运行时线路(包括周边环境)会给予动车组以各种确定性和不确定性的激扰,从而影响动车组在运行中的受力状况,特别是轮轨间的动力作用可能会发生较大的变化,直接影响行车的安全性和平稳性。尤其是当动车组的激振频率与线路(特别是桥梁)的固有频率相同或者相近时,将引发动车组与线路之间的共振,严重危及行车安全。因此必须对动车组的动力性能进行细致研究。通常认为动车组动力性能主要包括运行安全性、运行稳定性、运行平稳性、乘坐舒适性和曲线通过能力等,这些性能在动车组系统动力学