



机车车辆动态模拟

Dynamic Simulation of Railway Vehicles

张卫华 著

Zhang Weihua

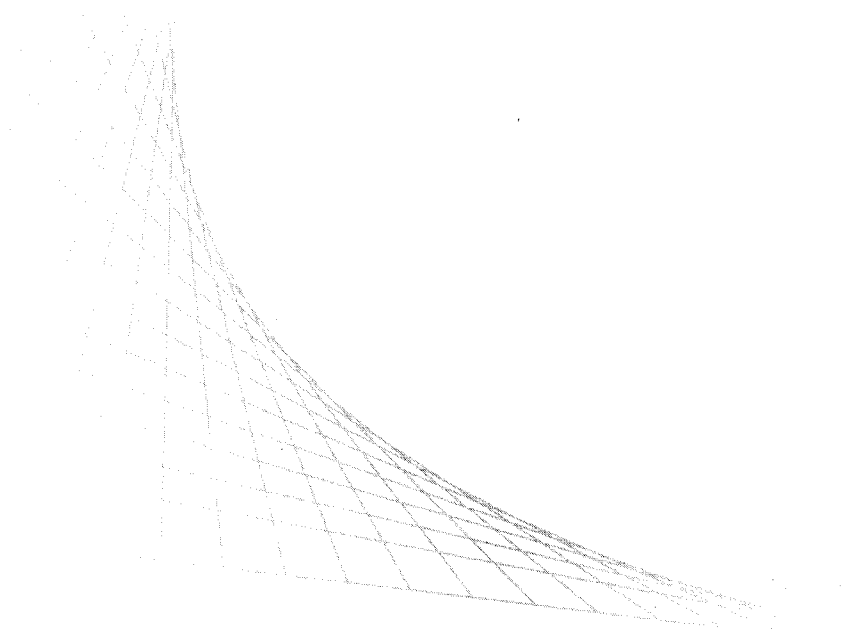
中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

国家科学技术学术著作出版基金资助出版
铁路科技图书出版基金资助出版

机车车辆动态模拟

Dynamic Simulation of Railway Vehicles

张卫华 著
詹斐生 审



中国铁道出版社
2006·北京

图书在版编目(CIP)数据

机车车辆动态模拟/张卫华著. —北京:中国铁道出版社,2007,1
ISBN 7-113-07479-0

I. 机… II. 张… III. 机车-车辆运行-动态模型-研究 IV. U260.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 147349 号

书 名:机车车辆动态模拟

作 者:张卫华 著

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)

责任编辑:韦和春 薛 淳 编辑部电话:(路电)021-73139 (市电)010-51873139

封面设计:冯龙彬

印 刷:北京盛兰兄弟印刷装订有限公司

开 本:787mm×1 092mm 1/16 印张:28.25 字数:506千

版 本:2006年12月第1版 2006年12月第1次印刷

印 数:1~2 000册

书 名:ISBN 7-113-07479-0/U·1976

定 价:65.00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,请与本社发行部调换。

作者简历

张卫华,男,1961年生,江苏宜兴人。现任西南交通大学长江学者特聘教授、博士生导师,牵引动力国家重点实验室主任。国家杰出青年科学基金、教育部跨世纪优秀人才基金和全国百篇优秀博士学位论文获得者。

长期从事机车车辆系统动力学及控制的研究,在机车车辆整车运行动态模拟、新型机车车辆开发及试验研究和受电弓-接触网系统研究等方面,取得多项创新成果,其中参加主研的成果“机车车辆整车滚动振动试验台”获得国家科技进步一等奖(排名第二),主持完成的成果“铁道机车车辆走行部理论研究及应用”获国家科技进步二等奖,另外获得省部级科技进步一等、二等奖各2项。

发表学术论文140余篇(其中被SCI检索20篇,EI检索60余篇),论文《A study on dynamic behavior of pantograph by using hybrid simulation method》被英国机械工程师学会评选为2005年度学会最佳优秀原创性论文,并授予Thomas Hawksley金奖。

目前,作者是四川省和铁道部学术带头人,荣获了包括茅以升铁道科技奖、詹天佑铁道科技奖-成就奖、新世纪百千万人才工程国家级人选和政府津贴获得者在内的十多种荣誉奖励。作为牵引动力国家重点实验室的创始人之一,作者先后两次被评为国家重点实验室建设先进工作者,授予金牛奖,所领导的牵引动力国家重点实验室在2003年国家重点实验室评估中被评为优秀。作者置身于我国铁路事业的教学、科研和技术服务,为我国铁路现代化做出了重要贡献。

内 容 提 要

本书是第一本以机车车辆模拟试验为主线的动态模拟方面的专著,书中关于机车车辆的试验方法、试验标准和试验误差分析是指导机车车辆动态模拟试验台和测试试验台的设计和运用的有效工具,具有良好的应用价值和参考意义;书中所介绍的轮轮接触关系研究是最新的研究成果,特别是提出的轮重减载与横向力和脱轨的相互关系、高速和振动条件下的黏着特性、波浪形磨损产生的充要条件均是笔者所在牵引动力国家重点实验室的重要发现;机车车辆非线性稳定性理论、轨道谱反演、列车动力学仿真计算方法和弓网系统耦合模型是理论性强的研究成果;书中混合模拟技术、动应力研究和机车车辆虚拟样机平台研究,均是笔者在国内首次提出并开展研究的国际上最前沿的研究成果;书中最后一章所展望的机车车辆动态模拟技术,将促进机车车辆动力学的进一步发展。

本书内容来源于工程,应用于工程,并在理论上得到升华。本书所介绍的研究成果,如滚动振动试验台设计理论和试验方法,参数测定试验方法,已应用到近 10 个铁路机车车辆生产企业,并指导了 50 余个机车车辆试验台试验。又如受电弓-接触网系统耦合动力学研究成果,也在铁路勘察设计院、电力机车厂等单位广泛应用,所产生的经济效益超亿元。另外,机车车辆试验台试验方法已写进铁道部标准《机车车辆动力学性能台架试验方法》,与滚动试验台相关内容已写进英文版的《A Handbook of Railway Vehicle Dynamics》(铁路车辆动力学手册)。

本书适合于机车车辆专业的科研、设计和试验人员阅读参考,并可作为高等院校相关专业的硕士和博士研究生的教学用书。

研制一个实物轮对的动态模拟轮轨试验台,开展轮轨相互作用研究是本人长期的心愿,并以此为目标,于1988年开始筹建牵引动力国家重点实验室。在随后的实验室建设论证中,动态模拟轮轨试验台建设的目标和规模不断扩大,从模拟一根轮对,到一个2轴转向架,并将最后的建设方案扩展到4轴整车。在具体的试验台研制过程中,不仅要克服手头资料缺,学校教师实际设计经验少等困难,还要克服我国机械制造工业水平相对落后,所用工艺和配件难以实现等困难。重达几百吨的大型试验台是成功研制,还是成为一堆废铁,作为实验室主任的我心里忐忑不安。直到1993年试验台开始试运行,特别是1995年以后的大量机车车辆上试验台顺利开展试验研究,我心中的一块石头才终于落了地。

1

回顾滚动振动试验台的建设和运用历程,从机车车辆整车滚动振动试验台在性能上达到设计要求,特别是在我国铁路提速和高速列车研制中发挥重要作用,并为铁道部和铁路机车车辆工厂所普遍肯定和承认,到试验台获得国家科技进步一等奖,其中的功臣之一就是本书的作者——张卫华。张卫华从实验室筹建开始,一直干到现在。随着试验台的建设和运用,他从一名助教成长为“长江学者”特聘教授。围绕试验台的建设与运用,他从机车车辆试验台试验方法研究开始,经历了试验台方案设计、施工图设计、生产监制、安装调试、标定和试验运行。围绕试验台建设和运用这一庞大的工程问题,他结合博士论文的撰写,加以系统的理论研究,提出了机车车辆台架试验最佳方法,分析研究了滚动振动试验台的结构方案和动力学特性,给出了机车车辆台架试验所特有的轮轮接触几何关系,建立了机车车辆台架试验动力学模型,并在此基础上,研究了

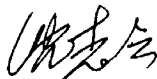
机车车辆台架试验和线路运行在动力学性能上的差别,并指出了试验台本身的状态误差对机车车辆动力学性能试验结果的影响趋势。这些研究为试验台的设计和运用提供了很好的理论支持。为此,该博士论文被评为全国百篇优秀博士学位论文,也成为本书稿的主要内容。

以轮轨接触为特征的机车车辆动力学研究是机车车辆发展和列车提速的基础。随着计算机技术和试验技术的发展,动态模拟将成为机车车辆动力学研究的主要方法,在以往的与机车车辆动力学研究有关的书籍中,大多只涉及计算机模拟方面的研究。本书的出现,不仅把机车车辆动态模拟延伸到实物模拟,而且还运用计算机仿真技术,提出新的列车动力学仿真计算方法,并借助于试验台试验,在对计算模型和计算方法进行验证的基础上,开展机车车辆动态仿真研究,给出机车车辆台架试验的误差。书稿在研究实物模拟和计算机模拟的基础上,进而提出了半实物半虚拟的混合模拟方法,并应用到了弓网关系的模拟研究中去,这一创新工作丰富和发展了机车车辆动态模拟技术。另外,书中针对目前我国铁路机车车辆可靠性差这一实际情况,倡导将动力学的仿真理念延拓到强度分析,开展动应力的模拟研究,例如接触网的动应力研究。书稿中结合铁路机车车辆的发展,特别是高速化技术的发展,提出了机车车辆动态模拟的发展方向设计,包括虚拟样机技术的应用和发展。本书除了对铁路的主要载体——机车车辆开展模拟研究外,同时还研究了机车车辆与固定设备的相互关系,即轮轨关系和弓网关系,对其中的热点问题开展了模拟研究,获得一系列新的研究成果。在机车车辆台架试验研究方面,本书稿在总结试验研究经验的基础上,提出了机车车辆台架动力学试验方法和参数测定方法,使得机车车辆试验有章可循。

本书稿是作者参与机车车辆动力学研究以来的工作总结,同时也是牵引动力国家重点实验室最新研究成果的体现。目前正值铁路跨越式发展之际,提速和高速铁路研究必须建立在深入的动力学研究基础之上,并有赖于机车车辆动态模拟技术和应用技术的不断创新。本书稿的面世,无疑将成为铁路机车车辆研究的重要参考用书,并对促进和推动机车车辆动力学研究的发展作出重要贡献。

中国科学院院士

中国工程院院士



2006年5月6日

应本书作者张卫华教授的诚邀,对《机车车辆动态模拟》一书进行了校审。通过校审,本人不仅回顾了机车车辆动态模拟的发展历程,特别是在我国铁路现代化发展中所起到的巨大作用,而且也学到了很多新知识。感受良多,特以校审者的名义写下本序,与作者和广大读者共勉。

本书是作者从事机车车辆动态模拟研究 20 年来科研历程的缩影和总结。作为本书稿论述基础的《机车车辆运行动态模拟研究》已入选全国百篇优秀博士学位论文,这既是对作者辛勤劳动的肯定,也是对该命题在学术和工程应用上价值取向的肯定。同时,作为动态模拟基础试验设备的机车车辆整车滚动振动试验台已获国家科技进步一等奖,充分褒奖了它在铁路提速和机车车辆研制开发中不可替代的作用;作者作为试验台的技术负责人,从立项伊始,一直指挥战斗在设计、制造、调试、运行及扩能改造的第一线。显然,孕育本书稿的土壤十分肥沃,条件得天独厚。在这样背景下形成的书稿,以两种主要的动态模拟,即计算机仿真模拟和实验室实物模拟为主线,显示了牵引动力国家重点实验室团队及其骨干成员的事业抱负、拼搏精神、严谨学风等方面的风范性素质。可以说,书稿是丰硕研究和实践成果的集成,其集成过程体现了不断探索、不断总结、不断提高和不断改进的科学发展观。

动态模拟对于铁路的重要性,犹如它对航天航空部门一样,直接关系到运行和生命财产安全,未经充分验证和考验的产品是不允许直接在现场环境中进行试验的。众所周知,机车车辆、轨道系统是一类典型的多学科复杂交叉系统,长期以来一直处于分离子系统的初级简化研究层次,虽然可以借助实验动力学的现场试验缓慢地取得某些技术的进步,但太过于表观,而且成本昂贵,安全风险又很

大。尤其是,所获得的数据是综合结果,既无法分离出子系统之间的相互作用,又无法判断动态行为消长的本质性关系,从而也就很难把表现现象上升为可操作的理性认识,以至于产生了困扰铁路百年的顽疾,像脱轨、蛇行、波浪磨耗……。因此,本书稿的面世,不仅是为铁路科技,乃至机械工程、控制工程、材料工程等学科交叉输送新鲜血液和养分,而且也是为人才培养提供专业基础教材。不仅如此,在与世界铁路的知识交流和技术合作方面,书稿的面世还将有助于发挥我们更大的主动性和积极性,并增强我们在其中的主导地位。早在 20 世纪 90 年代,由于我国在计算机动态仿真模拟方面的优势,已经与国际铁路系统动力学站在了同一水平线上,我国的研究动向和研究成果在国际业界中已具有举足轻重的影响力。就当前动态模拟研究的现状而言,由于我国整车滚动振动试验台比任何国家的同类装置都具有更多的功能和更大的规模,事实上我国的实验室实物模拟水平就代表着世界水平,而且这一水平已经经受了我国铁路提速和机车车辆样机现场试验数据的检验。

运行动态模拟成果的产生是时代呼唤和社会需求的产物。20 世纪七八十年代我国高速重载的兴起,急切呼唤铁路要对若干重大的动态行为作出科学的运行安全预测和评估,并为克服和防治有害动态效应提出可操作的有效措施。铁路要摆脱对有害动态效应的无力状态成了当时满足高速重载社会需求的瓶颈。对此尽管反响强烈,但国家的“211 工程”决策,独为西南交通大学敞开了建造足尺滚振试验台的大门。这一得天独厚的条件,可以在计算机仿真模拟和实验室实物模拟之间建立起互补、互证和互动机制。足尺试验台除了轨道曲率相似性差,必须要用轮轮接触关系模拟轮轨接触关系之外,其他的相似关系相对简单。比起小比例实物模拟试验台来,其运行条件更加逼近真实工况。显然,在传统的线路试验速度范围内,铁路提速和研制样机的现场线路试验数据也可以与滚振试验台的实物试验建立起互补、互证和互动机制,从而改善滚振试验台数据的误差和可信度。

书稿论述的第三类动态模拟是混合模拟,这是一类更为灵活方便的虚实结合模拟。通常,可以把研究对象或无法用数学模型精确描述的子系统作为实物来处理,而把实物构建困难或可用数学模型精确描述的子系统作虚拟处理。在研究弓网动态模拟时,作者以实物受电弓运行在虚拟的接触网子系统中,使本来无法在实验室内进行的受电弓动态试验成为可能,并直接对受电弓性能进行了分析。可以设想,当把机车车辆视为一个在天上(接触网)与地下(轨道路基)之间的运动物体时,那么它和天上地下构成相互作用的庞大系统将涉及机、电、气、油、水、土壤以及各类工程材料的集合与交叉,混合模拟将具有发挥作用的广深空间,当需要引入控制手段驾驭系统的动态行为的响应时,将尤为方便。

本书稿的叙说层次清晰、目标明确,并遵循循序渐进的原则。它首先从动态模拟装备的基础入手,阐述实验室台架试验的装置及其国内外现状、被试对

象的参数测定以及台架性能试验的实验和评价方法。由于足尺滚振试验台是用有限曲率的滚轮模拟零曲率的真实轨道的,书稿也引述了轮轨动力学的基础理论,并分别就轮轨和轮轮接触论述了真实轮对和模拟轮对的动力学运动方程,并对其动态行为作了比较。第8章以此为理论基础,开始对蠕滑力、脱轨、黏着和波浪磨耗等现象进行计算机仿真模拟和试验台实物模拟,取得一批可喜的动态模拟成果,尤其是在试验台上再现了特定条件下的脱轨和波浪磨耗。第9章以重载和高速为目标,面向铁路提速和机车车辆样机开展开各类实验室实物动态模拟,充分发挥滚振试验台的优势和潜能,并与计算机仿真、现场样机实物试验建立起互补、互证和互动机制,通过参数优化提高样机的动力学性能水平,使滚振试验台发挥了不可替代的作用。

由于滚振试验台模拟的轨道条件偏离现场试验的真实运行条件,台架试验数据必然包含误差。书稿第10章利用理论计算方法来分析试验台试验与线路运行试验之间的差异,并以此来修正台架试验结果。这一章对于数据的可信度是必不可少的,它同时也为试验台功能的扩大和性能改进提高原始积累。

受电弓-接触网系统是机车车辆动力学的主要基础模块,直接关系到平稳稳定受流的质量和接触网波动的传播速度,是决定轮轨式运输极限时速的关键环节之一。构成相互作用的元素,除了刚体和弹塑体之外,还涉及柔索体和纯索体,且被置于强电磁场的环境之下。作者显然非常关注这一系统的复杂性和重要性,早在硕士阶段就开始着手研究,并一直延续至今。考虑到接触网延长的尺度太大,建造受电弓动态模拟实验室代价非常昂贵,从而选择混合模拟对其进行研究。第12章描述了这一探索和研究的过 程,并用事实说明混合模拟是切实可行和方便有效的。此外,作者首次借助于动力学计算和强度计算相结合的方法,对受电弓运行状态下的接触网动应力作了同步仿真模拟。显然,可以将这种同步模拟延拓到其他类似的零部件中去,这对零部件强度性能的改善和可靠性寿命的提高将大有益处。

尽管书稿留有作者独立论文组合的痕迹,贯穿书稿的思考脉络依然清晰可见,章节之间是有机联系着的。必须指出,就重要性而言,书稿的第6、7、8章是基础和精髓。众所周知,轮轨滚动接触及其效应是铁路机车车辆所固有的属性,滚动接触蠕滑力既是牵引力的源头,也是一切不稳定动态行为的发源地。既然是在滚动振动试验台上模拟机车车辆的运行,就必须用轮轮滚动接触的几何关系和蠕滑力作用机制来建立滚振台的轮对运动方程,并借助于实测的动力学参数,分析机车车辆模拟运行的各种动态效应,或预测它在真实线路上的运行性能走向,或比较它在轮轨接触条件下的计算机仿真结果,以期捕获任何可能出现的不稳定因素和有害动态效应。因此,融会贯通第6、7、8章是理解机车车辆动态模拟的钥匙。

毋庸置疑,动态模拟是服务于产品开发目标的手段。只有掌握模拟对象各体

之间的内在本质联系以及模拟方法学,才可以将其应用在产品的设计、制造、运用和维护的各个阶段上,并可借助于接口连接扩延到模拟对象的任一组合或任一可分的细部,前者如列车动力学,后者如弓网关系。就列车动力学而言,书稿介绍了作者编制的列车动力学软件 TPLTrain。在剖析现有同类软件不足的基础上,著者在建模时细化了列车、车辆、线路的定义,并包罗了牵引、制动和空气阻力三种工况,因此大大扩大了求解的自由度数目。为了化解求解难度,作者巧妙地选择了基于循环变量的递推积分方法,从而不仅有效地减小了一次积分的规模,也因此大大简化了建模过程,可以实现列车的任意编组和建模。

同样,虚拟样机或基于虚拟现实的虚拟样机是模拟手段和模拟方法学的发展和延扩,它可以代替物理样机产品进行创新设计、测试和评估,既缩短开发时间,又降低成本,使产品达到时间、质量、成本、服务和环境都最佳的效果,因此,虚拟样机的研究已成为当今的一大热点。由于虚拟样机研究固有的特性,即全系统的模拟,全生命周期的优化和全方位全视角的评估,使得产品的开发达到极至的理想境界。有理由可以相信,虚拟样机技术将为产品创新和研制开创一个革命性的新时代,作者在书稿中不仅对其作了详细的介绍,还特地用弓网系统研究作实例,对虚拟样机技术作出诠释。但愿作者正在主持的机车车辆虚拟样机设计平台尽快建成并投入使用。

6

综上所述,书稿认真总结和忠实记录了从 20 世纪 80 年代以来,我国在机车车辆动态模拟领域内的历史和丰硕成果,见证了众多机车车辆动力学研究团队的成熟和一大批青年骨干的成长,铁路和机车车辆动力学攻坚后继有人,盛旺有望,而这,不仅仅限于作者所在团队及作者本人,也包括了所有为此作出贡献的其他高校、科研院所、工厂以及运用运营单位。

应该承认,贯穿书稿全线的主线是工程应用。围绕着改善和提高机车车辆动力学性能,确保运行安全、延长设备服役寿命和完善服役环境,书稿既介绍了一般的基础常识,也论述了铁路专业基础理论和相关学科的学术进展和交叉信息,为机车车辆动态模拟描述了一幅极至的远景。我衷心祝贺书稿的出版,并祝愿它能吸引众多的机车车辆动力学科技人士,成为机车车辆现代化事业之一支力量。

铁道科学研究院博士生导师
铁道科学研究院研究员

詹斐生

2006 年 5 月 10 日
于北京

铁路机车车辆是典型的大型复杂机械系统,包括运动稳定性、运行平稳性和安全性在内的相应的动力学性能,是机车车辆最重要的性能指标。随着列车运行速度的提高,机车车辆运行的服役环境不断恶化,由于系统振动加剧,对机车车辆动力学品质,特别是运行安全性提出了更高的要求。为了适应机车车辆研究的需要,新的动力学研究方法不断涌现和完善。例如,实物试验装备从小比例模拟滚动试验台进步到足尺寸滚动试验台,进而发展到可进行动态服役全环境模拟的滚动振动试验台;动力学计算从简化的机车车辆线性模型,发展到可以充分考虑非线性因素的仿真技术,目前正在朝更高层次的虚拟样机技术和虚拟现实技术发展。研究内容的广度和理论的深度在不断提高,研究成果层出不穷,即便是最基础、最古老的轮轨接触问题,在新的研究方法和试验技术支持下,也在不断取得新的突破。

牵引动力国家重点实验室是我国轨道交通领域车辆界唯一的国家级开放研究实验室。实验室运行之始正值我国铁路大提速之时,实验室以铁路实现跨越式发展为己任,研制成功目前世界上规模最大、功能最多的机车车辆整车滚动振动试验台,为新型机车车辆开发提供了强有力的试验研究手段,该试验台在我国铁路提速和高速机车车辆研制中发挥了不可替代的作用。围绕铁路机车车辆动态模拟研究,承担了包括国家攻关项目、国家自然科学基金重点项目在内的一大批研究课题,取得以机车车辆整车滚动振动试验台、270 km/h 高速列车、摆式列车为代表的一批科研成果,并在机车车辆非线性稳定性、轮轨关系和弓网关系等基础理论研究方面取得突破性进展。

为了展现在机车车辆动态模拟方面的最新发展和研究

成果,满足博士和硕士研究生教学的需要,笔者以全国百篇优秀博士学位论文《机车车辆运行动态模拟研究》为基础,以获国家科技进步一等奖的机车车辆整车滚动振动试验台为背景,结合笔者取得的相关研究成果,并引用了牵引动力国家重点实验室最新的一些研究进展,形成本书。

由于本书的主体内容是笔者从硕士研究生开始的研究成果和 20 年来的科研工作总结,故所有的内容都是笔者主持或参与的国家自然科学基金项目、国家攻关项目和省部级科研项目研究成果,几乎所有的章节都是由笔者已发表的论文所构成。因而,本书章节之间基本上相对独立,但笔者注意尽量使其做到结构的完整性和内容的连贯性。

第 1 章是绪论,考虑到在研究生教学中会有许多非机车车辆专业的学生,本书一开始用很少的篇幅介绍了铁路发展的历史和铁路系统的构成,引出了机车车辆动态模拟的三种不同方法,即实物模拟、计算机仿真和混合模拟的概念。

第 2 章在论述机车车辆试验台试验的重要性和优越性的基础上,对机车车辆整车动态模拟试验台进行了分类,介绍了机车车辆整车试验台的发展情况,最后重点介绍了在国际上影响较大的国内外机车车辆整车试验台。

第 3 章在研究机车车辆运行模拟方法和定义轨道谱概念的基础上,详细介绍了牵引动力国家重点实验室研制的曾获国家科技进步一等奖的机车车辆整车滚动振动试验台的设计方案、关键技术、性能指标和功能,以及对试验台动态特性的标定结果。

结构决定功能,参数决定性能,机车车辆动力学参数的测定和机车车辆性能测定一样重要。所以,第 4 章给出了笔者所提出的车体重量、重心(特别是重心高)和转动惯量的悬吊测定方法以及具体的计算公式,进而从理论和概念上介绍了转向架悬挂参数的测定方法,最后通过实例对机车车辆参数测定方法进行诠释。

规范机车车辆台架试验,建立机车车辆台架试验标准是一项基础工作。第 5 章以现有机车车辆动力学试验评估标准为基础,提出了机车车辆运动稳定性、运行平稳性、安全性以及机车车辆悬挂模态和车体模态的台架试验方法。本章还重点介绍了利用滚动振动试验台进行轨道谱反演的方法。

轮轨接触是铁路系统的特性,轮轨接触几何关系是机车车辆动力学研究的基础。第 6 章系统介绍笔者所开展的机车车辆台架试验所特有的轮轮接触几何关系的计算方法,并与轮轨接触几何关系进行了对比分析。本章还在介绍轮轨接触基本参数的基础上,提出了轮轨型面的设计准则。

机车车辆动力学模型和一般机械动力学模型的最大差别,是基于轮轨接触蠕滑力作用的轮对运动方程,而机车车辆运动稳定性性能也受制于以运行速度为参变量的蠕滑力影响。所以,第 7 章在给出轮轮接触条件下蠕滑率计

算公式的基础上,导出了机车车辆在试验台上的轮对运动方程,以及基于Poincaré'点映射不动点判稳的非线性稳定性判稳方法,并通过实车试验,分析了机车车辆非线性运动稳定性。

前面的章节是机车车辆动态模拟的装备基础和理论基础。从第8章开始,进行机车车辆动态模拟的探讨和研究。首先是从轮轨关系的动态模拟研究开始,利用滚动振动试验台,采用实物转向架或轮对模型,进行了非线性轮轨蠕滑力模型的验证;进而研究了在高速、振动和轮轨表面污染条件下的轮轨黏着特性,得到非线性、非单调的黏着曲线。利用实物试验,在试验台上再现了脱轨和轮轨波浪形磨耗,提出引发(稳态)脱轨和波浪形磨耗的必要条件。

第9章集中介绍了典型机车车辆的台架动力学性能试验,同时和仿真计算进行比较,对计算模型进行验证,进而通过计算机仿真计算,对一些典型机车车辆进行了动力学性能预测和参数的优化研究。

机车车辆台架试验,毕竟是在试验台上完成的。用有限半径的滚轮代替无限半径的钢轨,带来了无法避免的误差。所以,第10章针对机车车辆动力学三要素——运动稳定性、运行平稳性和安全性的台架试验,利用计算机仿真,在与线路运行工况计算结果比较的基础上,进行了机车车辆试验台试验的误差分析。同时,还分析了试验台状态对试验结果的影响。本章的研究成果对试验台试验有很好的指导作用。

在机车车辆实物模拟中,早期采用的方法是小比例滚动试验台试验。第11章在介绍基本的相似比基础上,结合DLR和MMU的小比例试验台,介绍了1:5比例试验台设计思路和试验台结构,并分析了它们所固有的试验误差,指出了小比例试验台试验的固有不足。

机车车辆作为铁路运输的主体,它的性能不仅依赖于第8章所涉及的轮轨关系,同时也依赖于弓网关系。第12章系统介绍了受电弓-接触网的耦合动力学研究成果。首先详细介绍了笔者所建立的弓网耦合模型,提出了接触线不平顺的理念,并分析接触线不平顺和弛度对弓网系统动力学的影响。本章还系统介绍了笔者所提出的半实物(受电弓)、半虚拟(接触网)混合模拟技术和应用实例。作为机车车辆动态模拟的延拓,本章介绍了在受电弓运行下,接触网动应力的仿真模拟技术。本章最后还介绍了在主动受电弓研究方面的成果。

第13章在指出现有机车车辆动力学研究中的不足和开展列车系统动力学研究必要性的同时,笔者提出了基于循环变量的列车系统动力学仿真积分计算的递推积分方法,从而不仅有效地减小了一次积分计算的规模,同时也大大简化了建模过程,实现了可以自由编组的列车系统建模。

机车车辆动态模拟的最高境界是虚拟样机和虚拟现实。第14章在介绍笔者正在主持研制的机车车辆虚拟样机设计平台的框架基础上,介绍了基于

虚拟样机技术的受电弓-接触网系统的研究,对虚拟样机技术进行诠释。

第 15 章是本书最后一章,实际上是笔者从高速列车研究的角度,由机车车辆动态模拟与铁路技术的关系出发,思考今后机车车辆动态模拟技术的发展和相关课题的设置。这既是笔者以后需要努力的方向,同时也是向同行们发出的邀请,希望共同来关心和发展机车车辆动态模拟技术,为我国铁路高速重载运输事业的发展贡献力量。

本书的出版,得益于方方面面的支持和帮助。首先我要感谢我的硕士和博士研究生导师,中国科学院和中国工程院院士,牵引动力国家重点实验室创始人沈志云教授,正是他的悉心指导,我的博士学位论文才得以评为全国百篇优秀博士学位论文,成为本书的基础。当然我要感谢牵引动力国家重点实验室的全体同仁,是他们的积极配合和支持,保证了各项科研工作的顺利开展,使一些研究成果成为本书的重要内容。我还要感谢我指导的研究生们,本书是他们共同努力的结果。我要特别感谢铁道科学研究院的詹斐生研究员和北京交通大学缪龙秀教授对本书的细致审阅和平时一贯的帮助。其次我要感谢国家自然科学基金委员会,教育部科技发展中心,铁道部科技司,教育部人事司和科技司,四川省科技厅,长江学者奖励办公室等单位对本书所涉及的研究工作所提供的有力资助。最后要衷心感谢国家科学技术学术著作出版基金办公室、中国铁道出版社的领导和编辑,是他们的直接支持和辛勤工作促成了本书的及时出版。

本书内容多,涉及知识面广,而且有些研究正在进行之中,内容上还缺乏系统性和严谨性,虔诚期望在以后的再版时能得到完善。另外,作为研究生的教学用书,特别增加了一些基础知识和基本概念,使得本书显得冗长。如此种种,限于作者水平,肤浅之处敬请同行们多多指教,书中错误和不当之处在所难免,也请广大读者批评指正。

张卫华

2006 年 5 月 1 日
于成都西南交通大学

Railway vehicles are large-scale complicated machines. Their dynamic characteristics including motion stability and curving behavior are crucial indices which measure the quality and behavior of the vehicle systems.

Vehicle vibration increases with the increase of train speed. This causes a deterioration of the service environment which reduces the life of the structural components of the train. Furthermore, vibration may reduce passenger comfort, lower vehicle stability, and generate impact noise between wheels and rails. Severe vibration can even cause train derailment, and therefore, higher dynamic quality, especially running safety, is crucial for trains running at high speeds.

11

To meet the need for research on the technology of high speed trains, the dynamic models of vehicle systems have been gradually improved, and new methods and techniques have also been developed. For instance, the small-scale roller test rig which simulates vehicle dynamic behavior has been extended to full-scale. The rig has been further improved to enable the reproduction of vehicle running behavior on track. Existing linear models of railway vehicles have been improved to include the non-linear factors which can accurately characterize the essential features of actual vehicle structures. Traditional numerical simulation has been gradually replaced with the use of the virtual prototype. Due to the potential increase in the number of high speed trains in China and the complex engineering problems associated with their use, it is

necessary to increase the scope and depth of dynamic theory studies for railway vehicles. With the help of new methods and means, advances in science and technology have been achieved for high speed train research. Important progress has also been made in the basic and complicated rolling contact problems of wheel/rail systems.

The Traction Power Laboratory (TPL) is the largest State Key Laboratory for transportation research in China and has an international reputation for work in this area. The multiple function full scale roller test rig developed by TPL has played a key role in raising train speed on existing railway lines and the rapid development of high speed passenger and heavy haul rail services in China. The scaled test rig has become an irreplaceable tool in the development of new types of rolling stock in China. The test rig has enabled numerous test simulations of actual rolling stock to be carried out, resulting in the prediction and optimization of dynamic behavior. Based on the studies of the dynamic behavior of rolling stock, the laboratory has taken charge of many important research activities including undertaking national projects and key projects granted by the National Natural Science Foundation of China. The full-scale roller test rig was successfully applied in test studies of the tilting train and 270 km/h high speed train, which finally passed the field tests. The academic researchers associated with the laboratory have made great progress in the nonlinear theories of vehicle system dynamics, the theory of wheel/rail systems, and the dynamics of pantograph/catenary systems.

This book has been written to present our recent research accomplishments and to meet the study needs of post-graduates and staff for their teaching and research activities. The kernel of the book is mainly from the author's academic dissertations and is the summary of the author's research work from the time he studied for his Masters degree. However, it also incorporates the recent research accomplishments of the State Key Laboratory.

All the research discussed in this book has been funded by projects granted by the National Natural Science Foundation, the Ministry of Science and Technology of China, and the Ministry of Railways. The author has been involved with all these projects. Every chapter draws on work from research papers published by the author and his colleagues and each is therefore relatively independent in content. However, the author has made every effort to integrate the material into a coherent work.