

国家杰出青年科学基金成果  
国家教委跨世纪人才基金成果

# 车辆—轨道耦合动力学

翟婉明 著

中 国 铁 道 出 版 社

1 9 9 7 年 · 北 京

## 出版者的话

本书是介绍铁路大系统动力学研究领域的第一部学术著作。作者运用系统工程思想,将机车车辆系统和轨道系统有机地统一,提出并建立了车辆—轨道耦合动力学理论。书中系统深入地论述了车辆—轨道耦合动力学的学术思想、理论模型、分析方法、仿真系统以及试验验证等方面的内容,观点新颖、内容丰富、结构严谨,其理论模型在国际上具有一定影响,得到同行专家广泛采用。

作者翟婉明教授是我国铁路机车车辆专业首批博士,现任博士生导师;1993年首批入选国家教委“跨世界优秀人才计划”;1994年被国家人事部授予国家级有突出贡献的中青年专家;1995年获国家杰出青年科学基金资助,迄今是铁路系统唯一的一位;1996年入选国家“百千万人才工程”。本书所介绍的“车辆—轨道耦合动力学”即是作者在国家自然科学基金、国家杰出青年科学基金和国家教委跨世纪优秀人才专项基金资助下取得的研究成果。

车辆—轨道耦合动力学作为一个崭新的学科领域,有着十分广阔的工程应用前景。例如,应用车辆—轨道耦合动力学模型及软件,可以综合评价既有机车车辆及新造机车车辆(提速列车、大轴重货车等)对线路的动力作用性能,通过参数研究及方案比较,寻求降低轮轨相互作用的途径,最终实现机车车辆系统与轨道系统结构参数的最佳匹配。

总之,本书所研究的内容,对客运高速化、货运重载化提供了有益的理论指导。期望本书的出版对铁路科研人员、工程技术人员、以及高校教学人员有所裨益。

1997年3月

## 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。借助于模拟方法学的日益逼近真实,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,除了必须的实验支持之外,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。

本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,而且也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)的博士论文一经在第 13 届 IAVSD 学术年会上发表之后,立刻就在国际铁路动力学学术界引起反响,除了在 IAVSD 论文集、VSD 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领域内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上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。

本书的研究表明,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,能否利用有理分式函数,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讲师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时和内存。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上车就将无法运作。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,著者的贡献在于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。此二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,本书的前五章是基础,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扰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,本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。

铁道部科学研究院博士生导师

铁道部科学研究院研究员

詹斐生

1995年12月31日

北 京

## 前 言

当今世界铁路运输业蓬勃兴旺,中国铁路交通发展迅猛。本世纪末及下个世纪初,中国铁路将逐渐跨入以“高速客运、重载货运”为特征的崭新时代。

随着铁路现代化发展,传统的轮轨运输系统将不断面临许多新问题。行车速度愈高,安全问题愈显突出,既要保证高速列车不倾覆、不脱轨,又要保证机车车辆运行平稳、舒适;运载重量越大,轮轨之间的动力作用越强,机车车辆对轨道线路的破坏影响也越严重。因此,在我国铁路处于大发展的今天,进一步深入细致地研究轮轨系统动力学理论,特别是车辆与轨道的相互作用问题,具有十分重要的现实意义。

车辆与轨道的动态相互作用问题,是铁路轮轨接触式运输系统中最为基本的、也是最难以解决的问题,直接影响着铁路运输的安全与效率。长期以来,由于专业划分和计算条件的影响,有关铁路轮轨系统动力学方面的问题,常常归结为“机车车辆动力学”、“轨道动力学”及“轮轨关系”三个相对独立的研究领域。事实上,铁道车辆与轨道线路乃是铁路轮轨系统中不可分割的两大组成部分,车辆系统与轨道系统并非孤立系统,二者是相互依赖、相互影响的,从动力学角度来看,它们构成了一个耦合系统。例如,轨道的变形会激起车辆的振动,而车辆的振动经由轮轨接触界面,又会引起轨道结构振动的加剧,反过来助长了轨道的变形,这种互反馈作用将使车辆—轨道系统处于特定的耦合振动形态之中。显然,研究这样的问题,仅从某个单一系统着手,难以反映其本质,而应从整体系统去综合考察。

本书运用系统工程的思想,将车辆系统和轨道系统统一为总体大系统,而将轮轨关系(轮轨相互作用)作为连接这两个子系统

的“纽带”，开展了“车辆—轨道耦合动力学”的研究。

全书共分十章，包括理论和应用两大部分。第一部分（前五章）论述车辆—轨道耦合动力学理论与方法。第一章阐述车辆—轨道耦合动力学的基本思想、研究范畴和研究方法。第二章建立车辆—轨道耦合动力学的数学力学模型，包括垂向和横向两种模型；同时建立了系统激励模型，将轮轨激励归纳为脉冲型、谐波型和动力型三大类，分别给出了各自的数学表达式。第三章介绍车辆—轨道耦合动力学的数值分析方法，将作者早先发展的两种新型快速数值积分方法应用于车辆—轨道耦合系统动态响应的求解。第四章介绍车辆—轨道耦合动力学的计算机仿真分析系统，包括轮轨垂向相互作用仿真系统 VICT 和耦合动力学综合仿真软件包 VTCD。第五章为模型分析与验证，将车辆—轨道耦合动力学模型与传统车辆动力学模型及轮轨动力分析模型进行综合对比分析，并对垂向统一模型进行试验验证，同时还给出了一种采用集总参数描述的车辆—轨道耦合动力学简化模型。

第二部分（后五章）阐述车辆—轨道耦合动力学的工程应用。第六章介绍常见轮轨系统激励及曲线轨道激励所引起的车辆系统与轨道系统之间的耦合振动规律。第七章探讨耦合动力学理论在新型低动力作用轮轨系统设计中的应用，提出了机车车辆的低动力作用设计三原则和轨道结构低动力作用设计的两项基本措施，同时提出了轮轨系统状态的低动力作用维护准则。第八章应用耦合动力学理论研究重载货车与轨道的相互作用问题，着重分析了大轴重货车对线路的动力作用以及减轻这种动力作用的基本途径。第九章研究高速客车与轨道的相互作用问题，主要论述了高速铁路轮轨动态相互作用的特征，以及减轻轮轨相互作用宜采取的高速车辆簧下质量控制原则和高速轨道结构减振设计措施。第十章应用车辆—轨道耦合动力学的理论方法，探讨铁道车辆在实际（不平顺）轨道上的运行安全性问题，具体给出了轨道方向、轨距、高低、水平不平顺及轨道三角坑和复合不平顺的安全限值，为制订轨道几何尺寸的安全管理标准提供了理论依据。



本书内容是国家自然科学基金项目《车辆—轨道耦合动力学的研究》之主要成果,研究工作得到了国家教委《跨世纪优秀人才计划》首批专项基金和国家杰出青年科学基金资助。参加本项目(横向耦合动力学部分)研究的还有郭仕章、蔡成标讲师和王其昌教授;在本项目研究过程中,曾经得到过已故机车车辆知名专家孙翔教授的指导,此外,沈志云院士、严隽雋和金鼎昌二位教授也曾提供过宝贵意见。

本书是在著者博士学位论文基础上经补充完善而写成的。在写作过程中,课题组成员提供了不少有益素材。书稿承蒙铁道部科学研究院詹斐生研究员审阅并作序。本书由铁路科技图书出版基金资助出版。本书著者对曾经支持、帮助和关心过本书出版的各位同行、参考文献作者、审稿者和出版者致以诚挚的谢意!

限于著者水平,书中错误之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

翟婉明

1995年12月18日

成都

## 常用符号表

- $A, a$ ——轨道不平顺幅值；
- $a_n$ ——取不同的下标代号  $n$  时, 分别表示车辆和轨道系统部件的振动加速度；
- $C_n$ ——取不同的代号  $n$  时, 表示不同的阻尼系数；
- $c_n$ ——取不同的代号  $n$  时, 表示轨道不同部件的单位长阻尼系数；
- $C_x, C_y, C_z$ ——分别表示纵向、横向和垂直方向的阻尼系数；
- $C_{ij}$ ——Kalker 系数；
- $[C]$ ——系统阻尼矩阵；
- $E$ ——钢轨弹性模量；
- $E_b$ ——道床弹性模量；
- $E_f$ ——土(路基)的模量；
- $F_n$ ——取不同的代号  $n$  时, 表示不同部位之间的相互作用力；
- $F_0$ ——轮轨系统激振力输入函数；
- $F_{ra}$ ——轨枕动反力；
- $f_{ij}$ ——蠕滑系数；
- $G$ ——轮轨接触常数；
- $G_i$ ——表示第  $i$  号轮对与钢轨之间的动作用力；
- $H_n$ ——取不同  $n$  时, 表示不同物体质心之间的垂向距离；
- $h_b$ ——道床厚度；
- $I$ ——钢轨截面惯量；
- $I_x, I_y, I_z$ ——车辆部件侧滚、点头、摇头运动惯量；

- $J_n$ ——取不同的  $n$  时,表示不同物体点头惯量;  
 $K_n$ ——取不同的代号  $n$  时,表示不同的弹簧刚度;  
 $k_n$ ——取不同的代号  $n$  时,表示轨道不同部件的单位长支承刚度;  
 $K_x, K_y, K_z$ ——分别表示弹簧在纵向、横向和垂直方向的刚度;  
 $[K]$ ——系统刚度矩阵;  
 $L$ ——轨道不平顺波长;  
 $l$ ——轨道有效计算长度;  
 $l_b$ ——轨枕底面宽度;  
 $l_c$ ——车辆定距之半;  
 $l_e$ ——半轨枕的有效支承长度;  
 $l_s$ ——轨枕间距;  
 $l_t$ ——转向架固定轴距之半;  
 $M_n$ ——取不同的代号  $n$  时,分别表示车辆和轨道系统部件质量;  
 $m$ ——钢轨的单位长质量;  
 $[M]$ ——系统质量矩阵;  
 $N$ ——轨枕支点数;  
 $N_n$ ——取不同的  $n$  时,表示不同的法向力、正压力;  
 $NM$ ——钢轨的计算模态阶数;  
 $P_1$ ——轮轨高频冲击力;  
 $P_2$ ——轮轨低频响应力;  
 $p_i$ ——第  $i$  号轮对的轮轨作用力;  
 $p_0$ ——静轮载;  
 $\Delta P/\bar{P}$ ——轮重减载率;  
 $Q$ ——轮轨横向力;  
 $q_k$ ——钢轨的第  $k$  阶振型坐标;  
 $Q/P$ ——脱轨系数;  
 $R$ ——车轮半径;

- $R_n$ ——取不同的  $n$  时,表示不同位置轨道曲率半径;  
 $r_0$ ——车轮的名义滚动半径;  
 $S$ ——Hertz 应力常数;车辆运行距离;  
 $T, t$ ——时间;  
 $\Delta t$ ——时间步长;  
 $V$ ——车辆运行速度;  
 $X_n, Y_n, Z_n$ ——取不同的代号  $n$  时,分别表示轮轨系统不同部件的纵向、横向和垂向振动位移;  
 $x, y, z$ ——笛卡尔坐标分量;  
 $Y_k$ ——钢轨的第  $k$  阶振型函数;  
 $Z_0$ ——轮轨表面不平顺位移输入函数;  
 $\alpha$ ——轨道低接头折角之半;道床扩散角;  
 $\beta, \gamma$ ——Newmark 方法的积分参数;  
 $\delta_n$ ——取不同的代号  $n$  时,表示不同车轮的轮轨接触角;  
 $\delta(x)$ ——Dirac  $\delta$  函数;  
 $\delta Z$ ——轮轨间的弹性压缩量;  
 $\eta$ ——轨面几何不平顺;  
 $\theta_s$ ——转向架构架菱形变形;  
 $\xi_x, \xi_y, \xi_{SP}$ ——轮轨纵向、横向及旋转蠕滑率;  
 $\rho_b$ ——道床密度;  
 $\sigma$ ——轮轨接触应力;  
 $\phi_n$ ——取不同的  $n$  时,表示不同物体侧滚振动角位移;  
 $\varphi_n$ ——取不同的  $n$  时,表示不同物体点头振动角位移;  
 $\varphi, \psi$ ——新型显式积分法的积分参数;  
 $\psi_n$ ——取不同的  $n$  时,表示不同物体摇头振动角位移;  
 $\omega$ ——旋转角速度;强迫振动圆频率。

# 目 录

常用符号表 .....	1
<b>第一章 车辆—轨道耦合动力学导论</b> .....	1
第一节 铁路轮轨运输系统与轮轨系统动力学 .....	1
第二节 车辆—轨道耦合动力学的基本思想 .....	2
第三节 车辆—轨道耦合动力学的基本范畴 .....	4
第四节 车辆—轨道耦合动力学的研究方法 .....	7
<b>第二章 车辆—轨道耦合动力学模型</b> .....	9
第一节 轮轨动力分析模型的演进及其分类 .....	9
第二节 论车辆—轨道耦合系统的模型化 .....	12
第三节 车辆—轨道垂向系统统一模型 .....	19
第四节 车辆—轨道横向耦合动力学模型 .....	32
第五节 轮轨系统激励模型 .....	55
<b>第三章 车辆—轨道耦合动力学的数值分析方法</b> .....	72
第一节 大型非线性动力学系统数值求解现状 .....	72
第二节 大系统动态分析的新型快速数值积分法 .....	74
第三节 复杂非线性问题计算稳定性的数值试验法 .....	87
第四节 新方法在车辆—轨道耦合动力学数值分析 中的应用 .....	89
<b>第四章 车辆—轨道耦合动力学的计算机仿真分析系统</b> .....	93
第一节 车辆—轨道垂向相互作用的计算机仿真 VICT 分析系统 .....	93

---

第二节	车辆—轨道耦合动力学综合分析软件包 .....	96
<b>第五章</b>	<b>车辆—轨道耦合动力学模型分析与验证 .....</b>	<b>99</b>
第一节	车辆—轨道统一模型的试验验证 .....	99
第二节	车辆—轨道垂向统一模型与传统的车辆垂向 振动模型分析结果之比较 .....	106
第三节	车辆—轨道横向耦合动力学模型与传统的车辆 横向模型分析结果的比较 .....	112
第四节	车辆—轨道统一模型与一般轮轨动力分析 模型比较 .....	114
第五节	车辆—轨道耦合动力学的等效集总参数 简化模型 .....	116
<b>第六章</b>	<b>车辆与轨道的耦合振动 .....</b>	<b>124</b>
第一节	车辆—轨道耦合系统的冲击响应 .....	124
第二节	车辆—轨道耦合系统对谐波型激励的 振动响应 .....	129
第三节	轨道动力型不平顺对耦合系统振动响应的 影响 .....	135
第四节	车辆通过曲线轨道的动态响应 .....	139
<b>第七章</b>	<b>新型低动力作用轮轨系统的设计准则 .....</b>	<b>143</b>
第一节	发展新型低动力作用轮轨系统的意义 .....	143
第二节	轮轨相互动力作用的评价指标体系 .....	145
第三节	机车车辆的低动力作用设计原则 .....	148
第四节	轨道结构的低动力作用设计措施 .....	152
第五节	轨轮系统状态的低动力作用维护准则 .....	157
<b>第八章</b>	<b>重载铁路货车与轨道的相互作用 .....</b>	<b>162</b>
第一节	关于我国重载铁路运输及货车大型化问题 .....	162

第二节	大型货车对线路的动力影响·····	163
第三节	减轻大型重载货车对线路动力作用的 基本途径·····	165
第四节	新型重载货车设计及其轮轨动力性能预测·····	169
<b>第九章</b>	<b>高速铁路客车与轨道的相互作用·····</b>	<b>175</b>
第一节	高速铁路及其在我国的发展·····	175
第二节	高速铁路轮轨动态相互作用特征·····	177
第三节	高速铁道车辆簧下质量的动力学效应 及其控制·····	184
第四节	高速铁路轨道结构的减振设计措施·····	188
<b>第十章</b>	<b>铁道车辆在不平顺轨道上的运行安全性·····</b>	<b>192</b>
第一节	车辆—轨道耦合动力学理论在轨道不平顺 安全标准研究中的应用·····	192
第二节	轨道常见几何不平顺的安全限值·····	193
第三节	轨道三角坑对行车安全的影响·····	197
第四节	轨道复合不平顺的安全控制准则·····	198
<b>附    录</b>		
附录 A	轮轨接触椭圆参数表·····	203
附录 B	Kalker 线性蠕滑理论之系数 $C_{ij}$ ·····	205
附录 C	VICT 仿真软件包数据文件·····	206
附录 D	轮轨系统基本参数·····	207
<b>参考文献</b> ·····		<b>209</b>
<b>名词索引</b> ·····		<b>214</b>

# CONTENTS

## **Chapter 1 Introduction to Vehicle-Track Coupling Dynamics**

- 1.1 Railway Wheel/Rail System and Its Dynamics
- 1.2 Basic Idea of Vehicle-Track Coupling Dynamics
- 1.3 Basic Domain of Vehicle-Track Coupling Dynamics
- 1.4 Research Methods of Vehicle-Track Coupling Dynamics

## **Chapter 2 Dynamic Models of Vehicle-Track Coupling Dynamics**

- 2.1 Development of Wheel/Rail Dynamics Models
- 2.2 On Modelling of Vehicle-Track Coupling Systems
- 2.3 The Unified Model of Vertical Vehicle-Track Systems
- 2.4 The Lateral Model of Vehicle-Track Coupling Systems
- 2.5 The Excitation Models of Wheel/Rail Systems

## **Chapter 3 Numerical Methods for Vehicle-Track Coupling Dynamics**

- 3.1 Present Status of Numerically Solving Large-Scale Nonlinear Dynamic Systems
- 3.2 New Fast Numerical Integration Methods for Dynamic Analyses of Large Systems
- 3.3 Numerical Trial Method for Determining Integration Stability to Complicate Nonlinear Problems
- 3.4 Applications of New Integration Methods to Vehicle-Track Coupling Dynamic Analyses

## **Chapter 4 Computer Simulation Systems for Vehicle-Track Coupling Dynamic Analyses**

- 4.1 The VICT System for Simulating Vertical Interactions



between Vehicles and Tracks

4. 2 The Synthetic Simulation Software for Vehicle-Track Coupling Dynamic Analysis

## **Chapter 5 Verification and Analysis of Vehicle-Track Coupling Dynamic Models**

5. 1 Experimental Verification of the Unified Model of Vertical Vehicle-Track System
5. 2 Comparison of Computational Results of Vertical Vehicle-Track Model and Conventional Vertical Model for Vehicle Dynamics
5. 3 Comparison of Computational Results of Lateral Vehicle-Track Model and Conventional Lateral Model for Vehicle Dynamics
5. 4 Comparison of the Unified Vehicle-Track Model with General Wheel/Rail Dynamic Analysis Models
5. 5 Simplified Model of Vehicle-Track Coupling Dynamics Using Lumped Track Parameters

## **Chapter 6 Coupling Vibrations of Vehicles and Tracks**

6. 1 Impact Responses of Vehicle-Track Coupling Systems
6. 2 Harmonic Vibration Responses of Vehicle-Track Coupling Systems
6. 3 Influence of Track Stiffness Irregularities on Vehicle-Track Coupling Vibrations
6. 4 Dynamic Responses of Vehicles Running on Curved Tracks

## **Chapter 7 Principles for the Design of New Types of Wheel/Rail Systems with Low Dynamic Interactions**

7. 1 The Importance for the Development of New Wheel/Rail Systems with Low Dynamic Interactions
7. 2 On the System of Indices for Evaluating Wheel/Rail Dy-