

# 车辆—道路耦合 系统动力学研究

Dynamics of Vehicle-Road Coupled System

杨绍普 陈立群 李韶华 著



科学出版社

013028301

U461.1  
20

非线性动力学丛书 16

# 车辆-道路耦合 系统动力学研究

## Dynamics of Vehicle-Road Coupled System

杨绍普 陈立群 李韶华 著



科学出版社

北京



北航

C1634758

U461.1  
20

## 内 容 简 介

本书在介绍车辆动力学、道路动力学的国内外研究现状的基础上,提出了车辆-道路耦合系统动力学的研究框架,对车辆、道路及车辆-道路耦合系统动力学进行了理论、仿真及实验研究,主要包括基于实验建模、多自由度模型和多体系统动力学模型进行重型车辆动力学的研究;采用积分变换法、Galerkin 方法、有限元法分析移动车辆载荷下的道路系统动力学响应;建立车辆-道路耦合系统,比较耦合模型与传统模型动力响应的区别,分析车辆、道路系统参数的低动力设计措施;对于车路耦合实验段的建设、传感器的布置和实验数据的分析处理进行论述。本书将理论和实际相结合,既有理论推导和数值仿真结果,又包含很多实验分析。研究成果可为车辆参数的低动力设计,道路结构的设计、施工、养护和疲劳寿命预测提供理论指导。

本书适合高等学校力学、车辆、公路、机械及其他相关专业的教师、高年级本科生与研究生,以及相关专业的工程技术人员使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

车辆-道路耦合系统动力学研究/杨绍普,陈立群,李韶华著. —北京:科学出版社,2012

(非线性动力学丛书;16)

ISBN 978-7-03-036965-9

I. ①车… II. ①杨… ②陈… ③李… III. ①道路车辆-耦合系统-系统动态学-研究 IV. ①U461.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 044180 号

责任编辑:刘信力/责任校对:郭瑞芝

责任印制:钱玉芬/封面设计:陈敬

**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>

**新科印刷有限公司** 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2012年12月第一版 开本: B5(720×1000)

2012年12月第一次印刷 印张: 16

字数: 305 000

定价: **76.00 元**

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 《非线性动力学丛书》编委会

主 编 胡海岩

副主编 张 伟

编 委 (以汉语拼音为序)

陈立群 冯再春 何国威

金栋平 马兴瑞 孟 光

余振苏 徐 鉴 杨绍普

周又和

## 《非线性动力学丛书》序

真实的动力系统几乎都含有各种各样的非线性因素, 诸如机械系统中的间隙、干摩擦, 结构系统中的材料弹塑性、构件大变形, 控制系统中的元器件饱和和特性、变结构控制策略等. 实践中, 人们经常试图用线性模型来替代实际的非线性系统, 以求方便地获得其动力学行为的某种逼近. 然而, 被忽略的非线性因素常常会在分析和计算中引起无法接受的误差, 使得线性逼近成为一场徒劳. 特别对于系统的长时间历程动力学问题, 有时即使略去很微弱的非线性因素, 也会在分析和计算中出现本质性的错误.

因此, 人们很早就开始关注非线性系统的动力学问题. 早期研究可追溯到 1673 年 Huygens 对单摆大幅摆动非等时性的观察. 从 19 世纪末起, Poincaré, Lyapunov, Birkhoff, Andronov, Arnold 和 Smale 等数学家和力学家相继对非线性动力系统的理论进行了奠基性研究, Duffing, van der Pol, Lorenz, Ueda 等物理学家和工程师则在实验和数值模拟中获得了许多启示性发现. 他们的杰出贡献相辅相成, 形成了分岔、混沌、分形的理论框架, 使非线性动力学在 20 世纪 70 年代成为一门重要的前沿学科, 并促进了非线性科学的形成和发展.

近 20 年来, 非线性动力学在理论和应用两个方面均取得了很大进展. 这促使越来越多的学者基于非线性动力学观点来思考问题, 采用非线性动力学理论和方法, 对工程科学、生命科学、社会科学等领域中的非线性系统建立数学模型, 预测其长期的动力学行为, 揭示内在的规律性, 提出改善系统品质的控制策略. 一系列成功的实践使人们认识到: 许多过去无法解决的难题源于系统的非线性, 而解决难题的关键在于对问题所呈现的分岔、混沌、分形、孤立子等复杂非线性动力学现象具有正确的认识和理解.

近年来, 非线性动力学理论和方法正从低维向高维乃至无穷维发展. 伴随着计算机代数、数值模拟和图形技术的进步, 非线性动力学所处理的问题规模和难度不断提高. 已逐步接近一些实际系统. 在工程科学界, 以往研究人员对于非线性问题绕道而行的现象正在发生变化. 人们不仅力求深入分析非线性对系统动力学的影响, 使系统和产品的动态设计、加工、运行与控制满足日益提高的运行速度和精度需求, 而且开始探索利用分岔、混沌等非线性现象造福人类.

在这样的背景下, 有必要组织在工程科学、生命科学、社会科学等领域中从事非线性动力学研究的学者撰写一套非线性动力学丛书, 着重介绍近几年来非线性动力学理论和方法在上述领域的一些研究进展, 特别是我国学者的研究成果, 为从事

非线性动力学理论及应用研究的人员, 包括硕士研究生和博士研究生等, 提供最新的理论、方法及应用范例. 在科学出版社的大力支持下, 我们组织了这套《非线性动力学丛书》.

本套丛书在选题和内容上有别于郝柏林先生主编的《非线性科学丛书》(上海教育出版社出版), 它更加侧重于对工程科学、生命科学、社会科学等领域中的非线性动力学问题进行建模、理论分析、计算和实验. 与国外的同类丛书相比, 它更具有整体的出版思想, 每分册阐述一个主题, 互不重复. 丛书的选题主要来自我国学者在国家自然科学基金等资助下取得的研究成果, 有些研究成果已被国内外学者广泛引用或应用于工程和社会实践, 还有一些选题取自作者多年的教学成果.

希望作者、读者、丛书编委会和科学出版社共同努力, 使这套丛书取得成功.

胡海岩

2001年8月

# 前 言

随着车辆行驶速度和轴重的提高,车辆的行驶稳定性、舒适性、安全性以及公路的早期破坏成为人们关注的热点问题。目前,车辆动力学和道路动力学是两个独立的学科。车辆动力学将路面作为激励,研究汽车的操纵性、舒适性和安全性,而道路动力学是将车辆作为移动载荷,研究路基路面的响应和使用寿命。但是,车辆和道路是一个相互作用的整体,有必要作为一个耦合的系统进行研究。车辆和道路耦合起来形成一个复杂的高维非线性系统,其非线性源于车辆悬挂系统固有的非线性特性及道路的材料非线性等。研究车辆-道路耦合系统的动力学行为及产生机理,是一个车辆动力学、道路动力学和非线性动力学相交叉的崭新学科,在车辆、道路等工程领域具有重要的应用背景。

本书关于车辆-道路耦合系统动力学的研究成果,是作者长期从事车辆-道路耦合系统动力学及相关领域发表论文的凝练,在一定程度上反映了该领域研究方面的最新进展。本书章节是按照车辆、道路动力学和车辆-道路耦合动力学的发展逻辑来安排的,知识点由易到难,内容层次分明、逻辑清晰。研究方法由经典方法到新的耦合方法,如先介绍一般车辆、道路动力学的研究方法,然后介绍车辆-道路耦合系统动力学的研究方法。研究模型由易到难,如先研究线性系统的动力学,然后研究非线性系统的动力学;先研究二轴车辆模型,然后研究三轴车辆模型;先介绍一维的地基梁模型的计算结果,然后介绍二维的地基板和三维的地基多层体系模型的计算结果。

目前国内外系统反映车辆-道路耦合作用研究成果的专著尚不多见,特别是关于车辆-道路耦合系统的动力学分析、参数设计及实验段建设的专著,还未见公开发表。随着计算机技术的日益快速发展,车辆-道路耦合作用在众多工程领域越来越受到关注和重视。本书的出版为从事该领域研究的广大学者尤其是研究生快速进入课题并准确把握课题前沿的关键问题,提供了丰富、翔实的参考资料。

感谢北京理工大学胡海岩教授主编的非线性动力学丛书和科学出版社给本书的出版提供的机会。感谢国家重点基础研究发展计划(2012CB723301)、国家自然科学基金(10932006、10672107、11072159、11102121)、河北省自然科学基金(E2007000657、E2012210025)和河北省交通厅项目Y-2010029的资助。感谢河北省交通厅大广(大庆—广州)高速衡大段管理处的同志们在试验段构建过程中提供的帮助。

感谢石家庄铁道大学陈恩利教授、李皓玉教授、路永婕博士和上海大学丁虎博

士为本书研究所做的贡献。另外，本书还参考了很多国内外专家和同行学者的论文及专著，实验研究中得到了很多老师和研究生的大力支持，在此一并表示感谢。

由于作者水平有限，加之时间仓促，本书不足之处敬请读者谅解并批评指正。

作 者

2012年8月于石家庄铁道大学



# 目 录

绪论	1
0.1 汽车动力学的研究现状	1
0.2 道路动力学的研究现状	5
0.3 轮胎动力学的研究现状	9
0.4 车辆-道路耦合系统动力学研究框架	11
0.5 车辆-道路耦合系统动力学的研究内容及关键问题	12
参考文献	13
第 1 章 车辆系统建模及动力学分析	21
1.1 车辆悬架系统中非线性元件的实验建模	21
1.1.1 减振器阻尼特性实验	21
1.1.2 钢板弹簧刚度特性实验	30
1.2 双轴重型汽车模型及动力学分析	33
1.2.1 车辆模型及其运动微分方程	33
1.2.2 车辆系统的振动响应计算	36
1.2.3 随机激励下车辆的振动响应分析	39
1.2.4 参数影响分析	41
1.3 三轴重型汽车模型及动力学分析	45
1.3.1 具有平衡悬架的三轴重型汽车模型的建立	46
1.3.2 采用 FRC 轮胎模型的非线性三轴车辆模型建立	49
1.3.3 随机激励下车辆的振动响应分析	54
1.4 基于虚拟样机技术的重型汽车模型及动力学分析	59
1.4.1 悬架系统模型	60
1.4.2 轮胎及路面模型	63
1.4.3 整车模型集成	65
1.4.4 整车正交优化	66
1.4.5 整车半主动控制分析	75
1.5 本章小结	77
参考文献	78
第 2 章 车辆载荷作用下道路系统的动力学分析	80
2.1 移动载荷作用下有限长非线性地基梁的动力响应	80

2.1.1	移动集中载荷作用下的非线性地基梁模型	81
2.1.2	Galerkin 截断方法处理非线性方程	82
2.1.3	数值算例	84
2.2	移动载荷作用下无限长非线性地基梁的动力响应	88
2.2.1	无限长非线性地基的 Timoshenko 梁模型	89
2.2.2	移动恒载的多尺度摄动方法	90
2.2.3	移动简谐载荷的改进 Adomian 方法	94
2.2.4	移动恒载激励的数值算例	100
2.2.5	移动简谐载荷激励的数值算例	106
2.3	移动载荷作用下 Kelvin 地基上无限大双层板的动力响应	109
2.3.1	移动车辆载荷的数学模型描述	109
2.3.2	轮胎接地面积的确定	110
2.3.3	双层薄板的基本运动微分方程	111
2.3.4	双层板动力响应的稳态解析解	113
2.3.5	数值算例	117
2.4	移动载荷作用下弹性半空间地基上无限大双层板的动力响应	122
2.4.1	双层薄板的基本运动微分方程	122
2.4.2	弹性半空间地基的基本运动方程	122
2.4.3	弹性半空间地基在波数-频率域内的位移和应力计算	124
2.4.4	弹性半空间地基的位移 Green 函数	125
2.4.5	移动载荷作用下弹性半空间地基上双层板的位移和应力计算	127
2.4.6	数值算例	130
2.5	路面结构三维有限元分析	132
2.5.1	层状体系力学模型及其基本假设	133
2.5.2	路面结构三维有限元几何建模	133
2.5.3	路面结构振动响应的瞬态动力分析	135
2.5.4	路面结构各层的动力学响应分析	138
2.5.5	沥青路面疲劳寿命的参数影响分析	144
2.6	本章小结	147
	参考文献	148
<b>第 3 章</b>	<b>车辆-道路耦合系统建模及动力学分析</b>	<b>151</b>
3.1	二维车辆-道路耦合系统	151
3.1.1	轮胎-路面接触模型	151
3.1.2	车路耦合系统动力学方程	153
3.1.3	轮胎与路面的耦合作用	154

3.1.4	数值计算流程及模型验证	155
3.1.5	两种轮胎模型对车辆-道路耦合系统响应的影响	160
3.2	三维车辆-道路耦合系统	166
3.2.1	汽车系统运动微分方程	167
3.2.2	道路系统运动微分方程	169
3.2.3	汽车与路面的耦合作用	170
3.2.4	车辆-道路耦合模型与传统模型比较	173
3.2.5	车辆-道路耦合模型与有限元模型比较	180
3.3	车路系统参数的低动力设计	183
3.3.1	车速的影响	184
3.3.2	汽车载重量的影响	185
3.3.3	车轮质量的影响	185
3.3.4	轮胎刚度的影响	187
3.3.5	悬架刚度的影响	188
3.3.6	轮胎阻尼的影响	190
3.3.7	悬架阻尼的影响	191
3.3.8	轴距的影响	192
3.3.9	轮距的影响	192
3.3.10	路面密度的影响	194
3.3.11	路面厚度的影响	194
3.3.12	路面弹性模量的影响	196
3.3.13	路面泊松比的影响	198
3.3.14	路基反应模量的影响	199
3.3.15	路基阻尼系数的影响	200
3.4	三维非线性黏弹性车辆-道路耦合系统动力响应	200
3.4.1	系统非线性及黏弹性模型	201
3.4.2	非线性汽车系统运动微分方程	202
3.4.3	非线性黏弹性道路系统运动微分方程	204
3.4.4	非线性汽车-道路系统的耦合作用	209
3.4.5	数值积分算法	211
3.4.6	非线性车路耦合系统动力响应	212
3.4.7	车路非线性和路面黏弹性对车路响应的影响	216
3.5	本章小结	221
	参考文献	222
第 4 章	车辆-道路相互作用试验段构建	224
4.1	车辆-道路试验方案	224

## 绪 论

随着公路交通的迅猛发展,运输车辆迅速向重型化发展,由于汽车动载引起的路面早期破坏已成为突出问题,许多沥青混凝土路面在通车 2~3 年后就出现了不同程度的破坏<sup>[1]</sup>。路面的早期破坏,反过来又会严重影响行车的安全性、舒适性,引起汽车的振动加剧,从而进一步加大汽车对路面的动载,而汽车动载的加大又会进一步引起路面破坏的加剧。因此,汽车与路面是一个相互作用、相互耦合的统一系统。Mamlouk 早在 1997 年就指出,将车路耦合概念引入汽车和路面设计将是未来发展的方向<sup>[2]</sup>。

但是,目前的汽车动力学和道路动力学仍然将汽车和道路作为两个独立的系统进行研究。汽车动力学把路面作为汽车系统的随机激励,研究汽车系统的操纵性、舒适性和安全性,而道路动力学是将汽车作为移动载荷,研究道路的响应和使用寿命。因此,建立车辆-道路耦合大系统,研究汽车、路面路基之间的相互作用机理及动力响应,可以为汽车、道路参数的低动力设计提供理论指导,从而减小汽车动载引起的道路早期破坏。这是一个汽车动力学、道路动力学、轮胎动力学与非线性动力学等多学科相结合的崭新的课题,具有重要的理论意义和工程应用价值。

### 0.1 汽车动力学的研究现状

汽车动力学领域对汽车与路面相互作用的研究起步较早。研究思路是以汽车为研究对象,把路面作为汽车系统的激励,根据路面破坏的经验公式,研究汽车的操纵性、平顺性和汽车参数对路面破坏的影响。研究内容包括汽车的操纵稳定性、平顺性、半主动或主动悬架设计、汽车系统非线性动力学及汽车参数对路面破坏的影响等。研究方法有理论方法和数值方法。理论方法主要是根据振动理论求解汽车的响应、动态轮胎力和动载系数。数值方法主要是通过数值积分对汽车系统的动力学行为进行仿真。

汽车动力学的研究对象为汽车,一般不对路面结构进行研究,也很少考虑路面振动对汽车动力学行为的影响。汽车的研究模型由传统的集中参数模型发展到现在的有限元模型、动态子结构模型和多体系统动力学模型,由线性模型发展到具有非线性刚度或非线性阻尼的非线性模型。各种汽车模型如图 0-1~图 0-4 所示。

集中参数模型是利用弹簧、质量和阻尼元件将汽车模型抽象成有限个自由度的力学模型,主要包括二自由度的 1/4 汽车模型,四自由度、五自由度的 1/2 汽车

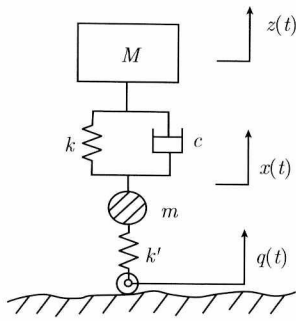


图 0-1 二自由度 1/4 汽车模型

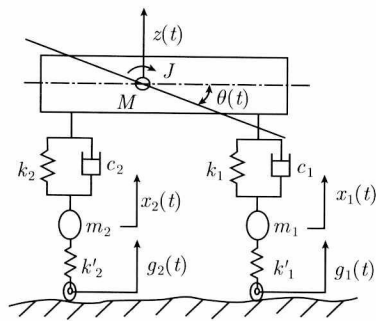


图 0-2 四自由度 1/2 汽车模型

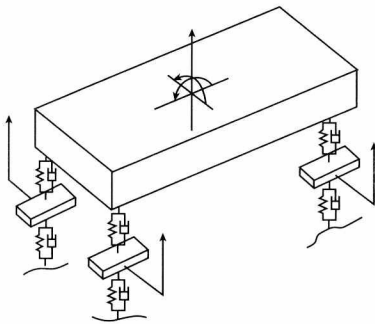


图 0-3 七自由度整车汽车模型

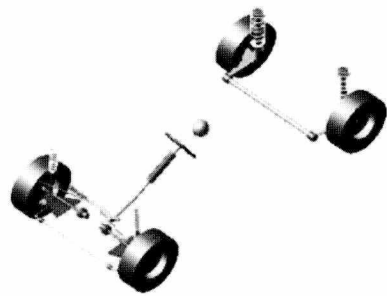


图 0-4 多系统动力学汽车模型

模型和七自由度、十七自由度的整车模型。目前，汽车动力学领域对汽车与路面相互作用的研究多基于少自由度的集中参数模型。Cole 和 Cebon 是这方面研究的代表人物，他们在重型汽车参数对路面破坏的影响方面进行了一系列的研究。他们对二自由度的传统被动悬架系统进行了优化设计，并分析了车辆参数对轮胎压力和路面损伤的影响，发现动态轮胎力减小 15% 时，理论上路面损伤减小 5.2%<sup>[3-8]</sup>。另外，他们还提出动态轮胎力沿轮迹的分布具有“空间重复性”，认为车辆动载幅值集中在沿路面的某些特定位置，这些位置的损坏达到平均水平的 4 倍，并将“空间重复性”纳入到车辆路面的疲劳损伤评价中，提出了 95 百分位综合四次幂力的评价指标<sup>[9]</sup>。Hardy 基于二自由度 1/4 汽车模型，利用线性叠加理论和积分变换推导了移动车辆荷载下黏弹性地基梁的位移解析解，并进行了试验验证<sup>[10]</sup>。Yi 以降低车辆对路面的损伤为目的，对主动和半主动悬架进行优化设计<sup>[11]</sup>。Kenis 研究了车辆参数及路面不平度变化情况下的车轮动载，并进行路面动响应的模拟<sup>[12]</sup>。Markow 和 Myers 详细研究了重型车辆的特性对轮胎动载及路面响应的影响，指出车辆结构和悬挂系统对轮胎动载影响大，轮胎压力对动载影响很小<sup>[13,14]</sup>。Sun 基于三自由度汽车模型，以轮胎动载最小为目标，对道路友好车辆悬架进行了优化设计，发现

大的轮胎压力和小的悬架阻尼会导致轮胎动载增大<sup>[15]</sup>。余卓平以减小车辆对道路的损伤系数为目标,对重型汽车悬架进行优化设计,并指出车辆对道路损伤的主要原因是后悬架阻尼太小<sup>[16]</sup>。朱孔源基于七自由度汽车模型研究了车速、路面不平度、轴距、轮距等对车辆动载的影响,并以降低车辆动载为目的设计了二自由度和七自由度半主动悬架<sup>[17,18]</sup>。徐斌以改进的四次幂定律为评定指标,分析载重量、车速以及车身和悬架参数对道路破坏的影响,并对悬架系统的参数进行优化<sup>[19]</sup>。刘强基于二自由度汽车悬架模型研究道路破坏与悬架参数、载重量及路面不平度之间的关系,他认为动载荷的空间重复性和簧载质量振动是引起道路破坏的主要原因<sup>[20]</sup>。郑泉利用二自由度模型,分析车速与路面不平度对车轮随机动载和路面疲劳应力的影响,指出不同的车速和路面状况引起的路面动力反应及损伤变化规律不同<sup>[21]</sup>。张洪信通过对各种车辆模型的构建和分析,得到了车辆悬架参数与垂向路面动载及纵向路面动态剪力之间的函数关系,并进行了仿真。研究发现,重型车辆装上预瞄全状态反馈主动悬架后,对路面损伤降低了23%~27%,车辆平顺性改善了90%以上。他还在四次幂定律的基础上提出了一种车辆对路面损伤的全概率评价方法,并分析了车辆平顺性与对路面损伤的相关性<sup>[22-25]</sup>。于清基于四自由度汽车模型,分析了动荷系数随路面不平顺波长的变化。研究发现,并不是车速越高动荷越大,而是随着车速的变化动荷系数存在峰值和共振现象<sup>[26]</sup>。张军利用单自由度点接触汽车模型,研究了车速、路面不平度、载重和悬挂系统刚度对重型汽车动载的影响<sup>[27]</sup>。郭成超基于简化的三自由度车辆模型,运用Fourier叠加法计算了车辆动载荷的幅频特性与功率谱密度、加速度放大因子与加速度谱,研究了车速和路面不平度特性、车辆动载与乘客的舒适性的关系,发现车速的提高和路面不平度的增大会使车辆动载荷谱密度增大,引起车辆动载荷方差和动载系数增加,这对路面非常不利<sup>[28]</sup>。严天一基于二自由度汽车模型设计了道路友好性的主动悬架系统最优控制器,并利用动荷系数、动态载荷应力因子及95百分位综合四次幂力三种评价指标对主动悬架和被动悬架的道路友好性进行了比较。研究发现,路面平顺性越差,与被动悬架相比,主动悬架的道路友好性优势越明显<sup>[29]</sup>。

汽车的有限元模型计算量大,主要用于车身、发动机悬置等复杂部件的动态设计<sup>[30-32]</sup>。动态子结构模型可分为机械导纳法和模态综合法。模态综合法应用较广,其基本思路是把复杂结构分为若干子结构,而每个部件可用计算或试验的方法求得模态参数,根据边界条件将各子结构的模态特性叠加起来,再通过平衡方程和约束方程将物理坐标约简,就可得到模态坐标下的运动方程。由此可计算整个系统的动态响应。模态综合法已成功地应用于研究重型汽车的振动、轿车振动和噪声产生机理及汽车底盘振动和车架振动的传递特性<sup>[33,34]</sup>。目前,对整车进行动态分析常采用集中参数法、有限元法和模态综合法相结合的方法。尚未发现基于有限元模型和动态子结构模型研究汽车对路面的破坏方面的报道。

近年来,随着多体系统动力学的发展,基于虚拟样机模型进行汽车系统平顺性、操纵稳定性等动力学仿真的研究日益成熟。虚拟样机软件 ADAMS 已进入商业化应用,它与许多国际著名公司(如 Ford、BMW、NASA 等)合作开发了专用设计模块<sup>[35-37]</sup>。一些学者开始尝试基于多体动力学模型进行道路友好性汽车参数的优化设计。由于所建的虚拟样机模型能够反映汽车的复杂结构特性和动态的轮胎路面接触力,所得结果更具说服力。Vaculin 基于多体动力学软件 SIMPACK 和 Matlab,以减小轮胎动载为主要目标,对半主动悬架进行了优化设计<sup>[38]</sup>。Odhams 应用 TruckSim 软件建立了铰链式重载汽车的复杂多体模型,研究拖挂车辆在主动转向系统操作下的行驶安全性<sup>[39]</sup>。Yang 基于 ADAMS 对重型汽车的平顺性进行了研究<sup>[40]</sup>。Lu 通过重载车实验数据,验证了多体整车模型的有效性,并探讨车速、载荷重量和路面等级对轮胎动载和动载系数的影响<sup>[41]</sup>。任卫群利用 ADAMS 软件建立了汽车模型,对车辆与道路的相互作用和主动悬架系统的设计进行了研究,所设计出的车辆主动悬架系统能够明显降低车辆对道路动态作用力的水平,从而减小车辆对道路的破坏性<sup>[42,43]</sup>。基于 FVP 技术的道路友好性汽车悬架的研究刚刚起步,研究成果非常少,因此有必要对这方面进行深入研究。

另外,由于汽车悬架和轮胎呈现明显的非线性特性,国内外学者对非线性汽车悬架模型的研究也非常丰富。Stensson 研究了 SAAB 9000 汽车悬架系统的非线性现象,包括多解、亚谐共振及系统数值积分的敏感性等<sup>[44]</sup>。Kim 研究了磁流变阻尼的汽车悬架系统的振动控制方法<sup>[45]</sup>。Zhu 研究了采用非线性刚度和非线性阻尼的汽车悬架模型的分岔和混沌<sup>[46,47]</sup>。Li 研究了具有非线性刚度和滞后非线性悬架阻尼的汽车悬架系统的主共振、亚谐共振及混沌运动<sup>[48,49]</sup>。Georgios 通过悬架半主动控制的方法研究了液压阻尼器对车辆行驶平顺性的影响<sup>[50]</sup>。Oscar 考虑了重型卡车空气悬架的非线性,利用数值仿真分析了路面不平度对车体平顺性的影响<sup>[51]</sup>。季学武通过轮胎动态实验,提出轮胎阻尼力是轮胎变形速率的线性函数,轮胎弹性力则是轮胎变形的非线性函数,并且平方非线性模型可以足够精确地表示轮胎弹性力<sup>[52]</sup>。屈求真利用轮胎非线性的摄动模型,讨论了非线性因素对汽车转向特性、动态响应及行驶稳定性的影响,导出了解析形式的稳定性判据<sup>[53]</sup>。孟泉考虑了汽车悬架系统板簧和轮胎的刚度非线性效应,并进行了非线性动力学分析,发现系统在某些频率范围内存在倍周期分岔现象,且发生倍周期分岔后,车体垂直方向加速度在量级上将产生跃变<sup>[54]</sup>。赵丁选等对工程机械用重型 10.00-20 轮胎进行了实验测试,发现轮胎的径向刚度与位移呈非线性关系,并且径向刚度几乎不随激励频率而改变<sup>[55]</sup>。朱博建立了二自由度变刚度钢板弹簧非线性悬挂系统的振动模型,用统计线性化方法进行随机响应计算,并与实测结果进行比较<sup>[56]</sup>。徐斌采用统计线性化方法分析货车悬架系统中两级变刚度复式钢板弹簧、液力减振器等非线性元件对车辆平顺性和道路友好性的影响,试验结果表明,考虑悬架系统非线性元件的

影响时,车辆振动状况的模拟值更接近实际情况<sup>[57]</sup>。杨欣梁建立了由主、副钢板弹簧组成的重型货车非线性后悬架系统的二自由度动力学模型,并以平顺性为目标对悬架参数进行优化<sup>[58]</sup>。

但是,以上研究仅限于路面不平顺下的汽车动态响应,均未考虑汽车与道路的耦合作用,在计算汽车响应时未考虑路面振动的影响,也未对道路结构进行建模。因此,有必要同时对汽车与道路建模,构成车辆-道路耦合系统,深入研究汽车与道路的耦合作用,并计算汽车与道路的动态响应。

## 0.2 道路动力学的研究现状

在道路动力学领域研究汽车与路面相互作用的思路是以路面为研究对象,把汽车对路面的作用处理成一个运动荷载,研究路面的响应和汽车参数对路面破坏的影响。理论研究方面,主要利用积分变换法、模态叠加法或传递矩阵法得到系统的理论解析解,然后进行数值积分来研究响应的分布规律和系统参数的影响。数值研究方面,多采用有限元法或边界元法建立路面的多层体系,进而研究道路的应力分布和动力响应。国外学者很早就对路面结构的动力响应问题进行了研究。如美国“战略公路研究计划”(Strategic Highway Research Program, SHRP)就有相当大的部分是研究路面动力学的<sup>[59]</sup>。欧洲经济合作与发展组织(OECD)提出的路面交通研究计划DIVINE(Dynamic Interaction between Vehicles and Infrastructure Experiment)也在这方面做了大量的研究工作<sup>[60,61]</sup>。研究交通荷载作用下路面结构的动力学行为,揭示路面结构的破坏机理,推动路面结构设计从静态向动态转化已成为目前道路界研究的热点问题之一。

道路动力学研究的侧重点在道路,很少对汽车系统进行建模,也很少考虑汽车振动对道路动力学行为的影响。道路的研究模型由一维、二维发展到三维,由单层发展到多层,由线性弹性地基发展到非线性弹性地基,由线弹性本构发展到黏弹性本构,由线性材料发展到非线性材料。目前,主要的道路研究模型包括黏弹性地基梁、黏弹性地基板、弹性半空间和黏弹性地基多层体系模型等,如图 0-5~ 图 0-8 所示。

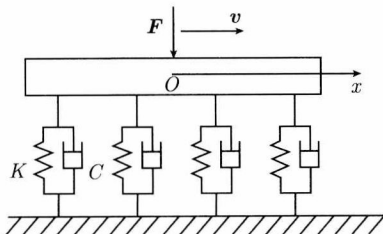


图 0-5 黏弹性地基梁模型

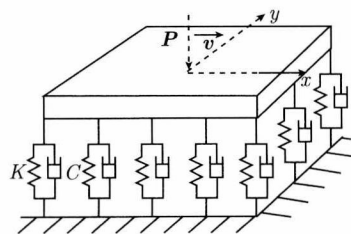


图 0-6 黏弹性地基板模型



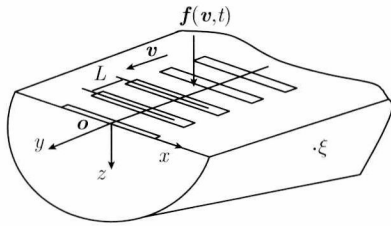


图 0-7 弹性半空间模型

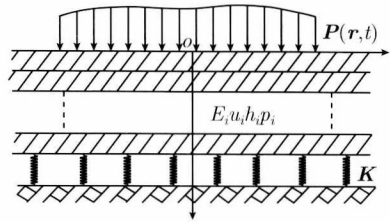


图 0-8 黏弹性地基多层体系模型

一维的黏弹性地基梁模型简单实用，适于对称路面的动态响应分析。国内外对于地基梁的研究起步最早，研究内容非常丰富，很多学者致力于弹性地基梁在移动载荷下的动力响应分析。Timoshenko 首先研究了运动点源负荷下简支梁的振动，给出了梁振动的三角级数解<sup>[62]</sup>。Kemdy、Fryba、Steele 分别研究了弹性地基上的无限长梁、有限长梁在运动点源载荷下的动力响应问题<sup>[63-65]</sup>。Thambiratnam 用 Newmark 数值积分研究了弹性地基梁在移动载荷下的动力响应，分析了荷载速度、地基刚度和梁长度对梁响应的影响<sup>[66]</sup>。Liu 利用积分变换法得到了黏弹性地基梁在移动车辆载荷下的动态响应解析解，并分析了路面粗糙度对路面位移和应变的影响<sup>[67]</sup>。Sun 利用积分变换法给出了简谐线源载荷下黏弹性地基上 Bernoulli-Euler 梁振动的解析解<sup>[68]</sup>。Giuseppe 研究了黏弹性地基梁在移动的单自由度振子作用下的响应，对耦合方程无量纲化后通过模态叠加法和数值积分研究了系统的响应<sup>[69]</sup>。邓学钧采用积分变换法对移动荷载下 Winkler 地基和 Kelvin 地基上无限长梁的动力响应进行了研究<sup>[70]</sup>。周华飞采用积分变换法求得了移动集中荷载作用下 Kelvin 地基上无限长梁挠度的积分形式解，指出当地基阻尼较小时，梁挠度峰值随荷载移动速度增大而增大；当地基阻尼较大时，梁挠度峰值随荷载移动速度增大而减小<sup>[71,72]</sup>。近年来，也有一些学者研究非线性地基梁和线性地基上非线性梁的动力响应和分岔、混沌等现象。Lenci 利用 Melnikov 方法研究了受轴向载荷的 Winkler 地基上的非线性弹性梁的混沌运动，发现地基参数的变化可能会使静态分岔变为超临界或亚临界分岔，在这两种情况下通向混沌的路径不同<sup>[73]</sup>。Kargarnovin 利用摄动法和复数 Fourier 变换研究受简谐移动载荷下非线性黏弹性地基上无限长梁的响应，得到了解析解，并研究了荷载速度和频率对梁响应的影响<sup>[74]</sup>。Santee 研究了非线性弹性地基梁振动的不稳定性及系统参数对非线性梁振动的影响，得到了固有频率与振幅的关系及倍周期和鞍结分岔，并利用 Melnikov 方法确定了系统不稳定区域的界线<sup>[75]</sup>。Kang 研究了受分布移动接触力作用下的梁的非线性响应，对梁横向振动方程伽辽金离散后，利用谱平衡方法得到前两个模态的幅频响应曲线，发现通过多次 Hopf 分岔后系统的运动转变为混沌运动<sup>[76]</sup>。张年梅研究了轴向载荷下具有材料非线性和几何非线性的弹性梁的混沌运动，利用非线性 Galerkin