

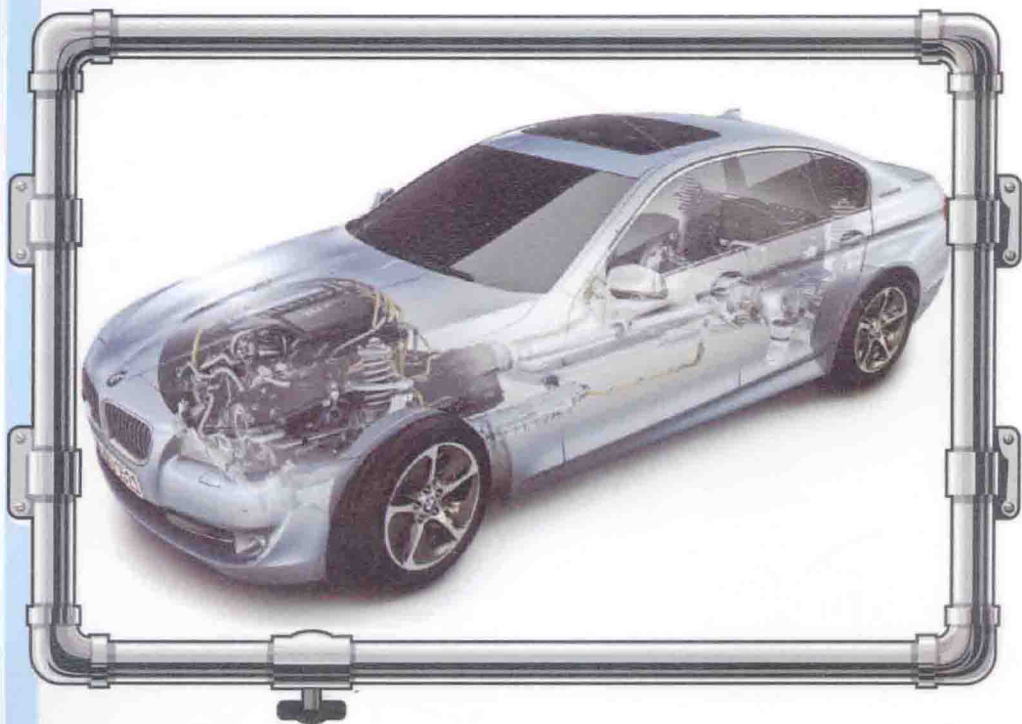


21世纪全国高等院校汽车类 **创新型** 应用人才培养规划教材

汽车系统动力学与仿真

崔胜民 编 著

- ✓ 系统地论述汽车系统动力学与仿真技术
- ✓ 通过实例进行汽车设计仿真和控制分析
- ✓ 体现作者对汽车系统动力学的研究成果



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

21 世纪全国高等院校汽车类创新型应用人才培养规划教材

汽车系统动力学与仿真

崔胜民 编 著



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

汽车系统动力学是研究所有与汽车系统运动有关的学科,是汽车优化设计和控制的基础。通过仿真分析,可以实现汽车结构参数与动力学特性的优化匹配,使汽车性能达到最优。本书全面系统地论述了汽车系统动力学与仿真技术,主要包括轮胎动力学、汽车驱动动力学、汽车制动动力学、汽车操纵动力学、汽车行驶动力学的评价指标、建模方法及仿真与控制技术等,并通过实例进行仿真和控制分析。本书内容新颖,具有一定的理论深度,同时注重实际应用。

本书可作为高等学校汽车类专业的教材及车辆工程专业研究生的教材,也可供从事汽车研究、设计等工作的专业技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

汽车系统动力学与仿真/崔胜民编著. —北京:北京大学出版社, 2014. 11

(21世纪全国高等院校汽车类创新型应用人才培养规划教材)

ISBN 978-7-301-25037-2

I. ①汽… II. ①崔… III. ①汽车—系统动态学—高等学校—教材②汽车—系统仿真—高等学校—教材 IV. ①U461

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 246570 号

书 名: 汽车系统动力学与仿真

著作责任者: 崔胜民 编著

策 划 编 辑: 童君鑫 黄红珍

责 任 编 辑: 黄红珍

标 准 书 号: ISBN 978-7-301-25037-2/TH·0411

出 版 发 行: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路 205 号 100871

网 址: <http://www.pup.cn> 新浪官方微博: @北京大学出版社

电 子 信 箱: pup_6@163.com

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667 出版部 62754962

印 刷 者: 北京飞达印刷有限责任公司

经 销 者: 新华书店

787 毫米×1092 毫米 16 开本 17 印张 396 千字

2014 年 11 月第 1 版 2014 年 11 月第 1 次印刷

定 价: 42.00 元

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究

举报电话:010-62752024 电子信箱:fd@pup.pku.edu.cn

前 言

随着汽车行业的迅猛发展，人们对现代汽车性能的要求不断提高，各种控制系统在底盘上的应用也越来越多，使得汽车系统动力学的研究内容更加丰富，研究手段更加先进，其中计算机仿真技术在汽车系统动力学研究中的应用越来越广泛。将汽车系统动力学与计算机仿真、优化和控制技术结合起来，能够使设计人员在设计阶段对所设计的汽车动力学性能进行预测，对设计的结构参数进行优化，使系统性能达到最优。汽车系统动力学与仿真技术已经成为现代汽车 CAD/CAE/CAM 的重要组成部分，具有重要的理论意义和实际应用价值。

全书共分 6 章，重点阐述和讲授轮胎动力学、汽车驱动动力学、汽车制动动力学、汽车操纵动力学、汽车行驶动力学的评价指标、建模方法及仿真和控制技术等，并通过实例进行仿真和控制分析。书中内容既有在现代汽车上已经广泛、成熟应用的理论和技术，也有最近发展的一些高新技术，特别是对三轴全轮转向汽车系统动力学进行了较细地分析。

本书是作者根据近几年对汽车系统动力学的研究成果，结合搜集到的国内、外有关文献资料编写而成的。

在本书编写过程中，感谢研究生徐博、吴翔宇、谭惠、曲晓静、谢东、刘杰军等提供的帮助和文献资料，以及陕西通运专用汽车集团有限公司提供的有关三轴汽车的资料。同时，书中引用了部分文献中的部分内容，特向其作者表示深切的谢意。

由于作者学识有限，书中不当之处在所难免，恳盼读者给予指正。

作 者
2014 年 7 月

目 录

7

第 1 章 绪论	1	第 3 章 汽车驱动动力学与仿真	47
1.1 汽车系统动力学的发展概况	2	3.1 汽车动力性评价指标	48
1.2 汽车系统动力学的研究内容	4	3.2 汽车动力性的分析方法	49
1.3 MATLAB 软件简介	5	3.2.1 汽车驱动力-行驶阻力平衡图	49
1.4 ADAMS 软件简介	6	3.2.2 汽车动力特性图	56
思考题	10	3.2.3 汽车功率平衡图	58
第 2 章 轮胎动力学与仿真	11	3.2.4 解析法求解汽车动力性	59
2.1 轮胎六分力	12	3.2.5 汽车动力性仿真	60
2.2 轮胎动力学模型的类型	13	3.3 汽车驱动防滑控制系统	62
2.2.1 轮胎理论模型	14	3.3.1 汽车 ASR 系统的作用	62
2.2.2 轮胎经验模型	15	3.3.2 汽车 ASR 系统的组成	63
2.2.3 轮胎半经验模型	16	3.3.3 汽车 ASR 系统的工作原理	64
2.2.4 轮胎自适应模型	16	3.3.4 汽车 ASR 系统的控制方式	65
2.3 轮胎理论模型	17	3.3.5 汽车 ASR 系统的控制原则	67
2.3.1 轮胎制动-驱动特性理论模型	17	3.3.6 汽车 ASR 系统的动力学模型	68
2.3.2 自由滚动轮胎侧偏特性理论模型	19	3.4 汽车 ASR 系统的控制技术	72
2.3.3 制动-驱动工况下的轮胎侧偏特性理论模型	21	3.4.1 汽车 ASR 系统的 PID 控制	72
2.4 ADAMS 软件中的轮胎模型	24	3.4.2 汽车 ASR 系统的逻辑门限值控制	74
2.4.1 ADAMS 软件中轮胎模型类型	24	3.4.3 汽车 ASR 系统的滑模变结构控制	75
2.4.2 Pacejka89 轮胎模型	26	3.4.4 汽车 ASR 系统的最优控制	78
2.4.3 Pacejka94 轮胎模型	30	3.4.5 汽车 ASR 系统的模糊控制	83
2.4.4 MF-Tyre 轮胎模型	32	思考题	87
2.4.5 Fiala 轮胎模型	36	第 4 章 汽车制动动力学与仿真	88
2.4.6 UA 轮胎模型	37	4.1 汽车制动性评价	89
2.5 轮胎动力学仿真	39		
2.5.1 轮胎动力学仿真模型	39		
2.5.2 轮胎动力学仿真结果	43		
思考题	46		



4.1.1	汽车制动性评价指标	89	5.1.2	汽车稳态回转试验 评价	132
4.1.2	汽车制动法规要求	90	5.1.3	汽车转向回正试验 评价	133
4.2	汽车制动效能分析	92	5.1.4	汽车转向轻便性试验 评价	134
4.2.1	制动车轮的受力	92	5.1.5	汽车转向瞬态响应 试验评价	135
4.2.2	汽车制动动力学模型	93	5.1.6	汽车蛇行试验评价	137
4.2.3	汽车制动过程分析	94	5.1.7	汽车操纵稳定性 综合评价	138
4.2.4	汽车制动效能仿真	100	5.2	三轴全轮转向汽车操纵 稳定性数学模型	138
4.3	制动力调节装置	101	5.3	汽车稳态响应	141
4.3.1	限压阀	101	5.3.1	汽车稳态响应评价	142
4.3.2	比例阀	102	5.3.2	三轴汽车稳态响应	143
4.3.3	感载阀	102	5.3.3	四轮转向汽车稳态 响应	144
4.3.4	惯性阀	103	5.4	汽车瞬态响应	144
4.4	汽车防抱死制动系统	103	5.4.1	汽车瞬态响应评价	144
4.4.1	汽车 ABS 的功用	103	5.4.2	三轴汽车瞬态响应	146
4.4.2	汽车 ABS 的组成	104	5.4.3	四轮转向汽车瞬态 响应	150
4.4.3	汽车 ABS 的工作原理	105	5.5	三轴全轮转向汽车操纵 稳定性仿真	151
4.4.4	汽车 ABS 动力学模型	106	5.5.1	轮胎侧向力非线性 模型	151
4.5	汽车 ABS 的控制技术	106	5.5.2	轮胎垂直载荷	151
4.5.1	汽车 ABS 的 PID 控制	106	5.5.3	轮胎侧偏角	154
4.5.2	汽车 ABS 的逻辑门限值 控制	107	5.5.4	三轴全轮转向汽车非线性 三自由度模型	155
4.5.3	汽车 ABS 的滑模变结构 控制	112	5.5.5	三轴全轮转向汽车 动态特性仿真	156
4.5.4	汽车 ABS 的最优控制	113	5.6	多轮转向汽车控制目标和 控制技术	157
4.5.5	汽车 ABS 的模糊控制	115	5.6.1	多轮转向汽车控制 目标	157
4.6	汽车 ABS/ASR 的集成控制 系统	117	5.6.2	多轮转向汽车控制 技术	158
4.6.1	汽车 ASB/ASR 集成控制 系统的组成	117	5.7	三轴全轮转向汽车最优 控制	160
4.6.2	汽车 ABS/ASR 集成系统 控制逻辑	117			
4.6.3	汽车 ABS/ASR 集成系统的 模糊控制	118			
4.6.4	汽车 ABS/ASR 集成控制 系统仿真	121			
	思考题	128			
第 5 章 汽车操纵动力学与仿真		129			
5.1	汽车操纵稳定性的评价	130			
5.1.1	汽车操纵稳定性评价的 基本概念	130			

5.7.1	三轴全轮转向汽车最优 控制系统结构	161	6.3.1	汽车被动悬架系统 数学模型	219
5.7.2	前馈比例控制器	161	6.3.2	随机路面下的汽车被动悬架 系统评价指标	220
5.7.3	汽车理论参考模型	163	6.3.3	汽车被动悬架系统评价 指标的频域特性	221
5.7.4	反馈最优控制器	164	6.4	汽车主动悬架系统控制功能和 控制技术	222
5.7.5	三轴汽车最优控制 仿真	166	6.4.1	汽车主动悬架系统 控制功能	222
5.8	三轴全轮转向汽车模糊控制	167	6.4.2	汽车主动悬架系统 控制技术	223
5.8.1	汽车质心侧偏角模糊 控制	168	6.5	汽车全主动悬架系统	227
5.8.2	汽车横摆角速度模糊 控制	173	6.5.1	汽车全主动悬架系统 数学模型	227
5.8.3	汽车质心侧偏角和横摆 角速度联合模糊控制	176	6.5.2	汽车全主动悬架系统评价 指标的频域特性	228
5.8.4	三轴全轮转向汽车转向 控制策略比较	180	6.5.3	汽车全主动悬架系统 最优控制	229
5.9	基于 ADAMS 的三轴前轮转向 汽车操纵稳定性仿真	182	6.5.4	汽车全主动悬架系统 模糊控制	230
5.9.1	ADAMS/Car 建模 思路	182	6.6	汽车半主动悬架系统	233
5.9.2	三轴前轮转向汽车 模型	183	6.6.1	汽车半主动悬架系统 数学模型	233
5.9.3	三轴前轮转向汽车 操纵稳定性仿真	188	6.6.2	汽车半主动悬架系统评价 指标的频域特性	234
	思考题	193	6.6.3	汽车半主动悬架系统 最优控制	235
第 6 章	汽车行驶动力学与仿真	194	6.6.4	汽车半主动悬架系统 自适应控制	236
6.1	汽车行驶动力学的评价	195	6.7	汽车空气悬架系统	239
6.1.1	汽车行驶平顺性评价 指标及要求	195	6.7.1	空气悬架系统组成及 特点	240
6.1.2	汽车悬架系统评价 指标及要求	201	6.7.2	汽车空气弹簧特性	242
6.2	汽车行驶动力学模型	201	6.7.3	ADAMS/Car 中汽车空气 悬架系统模型	243
6.2.1	1/4 汽车行驶动力学 模型	202	6.7.4	汽车空气悬架系统控制	250
6.2.2	1/2 汽车行驶动力学 模型	204	6.7.5	空气悬架汽车平顺性 仿真	258
6.2.3	汽车整车行驶动力学 模型	209		思考题	262
6.2.4	汽车路面输入模型	216		参考文献	263
6.3	汽车被动悬架系统	218			

第 1 章

绪 论



教学目标

通过本章的学习，读者能够掌握什么是汽车系统动力学，了解汽车系统动力学的发展、研究内容及 MATLAB 和 ADAMS 软件概况。



教学要求

知识要点	能力要求	相关知识
汽车系统动力学的定义与发展	掌握汽车系统动力学的定义，了解汽车系统动力学的发展	汽车技术的发展历史；汽车系统动力学发展过程和发展趋势
汽车系统动力学的研究内容	了解轮胎动力学、汽车驱动动力学、汽车制动动力学、汽车操纵动力学和汽车行驶动力学的研究内容	轮胎侧偏特性、汽车动力性、汽车制动性、汽车操纵稳定性、汽车行驶平顺性及相关标准
MATLAB 软件	了解 MATLAB 软件的功能、组成、常见工具箱及仿真途径	MATLAB/Simulink 与控制系统仿真
ADAMS 软件	了解 ADAMS 软件的功能、组成及 ADAMS/Car 的功能和仿真步骤	ADAMS 多体动力学仿真基础



导入案例

图 1.1 是某品牌汽车在做极限行驶运动。随着汽车技术的发展,人们对汽车性能的要求越来越高。为了保证汽车安全行驶,各种控制系统相继出现,如 ABS、ASR 系统、ACC 系统、ESP 系统和 VDC 系统等,这些控制系统与汽车系统动力学关系如何?如何在汽车设计阶段利用仿真技术对汽车性能进行预测并由此产生一个最佳设计方案?如何解决汽车设计过程中存在的问题并找到解决方案?通过本书的学习可以得到这些问题的答案。



图 1.1 汽车极限行驶

汽车是一个非常复杂的产品,它由成千上万个零部件组成,如何让汽车具有优良的性能,满足各种工况下的行驶要求,汽车系统动力学是基础。

1.1 汽车系统动力学的发展概况

汽车系统动力学是研究所有与汽车系统运动有关的学科,它涉及力学、仿真技术、控制技术和测试技术等,是一门相当复杂的学科。汽车系统动力学就是把汽车看作一个动态系统,对其行为进行研究,讨论其模型和响应、控制和仿真等。汽车系统动力学是随着汽车技术的发展而不断发展的,它是由经典动力学向系统动力学发展的。

汽车动力学的发展可以分为 4 个阶段。第 1 阶段是从 20 世纪初到 30 年代初期,其主要贡献是对汽车动力学有了初步认识。当时最具代表性的汽车是美国生产的福特 T 型车,如图 1.2 所示。从第一辆 T 型车面世到停产,共计 1500 多万辆车被销售。它的生产是当时先进工业生产技术与管理的典范,为汽车产业及制造业的发展做出了巨大贡献。在 20 世纪世界最有影响力汽车的全球性投票中,福特 T 型车荣登榜首。

福特 T 型车在行驶过程中,出现振动颠簸和前轮摆振等现象,这是人们最早对汽车动力学的认识。在这期间,人们认识到乘坐舒适性是汽车的重要性能,开始研究悬架系统和转向系统等。为了研究汽车悬架系统,1932 年,美国凯迪拉克公司建立了著名的“K²”试验台(一个具有前、后活动质量的车架)来研究前后悬架匹配及轴距对前后轮相位差的影响。该试验台没有测试仪器,完全靠感觉进行主观评判。

第 2 阶段是从 20 世纪 30 年代初到 50 年代初期,其主要贡献是初步形成汽车动力学

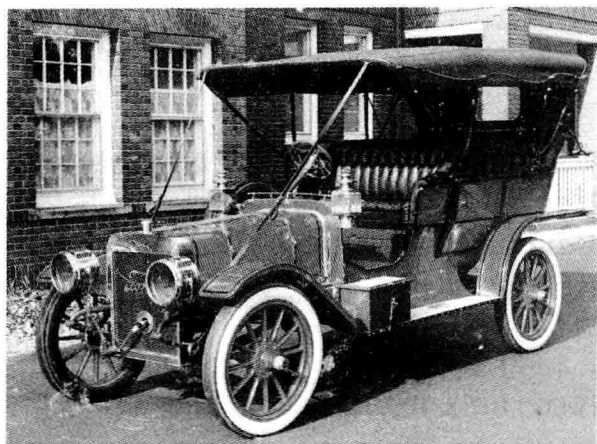


图 1.2 福特 T 型车

理论。人们认识到轮胎是影响汽车性能的重要因素之一，开始对轮胎力学性能进行研究，给出了轮胎侧偏角的概念；定义了不足转向和过度转向，开始研究汽车的稳态转向特性，建立了两自由度操纵动力学方程；对汽车行驶平顺性和操纵稳定性之间的重要协调关系开始有所认识。这一阶段建立的汽车动力学理论仍然是现代汽车理论的重要内容。

第3阶段是从20世纪50年代初到80年代末期，其主要贡献是完善了汽车动力学理论，特别是建立了比较完善的轮胎力学模型和试验方法，为汽车动力学的发展奠定了基础。扩展了对汽车操纵动力学的分析，从稳态分析发展到动态分析，从开环研究发展到闭环研究，从单一系统研究发展到多系统相互影响的研究，从经典动力学建模发展到多体动力学建模；采用随机振动理论对汽车行驶平顺性进行性能预测；汽车测试技术得到较快发展，各种汽车试验台相继出现等。这一阶段生产的汽车性能得到大幅度提高。

第4阶段是20世纪90年代初至今，其主要贡献是发展了汽车动力学理论。汽车制造商开始意识到汽车安全、节能、环保和舒适性等在汽车产品竞争中的重要性，因而汽车动力学得以迅速发展，从经典汽车动力学发展到汽车系统动力学。特别是先进的测试技术、计算机仿真技术和智能控制理论的应用，使得汽车系统动力学的研究内容和方法不断得到扩充和完善。这一阶段汽车性能成为产品竞争的焦点之一。

汽车系统动力学的发展主要有以下趋势。

(1) 汽车系统动力学模型从集中质量模型向多刚体、多柔体及刚柔耦合模型等方向发展，模型的复杂程度和精度不断提高。

(2) 驾驶人-汽车-环境闭环系统的研究从线性领域向非线性领域方向发展。

(3) 为提高汽车性能而研发的各种控制系统将在汽车上不断推广应用，这些控制系统与汽车系统动力学密切相关。

(4) 主动控制，特别是汽车底盘控制系统的集成是汽车控制技术发展的必然趋势。

(5) 先进的测试技术、控制技术和仿真技术将不断应用于汽车系统动力学研究中，推动汽车系统动力学的发展。

(6) 新能源汽车、智能汽车的系统动力学将成为新的研究热点。



1.2 汽车系统动力学的研究内容

汽车系统动力学研究内容广泛，涉及学科众多，而且发展速度较快。人们习惯把汽车动力学分为纵向动力学、操纵动力学和行驶动力学。纵向动力学是研究汽车直线运动时受力和运动的关系，可分为驱动动力学和制动动力学两大部分；操纵动力学是研究汽车在各种不同外界条件下的转向运动，其研究内容最为丰富；行驶动力学主要研究汽车行驶时，在随机不平路面的激励下，部件、总成及整车的动力学问题。轮胎动力学是研究汽车系统动力学的基础，因此，本书主要介绍轮胎动力学、汽车驱动动力学、汽车制动动力学、汽车操纵动力学和汽车行驶动力学及其仿真和控制技术。

1. 轮胎动力学

轮胎是汽车的重要部件之一，是汽车与地面之间的传力元件，起着承载、转向、驱动、制动等作用，其性能的优劣直接影响汽车的许多重要性能，如汽车的动力性、制动性、操纵稳定性、行驶平顺性及安全性等。轮胎动力学包括轮胎的纵向特性、侧偏特性及联合工况下的特性等。本书主要介绍轮胎六分力的定义、轮胎动力学模型的类型、轮胎三种工况下的理论模型、ADAMS 软件中的轮胎模型以及轮胎动力学的仿真。

2. 汽车驱动动力学

汽车驱动动力学属于汽车纵向动力学研究范畴，主要研究如何提高汽车直线行驶时的平均车速，包括驱动力的分配和控制，汽车驱动时的运动特性等。本书主要介绍汽车动力性和汽车驱动防滑控制系统两大部分。汽车动力性包括汽车动力性评价指标和汽车动力性各种分析方法；汽车驱动防滑控制系统包括其作用、组成、工作原理、控制方式、控制原则、动力学模型及各种控制技术。

3. 汽车制动动力学

汽车制动动力学也属于汽车纵向动力学研究范畴，主要研究如何降低汽车的制动距离，提高制动器的抗衰退性和制动时汽车的行驶方向稳定性，同时也包括制动力的合理分配、防抱死制动系统控制、汽车制动过程和转向制动性能的仿真等。本书主要介绍汽车制动性评价指标和法规要求；制动车轮的受力、汽车制动动力学模型、汽车制动过程分析和汽车制动效能仿真；限压阀、比例阀、感载阀和惯性阀等汽车制动力调节装置；汽车防抱死制动系统的功用、组成、工作原理、动力学模型及各种控制技术；汽车 ABS/ASR 集成控制系统的组成、控制逻辑、模糊控制及仿真分析。

4. 汽车操纵动力学

汽车操纵动力学是汽车系统动力学最重要的研究内容，主要研究对汽车操纵稳定性的评价，汽车在各种输入下的稳态响应和瞬态响应，多轮转向控制技术、驾驶人-汽车-环境闭环系统特性等。本书主要介绍汽车操纵稳定性评价的基本概念、汽车稳态回转试验评价、汽车转向回正试验评价、汽车转向轻便性试验评价、汽车转向瞬态响应试验评价、汽车蛇行试验评价、汽车操纵稳定性综合评价；建立三轴全轮转向汽车操纵稳定性数学模

型；分析三轴汽车稳态响应和瞬态响应、四轮转向汽车稳态响应和瞬态响应；利用 MATLAB/Simulink 对三轴全轮转向汽车操纵稳定性进行仿真；分析多轮转向汽车控制目标和控制技术，对三轴全轮转向汽车进行最优控制和模糊控制；利用 ADAMS 对三轴前轮转向汽车操纵稳定性进行仿真。

5. 汽车行驶动力学

汽车行驶动力学与乘坐舒适性密切相关，主要研究汽车在不同路面激励下，如何提高乘坐舒适性和保持最佳的姿态控制。本书主要介绍汽车行驶平顺性评价指标及要求、汽车悬架系统评价指标及要求；建立 1/4 汽车行驶动力学模型、1/2 汽车行驶动力学模型、汽车行驶动力学整车模型和汽车路面输入模型；对汽车被动悬架系统、全主动悬架系统、半主动悬架系统及空气悬架系统进行全面分析。

1.3 MATLAB 软件简介

MATLAB 系统经过 30 余年的发展，已经成为一个包含众多工程计算、仿真功能及工具的庞大系统，是目前世界上最流行的仿真计算软件。MATLAB 软件和工具箱(TOOLBOX)及 Simulink 仿真工具，为自动控制系统的计算与仿真提供了强有力的支持。

MATLAB 系统由 MATLAB 开发环境、MATLAB 数学函数库、MATLAB 语言、MATLAB 图形处理系统和 MATLAB 应用程序接口(API)五大部分组成。MATLAB 开发环境是一个集成化的工作空间，包括 MATLAB 桌面、命令窗口、M 文件编辑调试器、MATLAB 工作空间和在线帮助文档，可以让用户输入、输出数据，对 M 文件进行集成编译和调试；MATLAB 数学函数库包括了从基本运算到复杂算法的大量计算算法；MATLAB 语言是一个高级的基于矩阵/数组的语言，它具有程序流控制、函数、数据结构、输入/输出和面向对象编程等特色，用户可以用它编写各种应用程序；MATLAB 图形处理系统包括强力的二维、三维图形函数、图像处理 and 动画显示等函数，能方便地图形化显示向量和矩阵，而且能对图形添加标注和打印；MATLAB 应用程序接口(API)是一个使 MATLAB 语言能与 C、FORTRAN 等其他高级编程语言进行交互的函数库。

工具箱(TOOLBOX)是 MATLAB 强大功能得以实现的载体和手段，是对 MATLAB 基本功能的重要扩充。较为常见的 MATLAB 工具箱见表 1-1。

表 1-1 常见的 MATLAB 工具箱

类别	英文名称	中文名称
控制类	Control System Toolbox	控制系统工具箱
	System Identification Toolbox	系统辨识工具箱
	Robust Control Toolbox	鲁棒控制工具箱
	Fuzzy Logic Toolbox	模糊逻辑工具箱
	Neural Network Toolbox	神经网络工具箱
	Model Predictive Control Toolbox	模型预测控制工具箱



(续)

类别	英文名称	中文名称
应用数学类	Optimization Toolbox	最优工具箱
	Curve Fitting Toolbox	曲线拟合工具箱
	Statistics Toolbox	统计工具箱
	Partial Differential Equation Toolbox	偏微分方程工具箱
信号处理类	Signal Processing Toolbox	信号处理工具箱
	Communications System Toolbox	通信系统工具箱
	Wavelet Toolbox	小波分析工具箱
其他	Symbolic Math Toolbox	符号数学工具箱
	Parallel Computing Toolbox	并行计算工具箱

Simulink 是 MATLAB 软件的扩展，它是实现动态系统建模和仿真的一个软件包，它与 MATLAB 语言的主要区别在于它与用户交互接口是基于 Windows 的模型化图形输入的，从而使得用户把更多的精力投入到系统模型的构建而非语言的编程上。

利用 MATLAB/Simulink 进行仿真有两种途径。

(1) 在 MATLAB 的命令窗口下，编写和运行 M 文件，调用指令和各种用于系统仿真的函数，进行系统仿真。

(2) 直接在 Simulink 窗口上进行面向系统结构方框图的系统仿真，仿真模型一般采用 Simulink 模块库中的图标表示。

利用 MATLAB/Simulink 对汽车系统动力学仿真将在后面相应章节介绍。

1.4 ADAMS 软件简介

ADAMS 是由美国 MSC 公司开发的机械系统动力学自动分析软件，领先的“功能化数字样机技术”使它迅速发展成为 CAE 领域中使用范围最广、应用行业最多的机械系统动力学仿真工具，广泛应用于汽车、航空、航天、铁道、兵器、船舶、工程设备及重型机械等行业，许多国际化大型公司、企业均采用 ADAMS 软件作为其产品研发、设计过程中机械系统动力学仿真的平台。借助 ADAMS 提供的强大的建模功能、卓越的分析能力及灵活的后处理手段，可以建立复杂机械系统的“功能化数字样机”，在模拟现实工作条件的虚拟环境下逼真地模拟其所有运动情况，帮助用户对系统的各种动力学性能进行有效的评估，并且可以快速分析比较多种设计方案，直至获得最佳设计方案，提高产品性能，从而减少物理样机试验，提高产品设计水平，缩短产品开发周期，降低产品开发成本。

ADAMS 软件由基本模块、扩展模块、接口模块、专业领域模块及工具箱 5 类模块组成，见表 1-2。

表 1-2 ADAMS 软件模块

基本模块	用户界面模块	ADAMS/View
	求解器模块	ADAMS/Solver
	后处理模块	ADAMS/Postprocessor
扩展模块	液压系统模块	ADAMS/Hydraulics
	振动分析模块	ADAMS/Vibration
	线性化分析模块	ADAMS/Linear
	高速动画模块	ADAMS/Animation
	试验设计与分析模块	ADAMS/Insight
	耐久性分析模块	ADAMS/Durability
	数字化装配回放模块	ADAMS/DMU Replay
接口模块	柔性分析模块	ADAMS/Flex
	控制模块	ADAMS/Controls
	图形接口模块	ADAMS/Exchange
	CATIA 专业接口模块	CAT/ADAMS
	Pro/E 接口模块	Mechanical/Pro
专业领域模块	轿车模块	ADAMS/Car
	悬架设计软件包	Suspension Design
	概念化悬架模块	CSM
	驾驶人模块	ADAMS/Driver
	动力传动系统模块	ADAMS/Driveline
	轮胎模块	ADAMS/Tire
	柔性环轮胎模块	FTire Module
	柔性体生成器模块	ADAMS/FBG
	经验动力学模型	EDM
	发动机设计模块	ADAMS/Engine
	配气机构模块	ADAMS/Engine Valvetrain
	正时链模块	ADAMS/Engine Chain
	附件驱动模块	Accessory Drive Module
	铁路车辆模块	ADAMS/Rail
	FORD 汽车公司专用汽车模块	ADAMS/Pre(现改名为 Chassis)
工具箱	软件开发工具包	ADAMS/SDK
	虚拟试验工具箱	Virtual Test Lab



(续)

工具箱	虚拟试验模态分析工具箱	Virtual Experiment Modal Analysis
	钢板弹簧工具箱	Leafspring Toolkit
	飞机起落架工具箱	ADAMS/Landing Gear
	履带/轮胎式车辆工具箱	Tracked/Wheeled Vehicle
	齿轮传动工具箱	ADAMS/Gear Tool

ADAMS/Car 模块是 MSC 公司与奥迪 (Audi)、宝马 (BMW)、雷诺 (Renault) 和沃尔沃 (Volvo) 等汽车公司合作开发的整车设计软件包。该模块能够快速建造高精度的车辆模板、子系统和整车装配模型, 包括车身、悬架、传动系统、发动机、转向机构、制动系统等子系统在内的精确的参数化数字汽车, 如图 1.3 所示, 可以通过高速动画直观地再现在各种工况下 (例如天气、道路状况、驾驶人经验) 整车的运动学和动力学响应, 并输出汽车操纵稳定性、制动性、加速性、乘坐舒适性和安全性等性能指标参数, 从而减少对物理样机的依赖。

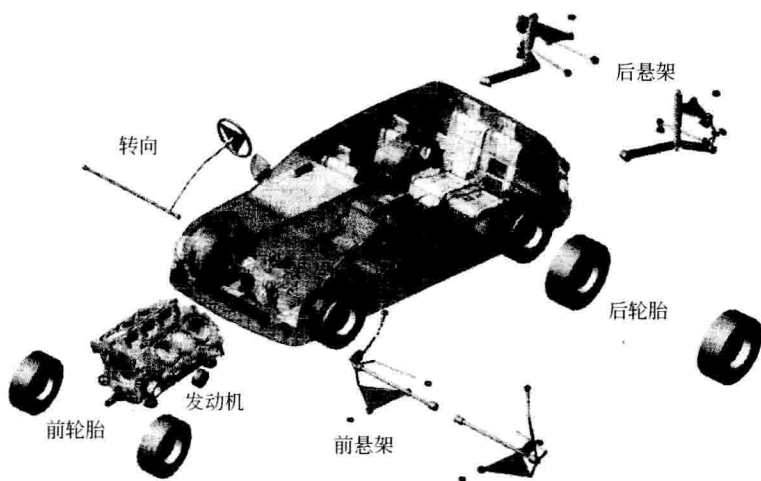


图 1.3 ADAMS/Car 基于模板的解决方案

ADAMS/Car 模块具有以下功能。

- (1) 汽车前、后悬架特性及转向器特性分析。
- (2) 功能化数字汽车的操纵稳定性分析。
- (3) 结合 ADAMS/Vibration 模块, 进行功能化数字汽车的振动特性分析。
- (4) 通用的四轮台架试验台, 用于功能化数字汽车的平顺性分析。
- (5) 机械-控制耦合, 用于功能化数字汽车的控制系统分析 (转向助力、ABS、ESP)。
- (6) 结合 ADAMS/Durability 模块, 进行功能化数字汽车的耐久性分析等。

使用 ADAMS/Car 的整车仿真功能可以对汽车整车虚拟原型进行一系列的车辆动力学仿真, 得到各种特性曲线和仿真动画。针对仿真结果, 可以方便快速地修改整车子系统中部件的几何尺寸和特性, 也可以更换子系统的类型, 观察其对整车性能的影响。

ADAMS/Car 将整车仿真运算方式分为两大类：一类称为事件，事件类仿真将驱动模型执行各种操作并行驶在指定的路面上；另一类称为演算，通过施加在模型上的力(侧向加速度)模拟真实运动但并不实际驱动车辆模型运动，它的优点是仿真容易成功，计算量较少；缺点是不能进行复杂路面、多次驾驶操纵情景的仿真。

整车仿真的一般步骤如图 1.4 所示。它分为 4 个步骤，步骤 1 是打开或创建整车组合，就是将要执行仿真的汽车原型导入到 ADAMS/Car 会话中，整车组合是一个汽车子系统的装配体，至少需要前后悬架、前后车轮、转向和车身子系统；步骤 2 是调节模型参数与设置仿真环境，调节模型参数是对基于模板的模型参数、硬点、参变量等进行调节，要获得有意义的仿真结论往往需要对整车模型进行多次调试；设置仿真环境主要是设置车轮通过何种路面，如分离附着系数路面、单边凹坑路面等；步骤 3 是执行仿真，从 Simulate (仿真)菜单指向 Full - Vehicle Analysis(整车分析)，选择需要执行的仿真类型，当选中某个具体的仿真后，ADAMS/Car 会弹出仿真设置卡，要求设置一些仿真参数，仿真设置选项卡根据不同的仿真类型而要求的参数也不同，ADAMS/Car 可提供的标准分析见表 1-3；步骤 4 是仿真结果的动画演示与绘图，仿真结束后，可以在屏幕上观察车辆模型的运动动画或调用 ADAMS/Postprocessor 后处理模块进行仿真分析曲线绘制和观察仿真动画。

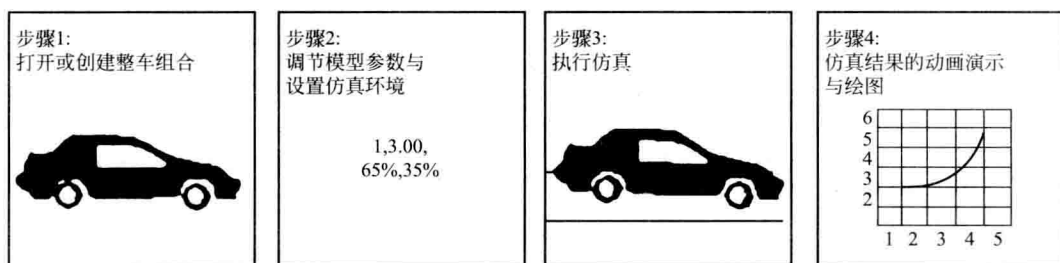


图 1.4 整车仿真步骤

表 1-3 标准整车仿真功能表

仿真类	试验组别	试验名称	目的
事件类	Open-Loop Steering Events 开环转向性能	Drift——漂移	分析汽车漂移时的方向稳定性
		Fish-Hook——蛇行	分析汽车的过渡响应和侧倾稳定性
		Impulse Steer——角脉冲转向	分析汽车的瞬态响应特性
		Ramp Steer——斜坡脉冲转向	分析汽车的时域瞬态响应特性
		Single Lane Change——单移线	分析汽车规定时间内的变车道能力
		Step Steer——阶跃转向	分析汽车的时域瞬态响应特性
		Swept Sine Steer——正弦扫描转向	分析汽车的频率响应特性
	Cornering Events 稳态转向性能	Braking - In - Turn——转向制动	分析汽车转向制动方向稳定性
		Constant-Radius Cornering——定半径转弯，也称稳态回转	分析汽车的稳态转向特性
		Cornering with Steer Release——转向回正	分析汽车自动回正能力



续表

仿真类	试验组别	试验名称	目的
事件类	Cornering Events 稳态转向性能	Lift-off-Turn-in——松加速踏板转向	分析汽车转向过程中突然松掉加速踏板并额外施加一个转向盘斜坡输入导致的路径及方向的偏离程度
		Power-off Cornering——发动机熄火转向	分析汽车直线行驶过程中发动机熄火对汽车方向稳定性的影响
	Straight-Line Events 直线行驶性能	Acceleration——加速	分析汽车加速时的俯仰运动特性
		Braking——制动	分析汽车制动时的俯仰运动特性
		Power-off Straight Line——收节气(油)门直线行驶	分析汽车直线行驶中突然从初始节气门位置抬起加速踏板后,汽车保持原运动轨迹的性能
	Course Events 路线跟踪事件	ISO Lane Change——ISO 双移线行驶	分析汽车保持沿指定路线行驶的能力
		3D Road——三维路面行驶	分析汽车在三维路面上的响应
演算类	Static and Quasi-Static Maneuvers 静态和准静态仿真	Quasi-Static Constant Radius Cornering——准静态定半径转向	分析汽车的稳态转向特性
		Quasi-Static Constant Velocity Cornering——准静态定速转弯	分析汽车的稳态转向特性
		Quasi-Static Force - Moment——准静态力-力矩方法	分析汽车的操纵稳定性
		Quasi-Static Straight - Line Acceleration——准静态直线加速	分析汽车直线行驶的稳定性
		Static Equilibrium——静平衡分析	用于模型的平衡计算或获取模态参数

利用 ADAMS/Car 对汽车操纵稳定性和悬架仿真将在第 5 章和第 6 章详细介绍。

思考题

1. 什么是汽车系统动力学? 汽车系统动力学发展分为哪几个阶段?
2. 汽车系统动力学的发展趋势有哪些?
3. 利用 MATLAB/Simulink 进行仿真的途径有哪些?
4. ADAMS/Car 模块具有哪些主要功能?