



普通高等教育“十五”国家级规划教材



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



普通高等教育“十三五”汽车类规划教材

汽车系统 动力学

第2版

Automobile System Dynamics

喻凡 林逸 © 编著



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



本书出版得到了上海汽车工业教育基金会的资助

普通高等教育“十五”国家级规划教材
普通高等教育“十一五”国家级规划教材
普通高等教育“十三五”汽车类规划教材

汽车系统动力学

第2版

喻凡 林逸 编著

机械工业出版社

汽车系统动力学是研究所有与汽车系统运动有关的学科, 研究内容可按车辆运动方向分为纵向、垂向和侧向动力学三大部分。

本书除介绍了汽车动力学建模的基础理论、轮胎力学及汽车空气动力学基础之外, 还重点介绍了受汽车发动机、传动系统、制动系统影响的驱动动力学和制动动力学(纵向), 以及行驶动力学(垂向)和操纵动力学(侧向)内容。本书运用系统方法及现代控制理论, 结合实例分析, 介绍了车辆动力学模型的建立、计算机仿真、动态性能分析和控制器设计的方法, 同时也使读者对常用的车辆动力学分析软件有所了解。

本书可作为高等学校车辆工程专业研究生教学用书, 也可作为车辆工程专业本科生的选修课教材, 同时可供汽车设计和研究人员阅读参考。

本书配有课件 PPT, 可免费赠送给采用本书作为教材的教师, 可登录 www.cmpedu.com 下载, 或联系编辑 (tian.lee9913@163.com) 索取。

图书在版编目(CIP)数据

汽车系统动力学/喻凡, 林逸编著. —2版. —北京: 机械工业出版社, 2016.9

普通高等教育“十五”国家级规划教材 普通高等教育“十一五”国家级规划教材 普通高等教育“十三五”汽车类规划教材

ISBN 978-7-111-55173-7

I. ①汽… II. ①喻…②林… III. ①汽车—系统动力学—高等学校—教材 IV. ①U461.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 248076 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 宋学敏 责任编辑: 宋学敏 李 然

责任校对: 刘怡丹 封面设计: 张 静

责任印制: 李 洋

保定市中国画美凯印刷有限公司印刷

2017 年 1 月第 2 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 25 印张 · 593 千字

0 001—3000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-55173-7

定价: 58.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线: 010-88379833

机工官网: www.cmpbook.com

读者购书热线: 010-88379649

机工官博: weibo.com/cmp1952

教育服务网: www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

金书网: www.golden-book.com

第2版前言

作者于1996年从英国利兹大学获得博士学位回国后,即在国内率先为研究生开设了汽车系统动力学课程。在近20年的教学实践中,形成了自己的体系和风格,得到了学生们的广泛好评。在此基础上,于2005年出版了普通高等教育“十五”国家级规划教材《汽车系统动力学》。

时间飞逝,距与林逸教授合作编著教材已过去11年,在这期间,有许多热心的读者提出了非常好的意见和建议,加之该领域最新研究成果不断涌现,以及作者在教学实践中的一些新体会和感悟,促使作者做出了补充、修改和完善本书的决定,希望更新后的第2版能够更好地为读者服务。

本书延续第1版的写作风格,通过结合实例来帮助学生理解从动力学建模、仿真分析到控制器设计的全过程。本书通过更多且略复杂的实例来介绍近来汽车系统动力学方面的新领域和新热点,着重从以下几方面对内容进行了补充:

- 1) 增加了一章关于驾驶人模型、人一车一路闭环系统及车辆操纵品质评价的内容。
- 2) 增加了一章作者近年来关于车辆底盘集成控制的研究成果,包括一个实例分析。
- 3) 增加了一个应用分岔理论进行非线性悬架动力学及前轮摆振分析的实例。
- 4) 对转向系统动力学及控制一章进行了较大的更新和补充,并增加了关于汽车主动转向控制方面的内容。
- 5) 应用ADAMS软件对某轿车前悬架建模的实例重新进行了修改。

相应于以上新增内容,作者要特别感谢国内外同行和朋友所提供的帮助,主要有日本神奈川工科大学的安部正人教授、浙江大学李道飞博士、上海交通大学李鸿光教授、一汽解放青岛汽车有限公司的李胜博士、北京理工大学的施国标博士和青岛理工大学的柳江博士。关于车辆底盘集成控制一章的内容主要是作者近十年的研究成果,很大程度上得益于两个国家自然科学基金项目(编号:50875163和51375299),在此对国家自然科学基金委员会的资助表示感谢。

由于条件有限,书中难免存在疏漏之处,恳请广大读者提出宝贵意见,并通过出版社或直接与作者联系(喻凡:fanyu@sju.edu.cn;林逸:linyi@china.com)。

编著者
2016年11月

第1版前言

汽车系统动力学是20世纪发展起来的新学科，随着对现代汽车性能和行驶速度要求的提高，以及不断涌现的底盘控制技术的应用，汽车系统动力学本身的研究内容更加丰富。

本书作者分别自1989年和1996年起在原吉林工业大学、上海交通大学和北京理工大学为研究生讲授“汽车系统动力学”课程。结合这方面的一些教学经验和科研工作，于2001年底向教育部申请出版此书，期望为高校本科生或研究生提供一本汽车系统动力学课程的教材。本书介绍的内容比较广泛，从本学科的历史到学科的最新发展均有涉及。内容安排上由浅入深，注重实例分析，力图使读者在了解汽车系统动力学基本内容的同时，通过几个完整的实例了解运用系统方法及现代控制理论进行车辆动力学建模、仿真分析和控制系统设计的方法，同时也掌握有关系统动力学分析软件的使用方法。因此，也期望本书对从事汽车工程研究的技术人员有参考价值。

在本书的编写过程中，得到了国内外同行和朋友的热情帮助。特别感谢同济大学张洪欣教授在2004年上海炎热的夏天花费整整两个月的时间对本书进行通篇审阅。同时，也感谢英国利兹大学的戴维·克劳拉教授，他就本书的结构和内容提出了口头建议。

我们还请合肥工业大学的陈无畏教授（行驶和操纵部分）、吉林大学林柏忠副教授（轮胎模型部分）、北京航空航天大学康宁教授（空气动力学基础部分）、上海交通大学何维廉和鲁统利副教授（传动系统扭振部分）对相关部分章节进行了审阅。在资料收集过程中得到了清华大学夏群生教授、江苏大学高翔教授的帮助，美国威斯康星大学的黄子春先生为购买国外参考书提供了资助。此外，在编写过程中还得到了上海交通大学和北京理工大学车辆工程专业研究生的热情帮助，在此一并表示感谢。

由于时间较为仓促，书中难免有不当之处，恳请读者批评指正。

编著者

2005年6月



(续)

符号	物理量	单位	符号	物理量	单位
F_b	车轮制动器制动力	N	h_{CG}	车辆质心距地面的高度	m
$F_{e,t}$	发动机缓速制动力	N	h_o	车辆质心至侧倾轴的距离	m
F_Q	作用于系统的广义力	N 或 $N \cdot m$	h_n	车轴侧倾中心至地面的距离	m
F_x	纵向力	N	I_{kp}	转向轮绕主销转动惯量	$kg \cdot m^2$
F_{xb}	车轮地面制动力	N	I_p	车身的俯仰转动惯量	$kg \cdot m^2$
F_{xc}	轮胎驱动力的极限值	N	I_r	车身的侧倾转动惯量	$kg \cdot m^2$
$F_{x,ex}$	后备驱动力	N	I_w	车轮的滚动转动惯量	$kg \cdot m^2$
F_y	侧向力	N	I_{xx}	车辆绕 x 轴的侧倾转动惯量	$kg \cdot m^2$
F_{yf}	地面对前轮的侧向力	N	I_{xsf}	前轴绕其纵轴线的侧转动惯量	$kg \cdot m^2$
F_{yr}	地面对后轮的侧向力	N	I_{xz}	车辆侧倾与横摆运动惯性积	$kg \cdot m^2$
F_z	法向力	N	I_{zz}	车辆绕 z 轴的横摆转动惯量	$kg \cdot m^2$
F_{zdf}	前轴动载	N	I_ψ	车轮的转向转动惯量	$kg \cdot m^2$
F_{zdr}	后轴动载	N	i_0	主减速器传动比	—
F_{zdf}	前轴垂向载荷	N	i_G	路面坡度	—
F_{zgr}	前轴重力垂向分量	N	i_g	变速器传动比	—
F_{zgr}	后轴重力垂向分量	N	i_n	转向系统传动比	—
F_{zr}	后轴垂向载荷	N	J_i	传动系中旋转部件的当量转动惯量	$kg \cdot m \cdot s^2$
F_{zsf}	前轴静载	N	K	稳定性因数	s^2/m^2
F_{zsr}	后轴静载	N	K_0	横拉杆刚度	N/m
$F_{z,w}$	车轮载荷	N	K_{SC}	转向柱的扭转刚度	$N \cdot m/rad$
f_R	滚动阻力系数	—	K_{SL}	转向杆系的等效扭转刚度	$N \cdot m/rad$
f_f	前轴附着率	—	K_{ST}	转向机构扭转刚度	$N \cdot m/rad$
f_{id}	理想附着率	—	K_i	传动系中旋转部件之间联接轴的当量扭转刚度	$N \cdot m/rad$
f_n	固有频率	Hz			
f_r	后轴附着率	—			
f_t	传动系统固有频率	Hz			
G_0	路面不平度系数	m^2/m^{-1}			



(续)

符号	物理量	单位	符号	物理量	单位
K_{kp}	车轮绕主销的扭转刚度	$N \cdot m/rad$	n	波数	cycle/m
K_p	转向机构刚度	$N \cdot m/rad$	n_0	下截止波数	cycle/m
K_s	悬架弹簧刚度	N/m	n_d	断点处波数	cycle/m
K_{sf}	前悬架刚度	kN/m	P_{Dem}	功率需求	kW
K_{sr}	后悬架刚度	kN/m	P_H	功率供应	kW
K_l	轮胎垂向刚度	N/m	P_i	发动机指示功率	kW
K_{tr}	转向梯形刚度	N/m	R	车辆转向半径	m
K_ϕ	车身侧倾刚度	$N \cdot m/rad$	Re	雷诺数	—
K_{ψ_r}	后轴相对车身的扭转刚度	$N \cdot m/rad$	R_f	前轮转向半径	m
L	轴距	m	R_r	后轮转向半径	m
L_0	主销延长线与地面交点至车轮中心平面的距离	m	R_{ss}	车辆稳态转向半径	m
L_{aw}	加权振级	dB	r	横摆角速度	rad/s
M_{Dem}	发动机转矩需求	$N \cdot m$	r_0	车轮自由半径	m
M_L	转矩损失	$N \cdot m$	r_d	车轮滚动半径	m
M_e	发动机转矩	$N \cdot m$	r_{ss}	横摆角速度稳态响应	$rad \cdot s^{-1}/rad$ 或 $(^\circ) \cdot s^{-1}/(^\circ)$
M_s	悬架变形时的回复力矩	$N \cdot m$	S	功率谱密度	m^2/m^{-1}
M_l	轮胎变形时的回复力矩	$N \cdot m$	s	车轮滑转率	—
M_x	车轮侧倾力矩	$N \cdot m$	s_b	车轮制动时的滑移率	—
M_y	车轮滚动阻力矩	$N \cdot m$	t_{kp}	两主销轴线与地面交点间的距离	m
M_z	车轮回正力矩	$N \cdot m$	t_m	轮胎的机械拖距	m
m_b	车身质量(簧载质量)	kg	U_a	主动悬架作动器控制力	N
m_{bf}	车身在前轴处的集中质量	kg	u	车辆前进速度	m/s
m_{bh}	半车身质量	kg	u_a	车辆前进速度	km/h
m_g	车轮不平衡质量	kg	u_c	车辆恒定前进速度	m/s
m_w	车轮质量(非簧载质量)	kg	V_s	发动机排量	L



(续)

符号	物理量	单位	符号	物理量	单位
W	车重	N	θ_b	车身俯仰角	rad 或($^{\circ}$)
y_{ϕ}	车身侧倾角引起的轮胎侧向偏移量	m	θ	滚动时的车轮滚动角	rad 或($^{\circ}$)
α	轮胎侧偏角	rad 或($^{\circ}$)	κ	不足转向参数	rad/($m \cdot s^{-2}$)
α_G	坡度角	rad 或($^{\circ}$)	λ	主销后倾角	rad 或($^{\circ}$)
β	车辆侧偏角	rad 或($^{\circ}$)	μ	地面附着系数	—
β_b	前后轴制动力分配比		μ_s	侧向附着系数	—
γ	车轮外倾角	rad 或($^{\circ}$)	ξ_s	悬架系统的阻尼比	—
γ_{ϕ}	车身侧倾引起的附加车轮外倾角	rad 或($^{\circ}$)	ξ	系统阻尼比	—
δ_{Fy}	轮胎侧向力通过悬架变形产生的附加变形转向角	rad 或($^{\circ}$)	ρ	空气密度	kg/m^3
δ_f	前轮转向角	rad 或($^{\circ}$)	ρ_{sw}	车辆稳态转向曲率	m^{-1}
δ_{fs}	由转向系产生的转向角	rad 或($^{\circ}$)	ϕ	车身侧倾角	rad 或($^{\circ}$)
δ_{ϕ}	车身侧倾引起的前轴附加侧倾转向角	rad 或($^{\circ}$)	ϕ_f	前轴侧倾角	rad 或($^{\circ}$)
δ_i	旋转质量换算系数	—	ϕ_t	轮胎运动方向与 x 轴的夹角	rad 或($^{\circ}$)
δ_{kp}	车轮绕主销转动的当量阻尼系数	—	ψ	车辆航向角	rad 或($^{\circ}$)
δ_o	外侧转向轮转角	rad 或($^{\circ}$)	ψ_t	车轮前束角	rad 或($^{\circ}$)
δ_r	后轮转向角	rad 或($^{\circ}$)	ψ_w	前轮绕主销的摆振角	rad 或($^{\circ}$)
$\delta_{r\phi}$	车身侧倾引起的后轴附加侧倾转向角	rad 或($^{\circ}$)	ω_{in}	前轴角振动固有频率	Hz
δ_{sw}	转向盘的角位移	rad 或($^{\circ}$)	ω_w	转向轮绕主销振动的固有频率	Hz
η_t	传动效率	—	ω_n	系统固有频率	Hz
			Ω	坐标变换中采用的角速度	rad 或($^{\circ}$)

目 录

第2版前言	
第1版前言	
常用符号表	

绪篇 概论和基础理论

第一章 车辆动力学概述	3
第一节 历史回顾	3
第二节 研究内容和范围	6
第三节 车辆特性和设计方法	9
第四节 术语、标准和法规	12
第五节 发展趋势	14
参考文献	17

第二章 车辆动力学建模方法及基础

理论

第一节 动力学方程的建立方法	19
第二节 非线性动力学系统分岔分析	21
第三节 多体系统动力学方法	26
第四节 非完整系统动力学	32
参考文献	36

第三章 充气轮胎动力学

第一节 概述	38
第二节 轮胎的功能、结构及发展	40
第三节 轮胎模型	42
第四节 轮胎纵向力学特性	46
第五节 轮胎垂向力学特性	66
第六节 轮胎侧向力学特性	72
参考文献	75

第四章 空气动力学基础

第一节 概述	77
第二节 空气的特性	77
第三节 伯努利方程	79

第四节 压力分布和压力系数	81
第五节 对实际气流特性的考虑	82
第六节 空气动力学试验	84
第七节 汽车的空气阻力	90
参考文献	94

第一篇 纵向动力学

第五章 纵向动力学性能分析

第一节 动力的需求与供应	97
第二节 动力性	101
第三节 燃油经济性	105
第四节 驱动与附着极限和驱动效率	109
第五节 制动性	114
参考文献	123

第六章 纵向动力学控制系统

第一节 防抱死制动控制	124
第二节 驱动力控制系统	130
第三节 车辆稳定性控制系统	133
参考文献	139

第七章 动力传动系统的振动分析

第一节 扭振系统的激振源	140
第二节 扭振系统模型与分析	142
第三节 动力传动系统的减振措施	147
参考文献	149

第二篇 行驶动力学

第八章 路面模型及舒适性标准

第一节 概述	153
第二节 路面输入及其模型	154
第三节 车辆舒适性评价标准	165
参考文献	171



第九章 行驶动力学模型 172

第一节 概述 172

第二节 与平顺性相关的部件特性 173

第三节 模型推导的前提及简化条件与分析 185

第四节 单轮车辆模型的推导及分析 187

第五节 半车模型的推导及分析 196

第六节 整车模型的推导及分析 199

参考文献 201

第十章 可控悬架系统 202

第一节 车身高度调节系统 202

第二节 自适应阻尼调节系统 203

第三节 可切换阻尼系统 205

第四节 全主动系统 205

第五节 有限带宽主动系统 207

第六节 连续可变阻尼的半主动系统 208

第七节 各类悬架系统的性能比较 209

第八节 主动悬架控制算法介绍 211

参考文献 220

第三篇 操纵动力学

第十一章 基本操纵模型 225

第一节 概述 225

第二节 基本操纵模型假设 226

第三节 运动方程的推导 226

第四节 操纵特性分析 231

第五节 对实际问题的考虑 243

第六节 实例分析与比较 246

参考文献 249

第十二章 扩展的操纵模型及实例分析 250

第一节 概述 250

第二节 考虑车身侧倾的三自由度模型 250

第三节 车轮转动效应 255

第四节 转向系统的影响 257

第五节 悬架运动学 260

第六节 变形转向 261

第七节 操纵动力学性能实例分析 265

参考文献 273

第十三章 转向系统动力学及控制 274

第一节 概述 274

第二节 转向系统振动分析 275

第三节 四轮转向系统 286

第四节 电动助力转向系统 294

第五节 主动前轮转向系统 301

参考文献 307

第十四章 驾驶人模型与车辆操纵品质评价 309

第一节 概述 309

第二节 驾驶人控制下的车辆运动 309

第三节 驾驶人模型参数辨识 311

第四节 基于驾驶人模型的车辆操纵品质评价 313

参考文献 325

第四篇 车辆计算机建模与仿真

第十五章 车辆动力学计算方法与软件 329

第一节 概述 329

第二节 面向目标设计的车辆动力学仿真软件 330

第三节 多体系统动力学分析软件 330

第四节 程序工具箱 335

第五节 各类方法的比较 337

参考文献 337

第十六章 MATLAB 环境下车辆系统建模、仿真与控制器设计实例 339

第一节 MATLAB/Simulink 软件介绍 339

第二节 实例1——制动动力学计算机建模、仿真及 ABS 控制器设计 340

第三节 实例2——行驶动力学计算机建模、仿真及主动悬架控制器设计 342

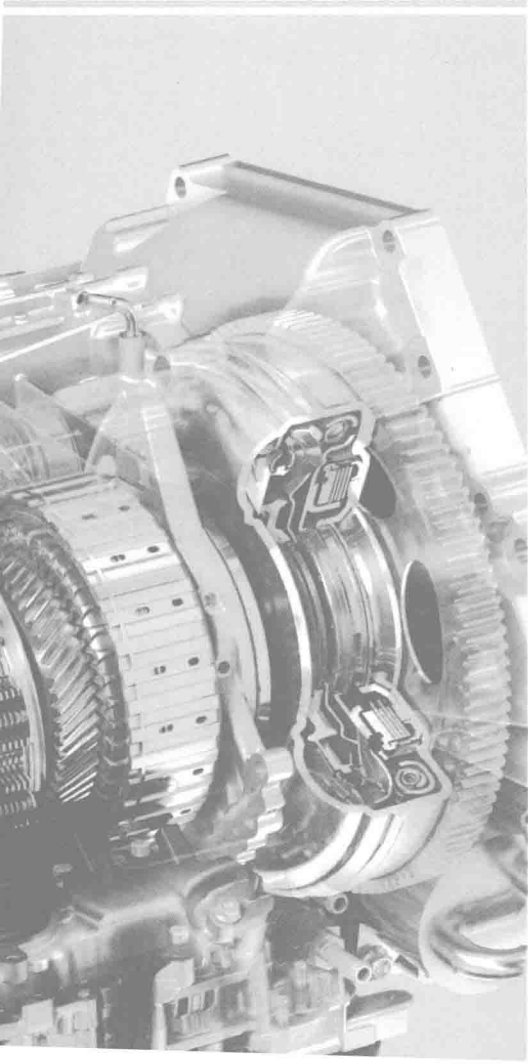


第四节 实例3——操纵动力学计算机建模、 分析及4WS控制器设计	346	第十八章 车辆动力学集成控制及应用	
参考文献	351	CarSim 软件的实例分析 ...	364
第十七章 应用 ADAMS 软件的多体动 力学实例分析	352	第一节 概述	364
第一节 ADAMS/Car 模块介绍	352	第二节 集成控制结构	365
第二节 轿车前悬架建模实例	353	第三节 集成控制策略	367
第三节 模型仿真分析	361	第四节 一种基于轮胎力最优分配的集成 控制方法	368
参考文献	363	第五节 一个应用 CarSim 软件的仿真分析 实例	372
		参考文献	378
		名词索引	379

绪 篇

概论和基础理论

本篇首先介绍车辆动力学的发展历史，车辆动力学理论对实际车辆设计所做的贡献、车辆动力学的研究内容和范围及其未来的发展趋势；然后介绍车辆动力学模型建立的基础理论和方法。考虑到轮胎在车辆动力学中的重要性，轮胎的物理特性也在本篇给予专门一章的介绍。此外，为了方便理解后面章节中有关汽车空气动力学的内容，在本篇的最后一章，对空气动力学的基础理论进行了简单介绍。



车辆动力学概述

第一节 历史回顾

车辆动力学是近代发展起来的一门新兴学科。有关车辆行驶振动分析的理论研究，最早可追溯到100年前^[1]。事实上，直到20世纪20年代，人们对车辆行驶中的振动问题才开始有初步的了解；到20世纪30年代，英国的Lanchester^[2]、美国的Olley^[3]、法国的Brouhiet开始了车辆独立悬架的研究，并就转向运动学和悬架运动学对车辆性能的影响进行了分析。开始出现有关转向、稳定性、悬架方面的文章。同时，人们对轮胎侧向动力学的重要性也开始有所认识。

回顾车辆动力学的发展过程，首先要肯定Frederick W. Lanchester对这门学科的早期发展所做的贡献。在他所处的时代，尽管缺乏成熟的理论，但作为当时最杰出的工程师，他对车辆设计的见解不但敏锐，而且深刻。即使在今天，Lanchester的思想仍有一定的借鉴意义。

另一位对本学科发展有卓越贡献的人物是Maurice Olley，他率先系统地提出了操纵动力学分析理论。后来，Olley这样总结了20世纪30年代早期的车辆设计状况^[4]：

“那时，已经零星出现了一些尝试性的方法，其目的在于提高车辆的行驶性能，但实际上却几乎没有什么作用。坐在后座的乘客仍然像压载物一般，被施加在后轮后上方的位置。人们对车辆转向不稳定的表现已习以为常，而装有前制动器的前桥摆振几乎成为了汽车驾驶中的必然现象。工程师使所有的单个部件都制作得精致完好，但将它们组装成整车时，却很少能得到令人满意的性能。”

就在这个时期，人们对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。但对车辆性能的评价，仍主要凭经验而非数学计算。1932年，Olley在美国凯迪拉克(Cadillac)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），用来研究前后悬架匹配及轴距对前后轮相位差的影响。该试验台并无测试仪器，完全靠感觉进行主观评判。由于当时缺乏确定的术语，期望的特性被Olley描述为“flat ride”（平稳行驶），他还提出过一个实现所谓“平稳行驶”的经验窍门，即前悬架必须比后悬架“软”。

以Olley为核心人物提出的有关行驶平顺性问题的讨论一直延续到20世纪30年代末，其中关于车身振动、固有频率、俯仰固有频率及其与前后悬架刚度匹配关系等重要问题的讨论极为有意义。人们对橡胶衬套在抑制高频振动中的作用也有所认识^[5]。也就在这时，出现了各种各样的独立悬架设计。追求独立悬架设计的部分动机是试图克服与前桥设计相关的



周期性摆振，而前桥转向系统的设计直接影响行驶动力学和操纵动力学两个方面。

在随后的20年中，车辆动力学进展甚微。进入20世纪50年代，可谓进入了一个车辆操纵动力学发展的“黄金时期”。这期间建立了较为完整的车辆操纵动力学线性域（即侧向加速度约小于 $0.3g$ ）理论体系。到20世纪50年代中期，一套较为完整的关于操纵和转向的基础理论体系得以形成，其标志是1956年所发生的一个“历史性事件”，Milliken将其称作车辆动力学发展过程中的一个分水岭，并在他的书^[6]中对此事件的整个过程做了详细记载。当时，机械工程师学会（Institution of Mechanical Engineers, IMechE）在伦敦组织了一个会议，主题是关于对汽车稳定性的控制及轮胎性能的研究。从车辆动力学发展的角度来看，这次会议的论文具有重要的历史意义。

随后有关行驶动力学的进一步发展，是在完善的测量和计算手段出现后才得以实现的。英国汽车研究所（Motor Industry Research Association, MIRA）对该领域的发展做出了重要贡献，包括路面特性的测量^[7]、主观评价和客观测试的关系^[8]、行驶平顺性测量仪的开发以及率先采用了模拟计算机、随后是电子计算机的动力学计算研究等。还有一些车辆动力学研究的先驱者，包括美国的Clark、Butkunas、Healy和德国的Mitschke等。他们在车辆建模与分析中，均采用了以轮胎接地点的随机路面输入作为激励输入的“集中质量模型”（lumped model）。

在人们对车辆动力学理解的进程中，理论和试验两方面因素均发挥了作用。其一，有关飞机稳定性及其控制的理论被有效地运用于汽车，当时不少车辆动力学先驱者原先是从事航空工程领域的研究工作（包括Bill Milliken、Douglas Milliken和Leonard Segel等）；其二，轮胎的重要性被肯定，人们开始用轮胎试验来测定轮胎的力学特性。正是由于Gough等人为轮胎特性提供了全面的认识，Olley^[4]、Milliken^[9]、Segel^[10]、Whitcomb^[11]等人才可能对操纵稳定性进行定性的处理分析。

在1993年举办的一次关于车辆舒适性和操纵稳定性的IMechE会议上，Segel发表了一篇重要演讲^[12]，对车辆动力学的发展进行了系统的回顾。由于Segel本人在1950~1990年间对车辆动力学的研究做出了重大贡献，所以他在文章中能以自己的深刻理解回顾了这门学科的发展，并以阶段划分的方式对本门学科的早期成就进行了概括，见表1-1。

表1-1 根据Segel^[12]提出的阶段划分对车辆动力学早期成就的总结

阶段一（到20世纪30年代初期）

1. 对车辆动态性能的经验性的观察
2. 开始注意到车轮摆振的问题
3. 认识到乘坐舒适性是车辆性能的一个重要方面

阶段二（从20世纪30年代初期到1952年）

1. 了解了简单的轮胎力学，给出了轮胎侧偏角的定义
 2. 定义了不足转向和过度转向
 3. 对车辆的稳态转向特性有所了解
 4. 建立了简单的两自由度操纵动力学方程
 5. 开始进行有关行驶平顺性的试验研究，建立了 K^2 试验台，提出了“平稳行驶”的概念
 6. 引入了前独立悬架
-

阶段三 (1952 年以后)

1. 通过试验结果分析和建模, 加深了对轮胎特性的了解
2. 在两自由度操纵模型基础上, 建立了考虑车身侧倾的三自由度操纵动力学方程
3. 扩展了对操纵动力学的分析, 包括稳定性和转向响应特性分析
4. 开始采用随机振动理论对行驶平顺性进行性能预测

随后的几十年, 汽车制造商意识到行驶平顺性和操纵稳定性在汽车产品竞争中的重要作用, 因而车辆动力学得以迅速发展。在试验方面, 车辆行驶振动分析仪、路面测量、转向信号传感装置、变车道、J 转向等试验方法的测试技术日趋完善。人们对非线性操纵响应的理解也愈加深入, 从而使操纵动力学的研究逐渐向高侧向加速度的非线性作用域扩展^[13]。

计算机技术及应用软件的开发, 使建模的复杂程度不断提高。多体系统 (Multi-Body System, MBS) 动力学分析软件 (如 ADAMS, DADS) 的应用, 使复杂的模型得到了明确的表达和方便的求解。在应用计算机技术的同时, 先进控制理论与技术的应用也极大地推动了车辆动力学的发展, 各种车辆底盘控制系统开始相继涌现, 它们对车辆性能的影响及相互关系如图 1-1 所示^[14]。

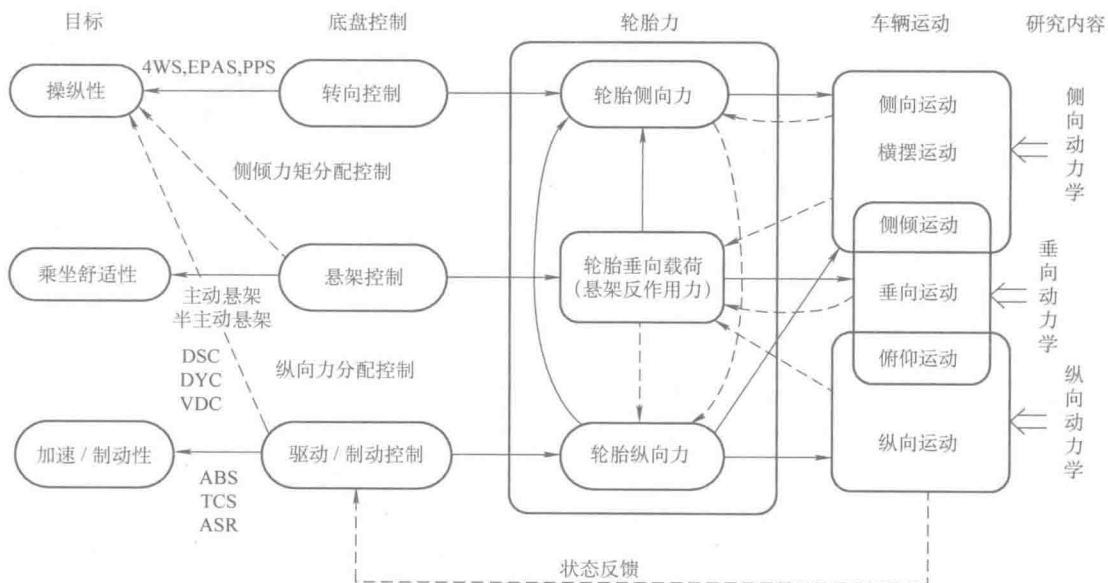


图 1-1 底盘控制系统与车辆动力学关系示意图

自 20 世纪 70 年代末, 从飞机设计技术中引入的防抱死制动系统 (Anti-lock Braking System, ABS) 可以称得上是向车辆底盘控制迈出的第一步, ABS 通过限制制动压力来保证车轮的最佳滑移率, 从而避免了车轮抱死。随后, 通过调节发动机输出转矩防止车轮滑转的驱动力控制系统 (Traction Control System, TCS) 在 20 世纪 80 年代中期得到应用。到 20 世纪 80 年代末, 在 ABS 和 TCS 的基础上, 又成功地开发了防滑转控制 (Anti-Slip Regulation, ASR) 装置, 可改善车辆急变速时与地面的附着力, 防止车轮打滑, 并避免车辆产生



侧向滑动的危险。20世纪90年代初,研究人员根据轮胎印迹处的纵向和侧向分力满足摩擦圆规律的原理,提出了在高速行驶中通过驱动力控制来保证车辆侧向稳定性的动态稳定性控制(Dynamic Stability Control, DSC),它对汽车高速转弯时制动特别有效。20世纪90年代末期,研究人员发现,车辆在高速行驶过程中的侧向稳定裕度较小,通过调节四个车轮的纵向力而形成一定的回转力矩,就可控制汽车的横摆角速度,由此提出了“直接横摆控制”(Direct Yaw moment Control, DYC)算法,并经试验验证了该算法的有效性。在此基础上,近年来又提出了限制一定侧偏角范围的车辆动力学控制(Vehicle Dynamics Control, VDC)。进入21世纪以来,VDC系统得到了世界各国汽车厂商的广泛关注,并进行开发研制。

除了对车辆车轮的纵向力进行控制外,在垂向动力学方面,主动悬架控制技术则可作为车辆动力学发展中的另一个典型代表。尽管在20世纪60年代早期,已有人开始进行此方面的一些基础性研究工作,但首先使主动悬架的基本思想和控制律得到完善的应该是Thomson^[15]。更有实际意义的是, Lotus公司^[16]在20世纪80年代初制造了第一辆装有主动悬架的原型样车。目前,主动、半主动悬架系统已在某些豪华轿车和军用车辆中得到了应用。

虽然很早就有人根据阿克曼(Ackermann)转向原理提出四轮转向系统(Four Wheel Steering, 即4WS)的概念,但由于这种系统对车辆后桥的改动过大、制造成本过高,在沉寂多年之后近些年才得到汽车厂商的重视。四轮转向的基本原理是:利用车辆行驶中的某些信息来控制后轮的转向角,以提高车辆的总体操纵性和稳定性。在20世纪80年代末,四轮转向产品在日本汽车中已开始应用^[17]。

除此之外,在转向系统的控制方面还包括围绕减轻驾驶人负担的控制技术,如对电子液压助力转向系统(Progressive Power Steering, PPS)和电动助力转向系统(Electrical Power Assisted Steering, EPAS)等进行研究。它们是按照车速等行驶条件的变化,根据一定的控制算法由电子控制器来调节油压或电动机输出转矩,从而使车辆在各种行驶条件下,均能保证转向盘操纵力矩处于最佳状态^[18]。近年来,随着车辆智能化的快速发展,主动前轮转向系统(Active Front Steering, AFS)以及一些先进驾驶辅助系统(Advanced Driver Assistant System, ADAS)得到了广泛关注。

在过去的80多年中,车辆动力学在理论和实际应用方面都取得了很多成就。然而,尽管工程师拥有功能强大的计算机软件,可求解几十甚至几百个自由度的复杂车辆模型,但事实上没有一个车辆制造商会完全用理论分析来取代自己详尽的车辆开发过程。在新车型的设计开发中,汽车制造商仍然需要依赖具有丰富测试经验与高超主观评价技能的工程师队伍。实际测试和主观评价在车辆开发中的重要作用显而易见,且二者不可替代,但这并不排除模型分析在动力学中的作用,设计者仍需通过建模来分析和理解系统内在的复杂关系,找出关键的影响因素,并为车辆性能的变化趋势提供预估。

第二节 研究内容和范围

严格地说,车辆动力学是研究所有与车辆系统运动有关的学科。它涉及的范围很广,除了影响车辆纵向运动及其子系统的纵向动力学(如发动机、传动、加速、制动、防抱死和牵引力控制系统等方面)的内容外,还有车辆在垂向和侧向两个方面的动力学内容,即行驶动力学和操纵动力学。行驶动力学主要研究由路面的不平激励,通过悬架和轮胎垂向力引