



普通高等教育“十五”国家级规划教材

汽车系统 动力学



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

普通高等教育“十五”国家级规划教材

汽车系统动力学

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。

本书除了介绍车辆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，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，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。

图书在版编目（CIP）数据

汽车系统动力学/喻凡，林逸编著. —北京：机械工业出版社，2005.7
普通高等教育“十五”国家级规划教材
ISBN 7-111-16895-X

I. 汽... II. ①喻...②林... III. 汽车-动力学-高等学校-教材
IV. U461.1

中国版本图书馆CIP数据核字（2005）第076099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：赵爱宁

责任编辑：冯春生 版式设计：张世琴 责任校对：李秋荣

封面设计：王伟光 责任印制：杨曦

北京机工印刷厂印刷

2005年9月第1版第1次印刷

787mm×1092mm¹/₁₆·21印张·505千字

定价：29.00元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

本社购书热线电话（010）68326294

封面无防伪标均为盗版

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，使得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的课程教材。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。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也有参考价值。

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）、上海交通大学丁祖荣教授（空气动力学基础部分）和何维廉及鲁统利副教授（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，书中错误和疏漏之处在所难免，恳请读者批评指正，并希望通过 E-mail 与我们联系（喻凡：fanyu@sjtu.edu.cn；林逸：linyi@china.com）。

编著者

2005 年 6 月

常用符号表

符号	物理量	单位	符号	物理量	单位
A	车辆迎风面积	m^2	C_a	轮胎侧偏刚度	$kN \cdot m/rad$
a	质心至前轴的距离	m	C_γ	侧倾外倾刚度	$kN \cdot m/rad$
a_w	加速度方均根值	m/s^2	C_ϕ	侧倾阻尼系数	$kN \cdot m/s$
a_x	车辆纵向加速度	m/s^2	C_ψ	车轮自回正刚度	$kN \cdot m/rad$
a_{xb}	制动减速度	m/s^2	d_a	转向节臂长度	m
a_y	车辆侧向加速度	m/s^2	d_b	转向梯形臂长度	m
B	轮距	m	d_f	前轮胎侧向偏移导数	m
B_{tp}	瞬时燃油消耗量	L/h	d_s	左右悬架弹簧间距	m
B_{tr}	里程燃油消耗量	L/km	d_r	后轮胎侧向偏移导数	m
b	质心至后轴的距离	m	E	车轮制动效率	—
b_e	发动机燃油消耗率	g/km	E_D	系统总耗散能	J
C_D	空气阻力系数	—	E_T	系统总动能	J
C_L	空气升力系数	—	E_v	系统总势能	J
C_s	转向系统阻尼系数	$kN \cdot m/s$	e	主销轴至车轮中心的距离	m
C_{SC}	转向柱等效阻尼系数	$kN \cdot m/s$	F_D	空气阻力	N
C_{St}	转向梯形机构等效阻尼系数	$kN \cdot m/s$	F_{Dem}	驱动力需求	N
C_{ST}	转向系统综合刚度	$kN \cdot m/rad$	F_G	坡度阻力	N
C_d	减振器阻尼系数	$kN \cdot m/s$	F_L	空气升力	N
C_{kp}	车轮绕主销转动的等效阻尼系数	$kN \cdot m/s$	F_R	轮胎滚动阻力	N
C_p	压力系数	—	F_s	空气侧向力	N
C_{sf}	前悬架阻尼系数	$kN \cdot m/s$	F_a	加速阻力	N
C_{sr}	后悬架阻尼系数	$kN \cdot m/s$	$F_{a,r}$	加速阻力转动分量	N
			$F_{a,t}$	加速阻力平动分量	N



(续)

符号	物理量	单位	符号	物理量	单位
K_{kp}	车轮绕主销的角刚度	$N \cdot m/rad$	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_t	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	Q_i	系统的广义力	N
K_ϕ	车身侧倾刚度	$N \cdot m/rad$	R	车辆转向半径	m
$K_{\psi r}$	后轴相对车身的扭转刚度	$N \cdot m/rad$	Re	雷诺数	—
L	轴距	m	R_f	前轮转向半径	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_r	后轮转向半径	m
L_{ω_w}	加权振级	dB	R_{ss}	车辆稳态转向半径	m
M_{Dem}	发动机转矩需求	$N \cdot m$	r	横摆角速度	rad/s
M_L	转矩损失	$N \cdot m$	r_0	车轮自由半径	m
M_e	发动机转矩	$N \cdot m$	r_d	车轮滚动半径	m
M_s	悬架变形时的恢复力矩	$N \cdot m$	r_{ss}	横摆角速度稳态响应	$rad \cdot s^{-1}/rad$ 或 $(^\circ) \cdot s^{-1}/(^\circ)$
M_t	轮胎变形时的恢复力矩	$N \cdot m$	S	空间谱密度	m^2/m^{-1}
M_x	车轮侧倾力矩	$N \cdot m$	s	滑转率	—
M_y	车轮滚动阻力矩	$N \cdot m$	s_b	滑移率	—
M_z	车轮回正力矩	$N \cdot m$	t_{kp}	两主销轴线与地面交点间的距离	m
m_b	车身质量(簧载质量)	kg	t_m	轮胎机械拖距	m
m_{bf}	车身在前轴处的集中质量	kg	U_a	主动悬架作动器控制力	N
m_{bh}	半车身质量	kg	u	车辆的前进速度	m/s
m_g	车轮不平衡质量	kg	u_a	车辆的前进速度	km/h
m_w	车轮质量(非簧载质量)	kg	u_c	车辆的恒定前进速度	m/s



常用符号表

(续)

符号	物理量	单位	符号	物理量	单位
V_s	发动机排量	L	δ_{sw}	转向盘的角位移	rad 或 ($^{\circ}$)
W	车重	N	η_t	传动效率	—
y_{ϕ}	车身侧倾角引起的轮胎侧向偏移量	m	θ_b	车身俯仰角	rad 或 ($^{\circ}$)
α	轮胎侧偏角	rad 或 ($^{\circ}$)	θ_w	车轮转角	rad 或 ($^{\circ}$)
α_G	坡度角	rad 或 ($^{\circ}$)	κ	不足转向参数(不足转向梯度)	rad/(m·s ⁻²)
β	车辆侧偏角	rad 或 ($^{\circ}$)	λ	主销后倾角	rad 或 ($^{\circ}$)
β_b	前后轴制动力分配比		μ	地面附着系数	—
γ	车轮外倾角	rad 或 ($^{\circ}$)	μ_s	侧向附着系数	—
γ_{ϕ}	车身侧倾引起的附加车轮外倾角	rad 或 ($^{\circ}$)	ξ_s	悬架系统的阻尼比	—
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_{ss}	车辆稳态转向曲率	m ⁻¹
δ_f	前轮转向角	rad 或 ($^{\circ}$)	ϕ	车身侧倾角	rad 或 ($^{\circ}$)
δ_{is}	转向系统产生的转向角	rad 或 ($^{\circ}$)	ϕ_f	前轴侧倾角	rad 或 ($^{\circ}$)
$\delta_{i\phi}$	车身侧倾引起的前轴附加侧倾转向角	rad 或 ($^{\circ}$)	ϕ_t	轮胎运动方向与纵坐标方向夹角	rad 或 ($^{\circ}$)
δ_i	旋转质量换算系数	—	ψ	车辆航向角	rad 或 ($^{\circ}$)
δ_{kp}	车轮绕主销转动的当量阻尼系数	—	ψ_t	车轮前束角	rad 或 ($^{\circ}$)
δ_o	外侧转向轮转角	rad 或 ($^{\circ}$)	ψ_w	前轮绕主销的摆振角	rad 或 ($^{\circ}$)
δ_r	后轮转向角	rad 或 ($^{\circ}$)	ω_{fa}	前轴角振动固有频率	Hz
$\delta_{r\phi}$	车身侧倾引起的后轴附加侧倾转向角	rad 或 ($^{\circ}$)	ω_w	转向轮绕主销振动的固有频率	Hz

目 录

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	1
第一节 历史回顾	1
第二节 研究内容和范围	4
第三节 车辆特性和设计方法	7
第四节 术语、标准和法规	10
第五节 发展趋势	12
参考文献	15

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	17
第二节 非完整系统动力学	19
第三节 多体系统动力学方法	22
参考文献	29

第三章 充气轮胎动力学

第一节 概述	30
第二节 轮胎的功能、结构及发展	32
第三节 轮胎模型	34
第四节 轮胎纵向力学特性	38
第五节 轮胎垂向力学特性	58
第六节 轮胎侧向力学特性	64
参考文献	67

第四章 空气动力学基础

第一节 概述	69
第二节 空气的特性	69

第三节 伯努利方程	71
第四节 压力分布和压力系数	72
第五节 实际气流特性概述	74
第六节 空气动力学试验	76
第七节 车辆空气阻力	82
参考文献	86

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	87
第二节 动力性	91
第三节 燃油经济性	95
第四节 驱动与附着极限和驱动效率	99
第五节 制动性	104
参考文献	113

第六章 纵向动力学控制系统

第一节 防抱死制动控制	114
第二节 驱动力控制系统	120
第三节 车辆稳定性控制系统	123
参考文献	129

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	130
第二节 扭振系统模型与分析	132
第三节 动力传动系统的减振措施	137
参考文献	139

第二篇 行驶动力学

第八章 路面输入及其模型



第一节 路面测量技术及数据处理	140	第二节 基本操纵模型假设	212
第二节 路面输入模型	146	第三节 运动方程的推导	212
第三节 特殊路面输入	150	第四节 操纵特性分析	218
参考文献	151	第五节 对实际问题的考虑	227
第九章 与平顺性相关的部件	152	第六节 实例分析与比较	231
第一节 概述	152	参考文献	234
第二节 弹簧	152	第十四章 基本操纵模型的扩展	235
第三节 减振器	159	第一节 概述	235
第四节 导向机构	161	第二节 考虑车身侧倾的三自由度操纵模型	235
第五节 座椅	163	第三节 车轮转动效应	240
参考文献	164	第四节 转向系统的影响	241
第十章 人体对振动的反应	165	第五节 悬架运动学	244
第一节 概述	165	第六节 变形转向	246
第二节 标准	165	参考文献	249
第三节 平顺性测量	169	第十五章 操纵动力学性能及实例分析	250
参考文献	170	第一节 模型参数组的开发	250
第十一章 行驶动力学模型	171	第二节 实例分析	251
第一节 模型推导的前提	171	参考文献	258
第二节 单轮车辆模型的推导	174	第十六章 转向系统动力学及控制	259
第三节 半车模型的推导及分析	183	第一节 概述	259
第四节 整车模型的推导及分析	186	第二节 转向系统振动分析	260
参考文献	188	第三节 四轮转向系统	268
第十二章 可控悬架系统	190	第四节 电动助力转向系统	276
第一节 车身高度调节系统	190	参考文献	283
第二节 自适应阻尼调节系统	191	第四篇 车辆计算机建模与仿真	
第三节 可切换阻尼系统	193	第十七章 车辆动力学计算方法与软	
第四节 全主动系统	193	件	284
第五节 有限带宽主动系统	195	第一节 概述	284
第六节 连续可变阻尼的半主动系统	196	第二节 面向目标设计的车辆仿真软	
第七节 各类悬架系统的性能比较	197	件	285
第八节 主动悬架控制算法介绍	200	第三节 多体系统动力学分析软件	285
参考文献	209	第四节 程序工具箱	289
第三篇 操纵动力学		第五节 各类方法的比较	291
第十三章 基本操纵模型	211	参考文献	292
第一节 概述	211		



第十八章 MATLAB 环境下的车辆系统建模、仿真与控制器设计实例..... 293

第一节 MATLAB/Simulink 软件介绍 293

第二节 实例1——制动系统建模、仿真及 ABS 控制器设计 294

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 296

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 300

参考文献 305

第十九章 应用 ADAMS 软件的多体动力学实例分析 306

第一节 ADAMS/Car 模块介绍 306

第二节 轿车前悬架建模实例 307

第三节 模型仿真分析 315

参考文献 317

名词索引 318

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作的贡献、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介绍。此外，为了方便后面章节中有关汽车空气动力学内容的理解，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。

第一章 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，并对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象压载物一般，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），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，就是前悬架必须比后悬架要“软”一定的比例。

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着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 将它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作了详细记载。当时，机械工程师学会（I Mech E）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。英国汽车研究所（MIRA）对该领域的发展作出了重要贡献，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地回顾。由于 Segel 本人在 1950 ~ 1990 年间对车辆动力学的研究作出了重大贡献，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



(续)

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。多刚体系统 (Multi-Body System) 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, 如图 1-1 所示^[14]。

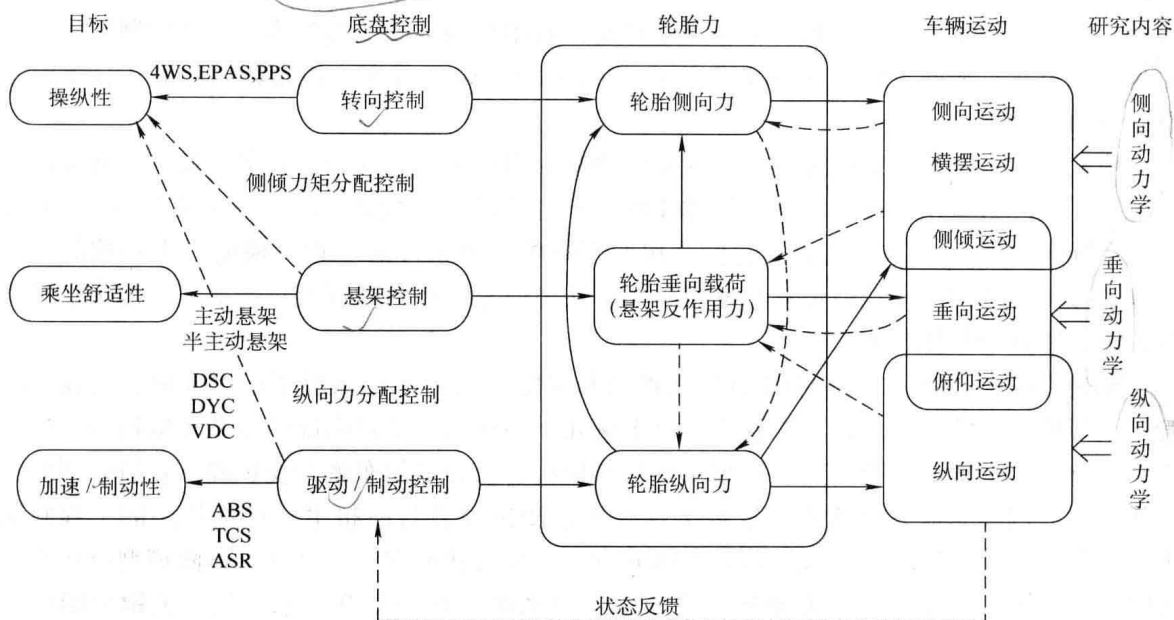


图 1-1 底盘控制系统与车辆动力学关系示意图

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, 简称 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, 通过限制发动机输出转矩防止车轮滑转的驱动力控制系统 (Traction Control System, 简称 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 (Acceleration Spin Regulation, 简称 ASR) 装置, 这种装置在车辆急剧变速时, 可改善车辆与地面的附着力, 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分力和横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横向稳定性的动态稳定性控制 (Dynamic Stability Control, 简称 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横向稳定裕度较小, 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, 简称 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, 简称 VDC)。自 2000 年以来, VDC 系统得到了世界各国汽车厂商的关注, 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, 已有人开始进行了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转向原理提出四轮转向系统 (Four Wheel Steer, 简称 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, 在转向系统方面, 主要是围绕减轻驾驶员负担的控制技术, 如电子液压助力转向系统 (Progressive Power Steer, 简称 PPS) 和电动助力转向系统 (Electrical Power Assisted Steer, 简称 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]。

在过去的 70 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于具有丰富测试经验与高超主观评价技能的工程师队伍, 由此可见实际测试和主观评价在车辆开发中不可替代的作用。这并不排除模型分析在动力学中的作用, 设计者仍然需要通过建模来了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动力学响应 (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因素)外,还有车辆在垂向和横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起的车身跳动和俯仰以及车轮的运动;而操纵动力学研究车辆的操纵特性,主要与轮胎侧向力有关,并由此引起车辆侧滑、横摆和侧倾运动。

长期以来,人们一直在很大程度上习惯按纵向、垂向和横向分别独立研究车辆动力学问题;而实际中的车辆同时会受到三个方向的输入,各方向所表现的运动响应特性必然是相互作用、相互耦合的(图 1-1)。比如转向过程中,路面在给车辆提供侧向力的同时,也通过悬架给车辆提供垂直输入干扰。悬架的作用除支撑车辆、隔离路面干扰外,还将控制转向时的车身姿态,并传递来自轮胎的力。反过来看,同样的车身运动既可由行驶输入引起,如路面不平引起的车身侧倾,也可由操纵方面引起,如转向时引起的车身侧倾。此外,利用不同车轮纵向力控制来改善极限工况下的操纵稳定性控制系统(VSC)也是一个典型的例子。因此,我们可能要问:分别研究这三个方面性能的合理性将如何证明?

事实上,分开处理的主要理由可能很实际,主要是为了减少模型的自由度,从而减少分析工作量,易于处理。当然,如果对车辆的工作状况及条件进行适当限制,那么三个方向的耦合关系则可能不太显著。比如,当车辆在水平粗糙路面匀速直线行驶时,问题将集中在行驶动力学特性方面;当车辆在水平路面匀速转弯行驶时,那些主导操纵性能的力和运动对纵向和垂向特性则无显著影响。

随着功能强大的计算机技术和动力学分析软件的发展,我们已经有能力将三个方向的动力学问题结合起来进行研究,对车辆动力学问题的分析也可能扩展到更复杂的工况及非线性域。但为便于读者对车辆动力学内容的学习和理解,本书仍然按三个方向进行编排,在第一、二、三篇中分别对纵向动力学、行驶动力学和操纵动力学给予介绍。

一、纵向动力学

纵向动力学研究车辆直线运动及其控制的问题,主要是车辆沿前进方向的受力与其运动的关系。按车辆工况的不同,可分为驱动动力学和制动动力学两大部分。

驱动动力学研究中,首先要了解车辆的行驶阻力,由此才可决定车辆驱动轮上所需的力矩和功率,以及能量消耗。行驶阻力代表了车辆对动力和功率的需求,而车辆的动力与传动系统则为车辆提供了对动力及功率的供应,需求与供应之间的平衡关系还与路面附着系数有关,直接影响车辆的驱动性能。

制动动力学研究中,首先要了解车辆制动性能的评价指标;在此基础上,介绍直线分析及前、后车轮制动力的分配关系,并分析车辆的制动稳定性;最后,从章节安排上考虑,将转向制动动力学分析也放在一起给予介绍。

因此,第一篇的主要内容是,首先介绍车辆的行驶阻力,分析车辆对动力及功率的供求关系;然后分析包括动力性、燃油经济性和制动性在内的纵向动力学性能;最后介绍相关的纵向动力学控制系统,如 ABS、TCS 等。

二、行驶动力学

与车辆行驶动力学有关的主要性能及参数如图 1-2 所示。在有限的悬架工作空间内,设



计人员必须为驾驶员和乘客提供良好的乘坐舒适性、良好的车身姿态，以及对车轮动载荷的合理控制。行驶动力学研究中的首要问题是建立考虑悬架特性在内的车辆动力学模型，而分析这些动力学问题的最简单的数学模型应该是具有七自由度的整车系统模型。随着功能愈来愈强大的多体动力学仿真软件的普及应用，包括衬套等复杂细节在内的车辆模型也可以方便地得到。

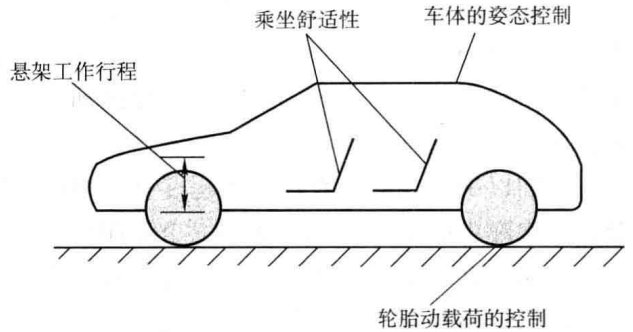


图 1-2 与车辆行驶动力学有关的主要性能及参数

实际上可将行驶动力学问题分为两类^[19]。一类是可通过数学建模来分析的行驶动力学问题，有人将它称之为“主要行驶舒适性问题”。关于主要行驶动力学的数学建模及随机路面输入下车辆响应分析的内容，将在第二篇中介绍。然而，主要行驶舒适性研究还无法将所有的行驶振动特征完整而真实地描述出来，实际中还有大量其他因素影响乘员对乘坐舒适性的主观评价，包括对约 15Hz 以上的高频振动的响应、更高频率范围内的振动噪声问题 (Harshness)、悬架系统中橡胶衬套的影响、对路面的阶跃凸起及凹坑等路障的纵向冲击的响应以及人体对振动的响应等。目前，几乎还没有办法用数学解析模型来准确地预测这些影响，这类问题通常可以归结为“次级行驶舒适性问题”。

对次级行驶舒适性问题，通常需要人的主观设计，例如路面凹坑离散输入对悬架系统振动噪声响应的评价，一般会涉及三个方面的问题，包括轮胎在路面输入处变形时的动态响应、纵向和垂向的悬架非线性动力学性能以及驾驶员的响应特性。围绕其每一方面，均有众多不确定的因素，因而生产厂家必须依靠经验丰富的测试驾驶员来评价。

三、操纵动力学

在车辆动力学研究中，操纵动力学的内容最为丰富，将在第三篇中加以介绍。由于轮胎的重要性，因此操纵动力学建模中必须要与轮胎模型精度相吻合，否则建立的操纵模型将失去意义。

分析车辆操纵特性可以从最基本的两自由度车辆模型入手，该模型中，车辆向前的速度被假定为恒定的，而两个变量分别是车辆的侧向速度和横摆速度。虽然基本模型看似简单，但它为操纵性能分析提供了十分重要的基础。在线性范围内，两自由度模型的预估精度可能会达到 70% 以上。

经过对基本模型的动力学分析，得到了一个关于车辆操纵特性的最基本的概念，即车辆的“不足或过度转向” (under/over steer) 特性。分析结果表明，不足转向与过度转向的区别取决于一个重要物理量，叫做车辆的“稳定裕度” (stability margin)，定义为 $bC_{\alpha r} - aC_{\alpha f}$ 。其中， a 和 b 分别为前轴和后轴至车辆质心的距离； $C_{\alpha f}$ 和 $C_{\alpha r}$ 分别代表了前、后轮胎的侧偏刚度。如果稳定裕度为正值，车辆表现为不足转向；否则，为过度转向。可以看出，稳定裕度中的第一项 $bC_{\alpha r}$ 代表了“后轮产生力的能力” (更严格地讲，指后轮产生的力绕车辆质心的力矩)；而第二项 $aC_{\alpha f}$ 则表达了“前轮产生力的能力”。因此，设计者可以利用前后轮胎力



(或力矩)的平衡关系,扩展稳定裕度这一概念,并以此来理解以下因素的影响:

- 1) 与负载情况有关的车辆质心位置;
- 2) 与轮胎的结构、尺寸和胎压有关的轮胎侧偏刚度;
- 3) 前、后轮外倾角;
- 4) 前、后轴载荷转移;
- 5) 侧倾转向效应;
- 6) 变形转向效应。

以上参数均可用来调节车辆的不足(或过度)转向程度,而且各因素对不足(或过度)转向在线性域内的作用均可以通过对两自由度线性模型的扩展定量地给出。由此看出,任何模型的合理性并不是简单地与其复杂程度成正比,这种基于基本操纵模型的分析方法虽然简单,但它却可以为研究更复杂的模型提供一个必要的基础。

通常,操纵动力学的研究范围分为三个区域,即:

- 1) 线性域:侧向加速度约小于 $0.4g$ 时,通常意味着车辆在高附着路面作小转向运动;
- 2) 非线性域:在超过线性域且小于极限侧向加速度(约为 $0.8g$)范围内;
- 3) 非线性联合工况:通常指车辆在转弯制动或转弯加速时的情况。

对模型不太复杂的线性域情况,一般通过人工计算也可有效地建模和求解。但考虑到实际设计中的可用性,模型中至少应包括车身的横摆、侧倾和侧向运动,悬架的运动学效应,悬架系统特性,转向系统的影响等。在高速直线行驶时,还要包括空气阻力和力矩。尽管线性模型已经在操纵性能定量分析中得到了有效的应用,如前面提到的设计参数对车辆性能的影响分析。但对非线性域和非线性联合工况,则通常需要采用多体动力学分析软件,以求解这些非线性方程。

最后要说明的是,纵向动力学、行驶动力学和操纵动力学与各底盘控制系统的关系已在图1-1中清楚地说明,因此,有关控制系统及结合车辆动力学分析的控制算法设计内容,均被安排在相应章节中,如结合制动动力学的防抱死制动系统、牵引力控制系统等,被放在第一篇纵向动力学中;悬架控制系统被安排在第二篇行驶动力学中;而四轮转向和电动助力转向系统则被安排在第三篇操纵动力学中给予介绍。

第三节 车辆特性和设计方法

车辆动力学特性的设计方法主要以系统建模和分析为主,而车辆设计则可以是一个迭代循环的过程。在介绍设计方法之前,首先探讨一下什么是所期望的车辆特性。

一、期望的车辆特性

人们对车辆纵向动力学性能的要求是,有很好的动力性、燃油经济性和制动性。为实现这些理想特性,就要由对车辆的动力与传动系统及制动系统的良好设计来保证。在车辆行驶振动方面,也有明确而且被普遍认可的车辆特性评价指标;而对操纵性能而言,其中涉及了许多人为的主观因素,所以其评价指标通常较难确认,不大可能被所有人接受,因而成为本节主要讨论的内容。