



国防特色教材·控制科学与工程

汽车动力学及其控制

丁能根 余贵珍 ©主编

 哈尔滨工程大学出版社
Harbin Engineering University Press

北京航空航天大学出版社 北京理工大学出版社
哈尔滨工业大学出版社 西北工业大学出版社



国防特色教材·控制科学与工程

汽车动力学及其控制

丁能根 余贵珍 主编

哈尔滨工程大学出版社

北京航空航天大学出版社 北京理工大学出版社
哈尔滨工业大学出版社 西北工业大学出版社

内容简介

本书主要介绍汽车动力学基本理论及其建模和求解的一般方法,分析汽车的加速性、制动性、行驶平顺性和操纵稳定性,研究汽车动力学性能的主要影响因素以及改善这些性能的各种控制系统和方法。

在汽车动力学控制方面,运用现代控制理论并结合产业化开发实践,介绍了防抱制动系统(ABS)、驱动防滑转系统(ASR)、主动/半主动悬架控制和电子稳定控制系统(ESP)等汽车底盘控制系统的工作原理、控制器设计及系统组成。

本书可作为高等学校车辆工程专业研究生教学用书,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

汽车动力学及其控制/丁能根,余贵珍主编.—哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2009.5

ISBN 978-7-81133-427-2

I.汽… II.①丁…②余…汽车-动力学
IV.U461.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第055100号

汽车动力学及其控制

丁能根 余贵珍 主编

责任编辑 刘凯元

*

哈尔滨工程大学出版社出版发行

哈尔滨市南岗区东大直街124号 发行部电话:0451-82519328 传真:0451-82519699

<http://press.hrbeu.edu.cn> E-mail:heupress@hrbeu.edu.cn

哈尔滨工业大学印刷厂印刷 各地书店经销

*

开本:787×960 1/16 印张:14.75 字数:300千字

2009年5月第1版 2009年5月第1次印刷 印数:1000册

ISBN 978-7-81133-427-2 定价:39.00元

前 言

国内关于汽车动力学及其控制方面的教材、专著或译著已经不少,但从满足研究生课程教学的需要来看一般都存在一些不足。有些是缺乏系统性或不够全面,有些内容相对陈旧,而有些则不适合用作教材。

从 1999 年开始,作者在北京航空航天大学为车辆工程专业研究生讲授“汽车动力学及其控制”课程时,广泛参考了大量的教材和专著,并编写了用于教学的讲义。在编写过程中,力求做到:

(1)内容全面、系统性较好;

(2)深入浅出,便于学生阅读和理解;

(3)能够反映本课程研究领域的近期发展,如防抱死制动系统(ABS)、驱动防滑转系统(ASR)、主动/半主动悬架控制和电子稳定程序(ESP)等。

本书主要介绍汽车动力学建模和求解的一般方法,分析并评价汽车的加速性能、制动性能、行驶平顺性和操纵稳定性,研究汽车动力学性能的主要影响因素以及着重于改善这些性能的各种控制方法。

本书的第一个特点是注意吸收汽车动力学及其控制的最新研究方法和成果。例如 ABS、ASR、主动/半主动悬架控制和 ESP 这些已经得到应用或将要在汽车上普及的汽车底盘控制方法,在其他教材中介绍较少或没有涉及。

第二个特点是注意介绍汽车动力学问题的各种求解方法、适用范围和内在联系。譬如平顺性分析时,当受到路面不平度随机输入的车辆系统为线性系统时可以用功率谱分析和求出频率响应函数的方法求解,这是利用了线性常系数微分方程的叠加原理。如果车辆系统具有明显的非线性,就只能采用数值分析的方法。

第三个特点是研究内容比较广泛,涉及汽车整车和底盘各总成,全面反映了汽车的各种动态特性和动力学控制方法。

本书在编写过程中,北京理工大学刘昭度教授、北京航空航天大学刘献栋教授等曾对本书提出许多宝贵意见和帮助。北京航空航天大学汽车系的研究生薄颖、冉晓凤、张宏兵、陈默然、张鑫等在图表制作、文字录入等方面,以及王健、李振

华、李丹华等在文字校对方面做了大量工作。编写过程中得到了北京航空航天大学研究生院和教务处的大力支持和资助,同时在本书编写中参考或引用了国内外一些学者的论著和研究成果,在此,一并对他们表示衷心地感谢!

与已经出版的其他书籍一样,相信本书一定存在这样那样的不足和问题。恳请读者批评指正,欢迎通过电子邮件(dingng@buaa.edu.cn)的方式进行沟通。

编者

2007 年 11 月

常用符号表

A	系统参数矩阵	D_r	后悬架侧倾角阻尼, $N \cdot m \cdot s \cdot rad^{-1}$
A	①迎风面积, m^2	D_x	制动减速度, $m \cdot s^{-2}$
	②振幅, m	E	①制动系吸收的动能, J
a	①车辆质心至前轴距离, m		②数学期望算子
	②车轮滚动时其法向反作用力相对于 车轮中心的偏移距, mm		③MF 轮胎模型峰值因子
A_w	轮缸活塞面积, mm^2	e_1	车辆质心到车道中心线的距离, m
a_x	汽车纵向加速度, $m \cdot s^{-2}$	e_2	车辆相对于道路的方向角差, rad
a_y	汽车侧向加速度, $m \cdot s^{-2}$	E_f	前轮侧倾转向系数
B	①轮距, m	E_r	后轮侧倾转向系数
	②MF 轮胎模型刚度因子	$e_{r_{ss}}$	稳态转向时横摆角速度误差, rad
b	车辆质心到后轴的距离, m	E_θ	转向盘转角输入总方差, rad^2
C	MF 轮胎模型曲率因子	F	外力矩阵
c	阻尼系数, $N \cdot s \cdot m^{-1}$	F	激励函数
C_D	空气阻力系数	$F(s)$	跟随器传递函数
C_f	前轮侧偏刚度系数, $m \cdot s^{-2}$	F_a	悬架主动力, N
c_f	前悬架阻尼系数, $N \cdot s \cdot m^{-1}$	F_b	前后轴制动力总和, N
CG	质心	F_{bf}	前轴制动力, N
C_r	后轮侧偏刚度系数, $m \cdot s^{-2}$	F_{br}	后轴制动力, N
c_r	后悬架阻尼系数, $N \cdot s \cdot m^{-1}$	F_{bmf}	前轴最大制动力, N
c_s	悬架阻尼系数, $N \cdot s \cdot m^{-1}$	F_{bmr}	后轴最大制动力, N
c_{semi}	半主动悬架阻尼系数, $N \cdot s \cdot m^{-1}$	F_d	车轮动载, N
C_α	轮胎侧偏刚度, N/rad	$\bar{F}_d$	车轮动载的均方根值, N
$C_{\alpha f}$	前轮侧偏刚度, N/rad	F_i	坡度阻力, N
$C_{\alpha r}$	后轮侧偏刚度, N/rad	F_{pl}	作用于前轮中心处的推力, N
D	①方差算子	f_r	滚动阻力系数
	②轮胎外径, mm	F_t	驱动力, N
D_A	空气阻力, N	F_x	轮胎所受地面的纵向力, N
D_f	前悬架侧倾角阻尼, $N \cdot m \cdot s \cdot rad^{-1}$	F_{xb}	地面制动力, N

F_{xf}	前轮纵向力, N	I_t	变速器旋转零件换算到其输入端的等效转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$
$F_{x\text{rmax}}$	取决于附着极限的最大纵向力, N	i_1	变速器传动比
F_{xr}	后轮纵向力, N	i_d	变速器和主减速器的总传动比
F_{x1}	作用于在车辆的所有纵向力之和, N	I_w	车轮绕自身回转轴线的转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$
F_y	轮胎所受地面的侧向力, N	I_x	簧载质量绕过其侧倾中心纵向轴线的转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$
F_{y1r}	前轮相对侧向力, N	I_{xz}	簧载质量绕 x 、 z 两轴的惯性积, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$
F_{y2r}	后轮相对侧向力, N	I_z	整车绕垂直轴的转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$
F_z	轮胎垂直力(地面法向反作用力), N	K	刚度矩阵
F_{zs}	车轮静载, N	K	①振动强度
G	功率谱密度(单边谱)函数	K	②稳定性因数
G_{a_y}	侧向加速度稳态增益	k	弹簧或悬架的刚度, N/m
G_b	制动器增益, $\text{N} \cdot \text{m}/\text{MPa}$	k_f	前悬架刚度, N/m
g_e	发动机燃油消耗率, $\text{g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$	K_p	主刚度矩阵
G_r	横摆角速度稳态增益, s^{-1}	k_r	后悬架刚度, N/m
g_{sh}	空钩阻尼反馈系数	k_s	悬架刚度, N/m
G_β	车辆质心侧偏角稳态增益	K_t	总的振动强度
H	频率响应函数	k_t	轮胎垂直刚度, N/m
h	路面不平度, m	k_x	轮胎纵向刚度, N/m
H_A	簧载质量加速度传递函数	k_y	轮胎侧向刚度, N/m
h_f	前轮受到的路面不平度激励, m	K_ϕ	总的侧倾角刚度, $\text{N} \cdot \text{m}/\text{rad}$
h_g	车辆质心离地高度, m	$K_{\phi f}$	前悬架侧倾角刚度, $\text{N} \cdot \text{m}/\text{rad}$
h_r	后轮受到的路面不平度激励, m	$K_{\phi r}$	后悬架侧倾角刚度, $\text{N} \cdot \text{m}/\text{rad}$
H_{RS}	悬架动挠度传递函数	L	①轴距, m
h_t	轮胎截面高度, mm		②拉格朗日函数
H_{TD}	轮胎动变形传递函数	L_p	绕 x 轴外力矩对侧倾角速度的偏导数
i	坡度, %	l_r	轮胎驰豫长度, m
I_d	传动轴转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$	L_ϕ	绕 x 轴外力矩对侧倾角的偏导数
I_e	发动机旋转零件转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$	M	质量矩阵
i_f	主传动比	m	整车质量, kg
I_s	簧载质量绕 y 轴转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$		
i_s	①转向系传动比		
	②电磁阀工作电流, A		

m_b	车身质量, kg		②自相关函数或互相关函数
M_p	主质量矩阵	R^*	汽车最优转弯半径, m
m_p	座椅和人体质量, kg	r	横摆角速度, rad/s
m_s	簧载质量, kg	R_b	制动半径, m
m_u	非簧载质量, kg	R_g	坡度产生的制动力, N
M_x	轮胎翻转力矩, $N \cdot m$	R_{hx}	挂钩(牵引)力纵向分力, N
M_y	轮胎滚动阻力矩, $N \cdot m$	R_{hz}	挂钩(牵引)力法向分力, N
M_z	轮胎回正力矩, $N \cdot m$	r_w	车轮半径, mm
$M_{\psi b}$	差压制动产生的横摆力矩, $N \cdot m$	R_x	滚动阻力, N
N	法向力, N	S	功率谱密度(双边谱)函数
n	空间频率, m^{-1}	s	①滑动率(制动滑移率或驱动滑移率), %
n_e	发动机转速, r/min		②拉普拉斯复频率变量
n_F	车轮法向力冲击系数	s_a	加速时的车轮滑动率, %
N_γ	绕 z 轴外力矩对横摆角速度的偏导数	s_b	制动时的车轮滑动率, %
N_β	绕 z 轴外力矩对质心侧偏角的偏导数	SD	制动距离, m
N_δ	绕 z 轴外力矩对名义前轮转角的偏导数	S_h	MF 轮胎模型水平偏移
N_ϕ	绕 z 轴外力矩对侧倾角的偏导数	s_p	峰值滑移率, %
$P(s)$	预测器传递函数	s_{ref}	参考滑移率, %
p	①制动压力, MPa	S_v	MF 轮胎模型垂直偏移
	②侧倾角速度, rad/s	T	①动能, J
P_a	轮缸促动力, N		②驾驶员前驶时间, s
P_b	制动平均吸收功率, kW	t	时间, s
P_d	空气动压力, $N \cdot m^{-2}$	$T_{0.05}$	振幅衰减至 5% 所需时间, s
P_e	发动机功率, kW	T_c	传至离合器的转矩, $N \cdot m$
P_s	空气静压力, $N \cdot m^{-2}$	T_d	传至传动轴的转矩, $N \cdot m$
P_t	空气总压力, $N \cdot m^{-2}$	t_d	驾驶员反应迟滞时间, s
P_{wc}	轮缸压力, MPa	T_e	发动机转矩, $N \cdot m$
Q	广义力, N	T_f	阶跃输入下的响应时间, s
q	①俯仰角速度, rad/s	T_R	驱动轮上的静力矩, $N \cdot m$
	②广义坐标	T_r	滚动阻力偶, $N \cdot mm$
R	①转弯半径, m		

T_s	簧载质量经悬架作用于驱动桥的力矩, $N \cdot m$	Y	角) ①地面坐标系 Y 轴 ②考虑“垂直偏移”的轮胎广义力(纵向力、侧向力或回正力矩)
t_s	制动时间, s	y	①车辆坐标系或轮胎坐标系轴 ②轮胎广义力(纵向力、侧向力或回正力矩)
T_{sf}	前悬架作用于车厢的恢复力矩, $N \cdot m$	y_h	齐次微分方程的解
T_{sr}	后悬架作用于车厢的恢复力矩, $N \cdot m$	y_p	非齐次微分方程的特解
T_l	车轮驱动力矩, $N \cdot m$	Y_γ	侧向外力对横摆角速度的偏导数
T_{xr}	制动时的附着力矩, 为地面制动力与车轮动力半径的乘积, $N \cdot m$	Y_β	侧向外力对质心侧偏角的偏导数
T_μ	制动器制动力矩, $N \cdot m$	Y_δ	侧向外力对名义前轮转角的偏导数
u	车辆纵向速度, $m \cdot s^{-1}$	Y_ϕ	侧向外力对侧倾角的偏导数
u_a	车速(纵向速度), km/h	Z	位移矩阵
u_{ch}	不足转向汽车的特征车速, $m \cdot s^{-1}$	Z	地面坐标系的 Z 轴
u_{cr}	过多转向汽车的临界车速, $m \cdot s^{-1}$	z	车辆坐标系或轮胎坐标系 z 轴
u_r	空气相对于汽车的速度, $m \cdot s^{-1}$	z_s	簧载质量垂直位移, m
u_{ref}	参考车速, $m \cdot s^{-1}$	α	①轮胎侧偏角, rad ②特征方程特征根实部
v	车辆侧向速度, $m \cdot s^{-1}$	β	车辆质心偏向角, rad
W	整车重力, N	β_{des}	期望侧偏角, rad
w	频率指数	β_l	目标侧偏角, rad
W_{dl}	驱动或制动过程中的动态载荷转移量, N	β_u	侧偏角上限值, rad
W_f	前轴垂直载荷, N	γ	①车轮侧倾角, rad ②轮胎垂直刚度与悬架刚度之比
W_{fs}	前轴静载, N	Δ	位移, m
W_r	后轴垂直载荷, N	Δz	座椅弹簧或悬架总的挠度, cm
W_{rs}	后轴静载, N	Δz_{bu}	悬架动挠度, cm
w_l	轮胎截面宽度, mm	Δz_{dl}	座椅弹簧或悬架动挠度, cm
W_y	驱动车轮横向载荷转移量, N	Δz_{pb}	座椅-人体系统的动挠度, cm
X	系统变量构成的向量	Δz_s	座椅弹簧或悬架静挠度, cm
X	①地面坐标系 X 轴 ②考虑“水平偏移”的轮胎广义位移(纵向滑动率或纵偏角)	Δz_{sf}	满载状态下悬架静挠度, cm
x	①状态变量列向量 ②车辆坐标系或轮胎坐标系轴 ③轮胎广义位移(纵向滑动率或侧偏	Δz_{su}	空载状态下悬架静挠度, cm

$\Delta\Delta z_s$	满载与空载两种状态下悬架静强度之差值, cm	σ_F	车轮动载标准差, N
δ	前轮转角, rad	$\sigma_{\Delta x}$	座椅弹簧动挠度标准差, cm
δ_{ss}	车辆稳态转向角, rad	$\sigma_{\Delta x f}$	满载状态下悬架动挠度标准差, cm
δ_{sw}	转向盘转角, rad	$\sigma_{\Delta x u}$	空载状态下悬架动挠度标准差, cm
δ_{sw}^*	最优转向盘转角, rad	φ	①路面附着系数 ②相位角, rad
δ_l	轮胎的径向变形, mm	φ_1	前轮有效侧向附着系数
ε	车轮角加速度, $\text{rad} \cdot \text{s}^{-2}$	φ_2	后轮有效侧向附着系数
ζ	瑞雷阻尼量或相对阻尼系数	φ_a	加速时的附着系数(纵向)
ζ'_b	车身相对阻尼系数	φ_b	制动时的附着系数(纵向)
ζ_p	座椅-人体系统相对阻尼系数	φ_p	峰值附着系数
ζ_u	非簧载质量相对阻尼系数	φ_s	滑动附着系数
η	主坐标向量	φ_x	轮胎纵向附着系数
η	①频率比 ②簧载质量分配系数	φ_y	轮胎侧向附着系数
Θ	坡度角(上坡时为正), ($^\circ$)	F	振型矩阵
θ	①俯仰角, rad ②道路应力影响因数	ϕ	主振型向量
θ_s	簧载质量俯仰角, rad	ϕ	侧倾角, rad
θ_{rf}	前轮速度矢量角, rad	ψ	横摆角, rad
θ_{rr}	后轮速度矢量角, rad	ψ_{des}	车辆期望横摆角速度, $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$
λ	微分方程特征方程的根	ψ_E	名义期望横摆角速度, $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$
μ	①摩擦系数 ②均值 ③簧载质量与非簧载质量之比	ψ_u	横摆角速度上限值, $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$
$\bar{\mu}$	侧向加速度系数(侧向加速度与重力加速度之比)	Ω	空间圆频率, $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$
μ_b	制动器摩擦系数	ω	圆频率, $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$
ν	航向角, rad	ω_0	簧载质量无阻尼固有圆频率, $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$
ξ	轮胎拖距, m	ω'_b	车身无阻尼固有圆频率, $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$
ρ	①空气密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ②整车绕 y 轴的回转半径, m	ω_d	传动轴角速度, $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$
σ	标准差	ω_e	发动机角速度, $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$
		ω_p	座椅和人体无阻尼固有圆频率, $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$
		ω_n	有阻尼固有圆频率, $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$
		ω_l	非簧载质量无阻尼固有圆频率, $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$
		ω_w	车轮角速度, $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$

常用角标说明

1	前轮/前轴	r	后轴或右侧(车轮/轮胎)
2	后轮/后轴	rl	左后(车轮/轮胎)
a	加速	rms	均方根值
b	制动	rr	右后(车轮/轮胎)
e	发动机	s	簧载质量
f	前轴	sw	转向盘
fl	左前(车轮/轮胎)	t	轮胎
fr	右前(车轮/轮胎)	u	非簧载质量
l	左侧(车轮/轮胎)	w	车轮

常量符号

g	重力加速度, $9.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$
Ω_0	路面不平度标准空间圆频率, $0.2\pi \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 历史回顾	1
1.2 研究内容和特点	3
1.3 研究方法和理论基础	8
1.4 发展趋势	12
习题	15
第 2 章 汽车驱动与制动动力学	16
2.1 驱动力和行驶阻力	16
2.2 汽车加速性能	23
2.3 汽车制动性能	29
习题	39
第 3 章 汽车防滑控制系统	40
3.1 制动动力学单轮模型	40
3.2 ABS 的控制原理和控制技术	46
3.3 ASR 的工作原理和基本组成	54
习题	59
第 4 章 汽车振动基础	60
4.1 概述	60
4.2 单自由度系统	62
4.3 多自由度系统	72
4.4 随机振动基础	82
习题	92
第 5 章 行驶振动力学	93
5.1 路面不平度及其功率谱	93

5.2 振动性能的评价	100
5.3 单轮车辆模型	108
5.4 单轨车辆和整车模型	129
5.5 行驶振动力学仿真	135
习题	142
第 6 章 车辆的可控悬架	143
6.1 主动悬架	143
6.2 半主动悬架	153
习题	164
第 7 章 轮胎模型	165
7.1 研究历史和现状	165
7.2 几种典型的轮胎模型	167
7.3 轮胎的瞬态响应特性	173
习题	175
第 8 章 汽车操纵动力学	177
8.1 概述	177
8.2 二自由度转向运动动力学	181
8.3 汽车闭环操纵动力学	189
习题	204
第 9 章 电子稳定控制	206
9.1 概述	206
9.2 差压制动系统	210
9.3 ESP 的组成	217
习题	222
参考文献	223

第 1 章 绪 论

汽车动力学及其控制涉及到多门学科,是汽车设计与理论、机械振动、多体系统动力学、计算机仿真、控制理论、电子学、传感器技术和液压液力技术等多门学科和多项技术的综合应用。

本章介绍汽车动力学的发展历史,论述汽车动力学理论对实际车辆设计所做的贡献,并介绍汽车动力学及其控制的研究内容、研究方法以及未来发展。

1.1 历史回顾

汽车动力学是近代发展起来的一门新兴学科,最早关于车辆行驶振动分析的理论研究可追溯到 1900 年。事实上,汽车动力学是在 20 世纪初随着车辆性能要求特别是行驶速度的提高而逐步形成并被世人所承认。当时,汽车工业界的主要注意力放在新结构的应用和发明上,以便设计出速度更快、乘坐更舒适、使用更可靠的车辆。从图 1.1 所示的典型轿车最高车速可以看出,这一时期机动车辆的行驶速度上升很快。

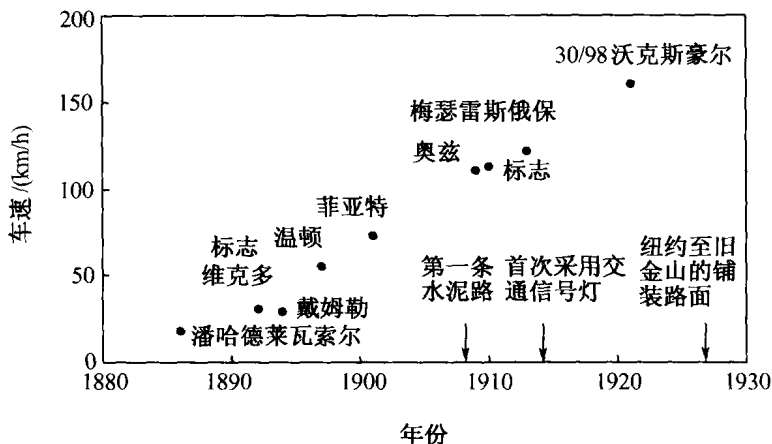


图 1.1 早期典型轿车的最高车速

到 20 世纪 20 年代,人们对车辆行驶中的振动问题开始有一些初步了解,并开始出现有关转向和悬架方面的文章。英国的 F.W. Lanchester 是最先撰写汽车动力学论文的工程师之一。在一篇 1908 年发表的论文中,他注意到如果作用在驾驶员手上的离心力使得转向角变大,则带有拖车的汽车在转向时出现“过多转向”。在 20 世纪 30 年代, Lanchester、美国的 M. Olley 和法国的

G. Broulhiet开始研究独立悬架,分析转向运动学和悬架运动学对车辆性能的影响,并且注意到转向轮摆振现象。当时,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,虽然今天看来前桥转向系统的设计实际上直接影响着行驶振动力学和操纵动力学两个方面。

然而,正如 L Segel 在 1990 年所描述的那样,早期对转向特性和摆振问题的理解因缺乏轮胎力学知识而受到限制。Olley 对这一时期的汽车工程界状况这样回忆到:“那时,为了让汽车行驶得平稳些,已经零星出现了一些尝试性的方法,但实际上却几乎没有什么作用。坐在后排的人就像压舱物一样守在后轮的后上方。转向经常不稳定,而前桥连同前轮制动器发生摆振几乎成为必然。虽然工程师们将所有的单个部件都制作得精制完好,但用它们组装成整车时却很少能得到令人满意的性能。”

1931 年,建成了一台作为测试装置的轮胎测功机,它被用来测试充气轮胎的机械性能。只有到那时, Lanchester, Olley, Riechert 以及 Schunk, Rocard 和 Segel 等工程师们才能给出汽车转向性能的力学解释。也只有在 Gough 等人为轮胎特性提供较为全面的认识之后, Olley, Milliken, Segel 和 Whitcomb 等人才可能在 20 世纪 50 年代对操纵稳定性进行定性的处理分析。

在 20 世纪 30 年代末之后的 20 年中,汽车动力学进展甚微。进入 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 年发生的一个“历史性事件”, W. F. Milliken 将它称作汽车动力学发展过程中的一个分水岭,并在他的书中对此事件作了详细的记载。当时,机械工程师学会(I. Mech. E)在伦敦组织了一个会议,主题是关于汽车稳定性和控制及轮胎性能的研究。直到今天,人们都还认为,从汽车动力学角度来看这次会议的论文极有创意,而且至今仍然被广泛引用和参考。

在 1993 年关于车辆舒适性和操纵稳定性的机械工程师学会会议上, Segel 发表了一篇重要演讲,它可能是迄今为止关于汽车动力学发展的一篇最好的综述。Segel 本人在 1950—1990 年间对汽车动力学的研究作出了重大贡献。那篇文章中他以自己深刻的理解回顾了这门学科的发展,并将本门学科的早期成就划分为三个阶段,见表 1.1。

20 世纪 50 年代之后的几十年,汽车制造商们意识到行驶平顺性和操纵稳定性在车辆产品竞争中的重要作用,因而汽车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、移线、J 转向等试验方法与测试技术日趋完善。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大侧向加速度、非线性作用域分析的方向发展。

表 1.1 根据 Segel 提出的阶段划分对汽车动力学早期成就的总结

阶段一(到 20 世纪 30 年代初期) 对于车辆动态性能的经验性观察; 开始注意到车轮摆振的问题; 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) 了解了简单的轮胎力学,并定义了侧偏角; 定义了不足转向和过多转向; 了解了稳态转向特性; 建立了简单的二自由度操纵动力学方程; 开始进行有关行驶特性的实验研究,建立了 K^2 实验台,提出了“平稳行驶”的概念; 引入了前独立悬架。
阶段三(1952 年以后) 通过试验结果分析和建模,加深了对轮胎特性的了解; 建立了三自由度操纵动力学方程; 扩展了操纵动力学的分析内容,包括稳定性和转向响应特性分析; 开始采用随机振动理论对行驶平顺性进行性能预测。

汽车工业经过 100 多年的发展已经取得了长足的进步,而汽车动力学在经过 80 多年的发展之后在理论和实践中都取得了很大成就。今天,功能强大的计算机软件可求解多至几百个自由度的复杂车辆模型。另外从研究手段上来看,不仅有纯软件仿真,还有分析结果更加准确可信的硬件在环仿真。但同时也应看到,不管理论研究和仿真分析发展到怎样的一个高度,事实上没有一个汽车制造商会完全用理论分析和研究取代自己详尽的车辆开发过程。在实际新车型的设计开发中,主要仍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,说明了车辆开发离不开实际测试和主观评价。另外,不同国家和地区的用户对行驶平顺性和操纵稳定性之间的协调关系有着不同的观点,这从另外一个侧面反映了主观评价的重要性。同时也应看到,和以前任何时候相比,汽车动力学在车辆设计和开发中都起着更为重要的作用。

1.2 研究内容和特点

汽车动力学及其控制是研究所有与车辆系统的受力、运动以及运动控制有关的一门课程。一般来说,汽车动力学的主要研究内容是通过建立汽车驱动动力学、制动动力学、行驶振动力学和操纵动力学的运动方程和数学模型,分析汽车的运动规律及其加速性能、制动性能、行驶平顺性和操纵稳定性,并研究如何评价和改善这些性能。另外,汽车动力学的各种控制方法也是本课程重要内容。

1.2.1 轮胎力学特性

人们经常说控制高速车辆的主要力是通过由 4 块成年人手掌大小的轮胎与地面的接地印迹产生的,事实确实如此。了解地面作用于轮胎上的力和力矩对于理解路面车辆的动力学行为是必不可少的。研究汽车在力作用下的响应特性,它们决定了汽车的加速、制动、转向和平顺性能,汽车动力学的很多内容就是研究这些力是如何产生的。控制汽车性能、作用在汽车上起决定性作用的力也是地面作用于轮胎的力。因此,必须深入了解轮胎特性,该特性表现为在广泛的车辆行驶工况下轮胎所受到的力和力矩。在研究轮胎特性时,如果不了解它对汽车的重要性是不行的。因此,在有关章节详细介绍了轮胎的力学特性和轮胎模型。

1.2.2 驱动与制动动力学及其控制

驱动与制动动力学主要研究车辆系统沿汽车纵向的力与运动的关系,即研究汽车在驱动力或制动力以及各种阻力作用下的运动特性,这些特性包括加速性能和制动性能。驱动力或制动力都由地面产生,驱动时作用在驱动轮上,制动时作用在制动车轮上。驱动力和制动力都受限于地面的附着力,而地面附着力与车轮的运动状态(滑转或滑移)有密切关系,这是建立汽车纵向动力学及其控制模型时的重要研究内容。汽车行驶阻力中的空气阻力主要取决于汽车空气动力学性能,因在其他课程中有专门论述,本书中仅引用其中的有关结论。

制动防抱死系统(ABS)主要解决制动过程中的方向稳定性问题,同时可以缩短制动距离,从而提高行车安全。其实质是通过对制动过程中车轮滑移率的控制,保证汽车能获得足够大的横向附着力和尽可能大的纵向附着力。与制动动力学控制有关的主要研究内容包括 ABS 的理论基础、控制方法和系统结构。控制方法以逻辑门限值方法为主,并简要介绍模糊控制方法、最优控制方法和滑模控制方法。

驱动防滑转系统(ASR)则主要研究起步和加速过程的车轮滑转问题,以尽可能提高汽车的动力通过性和起步、加速过程的操纵稳定性。由于其控制原理与 ABS 有许多共性,并且与 ABS 共用很多硬件,将 ASR 和 ABS 一起作为防滑控制系统加以介绍。

1.2.3 行驶振动力学及其控制

通常,行驶振动力学可分为两类问题。一类是可通过数学建模进行分析的问题,称之为主平顺性(Primary ride)问题。“主平顺性”动力学的数学建模及随机路面输入下车辆响应分析是本书中行驶振动力学的主要研究内容之一。然而,主平顺性研究还无法将车辆中的所有行驶振动特征全面而真实地描述出来,即实际中还有大量其他因素影响着乘员对乘坐舒适性的主