

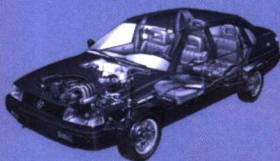
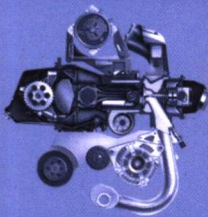


普通高等教育“十一五”国家级规划教材

汽车理论

Qiche Lilun

◎ 吴光强 主编



人民交通出版社
China Communications Press

内 容 提 要

本书共分8章,其主要内容包括:轮胎力学与汽车空气动力学,汽车纵向动力学,汽车经济性和排放性,汽车转向系统动力学,汽车操纵动力学,汽车平顺性,汽车碰撞安全性,以及现代电动汽车等。

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材,也可供相关专业的技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

汽车理论/吴光强主编. —北京:人民交通出版社,
2007.2

ISBN 978 - 7 - 114 - 06271 - 1

I. 汽… II. 吴… III. 汽车工程 IV. U461

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 138893 号

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

书 名:汽车理论

著 者:吴光强

责任编辑:刘敏嘉

出版发行:人民交通出版社

地 址:(100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址:<http://www.ccpres.com.cn>

销售电话:(010)85285656,85285838,85285995

总 经 销:北京中交盛世书刊有限公司

经 销:各地新华书店

印 刷:北京牛山世兴印刷厂

开 本:787×980 1/16

印 张:20.5

字 数:393千

版 次:2007年2月第1版

印 次:2007年2月第1次印刷

书 号:ISBN 978 - 7 - 114 - 06271 - 1

印 数:0001—4000册

定 价:32.00元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)



高等学校车辆工程专业教材

21 世纪交通版高等学校车辆工程专业教材 编委会名单

编委会主任

陈礼璠(同济大学)

编委会副主任(按姓名拼音排序)

陈南(东南大学)

杜子学(重庆交通学院)

方锡邦(合肥工业大学)

谷正气(湖南大学)

编委会委员(按姓名拼音排序)

陈明(同济大学)

陈全世(清华大学)

陈鑫(吉林大学)

陈辛波(同济大学)

戴汝泉(山东交通学院)

邓亚东(武汉理工大学)

杜爱民(同济大学)

冯崇毅(东南大学)

冯晋祥(山东交通学院)

龚金科(湖南大学)

关家午(长安大学)

过学迅(武汉理工大学)

韩英淳(吉林大学)

何丹娅(东南大学)

何仁(江苏大学)

何东伟(同济大学)

何耀华(武汉理工大学)

黄韶炯(中国农业大学)

金达锋(清华大学)

李晓霞(长安大学)

刘晶郁(长安大学)

鲁植雄(南京农业大学)

栾志强(中国农业大学)

罗虹(重庆大学)

孟宪皆(同济大学)

任恒山(湖南大学)

谭继锦(合肥工业大学)

王国林(江苏大学)

温吾凡(吉林大学)

吴光强(同济大学)

吴小清(同济大学)

席军强(北京理工大学)

张红(中国农业大学)

张洪欣(同济大学)

张启明(长安大学)

赵福堂(北京理工大学)

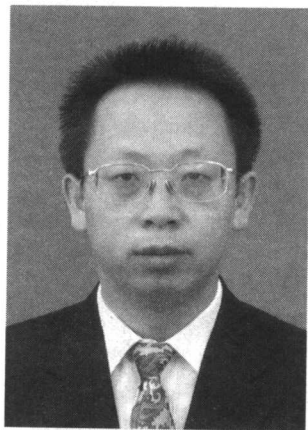
朱西产(同济大学)

钟诗清(武汉理工大学)

教材策划组成员名单

刘敏嘉 白 峻 钟 伟 翁志新 黄景宇

主编简介



吴光强,工学博士、教授、博士生导师,河北人,1965年12月生,1994年7月在吉林(工业)大学液力机械传动研究所获工学博士学位,1996年8月在哈尔滨工业大学机械工程学科博士后流动站出站,1996年9月起在同济大学汽车工程系任教。现为同济大学汽车学院汽车仿真技术研究所所长,此外兼任上海市科委技术预见专家,中国机械工程学会流体传动与控制分会委员、液力传动技术委员会委员,中国自动化学会系统仿真专业委员会委员,上海市系统仿真学会常务理事兼秘书长、仿真技术推广应用专业委员会副主任,中国力学学会、上海力学学会动力学与控制专业委员会委员,上海汽车工程学会乘用车专业委员会副主任,上海市第八届曙光学者。

一直从事产品的先进设计与仿真理论及方法、汽车多体系统动力学与非线性控制等方面的理论与应用研究,在国内外重要学术刊物及国际学术会议上发表论文100余篇,且已有20余篇论文收录入(SCI/EI),完成《车辆静液驱动与智能控制系统》、《汽车数字化开发技术》等著作,主持过国家、国际合作和省部级课题30余项,获国家发明专利3项,国家计算机软件著作权6项,两次受到美国汽车工程师学会(SAE)的表彰,荣获霍英东教育基金会高等院校青年教师基金奖,作为第一完成人获省部级科技进步奖二等奖1项、三等奖3项,省部级教学成果奖二等奖1项,并获中国汽车工业优秀青年科技人才奖。

前 言

汽车作为重要的运载器具，正在不断地改变着世界，影响社会与人们的生活。在一个短的时间内开发出新的车型对汽车工业企业至关重要，将影响市场的占有率和经济上的利益，关系到企业的生存与发展。汽车设计与制造过程中，需进行整车性能的分析，在产品开发初期就能对其性能做出预测与评价，并进行系统与结构的优化，以利用低成本、快速开发出高质量的汽车产品。在这个方面，车辆动力学的模型建立、数字仿真等手段具有日益增加的重要性。它可在开发的前期，在没有物理样机的条件下进行（数字）试验和评估。此外，汽车本身由于技术的发展、使用及不同用户更高的要求等原因，也出现了显著的变化。为此，需要在汽车、力学和自动控制等相关学科理论与方法的基础上，借助有关工具，进一步进行汽车理论的研究，这同时也是培养高素质汽车专门人才的需要。

本书在各章节具体内容的组织上，主要考虑和根据车辆坐标系的方向、驾驶员的操作输入及其他扰动的不同类型等。这样就使得其特色表现在以下几个方面：

- (1) 首先从充气轮胎力学、空气动力学入手，确定汽车行驶过程中所受到的外力；
- (2) 根据车辆坐标系的方向，分析与提出汽车性能的3个部分内容：纵向动力学相关的汽车性能（动力性、制动性），侧向动力学相关的汽车性能（低速时的转向性能与高速时的操纵稳定性），垂向动力学相关的汽车平顺性（振动与噪声）；
- (3) 增加了电动汽车经济性与混合动力等汽车排放性能的计算；
- (4) 融入主动与被动安全性的内容；
- (5) 增加了新能源汽车，包括电动汽车、混合动力及燃料电池汽车的相关理论。

这样既体现了本版《汽车理论》教材的编写特色，又不失现有的《汽车理论》教材中按汽车性能编写的整体思路。

该书编写的分工依章节的次序分别为：

第1章、第2章的2.6~2.10由张洪欣教授编写；第2章的2.1~2.5（初稿）由吴小清副教授编写；第3章由何东伟副教授编写；第4章由陈辛波教授编写；第5章、第8章由吴光强教授编写，并对第2章进行了修改与补充；第6章由孟宪皆副教授编写；第7章由朱西产教授编写。全书由吴光强教授统稿与审定。



在编写过程中,得到了杨伟斌、方杰等的帮助,在此表示感谢!此外,对引用文献和引用了但没有列出的作者表示真诚的谢意!

最后,热切地期望使用本教材的高校师生和读者批评指正,以便在再版时修改完善。

编者

2006年10月

于同济大学

常用符号表

第 1 章 轮胎力学与汽车空气动力学

物 理 量	代 号	单 位	物 理 量	代 号	单 位
力	F	N	地面法向反作用力	F_z	N
力矩	T	N·m	空气阻力	F_w	N
车速	u_a	km/h	滚动阻力	F_f	N
侧偏力	F_y	N	空气阻力系数	C_D	
车轮半径	r	m	滑动率	s	
侧偏刚度	k_α	N/rad	滚动阻力系数	f	
外倾刚度	k_γ	N/rad	侧向力系数	φ_1	
制动力系数	φ_b		附着系数	φ	
外倾角	γ	rad 或 (°)	侧偏角	α	rad 或 (°)
外倾侧向力	$F_{Y\gamma}$	N	空气流入角	τ	rad 或 (°)
回正力矩	T_z	N·m			

第 2 章 汽车纵向动力学

物 理 量	代 号	单 位	物 理 量	代 号	单 位
汽车质量	m	kg	驱动力	F_t	N
汽车重力	G	N	制动器制动力	F_μ	N
发动机转矩	T_{tq}	N·m	坡度阻力	F_i	N
发动机功率	P_e	kW	加速阻力	F_j	N
发动机转速	n	r/min	道路阻力系数	ψ	
变速器传动比	i_g		旋转质量换算系数	δ	
主减速器传动比	i_0		动力因数	D	
传动效率	η_T		制动力分配系数	β	
附着力	F_φ	N	制动减速度	a_b	m/s ²
制动器摩擦转矩	T_μ	N·m	侧向力系数	φ_t	
地面制动力	F_b	N	同步附着系数	φ_0	
制动效能因数	K_{ef}		坡度	i	



第3章 汽车经济性与排放性

物理量	代号	单位	物理量	代号	单位
燃油消耗率	b	$g/(kW \cdot h)$	汽车百公里油耗	Q_s	$L/100km$

第4章 汽车转向系统动力学

物理量	代号	单位	物理量	代号	单位
质心侧向速度	v	m/s	质心总的速度	V	m/s
回正力矩	T_s	$N \cdot m$	稳定性因数	K	s^2/m^2
转向盘力矩	T_h	$N \cdot m$	转向半径	R	m
转向系统刚度	k_s	$N \cdot m/rad$	侧偏刚度	$k_i (i=f, r)$	N/rad
横摆角速度	ω_r	rad/s 或 $(^\circ)/s$	质心侧偏角	β	rad/s 或 $(^\circ)$
转向盘转角	α	rad/s 或 $(^\circ)$	转向系统固有频率	ω_s	rad/s
前轮侧偏角	β_f	rad/s 或 $(^\circ)$	转向轮转角	δ	rad/s 或 $(^\circ)$
稳态横摆角速度增益	$\left(\frac{\omega_r}{\delta}\right)_s$	$rad \cdot s^{-1}/rad$ 或 $(^\circ) \cdot s^{-1}/(^\circ)$	后轮侧偏角	β_r	rad/s 或 $(^\circ)$
质心至前轴的距离	l_f	m	稳定性因数	K	m^2/s^2
汽车绕 OZ 轴的转动惯量	I_z	$kg \cdot m^2$	质心至后轴距	l_r	m

第5章 汽车操纵动力学

物理量	代号	单位	物理量	代号	单位
侧向加速度	a_y	m/s^2	车轮纵向滑移率	s_x	
侧向加速度稳态值	a_{ys}	m/s^2	纵倾角	ρ	rad
侧倾角	ϕ	rad/s 或 $(^\circ)$	前悬架侧倾角刚度	$C_{\phi 1}$	$N \cdot m/rad$
侧倾角速度	ω_p	rad/s 或 $(^\circ)/s$	后悬架侧倾角刚度	$C_{\phi 2}$	$N \cdot m/rad$
侧翻阈值	rT		临界车速	v_{cr}	m/s
侧倾刚度分配系数	rR_i		阻尼比	ζ	
前后载荷转移系数	ldD_i		前悬架侧倾角阻尼	D_f	$N \cdot ms/rad$
转弯时外侧轮胎力的分配系数	ldU_{oi}		后悬架侧倾角阻尼	D_r	$N \cdot ms/rad$
车辆转弯时内侧轮胎垂向力的分配系数	ldU_{ij}		峰值反应时间	ϵ	s

续上表

物理量	代号	单位	物理量	代号	单位
前侧倾转向系数	E_f	无量纲	前回正力矩刚性	N_1	$N \cdot m / rad$
后侧倾转向系数	E_r	无量纲	后回正力矩刚性	N_2	$N \cdot m / rad$
惯性积	I_{xz}	$kg \cdot m^2$	侧倾力矩	T_{Φ_c}	$N \cdot m$
侧倾力臂长度	H_{cr}, h	m	载荷分配系数	rL	
整车质量	M	kg	绕 i 轴转动惯量	$I_i (i = x, z)$	$kg \cdot m^2$
悬挂质量	M_s, m_s	kg	航向角	ψ	rad

第6章 汽车的平顺性

物理量	代号	单位	物理量	代号	单位
悬架刚度	K	N/m	频率响应函数	$H(j\omega)$ 或 $H(f)$	
路面不平度系数	$G_q(n_0)$	m^2/m^{-1}	阻尼比	ζ	
频率	f	Hz 或 s^{-1}	频率比	λ	
悬架动挠度	f_d	m	车轮部分垂直位移	z_1	m
悬架静挠度	f_s	m	固有圆频率	ω_0	rad/s
车轮与路面间的动载	F_d	N	有阻尼固有圆频率	ω_d	rad/s
阻尼系数	C	$N \cdot s / m$	激振频率	ω	rad/s
车身质量(悬挂质量)	m_2	kg	路面不平度函数	q	m
车轮质量(非悬挂质量)	m_1	kg	相位角	Φ	($^\circ$)
坐垫上人体的位移	p	m	标准差	σ	
自相关函数	$R_q(\tau)$	m^2	空间频率	n	m^{-1}
自功率谱密度函数	$S_q(f)$	$m^2 \cdot s$	回转半径	ρ	m
悬挂质量分配系数	ϵ		刚度比	γ	
频率指数	W	m	质量比	μ	
车身垂直位移	Z_2	m	声压级	L_p	dB
声强级	L_1	dB	声功率级	L_w	dB
响度	N	宋 (sone)	尖锐度	S	acum
抖晃度	F	vacil	粗糙度	R	asper

第7章 汽车碰撞安全性

物理量	代号	单位	物理量	代号	单位
能量	E	J	车身变形量	S	m
前端刚度	k		碰撞载荷	F	N

第8章 现代电动汽车

物理量	代号	单位	物理量	代号	单位
放电量	Q	F	标准放电电流	I_n	A



目 录

第 1 章 轮胎力学与汽车空气动力学	1
1.1 轮胎力学	1
1.2 汽车空气动力学	29
第 2 章 汽车纵向动力学	38
2.1 汽车动力性及其评价指标	38
2.2 汽车行驶驱动力与行驶阻力	39
2.3 汽车行驶的驱动—附着条件与汽车的附着力	47
2.4 汽车的动力性分析	53
2.5 汽车动力性的主要影响因素	62
2.6 汽车制动动力学的研究内容	65
2.7 汽车的制动效能及其恒定性	66
2.8 汽车制动时的方向稳定性	70
2.9 制动力分配及其调节	73
2.10 汽车防抱死制动系统	85
第 3 章 汽车经济性与排放性	94
3.1 汽车燃料经济性的评价指标	94
3.2 汽车燃料经济性的计算方法	101
3.3 影响汽车燃料经济性的因素	101
3.4 汽车排放性及其影响因素	124
3.5 混合动力汽车经济性和排放性的仿真分析	131
第 4 章 汽车转向系统动力学	137
4.1 汽车转向行驶动力学模型	137
4.2 固定转向盘转角时,转向系统对汽车转向性能的影响	142
4.3 不固定转向盘转角时,转向系统对汽车转向性能的影响	147
4.4 汽车的四轮转向	151
4.5 汽车电动助力转向系统(EPS)简介	160



第 5 章 汽车操纵动力学	164
5.1 概述	164
5.2 汽车操纵稳定性的研究方法 with 内容	166
5.3 汽车操纵稳定性模型建立的坐标系	167
5.4 基于两自由度模型的操纵稳定性分析	169
5.5 线性三自由度汽车操纵稳定性模型	178
5.6 汽车操纵稳定性与悬架的关系	185
5.7 载荷等因素对汽车操纵稳定性的影响	193
5.8 侧风对汽车操纵稳定性的影响	198
5.9 汽车操纵性和平顺性的建模与仿真	204
5.10 汽车电子稳定性程序	213
第 6 章 汽车的平顺性	223
6.1 人体对振动的反应和平顺性评价	224
6.2 路面输入的统计特性	227
6.3 汽车振动模型的简化	230
6.4 车身单质量振动系统的平顺性分析	232
6.5 车身车轮双质量振动系统的平顺性分析	236
6.6 七自由度平顺性模型及仿真	243
6.7 主动悬架平顺性模型及仿真	247
6.8 “人体—座椅”系统参数对振动的影响	254
6.9 结构因素对平顺性的影响	256
6.10 汽车车内噪声及其声品质评价	257
第 7 章 汽车碰撞安全性	266
7.1 道路交通事故及对策	266
7.2 汽车安全性的评价体系	270
7.3 汽车耐撞性设计准则	275
7.4 正面碰撞耐撞性的分析	281
第 8 章 现代电动汽车	288
8.1 电动汽车概述	288
8.2 电动汽车的动力装置	290
8.3 混合动力汽车	297
8.4 纯电动汽车	306
8.5 燃料电池汽车	308
复习题	312



第1章 轮胎力学与汽车空气动力学

汽车受到的外力(除重力以外),主要来自地面和车周围气流的反作用力;本章首先介绍由轮胎与地面间相互作用而引起的、作用在轮胎上的力和力矩及其各种力学性能,然后介绍空气与运动中车辆之间相互作用而引起的气动力及其力学性能。

1.1 轮胎力学

1.1.1 概述

轮胎是汽车上一个重要部件,支承整车,缓和路面不平对车辆的冲击力,为驱动和制动提供良好的附着作用,直接影响汽车的操纵稳定性和方向稳定性,许多使用性能与轮胎有关。因此对轮胎要求也很高,主要有以下几点:

- (1)要有足够强度和寿命、气密性好,保持行驶安全。
- (2)良好的弹性和阻尼特性,和悬架一起缓和由路面不平引起的振动和冲击,噪声要小,保证乘坐舒适和安全。
- (3)胎面花纹要增强与地面的附着性,保证必要的驱动力和制动效能。
- (4)轮胎变形时,材料中摩擦损失或迟滞损失要小,以保证滚动阻力小。
- (5)轮胎侧偏特性好,保证转向灵敏和良好的方向稳定性。

现代汽车大多采用充气轮胎,按组成结构不同,又分为有内胎轮胎和无内胎轮胎两种。充气轮胎按胎体中帘线排列的方向不同,还分为普通斜线胎、带束斜交帘线胎和子午线轮胎。

轮胎种类是通过规格划分的,轮胎规格由以下几部分组成:

- (1)轮胎宽度(mm)。
- (2)扁平率(%)。
- (3)轮胎结构形式。
- (4)轮辋直径(in 或 mm)。
- (5)工作标记(包括速度标记 GSY 和负荷指数 L1),见表 1-1 和表 1-2。





速度标记

表 1-1

速度标记(GSY)	最高车速(km/h)	速度标记(GSY)	最高车速(km/h)
F	80	R	170
M	130	S	180
P	150	T	190
Q	160	H	210

负荷指数(LI)

表 1-2

LI	承载能力(kg)	LI	承载能力(kg)	LI	承载能力(kg)	LI	承载能力(kg)
50	190	65	290	80	450	95	690
51	195	66	300	81	462	96	710
52	200	67	307	82	475	97	730
53	206	68	315	83	487	98	750
54	212	69	325	84	500	99	775
55	218	70	335	85	515	100	800
56	224	71	345	86	530	101	825
57	230	72	355	87	545	102	850
58	236	73	365	88	560	103	875
59	243	74	375	89	580	104	900
60	250	75	387	90	600	105	925
61	257	76	400	91	615	106	950
62	265	77	412	92	630	107	975
63	272	78	425	93	650	108	1000
64	280	79	437	94	670	109	1030

轮胎规格示例如下:

175/65 R 14 82 H

- 速度标记(允许速度可达 210km/h,见表 1-1)
- 负荷指数(最小承载能力 475kg,见表 1-2)
- 轮辋直径,单位:in(或 mm)
- 轮胎型号(R 为子午线轮胎,斜交帘线轮胎改用 — 表示)
- 扁平率,用 % 表示(指轮胎断面高 / 轮胎断面宽)
- 测量气压为 1.8bar(1bar = 10⁵Pa)时,轮胎断面的宽度





1.1.2 作用在轮胎上的力和力矩

为了分析作用在轮胎上的各种力和力矩,必须有一个统一的参考坐标系,图 1-1 是一种比较通用的坐标系,其原点是轮胎接地面的中心。

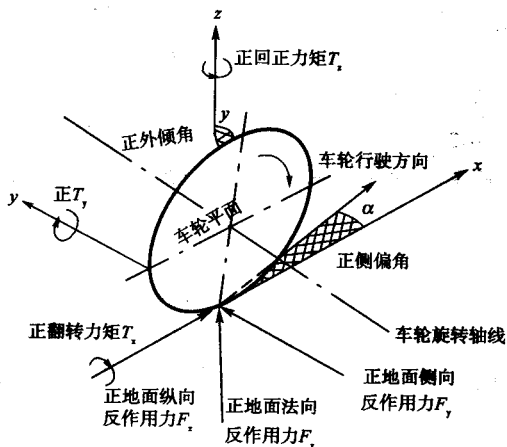


图 1-1 轮胎坐标系

x 轴是车轮平面与地面的交线,前进方向为正, z 轴垂直于路面,向上为正, y 轴在地平面内,规定面向轮胎前进方向时指向左方为正。地面对轮胎作用有三个力和力矩,即图中 F_x, F_y, F_z 和 T_x, T_y, T_z ,这六个量称为轮胎六分力,其名称及意义见表 1-3。

轮胎六分力

表 1-3

符号	名称	意义
F_x	纵向力	地面对轮胎的反作用力沿轮胎坐标系 x 轴分量
F_y	侧向力	地面对轮胎的反作用力沿轮胎坐标系 y 轴分量
F_z	法向力	地面对轮胎的反作用力沿轮胎坐标系 z 轴分量
T_x	翻转力矩	地面对轮胎反作用力绕 x 轴产生的力矩
T_y	滚动阻力矩	地面对轮胎反作用力绕 y 轴产生的力矩
T_z	回正力矩	地面对轮胎反作用力绕 z 轴产生的力矩

1.1.3 轮胎纵向动力学特性

现主要研究滚动阻力、驱动力和制动力与轮胎参数及地面状况的关系。

1. 滚动阻力

由于轮胎的内摩擦产生弹性迟滞损失,在软路面上由于地面变形和沉陷以及轮胎与



地面间的局部滑移,地面沿轮胎的法向反力总是偏前一距离 a ,使地面反力与车轮上垂直负荷 W 形成力偶 $F_z a$,它起到阻止运动的作用,称为滚动阻力偶。由图 1-2 可知,欲使从

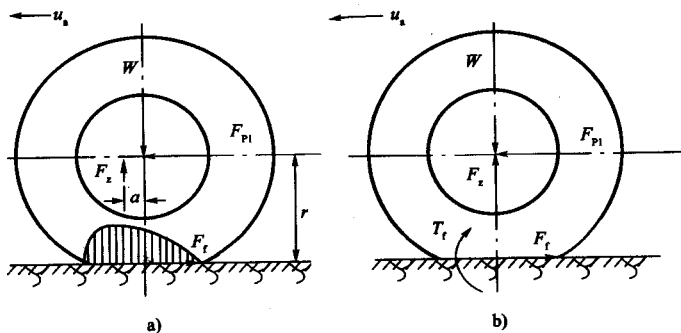


图 1-2 从动轮受力情况

动轮滚动,必须在车轮中心施加推力 F_{P1} ,根据平衡条件,它引起地面切向反力 F_f ,此力阻碍车轮滚动,故称为滚动阻力 F_f ,此二力大小相等,方向相反,并构成一力偶矩来克服上述滚动阻力偶,可用下式表示

$$T_f = F_{P1} \cdot r = F_z \cdot a \text{ 或 } F_{P1} = F_z \frac{a}{r}$$

式中: r ——车轮半径。

令 $f = \frac{a}{r}$,考虑到 $F_z = W$, $F_f = F_{P1}$

得

$$F_f = Wf \tag{1-1}$$

式中: F_f ——滚动阻力;

f ——滚动阻力系数。

此关系式表明,滚动阻力等于滚动阻力系数与车轮垂直载荷(或地面法向反作用力)之乘积。

1) 直线行驶时滚动阻力

(1) 硬路面

式(1-1)表明,减少滚动阻力的主要措施是减少滚动阻力系数,这就必须研究影响滚动阻力系数的各种因素。

试验表明,轮胎滚动阻力系数 f 与轮胎气压和轮胎上法向力 F_z 有关,它随轮胎充气压力增大而减少,随法向力增大而减少,如图 1-3 所示。

下面对多滚动阻力产生的原因及影响因素进行

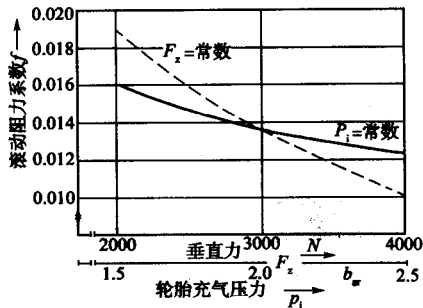


图 1-3 145R1375S 轮胎滚动阻力系数 f 与轮胎气压 P_1 和法向力 F_z 的关系

