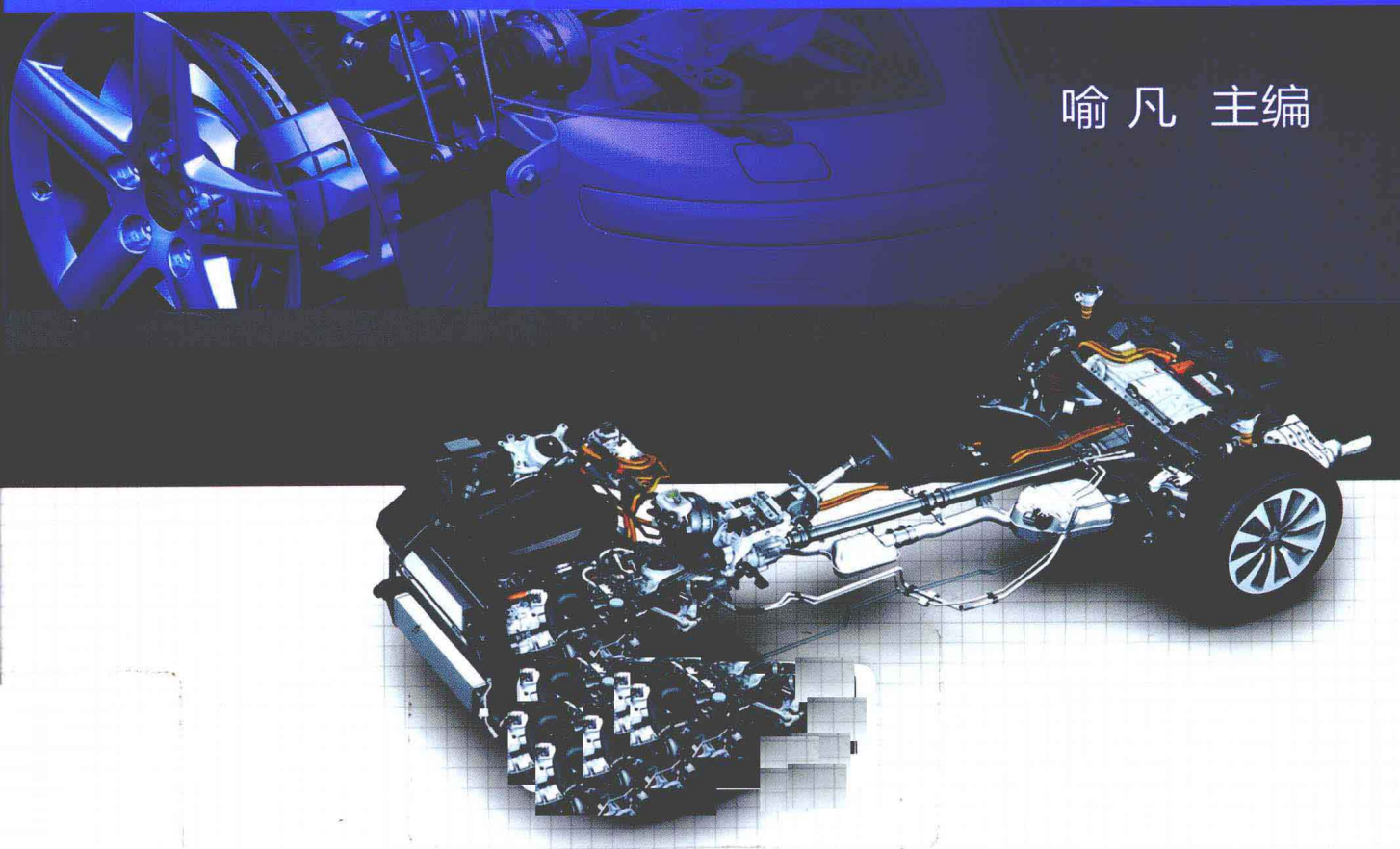


全国工程硕士专业学位教育指导委员会推荐教材

# 车辆动力学及其控制

喻凡 主编



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



全国工程硕士专业学位教育指导委员会推荐教材

# 车辆动力学及其控制

主 编 喻 凡  
副主编 沈 钢 史文库  
参 编 王国丽 鲁统利  
冯 原  
主 审 林 逸



机械工业出版社

# 前 言

随着对车辆性能和行驶速度要求的提高，以及不断涌现的控制新技术在车辆上的应用，车辆动力学及其控制方面的研究内容得到不断丰富和发展。本书作为全国工程硕士专业学位教育指导委员会选定的核心教材，以培养现代车辆工程专业的人才为目的，系统地介绍了车辆动力学及其控制的理论和方法。本书注重理论与实际相结合，紧密跟踪国内外最新研究成果与技术发展趋势，力图通过对实例的分析，培养学生认识问题与解决问题的能力。

本书由地面车辆和轨道车辆两大部分组成，在内容安排上充分考虑了知识结构的完整性和系统性，注重实例分析，使读者在了解车辆动力学基本内容的同时，通过几个完整的实例，学会运用系统方法及现代控制理论进行动力学建模、仿真分析和控制系统设计的方法，同时也掌握相关系统动力学分析软件的使用方法。本书具备良好的通用性和实用性，既可作为高等院校车辆工程专业的工程硕士教材，也可用作本科和工学硕士的教学用书和企业技术人员的培训教材，对从事车辆工程研究的技术人员也有参考价值。

本书由喻凡教授主编，沈钢教授和史文库教授任副主编，并有来自上海交通大学、同济大学、吉林大学和北京理工大学四所大学的教师参加了编写。具体编写分工如下：第一章、第二章和第三章由上海交通大学机械与动力工程学院的喻凡教授和鲁统利副教授编写，第四章和第五章由吉林大学汽车工程学院史文库教授和冯原副教授编写，第六章由北京理工大学的王国丽博士编写，同济大学的沈钢教授编写了轨道车辆部分的第七章至第十二章。

本书编写过程中参考了大量国内外文献和书籍，引用了国内外一些企业的成功实例，在此谨向这些文献和书籍的作者以及相关企业表示深深的感谢。此外，我们在编写过程中还得到了上海交通大学、吉林大学、同济大学和北京理工大学车辆工程专业研究生们的热情帮助，他们在资料整理以及文稿编排方面做出了贡献，北京汽车研究总院的林逸教授对本书进行了审阅，在此一并表示感谢。

由于编者水平有限，书中难免有错误和疏漏之处，恳请读者批评指正。

编 者  
二〇〇九年

# 目 录

前言	
<b>第一章 车辆纵向动力学及其控制</b> .....	1
第一节 轮胎纵向力学特性 .....	1
一、轮胎的滚动阻力 .....	1
二、道路阻力 .....	6
三、轮胎侧偏阻力 .....	10
四、总的车轮滚动阻力 .....	12
五、轮胎纵向力与滑动率的关系 .....	12
第二节 汽车的动力与传动系统 .....	15
一、理想的动力传动特性 .....	15
二、动力传动系统的功能 .....	16
三、现代动力传动系统的种类和组成 .....	18
第三节 驱动动力学性能及分析 .....	20
一、车辆行驶阻力与功率需求 .....	20
二、驱动系统的特性场 .....	23
三、车辆动力与传动系统性能仿真 .....	27
四、建模工具介绍 .....	29
第四节 动力与传动系统的控制 .....	34
一、发动机燃油喷射及电子点火控制 .....	34
二、离合器控制 .....	36
三、自动变速器控制 .....	40
第五节 制动动力学及其控制 .....	41
一、概述 .....	41
二、直线制动动力学分析 .....	42
三、制动稳定性分析 .....	43
四、制动力控制系统 .....	44
五、车轮抱死控制系统 .....	47
<b>第二章 车辆操纵动力学及其控制</b> .....	53
第一节 轮胎侧偏特性与轮胎模型 .....	53
一、相关术语及定义 .....	53
二、轮胎模型 .....	54
三、轮胎的侧向力学特性 .....	57
四、整车建模中对轮胎模型的考虑 .....	59
第二节 基本操纵模型 .....	60
一、作用于车辆的外力与外力矩 .....	60
二、基本操纵模型假设 .....	61
三、运动方程的推导 .....	62
四、操纵动力学特性分析 .....	66
五、对实际问题的考虑 .....	72
第三节 基本操纵模型的扩展 .....	77
一、考虑车身侧倾的三自由度操纵模型 .....	77
二、车轮转动效应 .....	82
三、转向系统的影响 .....	84
四、悬架运动学 .....	86
五、变形转向 .....	87
第四节 转向系统的控制 .....	90
一、四轮转向系统 .....	91
二、电动助力转向系统 .....	98
<b>第三章 车辆行驶动力学及其控制</b> .....	103
第一节 路面输入模型 .....	103
一、路面测量技术及数据处理 .....	103
二、路面输入模型 .....	106
第二节 汽车舒适性评价标准 .....	112
一、标准 .....	112
二、平顺性测量 .....	116
第三节 行驶动力学模型 .....	117
一、模型推导的前提 .....	117
二、单轮车辆模型的推导 .....	120
三、半车模型的推导和结果分析 .....	129
四、整车模型的推导和结果分析 .....	131
第四节 可控悬架系统 .....	134
一、车身高度调节系统 .....	134
二、自适应系统 .....	134
三、可切换阻尼系统 .....	136
四、全主动系统 .....	137
五、有限带宽主动系统 .....	139
六、连续可变阻尼的半主动系统 .....	139
七、各类悬架系统的性能比较 .....	140

<b>第四章 汽车空气动力学</b> .....	143	一、履带效应 .....	174
第一节 SAE 汽车动力学坐标系及相关术语和定义 .....	143	二、行驶动力学模型 .....	175
第二节 气动阻力 .....	145	第三节 履带车辆转向动力学 .....	183
一、形状阻力 .....	145	一、作用在履带车辆上的外力 .....	183
二、摩擦阻力 .....	147	二、作用在履带车辆上的外力矩 .....	187
三、诱导阻力 .....	148	三、转向阻力系数 .....	188
四、干扰阻力 .....	149	四、转向所需牵引力和制动力 .....	189
五、内部阻力 .....	149	<b>第七章 轮轨关系及基本理论</b> .....	192
第三节 气动升力 .....	149	第一节 概述 .....	192
第四节 气动力对汽车性能的影响 .....	151	第二节 轮轨接触几何关系 .....	193
一、概述 .....	151	第三节 蠕滑理论 .....	198
二、发动机功率与车速的关系 .....	151	第四节 单轮对的仿真模拟 .....	211
三、气动阻力与最高车速的关系 .....	152	<b>第八章 蛇行运动与稳定性</b> .....	215
四、气动阻力对加速度的影响 .....	152	第一节 横向稳定性及车辆的临界速度 .....	215
五、气动阻力对燃油经济性的影响 .....	152	第二节 单轮对横向稳定性 .....	216
第五节 气动力对汽车操纵稳定性的影响 .....	154	第三节 H 型构架式转向架横向稳定性 .....	218
一、概述 .....	154	第四节 整车横向稳定性 .....	219
二、影响汽车操纵稳定性的气动力 .....	154	<b>第九章 轨道车辆的随机响应理论</b> .....	228
三、提高操纵稳定性的汽车造型措施 .....	156	第一节 轨道的随机激励输入描述 .....	228
四、侧倾力矩 .....	157	一、轨道高低不平顺 .....	228
第六节 汽车空气动力学试验 .....	158	二、轨道水平不平顺 .....	228
一、试验基本方法 .....	158	三、轨道方向不平顺 .....	229
二、汽车风洞 .....	158	四、轨道轨距不平顺 .....	229
三、汽车风洞试验的准则 .....	159	第二节 车辆的随机响应计算 .....	233
四、风洞试验的测量方法 .....	159	第三节 地铁列车的随机响应 .....	237
<b>第五章 汽车侧翻</b> .....	161	<b>第十章 曲线导向理论</b> .....	250
第一节 刚性汽车的准静态侧翻 .....	161	第一节 概述 .....	250
第二节 考虑悬架的准静态侧翻 .....	163	第二节 单轮对的曲线通过数学模型 .....	251
第三节 汽车的瞬态侧翻 .....	165	一、单轮对的线性曲线通过模型 .....	251
一、简单的侧翻模型 .....	165	二、单轮对的非线性曲线通过模型 .....	254
二、横摆-侧翻模型 .....	166	第三节 单转向架的曲线通过模型 .....	258
三、绊倒侧翻 .....	168	第四节 四轴车曲线通过模型 .....	264
第四节 侧翻事故过程 .....	169	第五节 独立轮及轮对的导向问题 .....	269
<b>第六章 履带式车辆动力学概述</b> .....	172	<b>第十一章 轨道车辆的纵向动力学</b> .....	283
第一节 悬架系统 .....	172	第一节 列车的纵向动力学 .....	283
一、弹性元件的发展 .....	172	第二节 纵向振动数学模型 .....	284
二、减振器的发展 .....	173	第三节 制动和牵引对列车纵向振动的影 响 .....	287
第二节 履带车辆行驶动力学 .....	174	一、紧急制动工况 .....	287

---

二、常用制动工况 .....	288	三、Weinstock 准则 .....	302
三、起动牵引工况 .....	288	四、JNR 的动态脱轨判断准则 .....	303
第四节 列车碰撞动力学 .....	288	五、滑轨判断准则 .....	303
<b>第十二章 轨道车辆的运行安全性</b> .....	<b>301</b>	第三节 影响因素及防治措施 .....	<b>304</b>
第一节 脱轨的类型及机理 .....	301	一、影响因素 .....	304
第二节 基本的脱轨安全评价指标 .....	301	二、防治措施 .....	306
一、Nadal 公式 .....	301	<b>参考文献</b> .....	<b>308</b>
二、Marie 公式 .....	302		

# 第一章 车辆纵向动力学及其控制

本章首先介绍了轮胎的纵向力学特性。其次，分析了车辆理想的动力传动系统特性，并介绍了现代汽车动力传动系统的分类和组成。然后，在分析汽车行驶时的动力需求与供应、汽车的驱动力学特性、车辆驱动动力学仿真方法及仿真建模工具的基础上，介绍了动力与传动系统典型部件的控制方法。最后，对制动动力学及其控制的相关内容进行了分析。

## 第一节 轮胎纵向力学特性

滚动车轮产生的所有阻力被定义为车轮滚动阻力，主要包括轮胎滚动阻力分量、道路阻力分量和侧偏阻力分量。其中，侧偏阻力分量是由轮胎的侧向载荷使轮胎侧偏而产生的纵向附加轮胎阻力；而由不平路面、塑性路面和湿路面等道路情况引起的附加阻力称为道路阻力分量；此外，除了由轴承摩擦和轮胎与地面相对滑动造成的摩擦阻力外，胎内气流流动以及转动的轮胎对外部空气造成的风扇效应都会引起轮胎的滚动阻力，但均为次要影响因素，因此通常将它们隐含于车轮阻力中，并不单独列出。

本节首先介绍在干、硬路面直线行驶的轮胎滚动阻力及其产生机理；然后，对其主要影响因素，如道路条件和轮胎侧偏引起的附加阻力分别进行讨论；最后，根据车辆纵向动力学研究的要求，介绍轮胎纵向力与车轮滑动率的关系，并试图对其产生机理和物理过程通过轮胎模型给予理论上的解释。

### 一、轮胎的滚动阻力

当充气轮胎在理想路面（通常指平坦的干、硬路面）上直线滚动时，其外缘中心对称面与车轮滚动方向一致，所受到的与滚动方向相反的阻力即为轮胎滚动阻力。

根据作用机理的不同，轮胎滚动阻力还可进一步分解为弹性迟滞阻力、摩擦阻力和风扇效应阻力，分别介绍如下。

#### 1. 弹性迟滞阻力

胎体变形所引起的轮胎材料迟滞作用是造成轮胎滚动阻力的主要原因。实际中，充气轮胎在静态压缩作用下会产生变形并且回弹，并由于其内部的摩擦作用而引起能量损失。当车轮在力或力矩作用下滚动时，对轮胎胎面上的每一单元而言，其压缩与回弹的过程将重复不断地进行。对这样一个过程，可用图 1-1 所示的车轮系统等效模型来加以解释。

在图 1-1 所示的车轮系统等效模型中，假定车轮的外圆周与轮辋之间由一些径向布置的弹簧和阻尼单元支撑；此外轮胎胎面也假定由一系列切向排列的弹簧和阻尼单元构成。当这些单元进入轮胎与路

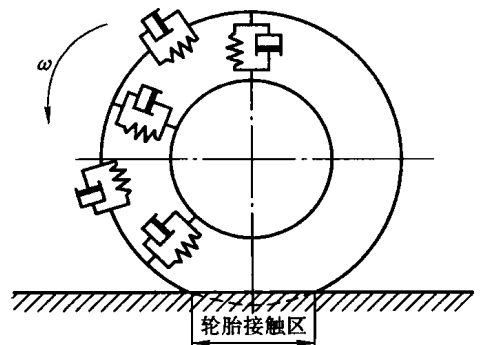


图 1-1 车轮系统等效模型

面的接触印迹时，其弹簧和阻尼便能充分做功，并生成附加的摩擦效应，我们将其称之为弹性迟滞阻力。轮胎胎面的弹性和阻尼特性对路面附着力也有影响，选用低阻尼的胎面材料会减少附着摩擦力。随着车轮等效模型的滚动，相应的“弹簧-阻尼单元”便开始做功，并将其转化为热，所产生的弹性迟滞阻力应等于消耗的阻尼功与行驶距离之比。对同一帘布材料的轮胎而言，由于相邻帘布层间的相对运动将产生阻尼功，因而胎体帘布层数量越多，轮胎的阻尼通常就会越大。

在轮胎接触印迹外形成所谓的“驻波” (Deformation wave 或 Standing wave) 的过程，如图 1-2 所示。通常，轮胎的阻尼随车轮转速的增加而减小。驻波的形成是由于高速情况下，离开接触区域的胎面变形不能立即恢复，这个残留形变导致了驻波的产生。驻波的形成过程最终决定了阻尼的减小对轮胎弹性迟滞阻力的影响，而这一过程又取决于车速。驻波的形成会显著增加能量损失，从而产生大量的热，最终使轮胎损坏，因而也就限制了轮胎的最高安全行驶速度。某轮胎试验结果

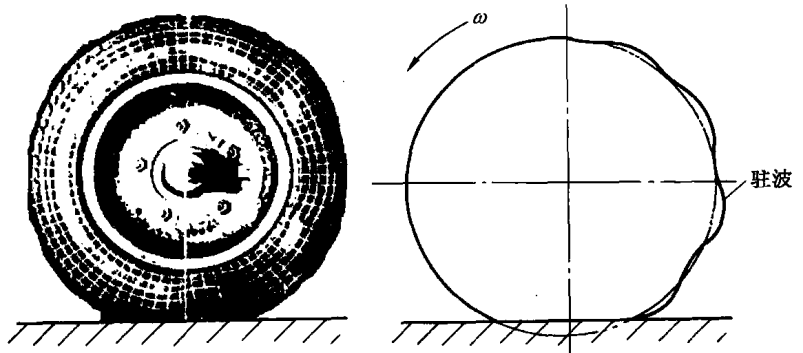


图 1-2 轮胎驻波的形成(运行工况:超载、低压胎、高速)

表明，其弹性迟滞阻力随车速的增加开始缓慢地呈线性增加；当车速增至约 35m/s 后，呈急剧上升的趋势。需强调说明的是，弹性迟滞阻力是轮胎滚动阻力中最重要的部分。

### 2. 摩擦阻力

对于轮胎的摩擦阻力，仍以图 1-1 所示的等效模型进行说明。由图 1-1 可见，当轮胎单元连续滚动进入轮胎接地区，接触印迹内的路面与滚动单元带之间将在纵向和侧向产生相对的部分滑动，由此引起轮胎与地面摩擦产生附加的摩擦阻力。

### 3. 风扇效应阻力

虽然轮胎的旋转运动会产生所谓的气流损失而产生所谓的“风扇效应阻力”，但我们可将其看做是对整个车辆气流影响的一部分。因此，通常我们将风扇效应阻力加到总的车辆空气阻力中，对此将在后面章节中介绍。

### 4. 滚动阻力系数

综上所述，车轮在干、硬的平路面上直线行驶，其滚动阻力  $F_R$  主要包括弹性迟滞阻力  $F_{R,弹性迟滞}$ 、摩擦阻力  $F_{R,摩擦}$  和风扇阻力  $F_{R,风扇}$  三部分，即

$$F_R = F_{R,弹性迟滞} + F_{R,摩擦} + F_{R,风扇} \tag{1-1}$$

试验表明，在 128 ~ 152km/h 速度范围内，90%~95% 轮胎的损坏由内部迟滞作用引起，而 2%~10% 则归咎于轮胎与地面的摩擦，仅 1.5%~3.5% 归咎于空气阻力。因此，轮胎在硬路面上的滚动阻力主要由胎体变形所引起的轮胎材料迟滞作用造成。实际上，式(1-1)表达的各个分量(如弹性分量与摩擦分量)均无法单独分开测量，因此有用的还是综合表达式。

图 1-3 给出了某货车子午线轮胎在不同载荷下滚动阻力的变化情况，清楚地说明了轮胎滚动阻力与载荷的关系。由图看出，轮胎滚动阻力和车轮法向载荷近似呈线性关系。因此，



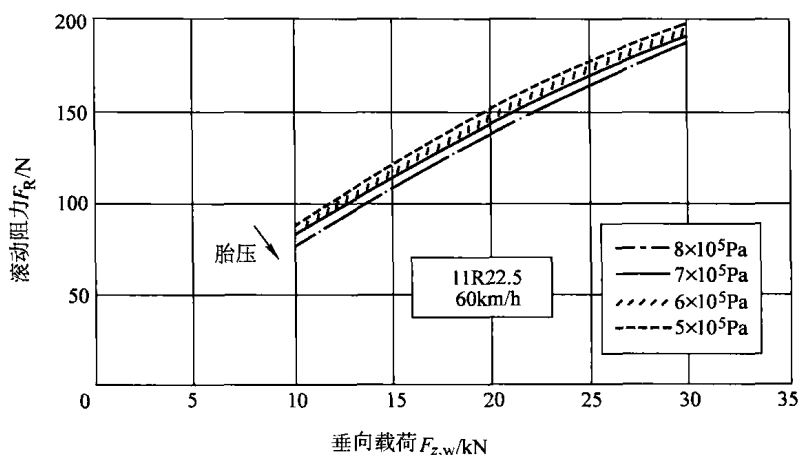


图 1-3 某货车子午线轮胎载荷与滚动阻力的关系

可定义一个无量纲的轮胎滚动阻力系数  $f_R$ ，其值等于滚动阻力  $F_R$  与车轮垂向载荷  $F_{z,w}$  之比，即

$$f_R = \frac{F_R}{F_{z,w}} \quad (1-2)$$

事实上，在轮胎接地印迹内，轮胎压力在纵向和横向均呈不对称分布，对典型的斜交轮胎和子午线轮胎的实际测量接地印迹内的轮胎压力分布如图 1-4 所示。

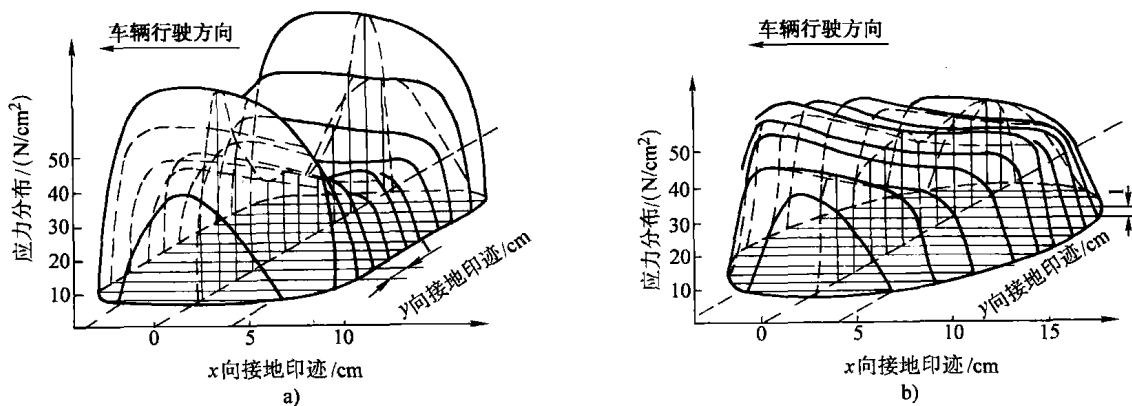


图 1-4 接地印迹内的轮胎压力分布

a) 斜交轮胎 b) 子午线轮胎

若仅考虑车轮中心面的纵向压力分布，由图 1-4 所示的三维压力分布情况可简化为图 1-5 所示的二维表达形式，这样更容易理解在车辆纵向动力学意义上的车轮受力情况。

分别作用于车轮、车身和路面上的力与力矩如图 1-6 所示。这里以非驱动轮为例，若将轮胎接地印迹内的法向分力求和，我们就可得到车轮载荷的反作用力  $F_{RW}$ 。由于接地印迹内压力分布的不对称性，其作用点位于轴心前方。若定义该偏心距为  $e_R$ ，则由此产生与车轮转动方向相反的力矩  $M_R$ ，其值等于

$$M_R = F_{RW}e_R \quad (1-3)$$

由此可见，要克服滚动阻力  $F_R$  就需要一个作用于轮轴的水平推力  $F_x$ ，它与车轮动力半径  $r_d$  的乘积所表示的力矩等于  $M_R$ ，即

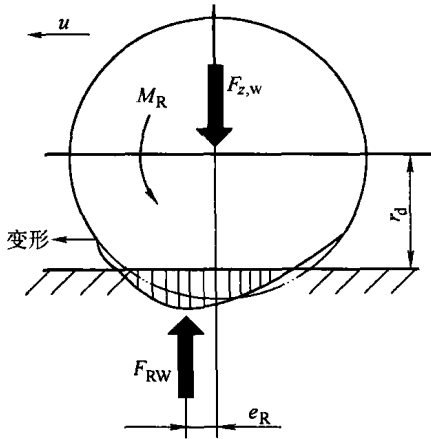


图 1-5 作用于车轮的力和力矩

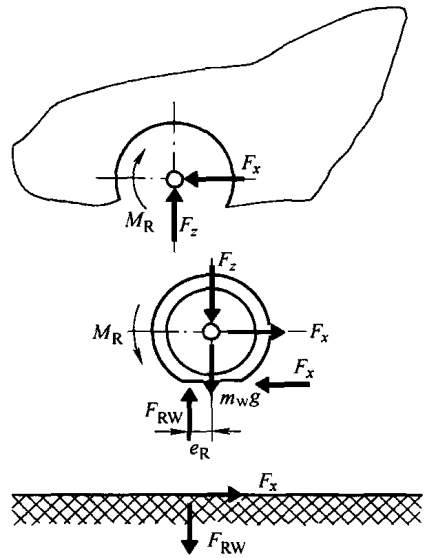


图 1-6 分别作用于车身、车轮、路面的力与力矩

$$M_R = F_x r_d = F_R r_d \quad (1-4)$$

结合式(1-3)和式(1-4)，我们可以简单地估计轮胎的滚动阻力系数，即

$$F_R r_d = F_{RW} e_R \quad (1-5)$$

若令

$$F_R = f_R F_{RW} \quad (1-6)$$

则得滚动阻力系数  $f_R$  为

$$f_R = \frac{e_R}{r_d} \quad (1-7)$$

在车辆性能粗略估算中，通常假定轮胎滚动阻力是与车轮载荷和行驶速度无关的常量。当需要更细致地考虑与载荷的关系时，轮胎的滚动阻力通常随车轮载荷的增加而增加；而滚动阻力系数则通常随车轮载荷的增加而减小，如图 1-3 所示。

上述情况可由图 1-7 所示的某货车子午线轮胎滚动阻力系数曲线更清楚地说明。此外，图 1-7 也表明了轮胎压力对滚动阻力系数的影响。随着胎压的升高，滚动阻力系数降低。由于胎压的增加使轮胎刚度增大，因而在车轮载荷不变的情况下，轮胎变形相应减小，进而使

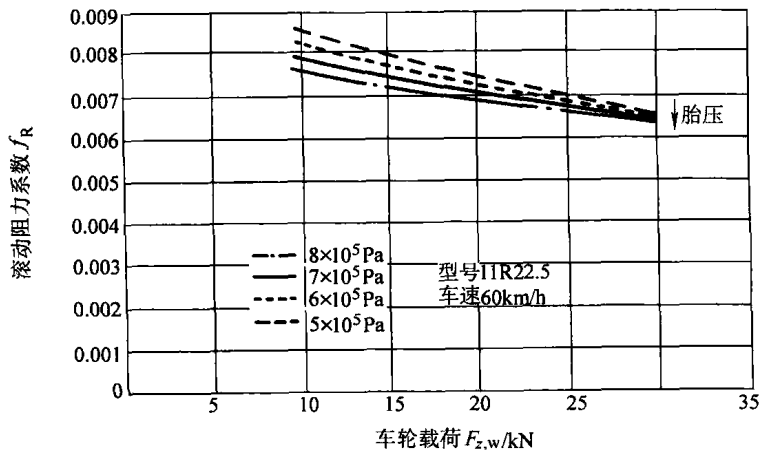


图 1-7 某货车子午线轮胎的滚动阻力系数与车轮载荷和胎压的关系

弹性变形能减小。同时，由于接地印迹长度的减小，轮胎的摩擦阻力分量也相应降低。

车速对滚动阻力系数的影响如图 1-8 所示。随着车速的增加，滚动阻力系数起初只是稍有增加。随后逐渐随着车速呈显著增加趋势，其原因是驻波的形成对弹性迟滞阻力产生影响，而这一影响随着车速的增加而更加显著。

对高速 H 型轮胎(时速可高达 210km/h)和超高速 V 型轮胎(时速可高达 240km/h)而言，轮胎刚度的增加削弱了驻波的影响，因而其滚动阻力将会在更高车速下才开始显著增加，且变化趋势更为平缓。

总体来说，除了车速、车轮载荷和轮胎压力等外部因素的影响外，轮胎滚动阻力还取决于轮胎的结构设计、嵌入材料和橡胶混合物的选用。与斜交轮胎相比，子午线轮胎的滚动阻力通常较小。另外，轮胎胎面的结构设计对滚动阻力也有一定影响。较浅的胎面花纹和设计良好的胎面轮廓可使滚动阻力减小。然而，随着车速的增加，胎面花纹的影响相应下降。

当考虑材料、结构和设计参数对轮胎滚动阻力的影响时，必须正确认识轮胎的能量损失与“轮胎-车辆”系统的整体特性之间的关系。虽然我们期望滚动阻力越小越好，但也必须权衡其他性能参数，如轮胎寿命与耐久性、驱动性能、转弯性能以及缓冲作用等。例如，从滚动阻力角度看，合成橡胶材料不如天然橡胶材料优越，但由于前者具有在胎面寿命、湿路面上的附着力和轮胎噪声方面的巨大优势，实际上它们已经取代了天然橡胶，尤其在胎面材料应用方面。对于高性能车辆，采用丁基橡胶的轮胎具有更大优势，虽然由于其材料的迟滞特性较差而导致轮胎滚动阻力较大，但在驱动力、抓地性、噪声与舒适性等方面性能却显著得到改善。

### 5. 滚动阻力系数的测量

上面介绍了轮胎滚动阻力的各个分量，包括弹性迟滞阻力、摩擦阻力和风扇效应阻力。有一点可以肯定，滚动阻力中的最大的分量是弹性迟滞阻力。实际上，分别精确地测量上述各项是困难的，通常的做法是测量总的滚动阻力。一般可采用两种不同的方法测量轮胎的总滚动阻力，即整车道路测试和室内台架测试。整车道路测试的优点是：道路状况和基本条件是真实的，但由于轮胎重复试验所必要的外部环境，如天气、道路及交通条件等外在因素的干扰和不确定性，测试中很难保证指定的试验参数。而以上问题在室内固定轮胎试验台测试中可以避免。在室内试验条件下，装有试验轮胎的车轮被放在可移动的滚动表面上，试验数据可由车轮固定装置(如连接杆系和轮辋)上的力传感器获得。

根据滚动面情况的不同，轮胎试验台基本上可分为以下三种类型(见图 1-9)：

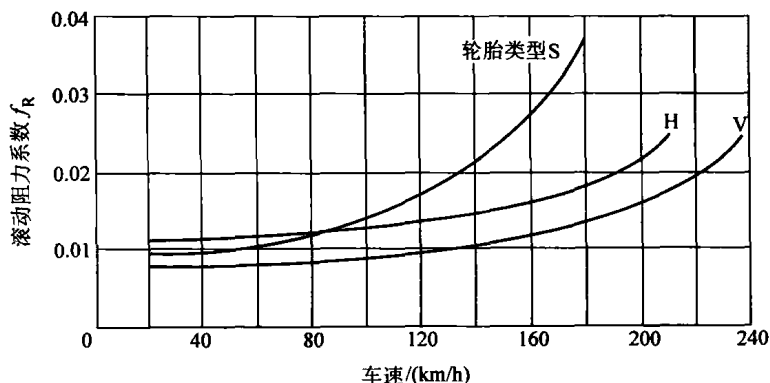


图 1-8 车速对滚动阻力系数的影响

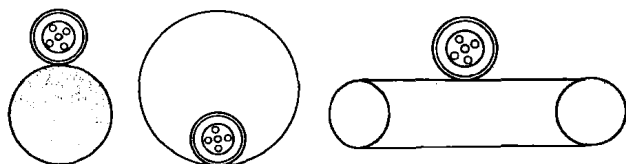


图 1-9 轮胎试验台的结构形式及特点

外支撑实验台、内支撑实验台和平板实验台。

最常用的是外支撑试验台。它的优点是成本相对较低，承载能力高，且结构紧凑，车轮周围留有较大的空间，不但可容纳各种不同的车轮导向元件，以保证车轮的定位，而且还可方便车轮的安装。但由于离心力的作用，很难在外转鼓上设置不同的道路条件。因此，路面试验条件不能充分保证。

对内支撑试验台而言，离心力的作用却可使车轮胎面很容易地固定于试验台面上。因此，内支撑试验台特别适合于进行不同类型的路面试验，比如确定轮胎湿胎面的滚动特性。然而，车轮上的有限空间不利于车轮的安装和控制。由于弧形支承面的影响，所有的内支撑试验台基本上都存在测量误差。与实际路面相比，在车轮载荷相同情况下，内支撑试验台使轮胎接触印迹和变形量增大，从而摩擦阻力和弹性迟滞阻力也相应增加。如果滚动卷筒半径与车轮半径相比相对较大，其测量误差就可控制在较小范围内。必要时可引入校正因子，以保证其测量结果与平面测量结果相吻合。

平板试验台在最大程度上保证了轮胎的滚动表面为平面，为车轮控制和车轮运动提供了宽阔的空间，同时也方便了轮胎的安装。通过变换不同滚板，可在一定条件下实现道路条件的改变。同样，也适用于湿道路条件。但由于支承面振动可能会产生测量误差，为解决滚板的导向问题，需要的技术成本较高，另外，滚板的磨损也增加了运行成本。

实际上，测试条件影响着与车速有关的滚动阻力系数特性曲线，常采用的测试方法主要有以下两种：

- 1) 将静止的或匀速滚动的轮胎设置为额定胎压，随后，在无气压控制的条件下测量每一点，由于轮胎的弹性迟滞能量，轮胎内气温升高，从而气压增加。
- 2) 整个运行过程中控制轮胎内部压力，并始终调整到额定压力。

第二种方法消除了不断变化的参数对轮胎压力的影响，而第一种方法则更接近实际轮胎运行工况。这其中并没有考虑诸如冷却气流等其他因素的影响。

以两种不同型号的货车轮胎为例，图 1-10 所示比较了以上介绍的两种测量方法的测试结果。无胎压控制的滚动阻力系数基本上低于有胎压控制的滚动阻力系数，原因是轮胎内部压力的增加导致了滚动阻力降低。

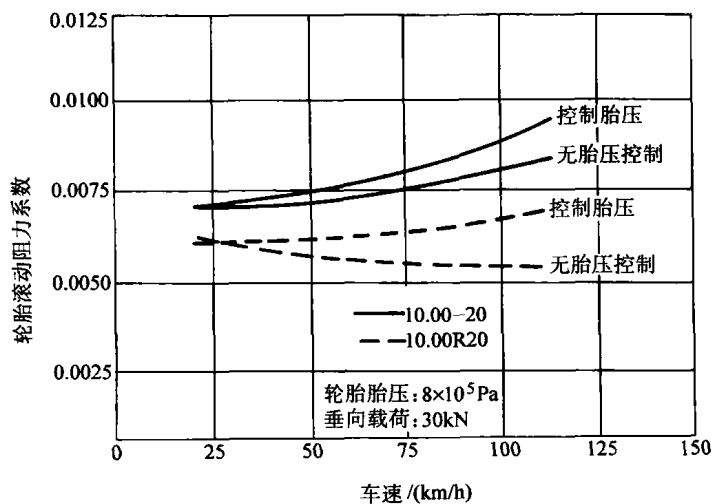


图 1-10 有、无胎压控制情况下车速对轮胎滚动阻力系数的影响

## 二、道路阻力

以上介绍了车轮在干、硬的平坦路面上的滚动阻力。实际上，不平路面、塑性路面和湿路面均会使轮胎滚动阻力增加。我们将这样的道路条件引起的轮胎滚动阻力增加的部分称之为“道路阻力分量”。

### 1. 不平路面

车辆行驶过程中，路面的微小不平度可由轮胎缓冲和吸收。此外，通过悬架弹簧和减振

器，整个车轮总成相对车身上下跳动。此时，轮胎和悬架减振器一样，其中的动能也被转化为热量。这说明当车轮作弹跳运动时，弹性单元恢复变形过程中释放的能量比压缩过程所做的功少，其减小的量相当于阻尼功的大小。下面以图 1-11 所示的越障时轮胎的能量释放过程来解释说明。

由于能量的释放，图 1-11 所示等效系统中弹簧力所做的功对滚动阻力没有影响。但阻尼器在相应的不平路段( $x$  距离之内)所做的功  $\Delta W$  使车轮滚动阻力增加了一附加分量，定义为不平路面滚动阻力分量  $F_{R,不平}$ ，其大小等于

$$F_{R,不平} = \frac{\sum_0^x \Delta W}{x} \quad (1-8)$$

### 2. 塑性路面

车轮在硬路面(如沥青路面)或微弹性路面(如混凝土路面)上滚动时，路面在正常载荷作用下不会产生永久变形。然而，在土路、砂路、草地或雪路等情况下，当承载车轮滚过后，将使路面产生清晰可见的车辙。我们将由路面塑性变形引起的附加车轮阻力定义为塑性路面阻力，记为  $F_{R,塑性}$ ，它主要由以下三部分阻力组成：

(1) 压实阻力 根据路基种类的不同，承载车轮在塑性路面滚过的底层土壤变形只在很小的范围内可弹性恢复，滚过之后会有车辙留下，如图 1-12a 所示。

(2) 推土阻力 当车轮滚过松软的底层土壤时，大量的土壤开始先被挤到轮胎前部，直至被压实或挤到侧面。由这些路面物质的纵向和侧向运动造成的附加轮胎滚动阻力，可用推土阻力来表示，如图 1-12b 所示。

(3) 剪切阻力 此外，还有更微小的阻力分量，即胎面花纹沟槽摩擦阻力，由轮胎侧壁和路面物质之间的摩擦产生，如图 1-12c 所示。

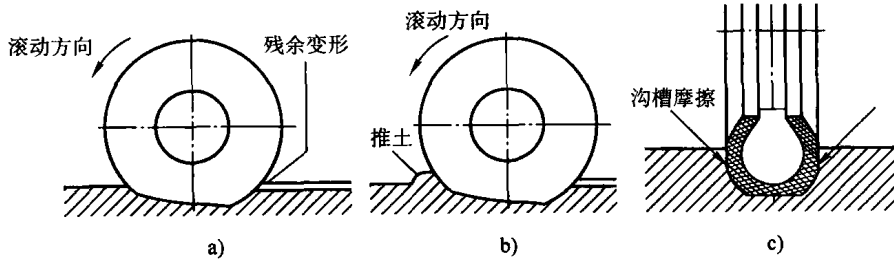


图 1-12 塑性路面产生的轮胎滚动阻力示意图

a) 压实阻力 b) 推土阻力 c) 剪切阻力

与硬路面上的轮胎滚动阻力相反，塑性路面上的附加阻力随着胎压的增加而增大。这是由于轮胎内部压力的增加使轮胎接地印迹减小，并使轮胎在路面中沉陷量加深，如图 1-13 所示。

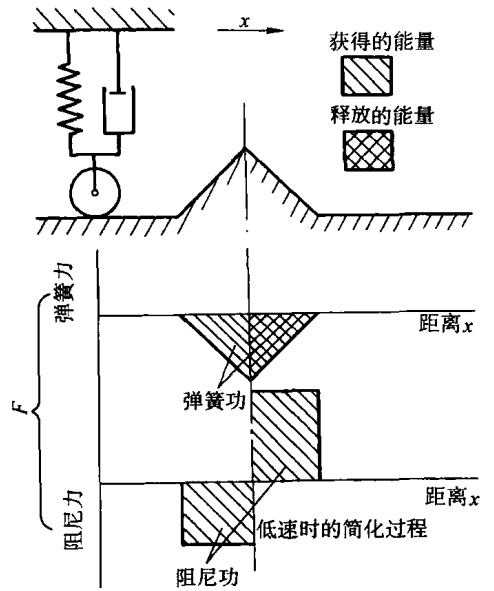


图 1-11 越障时轮胎(等效为车轮-弹簧-阻尼系统)的能量释放过程

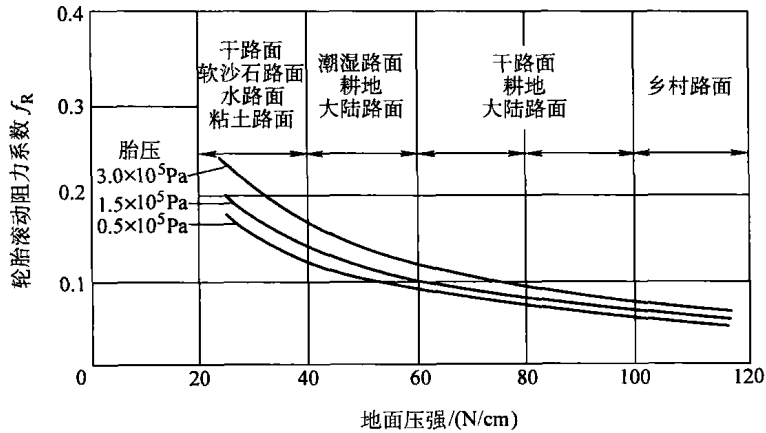


图 1-13 塑性路面上与地面承载能力相关的轮胎滚动阻力系数

总之，在塑性路面上轮胎滚动阻力由压实阻力、推土阻力、剪切阻力和硬路面上的滚动阻力之和构成，即

$$\sum F_{R,塑性} = F_R + F_{R,塑性} = F_{z,w}(f_R + f_{R,塑性}) \quad (1-9)$$

由式(1-9)可见，推导出的轮胎滚动阻力系数与道路条件有关。但我们通常仍将总的阻力系数简称为滚动阻力系数。只是，这里的滚动阻力系数包含着双重含义，即它还包含了附加的塑性路面阻力。考虑上述影响，表 1-1 列出了不同道路条件下的滚动阻力系数值。

表 1-1 不同道路条件下的滚动阻力系数值

道路条件	滚动阻力系数值	道路条件	滚动阻力系数值
新硬柏油、混凝土路面、碎石路、大卵石路	0.005 ~ 0.015	损坏的搓板砂砾路	0.03 ~ 0.04
		良好土路	0.04 ~ 0.05
压实砂砾路、损坏的搓板柏油路	0.02 ~ 0.03	土路	0.05 ~ 0.15
		沙路	0.15 ~ 0.35

### 3. 湿路面

为了使滚动的轮胎胎面与湿路面接触，轮胎必须穿透水层。在纵向上，胎面和水层之间的涉水区可分为三部分：水膜区、过渡区和直接接触区，如图 1-14 所示。在水膜区，滚动的

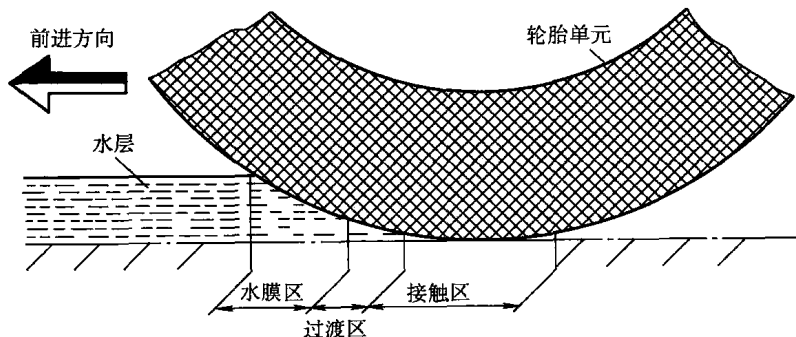


图 1-14 湿路面上轮胎涉水区示意图

的轮胎胎面实际上没有接触路面，大部分水被排走；在过渡区，轮胎胎面部分接触地面，且轮胎已产生变形；在直接接触区，滚动的轮胎胎面和路面直接接触，只有少量的水由轮胎花纹间挤出，是胎面与路面的实际接触区域。

在涉水区内，为了消除水的干扰，必须克服所谓的“扰流阻力”。试验表明，扰流阻力基本上取决于单位时间内排开水的体积，而轮胎设计、空气压力或轮胎载荷对扰流阻力几乎没有多大的影响。单位时间内的排水体积则由积水深度  $h$ 、轮胎宽度  $W_t$  和车轮滚动速度所决定。扰流阻力  $F_{R,扰流}$  可通过以下经验公式计算获得

$$F_{R,扰流} = \left( \frac{W_t \cdot u_w}{10 \cdot N} \right)^E \quad (1-10)$$

式中， $F_{R,扰流}$  为扰流阻力(N)； $W_t$  为轮胎宽度(cm)； $u_w$  为车轮前进速度(km/h)； $N$  和  $E$  的数值取决于积水深度，它们与积水深度的关系曲线如图 1-15 所示。

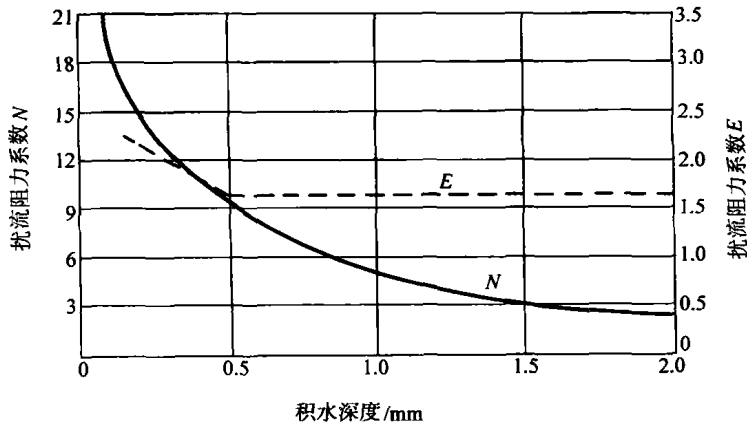


图 1-15 扰流阻力系数(N和E)与积水深度的关系曲线

在不同积水深度下，我们将式(1-10)计算出的扰流阻力与车轮滚动速度的关系与实际测量结果进行了比较，如图 1-16 所示。由图可以看出：斜交轮胎和子午线轮胎的测量值差别不大。

图 1-17 给出了两个不同胎面结构的轮胎在某湿路面行驶的胎面接地触水情况。其中图 1-17a 所示的车辆行驶速度为 80km/h，接水印迹长度约 12mm，而干接触印迹长度约 68mm；图 1-17b 所示的车速为 150km/h 时，接水印迹长度已达到 18mm；图 1-17c 所示的车速为 80km/h 时，由于车轮和路面间已经存在了一封闭的水层，故此胎面已无清晰的轮廓。

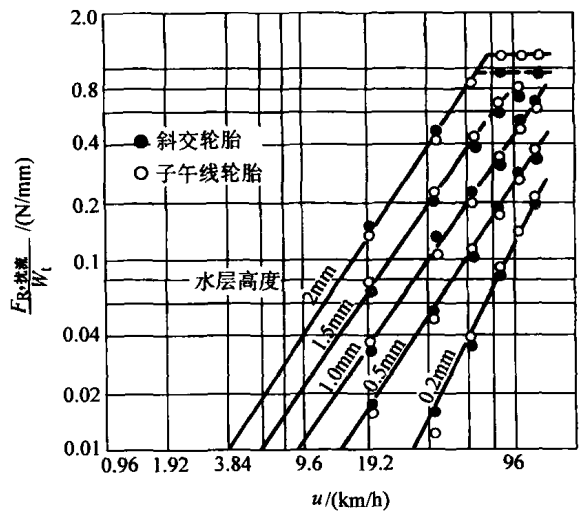


图 1-16 轮胎的扰流阻力与车轮滚动速度关系曲线

考虑以上介绍的扰流阻力，再加上干路面行驶的滚动阻力，就得到了湿路面上的轮胎滚动阻力，即

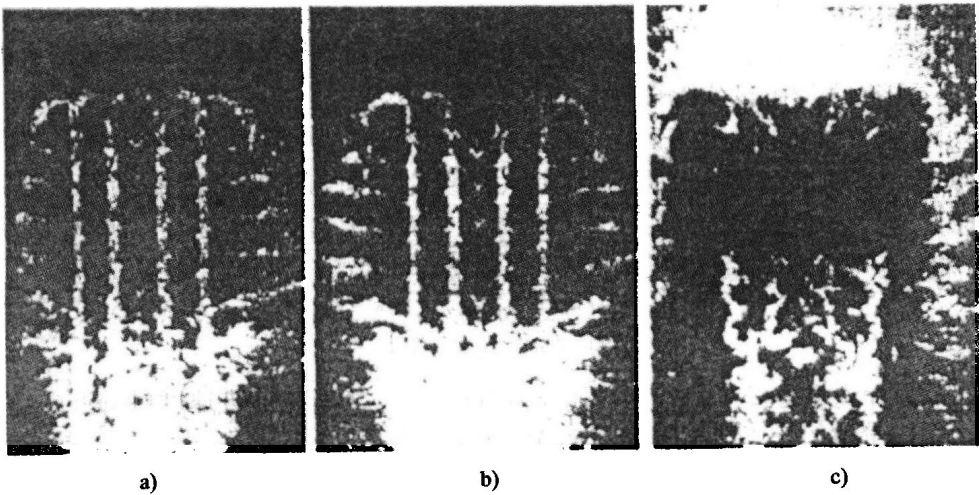


图 1-17 不同胎面结构轮胎的滑水现象

- a) 胎纹完整(胎面结构良好的轮胎,  $u_a = 80\text{km/h}$ )
- b) 胎纹基本完整(胎面结构良好的轮胎,  $u_a = 150\text{km/h}$ )
- c) 无完整胎纹(胎面结构差的轮胎,  $u_a = 80\text{km/h}$ )

$$F_{R,湿路} = F_R + F_{R,抗流} \tag{1-11}$$

### 三、轮胎侧偏阻力

前面讨论的轮胎滚动阻力是基于车轮前进方向垂直于车轴,且车轴平行于路面的假设条件。然而,侧向载荷和车轮定位情况都会改变以上假设条件,下面就不同情况分别讨论。

#### 1. 侧向载荷的影响

当受到侧向风或在坡度路面上滚动时,特别是在转弯工况时,车轮将在侧向载荷作用下滚动,这时车轮的运动方向与其回转平面将产生一个侧偏角,记为  $\alpha$ 。图 1-18 所示的俯视图说明了转弯过程中车轮受力情况,其中车轮所受离心力  $F_c$  垂直于运动方向,轮胎侧向力  $F_y$  垂直于车轮平面,车轮滚动阻力沿车轮平面方向。

因此,有侧偏时的车轮滚动阻力  $F'_{R,侧偏}$  包括侧向力  $F_y$  和无侧偏时的滚动阻力  $F_R$  在车轮运动方向的分量之和,即

$$F'_{R,侧偏} = F_R \cos\alpha + F_y \sin\alpha \tag{1-12}$$

为了更直观地看出侧偏角  $\alpha$  的附加影响,上式可改写为

$$F'_{R,侧偏} = F_R - F_R(1 - \cos\alpha) + F_y \sin\alpha \tag{1-13}$$

式(1-13)右边的后两项则代表了由轮胎侧偏角而引起的附加滚动阻力项,因而相应于某一特定车轮载荷,即可获得由侧偏角引起的附加滚动阻力系数

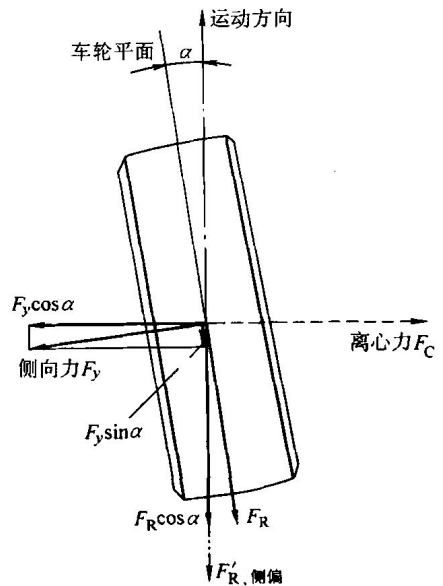


图 1-18 侧偏角作用下的车轮受力情况



$$f_{R,侧偏} = \frac{F_y \sin\alpha - F_R(1 - \cos\alpha)}{F_{z,w}} \quad (1-14)$$

将无侧向载荷的直线行驶工况下的滚动阻力系数  $f_R$  代入上式, 有

$$f_{R,侧偏} = \frac{F_y \sin\alpha}{F_{z,w}} - f_R(1 - \cos\alpha) \quad (1-15)$$

由于在小侧偏角情况下, 轮胎侧向力  $F_y$  与侧偏角  $\alpha$  近似成正比, 即

$$F_y = C_\alpha \alpha \quad (1-16)$$

式中,  $C_\alpha$  称为轮胎侧偏刚度。

结合式(1-15)和式(1-16), 并在小侧偏角情况下假定  $\cos\alpha \approx 1$ ,  $\sin\alpha \approx \alpha$ , 则由轮胎侧偏引起的附加滚动阻力系数为

$$f_{R,侧偏} = \frac{C_\alpha \alpha^2}{F_{z,w}} \quad (1-17)$$

轮胎侧偏角与由其引起的轮胎侧偏滚动阻力系数间的关系如图 1-19 所示。与表 1-1 中不同路面下车轮无侧偏时滚动阻力系数值比较可见, 当侧偏角  $\alpha$  小于  $2^\circ$  时, 轮胎的滚动阻力系数与直线工况下的数值相差不大(阶数相同); 而当侧偏角  $\alpha$  超过  $2^\circ$  时, 滚动阻力系数将成倍地增长。

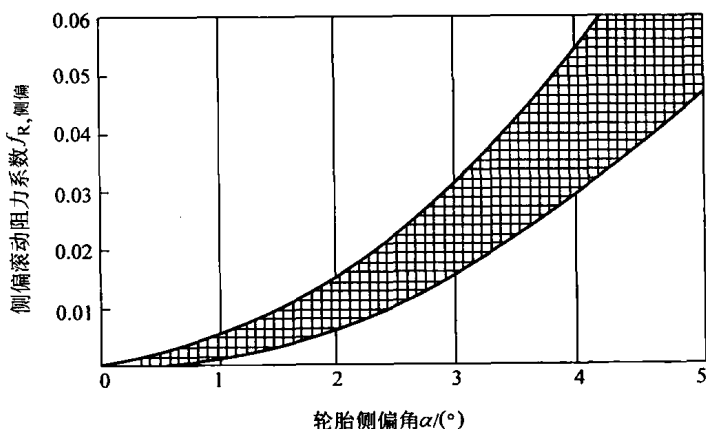


图 1-19 轮胎侧偏角与由其引起的轮胎侧偏滚动阻力系数间的关系

## 2. 车轮定位的影响

为了保证车辆良好的操纵稳定性, 一般要要求转向车轮有一定的前束角或外倾角。与前面提到的轮胎侧偏角相似, 车轮的前束和外倾都将使轮胎滚动阻力增加, 下面分别进行介绍。

(1) 车轮前束角 车轮前束角  $\psi_1$  是车轮中心平面水平轴线与车辆行驶方向之间的夹角, 其作用是保证车辆的直线行使性。对每一车轮而言, 即使车辆无外部侧向载荷作用, 车轮前束也可使在每一转向车轮产生侧偏角, 从而产生与运动方向相反的附加滚动阻力, 其原理如图 1-20 所示。

同样, 与侧偏角的分析方法相似, 我们可得到由车轮前束角产生的附加滚动阻力

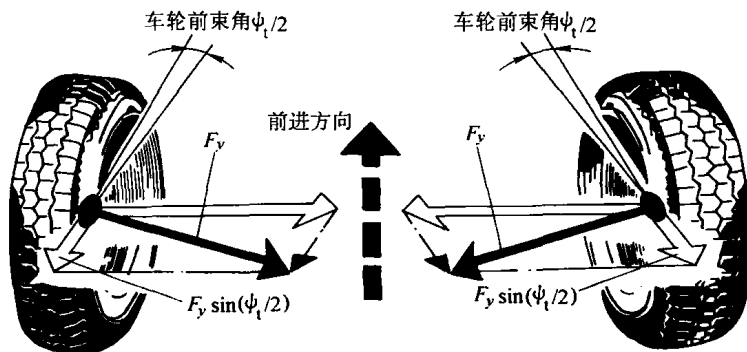


图 1-20 由车轮前束角产生的附加前束滚动阻力示意图