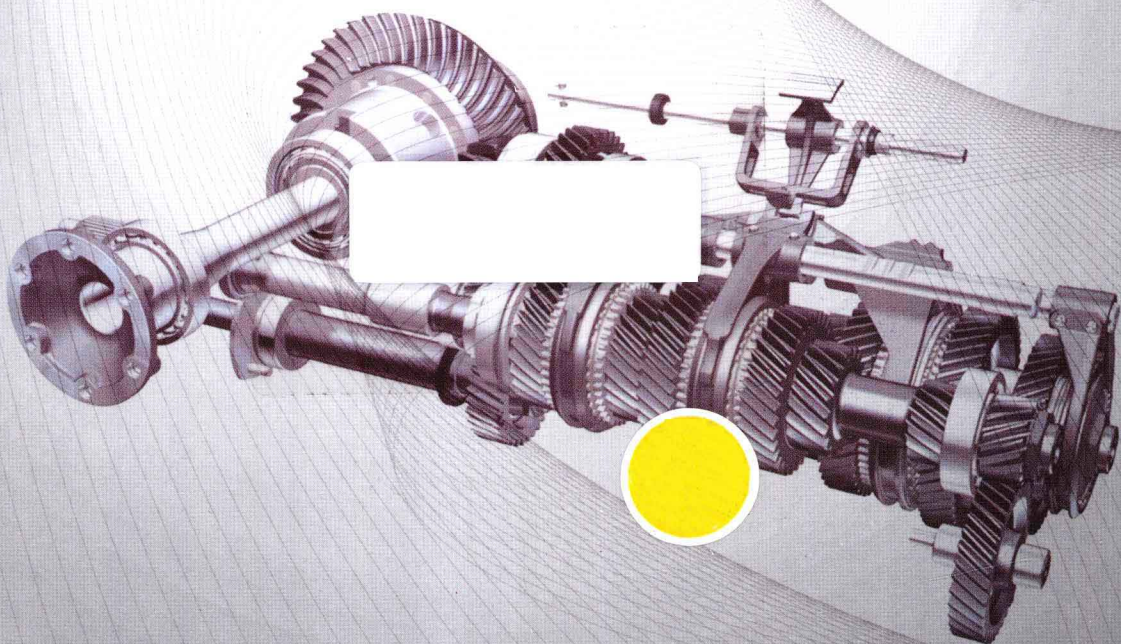


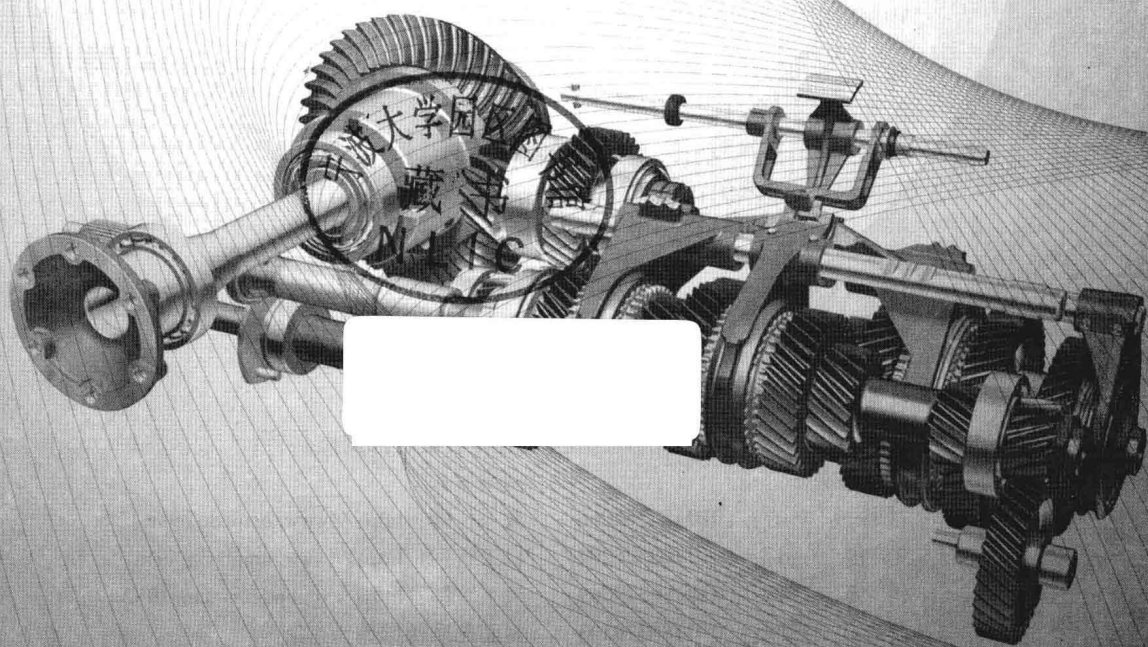
汽车工程 应用力学

韦竞秋 编著



汽车工程 应用力学

韦竞秋 编著



本书内容包括轮胎力学特性与轮胎、汽车的动力性、汽车的制动性、汽车的操纵稳定性和汽车空气动力学。作者力求使本书内容编排新颖、逻辑连贯、叙述通俗、深入浅出、重点突出,并注重理论联系实际。书中内容涉及汽车先进技术,如 ABS、BAS、4WS、VSC 等电控系统以及低风阻车身造型、主动悬架、半主动悬架、特殊性能轮胎、F1 赛车尾部扩散器等空气动力学套件等。

本书可作为普通高等学校面向应用型人才培养的本科及高职高专汽车专业师生的学习参考书,亦可作为从事汽车设计与试验、汽车运用的工程技术人员的辅助读物。

图书在版编目(CIP)数据

汽车工程应用力学/韦竞秋编著. —北京:机械工业出版社, 2013. 2

ISBN 978-7-111-41149-9

I. ①汽… II. ①韦… III. ①汽车工程—应用力学
IV. ①U461. 1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 008972 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:徐 巍 责任编辑:徐 巍

版式设计:霍永明 责任校对:陈延翔 肖 琳

封面设计:路恩中 责任印制:乔 宇

北京铭成印刷有限公司印刷

2013 年 4 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 25.25 印张 · 466 千字

0001—3000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-41149-9

定价: 69.80 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

社服务中心:(010)88361066

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010)68326294

机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010)88379649

机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010)88379203

封面无防伪标均为盗版

前 言

笔者在上学时喜欢力学，在实践工作中也喜欢用力学来分析和解释一些汽车运用中的现象。但总觉得有的汽车力学书籍写得过于理论，文字表达也不怎么通俗。因此总想，能不能把汽车力学写得通俗些，好让读者读懂，这就是笔者编写这本书的初衷。

本书分为5章：第1章 轮胎与轮胎力学特性；第2章 汽车的动力性；第3章 汽车的制动性；第4章 汽车的操纵稳定性；第5章 汽车空气动力学。笔者认为，这5章的内容与实际联系较紧密，所以编入本书。汽车的地面力学均与轮胎密切相关，因此将轮胎编入并作重点阐述。

本书融入较多插图，以配合理解所讲内容。本书还讲述了车轮制动器结构、制动力调节器、悬架、电控装置、低风阻系数轿车、高性能轮胎以及F1赛车的空气动力学套件等内容。另外，在每一章的末尾均设置了“讨论题”一节，以此作为本章学习的一种小结形式，同时也是理论联系实际的一种学习启发形式。

写书的目的莫过于让读者读懂，学习理论的目的莫过于应用。只有把书本的知识理解并变为自己的知识，才能够能动地改造客观世界。笔者只有站在读者的立场上才有可能把书编写好。基于这样的出发点，笔者力求使本书内容编排新颖、逻辑连贯、叙述通俗、深入浅出、重点突出。希望本书能给读者带来些益处，如果还能吸引更多的人来喜欢汽车力学，并参与讨论，那么本书就起到了抛砖引玉的作用。

在编写本书过程中，笔者所参考的主要文献已在末页一一注明，在此，笔者对以上参考文献、图表有关的作者表示衷心的感谢。

基于笔者的汽车理论水平有限，本书有误在所难免，恳请指正。

笔 者

目 录

前言

第1章 轮胎与轮胎力学特性 1

- 1.1 轮胎的纵向力学特性 1
 - 1.1.1 轮胎滚动阻力与滚动阻力系数 1
 - 1.1.2 轮胎道路阻力 8
 - 1.1.3 轮胎侧偏阻力 9
- 1.2 轮胎的垂向力学特性 10
 - 1.2.1 轮胎的垂向变形 10
 - 1.2.2 轮胎的刚度 11
 - 1.2.3 轮胎噪声 13
- 1.3 轮胎的侧向力学特性 14
 - 1.3.1 轮胎运动坐标系 14
 - 1.3.2 轮胎的侧偏现象 15
 - 1.3.3 轮胎的侧偏特性——侧偏力—侧偏角曲线 17
 - 1.3.4 轮胎的侧偏特性——侧偏回正力矩—侧偏角曲线 18
 - 1.3.5 轮胎侧偏特性的影响因素 18
 - 1.3.6 侧偏回正力矩的影响因素 22
- 1.4 轿车子午线轮胎 24
 - 1.4.1 轿车子午线轮胎的结构 24
 - 1.4.2 子午线轮胎与斜交线轮胎的结构差异 25
 - 1.4.3 轿车子午线轮胎的带束层 26
- 1.5 子午线轮胎的性能特点 27
- 1.6 轮胎的标志 33
 - 1.6.1 轮胎的扁平比 33
 - 1.6.2 轮胎的标志方法 34
- 1.7 胎面花纹 36
 - 1.7.1 花纹的基本功能 36
 - 1.7.2 各种花纹的附着性能特点 37
- 1.8 特殊性能花纹轮胎 39

- 1.8.1 防滑水花纹轮胎 39
 - 1.8.2 低噪声花纹轮胎 42
 - 1.8.3 冰雪路面防滑花纹轮胎 44
 - 1.8.4 全天候花纹轮胎 50
 - 1.8.5 不对称花纹轮胎 51
 - 1.8.6 单导向花纹轮胎 52
 - 1.9 F1赛车轮胎 53
 - 1.9.1 F1赛车轮胎的规格与种类 53
 - 1.9.2 F1赛车轮胎应具备的性能 55
 - 1.10 轮胎的磨损 56
 - 1.10.1 轮胎的正常磨损 56
 - 1.10.2 轮胎的异常磨损 57
 - 1.11 讨论题 59
 - 复习题 63
- ## 第2章 汽车的动力性 65
- 2.1 汽车动力性的评价指标 65
 - 2.2 汽车的动力性能 66
 - 2.2.1 轿车的动力性能 66
 - 2.2.2 世界著名跑车的动力性能 70
 - 2.3 汽车的驱动力与行驶阻力 76
 - 2.3.1 驱动力 76
 - 2.3.2 行驶阻力 80
 - 2.4 汽车行驶条件 84
 - 2.4.1 汽车行驶的驱动条件 85
 - 2.4.2 汽车行驶的附着条件 85
 - 2.4.3 汽车行驶的必要与充分条件 85
 - 2.4.4 附着率 86
 - 2.5 动力性的评价方法——驱动力与行驶阻力平衡图 88
 - 2.5.1 驱动力—行驶阻力平衡图 88
 - 2.5.2 驱动力—行驶阻力平衡图的应用 89
 - 2.5.3 动力特性图 91



| | | | |
|-----------------------------------|------------|---|------------|
| 2.5.4 动力特性图的应用 | 92 | 分配的重要性 | 132 |
| 2.6 动力功率与阻力功率的平衡 | 94 | 3.6.2 制动时前、后车轮地面法向反力的变化 | 132 |
| 2.6.1 功率平衡方程式 | 94 | 3.6.3 理想的前、后制动器制动力分配 | 133 |
| 2.6.2 功率平衡图 | 94 | 3.6.4 具有固定比值的前、后制动器制动力分配线 β | 135 |
| 2.7 影响汽车动力性的主要因素 | 95 | 3.6.5 同步附着系数 φ_0 | 136 |
| 2.7.1 发动机参数的影响 | 95 | 3.6.6 汽车在不同 φ 值路面上的制动过程分析 | 137 |
| 2.7.2 传动系参数的影响 | 96 | 3.6.7 同步系数 φ_0 的选择 | 141 |
| 2.7.3 汽车结构的影响 | 97 | 3.6.8 制动强度与附着系数利用率 | 142 |
| 2.7.4 底盘技术状况的影响 | 98 | 3.6.9 利用附着系数与制动效率 | 147 |
| 2.8 汽车的动力性试验 | 98 | 3.6.10 对前、后制动器制动力分配的规范要求 | 150 |
| 2.8.1 道路试验 | 98 | 3.6.11 发动机制动对制动力分配和制动效能的影响 | 151 |
| 2.8.2 室内试验 | 100 | 3.6.12 各类制动力辅助调节装置的性能特点 | 152 |
| 2.9 讨论题 | 100 | 3.6.13 制动防抱死系统 | 163 |
| 复习题 | 102 | 3.7 汽车制动性试验 | 170 |
| 第3章 汽车的制动性 | 104 | 3.7.1 道路试验(行车制动) | 171 |
| 3.1 汽车制动性的评价指标 | 104 | 3.7.2 室内制动试验 | 173 |
| 3.2 地面制动力与制动器制动力 | 105 | 3.7.3 驻车制动性能试验 | 174 |
| 3.2.1 地面制动力 | 105 | 3.8 讨论题 | 175 |
| 3.2.2 制动器制动力 | 105 | 复习题 | 182 |
| 3.2.3 地面制动力、制动器制动力与附着力之间的关系 | 106 | 第4章 汽车的操纵稳定性 | 184 |
| 3.2.4 硬路面的附着系数 | 107 | 4.1 汽车操纵稳定性概述 | 184 |
| 3.2.5 附着系数的主要影响因素 | 109 | 4.1.1 什么是操纵稳定性 | 184 |
| 3.3 评定制动效能的指标 | 112 | 4.1.2 汽车操纵稳定性的基本内容 | 184 |
| 3.3.1 制动减速度 | 112 | 4.1.3 车辆坐标系 | 185 |
| 3.3.2 制动距离 | 113 | 4.1.4 稳态响应和瞬态响应的基本概念 | 186 |
| 3.4 制动效能的恒定性 | 115 | 4.2 线性二自由度汽车模型 | 187 |
| 3.4.1 制动效能恒定性的主要指标 | 115 | 对前轮角输入的响应 | 187 |
| 3.4.2 影响抗热衰退性能的因素 | 116 | 4.2.1 线性二自由度汽车模型的基本假设 | 187 |
| 3.4.3 各种鼓式、盘式制动器的性能特点 | 120 | 4.2.2 线性二自由度汽车模型的运动微分方程 | 187 |
| 3.5 制动时汽车的方向稳定性 | 126 | 4.2.3 前轮角阶跃输入下的汽车 | |
| 3.5.1 制动跑偏 | 126 | | |
| 3.5.2 制动时后轴侧滑与前轴丧失转向能力的试验 | 128 | | |
| 3.5.3 单轴车轮抱死拖滑的运动分析 | 131 | | |
| 3.6 前、后制动器制动力的比例关系 | 132 | | |
| 3.6.1 前、后制动器制动力比例 | | | |



| | | | |
|-----------------------------------|-----|-------------------------------------|------------|
| 三种稳态转向特性 | 188 | 4.7.2 车轮前束 | 224 |
| 4.2.4 表征稳态转向特性的 主要参数 | 188 | 4.7.3 主销后倾角 | 225 |
| 4.2.5 参数对转向特性的 表征方法 | 189 | 4.7.4 主销内倾角 | 226 |
| 4.2.6 特征车速与临界车速 | 195 | 4.7.5 轿车车轮定位的发展趋势 | 228 |
| 4.2.7 前轮角阶跃输入下进入的 瞬态响应 | 196 | 4.8 悬架对汽车操纵稳定性的影响 | 229 |
| 4.3 汽车的侧滑与侧翻 | 202 | 4.8.1 概述 | 229 |
| 4.3.1 汽车的侧滑 | 202 | 4.8.2 各类被动独立悬架的 性能特点 | 231 |
| 4.3.2 刚性汽车的准静态侧翻 | 203 | 4.8.3 各种主动悬架的结构及 工作原理 | 236 |
| 4.3.3 带悬架汽车的稳态侧翻 | 205 | 4.8.4 半主动悬架 | 245 |
| 4.3.4 汽车的瞬态侧翻 | 206 | 4.8.5 特殊性能悬架机构 | 247 |
| 4.3.5 汽车的侧翻案例分析 | 207 | 4.8.6 独立悬架对汽车操纵 稳定性的影响 | 248 |
| 4.4 汽车操纵稳定性的道路试验 | 208 | 4.9 讨论题 | 256 |
| 4.4.1 转向轻便性试验 | 208 | 复习题 | 267 |
| 4.4.2 稳态转向特性试验 | 208 | 第5章 汽车空气动力学 | 270 |
| 4.4.3 转向瞬态横摆响应试验 | 209 | 5.1 汽车空气动力学的重要性 | 270 |
| 4.4.4 转向回正性能试验 | 209 | 5.1.1 气动力对汽车动力性的影响 | 271 |
| 4.4.5 转向盘角脉冲输入试验 | 210 | 5.1.2 气动力对汽车燃油 经济性的影响 | 272 |
| 4.4.6 转向盘中间位置的 操纵稳定性试验 | 210 | 5.1.3 气动力及气动力矩对汽车操纵 稳定性的影响 | 274 |
| 4.5 利用地面切向反力控制 汽车转向特性 | 212 | 5.2 空气动力学的基础理论 | 276 |
| 4.5.1 驱动力、地面制动力 对转向特性的影响 | 212 | 5.2.1 空气的基本物理属性 | 276 |
| 4.5.2 控制转向特性的地面切向反力 选择 | 213 | 5.2.2 气流运动的基本概念 | 281 |
| 4.5.3 地面切向反力的控制方法 | 213 | 5.2.3 伯努利方程 | 283 |
| 4.6 几种提高操纵稳定性的电控系统 | 216 | 5.2.4 粘性流的基础知识 | 284 |
| 4.6.1 防制动抱死系统(ABS) | 216 | 5.3 作用于汽车的气动力和氣动力矩 | 291 |
| 4.6.2 制动辅助系统(BAS) | 217 | 5.3.1 气动力的成分与计算 | 291 |
| 4.6.3 ABS—TCS 合一控制系统 | 217 | 5.3.2 氣动力矩的成分与计算 | 292 |
| 4.6.4 四轮转向电控系统(4WS) | 217 | 5.4 汽车的气动阻力 | 293 |
| 4.6.5 车辆稳定性控制系统(VSC) | 218 | 5.4.1 气动阻力的组成 | 293 |
| 4.6.6 电子稳定性程序 控制系统(ESP) | 219 | 5.4.2 气动阻力系数 | 293 |
| 4.7 车轮定位参数对操纵 稳定性的影响 | 222 | 5.4.3 不同车型的气动阻力系数 | 294 |
| 4.7.1 车轮外倾角 | 222 | 5.5 压差阻力与汽车外形 | 299 |
| | | 5.5.1 压差阻力的产生机理 | 299 |
| | | 5.5.2 气流分离线、基面与 基面阻力 | 301 |



| | | | |
|-------------------------------|-----|--|-----|
| 5.5.3 “短尾”理论 | 302 | 5.10.2 减小气动升力的主要措施 | 339 |
| 5.5.4 简单几何形体的 气动阻力系数 | 306 | 5.10.3 影响负升力翼效果的因素 | 348 |
| 5.5.5 阻力最小的理想形体 | 308 | 5.11 汽车的侧风稳定性 | 352 |
| 5.5.6 来流的分流与表面压强分布 | 308 | 5.11.1 侧向气流对汽车空气动力 特性的影响 | 352 |
| 5.5.7 影响压差阻力的主要部位 | 310 | 5.11.2 风压中心位置的重要性 | 352 |
| 5.6 诱导阻力与汽车外形 | 327 | 5.11.3 风压中心后置的办法 | 353 |
| 5.6.1 诱导阻力形成的机理 | 327 | 5.12 讨论题 | 353 |
| 5.6.2 产生涡流的部位 | 329 | 5.13 汽车空气动力学的应用实例 | 356 |
| 5.6.3 影响诱导阻力的部位 | 330 | 5.13.1 捷达车型的演变与 风阻系数 | 356 |
| 5.7 干扰阻力与汽车外形 | 332 | 5.13.2 我国自主品牌轿车风阻 系数的进步 | 357 |
| 5.7.1 干扰阻力概述 | 332 | 5.13.3 奥迪 100C2 改型为 100C3 的启示 | 358 |
| 5.7.2 引起干扰阻力的主要部位 | 333 | 5.13.4 不断创新的 F1 赛车空 气动力学套件 | 361 |
| 5.8 摩擦阻力 | 336 | 复习题 | 387 |
| 5.8.1 摩擦阻力与速度梯度的关系 | 336 | 附录 世界各类轿车(部分) | |
| 5.8.2 湍流并非全坏事 | 336 | 风阻系数 C_D 值 | 389 |
| 5.9 内部阻力 | 337 | 参考文献 | 394 |
| 5.9.1 内部阻力概述 | 337 | | |
| 5.9.2 降低内部阻力的措施 | 337 | | |
| 5.10 气动升力 | 337 | | |
| 5.10.1 汽车气动升力的原理 | 338 | | |

第 1 章 轮胎与轮胎力学特性

学习提示

轮胎是汽车各种性能的“落脚点”，汽车各种性能的发挥均与轮胎的性能密切相关。

学习要求

了解轮胎的地面力学特性，重点学习轮胎的侧偏特性及其影响因素；了解汽车滚动阻力的起因以及滚动阻力系数的影响因素；了解子午线轮胎、现代高性能轮胎的结构与性能特点；懂得轮胎的识别以及选配轮胎。

本章的前一部分着重阐述轮胎的地面力学特性，后一部分着重阐述轮胎的结构与功能。

轮胎是车辆的重要组成部分。它直接与地面接触，其作用是支承整车的重量；并与悬架共同缓冲来自路面的高低变化激励，以保证车辆具有良好的乘坐舒适性和行驶平顺性，保证车轮与路面具有良好的附着性，以提高车辆驱动性、制动性和通过性，为车辆提供充分的转向力。轮胎是一个复杂的粘弹性结构，具有明显的非线性特性。由于轮胎材料、结构及其与路面相互作用关系的复杂性，以及轮胎力学特性对车辆动力学的重要影响，因此有必要将轮胎与轮胎力学特性作为独立的章节来介绍。

轮胎地面力学特性主要包括纵向力学特性、垂向力学特性和侧向力学特性。下面分别叙述。

1.1 轮胎的纵向力学特性

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、道路阻力分量和轮胎侧偏阻力分量。其中，轮胎侧偏阻力分量是由轮胎的侧向载荷使轮胎侧偏而产生的附加轮胎纵向阻力；由不平路面、塑性路面和水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，因此通常将它们包含于车轮阻力中，并不单独列出。

本节主要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，对其影响因素进行讨论。

1.1.1 轮胎滚动阻力与滚动阻力系数

充气轮胎在平坦、干硬路面上作直线滚动时所受到的与滚动方向相反的阻力为本节所介绍的轮胎滚动阻力。



根据作用机理的不同,轮胎滚动阻力又可分解为弹性迟滞阻力、摩擦阻力和轮胎的风扇效应阻力等三部分。其中弹性迟滞阻力是最重要的组成部分。摩擦阻力是由于轮胎滚动时,圆弧的胎面在进入地面时将在纵向和横向上发生伸展成为一接触面,在胎面的伸展过程中与地面发生相对滑动而产生一定的摩擦力,由此产生了附加阻力。车轮在旋转运动时也遭受空气的阻力,它好比风扇扇风一样,扇得越快空气阻力越大,也导致汽车部分能量的损失,由此也产生了附加阻力。

试验表明,在车速为 128 ~ 152km/h 的范围内,轮胎的耗能 90% ~ 95% 是由内部迟滞作用引起的,而 2% ~ 10% 则归因于轮胎与地面的摩擦,仅有 1.5% ~ 3.5% 归因于自身旋转运动而引起的空气阻力(但已归类计入空气阻力中,在此可忽略不计)。由此可见,弹性迟滞阻力是滚动阻力最重要的组成部分。我们通常所称的滚动阻力指的就是弹性迟滞阻力。

下面着重介绍弹性迟滞阻力。

1. 弹性迟滞阻力

轮胎是个弹性体,但它不具有绝对弹性,在外力的作用下产生形变,当外力解除后外力对它所做的功不能完全收回。损失的这部分功是被轮胎内部参与变形的各种物质间相互摩擦生热所需要的能量消耗掉了。我们把弹性体的这种能量损失叫做弹性迟滞损失。假设轮胎具有绝对弹性,就不会产生迟滞损失,因为外力解除后做功的能量可以被全部收回;假设轮胎是绝对塑性体,则做功的能量全部不能收回,因为这种塑性变形属永久变形,外力解除后变形没有任何恢复,外力所做的功全部被消耗掉;假设轮胎是绝对刚性体,在外力作用下它不产生任何变形(位移),也就不存在能量损失。

弹性迟滞阻力的产生机理:充气轮胎在静态压缩作用下会产生变形与回弹,在此变形与回弹的过程中由于其内部的摩擦作用而引起能量损失。当轮胎在力或力矩的作用下滚动时,轮胎胎面上每一个单元的这种压缩与回弹的过程将周而复始地不断进行。对于这一过程所起的迟滞阻力,可用图 1-1 所示的“轮胎等效系统模型”来解释。在“模型”中,假定车轮胎面与轮辋之间都沿径向连接一些线性弹簧和阻尼单元来支撑;同样,也沿胎面切向排列一系列的弹簧和阻尼单元,以此来模拟轮胎。当这些单元进入与地面接触印迹时,其弹簧和阻尼就能充分作用,因而就产生了附加的摩擦效应,将它称之为弹性迟滞阻力。

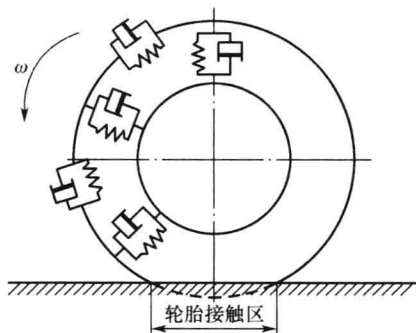


图 1-1 轮胎等效系统模型图

当轮胎等效系统模型滚动时,与接地对应的“弹簧-阻尼单元”便开始做功,并将转化为热。这时,所产生的弹性迟滞阻力等于消耗的阻尼功与行驶距离之比。将具有相同帘布材料的轮胎进行比较可知,帘布层数越多,轮胎的阻尼就越高,原因是相邻帘布层间的相对运动所产生的阻尼功越大。斜交线轮胎的帘布层层数多于同规格的子午线轮胎,所以滚动阻力较大。

2. 轮胎的周向变形

对于从动轮,周向变形分为三个阶段:对于同一轮胎单元,第一阶段是开始与地接触阶段,胎面在垂直方向上逐步进入压缩变形;第二阶段是进入接触中心,压缩变形最大;第三



阶段是逐渐脱离接触区域,胎面逐渐恢复(回弹)。对于驱动轮,在垂向载荷和切向力的同时作用下引起轮胎相应的变形,驱动转矩使轮胎变形区域的前半部被强制压缩;后半部被强制拉伸,如图1-2所示。轮胎的周向变形虽然没垂向变形那么明显,但驱动轮涉及的变形范围比较大,可达三分之一的周面,即从接地中心向前后各扩展 60° 之多。

轮胎的周向变形与路面的性质、轮胎的结构、充气压力以及行驶速度等因素有关,它对滚动阻力有很大的影响。

3. 滚动阻力偶矩的形成

假设路面坚硬平坦不变形,以非驱动轮为研究对象。在垂直载荷的作用下,轮胎因变形而与地产生了接触印痕。当车轮不滚动时,地面对车轮的法向反作用力在接触印痕上的分布呈前后对称状态,法向反作用力合力 F_z 的作用线与车轮法向载荷 W 重合。但当车轮滚动时轮胎周向发生了变形,由于轮胎接地的前面部分的变形增大,而接地的后面部分的变形减小,使得地面对车轮的法向反作用力在接触印痕上的分布就不呈前后对称了,处于压缩过程的接地前部地面法向反作用力大于恢复过程的后部地面法向反作用力。如图1-3所示,在 X 轴上,靠原点 O 的法向压力较大,而离原点往右的法向压力逐渐减小。

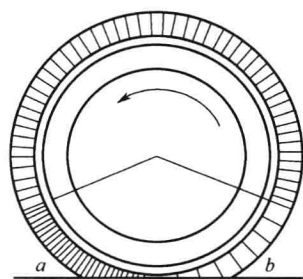


图1-2 驱动轮传递转矩时的周向变形
a—压缩区 b—伸长区

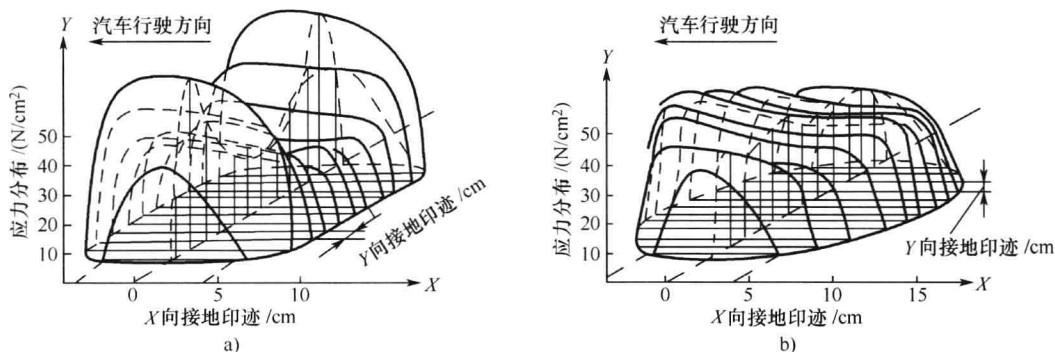


图1-3 滚动轮胎接地印迹内的压力分布
a) 斜交线轮胎 b) 子午线轮胎

由于接触印痕的前部法向压力大于后部法向压力,使得地面法向反作用力的作用点前移,即地面法向反作用力的合力 F_z 的作用点相对于轮心法线向前移动了一个距离 a ,如图1-4a所示。这个距离 a 随着弹性迟滞损失的增大而变大,也就是随着轮胎周向变形的增大而增大。通俗地说,轮胎越充气,周向变形越大,这个前移距离 a 就越大。因此,轮胎变形大就意味着迟滞损失大。合力 F_z 与车轮法向载荷 W 大小相等方向相反,且相互间有一个距离 a ,于是便形成了一对力偶。 F_z 绕车轮中心有一个力矩 $T_f = F_z a$ 产生,是它阻碍了车轮的滚动,故把此力矩 T_f 称为滚动阻力偶矩。实际上,真正意义的滚动阻力并不具体存在,实际存在的是滚动阻力偶矩。

上述可以这样简单地描述:轮胎滚动前,地面对轮胎的法向反作用力的作用线通过车轮中心;但车轮一开始滚动,由于轮胎接地的前部周向变形大于后部,所以地面法向反作用力



的作用点前移了一个距离，它绕轮心产生了一个力矩，这个力矩方向与车轮转向相反，阻碍了车轮的滚动，所以称之为滚动阻力矩。人用力去推车时，当车轮即将滚动却又松手时车轮被弹回来，其原因就是这个滚动阻力矩作用的缘故。

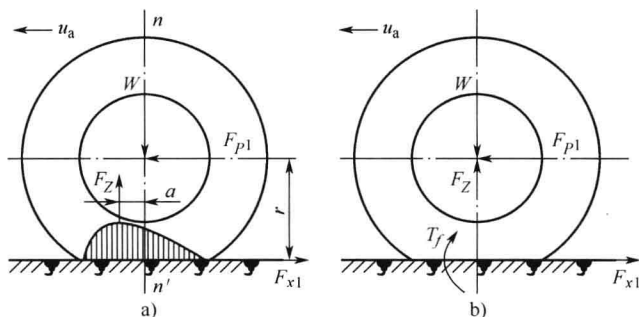


图 1-4 从动轮在硬路面上滚动时的受力分析

a) 受力分析 b) 力矩分析

4. 滚动阻力系数

从上面得知 T_f 为滚动阻力偶矩，把它标在受力图上则如图 1-4b 所示。滚动阻力 F_f 可表达为

$$F_f = \frac{T_f}{r}$$

由于滚动阻力偶矩的存在，如果欲使从动轮作等速滚动，则必须在车轮中心施加一个推力(驱动力) F_{p1} ，使它与地面的切向反作用力 F_{x1} 构成一力偶矩来平衡滚动阻力偶矩，即

$$F_{x1}r = T_f$$

故推力 F_{p1} 为

$$F_{p1} = \frac{T_f}{r} = \frac{F_z a}{r} = \frac{W a}{r}$$

若令 $f = \frac{a}{r}$ ，则

$$F_{p1} = fW \quad \text{或} \quad f = \frac{F_{p1}}{W} \quad (1-1)$$

式中 f ——滚动阻力系数。

可见，滚动阻力系数是车轮在一定的条件下滚动时所需要的推力与车轮载荷之比，亦即单位汽车重力所需的推力。换言之，滚动阻力等于滚动阻力系数与车轮载荷的乘积。即

$$F_f = fW \quad (1-2)$$

而且

$$F_f = \frac{T_f}{r}$$

从上式亦可看出，若 T_f 不变，车轮大的汽车，其滚动阻力较小，推车时较省力。

这样，我们在分析汽车车轮滚动阻力时，就不必具体计算车轮滚动时所受的滚动阻力偶矩，而只要知道滚动阻力系数便可求出滚动阻力。这有利于动力性分析的简化。必须说明的是，滚动阻力仅是个数值，无法将它在受力图上画出来。

在进行动力性分析时，若无试验得到的准确滚动阻力系数，可利用经验公式进行估算。



例如，良好路面上的滚动阻力系数 f 为

$$f = 0.0076 + 0.000056u_a$$

图 1-5 给出了根据此式计算得到的载货汽车轮胎滚动阻力系数值。图上还有依据其他经验公式计算得到的滚动阻力系数值。

5. 滚动阻力系数的影响因素

从式(1-1)的推导中得知，滚动阻力系数的大小与轮胎半径 r 和“前移距” a 的变化有关，即

$$f = \frac{a}{r}$$

(1) 路面性质对滚动阻力系数的影响。滚动阻力系数 f 的数值是通过试验来确定。表 1-1 给出了在 50km/h 车速下的不同性质路面上测得的滚动阻力系数 f 的数值。

表 1-1 各种不同性质路面的滚动阻力系数 f 的数值 (50km/h 车速)

| 路面 | 滚动阻力系数 | 路面 | 滚动阻力系数 |
|----------|---------------|---------|---------------|
| 良好沥青或混凝土 | 0.010 ~ 0.018 | 压紧土路、干燥 | 0.025 ~ 0.035 |
| 一般沥青或混凝土 | 0.018 ~ 0.020 | 压紧土路、雨后 | 0.050 ~ 0.150 |
| 碎石 | 0.020 ~ 0.025 | 干沙 | 0.100 ~ 0.300 |
| 良好卵石 | 0.025 ~ 0.030 | 湿沙 | 0.060 ~ 0.150 |
| 坑洼卵石 | 0.035 ~ 0.050 | 结冰路面 | 0.015 ~ 0.030 |
| 泥泞土路(雨季) | 0.100 ~ 0.250 | 压紧雪路 | 0.030 ~ 0.050 |

在松软路面上，轮胎和路面均发生变形，均消耗汽车一部分能量。虽然轮胎变形量相对于硬路面小些，但两者变形所消耗的能量之和总是比较大，这就是松软路面滚动阻力系数比硬路面较大的原因。

(2) 速度对滚动阻力系数的影响 速度对滚动阻力系数的影响如图 1-6 所示。随着车速的增加，滚动阻力系数起初只是稍有增加，而随后逐渐随着车速呈现显著增加趋势。

速度对于滚动阻力的影响在于轮胎受力压缩后的恢复不充分(意味着轮胎半径 r 减小)，而且速度越快恢复越不充分。恢复不充分必然造成轮胎的周向变形量增大(亦即地面法向反作用力的前移距 a 增大)，导致弹性迟滞损失增大(亦即滚动阻力系数增大)，直至发展到“驻波”的生成。图 1-6 中三种不同速度级别的子午线轮胎的最高速度分别为：S 级 180km/h，H 级 210km/h，V 级 240km/h。它们之间的滚动阻力系数变化的差别主要在于它们周向刚度的差别；而轮胎周向刚度的大小要与速度级别设计相适应，并付诸实现于制造。H 级、V 级轮胎属于高速或超

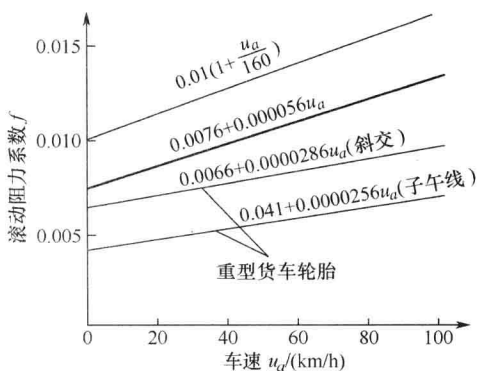


图 1-5 经验估算的货车轮胎滚动阻力系数

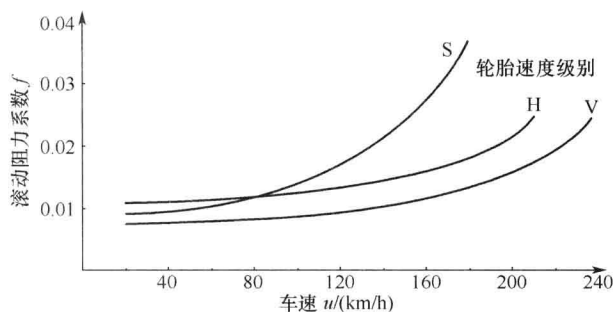


图 1-6 车速对滚动阻力系数的影响

速的。它们之间的滚动阻力系数变化的差别主要在于它们周向刚度的差别；而轮胎周向刚度的大小要与速度级别设计相适应，并付诸实现于制造。H 级、V 级轮胎属于高速或超



高速轮胎,在设计和制作时对于周向刚性要求较高,尤其是对带束层的制作要求较高,因此它们具有良好的周向刚性,在滚动时周向变形随速度变化较小,因而弹性迟滞损失较小,削弱了“驻波”形成的趋势,只有在接近极限速度(最高速度)时滚动阻力才会有显著增加。而速度级别较低的S级轮胎,其周向刚性差些,刚度小些,因此滚动阻力系数随速度增大就快些。

在转弯行驶时,轮胎发生侧偏现象,滚动阻力大幅增加。图1-7给出了总质量为34.5t的半挂车绕半径为33m的圆周行驶时,滚动阻力增长的情况。试验表明,这种由于转弯行驶所增加的滚动阻力已接近直线行驶时的50%~100%。但在一般的动力分析中,常常不考虑由转弯所增加的阻力。

尤其是对带束层的制作要求较高,因此

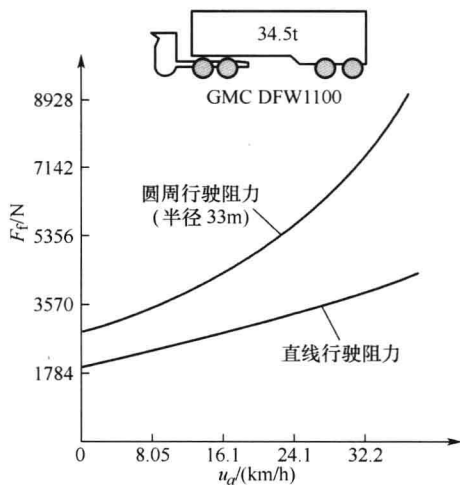


图1-7 转弯时滚动阻力与车速的关系

(3) 轮胎结构与材料对滚动阻力系数的影响

轮胎按结构的不同分为斜交线轮胎和子午线轮胎两大类。子午线轮胎与斜交线轮胎在结构上的最主要区别在于胎体帘线排列方向不同与帘线层层数的不同;另外则是子午线轮胎在胎体与胎冠层之间设置有带束层,而斜交线轮胎没有带束层(具体详见本章有关内容)。

由于子午线轮胎胎体帘线与中心周线呈90°平行排列,后层与前层平行重叠,因此使胎体具有较高的强度,使得帘线层的层数得以减少(通常为1~2层)。胎体层数少则使胎侧变得较柔软,弹性较好,在轮胎滚动屈挠过程中参与变形的材料较少,因而弹性迟滞损失较小,滚动阻力系数较小。

斜交线轮胎是用传统工艺制作的轮胎,胎体帘线方向与中心周线呈35°~45°斜向排列,后层与前层互为交叉,为了保证胎体的强度,通常层数为偶数层——2层或4层。由于胎体帘线层数较多,胎侧显得比较僵硬,弹性较差,在滚动屈挠过程中参与变形的材料较多,因而弹性迟滞损失较大,滚动阻力系数较大。

实验表明,子午线轮胎的滚动阻力比斜交线轮胎小25%~30%。在图1-8中,曲线③代表了规格为175R14子午线轮胎滚动阻力系数随速度的变化规律,它在接近最高速度之前滚动阻力系数一直呈平缓地增大;而代表斜交线轮胎的曲线①,滚动阻力系数不仅随车速增大较快,而且在任何速度下总是比子午线轮胎高出许多。

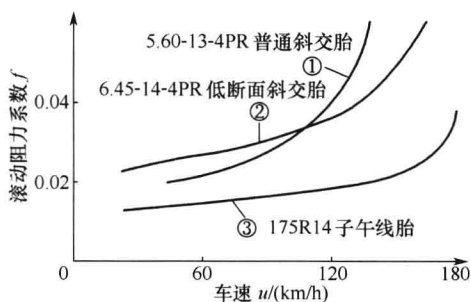


图1-8 不同结构轮胎的滚动阻力系数

带束层是子午线轮胎独有的结构(图1-9),它的选材与编织十分讲究。带束层的帘线一般为钢丝,带束层犹如钢丝环紧箍着胎体周面,使胎冠层具有较强的刚度,从而使轮胎变成刚柔兼有的弹性体,即纵向刚度大、径向弹性好。它的存在对汽车能获得较高的极限速度起着积极的决定性的作用。它好比坦克的履带,即使是高速滚动,接地胎面周向变形仍然较小,因而弹性迟滞损失较小,滚动阻力较小。



轿车子午线轮胎带束层的骨架材料种类比较多,采用最为普遍的是钢丝帘线,还有人造丝、芳纶、玻璃纤维等纤维帘线。带束层的结构形式也是多样化,其中常见的有:普通叠层式——用于速度级别较低和扁平系列高的轿车子午线轮胎;钢丝/纤维混合式——用于较高速度级别和扁平系列低的轿车子午线轮胎;折叠式——通常用于高速度级别(如H、V级)的轿车子午线轮胎,它可以增强带束层边端的刚性,从而提高胎面磨耗的均匀性、行驶稳定性和驻波发生的临界速度;包边式——它能使带束层具有足够的刚性和较长的使用寿命。编织式采用新研发材料芳纶作帘线,它对改善高速性能、转弯性能和提高耐磨性能均有明显作用。

轮胎的扁平比(高宽比)越小,其滚动阻力就越小(图1-10)。

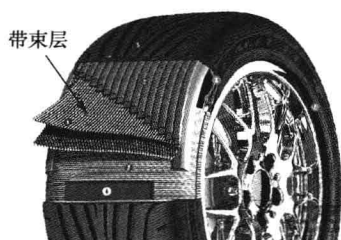


图1-9 某轿车子午线轮胎的带束层

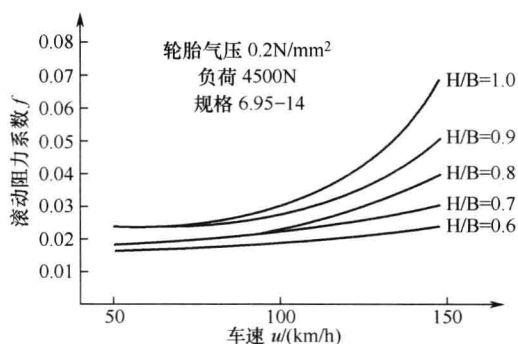


图1-10 轮胎扁平比与滚动阻力的关系

(4) 充气压力对滚动阻力系数的影响 如果路面、轮胎结构、行驶速度是相对不变的因素,那么轮胎的充气压力则是一个比较现实的因素。可以想象,当轮胎缺气时人推车是什么样的感受,当汽车拖着气压不足的轮胎一路跑下去又是什么状况?

图1-11给出了滚动阻力系数与充气压力的关系曲线。轮胎的充气压力对滚动阻力影响很大。当气压降低时,在硬路面上轮胎变形大,滚动时弹性迟滞损失有很大增加。反之,当气压升高时,滚动阻力系数明显降低。若从曲线首末的充气压力所对应的滚动阻力系数来看,两者相差就更大。

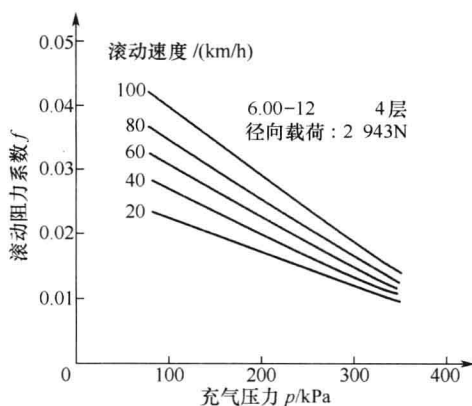


图1-11 滚动阻力系数与充气压力的关系

同时从图中也可以看出,对于斜交线轮胎,在同一充气压力下,速度对滚动阻力影响也很大,尤其轮胎处于低气压时。因此,在汽车使用中为了提高经济性需要考虑轮胎的正常气压范围。若轮胎没有受过损伤,使用上限正常气压是比较有利的,它既可以减小滚动阻力又可以提高车速。但如果轮胎内气压过高也有其弊,它会使接地面积减小、压强增大,滑移率增大,损害了附着性能。

6. 轮胎的“驻波”现象

“驻波”也叫静止波,也可以通俗地理解为保持在胎面上传播的波,如图1-12所示。



轮胎在高速运转的情况下,由于振动频率过高,致使离开了与地接触区域的胎面变形来不及回弹恢复。轮胎的转速越高,胎面的离心力越大,胎面的变形越来越来不及回弹恢复,从而残留在胎面上形成驻波。其结果是:压缩变形过程中所吸收的能量几乎不能释放回收,弹性迟滞损失很大。不能回收的能量大部分转化为热能,致使胎温迅速升高,内压迅速增大。如此恶性循环,几分钟之内可以导致轮胎爆破(图 1-13)。

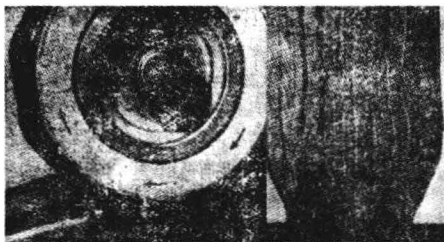


图 1-12 轮胎驻波的情形



图 1-13 车轮高速爆破的情形

由此可见,胎侧壁较厚、弹性较差的斜交线轮胎更容易发生驻波现象。相比之下,子午线轮胎显得更为优越,它速度级别可高达 Y 级(300km/h)和 Z 级(大于 240km/h),这是斜交线轮胎所望尘莫及的。选用速度级别比原车高一级的轮胎对防止驻波发生更为有效,但最好的方法还是把车速控制在离发生驻波临界速度适当低的范围内。

7. 制定轮胎速度级别的依据

为了避免驻波的发生,必须对轮胎的最高速度加以限制,轮胎的最高速度必须低于轮胎发生驻波的临界速度,这就是制定轮胎速度级别的最主要依据。所以每种规格的子午线轿车轮胎都在胎侧上标注有速度级别,表明该轮胎的实际行驶速度只允许在该级别速度范围以内。速度级别与对应的允许速度如表 1-4 所示,例如速度等级为 V 级的轮胎,其允许的最高速度为 240km/h。

轮胎的速度级别是速度性能的标志之一。轮胎高速性能好表明该轮胎既适合高速行驶,而其他性能又不因速度的提升而出现太大的削弱,如附着性能、耐磨性能、操控稳定性、滚动阻力等。

1.1.2 轮胎道路阻力

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、塑性路面和水湿路面均可使轮胎滚动阻力增加,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. 不平路面的道路阻力

车辆行驶过程中,路面的微小不平激励可由轮胎缓冲和吸收。此外,通过悬架弹簧和减振器使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。这说明当车轮作弹性跳动时,弹性单元在弹性恢复过程中释放的能量比压缩过程所做的功少,其减小的数量相当于阻尼功的大小。

2. 塑性路面的道路阻力

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



时, 将使路面产生清晰可见的车辙, 由此引起附加的车轮阻力由压实阻力、推土阻力、剪切阻力等三部分组成(图 1-14)。

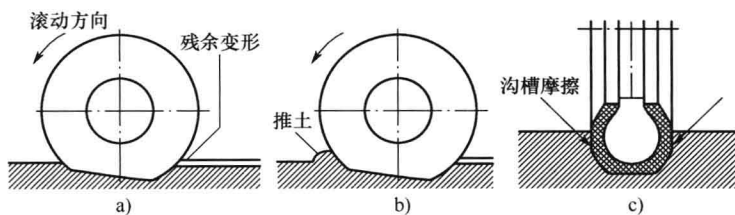


图 1-14 塑性路面产生的轮胎滚动阻力示意图

a) 压实阻力 b) 推土阻力 c) 剪切阻力

3. 水湿路面的道路阻力

轮胎在水湿路面上涉水的示意图如图 1-15 所示。要使轮胎胎面与路面接触, 轮胎必须穿透水层。在水膜区, 滚动轮胎只是将大部分水挤走, 实际上没有接触路面; 在过渡区; 胎面部分接地面, 且轮胎已产生变形; 在直接接触区, 胎面与路面直接接触, 只有少量的水从胎面花纹挤出(图 1-15), 在直接接触区里产生能量转移。

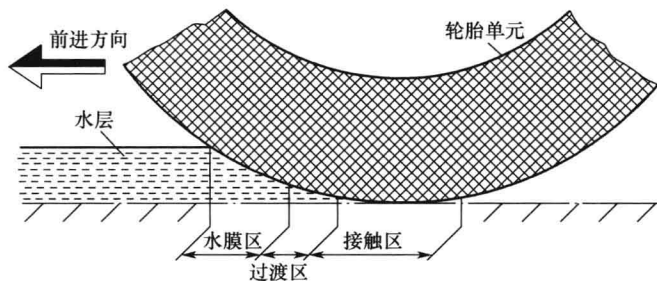


图 1-15 在水湿路面上轮胎涉水区示意图

在涉水区内, 为了排除水的干扰, 必须克服所谓的“扰流阻力”。试验表明, 扰流阻力几乎完全依赖于单位时间内排开的水体积; 而与轮胎性能、充气压力或轮胎负荷等几乎没有多大关系。单位时间的排水体积取决于路面积水深度 h 、轮胎宽度 W_t 和车速 u_w 。扰流阻力 $F_{R, \text{扰流}}$ 可通过下面经验公式计算:

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

式中, $F_{R, \text{扰流}}$ 单位为 N , W_t 单位为 cm , u_w 单位为 km/h , N 、 E 为扰流系数, 其数值取决于积水深度, 它们与积水深度的关系曲线如图 1-16 所示。

1.1.3 轮胎侧偏阻力

前面讨论的轮胎滚动阻力是基于沿汽车纵轴线方向行驶, 且车轴平行于路面的假设条件。然而, 侧向载荷和车轮定位

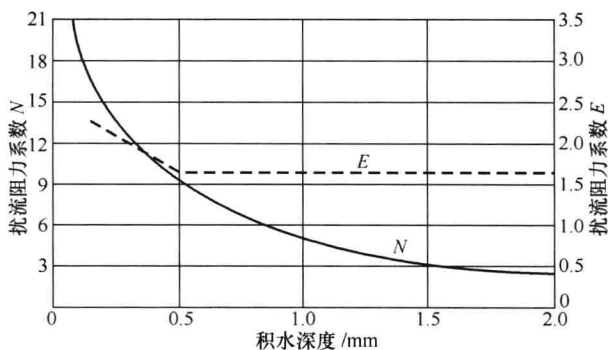


图 1-16 扰流阻力系数(N 和 E)与积水深度的关系曲线