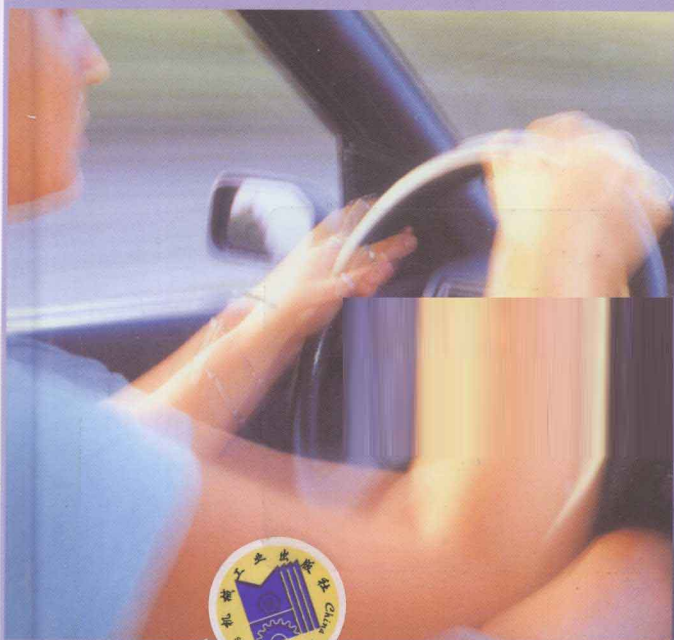


汽 / 车 / 先 / 进 / 技 / 术 / 译 / 丛

# 车辆操纵动力学

## Vehicle Handling Dynamics

(日) Masato Abe 著  
喻凡 译



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

汽车先进技术译丛

---

# 车辆操纵动力学

## Vehicle Handling Dynamics

---

(日) Masato Abe 著  
喻凡 译

---



机械工业出版社

车辆动力学是评价车辆的驾驶特性、效率和主动安全性的关键。了解车辆的受力与运动、操纵特性、轮胎特性、驱动技术和驾驶人对车辆的操纵,这对车辆的设计、开发和优化是不可缺少的。

基于车辆动力学理论的阐述,本书“操纵动力学”为读者建立了完整的动力学方程,为车辆关键部件的设计提供了详细的理解。在 MATLAB 工具箱的支持下,对影响车辆动力学的关键领域都进行了分析,包括轮胎力学、操纵系统、车辆侧倾、驱动与制动、四轮驱动,以及受车辆和驾驶人协调控制影响的车辆动力学与可控性等方面的问题。

本书可以帮助汽车行业相关领域技术人员更好地理解关键技术问题,也可供高等院校相关专业的老师和学生阅读参考。

Vehicle Handling Dynamics

M. Abe and W. Manning

ISBN: 978-1-8561-7749-8

Copyright© 2009 by Elsevier. All rights reserved.

Authorized Simplified Chinese translation edition published by the Proprietor.

ISBN: 978-9-812-72914-9

Copyright© 2012 by Elsevier (Singapore) Pte Ltd and China Machine Press.

All rights reserved.

Published in China by China Machine Press under special arrangement with Elsevier (Singapore) Pte Ltd. This edition is authorized for sale in China only, excluding Hong Kong SAR and Taiwan. Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本书简体中文版由 Elsevier (Singapore) Pte Ltd. 授予机械工业出版社在中国大陆地区(不包括香港、澳门特别行政区以及台湾地区)出版与发行。未经许可之出口,视为违反著作权法,将受法律之制裁。

本书封底贴有 Elsevier 防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。

北京市版权局著作权合同登记号:01-2011-2313。

## 图书在版编目(CIP)数据

车辆操纵动力学/(日)安部正人著;喻凡译.

—北京:机械工业出版社,2012.6

(汽车先进技术译丛)

书名原文:Vehicle Handling Dynamics

ISBN 978-7-111-38407-6

I. ①车… II. ①安…②喻… III. ①汽车—  
动力学 IV. ①U461.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 105247 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:何士娟 责任编辑:何士娟 孙鹏

责任校对:肖琳 封面设计:鞠杨

责任印制:乔宇

北京铭成印刷有限公司印刷

2012 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 18.5 印张 · 270 千字

0001—3000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-38407-6

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

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010)68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010)88379649

读者购书热线:(010)88379203

封面无防伪标均为盗版

---

*This book is dedicated to the memory of  
Professor David Crolla*

谨以此书献给我们怀念的  
大卫·克罗拉教授

Masato Abe Warren Manning Fan Yu  
安部正人 瓦润·曼宁 喻凡

In September of 2011 in Cambridge, England

二〇一一年九月于英国剑桥

---

## 前 言

本书旨在向读者介绍汽车操纵动力学方面的基本理论和一些应用实例，适合作为车辆工程专业本科生和研究生的汽车动力学教材。同时，本书也可作为汽车动力学与控制、底盘设计与开发等领域的研发人员和工程师的参考书籍。

本书所涉及的车辆运动均由轮胎力引起，而轮胎力又是由车辆本身的运动产生的。根据驾驶人的意图，车辆可以在地面上以任意方向运动，这点与飞行动力学和船舶动力学相似。

本书第1章定义了书中所研究的车辆运动。第2章考察了轮胎力学，由于车辆的运动取决于轮胎的受力情况，因此第2章是整本书的基础。然而，即使读者对轮胎力学方面的一些具体描述感到难以理解，仍可跳过第2章继续学习，而不会影响对汽车动力学的基础理论的理解。在第3章中，通过采用一个两自由度模型讲解了汽车动力学的基本理论。第4章仍然基于这个模型描述了外部干扰力作用下车辆的运动。对一辆可在地面上自由运动的车辆来说，这样的运动显然是不可避免的。第5章研究了转向系统对于车辆运动的影响。第6章描述了车身侧倾对车辆动力学的影响。第7章讨论了车辆的纵向运动对其侧向运动的影响。第8章介绍了具有主动控制的车辆的相关动力学基础知识。我们知道，车辆的运动通常是由人（即驾驶人）所控制的，第9章描述了有关由驾驶人控制的车辆运动方面的内容，而第10章则阐述了驾驶人对操纵性能的评价与车辆动力学特性之间的关系。

对于只需了解车辆动力学以及驾驶人特性方面基础理论的读者，可在阅读第1~4章之后直接跳到第9章。而对那些希望详细学习车辆动力学的读者，则可根据个人兴趣继续阅读第5~10章。

本书的最初版本由作者以日文撰写并在日本出版，随后曾由作者的一名硕士研究生 Y. W. Chai 将其译成英文。作者在书中又加入

了一些新内容，如在每章中添加了例题以及每章后所留的习题。  
W. Manning 重新修改了整本书的英文版本。

出版流程是在作者的老朋友 D. A. Crolla 的建议下进行的。在整个出版发行过程中，他始终如一地给予了我们宝贵的意见。

不得不说，没有上述三位的支持本书难以出版。在此，作者对他们为本书的出版所作的贡献深表感激。

作者还要感谢他的以前的硕士研究生 J. Ishio，他为本书协助编写了各章中的例题。此外，还要特别感谢 Yokohama 橡胶有限公司，感谢他们为本书第 2 章提供的那些轮胎数据。

最后，作者还要感谢 Elsevier 科技书籍出版社的编辑和出版人员，感谢他们为本书出版所付出的努力。

Masato Abe  
2009 年 3 月

## 符 号

为方便读者进行阅读，本书自第3~10章将统一使用以下符号作为车辆动力学表述中的基本符号，一般不再对此加以说明。然而，当必须用这些符号表达其他意义时，我们会在章节中所有使用之处特别加以进行注明。

$m$ : 车身质量

$I$ : 车辆的横摆转动惯量

$l$ : 轴距

$l_f$ : 车辆质心到前轴的距离

$l_r$ : 车辆质心到后轴的距离

$K_f$ : 前轮的侧偏刚度

$K_r$ : 后轮的侧偏刚度

$V$ : 车速

$\delta$ : 前轮转向角

$\beta$ : 车辆质心侧偏角

$r$ : 横摆角速度

$\theta$ : 横摆角

$x$ : 表示车辆的纵向

$y$ : 表示车辆的侧向及侧向位移

$t$ : 表示时间

$s$ : 拉普拉斯变量

若在每章使用了上述符号以外的符号时，我们会在该章第一次使用时给予说明。

值得注意的是， $\ddot{x}$  和  $\ddot{y}$  通常用来表示变量  $x$  和  $y$  对时间的二次导数，但本书中为方便起见，用其分别表示车辆的纵向和侧向加速度。另外， $\delta(s)$  一般用来表示以  $s$  为自变量的函数，但本书中用来表示对  $\delta$  进行的拉普拉斯变换，并对所有变量通篇均以该方式表示之。

# 目 录

前言  
符号

第 1 章 车辆动力学与控制	1
1.1 对车辆的定义	1
1.2 四轮车辆简化模型	1
1.3 对车辆运动的操纵	3
第 2 章 轮胎力学	4
2.1 引言	4
2.2 轮胎侧向力的产生	4
2.3 轮胎侧偏特性	8
2.4 驱动和制动情况下轮胎的侧偏特性	28
2.5 轮胎的动态侧偏特性	40
习题	44
参考文献	45
第 3 章 车辆动力学基础	46
3.1 引言	46
3.2 车辆运动方程	46
3.3 车辆的稳态转向	60
3.4 车辆的动态特性	86
习题	119
参考文献	120



<b>第 4 章 外部干扰引起的车辆运动</b> .....	121
4.1 引言 .....	121
4.2 质心侧向力所引起的车辆运动 .....	121
4.3 侧风引起的车辆运动 .....	139
4.4 结论 .....	149
习题 .....	150
参考文献 .....	151
<b>第 5 章 转向系与车辆动力学</b> .....	152
5.1 引言 .....	152
5.2 转向系模型与运动方程 .....	152
5.3 转向系特性对车辆运动的影响 .....	154
习题 .....	165
参考文献 .....	166
<b>第 6 章 车身侧倾与车辆动力学</b> .....	167
6.1 引言 .....	167
6.2 侧倾几何学 .....	167
6.3 车身侧倾与车辆动力学 .....	175
6.4 考虑侧倾的运动学方程 .....	182
6.5 侧倾对车辆动力学的影响 .....	194
习题 .....	198
参考文献 .....	198
<b>第 7 章 驱动和制动时的车辆运动</b> .....	200
7.1 引言 .....	200
7.2 包含纵向运动的运动方程 .....	200
7.3 车辆的准稳态转向 .....	201
7.4 车辆转向的瞬态响应 .....	208

---

<b>第 8 章 车辆动力学主动控制</b> .....	213
8.1 引言 .....	213
8.2 附加后轮转向的车辆运动 .....	213
8.3 使侧偏角为零的后轮转向控制 .....	221
8.4 基于后轮转角的横摆角速度模型 .....	223
8.5 前、后轮转向主动控制 .....	225
8.6 车辆运动的直接横摆力矩控制(DYC) .....	229
参考文献 .....	240
<b>第 9 章 驾驶人操纵的车辆运动</b> .....	241
9.1 引言 .....	241
9.2 驾驶人的控制行为 .....	242
9.3 驾驶人控制下的车辆运动 .....	243
9.4 驾驶人对车辆特性的适应性和移线行为 .....	254
9.5 驾驶人模型参数的辨识 .....	260
习题 .....	264
参考文献 .....	265
扩展阅读 .....	265
<b>第 10 章 车辆的操纵品质</b> .....	266
10.1 引言 .....	266
10.2 车辆的可控性 .....	266
10.3 车辆的运动特性与可控性 .....	268
10.4 基于驾驶人模型的车辆操纵品质评价的可行性 .....	278
参考文献 .....	283

# 第 1 章 车辆动力学与控制

## 1.1 对车辆的定义

地面行驶的车辆主要可分为两大类：一类是被约束于地面轨道上行驶的车辆，例如轨道车辆；另一类是不受轨道约束、通过对其车轮的操纵，自由行驶在地面上的车辆，例如路面车辆。

飞机可以在空气中自由飞行，船舶可以在水面上自由航行。而通过对车轮的操纵，路面车辆也同样与飞机和船舶共享着这一特点，即它可以在地面做无约束的运动。

从动力学的观点来看，以上这三种运动体都受到由自身运动而产生的力，并利用这种力来实现各自所期望的运动，这是三者在本质上所具有的共性。具体一点讲，飞机通过机翼与空气的相对运动产生升力；船舶通过船体与水的相对运动产生动力；而在地面行驶的车辆则依靠其轮胎与地面的相对运动而产生作用于轮胎的侧向力。

从上述三种运动体的形式来看，其动力学特性与控制是与它们各自的自然功能紧密相关的。对飞机和船舶而言，由此展开的研究已经分别产生了飞行动力学和船舶动力学。而对车辆而言，同样也产生了车辆动力学。

需要说明的是，本书所研究的是这样一种车辆，它可以像飞机和船舶一样依靠自身运动所产生的力，来实现其在地面上的独立运动。

## 1.2 四轮车辆简化模型

为了研究车辆动力学及其控制，首先假设了一个典型车辆的数学模型，如图 1.1 所示。该模型由一个刚性的车身以及安装于其上的前

后各两个可操纵的车轮组成。轿车、货车、公共汽车以及农用车辆均可抽象地简化成这样的模型。表面上看，这些不同车辆之间似乎不存在动力学上的共性，但当采用了这一简单的四轮车辆模型后，就能获取这些不同车辆在动力学方面的基本信息了。

在图 1.1 所示的车辆数学模型中，假设车轮不具有质量，车辆的质量集中于刚性的车身。我们取车辆的质心为坐标原点，车辆的纵向为  $x$  轴，侧向为  $y$  轴，垂直方向为  $z$  轴，这样就建立了固定于车辆的坐标系。

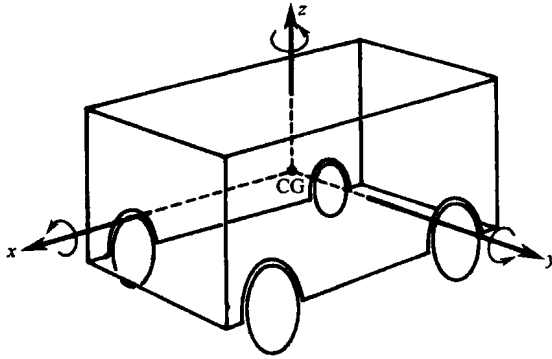


图 1.1 车辆动力学模型

以此坐标系为基准，车辆的运动具有如下六个独立的自由度：

- 1)  $z$  方向上的垂向运动。
- 2)  $y$  方向上的侧向运动。
- 3)  $x$  方向上的纵向运动。
- 4) 绕  $x$  轴的侧倾运动。
- 5) 绕  $y$  轴的俯仰运动。
- 6) 绕  $z$  轴的横摆运动。

上述运动可以分为两类：一类为与转向操纵无直接关系的 1)、3)、5) 的运动，其中 1) 是由路面不平引起的垂向运动，它关系到车辆的乘坐舒适性；3) 为车辆的纵向直线运动，产生于驾驶人通过踩加速踏板或制动踏板所引起的驱动或制动；5) 也是由路面不平、驱动或制动而引起的运动，同样关系到车辆的乘坐舒适性。

而车辆在  $y$  方向上的侧向运动 2) 和绕  $z$  轴的横摆运动 6) 基本上是由对车辆所进行的转向操纵而产生的；而绕  $x$  轴的侧倾运动 4) 则是伴随着运动 2) 和 6) 而产生的，当然，路面不平也会导致这种运动。

如前所述，本书所研究的道路车辆是可通过转向操纵而在地面上沿任意方向自由运动的车辆。因此，本书中我们将主要研究由转向操纵引起的  $y$  方向上的侧向运动 2)、绕  $x$  轴的侧倾运动 4) 以及绕  $z$  轴的横摆运动 6)。

### 1.3 对车辆运动的操纵

对普通车辆而言，其侧向运动、横摆运动和侧倾运动的产生来自于驾驶人的转向操纵，同时还取决于车辆本身的动力学特性。这里，并非说驾驶人随意地转向，他要持续不断地观察着前方的目标路径，要么正在跟随着他的目标路径，要么正在设定一个要跟随的新的目标路径。驾驶人同时要观察许多情况，比如车辆相对于目标路径正处于什么位置以及当前车辆的运动情况；此外，他还要预测车辆接下来会怎样运动。基于以上这些信息，驾驶人做出判断并进行恰当的转向操纵。这样，车辆按照给定的或驾驶人设定的目标路径运动。图 1.2 给出了车辆运动与驾驶人控制之间的关系框图。

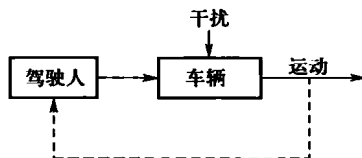


图 1.2 车辆与驾驶人控制

对不受预设轨道所束缚、可在平面内自由运动的车辆而言，只有当其受到驾驶人适当的转向控制作用下，它才能进行有目的、有意义的运动。

因此，我们最感兴趣的首先是车辆本身固有的动力学特性，并可通过观察某特定转向输入下车辆的运动来得以了解。接下来，我们要研究在驾驶人的操纵下车辆的运动情况。最终的目的是：了解车辆的动力学特性，以使驾驶人更容易地对其进行操纵。

## 第2章 轮胎力学

### 2.1 引言

第1章中，我们解释了本书是如何来处理车辆的独立运动的，即车辆在未受预设于地面的轨道束缚情况下，在水平平面内所进行的运动。而实现这一运动的力由车辆与地面之间的相对运动而产生。

车辆与地面的接触是通过车轮得以实现的。如果车轮存在一个与其回转头相垂直的速度分量，那么它将会受到垂直于其行驶方向的作用力。换言之，车辆与地面的相对运动使车轮受到来自地面的力，它反过来又使车辆运动。这就相当于飞机飞行中垂直作用于机翼的升力，以及船舶在转向航行中垂直作用于船体运动方向的浮力(相对于船体为侧向力)。

车辆上的车轮在转动中不仅需要支撑车身重量、产生驱动力和制动力，还要在使车辆能独立于轨道或导轨而实现自由运动的过程中起主要作用。对我们所研究的车辆而言，其基本功能就体现于此。

在对车辆动力学与控制的研究中，掌握轮胎受力方面的知识是必需的。因此，本章将主要阐述由于车轮与地面相对运动所产生的力的机理，并解释其特性。

### 2.2 轮胎侧向力的产生

#### 2.2.1 轮胎和侧偏角

一般来说，当车辆直线行驶时，车轮的旋转平面(其航向)与其行驶方向是一致的。换言之，车轮的行驶方向位于其旋转平面内。然而，当车辆产生侧向运动或/和横摆运动时，车轮的行驶方向就可能

会跑出其旋转平面。

图 2.1 为车轮的俯视图，其中图 a 表示车轮的行驶方向位于其旋转平面内的情况；而图 b 表示车轮的行驶方向不在其旋转平面内的情况，也就是所谓的伴有侧向滑动的情况。车轮的行驶方向与车轮旋转平面（即车轮的航向）之间的夹角被称为侧偏角。

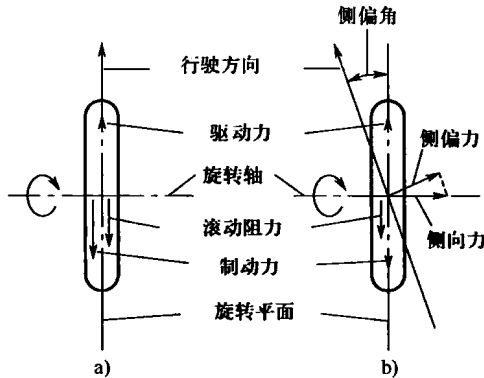


图 2.1 运动中的车轮

a) 车轮的行驶方向位于其旋转平面内 b) 车轮的行驶方向不在其旋转平面内

车辆在行驶过程中，其车轮受到沿行驶方向作用的驱动力、制动时产生的制动力以及一直存在着的滚动阻力。如果车轮发生如图 2.1b 所示的侧滑时，将会产生垂直于车轮旋转平面的力，我们可以将其视为车轮发生侧向滑动时抵抗侧滑的反作用力，这也是车辆实现独立运动所必须依赖的、非常重要的力，我们通常称之为侧向力。而在垂直于车轮旋转平面的分力被称为侧偏力。当侧偏角很小时，可以认为侧偏力与侧向力相同。

上述侧向力可由图 2.2 所示的流体动力学中的升力给予解释，侧向力对应于在流体中以迎面角前进的物体所受到的升力。

尽管轮胎有很多种，但在做伴有侧滑的转动时，都会产生垂直于车轮旋转面的力。图 2.3 比较了在小侧偏角情况下，充气橡胶轮胎车轮、实心

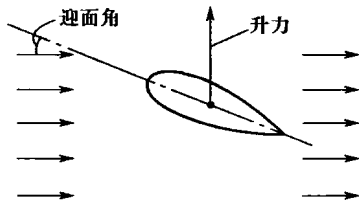


图 2.2 物体所受到的升力

橡胶轮胎车轮和铁车轮分别产生的侧向力。

由图可见，由于车轮的种类不同，所产生的侧向力大小显著不同。尤其是铁车轮，所能产生的最大侧向力还不到橡胶轮胎的三分之一。而且，充气橡胶轮胎车轮所能产生的侧向力大于实心橡胶轮胎车轮。对独立运动的车辆而言，伴有

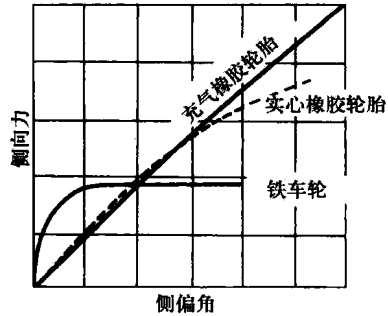


图 2.3 不同车轮的侧向力比较

侧滑的车轮所能产生的侧向力越大越好。因此，可在无约束的平面上自由运动的车辆通常都装有充气橡胶轮胎。原因就是，它不仅有利于车辆的乘坐舒适性，而且还有利于获得操纵车辆所需的侧向力。

以下章节中，我们将充气橡胶轮胎简称为轮胎，并介绍伴有侧滑的轮胎所受到的力的产生机理及其特性。

### 2.2.2 侧滑轮胎的变形和侧向力

一般而言，轮胎力通过轮胎与地面的接地区域而发生作用。一个伴有侧向滑动的轮胎如图 2.4 所示，在其接地区及外周将会发生变形：图 a 表示从轮胎的纵向和侧向观察到的轮胎变形；图 b 为俯视观察到的轮胎接地区及其外周的变形。

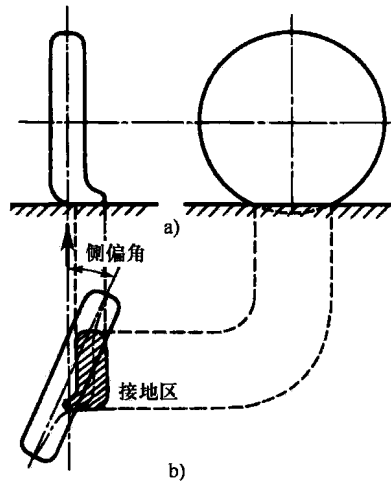


图 2.4 侧偏情况下轮胎的变形  
a) 纵向和侧向观察 b) 俯视观察

从轮胎接地区的前部看，轮胎变形的方向几乎与轮胎行驶的方向平行，这部分与地面之间并未产生相对滑动。如果轮胎侧偏角较小时，整个轮胎接地区同样地保持与轮胎行驶方向平行且与地面不发生相对滑动，而轮胎接地区的后端产生的侧向变形则达



到最大。

当侧偏角增大时，轮胎接地区的前端仍保持与轮胎行驶方向几乎平行。而接近接地区中心附近，随着变形的减缓，侧向变形在接地区某处达到最大。此后，轮胎接地区滑离轮胎的中心线，且侧向变形不再增加。

如果轮胎侧偏角再进一步增大，则侧向变形最大的点会迅速地移向前方。当轮胎的侧偏角达到  $10^\circ \sim 12^\circ$  时，接地区将不再平行于轮胎行驶方向，而是前、后部产生与轮心几乎对称的变形。此时，可认为接地区的所有部分都产生了相对于地面的滑动。

轮胎这样的侧向变形产生了一个作用于轮胎接地区的侧向力，它的分布与轮胎变形的分布相对应。在小侧偏角情况下，轮胎的这种侧向力通常被称作侧偏力。从轮胎的侧向变形来看，产生的侧向力其作用点不一定与轮胎接地区的中心重合，因此会绕轮胎接地区的中心产生一个力矩，即所谓的“回正力矩”，其作用方向是使轮胎侧偏角减小。

### 2.2.3 轮胎的外倾和侧向力

如图 2.5 所示，轮胎旋转平面与铅垂平面之间的夹角称为轮胎外倾角。如果轮胎保持外倾角  $\phi$  不变，并在水平面内作自由转动，则其轨迹应该如图 2.5 所示，即为圆心在  $O$  点且半径为  $R/\sin\phi$  的一段圆弧。如果具有外倾角的轮胎不能作这样的圆周运动，而是强制其只作直线运动，则它将会受到图中所示的力  $P$  的作用，这一由轮胎相对地面外倾而产生的力被称之为外倾侧向力。

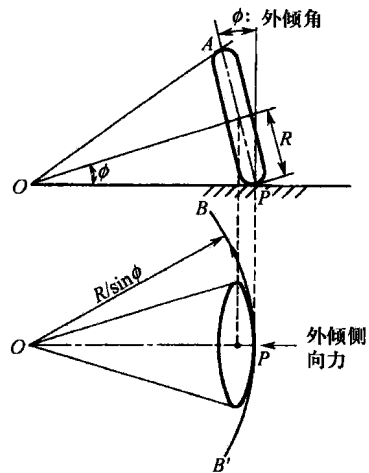


图 2.5 具有外倾角且在外倾侧向力作用下的轮胎