



汽车先进技术译丛

日本汽车技术协会·汽车技术经典书系

第4分册

汽车运动性能 技术

[日] 安部正人 编著
大沢 洋 译
马宁



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



汽车先进技术译丛

日本汽车技术协会·汽车技术经典书系

汽车运动性能技术

[日] 安部正人 大沢 洋 编著
马 宁 译

机械工业出版社

《汽车运动性能技术》主要围绕车辆的前后方向与侧向运动，特别是侧向运动，重点讲述用于提升其性能的技术成果。第1章主要讲述轮胎对于车辆运动性能的影响与提升。第2章主要讲述提升车辆运动性能的理论性解析手法。第3章主要基于实际观点，讲述一般的车辆运动性能及其提升技术。第4章主要讲述转向系统与车辆运动性能。第5章主要讲述悬架与车辆运动性能。第6章主要讲述最近的4WS系统对车辆运动性能所带来的提升。第7章主要讲述最新的利用驱动力及制动力的车辆运动控制。第8章主要讲述人车之间的运动。本书适合对汽车动力学感兴趣的技术人员及相关专业师生阅读使用。

Translation from Japanese language edition: 自動車の運動性能向上技術, 自動車技術会編集

Copyright © Originally published in Japan in 1998 by Asakura Publishing Company, Ltd.

Chinese translation rights arranged with Asakura Publishing Company, Ltd. through TOHAN CORPORATION, TOKYO.

All Rights Reserved.

版权所有，侵权必究。

This title is published in China by China Machine Press with license from Asakura Publishing Company, Ltd. This edition is authorized for sale in China only, excluding Hong Kong SAR, Macao 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.

本书中文简体版由 Asakura Publishing Company, Ltd. 授权机械工业出版社在中国境内（不包括香港、澳门特别行政区及台湾地区）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。

北京市版权局著作权合同登记 图字：01-2015-0546。

图书在版编目（CIP）数据

汽车运动性能技术/(日)安部正人,(日)大沢洋编著;马宁译. —北京:机械工业出版社,2018.6

(汽车先进技术译丛. 汽车技术经典书系)

ISBN 978-7-111-59710-0

I. ①汽… II. ①安…②大…③马… III. ①汽车运动-性能分析
IV. ①G872.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 077822 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: 孙 鹏 责任编辑: 孙 鹏

责任校对: 张 薇 封面设计: 鞠 杨

责任印制: 李 昂

北京宝昌彩色印刷有限公司印刷

2018 年 6 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·10.75 印张·250 千字

0001—3000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-59710-0

定价: 69.00 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

服务咨询热线: 010-88361066

读者购书热线: 010-68326294

010-88379203

封面无防伪标均为盗版

网络服务

机工官网: www.cmpbook.com

机工官博: weibo.com/cmp1952

金书网: www.golden-book.com

教育服务网: www.cmpedu.com

序

本丛书是日本汽车技术协会主编的汽车技术经典书系，书系共 12 册。本系列丛书旨在阐述汽车相关的焦点技术及其将来的发展趋势，由活跃在第一线的研究人员和技术人员编写。

日本汽车技术协会的主要责任是向读者提供最新技术课题所需要的必要信息，为此我们策划了本系列丛书的出版发行。本系列丛书的各分册中，相对于包罗万象的全面涉及，编者更倾向于有所取舍地选择相关内容，并在此主导思想下由各位执笔者自由地发表其主张和见解。因此，本系列丛书传递的将是汽车工程学、技术最前沿的热点话题。

本系列丛书的主题思想是无一遗漏地包含基础且普遍的事项，与本协会的“汽车工学手册”属于对立的两个极端，“汽车工学手册”每十年左右修订一次，以包含当代最新技术为指导思想不断地进行更新，而本系列丛书则侧重于这十年当中的技术进展。再者，本系列丛书的发行正值日本汽车技术协会创立 50 年之际，具有划时代的意义，将会为今后的汽车工学、技术，以及工业的发展发挥积极的作用。

在本系列丛书发行之际，我代表日本汽车技术协会向所有为本系列丛书提供协助的相关人员，以及各位执笔者所做出的努力和贡献表示衷心的感谢。

社团法人 日本汽车技术协会
汽车技术经典书系出版委员会
委员长 池上 询

前言

汽车运动性能相关领域，理论较易应用，很早就独立于其他汽车相关领域，作为一个学科性的领域自成体系，为汽车性能提升做出了贡献。

如果把汽车考虑成一个刚体，那么其运动大致可分为前后方向、侧向、上下方向三个方向的运动。在这类汽车运动之中，前后方向与侧向运动，因驾驶人的加速与制动及转向操作，属于同驾驶人主动性关联的运动。相对于此，上下方向的运动，仅属于同驾驶人被动关联的运动，驾驶人无法积极控制该运动。

车辆运动性能更多是指与该驾驶人积极控制相关联的运动。上下方向的运动多涉及与驾驶人及其他乘员被动关联的振动噪声乘坐舒适性能问题的处理。侧向运动则与转向盘操作相关联，以汽车特有的运动力学，在理论上形成了体系化。另一方面，立足实际，不断积累运动性能及其提升技术方面的知识，针对操纵性、稳定性理论，确立起了狭义的车辆运动力学领域。

本书主要围绕车辆的前后方向与侧向运动，特别是侧向运动，重点讲述用于提升车辆性能的最新技术成果。

作用在轮胎上的力会支配车辆的运动。第1章主要讲述轮胎对于车辆运动性能的影响与提升。第2章主要讲述提升车辆运动性能的理论性解析手法。第3章主要基于实际观点，讲述一般的车辆运动性能及其提升技术。

与车辆运动性能相关的底盘组件主要有转向系统与悬架系统。这些组件性能的提升是确保基本的车辆运动性能的关键所在。第4章主要讲述转向系统与车辆运动性能。第5章主要讲述悬架与车辆运动性能。

此外，最近采用的底盘控制技术，因飞跃式地提升了车辆运动性能而备受瞩目。其中极具代表性的有4WS与驱动力制动力控制。第6章主要讲述最近的4WS系统对车辆运动性能所带来的提升。第7章主要讲述最新的利用驱动力及制动力的车辆运动控制。

如上所述，本书所涉及的车辆运动，主要指驾驶人积极与该运动的控制相关联的运动。从此观点出发，考虑到人的操纵，第8章主要讲述人车之间的运动。

其实在现实的车辆运动性能调校阶段，同驾驶人主动关联的前后方向与侧向的运动性能，同处于被动关联的上下方向运动即振动乘坐舒适性之间，常处于相互抗衡之中。因此，从现实层面看，无法独立处理彼此。技术上务必做到两者兼顾。而本书对此问题的重视也始终贯穿于各章节。

安部正人
大沢 洋

编辑的话

本书是由日本汽车技术协会组织编写的“汽车技术经典书系”的第4分册《自動車の運動性能向上技術》翻译而来的。本丛书的特点是对汽车设计、测试、模拟、控制、生产等技术的细节描写深入而实用，所有作者均具备汽车开发一线的实际工作经验，尤其适合汽车设计、生产一线的工程师研读并应用于工程实践！本丛书虽然原版出版日期较早，但因为本丛书在编写时集聚了日本国内最优秀的专家，使本丛书具有极高的权威性，是日本汽车工程技术人员必读图书，故多次重印，目前仍然热销。非常希望这套丛书的引进出版能使读者从本丛书的阅读中受益！本丛书由曾在日本丰田公司工作的刘显臣先生推荐，也在此表示感谢！

日本汽车技术协会 “汽车技术经典书系” 出版委员会

委员长	池上 询	京都大学工学部
副委员长	近森 顺	成蹊大学工学部
委员	安部正人	神奈川工科大学
	井上惠太	丰田汽车
	大沢 洋	日野汽车
	冈 克己	本田技术研究所
	小林敏雄	东京大学生产技术研究所
	城井幸保	三菱汽车
	芹野洋一	丰田汽车
	高波克治	五十铃工程技术有限公司
	迁村钦司	新 ANSYS 有限公司
	農沢隆秀	马自达汽车
	林 直义	本田技术研究所
	原 田宏	防卫大学校
	东出隼机	日产柴油发动机有限公司
	间瀬俊明	日产汽车
	柳瀬徹夫	日产汽车
	山川新二	工学院大学工学部

主编

安部正人

大沢 洋

参编

牧田光弘

安部正人

山本真规

笠原民良

宇野高明

村田 诚

古川 修

礪田桂司

景山一郎

神奈川工科大学

日野汽车

日产汽车

神奈川工科大学

丰田汽车

日产汽车

日产汽车

日产汽车

本田技术研究所

三菱汽车

日本大学

目 录

序

前言

编辑的话

第1章 轮胎特性..... 1

1.1 影响车辆运动性能的 轮胎特性 1

1.1.1 轮胎坐标系 1

1.1.2 决定轮胎尺寸的主要因素 2

1.1.3 决定车辆姿态等的轮胎刚度 3

1.1.4 支配车辆运动的线性区域特性 ... 4

1.1.5 支配车辆运动的非线性
区域特性 4

1.1.6 影响主观评价的特性 6

1.2 解析运动性能用轮胎模型 6

1.2.1 必要条件 6

1.2.2 模型的输入与输出 7

1.2.3 线性区域的适用范围 7

1.2.4 稳态模型与动态特性模型 7

1.2.5 近年开发的模型 8

1.3 模型的案例分析 Magic Formula 9

1.3.1 Magic Formula 的背景 9

1.3.2 Pure 模型 9

1.3.3 复合输入模型 11

1.3.4 模型系数决定步骤 14

1.4 轮胎特性测量技术 15

1.4.1 测量的试验条件 15

1.4.2 轮胎力和力矩的测量 17

1.4.3 前轮定位测量 18

1.4.4 侧滑角和滑移比 18

参考文献 20

第2章 车辆的运动性能理论 21

2.1 汽车的运动与运动方程式 21

2.1.1 平面运动的运动方程式 21

2.1.2 涵盖转向系统的运动与运动方

程式 22

2.1.3 涵盖侧倾的运动与运动方程式 ... 23

2.1.4 垂向运动与运动方程式 24

2.1.5 一般的汽车运动与结构分析模型 ... 25

2.2 利用平面2自由度模型的 线性分析 25

2.2.1 匀速环行 25

2.2.2 转向时的瞬态响应特性 26

2.2.3 外部干扰时的运动 27

2.2.4 柔性偏向与等效侧抗刚度 28

2.2.5 复合侧抗刚度 29

2.2.6 驱动与制动时的准匀速环行 29

2.3 非线性区域车辆运动分析方法 ... 31

2.3.1 基于较大侧向加速度的线性化分析
与等效侧抗刚度 31

2.3.2 轮胎的非线性特性与环行的几何学
分析 32

2.3.3 横摆力矩法 35

2.3.4 利用状态平面解析 37

参考文献 38

第3章 车辆的运动性能 39

3.1 运动性能的评价与解析 39

3.1.1 车辆参数的测量 39

3.1.2 道路试验 40

3.1.3 室内试验 41

3.1.4 仿真解析 41

3.2 转向时的运动性能 41

3.2.1 稳态转向性能 41

3.2.2 动态转向响应性 45

3.2.3 转向时的侧倾姿态 49

3.2.4 转向力特性 51

3.3 外部干扰时的运动性能.....	51	5.2 悬架特性与操纵稳定性能.....	77
3.3.1 侧风稳定性	51	5.2.1 束角变化与操纵稳定性能.....	77
3.3.2 乘坐舒适性	52	5.2.2 轮胎产生运动时的接地点变化、 胎面变化	81
3.3.3 路面外部干扰稳定性	54	5.2.3 外倾变化特性与操纵稳定性能 ...	82
3.4 驱动、制动时的运动性能.....	56	5.2.4 悬架特性与侧倾运动	83
3.4.1 转向加减速时的车辆特性.....	56	5.2.5 悬架特性与加减速时动态 车辆姿态变化	86
3.4.2 转向制动时的车辆特性	57	5.3 悬架特性与乘坐舒适性.....	87
3.4.3 制动驱动时的车辆姿态	59	5.3.1 乘坐舒适性与悬架性能	87
3.5 极限附近的运动性能.....	59	5.3.2 上下振动特性	87
3.5.1 转向与转向的极限性能	59	5.3.3 跃振与悬架特性	88
3.5.2 低摩擦路面上的运动性能.....	61	5.4 悬架的类型与特性	89
参考文献	64	5.4.1 悬架的基本类型与特性	89
第4章 转向系统与车辆运动性能	65	5.4.2 悬架的发展趋势	91
4.1 转向系统与转向响应/转向反作 用力.....	65	5.4.3 悬架与底盘控制技术	96
4.1.1 概要	65	5.5 主动悬架.....	97
4.1.2 理想的转向响应/转向 反作用力特性	66	5.5.1 概要	97
4.1.3 转向反作用力的构成要素.....	68	5.5.2 垂向振动控制原理	97
4.2 动力转向装置与转向力特性.....	69	5.5.3 姿态控制、转向特性控制	100
4.2.1 动力转向装置齿轮箱、控制阀 ...	69	5.5.4 主动悬架的类型与特性	100
4.2.2 油泵系统	69	5.5.5 实际系统案例	101
4.2.3 动力转向装置新技术	69	参考文献.....	103
4.3 转向系统几何学与车辆运动性能 ...	70	第6章 4WS 系统与车辆运动性能 ...	104
4.3.1 阿克曼特性	70	6.1 4WS 系统的目的与原理	104
4.3.2 转向主销轴线相关参数与 车辆运动性能的关系	70	6.1.1 前馈型 4WS	104
4.3.3 转向系统的柔性特性	73	6.1.2 反馈型 4WS	105
4.4 其他与转向系统相关的车辆动作 ...	73	6.1.3 低速小转弯半径型 4WS	105
4.4.1 车辆跑偏	73	6.2 4WS 运动学理论	106
4.4.2 游动、偏离行驶	74	6.3 控制方法的分类与基本控制 方法概要	107
4.5 近期技术动向	74	6.3.1 前馈型 4WS	107
4.5.1 转向角控制	74	6.3.2 反馈型 4WS	108
4.5.2 转向力控制	75	6.4 控制方法的实际情况	109
参考文献	75	6.4.1 横摆率响应延迟的改进 对策.....	109
第5章 悬架与车辆的运动性能	76	6.4.2 车身零侧偏控制	109
5.1 悬架的功能.....	76	6.4.3 低速行驶时的驾驶性能 提升.....	111
5.1.1 悬架的基本功能	76		
5.1.2 悬架的具体结构与辅助功能	76		



6.4.4	理想转向响应的实现·····	113	7.3	驱动力与制动力的左右分配控制···	130
6.4.5	非线性运动区域控制·····	114	7.3.1	左右分配与前后分配的比较···	131
6.4.6	4WS 与其他底盘控制的 协调控制·····	115	7.3.2	驱动力左右分配控制时的车辆 特性·····	132
6.4.7	其他控制应用研究·····	116	7.3.3	制动力左右分配控制时的车辆 特性·····	137
6.5	4WS 的各种结构·····	116	7.3.4	扩展动态四边形·····	139
6.5.1	全机械式控制·····	116	7.4	轮胎纵向力与侧向力的综合 控制·····	140
6.5.2	可变齿轮机构电子控制·····	116	7.4.1	驱动力控制与 4WS 的综合 控制·····	140
6.5.3	电气-机械综合控制·····	117	7.4.2	制动力控制与 4WS 的综合 控制·····	141
6.5.4	纯电气式控制·····	117	7.4.3	DYC 与 4WS 的综合控制·····	142
6.6	4WS 技术展望·····	119	7.5	驱动力与制动力的展望·····	144
参考文献	·····	119	参考文献	·····	144
第 7 章	驱动力及制动力控制与车辆 运动性能·····	121	第 8 章	人-车系统的运动·····	146
7.1	驱动力与制动力的控制定位和 目标·····	121	8.1	前言·····	146
7.1.1	驱动力与制动力的控制定位···	121	8.2	人的控制动作·····	146
7.1.2	驱动力与制动力的控制目标···	122	8.3	人的操纵动作模型·····	148
7.2	驱动力与制动力的前后分配 控制·····	122	8.3.1	人的传递函数模型·····	148
7.2.1	直行时的加速与减速性能·····	122	8.3.2	预瞄控制模型·····	149
7.2.2	转弯时的加速、减速性能·····	123	8.3.3	应用专家系统的模型·····	152
7.2.3	驱动力前后分配控制与车辆 变化·····	126	8.3.4	其他控制动作模型·····	154
7.2.4	制动力前后分配控制与车辆 变化·····	129	8.4	人与汽车的稳定性·····	157
			参考文献	·····	160

第1章 轮胎特性

研究车辆运动时，轮胎无疑在所有相关机构中起着不可或缺的作用，但是在车辆运动性能研究领域，轮胎机理多处于不明状态。

这主要是因为与底盘的其他零部件相比，轮胎自身在力的传递过程中会发生较大的变形，轮胎力与转矩在轮胎所受激励的侧滑角与轮荷等常用范围内，呈现出很强的非线性。

本章内容是基于轮胎机理尚不明了这一实际情况，通过讲解帮助一线技术人员了解如何使用轮胎解析车辆运动。

1.1 影响车辆运动性能的轮胎特性

1.1.1 轮胎坐标系

《汽车工程手册》中也曾提到过轮胎坐标系，在研究轮胎力时，坐标系是一切的出发点，因此在本节中将再次阐述坐标系。

轮胎坐标系的 x 、 y 轴设定在接地平面上，如图 1-1 所示，相对于 x 、 y 轴，定义 z 轴为右手坐标系，垂直于路面竖直向上。由于附加了外倾角，轮胎坐标系与轮胎一起，都不会向外倾角方向倾斜。 x 轴的正方向设定为轮胎前进方向，以 x 、 z 轴的正方向来规定 y 轴的正方向。

轮胎中心点相对路面的前进方向涉及其在接地平面上的投影轴。轮胎行进方向轴代表轮胎的（车辆）行驶结果。

如果以侧滑角为轮胎输入，从车辆的运动方向观察轮胎，那么以源自轮胎中心前进方向的轮胎坐标系 x 轴（平行于轮胎回转平面）的倾斜作为侧滑角，绕 z 轴向右旋转方向定义为正。从轮胎坐标系观察轮胎角度来

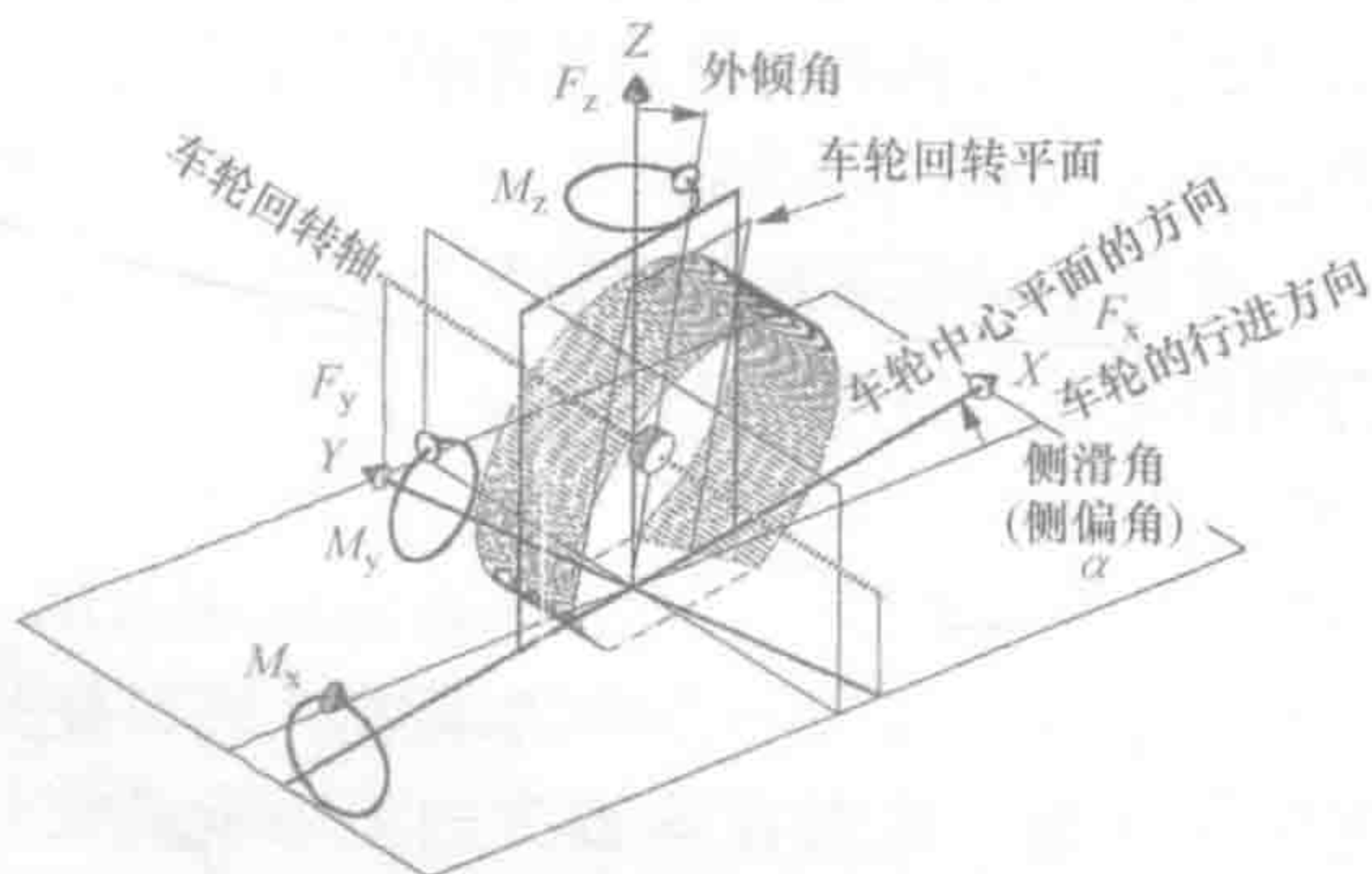


图 1-1 轮胎坐标系

看，轮胎坐标系 $x-z$ 平面与轮胎中心面的夹角，在绕 x 轴向右旋转方向上为正。滑移比有多种定义，《汽车工程手册》中提到的常规定义是，如果轮胎的转动角速度为 ω ，轮胎的前进速度为 V ，轮胎的滚动半径（动态负荷半径）为 r ，那么则有

驱动时：

$$S = (r\omega - V)/(r\omega) \quad (S > 0) \quad (1-1)$$

制动时：

$$S = (r\omega - V)/V \quad (S < 0) \quad (1-2)$$

这里用常数 r 表示轮胎的滚动半径，但实际上轮胎的滚动半径受轮荷与侧滑角等条件影响会发生细小的变化。为此，尽管所定义的滑移比以上述公式规定，实际上很多时候无法实现高精度测量滑移比。针对此点，在第 1.4 节中会进行阐述。

下面，说明一下力与力矩的定义。力可理解为路面作用到轮胎上的力分解到轮胎坐标系的各轴方向组成部分上的合力。在表示纵向力的 x 轴方向上，轮胎自由转动时所受到的来自路面的滚动阻力为负，驱动时轮胎因其所传递的驱动转矩而承受的来自路面的反作用力为驱动力（ F_x ），方向为正。制动时为制动力（ F_x ），方向为负。而在表示侧



向力 (F_y) 的轮胎坐标系 y 轴方向上, 轮胎所承受的来自路面的反作用力为正方向。附加在轮胎上的侧滑角是侧向力的主要诱因, 二者的关系是当侧滑角向正方向变化时, 侧向力也会向正方向变化。在表示垂直力 (F_z) 的 z 轴方向上, 轮胎所承受的来自路面的力 (轮荷) 为正。

在轮胎坐标系围绕各轴的转动中, 力矩分别被定义为倾覆力矩 (M_x)、滚动阻力矩 (M_y) 和自动回正力矩 (M_z)。其中当以“转矩”形式称呼 M_z 时, 意在强调轮胎围绕 z 轴的转动是力矩作用的结果。 M_x 、 M_y 是力矩本身, 轮胎在该轴方向上不允许转动, 因此其会作用在悬架上, 用“力矩”表示 (严格来讲, 在 z 轴方向上无法自由转动, 然而从车辆视角出发, 创立了自动回正这一表达词语)。并且, 在本定义中, M_z 相对侧滑角摆动范围的变化是侧滑角向正向轻微变化时为负, 因而通常用相反的符号定义自动回正力矩 M_z , 在侧滑角的正向上, 自动回正力矩为正。

实际测量轮胎力、力矩时是在轮胎中心测量, 需要转换为轮胎的坐标系。应当注意力矩的值因坐标系具体情况会有很大差异。

在 JASO 与 SAE 中, 轮胎坐标系的定义不同。SAE 中, 如图 1-2 所示, 取地球中心方向为轴, 按照其坐标系, 轮荷 F_z 写为负, 满足坐标系的负值称作“法向力 (Normal Force)”, 其反向值定义为“垂向力 (Vertical Force)”, 轮荷值使用正号。

1.1.2 决定轮胎尺寸的主要因素

轮胎的选定对车辆运动性能至关重要, 特别是轮胎尺寸 (与车轮尺寸) 已经在某种程度上决定了轮胎特性, 故对如何确定合适的轮胎尺寸应给予充分的考虑。其实轮胎尺寸业已标准化, 例如在日本, JATMA (日本轮胎工业会) 发布有关轮胎尺寸的年鉴, 如图 1-3 和图 1-4 所示, 其主要是依据

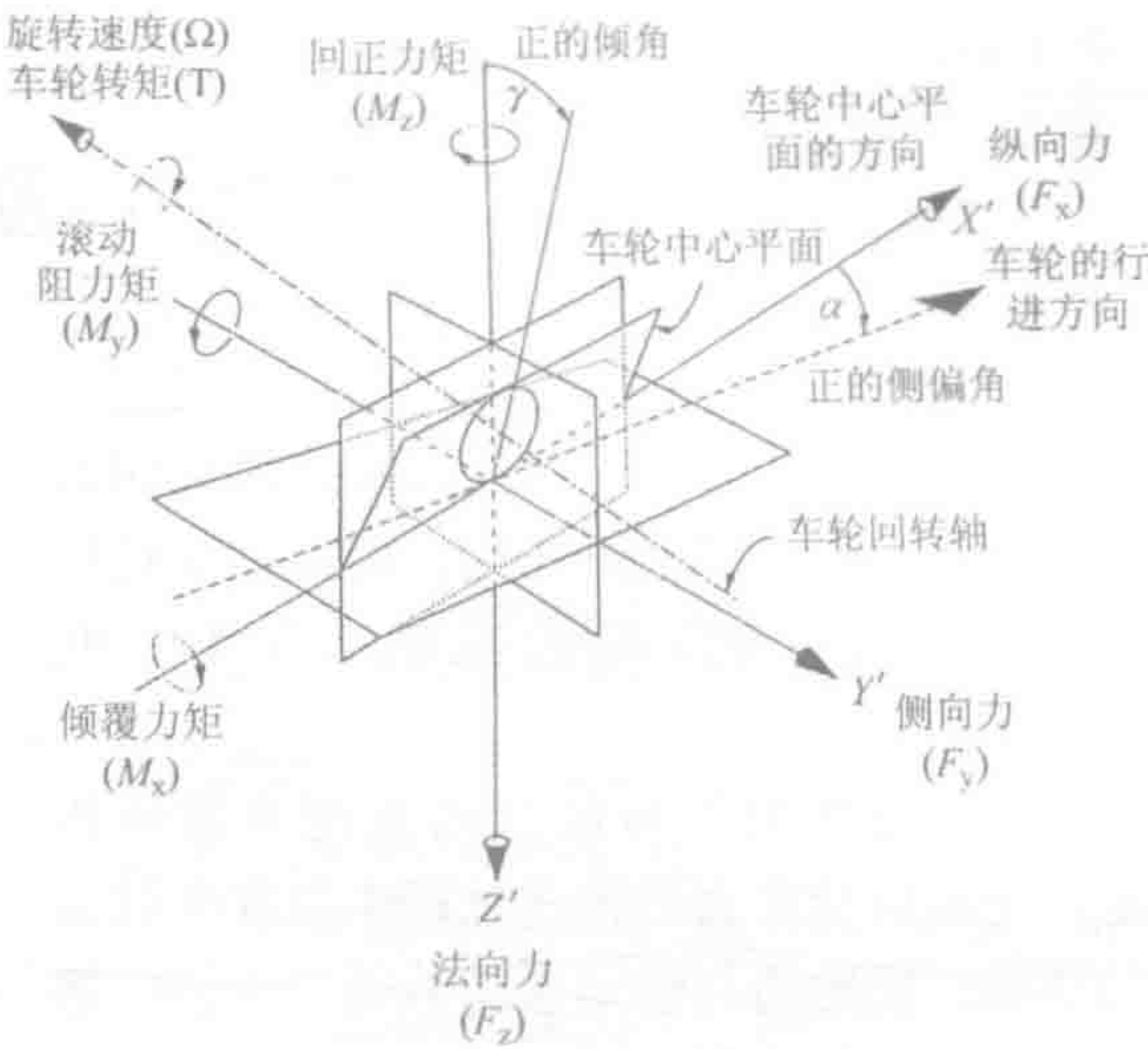


图 1-2 SAE 中的轮胎坐标系

轮胎扁平率与车轮的轮辋直径分类, 规定设计上的最大载荷能力等。轮胎尺寸的确定正是源自这些规格以及车辆要求的各种条件。

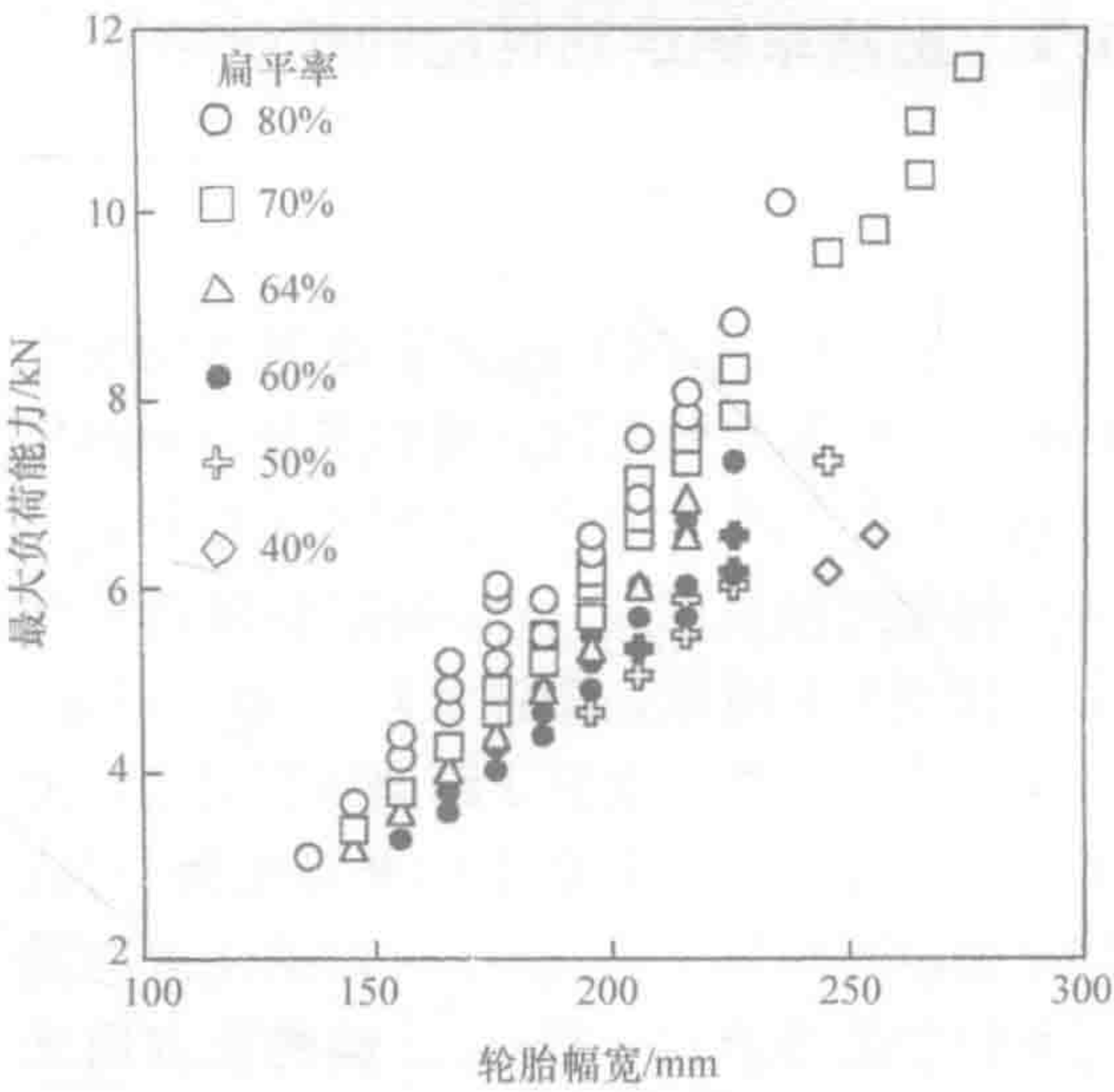


图 1-3 轮胎幅宽与设计最大负荷能力的关系 (JATMA 年鉴 94 年版)

首先, 涉及车辆时, 轮胎限制条件与车身姿态有关, 如最小离地间隙等的制约。轮胎外径的选定要基于车辆的地板布置与悬架形状, 也务必要满足最小离地间隙。轮胎外径与滚动半径成正比, 它与差速器及变速器齿轮比相互配合, 对车辆的齿轮比也有所影

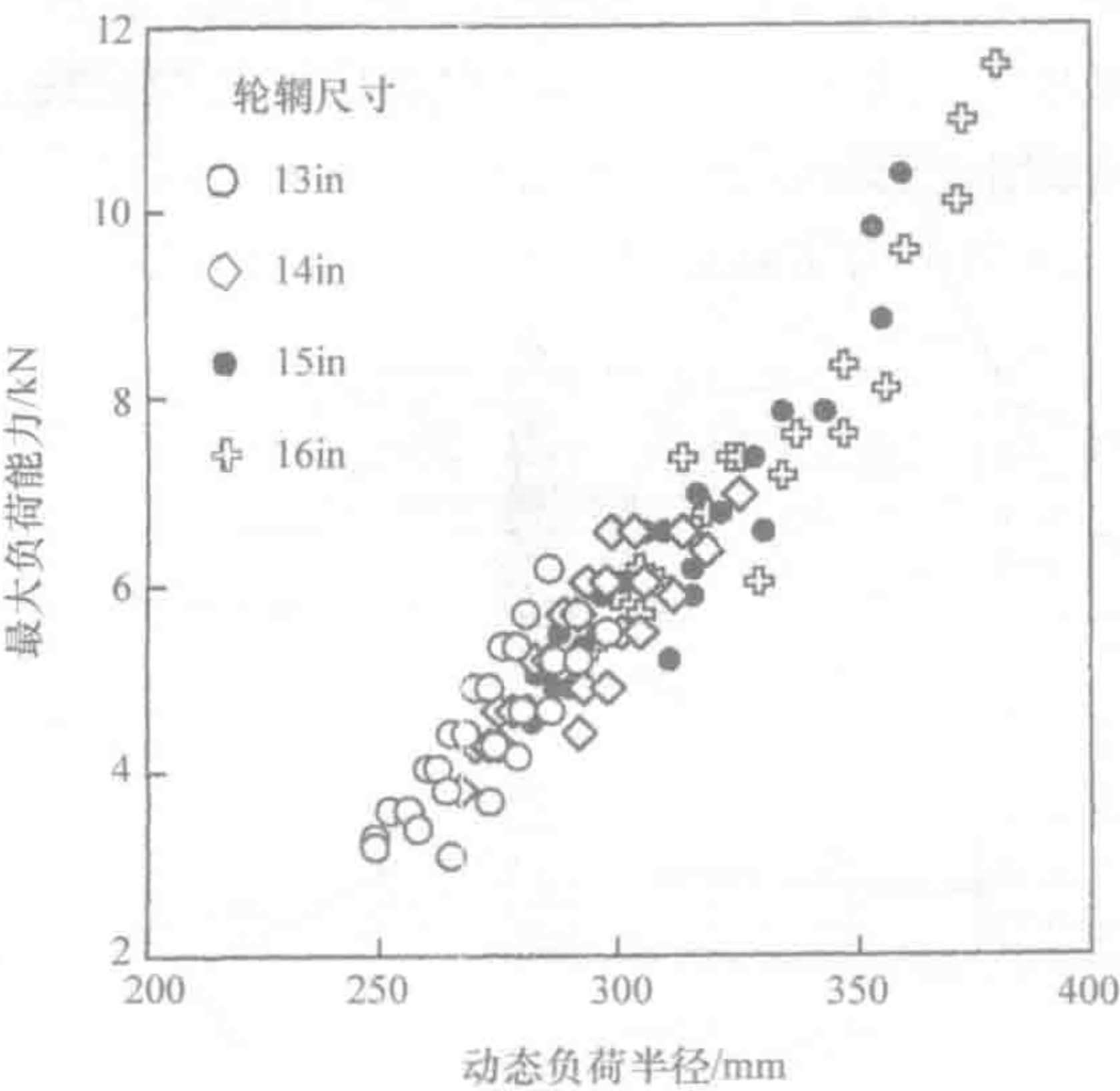


图 1-4 动态负荷半径与设计最大负荷能力的关系 (JATMA 年鉴 94 年版)

响，因此，还应考虑发动机的加速特性与车辆油耗等条件。而最小转弯半径代表了车辆的驾驶灵活性能，轮胎外径与宽度越小，对其越有利。

考虑车辆制动性能时，要考虑车轮轮辋直径的最小值，以便能容纳必要的制动部件。为防止悬架与车轮罩干涉，对车轮的轮辋宽度与轮胎宽度也要加以限制（通常，假定在积雪道路上行驶，考虑到留给轮胎防滑链部分的余量等，从轮胎表面到接近车身部件的间隙，需要 10mm 左右）。

基于这些在考虑车辆运动性能前已经确定的各项条件，轮胎尺寸在某种程度上也已被限定。预计今后会进一步强化与车外噪声及车辆燃油等各种法规的适应性，轮胎与此也是息息相关的。

从可允许的轮胎尺寸之中，选取出什么样的尺寸，与车辆特性有直接关系。选择方法并非采取简单化的定型化方法，而是要适度权衡受轮胎影响的主要性能。例如，轮胎的扁平率等对于探求操纵稳定性与乘坐舒适性的平衡点有着重要的意义。近年来，在主要领域内，轮胎扁平率以每 5% 大小为系列

进行排列，选择范围扩宽。

相反，为提升操纵稳定性与制动驱动性能，扁平率为 45% 与 40% 的轮胎也开始逐渐普及，因车辆重量分配等关系，有时前后轮会安装不同直径的轮胎。今后，根据 FR 与 FF 等驱动方式，在高性能车上，或许可依据从动轮、驱动轮和转向轮的各自特性，选择轮胎的胎面花纹与内部结构。

1.1.3 决定车辆姿态等的轮胎刚度

轮胎特性的第一考虑要素是轮胎坐标系上各轴向的刚度。车辆借助这些刚度被路面支撑起来。

径向刚度（z 轴方向）起到特别大的作用。通常，车身由悬架弹簧与轮胎并列组合支撑。通常悬架弹簧的刚度值是数十牛/毫米，轮胎的刚度值则比它大一位。悬架弹簧主要是吸收车身振动（频率在几赫兹内的振动），轮胎的纵向刚度主要是吸收路面输入（数十赫兹内的振动）。轮胎的纵向刚度基本上由胎压决定，常规胎压设定在 200kPa 左右，加上受到轮胎尺寸的制约，纵向刚度的范围是 150 ~ 250N/mm。乘用车上搭载的轮胎的半径为 300mm 左右，基于施加在单个轮胎上的轮荷及由其引起的轮胎磨损而形成的轮胎接地面，一定要控制在能够适当发挥轮胎性能的形状范围内。根据轮胎尺寸恰当地设定胎压十分关键。

在该轮胎尺寸的常用载荷区域，轮胎的径向刚度对轮荷的依赖性较弱，基本为常量。在轮胎静止状态下进行测量时，力的曲线相对变形具有滞后特性，故最好在轮胎滚动状态下进行测量。

径向刚度主要由轮胎胎面环的刚度与轮胎内部空气的弹力组成。径向刚度与胎压基本成正比。在高胎压下，除运动性能以外，乘坐舒适性与车辆行驶噪声等主观领域的性能变差，为此务必充分权衡好其与运动性能之间的关系。近年来，人们对汽车油耗的要



求也日渐重视，而为应对电动汽车等车重较大的车辆，要求胎压设定得更高，这种关系的取舍变得愈发复杂。

轮胎的侧向刚度（平行于 y 轴的方向）与轮胎产生的侧向力有关，是直接对车辆运动性能造成较大影响的特性。影响侧向刚度的主要因素是胎面环的刚度。相比径向刚度，其对于胎压与轮荷的依赖性要小，但是与径向刚度也有关联。乘用车上搭载的轮胎的侧向刚度大约为 $100 \sim 200\text{N/mm}$ 。

轮胎的纵向刚度（平行于 x 轴的方向）会影响 ABS 的控制与制动、驱动的感觉等，它主要由胎面胶、胎面环以及靠胎压支撑的轮胎胎侧的刚度构成。纵向刚度受到的胎压与轮荷的影响是侧向刚度的 2 倍以上。乘用车上搭载的轮胎的纵向刚度一般大于侧向刚度，在 $200 \sim 400\text{N/mm}$ 。

轮胎坐标系绕 z 轴转动的扭转刚度与转向时的转向反作用力相当。扭转刚度受胎面环的刚度、胎压所支撑的轮胎胎侧部位的刚度和接地形状的影响。接地宽度与长度越大，绕接地中心转动时的路面反作用力转矩就越大，扭转刚度增加。不同于其他的刚度，扭转刚度会随胎压增加而下降。

1.1.4 支配车辆运动的线性区域特性

侧向力 F_y 是对应轮胎侧滑角产生的，其特性之中，在特征线呈线性变化的微小侧滑角区域内，特征线的倾斜称为侧抗刚度 K_y 。一般地，侧抗特征线上侧滑角 $0^\circ \sim 1^\circ$ 区间的倾斜较为常见。侧滑角为 0° 时， F_y 具有偏置值，所以倾斜位于侧滑角 -1° 与 $+1^\circ$ 之间。当然， K_y 的定义区间随侧滑角作为 F_y 的线性区域而变化。

K_y 本身对轮荷有依赖性，当轮荷在某一范围内，相对轮荷，可将 K_y 处理成为线性，如图 1-5 所示。

在车辆运动中，即使以轮胎的 F_y 特性为乘数近似表现侧滑角与轮荷，也能够对车

辆运动进行解析的领域称作线性区域。此区域中，对车辆运动时的转向响应性与稳定性所需的车辆运动线性模型进行研究，其结果显示出了与实际运动之间良好的对应关系。

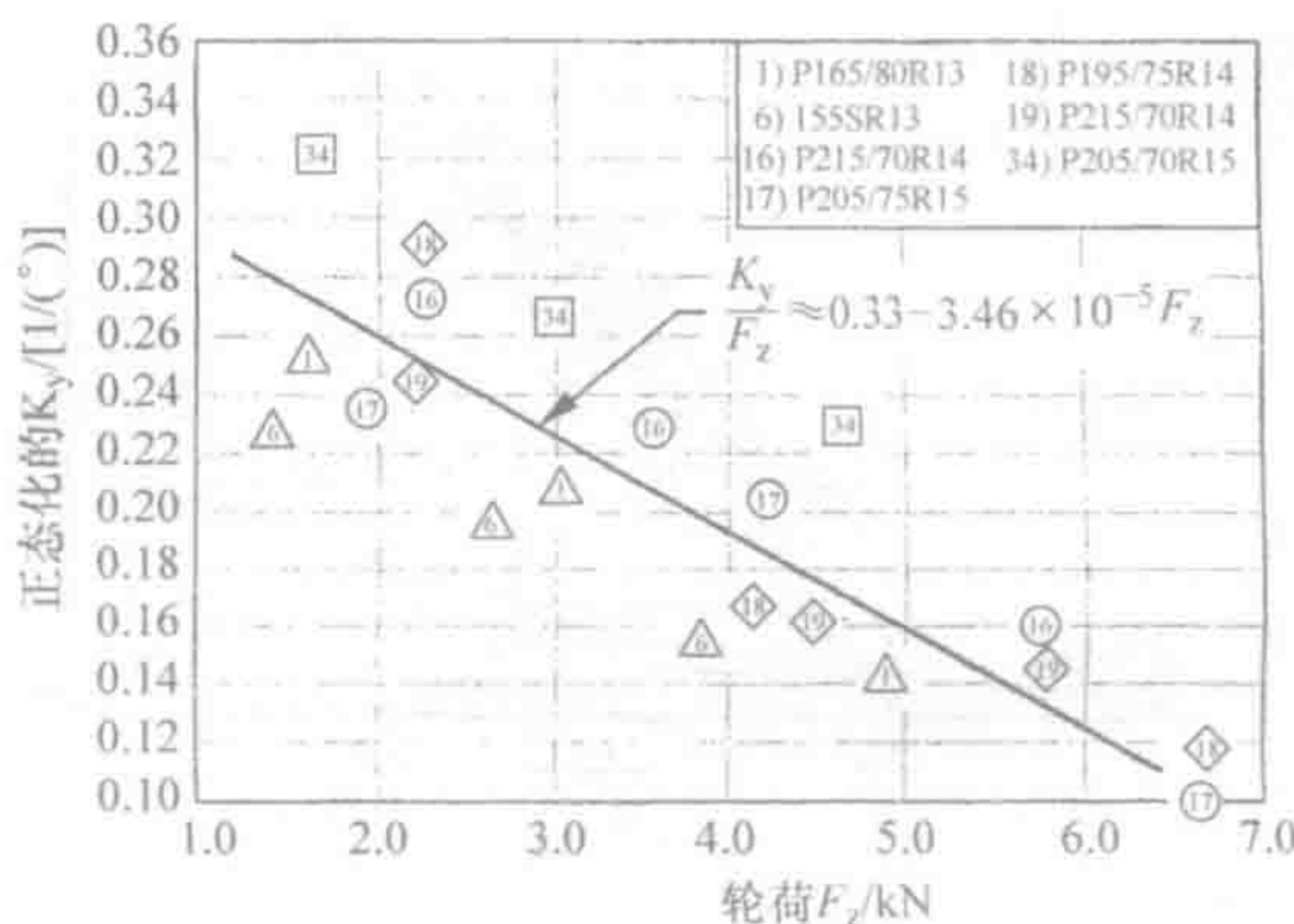


图 1-5 正态化的 K_y 对轮荷的依赖性

根据与侧向力 F_y 相应的 K_y ，相对自动回正力矩 M_z ，有自动回正刚性 A_s 。 M_z 的特性是非线性的，且强于 F_y ，一般在 K_y 的定义区域内， A_s 也是线性的，二者大致相同。 A_s 会影响从直行向小幅转向时的转向反作用力，关联到车辆的直行性。在车辆的线性模型中，考虑到悬架绕轮胎 z 轴转动的刚性，应根据轮胎的 F_y 与 M_z ，改变轮胎的侧滑角。

1.1.5 支配车辆运动的非线性区域特性

当轮荷施加在轮胎上时，轮胎与地面之间会产生摩擦力。其实与地面接触的接地压力并不是均等的，其分布受制于轮胎内部力的均匀性。在极小的滑移比与侧滑角区域内，作用在接地内胎面胶上的剪切力，小于轮胎与路面之间的静摩擦力，轮胎力与胎面胶变形成正比。当部分接地内胎面胶的剪切力超过该点上的静摩擦力时，接地面内轮胎力将失去均匀性。轮胎的非线性描述是以此点为起点，直至整个接地面相对路面处于滑动状态的区域，如图 1-6 所示。

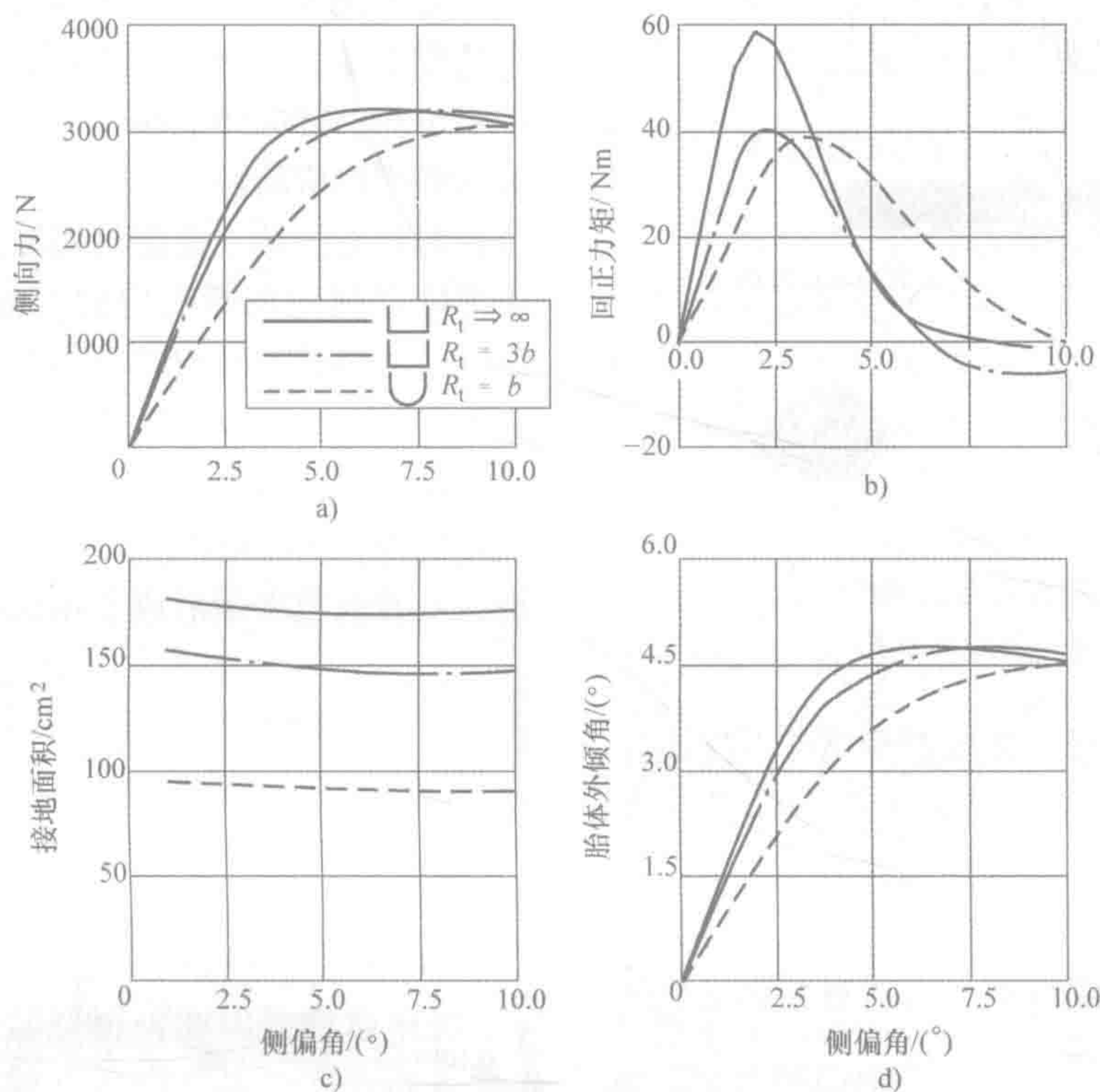


图 1-6 轮胎剖面形状差异下的轮胎侧抗特性与接地面积、胎体部位变形角度（轮荷 4kN，速度 80km/h）

在该区域内，关系到轮胎与路面之间摩擦的要素是支配轮胎特性的核心要素，主要有接地面形状、接地面压力分布、胎面花纹和胎面胶材质等。

接地面形状取决于胎面幅宽等轮胎尺寸。在 JATMA 的轮胎规格中，同样规定了每个轮胎的允许范围，可在其间做出调整。通常自动回正力矩刚性 A_s 会随着接地形状向长度方向延展而增大，影响转向反作用力。而轮胎胎侧与胎面间的形状则会使得车辆极限行驶时（因外倾角增加）的接地形状变化增大。

接地面压力的分布取决于轮胎内部构造与胎压。当胎面部位产生较大的力，在接地部位，轮胎带束层的力的均匀性有时会引起压曲，若附加大侧滑角与滑移比，接地面形状对于能否确保接地部位的表面压力分布也同样至关重要。增加胎压，可抑制压曲的形

成，却容易减少接地面积，因而胎压设定也至关重要。

胎面花纹形状会影响胎面刚度。以孔穴轮胎为例，胎面无花纹但有孔穴，胎面刚性大，侧抗刚度也大，峰值附近的特性变化变大。

胎面胶材质则会影响轮胎与路面间的接触状态。常用弹性与滞后量表示橡胶材质特性。滞后量是指伴随橡胶材料变形的能量散逸程度（一部分运动能量转换为热量）。路面有微小起伏时，胎面胶会滑动并产生相对位移，若橡胶滞后量大，其追随微小起伏发生相对位移时的阻力就会变大，反之就是容易确保接地性能，如图 1-7 所示。

考察车辆运动性能时，还应重点关注干燥与湿滑路面上所表现出的性能差异，如图 1-8 所示。在干燥与湿滑路面上的差异，基本上是越小越好，主要集中在如何从接地面

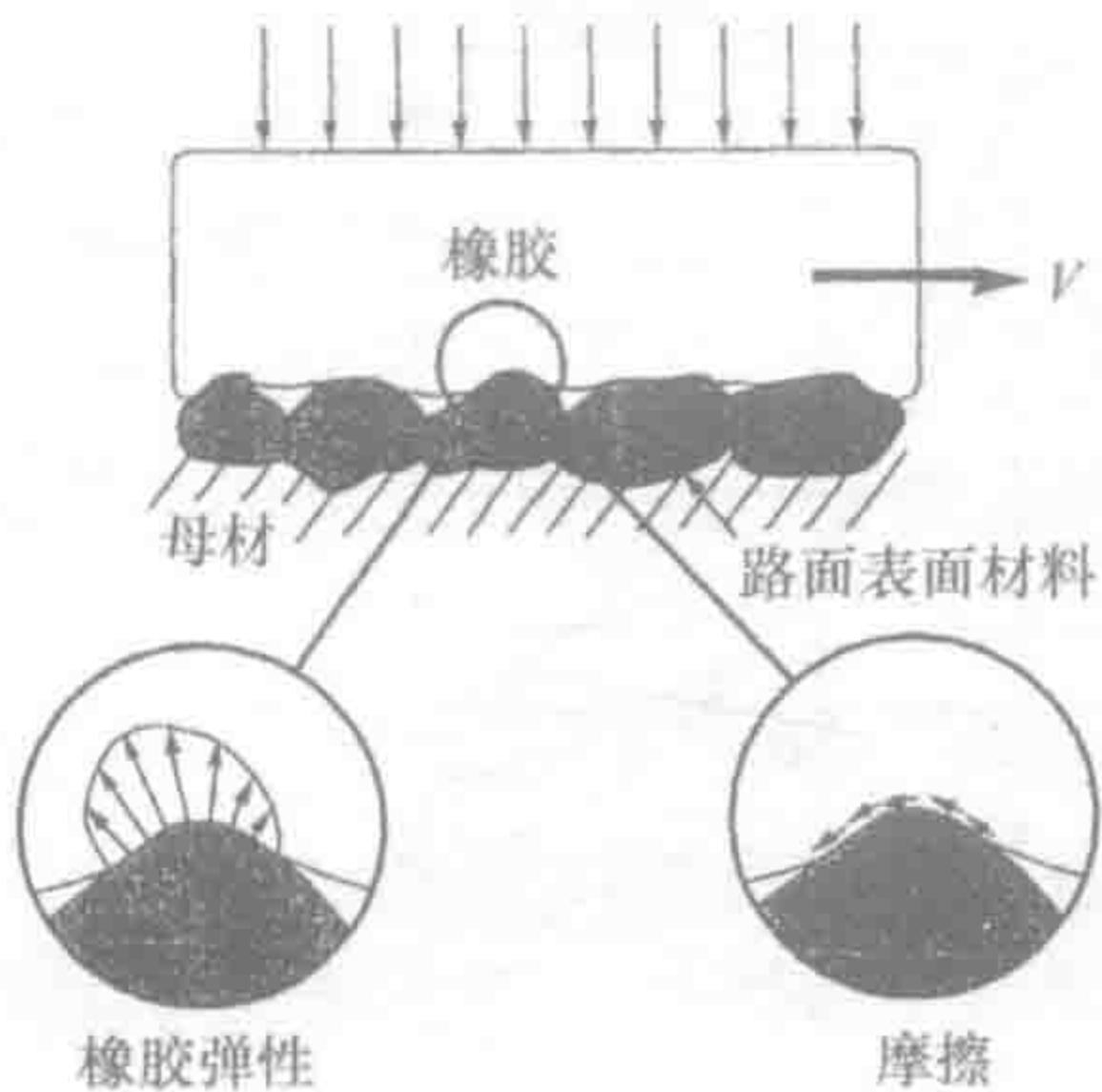


图 1-7 支配轮胎接地性能的摩擦与橡胶弹性^⑧

内排水和确保轮胎与积水湿滑路面的接地性能这两方面。胎面花纹属于轮胎的设计要素，要求考虑到良好的排水性能与由胎面花纹引起的噪声问题等。近年来，橡胶材质与混合材料也在不断发展，有望对车辆运动性能的提升带来助益。

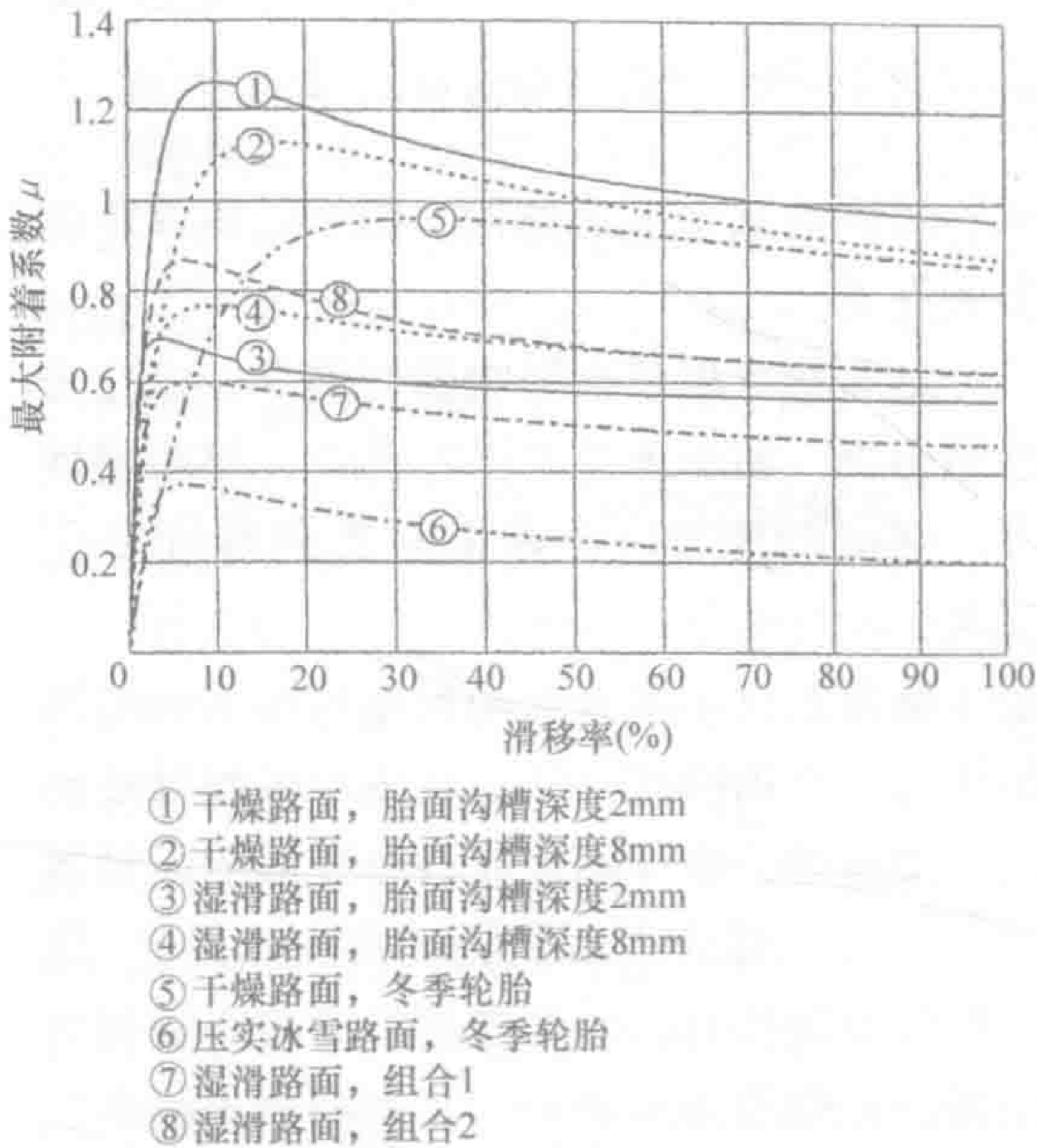


图 1-8 不同轮胎与路面上的 $\mu-s$ 曲线^⑨

1.1.6 影响主观评价的特性

目前为止，所讲述的仅限于稳态下的轮胎特性，其实还应考虑到轮胎在运动性能区域的频率特性。轮胎在产生力之前，首先要

产生某种程度的回转，达到足以让轮胎产生力的变形量。如图 1-9 所示，解析车辆的频率响应与急转向时的响应特性，需要考虑轮胎的频率响应特性。轮胎的频率响应其实是由轮胎自身的转动速度与侧滑角及轮荷的变化速度之间的关系决定的。通常，把 F_y 近似为一次延迟，常用转动速度除以其时间定值得出的张弛长度（距离）量来表示。

M_z 的张弛长度也会影响频率响应特性，除此之外，转动速度为 0 时会产生转向力矩，二者合起来就形成了频率响应特性。

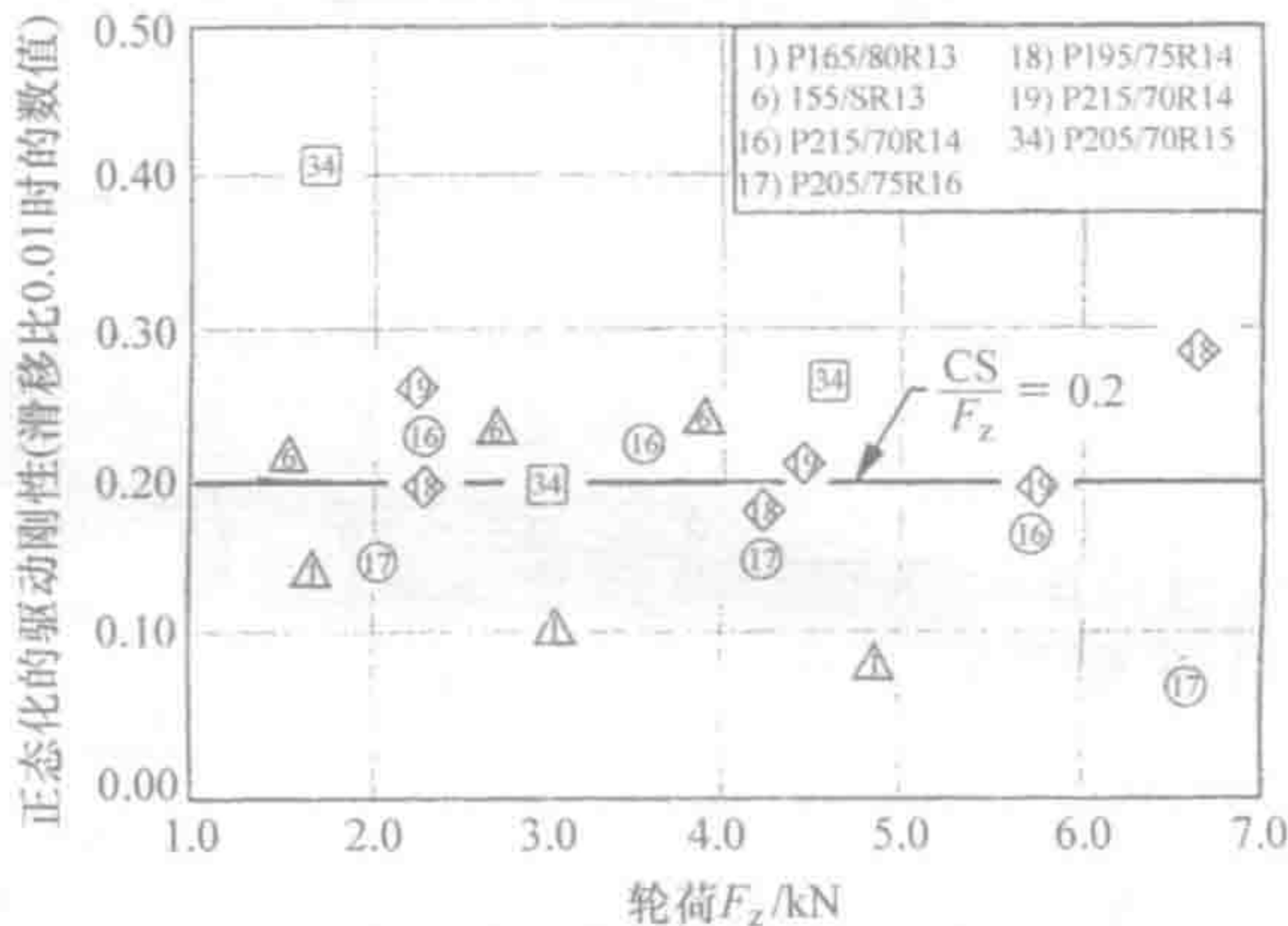


图 1-9 正态化的驱动刚性对轮荷的依存性^⑩

F_x 方向（ M_y 轮胎回转扭转方向）的刚性大于 F_y 方向，故在解析运动性能时，不过多考虑响应特性。但在解析 ABS 等高速工作装置的动作时，有时仍需考虑。

1.2 解析运动性能用轮胎模型

1.2.1 必要条件

用于解析车辆运动性能的轮胎模型，即便是简单的 2 轮车辆模型，车辆的力平衡计算也需要 2 次，四轮车辆模型则需要计算 4 次。再加上下文所述的轮胎动态特性，则需要更多的时间。因此，在计算时间等实质性制约条件基础上，判明需要哪种程度的轮胎模型十分关键。