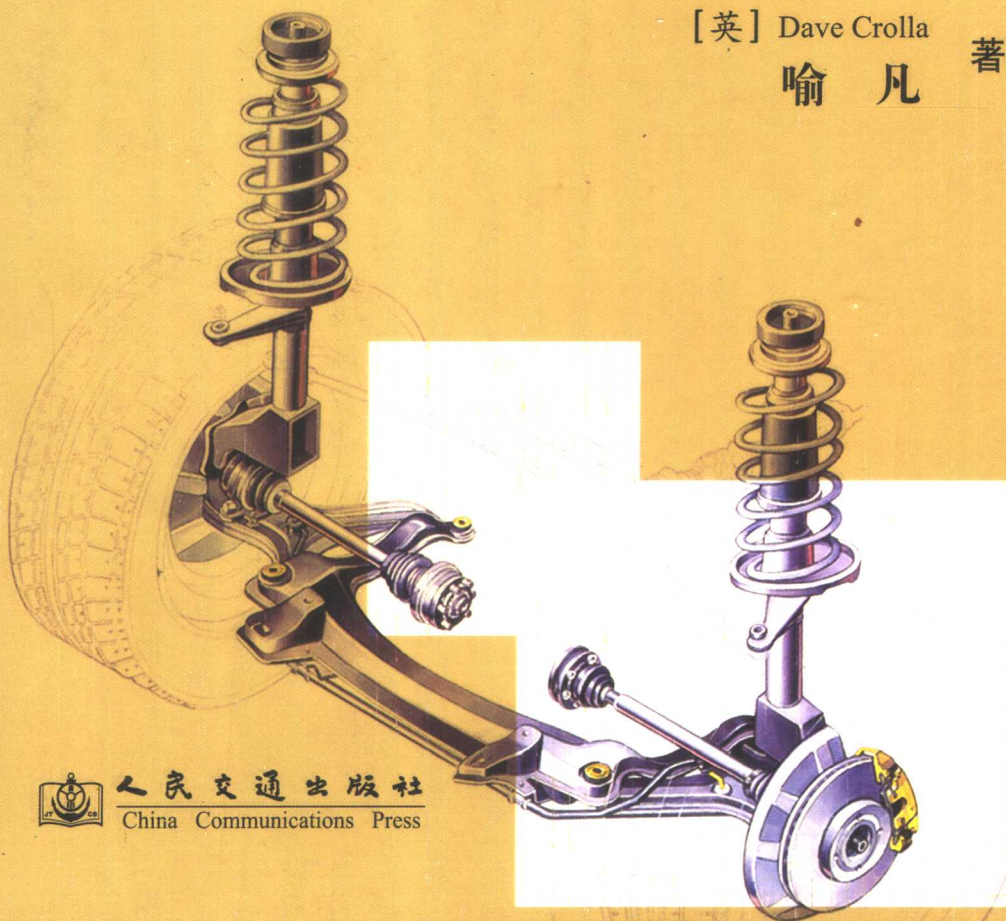


Vehicle Dynamics and Control

车辆动力学 及其控制

[英] Dave Crolla 著
喻 凡



人民交通出版社
China Communications Press

车辆动力学及其控制

Vehicle Dynamics and Control

[英] Dave Crolla

著

喻凡

人民交通出版社

内 容 提 要

车辆动力学是研究所有与车辆系统运动有关的学科,研究内容包括更广的范畴,如发动机、传动系、驱动与制动系统,但本书着重介绍的是车辆的垂向和横向动力学,即行驶动力学和操纵动力学。本书运用系统方法及现代控制理论,结合实例分析,介绍车辆动力学模型的建立、计算机仿真、动态性能分析和控制器设计的整个过程及方法,同时可使读者对常用的车辆动力学分析软件有所了解。

本书可供汽车设计和研究人员阅读参考,也可作为高等学校车辆工程专业教学用书。

图书在版编目(CIP)数据

车辆动力学及其控制/(英)克罗拉,喻凡著. —北京:人民交通出版社,2003.10

ISBN 7-114-04836-X

I. 车... II. ①克... ②喻... III. 汽车-动力学
IV. U461.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2003)第088852号

车辆动力学及其控制

(英) Dave Crolla

喻 凡 著

正文设计:孙立宁 责任校对:刘 芹 责任印制:张 恺

人民交通出版社出版发行

(100013 北京和平里东街10号 010 64216602)

各地新华书店经销

三河市宝日文龙印务有限公司印刷

开本:787 × 980 1/16 印张:14.25 字数:229千

2004年1月 第1版

2004年1月 第1版 第1次印刷

印数:0001—3000册 定价:26.00元

ISBN 7-114-04836-X

前 言

作者于 1992 年由原国家教委选派赴英国留学攻读博士学位,师从于利兹大学机械工程学院大卫·克罗拉教授。利兹大学为机械工程专业本科生开设的车辆动力学选修课程,主要的参考资料来自于克罗拉教授编写的一本讲义《Introduction to Vehicle Dynamics》。作者在 1996 年回国后一直以这本讲义作为主要参考教材,分别在原吉林工业大学和上海交通大学为研究生讲授“车辆系统动力学”课程。

本讲义介绍的内容比较广泛,从本学科的历史到学科的最新发展。虽然在利兹大学已使用了近二十年,但几乎每两年内容都有更新,其中结合了许多研究生的研究成果。写作方式上的特点是,不仅是简单地“介绍”本学科的内容,而是加强“论述”,即“为什么要这样做?”“怎样做?”作者在几年的课程教学中发现,学生对车辆动力学建模和仿真分析很感兴趣,通过几个相关的“大作业”可以更好地理解学习内容。而这本讲义中恰好给出了几套完整的车辆参数及仿真分析的过程和结果,为学生进行动力学建模和仿真分析提供了很好的参考。

基于上述原因,我很想以本讲义为主要素材,并结合近年来迅速发展起来的车辆主动控制技术,通过一些典型实例,介绍在相关软件环境下的车辆动力学仿真及控制器设计的过程,并将这些方法介绍给更多的中国读者。该想法得到了克罗拉教授的积极响应,因此我们决定合著《车辆动力学及其控制》这本书。在写作风格上,我们试图涵盖“理论分析”和“对实际问题的解释”两个方面,从而期望本书对车辆工程专业的学生和从事汽车工程设计与研究的技术人员均有参考价值。

本书在编辑和出版过程中得到了人民交通出版社的帮助,特别是得到杜颖女士大力支持,黄景宇先生对本书的编排提出了许多宝贵意见,在此表示诚挚的谢意。本书在编写过程中还得到了上海交通大学车辆工程专业研究生们的热情帮助,在此一并表示感谢。

由于时间较为仓促,书中错误和疏漏之处在所难免,恳请读者批评指正,并希望通过 E-mail(fanyu@ sjtu.edu.cn)与我们联系。

喻 凡
于上海

PREFACE

This book has arisen out of a long term collaboration between Professor D. A. Crolla, School of Mechanical Engineering, University of Leeds, and Professor Fan Yu, School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiaotong University.

The material on vehicle dynamics originates from lecture notes delivered to the students of automotive engineering at the University of Leeds over the past two decades. Professor Fan Yu studied for a PhD degree entitled "Self-tuning and adaptive control for vehicle suspension" from 1992 to 1996, and has continued her research work in the area of vehicle dynamics and control respectively at Jilin University, Tsinghua University and Shanghai Jiaotong University. Over recent years, she has used these lecture notes as a main reference book for her Chinese students studying vehicle dynamics. Professor Fan Yu first suggested that we should collaborate to write a book for the subject, particularly for the research students of Automotive Engineering, and took responsibility for translating the original material into Chinese and for adding sections on suspension control and providing some simulation cases. Fortunately, the idea was supported by Ms. Du Ying, the deputy chief editor of China communication Press. That formed the motivation for us to co-write the book.

We hope the book will be useful both to students and to practising engineers in automotive engineering. So we have tried to write it in a style which embraces both the analytical understanding and a practical interpretation of the continually fascinating subject area of vehicle dynamics. If you have any comments or queries, then please contact either of us by email.

We would both like to thank all our friends and colleagues at Leeds, Jilin, Beijing and Shanghai. We would also like to acknowledge the support of the China Communication Press for the publication of the book and particularly, Mr. Huang Jingyu, who is responsible for the editing work. Also, thanks are due to many of research students who have supported us and contributed to the book. We will always

be grateful for the times shared with colleagues, both at work in our Schools of Mechanical Engineering and on more social occasions.

Finally, we would like to dedicate this book to our families.

Dave Crolla

August 7, 2003

In Leeds, England

目 录

第1篇 概述	1
第1章 车辆动力学介绍	1
1.1 历史回顾	1
1.2 研究范围	4
1.3 相关文献介绍	9
1.4 研究方法和设计哲学	10
1.5 期望的车辆特性	12
1.6 车辆动力学术语	14
1.7 标准和法规	17
1.8 发展趋势	17
参考文献	20
第2章 控制理论在主动悬架系统中的应用	23
2.1 引言	23
2.2 随机线性最优控制	23
2.3 预瞄控制	29
2.4 自适应与自校正控制	39
2.5 其他控制	43
参考文献	43
第2篇 行驶动力学	46
第1章 路面输入及其模型	46
1.1 路面测量技术	46
1.2 路面位移输入的频域表达	49
1.3 测量数据处理及路面不平度表达	51
1.4 路面输入的相关函数	53
1.5 路面表达的标准形式	54

1.6 其他特殊路面输入	56
参考文献	56
第2章 悬架相关元件及其动力学建模	57
2.1 轮胎	57
2.2 弹簧	58
2.3 减振器	62
参考文献	66
第3章 人体对振动的反应	66
3.1 内容简介	66
3.2 标准	67
3.3 平顺性测量	72
参考文献	74
第4章 行驶动力学模型	74
4.1 模型推导的前提	74
4.2 单轮车辆模型的推导	79
4.3 单轨半车辆模型的推导	93
4.4 整车模型的推导及结果分析	99
参考文献	101
第5章 可控悬架	102
5.1 自水平车高调节系统	103
5.2 自适应系统	104
5.3 可切换阻尼系统	106
5.4 全主动系统	107
5.5 有限带宽主动系统	109
5.6 连续可变阻尼的半主动系统	111
5.7 各类悬架系统的性能比较	112
参考文献	114
第3篇 操纵动力学	116
第1章 轮胎特性	116
1.1 概述	116
1.2 轮胎的物理特性	117
1.3 力和力矩特性	120

1.4 基于实测数据的轮胎经验模型	126
1.5 基于物理建模的轮胎模型	130
参考文献	131
第2章 基本操纵模型	132
2.1 概述	132
2.2 基本操纵模型假设	133
2.3 运动方程的推导	134
2.4 结果分析	143
2.5 对实际问题的考虑	157
2.6 一个完整的例子	163
参考文献	167
第3章 基本操纵模型的扩展	168
3.1 概述	168
3.2 车身侧倾的影响	168
3.3 车轮转动效应	174
3.4 转向系的影响	176
3.5 悬架运动学效应	180
3.6 变形转向效应	182
第4章 结合实例的操纵动力学性能分析	187
4.1 概述	187
4.2 模型参数组的开发	187
4.3 实例分析	190
参考文献	199
第4篇 车辆计算机建模与分析	200
第1章 车辆动力学分析方法及软件	200
1.1 概述	200
1.2 目标设计的车辆仿真程序	201
1.3 多体系统动力学分析软件	202
1.4 程序工具箱	204
1.5 各类方法的比较	206
参考文献	207
第2章 多体动力学实例分析	207

2.1 ADAMS/CAR 模块介绍	207
2.2 某轿车前悬架系统建模实例介绍	208
2.3 模型参数的准备	211
2.4 仿真分析	214
参考文献	217

第1篇 概述

本篇首先介绍车辆动力学的发展历史,论述车辆动力学理论对实际车辆设计所作的贡献、车辆动力学的研究内容和范围以及未来发展。其次,介绍主动控制在车辆中的应用,特别是结合行驶动力学模型的主动悬架控制器设计,以及主动控制系统对车辆的行驶、操纵及安全性能的影响。

第1章 车辆动力学介绍

1.1 历史回顾

车辆动力学是近代发展起来的一门新兴学科,最早的有关车辆行驶振动分析的理论研究可追溯到1900年^[1]。事实上,一个世纪前,车辆动力学还未被世人所承认。20世纪20年代,人们对车辆行驶中的振动问题开始有了一些初步的了解,直到30年代,才开始出现有关转向、稳定性、悬架方面的文章。20世纪30年代初期,英国的Lanchester^[2]、美国的Olley^[3]、法国的Brouhiet开始了车辆独立悬架的研究,并对转向运动学和悬架运动学对车辆性能的影响进行了分析。同时,人们对轮胎侧向动力学的重要性也开始有所认识。

回顾车辆动力学的发展过程,首先要肯定Frederick W. Lanchester对这门学科的早期发展所做的贡献。在他所处的时代,尽管缺乏成熟的理论,但作为当时最杰出的工程师,他对车辆设计的见解不但敏锐,而且深刻。即使在今天,Lanchester的思想对我们仍有一定的借鉴意义。

另一位对本学科发展有卓越贡献的人物是英国工程师Maurice Olley,他率先系统地提出了操纵动力学分析理论。后来,Olley这样总结了20世纪30年代早期的车辆设计状况^[4]:

“那时,已经零星出现了一些尝试性的方法,其目的在于提高车辆的行驶性能,但实际上却几乎没有什么作用。坐在后座的乘客像压载物一样,被放置在后轮上方处的位置。人们对车辆转向的不稳定已习以为常,而装有

前制动器的前桥横摆几乎成为了汽车驾驶中的必然现象。工程师们使所有的单个部件都制作得精致完好,但将它们组装成整车时,却很少能得到令人满意的性能。”

大约是在这个时期,行驶平顺性和操纵稳定性之间协调关系的重要性开始被人们所认识。1932年,Olley在凯迪拉克(Cadillac)公司建立了著名的“K²”实验台(一个具有前、后活动质量的车架),以此来研究前后悬架匹配及轴距对前后轮相位差的影响。该实验台并无测试仪器,完全靠感觉进行主观评判。由于在当时没有确定的术语,期望的车辆特性被Olley描述为“flat ride”(平稳行驶),他还提出一个实现“平稳行驶”的窍门,就是前悬架必须比后悬架要“软”一定的比例。

关于行驶平顺性问题的讨论,一直延续到20世纪30年代。也就在这一时期,出现了各种各样的独立悬架设计。当时,追求独立悬架设计的部分动机是试图克服与前桥设计相关的周期性摆振,而实际上前桥转向系统的设计直接影响着行驶动力学和操纵动力学两个方面。

但随后的20年中,车辆动力学进展甚微。进入50年代,可谓进入了一个车辆操纵动力学发展的“黄金时期”。这期间建立了较为完整的车辆操纵动力学线性域(即侧向加速度约小于 $0.3g$)理论体系。到50年代中期,一套较为完整关于操纵和转向的基础理论体系得以形成,其标志是1956年发生的一个“历史性事件”,Milliken将它称作车辆动力学发展过程中的一个分水岭,并在他的书中^[5]对此事件的整个过程作了详细的记载。当时,机械工程师学会(I. Mech. E)在伦敦组织了一个会议,主题是关于对汽车稳定性和控制及轮胎性能的研究。直到今天,人们都还认为,从车辆动力学角度来看,这次会议的论文极有创意,而且至今仍然被广泛参考。

在人们对车辆动力学理解的进程中,理论和试验两方面因素均发挥了作用。其一,有关飞机稳定性及其控制研究的理论被有效地运用于汽车,当时不少车辆动力学先驱原先是航空工程师(包括Leonard Segel);其二,轮胎的重要性被肯定,人们开始用轮胎试验台来测定轮胎的力学特性。正是由于Gough等人为轮胎特性提供了较为全面的认识,Olley^[4]、Milliken^[6]、Segel^[7]、Whitcomb^[8]等人才可能对操纵稳定性进行定性的处理分析。

在1993年关于车辆舒适性和操纵稳定性的机械工程师学会(I. Mech. E)会议上,Segel发表了一篇重要演讲^[9],这篇文章可能是迄今为止关于车辆动力学发展的最好的一篇回顾文章。Segel本人在1950~1990年间对车辆动力学的研究作出了重大贡献,在文章中他以自己深刻的理解

回顾了这门学科的发展,并以阶段划分的方式对本门学科的早期成就进行了概括,见表 1-1-1。

根据 Segel^[9]提出的阶段划分对车辆动力学早期成就的总结 表 1-1-1

阶段一(到 20 世纪 30 年代初期)

对于车辆动态性能的经验性观察;
开始注意到车轮摆振的问题;
认识到乘坐舒适性是车辆性能的一个重要方面。

阶段二(从 30 年代初期到 1952 年)

了解了简单的轮胎力学,并定义了侧偏角;
定义了不足转向和过度转向;
了解了稳态转向特性;
建立了简单的两自由度操纵动力学方程;
开始进行有关行驶特性的实验研究,建立了 K^2 试验台,提出了“平稳行驶”的概念;
引入了前独立悬架。

阶段三(1952 年以后)

通过试验结果分析和建模,加深了对轮胎特性的了解;
建立了三自由度操纵动力学方程;
扩展了操纵动力学的分析内容,包括稳定性和转向响应特性分析;
开始采用随机振动理论对行驶平顺性进行性能预测。

随后的几十年,汽车制造商们意识到行驶平顺性和操纵稳定性在车辆产品竞争中的重要作用,因而车辆动力学得以迅速发展。在试验方面,车辆行驶振动分析仪、路面测量、转向信号传感装置、变车道、J 转向等试验方法及测试技术日趋完善。人们对非线性操纵响应的理解也愈加深入,从而使操纵动力学的研究逐渐向高侧向加速度非线性作用域分析的方向发展。

计算机技术及应用软件的开发,使建模的复杂程度不断提高。多刚体系统(Multi-Body System)动力学分析软件(如 ADAMS, DADS)的应用,使复杂的车辆模型得到了明确的表达和方便的求解。而在此之前,用人工求解这样复杂的模型方程是不可想象的。

在动力学发展的同时,主动控制理论与技术也开始应用于车辆控制系统。甚至可以这样说,主动悬架控制技术代表了车辆动力学发展中的另一个里程碑。尽管在 20 世纪 60 年代早期,已有人开始进行了一些这方面的基础性研究工作,但首先使主动悬架的基本思想和控制律设计得以完善的应该是 Thomson^[10]。更有实际意义的是, Lotus 公司^[11]在 80 年代初制造了

第一辆装有主动悬架的原型样车。以往的车辆动力学研究都是针对被动元件(如弹簧、阻尼器、轴套等)的设计而言,而采用主动控制来改变车辆动态性能的理念,则为车辆动力学开辟了一个崭新的研究领域。特别是关于旨在开发先进的控制律以及预测其控制效果等方面的理论研究,更成为人们广泛关注的研究热点。然而,这些理论的应用还将主要取决于实际执行机构和相关控制元件的设计。

在过去的 60 多年中,尽管理论上取得了很多成就,工程师们拥有功能强大的计算机软件,可求解几十甚至几百个自由度的复杂车辆模型,但事实上没有一个车辆制造商会完全用理论来取代自己详尽的车辆开发过程。在实际新车型的设计开发中,汽车制造商仍然主要依赖于具有丰富测试经验与高超主观评价技能的工程师队伍,说明了实际测试和主观评价在车辆开发中不可替代的作用。而且,实际上不同国家和地区的用户对于行驶平顺性和操纵稳定性之间的协调关系有着不同的看法和要求,这也说明了主观评价在车辆动力学中的重要性。

1.2 研究范围

严格地说,车辆动力学是研究所有与车辆系统运动有关的学科。它涉及的范围很广,尽管有很多其他方面的因素影响车辆或其子系统的动力学响应(如发动机、传动系、加速、制动、防抱死和牵引力控制系统等),但车辆动力学的主要研究领域仍是行驶动力学和操纵动力学两个分支,这也是本书的主要内容。

一、行驶动力学

车辆行驶振动分析的基本理论研究可追溯到 1900 年。当时 Lanchester 设计了他自己的 10~12 马力汽车,该车的悬架数据,包括所谓“static yield”(静态产生)的垂直振动和俯仰频率等在论文中[1,2]都有所介绍。有趣的是,早期的汽车后悬架较前悬架软,因为最重要的人物——车主,通常坐在后部。在随后几年,由于车主本人通常也成了驾驶者,故前悬架通常做的较软,以提高其乘坐舒适性。Lanchester 也揭示了悬架几何尺寸及定位对控制车身侧倾的重要性,而车身侧倾又会使驾驶员感受到侧向干扰的影响。

进入 20 世纪 30 年代,人们对车辆行驶平顺性的研究主要是基于经验设计而非数学计算。那时,人们对橡胶衬套在抑制高频振动中的作用已有所认识^[12]。以 Olley 为核心人物的有关行驶平顺性问题的争论一直延续到 30 年代末,其中就车身振动固有频率、车身俯仰固有频率及其与前后悬架

刚度匹配关系等重要问题的讨论极为有意义。

随后车辆动力学的进一步发展是在完善的测量和计算手段出现后才得以实现。位于英国 Nuneaton 镇的英国汽车研究所(MIRA)对该领域的发展功不可没,所做的贡献包括路面特性的测量^[13]、主观评价和客观测试的关系^[14]、行驶平顺性测量仪的开发,以及率先采用了模拟计算机,随后是电子计算机的动力学计算研究等。还有一些车辆动力学研究的先驱者,包括美国的 Clark、Butkunas、Healy 和德国的 Mitschke 等人,他们在车辆建模与分析中,均采用了以轮胎接地点处的随机路面输入作为激励输入的“Lumped Mass Model”(集中质量模型)。

与车辆行驶动力学有关的主要性能指标,可由图 1-1-1 说明。在有限的悬架工作空间内,设计人员必须为驾驶员和乘客提供良好的乘坐舒适性、可接受的车身姿态以及对车轮动载荷的合理控制。车辆动力学研究的首要问题是动力学模型的建立,而分析行驶动力学问题的最简单的数学模型应该具有 7 个自由度的整车系统模型。随着功能愈加强大的多体动力学仿真软件的普及应用,包括衬套等复杂细节在内的车辆模型也可以方便地得到。

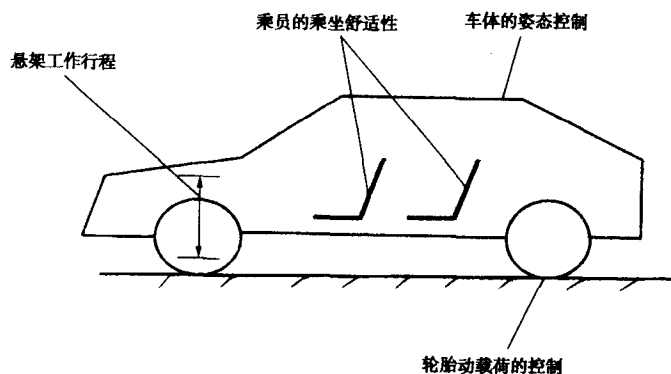


图 1-1-1 与车辆行驶动力学有关的主要性能指标

通常,我们将行驶动力学问题分为两类。一类是可通过数学建模分析的行驶动力学问题,可以称之为“Primary ride”(主行驶)问题。有关“主行驶”动力学的数学建模及随机路面输入下车辆响应分析的内容,我们将在第 2 篇中专门介绍。然而,主行驶研究还无法将车辆中的所有行驶振动特征完整而真实地描述出来,实际中还有大量其他因素影响乘员对乘坐舒适性的主观评价,包括对 15Hz 以上的结构振动的响应、更高频率范围内的振

动噪声问题(Harshness)、悬架系统中橡胶衬套的影响、对路面阶跃及凹坑等路障的纵向冲击的响应、人体对振动的响应等。目前几乎还没有办法用数学模型来准确地预测这些影响,通常将这类问题划分为“Secondary ride”(二级行驶)问题。

比如说,对路面凹坑这样的离散输入,对悬架系统振动噪声响应的评价,一般会涉及到3方面的问题,包括轮胎在路面输入处变形时的动态响应、纵向和垂向的悬架非线性动力学性能、驾驶员的响应特性。围绕其每一方面,均有众多不确定的因素,因而生产厂家必须依靠经验丰富的测试驾驶员来进行主观评价。这并不排除数学分析在解决动力学问题中的作用,设计者仍然需要通过模型来了解系统内在的复杂关系,并提供性能趋势的预估。

二、操纵动力学

用于分析车辆操纵特性的最基本的模型为两自由度操纵模型,对此我们将在第3篇第2章中给予详细介绍。在基本操纵模型中,车辆的向前速度被认为是常量,而两个变量分别是车辆的侧向速度和横摆速度。

对于基本操纵模型的动力学分析,归根到底说明了一个最基本的概念,即车辆的“不足或过度转向”特性。几乎在所有关于车辆操纵特性的技术讨论中都要用到该术语。分析结果表明,不足转向与过度转向的区别取决于一个重要的物理量,叫做车辆的“稳定裕度”(stability margin),定义为 $bC_r - aC_f$ 。其中 b 和 a 分别为前轴和后轴至车辆质心的距离; C_f 和 C_r 分别代表了前、后轮胎的侧偏刚度。如果稳定裕度为正值,车辆表现为不足转向;否则,为过度转向。尽管该结果是由如此简单的模型得出,然而它却体现了一个至关重要的概念,因此它在基本操纵模型以外的条件下也具有重要的应用价值。

可以这样认为,稳定裕度中的第一项 bC_r 代表了“后轮产生侧向力的能力”(更严格地讲,指后轮产生的力绕车辆质心的力矩);而第二项 aC_f 则表达了“前轮产生侧向力的能力”。因此,设计者可以利用前、后轮胎侧向力(或力矩)的平衡关系,扩展稳定裕度这一概念,并以此来理解以下因素的影响:

- (1)与负载情况有关的车辆质心位置;
- (2)与轮胎的结构、尺寸和胎压有关的轮胎侧偏刚度;
- (3)前、后轮外倾角;
- (4)前、后轴载荷转移;
- (5)侧倾转向效应;
- (6)变形转向效应等。

以上参数均可用来调节车辆的不足(或过度)转向程度,而且,各因素对不足(或过度)转向的作用均可以通过简单的两自由度模型定量地给出。由此看出,尽管任何一个模型的合理性并不是简单地与其复杂程度成正比,这种基于基本模型的分析方法却可以为研究更复杂的模型提供一个必要的基础。

通常,我们将操纵动力学的研究范围按不同的作用域划分,即:

- (1)线性域,侧向加速度 $<0.3g$ 时;
- (2)非线性域,研究的侧向加速度可高达极限(约为 $0.8g$);
- (3)非线性联合工况,指转弯制动或转弯加速时的情况。

对线性域情况,用稍复杂的模型(或许最多7个自由度),通过手工计算即可有效地建模和求解。考虑到实际设计中的可用性,模型中至少应包括车身的横摆、侧倾和侧向运动、悬架的运动学效应、悬架系统特性、转向系影响等。如高速直线行驶时,还要包括空气阻力和力矩。线性模型已经有效地应用到操纵性能定量分析,如上面提到的设计参数对车辆性能的影响。而对非线性域和非线性联合工况来说,通常则需要用多体动力学分析软件来求解模型中的非线性方程。

接着我们要讨论的问题是主动控制系统对改善车辆操纵性能的潜力。这里是以两种系统(如主动悬架系统和主动转向系统)为例来分别加以说明。首先,通过悬架控制车辆的垂向运动,对操纵稳定性至少有3个潜在的好处:

- (1)消除侧倾转向;
- (2)控制前、后轴的载荷分配;
- (3)控制轮胎动载荷。

经验表明,在以上3个方面的因素中,采用主动悬架来消除侧倾转向效应对主观评价影响最大,但在定量分析时,其优点似乎并非如此显著。但毕竟载荷转移相对减少,同时也消除了车身侧倾引起的悬架运动学效应,而且在转向过程中,也无需“浪费”任何能量用于激励那些我们并不期望的车辆侧倾模态。最近几年,人们在研究一些更简单的方法来控制车辆转弯时的车身侧倾,并研制出了原型样车。其工作原理大多是使横向稳定杆产生一个附加力矩,以抵消车身的侧倾。实施方案包括,在防侧倾杆中间加入一个旋转作动器,或在防侧倾杆的端部加上一个作动器,这类系统已被 Citroën 率先应用于市场,但却使每辆中档轿车的成本增加了约1000英镑。

车辆极限工况下的操纵特性很大程度上受轴荷转移及分配方式的影