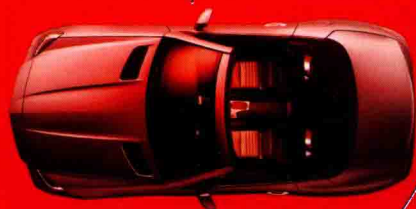


汽车动力学 & 底盘主动控制

丁能根 | 许骏 编著



QI DONG
LI XUE
CHE
JI DIPAN
ZHUDONG
KONGZHI



化学工业出版社

汽车动力学及底盘主动控制

丁能根 许 骏 编著



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书主要介绍汽车动力学基本理论及其建模和求解的一般方法,分析汽车的加速性、制动性、行驶平顺性和操纵稳定性,分析汽车动力学性能的主要影响因素以及改善这些性能的各种控制系统和方法。

在汽车动力学控制方面,运用现代控制理论并结合产业化开发实践,介绍了防抱死制动系统(ABS)、驱动防滑转系统(ASR)、电子稳定控制系统(ESC)和主动/半主动悬架控制等汽车底盘控制系统的工作原理、控制器设计及系统组成。

本书可作为高等学校车辆工程专业研究生教学用书,同时可供汽车设计和研究人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

汽车动力学及底盘主动控制/丁能根,许骏编著. —北京:
化学工业出版社, 2016. 11
ISBN 978-7-122-28341-2

I. ①汽… II. ①丁…②许… III. ①汽车动力学②汽车-
底盘-控制系统 IV. ①U461.1②U463.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 253513 号

责任编辑: 辛 田 刘 琳
责任校对: 王 静

装帧设计: 尹琳琳

出版发行: 化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷: 北京永鑫印刷有限责任公司

装 订: 三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张 13 字数 347 千字 2017 年 1 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价: 58.00 元

版权所有 违者必究



前言

FOREWORD

国内关于汽车动力学及底盘主动控制方面的教材、专著和译著已经不少,但从满足研究生课程教学的需要来看一般都存在一些不足。有些缺乏系统性或不够全面,有些内容相对陈旧,而有些则不适合用作教材。

本书在广泛参考了大量的教材和专著基础上,结合近年来汽车动力学及控制领域新的研究进展编写而成。在编写过程中,力求满足以下要求。

① 内容全面,系统性好。

② 深入浅出,便于学生阅读和理解。

③ 能够反映本课程研究领域的近期发展,如自适应巡航控制(ACC)、自主紧急制动系统(AEB)、汽车非线性动力学及稳定性分岔分析、前轮主动转向(AFS)和直接横摆力矩控制(DYC)等。

本书主要介绍汽车动力学基本理论及其建模和求解的一般方法,分析汽车的加速性、制动性、行驶平顺性和操纵稳定性,分析汽车动力学性能的主要影响因素以及改善这些性能的各种控制系统和方法。还介绍了汽车非线性动力学系统的稳定性分岔分析,这部分内容有助于理解汽车系统的稳定性及各种汽车稳定性增强系统的控制原理。

本书的第一个特点是注意吸收汽车动力学及底盘主动控制的最新研究方法和成果,如ACC、AEB、AFS和电子稳定控制系统(ESC)等,在其他同类书中介绍较少。

第二个特点是注意介绍汽车动力学问题的各种求解方法、适用范围和内在联系。譬如平顺性分析时,当受到路面不平度随机输入的车辆系统为线性系统时,可以用功率谱分析并求出频率响应函数的方法求解,这是利用了线性常系数微分方程解的叠加原理。如果考虑到车辆系统具有的明显非线性,则只能采用数值分析的方法。

第三个特点是研究内容比较广泛,涉及汽车整车和底盘各总成,全面反映了汽车的各种动态特性和动力学控制方法。

本书在编写过程中,清华大学郑四发教授、北京工业大学冯能莲教授等对本书提出许多宝贵意见。编写过程中得到了北京航空航天大学研究生院和化学工业出版社的大力支持和资助,同时在本书编写过程中参考及引用了国内外一些学者的论著和研究成果。在此,一并对他们表示衷心的感谢!

与已经出版的其他书籍一样,本书一定存在不足和问题。恳请读者批评指正,欢迎通过电子邮件(dingng@buaa.edu.cn、junxu@buaa.edu.cn)的方式进行沟通。

编著者



目录

CONTENTS

第 1 章 绪论	1
1.1 历史回顾	1
1.2 研究内容和特点	3
1.3 研究方法和理论基础	6
1.4 发展趋势	10
第 2 章 汽车驱动与制动动力学	13
2.1 驱动力和行驶阻力	13
2.2 汽车加速性能	18
2.3 汽车制动性能	23
习题	30
第 3 章 汽车纵向动力学控制系统	31
3.1 制动动力学单轮模型	31
3.2 ABS 的控制原理和控制技术	35
3.3 ASR 的工作原理和基本组成	41
3.4 ACC 的工作原理和控制算法	45
3.5 AEB 的工作原理和控制算法	52
习题	57
第 4 章 汽车振动基础	58
4.1 概述	58
4.2 单自由度系统	60
4.3 多自由度系统	68
4.4 随机振动基础	76
习题	83
第 5 章 行驶动力学	84
5.1 路面不平度及其功率谱	84

5.2 振动性能的评价	89
5.3 单轮车辆模型	94
5.4 单轨车辆和整车模型	110
5.5 行驶动力学仿真	115
习题	120

第6章 车辆的可控悬架 121

6.1 主动悬架	121
6.2 半主动悬架	132
6.3 其他形式的可控悬架	141
习题	146

第7章 轮胎模型 147

7.1 研究历史和现状	147
7.2 几种典型的轮胎模型	148
7.3 轮胎的瞬态响应特性	153
习题	155

第8章 汽车操纵动力学 156

8.1 概述	156
8.2 二自由度转向运动动力学	159
8.3 汽车闭环操纵动力学	165
8.4 汽车非线性动力学及稳定性分析	176
习题	180

第9章 汽车操纵稳定性控制系统 181

9.1 概述	181
9.2 基于差压制动的电子稳定控制	184
9.3 主动前轮转向控制	192
9.4 基于 AFS 和 DYC 的集成控制	197
习题	200

参考文献 201

汽车动力学及其控制涉及多门学科,是汽车设计与理论、机械振动、多体系统动力学、计算机仿真、控制理论、电子学、传感器技术和液压液力技术等多门学科和多项技术的综合应用。

本章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做的贡献、车辆动力学的研究内容、研究方法以及未来发展。

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,最早关于车辆行驶振动分析的理论研究可追溯到 1900 年。事实上,车辆动力学是在 20 世纪初随着车辆性能要求特别是行驶速度的提高而逐步形成并被世人所承认的。当时,汽车工业界的主要注意力放在新结构的应用和发明上,以便设计出速度更快、乘坐更舒适、使用更可靠的车辆。从图 1-1 所示的典型轿车最高车速可以看出,这一时期机动车的行驶速度上升很快。

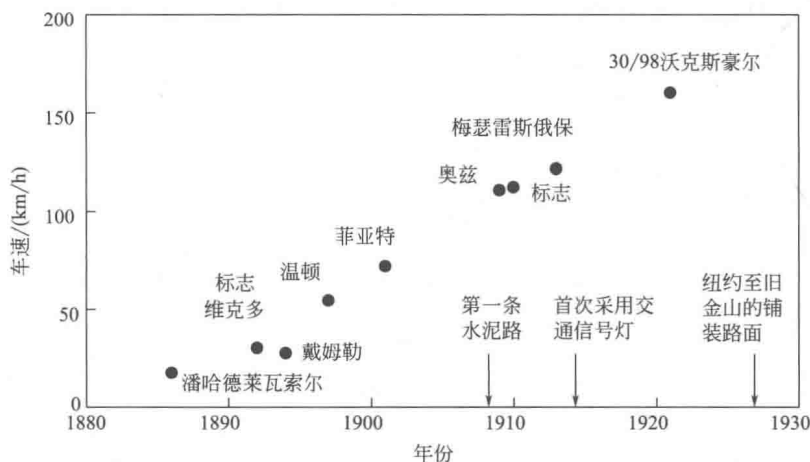


图 1-1 早期典型轿车的最高车速

到 20 世纪 20 年代,人们对车辆行驶中的振动问题开始有一些初步了解,并开始出现有关转向和悬架方面的文章。英国的 F. W. Lanchester 是最先撰写车辆动力学论文的工程师之一。在一篇 1908 年的论文中,他注意到如果作用在驾驶员手上的离心力使得转向角变大,则带有拖车的汽车在转向时出现“过多转向”。在 30 年代, Lanchester、美国的 M. Olley 和法国的 G. Brouhiet 开始研究独立悬架,分析转向运动学和悬架运动学对车辆性能的影响,并且注意到转向轮摆振现象。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,虽然今天看来前桥转向系统的设计实际上直接影响着行驶动力学和操纵动力学两个方面。

然而,正如 L. Segel 在 1990 年所描述的那样,早期对转向特性和摆振问题的理解因缺乏轮胎力学知识而受到限制。Olley 对这一时期的汽车工程界状况这样回忆:“那时,为了



让汽车行驶得平稳些，已经零星出现了一些尝试性的方法，但实际上却几乎没有什么作用。坐在后排的人就像压舱物一样守在后轮的后上方。转向经常不稳定，而前桥连同前轮制动器发生摆振几乎成为必然。虽然工程师们将所有的单个部件都制作得精制完好，但用它们组装成整车时却很少能得到令人满意的性能。”

1931 年，建成了一台作为测试装置的轮胎测功机，用来测试充气轮胎的机械性能。直到那时，Lanchester、Olley、Riechert 以及 Schunk、Rocard 和 Segel 等工程师们才给出汽车转向性能的力学解释，也只有在 Gough 等人为轮胎特性提供较为全面的认识之后，Olley、Milliken、Segel 和 Whitcomb 等人才可能在 50 年代对操纵稳定性进行定性的处理分析。

在 30 年代末之后的 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，一套较为完整的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”，W. F. Milliken 将它称作车辆动力学发展过程中的一个分水岭，并在他的书中对此事件作了详细记载。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引用和参考。

表 1-1 根据 Segel 提出的阶段划分对车辆动力学早期成就的总结

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多转向 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 实验台，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

在 1993 年关于车辆舒适性和操纵稳定性的机械工程师学会会议上，Segel 发表了重要演讲，它可能是迄今为止关于车辆动力学发展的最好的综述。Segel 本人在 1950~1990 年间对车辆动力学的研究做出了重大贡献。那篇文章中他以自己深刻的理解回顾了这门学科的发展，并将本门学科的早期成就划分为 3 个阶段，见表 1-1。

50 年代之后的几十年，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、移线、J 转向等试验方法与测试技术日趋完善。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大侧向加速度、非线性作用域分析的方向发展。

汽车工业经过 100 多年的发展已经取得了长足的进步，而车辆动力学在经过 80 多年的发展之后在理论和实践中都取得了很大成就。今天，功能强大的计算机软件可求解多至几百个自由度的复杂车辆模型。另外从研究手段上来看，不仅有纯软件仿真，还有分析结果更加准确可信的硬件在环仿真。但同时也应看到，不管理论研究和仿真分析发展到怎样的一个高度，事实

上没有汽车制造商会完全用理论分析和研究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,主要仍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,说明了车辆开发离不开实际测试和主观评价。另外,不同国家和地区的用户对行驶平顺性和操纵稳定性之间的协调关系有着不同的观点,这从另外一个侧面反映了主观评价的重要性。同时也应看到,和以前任何时候相比,车辆动力学在车辆设计和开发中都起着更为重要的作用。

1.2 研究内容和特点

车辆动力学是研究所有与车辆系统的受力和运动有关的学科。一般来说,车辆动力学的主要研究内容是通过建立汽车驱动动力学、制动动力学、行驶动力学和操纵动力学的运动方程和数学模型,分析汽车的运动规律及其加速性能、制动性能、行驶平顺性和操纵稳定性,并研究如何评价和改善这些性能。另外,汽车动力学的各种控制方法也是本书重要内容。

1.2.1 轮胎力学特性

人们经常说控制高速车辆的主要力是通过由4块成年人手掌大小的轮胎与地面的接地印迹产生的,事实确实如此。了解地面作用于轮胎上的力和力矩对于理解路面车辆的动力学行为是必不可少的。既然研究汽车在力作用下的响应特性——这些特性决定了汽车的加速、制动、转向和平顺性能,汽车动力学的很多内容就是研究这些力是如何产生的。在汽车所受的外力中,地面作用于轮胎的力对汽车动力学性能起决定性作用。因此,必须深入了解轮胎特性,该特性表现为在广泛的车辆行驶工况下轮胎所受到的力和力矩。在研究轮胎特性时,如果不了解它对汽车的重要性是不行的。因此,本书在有关章节对轮胎的力学特性和轮胎模型做了详细介绍。

1.2.2 驱动与制动动力学及其控制

驱动与制动动力学主要研究车辆系统沿汽车纵向的力与运动的关系,即研究汽车在驱动力或制动力以及各种阻力作用下的运动特性,这些特性包括加速性能和制动性能。驱动力或制动力都由地面产生,驱动时作用在驱动轮上,制动时作用在制动车轮上。驱动力和制动力都受限于地面的附着力,而地面附着力与车轮的运动状态(滑转或滑移)有密切关系,这是建立汽车纵向动力学及其控制模型时的重要研究内容。汽车行驶阻力中的空气阻力主要取决于汽车空气动力学性能,因在其他课程中有专门论述,本书中仅引用其中的有关结论。

制动防抱死系统(ABS)主要解决制动过程中的方向稳定性问题,同时可以缩短制动距离,从而提高行车安全。其实质是通过对制动过程中车轮滑移率的控制,保证汽车能获得足够大的横向附着力和尽可能大的纵向附着力。与制动动力学控制有关的主要研究内容包括ABS的理论基础、控制方法和系统结构。控制方法以逻辑门限值方法为主,并简要介绍模糊控制方法、最优控制方法和滑模控制方法。

驱动防滑转系统(ASR)则主要解决起步和加速过程的滑转问题,以尽可能提高汽车的动力通过性。由于其控制原理与ABS有许多共性,并且与ABS共用很多硬件,将ASR和ABS一起作为防滑控制系统加以介绍。

1.2.3 行驶动力学及其控制

通常,行驶动力学可分为两类问题。一类是可通过数学建模进行分析的问题,称之为主平顺性(Primary ride)问题。“主平顺性”动力学的数学建模及随机路面输入下车辆响应分析是本书中行驶动力学的主要研究内容之一。然而,还有一类问题无法利用主平顺性研究将



车辆中的所有行驶振动特征全面而真实地描述出来,即实际中还有大量其他因素影响着乘员对乘坐舒适性的主观评价。主要的影响因素包括对 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,一般将这类问题划分为次平顺性 (Secondary ride) 问题。例如,对路面凹坑这样的离散输入,评价悬架系统振动噪声响应一般会涉及到三个方面的问题,包括轮胎在路面输入处变形时的悬架非线性动力学纵向动态响应特性、轮胎在路面输入处变形时的悬架非线性动力学垂向动态响应特性和人体对振动的响应特性。每一方面的问题均存在众多不确定的因素,因而生产厂家必须依靠经验丰富的试车驾驶员进行主观评价。即便如此,也并不排除理论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,并预估性能趋势。

本书在行驶动力学方面主要研究路面不平所激发的汽车振动问题,即主平顺性问题。关

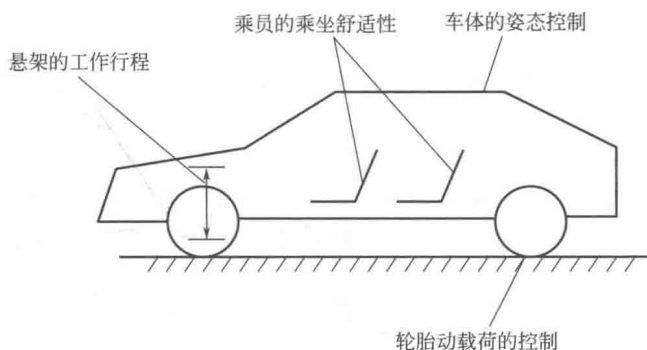


图 1-2 与行驶动力学有关的主要性能指标

于随机路面输入,在有关章节介绍路面不平度及其测量等内容。

与行驶动力学有关的车辆主要性能指标包括簧载质量的加速度、车轮与路面间的动载、车厢的姿态以及悬架的动挠度,可由图 1-2 说明。在给定的悬架设计空间内,设计人员必须为驾驶员和乘员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的合理控制。

在行驶动力学控制方面,主要介绍主动和半主动悬架。主动悬架

采用一个力发生器(或称为作动器)作为执行机构,以取代传统被动悬架中的弹簧和减振器。为节省控制能量,往往保留弹簧和减振器,并将主动悬架的执行机构与它们组合使用。半主动悬架是指仅阻尼可调的悬架。主动/半主动悬架设计的关键之一是寻求一个能够为车辆提供良好性能的控制律,这方面着重介绍随机线性最优控制和预瞄控制的方法,并简要介绍自适应与自校正控制等其他控制方法。

1.2.4 操纵动力学及其控制

汽车操纵动力学主要研究车辆对驾驶员通过转向系统及转向车轮的转向输入、对弯道行驶时车辆加速和减速以及对外界扰动的响应。与汽车操纵动力学有关的性能指标是操纵稳定性,这一性能是指在驾驶员不感到过分紧张和疲劳的条件下,汽车能遵循驾驶员通过转向系统及转向车轮所给定的方向行驶,且当遭遇外界干扰时,汽车抵抗干扰而保持稳定行驶的能力。

用于分析车辆操纵稳定性的最基本的模型是两自由度操纵模型。该模型假定车速为常数,两个自由度为车辆的侧向速度和横摆角速度。虽然两自由度操纵模型很简单,但它反映出的车辆“不足/过多转向”特性是操纵稳定性的最基本和最重要的概念,它对于车辆操纵特性的理解是至关重要的——即便在采用两自由度操纵模型以外的场合也是如此。

通常,将操纵动力学的研究范围按不同的作用域划分为以下几类。

- ① 线性域——侧向加速度 $\leq 0.3g$ 。
- ② 非线性域——侧向加速度可高达附着极限(约为 $0.8g$)。
- ③ 非线性联合工况——转向制动或转向加速等行驶工况。

对于自由度不超过 7 个的线性域,通过手工计算即可有效地建模和求解。考虑到设计中的实用性,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、转向系统影响等。高速行驶时还应包括空气动力学力和力矩。对于非线性域和非线性联合工况,一般采用多体动力学分析软件来求解模型中的非线性方程。

本书有关汽车操纵动力学的基本内容主要包括单轨模型下的稳态回转特性和瞬态转向特性、转向特性的主观评价、转向的闭环控制模型。结合实例的整车操纵动力学模型在汽车操纵动力学仿真一章中介绍。

在转向动力学的控制方面,主要介绍四轮转向(4WS)、主动转向系统和电子稳定程序(ESP),并介绍主动悬架系统对改善汽车操纵稳定性的作用。

4WS 车辆的后轮也能根据需要像前轮一样偏转一个角度,它使车辆操纵稳定性更好。低速转向时,后轮偏转方向与前轮相反,这使车辆的转弯半径减小,提高了机动灵活性。高速转向时,后轮偏转方向与前轮相同,车辆的瞬态转向特性大幅度提高且质心处侧偏角减小。主动转向系统通过控制汽车的动态特性,跟踪汽车理想转向横摆角速度。

通过轮胎纵向力主动分配的 DYC 能够比 4WS 更有效地提高车辆稳定性,其原因是由左、右纵向力的差异而产生的横摆力矩受侧向加速度的影响较小。DYC 的工作原理是控制器根据转向盘转角和车速计算出一个理想的横摆角速度,然后通过改变驱动力和制动力使车辆受到主动横摆力矩的作用,使车辆实际的横摆角速度跟随理想的横摆角速度变化。

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响,它决定了哪个车轮最先达到附着饱和状态。因此,前、后轴荷的分配控制对改善操纵稳定性会很奏效。譬如,ESP 允许载荷分布作为性能(侧向加速度和横摆角速度)和转向输入(转向盘转角)的函数而任意调节,因此它能够在极限情况下实现最佳的操纵稳定性。

通过悬架控制车辆的垂向运动,对操纵稳定性至少有以下三个好处。

- ① 消除侧倾转向。
- ② 控制前、后轴各自的横向载荷转移。
- ③ 控制轮胎动载荷。

经验表明,在以上三个方面的因素中,采用主动悬架来消除侧倾转向效应对主观评价影响最大——尽管在定性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。控制车辆转向时车身侧倾的一个简单方法是使横向稳定器产生一个附加力矩,以减小车身侧倾。其基本原理是汽车转向时,稳定器产生反侧倾力矩,大幅度地降低车身侧倾以提高汽车的乘坐舒适性;直线行驶时,稳定器因处于自由状态而不影响舒适性。实施方案一般是在防侧倾杆中间加入一个旋转执行机构或者在其两端各加一个执行机构。法国雪铁龙公司率先采用这类系统,相应的每辆轿车成本增加约 1000 英镑。

1.2.5 汽车动力学及其控制的研究特点

汽车动态特性(或称传递特性)曾在早期的汽车动力学中研究过。经典的汽车动力学主要研究汽车受到各种力时其相互作用和由此产生的各种动态工况,并讨论这些动态工况及其变化对汽车使用性能的影响。不足之处是涉及的外界力都是理想化的,模型也过于简单(追求解析解)。现代的汽车动力学也研究汽车的受力与运动,但车辆被处理为一个置于真实环境的系统,并研究路面不平度、土壤或路面物理性质、气流及风向等环境因素对车辆系统的作用。

现代汽车的速度越来越快,对高速行驶工况下汽车的操纵和控制的要求也越来越严格,否则很容易引发交通事故。现代汽车的可控性几乎和一个控制系统的要求是接近的。因此,汽车动力学及其控制是将整车或其中一部分看成一个控制系统来进行分析,这是与经典汽车动力学的第二个不同点。



现代汽车动力学的第三个特点是把驾驶员作为一个环节考虑到汽车系统中去组成一个人—车辆—环境系统来加以研究。例如，当汽车偏离预定路线时，驾驶员通过目测判断偏离量的大小，该信息传到大脑并经其处理后指挥四肢完成相应的纠偏操作。

汽车动力学控制朝着集成化方向发展。就未来的整车底盘控制而言，它将制动系统、悬架系统、减振系统、转向系统和轮胎集成为智能底盘。整体底盘智能控制的中央计算机根据传感器数据对行驶状态进行评估，通过各系统的相互协调，确保在所有路况下都获得更好的安全性和舒适性。由于采用集成控制技术，CAN 总线技术在汽车发动机及底盘控制中得到广泛应用。

1.3 研究方法和理论基础

1.3.1 经验法和解析法

可以用两种不同的方法理解汽车动力学——经验法和解析法。基于经验的理解来自反复试验，从而了解哪些因素以怎样的方式、在哪些条件下对汽车的性能产生影响。然而经验法经常会导致错误的结果。如果对汽车结构或性能参数影响整车性能的机理缺乏理解，仅将以往的经验外推到新的条件下使用，就可能因没有考虑到一些未知因素而使得单凭经验的方法不再奏效。基于这一原因，工程师们更愿意采用解析法。解析法根据已知的物理定律，试图描述所感兴趣研究对象的力学方程以便建立解析模型。其最简单的例子就是那些能用代数方程或微分方程表达的模型，这些方程反映了力（或运动）与控制输入以及车辆或轮胎的特性之间的关系，并对车辆的各种特性在感兴趣的现象中所起的作用做出评价。因此，所建立的模型为找出那些重要的影响因素及它们起作用的方式和起作用的条件提供了手段。模型还具有预测的能力，可通过改变参数的值达到给定的性能目标。

当然，也应当注意到解析法并不是无懈可击的，因为它们相对于真实情况来说只是近似的方法。建立模型时采用的各种假设是否合理对分析结果的正确性有决定性的影响，偶尔也会因处理不当而得出错误的结论。因此，理解动力学建模过程中所作的各种假设以避免出现错误是很重要的。

对汽车的动力学特性的研究开始的很早。经典的汽车动力学主要研究汽车受到各种力时运动状态的改变和动态响应特性，并研究各种工况下力的变化对汽车性能的影响。由于对涉及的汽车外力作了过多的假设和简化，模型过于简单，同时缺乏对轮胎模型的足够认识，早期的研究结果很难被用来指导汽车的设计和改进。

早期的汽车动力学研究中之所以采用过于简单的分析模型，与当时具备的求解能力和数值计算条件有关。在计算机出现以前，只有获得简洁形式的解时解析法才被认为是成功的。也就是说，所得到的解只有在能够直接反映所感兴趣的变量之间的关系时才被认可。这就限制了解析法在汽车动力学中的应用。汽车由大量部件、系统、子系统组成，还存在各种非线性关系，以前要建立一个完完全全的虚拟模型是不可能的，只能对一些机械系统建立较简单的模型进行研究。这种模型虽然有用，但简单模型存在的缺点限制了解析法在汽车开发中的工程应用。

随着电子计算机计算能力和计算速度的提高以及各种动力学分析软件的出现，现在已经能够利用计算机数字仿真技术完成各种复杂的动力学仿真研究，而不再追求如何获得简单形式的解。现在，可以将单个部件的模型（方程）集成到整车模型（方程）中进行分析，以考察部件结构和性能参数对整车动力学性能的影响，从而在实物制造出来之前就能完成仿真和性能评价，并能合理选择参数指导设计以提高整车的动力学性能。当设计人员不能确定某些特定性能参数的重要性时，就可以将这些性能参数包括在模型中并通过仿真评价它们对整车性能的影响。这为设计人员提供了一个强大的新工具，它是检验我们对复杂系统理解的一个

手段,是研究提高汽车性能的新方法。

1.3.2 汽车动力学及其控制的理论基础

研究汽车动力学时,当系统的力学模型建立之后,正确地确定描述系统运动的动力学方程就成为首要任务。可以用不同的力学原理来建立这类方程——这取决于系统的简化程度。对于单自由度、双自由度或某些简单类型的多自由度振动问题,可以用牛顿定律、达朗贝尔原理、动量定理或动量矩定理建立振动微分方程(组)。对于大多数多自由度系统,往往采用分析力学的方法。分析力学是基于能量观点建立起来的,它利用广义坐标作为独立参数来描述系统的运动。另一方面它应用达朗贝尔原理将静力学中的虚位移原理推广到动力学问题中去,从而建立动力学普遍方程式,据此推导出可广泛使用的拉格朗日(Lagrange)方程来建立系统的运动方程。用分析力学的方法可以较严格地阐明有限自由度体系振动的普遍规律和计算方法,而且所得到的规律可推广到无限自由度体系。这是一个很大的优点。其缺点是由于它所研究的对象具有普遍性,因而比较抽象,物理概念不那么直接。与此相反,由于用经典力学方法研究的对象比较简单,因而具有概念清楚、计算方便等优点。这两种方法在汽车动力学中都得到广泛应用。

线性系统理论和现代控制理论是汽车动力学及其控制的重要理论基础。

过去研究汽车动力学对环境和人的因素及它们与汽车的相互作用考虑得较少,而现在更多的是将“地面—车辆—人”作为一个整体加以研究。研究车辆系统在给定输入下的响应,如果把人的干预(即根据车辆运动响应,通过转向盘、加速踏板、制动踏板、离合器踏板和换挡手柄操纵车辆)考虑在内,则形成一个带反馈的闭环控制系统。但由于车辆系统的输入往往是瞬息万变的,单靠驾驶员控制是很不完善的,因此必须在系统中装有调节装置或控制装置。譬如,制动系统中的限压阀和比例阀就是调节装置,而制动防抱死系统(ABS)、驱动防滑转系统(ASR)、电子稳定程序(ESP)和电控主动悬架等则属于控制装置。没有系统分析的知识和现代控制理论的指导,汽车设计师就不能对车辆系统的动态特性做出科学的分析,也就不能设计出能保证优越性能的控制装置。所以系统分析、优化设计和现代控制理论(包括最优控制理论)是汽车动力学及其控制的重要理论基础。

就控制方法而言,汽车动力学控制中应用最成功和最成熟的是逻辑门限值控制和最优控制。ABS、ASR和ESP等普遍采用逻辑门限值控制方法;主动/半主动悬架则更多地采用最优控制方法。当然,随着控制方法的发展和人们对汽车动力学了解的深入,滑模控制、神经网络控制、模糊控制也逐渐得到更多应用。

汽车作为一个系统每时每刻都要通过其轮胎与地面发生相互作用,新发展的车辆地面力学和轮胎力学对研究地面与车辆相互作用起了很大作用。车辆驶过的道路不平度具有随机性,车辆系统在道路不平度输入的作用下其运动响应也是随机的,这种不确定性要求分析系统动态响应和输出的统计规律。因此,概率论及其分支随机过程是研究汽车动力学及其控制的必备理论基础。

人机工程学对研究“地面—车辆—人”系统也很有用,这项学科的研究对象是工程技术设计中与人体有关的问题,其目的是解决工程技术设计如何适应人体的各种要求,从而使人机系统工作效能达到最高。汽车性能如何最终要由人来评价,譬如研究平顺性时就必须了解人体对振动的响应特性,而研究操纵稳定性时则必须了解人体对车身侧倾的响应特性。因此,人机工程学也是汽车动力学及其控制的理论基础。

1.3.3 基本的建模方法

解决任何一个系统问题的首要步骤就是把实际问题抽象化,并转变为简化的模型。抽象



是通过一种思维分离出现象的本质而忽略非本质和次要因素的一种逻辑方法。就汽车运动和所受力的关系而言,通过抽象建立一种表达其动力学行为的模式就是数学建模并建立动力学方程。所建立的数学模型应当能反映汽车的动力学本质,也就是汽车的动态性能。

汽车的动态性能取决于作用于其上的各种力,这些力包括作用于轮胎上的地面力、整车受到的重力和空气产生的力。对于特定的运动形式和给定的行驶条件,在研究汽车及其部件时需要确定应当考虑哪些力以及车辆对这些力的响应。

如何选择建模复杂程度可能是建立汽车动力学数学模型首先会遇到的问题。各数学模型的复杂程度可能不尽相同,但每一个模型中的假设均应给予适当的考虑,并且这一点要贯穿于整个建模分析过程。如果模型的简化既要有利于对基本原理的理解,又要易于获得结果,则通常会以牺牲描述实际问题的精度为代价。首先要明确,到底什么信息是最关心、最需要的?这是选择建模复杂程度的基本原则。例如,在分析悬架弹簧和阻尼的基本设计问题时,选择一个双质量单轮模型应该是合理的,然而它对探讨悬架衬套刚度等细节的研究显然是不合适的。

汽车动力学建模所遵循的最基本物理定律是牛顿第二定律和达朗贝尔原理。根据这两个基本定律,可以针对汽车建立一组运动微分方程并据此研究汽车的动力学行为。然而,汽车由成千上万个零件组成,不可能也不必要每个零件都建立一个方程。解决的办法是将一起运动的多个零件简化为一个集中质量。譬如制动分析时,汽车可用一个位于其质心的集中质量来代替,该集中质量具有一定的质量和转动惯量。对于加速、制动和大多数转向分析,一个质量就够了;对于平顺性分析,经常需要将车轮处理为单独的质量。这种情况下,代表车身的集中质量被称为“簧载质量”,而代表车轮的集中质量则用“非簧载质量”表示。

有些场合,即便是单个零件也不能简化为集中质量,这就是所谓刚体和柔体的区别。所谓刚体就是不能变形的物体,柔体则能变形。譬如,若要考虑转向系统零件的扭转刚度对汽车操纵性能的影响,将转向盘轴处理为柔体更为恰当,而转向盘则可处理为刚体。

除了刚体和柔体,在建立汽车动力学模型时将一些零件抽象为弹性元件和阻尼元件(有时将它们称为力元)。弹性元件常常忽略其质量或在别处考虑其质量但具有传递力的特性。汽车悬架的弹簧就是典型的弹性元件,其质量常常被忽略。分析平顺性时若涉及高频振动,从充气的橡胶轮胎也可抽象出一个弹性元件,但轮胎的质量却不可忽略——该质量被处理为非簧载质量的一部分。阻尼元件也传递力且质量常被忽略,但它产生的力总是与运动方向相反。悬架减振器是典型的阻尼元件,橡胶衬套、轮胎和钢板弹簧也具有阻尼特性。

最常见的汽车动力学数学模型除上面提到的微分方程组外,有时也采用控制系统研究中广泛使用的方框图。方框图用数字与逻辑符号建立模型,反映信息传递的因果关系。由于方框内写的是研究对象的传递函数,所以方框图又称为传递函数图。

建立数学模型后,常遇到的一个问题就是求系统的响应问题。常用的求解方法如下。

① 解析法。只有极少的数学模型存在解析解,且主要针对线性系统。

② 数值法。这种方法借助计算机及相应的软件求解复杂系统的近似解,虽有误差,但精度满足工程要求即可。

还应指出的是,对于受到随机激励的线性系统,采用频域求解很方便,其实质是利用了线性微分方程的解的叠加原理。以汽车的平顺性分析为例,如果模型为线性的,很容易根据路面不平度的功率谱密度得到汽车振动系统任一响应量的功率谱密度,对其积分即得到该响应量的均方差并进一步得到标准差(反映随机量的统计特性)。对于大多数非线性系统,一般只能在时域用数值法求解。

1.3.4 汽车动力学术语和建模的一些约定

对于特定的运动形式和给定的行驶条件,在研究汽车及其部件时需要确定应当考虑哪些力以及车辆对这些力的响应。因此,就必须为系统建模建立一套严格的方法并对运动量的描述加以约定。本书所采用的符号、图表及文字说明均遵循国际汽车工程师协会(SAE)颁布实施的规定。

首先介绍两个SAE标准坐标系中描述车身运动的SAE标准坐标系,如图1-3所示。汽车上的各种运动是以一个右手正交坐标系(固结于车辆的坐标系,简称车辆坐标系)为参照系定义的,该坐标系的原点 O 位于车辆质心 CG 处,并随车辆一起运动。按照SAE的约定,车辆坐标系的 x 轴平行于地面指向车辆的前进方向,并位于汽车的纵向对称面内,该方向上的参数有纵向速度 u ,侧倾角 ϕ 和侧倾角速度 $p=\dot{\phi}$; y 轴平行于地面并指向车辆的右侧,该方向上的参数有侧向速度 v ,俯仰角 θ 和俯仰角速度 $q=\dot{\theta}$; z 轴垂直于地面指向车辆的下方,该方向上的参数有垂向速度 w ,横摆角 ψ 和横摆角速度 $r=\dot{\psi}$ 。在车辆坐标系中定义了车身运动的6个自由度(包括3个平动和3个转动),并规定了运动变量的符号(包括位移、速度、角位移和角速度)。

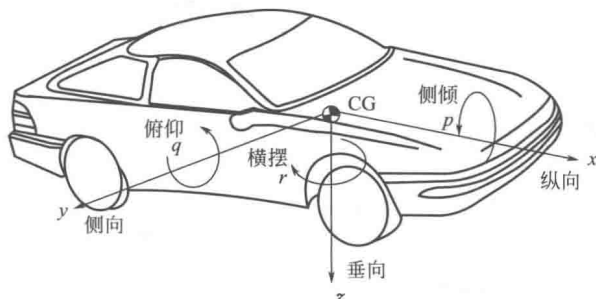


图 1-3 SAE 车辆坐标系

图1-4所示为描述轮胎运动的SAE标准坐标系。图中给出了轮胎的作用力和力矩的定义。同样,轮胎坐标系中,对方向、符号意义及表达均有详细规定。这部分内容参见有关轮

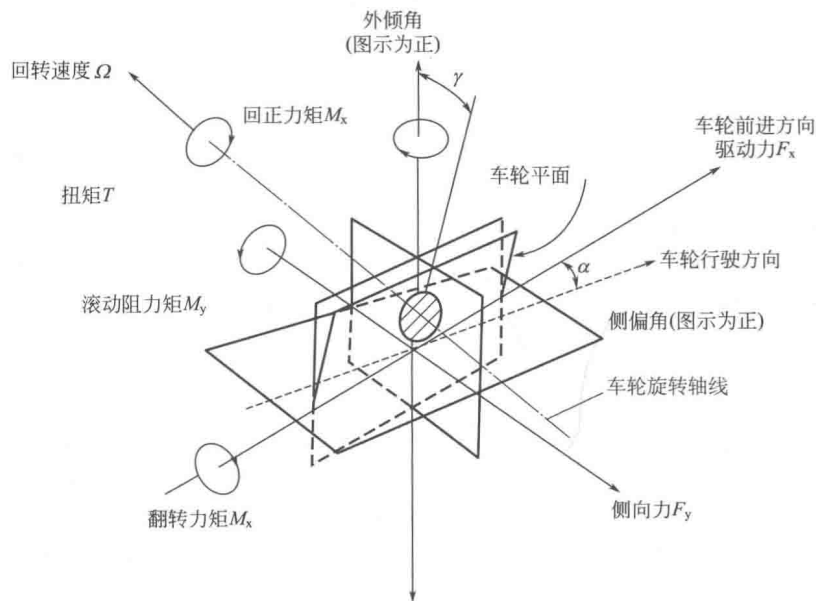


图 1-4 SAE 轮胎坐标系



胎模型的章节。

车辆运动过程中的姿态和轨迹是以一个固结于地面的右手正交坐标系（简称地面坐标系）来定义的。通常选择与车辆起始位置的车辆坐标系重合的地面坐标系，如图 1-5 所示。其中 X 、 Y 和 Z （图中未标出）分别表示向前的位移、向右的位移和垂直位移（向下为正）； Ψ 为航向改变角（车辆坐标系 x 轴与地面坐标系 X 轴在地平面内的夹角）； ν 为航向角（车辆速度矢量与 X 轴的夹角）； β 为侧偏角（ x 轴与车辆速度矢量的夹角）。

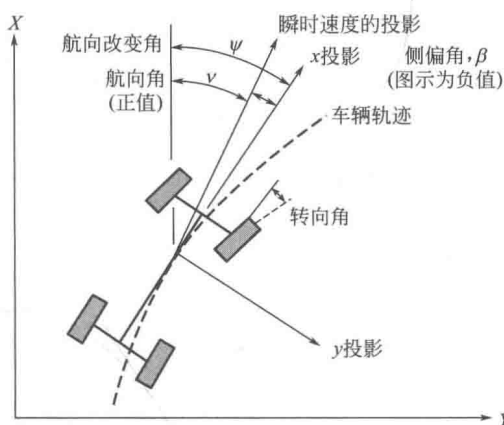


图 1-5 固结于地面坐标系中的车辆

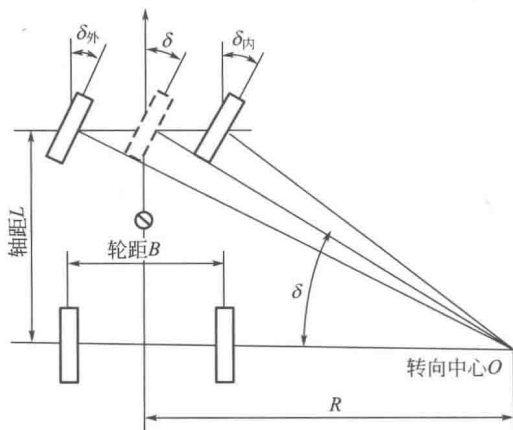


图 1-6 阿克曼转向角 δ 的定义

在进行汽车动力学分析之前，还需要定义一些其他术语。常用术语定义如下。

① 平衡条件 (Trim Condition)——指稳定状态，即平衡条件或基准条件。它是指在恒定条件下（通常是零输入）的车辆状态，在车辆稳定性分析及控制中通常作为分析的参照点。

② 干扰 (Perturbations)——指系统参数在平衡条件下的小幅度波动。

③ 稳态 (Steady State)——指车辆在周期性的（或恒定的）操纵输入（或扰动输入）作用下，若其响应也是周期性的（或恒定的）且在任意长的时间内不发生变化，则称该车辆处于稳态。

④ 瞬态 (Transient State)——指车辆的运动响应和作用在其上的外力或操纵位置随时间变化而变化，便称此时该车辆的运动处于瞬态。

⑤ 阿克曼 (Ackermann) 转向角——被用来描述车辆稳态转向时的运动学效应的前轮偏转角，如图 1-6 所示。这里假定轮胎作无侧偏滚动。两前轮之间的虚线矩形框表示假想的虚拟轮胎，其中心位于车辆纵向对称面内。

1.4 发展趋势

任何车辆控制系统的构成都包括三大组成部分，即控制器、传感器和执行机构。后两者在技术上可以解决，但对于作为控制系统关键的控制器，其控制算法实质是要寻求一个能够为车辆提供良好性能的控制律。为此，需要将控制理论与车辆动力学紧密结合，且主要以计算机建模与仿真分析以及实时控制试验为研究手段。随着主动控制系统在车辆中应用的增加趋势及各种功能控制系统集成程度的日益提高，车辆动力学在未来车辆控制系统设计中的作用将愈加重要。最近 10 年，人们在主动控制系统开发及其与被动车辆系统的动力学结合方面做了很多工作。在未来的发展中，这两方面工作仍然会涉及并进一步加强。

1.4.1 主动控制

以主动悬架为例,从理论上讲,采用主动悬架的车辆要想获得满意的控制律还要用到几项技术。在设计控制器时,一般对车辆的行驶条件都采用了一些假设并限定了其范围。然而在现实中的路面粗糙度、路面不平度输入、车速、制动力或驱动力等因素可能在较大范围内变化,因此控制器设计时需要考虑稳定性和自适应问题。也就是说,在保证系统稳定的前提下,控制器可在线地自调节以适应当前特定的运行条件。这就需要更深入的基础性工作,把先进的控制理论运用到车辆动力学设计中去。

研究表明,利用“轴距预瞄”信息可以提高后轮处的悬架性能,而这种轴距预瞄信息基于一个前提,即后轮的输入与前轮输入相同,只是时间上存在着一个滞后。假如我们将这一概念进一步扩展,即在车辆前部安装一个前视预瞄传感器,来提供关于前轮前方路面输入的可靠信息,控制系统就可同时利用车辆前后轮的路面预测信息来控制,这一控制方式称为“预瞄控制”。然而,预瞄控制的潜力尚有待于进一步研究,以判断开发这种传感器的实际价值。已有的一些研究结果显示,在前轮前方0.8~1m处前保险杠上安装传感器,能够获得满意的车辆性能改善效果,并具有可接受的性价比。

液气悬架的商业前途已得到人们的普遍认可,但实际中的一些约束条件限制了有限带宽主动悬架系统的市场开发。按其重要程度大致排列是,造价,能耗,增加的质量,安全性或可靠性。若想在今后几年内取得重大的发展,还需要在电液阀技术方面有大的突破来降低成本。一些功能相对较差而造价低得多的可控子系统将继续得到汽车厂商的关注,包括连续可调阻尼系统、侧倾控制系统和车高控制系统。实际上,如果能够将这3个子系统很好地结合使用的话,其共同完成的功能与一个有限带宽主动系统不相上下,但造价和能耗却可能低很多。

最后,探讨控制系统集成这个大范围的问题。控制系统已经在一些方面(如防抱死、牵引力控制等)得到了很好的应用,并且正在向其他方面拓展,如可切换阻尼器、侧倾控制、四轮转向等。这些系统最初只限于各自完成某一特定的功能,但它们迟早会结合起来。虽然这里我们并未涉及防抱死制动系统(ABS)和牵引力控制系统(TCS)等,但显然这些底盘系统通常相互关联,且相互作用。比如,通过垂向的轮胎动载荷影响,ABS或TCS必然要和主动悬架控制发生联系;又比如,车辆在对开路面(两边摩擦系数不同的路面)制动时,通过ABS对纵向力的控制可以与采用4WS对横向力的控制共同作用,以保证横摆力矩的稳定,提高车辆行驶安全性。因此,在车辆动力学领域中,对于这些控制系统的集成研究不仅必要,而且必需,同时也为未来的车辆动力学研究者留下了一个新的挑战。

1.4.2 整体底盘控制

作为车辆和道路之间的界面,轮胎和底盘对于行驶安全和舒适性起着决定性的作用,对于这个界面进行优化也就是我们未来最重要的项目。整体底盘控制项目将制动系统、悬架系统、转向系统和轮胎集成为智能底盘,如图1-7所示。整体底盘智能控制的中央计算机根据传感器数据对行驶状态进行评估,通过各系统的相互协调,确保所有路况下都能获得更好的安全性、舒适性和驾驶乐趣。整体底盘智能控制与传统底盘有以下区别。在弯道较多的山路行驶时,驾驶员要不断转向,整体底盘智能控制可大大改善对车辆的操纵,主动底盘使摆动减到最小,可变转向比使转向更轻松,这样,驾驶员可轻易完成弯道的行驶。道路上的湿树叶对于高速行驶来说不成问题。传感器获得有关各车轮附着力的数据,主动转向开始工作,以避免甩尾。主动底盘使车辆保持稳定,驾驶员在任何时候都能控制情况。在不同附着系数