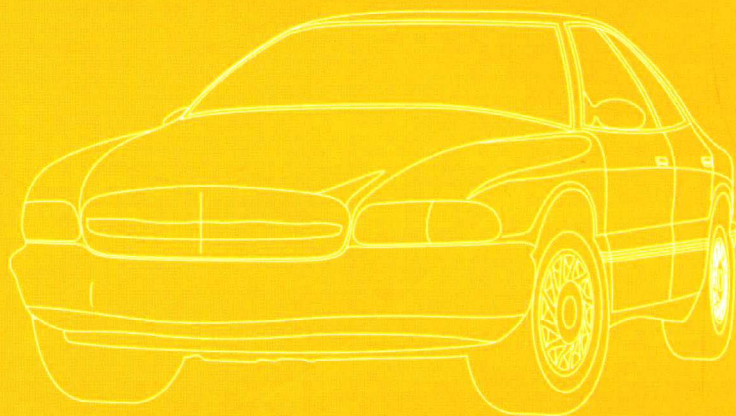




全国工程专业学位研究生教育国家级规划教材

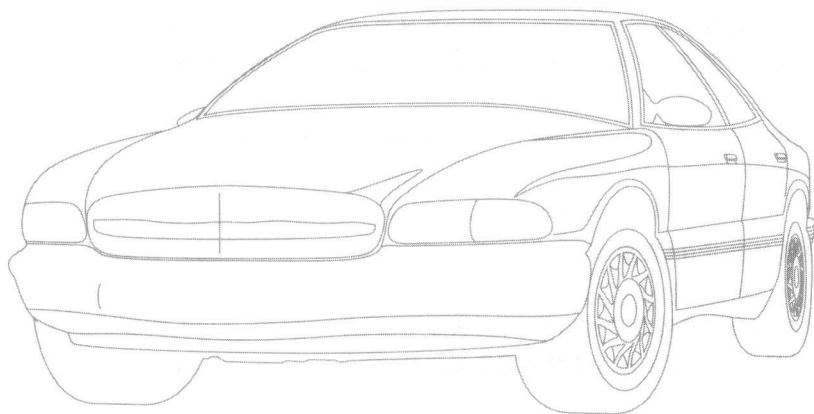


潘公宇 陈龙 江浩斌 杨晓峰 编著

汽车系统动力学基础 及其控制技术

清华大学出版社

全国工程专业学位研究生教育国家级规划教材



潘公宇 陈龙 江浩斌 杨晓峰 编著

汽车系统动力学基础 及其控制技术

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书系统地介绍了汽车动力学的基础理论、相关的现代控制理论的基础知识及其在车辆工程上的应用。汽车动力学的基础理论主要包括汽车的纵向动力学、操纵动力学和垂向动力学的力学分析和建模；现代控制理论的基础知识主要包括状态空间法、线性系统的能控性和能观测性、稳定性、最优控制等；车辆工程上的应用主要包括驱动防滑控制、制动防抱死系统、四轮转向系统、稳定性控制、半主动悬架及主动悬架等。

本书可作为高等学校车辆工程专业、载运工具运用工程等专业研究生教学用书，也可作为车辆工程专业本科生的选修课教材，对从事车辆专业的技术人员有很好的参考价值。

版权所有，侵权必究。侵权举报电话：010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

汽车系统动力学基础及其控制技术/潘公宇等编著. —北京：清华大学出版社，2017

(全国工程专业学位研究生教育国家级规划教材)

ISBN 978-7-302-45776-3

I. ①汽… II. ①潘… III. ①汽车—系统动力学—研究生—教材 IV. ①U461.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 290558 号

责任编辑：许 龙 赵从棉

封面设计：何凤霞

责任校对：赵丽敏

责任印制：刘海龙

出版发行：清华大学出版社

网 址：<http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址：北京清华大学学研大厦 A 座

邮 编：100084

社 总 机：010-62770175

邮 购：010-62786544

投稿与读者服务：010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈：010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者：保定市中华美凯印刷有限公司

经 销：全国新华书店

开 本：185mm×260mm 印 张：16

字 数：388 千字

版 次：2017 年 1 月第 1 版

印 次：2017 年 1 月第 1 次印刷

印 数：1~2000

定 价：39.80 元

产品编号：068664-01

随着汽车技术的不断发展,控制理论已成为汽车工程中不可缺少的一部分,控制技术在汽车系统动力学中的应用越来越广泛。本书从汽车系统动力学的基础理论出发,介绍了汽车纵向动力学、操纵动力学和垂向动力学的力学分析、系统建模及动态响应等,结合现代控制的基本理论,讨论了控制技术在车辆工程上的应用。

本书系统地介绍了汽车动力学的基础理论、相关的现代控制理论的基础知识及其在车辆工程上的应用。全书共分5章。第1章介绍了汽车动力学的研究范围、研究方法以及控制理论的产生与发展。第2章介绍了现代控制理论基础,包括状态空间法、线性系统的能控性和能观测性、稳定性、最优控制等。第3章介绍了汽车纵向动力学及其控制技术,包括汽车在驱动和制动过程的力学分析、驱动和制动过程中路面切向作用力及侧向作用力与滑移率的关系、动力传动系统及驱动力控制、制动系统控制等。第4章介绍了汽车操纵动力学及其控制技术,包括轮胎的力学特性、轮胎模型;操纵动力学的二自由度基本模型和扩展的三自由度及四自由度模型;汽车四轮转向系统的控制技术和稳定性控制技术。第5章介绍了汽车的垂向动力学及其控制技术,包括路面的输入特性和模型;汽车的单自由度、二自由度及四自由度模型的建立和分析;汽车半主动控制技术和主动控制技术等。

本书涵盖了汽车动力学的基础理论,汽车各典型系统的特性及控制方法,为高等学校车辆专业师生及从事汽车专业的技术人员提供了一本较全面系统的有关汽车系统动力与应用的参考书。

本书由江苏大学潘公宇、陈龙、江浩斌、杨晓峰编著。在编写过程中参考了国内外学者公开出版的相关教材、专著及相关研究论文,在此向这些资料的著者们表示衷心的感谢。

本书的编写和出版得到了江苏省重点学科(江苏大学交通运输学科)建设经费及江苏省汽车重点实验室基金的支持。编写过程中,得到了江苏大学汽车与交通工程学院姜中望、张明梅等研究生的热情帮助,在此表示感谢。

由于编者水平有限,书中缺点及错误之处在所难免,敬请读者批评指正。

编者

2016年6月于江苏大学

第 1 章 汽车动力学及控制理论概述	1
1.1 汽车动力学的研究范围	1
1.1.1 纵向动力学	2
1.1.2 操纵动力学	2
1.1.3 垂向动力学	3
1.2 汽车动力学的研究方法	4
1.2.1 经验法和解析法	4
1.2.2 基本的建模方法	5
1.3 控制理论的产生与发展	6
1.4 经典控制理论和现代控制理论	8
第 2 章 现代控制理论基础	10
2.1 系统描述及线性系统状态方程的解	10
2.1.1 状态空间表达式	10
2.1.2 $n \times n$ 系统矩阵 A 的特征值	12
2.1.3 利用 MATLAB 进行系统模型之间的 相互转换	13
2.1.4 线性系统状态方程的解	14
2.2 线性系统的能控性与能观测性分析	15
2.2.1 线性连续系统的能控性	15
2.2.2 线性连续系统的能观测性	18
2.3 线性系统的综合与设计	21
2.3.1 概述	21
2.3.2 极点配置问题	23
2.4 状态观测器	28
2.4.1 全维状态观测器的误差方程	30
2.4.2 对偶问题	30
2.4.3 可观测条件	31
2.4.4 全维状态观测器的 Bass-Gura 算法	31

2.4.5	最小阶观测器	35
2.4.6	具有最小阶状态观测器的观测-状态反馈控制系统	38
2.5	李雅普诺夫(Lyapunov)稳定性分析	38
2.5.1	Lyapunov 第二法	39
2.5.2	线性定常系统的 Lyapunov 稳定性分析	42
2.5.3	二次型最优控制	44
第 3 章	汽车纵向动力学及其控制	56
3.1	汽车的驱动力与行驶阻力	56
3.1.1	驱动力	56
3.1.2	行驶阻力	58
3.1.3	汽车行驶的驱动-附着条件	63
3.1.4	驱动力-行驶阻力平衡	64
3.1.5	纵向力与滑动率的关系	65
3.2	汽车动力性能及分析	68
3.2.1	理想的动力传动特性	68
3.2.2	动力传动系统的功能	70
3.2.3	现代动力传动系统的种类和组成	71
3.3	动力传动系统及驱动力控制	74
3.3.1	发动机燃油喷射及电子点火控制	75
3.3.2	离合器控制	77
3.3.3	自动变速器控制	80
3.3.4	驱动防滑控制	82
3.4	汽车制动性能及其控制	88
3.4.1	概述	88
3.4.2	制动动力学分析	88
3.4.3	制动稳定性分析	90
3.4.4	车轮防抱死控制系统	91
第 4 章	汽车操纵动力学及其控制	110
4.1	轮胎的力学特性	111
4.1.1	作用在轮胎上的力和力矩	111
4.1.2	侧偏角和侧向力特性	112
4.1.3	侧偏角与回正力矩特性	113
4.1.4	轮胎侧偏特性的简化理论模型	114
4.2	操纵动力学的基本模型	121
4.2.1	二自由度角输入运动	121
4.2.2	二自由度力输入运动	129
4.3	基本模型的扩展	133

4.3.1	线性三自由度角输入操纵运动的数学模型	133
4.3.2	线性四自由度力输入运动的数学模型	138
4.4	汽车四轮转向系统的控制技术	143
4.4.1	四轮转向系统概述	143
4.4.2	4WS 汽车模型及转向特性分析	148
4.4.3	4WS 汽车系统的最优控制	153
4.5	汽车稳定性控制	158
4.5.1	VSC 的结构及其原理	159
4.5.2	汽车稳定性的控制方法	161
4.5.3	动力学模型的建立及其仿真	165
4.6	汽车助力转向系统	172
4.6.1	汽车助力转向系统概述	172
4.6.2	转向助力特性的确定	174
4.6.3	转向系统的建模	176
4.6.4	仿真分析	179
第 5 章	汽车垂向动力学及其控制	181
5.1	人体对振动的反应	181
5.1.1	概述	181
5.1.2	ISO 2631 标准	181
5.2	路面不平度的统计特性	185
5.2.1	路面不平度的测量	185
5.2.2	路面不平度的功率谱密度	187
5.3	路面输入模型	188
5.3.1	频域模型	188
5.3.2	时域模型	189
5.3.3	四轮输入时的考虑	190
5.3.4	特殊路面的输入	190
5.4	汽车车身单自由度系统的振动	191
5.4.1	系统的运动方程	191
5.4.2	系统的频率响应特性	192
5.5	汽车的二自由度振动系统	193
5.5.1	汽车车身车轮振动系统的运动方程与振型分析	193
5.5.2	车身车轮振动系统的传递特性	195
5.5.3	双轴汽车振动模型	196
5.6	汽车多自由度振动模型	199
5.6.1	汽车车身车轮的四自由度模型	199
5.6.2	整车七自由度模型	200
5.6.3	扭振系统模型与分析	201

5.7 汽车半主动悬架及其控制技术	205
5.7.1 概述	205
5.7.2 半主动的控制策略	207
5.7.3 阻尼可调式阻尼器	210
5.7.4 半主动悬架的性能	222
5.8 主动悬架系统	225
5.8.1 系统模型的建立	225
5.8.2 主动悬架最优控制器设计	227
5.8.3 主动悬架系统的性能	229
5.8.4 液压主动悬架系统	233
5.9 半主动悬架和电动转向集成控制技术	239
5.9.1 半主动悬架和电动转向集成系统模型	240
5.9.2 半主动悬架和电动转向集成系统满意度优化	241
5.9.3 系统动态性能仿真分析和实验	242
参考文献	247

第1章 汽车动力学及控制理论概述

汽车系统动力学是近代发展起来的一门新兴学科,汽车系统动力学及其控制涉及多门学科,是汽车设计和理论、控制理论、机械振动、多刚体系统动力学、计算机仿真等多门学科和多门技术的综合应用。本章主要介绍汽车动力学的研究范围、研究方法以及控制理论的产生和发展。

1.1 汽车动力学的研究范围

汽车动力学是研究所有与汽车系统运动有关的学科。除了研究汽车纵向运动及其子系统的动力响应外,还有车辆在横向和垂向两个方向的动力学内容,即操纵动力学和垂向动力学。操纵动力学研究车辆的操纵特性,主要与轮胎侧向力有关,并由此引起车辆侧滑、横摆和侧倾运动;而垂向动力学主要研究由路面的不平激励,通过悬架和轮胎引起的车身跳动和俯仰以及车轮运动。图 1-1 示出了汽车动力学的研究范围及其相互关系。

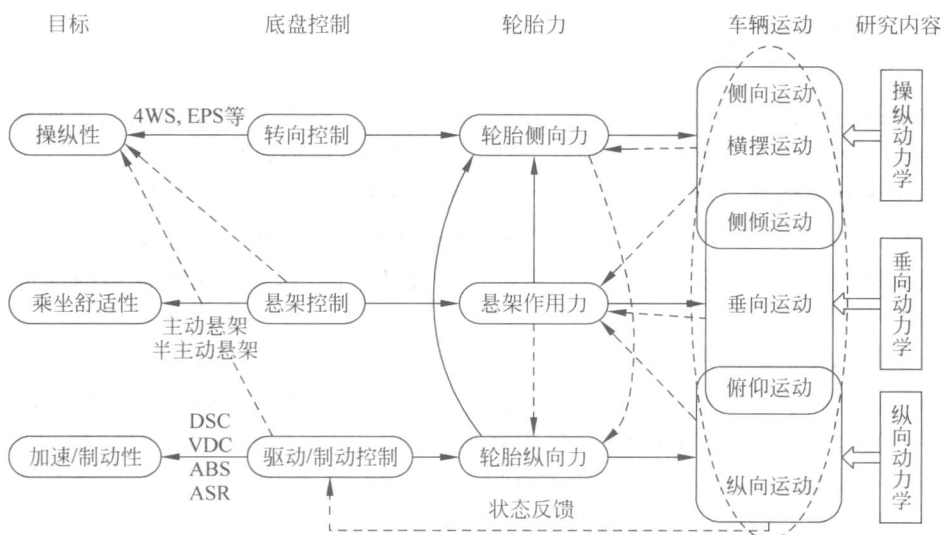


图 1-1 汽车动力学的研究范围

长期以来,人们通常在纵向、横向和垂向分别独立研究车辆动力学问题;而实际中车辆会同时受到三个方向的输入,各方向所表现的运动相应特性必然是相互作用、相互耦合的。比如转向过程中,路面在给车辆提供侧向力的同时,也通过悬架给车辆提供垂直输入干扰。

悬架的作用除支撑车辆、隔离路面干扰外,还将控制转向时的车身姿态,并传递来自轮胎的力。反过来看,同样的车身运动既可由行驶输入引起,如路面不平引起的车身侧倾,也可由操纵方面引起,如转向时引起的车身侧倾。此外,利用不同车轮纵向力控制来改善极限工况下的操纵稳定性控制系统也是一个典型的例子。当然,如果对车辆的工作状况及条件进行适当限制,那么三个方向的耦合关系则可能不太显著。比如,当车辆在水平粗糙路面匀速直线行驶时,问题将集中在垂向动力学特性方面;当车辆在水平路面匀速转弯行驶时,那些主导操纵性能的力和运动对纵向和垂向特性则无显著影响。

随着功能强大的计算机技术和动力学分析软件的发展,我们已经有能力将三个方向的动力学问题结合起来进行研究,对车辆动力学问题的分析也可能扩展到更复杂的工况及非线性域。

1.1.1 纵向动力学

纵向动力学研究车辆直线运动及其控制的问题,主要是车辆沿前进方向的受力与其运动的关系。按车辆工况的不同,可分为驱动动力学和制动动力学两大部分。

驱动动力学研究中,首先要了解车辆的行驶阻力,由此才可决定车辆驱动轮上所需的力矩和功率,以及能量消耗。行驶阻力代表了车辆对动力和功率的需求,而车辆的动力与传动系统则为车辆提供了对动力及功率的供应,需求与供应之间的平衡关系还与路面附着系数有关,直接影响车辆的驱动性能。

制动动力学研究中,首先要了解车辆制动性能的评价指标;在此基础上,研究制动过程分析及前、后车轮制动力的分配关系,并分析车辆的制动稳定性及其控制。

1.1.2 操纵动力学

在车辆动力学研究中,操纵动力学的内容最为丰富。由于轮胎的重要性,因此操纵动力学建模中必须要与轮胎模型精度相吻合,否则建立的操纵模型将失去意义。

分析车辆操纵特性可以从最基本的二自由度车辆模型入手,该模型中,车辆向前的速度被假定为恒定的,而两个变量分别是车辆的侧向速度和横摆速度。虽然基本模型看似简单,但它为操纵性能分析提供了十分重要的基础。在线性范围内,二自由度模型的预估精度可能会达到70%以上。

经过对基本模型的动力学分析,得到了一个关于车辆操纵特性的最基本的概念,即车辆的“不足或过度转向”(under/over steer)特性。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物理量,叫做车辆的“稳定裕度”(stability margin),定义为 $bK_2 - aK_1$ 。其中, a 和 b 分别为前轴和后轴至车辆质心的距离; K_1 和 K_2 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。可以看出,稳定裕度中的第一项 bK_2 代表了“后轮产生力的能力”(更严格的讲,指后轮产生的力绕车辆质心的力矩);而第二项 aK_1 则表达了“前轮产生力的能力”。因此,设计者可以利用前后轮胎力(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。

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)转向在线性域内的作用均可以通过对二自由度线性模型的扩展定量地给出。由此看出,任何模型的合理性并不是简单地与其复杂程度成正比,这种基于基本操纵模型的分析方法虽然简单,但它却可以为研究更复杂的模型提供一个必要的基础。

通常,操纵动力学的研究范围分为以下三个区域。

- (1) 线性域:侧向加速度约小于 $0.4g$ 时,通常意味着车辆在高附着路面作小转向运动。
- (2) 非线性域:在超过线性域且小于极限侧向加速度(约为 $0.8g$)范围内。
- (3) 非线性联合工况:通常指车辆在转弯制动或转弯加速时的情况。

对模型不太复杂的线性域情况,一般通过人工计算也可有效地建模和求解。但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,转向系统的影响等。在高速直线行驶时,还要包括空气阻力和力矩。尽管线性模型已经在操纵性能定量分析中得到了有效的应用,如前面提到的设计参数对车辆性能的影响分析,但对非线性域和非线性联合工况,则通常需要采用多刚体动力学分析软件,以求解这些非线性方程。

1.1.3 垂向动力学

与车辆垂向动力学有关的主要性能包括乘坐舒适性、车体的姿态控制、车轮动载荷及其悬架工作行程的控制。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、良好的车身姿态,以及对车轮动载荷的合理控制。垂向动力学研究中的首要问题是建立考虑悬架特性在内的车轮动力学模型,而分析这些动力学问题的最简单的数学模型是具有七自由度的整车系统模型。随着功能越来越强大的多刚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建立并进行分析。

实际上可将垂向动力学问题分为两类。一类是可以通过数学建模来分析的垂向动力学问题,有人称之为“主要行驶舒适性问题”。然而,主要行驶舒适性研究还无法将所有的行驶振动特性完整而真实地描述出来,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,包括对约 15Hz 以上的高频振动的响应、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、对路面的阶跃凸起及凹坑等路障的纵向冲击的响应以及人体对振动的响应等。目前,几乎还没有办法用数学解析模型来准确地预测这些影响,这类问题通常可以归结为“次级行驶舒适性问题”。

对次级行驶舒适性问题,通常需要人的主观设计。例如路面凹坑离散输入对悬架系统振动噪声响应的评价,一般会涉及三个方面的问题,包括轮胎在路面输入变形时的动态响应、纵向和垂直的悬架非线性动力学性能以及驾驶员的响应特性。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评价。

1.2 汽车动力学的研究方法

1.2.1 经验法和解析法

汽车动力学分析方法包括经验法和解析法。经验法来源于反复试验和工程实践,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,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导致错误的结果。基于这一原因,工程师们更愿意采用解析法。解析法是根据已知的物理定律,建立研究对象的力学方程和解析模型。描述模型的代数方程式微分方程反映了力(或运动)与控制输入以及车辆或轮胎的特性之间的关系,以此为基础研究并评价车辆性能。建模的目的就是要找出车辆性能的主要影响因素及其起作用的方式和条件。模型还应具有预测的能力,即能够通过改变参数的值达到预定的性能目标。

相对于真实模型,解析法在建模时采用了各种假设。这些假设是否合理决定了分析结果的正确性,处理不当就会得到错误的结论。因此,理解动力学建模过程中的各种假设以避免出现错误是很重要的。

早期的汽车动力学主要研究各种力作用下汽车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。由于对外力的假设和简化过多,同时缺乏对轮胎模型的足够认识,由这种过于简单的模型得到的研究结果很难被用来指导汽车的设计和改进。对于由大量部件、系统、子系统组成且存在各种非线性的汽车,在计算机出现以前所具备的求解能力和数值计算条件下,建立一个完整的虚拟模型是无法想象的。

随着电子计算机运算能力的提高以及各种动力学分析软件的出现,现在已经能够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。譬如,可以将单个部件的模型(方程)集成到整车模型(方程)中,以分析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。

研究汽车动力学时,首先要根据力学原理建立汽车系统的运动方程。对于自由度较少的振动问题,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。多自由度系统则更适合采用分析力学方法。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方程来建立系统的运动方程。分析力学的优点是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。其缺点是由于研究对象具有普遍性,因而比较抽象,物理概念不那么直接。而经典力学方法的研究对象比较简单,其概念清楚、计算方便。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 and 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、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,而防抱死制动系统(ABS)、驱动防滑转系统(ASR)、车辆稳定控制系统(VSC)和电控主动悬架等则属于控制装置。没有系统分析的知识 and 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作出科学的分析,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 VSC 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,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的性质,车辆系统在道路不平度输入作用下的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率达到最高。汽车性能最终要由人来评价,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。

1.2.2 基本的建模方法

建模是对实际问题的抽象,而抽象是一种通过思维分离现象的本质而忽略非本质和次要因素的逻辑方法。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,所建立的数学模型应当能反映汽车的动力学本质。

汽车动力学性能取决于受到的各种力,包括作用于轮胎的地面力、整车所受重力等其他各种外力。在不同的汽车运动形式和行驶条件下,需要对其受力进行不同的简化。

如何选择建模复杂程度取决于要达到的分析目标和精度要求。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是合理的,但对于悬架衬套刚度等细节的研究则不合适。又如,制动分析时可将汽车简化为一个位于其质心、具有一定转动惯量的集中质量。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,则有必要将车轮处理为单独的质量。此时代表车身和车轮的集中质量分别被称为“簧载质量”和“非簧载质量”。

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还将一些零件抽象为弹性元件和阻尼元件。对弹性元件常常忽略其质量或在别处考虑其质量,但它具有传递力的特性。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,则充气的橡胶轮胎也可抽象为弹性元件,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。

除上面提到的微分方程,最常见的汽车动力学数学模型有时也采用控制系统研究中广泛使用的方框图。方框图是用数字与逻辑符号建立模型,它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,所以又称为传递函数图。

数学模型的求解方法主要有解析法和数值法。解析法只对极少数数学模型有效,且主要针对线性系统。数值法常借助计算机及相应的软件求解复杂系统响应的近似解,虽有误差但精度满足工程要求即可。

对于受到随机激励的线性系统,采用频域求解更方便,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反映随机量统计特性的标准差。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 控制理论的产生与发展

在科学技术的发展过程中,自动控制起着重要的作用,和所有的科学技术一样,其发展同样也经历了由简单到复杂、由低级到高级的多个阶段。纵观控制理论的发展,可分为三个阶段。

第一阶段控制理论称为经典控制理论。

从自动控制技术的发展历史可以看到,早在两千年前就有了控制技术的萌芽。两千年前,中国就发明了指南车,这是一种开环自动调节系统。公元1086—1089年(北宋哲宗元祐初年),中国发明了水运仪象台,这是一种闭环自动调节系统,它利用水力运转,并能保持一个和天体运动一致的恒定速度。到了18世纪,自动控制技术逐渐应用到现代工业中,其中最卓越的代表就是由瓦特(J. Watt)发明的蒸汽机离心调速器,加速了第一次工业革命的步伐。

1868年,麦斯韦耳(J. C. Maxwell)解决了蒸汽机调速系统中出现的剧烈振荡的不稳定性问题,提出了简单的稳定性代数判据。1895年,劳思(Routh)与赫维茨(Hurwitz)把这种思想扩展到用高阶微分方程描述的更复杂的系统,各自独立地提出了两个著名的稳定性判据——劳思判据与赫维茨判据,基本上满足了20世纪初期控制工程师的需要。

到了第二次世界大战前后,对自动控制系统的全程控制或伺服控制的要求、对控制系统的准确跟踪与补偿能力的要求以及对系统静态准确度的要求越来越高,这就促进了控制理论的迅速发展。1932年,奈奎斯特(H. Nyquist)提出了在频率域内研究系统的频率响应法,提供了一个具有高质量的动态品质和静态准确度的军用控制系统所需要的分析工具。

1948年,伊万斯(W. R. Ewans)提出了在复数域内研究系统的根轨迹法。这两项重大的贡献,使控制理论发展的第一个阶段基本上完成了。建立在奈奎斯特的频率响应法及伊万斯的根轨迹法基础上的理论目前统称为经典控制理论。

控制理论的奠基人韦纳(N. Wiener)在1947年把控制理论引起的自动化同“第二次工业革命”联系起来。我国著名科学家钱学森将控制理论应用于工程实践,在1954年出版了《工程控制论》,为控制理论的发展与应用做出了卓越的贡献。

从20世纪40年代到50年代末,经典控制理论的发展与应用使整个世界的科学技术水平出现了巨大的飞跃,几乎在工业、农业、交通运输及国防建设的各个领域中都广泛地采用了自动控制技术。

第二阶段控制理论称为现代控制理论。

随着科学技术的飞速发展,在20世纪50年代末至60年代初出现了核能技术、电子数字计算机以及空间技术等现代技术革命。生产与科学实验的发展对控制系统提出了高速度、高精度的要求,并出现了许多大型复杂的控制问题,例如,多输入多输出系统、高速度高精度系统、非线性系统及参数时变系统等的分析与设计问题。这时,经典控制理论的局限性就明显地暴露出来,在控制理论的发展上孕育着一场新的变革。

科学技术的大发展不仅需要迅速地发展控制理论,而且也给现代控制理论的发展准备了两个重要的条件——现代数学和数字计算机。现代数学,如泛函分析、现代代数等,为现代控制理论提供了多种多样的分析工具;而数字计算机的发展更具有决定性的作用,可以说控制理论与控制技术是和数字计算机平行发展起来的。在这种情况下,于1960年前后开始形成现代控制理论,它的主要标志是贝尔曼等人提出的状态空间法(state space methods)、庞特里亚金极大值原理(Pontyagin's maximum principle)、贝尔曼动态规划法(Bellman's dynamic programming methods)、卡尔曼的可控性可观测性理论(controllability and observability)及最佳滤波理论(optimal filtering theory)。它主要通过状态空间方法,在时域范围内研究系统状态的运动规律,并实现最优化设计。现代控制理论克服了经典控制理论的许多局限性,显示了强大的生命力。现代控制理论主要用来解决具有多输入、多输出的多变量系统问题。系统可以是线性或非线性的、定常或时变的、集中参数或分布参数的,它适用解决大型复杂系统的控制问题,而且不限于单纯的闭环控制,可扩展为适应环、学习环控制。它的分析和综合的目标,是要提示系统内在的规律,并通过结构辨识与参数估计,针对一定的综合性能指标,实现系统的最佳估计和最佳控制。

第三阶段控制理论是20世纪70年代以来控制理论的新发展。在这段时期,生产技术的发展速度是惊人的,特别是电子器件与电子计算机的迅速发展,使控制理论受到很大的冲击,以至不得不引入“大系统”这个新概念。所谓大系统,就是规模十分庞大的信息与控制系统,如大型交通运输系统、大型电力网、大型通信网、大型空间探测系统等,它们大都包括若干子系统,并与有控制能力的电子计算机相结合,采用多级递阶控制,以实现多指标综合最优化。智能控制系统则是与人工智能相结合的信息与控制系统,例如模糊控制、人工神经网络等。另外,20世纪90年代末以来,不少研究者提出充分利用现在的一切技术,同时从时间和频域两种方法来设计控制系统,即择优控制(elective control)。

1.4 经典控制理论和现代控制理论

目前,虽然经典控制理论应用得比较广泛,但是该理论有它的局限性,主要表现在以下方面。

(1) 经典控制理论只适合于单输入-单输出的线性定常系统的研究。经典控制理论的研究方法是传递函数法,只讨论系统外部输入量与输出量之间的关系,因此当系统的内部特性中含有的某些因素在外部特性中反映不出来时,这种方法就可能得出错误的结论。经典控制理论本质上是一种频率法,要靠各个频率分量描述信号,也就是说,只限于线性定常系统才能使用频率法,否则就不能用迭加原理进行分析。因此,经典控制理论只局限于对简单的单输入-单输出的线性定常系统进行分析和设计。

(2) 经典控制理论很难实现实时控制。经典控制理论是以传递函数法为基础的,是在复数域内对控制系统进行研究。这就限制了对整个过程在域内进行控制的能力,只能判断系统运动的主要特性,得不出系统运动的精确曲线,因此难以实现实时控制。

(3) 经典控制理论很难实现最优控制。由于经典控制理论的设计方法是建立在试探法的基础上的,满足给定品质指标的设计方案可以有多个,设计的优劣在很大程度上取决于设计人员的经验,因此很难设计出品质指标最优的控制系统。

随着科学技术的发展,控制系统的复杂性及对其性能的要求也越来越高,经典控制理论的局限性也越来越突出。以状态空间法为基础的现代控制理论克服了经典控制理论的局限性,使控制理论的发展达到了一个新阶段。

现代控制理论的优越性主要表现在以下方面。

(1) 现代控制理论适用于多输入-多输出等复杂系统的研究。由于现代控制理论采用了状态空间法,因此所研究的系统可以是单输入-单输出的,也可以是多输入-多输出的;可以是线性的,也可以是非线性的;可以是定常的,也可以是时变的;可以是集中参数的,也可以是分布参数的;可以是连续型的,也可以是离散型的。状态空间法的实质就是将系统的运动方程写成一阶微分方程组的形式,进而将一阶微分方程组写成矩阵方程,因而简化了数学符号,方便了运算。

(2) 现代控制理论具有实现实时控制的能力。现代控制理论的研究是在时间域内进行的,这就允许对整个过程在时间域内进行实时控制。电子计算机的微型化与高速化在客观上提供了这种可能性。

(3) 现代控制理论具有实现最优控制的能力。由于采用了状态空间法,现代控制理论有利于设计人员根据给定的性能指标设计出最优控制系统。

现代控制理论主要包括两个方面的内容:其一是控制对象的研究即系统理论;其二是最优规律的研究,即最优估计与最优控制。

系统理论是现代控制理论的基础,其任务是研究动态系统的数学描述和内在属性。对动态系统的数学描述,主要使用状态空间法;关于动态系统的内在属性主要是指可控性、可观测性、可辨识性和稳定性等。除系统识别外,在现代控制理论中还要研究确定性最优控制、最优估计、随机控制、自适应控制等内容。

确定性最优控制问题是指控制对象的数学模型完全已知,在不考虑系统和测量的随机噪声情况下的最优控制问题,在这方面产生了许多理论和方法,如变分法、庞特里亚金原理及动态规划法等解析方法,以及最速下降法、牛顿-康托罗维奇法等数值分析法。另外,要实现闭环最优控制,必须获取控制对象的全部状态变量,但在实际上由于存在明显噪声和系统噪声干扰,往往不能得到全部状态变量。故必须研究状态最优估计问题,即从混有噪声的不足的测量信息中对状态向量进行估计,其常用的方法有最小二乘法、卡尔曼滤波法等。在确定性最优控制问题的基础上,考虑随机干扰信号且结合状态最优估计时,就得到了随机控制问题。当控制对象的数学模型未知时,为了进行最优控制,必须研究系统的结构辨识和参数估计问题。这种伴随着噪声干扰的控制问题又称最优自适应控制问题。显然,它是最优控制、最优估计和最优辨识问题的综合。另外,在现代控制理论最新研究的问题中,还有微分对策、分布参数控制理论、大系统理论等方面的内容。

最后应该指出,现代控制理论作为一种具有普遍意义的理论,它不限于使用在某一个工业技术领域,它有自己的体系和理论上的严密性和客观性。同时,它又是为各专业服务、为各专业所应用的,控制理论基础和专业技术结合起来,使专业得到更新的理论工具,推动专业技术工作的更加深入,从而使各专业技术的潜力充分发挥出来。20世纪90年代以来,现代控制理论在汽车工程中得到广泛的应用就说明了这一问题。目前,现代控制理论在汽车主动悬架系统、自动变速系统、制动防抱死系统、四轮转向系统和汽车自动驾驶系统等方面已经有了不少成功的应用实例。随着汽车技术发展的需要,将有更多的汽车部件应用现代控制理论的方法来分析和设计,以便提高汽车产品的性能,满足人们日益增长的要求。