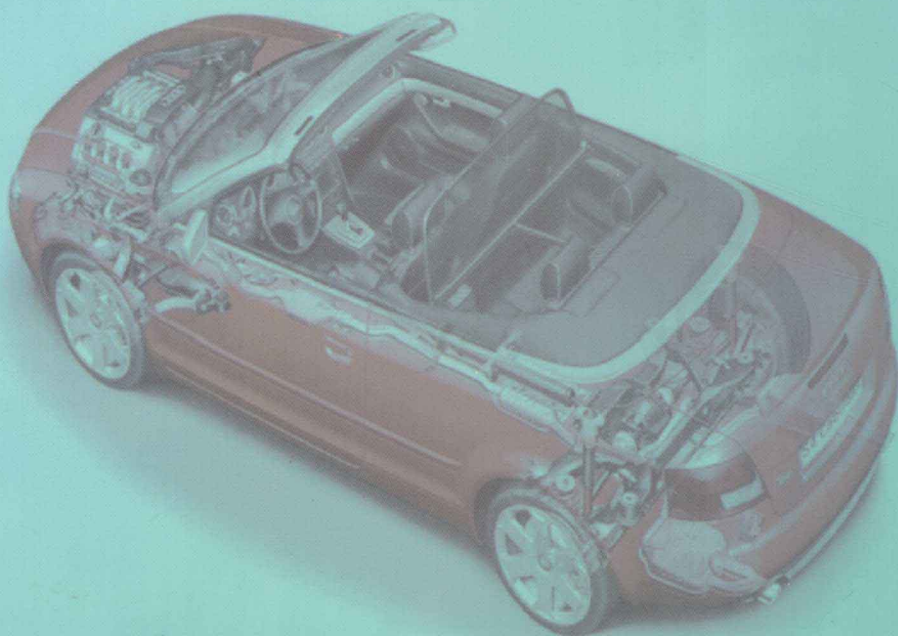


BASIS OF VEHICLE DYNAMICS

车辆动力学基础

唐传茵 张大千 主 编



東北大學出版社
Northeastern University Press

车辆动力学基础

主 编 唐传茵 张大千
副主编 赵广耀

东北大学出版社

· 沈 阳 ·

© 唐传茵 张大千 2011

图书在版编目 (CIP) 数据

车辆动力学基础 / 唐传茵, 张大千主编. —沈阳: 东北大学出版社, 2011. 11

ISBN 978-7-5517-0051-1

I. ①车… II. ①唐… ②张… III. ①车辆动力学 IV. ①U270.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 227252 号

出 版 者: 东北大学出版社

地址: 沈阳市和平区文化路 3 号巷 11 号

邮编: 110004

电话: 024-83687331(市场部) 83680267(社务室)

传真: 024-83680180(市场部) 83680265(社务室)

E-mail: neuph@neupress.com

http: //www. neupress. com

印 刷 者: 沈阳航空发动机研究所印刷厂

发 行 者: 东北大学出版社

幅面尺寸: 185mm × 260mm

印 张: 13.5

字 数: 337 千字

出版时间: 2011 年 11 月第 1 版

印刷时间: 2011 年 11 月第 1 次印刷

责任编辑: 任彦斌 王艺霏

封面设计: 刘江旻

责任校对: 伯 言

责任出版: 唐敏智

ISBN 978-7-5517-0051-1

定 价: 29.00 元

前 言

随着汽车技术的进步，对车辆性能要求逐渐提高，不断涌现的控制新技术被大量地应用在汽车上，车辆动力学的内容得到不断的完善与发展。本书主要针对本科生课程教学需要而设计，既包括车辆动力学的基础理论，又涵盖车辆动力学的控制算法，并且由浅入深地介绍了车辆模态分析的知识。编排上注重理论联系实际，系统性较强，可供有关技术人员参考。

本书主要介绍了车辆动力学建模的基础知识与求解的一般方法，通过实例，使读者学会运用动力学系统方法及现代控制理论进行车辆建模、仿真分析与控制系统设计，分析并评价车辆的行驶平顺性与操纵稳定性。通过研究平顺性与操纵稳定性的影响因素，为进一步改善这些性能，提出有效的控制策略奠定基础。

本书由东北大学唐传茵，沈阳航空航天大学张大千执笔编写。东北大学的赵广耀副教授负责编写第六章的内容。在编写过程中，东北大学的张天侠教授、杨英教授、郭立新教授对本书提出了许多宝贵的意见和帮助。此外，本书在编写过程中，得到了周淑文副教授、研究生徐小彬与朱泽鹏的热情帮助，在此一并表示感谢。

本书在编写过程中参考了大量国内外书籍和文献，引用了国内一些企业的实例，在此谨向这些书籍和文献的作者及相关企业表示深深的感谢与敬意。

由于编者水平有限，书中错误与疏漏之处在所难免，恳请读者批评指正。

编 者

2011 年 9 月

目 录

第 1 章 车辆动力学概述	1
1.1 车辆动力学的产生	1
1.2 车辆动力学的研究内容	3
1.2.1 行驶动力学及其控制	3
1.2.2 操纵动力学	4
1.3 车辆动力学的研究方法和理论基础	4
1.3.1 经验法和解析法	4
1.3.2 车辆动力学及其控制的理论基础	5
1.3.3 基本的建模方法	6
1.3.4 车辆动力学建模的坐标系	7
1.4 车辆动力学的发展趋势	7
1.4.1 车辆的主动控制	7
1.4.2 多体系统动力学	8
1.4.3 “地面 - 车辆 - 人”闭环系统和评价	9
第 2 章 随机振动及路面输入	10
2.1 随机振动的基本知识	10
2.1.1 分布密度函数和分布函数	10
2.1.2 高斯分布	11
2.1.3 从时间函数导出功率谱函数	12
2.2 路面不平度的功率谱密度	13
2.3 互功率谱密度和相干函数	14
2.4 路面测量技术及数据处理	17
2.4.1 路面测量技术	17
2.4.2 数据处理	18
2.5 路面输入模型	20
2.5.1 频域模型	20
2.5.2 时域模型	24
2.5.3 路面对四轮车辆的输入功率谱密度	25
2.6 特殊路面输入	27
第 3 章 车辆行驶动力学模型及分析	29
3.1 车辆振动系统的简化	29

3.2	单自由度车辆模型	30
3.2.1	运动微分方程	30
3.2.2	单质量系统的频率响应特性	31
3.3	车身与车轮两自由度模型	33
3.3.1	运动方程与振型分析	33
3.3.2	双质量系统的传递特性	36
3.3.3	基本性能参数的幅频特性	38
3.4	双轴车辆振动模型	39
3.5	整车模型	43
3.6	不同简化模型分析结果的比较	44
第4章	悬架系统特性对整车性能的影响	45
4.1	用随机振动理论分析汽车平顺性	45
4.1.1	平顺性分析的主要振动响应量	45
4.1.2	振动响应量的功率谱密度与均方根值	45
4.1.3	概率分布与标准差的关系	46
4.2	悬架性能对汽车平顺性的影响	47
4.2.1	单自由度系统对路面随机输入的响应	47
4.2.2	车身与车轮两自由度系统对路面随机输入的响应	51
4.3	悬架系统对转向特性的影响	55
4.3.1	侧倾力矩分配	56
4.3.2	外倾角变化	60
4.3.3	侧倾转向	62
4.3.4	侧向力柔顺转向	63
4.3.5	回正力矩	63
4.3.6	驱动力对转向的影响	64
4.4	不足转向效应小结	65
第5章	现代车辆悬架控制技术	66
5.1	汽车悬架的功用	66
5.1.1	被动悬架	66
5.1.2	主动悬架	67
5.1.3	半主动悬架	68
5.1.4	主动悬架控制技术的研究和应用	69
5.2	LQG 控制	70
5.2.1	LQG 控制原理	70
5.2.2	LQG 控制器设计	71
5.3	PID 控制	72

5.3.1	PID 控制原理	72
5.3.2	PID 控制器设计与仿真	74
5.3.3	PID 控制器的参数选择	75
5.4	神经网络	76
5.4.1	神经网络原理	76
5.4.2	BP 网络—多层前向网络误差反传的学习过程	77
5.4.3	车辆悬架系统的神经网络辨识	78
5.4.4	神经网络辨识与控制系统	81
5.5	模糊控制	84
5.5.1	模糊原理	84
5.5.2	模糊控制原理和设计方法	84
5.5.3	模糊控制器的结构选择	86
5.5.4	模糊规则的选取	86
5.5.5	模糊逻辑推理	88
5.5.6	精确化过程	88
5.5.7	数值仿真	89
5.6	遗传算法神经网络控制	89
5.6.1	神经网络与遗传算法的系统思维特性	89
5.6.2	遗传算法神经网络控制策略	90
第 6 章	振动乘坐舒适性评价	93
6.1	振动引起的乘坐舒适性的影响因素	93
6.2	坐姿振动的乘舒性研究	94
6.3	其他振动形式的影响	97
6.4	人体对振动的反应	98
6.5	乘舒性的评价方法	99
6.5.1	基本的评价方法	100
6.5.2	辅助评价方法	101
第 7 章	车辆的操纵稳定性	102
7.1	概述	102
7.1.1	汽车操纵稳定性包含的内容	102
7.1.2	车辆坐标系与转向盘角阶跃输入下的时域响应	104
7.1.3	人—汽车闭路系统	106
7.1.4	汽车试验的两种评价方法	106
7.2	转向系统	107
7.2.1	转向几何误差	109
7.2.2	前轮几何布置	111

7.2.3	转向系统的力与力矩	111
7.2.4	转向系统模型	114
7.2.5	转向系统影响因素实例	115
7.2.6	前轮驱动的影响	117
7.2.7	四轮转向	119
7.3	轮胎的侧偏特性	121
7.3.1	轮胎的坐标系	121
7.3.2	轮胎的侧偏现象和侧偏力 - 侧偏角曲线	121
7.3.3	轮胎的结构、工作条件对侧偏特性的影响	123
7.3.4	回正力矩——绕 Q_z 轴的力矩	126
7.3.5	有外倾角时轮胎的滚动	127
7.4	线性二自由度汽车模型对前轮角输入的响应	129
7.4.1	线性二自由度汽车模型的运动微分方程	129
7.4.2	前轮角阶跃输入下进入的汽车稳态响应——等速圆周行驶	131
7.4.3	前轮角阶跃输入下的瞬态响应	137
7.4.4	横摆角速度频率响应特性	143
7.5	汽车操纵稳定性与悬架的关系	146
7.5.1	汽车的侧倾	147
7.5.2	侧倾时垂直载荷在左、右侧车轮的重新分配及对稳态响应的影响	153
7.5.3	侧倾外倾——侧倾时车轮外倾角的变化	156
7.5.4	侧倾转向	158
7.5.5	变形转向——悬架导向装置变形引起的车轮转向角	159
7.5.6	变形外倾——悬架导向装置变形引起的外倾角的变化	161
7.6	车辆侧翻	161
7.6.1	刚体车辆的准静态侧翻	162
7.6.2	悬架车辆的准静态侧翻	164
7.6.3	瞬态侧翻	166
7.6.4	事故经历	171
第8章	车辆模态分析基础与测试技术	174
8.1	单自由度系统的传递函数分析	174
8.1.1	系统方程及传递函数	174
8.1.2	系统极点	175
8.1.3	留数	176
8.1.4	传递函数图	176
8.1.5	频率响应函数和脉冲响应函数	177
8.1.6	质量、阻尼和刚度变化对频响函数的影响	177
8.2	多自由度系统的传递函数分析	178

8.2.1	系统方程与传递函数	178
8.2.2	系统极点、固有频率和阻尼因子	179
8.2.3	模态向量和留数	179
8.2.4	频响函数矩阵和脉冲响应函数矩阵	180
8.2.5	无阻尼系统	181
8.2.6	正交性与模态坐标	182
8.2.7	解析法和实验法	183
8.3	模态参数识别	183
8.3.1	模态参数识别的基本概念	183
8.3.2	单自由度法	184
8.3.3	多自由度时域法	186
8.3.4	多自由度频域法	187
8.4	基本测试系统	188
8.5	车辆的准备	189
8.6	激励系统与激励信号	190
8.6.1	激励系统	190
8.6.2	激励信号	191
8.7	力和运动传感器	195
8.7.1	力传感器	196
8.7.2	运动传感器	196
8.8	车辆模态测试实例	197
8.8.1	试验设备	197
8.8.2	试验方法的确定	198
8.8.3	支持系统的布置及要求	199
8.8.4	测试方案的制定	199
8.8.5	试验结果	199
	参考文献	203

第 1 章 车辆动力学概述

从工程力学角度考虑,车辆动力学研究的是车辆受力和车辆运动的关系。而按照车辆术语来说,讨论的是车辆的各项行驶性能。

车辆动力学及其控制涉及如车辆设计与理论、机械振动、多体系统动力学、计算机仿真、控制理论、电子学、传感器技术和液压技术等多门学科和多项技术的综合应用。

1.1 车辆动力学的产生

车辆动力学是近代发展起来的一门新兴学科。有关车辆振动分析的理论研究最早可以追溯到 1900 年。事实上,直到 20 世纪 20 年代,人们对车辆行驶中的振动问题才开始有初步的了解;到 20 世纪 30 年代,英国的 Lanchester、美国的 Olley、法国的 Brou Ihiel 开始发表有关转向、稳定性、悬架方面的文章。

1932 年, Maurice Olley 在美国凯迪拉克 (Cadillac) 公司建立了著名的 “ K^2 ” 试验台 (一个具有前、后活动质量的车架), 来研究前、后悬架匹配及轴距对前、后轮相位差的影响。该试验台并无检测仪器, 完全靠感觉进行主观评判。由于当时缺乏确定的术语, 将 Olley 期望的特性描述为 “flat ride” (平稳行驶), 他还提出过一个实现所谓 “平稳行驶” 的经验窍门, 就是前悬架必须比后悬架要 “软” 一定的比例。以 Olley 为核心人物提出的有关行驶平顺性问题的讨论一直延续到 20 世纪 30 年代末, 其中关于车身振动、固有频率、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, 人们对橡胶衬套在已知高频振动中的作用也有所认识。也就在这时, 出现了各种各样的独立悬架设计, 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, 而前桥转向系统的设计直接影响着行驶动力学和操作动力学两个方面。

有关动力学的进一步发展是在完善的测量和计算手段出现后, 才得以实现的。英国车辆研究所对该领域的发展作出了重要贡献, 包括路面特性的测量、主观评价和客观测试的关系、行驶平顺性。测量仪的开发和率先采用了模拟计算机, 随后是基于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前驱者, 包括美国的 Clark, Burkunas, Healy 和德国的 Mitschke 等。他们在车辆建模与分析中, 均采用了以轮胎接地点的随机路面输入的 “集中质量模型”。随后的几十年, 车辆制造商意识到行驶平顺性在车辆产品竞争中的重要性, 因而车辆行驶动力学得以迅速发展。在试验方面, 车辆行驶振动分析仪、路面测量测试技术日趋完善。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。多刚体系统动力学分析软件 (如 ADAMS, DADS) 的应用, 使复杂的模型得到了明确的表达和方便的求解。在应用计算机技术的同时, 先进控制理论与技术的应用也极大地推动了车辆动力学的发展, 各种车辆底盘控制系统开始涌现, 底盘控制系统与车辆动力学的关系如图 1-1 所示^[4]。

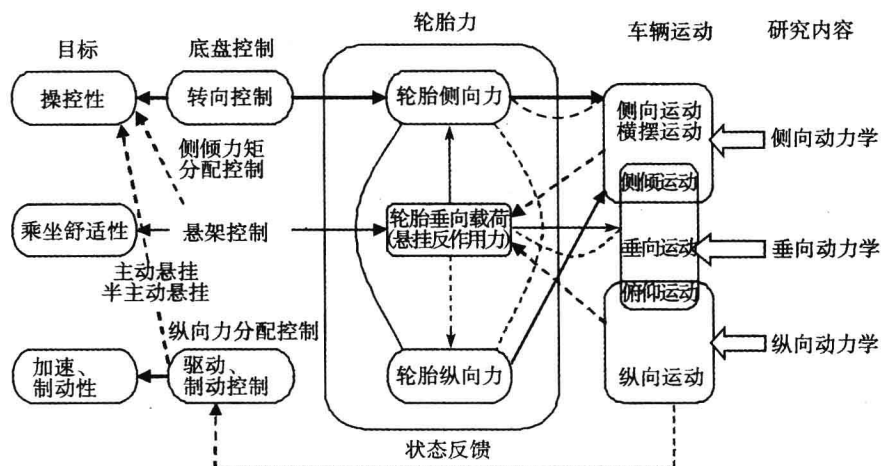


图 1-1 底盘控制系统与车辆动力学的关系

在 20 世纪 60 年代早期，已有人开始进行了主动悬架控制技术的一些基础性研究工作，但首先使主动悬架的基本思想和控制规律得到完善的应该是 Thomson。Lotus 公司在 20 世纪 80 年代初制造了第一辆装有主动悬架的原型样车。目前，主动、半主动悬架系统已经在某些豪华轿车和军用车辆中得到了应用。

掌握车辆动力学分为两个层面，即经验和分析。经验的掌握可以通过研究影响车辆性能的因素、影响的方式和条件，反复实践得到。然而，经验方法经常可能导致失败。如果不了解车辆设计或特性的变化如何影响性能，缺乏力学知识，而仅根据过去的经验推断新的情况及可能带来未知的因素，那么，产生的新结果可能背离凭经验获得的普遍法则。由于这个原因，工程师们更热衷于分析方法——通过描述基于已知的物理定律的力学要点，建立分析模型。在一般情况下，这些模型可以由代数方程或者微分方程表示，这些方程由一些将要讨论的力或运动与控制输入和车辆或轮胎特性关联起来。这些方程可以评价在讨论的现象中每个车辆特性发挥的作用。因此，模型的建立提供了辨识重要因素的方法及这些因素产生影响的运作方式和条件。模型还提供了预测能力，可以确定为实现给定性能指标所需要的变化。

需要指出的是，分析方法也不是十分可靠的，因为它们只是接近真实。根据经验，为得到易于处理的模型，必须做一些假设，而在应用分析方法时，这些假设时常导致严重的错误。因此，必须严格把握动力学模型的任何假设，以避免错误。

经过几十年的发展，车辆动力学在理论和实践中都取得了很大的成就。今天，功能强大的计算机软件可求解上百万自由度的复杂车辆模型。在研究手段上，除软件仿真外，还有分析结果更加准确可信的硬件在环仿真。但不管理论研究和仿真分析如何发展，理论分析和研究都不能取代详尽的车辆开发过程。新车型的设计开发仍然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，尽管如此，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 车辆动力学的研究内容

车辆动力学是研究所有与车辆系统的受力、运动有关的一门课程。一般来说,车辆动力学的主要研究内容是通过建立车辆驱动动力学、制动动力学、行驶振动动力学和操纵动力学的运动方程和数学模型,分析车辆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。

长期以来,人们一直在很大程度上习惯按照纵向、垂向和横向分别独立研究车辆动力学问题,但实际车辆会同时受到三个方向的输入,各方向所表现的运动响应特性必然是相互作用、相互耦合的(如图1-2所示)。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。悬架除起到支撑车辆、隔离路面干扰的作用外,还将控制转向时的车身姿态,并传递来自轮胎的力。

随着功能强大的计算机技术和动力学分析软件的发展,目前已能够将三个方向的动力学问题结合起来进行研究,对车辆动力学的分析可以扩展到更复杂的工况及非线性领域。但为便于初学者对车辆动力学内容的学习和理解,本书侧重于车辆的平顺性和操纵稳定性,即主要对行驶动力学和基本的操纵动力学给予介绍。

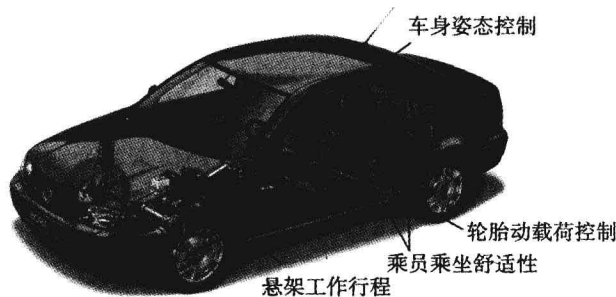


图 1-2 车辆行驶的动力与相关的主要性能指标

1.2.1 行驶动力学及其控制

通常,行驶动力学可以分为两类问题。一类是可以通过数学建模进行分析的问题,称之为“主平顺性”问题。“主平顺性”动力学的数学建模及随机路面输入车辆响应分析是行驶动力学的主要研究内容之一。然而,主平顺性研究还无法将车辆中的所有行驶振动特性全面而真实地描述出来,即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。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、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级平顺性问题。

比如说,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三个方面的问题,包括轮胎在路面输入处变形时的动态响应、纵向和法向的悬架非线性动力学性能、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车辆振动所引发的舒适性问题,即主平顺性问题。关于随机振动的概念及分析方法仅作简要介绍。

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、车厢的姿态和悬架的动挠度,可由图 1-2 说明。在给定的悬架设计空间内,设计者必须为驾乘人员提供良好的乘坐舒适性、可接受的车身姿态和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/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。

1.2.2 操纵动力学

车辆操纵动力学主要研究车辆对驾驶员通过转向系及转向车轮的转向输入、对弯道行驶时车辆加速和减速及对外界扰动的响应。与车辆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,车辆能遵循驾驶员通过转向系及转向车轮所给定的方向行驶,且当遭遇外界干扰时,车辆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二自由度操纵模型。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。虽然二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,即便在采用二自由度操纵模型以外的场合也是如此。

1.3 车辆动力学的研究方法和理论基础

1.3.1 经验法和解析法

车辆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、在哪些条件下对车辆的性能产生影响。然而,如果对车辆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,就可能因为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。

早期的车辆动力学主要研究各种力作用下车辆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车辆性能的影响。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车辆的设计和改进。对于由大量部件、系统、子系统组成且存在各种非线性特征的车辆,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和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。

1.3.2 车辆动力学及其控制的理论基础

研究车辆动力学时,首先要根据力学原理建立车辆系统的运动方程。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,据此推导出可以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以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。这两种方法在车辆动力学中都得到了广泛的应用。

线性系统理论和现代控制理论是车辆动力学及其控制的重要理论基础。

过去研究车辆动力学对环境 and 人的因素及它们与车辆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,而防抱死制动系统(Anti-Locked Braking System, ABS)、驱动防滑转系统(Acceleration Slip Regulation, ASR)、车辆稳定控制系统(Vehicle Stability Control, 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和现代控制理论的指导,车辆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车辆动力学及其控制的重要理论基础。

就控制方法而言,车辆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车辆动力学了解的深入,滑模控制、神经网络控制、模糊控制也逐渐得到更多的应用。

车辆驶过的道路的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车辆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设计中与人体有关的问题,其目的是解决工程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。车辆性能如何,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,人机工程学也是车辆动力学及其控制的理论基础。

1.3.3 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出现象的本质而忽略非本质和次要因素的逻辑方法。就车辆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车辆的动力学本质。

车辆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、整车所受重力和空气动力。在不同的车辆运动形式和行驶条件下,需要对其受力进行不同的简化。

建模的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,可将车辆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,而对于平顺性分析,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。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车辆操纵性能的影响,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,在建立车辆动力学模型时,还将一些零件抽象为弹性元件或阻尼元件(也称为“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。如车辆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,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——该质量应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的。悬架减震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。

车辆动力学数学模型除微分方程组外,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,所以方框图又称为传递函数图。

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,虽然有误差,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。以车辆的平顺性分析为例,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车辆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。

1.3.4 车辆动力学建模的坐标系

首先介绍用于描述车身运动的 SAE (Society of Automotioe Engineers) 标准坐标系, 如图 1-3 所示。车辆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 标准, 车辆坐标系的 x 轴平行于地面指向车辆的前进方向, 并位于车辆的纵向对称面内; y 轴平行于地面并指向车辆的右侧; z 轴垂直于地面指向车辆的下方。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)。

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^[5]。通常将地面坐标系选择为与车辆起始位置的车辆坐标系重合, 如图 1-4 所示。其中 X , Y 和 Z 分别表示向前的位移、向右的位移和垂直位移 (向下为正); ψ 为横摆角 (车辆坐标系 x 轴与地面坐标系 X 轴在地平面内的夹角); Y 为航向角 (车辆速度矢量与 X 轴的夹角); β 为质心侧偏角 (x 轴与车辆速度矢量的夹角)。

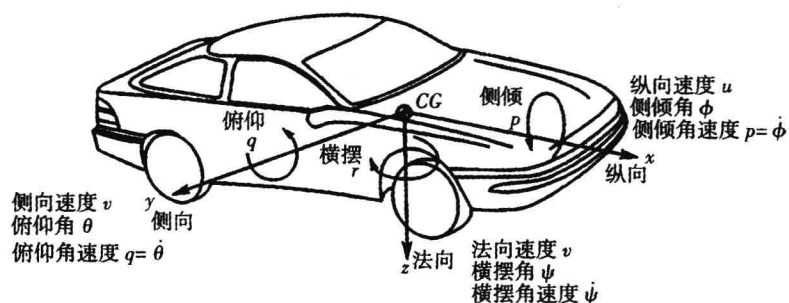


图 1-3 SAE 车辆坐标系

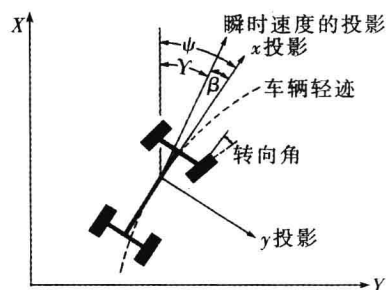


图 1-4 固结于地面坐标系中的车辆

1.4 车辆动力学的发展趋势

传统的车辆行驶动力学研究都是针对被动元件的设计而言的, 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。在车辆系统动力学研究中, 采用“地面-车辆-人”大闭环的概念应该是未来的趋势。作为驾驶者, 人既起着控制器的作用, 同时也是车辆性能的最终评价者。控制技术的应用使得车辆设计的目标可以是: 力求使车辆系统在各种工况下都能有一种较易为驾驶者适应的特性。

随着多体动力学的发展及相应软件的开发和日益成熟, 功能强大的计算机软件能够有效地模拟复杂的车辆模型, 使得车辆系统动力学成为车辆 SAE 的重要组成部分, 并逐渐朝着电子和液压控制、有限元分析等技术集成的方向发展。

1.4.1 车辆的主动控制

如今, 对汽车产品提出的安全、舒适、易于操纵乃至智能化等更高的要求与最初人们对

车辆的要求已有很大的转变。这一转变在本质上体现了人-车关系的转变。实际中,在不同工况下,车辆系统往往体现出不同的特性。由于车辆系统的应用环境(工况)和评价指标的多样性与复杂性,为了使“地面-车辆-人”这一大闭环系统具有良好的性能,除要求驾驶者具有一定的适应性外,车辆设计师的着眼点更应该是力求使车辆系统在各种工况下都能有一种较易为驾驶者适应的特性。

任何车辆控制系统的构成都将包括三大组成部分,即控制算法、传感器技术和执行机构的开发。后两者在技术上可以解决;但作为控制系统的关键,即寻求一个能够为车辆提供良好性能的控制律,则需要控制理论与车辆动力学的紧密结合。如电控悬架技术的总体发展趋势体现出高效化、智能化、网络化、协同化、模块化等特点。此外,轻量化、高安全性、高可靠性也是电控悬架系统技术发展特别关注的问题。

车辆悬架由连接车架(或车身)与车轮(或车桥)的传力部件组成,悬架在车架与车轮之间传递竖向力、纵向力和横向力,对车辆的方向稳定性、行驶平顺性和乘坐舒适性具有重要的影响,车辆在不同的载荷情况、行驶状态和道路条件下,对悬架的性能要求有所不同,通过计算机控制系统对悬架进行控制,可以满足车辆对悬架多方面的要求。

悬架控制的总体目标是保证车辆在不同的载重情况、行驶状态和道路条件下,具有良好的方向稳定性、行驶平顺性和乘坐舒适性,具体的控制目标如下。

①能够根据车辆的载荷情况、行驶状态和道路条件,自动地调节悬架的阻尼,有效地衰减车身的振动,减轻车轮的动载荷,并改善车轮的接地状态。

②能够根据车辆的载荷情况、行驶状态和道路条件,自动地调节悬架的刚度,防止车辆在制动时发生前俯,防止车辆在加速时发生后仰。防止车辆在转向时发生侧倾,防止车辆在颠簸时发生车底触地。

③能够根据车辆的载荷情况、行驶状态和道路条件,自动地调节悬架的高度,使车辆保持合适的姿态,以提高其通过不良道路的能力,减小高速行驶时的空气阻力,方便乘客上下。

1.4.2 多体系统动力学

与传统的集中质量模型相比,近代发展起来的多刚体系统动力学可以大大地提高复杂车辆模型的精度。随着计算机技术的飞速发展,车辆的多刚体模型逐步向多柔体模型发展。因此,考虑车辆中一些柔体(如橡胶衬套等)的刚柔耦合模型也能够被精确地建立。

多体系统动力学基本方法:首先,对一个由不同质量和几何尺寸组成的系统施加一些不同类型的连接元件,从而建立起一个具有合适自由度的模型;然后,软件包会自动地产生相应的时域非线性方程,并在给定的系统输入下进行求解。

其实,不管实际的系统方程组多么复杂,它们总可以写成

$$MX = F$$

式中, M —一个系统参数矩阵,包括质量、惯量、刚度、阻尼、几何尺寸等;

X —系统状态变量的矢量形式,它可能包含几百个变量;

F —所有外力的矢量。

随着多体系统动力学的发展,功能强大的分析软件和日益成熟的车辆模型开发,使汽车