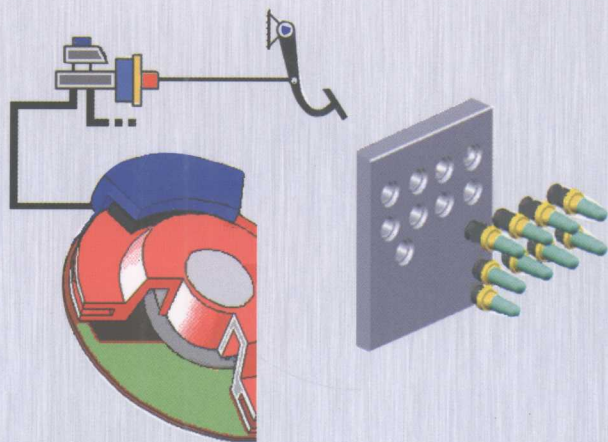


二十一世纪高等院校研究生精品规划教材

# 车辆制动系统电磁 动力学与耦合控制

李永 宋健 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

本书的研究工作得到国家自然科学基金(批准号 10702005)和  
汽车安全与节能国家重点实验室开放基金(批准号 KF2007-10)的资助

# 车辆制动系统电磁 动力学与耦合控制

李永 宋健 著

国防工业出版社

·北京·

## 内 容 简 介

本书系统而全面地阐述了作者研究的车辆制动系统电磁动力学与耦合控制新理论及其在现代车辆工程中的应用实践,是车辆制动系统电磁动力学方面的一部学术专著。全书共 10 章,分上、下两篇。上篇(前 5 章)完整论述了车辆制动系统电磁动力学与耦合控制的理论体系,包括学术思想、理论模型、求解方法;下篇(后 5 章)介绍车辆制动系统电磁动力学与耦合控制理论的仿真方法、实验方法、实验验证及工程应用等,以车辆电磁制动系统动态匹配设计为主线,重点围绕车辆与电磁动态作用制动的安全问题,阐述电磁制动理论在现代高速、安全节能车辆及科学工程中的应用,并选取有代表性的若干个具体工程应用实例予以重点介绍。有关车辆制动系统电磁动力学与耦合控制的研究是目前车辆工程、机械、自动控制、力学及材料科学等学科的研究热点之一。本书以作者近 10 年来在这方面的系列化研究成果为主要内容,是具有较为完整理论体系和实验验证的车辆制动系统电磁动力学与耦合控制方面的专著,可以为电磁制动问题的分析和评价提供基本的理论框架和方法。

本书不仅理论方法先进,而且工程应用性强,适合于车辆工程、机械控制、力学和材料等专业的科研、设计人员及工程技术人员阅读参考,并可兼作高等院校车辆工程、机械控制、力学等专业相关方向的教师、博士、硕士研究生教学用书,也可作为车辆工程、力学等和其他相关专业本科生的学习参考书和工具书。

### 图书在版编目(CIP)数据

车辆制动系统电磁动力学与耦合控制/李永,宋健著.  
北京:国防工业出版社,2008.8  
ISBN 978-7-118-05980-9

I. 车... II. ①李...②宋... III. ①车辆制动—制  
动装置—电磁学:动力学—研究②车辆制动—制  
动装置—耦合—控制—研究 IV. U270.35

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 150527 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 787×1092 1/16 印张 16 $\frac{3}{4}$  字数 411 千字

2008 年 8 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 46.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

# 前 言

科学技术工程中的制动系统、结构、装置及产品在本质上总含有各种各样的物理和力学因素，如车辆制动系统电磁动力学等。对于此类现象，依靠电磁动力学可正确解释。因此，有必要研究车辆制动系统的电磁动力学行为，揭示制动对系统力学行为的影响。把握了制动现象内在机理，就可利用该机理得到系统所不具备的功能。车辆制动系统电磁动力学问题的求解非常繁琐，只有极个别问题有解析解，由于叠加原理不适用于制动系统，这些问题解无法叠加成复杂问题解。因此，人们努力试图发展各种科学方法，揭示制动系统的内在机理。车辆制动系统电磁动力学已成为一个专门研究领域，并处在不断发展之中。制动系统电磁动力学的研究和应用得到了迅速发展，从汽车工程、航空航天推广到轨道交通、高速列车等领域。

本书的主要读者是高年级的本科生和攻读博士、硕士学位的研究生，同学们大多首次接触车辆制动系统电磁动力学与控制问题，该领域系统文献并不多见。近十年来，作者对本领域进行了较为系统的研究，国内外诸多研究者对此也均做出了贡献，考虑到国内外关于车辆制动系统电磁动力学方面的学术专著尚未见报道，故决定完成这部凝聚了我们课题组研究精髓和借鉴国内外本方面研究成果的学术专著。本书结合了汽车动力学、结构动力学、振动力学、电磁学及自动控制理论等撰写而成，总结并且凝炼了课题组内多位博士后、博士生及硕士生的最新研究成果，提炼出解决车辆制动系统电磁动力学问题的基础理论与基本方法。

在现有的教科书和论著中，通常不涉及针对车辆制动系统的复杂电磁动力学理论建模，而将其归于汽车动力学、汽车理论等前期课程或多体动力学、模态分析等专门课程。尚未发现车辆制动系统电磁动力学与耦合控制实验建模的公开报道，随着近年来学科交叉和实验建模的发展，本书着重介绍建立的电磁制动系统建模的方法。在本书选材和撰写上的首要考虑就是要精而实用，易入门，可以帮助研究生、本科生读者朋友和专业人员从事科研课题的具体实践工作；其次是压缩经典内容，使读者尽可能多地接触该学科的最新发展方向和成果，为从事车辆制动系统电磁动力学研究架设桥梁。期望本书能增加读者今后处理实际问题时的成功机会。研究车辆制动系统电磁动力学问题的第一步是通过理论建立研究对象的模型。

本书的上篇第1章至第5章属于制动基本研究内容，一是分门别类介绍分析方法，二是介绍制动特有的现象。在下篇第6章至第8章分别介绍了定性方法和常用的几种定量分析（半解析）方法。在下篇第9和第10章中，则将目前实验和仿真方法推广到电-磁-热-力耦合制动系统，比较全面地介绍制动系统特有的现象。可以说，上篇侧重于介绍构建基本制动原理的理论体系，下篇侧重于介绍车辆制动系统电磁动力学实验方法、仿真、程序和工业应用体系。

本书所介绍制动理论和工业应用，是经典机械控制内容向现代耦合控制内容的转折。为了与近代文献相衔接并使读者接受必要的数学训练，叙述做到言简意赅，并且有一些数学证

明，这是本书的重点与难点。近年来，随着汽车电子和电磁技术的蓬勃发展，并结合经典的机械工业，同时，考虑提高汽车产品的科技附加值含量，因此，车辆制动系统电磁动力学与耦合控制日益成为汽车技术研究的热点。汽车行业做为国民经济的支柱产业之一，汽车技术研究群体庞大。因此，我们以尽可能通俗的语言介绍制动现象以及如何控制制动，作者希望本书成为读者朋友们在工程技术和科学研究时的有力助手。

随着计算机的普及，数值计算方法在研究复杂制动系统的行为，特别在研究系统的长时间历程行为中正起着重要作用。本书介绍一些重要的数值计算方法。由于本书参考文献较多，为使读者快捷方便地查阅，每章后面均列出了与该章内容有关的参考文献，将其按照章节次序先后，综合罗列在每章的末尾。

在此，特别感谢国家自然科学基金项目（批准号 10702005）、清华大学汽车安全与节能国家重点实验室开放基金（批准号 KF2007-10）的资助，本书的部分研究成果是在这两项科学基金的资助下顺利完成的。

作者也衷心感谢课题组多名博士生、硕士生所做的科研工作，为本书的形成提供了许多生动并且引人入胜的例子。

车辆制动系统电磁动力学与耦合控制是一门正在发展中的学科，书中许多内容并不是完全成熟的。作者衷心希望读者在阅读本书的过程中能够解决已指出的一些遗留问题，并期待读者能发现和提出有意义的新问题。由于作者水平有限，又无本方面的专著可以借鉴，不当之处在所难免，希望读者不吝指正。

作者

2008年4月于北京理工大学

# 目 录

## 上篇 车辆制动系统电磁动力学机理与耦合控制策略

第1章 绪论	3
1.1 电磁动力学简介	3
1.1.1 电磁动力学目标	3
1.1.2 电磁动力学进展	3
1.1.3 研究方法	4
1.2 车辆制动系统电磁动力学简介	5
1.2.1 防抱制动系统(ABS)简介	5
1.2.2 ABS逻辑门限控制算法	6
1.2.3 PID控制算法	7
1.2.4 滑模变结构控制算法	8
1.2.5 模糊控制算法	8
1.2.6 基于制动器耗散功率的ABS控制方法	9
1.2.7 制动道路实验的测试方法与数据处理	11
1.2.8 制动器特性分析简介	11
1.2.9 典型制动系统组成示意图	12
参考文献	15
第2章 车辆制动系统电磁设计与制动机理	17
2.1 车辆制动系统典型部件结构特性分析	17
2.2 制动器制动压力建模	21
2.2.1 非线性模型	21
2.2.2 线性模型	22
2.3 典型实验分析	23
2.4 制动油压频率的算法	24
2.4.1 基本定义与模型	24
2.4.2 频率算法描述	25
2.5 ABS液压执行机构及制动轮缸建模	27
2.6 车辆制动系统的电磁数学模型和耦合控制仿真	29

2.6.1	车身模型	29
2.6.2	悬架模型	30
2.6.3	转向模型	31
2.7	制动管路液压模型	33
2.8	发动机模型	34
	参考文献	35
<b>第3章</b>	<b>车辆制动系统电磁动力学方法与耦合控制策略</b>	<b>37</b>
3.1	车辆制动系统电磁动力学方法	37
3.1.1	目标函数	37
3.1.2	运动质量的弹簧阻尼动力学模型	37
3.1.3	频率响应及传递函数	38
3.1.4	制动管路压力与制动时间的关系	39
3.1.5	动态压力-力矩响应的计算模型	39
3.2	广义当量最小二乘法的理论模型	39
3.3	ECU 的结构设计	43
3.3.1	总体布置	43
3.3.2	双 CPU 的设计和选型	45
3.3.3	轮速输入电路	47
3.3.4	电磁阀驱动电路	48
3.3.5	压力传感器输入电路	50
3.3.6	电源、晶振、LED 电路	51
3.3.7	可编程逻辑器件电路	55
	参考文献	57
<b>第4章</b>	<b>车辆制动系统制动压力状态观测与电磁仿真</b>	<b>60</b>
4.1	车辆制动系统制动压力在线状态观测	60
4.1.1	升压过程	60
4.1.2	减压过程	62
4.1.3	保压过程	62
4.1.4	缓升压过程首次升压的确定	62
4.1.5	制动管路液压模型	65
4.1.6	传递函数	67
4.1.7	预报方法	68
4.1.8	控制器设计	69
4.2	电磁制动系统硬件闭环混合仿真及软件系统	70
4.2.1	定义与概念	70
4.2.2	目标计划	71

4.3	液压电磁制动系统硬件闭环混合仿真系统总体设计	71
4.3.1	总体概述	71
4.3.2	硬件系统体系结构	72
4.3.3	软件系统体系结构	73
4.4	硬件闭环混合仿真系统模型分析	74
4.5	液压电磁制动系统硬件闭环混合仿真硬件系统设计	77
	参考文献	81
<b>第5章</b>	<b>电磁系统设计、力学行为与机理</b>	<b>83</b>
5.1	电磁系统结构设计	83
5.2	电磁系统的电磁机理	84
5.3	阀腔流场分析	87
5.4	电磁阀的动态响应特性实验测试	93
5.5	电磁阀动态数学模型	96
5.6	阀口特性	102
	参考文献	103

## 下篇 车辆制动系统电磁动力学/整车匹配实验与耦合控制

<b>第6章</b>	<b>电磁制动系统动态特性实验</b>	<b>107</b>
6.1	制动力矩	107
6.2	惯性制动器实验台的控制方法	107
6.3	制动器 $T_Q - P$ 的动态关系	110
6.3.1	实验目的	110
6.3.2	实验分析	110
6.4	实验中的迟滞问题	112
6.5	制动系统液压部分的压力传递动态特性实验	117
6.5.1	实验原理	117
6.5.2	实验准备	117
6.5.3	实验模型	117
6.5.4	实验结果	120
6.5.5	实验数据处理及分析	121
6.6	制动器制动力矩相对于轮缸压力的动态特性实验	122
6.6.1	实验原理	122
6.6.2	实验设备的安装	122
6.7	真空助力器输入输出特性实验	126



6.8	单膜片真空助力器工作原理 .....	128
6.9	双膜片真空助力器结构及工作原理 .....	130
	参考文献 .....	133
<b>第7章</b>	<b>车辆制动系统电磁仿真计算平台 .....</b>	<b>135</b>
7.1	建立基于知识管理的产品创新设计软件平台系统 .....	135
7.1.1	建立知识库 .....	136
7.1.2	建立专家系统 .....	136
7.2	基于知识管理的创新设计平台关键技术 .....	137
7.3	基于知识管理的产品创新设计平台技术路线 .....	137
7.4	制动器建模参数设计系统概念设计 .....	139
7.5	性能分析专家系统业务功能描述 .....	140
7.5.1	研究目标 .....	140
7.5.2	分析专家系统工作的定位依据 .....	140
7.5.3	分析的流程 .....	142
7.5.4	强度分析子系统 .....	142
	参考文献 .....	150
<b>第8章</b>	<b>车辆制动系统电磁动力学与整车匹配方法 .....</b>	<b>152</b>
8.1	电磁制动系统状态空间与传递矩阵分析法 .....	152
8.1.1	符号约定 .....	153
8.1.2	系统状态矢量 .....	154
8.1.3	弹簧和扭簧传递矩阵 .....	155
8.2	车辆制动系统电磁动力学求解与整车匹配 .....	157
8.3	十五自由度模型 .....	161
	参考文献 .....	167
<b>第9章</b>	<b>制动系统热-力-电-磁耦合热力学 .....</b>	<b>169</b>
9.1	热-力-电-磁耦合分析模块 .....	169
9.1.1	摩擦热对制动器摩擦副的影响 .....	170
9.1.2	研究制动摩擦热的意义 .....	171
9.1.3	制动器温度场的研究现状及发展趋势 .....	171
9.1.4	制动摩擦表面温度场计算方法 .....	172
9.2	接触问题研究 .....	174
9.3	盘式制动器热分析 .....	178
9.4	热疲劳研究 .....	180
9.4.1	疲劳问题的一般描述 .....	180
9.4.2	疲劳裂纹萌生 .....	182

9.4.3 疲劳裂纹扩展 .....	183
9.5 热衰退分析模块 .....	186
9.5.1 概述 .....	186
9.5.2 热衰退分析的数据流 .....	187
9.5.3 快速系统仿真模型的建立 .....	189
9.5.4 非线性边界条件的处理 .....	190
9.5.5 盘式制动器的算例分析 .....	192
9.5.6 盘式制动器(空心盘)算例 .....	193
9.5.7 制动鼓算例 .....	194
9.5.8 制动热衰退机理 .....	195
参考文献 .....	195
<b>第 10 章 车辆制动系统振动、噪声的耦合控制与模态综合</b> .....	<b>197</b>
10.1 车辆制动振动研究的回顾 .....	197
10.1.1 车辆制动振动研究意义、现状、发展趋势 .....	197
10.1.2 汽车制动器制动振动噪声自激振动机理 .....	197
10.1.3 汽车制动器制动振动噪声的主要分析方法 .....	200
10.1.4 研究进展 .....	202
10.2 制动器结构的模态分析 .....	203
10.2.1 动态子结构方法 .....	204
10.2.2 盘式制动器动态子结构的划分 .....	204
10.3 子结构模态分析实现 .....	205
10.3.1 部件子结构实体模型的建立 .....	205
10.3.2 求解器的设置 .....	205
10.3.3 进入后处理察看模态结果 .....	208
10.4 基于闭环耦合计算模型的模态综合 .....	210
10.4.1 模态综合 .....	210
10.4.2 汽车制动器系统闭环耦合模型的建立 .....	211
10.4.3 子结构模态参数的提取 .....	213
10.5 结构灵敏度分析与动力修改 .....	216
参考文献 .....	218
<b>附录 1 1/4 模型 S 函数模板格式</b> .....	<b>220</b>
<b>附录 2 综合控制方法的模块框图</b> .....	<b>222</b>
<b>附录 3 1/4 整车模型综合控制方法仿真结果</b> .....	<b>224</b>
<b>附录 4 10 自由度模型以滑移率为控制参数的仿真结果</b> .....	<b>226</b>
<b>附录 5 15 自由度模型单一控制参数对比仿真结果</b> .....	<b>228</b>
<b>附录 6 15 自由度模型综合控制方法仿真结果</b> .....	<b>229</b>

附录 7	某型车仿真分析算例 .....	230
附录 8	ADAMS 与 MATLAB 的协同仿真与道路实验对比仿真 .....	231
附录 9	在 Simulink 中进行低附着路面上的仿真结果 .....	232
附录 10	道路实验算例 .....	234
附录 11	核心控制单元 .....	237
附录 12	核心控制算法框图 .....	238
附录 13	辅助控制逻辑 .....	240
附录 14	重要函数说明 .....	242
附录 15	87c196KC 程序说明 .....	243
附录 16	数据结构 .....	245
附录 17	函数说明 .....	247
附录 18	控制参数的宏定义 .....	249
附录 19	实验设备、仪器、元件与电磁特性 .....	253

# 上 篇

## 车辆制动系统电磁 动力学机理与耦合控制策略



# 第1章 绪 论

## 1.1 电磁动力学简介

### 1.1.1 电磁动力学目标

电磁动力学是一门研究制动系统力学行为的科学。研究对象包括几乎所有具有制动功能的系统,其研究范围涵盖了这类系统的建模与仿真、动力学与控制、运行监测和诊断等。主要任务是采用尽可能低的成本使产品在设计、研制、实施各阶段具有最佳的电磁力学品质。车辆、飞行器、机器人等发展不断提出新的制动问题,极大地促进了这类系统的动力学建模与仿真、动力学与控制、监测和诊断等方面的发展<sup>[1]</sup>。随着信息化科学和电磁科学的发展,电磁动力学研究内涵更加深入,其特征是:系统建模计入各种重要电磁因素、耦合因素、边界与结合部效应,应用动力学仿真技术研究系统的力学特性,基于对电磁动力学的深刻理解实现系统的动力学设计,对系统实施各种控制乃至智能控制来获得所需的运动,在研究电磁一体化的受控系统时考虑动力学与控制的相互耦合,采用最新信息提取和分析,诊断系统的故障等。

本书将先就电磁动力学所涉及的理论和方法进行评述,介绍电磁制动系统的动力学建模、设计、控制等方面的研究现状。然后,分别介绍车辆、系统、结构与耦合电磁动力学等的研究现状,并对各分支发展中的问题进行讨论。

### 1.1.2 电磁动力学进展

#### 1. 建模

制动系统的动力学控制需要建立在简洁、可靠的模型基础上。由于实际问题的复杂性,系统模型往往要由理论和实验相结合来确定。目前,分析动力学问题的方法已较成熟,可在 ANSYS、MSC 等商用化平台上完成建模和各种分析,多刚体系统动力学建模技术也比较成熟,可在 ADAMS 等商品化软件上来完成。相比之下,处理系统的电磁动力学方法和软件要落后许多,近期研究解决一些遗留问题。如具有奇异性和冗余自由度的多刚体系统建模<sup>[2]</sup>,电磁耦合系统的统一建模<sup>[3]</sup>等。电磁耦合建模是一具有挑战性的难题。其基本思路是:采用假设模态、校正模态、奇异扰动等方法获得逼近的坐标基,通过 Lagrange 方程或变分原理导出动力学方程组。从而使得计算量、数值稳定性、用于控制的方便程度不同<sup>[4]</sup>。

用多柔体法描述非碰撞的柔体,通过程序进行切换来加速计算过程<sup>[5,6]</sup>。实验建模旨在确定制动系统中一些难以由理论分析得到的复杂因素,如系统阻尼、约束和支撑处的间隙和摩擦、一些作动器的输入输出关系、控制环节的时间滞后等,是典型的动力学反问题。目前,线性时不变系统的实验建模已比较成熟,研究重点已转向电磁系统<sup>[7,8]</sup>。过去,一般通过对实验数据进行曲线或曲面拟合来确定间隙、摩擦等非线性因素。近年来,则将动力学反问题表述为优化问题,采基因算法、模拟退火算法等全局优化技术来解决,或采用各种神经网络来逼近原系

统的动力学模型。例如,采用基因算法识别制动的电磁特性<sup>[8]</sup>,采用自适应滤波和估计以及神经网络对随机激励下具有迟滞非线性的电磁制动系统进行建模<sup>[9,10]</sup>。控制与制动系统的时间滞后正引起人们关注,其辨识是具有挑战性的难题<sup>[11,12]</sup>。

## 2. 设计

近年来,对电磁动力学的研究集中在以下方面,即复杂制动系统动力学的仿真、非线性制动力学、时变制动力学等。描述复杂制动系统的最普适模型,有不少研究致力于改进已有的计算方法,提高其计算效率、鲁棒性等<sup>[13,14]</sup>。一个研究进展是,通过现代电磁力学理论与实验观测的结合可揭示出一些复杂的电磁制动行为。但在对高维周期时变系统的处理上仍存在着相当大的困难,因而对实际具有周期运动特征的制动系统动态分析和设计仍缺乏强有力的理论指导。

## 3. 目的

在产品的设计阶段,根据给定的动力学环境,按照功能等方面的要求设计产品,使其有良好的动态特性,达到控制系统水平的目的。近年来,对特征值和特征矢量灵敏度的计算方法日趋成熟,采用约束变尺度法和信赖域法求解复杂结构固有特性设计引出的优化问题取得一系列成功,解决了有多阶固有频率和振型要求的复杂结构设计问题,并应用于车辆制动模型等复杂结构的设计<sup>[15-32]</sup>。动响应设计概念适用于各类制动系统,其设计目标是谋求给定激励下系统的最优动响应。对于线性时不变系统,已可导出了任意确定性激励和平稳随即激励下系统响应关于设计变量的灵敏度,可采用优化方法解决动响应设计问题<sup>[32]</sup>,也可采用灵敏度分析方法对其进行动态设计<sup>[33]</sup>。

## 4. 控制

随着计算机技术和测控技术的发展,控制技术有了长足进展,已在工程领域得到了一些成功应用<sup>[34-35]</sup>。近年来,控制技术最引人注目的进展是集传感器、控制器、作动器与结构为一体的智能结构<sup>[36-39]</sup>。当前,研究的热点是基于压电传感器和作动器的智能结构,控制策略则来自耦合控制、自适应控制、神经网络控制、非线性控制与随机控制等控制理论的成果。经过大量的数值模拟、优化设计和实验,这类智能结构已有许多成功的应用。例如,已研制了多种电流变和磁流变可控阻尼器,针对车辆悬架等开发了半主动控制技术。此外,采用半主动控制的动力吸振器技术也有新的进展<sup>[39-43]</sup>。

### 1.1.3 研究方法

#### 1. 系统动力学

典型的系统多场耦合致使数学模型成为具有时变系数、复杂非线性项的高维微分方程组或微分代数方程组,这给动力学分析带来很大的困难。从已有研究基础和问题的难度看,电磁动力学中颇具挑战的前沿领域是:

(1) 动力学建模:建立更为精确的模型,该模型不仅应正确反映出运动的影响,而且还应正确体现出机构的大范围运动的耦合程度,同时结合大多数机构具有周期运动特征,建立起具有针对性的有效、可靠的数值计算方法,最终逐渐形成成熟的动力学仿真软件系统。

(2) 动力学设计:在较透彻地理解机构非线性动力行为及其特性后,需从特定机构出发,逐步形成机构的动态设计理论,建立起一些动态设计的准则。

(3) 振动控制:如上所述,采用电磁作动器,控制形式及效果与实际机构的要求存在很大距离。因此,需针对实际机构,探索更为有效的控制策略及作动器。

## 2. 车辆动力学

由于人们对车辆系统的高速、安全和舒适等要求不断提高,车辆系统动力学是近年来广泛关注的研究领域。从车辆动力学分析和设计角度看,基于多体动力学的 ADAMS 平台已提供了非常方便的动力学模拟平台。因此,近年来车辆动力学的研究趋势是将车辆作为机电一体化系统,以多体动力学为建模工具,结合最优化方法和控制技术进行动力学与控制的一体化分析与设计<sup>[44-52]</sup>。

随着中高档轿车大量使用柔性衬套,汽车操纵动力学、行驶平顺性、振动与噪声等性能指标之间经常出现矛盾,导致刹车不平顺等涉及多个子系统的综合性问题。因此,需要从大系统动力学角度来协调车辆各子系统的动力学设计。

## 1.2 车辆制动系统电磁动力学简介

### 1.2.1 防抱制动系统(ABS)简介

驾驶车辆在潮湿的沥青路面上或是有积雪的道路上进行紧急制动时,车辆尾部会翘起,严重时车辆会打转。在积雪的路面上,由于出现行驶轮迹,以及部分路面从积雪中露出,这时如果车辆的左右车轮中的一个在无雪的道路上,而另一个在有雪的路面上行驶时,就极有可能发生车辆打转的现象。如果在这样的条件下进行紧急制动,就很难掌握住方向盘。有可能闯入其他车道或无法避开道路上的障碍物。防抱制动系统(Antilock Braking System,简称 ABS)就是为了防止这种危险状况而开发的装置。

防抱制动装置与原来的制动系统<sup>[1-6]</sup>(制动总泵、盘式制动器、鼓式制动器、压力限制阀等)共同构成车辆的主动安全装置。20世纪80年代中期车辆才开始使用ABS装置,没有装设ABS的车辆,如果在行驶中用力踩踏制动踏板,车轮会急速降低转速,最后车轮停止,但车身依然保持惯性向前滑动。这种现象在车轮与路面之间会发生较大的滑移,当出现这种状况时,车辆轮胎对路面的侧滑摩擦力几乎消失,很容易发生行车事故于是就会出现下述几种情况。

- (1) 转向盘操纵不灵,严重时出现车辆打转现象;
- (2) 操纵性下降,达不到转向要求;
- (3) 制动距离延长,超过一般的制动距离。

ABS可根据行驶中的轮胎与路面间的摩擦对各车轮给予不同的最佳制动力,采用控制车轮的制动液压的方法,其功能是可感知制动轮每一瞬间的运动状态,并根据其运动状态相应地调节制动力的大小,避免出现车轮的抱死现象,可使车辆在制动时维持方向稳定性和缩短制动距离,有效的提高行车的安全性。装有ABS的车辆在积雪或冰冻的路面、下雨天的打滑路面,以及在多弯道的各种状况中,可以放心的操纵方向盘,进行制动。在未装ABS的车辆上,做到这一点是不可能的。

ABS是在传统的制动系统基础上采用技术含量附加值高的电子控制技术,在制动时防止车轮抱死的一种以电子控制为主的机电一体化系统,图1-1为一个四轮车辆防抱死控制系统的原理图。它由①轮速传感器,②电磁阀,③控制仪器,④节气门调节器,⑤喷嘴阀门,⑥点火模块,⑦油门踏板探头组成。

近年来,随着车辆工业的发展,车辆速度的提高,车辆的制动性能越来越重要。尤其是制动过程中的方向稳定性和转向能力,已经成为人们关注的焦点。研究显示,在道路交通事故



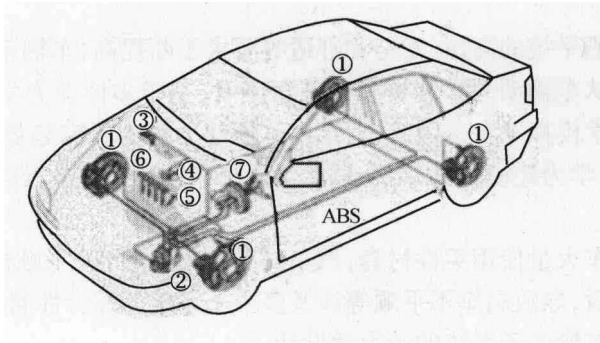


图 1-1 ABS 原理示意图

中,大约 10% 的事故<sup>[7-9]</sup>是由于车辆在制动瞬间偏离预定轨道或甩尾造成的,因此完善制动性能是减少交通事故和促进车辆工业发展的重要措施。目前在提高制动性能的各种技术中,最有效并且得到广泛应用的是 ABS。一方面随着我国对车辆工业的大规模投资及国内车辆工业与国外车辆工业的合资,车辆工业得到迅速的发展,产量大幅度增加。另一方面,虽然公路建设得到各级政府的重视,总里程数也在迅速增加,但总的趋势是车流及车辆密度不断增加,道路交通事故也随之增加。为了有效地减少交通事故,装用 ABS 是极为有效的手段之一,这已被国内外的大量经验所证明。目前 ABS 研究正成为国内外车辆界研究的热门课题,各高等院校、车辆集团及车辆研究所都开始进行积极的研究工作。

## 1.2.2 ABS 逻辑门限控制算法

### 1. ABS 简单逻辑控制算法

车轮的加速度大于零(即路面所能控制的制动力矩对车轮的中心力矩大于所施加的制动力矩)就可避免抱死的倾向。于是又可以取一个适当大正数  $+\alpha$  ( $+\alpha$ ,  $-\alpha$  仅表示车轮加、减速度,它们的值可以是不同的)作为车轮加速度的门限,构成双门限的逻辑控制,经组合可得到 3 个常用的逻辑判定条件:

$$\begin{cases} \dot{\omega} < -\alpha, & \text{减压} \\ \dot{\omega} > +\alpha, & \text{保压,上一个为减压过程} \\ \dot{\omega} \leq +\alpha, & \text{增压,上一个为保压过程} \end{cases} \quad (1-1)$$

双门限值控制逻辑<sup>[10-12]</sup>可以适应不同的路面特性,但当路面附着系数出现跃变时,就不能快速适应,所以对快速变化的路面跟踪性能较差。

### 2. 以车轮加、减速度和滑移率结合的逻辑控制

#### 1) 车轮加速度算法

(1) 直接微分法。用轮速的一阶差商来近似计算车轮加速度,即  $\alpha = \Delta V / \Delta t$ 。

(2) 线性拟合法。在限定的小的时间间隔内,对当前时刻和前若干个时刻的轮速值作线性最小二乘拟合,拟合得到的直线斜率就是所求的当前时刻车轮加速度值。

(3) 抛物线拟合法。用来逼近轮速的曲线为抛物线,对拟合后的抛物线求导得到的导数值作为该时刻的车轮加速度值。

(4) 五点插值求导法。用四次多项式来近似描述轮速曲线,用该多项式的导数来近似表示车轮加速度值。