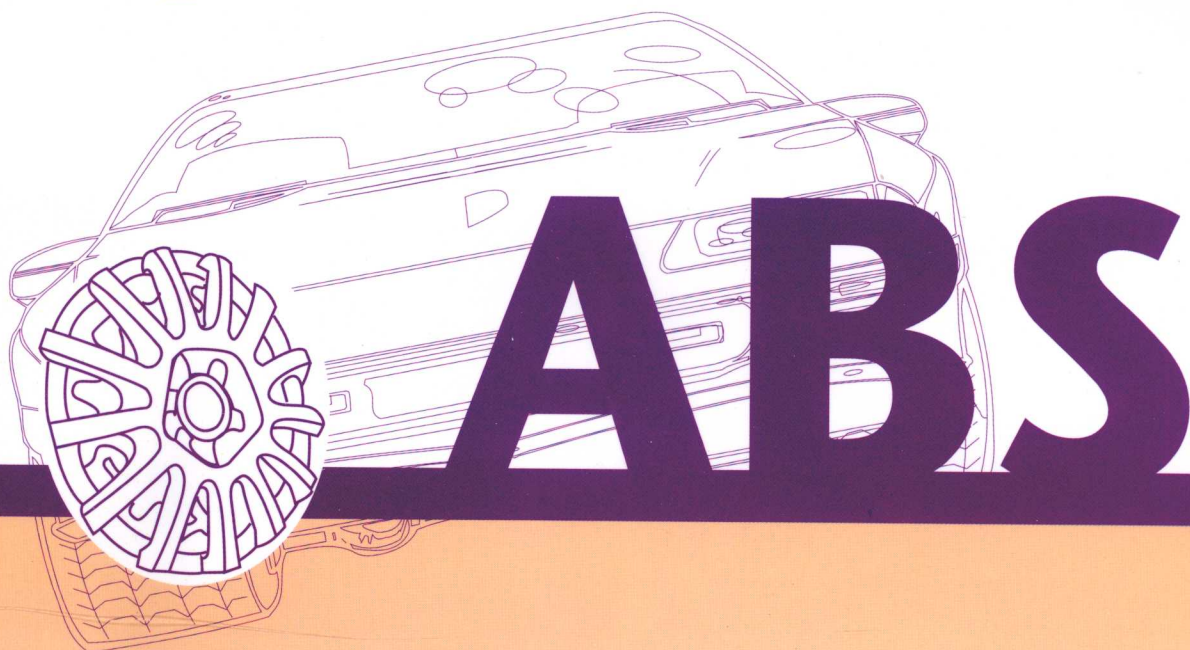




普通高等学校“十一五”规划教材



车辆防抱死制动控制 理论与应用

李果 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

普通高等学校“十一五”规划教材

车辆防抱死 制动控制理论与应用

李果 编著

国防工业出版社

(地址: 北京市海淀区中关村大街8号)

· 北京 ·

发行部: (010) 88414137
发行部: (010) 88414137

发行部: (010) 88414137
发行部: (010) 88414137

林路保 李果 著 内容简介

本书系统而全面地阐述了 ABS 的工作原理、发展现状及车辆动力学建模,以及车辆防抱死制动的各种控制理论。同时,对基于 T-S 模型的汽车防抱死制动模糊控制系统设计、双车轮制动安全控制实验台设计与试验、汽车防抱死制动模糊 PID 控制系统设计和鲁棒自适应控制系统设计、汽车转弯制动防抱死控制仿真进行了深入地研究。本书的这部分内容是作者及其团队多年来的最新研究成果,具有较为完整的理论体系和实验成果。

本书不仅理论方法先进,同时工程实用性强,适合于车辆工程、汽车设计、机械控制等专业的科研、设计人员以及工程技术人员参考阅读,并可作为高等院校相关专业的师生、硕士研究生的学习参考书和教学用书。

李果 著

图书在版编目(CIP)数据

车辆防抱死制动控制理论与应用/李果编著. —北京:国防工业出版社,2009.8
ISBN 978-7-118-06341-7

I. 车... II. 李... III. 汽车—制动装置,防抱死
IV. U463.52

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 071426 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)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

开本 787×1092 1/16 印张 14 字数 318 千字

2009 年 8 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 25.00 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

随着汽车动力性能的不断提高,客观上对汽车制动的安全性能也提出了越来越高的要求。然而,由于汽车运动状态的复杂性和车轮与地面之间的附着力的非线性等原因,当汽车在高速行驶中制动或在弯道上紧急制动以及在冰雪路面等复杂路况下制动时,经常会出现车轮因抱死拖滑而导致制动距离加长,同时还有车身侧滑调头、失去方向控制能力等现象,严重威胁汽车、乘客和行人的安全。车辆防抱死制动控制系统(ABS)是一种在紧急制动情况下使汽车制动距离尽可能缩短,同时保持汽车方向稳定性和转向操纵能力的装置。它在各种车辆上已经得到广泛应用,并成为汽车主动安全控制的一个重要研究方向,也是现代汽车研究的重要课题。汽车防抱死制动控制理论与应用是目前国内外车辆自动控制技术研究的核心热点,它对推进车辆控制技术向前发展有着巨大的意义。

本书共分8章,系统而全面阐述了ABS的理论、工作原理、发展现状及车辆动力学建模,以及车辆制动控制的各种理论。同时,对基于T-S模型的汽车防抱死制动模糊控制系统设计、双车轮制动安全控制实验台设计与试验、汽车防抱死制动模糊PID控制系统设计和鲁棒自适应控制系统设计、汽车转弯制动防抱死控制仿真进行了深入地研究。本书的这一部分内容是作者及其团队多年来的最新研究成果,也反映了国内外研究的水平,具有较完整的理论体系和实验成果,是一本理论方法先进,工程实用性强的学术专著。

本书在编写中,参考了很多相关的图书资料,我本人在此对这些作者表示衷心的感谢。

作者特别感谢程军同志的工作,感谢余达太教授、张卫东、晏蔚光博士以及王伦国、王新力、王旭、梁志锋硕士等人的工作,正是他们的大力支持,才使本书可以顺利完成。

由于作者水平有限,不当之处在所难免,希望读者和同行不吝指正。

作者

2009年4月于北京

目 录

第1章 绪论	1
1.1 防抱死制动系统的基本工作原理	1
1.2 防抱死制动系统的发展历史	3
1.3 防抱死制动系统的组成	5
1.4 操纵稳定控制技术的发展方向	5
1.4.1 四轮转向技术	5
1.4.2 横摆力矩控制	7
1.4.3 汽车 ABS 技术与操纵稳定性控制的结合	8
1.4.4 电子制动系统的研制开发	8
第2章 车辆动力学建模	11
2.1 概述	11
2.2 车辆系统模型	17
2.2.1 一般车辆动力学模型	17
2.2.2 四轮车辆模型	19
2.2.3 双轮车辆模型	20
2.2.4 单轮车辆模型	21
2.3 车轮轮胎模型	22
2.3.1 理论模型	22
2.3.2 魔术公式	25
2.4 制动系统模型	28
2.4.1 气动系统	28
2.4.2 制动执行机构动态建模	33
2.4.3 液压制动系统的建模	37
2.4.4 制动器建模	39
2.5 驱动系统模型	40
2.5.1 载重车驱动系统模型	40
2.5.2 轿车驱动系统模型	42
第3章 车辆防抱死控制基础	46
3.1 防抱死控制基本理论分析	46

3.1.1	车辆的制动过程描述	46
3.1.2	车轮制动模型	48
3.2	基本防抱死逻辑	51
3.2.1	防抱死控制的基本控制策略	51
3.2.2	防抱死控制特征值分析	52
3.3	制动控制系统的控制方法	60
3.3.1	概述	60
3.3.2	控制系统的计算机辅助设计	62
3.3.3	控制系统用单轮车辆模型	63
3.4	PID 控制方法	67
3.5	最优控制方法	72
3.6	滑模变结构控制方法	76
3.7	模糊控制方法	81
3.7.1	基于车轮滑移率的模糊控制系统	82
3.7.2	基于车轮加、减速度的模糊控制系统	87
3.8	不同控制方法的比较	89
3.8.1	车辆动力学及制动系统建模简介	90
3.8.2	控制系统设计	90
3.8.3	计算结果及分析	93
第 4 章	基于 T—S 模型汽车防抱死制动模糊控制系统	99
4.1	概述	99
4.2	防抱死制动系统模糊控制器设计	99
4.2.1	防抱制动系统模糊控制器的结构设计	99
4.2.2	防抱制动模糊控制器规则的确定	100
4.2.3	输入变量的模糊化处理	102
4.2.4	模糊推理及解模糊方法	102
4.3	模糊控制器状态方程模型的建立	103
4.3.1	模糊状态方程	103
4.3.2	前、后轮模型参数的确定	105
4.4	模糊控制系统的 PDC 设计	106
4.5	基于 LMI 的防抱制动控制稳定性分析与设计	107
4.6	防抱制动模糊控制器仿真	108
4.6.1	利用模糊推理系统工具箱设计模糊控制器	109
4.6.2	采用 Simulink 模块构建控制系统框图	109
4.6.3	仿真结果与分析	109

第5章 双车轮制动安全控制试验台设计	116
5.1 制动安全控制试验台的分类	116
5.2 防抱死制动试验台的设计方案	117
5.3 试验台的主要功能	119
5.4 试验台总体结构方案设计	120
5.4.1 轮胎侧向力、转速检测结构的设计	120
5.4.2 轮胎负荷及纵向制动力检测结构的设计	121
5.4.3 试验台控制系统的设计	121
5.4.4 信号采集与传输	122
5.4.5 软件系统	123
第6章 先进的控制系统设计与试验	124
6.1 模糊与PID复合控制器	124
6.1.1 PID控制器	124
6.1.2 模糊控制器	125
6.1.3 模糊推理	125
6.1.4 模糊判决	126
6.2 鲁棒控制方法	127
6.2.1 鲁棒控制原理	127
6.2.2 ABS鲁棒控制器的设计	129
6.2.3 计算及分析	133
6.3 鲁棒自适应控制理论	135
6.3.1 参数不确定性及自适应功能	135
6.3.2 自适应控制器	137
6.4 鲁棒自适应控制系统	144
6.4.1 电动车制动动力学模型	144
6.4.2 自适应鲁棒控制器	145
6.5 电动车ABS试验结果分析	147
第7章 电动车转向制动控制仿真研究	150
7.1 电动车整体控制系统方案	150
7.2 电动车非线性动力学模型建立	152
7.2.1 电动车整车动力学模型	152
7.2.2 轮胎与整车运动关系的分析	154
7.2.3 轮胎纵滑率、侧滑率的相关计算	155
7.2.4 转向系统的力学特性	156

7.3	交流异步电动机数学模型的建立	158
7.3.1	交流异步电动机在两相(M-T)旋转坐标系上的数学模型	158
7.3.2	交流异步电动机矢量控制的基本方程	160
7.3.3	电动机模型与车辆运动模型的协同	161
7.4	神经网络与PID复合控制器设计	162
7.4.1	小脑模型连接控制网络	162
7.4.2	CMAC神经控制的结构方案	164
7.4.3	CMAC+PID复合控制算法	165
7.4.4	学习规则的选择	167
7.4.5	车辆控制系统总体框图	168
7.4.6	权值表的优化	168
7.5	系统 Matlab 仿真分析	170
7.5.1	双质汽车模型仿真的建立	170
7.5.2	交流异步电动机矢量控制仿真模型的建立	175
7.5.3	整个仿真系统的结构	176
7.5.4	系统的 Simulink 仿真结果	177
第8章	ABS 及试验技术	187
8.1	典型 ABS 简介	187
8.1.1	典型液压制动 ABS	187
8.1.2	典型气制动 ABS	188
8.2	ABS 的基本布置形式	189
8.3	ABS 的道路试验方法	193
8.4	ABS 制动道路试验的测试方法与数据处理	198
8.4.1	ABS 制动道路试验的测试	198
8.4.2	数据的采集	199
8.4.3	数据处理系统	200
8.5	ABS 试验结果的分析	202
	参考文献	213

第1章 绪 论

1.1 防抱死制动系统的基本工作原理

防抱死制动控制系统(ABS)(以下简称 ABS)是在传统制动系统的基础上采用电子控制技术,在制动时防止车轮抱死的一种机电一体化系统,由控制器、电磁阀、轮速传感器三部分组成。在应急制动时,司机脚踏板控制的制动压力过大时,轮速传感器及控制器可以探测到车轮有抱死的倾向,此时控制器控制作动系统减小制动压力。当车轮轮速恢复并且地面摩擦力有减小趋势时,控制器又控制作动系统增加制动压力。这样使得车轮一直处于最佳的制动状态,可最有效地利用地面附着力,得到最佳制动距离和制动稳定性。

传统的汽车制动系统功能是使行驶的汽车车轮受制动力矩的作用,使车辆停止。在大多数情况下往往要抱死车轮,此时一方面会造成车轮轮胎的严重磨损;另一方面后轮抱死会产生侧滑,容易使车辆丧失稳定性,而前轮抱死会使车辆丧失转向能力,这些状态都容易导致事故的发生。

ABS 的引入,使制动过程中的车轮处于非抱死状态,这样不仅可以防止制动过程中后轮抱死而导致的车辆侧滑甩尾,还大大提高了制动过程的方向稳定性,以及可以防止前轮抱死而丧失转向能力,提高汽车躲避车辆前方障碍物的操纵性和弯道制动时的轨迹保持能力,而且最终制动距离往往要比同类车型不带 ABS 的车辆制动距离要短,因而 ABS 是一种有效的车辆安全装置。

汽车的安全性包括主动安全性(Active Safety)和被动安全性(Passive Safety)两方面。汽车主动安全性是指汽车防止事故发生的能力,包括制动性能、操纵性能、轮胎性能、照明灯、信号灯性能等。汽车被动安全性指发生事故时,汽车保护乘员的能力。汽车被动安全部件主要包括安全带、安全气囊、能量吸收式转向柱、头枕等。以前,汽车安全设计主要考虑被动安全系统;现随着汽车动力性能的提高,主动安全技术成为现代汽车设计的重要考虑部分。在主动安全设计中,汽车制动性能的提高尤为突出。

汽车制动性能的评价指标包括制动效能、制动方向稳定性和制动效能的恒定性三方面。其中,制动效能又包括制动距离和制动减速度两方面。汽车通过轮胎与地面相互作用,在制动时把作用在车轮上的制动力矩转变为汽车的制动力。汽车制动时,当地面提供的附着力对车轮产生的转矩不足以克服制动器所产生的制动转矩时,车轮就会发生制动抱死。如果汽车此时仍未完全停车,车轮就会发生相对地面的滑移。令汽车前进的方向为附着力的正向,附着力的幅值大小取决于轮胎与路面之间的垂直载荷和附着系数,即

$$F_x = -\mu \cdot F_z \quad (1.1)$$

式中: F_x 为轮胎与地面之间的附着力; F_z 为轮胎对地面的垂直载荷; μ 为附着系数。

根据汽车的行驶方向可将附着系数分为纵向附着系数 μ_x 和侧向附着系数 μ_y 。在车轮制动时,作用在车轮上的纵向附着力和侧向附着力分别为

$$F_x = -\mu_x \cdot F_z \quad (1.2)$$

$$F_y = \mu_y \cdot F_z \quad (1.3)$$

车轮制动时,车辆纵向受力情况如图 1.1 所示。附着系数与轮胎的结构、材料、气压和路面特性等因素有关,与车轮的滑移率 S 也有关系。滑移率定义为

$$S = \frac{v_x - v_w}{v_x} \times 100\% = \frac{v_x - \omega R}{v_x} \times 100\% \quad (1.4)$$

式中: v_x 为车速(车轮中心纵向速度); v_w 为车轮速度(车轮瞬时圆周速度, $v_w = \omega R$); ω 为车轮转动角速度; R 为车轮有效滚动半径。

车轮在其滚动平面内相对于路面有滚动和滑动两种运动形式。车轮在路面上纯滚动时, $v = v_w$, 车轮滑移率 $S = 0$; 车轮抱死时, $v_w = 0$, 滑移率 $S = 100\%$; 车轮在路面上边滚动边滑动时, $v > v_w$, 滑移率 $0 < S < 100\%$ 。

车轮的附着系数与滑移率的关系如图 1.2 所示。纵向附着系数随滑移率的增大,先是增大,然后减小,纵向附着系数峰值通常在滑移率 20% 附近。当滑移率在 0~20% 之间时,随着滑移率 S 的增加,纵向附着系数逐渐增大,称滑移率所处的这一区域为稳定区域;在滑移率 $S = 20\%$ 附近,纵向附着系数出现峰值,此时的滑移率称为最佳滑移率 S_p , 对应的附着系数 μ_p 称为峰值附着系数;当滑移率继续增大时,纵向附着系数开始下降,在制动力矩不变的条件下,车轮会迅速抱死,因此称滑移率处于 20%~100% 的区域为不稳定区域。在滑移率 $S = 100\%$ 时,纵向附着系数达到这一区域的最小值 μ_g 。

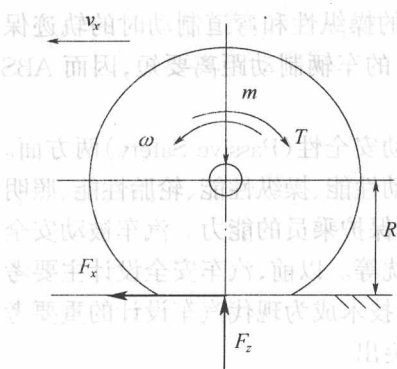


图 1.1 车辆制动时的受力情况

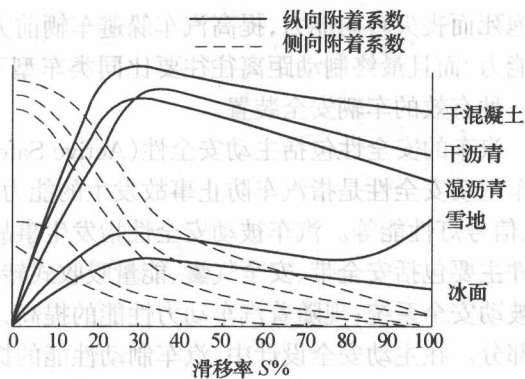


图 1.2 不同路面附着系数与滑移率关系

从图 1.2 可以看出滑移率对车轮抵抗外界侧向力作用能力的影响:随着滑移率 S 的增大,侧向附着系数 μ_y 迅速减小,即车轮抵抗外界侧向力作用的能力越来越小;而轮胎与路面之间的纵向附着力 F_x 的幅值先迅速增大,而后逐渐减小。车轮被制动抱死以后,侧向附着系数 μ_y 几乎减小到 0,轮胎与路面之间的附着力将全部作用在车轮的转动平面内(即纵向附着力方向上),车轮将完全丧失抵抗外界侧向力作用的能力。所以,车轮被制动抱死后,不仅不能产生最大的制动力,延长汽车的制动距离,而且车轮如果受到侧向力的

作用还会发生横向滑移,使汽车失去方向稳定性和转向操纵能力。

车轮的纵向和侧向附着系数的大小与路面情况也有关系。一般干路面的附着系数大于湿路面和冰雪路面的附着系数。各种路面的附着系数与滑移率的关系如图 1.2 所示。

为了使汽车在制动过程中获得良好的行驶性能,就要充分地利用轮胎与路面之间的附着力(即最大纵向、侧向作用力)。通过分析可以知道,车轮的角速度、角加速度、滑移率是表明车轮运动状态的重要参数,通过控制制动器输出的制动力矩调节以上参数可以实现控制车轮状态的目的。

ABS 的功能就是防止车轮制动时发生抱死。通过控制制动力矩,将车轮的滑移率控制在最佳滑移率的附近,使车轮既具有良好的纵向附着力,以获得较大的减速度,又具有较强的抗侧滑能力。安装了 ABS 的汽车在刹车时还可以利用方向盘控制正常行驶,发挥转向功能以避免障碍物,确保了转向系统的操纵功能。

ABS 的控制过程是:制动系统启动后,ABS 控制器开始检测车轮的转速和减速度。当传感器检测到车轮出现抱死趋向(车轮减速度和参考滑移率达到设定值)时,控制器发出制动防抱死信号,减小制动器作用于车轮的制动力矩;当车轮重新开始转动,车轮角减速度和参考滑移率恢复到某一范围内时,再次增大制动力矩。周而复始,使车轮的滑移率始终保持在设定的理想滑移率附近,以达到防抱死的目的。

1.2 防抱死制动系统的发展历史

最早官方记录的汽车防抱死系统是英国在 1932 年发布的专利 382241,名称是“制动时防止车轮压紧转动车轮的安全装置”。

在 20 世纪 30 年代,美国、德国、法国也有人申请有关防抱死装置的专利。

德国 BOSCH(博世)公司在 1936 年将电磁传感器用于测量车轮的速度,当传感器探测车轮抱死时,在每条制动管路上的电动机启动控制阀口的大小,从而调节制动压力。博世公司的这一专利被认为是 ABS 形成中的一个里程碑,其原理一直延用至今。

ABS 的实际应用被认为始于 1943 年,首先用于铁路上。美国西屋公司开始批量生产用于火车上的 ABS。而飞机发展的需要进一步推动了 ABS 的发展。由于飞机体积和重量的加大,速度的加快,飞机在着陆时,车轮制动抱死产生剧烈的摩擦,在驾驶员反应过来之前轮胎就会磨出斑点,大大缩短了轮胎的寿命。ABS 的应用防止了这一现象的发生。20 世纪 40 年代末 50 年代初,ABS 成功地应用于飞机上。这些早期的 ABS 大多是机械式的,是利用惯性飞轮探测车轮是否抱死,从而减小制动压力。

20 世纪 50 年代,ABS 开始应用于汽车工业。1951 年,Goodyear 航空公司将 ABS 装于载重车;1954 年,福特汽车公司在林肯车上装用了法国航空公司的 ABS 装置。在 20 世纪 60 年代,开始应用电磁传感器探测车轮轮速,控制部分主要是机械式的,系统相对简单,只有在特定的车辆参数和工况下防抱死效果才显著;而在车辆参数及工况发生变化时,防抱死功能就会丧失。而要改善这些性能就会增加机械系统的复杂性和体积,从经济观点来说是不合适的。所以 ABS 的发展处于进退两难的境地。

随着电子技术的飞速发展,70 年代初期 ABS 制造厂家采用分离元件的电子线路,但控制器的体积较大,多达上千个元件,并且可靠性比较差,还是难于实用化。

在 20 世纪 70 年代中期,由于大规模集成电路的应用,ABS 控制器由上千个减少到几百个,大大缩小了控制器的体积,并增强了可靠性。但控制功能的实现是靠硬件构成的逻辑电路,这决定了控制器不可能实现复杂的控制逻辑。

1978 年,ABS 有了突破性的发展。博世公司与奔驰公司合作研制出三通道四轮带有数字式控制器的 ABS,并批量装于奔驰轿车。由于微处理器的引入,使 ABS 开始具有了智能,从而奠定了 ABS 的基础和基本模式。

1981 年,德国的 WABCO 公司与奔驰公司在载重车上装用了数字式 ABS。

20 世纪 80 年代以后,ABS 在技术上得到很大发展,许多汽车零部件公司纷纷开始生产 ABS 产品。汽车新车的 ABS 装车率在美国已超过 50%。尤其是对重型车、大客车;欧洲和美国在法规的要求下其装车率已达 100%。在发展过程中,ABS 体积逐步减小,重量逐步减轻,控制和诊断功能不断增强。液压 ABS 已将控制器与控制阀体集成为一体,可以作为一个附加系统添加到常规的制动系统中去。控制器已普遍采用 16 位单片机作为 CPU,同时采用通用的诊断协议接口。ABS 除本身朝着集成化、低价格、大批量的方向发展外,还在原有系统上进行了扩展。

20 世纪 80 年代中后期,防滑控制系统(ASR)得到了发展,它包括制动防滑和牵引控制两部分,利用原有 ABS 基础上,只增加部分作动系统和相应的软件,就可以实现防滑控制功能,使性能价格比大大提高。

电子制动控制系统(EBS)已开始在重型车上应用,除了 ABS/ASR 功能外又增加了许多新功能。最重要的特点是各个车轮上的制动力可以独立控制。控制强度则由司机踏板位移信号的大小来决定,由压力调节阀、气压传感器及控制器构成闭环的连续压力控制,这样可以在外环形成一个控制回路来实现各种控制功能,如制动力分布控制、减速控制、牵引车与挂车处耦合力控制等。

在现有的 ABS 中也可以实现制动力分布控制,即在车轮未达到防抱死控制状态时,通过比较前、后轮的滑移率差,使之保持在一定范围内,这样制动力分布接近于理想的制动力分布,同时还可以省去后轴的感载比例阀。

除 EBS 外,ABS 的另一个发展是车辆动力学控制系统(VDC),它是在 ABS 的基础上通过测量方向盘转角、横摆角速度和侧向加速度对车辆的运动状态进行控制。VDC 系统根据转向角、油门、制动压力,通过观测器决定出车辆应具有的名义运动状态。同时,由轮速、横摆角速度和侧向加速度传感器测出车辆的实际运动状态。名义状态与实际状态的差值即为控制的状态变量,控制的目的是使这种差值达到最小,实现的方法则是利用车轮滑移率特性。由于车轮滑移率增加时,车轮侧向力减小,利用滑移率就可以控制侧向力的大小以及横摆力矩,采用状态空间反馈的控制方法,状态控制器的输出为名义横摆力矩。由此计算出相应于每一个车轮上的名义滑移率。当出现不稳定情况时,实际的滑移率要偏离名义值,此时可通过控制制动压力或发动机驱动力而消除差值。这样就构成了两个串级控制循环,内部实现滑移率控制,外部实现车辆状态控制,即车辆横摆角速度和车辆质心滑移率控制。VDC 目前在轿车上开始得到应用。这一系统与 ABS 不同的是,它可以在车辆运动状态处于危险状态下自动进行控制,努力去纠正人为操纵中出现的错误。

由于车辆上不断增加的电子控制系统,需要采用总线结构将各个系统联系起来,达到数据和资源共享,朝着系统集成化的方向发展。无论 ABS,还是其它车辆控制系统的发

展都将会持续下去,而这取决于计算机技术、车辆技术的发展和接受能力。人们预计,21世纪汽车的发展将是电子控制的年代,汽车在电子系统控制下将变得更加清洁、安全和舒适。

1.3 防抱死制动系统的组成

ABS的发展经历了机械式、电子式和数字式三个阶段,其中数字式ABS更具有抗干扰、响应速度快、控制准确等优点,目前已大批量生产。

数字式ABS主要由传感器(车速及轮速传感器)、微机控制系统及执行机构(压力调节器)三大部分组成。压力调节器串联在汽车的液压/气压制动管路上。微机系统通过监测到的传感器信号计算出车轮的减速度和参考滑移率,按照预先设定的逻辑或算法控制压力调节器动作,调节汽车制动器的制动力。

按控制通道的多少,ABS可以分为四通道~单通道四种布置方式。双通道和单通道ABS在控制性能上并不十分理想,目前已经基本被三通道和四通道ABS所取代。三通道ABS的应用最为广泛,它对两前轮进行独立控制,对两后轮按低选原则一同控制。由于三通道ABS既能够充分利用前轮制动力,又能够使两个后轮制动力始终保持平衡,因此能够保证汽车具有良好的方向操纵性和稳定性。早期,四通道ABS由于控制复杂,在非对称路面上因为左右两侧制动力的差异,往往使制动稳定性恶化,因此应用较少。但是,随着对汽车动力学性能研究的深入,通过控制各车轮制动力的分配来提高制动的安全性能将是今后的研究方向,所以四通道ABS将有非常良好的发展前景。图1.3为三通道和四通道ABS的组成形式。

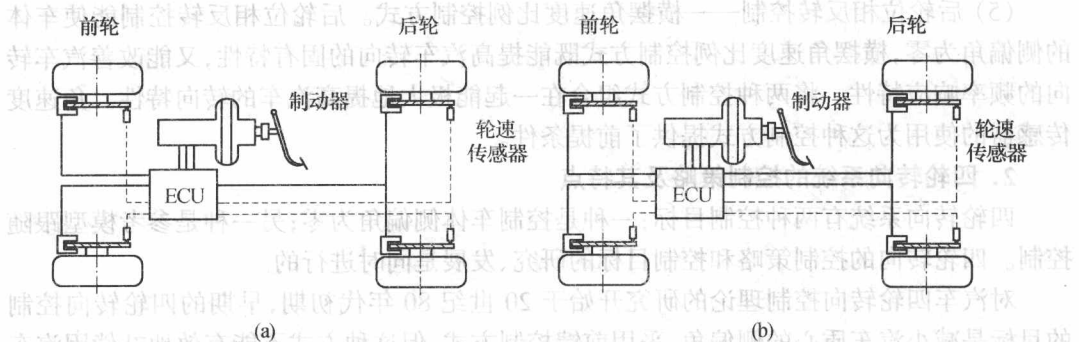


图 1.3 ABS 的组成形式
(a) 三通道 ABS; (b) 四通道 ABS。

1.4 操纵稳定控制技术的发展方向

1.4.1 四轮转向技术

四轮转向(Four Wheel Steering, 4WS)技术是主动底盘控制的重要组成部分,是改善汽车操纵稳定性的一种有效手段。车辆以中高速行驶时,通过控制后轮转角,可以避免由

于轮胎侧偏特性而产生的过多转向现象,提高了汽车高速行驶的安全性。此外,在低速转向时,利用后轮与前转向轮反相转动来获得较小的转弯半径,可以改善汽车的机动性能。

在国外,由于采用四轮转向技术有着良好的前景,四轮转向技术用于高速车辆(主要是轿车)和越野车辆已成为一种趋势。国内汽车行业对高速车辆的四轮转向技术也已做了多年的研究。

1. 四轮转向的控制方式

按照控制机构分,有两种类型的控制方案:一是控制器仅控制后轮的转向;二是控制器根据方向盘的指令,主动控制前、后轮的转向。前者只能控制一个状态变量(横摆角速度),而后者可同时控制两个状态变量(横摆角速度与质心侧偏角)。

在实际应用中,四轮转向控制主要采用以下几种控制方式:

(1) 后轮与前轮逆向的前轮转角比例控制方式。这种控制方式使横向加速度和横摆角速度的振幅增大,只适用于低速大转角转向,以提高汽车的机动性;

(2) 后轮与前轮同向的前轮转角比例控制方式。这种控制方式横摆角速度频率响应的相位滞后增大,不利于汽车的转向特性。但它减小了横向加速度与横摆角速度的振幅,车体的侧偏角减小。

(3) 后轮延时控制——前轮的相位提前控制。这种控制方式在转向初期相当于 2WS 汽车,随后转化为前、后轮同向,以改善横摆角速度的频率响应特性。

(4) 后轮位相反转控制。在转向初期,让后轮与前轮逆向以得到较大的横摆角速度,随后后轮很快就转到与前轮的同向,以减小车体的侧偏角。如果比例常数随着车速而改变,后轮位相反转控制能使车体的侧偏角为零。

(5) 后轮位相反转控制——横摆角速度比例控制方式。后轮位相反转控制能使车体的侧偏角为零,横摆角速度比例控制方式既能提高汽车转向的固有特性,又能改善汽车转向的频率响应特性。将两种控制方式组合在一起能极大地提高汽车的转向特性。角速度传感器的使用为这种控制方式提供了前提条件。

2. 四轮转向系统的控制策略及其特点

四轮转向系统有两种控制目标:一种是控制车体侧偏角为零;另一种是参考模型跟随控制。四轮转向的控制策略和控制目标的研究、发展是同时进行的。

对汽车四轮转向控制理论的研究开始于 20 世纪 80 年代初期,早期的四轮转向控制的目标是减小汽车质心的侧偏角,采用前馈控制方式,但这种方式不能有效地补偿因汽车系统参数改变、道路表面不规则以及侧向风干扰带来的影响。20 世纪 90 年代以后,自适应控制、滑模控制、时间延迟控制、 H^∞ 控制等新的控制策略被应用于四轮转向控制,反馈控制与前馈控制被同时应用于四轮转向系统,以达到所希望的响应特性,并提高系统在参数变化及存在外部扰动时的鲁棒性。

1) 前馈型四轮转向

前馈型四轮转向系统,后轮转角 δ_r 是前轮转角 δ_f 的函数,而汽车的运动状态靠驾驶员来进行反馈控制。早期的四轮转向采用的是前馈型控制方式,其控制目标是减小汽车质心处的侧偏角,以便减小侧向加速度与横摆角速度之间的相位差,这种控制方式可使稳态下的侧偏角接近为零,但缺点是增加了瞬态的侧滑速度。

2) 反馈型四轮转向

反馈型四轮转向系统的后轮转角是汽车参数的函数,其特点是响应快,能有效地减小外界干扰的影响。这种方法能够改变汽车侧向动力学方程的特征根,增强系统抵御外界干扰的能力。现代的四轮转向控制方法都是以此为基础而建立起来的。

四轮转向反馈控制的目标有两种:一种是控制汽车质心侧偏角为零;另一种是建立以横摆角运动为控制目标的参考模型,采用参考模型跟随控制。零侧偏角控制可使汽车具有很快的转向响应,但同时也增加了汽车的不足转向特性,而且需要高成本的侧向速度传感器。而参考模型跟随控制所需的角速度传感器成本较低。

以上提到的非线性控制方法适合于轮胎侧偏刚度变化不明显的工况。目前,四轮转向系统对小侧偏角的控制非常有效,随着侧向加速度的上升,轮胎特性进入非线性状态,给控制系统的设计带来了很大困难。一旦轮胎侧偏刚度急剧下降时,鲁棒控制理论也可能失效,尤其当轮胎力超过了最大附着力的后,轮胎的侧偏刚度表现为负值,控制系统就会失去稳定性。

3. 四轮转向系统的控制目标

四轮转向系统的控制目标主要包括有:

- (1) 减小侧向加速度响应和横摆角速度响应的相位滞后;
- (2) 减小汽车质心处的侧偏角;
- (3) 在低速行驶时具备良好的机动性,在高速行驶时具有很好的稳定性;
- (4) 改善汽车的转向响应特性(模型匹配/模型跟随控制);
- (5) 增强汽车稳定性;
- (6) 降低由汽车自身参数变化因素对汽车转向响应特性的影响,并保证所期望的汽车转向响应特性(自适应控制、鲁棒控制);
- (7) 在轮胎处于附着极限时,仍应具备良好的响应特性。

当前,四轮转向所采用的控制策略基本都是基于线性二自由度模型,主要的控制目标基本都是围绕着车辆质心处的侧偏角为零,以提高侧向稳定性。但这些系统不能较好地适应汽车本身特性的非线性或随机性变化(如轮胎侧偏特性的非线性,及前、后轮负荷变化的随机性等),不能适应车辆一道路系统特性的非线性或随机性变化(如轮胎与路面附着系数的变化等)。要在这样的条件下实现更为有效地控制,控制系统就必须具有自学习、自适应能力。

1.4.2 横摆力矩控制

横摆力矩控制(Direct Yaw Moment Control, DYC)通过由调整轮胎纵向力的横向分配产生的横摆力矩来提高汽车的操纵稳定性,它将成为改善汽车主动安全性能的最有前途的底盘控制方式。横摆力矩控制可直接控制左右车轮上的驱动力和制动力,产生横摆力矩来精确控制汽车的侧向运动。这种控制方法的最大优点是产生所需横摆力矩时不受汽车运动状态的影响,因此汽车的运动对外界干扰具有鲁棒性。

20 世纪 90 年代末,关于 DYC 的文章开始大量发表,对 DYC 的研究开始成为汽车主动底盘控制研究的热点。本田汽车公司的工程师 Shibahata 讨论了由轮胎侧向力产生的横摆力矩是如何随汽车质心侧偏角的变化而变化的。他指出:随着汽车质心侧偏角的增

加,回复横摆力矩的降低是导致汽车在临界条件下丧失稳定性的根本原因。附加的横摆力矩会恢复汽车的稳定性,特别是在汽车动力学的非线性区域内,这种作用非常明显。

基于这一思想,一些通过横摆运动检测质心侧偏角,并通过横摆力矩控制来改善汽车操纵稳定性的方法陆续被研究出来,其中部分研究成果已经应用于实际样车。

日本 Kanagawa 研究所的 Abe 通过台架试验轮胎模型研究了质心侧偏角的估计方法,并采用滑模控制理论,通过侧滑控制实现 DYC 的效果。随后,Abe 通过仿真证明:在侧偏控制方面,DYC 比 4WS 具有更高的稳定性控制能力。同时还指出,在补偿由于轮胎非线性而引起稳定性丧失方面,以侧偏角作为控制目标的控制性能优于以横摆角速度为控制目标的 DYC。

日本 Sharif 工业大学的 Esmailzadeh 采用最优控制理论,研究了利用转向角前馈控制和横摆角速度反馈控制的 DYC 方式,并比较了有/无侧向速度反馈控制的控制性能。仿真结果表明,侧向速度反馈控制对改善前者控制性能的效果并不显著。

韩国 Kookmin 大学的 Kihong Park 等人员研究了汽车动力学控制(VDC)的控制算法。提出以中性转向特性作为控制目标,以左右侧轮胎纵向力不平衡性产生的横摆力矩为控制变量,其实质就是 DYC 控制。文章指出:控制系统的目标是使汽车的侧向运动与驾驶员的转向输入相一致,该控制算法以汽车质心侧偏角和横摆角速度作为状态变量,采用前馈—反馈复合控制结构,通过前馈控制补偿转向输入引起的底盘转向运动;在反馈控制中采用线性二次型最优控制理论计算横摆力矩以保持车辆运动稳定性。文章还提出了基于模型的侧偏角估计方法。仿真结果表明,该控制算法可以有效提高汽车的侧向动力学特性。

目前,横摆力矩控制的控制目标包括两种:一种是以车体质心侧偏角(Side-slip Angle)为控制目标;另一种以中性转向特性(Neutral Steer)为控制目标。控制算法主要采用最优控制理论和滑模控制理论。对横摆力矩控制的研究还处于进一步深入之中,其发展趋势将是与四轮转向等底盘控制技术相结合,以提高车辆的操纵稳定性。

1.4.3 汽车 ABS 技术与操纵稳定性控制的结合

将 ABS、4WS 和 DYC 技术结合起来,是提高制动安全性能的有效途径。在 4WS 和 DYC 控制设计中,质心侧偏角和横摆角速度被作为系统的状态变量,车速被视为不变量。当忽略轮胎侧偏刚度变化时,建立的操纵稳定性数学模型为线性定常系统。但在制动过程中,车速由初始值逐渐减小至零。车速的变化,使原数学模型转变为时变线性系统,这将增加控制算法的求解难度。同时,非零转向角引起的离心力以及纵向制动力的存在,使各轮胎的负荷发生转移,从而改变了各轮胎的最大纵向附着力和侧偏特性。非零转向角和纵向制动力相互影响,也增加了轮胎侧偏特性的非线性。这些因素都增加了制动安全控制的难度。

因此,制动安全控制并不是将 ABS 与 4WS、DYC 控制简单地叠加,而是需要综合考虑纵向制动力、转向角、汽车质心侧偏角和横摆角速度之间的相互作用,同时考虑轮胎侧偏特性和外部干扰的影响,采用鲁棒控制方法,以使系统控制性能最优。

1.4.4 电子制动系统的研制开发

控制技术的发展,对制动执行机构的性能提出了更高的要求,需要响应速度快、控制

精度高。目前,传统液压制动仍然是最可靠最经济的办法。液压式 ABS 的控制多采用开关控制方式,存在控制的不连续性。同时,ABS 的信号监测和执行动作存在滞后,实际控制的输出只能达到每秒 10 次~20 次。随着对制动响应快速性的要求和连续控制技术的出现,迫切需要一种执行机构,来满足更快的响应速度和更高的控制精度。

汽车电子制动系统(Electronic Braking System,EBS)用电路代替液压制动管路,用电控元件来控制动力的大小和各轴制动力的分配,实现 ABS 的功能。EBS 的电子化,还易于与其它电控系统结合在一起,如汽车发动机的控制、电子悬架、自动换挡和防碰撞系统的控制等,为汽车实现电子化提供了良好条件。

1. EBS 的结构分类

EBS 按执行机构的不同可分为盘式、鼓式和电机驱动式。其中,电动盘式和鼓式制动器与液压制动器的结构形式十分相近,其作动器为电动机。应用于电动汽车上的电机驱动式制动系统的作动器是电动汽车的驱动电机,驱动电机通过减速器对轮胎施加驱动/制动扭矩,仅使用一个动力装置就可以实现驱动和制动功能。

盘式、鼓式制动器与电机式制动器工作原理的区别是:盘式和鼓式制动器将汽车的动能通过摩擦转化成热能耗散掉;而电机式制动器则是通过电机能耗制动将汽车动能转化成热能,或通过能量再生制动吸收汽车的动能,将它转化成化学能存储在电池中。

利用驱动电机控制车辆制动时的车轮制动扭矩,具有响应速度快、控制精度高等优点。控制系统不仅可以控制电机的转速,还可以监测、控制输出转矩。以此为基础开发主动安全控制系统,其控制性能将会有更大的突破,制动性能将比传统 ABS 更加良好。

2. 电机制动系统

电机制动系统是一种应用于电动汽车的制动系统。采用这种制动系统,不仅简化了系统结构,省去了多种传感器,而且提高了控制精度。电动轮式电动汽车的驱动结构,便于实现各车轮单独控制,为各种控制算法的应用开辟了广阔的空间。

由于电机制动系统将电动汽车驱动系统和制动系统合而为一,因此制动系统在动力布置方式、驱动系统选择以及控制算法方面,需要综合考虑电动汽车驱动系统的要求。

目前,世界各国研制的电动汽车多采用单电机驱动,以减少结构和控制的复杂性。但是,采用电动轮驱动的电动汽车由于其较高的机动性能,也受到了人们的关注。

1999 年和 2000 年,日本东京大学在第 16 届和第 17 届国际电动汽车会议上连续介绍了其采用电动轮驱动的四轮驱动电动汽车的驱动控制方法。

2001 年,日本丰田公司在其销售的混合动力汽车 ESTIMA 上采用了双电机、前后轴驱动的结构形式。

在 2002 年,北美国际车展上展出的通用汽车公司的概念车“Autonomy”也采用了电动轮的四轮驱动结构形式。图 1.4 为东京大学研制的安装有电动轮的四轮驱动电动汽车。

与单电机驱动相比,电动轮驱动的电动汽车通过动态调整各车轮的动力分配,能够更好地改善汽车在气动、加速、转向时的动力性能,同时也为在电动汽车上采用电子制动控制,提高汽车制动安全性能提供了条件。