

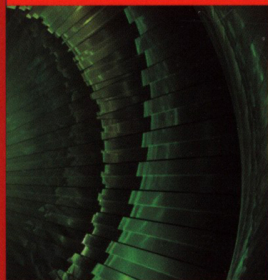


汽车先进技术译丛



Springer

汽车主动制动 控制系统设计



[英] Sergio M. Savaresi Mara Tanelli 著
于京诺 李元元 等译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

汽车先进技术译丛

汽车主动制动控制 系统设计

[英] 塞尔吉奥·M. 赛瓦瑞西 (Sergio M. Savaresi) 著
玛拉·塔内莉 (Mara Tanelli)

于京诺 李元元 梁桂航 王 健 译
李洪斌 宋进桂 李 栋 杨永胜



机械工业出版社

本书由3部分组成,第1部分包括第1章和第2章,介绍了防抱死制动系统的发展历程及未来展望,以及在研究制动系统及其控制时使用的模型;第2部分包括第3章、第4章和第5章,介绍了制动控制系统设计的基本解决方案;第3部分包括第6章、第7章和第8章,提出了主动制动控制系统设计和轮胎—路面附着系数估计的更先进的解决方案。本书后面还有附录,提供了本书用到的动态系统的分析和推理工具以及轮速传感器的信号处理方法。

本书主要内容来自米兰理工大学与先进的汽车工业领域联合研究的最新成果,既有较深的理论,又与汽车工业实际紧密联系。可作为车辆工程相关专业本科生或者研究生的教材,也可作为汽车工业领域相关工程技术人员的参考书,还可以作为相关研究领域研究人员的参考资料。

Translation from English language edition:

Active Braking Control Systems Design for Vehicles

By Sergio M. Savaresi and Mara Tanelli

Copyright © 2010 Springer London

Springer London is a part of Springer Science + Business Media

All Rights Reserved

本书中文简体版由 Springer 出版社授权机械工业出版社独家出版发行。

版权所有,侵权必究。

北京市版权局著作权登记号:01-2013-1406

图书在版编目(CIP)数据

汽车主动制动控制系统设计/(英)赛瓦瑞西
(Savaresi, S. M.), (英)塔内莉(Tanelli, M.)著;
于京诺等译. —北京:机械工业出版社,2014.8
(汽车先进技术译丛)
ISBN 978-7-111-46902-5

I. ①汽… II. ①赛…②塔…③于… III. ①汽车—
制动装置—控制系统—系统设计 IV. ①U463.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第115735号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:徐巍 责任编辑:徐巍 版式设计:霍永明

责任校对:纪敬 封面设计:鞠杨 责任印制:乔宇

北京铭成印刷有限公司印刷

2014年9月第1版第1次印刷

169mm×239mm·14.25印张·265千字

0001—3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-46902-5

定价:69.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010)68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010)88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010)88379203 封面防伪标均为盗版

译者的话

塞尔吉奥·M. 赛瓦瑞西教授和玛拉·塔内莉博士合著的《汽车主动制动控制系统设计》，是“工业控制进展”系列专著中的一本。本书由3部分组成，第1部分包括第1章和第2章，介绍了防抱死制动系统的发展历程及未来展望，以及在研究制动系统及其控制时使用的模型；第2部分包括第3章、第4章和第5章，介绍了制动控制系统设计的基本解决方案，包括基于连续动态和离散动态执行器的制动控制器的设计，以及纵向车轮滑移率的估计问题；第3部分包括第6章、第7章和第8章，提出了主动制动控制系统设计和轮胎—路面附着系数估计的更先进的解决方案，包括基于制动动力学线性模型的滑移率和减速度混合控制方法、车轮滑移率控制的非线性控制方法以及轮胎—路面附着条件的识别方法。该专著的最后是附录，附录A提供了本书用到的动态系统的分析和推理工具；附录B提供了轮速传感器的信号处理方法。这两个附录可以为读者阅读和理解本书提供有益的帮助。

本书运用经典和现代控制理论阐述汽车主动制动控制系统先进的设计方法，其主要内容来自米兰理工大学与先进的汽车工业领域联合研究的最新成果，既有较深的理论，又与汽车工业实际紧密联系，是现代汽车主动制动控制系统设计方面的一本难得的好书。本书可作为车辆工程相关专业本科生或者研究生的教材，也可作为汽车工业领域相关工程技术人员的参考书，还可以作为相关研究领域研究人员的参考资料。

本书翻译人员有于京诺、李元元、梁桂航、王健、李洪斌、宋进桂、李栋、杨永胜。

由于译者水平有限，难免存在翻译不当或者错误之处，敬请读者批评指正。

译者

系列专著编辑前言

“工业控制进展”系列专著，旨在介绍并促进在控制工程方面的技术转让。控制技术的迅速发展已经对控制学科的所有领域产生了影响。包括新理论，新控制器、执行器、传感器，新的工业生产过程、计算方法，新应用，新观点，新挑战。这一研究著作的大部分内容来自工业报告、可行性研究论文和先进的合作项目报告。本专著系列为研究者提供了充分展示其在工业控制方面新著作的机会，以使其更广泛、更快捷地传播。

在过去的几十年里，汽车技术已经有了很大发展。汽车技术发展的方向之一是多燃料发动机的引入，包括使用汽油、柴油和乙醇的发动机，以及可以在双燃料模式下工作的发动机。电动汽车也开始获得市场份额，尤其是市内行驶的小型车辆。然而，或许同等重要的发展是引入电子部件管理汽车的工作，并且在某些情况下可以替代或显著改进机械部件。相关的事例就是线控制动系统的采用。电子部件在汽车中的使用对汽车制造商有如下益处：

1) 电子部件可以使汽车部件大批量生产和模块化，并且更容易安装，这样就降低了装配时间和制造成本。

2) 如果是电子部件，就可以避免手动调整，取而代之的是利用插件基于计算机进行调整，这使调整过程更加可靠并且还降低了装配时间和成本。

3) 使用电子部件和取消机械连接可以释放空间，降低汽车重量；这样制造商可以引入新的设计性能，可以改进汽车产品质量，增加产品品种，从而获得市场优势。

电子部件在汽车中的使用同样对汽车购买者、驾驶人和乘客都有益处：

1) 电子部件带来的设计自由为购买者在发动机的类型和管理上提供了更加多样化的选择，也带来更好的燃油经济性、更好的平顺性和更大的内部空间。

2) 汽车更加安全可靠，即使驾驶人对发动机室盖下发生了什么知之甚少。另外，日常维护变为基于计算机的操作，比手工处理程序更加迅速和规范。

3) 驾驶界面更加先进，为驾驶人提供更多的“驾驶”信息，从而可以更安全地驾驶，因为驾驶人会更加了解他们可能需要应对的潜在危险。

电子部件的使用为更好、更先进的控制策略的运用创造了条件，这些控制策略的运用可以降低油耗、限制排放量、改进操控性能，使制动操纵更好、更安全。“工业控制进展”系列专著的最后一部由塞尔吉奥·M. 赛瓦瑞西和玛拉·塔内莉完成。它包括3部分，第1部分包括2章，提供在制动系统中使用的控制系

统设计的背景，包括发展历程部分的介绍(第1章)以及在研究制动系统及其控制时使用的模型的详细介绍(第2章)。第2部分包括3章，介绍了制动控制系统设计的基本解决方案(第3章和第4章)，以及纵向车轮滑移参数的识别方法(第5章)。第3部分包括3章，阐述了更先进的设计方案和更多行驶参数的识别，包括轮胎—路面附着参数的识别。本书的最后是作者使用的有关非线性控制方面的和有关轮速传感器信号处理的实际问题的两个非常有用的附录。

塞尔吉奥·M. 赛瓦瑞西和玛拉·塔内莉已经完成了一部成功展示先进控制如何促成新制动系统技术设计的专著。工业领域和学术领域的读者会发现本书很容易理解；大学讲授控制课程的教师也许会发现案例研究可以作为工业控制理论在实际中应用的范例。总之，本书是一本非常专业的并与工业相关的著作，将会有许多来自控制领域和汽车工业领域的感兴趣的读者。本系列专著的编辑很高兴在该系列中有这样一本专著，因为它对近期由 Pietro J. Dolcini, Carlos Candas-de-wit 和 Hubert bechart 所撰写的专著《汽车干式离合器的控制》(ISBN :978-1-84996-067-0,2010)是一个很好的补充，并且保证了本系列专著能够继续介绍汽车工业先进控制应用的发展。

M. J. Grimble

M. A. Johnson

英国苏格兰格拉斯哥工业控制中心

2010

前 言

车轮滑移的动态控制是底盘控制中最关键和最令人关注的领域，因为它是大多数主要底盘控制子系统如制动控制、牵引控制和稳定性控制的基础。另外，它是看似简单的动态特性(其主要特征可以简单地用二阶动态模型表现)与挑战性(非线性特性,随着考虑的工作条件、时变参数、大的参数变化、未知的环境—依赖参数等而变化的稳定性)非同寻常的结合。

本书主要致力于车轮滑移控制策略的分析和研究。然而，为了保证本书重点突出并能够进行深入研究，著作的大部分内容介绍的是有关车辆制动期间的纵向动态控制问题。

在保持牵引控制和稳定性控制的背景下，关注制动控制主要有三个原因：

1) 制动控制是面向大众市场生产的第一个底盘控制子系统。防抱死制动系统(ABS)已经成为所有现代轿车的标准配置。然而，牵引控制和稳定性控制子系统的应用依然有限。

2) 制动控制必须面对所有车轮上制动力的协调方面的挑战，然而，牵引控制通常只是控制车轮的一半，即控制驱动轮。

3) 当分析局限于纵向动态时，制动控制也是独立的和有意义的，然而，稳定性控制本来就需要纵向、横向和横摆动态耦合。

当然，所有为了解决在制动时车轮滑移控制问题的研究成果，都可以在牵引控制和稳定性控制中重新直接使用。

从技术的角度看，自动制动控制系统的设计显然高度依赖制动系统的特性和执行器的性能。

事实上，装备有传统液压制动系统的轮式车辆的ABS(通常在所有小型客车上都装备)造成了特殊的设计约束，因为它们必须应对制动压力的开/关调节。另一方面，最近由执行器引起的电子—液压和电子—机械制动系统的技术进步已经从根本上改变了制动控制系统设计的基本理念。事实上，这些制动系统能够连续调节制动力矩，因而允许使用经典控制理论工具进行控制器设计。

该领域研究的巨大进展直接来自工业界，由于寻求可靠的控制系统而引起了许多挑战性的问题：最简单的结构，更少的传感器布置，具有应对传输延迟、明显的测量误差以及参数不确定性问题的能力。

本书是在这种具有挑战性的不断发展的背景下，以为主动制动控制系统提供更全面的分析和提供基本的以及创新的解决方案为目的撰写的。以方法论的观点

看, 无论从工业的角度还是从理论的角度上看, 本书都是有效的和适用的。

特别是本书同时致力于主动制动控制系统的分析和设计以及在制动控制情况下出现的主要估计和识别问题。

在本书中考虑的控制设计问题主要与两种不同的制动技术相关。即基于具有开/关动态特性的液压制动(HAB)的制动控制系统和适用于线控制动(BBW)控制尤其是基于电子—机械制动(EMB)的制动控制系统。

由于制动动力学的控制算法可以基于线性或非线性制动动态模型, 因此线控制动(BBW)控制方法也可以进一步分为两种类型。

本书说明了这些不同的控制方法具有互补性, 因为每种控制方法在性能方面或者在闭环系统的结构性质方面都有自己的具体特性。

最后, 本书提出了一些与制动控制系统设计密切相关的解决三种不同的估计和识别问题的新方法, 即

- 1) 纵向车轮滑移率的估计。
- 2) 轮胎—路面附着系数的估计。
- 3) 通过轮胎内传感器直接估计轮胎—路面接合力。

其目的是为了从更广阔的视角给读者提供汽车主动制动控制系统的综合处理方法。在本书中介绍的重要内容是在米兰理工大学与领先的汽车产业之间的联合项目开展的内容, 因此该专著的内容紧密联系工业实际。

本书的适用范围和结构

为了适应更多的读者, 本书包括综述部分, 该部分是从历史的角度和作为教程的框架进行编写并引入相关的问题和方法。因此, 本书适应三种阅读水平: 学生的教材水平, 工程师和技术人员的应用水平, 研究者对控制方法研究的水平。

为了兼顾这些不同的阅读水平, 同时为了以一种由基本的到最先进的控制方法的渐进的方式来介绍, 本书在概念上分为3部分。

本书的第1部分由第1章和第2章组成: 前者提供了有关防抱死制动系统(ABS)及其发展和未来展望的介绍资料, 描述了本书考虑的不同的制动系统, 并进行了数学描述; 而后者介绍了制动动力学的面向控制的动态模型。

本书的第2部分由第3章、第4章和第5章组成, 主要是处理控制和估计方面的问题。具体为在第3章和第4章中根据执行器的两种不同类型提出了制动控制设计的基本解决方案; 第3章讨论了基于连续动态执行器的制动控制器的设计, 而第4章详细探讨了具有开/关(ON/OFF)动态特性的制动系统。此外, 第5章研究了与主动制动控制器的设计密切相关的重要的估计问题: 车轮滑移率估计。

本书第3部分提出了关于主动制动控制系统设计和轮胎—路面附着系数估计的更先进的和面向研究的解决方案。具体是第6章讨论了滑移率和减速度混合控

制，这是一种基于制动动力学线性模型的先进的控制方案，而第7章提出了车轮防滑控制的非线性控制方法，即基于李雅普诺夫(Lyapunov)的综合推理方法，它能够产生具有优越性的特殊闭环性能。最后，第8章解决了轮胎—路面附着条件的估计问题，并且概括介绍了一种来自于轮胎内部传感器对接触力的直接估计的方法。

撰写本书时，我们假定读者熟悉动态系统的基本概念和线性控制系统的设计。因此，我们为本书补充了附录A，附录A提供了本书中用到的非线性系统分析和综合推理方法的基本定义和概念。参照这些主题，该附录意在提供一种快速教程，对这些问题的详细研究需要借助专业书籍，其中一些也是附录A本身引用的。

最后，附录B提供了一种对来自传感器的轮速估计问题的专门处理方法，该传感器是在开发主动制动和牵引控制系统时必须涉及的基本的传感器。该附录介绍了两种主要的速度估计算法并强调了它们的优缺点，还提出了一些对在分析实验数据时出现的信号滤波问题的见解。

总之，本书的前两部分介绍的内容适合实际工作者和车辆控制方向的硕士课程的深度水平，而第3部分可以作为汽车控制领域的研究生和研究者感兴趣的参考资料。

塞尔吉奥·M. 赛瓦瑞西

玛拉·塔内莉

米兰

2010. 7. 19

致 谢

本书是学术界和工业界的合作伙伴多年合作的成果。部分成果已经发表在论文[21,73,90,92,93,105-111,113,115-120]中。

我们感谢所有的合著者：Alessandro Astolfi, Ivo Boniolo, Sebastiano campo, Carlo Cantoni, Fabio Codeca, Matteo Corno, Mario di Bernardo, Luigi del Re, Luca Fabbri, Andrea Fortina, Alessandra Gagnani, Peter Langthaler, Alessandro Moia, Gustavo Osorio, Giulio Panzani, Luigi Piroddi, Maria Prandini, Roberto Sartori and Annalisa Zappavigna, 感谢他们所有充满激情的讨论, 并且感谢他们真诚的帮助和永恒的友谊。

在工业领域, 我们特别感激布雷博公司(Brembo S. p. A)的 Carlo Cantoni, 比亚乔集团公司(Piaggio Group S. p. A)的 Luca Fabbri, 菲亚特汽车公司(FIAT Automobili S. p. A)的 Sebastiano Campo, 感激他们对我们研究先进解决方案时给予的始终如一的支持和关注, 并且感谢他们在相关研究主题上为我们提供的工业视角。

感谢米兰理工大学(Politecnico di Milano)的汽车控制团队(<http://move.dei.polimi.it/>)为本书提供了所用的资料, 我们要感谢现在的和曾经的成员们这么多年来与我们的合作, 特别是 Matteo Corno。我们非常感谢 Matteo 的帮助, 感谢他的洞察力和对研究充满无限的激情。

此外, 我们要感谢现在和以前的学生, 从米兰理工大学(Politecnico di Milano)开设车辆控制课程开始, 他们就帮助我们撰写和推敲不同课题的报告。

特别感谢 Alessandro Astolfi, Mario di Bernardo 和 Luigi del Re, 感谢他们所有的合作以及在参观他们的机构时的热情接待。还要感谢 Guido Guardabassi 在审查该书的草稿时对我们所提供的耐心帮助。

最后, 我们要感谢 Robin Sharp 教授和 Bjorn Wittenmark 教授, 感谢他们百忙之中抽出时间来阅读和评价构成了本书的基础的这些博士论文, 感谢他们提出了帮助改进这些论文内容并且适合本书的建设性的意见。

用于本书的缩写

ABS	防抱死制动系统
BBW	线控制动
BVP	边值问题
CAN	控制器局域网
ECU	电子控制单元
EHB	电子—液压制动
EMB	电子—机械制动
ESC	电子稳定控制
ESP	电子稳定程序
FIR	有限脉冲响应
FSM	有限状态机
GAS	全局渐近稳定
GES	全局指数稳定
GCC	底盘综合控制
GPS	全球定位系统
HMI	人机界面
IBCU	智能制动控制单元
LAS	局部渐近稳定
LS	最小二乘法
MIMO	多输入多输出
ML	最大似然法
MSD	滑移率—减速度混合
OEM	原始设备制造商
RLS	递归最小二乘法
RML	递归最大似然法

目 录

译者的话	
系列专著编辑前言	
前言	
致谢	
用于本书的缩写	

第 1 部分 制动控制系统设计绪论和建模

第 1 章 主动制动控制系统绪论	2
1.1 引言	2
1.2 ABS 的发展史	3
1.3 执行器主要技术和功能介绍	4
1.4 线控方式	8
1.5 主动制动控制系统设计的技术发展水平	10
1.6 基于底盘综合控制的制动系统的最新进展	11
1.7 总结	13
第 2 章 面向控制的制动动力学模型	14
2.1 引言	14
2.2 轮胎—路面接触力	14
2.2.1 摩擦模型	17
2.2.2 弛豫动力学	19
2.3 单轴模型	20
2.4 双轴模型	22
2.5 线性模型与动力学分析	25
2.5.1 单轴模型分析	25
2.5.2 双轴模型分析	36
2.6 总结	44

第 2 部分 制动控制系统设计基本解决方案

第 3 章 制动控制系统设计：连续动态执行器	46
3.1 引言	46

3.2	车轮滑移控制	46
3.3	车轮减速度控制	48
3.4	线性车轮滑移率控制器设计	51
3.5	执行器动态特性的影响	54
3.6	性能分析：数值举例	56
3.7	激活与抑制逻辑	58
3.7.1	激活条件	59
3.7.2	抑制条件	60
3.8	基于双轴模型的滑移率控制器分析	62
3.8.1	闭环稳定性分析	62
3.8.2	控制后轮：滑移率控制与相对滑移率控制	65
3.8.3	在弯路上的车轮滑移率控制	70
3.9	总结	70
第4章	制动控制系统设计：离散动态执行器	72
4.1	引言	72
4.2	问题提出	73
4.3	极限环的存在和稳定性	76
4.4	极限环稳定性分析	84
4.5	执行器速率极限变化的影响	85
4.6	执行器性能总结	87
4.7	总结	89
第5章	纵向车轮滑移率估计	90
5.1	引言	90
5.2	制动控制和车速估计的相互影响	91
5.3	车速估计的解决方案	94
5.4	估计算法的性能评价	98
5.5	总结	100

第3部分 制动控制系统设计先进的解决方案

第6章	滑移率和减速度混合控制	104
6.1	引言	104
6.2	滑移率—减速度混合控制	104
6.2.1	开环动态特性分析	107
6.2.2	MSD 控制的闭环稳定性	108
6.3	滑移率控制和 MSD 控制的扰动分析	110

6.4	MSD 控制的稳态滑移率	115
6.5	数值分析	117
6.6	总结	120
第7章	非线性车轮滑移率控制设计	121
7.1	引言	121
7.2	基于李雅普诺夫(Lyapunov)方法的车轮滑移率控制	121
7.2.1	假设	122
7.2.2	控制器设计	122
7.3	数值分析	131
7.4	总结	133
第8章	轮胎—路面附着条件的识别	135
8.1	引言	135
8.2	通过车轮减速度测量值检测附着系数曲线峰值点	135
8.2.1	附着系数曲线斜率符号的实时检测	136
8.2.2	ABS 监督控制逻辑	138
8.2.3	试验结果	139
8.3	轮胎—路面附着条件的实时识别	143
8.3.1	识别策略	144
8.3.2	数值分析	146
8.3.3	试验结果	150
8.4	通过轮胎内置传感器直接估计接触力	155
8.4.1	引言	156
8.4.2	试验装置	157
8.4.3	主要概念	158
8.4.4	信号处理	160
8.4.5	试验结果	166
8.5	总结	170

附 录

附录 A	动态系统的分析和推理工具	172
A.1	引言	172
A.2	动态系统分析	173
A.2.1	平衡点的稳定性: 李雅普诺夫(Lyapunov)定理	176
A.2.2	特殊情况: 二阶动态系统	182
A.3	非线性设计工具	189

A. 4 总结	193
附录 B 轮速传感器的信号处理	194
B. 1 引言	194
B. 2 轮速传感器信号	194
B. 2.1 速度估计算法	195
B. 2.2 轮径校准	200
B. 3 轮速传感器信号的分析 and 滤波	202
B. 4 总结	205
参考文献	207

第 1 部分

制动控制系统设计 绪论和建模

本书第 1 部分首先介绍主动制动控制系统的发展史，然后探讨其工业应用和理论发展，以及未来的研究前景。此外，本书还提供了对制动系统的功能描述以及数学描述。最后，讨论了用于控制器设计的面向控制的制动动力学模型。总之，这些问题是本书将要讨论的控制方法所涉及的主要内容。

第 1 章 主动制动控制系统绪论

1.1 引言

不可否认,自轮式车辆诞生以来,车轮打滑就一直是一件很麻烦的事情。固特异航空航天公司的 A. C. Gunsaulus 于 1952 年发表的论文^[28]将侧滑简单地描述为“不按驾驶人意愿的不希望的(汽车的)侧向运动……其主要原因是路面上轮胎的附着力较低并且侧向力大于轮胎的附着力,其结果通常是使驾驶人部分或者完全失去对车辆的控制。”

对于在公路上行驶的车辆,主动制动控制系统可以防止不希望的侧滑现象发生。

事实上,现代绝大部分在公路上行驶的车辆都装备了电控防抱死制动系统(ABS)。防抱死制动系统(ABS)能够极大地改进汽车在极端环境下的安全性,因为它能够在保持轮胎与路面最大纵向附着力的同时,保持较大的能够确保汽车操纵性能的侧向附着力。自动制动控制系统的应用也已经扩展到了电子稳定控制(ESC)系统(见参考文献[27,39,45,88])。

毫无疑问,自动制动控制系统的设计主要取决于制动系统的特性以及执行器的性能。众所周知,装备传统液压执行器的轮式车辆的标准 ABS 主要采用基于规则的控制逻辑(见参考文献[124])。

另一方面,执行器最新的技术进展已经导致了电子—液压和电子—机械制动系统的发展,这些系统能连续调节制动力矩,因而允许我们将主动制动系统作为一个经典问题予以描述(见参考文献[15,23,41,90])。在自动制动控制领域,最近十年有大量的方法和途径被提出,范围从传统的调节回路,到滑动模型、模糊神经或者混合结构(见参考文献[15,38,39,53,54,59,60,95,101,122])。

本章将提供 ABS 的概述,包括 ABS 发展史以及在这一领域的科技发展成果。此外,还讨论了本书涉及的制动系统的主要特性,并且提供了对它们的数学描述。本章最后简要介绍了主动底盘控制系统研究的最新进展,包括作为所谓底盘综合控制(GCC)子系统的制动控制器。