



汽车先进技术译丛
汽车创新与开发系列

 Springer

汽车机电一体化 控制系统

应用与解决方案 (下)

Automotive Mechatronics Operational and Practical Issues (II)

[波兰] 波格丹·塔德乌什·费雅伍科夫斯基 著
(Bogdan Thaddeus Fijalkowski)
高建平 李高鹏 等译

SBW AWS 转向机电一体化控制系统
ABA AWA 悬架机电一体化控制系统

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS





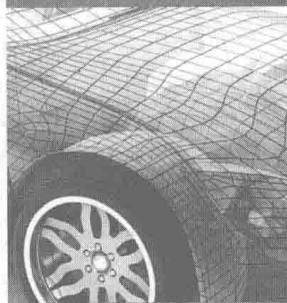
汽车先进技术译丛

汽车创新与开发系列

 Springer

汽车机电一体化 控制系统

应用与解决方案（下）



Automotive Mechatronics Operational and Practical Issues (II)

[波兰] 波格丹·塔德乌什·费雅伍科夫斯基 著
(Bogdan Thaddeus Fijałkowski)

全体译者（按音序排列）

曹付义	陈慧勇	丁 伟	段海燕	高建平	高小杰
葛 坚	郭清松	介石磊	李 鹏	李忠利	刘振楠
马海英	马心坦	彭能岭	任 轩	孙家辉	孙中博
王庆国	王运玲	位跃辉	郝建国	徐振海	张磊敏
张 鹏	赵金宝	郑 维	朱光海		

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

汽车技术的快速发展,造成了资深的、跨学科的汽车科学家和工程师的缺乏。本书讨论了现代汽车上各种机电一体化控制系统的类型,以及在这种环境中工作的汽车科学家和工程师所需的技能。本书旨在提供汽车机电一体化应用和解决方案,特别强调不同种类汽车系统的方案。

本书可作为研究生教材,也可作为涉及汽车机电一体化控制系统设计任务的研发人员的参考书。

Translation from English language edition:

Automotive Mechatronics: Operational and Practical Issues (II)

by B. T. Fijalkowski.

Copyright © 2011 Springer Netherlands.

Springer Netherlands is a part of Springer Science + Business Media.

All Rights Reserved.

版权所有,侵权必究。

This title is published in China by China Machine Press with license from Springer. This edition is authorized for sale in China only, excluding Hong Kong SAR, Macao SAR and Taiwan. Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本书由 Springer 出版社授权机械工业出版社在中华人民共和国境内地区(不包括香港、澳门特别行政区及台湾地区)出版与发行。未经许可之出口,视为违反著作权法,将受法律之制裁。

北京市版权局著作权合同登记 图字:01-2014-2251号。

图书在版编目(CIP)数据

汽车机电一体化控制系统:应用与解决方案.下/(波)波格丹·塔德乌什·费雅伍科夫斯基著;高建平等译.—北京:机械工业出版社,2017.9

(汽车先进技术译丛 汽车创新与开发系列)

书名原文:Automotive Mechatronics: Operational and Practical Issues (II)

ISBN 978-7-111-57442-2

I. ①汽… II. ①波… ②高… III. ①汽车-机电一体化-控制系统
IV. ①U463

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第167717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:何士娟 责任编辑:何士娟 责任校对:刘岚

封面设计:鞠杨 责任印制:常天增

北京圣天亚美印刷有限公司印刷

2017年9月第1版第1次印刷

169mm×239mm·26.75印张·2插页·540千字

0 001—1 900册

标准书号:ISBN 978-7-111-57442-2

定价:199.00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

服务咨询热线:010-88361066

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-68326294

机工官博:weibo.com/cmp1952

010-88379203

金书网:www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

教育服务网:www.cmpedu.com

译者序

随着科学技术的飞速发展和人们对汽车性能要求的不断提高，机械学、流体力学、电力电子学、控制理论、计算机科学、信息技术等越来越多地应用于现代汽车产品，传统机械零部件逐渐被机电一体化控制系统所取代，汽车早已不再是一个单纯的机械产品，而是多学科、跨领域理论和技术协同组合应用的综合体。

波兰克拉科夫工业大学 Bogdan Thaddeus. FIJALKOWSKI 教授是汽车机电一体化控制领域的知名专家，是世界电动汽车协会备忘录的签署人，曾入选“世界名人录”和“科学与工程名人录”。B. T. FIJALKOWSKI 教授基于自己多年的研究成果，以及对于汽车行业技术发展前沿的理解和判断，著写了《Automotive Mechatronics: Operational and Practical Issues》。该著作图文并茂，深入浅出，既有对已有理论知识、技术原理和系统结构的全面深入探讨，也有对未来技术发展方向和趋势的科学判断。为了帮助读者全面深入理解相关技术，作者大量引入了先进技术和最新研究成果，并对来自他人的文本、图片、理论、结果和设计一一进行了附注，体现了他高度严谨和务实的学术作风。

我们在高校和企业从事汽车机电一体化控制系统和新能源汽车技术研发工作多年，也曾前往美国和德国访问学习电动汽车技术。在翻译该著作的过程中，除了理解和再现 B. T. FIJALKOWSKI 教授对于汽车机电一体化控制系统的见解外，也融入了团队在相关领域的研究和实践经验，加入我们在这一领域的理解，最终形成本书——《汽车机电一体化控制系统：应用与解决方案》，共上、下两册。

本书的翻译工作是在机械工业出版社的大力支持下，由河南科技大学的高建平副教授和郑州宇通客车股份有限公司的李高鹏高级工程师全面负责翻译和审校工作，参加本书翻译工作的还有河南科技大学的郝建国、王运玲、曹付义、马心坦、李忠利、葛坚、丁伟、孙中博、任德轩、张磊敏、高小杰、徐振海、孙家辉，黄河交通学院的张鹏、马海英、介石磊、郭清松，以及郑州宇通客车股份有限公司的朱光海、段海燕、彭能岭、陈慧勇、郑维、赵金宝、刘振楠、位跃辉、王庆国。在此对他们表示衷心的感谢。

本书是汽车技术领域的专业著作，内容精深，译者的知识局限性会给译文带来很多不足之处，望广大读者多提宝贵意见。

河南科技大学车辆与交通工程学院

高建平

2017年7月1日

前 言

本书旨在提出汽车机电一体化的工作和实践方案，特别强调不同种类汽车系统的方案。

本书可作为研究生教材，也可作为涉及汽车机电一体化控制系统设计任务的研发人员的参考书。

汽车技术的快速发展，造成了资深的、跨学科的汽车科学家和工程师的缺乏。本书讨论了现代汽车上各种机电一体化控制系统的类型，以及在这种环境中工作的汽车科学家和工程师所需的技能。

《汽车机电一体化控制系统：应用与解决方案》旨在提高汽车机电一体化的教育并强调对学生实验动手能力的培养。作者希望本书能促进和提高高等教育机构教学计划中的学生实验动手能力，并由此培养出更多汽车机电一体化和自动化的工程师。

内容：

* 上册

- 第1章：RBW/XBW 整体式一体成型车身或底盘运动机电一体化控制超系统。

- 第2章：DBW AWD 驱动机电一体化控制系统。

- 第3章：BBW AWB 制动机电一体化控制系统。

* 下册

- 第1章：SBW AWS 转向机电一体化控制系统。

- 第2章：ABW AWA 悬架机电一体化控制系统。

本书既适用于大学本科生和研究生，也适用于涉及与汽车动力学、制动器、转向装置以及减振器（阻尼器）有关的各个学科的专业人员。阅读本书，需要具备大学数学、大学物理学的基本知识，同时还需要具备有关汽车驱动、制动、转向和悬架系统等方面的基本知识。

对于刚接触 RBW 或 XBW 一体成型车身、分离式底盘（space - chassis）、滑板式底盘（skateboard - chassis）或整体式底盘（body - over - chassis）运动机电一体化控制系统的读者，可以从大多数教材中获益良多。本教材不要求读者必须具备 DBW AWD 驱动、BBW AWB 制动、SBW AWS 转向以及 ABW AWA 悬架机电一体化控制系统的基本背景或知识。此外，出于所有权的考虑，本书没有详细说明算法设计、算法性能分析或算法应用。

作为本书唯一的作者，除非特别说明，书中包含的所有内容均为本人自己的构思。出于对原著者的感谢，本书对任何非本人原创的文本、图片、理论、结果和设

计等均进行了附注。对于所有参考文献及帮助材料，本书都给予了致谢。

本书中所有信息的获得和介绍均符合学术规则和道德行为准则。在满足这些规则和行行为准则的前提下，我也郑重声明：对于非本书原创的所有资料和结果均注明了出处。

在此向 Spiros Tzafestas 教授致以我最衷心的感谢，感谢他在本书编写中对智能系统、控制、自动化 (ISCA)、科学和工程系列图书的关注。同时，也要对 Nathalie Jacobs 女士和 Johanna F. A 女士表达谢意，正是由于她们的坚持才使本书得以完成。

在本书写作过程中，引用了众多作者的相关内容，我从中受益良多，在此感谢他们！对于在本书中有间接贡献的国内外同行，一并感谢！

还要特别向以下组织和机构表示感谢：ABIresearch, ABResearch, ACURE Dynamics, ADAMS, ADVISOR, ADwin, 德国通用电气公司 (AEG), 美国空军研究实验室 (AFRL), AIRMATIC, AirRock, AKA Bose 公司, AMESim, AMI Semiconductor, AMT, AMTIAC, AR&C, ARQQ Ltd., 奥迪股份公司, AUDIAG, AutoPro, AUTOSAR, AUTOTECH, Avio Pro, AVL, Bertone, BizWire, Bobbs - Merrill 公司, BMW, BOSCH 公司, Bridgestone 公司, Cadillac, CAFS, California Linear Devices, 卡内基梅隆大学, Centro Recherche FIAT, CFC, Challenge Bibendum, Chalmers University of Technology (查尔默斯技术大学), Climatronic, Cleveland State University (克利夫兰州立大学), Cracow University of Technology (克拉科夫工业大学), Continental TEVES 公司, Cosc/Psych, CRL, Chrysler, Daimler - Benz, DaimlerChrysler 公司, D&R, DAS, DECOMSYS, Delco Electronics, Delco - Remy, Delphi, Delft 系统和控制中心, DJH, DLR RoboDrive, DRDC, dSPACE 公司, Dynamic Structure & Materials LLC, Energen 公司, ERFD, ER Fluid Developments Ltd. UK, eSTOP 公司, FAA US DoT (美国运输部联邦航空局), FACE International Corp., FHWA - MC Fiat, Fichtel & Sachs, FlexRay Consortium, FMA, FortuneCity, FPDA, US DoT (美国运输部), 福特欧洲公司, 福特汽车公司, 福特 SRL, 飞思卡尔半导体公司, 富士微电子公司 (FMA), 日本富士通公司 (FUJITSU), GM Chevrolet, GM Opel, 通用汽车公司, 德国航空航天中心 (DLE e. V.), Gothorum Carolinae Sigillium Universita, Graz University of Technology (TUG, 格拉茨工业大学), Haskell, 日立公司 (Hitachi Co.), 本田汽车公司 (Honda), How Stuff Works, Hunter, I - CAR, IEC, IEEE, IMechE, Intel, Institute of Robotics and Mechatronics, Intelligent Transportation Society (ITS), ISO, IPC website, IPG 汽车股份有限公司, Istanbul technical University (伊斯坦布尔技术大学), Jäger 公司, JB, JUST - AUTO. COM, Kalmar, Kinetic Suspension Technology, Lexus, Kungl. Tekniska Högskolan (KTH, 瑞典皇家工学院), Land Rover, Lord, Lotus Engineering, Lund Institute of Technology (隆德理工学院), MagnetiMarelli, Magnet Motor, Mazda, McCormick, Mechanical Dynamics 公司, Mecel, Messier - Bugatti, MICHELIN, MILLENWORKS, MIT Hatsoupulos Mi-

crofluid 实验室, 三菱公司, MOST Net - services, MOTOROLA, NI, 美国航空航天局兰利研究中心 (NASA Langley Research Center), 美国国家公路交通安全管理局 (NHTSA), Nissan, Office of Naval Research (ONR, 美国海军研究局), Norwegian University of Science and Technology (挪威科技大学), Oldhams 公司, OSEK - WORKS, Packard, PACIFICA Group Technologies Pty Ltd., PHILIPS, PITechnology, Polski FIAT, Porsche, 标致雪铁龙公司, Purdue 工程技术学院, SAAB, SAE, Scania, Sensormag, 西门子 VDO 汽车公司, SKF, Star, Studebaker, Subaru, Radatec 公司, 美国西南研究院 (SwRI), Racelogic, Radatec 公司, Renault, Research Team for Technology (CAMELS), Ricardo, RMSV, Robert Bosch 公司, Rodmillen, SCANIA, Seoul National University (首尔大学), TACOM TARDEC, Technische Universität Darmstadt (达姆施塔特科技大学), Universität Koblenz (科布伦茨大学), Universität Regensburg (雷根斯堡大学), TENNECO Automotive, The Motor Industry Research Association (MIRA, 英国汽车工业研究所), The New York Times (纽约时报), The University of Michigan (密歇根大学), Toyota, TRIDEC, Triumph, TRW 汽车公司, TTPbuild, TTPnode, TTTech Computertechnik AG, Università 'di Bologna (意大利博洛尼亚大学), Universität Salzburg (萨尔茨堡大学), University of California Berkeley (加州大学伯克利分校), University of Leicester (莱斯特大学), University of Limerick (利默里克大学), University of Pennsylvania (宾夕法尼亚大学), University of Queensland (昆士兰大学), University of Sussex (苏塞克斯大学), University of Texas at Austin (德克萨斯大学奥斯汀分校), University of York (UK) (英国约克大学), Uppsala University (乌普萨拉大学), US Army Research Office (美国陆军研究办公室), US DLA (美国国防后勤局), US DoD (美国国防部), US DoE (美国能源部), UT - GEM, Valentin Technologies 公司, Valeo, Van Doorne Transmissie BV, VCT, Vienna Institute of Technology (维也纳技术学院), VOLKSWAGEN (VM, 德国大众汽车), VOLVO, Wongkwang University (韩国圆光大学), ZF Sachs AG, 以及 XILINX 等。本书中包含了来自上述组织和机构的文字、图片或设计, 这归功于他们的权威, 同时也为了介绍他们在当代汽车机电一体化领域中所取得的成就。

本书中还包含很多汽车行业技术发展前沿的信息, 在表述中采用了诸如“也许”“将会”“估计”“趋势”“预料”“期望”等措辞, 或者类似的措辞。这些表述基于欧洲、美洲及亚太国家技术发展, 特别是汽车工业技术发展的设想。基于本人的认知, 我认为在本书付梓之际它们将会实现。

但上述估计也暗含了一定程度的风险, 实际的技术发展可能与上述预设大相径庭。如果任何上述表述所基于的假设被证明有误, 那么实际的结果可能会有着本质的不同。

本人没有对前瞻性表述进行实时更新。上述表述在本书付梓之日可能被更新了, 但仍具有较大参考价值。

本书是利用业余时间编写的，付出了许多个周末和假日，在此亦将本书献给我的家人，感谢他们一直以来的鼓励、无微不至的照顾和帮助，以及无限的耐心。正是由于他们自始至终对我充分的理解，才使本书出版成为可能。

Bogdan Thaddeus Fijalkowski

2010年9月于 Cracow (波兰克拉科夫)

目 录

译者序

前 言

第1章 SBW AWS转向机电一体化控制系统	1
1.1 引言	1
1.2 可变辅助 SBW 2WS转向机电一体化控制系统	28
1.2.1 SBW 2WS转向机电一体化控制系统概述	28
1.2.2 SBW 2WS转向机电一体化控制系统的种类	31
1.2.3 SBW 2WS转向机电一体化控制系统的描述	32
1.2.4 混合 E-M-F-M EPFS SBW 2WS转向机电一体化控制系统	38
1.2.5 E-M EPS SBW 2WS转向机电一体化控制系统	41
1.3 节能效果	52
1.3.1 引言	52
1.3.2 研发趋势	53
1.4 线控转向 (SBW) 四轮转向 (4WS) 转向机电一体化控制系统	55
1.4.1 引言	55
1.4.2 SBW 4WS转向机电一体化控制系统的原理	57
1.4.3 SBW 4WS转向机电一体化控制系统的动力特性分析	59
1.4.4 SBW 4WS转向机电一体化控制系统的种类	62
1.4.5 SBW 4WS转向机电一体化控制系统的分类及概述	64
1.4.6 E-M SBW 4WS转向机电一体化控制系统	76
1.4.7 研发趋势	85
1.5 未来汽车的三模混合动力 SBW AWS转向机电一体化控制系统	89
1.5.1 引言	89
1.5.2 三模混合动力 SBW AWS转向机电一体化控制的原理	92
1.5.3 EM SBW AWS转向执行机构	93
1.5.4 SBW 4WS转向机电一体化控制	95
1.5.5 结论	104
1.6 汽车车道保持的 SBW 4WS转向机电一体化控制系统	105
1.6.1 引言	105
1.6.2 汽车物理和数学模型	106
1.6.3 SBW 4WS转向机电一体化控制系统设计	107
1.6.4 4WS汽车车道保持仿真	113
1.6.5 结论	116
1.7 在 SBW AWS转向机电一体化控制系统开发中基于模型设计的产品代码生成	116
1.7.1 引言	116

1.7.2	基于模型设计的产品代码生成	117
1.7.3	行为建模	117
1.7.4	仿真和分析	118
1.7.5	快速原型法	119
1.7.6	详细软件设计	119
1.7.7	物理模型试验	119
1.7.8	分布式架构设计	120
1.7.9	产品代码生成	121
1.7.10	在环测试	122
1.7.11	集成组件	122
1.7.12	附加资源	122
1.8	使用故障静默 (fault - silent) 的 SBW AWS 转向机电一体化控制系统	123
1.8.1	引言	123
1.8.2	SBW AWS 转向机电一体化控制系统的时间触发架构	125
1.8.3	4WS SBW 转向架构可能的结构	126
1.8.4	结论	129
1.9	讨论和结论	129
	名词术语 (英文解释)	132
	参考文献	137
第2章	ABW AWA 悬架机电一体化控制系统	168
2.1	引言	168
2.2	车辆的悬架	183
2.2.1	车辆悬架的种类	184
2.2.2	车辆悬架的功能	196
2.2.3	车辆悬架的性能	197
2.3	被动悬架	198
2.3.1	引言	198
2.3.2	被动 F - M 或 P - M 减振器悬架机电一体化控制系统	206
2.3.3	被动 F - P - M 悬架机电一体化控制系统	218
2.4	水准自平衡悬架	219
2.4.1	引言	219
2.4.2	水准自平衡悬架机电一体化控制系统的布置	221
2.4.3	水准自平衡悬架机电一体化控制系统的元件	222
2.4.4	水准自平衡悬架机电一体化控制系统的功能	222
2.5	半主动悬架	225
2.5.1	引言	225
2.5.2	减振器悬架机电一体化控制系统装置	230
2.5.3	减振器悬架机电一体化控制系统功能	231
2.5.4	半主动装置的类型	233
2.5.5	半主动 ABW AWA 悬架设计的挑战	234
2.5.6	半主动 F - M ABW AWA 悬架的解决方案	235

2.5.7	半主动 P-M ABW AWA 悬架的解决方案	243
2.5.8	半主动 E-M ABW AWA 悬架的解决方案	246
2.5.9	半主动 MR ABW AWA 悬架的解决方案	248
2.5.10	半主动 ER ABW AWA 悬架的解决方案	263
2.5.11	半主动 PF ABW AWA 悬架的解决方案	270
2.6	主动悬架	276
2.6.1	引言	276
2.6.2	主动 F-M ABW AWA 悬架机电一体化控制系统	290
2.6.3	主动 E-P-M ABW AWA 悬架机电一体化控制系统	309
2.6.4	主动 P-M ABW AWA 悬架机电一体化控制系统	319
2.6.5	主动 E-M ABW AWA 悬架机电一体化控制系统	325
2.6.6	主动 E-P-M ABW AWA 悬架机电一体化控制系统	338
2.6.7	主动 E-M-M ABW AWA 悬架机电一体化控制系统	347
2.7	混合 ABW AWA 悬架机电一体化控制系统	352
2.8	讨论和结论	354
	名词术语 (英文解释)	360
	参考文献	369
	缩略词	413

第 1 章 SBW AWS 转向机电一体化控制系统

1.1 引言

对于这一部分，有兴趣的读者可以思考汽车在 y 轴的横向运动。汽车的横向运动，指的是车辆如何响应转向输入。

驾驶人 (Human Driver, HD) 通过间接影响车轮的附着力而控制车辆的横向运动。这些力受各种系统的影响，如：

- 转向系统。
- 制动系统。
- 减振系统。
- 动力传动系统。

事实上，汽车对转向输入的响应主要受线控转向 (SBW) - 全轮转向 (AWS) 机电一体化控制系统的影响。另外，线控制动 (BBW) - 全轮制动 (AWB)、线控减振 (ABW) - 全轮减振 (AWA) 悬架和线控驱动 (DBW) - 全轮驱动 (AWD) 机电一体化控制系统，也可以改变车辆的转向能力。关于控制车辆横向运动的研究，最近集中在将这些系统集成到一个电控节气门 (RBW) 或线传控制 (XBW) 整体式一体成形车身、分离式底盘 (space - chassis)、滑板式底盘 (skateboard - chassis) 或整体式底盘 (body - over - chassis) 运动机电一体化控制系统中。

① 通过 SBW AWS 转向机电一体化控制系统的横向动力学的机电一体化控制：通常，车辆转向系统控制车辆的横向运动。关于该课题的研发工作大致可沿下述路线分解：主动前轮转向 (FWS) → 主动后轮转向 (RWS) → 全轮转向 (AWS) 系统。SBW 4WS (四轮转向) 转向机电一体化控制器可以用不同的模式影响轮胎的方向，如图 1-1 所示【VILLEGAS AND SHORTEN 2005】。FWS 控制器 (用或不用一个机械连接) 按驾驶人的输入改变前轮的方向。RWS 控制器不影响前轮转向角，但通过调整后轮转向角来影响车辆的动力学。

四轮转向系统根据驾驶人的输入和车辆动力学控制前后转向角。在【MOCHIZUKI AND NAKANO 2000】中，介绍了在转向盘和转向角之间没有机械连接的 FWS 系统 (即主动 FWS SBW 转向机电一体化控制系统)。该控制结构根据转向盘输入、车速、横摆角速度和横向加速度，使用反馈控制和前馈控制来实时控制车辆的横摆角速度。与配备直接控制横摆力矩 (DYC) 的制动力和驱动力分配的车辆，这种控制器在积雪路面换道操纵期间表现出更好的车辆稳定性，还可以通过转向盘

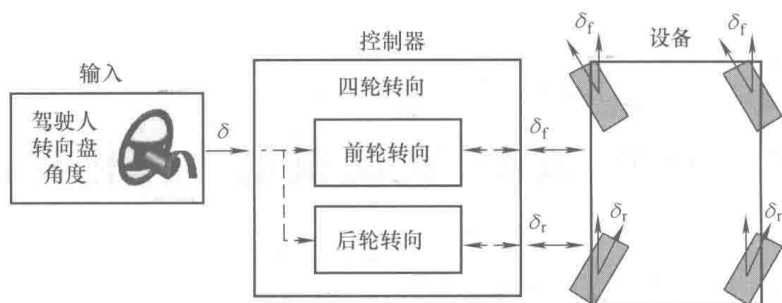


图 1-1 主动 SBW 4WS 转向机电一体化控制系统【VILLEGAS AND SHORTEN 2005】

向驾驶人反馈转矩信息。其他的主动转向系统大多保留了与转向盘直接连接的机械装置，但在转向系统中使用了一台电动机（E-M）来调整修正转向角。这类系统在机电控制系统失效的情况下仍可实现转向，这大大提高了汽车的安全性。（这类结构可参见【ACKERMANN 1998；and KOBO ET AL. 2002】）。

在【ACKERMANN 1998】中，为使驾驶人保持在正确车道和实现自动横摆稳定，可进行修正转向角 + 横摆角速度反馈独立控制。测试结果（在参考文献中给出）显示对侧风扰动以及对 μ -分路式（ μ -split）制动的鲁棒性。在【VILA LANA 2004】中介绍了另一种方法。在这个参考文献中，SBW 4WS 转向机电一体化控制系统和传统的转向系统被集成进单个转向系统中。在 SBW 4WS 功能失效时，这种结构允许回复到普通转向的安全管理系统。为控制汽车横向运动，不同的研究机构都在研发主动 RWS。大部分这些结构依靠使用增益调度的前馈控制来控制后转向角（FURUKAWA ET AL. 1989）。在这种控制结构中，有一些已经应用在乘用车中了，其后转向角可根据驾驶人从转向盘输入的前转向角命令来计算。

为了控制这种系统（通常与车辆的机动性和转弯稳定性的改进有关），人们采用了各种不同的控制方法。

在【INOE AND SUGASAWA 2002】中，以及几年以后的【HIRANO AND FUKATANI 1996】中，作者结合前馈和反馈控制来控制后转向角，同时前转向角仍处于驾驶人的直接控制之下。其中控制参数是根据汽车动力学的预设物理模型。

为了获得令人满意的鲁棒性，该反馈控制器使用 μ 合成法设计【HIRANO AND FUKATANI 1996】。结果表明，在多种不同的实验条件，操控稳定性都有所提高。在有些情况下，需要同时控制侧滑角和车辆横摆角速度（NIETHAMMER 2000）。

这些动力学因素同时实现机电一体化控制不可能只使用主动 RWS 或者只使用主动 FWS。这些参数的机电一体化控制至少需要两个控制输入。

在装备有电子稳定程序（ESP）或 DYC 的汽车中，这可以将制动和驱动力作为第一个输入、将前转向角作为第二个输入来实现。事实上，使用 ESP 来控制横向动力学参数并不适用于所有情况。

对于运行在正常情况下的车辆，显然使用一个 SBW 4WS 转向机电一体化控制系统是可行的。在这里，前、后转向角是两个控制输入。在这种情况下，甚至来自 ESP 或 DYC 的无用的副作用都可被消除。图 1-2 中所示为彼此独立的侧滑控制和横摆角速度控制【VILLEGAS AND SHORTEN 2005】。当前后轮转向角处于相反方向时，可以获得一个没有侧滑的横摆角速度，从而可以管理一个小半径曲线；当前后轮转向角有相同的方向感时，没有横摆角速度的侧滑角可用于换道。

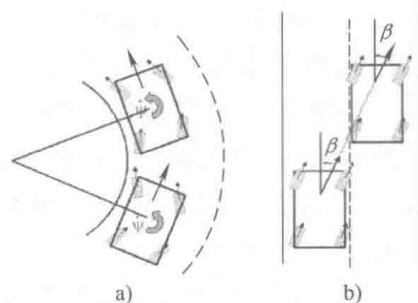


图 1-2 彼此独立的侧滑控制和横摆角速度控制
【VILLEGAS AND SHORTEN 2005】

在本书这一部分的参考书目中，涉及大量关于 SBW 4WS 车辆的机电一体化控制研发 (R&D) 工作的思路，同时考虑了各种各样的控制结构。

在【VILAPLANA 2004】中，介绍了一个新型反馈转向控制器。这种控制器能够修改 SBW 4WS 汽车的横向动力学参数以便适用于一个给定参考物理模型。这种转向控制器是根据驾驶人给转向盘和踏板的输入信号而实时获得侧滑角和横摆角速度信号，从而控制前后转向角。这些参考信号描述了当驾驶人的输入应用于预设的动力学物理模型时，所导致的横向运动。此外，转向控制器会自动屏蔽侧滑和横摆角速度中的任何干扰。

在【GIANONE ET AL. 1995】中所描述的研发工作，提出一种基于虚拟模型跟踪控制 (VMFC) 和健壮的 (robust) 线性二次型调节器 (LQR) 设计的反馈控制结构。要遵循的物理模型对应 FWS 汽车。在【ACKERMANN 1994】中，介绍了一个专门为 SBW 4WS 车辆而设计的转向控制器的例子。在该参考文献中给出的控制器结构，是基于对前转向角的实测横摆角速度的交叉反馈。这种结构将横摆角速度与横向加速度分开控制。利用两个外反馈环：FWS 用于跟踪期望的横向加速度；RWS 用来调节横摆动力学的振幅。

在本章的参考文献中，一小部分文献涉及了汽车仿真问题，但只有【LEE 1995】展示了一个仿真器。

在【LEE 1995】中，一辆带主动 RWS 算法的“中型”车辆被用于仿真“小型”“紧凑型”和“大型”车辆的横向动力学。“小型”车辆的仿真实验结果不错，但“紧凑型”和“大型”车辆的结果并不好。

② 通过 BBW AWB 制动和 ABW AWA 机电一体化悬架控制系统的横向动力学机电一体化控制：前面已经提及，车辆横向运动可受除 SBW AWS 转向机电一体化控制之外的机电一体化控制系统的影响。很多研发人员已经在工作中使用了 BBW AWB 制动和 ABW AWA 悬架机电一体化控制系统来控制这些横向运动。

大多数这种研发工作是出于对汽车安全性的考虑。比如，在某些紧急情况下，当车辆轮毂到达极限时，改变转向角或进行其他驾驶操作时，车辆如何响应。在这些情况下，可以使用 ABW AWA 悬架和/或 BBW AWB 制动机电一体化控制系统来补偿这种影响。最近的开发技术有；主要使用的方法是单轮防抱死制动系统 (ABS)、转矩分配 (RMD) 和外燃机 (ECE) /内燃机 (ICE) 力矩分配 (TD)。

应该注意，主动 ABW AWA 悬架和单轮 BBW AWB 制动在正常驾驶情况下对横向动力学也有影响。它们是相互作用的。尽管这种情形在文献中通常被忽略，但在 CEMACS 项目的研发过程中被发现了【VILLEGAS AND SHORTEN 2005】。

③ 防抱死制动系统 (ABS) 和牵引力控制系统 (TCS)：单轮 ABS 和牵引力控制系统 (TCS) 存在于各种传统的汽车上。这些系统也被称为 ESP 或车辆动力学控制系统 (VDC)。

在【ZANTEN VON 1996】中，描述了一种博世公司生产的 VDC。它使用一个 ABS 和 TCS 装置来维持危险情况下的车辆稳定性，并增强摩擦力的效用。受控力是轮胎纵向上的力；这些都是由单轮制动压力和 ECE/ICE 转矩控制的。虽然这种系统能维持稳定性，很多研究人员都认为使用单轮 ABS 来控制横摆角速度，不但会使驾驶人不舒服，而且车辆需要产生非常大的轮胎附着力（正如在“ACKERMANN ET AL 1999”中所说明的）。事实上，在某种情况下，使用这种强大的力来控制车辆是不可取的。

在【ACKERMANN ET AL. 1999】中，作者给出的仿真结果显示，主动 FWS + 单轮 ABS 的控制方法，使车辆在危险情况下更稳定，此外还可以防止车辆翻转（由驾驶人的输入引起）。在【MOKHIAMAR AND ABE 2002】中，介绍了主动 SBW 4WS 转向机电一体化控制系统 + 单轮 ABS 控制方法。试验证明，这种系统的稳定性比彼此独立操作的机电一体化控制系统的要好，因为它能够充分利用车辆轮胎力。在【HIRANO ET AL. 1992】中，介绍了一个利用 TD + 主动 RWS 的机电一体化控制系统。在这里，作者阐述了车辆转向力随着转矩的提高而减小这个事实。在一系列的论文中，作者证明，在湿滑路面上，与使用主动 RWS 相比，使用 TD 可以大大提高车辆稳定性。

④ 全轮减振 (AWA) + 线控减振 (ABW) 悬架机电一体化控制系统：众所周知，每个车轮的垂直载荷上的变化，都会影响轮胎产生的总力。因此，当 ABW AWA 悬架机电一体化控制系统感知到公路/越野路面的惯性载荷时，就可以对车辆横向运动进行主动/半主动控制。

在【ABE 1991】中，分析了当车辆接近极限情况时，VDC 对车辆稳定性的影响。仿真结果显示，VDC 有在难操纵情况下提高车辆横向/定向稳定性的潜力。在【BODIE AND HAC 2002】中，介绍了一种涉及不同阻尼系数的半主动方法 [带磁流变 (MR) 减振器]。在该文献中，横摆角速度通过在前桥和后桥之间分配阻尼

力进行控制,从而改进车辆响应,并减少驾驶人对转向盘的操控欲望。它也表明,在车辆具有较高横向加速度时,减振(阻尼)力的变化有较大的修正横摆力矩的潜力。

在【WILLIAMS AND HADDAD 1995】中,使用一个带非线性控制器的主动悬架实验验证了VDC。这种控制器在转弯时显示了良好的横摆角速度跟踪性能。除了主动悬架,在每个车轴配置有主动稳定杆。该稳定杆对悬架受力有影响,从而改变了前车桥和后车桥之间的刚度分配。

在【OETTGEN AND BERTRAM 2001】中已经表明,与其增加更多的倾斜刚度,还不如通过重新分配前桥和后桥的倾斜刚度来改善不足转向梯度(定义转弯时车辆的横向动作)。一味地增加倾斜刚度,由于使用了在车辆前桥剩余的潜能,从而可能使轮胎的横向力潜能被完全消耗。

为了减少任何不想要的侧倾并保持稳定,比例-积分-微分(PID)侧倾力矩控制和比例积分(PI)侧倾力矩分配控制器,均由主动稳定器实现。正如【HARADA AND HARADA 1999】中所说的,车辆纵倾和升降也对横向动力学有影响。根据公路/越野道路的频率特性描述,作者得出侧滑角与上下跳动速度相关,同时横摆角速度与纵倾角速度相关,并且这些关系看起来独立于前桥和后桥悬架弹簧刚度的分配。作者为弹跳和颠簸开发了一个基于LQR理论的控制算法,通过仿真发现对侧滑和横摆角速度的最大干扰影响有所减少。

⑤ 集成的防抱死制动系统(ABS)+牵引力控制系统(TCS)+线控减振(ABW)全轮减振悬架机电一体化控制系统。许多作者也已经发现可将悬架和纵向力作为一个整体来考虑它们对车辆横向运动的影响。【GORDON ET AL. 2003】广泛总结了在该领域中最近的工作。大体上,在该领域的研发工作沿着两条探索线进行。第一种方法是机电一体化控制系统的独立设计,控制系统的动作通过一个监督机构来协调。比如,在【HAC AND BODIE 2002】中构建了这样一种机电一体化控制系统:采用MR ABW AWA悬架+一个控制算法来协调制动器的主动机电一体化控制。相比只使用BBW AWB制动,它大大减少了保持稳定所需的制动干预。除ABS之外,TD也可被用来提高在危险情况下的稳定性。

【COOPER ET AL. 2004】介绍了ECE或ICE转矩对车辆横向运动的影响,以及ECE或ICE转矩和ABW AWA悬架机电一体化控制系统之间的相互作用。在该参考文献中,ABW AWA主动悬架+可变牵引力分配(VTD)被用来提高操纵性和稳定性。

虽然带ABW AWA主动悬架的VDC具有更好的横摆角速度跟踪性能,但与那些作用较为单一的分机电一体化控制系统,集中控制器具有更好的稳定性和操纵性。在【KITAJIMA AND HUEI 2000】中,使用一个H,算法独立测试和协调所有的机电一体化控制系统、主动ABW AWA悬架、SBW 4WS转向和VDC。相比非同的控制器的,该集中控制器表现出(在模拟下)了明显不同的性能和更好的稳定

性。这说明了协调的重要性。在【TRAECHTLER 2004】中，展示了与使用单一方法相比，使用综合方法能使车辆拥有更好的性能，并进行了试验验证。在这里，ESP 与其他控制器集成（如前轮主动转向控制，即 AFS）后，横向动态操纵性上明显得到改善，同时也显示出需要更少的驾驶人干预和更低的制动压力，而这些通常是保持稳定性所需要的。此外，实验结果也显示，这种相互作用也可以用于影响纵向动力学，比如减少制动距离。例如：将 AFS 整合到转向杆。其主要部件是一个 E-M 执行器和一个集成的行星轮，集成的行星轮根据角度传感器信号驱动 E-M 执行器，从而提供动力转向。

升级版本的 AFS 不再依靠机械转向命令，可以实现真正的 SBW AWS 转向机电一体化控制。转向控制器向 E-M 电动机发送命令，E-M 电动机响应指令后使转向齿轮机构移动并将前轮送到正确位置。此功能也可将预设的转向特征作为自动巡航控制（在曲线/横摆角速度调整中负载变化）的输入（叠加）。比如，使用 SBW 4WS 控制器【VILAPLANA ET AL. 2004】，通过在转向盘中激活/不激活主动悬架控制器（ASC）进行模拟，测试垂直动力学对横向动力学的影响。【VILLEGAS AND SHORTEN 2005】中的试验结果如图 1-3 所示，描述了滚动垂直动力学对转向系统跟踪性能的影响。滚动动力学主要影响侧滑角和横摆加速度的变化。

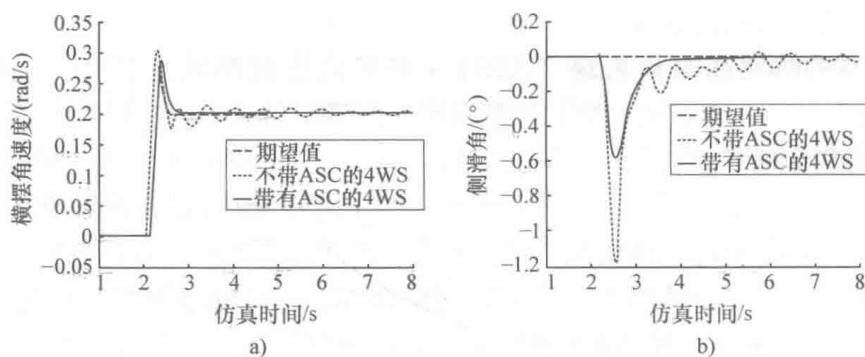


图 1-3 垂直动力学对 SBW 4WS 控制器的影响

a) 垂直动力学对 4WS 控制器的横摆角速响应度的影响 b) 垂直动力学对 4WS 控制器的侧滑响应的影响【VILLEGAS AND SHORTEN 2005】

SBW AWS 转向机电一体化控制系统通过在车辆的中部或后部安装一个附加的 SBW 转向机电一体化控制系统而运行。成熟的版本是机械控制的。在两种情况下，当前轮指着一定的角度，中间和/或后轮也相应调整至适合的角度，从而在驾驶和转向时为车辆提供卓越的平台控制。工业三轮汽车传统上使用可在更紧凑空间中急转弯的 RWS。这些车载平台的缺点是它们缺乏稳定性，并需要驾驶人具有丰富的驾驶经验。比如，采用 SBW 4WS 转向机电一体化控制系统，后轮以与前轮相同或相反的方向感转向，这完全取决于车速或转向盘转动的角度。这些都是在 SBW