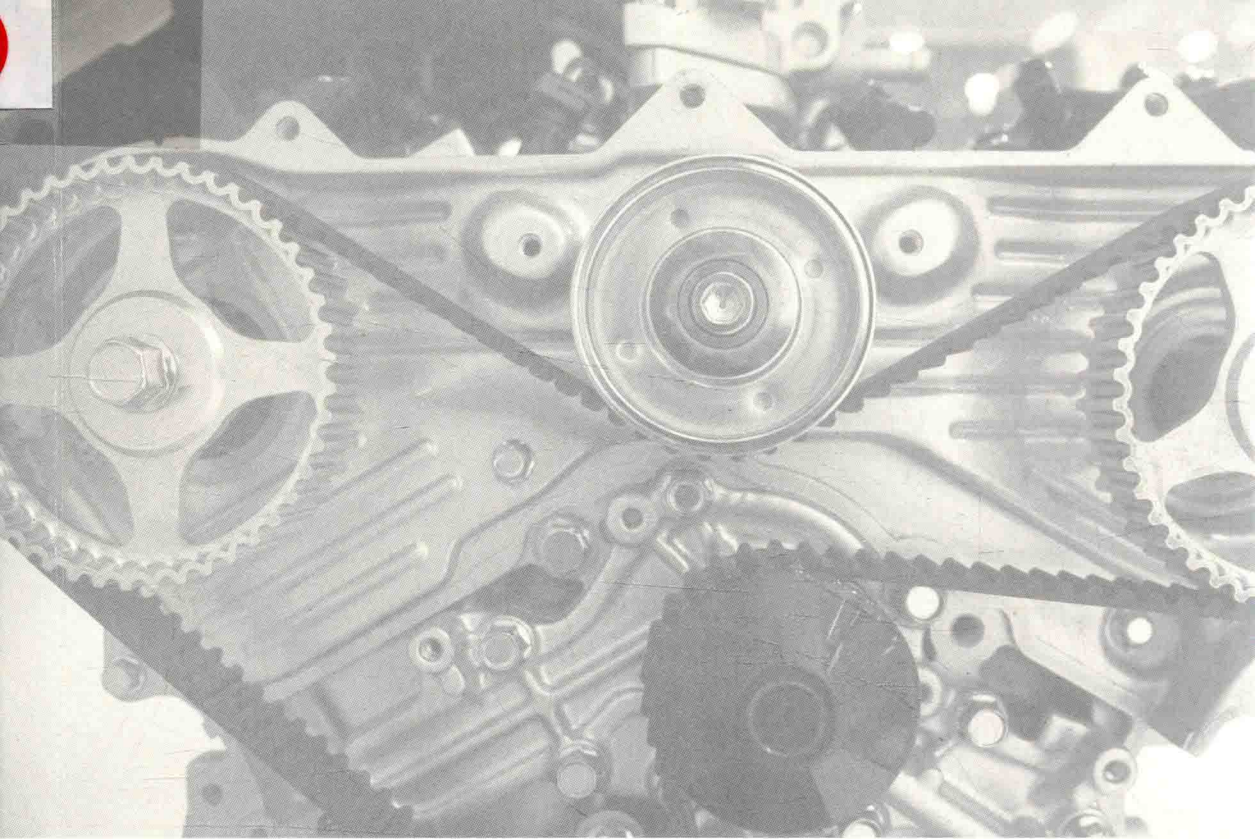




汽车安全的仿真与优化设计

詹振飞 石磊◎编著
韩维建◎主编

2



机械工业出版社
China Machine Press

汽车工程专业系列丛书

汽车安全的仿真与优化设计

詹振飞 石磊 ◎编著

韩维建◎主编



机械工业出版社
China Machine Press

图书在版编目(CIP)数据

汽车安全的仿真与优化设计 / 詹振飞, 石磊编著; 韩维建主编. —北京: 机械工业出版社, 2017.6

(汽车工程专业系列丛书)

ISBN 978-7-111-56948-0

I. 汽… II. ①詹… ②石… ③韩… III. ①汽车—安全设计—仿真设计 ②汽车—安全设计—最优设计 IV. U461.91

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 095612 号

汽车安全的仿真与优化设计

出版发行: 机械工业出版社 (北京市西城区百万庄大街 22 号 邮政编码: 100037) *

责任编辑: 单秋婷

责任校对: 李秋荣

印 刷: 北京诚信伟业印刷有限公司

版 次: 2017 年 6 月第 1 版第 1 次印刷

开 本: 170mm×242mm 1/16

印 张: 14.25

书 号: ISBN 978-7-111-56948-0

定 价: 49.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

客服热线: (010) 68995261 88361066

投稿热线: (010) 88379007

购书热线: (010) 68326294 88379649 68995259

读者信箱: hzjg@hzbook.com

版权所有·侵权必究

封底无防伪标均为盗版

本书法律顾问: 北京大成律师事务所 韩光 / 邹晓东

丛书总序

中国的汽车产业发展迅速，目前已成为我国国民经济的支柱产业之一。随着家庭平均汽车保有量的迅速增长，汽车给整个社会带来的能源、环境、交通和安全的压力日益加大。尽管汽车在轻量化、电动化、排放控制技术和安全技术方面已经有了长足的进步，尤其是近几年互联网和通信技术的发展为汽车的独立驾驶和智能化提供了极大的发展和创新空间，但诸多的发展给汽车产业带来无限的挑战和机遇。因此，行业的快速变化亟需培养一大批不仅懂专业技术，更熟悉跨界知识的创新型人才。

重庆大学汽车协同创新中心认识到人才培养的迫切需求，组织我们为新成立的汽车学院编写一套教材。参与这套教材编写的所有作者都身在汽车行业的科研和技术开发的第一线，其中大部分作者是近年海归的年轻博士。教材的选题经过专家在传统学科和新兴学科中反复地论证和研讨，遴选了汽车行业面临紧迫且挑战性的技术和话题。第一批教材有八本，包括《汽车材料及轻量化趋势》《汽车设计的耐久性分析》《汽车动力总成现代技术》《汽车安全的仿真与优化设计》《汽车尾气排放处理技术》《汽车系统控制及其智能化》《中国汽车二氧化碳减排路径》和《汽车制造系统和质量控制》。

这套教材的一个共同特点就是与国际发展同步、内容新颖。编著者对于比较传统的学科，在编写过程中尽可能地把最新的技术和理念包括进去，比如在编写《汽车材料及轻量化趋势》的过程中，作者不仅介绍了各种轻量化材料的特点和动向，而且强调了轻量化材料的应用必须系统地考虑材料的性能、部件的加工方法和成本。有些选题针对汽车行业发展的新的技术动向，比如《汽车安全的仿真与

优化设计》主要介绍汽车安全仿真的模型验证和优化，这是汽车产品开发采用电子认证的必经之路；而《汽车系统控制及其智能化》概括了汽车的主要系统及其控制，以及智能化技术在各个系统中的应用，这些都是汽车自动驾驶的基础。

这套教材的另一个突出的特点是实用，比如一般汽车设计要求非磨损件的寿命是24万公里。《汽车设计的耐久性分析》着重介绍了汽车行业用于耐久性分析的主要工具和方法，以及这些方法的理论基础。这是进行汽车整车和零部件寿命耐久性正向设计的基础。随着环境保护的法规日益严格，汽车排放控制技术也在不断发展提高。汽车动力技术已经形成化石燃料到其他燃料的多元化发展，《汽车尾气排放处理技术》和《中国汽车二氧化碳减排路径》介绍了排放控制技术的进程和法规实施的协调，以及达到法规要求的不同技术路线。汽车质量一直是热门话题，也是一个汽车企业长期生存的关键问题之一。《汽车制造系统和质量控制》介绍了现代汽车制造系统与质量控制的基本概念和实践。

本套丛书不仅对汽车专业的学生大有裨益，也可以作为汽车从业人员和所有对汽车技术感兴趣者的参考读物。由于时间有限，选题的范围还不全面。每本书的内容也会反映出作者的知识和经验的局限性。在此，真诚地希望广大读者提出意见，供我们不断修改和完善。



2016年8月5日

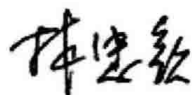
推荐序一

随着我国汽车工业的快速发展,先进的汽车设计理论和技术在车身开发中越来越受到重视。同时,汽车发展遇到了环保、能源、交通等各个方面的诸多问题,在这种新的形势下,从业者掌握和熟练运用核心设计技术显得尤为重要。

汽车的设计与制造是一个非常复杂的系统工程,需要考虑零件、子系统、系统及至整车各个层面,综合运用了材料科学、能源科学、信息科学和制造科学的相关知识、理论和方法。本套“汽车工程专业系列丛书”涵盖了汽车制造系统和质量、汽车动力总成、汽车材料及轻量化、汽车车身耐久性、汽车安全仿真与优化、汽车系统控制及其智能化、汽车尾气排放处理与二氧化碳减排等多个方面的内容,涉及汽车轻量化、安全、环保、电子控制等关键技术。

本套丛书的作者既有在汽车相关领域工作多年、经验丰富的专家,也有学成回国、已崭露头角的后起之秀。丛书的内容既有适合初学者学习的大量基础理论知识,也融入了编著者在相关领域多年来的研究体会和经验,从中我们能充分体会到现代汽车技术节能、环保和智能化的发展趋势。丛书还结合大量实例进行阐述,取材丰富,图文并茂。

本套丛书可作为汽车设计的参考工具,也可作为车辆工程、机械工程、环境工程等专业研究生的专门教材及学习参考书。相信丛书对于汽车行业相关领域的研究生、企业研发人员和科研工作者会产生重要的启发作用,特作序推荐。



上海交通大学

推荐序二

作为“中国制造 2025”战略部署的主要支点之一，汽车业的持续、快速、健康发展将为实现我国制造业强国目标奠定坚实基础。面对中国汽车产业大而不强的现状，自主品牌汽车产业的发展壮大时不我待。重庆大学汽车协同创新中心立足于重庆地区汽车产业，依托国家“2011 计划”，以我国自主品牌汽车发展重大需求为牵引，以体制机制创新为手段，探索我国汽车自主品牌发展模式。中心面向国内自主品牌汽车产业，重点开展培养高端人才、汇聚优秀团队、研发核心技术、推广产业应用、整合优势资源、搭建交流平台等工作。重庆自主品牌汽车协同创新中心瞄准“节能环保、安全可靠、智能舒适”的国际汽车三大发展趋势，专注学科发展方向、汇聚创新资源和汽车及相关领域优势学科群，建立了全面涵盖汽车行业研究领域的创新团队。本系列丛书由汽车中心特别顾问、福特汽车亚太区技术总监韩维建博士积极推动编著。丛书主编韩维建博士基于数十年国际一流汽车工程经验以及独到全面的行业技术趋势把握，整合及组建了编著团队进行丛书中各本书籍的编著。编著团队成员主要组成为具有多年国际汽车公司工作经验并且在高校及企业科研一线工作的归国人员，丛书内容拥有立足成熟技术、紧跟国际前沿、把握领域创新的特点及优势，丛书的成功出版将会为国内汽车行业及学科提供全面而翔实的参考材料。

书籍是知识传播的介质，也是人才培养及创新意识传承的基础。正如重庆大学建校宣言“人类之文野，国家之理乱，悉以人才为其主要之因”，本系列丛书秉承重庆自主品牌汽车协同创新中心的人才培养方针，主要面向高校汽车相关学科

本科及研究生的教学，同时也可作为汽车行业工程人员参考。相信本系列丛书对我国汽车领域学科及行业将产生积极良好的推动作用。

A handwritten signature in black ink, appearing to read '刘俊' (Liu Jun).

江苏省产业技术研究院

前 言

世界卫生组织发布的《2015 全球道路安全现状报告》显示,每年全球有逾百万人死于道路交通事故,另有数千万人因交通事故遭受非致命性伤害。汽车安全是未来汽车轻量化、智能化、电动化成功实施的有力保障。汽车安全系统的设计离不开物理样机的开发与试验。特别对于汽车安全结构耐撞性设计来说,高风险、高费用的物理试验使得工程师和研究人员不得不积极寻找其他途径来提高汽车的安全品质。近 20 年,汽车安全领域的数字化模型仿真技术发展迅速,已成为汽车安全开发中的常用方法。本书除了介绍汽车安全基本研究内容外,着重阐述面向汽车安全设计的仿真模型验证和确认方法,以及考虑不确定性的汽车安全数字化模型优化理论及方法两大部分内容。这两部分内容也是本书的特色所在。

本书内容结合实际工业应用,介绍了诸多分析实例以支撑所介绍的新理论、新方法。本书第 1 章回顾了汽车安全的历史沿革,并从全球安全法规及标准出发,详细介绍了主被动安全系统的原理、现状及研究内容。第 2 章着重介绍面向汽车安全系统设计的仿真与试验技术。第 3 章介绍面向汽车安全仿真的模型验证和确认的基本理论和典型模型确认度量,其中包括已纳入 ISO 标准的模型确认方法及相应案例。第 4 章针对以汽车安全系统为代表的复杂动态系统的数据特点,介绍了多元、不确定性以及层次化模型确认理论和方法。第 5 章基于贝叶斯决策论,介绍了考虑不确定性条件下近似模型的识别方法及汽车安全的设计优化。第 6 章详细介绍了基于模型偏差修正的技术及优化策略,以提高复杂汽车安全响应预测准确度。第 7 章引入数据挖掘技术,介绍了基于分类与回归树的汽车安全优化设计方法,并通过典型安全设计案例进行说明。

在本书的编著过程中，作者尽最大努力将自己对汽车安全系统设计开发的理解和经验融入书籍。作者感谢 Priya Prasad 博士、Barbat Saeed 博士、Ren - Jye Yang 博士对本书理论框架的指导，以及杨俊祺、杨鑫、胡宸、宋浩展、李君明、张玉峰等对资料整理、文字翻译及校对方面做出的协助。本书作为参考书籍，主要面向高校相关专业的学生和从事汽车安全相关行业的工程师。由于时间仓促和作者的阅历局限，疏漏和不妥之处在所难免，欢迎读者提出批评和修改意见。

詹振飞

目 录

丛书总序

推荐序一

推荐序二

前言

第1章 绪 论	1
1.1 汽车安全的发展	1
1.2 汽车安全标准与法规概述	2
1.2.1 国内外主要汽车安全技术法律法规体系	3
1.2.2 国内外主要新车评估体系	4
1.3 汽车被动安全研究	6
1.3.1 被动安全基础理论	6
1.3.2 被动安全系统开发	12
1.4 汽车主动安全研究	16
1.4.1 主动安全系统理论	16
1.4.2 主动安全系统开发	23
参考文献	26
第2章 面向汽车安全设计的仿真与试验技术	28

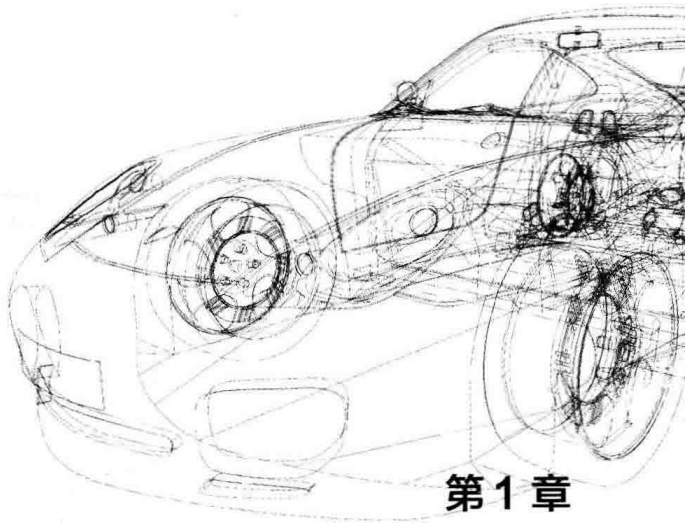
2.1 法规驱动的汽车安全系统设计·····	28
2.2 被动安全仿真与试验·····	30
2.2.1 被动安全试验简介·····	30
2.2.2 被动安全仿真建模方法·····	32
2.2.3 碰撞仿真模型·····	34
2.3 主动安全仿真与试验·····	37
2.3.1 主动安全试验简介·····	37
2.3.2 主动安全仿真建模方法·····	39
2.3.3 主动安全仿真模型·····	46
参考文献·····	50
第3章 面向汽车安全的模型验证与确认 ·····	51
3.1 模型验证与确认概述·····	51
3.1.1 模型验证与确认的基本概念·····	51
3.1.2 模型确认度量·····	54
3.2 面向动态系统的模型确认理论及方法·····	55
3.3 国际标准组织 (ISO) 模型确认度量·····	58
3.3.1 CORA 度量·····	58
3.3.2 EEARTH 动态时间响应分析方法·····	63
3.3.3 ISO 整合度量·····	72
3.4 ISO 时间序列响应的典型应用案例·····	75
3.4.1 儿童约束系统案例·····	75
3.4.2 台车测试案例·····	77
参考文献·····	79
第4章 面向复杂动态系统的模型确认 ·····	84
4.1 多元动态系统的模型确认·····	85
4.1.1 PCA 主元分析·····	86

- 4.1.2 MEARTH 多元时间响应误差评估方法 87
- 4.1.3 MEARTH 确认实例 88
- 4.2 不确定性多元动态系统的模型确认 91
 - 4.2.1 PPCA 统计主元分析 92
 - 4.2.2 不确定性多元动态系统重复性误差分析和计算 94
 - 4.2.3 不确定性多元动态系统的模型确认量和阈值的选取 94
 - 4.2.4 不确定性多元动态系统的模型确认流程与碰撞实例 97
- 4.3 贝叶斯模型确认 105
 - 4.3.1 贝叶斯网络 105
 - 4.3.2 模型确认中的贝叶斯网络 109
- 4.4 模型外推理论及方法 112
 - 4.4.1 模型外推理论简介 112
 - 4.4.2 基于贝叶斯推理的内插和外推方法 113
 - 4.4.3 基于高斯过程建模的内插和外推方法 116
 - 4.4.4 基于 Copula 内插外推方法 118
- 参考文献 120

- 第5章 基于数据不确定性的近似模型设计优化 123
 - 5.1 近似建模技术概述 123
 - 5.2 贝叶斯决策论 128
 - 5.3 考虑数据不确定性的贝叶斯指标 130
 - 5.3.1 贝叶斯指标推导 130
 - 5.3.2 贝叶斯指标物理意义及应用 133
 - 5.4 基于贝叶斯指标近似建模数值案例 135
 - 5.4.1 数学案例验证 135
 - 5.4.2 数据不确定性影响分析 136
 - 5.4.3 数据样本规模影响分析 137
 - 5.5 基于贝叶斯指标的汽车结构碰撞安全研究 138

5.5.1 汽车安全仿真分析	138
5.5.2 贝叶斯近似建模	140
5.5.3 数据不确定性影响分析	141
5.5.4 数据样本规模影响分析	145
5.6 基于贝叶斯指标的汽车安全优化设计	147
5.6.1 贝叶斯指标自适应建模	147
5.6.2 应用案例	149
参考文献	153
第6章 面向汽车安全的模型偏差修正优化策略	159
6.1 模型更新方法概述	159
6.2 高斯随机过程	161
6.3 模型偏差修正方法	163
6.4 基于模型偏差修正的数据不确定性量化	166
6.4.1 数据不确定性量化方法	166
6.4.2 数学案例验证	167
6.5 面向汽车安全设计优化的模型偏差修正更新策略	170
6.5.1 近似模型更新策略	170
6.5.2 汽车正面安全碰撞应用案例	171
6.5.3 汽车侧面安全碰撞应用案例	174
参考文献	179
第7章 数据挖掘技术在汽车安全设计优化中的应用	182
7.1 基于 CART 数据挖掘技术	183
7.1.1 数据挖掘方法概述	183
7.1.2 数学案例验证	186
7.2 基于 CART 数据挖掘技术的汽车安全优化设计域识别方法	188
7.2.1 优化设计域识别方法	188

- 7.2.2 数学案例验证 190
- 7.3 基于 CART 数据挖掘技术的汽车安全优化设计域识别算法..... 200
- 7.4 基于 CART 数据挖掘技术的汽车安全优化设计应用案例..... 202
 - 7.4.1 优化设计域识别分析 204
 - 7.4.2 确定性多目标优化设计案例 206
 - 7.4.3 可靠性单目标优化设计案例 207
- 参考文献 209



第1章

绪论

1.1 汽车安全的发展

人类历史上第一起汽车交通事故发生于 1889 年的纽约，或许正是因为这起交通事故，汽车安全逐渐成为一个新的研究领域。经过一个多世纪的发展，汽车安全性变得越发重要，安全技术也日趋成熟。

汽车安全技术的发展主要经历了三个阶段。

20 世纪初到 1935 年是汽车安全研究发展的第一个阶段，该阶段出现了各种基础安全装置。例如，发明雨刮器来提高车辆在雨天行驶时的安全性，加装前照灯以增强夜间行车的能见度，安装安全玻璃以减少外部环境对乘员脸部的伤害。但是该阶段还未出现对汽车结构的研究，车身结构依然脆弱，在严重交通事故中难以保障乘员的生命安全。

1936 ~ 1965 年是汽车安全发展的第二个阶段。在此期



间,各大汽车厂商开始注重对安全装置的提升和改进。1959年,VOLVO工程师Nils Bohlin发明了V型三点式安全带,这项发明成为120多年汽车历史中最重要的单项发明。除了汽车安全装置的引入和改进,各大汽车厂商也开始进行汽车安全试验。1959年,奔驰公司进行了汽车正面碰撞刚性壁障的试验,这是汽车历史上的第一次汽车碰撞试验。早期的试验程序异常简单,仅通过观察碰撞后的车辆状态来评估结构性能,并未充分、有效地利用试验假人和其他电子设备,但是这些试验为汽车安全性能的研究提供了新的方向,为汽车安全法规的产生奠定了基础。

汽车安全发展的第三个阶段始于1966年。当时的美国总统林登·约翰逊签署了一项法令——《公路安全法案》,并且批准成立了国家公路交通安全管理局(NHTSA)。此后,美国制定了包括联邦机动车安全标准(FMVSS)等在内的许多强制安全标准,对汽车的耐撞性等多个方面提出了要求。这些标准也逐渐成为其他国家制定安全法规的重要参考对象。经过50多年的发展,世界各国的汽车法律法规不断完善,汽车的安全性也得到进一步提高。

近年来,随着科学技术的发展,各种汽车安全系统和装置,如安全气囊、安全座椅、汽车前方碰撞预警系统(FCW)和车道偏离预警系统(LDW)、电子稳定控制系统(ESC)、自主紧急制动系统(AEB)、车道保持辅助系统(LKS)和速度辅助系统(SAS)等安全技术开始被广泛应用,极大地提高了汽车的安全性。

1.2 汽车安全标准与法规概述

为了确保汽车的安全,世界各国都制定了相应的安全标准。安全标准主要分为两类,一类是国家强制性法规,主要有美国的FMVSS和欧洲经济委员会的EEC与ECE两大体系,其他国家的技术法规大多是参照这两套法规体系来制定的。另一类则是以欧洲的Euro-NCAP和美国的IIHS-NCAP为代表,它们由比政府更为独立的测试机构制定,在具体的试验项目、强度、规程和技术等方面比国家强制性法规更为严格。