

★ ★ ★
★ “十二五” ★

国家重点出版物出版规划项目



国之重器出版工程
制造强国建设

新能源汽车关键技术研究丛书

Multidisciplinary Design Optimization for Ground Vehicles

车辆多学科 设计优化方法

陈潇凯 编著



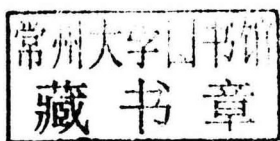
中国工信出版集团



北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

车辆多学科设计 优化方法

陈潇凯 编著



 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书对多学科设计优化主要研究内容进行了较系统的归纳,突出基础性、适用性。围绕MDO核心内容——MDO建模技术、MDO方法体系、灵敏度分析与近似建模、设计空间寻优策略、多目标优化等方面进行梳理和总结,并结合理论阐释给出大量的算例及编程参考。读者可通过本书所介绍的理论方法和数学算例及工程应用实例,在实践中提升对MDO的认识和工程应用能力。

本书可供高等院校车辆设计、机械设计等相关专业,或者多学科设计优化、轻量化设计等研究方向的师生作为教学参考书和技术参考资料,也可供从事汽车总体设计、零部件开发或者其他复杂工程系统开发的研究人员和工程设计人员参考。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

车辆多学科设计优化方法/陈潇凯编著. —北京:北京理工大学出版社, 2018.6

“十二五”国家重点出版物出版规划项目

ISBN 978-7-5682-4886-0

I. ①车… II. ①陈… III. ①电动汽车—设计 IV. ①U469.720.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第243284号

出 版 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街5号

邮 编 / 100081

电 话 / (010)68914775(总编室)

(010)82562903(教材售后服务热线)

(010)68948351(其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 固安县铭成印刷有限公司

开 本 / 710毫米×1000毫米 1/16

印 张 / 31.75

责任编辑 / 杜春英

字 数 / 562千字

文案编辑 / 杜春英

版 次 / 2018年6月第1版 2018年6月第1次印刷

责任校对 / 周瑞红

定 价 / 89.00元

责任印制 / 王美丽

图书出现印装质量问题,请拨打售后服务热线,本社负责调换



前 言

车辆，尤其是近年来蓬勃发展的新能源汽车和智能汽车等新型车辆，其设计任务是复杂的工程问题，包含动力总成、底盘、车身、电子电控等多个核心部件总成，涉及机械、电子、流体、控制、材料、制造工艺等多个学科领域，涉及动力性、能耗经济性、NVH、可靠耐久等诸多性能，部件、学科、性能间相互耦合，相互影响，使得其研发工作成为一项非常复杂的系统工程。

多学科设计优化（Multidisciplinary Design Optimization, MDO）是近 20 年发展起来的用于解决航空航天、车辆等多学科耦合复杂系统的方法论。MDO 能够充分考虑各学科之间的相互影响和耦合作用，通过充分利用各个学科之间的相互作用所产生的协同效应获得系统的整体最优解，不仅可以缩短设计周期和降低研制费用，也能为实现系统性能整体优化提供新的可能性，MDO 技术业已受到国际主要汽车厂商及零部件企业的广泛关注。作为典型的多学科复杂系统，汽车开发设计工作与多学科设计优化方法相结合是提升产品开发质量和市场竞争力的必由之路。

多学科设计优化方法虽然发展历程较短，但由于其所具有的强大潜力和广阔前景，相关研究内容均得到大量研究，内容浩繁，并且各技术术语、方法林林总总，散落于众多技术资料之中，很多还没有得以统一，为相关内容的学习和工程应用带来诸多困扰。

本书结合课题组近年来在多学科设计优化领域的探索和工程实践，参考吸收国内外 MDO 方面的专著、论文等最新研究成果，对多学科设计优化主要研究内容进行较系统的归纳，突出基础性、适用性。围绕 MDO 核心内容——MDO 建模技术、MDO 方法体系、灵敏度分析与近似建模、设计空间寻优策略、多目标优化等方面进行梳理和总结，并结合理论阐释给出大量的算例及编程参考。



读者可通过本书所介绍的理论方法和数学算例及工程应用实例，在实践中提升对 MDO 的认识和工程应用能力。

本书的研究工作得到了国家自然科学基金（51275040、50905017）和科技部“863”课题（2006AA04Z119）等项目的支持。同时，本书的出版工作也得到了北京理工大学“学术型研究生精品课程建设”资助。

感谢林逸教授、孙逢春教授、林程教授、张承宁教授、何洪文教授长期以来对课题组研究工作的大力支持和指导。课题组的李邦国、陈勇、赵迁、王婷婷，以及实验室的高丰岭、王喜明等博士为本书的研究工作贡献颇多；在本书的出版准备过程中，李孟强、金嘉威、张成、李思奇等研究生对资料整理和校对也有大量辛勤付出；另外，近年来参与“多学科设计优化方法”课程学习的易璐、李垚、罗佳毅等 390 余名研究生对课程建设注入了热情和活力。在此向他们一并表示感谢。

本书可供从事车辆或者其他复杂工程系统开发的研究人员和工程设计人员参考，也可作为高等院校相关专业研究生和高年级本科生的教材。希望本书的出版对推动我国多学科设计优化技术领域人才培养，以及 MDO 方法在车辆及其他工程设计领域的研究与应用起到良好作用。

多学科设计优化方法是一门新兴学科，其本身尚处于快速发展的过程中，很多理论方法未能完善定型，同时由于作者水平有限，书中不足之处在所难免，此外由于专业术语译名上各有所好，也难免有疏漏甚至错讹之处，敬请业内专家和广大读者指正，可与作者联系（chenxiaokai@bit.edu.cn）。书中主要章节内容多年来一直用作所授研究生课程讲义，部分内容参考了国内外学者的研究成果，借此机会，向所引用资料的作者一并表示感谢。

作 者

《国之重器出版工程》 编辑委员会

编辑委员会主任：苗 圩

编辑委员会副主任：刘利华 辛国斌

编辑委员会委员：

冯长辉	梁志峰	高东升	姜子琨	许科敏
陈 因	郑立新	马向晖	高云虎	金 鑫
李 巍	李 东	高延敏	何 琼	刁石京
谢少锋	闻 库	韩 夏	赵志国	谢远生
赵永红	韩占武	刘 多	尹丽波	赵 波
卢 山	徐惠彬	赵长禄	周 玉	姚 郁
张 炜	聂 宏	付梦印	季仲华	



专家委员会委员（按姓氏笔画排列）：

- 于 全 中国工程院院士
- 王少萍 “长江学者奖励计划”特聘教授
- 王建民 清华大学软件学院院长
- 王哲荣 中国工程院院士
- 王 越 中国科学院院士、中国工程院院士
- 尤肖虎 “长江学者奖励计划”特聘教授
- 邓宗全 中国工程院院士
- 甘晓华 中国工程院院士
- 叶培建 中国科学院院士
- 朱英富 中国工程院院士
- 朵英贤 中国工程院院士
- 邬贺铨 中国工程院院士
- 刘大响 中国工程院院士
- 刘怡昕 中国工程院院士
- 刘韵洁 中国工程院院士
- 孙逢春 中国工程院院士
- 苏彦庆 “长江学者奖励计划”特聘教授



- 苏哲子 中国工程院院士
- 李伯虎 中国工程院院士
- 李应红 中国科学院院士
- 李新亚 国家制造强国建设战略咨询委员会委员、
中国机械工业联合会副会长
- 杨德森 中国工程院院士
- 张宏科 北京交通大学下一代互联网互联设备国家
工程实验室主任
- 陆建勋 中国工程院院士
- 陆燕荪 国家制造强国建设战略咨询委员会委员、原
机械工业部副部长
- 陈一坚 中国工程院院士
- 陈懋章 中国工程院院士
- 金东寒 中国工程院院士
- 周立伟 中国工程院院士
- 郑纬民 中国计算机学会原理事长
- 郑建华 中国科学院院士



- 屈贤明** 国家制造强国建设战略咨询委员会委员、工业和信息化部智能制造专家咨询委员会副主任
- 项昌乐** “长江学者奖励计划”特聘教授，中国科协书记处书记，北京理工大学党委副书记、副校长
- 柳百成** 中国工程院院士
- 闻雪友** 中国工程院院士
- 徐德民** 中国工程院院士
- 唐长红** 中国工程院院士
- 黄卫东** “长江学者奖励计划”特聘教授
- 黄先祥** 中国工程院院士
- 黄 维** 中国科学院院士、西北工业大学常务副校长
- 董景辰** 工业和信息化部智能制造专家咨询委员会委员
- 焦宗夏** “长江学者奖励计划”特聘教授



目 录

第 1 章 绪论	001
1.1 车辆多学科设计优化的形成动因	002
1.1.1 车辆设计工作的复杂性本质	002
1.1.2 汽车设计开发技术及理念新态势	002
1.2 什么是“多学科设计优化”	005
1.2.1 MDO 的基本概念	005
1.2.2 MDO 在产品开发中的作用	008
1.3 多学科设计优化的主要研究内容	010
1.3.1 复杂系统的分解与协调	011
1.3.2 MDO 方法	012
1.3.3 复杂系统建模	013
1.3.4 灵敏度分析	013
1.3.5 近似建模	014
1.3.6 优化算法	015
1.3.7 集成设计系统	015
1.4 MDO 与车辆工程结合的典型形式	017
1.5 MDO 在车辆工程应用中的挑战与趋势	020
1.5.1 面临的挑战	020
1.5.2 发展趋势	022
参考文献	023
第 2 章 多学科设计优化方法体系	027



2.1	多学科设计优化技术中优化方法与优化算法的区别	028
2.2	多学科设计优化方法的研究着眼点	029
2.3	多学科设计优化方法的分类	030
2.4	多学科可行法	031
2.4.1	MDF 法的基本思想	031
2.4.2	多学科分析	034
2.4.3	MDF 法的特点	037
2.4.4	MDF 法算例	038
2.4.5	MDF 法的编程实现	039
2.5	单学科可行法	044
2.5.1	IDF 法的基本思想	044
2.5.2	IDF 法的特点	046
2.5.3	IDF 法算例	046
2.5.4	IDF 法的编程实现	047
2.6	一致性优化法	051
2.6.1	AAO 法的基本思想	051
2.6.2	AAO 法的特点	053
2.6.3	AAO 法算例	053
2.6.4	AAO 法的编程实现	054
2.7	并行子空间优化法	057
2.7.1	CSSO 法的基本思想	057
2.7.2	CSSO 法的特点	062
2.7.3	CSSO 法算例	063
2.8	协同优化法	066
2.8.1	CO 法的基本思想	066
2.8.2	CO 法的特点	069
2.8.3	CO 法算例	070
2.8.4	CO 法的编程实现	071
2.9	两级集成系统综合法	078
2.9.1	BLISS 法的基本思想	079
2.9.2	BLISS 法的特点	082
2.9.3	BLISS 法的改进	082
2.9.4	BLISS 2000 方法简介	084
2.9.5	BLISS 法算例	086



2.10	目标分流法	092
2.10.1	ATC法的基本思想	093
2.10.2	ATC法的特点	097
2.10.3	ATC法的编程实现	098
	参考文献	106
第3章	多学科设计优化建模	110
3.1	复杂系统的分解方法	111
3.1.1	基于分解的设计优化	111
3.1.2	学科的定义及划分原则	112
3.1.3	复杂系统的分解方法	113
3.1.4	设计结构矩阵方法	114
3.1.5	函数关系矩阵方法	121
3.1.6	超图方法	131
3.1.7	MDO分解基本原则	134
3.2	协调策略	135
3.3	变复杂度建模	138
3.4	不确定性建模	140
3.4.1	不确定性的来源	140
3.4.2	不确定性建模方法	141
3.4.3	不确定性传播方法	142
3.4.4	不确定性优化设计	154
3.4.5	不确定性多学科设计优化建模	157
	参考文献	159
第4章	灵敏度分析技术	162
4.1	灵敏度分析的概念	163
4.2	单学科灵敏度分析	165
4.2.1	单学科灵敏度分析简介	165
4.2.2	手工求导方法	166
4.2.3	符号微分方法	166
4.2.4	有限差分方法	166
4.2.5	自动微分方法	168
4.2.6	复变量方法	174
4.2.7	解析方法	176



4.2.8 其他方法	178
4.3 多学科灵敏度分析	180
4.3.1 多学科灵敏度分析简介	180
4.3.2 最优灵敏度分析方法	181
4.3.3 全局灵敏度分析方法	184
4.3.4 滞后耦合伴随方法	187
参考文献	188
第5章 近似模型技术	189
5.1 近似模型基础	190
5.1.1 基本概念	190
5.1.2 近似模型的需求背景	190
5.1.3 近似建模的基本思想	191
5.1.4 近似模型的基本构建过程	192
5.2 试验设计方法	193
5.2.1 全因子试验设计方法	194
5.2.2 部分因子试验设计方法	194
5.2.3 中心组合设计方法	194
5.2.4 蒙特卡罗法	194
5.2.5 正交试验设计方法	195
5.2.6 拉丁方设计方法	196
5.3 近似模型的构造方法	199
5.3.1 局部近似	199
5.3.2 中等范围近似	200
5.3.3 全局近似	201
5.4 响应面模型方法	202
5.5 移动最小二乘响应面法	205
5.6 Kriging 模型法	210
5.7 人工神经网络模型法	214
5.7.1 BP 神经网络	214
5.7.2 RBF 神经网络	219
5.8 支持向量机法	222
5.9 近似模型预测精度的评价	225
5.9.1 误差分析方法	225



5.9.2	近似能力评价方法	227
5.10	近似模型的特点对比及适用性	228
5.11	基于近似模型的 MDO 方法	230
5.12	电动汽车动力电池箱应用实例	232
5.12.1	电动汽车动力电池箱优化问题	232
5.12.2	最优拉丁超立方采样	237
5.12.3	电池箱响应面模型构建	238
5.12.4	电池箱径向基模型构建	244
5.12.5	电池箱 Kriging 模型构建	252
5.12.6	近似模型分析对比	266
	参考文献	267
第 6 章	多学科设计优化求解策略	269
6.1	优化算法概述	270
6.2	优化算法的发展简史	272
6.3	优化算法的数学基础	281
6.3.1	函数的方向导数与梯度	281
6.3.2	多元函数的泰勒展开	284
6.3.3	多元函数的极值条件及其凸性	286
6.3.4	无约束问题的极值条件	289
6.3.5	约束问题的极值条件	289
6.4	经典优化算法	293
6.4.1	线性搜索法	293
6.4.2	最速下降法	296
6.4.3	牛顿法	298
6.4.4	拟牛顿法	301
6.4.5	鲍威尔法	305
6.4.6	单纯形替换法	307
6.4.7	复合形法	310
6.4.8	可行方向法	315
6.4.9	拉格朗日乘子法	319
6.4.10	序列二次规划法	321
6.5	智能优化算法	325
6.5.1	遗传算法	325



6.5.2	模拟退火算法	330
6.5.3	蚁群优化算法	335
6.5.4	禁忌搜索算法	342
6.5.5	粒子群算法	344
6.6	优化算法的组合策略	347
	参考文献	348
第7章	多目标优化方法	350
7.1	多目标优化与多学科设计优化的关系	351
7.1.1	多目标优化的特点	351
7.1.2	汽车开发多目标优化问题	353
7.1.3	多目标优化方法研究简史	355
7.2	多目标优化的基本概念	358
7.2.1	主要术语的定义	358
7.2.2	多目标优化算法的评价标准	360
7.3	基于偏好的先验方法	363
7.3.1	加权和法	363
7.3.2	主要目标法	365
7.3.3	理想点法	366
7.3.4	极大极小法	367
7.3.5	功效系数法	368
7.3.6	物理规划法	371
7.4	基于偏好的后验方法	382
7.4.1	法线边界正交法(NBI)	382
7.4.2	自适应加权和法(AWS)	391
7.4.3	NC法	402
7.5	无偏好方法	407
7.5.1	多目标遗传算法	407
7.5.2	多目标模拟退火算法	419
7.5.3	多目标粒子群算法	426
7.6	汽车行驶动力学性能的多目标优化算例	433
7.6.1	问题背景	433
7.6.2	多目标优化问题建模	434
7.6.3	多目标优化与结果分析	440



参考文献	442
第 8 章 工程应用案例	445
8.1 汽车主动悬架系统优化	446
8.1.1 车辆模型的建立	447
8.1.2 线性二次高斯控制算法	448
8.1.3 卡尔曼滤波算法	450
8.1.4 主动悬架 MDF 优化	450
8.1.5 优化结果及讨论	454
8.2 插电式混合动力汽车动力系统优化	459
8.2.1 驾驶员模型	459
8.2.2 整车控制器模型	461
8.2.3 发动机模型	461
8.2.4 主驱动电机模型	463
8.2.5 ISG 电机模型	465
8.2.6 动力电池模型	466
8.2.7 行驶动力学模型	467
8.2.8 能量管理策略模型	469
8.2.9 整车参数及约束条件	469
8.2.10 动力系统 CO 优化及优化结果	470
8.3 汽车车身结构正面抗撞性设计优化	475
8.3.1 整车碰撞有限元分析模型的建立	475
8.3.2 有限元模型验证	477
8.3.3 近似模型的建立	481
8.3.4 基于 CO 和近似模型的正面抗撞性优化	483
8.3.5 优化结果	488
参考文献	490



第1章 绪论

人类认识事物或解决问题的过程一般遵循“由简至繁、从局部到整体”的规律：初期阶段，在保证复杂事物本质的前提下，对用于描述其性质的模型应尽可能进行简化，以期能够应用已有知识对其进行理解和探索；随着对该事物认识的逐步深入，会追求对其细节的探究，通过添加更多细节信息对模型进行修正和精细化，能够实现对该事物更准确的分析和处理；最后，当认识清楚各个细节之后，将倾向于综合分析其整体特征并进行全面解决。

多学科设计优化理论和方法是人类认识发展到探求系统性能整体优化阶段的产物。本章将介绍多学科设计优化方法提出的背景、基本概念和主要研究内容，以及在理论研究和工程实践中面临的挑战与机遇。