



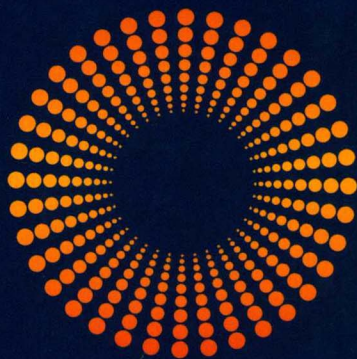
国家出版基金资助项目
“十三五”国家重点图书出版规划项目
湖北省学术著作出版专项资金资助项目
智能制造与机器人理论及技术研究丛书



总主编 丁汉 孙容磊

考虑多源不确定性的 多学科可靠性设计优化

刘继红 李连升◎著



KAOLÜ DUOYUAN BUQUEDINGXING DE
DUOXUEKE KEKAOXING SHEJI YOUHUA



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

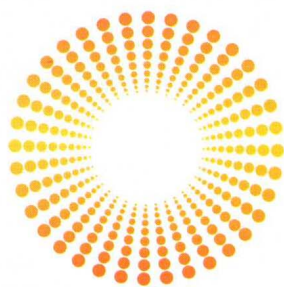


国家出版基金资助项目
“十三五”国家重点图书出版规划项目
湖北省学术著作出版专项资金资助项目
智能制造与机器人理论及技术研究丛书

总主编 丁汉 孙容磊

考虑多源不确定性的 多学科可靠性设计优化

刘继红 李连升◎著



DUOYUAN BUQUEDINGXING DE
DUOXUEKE KEKAOXING SHEJI YOUHUA



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

中国·武汉

内 容 简 介

本书从复杂产品设计与优化的角度出发,系统阐述了多学科可靠性设计优化的方法和技术,着重介绍了多学科协同优化策略、可靠性分析方法、多源不确定性数学建模理论、单学科统一可靠性分析方法、序列化的多学科可靠性分析方法、考虑多源不确定性的多学科可靠性设计优化建模与求解方法,并结合具体示例介绍了多学科可靠性设计优化方法的应用。

本书集中体现了作者在国家自然科学基金项目和与航天航空行业各研究院所合作项目的研究中取得的研究成果,具有专业性、系统性和实用性,反映了现代产品开发技术的最新进展。

本书可作为广大工程技术人员,特别是产品设计研发技术人员以及高等院校机械类专业研究生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

考虑多源不确定性的多学科可靠性设计优化/刘继红,李连升著. —武汉:华中科技大学出版社,2018.12

(智能制造与机器人理论及技术研究丛书)

ISBN 978-7-5680-3736-5

I. ①考… II. ①刘… ②李… III. ①结构可靠性-结构设计-最优设计-研究
IV. ①TB114.33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 272069 号

考虑多源不确定性的多学科可靠性设计优化

刘继红 李连升 著

Kaolü Duoyuan Buquedingxing de Duoxueke Kekaoxing

Sheji Youhua

策划编辑:万亚军

责任编辑:姚同梅

封面设计:原色设计

责任校对:刘 竣

责任监印:周治超

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

电话:(027)81321913

武汉市东湖新技术开发区华工科技园

邮编:430223

录 排:武汉三月禾文化传播有限公司

印 刷:湖北新华印务有限公司

开 本:710mm×1000mm 1/16

印 张:27.5

字 数:492千字

版 次:2018年12月第1版第1次印刷

定 价:168.00元



本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究



智能制造与机器人理论及技术研究丛书

专家委员会

主任委员 熊有伦（华中科技大学）

委 员 （按姓氏笔画排序）

卢秉恒（西安交通大学）

朱 荻（南京航空航天大学）

阮雪榆（上海交通大学）

杨华勇（浙江大学）

张建伟（德国汉堡大学）

邵新宇（华中科技大学）

林忠钦（上海交通大学）

蒋庄德（西安交通大学）

谭建荣（浙江大学）

顾问委员会

主任委员 李国民（佐治亚理工学院）

委 员 （按姓氏笔画排序）

于海斌（中国科学院沈阳自动化研究所）

王飞跃（中国科学院自动化研究所）

王田苗（北京航空航天大学）

尹周平（华中科技大学）

甘中学（宁波市智能制造产业研究院）

史铁林（华中科技大学）

朱向阳（上海交通大学）

刘 宏（哈尔滨工业大学）

孙立宁（苏州大学）

李 斌（华中科技大学）

杨桂林（中国科学院宁波材料技术与工程研究所）

张 丹（北京交通大学）

孟 光（上海航天技术研究院）

姜钟平（美国纽约大学）

黄 田（天津大学）

黄明辉（中南大学）

编写委员会

主任委员 丁 汉（华中科技大学） 孙容磊（华中科技大学）

委 员 （按姓氏笔画排序）

王成恩（上海交通大学）

方勇纯（南开大学）

史玉升（华中科技大学）

乔 红（中国科学院自动化研究所）

孙树栋（西北工业大学）

杜志江（哈尔滨工业大学）

张定华（西北工业大学）

张宪民（华南理工大学）

范大鹏（国防科技大学）

顾新建（浙江大学）

陶 波（华中科技大学）

韩建达（南开大学）

蔺永诚（中南大学）

熊 刚（中国科学院自动化研究所）

熊振华（上海交通大学）

作者简介



▶ **刘继红** 北京航空航天大学机械工程及自动化学院教授，博士生导师，日本东京都立大学工学博士，科技部“十二五”制造业信息化总体专家组成员，中国机械工程学会机械工业自动化分会第九届委员会副主任委员，中国机械工程学会成组与智能集成技术分会第四届委员会常务委员，全国知识管理标准化技术委员会委员。主要从事复杂产品数字化设计、制造与管理，设计理论与方法，知识管理与知识工程，制造业信息化战略等方向的研究、教学与服务工作。主持国家863计划项目、国家科技支撑计划项目、国家自然科学基金项目、国防基础科研计划项目等国家级科研项目20余项。发表论文150余篇，其中SCI/EI收录120余篇；出版专著1部，译著4部；获得国家发明专利授权4项，获颁计算机软件著作权登记证书15项。获省部级科技进步二等奖1次、中航工业集团科学技术一等奖1次。



▶ **李连升** 工学博士，高级工程师，现任北京控制工程研究所光电技术事业部研发部副主任，主要从事航天复杂系统多学科优化、空间光电产品研发与工程应用研究。主持和参加了国家自然科学基金项目、国家重点研发项目、军委科技委基础加强计划项目等10多个项目的研究与开发工作。参与研制我国首颗X射线脉冲星导航试验卫星(XPNAV-1)的主载荷——聚焦型X射线脉冲星望远镜，圆满完成工程与科学探测任务，填补了国内空白。在复杂航天系统不确定性设计优化与空间光电产品研发方面具有深厚的理论基础和应用开发能力，已发表SCI、EI检索高水平论文20余篇，获得国家发明专利授权5项。



总序

近年来,“智能制造+共融机器人”特别引人瞩目,呈现出“万物感知、万物互联、万物智能”的时代特征。智能制造与共融机器人产业将成为优先发展的战略性新兴产业,也是中国制造 2049 创新驱动发展的巨大引擎。值得注意的是,智能汽车与无人机、水下机器人等一起所形成的规模宏大的共融机器人产业,将是今后 30 年各国争夺的战略高地,并将对世界经济发展、社会进步、战争形态产生重大影响。与之相关的制造科学和机器人学属于综合性学科,是联系和涵盖物质科学、信息科学、生命科学的大科学。与其他工程科学、技术科学一样,制造科学和机器人学也是将认识世界和改造世界融合为一体的大科学。20 世纪中叶,Cybernetics 与 Engineering Cybernetics 等专著的发表开创了工程科学的新纪元。21 世纪以来,制造科学、机器人学和人工智能等异常活跃,影响深远,是“智能制造+共融机器人”原始创新的源泉。

华中科技大学出版社紧跟时代潮流,瞄准智能制造和机器人的科技前沿,组织策划了本套“智能制造与机器人理论及技术研究丛书”。丛书涉及的内容十分广泛。热烈欢迎专家、教授从不同的视野、不同的角度、不同的领域著书立说。选题要点包括但不限于:智能制造的各个环节,如研究、开发、设计、加工、成形和装配等;智能制造的各个学科领域,如智能控制、智能感知、智能装备、智能系统、智能物流和智能自动化等;各类机器人,如工业机器人、服务机器人、极端机器人、海陆空机器人、仿生/类生/拟人机器人、软体机器人和微纳机器人等的发展和应用;与机器人学有关的机构学与力学、机动性与操作性、运动规划与运动控制、智能驾驶与智能网联、人机交互与人机共融等;人工智能、认知科学、大数据、云制造、物联网和互联网等。

本套丛书将成为有关领域专家、学者学术交流与合作的平台,青年科学家茁壮成长的园地,科学家展示研究成果的国际舞台。华中科技大学出版社将与



施普林格(Springer)出版集团等国际学术出版机构一起,针对本套丛书进行全球联合出版发行,同时该社也与有关国际学术会议、国际学术期刊建立了密切联系,为提升本套丛书的学术水平和实用价值,扩大丛书的国际影响营造了良好的学术生态环境。

近年来,高校师生、各领域专家和科技工作者等各界人士对智能制造和机器人的热情与日俱增。这套丛书将成为有关领域专家学者、高校师生与工程技术人员之间的纽带,增强作者与读者之间的联系,加快发现知识、传授知识、增长知识和更新知识的进程,为经济建设、社会进步、科技发展做出贡献。

最后,衷心感谢为本套丛书做出贡献的作者和读者,感谢他们为创新驱动发展增添正能量、聚集正能量、发挥正能量。感谢华中科技大学出版社相关人员在组织、策划过程中的辛勤劳动。

华中科技大学教授

中国科学院院士

熊有伦

2017年9月



前言

随着科学技术的不断进步与发展以及人类需求的不断变化,工程系统的复杂程度日益提高。20 世纪 80 年代发展起来的多学科设计优化理论是一套解决复杂工程系统优化问题的方法论。多学科设计优化方法力求充分考虑工程系统各门学科间的相互影响和耦合作用,采用有效的优化策略,灵活组织和管理整个系统的设计过程,通过充分利用各学科之间相互作用所产生的协同效应,来获得系统的整体最优解,从而达到提高复杂工程系统性能、降低设计成本并缩短研发周期的目的。

复杂工程系统的设计与开发不仅涉及多个耦合学科,而且包含多源多类不确定性。从人类认知能力的角度,不确定性可分为随机不确定性和认知不确定性两类。为获得高可靠性和高安全性的工程系统,考虑不确定性的设计优化已成为复杂工程系统设计的焦点之一。目前,对于设计参变量含有随机不确定性的情况,基于可靠性的多学科设计优化得到了广泛关注,人们在这一研究领域已取得丰硕成果。然而,考虑多源不确定性(随机和认知不确定性)的多学科设计优化相关理论与方法仍有待深入研究。

本书结合笔者近十年来完成国家自然科学基金项目以及与企业合作研究开发项目所取得的研究成果,介绍了多源不确定性条件下的多学科可靠性设计优化相关理论与方法。本书主要内容如下。

第 1 章绪论,介绍了多学科可靠性设计优化方法提出的背景和意义,归纳总结了国内外相关研究现状与发展趋势。

第 2 章多学科可靠性设计优化理论基础,主要介绍了多学科设计优化的基础理论和关键技术,以及基于可靠性的设计优化基础理论。

第 3 章改进的协同优化算法,重点介绍了基于智能优化算法的自适应协同优化策略和基于线性近似过滤的联合线性近似协同优化策略。

第 4 章基于近似技术的可靠性分析方法,重点介绍了基于逆可靠性原理抽样的响应面法和基于样本点全插值的响应面法及其在可靠性分析中的应用。

第 5 章多源不确定性数学建模,主要介绍了随机不确定性、模糊不确定性



和区间不确定性的数学建模理论,提出了基于证据理论的多源不确定性统一表达方法。

第6章单学科统一可靠性分析方法,主要介绍了几种考虑多源不确定性的可靠性分析求解方法,包括基于证据理论的统一可靠性分析方法,基于概率论、可能性理论、证据理论的统一可靠性分析方法以及基于插值的统一可靠性分析方法。

第7章序列化的多学科统一可靠性分析方法,重点介绍了随机不确定性条件下序列化的多学科统一可靠性分析方法(SMRA)、同时处理随机和认知不确定性的序列化多学科可靠性分析方法(MU-SMRA)和一种基于插值的序列多学科逆可靠性分析方法(IS-MDPMA)。

第8章考虑多源不确定性的多学科可靠性设计优化建模,主要介绍了随机不确定性下的RBMDO建模、基于概率论和凸集模型的RBMDO建模及考虑随机-模糊-区间混合不确定性的RBMDO建模方法。

第9章多源不确定性条件下的多学科可靠性设计优化,重点介绍了混合层次多学科可靠性设计优化策略HSORA及其求解流程,通过工程算例对所提方法进行应用验证。

第10章RBMDO发展展望,论述相关研究方向的未来发展。

本书反映了笔者以及笔者所领导的研究团队近年来的研究成果。本书的主要内容来源于笔者指导的博士生、硕士生的研究工作以及学位论文和发表的学术论文。这些学生一部分已经走上工作岗位,或者在高等院校继续从事科研教学工作,或者任职于制造企业从事产品开发与生产工作。在此列出为本书内容做出直接贡献的人员的名字:中国航天科工集团朱玉明博士、刘少华硕士、谢琦硕士,河北工程大学孟欣佳博士,科诺世(上海)汽车科技有限公司安向男硕士,在读的博士研究生付超、周建慧及硕士研究生李新光、杨国辉。同时,向没有列出名字但在本书形成过程中给予了各方面帮助和支持的同事、学生表示感谢。

与中国航天科工集团开展的合作研究中,陈建江博士给予了大力支持,特此致谢。

本书得以出版,要特别感谢国家自然科学基金委员会的大力支持,感谢国家自然科学基金(项目编号51175019)以及国家出版基金、湖北省学术著作出版专项资金的资助,感谢华中科技大学出版社的支持和帮助。

作为研究成果,本书不可避免存在不完善的地方或者见解,书中内容的表述也会存在不妥当的地方,衷心希望各位专家和广大读者不吝批评和指正。

刘继红

2018年3月

于北京航空航天大学



目录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 多学科可靠性设计优化的提出	(1)
1.2 多学科可靠性设计优化研究现状	(3)
1.2.1 确定性多学科设计优化研究	(3)
1.2.2 不确定性量化理论	(6)
1.2.3 多学科可靠性评价方法	(8)
1.2.4 单学科可靠性分析方法	(9)
1.2.5 多学科可靠性分析方法	(13)
1.2.6 多学科可靠性设计优化	(15)
1.3 本书主要内容	(17)
参考文献	(19)
第 2 章 多学科可靠性设计优化理论基础	(29)
2.1 多学科设计优化理论	(29)
2.1.1 多学科设计优化定义	(30)
2.1.2 多学科设计优化数学模型	(32)
2.1.3 灵敏度分析技术	(33)
2.1.4 多学科设计优化算法	(37)
2.1.5 多学科设计优化策略	(39)
2.1.6 多学科设计优化中的多目标问题	(54)
2.1.7 多学科设计优化环境	(60)
2.2 基于可靠性的设计优化	(62)
2.2.1 不确定设计优化	(62)
2.2.2 RBDO 数学模型	(65)
2.2.3 RBDO 流程	(65)



2.2.4 RBDO 求解策略	(66)
2.3 本章小结	(67)
参考文献	(67)
第3章 改进的协同优化算法	(72)
3.1 协同优化算法改进综述	(72)
3.1.1 改进协同优化算法的收敛性能	(72)
3.1.2 提高协同优化算法的计算效率	(74)
3.2 基于智能优化算法的协同优化算法	(76)
3.2.1 面向多学科设计优化的智能优化算法库	(76)
3.2.2 自适应智能优化算法	(84)
3.2.3 自适应协同优化策略	(94)
3.3 基于线性近似过滤的联合线性近似协同优化策略	(109)
3.3.1 协同优化算法的迭代过程	(109)
3.3.2 联合线性近似协同优化	(111)
3.3.3 联合线性近似协同优化过程中的线性近似冲突	(113)
3.3.4 线性近似过滤策略	(115)
3.3.5 基于 LAF 策略的 CLA-CO 计算流程	(122)
3.3.6 算例验证	(123)
3.4 本章小结	(132)
参考文献	(132)
第4章 基于近似技术的可靠性分析方法	(136)
4.1 近似技术与试验设计概述	(136)
4.1.1 多学科设计优化中的近似技术	(136)
4.1.2 多学科设计优化中的试验设计方法	(141)
4.1.3 基于近似技术的多学科设计优化应用实例	(144)
4.2 基于逆可靠性原理抽样的响应面法	(155)
4.2.1 逆可靠性分析的响应面法	(155)
4.2.2 基于逆可靠性分析原理的抽样方法	(156)
4.2.3 算例验证	(160)
4.3 基于样本点全插值的响应面法及其应用	(164)
4.3.1 样本点全插值法	(165)
4.3.2 应用样本点全插值的响应面法	(166)
4.3.3 算例验证	(168)
4.4 本章小结	(170)

参考文献	(171)
第 5 章 多源不确定性数学建模	(173)
5.1 不确定性来源与分类	(174)
5.2 不确定性的数学建模理论	(176)
5.2.1 随机不确定性的数学建模	(176)
5.2.2 模糊不确定性的数学建模	(179)
5.2.3 区间不确定性的数学建模	(182)
5.2.4 基于证据理论的随机-模糊-区间不确定性 统一表达	(188)
5.3 不确定性在多学科系统中的传播	(190)
5.3.1 单学科不确定性传播	(190)
5.3.2 多学科系统中的混合不确定性传播	(191)
5.4 本章小结	(195)
参考文献	(195)
第 6 章 单学科统一可靠性分析方法	(200)
6.1 可靠性分析概述	(200)
6.1.1 可靠度概念	(200)
6.1.2 可靠度指标	(201)
6.1.3 可靠性评价	(202)
6.2 常用的可靠性分析方法	(203)
6.2.1 蒙特卡罗仿真分析方法	(203)
6.2.2 响应面法	(204)
6.2.3 一阶可靠性分析方法	(206)
6.2.4 二阶可靠性分析方法(SORM)	(214)
6.2.5 其他可靠度求解方法	(215)
6.3 基于证据理论的统一可靠性分析	(217)
6.3.1 基于证据理论的可靠性分析	(218)
6.3.2 基于证据理论的统一可靠性分析方法	(219)
6.3.3 算例	(221)
6.4 基于概率论、可能性理论、证据理论的统一可靠性 分析	(226)
6.4.1 随机-模糊-区间混合不确定性下的可靠性分析 模型构建	(226)
6.4.2 统一可靠性分析的 FORM- α -URA 方法	(233)

6.4.3	实例验证	(237)
6.5	基于插值的统一可靠性分析	(244)
6.5.1	目标子似真度的确定	(245)
6.5.2	逆可靠性评估模型的建立	(246)
6.5.3	逆分析的最可能失效点的求解	(247)
6.6	本章小结	(256)
	参考文献	(257)
第 7 章	序列化的多学科统一可靠性分析方法	(261)
7.1	多学科可靠性分析方法概述	(262)
7.1.1	多学科可靠性分析流程	(262)
7.1.2	多学科分析	(264)
7.1.3	基于 PMA 的多学科可靠性分析	(265)
7.1.4	基于卡方分布的统一多学科可靠性分析方法	(267)
7.1.5	基于鞍点近似的多学科统一可靠性分析方法	(271)
7.2	基于概率论的序列化多学科可靠性分析方法	(275)
7.2.1	序列化多学科可靠性分析方法原理	(275)
7.2.2	序列化多学科可靠性分析中采用的方法	(276)
7.2.3	序列化多学科可靠性分析方法的数学模型	(277)
7.2.4	序列化多学科可靠性分析流程与步骤	(277)
7.3	基于概率论和凸集模型的序列化多学科可靠性分析方法	(280)
7.3.1	MU-SMRA 方法原理	(280)
7.3.2	MU-SMRA 数学模型	(281)
7.3.3	MU-SMRA 流程与步骤	(283)
7.3.4	实例分析与讨论	(285)
7.4	基于概率论、可能性理论和证据理论的序列化多学科 可靠性分析方法	(291)
7.4.1	含有三种不确定性的多学科逆可靠性分析模型	(291)
7.4.2	嵌套 MDPMA 求解方法	(292)
7.4.3	IS-MDPMA 求解方法	(293)
7.4.4	算例验证	(296)
7.5	本章小结	(302)
	参考文献	(302)
第 8 章	考虑多源不确定性的多学科可靠性设计优化建模	(304)
8.1	复杂产品系统 MDO 建模方法概述	(304)

8.1.1	系统的分解	(304)
8.1.2	多学科设计优化建模技术	(306)
8.2	随机不确定性下的 RBMDO 模型	(311)
8.2.1	RBMDO 数学模型	(311)
8.2.2	采用多学科可行法的 RBMDO	(312)
8.2.3	采用单学科可行法的 RBMDO	(313)
8.3	基于概率论和凸集模型的 RBMDO 数学模型	(315)
8.3.1	不确定性的数学建模流程	(315)
8.3.2	可靠性综合评价指标的建立	(319)
8.3.3	多源不确定性条件下的 RBMDO 模型	(322)
8.4	考虑随机-模糊-区间混合不确定性的 RBMDO 建模	(326)
8.4.1	不确定性的数学建模	(326)
8.4.2	随机-模糊-区间混合不确定性下的可靠性评价	(327)
8.4.3	随机-模糊-区间混合不确定性下的多学科可靠性 设计优化模型	(330)
8.5	本章小结	(334)
	参考文献	(335)
第 9 章	多源不确定性条件下的多学科可靠性设计优化	(338)
9.1	基于可靠性的多学科设计优化	(338)
9.1.1	数学模型	(338)
9.1.2	优化流程	(339)
9.2	序列优化与可靠性评估策略及其应用	(342)
9.2.1	序列优化与可靠性评估策略	(342)
9.2.2	基于 SORA 和 CSSO 的多学科可靠性设计优化	(343)
9.2.3	基于 SORA 和 CO 的 RBMDO	(349)
9.2.4	基于 SORA 和 BLISCO 的 RBMDO	(351)
9.3	混合层次多学科可靠性设计优化策略 HSORA	(353)
9.3.1	HSORA 思想	(353)
9.3.2	HSORA 流程	(356)
9.3.3	HSORA 方法步骤	(357)
9.4	随机不确定性条件下的 HSORA	(358)
9.4.1	HSORA-RBMDO 策略	(358)
9.4.2	HSORA-RBMDO 步骤	(359)
9.4.3	HSORA-RBMDO 中的数学模型	(359)



9.5	随机-认知不确定性条件下的 AEMDO	(361)
9.5.1	HSORA-AEMDO 策略	(361)
9.5.2	HSORA-AEMDO 步骤	(362)
9.5.3	HSORA-AEMDO 中的数学模型	(363)
9.5.4	算例测试	(366)
9.6	随机-模糊-区间不确定性下的 SOMUA	(369)
9.6.1	单学科 SOMUA 介绍	(369)
9.6.2	并行计算的 SOMUA 方法	(372)
9.6.3	RFIMDO-PCSOMUA 方法与流程	(380)
9.6.4	RFIMDO-PCSOMUA 过程中的移动向量	(382)
9.6.5	RFIMDO-PCSOMUA 中的相关数学模型	(383)
9.6.6	数值算例验证	(385)
9.7	工程算例验证	(388)
9.7.1	航空齿轮传动系统算例	(389)
9.7.2	概念船设计算例	(395)
9.8	本章小结	(402)
	参考文献	(403)
第 10 章	RBMDO 发展展望	(406)
10.1	RBMDO 技术	(406)
10.1.1	构建精确的 RBMDO 模型	(406)
10.1.2	高效的 RBMDO 求解技术	(408)
10.2	多学科设计优化建模	(409)
10.2.1	传统多学科设计优化建模存在的问题	(410)
10.2.2	基于 MBSE 的多学科设计优化建模	(411)
10.2.3	基于 Modelica 的多学科设计优化建模方法	(412)
10.3	多学科设计优化环境	(414)
10.3.1	多学科设计优化策略的功能需求	(414)
10.3.2	基于 Web 服务的多学科设计优化框架	(417)
10.3.3	未来的多学科设计优化环境	(419)
10.4	多学科设计优化与先进技术的结合	(420)
10.4.1	基于多学科设计优化的 3D 打印设计技术	(420)
10.4.2	基于数据挖掘和大数据的多学科设计优化	(422)
10.5	本章小结	(423)
	参考文献	(424)



第 1 章 绪论

1.1 多学科可靠性设计优化的提出

随着科学技术的发展与人类需求的提高,工程产品和系统越来越复杂,研制开发难度日益增大。为适应日趋激烈的市场竞争,企业不断加大新技术的研发力度,以提高产品质量、缩短研制周期、降低研制成本。20 世纪 80 年代,美国航空航天界提出了解决复杂工程系统大规模、多耦合问题的多学科设计优化(multidisciplinary design optimization, MDO)方法,得到了广泛关注。多学科设计优化通过充分探索和利用系统中相互作用的协同机制来设计复杂系统和子系统,从系统全局的角度进行设计优化,从而达到提高产品性能和缩短设计周期的目的。多学科设计优化被认为是解决复杂产品设计优化问题的有效方法^[1],已经在航空航天、汽车、船舶等领域得到了应用,并产生了显著的技术与经济效益。

作为影响产品质量的关键性指标,可靠性已得到越来越多的重视,以可靠性为主体的相关设计理论与技术已成为提升企业核心竞争力的关键。产品的可靠性是指产品在规定的使用条件下、规定的时间内完成规定功能的能力^[2]。许多著名的国际大型企业和科研机构,如美国国家航空航天局(NASA)、波音公司、福特汽车公司等始终把产品的可靠性要求贯穿在产品的分析和设计中,不仅节约了大量的产品维护费用,而且显著地提高了产品的核心竞争力。

目前,我国以航空航天装备为代表的复杂工程系统与大型装备的可靠性设计水平与国际先进水平相比还有较大的差距,这已成为制约我国现代工业迅速崛起的瓶颈,造成企业开发的产品质量的先天不足,使“质量第一”“以质取胜”的经济战略方针在复杂工程系统中难以充分体现。因此,如何迅速提高我国企业的市场快速反应能力并创造出高质量、高可靠性的产品,赢得国际市场上的



主动权与核心地位,是一个必须正面回答的问题。21 世纪以来,我国军工领域在科研基地建设、科研立项、制定标准及型号研制等方面都非常重视可靠性工作。国家自然科学基金委员会也在多个学科支持了可靠性理论与方法研究的课题。科学技术部在“十一五”期间,在“863 计划”先进制造技术领域设立了可靠性专题项目“重大产品和重大设施寿命预测技术研究”。这些举措对鼓励和支持可靠性理论和应用研究,以及提高“中国制造”产品的可靠性起到了推动作用。同时,越来越多的科研院所和企业认识到在复杂工程系统与大型装备研发过程中实施可靠性工程以及多学科设计优化的重要性与紧迫性。

然而,早期的多学科设计优化并未考虑设计不确定性因素的影响,一般仅考虑确定性情况下的设计方案优化。确定性优化将设计结果推向了性能约束的边缘,为实际工程中无法回避的不确定性留下的空间很小,甚至可以说没留任何空间^[3]。换言之,如果实际工程中含有不确定性量,直接采用确定性优化结果作为设计方案,则极有可能会因不确定性量的波动而导致产品失败或失效。事实上,由于工程材料特性的离散性以及测量、加工、制造和安装误差等因素的影响,工程产品的系统参数具有固有的不确定性,同时具有由试验条件、研制周期、设计成本以及人类认知能力等因素所限而产生的认知不确定性。正是因为确定性的多学科设计优化忽略了实际工程中广泛存在的各类不确定性影响,其工程实用性受到了限制。

复杂工程系统与大型装备产品造价高昂,并且多处在恶劣的工作环境中,必须在设计过程中充分考虑各种不确定性带来的影响,这样才能保证复杂工程系统与大型装备安全可靠地工作。20 世纪 90 年代末,以提高复杂工程系统设计质量、考虑不确定性影响为目的的多学科可靠性设计优化(reliability-based multidisciplinary design optimization, RBMDO)成为多学科设计优化领域新的研究与应用热点。多学科可靠性优化设计充分考虑设计中存在的各种不确定性,将可靠性分析与多学科设计优化有机结合,使得复杂产品的设计在满足可靠性要求的同时可获得最优设计结果^[4]。

经过十余年的发展,目前,多学科可靠性优化设计的研究仍处在不断探索阶段。在这方面存在的主要问题有:

(1) 尚未全面地考虑实际工程设计中存在的多种多源不确定性因素,往往只是单一地描述与量化不确定性,或者只考虑某两种不确定性。

(2) 可靠性评价指标与体系无法针对复杂工程系统的多学科可靠性设计结果进行评估。传统的基于概率论、模糊理论或凸集理论的可靠性评价都是针对