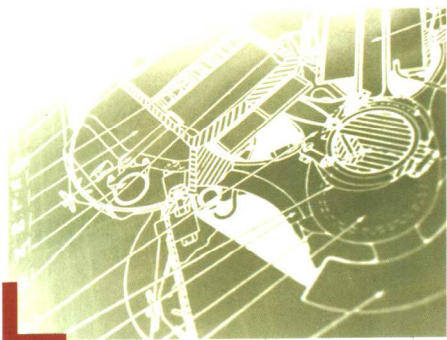


多学科 综合优化设计

原理与方法

◎ 钟毅芳 陈柏鸿 王周宏 编著



DUOXUEKE
ZONGHE YOUHUA SHEJI
YUANLI YU FANGFA

华中科技大学出版社
[http:// www.hustp.com](http://www.hustp.com)

多学科综合优化设计 原理与方法

钟毅芳 陈柏鸿 王周宏 编著

华中科技大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

多学科综合优化设计原理与方法/钟毅芳 陈柏鸿 王周宏 编著
武汉:华中科技大学出版社,2006年4月
ISBN 7-5609-3634-2

I. 多…

II. ①钟… ②陈… ③王…

III. 优化设计-建模

IV. TH

多学科综合优化设计原理与方法

钟毅芳 陈柏鸿 王周宏 编著

责任编辑:钟小珉 佟文珍

封面设计:刘 卉

责任校对:章 红

责任监印:熊庆玉

出版发行:华中科技大学出版社

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87557437

录 排:华大图文设计室

印 刷:华中科技大学印刷厂

开本:787×960 1/16

印张:12

字数:218 000

版次:2006年4月第1版

印次:2006年4月第1次印刷

定价:25.00元

ISBN 7-5609-3634-2/TH·140

(本书若有印装质量问题,请向出版社发行部调换)

内 容 提 要

本书的内容涉及多学科综合优化设计的建模技术、规划、求解策略、非光滑问题的优化算法,优化计算过程中的可控、可视、进化算法,以及优化设计后置处理等问题。

本书内容新颖,有较高的学术水平,可供机械设计及理论学科博士、硕士研究生和从事工程设计的技术人员学习、参考。

前言

多学科综合优化设计,是一种通过充分探索和利用工程系统中相互作用的协同机制来设计复杂产品及其子系统的方法论,是针对产品设计面临的问题以及优化方法本身不足所提出的一种设计思想,在理论上,它可以弥补传统优化设计技术上的不足。

多学科综合优化设计的基本思想,不是传统优化设计的单向延伸,也不是任何一种具体的算法,这种设计思想是随着科学技术的发展而变化的。目前,从理论上讲,它应是对工程系统设计过程中所包含的不同领域(如设计、制造、工艺、动力系统、控制系统和信息处理等)的研究成果的继承与发展的综合产物,是运用优化原理将这些领域合成为人类满意的工程系统的设计方法论。反映在应用中,它应能帮助设计师以尽可能高的效率获得工程系统尽可能优的整体设计方案或尽可能优的整体解。其研究方法和实现手段,则应是工程系统求解与分析的不同方法与工具(如建模、规划、传统优化算法、评价决策和其他分析工具等)的综合运用。

多学科综合优化设计,是将算法、寻优搜索策略和数据分析及管理集成在一起,来考虑如何对复杂的、由相互作用或耦合的子系统组成的系统进行优化设计的技术。该技术的主要内容包括以下两个方面。

(1) 分解与分析:用来考虑工程系统由哪些子系统构成或可分解成哪些子系统,每个子系统的变量、设计函数(目标函数和约束函数)的情况如何,子系统之间求解的次序、耦合程度和相互之间的输出与输入的灵敏度等。

(2) 综合与协调:根据子系统之间的各种关系和各自重要程度及计算情况,以人参与的形式对整个系统求解的进程进行调控。

从工程应用角度出发,人们还陆续提出了一些与传统优化方法显著不同的方法,如模拟退火算法、遗传算法和神经网络优化方法等。这些方法,特别是模拟退火算法和遗传算法,对模型的数学性态没有特殊要求,具有广阔的应用领域,是目前智能优化方法的主要研究内容。

工程优化设计中,还存在大量的非光滑问题,例如,许多经济决策和工程设计问题,诸如,在机构综合中要求机构的最大传动角最小(极大、极小问题),摩天大楼的抗震问题、机器人手臂的运动问题、大型挖掘机的动臂设计问题等,不仅目标函数是不可微的,而且约束函数也是不可微的。所有这些问题,都可归结为非光滑问题。

非光滑优化方法是在最近20多年里发展起来的。经典的优化方法一般要求函数是连续可微的,并满足较强的正则性条件。随着工程设计水平的提高,问题本身的不

可微性越来越突出,这类问题求解的困难程度远远超出了经典优化方法的范畴,正是在这种背景下,仅要求函数是局部 Lipschitz 连续的非光滑分析的理论研究迅速开展起来,并成为研究非光滑优化算法的理论基础。

非光滑优化算法目前大致可分为两大类:一类是专门针对特殊问题设计的算法,如针对复合非光滑优化问题由 Fletcher 提出的信赖域方法,针对极大、极小问题的极大熵算法等;另一类则是针对一般非光滑优化问题,仅要求函数是局部 Lipschitz 连续的,这类算法主要有次梯度法和捆集法。

本书的内容涉及多学科综合优化设计的建模技术、规划、求解策略、非光滑问题的优化算法、优化计算过程中的可控、可视、进化算法以及优化设计后置处理等问题。

本书是作者近年来在多学科综合优化设计领域中研究成果的总结。其主要特点是针对复杂、大型的工程设计需要处理多学科、多领域综合设计的问题,提出了相应的建模技术和求解策略;根据工程设计中大量存在的非光滑优化设计和智能优化设计问题,提出了相应的处理方法。

本书内容新颖,有较高的学术水平,可供机械设计及理论学科博士、硕士研究生和从事工程设计的技术人员参考。

本书共11章,其中第1、2、8、10章由钟毅芳编写,第3、4、7章由陈柏鸿编写,第5、6、9章由王周宏编写,第11章由钟毅芳、陈柏鸿、王周宏共同编写。此外,参加“多学科综合优化设计”课题研究和为本书提供素材的还有:陈义保、陈建江、赵明、彭立焱、刘立中、杜轩、司尚文等,在此向他们表示感谢。

作 者

2005年8月

于华中科技大学CAD中心

目 录

第1章 绪论	(1)
1.1 多学科综合优化的形成动因	(1)
1.2 多学科综合优化的研究概况与研究对象	(2)
1.2.1 多学科优化研究概况	(2)
1.2.2 多学科优化主要研究对象	(5)
1.3 复杂产品优化求解策略发展概况	(8)
1.3.1 层次型求解策略	(8)
1.3.2 非层次型求解策略	(10)
1.4 多学科优化的特征及目前存在的主要问题	(12)
1.4.1 计算复杂性	(12)
1.4.2 信息交换复杂性	(12)
参考文献	(13)
第2章 多学科综合优化设计体系	(17)
2.1 多学科综合优化设计定义及性质	(17)
2.2 多学科综合优化研究内容与理论基础	(19)
2.2.1 多学科优化研究内容	(19)
2.2.2 多学科优化涉及的理论基础	(21)
2.3 多学科综合优化设计功能体系结构	(23)
参考文献	(25)
第3章 多学科产品建模理论、方法与技术	(26)
3.1 复杂产品优化建模概况	(26)
3.2 多学科产品建模理论分析	(27)
3.2.1 多学科产品建模总论	(27)
3.2.2 多学科产品模型的描述方式	(28)
3.2.3 多学科产品模型的组成	(29)
3.3 多学科产品建模方法	(31)
3.3.1 多学科设计对象树的生成	(31)
3.3.2 设计对象各元素的确定与分类	(32)
参考文献	(38)
第4章 多学科产品模型处理与分解规划技术	(40)

4.1	引言	(40)
4.2	设计对象层次化	(40)
4.3	层次型规划	(42)
4.3.1	FDT 生成	(43)
4.3.2	层次型规划模型建立	(44)
4.3.3	层次型规划模型求解	(45)
4.4	分部件与分性能的非层次型规划	(51)
4.4.1	子任务关系分析	(51)
4.4.2	非层次型任务规划技术	(52)
4.5	优化计算模型生成	(54)
	参考文献	(56)
第5章	智能优化方法	(57)
5.1	概述	(57)
5.2	神经网络优化方法	(58)
5.3	模拟退火算法	(62)
5.4	遗传算法	(64)
	参考文献	(67)
第6章	非光滑优化方法	(69)
6.1	非光滑分析的基本理论	(69)
6.2	次梯度方法	(73)
6.3	捆集法	(76)
6.3.1	共轭次梯度法	(76)
6.3.2	ϵ -次梯度捆集法	(78)
6.3.3	割平面捆集法	(80)
	参考文献	(82)
第7章	多学科优化策略及相关变量的处理	(84)
7.1	学科描述及多学科求解流程	(84)
7.2	学科优解组合为整体优解的条件研究	(86)
7.3	耦合因素表现形式分析	(89)
7.4	多学科二级协调策略	(91)
7.4.1	层次型多学科二级求解技术	(91)
7.4.2	非层次型改进二级求解技术	(94)
7.5	非层次型多学科协同求解策略	(96)
7.5.1	协同求解的基本思想	(96)
7.5.2	系统层构造	(98)

7.5.3	各学科层的改进	(99)
7.5.4	协同优化模型与原模型的一致性分析	(100)
7.5.5	协同优化求解步骤	(101)
7.6	求解策略的算例	(102)
7.7	学科之间相关程度分析	(107)
7.8	相关变量影响性质	(108)
7.8.1	相关变量的组成及分类	(108)
7.8.2	相关变量影响性质分析	(109)
7.8.3	冗余相关变量的处理及案例	(112)
参考文献		(114)
第8章 基于响应面技术的多学科优化设计		(116)
8.1	响应面法的基本原理	(116)
8.2	基于CCD 响应面技术的多学科优化设计	(117)
8.3	基于人工神经网络响应面技术的多学科优化设计	(121)
8.3.1	基本思想和算法模型	(121)
8.3.2	基于神经网络响应面技术的MDO 算法	(124)
8.3.3	算法实例	(129)
参考文献		(136)
第9章 优化计算中的可视化和可控化		(137)
9.1	概述	(137)
9.2	优化算法的分类、选择与开发	(139)
9.3	系统的功能分析与总体结构	(142)
9.4	可控可视功能的具体实现	(147)
参考文献		(151)
第10章 一种多学科综合优化设计支持平台简介		(152)
10.1	多学科综合优化支持平台系统结构	(152)
10.2	建模工具模块	(153)
10.3	规划工具模块	(155)
10.4	协同寻优模块	(157)
10.5	可控可视模块	(159)
第11章 工程实例		(164)
11.1	叉车转向系统的综合优化	(164)
11.1.1	叉车的基本结构及设计要求	(164)
11.1.2	叉车转向系统的数学模型建立	(166)
11.1.3	叉车转向系统的分性能协同求解	(169)

11.2	抽油机综合优化·····	(170)
11.2.1	运动及动力分析 ·····	(171)
11.2.2	抽油机模型建立 ·····	(175)
11.2.3	抽油机分部件规划及协同求解 ·····	(176)
11.3	RSSR 空间机构综合问题的求解 ·····	(178)
	参考文献·····	(182)

第1章 绪论

1.1 多学科综合优化的形成动因

随着计算机技术的广泛应用,以及线性规划、非线性规划和动态规划技术的成熟,20世纪六七十年代人们已经利用优化技术在很多领域取得了累累硕果。自70年代末、80年代初以来,随着市场竞争的激烈化,人们需要决策的因素即需要优化的对象越来越复杂,工程产品包含的方方面面导致难以采用传统优化技术来解决许多实际问题。

首先,从工程问题本身来考察,由于复杂工程优化设计问题的设计空间极度复杂,导致设计人员难以有效对大型复杂系统(如航空器、汽车等系统)进行优化设计。虽然优化算法从理论上讲能够解决有限维问题,但不同类型问题的综合(如不同函数性态、不同变量类型等等问题的相互交织),使得许多算法无能为力或效率低下(即便采用遗传及进化等对问题本身性态无特殊需求的算法)。因此,除了发展可靠的优化算法之外,还需要清楚复杂工程产品所包含的不同因素及这些因素之间的相互关系,进而寻求解决问题的途径。其中,不同因素之间关系的处理往往是能否得到整体解的关键,这也是难以采用传统优化技术的重要原因之一。因此,得到产品整体优化结果的困难不仅在于优化算法本身,而是需要有新的优化理论与方法,如需要有更为合适的产品优化建模及规划技术、寻优搜索策略,等等。

其次,从设计方法学的角度来考察,人们在不断改进设计方法与制造技术的过程中,逐渐摒弃了传统的串行开发模式,取而代之改用集成的具有并行特点的开发策略,如CIMS、并行工程(concurrent engineering, CE)和虚拟设计,等等。优化技术在面临新的设计策略与途径时,以及计算机网络技术日益发展时,势必也要做出相应的变革才能满足复杂的工程设计需求,才能提高设计的柔性、灵活性和自动化水平,以适应知识经济条件下的复杂产品创新设计的要求。这无疑是优化领域面临的全新课题,同时也是CAD领域的一个前沿课题。

多学科综合优化设计(multidisciplinary design optimization, MDO),是借鉴并行协同设计学及集成制造技术的思想而提出的,它将单个学科(领域)的分析与优化同整个系统中互为耦合的其他学科的分析与优化结合起来,帮助我们将CE的基本思想贯穿到整个设计阶段。其主要思想是在复杂产品设计的整个过程中,利用分布式计算机网络技术来集成各个学科(子系统)的知识以及分析和求解工具,应用有效的

优化设计策略,组织和管理整个优化设计过程。其目的是通过充分利用各个学科(子系统)之间相互作用所产生的协同效应,获得系统的整体最优解,并通过实现并行设计,来缩短设计周期,从而使研制出的产品更具有竞争力。实际上,多学科综合优化设计就是一种通过充分探索和利用工程系统中相互作用的协同机制来设计复杂产品及其子系统的方法论^[1]。其宗旨与并行工程的思想不谋而合,它是用优化原理为产品的全生命周期设计提供一个理论基础和实施方法。故这种技术的思想一经提出,就被认为是“能够帮助设计师解决困惑的重要途径”^[2]。MDO 中,对于学科,除了表示不同领域或学科之外,还是产品设计的不同阶段或所包含的部件及性能等等的泛称。

1.2 多学科综合优化的研究概况与研究对象

1.2.1 多学科优化研究概况

1991 年初,美国 AIAA(美国航空航天研究院)分管多学科设计优化的技术委员会(Technical Committee on Multidisciplinary Design Optimization, TC-MDO)就优化的研究现状和 MDO 研究的迫切性发表了白皮书^[3]。同年,针对大型复杂系统优化设计的国际结构优化设计协会(International Society for Structural Optimization, ISSO)在德国成立,并于 1993 年更名为国际结构及多学科设计优化协会(International Society for Structural and Multidisciplinary Optimization, ISSMO);该协会于 1994 年联合 AIAA、NASA(美国宇航局)等组织在美国 Florida 举行了首次正式会议,其首次成员会议于 1995 年 9 月在德国举行。该协会的宗旨是:鼓励和促进结构优化及相关课题的研究,鼓励优化方法在工程中的应用及相关应用软件的开发,促进不同学科优化技术的交流,扶持优化在多学科协同设计中的应用,提供交流研讨会的组织及论坛和制定相应交流与传播的规范,促进第三世界结构优化的教学等六个方面。自此以后每隔两年举行一次成员会议。可以说,ISSMO 的成立是优化领域中非常重大的事件,标志着综合优化设计思想已经渗透到现代设计的各个环节和阶段。经过近十年的发展,MDO 技术已取得了很多重要进展并得到一定程度的应用。其中一些研究成果如表 1.1 所示(根据文献[4]整理)。

从表 1.1 可以看出,因其具有产生巨大经济效益的潜能,MDO 技术的研究得到了很多国家政府机构、企业界和学术机构的大力支持,涉及的领域包括航空、武器、汽车、计算机、通信、运输、机械、医疗以及建筑等等。从表 1.1 中亦可看出,MDO 技术研究主要包括 MDO 理论与方法、MDO 平台开发以及复杂产品的 MDO 应用等方面。

表 1.1 MDO 的主要研究机构及成果

国家	研究机构	研究对象与成果
英国	The University of Sheffield	进化计算;使MDO应用同现存工业结构相协调
	Durham University	发展模仿骨骼生成来进行结构优化的MDO方法
	University of Southampton	在涡轮叶片和低振动人造卫星结构设计等方面进行MDO方法的研究
	Synaps, DASA 和 Airbus	利用MDO技术改善飞行器机翼的形状设计
	U. K. Defence Evaluation and Research Agency	利用MDO技术进行飞行器机翼和机体的综合设计
法国	Université Pierre et Marie Curie	汽车防撞性的MDO应用
	Université De Nice	利用图像处理技术在拓扑优化方面取得显著成果
德国	Universität Siegen	MDO的研究用于亚毫米级望远镜及铁路运输工具
	Universität Braunschweig	MDO应用于裂缝及裂纹识别、质量控制、结构可靠性监控等方面
	Universität Stuttgart	开发用于自适应结构设计的MDO方法
澳大利亚	The University of Sydney	开发薄壁及冷色结构的MDO软件
葡萄牙	The University of Porto	预制梁方面的MDO方法
瑞典	Saab Ericsson 空间中心	设计初期和设计后期MDO软件的成功应用
波兰	科学研究院	MDO用于发展仿生机制,探讨人体骨头内部结构及外部特征,并应用于骨植入技术
印度	科学研究院	进化优化方法,并应用于VLSI芯片设计
日本	Osaka Prefecture University	卡车架脉冲分配器手柄MDO方法的应用
印度尼西亚	Teknologi Bandung 研究院	利用MDO技术设计高级水泥材料,其成果应用于Dassault Aviation、Renault 等公司
中国	大连理工大学	声-结构耦合设计优化

续表

国家	研究机构	研究对象与成果
美国	波音公司	描述诸如行为、性能、人机因素、可靠性和系统成本等多多样性、多目标 MDO 公理化方法;其防撞性工业软件的成功实施带来可观经济效益;开发出带有起搏器的双向通信天线
	Altair 工程公司	OptiStruct 软件成功用于带有制造工艺约束的拓扑优化
	Northeastern University	开发可执行程序 and 可视化方法以支持设计决策
	The University of Arizona	探讨利用 MDO 进行敏捷型复合机翼的设计方法,用于改善颤动特性、气流响应和其他性能
	University of Florida	应用 MDO 开发支柱——撑杆结构机翼的超音速飞机,与传统悬臂梁结构机翼飞机相比,能节省近 20% 的燃料
	The University of Iowa	开发出 MDO 设计过程程序并融入机械多体动力学 ADAMS 软件
	Georgia Tech	空间飞行器及火箭概念设计阶段的 MDO 方法;联合 Lockheed Martin Tactical 飞行器系统及空军武器实验室进行 MDO 不同设计阶段的不确定性建模
	The University of Illinois	将 MDO 研究与 3D 沉浸式虚拟现实技术结合,改观设计输入、输出信息的界面;其 MDO 方法对诸如快速成型、铸造、焊接、聚合体挤压与注入模具等制造工艺影响很大
	The University at Buffalo	研究产品及设计空间可视 MDO 方法,以支持设计决策
	Rice University Boeing 和 Mobil Oil 公司	它们在近似模型方面进行合作研究,以加强不同学科的计算机仿真技术
	The University of Pennsylvania	开发自适应机构拓扑优化的 MDO 方法,并用于微电子机械系统
	Ohio University	获得能够解决非连续性约束和大系统优化问题的鲁棒性算法专利
	Sandia 国家实验室	对存储设计问题进行并行优化

NASA-Langley 实验室

空军工业研究院及其智能中心

目前MDO研究的基本状况是,国外一些发达国家,在MDO原理、方法、应用及优化算法的研究等方面,已逐渐形成一个有机的整体,对不同学科的分析及计算软件已规范化并进行集成,其成果已面向应用且日趋成熟。而国内,这方面的研究开展较慢,研究内容也较单一和零散,除大连理工大学之外,南京航空航天大学对此也有所跟踪^[8],广义优化设计^[5]的某些思想也与多学科综合优化有相似之处;此外,在2000年初,“十五”国防基础科研项目,也准备将多学科优化设计列为重点攻关课题之一;其他相关研究则偏向某些侧面,如系统分解及其关系分析^[6,7]、结构分析中的近似技术^[8]、系统建模与协调控制策略^[9]、多目标优化方法^[10]和某些特殊系统的优化算法^[11]等等,而这些研究远不能称得上是多学科综合优化。与国外相比,国内在该方向的投入力度、研究深度及应用广度都相差较远,许多技术仍需开拓。

1.2.2 多学科优化主要研究对象

根据多学科综合优化问题的特点,Sobieski等人^[1]将其研究内容归纳为如下几个方面:建模方法、基于设计过程的分析、近似方法、灵敏度分析方法、分解规划方法、优化求解策略及构造系统集成平台,等等。本节将对以上几个方面进行概述,并对MDO中优化算法的需要进行简要说明。

1. 建模方法

工程系统中数学模型的软件实施通常是用一些代码组装的模块,每一模块表现为系统某一部件或某一性能等不同方面的某种物理现象,即一模块代表某一方面的功能。模块之间数据的传递按照系统内在的耦合关系进行,这些数据的传输,往往需要将其处理作为整个系统开销的重要方面。但现代设计需要强调成本等经济性因素,计算代价显得日益重要。因此,在MDO问题的建模中,Unger等人提出可根据需要在同一功能而复杂程度不同的模型之间进行选择,即可变模型技术。该技术建模方法包括三个主要原则:首先,不违反同一设计问题相同理论的前提下,MDO模型可比单个学科模型的设计细节要少一些;其次,在保证必要精度的前提下,MDO模型的复杂程度可比单学科的要低一些;第三,特殊场合时,同一学科不同复杂程度的模型可同时使用,较复杂的用于学科本身的分析与计算,而简单的则用于描述与其他学科的耦合。因此,需要研究复合知识的计算机内部表达和集成处理技术,开发具有自动与半自动相结合的柔性建模、图形建模和智能建模(包括自适应建模)等工具,并研究产品全生命周期的建模技术,以适应MDO的不同需要。

2. 设计过程重分析

通过提出及回答“What if”问题,工程设计才得以不断发展,MDO也不例外。在MDO发展过程中,需开发大量具有特殊属性的分析工具,这些属性包括:从减少花费和尽可能提高近似精度的角度选择不同需求程度的分析模块;因设计改变而只影响部分初始分析时能快速进行重分析;输出对输入的灵敏度计算;设计过程中数据管

理和可视化;等等。在MDO中,往往需要将通过输入/输出相互耦合模块的代码集中,并连同各代码输入/输出最新计算结果一起归档,存入数据库;当改变某输入而需要得到相应的输出时,尽可能地利用数据相关信息通过逻辑推理确定哪些模块受到影响,然后再执行相应的分析模块,这样就可尽量减少计算量。重分析技术已成为普遍应用的工业标准,这主要归功于信息的即时反馈。

3. 近似方法

对多学科分析来讲,设计空间的直接搜索法存在如下几个原因故而不适用于MDO方法。首先,对任何有大量设计变量的问题,通过直接搜索则计算目标和约束的计算量很大,为能较快得到目标与约束值,通常不能运行精确的MDO模型。其次,不同学科的分析通常在不同的计算机上执行,甚至在异地执行,使用集中搜索的程序使得通信量及安全性成为非常重要的因素。第三,因某些学科会产生一些噪音或失真,如不使用平滑的近似技术就迫使我们不得不使用低效的非梯度方法。因此,对于MDO问题来讲,需要将直接搜索和某些能容易计算目标或约束的近似方法结合起来。而在应用于工程系统的传统优化近似技术中,线性近似和二次近似经常使用,但这些技术通常为局部近似。为此,需开发适用于MDO的全局近似方法。目前,响应面近似法(response surface)在优化技术MDO应用中颇为流行^[22~25],该技术常将某些分析及计算复杂的目标和约束用一些较为简单的方程来替换,且可从全局近似学科之间耦合。这种近似方法与神经网络技术相结合时,其精度比较可靠。

4. 灵敏度分析方法

MDO要求其灵敏度分析数据可用来跟踪学科之间相互影响的功能。Sobieski等认为,原则上,MDO问题的灵敏度分析方法可使用在单学科内进行灵敏度分析的同样技术,然而在许多实际例子中,应用MDO系统进行灵敏度分析时,因系统分析具有整体规模的特性,使得不能简单地扩展单学科灵敏度分析方法。20世纪90年代初,用于耦合系统灵敏度分析的全局灵敏度分析方法(global sensitivity equation, GSE)及其高阶导数由Sobieski^[12]导出,GSE是一种能有效计算相互耦合多学科灵敏度的方法,该方法直接从隐函数原理推导而来,精确性较高。其算法有两种变型:一种是基于每个学科控制方程残数的导数,这里每个学科为系统数学模型的一个模块;另一种是基于各学科输出对其输入的导数。第二种更易于操作,这种变型其始于计算系统级数学模型中每个模块输出对其输入的导数,并使用适合于模块分析的灵敏度技术,而各模块本身灵敏度分析是相互独立的,且能并行执行。GSE正则化方法可参见文献^[13],在正则化基础上,Bloebaum^[14]对学科之间耦合程度进行了分析。除GSE之外,基于神经网络的灵敏度分析方法^[15]也有巨大的发展潜能。

5. 分解方法

复杂系统往往具备如下几个特征:数学模型的复杂性(如高度非线性)使得数值优化往往难以得到可信赖的稳定解;计算量大;系统本身的复杂性造成对系统难以认

知和求解。分解协调是复杂系统问题求解的有效方法,协调对应于分解,分解为基础。分解的目的就是把一个复杂的大系统分解为多个相互较为独立、容易求解、规模较小的子系统(学科)。系统分解既可以从建立数学模型的过程中,为便于计算进行分解^[16],也可以从便于管理的角度进行分解^[17],故系统分解不是一个单纯的理论问题或数学问题,对不同设计阶段或不同系统,其分解方式各有侧重,有时甚至需要将多种分解方式结合起来。分解之后,各子系统(学科)之间往往存在层次与非层次两大类基本关系。

6. 求解策略

需要协调是因为分解之后各子系统(学科)之间存在层次型或非层次型相互耦合的因素。在层次型模型中,只有父子模型之间存在耦合,同一级别的子模型之间没有耦合。而在非层次型模型中,耦合因素基本上可以分为两大类:系统变量和耦合变量;系统变量同时影响多个子模型,耦合变量为某子模型的计算结果但对其他子模型产生影响。下一节将重点总结这两种不同的模型的求解策略。

7. 集成平台及界面

MDO 不是“按按钮”式设计,而设计平台对设计师控制设计过程并加入其判断和创新来说就尤为重要。在融入MDO 技术并被企业使用的软件系统中,不同层次的界面非常关键。但由于这些软件几乎全是专用的,且没有发表可供参考的信息,故难以了解当前实施的软件系统中是否存在界面技术的共同准则。Sobieski^[1]通过了解一些系统之后,指出它们某些共同之处:其一,相关变量和独立变量选择的多样性,这些变量用于产生图形、轮廓及表面曲线、投影和动画等等,其中,动画不仅用来显示诸如振动等动态特性,而且还用来显示经过一系列迭代之后结果的变化情况;其二,在工程数据显示方面,还可显示工程任务之间数据流、工程实施状况及计划等。这些相似之处体现出两种特征:一是试图支持设计师持续性思维并促进其创造性及洞察力;二是支持设计小组成员之间的数据通信。

8. 优化算法

优化算法一直是优化设计领域研究的重点。现有的优化算法,可归纳为两大类方法:一是具有严格数学定义的经典优化法,如梯度法、内点法^[18]等;二是进化方法,如模拟退火、神经网络、遗传算法和演化算法^[19~21]等。

算法研究主要从两方面着手。首先,开发新算法。在工程优化设计中,尤其是在多学科优化中,往往问题性态更为复杂,维数急剧增加,如难解的组合优化问题(如生产调度问题、大规模集成电路板的布线问题等)、非光滑不可微优化问题(如大型叉车、挖掘机等复杂机械的最优设计问题)、系统动态设计和非数值优化问题等,对这些问题,难以实现优化。因此,需要进一步研究、开发出一些能解决设计全过程中出现的难解、完全NP、不可微非光滑等问题的高效的、对数学性态没有特殊要求的、具有并行处理特点的优化算法,以适应MDO 问题发展的需要。为解决这些问题,近十年来