

MULTIDISCIPLINARY DESIGN OPTIMIZATION OF SHIP HULL FORM

船体型线多学科设计优化

刘祖源 冯佰威 詹成胜 编著



國防工業出版社
National Defense Industry Press

船体型线多学科设计优化

Multidisciplinary Design Optimization of Ship Hull Form

刘祖源 冯佰威 詹成胜 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

船体型线多学科设计优化 / 刘祖源, 冯佰威,
詹成胜编著. —北京: 国防工业出版社, 2010. 11
ISBN 978 - 7 - 118 - 06792 - 7

I. ①航... II. ①刘... ②冯... ③詹...
III. ①船体 - 型线 - 设计 IV. ①U661.31

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 202627 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 880 × 1230 1/32 印张 6 $\frac{3}{4}$ 字数 192 千字

2010 年 11 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 24.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 68428422
发行传真: (010) 68411535

发行邮购: (010) 68414474
发行业务: (010) 68472764

前 言

船体型线设计是船舶总体设计的重要内容之一,对船舶的技术性能和经济性有重大影响。将优化技术应用到型线设计之中,是提高型线设计质量的重要手段。传统的优化方法基本上是从单项性能指标出发来评价船舶水动力性能的优劣,其他性能指标作为约束条件,这种传统方法对各水动力性能的考虑非常不均衡,不能有效综合集成各性能进行协同优化,因此无法获得各种性能综合平衡的设计。

多学科设计优化(Multidisciplinary Design Optimization, MDO)方法是近年来在机电工程设计领域迅速发展起来的一种解决复杂工程系统和子系统的先进设计方法。其主要思想是在复杂系统设计的整个过程中集成各个学科的知识,应用有效的设计、优化策略和分布式计算机网络系统,来组织和管理复杂机电产品设计过程。通过充分利用各个学科(子系统)之间的相互作用所产生的协同效应,获得系统整体最优的设计结果(即产品质量或性能更好),通过实现并行设计优化来缩短设计周期,从而使研制出的工程产品在国际市场上更具有竞争力。该方法起源于航空航天领域,目前世界航空工业已经将多学科设计优化作为产品设计中一项必不可少的手段。船舶领域对该技术的研究大多集中在欧美的一些国家,虽然起步较晚,但进展迅速,其研究成果已在船舶设计中得到了应用。

本书以船体型线优化设计为对象,重点阐述实现船体水动力性能多学科设计优化的一些关键基础问题。全书共分8章。第1章从基本概念入手,介绍了多学科设计优化的基本理论、主要研究内容和研究方法;第2章介绍了船体型线的特点以及国内外船体型线优化的研究进展,阐述

了船体型线多学科设计优化的基本问题;第3章论述了船型参数化建模方法,它是实现船体型线自动生成和修改的必要手段,是船体型线多学科设计优化的基础,重点给出了船型融合方法的理论基础及程序实现;第4章分别介绍了与船体型线最直接相关的阻力性能、耐波性能和操纵性能等船舶水动力性能的基本理论和数值计算方法,并开发了部分性能分析程序,在此基础上利用集成框架(iSIGHT)实现了船型设计与各性能分析程序的集成,最后利用单学科可行方法对优化系统进行了重构;第5章论述了多学科设计优化中经常用到的近似方法及变复杂度方法,多学科设计优化涉及的学科多、变量多,如果每一个学科都采用精确模型分析,将使多学科设计优化过程无法进行下去,近似方法及变复杂度方法是解决这一问题的有效途径;第6章介绍了多种MDO方法,并以某数学函数的优化为例,对部分优化方法进行了比较;第7章对各类集成框架进行了介绍,剖析了国外典型的MDO计算环境,提出了船舶MDO计算环境的体系框架;第8章以船体型线优化设计为目标,建立了多学科设计优化平台,并通过实例进行了验证。

本书的主要特点是结合船体型线优化设计的实际,重点阐述多学科设计优化的具体应用,论述解决问题的实现途径,并给出了相关的实例。通过详细介绍作者所在课题组开发的SHIPMDO平台,为船舶多学科设计优化的进一步深入研究打下了基础,提供了借鉴。

本书第1章由刘祖源编写,第2章由刘祖源、冯佰威编写,第3章、第7章、第8章由冯佰威编写,第4章由詹成胜、冯佰威编写,第5章由常海超编写,第6章由詹成胜编写。全书由刘祖源统稿和审核。

本书可作为船舶与海洋工程专业博、硕士研究生的参考资料,也可供船舶与海洋工程专业及相关专业的研究人员和工程技术人员参考。

作者及所在课题组在船舶多学科设计优化方面作了初步的探索,取得了一些成果,但距深刻理解多学科设计优化方法和成熟运用该方法,还有很长的路要走,因此书中肯定有不少的错误,望各位读

者不吝赐教。

将多学科设计优化方法应用到船舶研究领域不是一蹴而就的事情,需要造船界同仁的共同努力!诚望本书能够起到抛砖引玉的作用,吸引更多的学者一起研究,一起进步,为中国船舶科技进步贡献力量。

本书得到科技部 863 项目“基于多学科的船舶性能分析与优化设计技术研究”(资助号:2006AA04Z124)的资助。

编著者

2010 年 6 月

目 录

第 1 章 多学科设计优化的基本理论	1
1.1 多学科设计优化理论的发展	1
1.1.1 多学科设计优化的基本思想和内涵	1
1.1.2 多学科设计优化的研究发展概况	2
1.2 多学科设计优化的基本概念	4
1.2.1 多学科设计优化的定义	4
1.2.2 多学科设计优化的基本描述	5
1.2.3 多学科设计优化的特点	6
1.3 多学科设计优化的研究内容和方法	10
1.3.1 多学科系统建模	10
1.3.2 设计过程重分析	10
1.3.3 近似方法	10
1.3.4 敏度分析方法	11
1.3.5 分解方法	11
1.3.6 求解策略	11
1.3.7 集成平台及界面	11
1.3.8 优化算法	12
参考文献	12
第 2 章 船体型线设计原理与方法	14
2.1 船体型线的主要特点及地位	14
2.2 船体型线设计的基本方法	14
2.3 船体型线多学科设计优化的基本问题	17
2.3.1 传统船舶设计方法的不足	17

2.3.2 船型多学科设计优化关键问题	20
2.4 船体型线优化的国内外研究进展	21
2.4.1 国内船型优化研究进展	21
2.4.2 国外船型优化研究进展	23
参考文献	32
第3章 船型参数化建模技术	38
3.1 概述	38
3.1.1 参数化建模的基本思想	38
3.1.2 参数化驱动的数学模型	38
3.1.3 参数化建模的方法	39
3.2 船体型线建模方法	41
3.2.1 部分参数化建模方法	43
3.2.2 完全参数化建模方法	48
3.2.3 不同建模方法的比较	50
3.3 船型融合方法及程序的开发	50
3.3.1 理论基础	51
3.3.2 船型修改融合方法	52
3.3.3 模型生成器的开发	54
3.3.4 船型融合程序验证	56
参考文献	64
第4章 船舶水动力性能分析及优化系统重构	67
4.1 概述	67
4.2 水动力性能学科分析	68
4.2.1 阻力性能分析	68
4.2.2 耐波性能分析	74
4.2.3 操纵性能分析	81
4.3 船舶水动力性能多学科设计优化集成	85
4.3.1 数据集成	85
4.3.2 过程集成	87
4.4 多学科设计优化解耦方法	94

4.4.1	多学科可行方法	94
4.4.2	单学科可行方法	95
4.4.3	协同优化算法	96
4.4.4	并行子空间优化算法	98
4.5	船型优化系统的重构	100
	参考文献	105
第 5 章	近似方法及变复杂度方法	106
5.1	概述	106
5.2	近似方法	107
5.3	变复杂度方法	112
5.4	变复杂度方法在船型优化中的应用	113
5.4.1	船型优化变复杂度建模	113
5.4.2	系统优化模型	113
5.4.3	优化结果	116
	参考文献	117
第 6 章	多学科设计优化方法	118
6.1	传统的优化方法	118
6.1.1	无约束优化算法	118
6.1.2	有约束优化方法	121
6.1.3	传统全局优化方法	122
6.1.4	多目标优化方法	123
6.2	现代优化方法	124
6.2.1	模拟退火算法 (Simulated Annealing, SA)	125
6.2.2	遗传算法 (Genetic Algorithms, GA)	128
6.2.3	多目标遗传算法	133
6.3	优化方法混合策略	141
6.3.1	船型优化对优化方法的要求	141
6.3.2	混合优化方法	143
6.4	数学函数的测试实例	145
	参考文献	147

第7章 船舶多学科设计优化计算环境	148
7.1 MDO 计算环境需求	148
7.2 MDO 集成框架	151
7.2.1 iSIGHT	151
7.2.2 ModelCenter	153
7.2.3 AML	154
7.3 MDO 计算环境实例分析	156
7.3.1 美国 DD-21 驱逐舰多学科设计优化环境体系结构	156
7.3.2 美国国家宇航局 AEE 工程环境	158
7.4 船舶多学科设计优化计算环境体系结构的开发	161
参考文献	162
第8章 船体型线多学科设计优化平台的开发	163
8.1 多学科设计优化平台功能需求分析	163
8.1.1 船型主尺度的确定对 MDO 的需求	163
8.1.2 船型精细优化对 MDO 的需求	165
8.2 多学科设计优化平台的框架设计	165
8.3 平台模块的详细设计	167
8.4 平台的使用	180
8.5 SHIPMDO 平台实例测试	187
8.5.1 9000t 油船的多学科设计优化(0 水平优化)	187
8.5.2 46000t 油船耐波性能优化(0 水平优化)	192
8.5.3 46000t 油船阻力、操纵、耐波性能综合 优化(0 水平优化)	193
8.5.4 1300TEU 集装箱船球鼻首阻力性能 优化及模型试验(1 水平优化)	196
参考文献	204

第1章 多学科设计优化的基本理论

人类认识事物大都经过这样一个过程:初次面对复杂现象,往往是在保留其物理本质的前提下,尽可能地简化模型,以求应用现有理论来解释它;随着对该现象认识的加深,会追求对其细节的探究;而当把各个细节认识清楚以后,又倾向于综合分析其性质。多学科设计优化理论和方法就是人类认识发展到探求系统性能整体优化阶段的产物。本章主要介绍多学科设计优化理论的发展及基本概念、基本研究内容。

1.1 多学科设计优化理论的发展

1.1.1 多学科设计优化的基本思想和内涵

多学科设计优化(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,帮助我们将并行工程(Concurrent Engineering, CE)的基本思想贯穿到整个设计阶段。其主要思想是在复杂系统设计的整个过程中,利用分布式计算机网络技术来集成各个学科(子系统)的知识及分析和求解工具,应用有效的设计/优化策略,组织和管理整个系统的优化设计过程。其目的是通过充分利用各个学科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。其优点在于可以通过实现各学科模块化并行设计来缩短设计周期,通过考虑学科之间的相互耦合来挖掘设计潜力,通过系统的高度集成来实现产品的自动化设计,通过各学科的综合考虑来提高可靠性,通过门类齐全的多学科综合设计来降低研制费用。

多学科设计优化就是一种通过充分探索和利用工程系统中各子系统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。其宗旨与并行工程不谋而合,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^[1]。

1.1.2 多学科设计优化的研究发展概况

MDO 作为一个独立的研究领域,于 20 世纪 80 年代后期逐渐形成。其创始人是美籍波兰人 J. Sobieszczanski-Sobieski。1982 年,在研究大型结构优化问题求解的一篇文献中^[2],他首次提出了 MDO 的思想;在其随后发表的一系列文章中,对 MDO 问题进行了进一步阐述,并提出了基于灵敏度分析的 MDO 方法^[3,4]。

MDO 的提出在学术界引起了极大的关注。1986 年,由美国 AIAA/NASA/USAF/OAI 等 4 家机构联合召开了第一届“多学科分析与优化”专题讨论会,之后该学术讨论会每两年召开一届,目前这个会议已经演变成了国际性学术会议。1991 年,美国 AIAA(American Institute of Aeronautics and Astronautics)分管多学科设计优化的技术委员会就优化的研究现状和 MDO 研究的迫切性发表了白皮书。同年,在德国成立了国际结构优化设计协会(International Society for Structural Optimization, ISSO),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(National Aeronautics & Space Administration)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 12 月在德国举行,自此以后每隔两年举行一次成员会议。ISSMO 的成立是优化领域非常重大的事件,标志着综合优化设计思想已渗透到现代设计的各个环节和阶段。

1994 年,美国国防部高级研究计划局(the Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)将“基于仿真的设计”(Simulation Based Design, SBD)、“智能产品模型”(Smart Product Model, SPM)等概念和技术,用于飞机、卫星、舰艇、陆上运载工具、潜艇等复杂产品系统的概念设计、设计制造一体化,并进一步验证和改进多学科协同设计工程的技术概念和实

施技术。由于多学科设计优化技术在 SBD 之后的迅速发展并在美国国防工业中得到了实际应用,后来的 DARPA 计划在应用 SPM 的协同工程中,增加了多学科设计优化技术,进一步提高了复杂产品的设计质量。波音公司在“设计、制造、可生产性、仿真”计划 DMPS(Design, Manufacturing, Producibility, Simulation)中,以某歼击机机翼扭矩盒设计为工程背景,采用和改进了 SPM 技术。美国将新型驱逐舰 DD-21 的开发与建造列入基于仿真的采办(Simulation Based Acquisition, SBA)的示范工程项目,1998 年开始进入开发阶段,当时预定 2004 年完成概念设计,并在 2004 年开始并行地进行全面的详细设计与生产,2009 年完成 32 艘 DD-21 级舰只交付组建舰队的任务^[5]。当前,在 DD-21 项目中 MDO 主要应用于概念设计阶段的总体设计方面(参考 7.3.1 节)。

在我国,有些学者已经对 MDO 的基本理论进行了研究,并且在航天、航空及船舶领域进行了一定应用工作。余雄庆对 MDO 优化过程进行了综述,并运用 MDO 进行无人机的设计^[6];陈小前运用响应面法(Response Surface Method, RSM)进行了飞行器的概念设计,并提出了 MDO 在飞行器设计中运用的方法与步骤^[7];陈琪锋研究了协同进化 MDO 算法,并将其运用于导弹总体参数化设计和卫星星座系统的 MDO 中^[8];罗世彬将 MDO 方法运用到高超声速飞行器机体/发动机一体化设计优化中,取得了满意的结果^[9]。在船舶研制领域,刘蔚将多学科设计优化方法应用于 7000m 载人潜水器的总体设计中,以达到在设计要求和满足性能指标的约束下,得到最优的总体性能和总布置的设计结果^[10,11]。操安喜采用基于响应面近似模型和遗传算法(GA)对某深海载人潜水器耐压球壳进行多目标优化设计^[12]。胡志强采用协同优化算法,同时兼顾减小碰撞力密度、降低航行阻力和保证结构强度这三者的性能要求,优化了一艘大型集装箱船的球鼻首设计。在满足船东利益和船级社规范要求的基础上,合理地降低碰撞力密度,获得了综合各方效益的和谐解^[13]。潘彬彬对多学科设计优化的理论进行了介绍并且对国内的一艘实船的概念设计建立了多学科设计优化模型,最终获得了各性能综合兼优的设计方案^[14]。冯佰威等对船型多学科设计优化进行了深入的研究,提出了尺度及船型并行设计的模式;对船型的精细优化进行了研究,提出了船型修

改融合方法,并进行了程序的实现;开发了模型生成器,为水动力性能的分析提供统一的计算模型。在此基础上,开发了船体型线多学科设计优化平台,并进行了实例验证^[15~18]。

总的说来,经过 10 多年的发展,MDO 技术已取得了很多重要进展并得到较广泛的应用。国外一些发达国家在 MDO 方法的原理、方法、应用及优化算法方面已逐渐形成一个有机整体,对不同学科的分析及计算机软件已规范化并进行集成,其成果已面向应用且日趋成熟。国内的研究已经起步,目前的研究内容比较单一和零散。

1.2 多学科设计优化的基本概念

1.2.1 多学科设计优化的定义

多学科设计优化是一种针对解决复杂工程系统设计和多学科动态影响并实现优化设计的有效方法和工具,但对于 MDO 的概念目前尚未完全统一。

美国国家航空宇航局 Langley 研究中心的多学科分部(MDOB)给出的多学科设计优化的定义如下:

多学科设计优化是一门充分利用系统中的协同作用,设计具有耦合关系的复杂工程系统和子系统的方法学。

美国航空航天学会(AIAA)多学科设计优化技术委员会(MDO-TC)除了给出和 MDOB 相同的定义外,还给出了 MDO 的两个新定义,即:

复杂工程系统多学科设计优化的最优设计,需要解决学科(子系统)之间耦合作用的分析,并充分利用耦合作用所产生的协同机制进行设计。

多学科设计优化就是决定改变什么,在何种程度上改变,学科(子系统)之间如何相互影响的设计方法。

英国南安普顿大学(Southampton University)的计算工程与设计中心对 MDO 的定义为:

多学科设计优化是一门设计复杂耦合系统的方法学,它充分探索和利

用设计过程各个阶段耦合学科(子系统)之间相互作用所产生的协同效果。

MDO 的奠基人 J. Sobieszczański-Sobieski 对 MDO 的定义为:

多学科设计优化是一门考虑系统中学科之间相互影响的设计方法学,设计人员通过它不仅仅在一个学科对系统的性能产生重要的影响。

这些定义都认为 MDO 是一门方法学,它用来设计具有耦合作用的复杂工程系统和子系统,探索它们协同工作的机理,是一种充分探索和利用系统中各子系统相互作用的协同机制来设计复杂工程系统和子系统的方法论。MDO 本身不是设计,它提供了一组工具和方法来实现设计过程中各个学科间的权衡。除了优化方法之外,MDO 包含了更多的设计提高策略,在设计阶段充分发掘学科间的耦合作用对设计效果的贡献。

美国学者 Powell 对多学科设计优化技术的理解是“MDO 的基础和关键是多学科‘交叉’”。多学科设计优化中的交叉的具体含义是根据不同算法的特点,组合利用不同类型的优化算法,解决具体设计问题的方法。多学科设计优化中“交叉”研究的主要目标是针对目前工程设计问题的多样性,寻求灵活选择不同的优化算法的方法,提高对组合交叉问题的处理能力。例如:对具体工程设计问题的求解,一般首先应该使用全局优化算法,比如遗传算法对设计空间进行全局搜索,以确定期望的目标区域,然后应用局部优化算法,比如广义简约梯度法来搜索目标区域内最好的设计结果。

基于上述基本的理解,MDO 可以更确切地理解为:多学科设计优化,其“优化”的含义具有更广阔的范围,是将传统的优化技术和方法推进到了具有广阔含义的“设计空间探索”的理论、方法和技术,包含了更加广阔、多层次的探索活动和优化技术。

1.2.2 多学科设计优化的基本描述^[19]

(1) 学科(Discipline)。

学科是系统中本身相对独立、相互之间又有数据交换关系的基本模块。多学科设计优化中的学科又称子系统或子空间。

(2) 设计变量(Design Variables)。

设计变量是用于描述工程系统的特征、在设计过程中可被设计者控制的一组相互独立的变量。设计变量分为系统设计变量和局部设计变量。系统设计变量在整个系统范围内起作用,而局部设计变量则只在某一学科范围内起作用。

(3) 状态变量(Stable Variables)。

状态变量是用于描述工程系统的性能或特征的一组参数。状态变量可分为系统状态变量、学科状态变量和耦合状态变量。

(4) 约束条件(Constraints)。

约束条件是系统在设计过程中必须满足的条件。

(5) 系统参数(System Parameters)。

系统参数用于描述工程系统的特征,在设计过程中保持不变的一组参数。

(6) 学科分析(Contributing Analysis)。

学科分析也称子系统分析或子空间分析。以该学科设计变量、其他学科对该学科的耦合状态变量及系统的参数为输入,根据某一个学科满足的物理规律确定其物理特性的过程。

(7) 系统分析(System Analysis)。

对于整个系统,给定一组设计变量,通过求解系统的状态方程得到系统状态变量的过程。

(8) 一致性设计(Consistent Design)。

在系统分析过程中,由设计变量及其相应的满足系统状态方程的系统状态变量组成的一个设计方案。

(9) 可行设计(Feasible Design)。

满足所有设计要求或设计约束的一致性设计。

(10) 最优设计(Optimal Design)。

使目标函数最小(或最大)的可行设计。

1.2.3 多学科设计优化的特点

多学科设计优化最主要的两个特点就是分析与综合(优化)。复杂

工程系统由于其复杂性,学科(子系统)之间通常存在着复杂的交叉耦合关系,只有经过分析才能进行恰当的学科分解,获得所需的设计信息。学科(子系统)分析是进行多学科综合(优化)的基础和前提条件。系统性能是学科(子系统)分析基础上综合(优化)的外在表现。只有经过分析、综合(优化)、决策的反复迭代,才能最终设计出满意的产品(系统)。围绕这两个特点可以详细展开得到以下几个特点:

(1) 系统论是多学科设计优化的理论基础,系统建模技术、系统还原论和系统优化方法等都适合于多学科设计优化。系统具有整体性、目的性、关联性、层次性、动态性、复杂性和适应性等特征。复杂工程系统作为多学科设计优化的对象,具有系统的所有特征。系统涌现性主要是由它的成分按照系统的结构方式相互作用、相互补充、相互制约而激发出来的结构效应和组织效应。多学科设计优化是复杂工程系统的有效设计方法,通过系统分解方法简化系统的复杂性,在进行学科(子系统)分析的同时,通过系统级的综合协调,充分利用学科(子系统)之间复杂的耦合关系,在设计阶段就考虑到系统的涌现性。

(2) 分析是优化规划中的重要步骤,多学科设计优化中分析的目的,一方面是为了确定不同因素对系统、子系统总效果的作用,了解优化解空间的情况;另一方面是为了确定因素对系统、子系统设计目标影响的程度,找出与系统、子系统设计目标最强相关的设计变量。系统敏感性分析、Pareto 分析、DOE 分析都是常用的分析方法。多学科设计优化中的综合是建立在分析基础上的,系统性能是学科(子系统)分析基础上综合的外在表现。只有通过综合才能体现系统的涌现性。

(3) 复杂工程系统的设计问题,通常在中多学科设计优化过程中不是仅仅依靠简单的 MDO 方法(如 MDF、IDF、CO 等)就能够取得满意的优化结果的,必须采用一定的优化策略将试验设计、设计空间搜索技术、近似技术、质量工程方法等技术合理的结合起来才能取得满意的设计结果。多学科设计优化中的计算规划与可实现性是建立在分析、耦合基础上的,通过优化原理提高设计效率,在工程上可用以组织实施计算,建立最佳的计算路径。

(4) MDO 计算集成环境主要用来提供通信、数据、优化设计过程和