



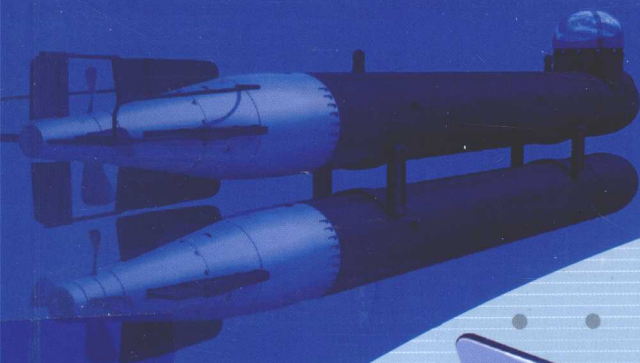
陕西出版资金精品项目



工业和信息化部“十二五”规划专著

鱼雷多学科设计 优化理论与应用研究

宋保维 王 鹏◎著



西北工业大学出版社



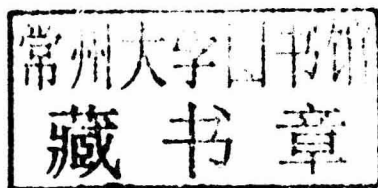
陕西出版资金



工业和信息化部“十二五”规划专著

YULEI DUOXUEKE SHEJI YOUHUA LILUN YU YINGYONG YANJIU
鱼雷多学科设计优化理论与应用研究

宋保维 王 鹏 著



西北工业大学出版社

【内容简介】 本书系统地介绍了鱼雷多学科设计优化理论与工程应用。全书共分为7章,主要内容包
括鱼雷多学科设计优化(MDO)研究现状、鱼雷 MDO 学科分解和耦合变量处理技术、鱼雷 MDO 参数化几何
建模技术、鱼雷子学科分析方法及计算模型、鱼雷 MDO 近似方法与灵敏度分析方法、鱼雷 MDO 求解策略及
应用实例以及鱼雷 MDO 软件平台开发与构建。为便于读者学习使用,书中提供了大量的图表、数据、计算实
例及参考文献。

本书可供从事鱼雷或其他复杂机电系统设计的研究人员和工程设计者参考,也可作为高等院校鱼雷总
体设计以及相关专业研究生和高年级本科生的教材。

图书在版编目(CIP)数据

鱼雷多学科设计优化理论与应用研究/宋保维,王鹏著. —西安:西北工业大学出版社,
2016.3

ISBN 978-7-5612-4796-9

I. ①鱼… II. ①宋…②王… III. ①鱼雷—总体设计—研究 IV. ①TJ630.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 062993 号

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路 127 号 邮编:710072

电 话:(029)88493844 88491757

网 址:www.nwpup.com

印 刷 者:陕西宝石兰印务有限责任公司

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16

印 张:13.625

字 数:328 千字

版 次:2016 年 3 月第 1 版 2016 年 3 月第 1 次印刷

定 价:38.00 元

序

鱼雷是重要的海军武器装备,在历次海战中都发挥了重要的作用,因而受到了世界各国海军的高度重视。为了适应现代战争日益复杂的作战需求,鱼雷设计所涉及的学科越来越多,专业分工越来越细,研制过程日趋复杂,设计周期和开发成本也日益增加。为了提高设计精度、缩短设计周期、降低开发成本,新的鱼雷设计方法亟待研究。

多学科设计优化理论是一种通过探索和利用系统中相互作用的协同机制来设计复杂系统的方法论。该方法可以通过各学科的并行设计来缩短设计周期,通过学科间的耦合求解来挖掘设计潜力,通过全系统的高度集成来实现自动化设计,已成为鱼雷设计的重要研究方向。

为了深化对鱼雷多学科设计优化理论和应用的研究,本书作者根据他们多年从事鱼雷多学科设计优化理论的研究与实践,并广泛综合了国内外大量的参考文献,写成了这部《鱼雷多学科设计优化理论与应用研究》学术专著。

全书共分为7章,详细深入地阐述了鱼雷多学科设计优化领域中所涉及的系统划分、学科建模、求解策略、软件平台等研究内容,并揭示了鱼雷多学科设计优化面临的发展机遇和技术挑战。本书主要有以下特点:

一、内容新、学术性强。作者没有空泛的、重复性的论述多学科设计优化的常规知识,而是着重通过大量的鱼雷设计实例,向读者展示了鱼雷多学科设计优化的国内外最新研究成果。

二、特色明显、实用价值高。作者不但建立了一套完整实用的鱼雷多学科设计优化的基础理论体系和工程应用方法,而且提供了大量的数据、资料和应用实例。

本书是鱼雷多学科设计优化领域的第一部学术专著。它不仅可供从事鱼雷设计的科技人员阅读,还可作为从事水中兵器领域产品研制、试验与生产的工程科技人员的参考书。

本书的问世,必将把鱼雷的研究工作提高到一个新的阶段,为我国水中兵器事业的新发展做出重要贡献。



2016年1月

* 徐德民:中国工程院院士,水中兵器专家。

前 言

鱼雷是重要的海军武器,具有隐蔽性强、爆炸威力大、适用范围广等特点,在近代海战中发挥了巨大的作用。例如,第二次世界大战中,鱼雷击沉的运输船吨位达1 445万吨,占被击沉运输船总吨位的68%;鱼雷击沉的大、中型战斗舰艇达369艘,占被击沉舰艇总艘数的38.5%。第二次世界大战以后,为了适应现代战争日益复杂的作战需求,世界各海洋强国在鱼雷设计过程中积极地探索各种新技术和新方法,力求研制出性能更加先进的鱼雷武器。而鱼雷总体设计作为鱼雷研制过程中的重要环节,直接决定着所设计鱼雷的最终性能,是鱼雷研究中最重要

的领域。

作为一个复杂的工程系统,鱼雷总体设计涉及外形、结构、动力等众多学科知识和内容,且各学科之间存在着复杂的耦合关系,具有工作难度大、复杂性强的特点。传统的设计方法将各学科分裂开来,由不同学科的设计人员完成具体的工作,设计过程中通常会忽略或弱化学科之间的相互联系,造成鱼雷研制周期长、开发成本高和总体性能欠佳等问题。为克服上述缺陷,鱼雷总体设计工作者在现代鱼雷设计中已开始采用多学科设计优化方法(Multidisciplinary Design Optimization, MDO)。该方法通过探索和利用系统中相互作用的协同机制来设计复杂的工业产品,采用分解或分层等策略,将复杂工程系统设计问题分解成学科层和系统层分别进行分析和求解,既保持了各学科设计的自主性,又保证了学科之间设计的一致性。多学科设计优化的工作流程与鱼雷工程设计中的组织和管理模式类似,可以缩短研制周期、降低成本、提高鱼雷的总体性能,已成为鱼雷总体设计的重要研究方向。

笔者长期从事鱼雷总体设计方法与工程应用研究,并在西北工业大学成立了“鱼雷多学科设计优化技术”课题组,在国内较早地开展了鱼雷多学科设计优化理论与应用研究,发表相关论文数十篇,研究成果在多种鱼雷、水下航行器总体设计中得到了成功应用,取得了很好的效果,在相关领域产生了积极的影响。本书力图全面总结笔者近年来在鱼雷多学科设计优化理论与应用方面所取得的一系列研究成果。全书共7章:第1章绪论,介绍鱼雷多学科设计优化的背景、主要研究内容、国内外现状、机遇与挑战等;第2章介绍鱼雷MDO学科分解和耦合变量处理技术,给出鱼雷MDO的学科划分和耦合变量;第3章介绍鱼雷MDO参数化几

何建模技术,是进行鱼雷 MDO 的基础;第 4 章介绍鱼雷各子学科分析方法,建立鱼雷各子学科计算模型;第 5 章介绍鱼雷 MDO 所需的两个关键技术:近似方法和灵敏度分析方法,并给出具体的鱼雷应用实例;第 6 章介绍鱼雷 MDO 求解策略及应用实例;第 7 章介绍鱼雷 MDO 软件平台的开发与构建过程。

关于鱼雷 MDO 的研究工作得到了国家高新技术发展计划、国家自然科学基金、总装创新基金等项目的支持,本书的出版得到了工业和信息化部资助。特别感谢徐德民院士和赵晓哲院士,他们对本书进行了认真的审阅,并提出了许多宝贵的意见,同时感谢课题组刘旭琳、朱琦峰、温庆国、董华超、张代雨等博士为本书出版所做的工作。

本书可供从事鱼雷或其他复杂机电系统设计的研究人员和工程设计者参考,也可作为高等院校鱼雷总体设计以及相关专业的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复杂机电系统多学科设计优化理论的进步能起到积极的作用。

由于水平有限,书中不足之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

作 者

2016 年 1 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 鱼雷设计概述	1
1.2 多学科设计优化概述	2
1.3 鱼雷 MDO 研究现状	8
1.4 鱼雷 MDO 技术面临的机遇与挑战	11
参考文献	13
第 2 章 鱼雷 MDO 学科分解技术	18
2.1 概述	18
2.2 学科最优解组合为整体最优解的条件	19
2.3 学科间耦合变量处理方法	21
2.4 鱼雷 MDO 学科分解与规划	24
2.5 鱼雷 MDO 耦合变量分析	28
参考文献	30
第 3 章 鱼雷 MDO 参数化几何建模	31
3.1 概述	31
3.2 雷体外形几何建模方法	32
3.3 鳍、舵外形几何建模方法	37
3.4 壳体结构几何建模方法	38
3.5 鱼雷 MDO 参数化几何模型	42
3.6 基于 UG/OPEN API 的参数化几何建模应用程序开发	45
3.7 参数化几何建模实例	49
参考文献	53
第 4 章 鱼雷 MDO 学科分析与建模	54
4.1 概述	54
4.2 外形与阻力学科的分析方法与计算模型	54
4.3 结构学科的分析方法与计算模型	64
4.4 操稳性学科的分析方法与计算模型	70

4.5 弹道学科的分析方法与计算模型·····	75
4.6 动力推进学科的分析方法与计算模型·····	81
4.7 噪声学科的分析方法与计算模型·····	88
4.8 质量布局学科的分析方法与计算模型·····	98
参考文献·····	102
第5章 鱼雷 MDO 近似方法与灵敏度分析 ·····	105
5.1 概述·····	105
5.2 近似方法·····	105
5.3 鱼雷近似方法实例·····	120
5.4 灵敏度分析方法·····	126
5.5 鱼雷灵敏度分析实例·····	135
参考文献·····	143
第6章 鱼雷 MDO 求解策略及应用实例 ·····	145
6.1 概述·····	145
6.2 单级求解策略·····	145
6.3 多级优化策略·····	148
6.4 鱼雷 MDO 的问题描述·····	163
6.5 鱼雷 MDO 的求解模型·····	166
6.6 鱼雷 MDO 的优化结果·····	170
参考文献·····	173
第7章 鱼雷 MDO 软件平台开发 ·····	175
7.1 概述·····	175
7.2 鱼雷 MDO 软件平台系统框架·····	175
7.3 鱼雷 MDO 软件平台集成方法·····	180
7.4 鱼雷 MDO 数据管理与交换·····	186
7.5 鱼雷 MDO 学科分析模型自动生成方法·····	190
7.6 鱼雷 MDO 分布式网络构建方法·····	195
7.7 鱼雷 MDO 软件平台用户界面·····	203
参考文献·····	209

第 1 章 绪 论

1.1 鱼雷设计概述

鱼雷(torpedo)是由携载作战的平台在发现目标后发射入水,在受控状态下自动航行,用以攻击、摧毁目标的水中兵器,具有隐蔽性能好、命中概率高、破坏威力大等特点。

世界上第一条鱼雷是 1868 年由英国人 R. 怀特海特工程师在奥匈帝国研制成功的,雷体直径为 356 mm,长度为 4.26 m,质量为 135.4 kg,装药量为 8.2 kg,航速为 6.7 kn,航程为 640 m。1877—1878 年俄土战争中,俄国海军首次使用这种鱼雷击沉了土耳其舰船 6 艘。随后,鱼雷作为海军不可缺少的重要武器,在历次海战中发挥了极为重要的作用。第一次世界大战中,鱼雷击沉的运输船吨位达 1 153 万吨,占被击沉运输船总吨位的 89%;鱼雷击沉的大、中型战斗舰艇达 162 艘,占被击沉舰艇总艘数的 49%。第二次世界大战中,鱼雷击沉的运输船吨位达 1 445 万吨,占被击沉运输船总吨位的 68%;鱼雷击沉的大、中型战斗舰艇达 369 艘,占被击沉舰艇总艘数的 38.5%,另外还有 7.5%舰艇是鱼雷与其他武器共同击沉的。

第二次世界大战后,鱼雷技术的发展更为迅速,目前世界上能够研制和生产鱼雷的国家共有 14 个,先后研制和生产了数百型鱼雷,在常规鱼雷中航速最高可达 70 kn,航深最高可达 1 000 m,航程最高可达 50 000 m,具有精确制导和水声对抗能力,可以定向或聚能爆炸。

迄今为止,鱼雷的发展历经了四个阶段。第一代鱼雷:直航鱼雷,动力采用蒸汽瓦斯或铅酸电池电动机,用于水面舰艇及潜艇之间的近距离攻击。第二代鱼雷:自导鱼雷,采用声自导,具有自动寻的功能,用于近程防御和突袭。第三代鱼雷:复合制导鱼雷,采用线导+声自导+尾流自导,具有多种寻的方式,主要用于海上中近程防御和突袭。第四代鱼雷:智能鱼雷,利用先进的数字信号处理技术、捷联惯导技术、光纤线导技术和减振降噪技术,具有强抗干扰和反对抗能力,可远程自主导航定位,用于复杂对抗作战环境下远程隐蔽攻击。

在鱼雷的整个发展过程中,如何设计出性能先进的鱼雷,以使己方在海战中处于有利的地位,一直是设计工作者的不懈追求,而总体设计作为鱼雷整个设计过程中的重要环节,决定着所设计鱼雷的最终性能,成为鱼雷研究中最重要技术领域。

纵观鱼雷的发展历史,可以看出鱼雷的改进换代与鱼雷总体设计的发展紧密相关:在直航鱼雷阶段,鱼雷总体设计主要侧重于研究机械结构的设计,主要包括鱼雷外形、壳体结构、舱段连接、战雷头等,按照鱼雷组成讲,当时的鱼雷总体设计仅将动力推进系统、控制系统的设计独立出去,余下各部分的设计均在鱼雷总体设计之列;在自导鱼雷阶段,鱼雷的组成变得复杂,自导系统的设计也独立分出,但鱼雷总体设计方法在实质上仍没有太大变化,各部分独立进行,相互间很少考虑耦合关系;在复合制导鱼雷阶段,系统工程理论与方法被引入鱼雷总体设计之中,同时弹道设计、声学设计也成为鱼雷总体设计的研究内容,并且出现了可靠性设计和一体化设计的概念,但是由于鱼雷总体设计涉及的学科领域较多,而各部分之间又很难进行足够的

协调和沟通,因此,当时的一体化设计方法也只是直接把多个学科的分析模型、设计变量连接在一起,采用单学科优化的方法进行计算,因此还不能称为真正意义上的一体化设计,其缺陷是当希望充分利用多学科协同效应,对较多的学科同时进行优化时,该方法不能适用;在智能鱼雷阶段,鱼雷的组成更为复杂,各种高新技术被广泛应用,为了解决采用传统设计方法时,鱼雷研制周期长、开发成本高和总体性能欠佳等问题,鱼雷总体设计工作者开始尝试采用多学科设计优化方法(Multidisciplinary Design Optimization, MDO)^[1]。该方法通过探索和利用系统中相互作用的协同机制来设计复杂的工业产品,采用分解或分层等策略,将复杂工程设计问题分解成学科层和系统层分别进行分析和求解,既保持了各学科设计的自主性,又保证了学科之间设计的一致性。多学科设计优化的工作流程与鱼雷工程设计中的组织和管理模式类似,可以缩短研制周期,降低研制成本,提高鱼雷的总体性能,已成为鱼雷总体设计的重要研究方向。

1.2 多学科设计优化概述

1.2.1 多学科设计优化的含义

多学科设计优化由美籍数学家 J. Sobieszczanski-Sobiesk 于 1982 年提出,它是一种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的方法论^[2-3]。其主要思想是将复杂系统按照学科或者部件分解为简单的子学科或子系统,对分解后的子学科或子系统分别进行设计与优化,同时考虑到各学科或子系统的耦合作用,利用求解策略进行组织和管理整个复杂系统的求解过程。MDO 充分利用学科或子系统之间的耦合作用产生的协同效应,以获得系统的最优解,设计流程与工程实际中的组织和管理模式相类似,现已成为大系统设计方法的研究重点^[4]。一个包含 N 个学科的多学科设计优化问题可以用数学形式表述如下:

$$\begin{aligned}
 & \text{寻找:} & \mathbf{P} = \{\mathbf{Z}, \mathbf{X}, \mathbf{Y}\} \\
 & \text{满足约束:} & \left. \begin{aligned} & \mathbf{Z}^l \leq \mathbf{Z} \leq \mathbf{Z}^u \\ & \mathbf{X}^l \leq \mathbf{X} \leq \mathbf{X}^u \\ & \mathbf{h}_i(\mathbf{Z}, \mathbf{X}_i, \mathbf{Y}_i(\mathbf{Z}, \mathbf{X}_i, \mathbf{Y}_j)) = \mathbf{0} \\ & \mathbf{g}_i(\mathbf{Z}, \mathbf{X}_i, \mathbf{Y}_i(\mathbf{Z}, \mathbf{X}_i, \mathbf{Y}_j)) \leq \mathbf{0} \\ & i = 1, 2, \dots, N; \quad \text{且 } i \neq j \end{aligned} \right\} \quad (1-1) \\
 & \text{最小化:} & f(\mathbf{Z}, \mathbf{X}, \mathbf{Y})
 \end{aligned}$$

式中, $\mathbf{P}$ 表示设计向量; $\mathbf{Z}$ 表示系统设计变量, $\mathbf{Z}^l$ 和 $\mathbf{Z}^u$ 为其取值范围的下限和上限; $\mathbf{X}$ 表示学科设计向量, $\mathbf{X}^l$ 和 $\mathbf{X}^u$ 为其取值范围的下限和上限; $\mathbf{h}_i$ 和 $\mathbf{g}_i$ 分别表示学科 i 的等式和不等式约束; $\mathbf{X}_i$ 和 $\mathbf{Y}_i$ 分别表示学科 i 的局部设计向量和状态向量; f 表示系统的优化目标。

多学科设计优化问题不同于一般的优化问题,有着一些特定的基本术语和参数定义。如图 1-1 所示,以一个包含三学科的非层次系统为例,介绍几个基本术语和符号。

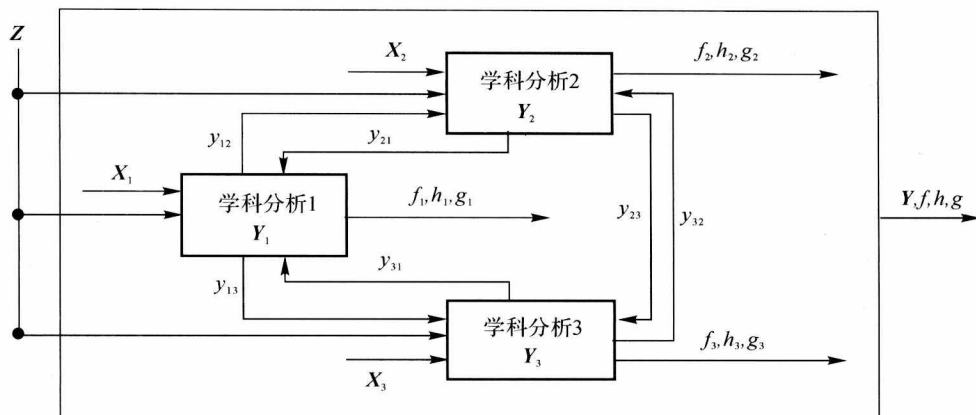


图 1-1 包含三个学科的非层次型多学科优化问题

(1) 学科:也称为子系统或子空间,是指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。以鱼雷为例,学科通常是指水动力、结构、控制、推进等子系统。

(2) 设计变量:用于描述工程系统的特征,在设计过程中受到设计者控制的一组相互独立的变量。根据作用范围的不同,设计变量可以分为共享设计变量和局部设计变量。共享设计变量也称为系统设计变量,是同时被 2 个或 2 个以上的学科控制的设计变量,如图 1-1 中的 Z ;局部设计变量又称为学科设计变量,是只被某一个学科控制的设计变量,如图 1-1 中的 X_1 , X_2 和 X_3 。

(3) 状态变量:用以描述复杂工程系统的性能或特征的一组参数,一般需要通过各种分析或计算模型才能得到。状态变量分为系统状态变量、学科状态变量和耦合状态变量。系统状态变量用以表征整个系统性能,如图 1-1 中的 Y ;学科状态变量是属于某一学科的状态变量,如图 1-1 中的 Y_1 , Y_2 , Y_3 ;耦合状态变量用以表征学科之间的耦合关系,如图 1-1 中的 y_{12} , y_{21} 等。

(4) 学科分析:指以系统设计变量、学科局部设计变量、其他学科对该学科的耦合状态变量为输入,求解学科状态方程的过程,工程上多利用商业软件包来完成。

(5) 系统分析:也称多学科分析。给定系统设计变量,通过求解系统的状态方程得到系统状态变量的过程。复杂工程系统的系统分析过程涉及多门学科分析,如果系统是非层次型的,由于学科之间的耦合关系,整个过程需要反复迭代才能完成。

(6) 一致性设计: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设计方案。满足一致性设计的方案是可行的设计方案,其中能够使系统目标函数最小(或最大)的设计方案是最优设计方案,分为全局最优和局部最优两类。

1.2.2 多学科设计优化的发展概况

多学科设计优化作为一个独立的研究领域,从诞生起,就在政府、高校、科研院所和工业界的极大关注下迅速发展起来,在 20 世纪 80 年代后期逐渐形成了完善的理论体系,成为国际上工业设计研究中的一个最新、最活跃的领域,并在工业实践中得到了广泛的应用,取得了显著

的成果。

国际上,美国、俄罗斯、欧洲等国家先后开展了对多学科设计优化的研究。

1982年,美籍波兰裔数学家 J. Sobieszczanski-Sobieski 首次提出了 MDO 方法,为 MDO 的研究做出了开创性的贡献,并为 MDO 的发展奠定了基础。随后,各种 MDO 的研究迅速发展起来。

1986年,在 MDO 概念提出仅仅 4 年之后,美国航空航天学会(American Institute of Aeronautics and Astronautics, AIAA)、美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)、美国空军(United States Air Force, USAF)和俄亥俄州立航天研究所(Ohio Aerospace Institute, 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 MDO 学术讨论会每两年召开一次,交流最近在这一领域的研究成果,目前这一 MDO 学术大会已演变成国际性学术会议。

1991年,随着 MDO 研究的不断升温,AIAA 成立了专门的 MDO 技术委员会,并发表了《关于多学科设计优化发展现状的白皮书》^[5],阐述了 MDO 研究的必要性和迫切性、MDO 的定义、MDO 的研究内容以及发展方向。该文的发表标志着 MDO 作为一个新的研究领域正式诞生。

同年,德国成立了一个针对大型复杂工程系统设计的国际结构优化设计协会(International Society for Structural Optimization, ISSO),并在 1993 年更名为国际结构及多学科优化协会(International Society for Structural and Multidisciplinary Optimization, ISSMO)。该协会的宗旨是鼓励和促进结构优化相关课题的研究,鼓励优化方法在工程中的应用及相关软件的开发,促进不同学科优化技术的交流,扶持 MDO 的工程应用,提供交流研讨会的组织、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的内容。ISSMO 的成立是优化领域中非常重大的事件,标志着多学科设计优化思想已经渗透到现代设计的各个环节和阶段。

1994年,随着航空航天工业界对 MDO 研究及应用的兴趣不断高涨,NASA 兰利(Langley)研究中心成立了多学科设计优化分部(MDOB)。MDOB 的任务包括确认、发展和展示 MDO 方法,及时地将有前途的 MDO 方法向工业界推广并促进 NASA、工业界和高校对 MDO 的基础研究。它的成立对于美国 MDO 的研究起到了极大的促进作用。

1996年,两位 MDO 研究的专家 Sobieski 和 Haftka 撰写了《航空航天领域中的多学科设计优化研究综述》一文。文中回顾了 MDO 的发展现状,特别探讨了 MDO 的 6 个主要组成部分,从而为 MDO 的研究指明了方向。同年,AIAA 组织了部分 MDO 研究人员,总结了近年来 MDO 的各个研究方面的发展现状,并编写了《Multidisciplinary Design Optimization, State of the Art》一书,详细地阐述了 MDO 的概念、基本方法、学科发展、近似概念和 MDO 集成环境等内容,标志着 MDO 研究内容的确定。

NASA 在推动 MDO 发展方面做出了巨大的贡献。例如,在其资助下,高校研究人员对有关高速民航机 MDO 问题进行了广泛研究^[6-7];与工业界合作研制了高速民航机多学科设计优化系统 HSCT^[8];随后 NASA 又启动了先进工程环境项目^[9](Advanced Engineering Environment, AEE),旨在为新一代可重复使用空间飞行器的概念提供一个协同设计环境。高校中,美国弗吉尼亚州立大学成立了先进飞行器的多学科分析与设计中心。以斯坦福大学航空航天系 Kroo 教授为首的飞机启动与设计小组首次提出了协同优化算法,用于飞行器产

品的多学科设计优化^[10]。纽约州立大学、圣母大学也成立了 MDO 实验室,专门从事 MDO 技术的研究工作。

俄罗斯作为传统的航天大国,其飞行器设计技术一直处于世界领先地位,对总体设计技术一直都十分重视。20 世纪 70 年代,俄罗斯的前身苏联在航天领域就广泛应用了“多准则设计(multicriteria design)”方法,该方法有许多与 MDO 研究相似的内容。近年来,在俄罗斯科学院院士、空间科学研究院教授 I. N. Egorov 的领导下,俄空间科学研究院已经研制成了将物理模型和数学工具紧密结合的高效率“多学科设计优化环境(IOSO)”,可用于求解各类 MDO 问题,在航空航天、汽车工业、生物技术等工程领域都得到了广泛的应用^[11-12]。

欧洲的 MDO 研究是整个欧盟内各国合作开展的,截至目前,在航空航天领域内已经发起了多个旨在提高设计水平进而增加飞行器竞争力的 MDO 项目。1996 年欧盟启动了一项为期三年、名为“MDO 工程”的 MDO 研究项目^[13],该项目由空中客车牵头,主要研究目标包括飞行器全寿命周期的初步设计阶段的集成问题、并行的 MDO 方法、信息技术与设计技术的进一步融合。研究对象是一种 500~600 座的大型商业运输飞机,至 1998 年结束,取得了很大的成功。随后,欧盟又进行了一项大型的分布式 MDO 项目,其全称为翼身融合体构型的多学科设计优化(multidisciplinary design and optimization for blended wing body configuration),该项目涉及欧洲的 3 个航空公司、4 个研究机构和 8 所大学。该项目的第一个目标是基于 MDO 方法发展一个分布式环境下能够支持各种学科设计工具集成的计算设计引擎(Computational Design Engine,CDE);第二个目标是利用 CDE 工具和分布式的专家团队来对一种新概念的飞机即翼身融合体飞机(BWB)进行设计,该飞机被视为空客 A380 的一个强有力的竞争者,而且也是一种很有潜力的军用飞机方案。最近,在欧盟第六框架下,欧盟针对 2020 年航空工业的发展趋势,正在进行 VIVAC 项目^[14](Value Improvement through a Virtual Aeronautical Collaborative enterprise),旨在为飞机和发动机设计提供先进的虚拟协同设计环境。

在国内,MDO 的研究兴起于 20 世纪 90 年代,主要集中在高校和科研院所,经过近 20 年的发展,取得了显著的进展。南京航空航天大学的余雄庆^[15]对 MDO 的理论与方法进行了最初的研究工作,并运用 MDO 进行了无人机的设计。图 1-2 所示为无人机多学科设计优化框架。西北工业大学的胡峪、李为吉等人^[16]提出了子空间近似算法,并对其在飞行器设计中的应用展开了具体的研究与探讨。上海交通大学的刘蔚、崔维成等人^[17]将 MDO 方法成功应用于“蛟龙号”载人潜水器总体设计中,取得了很好的设计效果。图 1-3 所示为蛟龙号载人潜水器。国防科技大学的颜力、王振国等人^[18]对固体战略弹道导弹多学科设计优化中的关键技术进行了详细的分析与讨论;陈小前^[19]提出了 MDO 方法在飞行器设计运用的方法和步骤;陈琪锋^[20]研究了分布式协同进化 MDO 算法,并将其应用于卫星星座系统的设计;罗世彬^[21]将 MDO 方法应用于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。华中科技大学的钟毅芳等人^[22]对导弹的 MDO 总体稳健性设计进行了研究,取得了满意的研究成果。

1.2.3 多学科设计优化的主要研究内容

随着多学科设计优化技术的不断发展,其研究内容也不断地得到充实和扩展。根据多学科设计优化问题的特点,Sobieski 等人^[23]将其研究内容分为三类:信息科学技术、面向设计的

学科分析和多学科设计优化过程。美国航空航天学会(AIAA)的MDO技术委员会在1998年将MDO的研究内容归纳为4大类共16个方面^[24]。本书仅介绍其中几个主要研究内容。

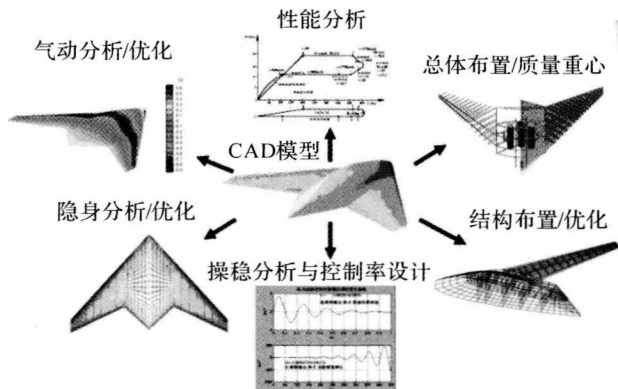


图 1-2 无人机多学科设计优化



图 1-3 蛟龙号载人潜水器

1. 系统分解与规划

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求解等。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^[25],也可以从便于管理的角度进行分解。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)之间往往存在层次型与非层次型两大基本关系。

2. 参数化几何建模

参数化几何建模是一种可共享的设计对象描述方式,可以方便地解决学科间或不同部门及地点之间的通信。为此,MDO过程需要发展参数化模型与自动建模技术,所建立的统一参数化几何模型应与现有的CAD软件兼容,并且参数化模型应该在设计变量发生变化的情况下仍能够保持精度与真实性。此外,在工业应用中,鲁棒的、自动化的、精确的非参数化模型,如学科间的网格映射技术,也是必要的。

3. 系统集成建模

确定各学科的分析方法,并建立复杂工程系统的系统集成优化模型是进行MDO的前提。一个优化设计问题,不管如何表达,最终都可以用一个由设计变量、目标函数以及约束条件组成的优化数学模型来表示。研究优化建模的目的就是帮助设计者正确表达设计思想,提高建模的方便性和自动化程度,主要方法包括直接建模、自适应建模、可变复杂度建模及过程建模等几类。此外,MDO问题的建模也应遵循三个主要原则:首先,在不违反同一设计问题相通理论的前提下,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。

4. 近似技术

由于复杂工程系统的 MDO 问题比单学科优化复杂很多,因而一次完整系统分析需要巨大的工作量,其中存在着大量的反复迭代权衡计算,使得在系统优化迭代的每一步完整地执行整个系统分析是不切实际的。因此,近似技术成为 MDO 研究领域的一项重要内容。近似技术的研究主要集中在如何构建满足精度要求的近似模型。近似模型用来代替各子学科中原有的分析模块,能够很容易地集成到 MDO 流程中,从而使复杂工程系统的 MDO 变得切实可行,因此构建近似模型成为支持 MDO 实用化的关键^[26-27]。实际的工程系统优化设计中通常使用的近似方法主要包括基于泰勒级数展开函数的局部近似方法以及多项式响应面、Kriging 模型和神经网络等全局近似方法等。

5. 灵敏度分析

MDO 的系统灵敏度分析是为了跟踪学科之间耦合设计变量的相互影响而提出的。Sobieski 认为,单学科的灵敏度分析方法同样适用于 MDO 问题的灵敏度分析。然而在许多实际例子中,进行 MDO 系统灵敏度分析时,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^[28]推导而得出。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。

6. 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算法,如梯度法、内点法^[29]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^[30]等。算法研究可从两方面入手。首先,开发新算法。在工程优化设计中,尤其在多学科优化中,问题形态更为复杂,维数急剧增加,如组合优化问题、非光滑不可微优化问题、系统动态设计和非数值优化问题等等,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、不可微、非光滑等问题的高效的、对数学形态没有特殊要求的、具有并行处理特点的优化算法。其次,集成和整理已有算法。MDO 中,优化任务不同,其所需要的算法也可能各有不同,有些任务可能需要组合应用几种算法,才能取得较好的效果;对于同一个优化任务,也可以采用不同的优化算法进行比较,以获得任务的最优解。

7. 求解策略

MDO 求解策略也称为 MDO 方法、MDO 优化过程或 MDO 优化框架等,是 MDO 问题的数学表达及这种表达在计算环境中实现的过程组织^[31]。MDO 求解策略是在系统分解的基础上进行的。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,耦合关系包含系统变量同时影响多个子模型的父子模型之间的耦合;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的子模型之间的耦合。各种 MDO 求解策略的最终目标就是将上述耦合关系解耦,并在解耦的过程中最大限度地挖掘系统的设计潜力。

8. 软件集成平台

MDO 软件集成平台是指能够实现多学科设计优化方法的软、硬件计算环境,在软件集成平台中能够集成和运行各子系统的学科分析和计算,并实现各子系统之间的通信^[32]。软件平

台是 MDO 方法实现的具体支持环境,其研究内容与计算机科学密切相关。好的软件平台,不仅具有良好的人机交互界面,还能够支持 MDO 过程的进行,得到系统总体设计的最优方案。随着 MDO 技术的不断发展,开发以计算机网络为基础,能集成各学科分析工具,并提供 MDO 求解策略进行多学科设计优化的软件平台已成为必然趋势。目前,国外有许多政府或企业的研究中心致力于 MDO 软件框架的开发,并取得了显著的研究成果^[33],其中有些已经作为商业 MDO 框架软件被设计者选用,用以开发针对具体设计对象的 MDO 软件集成平台,如 iSIGHT,AML 和 ModelCenter 等。

1.3 鱼雷 MDO 研究现状

1.3.1 国外鱼雷 MDO 的研究现状

R. Kalavalapally 和 R. Penmets 等人^[34-35]运用 MDO 进行了某轻型鱼雷的壳体优化设计。利用计算声学方法计算了鱼雷绕流场的流动噪声,并采用有限元软件对雷体噪声学科进行建模,解决了鱼雷壳体与外部流场之间的流固耦合问题。在此基础上,以壳体质量最轻和噪声辐射声压级最小为目标,利用 MDO 对鱼雷的壳体结构进行优化设计,并考虑到鲁棒性,得到了具有较高可靠性的壳体厚度及肋骨尺寸。其研究内容集中在结构强度分析、流体动力学参数计算和雷体噪声分析,学科分析模型均采用有限元仿真软件进行数值模拟,计算量较大。

E. Alyanak 等人^[36-38]在超空泡鱼雷的空泡设计研究工作中,利用 MDO 对空泡腔进行优化设计,获得了最佳的空泡长度与空泡数,从而最大限度地减小了航行阻力,使得鱼雷能够以更高的航速航行,并获得更大的航行距离。文中基于势流理论与边界元理论,利用高保真度的多相流 CFD 软件对不同速度下的超空泡鱼雷进行运动仿真,以确定从加速到全速不同阶段的最佳空泡形状,但是计算成本较高。为此,文章采用近似模型来代替 CFD 软件进行数值仿真计算,并利用 CFD 软件对优化结果进行校核,验证优化结果的可靠性。

N. M. Patel 等人^[39]探讨了 MDO 在类似鱼雷外形的自主水下航行器(Autonomous Underwater Vehicle, AUV)总体设计中的应用。文章对 AUV 的攻击过程进行建模,以对不同速度直航而来的鱼雷命中率为优化目标,对其质量、速度和推进器类型以及声呐配置等进行优化设计。此外,文章对比了采用 Kriging 近似模型与不采用近似模型的计算耗时及优化结果,表明两种方法得到的优化结果大致相同,使用 Kriging 近似方法对学科分析数据处理后,优化时间缩短,而结果未出现较大偏差。

S. Jung, N. Lee 等人^[40-41]利用 MDO 近似模型对 AUV 的外形和结构参数进行优化设计。以 AUV 外形参数和壳体的壁厚为设计变量,以阻力和质量最小为优化目标函数,然后在满足丰满度要求和壳体结构强度及稳定性要求的前提下,利用 MDO 求解策略组织整个优化设计流程,对 AUV 进行优化设计,获得了全局最优结果。与优化前相比,优化后 AUV 的质量得到很大的减少,优化效果显著。

A. Frits 等人^[42]从提高鱼雷的作战效能出发,利用 MDO 对鱼雷系统进行设计。文章从系统设计的角度出发,结合 MDO 思想,提出了一种称为“System of Systems”的鱼雷系统并行

设计方法。将此方法应用于具体的鱼雷系统设计,并对几种类型的鱼雷设计结果进行比较,验证了方法的有效性。

W. Timothy Simpson 等人^[43-44]利用 MDO 对 AUV 总体设计问题进行研究。提出了一种贡献融合的方法,替代传统的贡献分析方法,从而实现 MDO 过程的融合。利用一个两层分级优化框架实现贡献融合方法,系统级根据本级优化结果提出设计要求,并作为设计准则传递给子系统级各学科,用于子系统的优化,实现了利用贡献融合对传统 MDO 求解策略的改进。在这种改进的优化框架中,各层优化器都具有高度的自治权,常见的离散型变量也可以通过融合嵌入设计输入和设计输出中,实现了对输入/输出数据格式的柔性化处理,对于耦合约束函数的不等式约束也可以实现完美地融合。

M. Martz, W. L. Neu 等人^[45-47]完成了 AUV 的多学科多目标优化设计研究。首先,分析了 AUV 回转体外形的建模方法,建立了 AUV 水动力分析、壳体结构强度及稳定性分析、可靠性分析、成本分析等子学科模块的计算模型,然后利用 Phoenix Integration 公司开发的 MDO 集成框架 ModelCenter 集成了 AUV 各子学科模块,建立了系统集成优化模型。此外,对遗传算法进行改进,提出了一种适用于多目标优化的遗传算法,用以对 AUV 总体设计的三个目标:成本、可靠性、研制风险进行评估,最终得到多目标优化结果。他们针对美国海军无人水下航行器发展中心提供的三个初始方案设计模型进行优化与评估,采用两级分层的多学科求解策略来组织优化流程,当多目标遗传算法得到一个最优设计方案时,所有可行的设计方案将会被挑选出来,以用于后续的分析与优化。

J. Caleb Fitzgerald 等人^[48-49]在原有鱼雷概念设计阶段用以进行鱼雷参数优化和性能分析的代码——TOAD(Torpedo Optimization Analysis and Design)的基础上,开发了一个用于鱼雷总体设计的多学科优化集成平台——UTM(Universal Torpedo Model)。该平台利用响应面技术来进行鱼雷设计空间的有效建模,以采用闭式循环技术的热动力鱼雷 MK50 为研究对象,以最大航程、最高航速、最佳辐射噪声为总体性能指标,比较了热动力推进技术与电力推进技术的优劣。另外,该平台能够对鱼雷不同舱段和整个鱼雷系统进行计算,具有能够纳入较高置信度模型的可扩展结构。平台中建立了鱼雷阻力、空化深度、噪声辐射声压级及雷尾舱段的分析计算模型,使得鱼雷设计者可以将鱼雷总体设计的物理变量与鱼雷总体性能及尺寸结合起来,以鱼雷直径、作战深度、战斗部尺寸、能源舱段长度、能量密度以及发动机功率等物理变量作为设计输入,从而得到鱼雷长度、总质量、浮力、最大航程、最大航速以及辐射噪声等鱼雷性能指标输出特性参数。

1.3.2 国内鱼雷 MDO 的研究现状

在国内,西北工业大学航海学院在鱼雷等水中兵器的多学科设计优化领域开展了一系列研究工作,取得了一定的研究成果。

张宇文、卜广志等人^[50-51]利用 MDO 对鱼雷总体综合设计的建模思路进行了研究,以鱼雷的作战效能、寿命周期费用、风险和研制周期四个指标为目标,建立了鱼雷总体综合设计的框架和数学模型。通过对鱼雷总体设计进行学科划分,分析学科之间的耦合变量,构建了鱼雷总体设计的框架,分别使用三种典型的多学科求解策略——多学科可行性法、单学科可行性法和协同优化算法——对鱼雷总体综合设计进行建模思路研究,并进行了对比分析。另外,给出了