





“十三五”国家重点出版物出版规划项目

# 多学科设计优化理论及其 在大深度载人潜水器设计中的应用

潘彬彬 崔维成 著



 浙江出版联合集团  
 浙江科学技术出版社



“十三五”国家重点出版物出版规划项目

# 多学科设计优化理论及其 在大深度载人潜水器设计中的应用

潘彬彬 崔维成 著

 浙江出版联合集团  
 浙江科学技术出版社

图书在版编目 ( CIP ) 数据

多学科设计优化理论及其在大深度载人潜水器设计中的应用 / 潘彬彬, 崔维成著. - 杭州: 浙江科学技术出版社, 2017.12

(中国深渊研究)

ISBN 978-7-5341-7908-2

I. ①多… II. ①潘… ②崔… III. ①潜水器 - 设计  
IV. ①P754.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 230189 号

丛 书 名	中国深渊研究		
书 名	多学科设计优化理论及其在大深度载人潜水器设计中的应用		
著 者	潘彬彬 崔维成		
出版发行	浙江科学技术出版社 杭州市体育场路 347 号 邮政编码: 310006 办公室电话: 0571-85176593 销售部电话: 0571-85176040 网址: www.zkpress.com E-mail: zkpress@zkpress.com		
排 版	杭州为尔学术网络科技有限公司		
印 刷	浙江新华数码印务有限公司		
开 本	889×1194 1/16	印 张	13.5
字 数	340 000		
版 次	2017 年 12 月第 1 版	印 次	2017 年 12 月第 1 次印刷
书 号	ISBN 978-7-5341-7908-2	定 价	168.00 元

版权所有 翻印必究

(图书出现倒装、缺页等印装质量问题, 本社销售部负责调换)

策划组稿 顾旻波 张 特

责任编辑 刘 燕 卢晓梅 责任校对 赵 艳

封面设计 孙 菁 责任印务 田 文

## 序言

随着地球上人口的急剧膨胀，陆上资源供应已趋极限，各国都把经济发展的重点转移到海洋。这是因为占地球总面积 2/3 以上的浩瀚大海里，蕴藏着极其丰富的海水化学资源、海底矿产资源、海洋动力资源和海洋生物资源等，人类将在 21 世纪全面步入海洋经济时代。海洋开发将形成如海洋油气工业、海洋化学工业、深海采矿业等一批新兴产业。为了更好地开发和利用海洋，必须及时建设我国的深海装备体系，以满足我国对深海矿产资源调查、深海综合调查研究、深海科学研究、海洋资源开发和海洋权益维护等需求。深海装备体系可以包括进行勘查和作业的各类潜水器，如载人潜水器（HOV）、遥控潜水器（ROV）、自治潜水器（AUV）及其复合形式（ARV 或 HROV）；搭载潜水器进行作业的水面支持母船；进行水下勘查和作业的通用或专用深海作业工具；进行海洋环境长期观测的海底观测站；在真实深海环境条件下能进行科学研究的深海实验室；可用于深海环境观测、科学试验、深海资源开发的大型深海工作站等。其中，至少各一台的 HOV、ROV 和 AUV 以及相关的深海作业工具是深海运载体系的一个最基本的配备。这是因为此三类潜水器各有特点、功能互补，而且在有些情况下它们需要协同作业，在意外情况下需要相互救援。如果只有单一的潜水器，其使用在功能上受到限制，在工作中存在“使用风险”，会大大地降低某一种潜水器的使用效能和效率。

我国从 20 世纪 80 年代开始对无人潜水器和载人潜水器开展研究，至 2012 年具有国际上作业型载人潜水器最大下潜深度的“蛟龙”号载人潜水器的研制成功，终于跻身国际深潜技术发达国家俱乐部，科技部在“十二五”期间立项支持了三台经济实用型的 4500 米级的 ROV、AUV 和 HOV 的研制，目的是消化吸收在“蛟龙”号研制过程中的引进技术，巩固技术基础。“十三五”期间，科技部将全面支持 11000 米级的全海深载人 and 无人潜水器的研制，使深海装备技术的发展进入一个黄金时期。

为了进一步加快我国载人深潜技术的发展速度，我从 2013 年 3 月起在上海海洋大学领导的大力支持下，在国内高校中成立了首个深渊科学与技术研究中心，2014 年 11 月获批“上海深渊科学工程技术研究中心（筹）”，我们招聘技术团队研制由 3 台万米级着陆器、1 台 AUV/ROV 复合型的无人潜水器和 1 台 3 人作业型的载人潜水器以及 1 条 4800 吨级的专用科学考察母船组成的深渊科学技术流动实验室，同时招聘一些海洋科学家专攻深渊科学，期望攀登载人深潜技术的高峰，为填补我国的深渊科学空白作出积极的贡献。我们与上海彩虹鱼海洋科技股份有限公司紧密合作，采用“民间资金 + 国家支持”的新模式，把整个项目命名为“彩虹鱼挑战深渊极限”。在上海地方政府和社会有识之士的大力支持下，目前整个项目进展顺利！



“彩虹鱼挑战深渊极限”项目中需要研制的深渊科学技术流动实验室示意图

作为人类重要的深海科学考察和作业装备，大深度载人潜水器集成了材料、力学、机械、控制、声学、光学、电学等多个学科最先进的深海技术。为了在潜水器设计阶段协调多个学科和子系统之间的平衡，需要采用多学科设计优化理论处理学科间的交叉与耦合。由于意识到多学科设计优化理论的重要性，我从 2002 年起即指导研究生开展理论与应用研究，在我国的大深度载人潜水器“蛟龙号”设计中开展了大量多学科设计优化的理论研究和应用研究，至潘彬彬的博士论文把课题组十多年的研究成果进行了系统的梳理和集成。本书在潘彬彬博士论文的基础上，又对系统性和可读性作了大量的修改。本书的出版获得了浙江科学技术出版社的大力支持，他们付出了巨大的努力，我们对于他们的帮助表示由衷的感谢！希望本书的出版，能对我们正在到来的深海装备技术黄金发展期起到一定的支撑作用。

崔维成

2017 年 3 月

# 目录

## 第 1 章 绪论 1

- 1.1 大型复杂工程系统设计问题概述 1
- 1.2 多学科设计优化研究概述 3
- 1.3 载人潜水器发展历史概述 9

## 第 2 章 多学科设计优化理论 17

- 2.1 多学科设计优化建模 17
- 2.2 多学科设计优化方法 18
- 2.3 多学科设计优化的关键技术 27
- 2.4 优化与可靠性 55
- 2.5 多学科设计优化算例 56

## 第 3 章 不确定性理论 63

- 3.1 古典概率论 65
- 3.2 模糊理论 67
- 3.3 凸集理论 70
- 3.4 区间理论 71
- 3.5 证据理论 73
- 3.6 广义概率论 74

## 第 4 章 系统可靠度和可靠性分析 79

- 4.1 可靠度 79
- 4.2 可靠度分析方法 80
- 4.3 模糊可靠度分析简介 89

<b>第 5 章</b>	<b>基于可靠性的多学科设计优化</b>	<b>92</b>
5.1	可靠性设计方法	92
5.2	基于可靠性的多学科设计优化方法	116
<b>第 6 章</b>	<b>载人潜水器设计</b>	<b>125</b>
6.1	载人潜水器的主要构成	125
6.2	载人潜水器的设计概述	128
6.3	载人潜水器的设计基础	131
6.4	载人潜水器设计的关键技术	134
<b>第 7 章</b>	<b>多学科设计优化在载人潜水器设计中的应用</b>	<b>140</b>
7.1	载人舱可靠性设计	142
7.2	载人潜水器总体设计优化	171
	<b>参考文献</b>	<b>197</b>
	<b>符号和缩略词清单</b>	<b>208</b>

# 第1章 绪论

## 1.1 大型复杂工程系统设计问题概述

本书的主要目的是介绍大型复杂工程系统的设计及其相关的多学科设计优化理论。工程设计是指对工程项目的建设提供有技术依据的设计文件和图纸的整个活动过程，是建设项目生命期中的重要环节，是建设项目进行整体规划、体现具体实施意图的重要过程，是科学技术转化为生产力的纽带，是处理技术与经济关系的关键性环节，是确定与控制工程造价的重要阶段。工程设计是人们运用科技知识和方法，有目的地创造工程产品构思和计划的过程，几乎涉及人类活动的全部领域。工程设计的费用往往只占最终产品成本的一小部分（8%~15%），然而它对产品的先进性和竞争能力却起着决定性的影响，并往往决定70%~80%的制造成本和营销服务成本。所以说，工程设计是现代社会工业文明最重要的支柱，是工业创新的核心环节，也是现代社会生产力的龙头。工程设计的水平和能力是一个国家和地区工业创新能力和竞争能力的决定性因素之一。工程设计是否经济合理，对工程建设项目造价的确定与控制具有十分重要的意义。

大型复杂工程系统的第一个特点是规模很大，需要很多人共同参与才能完成。为了工作的方便和高效，一般将一个复杂的工程系统分解为几个分系统，再将分系统分解为子系统，这样一级一级分解，直到底层子系统的设计工作可以由一个人员承担为止。对于给定的某个工程项目和设计师队伍，系统的分解往往要结合设计师队伍的特点来进行，不能简单地照搬国外或他人对同类系统的划分方法。因此，如何结合自己的设计师队伍的特点来科学合理地分解某个要设计的大型复杂工程系统，是总设计师要解决的第一个问题。在系统分解后，如何检查各分系统或子系统之间的接口关系是否完整并且没有重复，是总设计师要解决的第二个问题。对于这一个问题来说，如果没有一个科学系统的方法是很难保证没有遗漏的，而且在某个设计阶段发现了遗漏或矛盾，有可能会影响到前面设计工作的有效性，导致设计工作不断重复，设计效率低下，设计水平不高。

为了进行复杂工程系统的子系统划分并有效地管理各个分系统（子系统）之间的协调，刘正元等参考美国空军由系统顶层向下层逐步分解的设计方法的思路，于1989年在研制“8A4水下机器人”时首次提出了四要素法。该方法在“蛟龙”号载人潜水器和其他水下工程项目的研制过程中得到了进一步地完善（崔维成等，2008）。通过多个项目的实践，设计人员越来越体会到它是分解大型复杂工程系统，弄清系统的组成，理顺各分系统或子系统之间关系等的有力工具。在四要素法中，首先将工程大系统的设计按照专业领域划分为分系统设计，再将分系统设计进一步细分为子系统设计。而且在划分系统的过程中，四要素法将每个分系统和子系统都与设计责任人进行绑定，即分系统或子系统的划分是以承担人为中心，没有承担人，就没有



我们这里所说的分（子）系统，例如在“蛟龙”号设计中，定义大系统的技术负责人为总设计师，分系统的技术负责人为主任设计师，子系统的技术负责人为设备设计师。将工程大系统划分为分系统、子系统后，因为各个分系统（子系统）之间既存在相互沟通，又存在相互约束，所以每个分（子）系统承担人除了要考虑本系统的设计要求外，还必须要考虑本分（子）系统和其他分（子）系统之间的相互制约和要求，即分（子）系统设计要考虑四个要素：输入、输出、支撑和约束。

（1）输入：是系统的总体性能和其他分（子）系统对本分（子）系统的要求，它是本分（子）系统的工作前提。

（2）输出：是本分（子）系统的最终设计结果，它必须满足对本分（子）系统的输入要求，并考虑了约束和支撑的限制。

（3）支撑：为完成本分（子）系统的设计而对其他分（子）系统和总体提出的要求。

（4）约束：为设计本分（子）系统需要考虑的总体及其他分（子）系统对本分（子）系统的约束限制。

系统四要素编制实施步骤如下：

（1）总设计师根据本单位的研制队伍以及与合作单位的具体分工，将所承担的大型工程系统划分成分系统，并确定每一个分系统的承担人。

（2）由每个分系统的承担人初步编制各自的分系统的四要素，并将可分解的分系统根据研制任务的要求以及研制队伍的特点，再划分下一级或数级的子系统，之后再确定每一个子系统的承担人并要求确定的承担人编制新的子系统的四要素表。

（3）由总师系统协调各分（子）系统四要素的相应接口，使已列出的所有分（子）系统的四要素的相应接口成为一个封闭回路，即落实各分（子）系统之间接口与相互关系。

（4）在设计过程中，如分（子）系统承担人提出了新的需要解决的问题，由变更系统的四要素表来进行，变更后的四要素表也交与总设计师或总师办来协调和处理相应接口。

系统四要素法具有下列两个重要特性：

（1）封闭性与内部动平衡性。系统的组成划分是开放式的，随着设计工作的深入，它可增加、合并，但是整个系统的四要素编制必须是封闭的。即系统的输出必须满足总体及其他分（子）系统对本分（子）系统的要求和限制，同时，本系统的支撑条件也必须落实到其他分（子）系统。不同的设计阶段，分（子）系统的划分及四要素的编制可以是不同的。因此，它是一种动态的平衡。

（2）非唯一性。对于某个系统的四要素的确定并不是唯一的，不同的设计方案会有不同的支撑要求，如有的输入可以看成是系统的输出，而有的约束又可以看成是系统的输入。因此系统的输入、输出、支撑以及约束的确定与承担人所承担的研究设计工作有关。虽然四要素的编制不是唯一的，但它的目的是明确的，那就是弄清系统组成，理顺系统之间的关系，并为计划的安排、节点的控制打下基础。

大型复杂工程系统的第二个特点是涉及的学科很多，超出了单个人所能掌握的全部知识，需要很多专业人士共同配合才能完成。这样就需要制定出一个比较科学合理的设计流程，即对于某一个特定的工程系统设计问题，设计出一个不同专业人员相互协助工作的先后顺序。比

如,传统的船舶设计按照船体主尺寸—船型—主机—空间—吨位—吃水—总布置—续航—耐波性—结构—造价……的设计螺旋线进行,设计师沿着螺旋线依次设计各个子系统,各个子系统间的协调依据本轮设计已完成设计的子系统的数据库、现有积累数据和设计师的经验来进行。当最终设计方案的性能或造价不能满足设计任务时,设计师需要沿着设计螺旋线重新进行一轮设计,因此这种螺旋线设计的缺点是明显的,如设计周期长、效率低;而且各个子系统之间的折中是设计师按照经验、直觉、有限的分析和测试来决定的,到底折中得好不好,设计师也不能确定,所以得到的往往是满足要求的设计,而不是最优的设计。

子系统间的协调、折中能够给系统性能带来多大的提升呢?陈卫(2001)以一个飞行器的例子生动地回答了这个问题。20世纪60年代中期,苏联的“米格-25”战斗机曾创下8项飞行速度、9项飞行高度和6项爬高时间的世界纪录,并在1971年第4次中东战争中令当时西方最先进的“F-4鬼怪”式战斗机和先进的“麻雀-1”空空导弹相形见绌。西方的军事专家怀着不安的心情纷纷猜测,这种飞机一定是采用了某种划时代的新技术。1976年9月6日,苏联飞行员维克多·别连科中尉驾着神秘的“米格-25”叛逃至日本北海道机场。随后“米格-25”被大卸八块,日美联合检查了它的每一部分,然而西方军事专家们发现“米格-25”战机并没有某一项技术有突破性的进展(实际上,该机的某些部件和设计甚至是比较落后的),但这些部件和设计组合在一起成为人机系统所发挥出来的效果却是惊人的。因此有评论说:“……钢结构让西方匪夷所思,落后的电子管技术更是让西方深刻了解了苏联电子技术的滞后,……但西方仍为苏联整体系统整合技术的高超而惊叹。”(陈卫,2001)该例子生动地说明了子系统协调的重要性,早在20世纪70年代,有些飞行器设计工程师就意识到了这点,船舶设计师们从80年代开始也认识到了最优的设计往往来自于子系统间的平衡而不是某项技术的先进。

设计方法的发展经历了这样的三个阶段,最原始的工程设计方法是串行方法,即先将工程设计包含的子系统进行先后排序,在设计每个阶段只对一个单独的子系统的设计,当设计好上一个子系统后才进行下一个子系统的设计,这样的设计过程不仅忽略了后续子系统对前子系统的影响,串行的流程使得后续子系统的设计必须等待上游子系统完成后才能进行,而且需要进行多轮完整的串行设计循环才能找到满足要求的设计方案,这极大地延长了设计周期。随着计算机辅助设计和数字虚拟设计等技术的发展,人们提出了并行工程(Concurrent Engineering, CE)设计方法,将系统设计任务分解为可以同时独立执行的子系统,从而可以并行地设计各个子系统,提高效率、缩短设计周期。从那时起,工程师们一直在寻找能够解决系统间协调的更好的方法。多学科设计优化正是在这样一种需求背景驱动下而逐步发展起来的设计方法,它使工程师们能够充分利用现阶段的各种技术和资源,通过子系统之间的合理协调来设计出最优的设计。

可以看到,在“蛟龙”号等水下工程项目中发展并应用的四要素法的思想与多学科设计优化方法是一致的。这个项目也可以看成多学科设计优化理论在水下工程领域的一种具体应用。

## 1.2 多学科设计优化研究概述

多学科设计优化集成了传统优化理论的大部分技术,同时又提出了新的概念以处理多个

学科之间的交叉，因此多学科设计优化的大量基本概念与传统优化理论相近，同时又有进一步的发展。本节将介绍多学科设计优化中的这些基本概念，在此基础上简单综述多学科设计优化的起源和发展现状。

### 1.2.1 基本概念

#### 1.2.1.1 多学科设计优化

Sobieszczanski-Sobieski J. 被认为是多学科设计优化的奠基人，他将多学科设计优化定义为 (Sobieszczanski-Sobieski J., 1995)：多学科设计优化是一种考虑系统内学科间相互影响的设计方法，在 multidisciplinary design optimization 中，单个学科的设计不再局限于本学科，而是会对整个系统的性能产生重要的影响。

美国国家航空航天局兰利研究中心 (Langley Research Center) 的多学科设计优化分部 (Multidisciplinary Optimization Branch, MDOB) 对多学科设计优化的定义为 (<http://mdob.larc.nasa.gov>)：多学科设计优化是一种方法，其目的在于设计复杂工程系统及其子系统，并探索它们协同工作的机理。

#### 1.2.1.2 学科

在 multidisciplinary design optimization 中，学科的概念指的是相对独立的设计模块或者子系统。注意此处的相对独立不是指学科间没有联系：多学科设计优化的学科间往往存在参数交换，即学科耦合或者学科交叉。在图 1-1 中， $x_1$ 、 $x_2$  分别是学科 1 和学科 2 的输入变量 (即设计变量)， $z_1$ 、 $z_2$  分别是两个学科的输出变量 (也称子系统的状态变量)，而  $y_{12}$ 、 $y_{21}$  就是学科 1 和学科 2 之间的耦合参数或称耦合变量。可见，多学科设计优化中的学科概念与传统的学科概念并不完全相同。

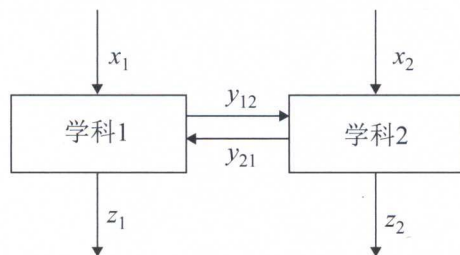


图 1-1 交叉学科

#### 1.2.1.3 子系统分析

子系统分析是指某个子系统根据给定的输入参数进行分析和计算得到输出参数的过程，即图 1-1 中学科 1 根据本学科输入变量  $x_1$  和  $y_{21}$  计算得到  $z_1$  和  $y_{12}$ ，或者学科 2 根据  $x_2$  和  $y_{12}$  计算得到  $z_2$  和  $y_{21}$  的过程。与传统优化设计中的子系统分析相比，其不同点在于，子系统  $i$  的输入参数除了设计变量  $x_i$  还有耦合参数  $y_{ji}$  ( $j$  泛指所有传递参数给子系统  $i$  的子系统，而不是单个子系统)，且输出参数除了状态变量  $z_i$  还有耦合变量  $y_{ij}$ 。

#### 1.2.1.4 系统分析

系统分析是指整个系统根据给定的输入参数进行计算分析得到输出参数的过程，系统分析通常包含所有子系统的分析，且包含相互交叉的子系统之间的多次平衡迭代，如图 1-1 中

包含两个子学科（子系统）的系统根据输入变量  $x_1$  和  $x_2$  计算得到  $z_1$  和  $z_2$  的过程，该过程中学科 1 和学科 2 需要进行多次子系统分析和学科间数据交换以确定耦合参数  $y_{12}$  和  $y_{21}$  的合适取值。

### 1.2.1.5 不确定性

人类通过观察自然现象，分析并概括出自然的运行规律，从而建立科学知识。但自然现象经常会发生已知规律外的活动，这些客观存在的意外活动很多时候依靠现有科学无法解释或描述，体现为随机的震荡或波动。这些意外活动有的是因为现有理论不完善而不能解释，有的是因为研究对象本身的特性就包含不能准确描述的性质。

### 1.2.1.6 偶然不确定性

偶然不确定性是指客观存在的且不可减少的不确定性，偶然不确定性描述的是实际系统或者环境固有的无规律变化（随机变化）的特性，所以通常也称为固有不确定性。

### 1.2.1.7 认知不确定性

认知不确定性是指由于知识缺乏导致的主观不确定性，认知不确定性是由于知识缺乏或者信息不全引起的，故也称主观不确定性。

### 1.2.1.8 状态函数

在设计阶段，工程系统的规定功能往往可表示为输入变量的函数，该函数被称为状态函数，通常由状态函数值的大小是否处于给定的范围内来判断工程系统的功能是否能够满足设计规定。

### 1.2.1.9 可靠度

工程系统或产品在规定的条件下和规定的时间内完成规定功能的能力（或者概率）称为可靠性或可靠度；与之对应的，工程系统或产品不能完成规定功能的概率称为失效概率。计算系统可靠度或者失效概率的过程称为可靠度分析，可靠度分析的基础是不确定性理论。

### 1.2.1.10 优化相关定义

多学科设计优化集成了传统的优化理论，所以如目标函数、约束条件、设计变量等与传统优化理论中的定义基本一致。

## 1.2.2 多学科设计优化发展动态

多学科设计优化最早起源于飞行器设计领域。20 世纪 70 年代航空界流行的飞行器设计方法是子系统串行式设计方法，就是在设计时先对所有子系统划分先后顺序，然后按照串行逐个设计各个子系统。在设计某个子系统时暂时忽略其他子系统和本子系统的联系，等设计好该子系统以后再设计下一个子系统，按顺序设计好所有子系统后，如果发现最终设计方案或者某个子系统的设计不理想的话，调整参数并开始新一轮的设计循环……不断进行设计循环直至找到可接受的设计方案。这样的设计流程存在明显的弊端：首先，各个子系统之间实际上是存在交叉耦合的，这种设计方法在设计子系统时人为切断了它与其他子系统之间的联系，假定各个

子系统之间是相互独立的，而实际上该子系统的设计发生变动时也会引起其他子系统的变化，而其他子系统的变化也会反过来影响该子系统的性能；其次，这样的设计方法是串行的，意味着所有子系统的设计必须等待之前的子系统设计完成后才能开始，这样将造成时间的浪费。

20 世纪 80 年代，一些飞行器设计人员已经意识到了飞行器设计应该从协同工程的角度出发，同时考虑飞行器整个寿命期内的所有方面（Schrage etc., 1991），以 Sobieszczanski-Sobieski J. 和 Kroo I. 为代表的一批航空领域的科学家和工程技术人员陆续提出了一些对复杂系统进行分析及设计优化的方法，Sobieszczanski-Sobieski J.（1982）提出了采用线性分解来处理优化问题的方法，该方法已经包含了多学科设计优化方法的核心思想之一——分解。这些对复杂系统进行分析及设计优化的思想和方法不断发展和完善就逐步形成了多学科设计优化（Multidisciplinary Design Optimization, MDO）理论（李响和李为吉，2003）。

Sobieszczanski-Sobieski J. 于 1993 年正式提出多学科设计优化是适合于工程系统设计，特别是复杂工程系统设计的方法（Sobieszczanski-Sobieski J., 1993）。多学科设计优化方法被提出后受到了学术界和工程界的高度重视，AIAA 成立了多学科设计优化技术委员会（Multidisciplinary Design Optimization Technical Committee, MDOTC），该技术委员会 1991 年（Schrage etc., 1991）和 1998 年（Giesing and Barthelemy, 1998）的白皮书在总结 MDO 的研究状况和应用状况的基础上，讨论了工程实际应用对 MDO 技术发展提出的要求，并根据这些要求指出了多学科设计优化的研究方向，AIAA 还在《Journal of Aircraft》杂志上出版了 MDO 专集（张科施等，2006）；NASA 的 MDOB 建立了测试 MDO 方法的问题集：MDO Test Suite（Padula et al., 1996），成为测试和验证多学科设计优化方法优劣的一个重要标准，并推动着多学科设计优化商用软件平台的成熟应用；AIAA/UASF/NASA/ISSMO 几大机构联合，每两年召开一届多学科分析与优化（Multidisciplinary Analysis and Optimization, 简称 MA&O）研讨会。在这些学术机构的推动下，多学科设计优化理论在 20 世纪 90 年代得到了快速发展，提出了多学科可行算法（Multidisciplinary Feasible Method, MDF）、单学科可行算法（Individual Disciplinary Feasible Method, IDF）、连续近似优化算法（Successive Approximate Optimization, SAO）、双层综合优化（Bi-Level Integrated Synthesis, BLISS）、并行子空间算法（Concurrent Subspace Optimization, CSSO）、协同优化算法（Collaborative Optimization, CO）、目标层解法（Analytical Target Cascading, ATC）等多学科设计优化方法。到 21 世纪初，多学科设计优化的理论和主要方法已基本成熟，理论研究进入较平缓的发展时期，现今的理论研究更多集中在各个领域的研究人员在应用多学科设计优化方法的过程中对这些方法进行改进，本书将对主要的多学科设计优化方法及其改进进行介绍。

多学科设计优化的实现需要大量的计算机算法支持，随着其应用的不断增加，多学科设计优化平台软件的市场需求也越来越大。多学科设计优化商用软件也逐步发展并达到工程应用的水平，如 iSIGHT（Engineous）、ModelCenter（Phoenix Int.）、modeFRONTIER（Esteco）等通用型多学科设计优化平台。很多专用多学科设计优化软件也得到了迅速的发展，例如 Chen 等（2006）针对人造卫星设计建立了 Satellite Integrated Design Environment（SIDE）平台；Iqbal（2009）开发了基于 Excel 的集成系统，可在飞行器的概念设计阶段用集成 CATIA、FLUENT、ANSYS、SURFCAM 等 CAD 和 CAE 软件进行高精度设计。这些软件平台的蓬勃发展推动着

多学科设计优化从诞生地——美国向全世界传播,其中 iSIGHT 被法国达索航空并购体现了欧洲航空界对多学科设计优化技术的重视。

多学科设计优化是面向实际工程的学科,其发展离不开工程应用的检验和推动,所以多学科设计优化的应用研究被放在和理论研究同等重要的位置。在它的起源地——航空界,多学科设计优化现在已经成为重要的设计手段:波音在 F18、F117、B2 等战斗机和轰炸机 (Young et al., 1998; Wakayama and Kroo, 1998)、军用直升机 (Tarzanin and Young, 1998) 等飞行器的设计中采用了很多多学科设计优化技术,而且应用的深度和广度不断提升;通用电气采用 iSIGHT 研究涡轮发动机的协同优化框架,建立近似模型并实施优化 (Röhl et al., 1998; Golovidov et al., 1998);洛克希德马丁在 F16 改进型和 F22 等先进战斗机的概念设计 (Carty, 2002)、气动弹性设计、总体设计中也大量采用了多学科设计优化技术 (Love, 1998; Radovcich and Layton, 1998); Rafique (2009) 采用遗传算法对包含推进、空气动力学、飞行控制和重量四个子系统的多级火箭概念设计进行了 MDO 分析;Gündüz (2010) 采用 ModelCenter 集成了商用 CAD、CAE 软件、Matlab 以及乔治亚理工的自有程序,力图使直升机的设计在概念设计阶段就确定大部分参数,从而减少后续试验、制造和维护阶段的设计变动和费用。

从现有文献可以知道,目前多学科设计优化的应用还是主要集中在航空航天领域。各个大学也在开展大量的多学科设计优化理论和应用研究:斯坦福大学的 Kroo 教授提出了著名的 CO 算法 (Kroo et al., 1994);弗吉尼亚工学院成立了先进飞行器多学科分析与设计中心,开展 MDO 的研究与教学工作,进行引擎翼端安装的桁架支撑式机翼超音速飞机的多学科设计优化研究,与使用传统设计方法的设计方案相比,它在降低起飞总重、燃料重量、操作空重的同时可提升巡航半径、每单位燃油可携带旅客飞行英里数等性能;乔治亚理工航天工程学院的航天系统分析中心开展了并行工程、近似模型和考虑不确定性的多学科设计优化方法等方面的研究,在直升机的初步设计阶段,进行了包括稳性和操纵性、引擎选择、推进性能、传送装置、重量和平衡、空气动力学、结构分析、噪声、经济性、总体性能等多个子系统的综合设计优化 (Khalid and Schrage, 2006),该校的航空系统设计中心 (Space Systems Design Lab) 在轨道分离式发射 (Branching Trajectories) 的设计中吸取了多学科设计优化的思想,采用多学科设计优化来处理运载太空飞船和其所搭载的航空器之间的耦合 (Ledsinger and Olds, 1998);布法罗大学研发了多学科设计优化方法模拟器 CASCADE,用于比较各种多学科设计优化方法的执行效率 (Hulme K. F. and Bloebaum C. L., 1997; 2000);佛罗里达大学研究了多学科设计优化在导弹设计中的应用,鹿特丹大学采用并行子空间法设计飞机刹车,研究了提高多学科优化灵敏度分析和求优效率的方法,并研究了不确定参数对多学科设计优化的影响;加拿大西安大略大学开发了基于网络技术的分布式多学科设计优化框架 (Wang et al., 2003);多伦多大学基于 Python 语言编写了多学科设计优化框架,并通过多学科设计优化测试问题集对各种多学科设计优化方法的效率进行了全面的比较 (Tedford, 2007);英国南安普敦大学成立了计算工程与设计中心研究多学科设计优化技术。除了在航空工业发达国家得到广泛应用,多学科设计优化正在向全球传播,如韩国 (Yi et al., 2007)、日本 (Kazuhisa et al., 2005)、德国 (Hönlinger et al., 1998) 等国都开展了多学科设计优化研究。另一个发展趋势是从航空航天领域向其他领域延伸,如水中兵器 (Yukish et al., 2001)、三体船 (Hefazi, 2005)、潜艇 (Shingler, 2005)、热

防护系统 (Sun and Zhang, 2006)、空间结构锁 (苏多等, 2008)、自动可重构系统 (Ferguson, 2008)、舰船概念设计 (Hart, 2010) 等。

统筹优化的概念在我国早已深入人心, 华罗庚的《统筹方法》一文早已写入小学语文教材。我国学者对传统优化理论的研究也已经取得了卓越的成绩, 如大连理工大学开发了国际领先的结构优化软件 MCADS 系统 (顾元宪和程耿东, 1995; 王健和程耿东, 2003)。自多学科设计优化在美国兴起后, 我国的研究人员也认识到了多学科设计优化的重要性, 开展了多学科设计优化的理论和应用研究: 南京航空航天大学较早开展了多学科设计优化方法和软件框架的研究 (余雄庆, 1999; 余雄庆等, 2004; 刘克龙和姚卫星, 2007), 并探索了其在机翼气动弹性设计中的应用 (刘克龙等, 2007); 北京航空航天大学研究了通过设计矩阵分析来重新进行系统建模, 减少反馈型耦合参数的数目, 从而降低优化模型的复杂度, 甚至可能将耦合模型变成前馈模型 (廖馨和王振华, 2007), 并开始研究不确定性对多学科设计优化结果的影响 (韩明红和邓家禔, 2007); 国防科技大学开展了导弹多学科设计优化的多项研究, 探索了分布式协同算法 (陈琪锋等, 2001; 2003)、实验设计和响应面模型 (罗世彬等, 2003)、灵敏度分析 (颜力等, 2005) 等技术 in 导弹设计中的应用。除了这些航空航天领域的高校, 西北工业大学 (李响和李为吉, 2003; 谷良贤和龚春林, 2007)、清华大学 (王爱俊和陈大融, 2001)、上海交通大学 (Liu Hong, Lin Xinhua et al., 2004)、哈尔滨工业大学 (张帆, 1998)、华中科技大学 (陈亚洲等, 2007)、山东科技大学 (马静敏, 2005; 任利, 2006)、华中农业大学 (胡伟, 2007)、郑州大学 (秦东晨等, 2004)、大庆石油学院 (齐名军, 2007)、中国航天机电集团公司第三研究院 (王健, 2000)、中国飞机强度研究所 (孙侠生, 2002)、中国航天科工集团三院三部 (陈建江等, 2005)、中国航空动力机械研究所 (尹泽勇等, 2007)、北京宇航系统工程研究所 (王晓青和王小军, 2007)、中国空间技术研究院总体设计部 (胡凌云, 2004) 等大学和研究单位也开展了多学科设计优化研究, 并将多学科设计优化技术引入核能工业、汽车工业、船舶与海洋工程等领域。

在船舶与海洋工程领域, 多学科设计优化的研究集中于应用研究。在 2000 年就出现了将多学科设计优化应用于集装箱船设计的研究 (Neu, 2000), 发展至今, 已经在鱼雷 (Yukish, 2001)、三体船 (Hefazi, 2005)、军舰 (Schultz, 2006)、潜艇 (操安喜等, 2007)、深海空间站 (赵敏, 2009) 等航海器和海洋工程结构物中得到应用。在“蛟龙”号载人潜水器设计过程中, 开展了一系列多学科设计优化理论和应用研究, 在调研分析国内外多学科设计优化研究现状 (刘蔚和崔维成, 2004; 赵敏和崔维成, 2007) 的基础上, 提出了两层分级多学科设计框架 (刘蔚等, 2006; 2008) 和两级集成系统协同优化方法 (Bi-Level Integrated System Collaborative Optimization, BLISCO) (赵敏和崔维成, 2009), 并将这些方法应用于自治无人潜水器 (AUV) (刘蔚等, 2006) 和大深度载人潜水器 (操安喜等, 2007; 刘蔚等, 2008; 操安喜和崔维成, 2008; 赵敏和崔维成, 2009) 的概念设计中。

从现有多学科设计优化研究文献中可以看到, 目前绝大部分多学科设计优化的研究和应用集中在确定性参数的范围内, 这样得到的设计方案有时并不能保证在面对复杂的工作环境时性能稳定、可靠。为了考虑不确定性参数对系统状态变量的影响, 研究人员开始研究基于可靠性的多学科设计优化: 通过引入辅助设计变量消除多学科系统中子系统之间的反馈参数, 然

后采用单循环可靠性设计方法进行基于可靠性的多学科设计优化 (Agarwal, 2003); 将 CSSO 和改进型一阶二次矩法相结合进行飞行器可靠性设计 (Fan and Li, 2008); 分别采用概率论和区间理论处理客观不确定性和主观不确定性, 建立统一可靠度分析法并用于多学科设计优化系统的可靠度分析 (Guo, 2008); 采用区间数描述不确定性并建立一套可用于多目标、双向耦合 (既有前馈也有反馈) 系统的鲁棒性多学科设计优化方法 (Li and Azarm, 2008); 将近似模型的误差当成不确定性因素, 并采用性能估计法 (Performance Measure Approach, PMA) 和优化可靠度分析交替进行法来处理这些不确定因素, 从而在飞行器设计的初步设计阶段就尽量减少计算误差带来的影响并提高设计的鲁棒性; 通过例子系统地比较了各种可靠度分析方法、可靠性设计优化方法和多学科设计优化方法进行组合时的计算误差和效率的差别 (Smith, 2007)。对于航空领域基于 CO、CSSO、ATC 等多学科设计优化方法的可靠设计优化研究现状, Yao 已经进行了较详细的综述 (Yao et al., 2011)。在我国 4500m 载人潜水器设计的过程中, 由于大量部件首次由我国自行生产, 面临着大量的不确定因素, 所以首次开展了基于可靠性的多学科设计优化在载人潜水器设计中的应用研究, 通过改进可靠度分析方法和可靠性设计优化方法建立了一套适用于载人潜水器等复杂工程设计的方法和程序, 研究了载人潜水器的不确定性因素来源并进行初步的可靠性设计, 这些工作为本书打下了基础。

经过近 30 年的发展, 现在多学科设计优化技术已经逐渐得到了工业界的认可, 并逐渐从技术突破期过渡至工程应用期。近几年来, 多学科设计优化在工程界尤其是航空航天界得到了越来越多的应用, 这些实际工程应用对多学科设计优化提出了越来越严峻的挑战。尽管计算机技术在几十年间取得了快速地发展, 计算难度却一直是多学科设计优化的一大难点, 尤其是考虑不确定性后计算量更是达到前所未有的庞大。所以在接下来的相当长一段时期内, 稳定且高精度的近似技术将是提高基于可靠性的多学科设计优化工程实用性的一个重要技术途径。多学科设计优化处理的对象是多个学科和多个子系统, 它的应用深度将受到各个子系统和子学科科学发展水平的制约。此外, 不同工程系统的子系统之间的耦合形式和紧密程度不同, 需要总体设计者根据实际工程的特点进行多学科设计优化建模, 选用合适的多学科设计优化方法处理子系统之间的耦合, 而且需要各个子系统的设计人员紧密配合才能建立能够运行优化算法的整个系统模型。现代复杂工程产品的研制往往由多个单位或部门联合进行, 很多时候出于各个单位 (部门) 的技术保护等原因, 总体设计组并不能掌握所有子系统的设计, 总体设计有时只能接受子系统的设计结果并在总体性能上做出妥协。这些都是在实际工程中组织多学科设计优化时不得不克服的难题。以上这些难题的解决办法都需要针对具体问题而制定, 本书将在介绍多学科设计优化相关方法和技术的同时, 介绍这些技术在载人潜水器设计中的应用, 为载人潜水器和水下工程设计人员提供本领域的直观经验, 也可为其他复杂系统工程设计人员和研究人员提供参考。

## 1.3 载人潜水器发展历史概述

### 1.3.1 海洋的形成

从太空中观察, 会发现我们的母星——地球主要由蓝色组成, 这是因为地球的 2/3 被海洋



覆盖着。大约 66 亿年前银河系发生大爆炸，其碎片和物质经过长时间的凝聚，以各个恒星为中心形成了不同的星球团体，我们的太阳系形成于大约 46 亿年前，地球也在这一过程中诞生了。由于星云物质释放出的引力势能转化为动能和热能，致使温度升高，加上地球内部放射性元素也在不断释放出热能，故初期的地球还是一团炽热的液体物质。高温的地球在旋转过程中使其中的物质发生重排，密度大的元素向地心下沉，密度小的物质（如岩石等）浮在外层，从而形成了分层结构。随着时间的推移地球慢慢冷却，内圈物质不断凝聚形成了固态地核，外圈物质冷却凝固形成以岩石为主的地幔层，地核与地幔之间的尚未冷却的熔融物质（岩浆）会沿着地幔的缝隙喷发。高温岩浆喷发的水蒸气、二氧化碳、氮气等物质不断聚集形成了大气层，随着温度的进一步降低，大气中的水蒸气开始凝结并形成降雨，雨水降至地表后流向地势低洼处形成了河流、湖泊和海洋。在随后的漫长岁月中，地球上的水在太阳照射下，在大气层和岩石圈之间形成了一个庞大的水循环系统。原始海洋随着地球的气候变化、大陆板块运动和其他地质活动发生着变化，最终形成了我们今天看到的太平洋、大西洋、印度洋、北冰洋、南冰洋的五大洋布局（2000 年国际水文地理组织确认南冰洋为第五大洋），地球的变化还在不断改变海洋的分布和形状，例如太平洋板块与欧亚板块的运动使得太平洋正在以每年几厘米的速度变小，而且在板块的俯冲区形成了大深度海沟。

### 1.3.2 海洋与生命

根据已经发现的生物化石和地球的小行星与陨石撞击记录分析，目前基本推断出地球生命出现在 40 亿至 38 亿年前，基本回答了地球生命起源的时间。关于地球生命起源的地点在哪里，最普遍的认为生命起源于海洋，但是也有学者指出，原始海洋盐浓度过高不利于生命的诞生，应该诞生于淡水系统中。无论如何，大多数人基本认同生命诞生于液态水中。而对于生命如何起源的这个问题，人类至今仍未找到答案。关于地球生命的起源，目前有创造论、自然发生论、陆地起源说、化学起源说、宇宙生命论等多种学说，这些学说各自都存在或多或少有待解释的问题和无法证实的猜测。在 20 世纪 70 年代，科学家通过分析古细菌的生活环境发现，古细菌生活的高温、缺氧、含硫、偏酸的环境与海底热泉喷口的环境十分符合，因此提出了地球生命可能起源于海底热泉喷口的学说。而且，近年来发现遗传物质的产生过程与硫的化学反应有密切关系，使得这一学说得到越来越多的支持。

尽管我们还没有找到生命起源的最终答案，但是海洋无疑在生命的诞生和演化过程中起到了重要的作用，在生命化学起源说和热泉喷口生命说中海洋为生命物质的融合演化提供了场所。此外，由于地球自然变化或者小行星撞击地球等灾难，地球生命经历了数次生物大灭绝，因此生命诞生后的演化过程并不是一帆风顺的，经历了多次类似推倒大厦从头再来的曲折过程。由生命演化的曲折也可以想象地球生命同样经历了无数次从诞生到灭绝的艰难历程，直至诞生出了适应地球环境变化的生命——我们的祖先。在海底热泉周围可以发现大量不依赖于阳光、不受地球气候变化的生命，所以海洋及其海底热泉可为生命的生存提供避难所，在灾难过去后这些生物成为地球生命发展壮大的主力军。所以，即使最初的生命可能不是起源于海洋，海洋也在地球生命演化发展的进程中起着非常重要的作用，说海洋孕育了地球生命一点也不为过。