



物理规划方法及其 在船舶设计优化中的应用

PHYSICAL PROGRAMMING AND ITS APPLICATION IN
SHIP DESIGN OPTIMIZATION

■ 郝寨柳 冯佰威 刘祖源 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

物理规划方法及其 在船舶设计优化中的应用

郝寨柳 冯佰威 刘祖源 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书针对船舶设计的复杂性和传统船舶设计优化的不足,着重进行多学科设计优化方法及多目标优化算法的研究与改进。提出了基于物理规划和动态偏好区间的分级目标传递法;改进了基于物理规划的多目标优化算法;在此基础上提出了基于物理规划的多目标分级目标传递法;最后,搭建了船型优化平台,进行了船舶水动力性能和结构性能综合优化研究。

本书可作为船舶与海洋工程专业博、硕士研究生教材,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。

图书在版编目(CIP)数据

物理规划方法及其在船舶设计优化中的应用/郝寨柳, 冯佰威, 刘祖源编著. —北京:国防工业出版社, 2015. 11

ISBN 978-7-118-10382-3

I. ①物… II. ①郝… ②冯… ③刘… III. ①船舶设计 IV. ①U662

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 249483 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)

三河市众誉天成印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 9 字数 162 千字

2015 年 11 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 58.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店: (010)88540777

发行邮购: (010)88540776

发行传真: (010)88540755

发行业务: (010)88540717

前 言

船舶是一个巨复杂系统,其设计优化涉及多个子系统,是一个多学科、多目标优化问题,如何平衡各设计指标,获得整体性能最优的设计方案,需要好的多学科多目标设计优化方法。复杂系统的多学科多目标设计一直是研究者所关注的问题,该方面已有不少的研究成果,并在实践中不断地被完善和发展。

物理规划(Physical Programming, PP)是由 A. Messac 提出的一种处理多目标优化问题的方法,它能通过设置偏好函数和偏好结构,从本质上把握设计者对不同设计目标的偏好程度,免除多目标优化中的权重设置和更新,减轻大规模多目标优化问题的计算负担。物理规划在国内外得到了广泛研究和应用,涉及航空航天、车辆工程、船舶与海洋工程、机械制造等领域。物理规划的应用可分为三类:①用于传统的多目标优化算法、多目标决策等方面,首先根据人们的偏好程度把多目标问题转换成单目标问题,然后采用不同的方法进行处理;②解决多级优化算法中的一致性误差问题,如处理协同优化(Collaborative Optimization, CO)和分级目标传递(Analytical Target Cascading, ATC)中的一致性误差,可以提高其优化效率和质量;③建立基于物理规划的多目标优化算法,得到均匀分布的 Pareto 前沿。物理规划的核心是偏好函数,现有的偏好函数存在一些问题,影响了物理规划的应用。本书首先分析偏好函数存在的问题,然后针对这些问题进行研究,并提出了改进:①在满足偏好函数的假设条件下,将其扩展到任意偶数次阶,以提高阶数选择的灵活性;②选择光顺性度量,通过优化来选取合适的阶次和斜率参数,提高其光顺性,降低其导数变化程度,以改善其在优化中的应用效果;③扩展其在偏好区间上限以外区域的表达,提高其适用范围。然后以此为基础,结合多学科设计优化方法和分级目标传递法,提出了基于改进的物理规划的多目标优化算法、基于物理规划和动态偏好区间的分级目标传递法,最终建立了高效高优化质量的多目标多学科优化方法——基于物理规划的多目标分级目标传递法,并将该方法应用于船舶水动力性能和结构性能的综合优化。

本书共分 6 章:

第 1 章通过对船舶设计特点的分析,阐述了多学科多目标设计优化对船舶产品设计的重大意义,介绍了多学科设计优化方法及多目标优化算法的研究及应用现状。

第 2 章首先介绍物理规划的研究现状,然后对物理规划进行详细说明,进而

指出其核心——偏好函数存在的问题。在上述研究基础上,对偏好函数进行改进,有效地改善了物理规划在优化中的应用效果和范围,为后续研究奠定了基础。

第3章通过研究多目标优化算法处理船舶各个目标之间的矛盾冲突,深入分析了基于物理规划的多目标优化算法(Multi-Objective Optimization Algorithm Based on Physical Programming, MOOA-PP)的不足之处,在此基础上对其进行多方面改进,使其可以应用于工程实际,生成高分布质量的 Pareto 前沿。本章以数值算例和船舶概念设计优化为例,并与多目标进化算法进行对比,说明改进的 MOOA-PP 的有效性。

第4章通过研究多学科设计优化(Multi-disciplinary Design Optimization, MDO)方法解决船舶各学科间的耦合问题,建立了一种高效高操作性的 MDO 方法。首先通过综合分析比较目前的 MDO 方法,选取 ATC 方法进行研究,然后对 ATC 方法和基于物理规划的分级目标传递法(Analytical Target Cascading Based on Physical Programming, ATC-PP)进行改进,提出了基于物理规划和动态偏好区间的分级目标传递法(Analytical Target Cascading Based on Physical Programming and Dynamic Preference Interval, ATC-PP-DYN),有效地提高了优化效率和质量。

第5章分析总结了多目标多学科优化问题的处理方法,指出目前在实现学科解耦、得到高分布质量的 Pareto 前沿方面仍缺少有效的方法。建立了高效、高优化质量的多目标多学科优化方法——基于物理规划的多目标分级目标传递法(Multi-Objective Analytical Target Cascading Based on Physical Programming, MOATC-PP),可以有效地解决学科间的耦合和目标间的矛盾冲突,高效得到高分布质量的 Pareto 前沿,并以船舶概念设计优化为例来说明 MOATC-PP 的有效性。

第6章进行了船舶水动力性能和结构性能综合优化:搭建船舶综合优化平台,考虑阻力、耐波性、操纵性、结构四个学科,同时进行船型和结构优化,建立的优化模型更加复杂且贴近船舶优化实际。采用本书提出的 MOATC-PP 可以高效得到高分布质量的 Pareto 前沿,充分显示了 MOATC-PP 的优越性。

本书第1章由冯佰威、刘祖源编写;第2章由郝寨柳、刘祖源编写;第3章由冯佰威、郝寨柳编写;第4章由郝寨柳、冯佰威编写;第5、6章由郝寨柳编写。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士、硕士研究生的学习用书,可供船舶与海洋工程专业的教学、研究人员参考,也可作为优化方法研究者的参考书。

针对船舶设计优化的特点,在现有方法的基础上,通过改进、融合,提出了一些新的多学科设计优化方法、多目标优化算法以及多学科多目标优化算法,对船舶多学科多目标优化问题进行了有益的探索。当然我们的工作才刚刚起步,书

中可能存在不少不成熟甚至错误的观点和方法,诚望各位读者不吝赐教。

本书得到国家自然科学基金委重点研究项目“船舶多学科设计优化的若干基础问题研究”(批准号:51039006)的资助。

编著者

2015年5月31日

目 录

第 1 章 船舶设计优化方法	1
1.1 船舶的设计特点及方法	1
1.2 多学科设计优化方法	3
1.2.1 单级优化算法	3
1.2.2 多级优化算法	4
1.2.3 MDO 方法在船舶领域中的应用	6
1.3 多目标优化算法	7
1.3.1 多目标优化算法现状	7
1.3.2 多目标优化算法在船舶领域中的应用	8
1.3.3 多目标优化算法对比	9
1.4 本书内容概述	10
参考文献	11
第 2 章 物理规划及其改进	16
2.1 物理规划	16
2.1.1 物理规划的基本内容	17
2.1.2 偏好函数	17
2.2 物理规划方法分析	24
2.2.1 多项式形式偏好函数的分析	24
2.2.2 指数形式偏好函数的分析	27
2.3 改进的物理规划	28
2.3.1 偏好函数阶次扩展	28
2.3.2 阶次和斜率参数的选取	31
2.3.3 偏好函数在偏好区间上限以外区域的表达	35
参考文献	36
第 3 章 基于改进的物理规划的多目标优化算法	38
3.1 多目标优化理论	38

3.2	基于物理规划的多目标优化算法的基本原理	39
3.2.1	伪偏好结构均匀搜索目标空间	39
3.2.2	缩减搜索域	41
3.2.3	转动搜索域	44
3.3	基于改进的物理规划的多目标优化算法	45
3.3.1	MOOA-PP 方法分析与改进思路	45
3.3.2	混料均匀试验设计的改进	47
3.3.3	转动伪偏好结构技术	53
3.4	Pareto 前沿评价指标	54
3.5	数值算例	55
3.5.1	改进的 MOOA-PP 方法解题步骤	55
3.5.2	算例	56
3.6	MOOA-PP 方法在船舶概念设计优化中的应用	60
3.6.1	二目标优化	61
3.6.2	三目标优化	63
3.6.3	结论	68
参考文献		68
第 4 章 基于物理规划和动态偏好区间的分级目标传递法		70
4.1	分级目标传递法概述	70
4.2	基于物理规划的分级目标传递法	73
4.2.1	分级目标传递法存在的问题	73
4.2.2	基于物理规划的分级目标传递法	74
4.3	动态偏好区间技术	75
4.4	基于物理规划和动态偏好区间的分级目标传递法	79
4.5	数值算例	81
4.5.1	测试函数	82
4.5.2	协同优化优化结果	82
4.5.3	分级目标传递法优化结果	85
4.5.4	优化结果对比	88
参考文献		89
第 5 章 基于物理规划的多目标分级目标传递法		90
5.1	多目标多学科优化方法分析	90
5.2	基于物理规划的多目标分级目标传递法	91

5.2.1	MOATC-PP 数学模型	91
5.2.2	MOATC-PP 框架及流程	94
5.2.3	小结	96
5.3	MOATC-PP 在船舶概念设计优化中的应用	96
5.3.1	船舶概念设计优化模型	97
5.3.2	船舶 MOATC-PP 数学模型	97
5.3.3	优化结果及分析	99
参考文献		102
第 6 章 MOATC-PP 在船舶水动力性能和结构性能综合优化中		
的应用		103
6.1	综合优化框架与流程	103
6.1.1	综合优化框架	103
6.1.2	综合优化流程	103
6.2	船型参数化建模	105
6.3	学科分析	106
6.3.1	阻力学科	107
6.3.2	耐波性学科	107
6.3.3	操纵性学科	108
6.3.4	结构学科	108
6.4	近似技术	109
6.4.1	近似模型建立流程	109
6.4.2	试验设计	110
6.4.3	近似模型形式选取	113
6.5	船舶水动力性能和结构性能综合优化	114
6.5.1	优化目标、变量和约束	115
6.5.2	近似模型的建立	116
6.5.3	综合优化过程及结果	117
6.5.4	结论	131
参考文献		132

第 1 章 船舶设计优化方法

本章通过对船舶设计特点的分析,阐述多学科多目标设计优化对船舶产品设计的重大意义。围绕船舶多学科多目标设计优化在工程应用中存在的难点,介绍多学科设计优化方法及多目标优化算法的研究及应用现状。最后对本书的研究内容进行概述。

1.1 船舶的设计特点及方法

目前,船舶设计一般采用母型船改造的方法。设计者根据用船部门对设计船提出的各项要求,凭借自己的经验,寻找几艘用途相仿、形状相似、营运中又比较受业主满意的船作为母型船,然后结合新船的设计特点,分析、确定船舶主尺度,形成初步方案,接下来估算这个方案的各种性能,并与母型船比较,确认是否达到预期的改进效果和技术任务书中的各项性能要求。由于船舶设计中的矛盾错综复杂,往往要进行多次这种估算校核工作才能得到比较符合要求的方案。换言之,船舶的设计过程是一个反复循环、螺旋式前进的过程,如图 1-1 所示。



图 1-1 传统的船舶设计螺旋

这种螺旋式的设计过程,实际上是一种串行序列化方法。即首先确定主尺度,然后进行船型设计和总布置设计,再根据船型进行主机选型及螺旋桨的设计,之后再进行结构设计,最后进行其他子系统的设计。在整个设计过程中,陆

续确定各学科的设计参数,设计人员对已经确定的参数不断进行各类性能校核,而且随着设计的深入这种性能校核将更为严格,从最初的经验公式到基于CFD/CAE的性能预报,其精确度不断提高,直到最终确定符合性能要求的设计方案。这种串行的设计方法对设计人员来说有其特有的优势,因为在设计过程中的某个阶段(如动力系统设计),大量的船舶设计参数(如主尺度、船型等)已经确定,这些参数常作为静态变量来考虑,或仅仅允许在小范围内进行改变,这就大大减少了问题的复杂度。如动力系统的设计人员可以更专注动力系统本身的设计,而较少考虑前期阶段的设计。这种方法的缺陷是:在设计的每个节点由于有过多的设计参数保持不变,本阶段的设计优化空间非常有限,最终获得的将是一个可行的方案,而非最优方案。

船舶是一个复杂的巨系统,构成这个巨系统的子系统相互依存、各司其职、高度集成,其中任何一个子系统的变化往往会引起其他子系统的连锁变化,系统之间的耦合影响也会使设计者需要解决的问题难度骤增,加之船舶子系统的数量异常庞大,诸多内部因素决定了船舶设计过程的复杂性。例如,改变船体的结构设计将会改变船舶总重量,进而影响船舶排水量、阻力及主机功率需求,同时也改变了船体的重量分布,最终影响船舶的耐波性能。而改变船舶阻力和推进特性又会影响所载燃料的重量,进而影响结构性能、空间利用情况及船舶的耐波性能。在其他子系统的设计过程中也会遇到类似的问题,不同专业、不同系统甚至不同时间和空间内的设计参数间都存在直接或间接的耦合影响,在某一方面的深入设计很有可能引起一系列其他设计参数的变化。由于船舶是以工程为主导的设计产品,包含大量的工程设计组件,其设计参数更是数以千计,因此其设计复杂程度比飞机有过之而无不及。

船舶作为一类复杂的工程产品,其设计理论及设计方法总是随着现代科学技术和各种现代设计手段的进步而发展。越来越多的学者为有效提高船舶的设计质量,缩短设计周期,开始在设计方法学方面进行了大量的深入研究,出现了很多新的设计理念如虚拟原型(Virtual Prototype, VP)、基于仿真的采办(Simulation Based Acquisition, SBA)、集成产品和过程研制(Integrated Product and Process Development, IPPD)、多学科设计优化(Multi-disciplinary Design Optimization, MDO)等,这些设计理念虽然侧重点不同,却无一例外地贯穿了并行工程的思想。在这些设计理念中,由于多学科设计优化理论具有一套成熟的处理复杂产品优化问题的新方法,已日益引起人们的重视。

近年来,多学科设计优化在船舶领域的研究和应用越来越多,其发展趋势:①考虑的学科越来越多,涉及的内容越来越广泛,总布置、结构、经济性、船舶能效设计指数(Energy Efficiency Design Index, EEDI)等都有所涉及;②学科模型的计算精度逐渐提高,经验公式逐渐被较高精度的计算模型所取代,以进行更为准确的学科分析,能更好地满足工程实际需求。

多学科设计优化的发展也带来了诸多挑战。最大的挑战来源于问题的高维性(High-dimensional)、计算仿真高昂的费用(Expensive computationally)以及未知的函数特性(Black-box),简称为 HEB 问题。同时具备这三项挑战会加剧研究的困难性,并成为多学科设计优化问题的主要障碍。船舶是复杂的机械产品,涉及的学科多、目标多,是典型的 HEB 问题。

由于 HEB 问题的存在,传统的船舶优化方法难以得到整体最优方案。其中的两个重要原因是:①未充分考虑各学科间的耦合作用;②难以考虑多个性能指标间的矛盾冲突。针对这两个问题,需要发展多学科设计优化方法和多目标优化算法。

1.2 多学科设计优化方法

船舶,包含数量众多的子学科,各子学科之间相互耦合影响,导致船舶设计问题的难度骤增,如何对其进行有效处理是目前船舶研究的重点。多学科设计优化充分研究和利用系统中相互作用的协同机制,以完成复杂系统的设计,是目前产品设计优化研究的焦点。MDO 方法是 MDO 最核心的部分,是 MDO 研究最活跃的领域,它把复杂系统分解为多个规模较小的子系统进行处理,侧重于 MDO 问题的分解和协调、数据信息的传递以及优化过程在计算环境中的组织和管理,通过建立合理的优化结构和选择适当的策略来解决复杂系统的计算和组织双重复杂性问题^[1-3]。MDO 方法可以有效解决船舶子学科间的耦合效应引起的困难,得到整体最优的船舶设计。

Balling 和 Sobieski^[4]根据优化层次的不同,把 MDO 方法分为单级优化算法和多级优化算法。单级优化算法只在系统层进行优化,各学科只负责分析或计算。多级优化算法中各学科分别进行优化,系统层负责各学科优化之间的协调。

1.2.1 单级优化算法

常见的单级优化算法包括多学科可行方法(Multidisciplinary Feasible Method, MDF, 也称为 All-In-One, AIO)、同时分析优化方法(Simultaneous Analysis and Design, SAND^[5], 也称 All-At-Once, AAO)和单学科可行方法(Individual Disciplinary Feasible Method, IDF^[6])。MDF 进行每次优化迭代都需要执行一次系统分析,不适合复杂产品优化问题的求解。AAO 引进辅助变量来代替各学科的状态变量,以实现各学科的并行分析。与 AAO 类似,IDF 也引进辅助设计变量来实现学科并行分析,但 IDF 只对耦合状态变量进行替代。

单级优化算法对于规模较小的工程产品优化问题,可以得到整体最优方案。但随着问题规模的扩大,所需计算量会大大增加,而且其与现存的专业分工形式

不符。因此,目前国内外已经很少有关于单级优化算法的研究,学者们的注意力大都集中在多级优化算法。

1.2.2 多级优化算法

多级优化算法主要包括并行子空间优化方法(Concurrent Subspace Optimization, CSSO)方法、协同优化方法(Collaborative Optimization, CO)、二级系统一体化合成优化方法(Bi-Level Integrated System Synthesis, BLISS)、分级目标传递方法等。多级优化算法将复杂系统分解为多个子系统,各子系统分别优化,并通过系统层进行协调,可以实现并行设计;而且其具有学科自治性,有利于学科专家知识和经验的发挥,在工程实际中的应用越来越广泛。

1. 并行子空间优化方法

1988年, Sobieski^[7]提出了基于全局灵敏度方程(Global Sensitivity Equation, GSE)的CSSO,其各子空间设计变量互不重叠,有时存在收敛振荡或收敛过早的问题。

国内外学者采用多种技术进行了改进,包括系统层采用包含启发式算法的专家系统^[8]、对系统分析采用近似模型进行优化^[9]、处理全局变量的CSSO^[10]、二阶近似提高收敛性^[11]、可以处理混合变量的CSSOL^[12]、基于广义灵敏度的CSSO^[13]、自适应加权CSSO^[14]等。

采用近似模型可以避免系统灵敏度分析,解决连续离散混合变量问题,消除系统分析的数值噪声,而且近似模型对非局部信息的分配比较成功,确定最优系统设计的能力也比较强。因此,很多学者采用近似技术改进CSSO。Stelmack和Batill^[15]研究了混合变量的CSSO,使用神经网络构造近似。Batill和Stelmack等人^[16]采用前馈S型神经网络来构造系统层的近似模型。Rodriguez和Perez^[17]研究了基于变复杂度响应面的序列近似CSSO。姚亮、陈小前等人^[18]提出了基于加速响应面的CSSO方法,提高了响应面近似模型的精度。Batill和Stelmack等人^[19]提出了并行子空间设计(Concurrent Subspace Design, CSD),可以充分利用学科专家的设计经验,提高学科设计的灵活性。

2. 协同优化方法

1994年, Kroo等人^[20]提出了协同优化方法,其对复杂工程优化问题的处理具有很大潜力,是目前研究和应用最为广泛的多级优化算法。

CO有多种改进方法,常见的有采用一致性约束松弛^[21-23]、采用动态约束因子^[24]、罚函数法^[25-28]、动态罚因子^[29,30]、满意度罚因子^[31]等。荀鹏^[1]引进附加约束来改进一致性约束,提出了序列协同优化方法(SCO)。王琦^[32]采用分布式并行遗传算法、模糊惩罚函数和多级代理模型来改进CO。

引进现代进化算法和近似技术可以在一定程度上缓解CO的收敛困难。引

进现代进化算法的相关研究有融合进化算法^[33]、模拟退火算法^[34]、遗传算法^[35]、基于 Pareto 遗传算法的多目标 CO^[36]、混合混沌算法^[37]、粒子群算法^[38]。对于近似技术,国内外应用多种形式的近似模型,采用不同的近似方式来改进 CO^[39-48],有效地改善了收敛效率,提高了优化质量。

3. 二级系统一体化合成优化算法

1998 年, Sobieski^[49]提出了基于 GSE 的 BLISS 方法,通过 GSE 将系统层优化和子系统层优化联系在一起。Kodiyalam 等人^[50]在系统层采用响应面模型近似系统目标和系统层约束。Sobieski 等人^[51]提出了基于响应面的 BLISS 方法 (BLISS 2000),利用响应面模型替代灵敏度分析,有效提高了优化效率和质量。Kim 等人^[52]分别采用二次响应面与 Kriging 模型对 BLISS 方法进行改进,指出采用 Kriging 模型得到的优化结果较好。Kim 等人^[53]提出了基于 Web 的协作设计环境,使 BLISS 方法可以顺利执行。Sobieski 等人^[54]提出了更能适应大型工程优化的三层一体化系统方法 (Tri-level Integrated System Synthesis, TLISS)。赵勇^[55]集成了基于改进 Kriging 模型的协调策略和基于混合粒子群算法的搜索策略,并利用 HLA/RTI (High Level Architecture/Runtime Infrastructure) 实现了并行。许林^[56]对 BLISS 进行了多方面改进,分别提出了加强的 EBLISS 2000、三级优化的 ETLISS 2000、基于全局优化搜索的 GBLISS 2000 和包含不确定性分析的 UGBLISS 2000,具体说明可参考文献[56]。

4. 分级目标传递法

ATC 方法是 Michelena 等人^[57]于 1999 年提出的一种基于模型和层次优化的多级求解策略。Michelena 等人^[58]对 ATC 方法在一定假设下的收敛性进行了证明。Michalek 等人^[59]对 ATC 方法中的相关概念和术语进行了详细介绍,提出 ATC 方法适用于复杂产品的设计优化,具有极强的生命力。Jeremy 等人^[60]提出权重系数更新法来更新 ATC 的权重系数,提高收敛性。Allison 等人^[61]提出了 ATC-MDO 方法,把其他 MDO 方法,如 CO,嵌入到 ATC 框架中进行优化,适用于更为复杂的系统优化设计。Liu 等人^[62]采用概率理论来处理 ATC 中的不确定性问题。Tosserams 等人^[63]采用扩展的拉格朗日惩罚函数松弛法替代原有的二次惩罚函数松弛法。Li 等人^[64]采用对角二次近似方法处理 ATC 方法中子系统并行求解的问题。Moussouni 等人^[65]对 ATC 的权重用多目标优化方法进行处理,以改善其收敛性。Tosserams 等人^[66]对 ATC 进行扩展,以解决非层次优化问题。褚学征^[67]提出了基于物理规划的 ATC 方法,采用偏好函数对优化目标和一致性误差进行处理,充分考虑了设计人员的设计经验和偏好,提高了优化效率和质量。

四种多级优化算法对比见表 1-1 所列。

表 1-1 四种多级优化算法对比

分 类	并行子空间 优化	协同优化	二级系统一 体化合成优化	分级目标 传递法
整个系统分层	二层	二层	二层	多层
划分标准	学科	学科	学科	子系统/部件
目标对子系统优化的影响	否	是	间接影响	是
是否需要系统分析	是	否	是	否
是否需要灵敏度分析	是	否	是	否
迭代过程中是否可行	是	否	是	否
是否需要进入中间变量	否	是	否	是
变量数	少	多	少	多
子系统优化分析是否独立	是	是	是	是
是否能证明收敛	否	否	否	是
是否使用近似模型	是	是	是	是

综上所述,上述的四种协调分解方法各有特点、各有侧重,但是 ATC 方法收敛性较好,并且适用于实际复杂产品的研发和设计。其优点如下:

(1) 基于系统部件分解,适合复杂产品设计开发的实际任务分解与分配情况,便于在工程应用中实施。

(2) 可根据实际系统开发的需要确定相应的分解优化级数。

(3) 起源于分解技术和非线性规划方法,具有坚实的数学基础,对于光滑的非线性问题,符合 Karush-Kuhn-Tucker 最优化条件,能够从理论上证明其收敛性。

(4) 适合于分布式计算和并行计算,符合复杂产品设计的未来方向。

(5) 相比于其他 MDO 方法,ATC 方法框架简单,软件集成难度低,收敛效率高。

1.2.3 MDO 方法在船舶领域中的应用

目前 MDO 方法一般应用于船舶的概念设计和初步设计阶段,采用经验公式或低精度模型进行学科分析,考虑的学科范围广,一般以经济性或综合指标为系统目标;当采用高精度学科分析模型时,一般采用近似技术来提高优化效率。其中,单级优化算法和多级优化算法里的 CO 方法、ATC 方法应用较多。

Yang 等人^[68]分别采用确定性方法和概率方法进行了船舶初步设计优化,其中,确定性方法采用 CO 方法进行优化。胡志强^[69]采用 CO 方法进行了球鼻艏和半潜式钻井平台概念设计优化。肖蜜^[48]采用基于 Kriging 的广义协同优化方法对小水线面双体船总阻力进行优化,考虑粘性阻力和兴波阻力两个学科,采

用 Kriging 模型进行近似处理。刘蔚^[70]对 IDF 方法进行改进,提出 BLH(Bi-Level Hierarchic)框架,并完成了 7000m 载人潜水器的总体设计。

密西根大学对 ATC 方法进行了深入研究,并将其应用于船舶概念设计阶段的优化。He 等人^[71]采用 ATC 对水下航行体进行优化。Vlahopoulos 等人^[72]采用 ATC 方法进行了潜艇概念设计优化,考虑了甲板面积、阻力/有效功率、结构、操纵性四个学科。

1.3 多目标优化算法

多目标优化主要研究多个性能指标的同时优化问题,即多目标优化问题(Multi-objective Optimization Problems, MOP)。MOP 的最优是定义在多个性能目标上的最优,其最优解是一组 Pareto 解集。Pareto 解集在目标空间中的像为 Pareto 前沿。多目标优化算法用来处理多目标问题,平衡多个目标间的冲突矛盾,得到高分布质量的 Pareto 前沿,实现系统的整体最优。

1.3.1 多目标优化算法现状

根据优化和决策的先后顺序,多目标优化算法可分为三类(图 1-2):

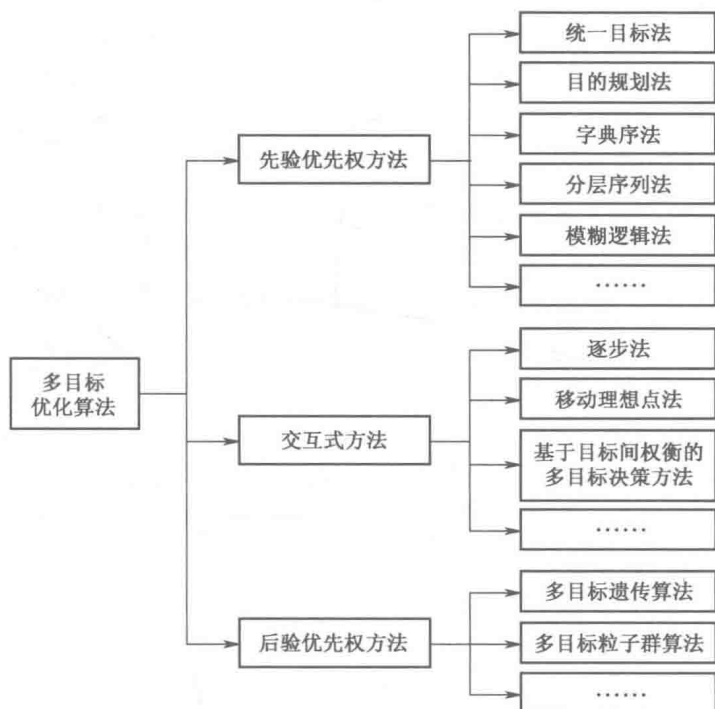


图 1-2 多目标优化算法分类

(1) 先验优先权方法:先决策后搜索。事先设置各目标的优先权值,把多目标问题转化成单目标问题进行优化。

(2) 交互式方法:优先权决策与 Pareto 解集的搜索交替进行。

(3) 后验优先权方法:先搜索后决策。首先搜索 Pareto 解集,然后从 Pareto 解集中进行选择^[74-77]。

传统多目标优化算法把多目标问题转化为单目标问题进行求解,包括加权法、理想点法、极大极小法、主要目标法等,一般属于先验优先权方法,其发展较为成熟,在工程实际中得到了广泛应用。随着多目标进化算法(Multi-Objective Evolutionary Algorithm, MOEA)的兴起,传统多目标优化算法的研究逐渐减少,目前其研究主要集中于采用物理规划的多目标优化方面。^[73]

物理规划由 Messac^[78,79]提出,广泛应用于生产规划、工程建筑、产品系列设计优化等领域,它根据各目标的满意度区间来构造偏好函数,建立物理规划优化模型,将 MOP 转化为单目标优化问题进行求解。对于基于物理规划的多目标优化算法,均匀改变设计目标的偏好结构,可以得到均匀分布的 Pareto 前沿^[80-83]。

现代多目标优化算法主要是指多目标进化算法,包括进化规划、进化策略、遗传算法、差分进化、粒子群优化、蚁群算法、遗传规划等,一般属于后验优先权方法,是目前多目标研究最引人关注的领域,相关文献也最多。与传统多目标优化算法相比,MOEA 对问题自身的要求低,适用于不同类型问题的求解,更符合工程实际,相关研究和应用更为广泛。

1.3.2 多目标优化算法在船舶领域中的应用

在船舶优化领域,传统多目标优化算法和 MOEA 都有较多应用。近年来,随着 MOEA 的发展,其在船舶领域中的应用越来越广泛。

Ray 等人^[84]用模糊隶属函数把多目标转化为单目标,进行船舶概念设计阶段优化。Good^[85]采用 MOGO(Multi-Objective Genetic Optimization)对 DDG51 进行概念设计阶段的不确定性优化。Tahara 等人^[86]进行了油船尾部优化,考虑推进和操纵性两个学科,采用多目标遗传算法,并用序列二次规划法对结果进行修正。Moraes 等人^[87]采用目标规划法进行高速船初步设计。Zalek^[88]考虑船舶推进和耐波性,采用多目标进化算法进行船型优化。Chun^[89]进行球首优化,考虑单目标和多目标多种情况,主要采用 PSO-sobol 求解多目标问题。Gregory^[90]应用 FRIENDSHIP 进行了船型多目标优化,采用 Evolutionary Algorithms 系统,目标为最小化最大兴波高度和垂向加速度响应幅值曲线的峰值。Hefazi^[91]采用多目标遗传算法,分别进行了三体海上补给运输概念船和双体高速船的优化。Papanikolaou^[92]采用 MOGA 进行双体油船概念设计优化。Vasconcellos 等人^[93]结合稳健设计方法和蒙特卡洛试验设计、遗传算法,进行了高速双体船初步设计