



船体结构

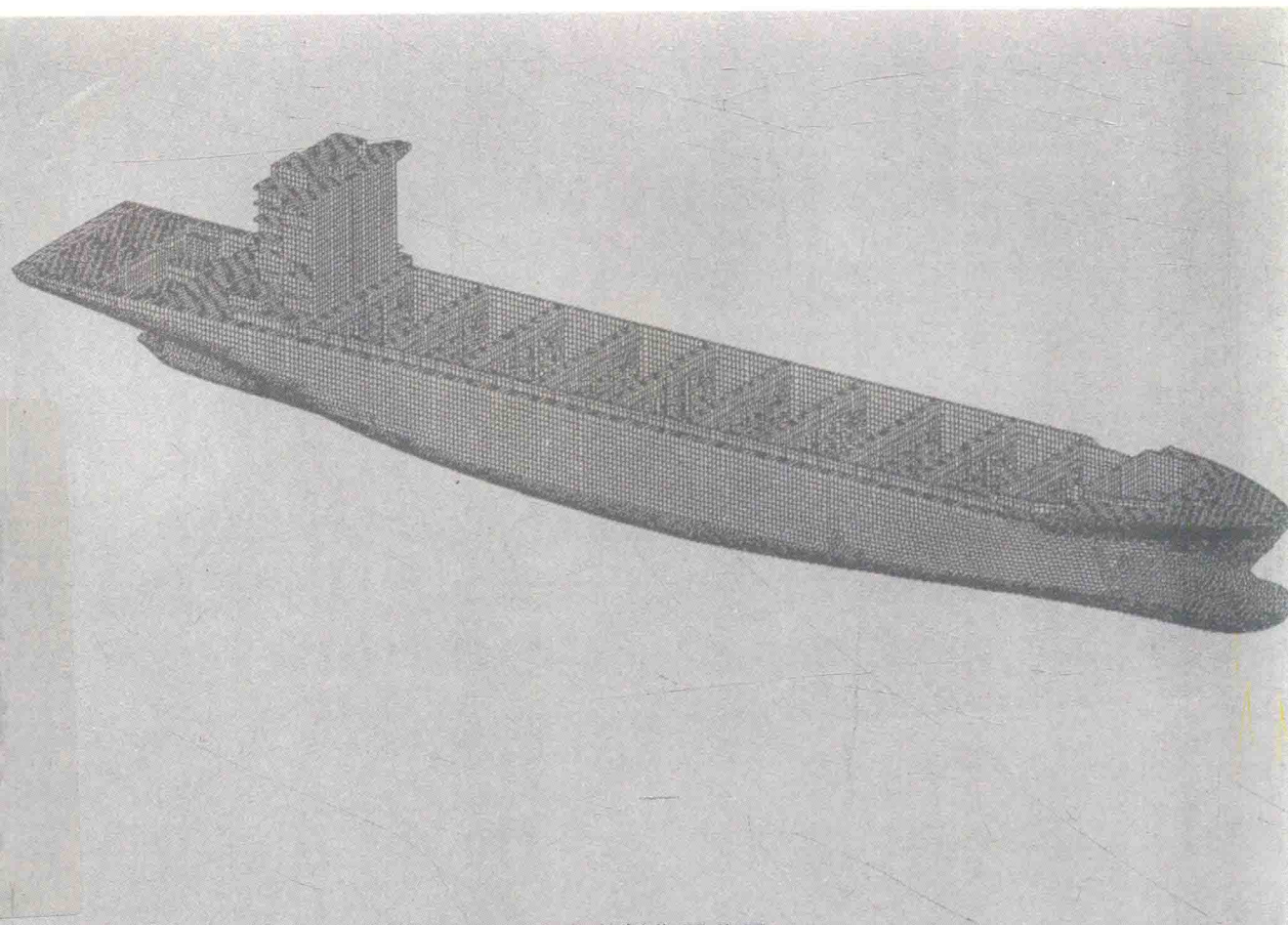


多目标与多学科优化设计

HUANTIJIIEGOU

DUOMUBIAO YU DUOXUEKE YOUHUA SHEJI

■ 黄海燕 张慧颖 王德禹 李艳娟 编著



云南出版集团公司
云南科技出版社

船体结构多目标与多学科优化设计

黄海燕 张慧颖 王德禹 李艳娟 编著

云南出版集团公司

云南科技出版社

·昆明·

图书在版编目 (C I P) 数据

船体结构多目标与多学科优化设计 / 黄海燕主编

— 昆明 : 云南科技出版社, 2017. 4

ISBN 978-7-5587-0516-8

I. ①船… II. ①黄… III. ①船体结构-最优设计
IV. ①U663

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 075239 号

责任编辑: 张文英

吴 涯

杨志芳

封面设计: 晓 晴

责任印制: 翟 苑

责任校对: 叶水金

张彦艳

云南出版集团公司

云南科技出版社出版发行

(昆明市环城西路 609 号云南新闻出版大楼 邮政编码: 650034)

昆明木行印刷有限公司印刷 全国新华书店经销

开本: 787mm×1092mm 1/16 印张: 11.5 字数: 290 千字

2017 年 4 月第 1 版 2017 年 4 月第 1 次印刷

印数: 1~1030 册 定价: 36.00 元

前 言

船体结构优化设计是一项周期长、涉及多学科且各学科高度关联、相互影响的复杂工程。船体结构多学科设计优化的困难不仅在于设计对象涉及多学科，而且在于隐藏在诸多学科背后的优化分析时所面临的巨大的计算量和学科之间的信息交流量，以及如何将不同学科的知识有效组成一个完整的计算模型。

船体结构是由空间板梁组成的庞大薄壁结构，由于结构形式的多样化、内部装载的多变性及外部载荷的随机性，致使构件受载极其复杂。其设计必须由性能、结构、振动、轮机、控制等学科组成的庞大研究团队相互协作完成。系统分析包含了所有的学科分析，各学科设计之间相互影响，学科分析相互耦合，需要各学科组之间进行大量的信息交流，多次迭代，才能获得最终的解答。此外，船体中的板材和骨材种类繁多，采用传统的优化方法会出现设计变量维度灾难而使优化无法进行。因此，本书旨在对船体结构多目标与多学科优化设计的若干关键技术进行研究。

全书共分9章。详细阐述了数值模型的建立、设计变量的选择、动力学特性和动力学响应分析、单目标与多目标优化、多学科优化和计算环境等关键技术。建立了基于精英策略的非支配排序遗传算法的多目标优化问题的计算模型。对协同优化算法进行了改进，建立了用于求解工程结构静、动态多目标优化问题的多目标协同优化算法，并提出模块组合式的多目标协同优化架构，同时搭建了基于网络并行计算的舰船多学科协同设计优化系统。

本书由黄海燕、张慧颖、王德禹、李艳娟共同编著，俞玲、刘晓卫、袁坤、马泽宇、刘红艳也参与了编写工作。

本书在编写过程中，得到了上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院领导

和老师的大力支持，特表谢意！

本书在编写过程中，参阅了大量科技文献和资料，由于篇幅所限，未能逐一系列出，特向本书编写过程中引用过的作者诚表谢意！

本书适合于相关专业高年级本科生、研究生、青年教师和科技人员阅读、参考。

限于编著者的水平，书中不妥之处，恳请各位专家和读者批评指正。

编著者

2017年3月

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 概述	(1)
1.2 研究进展	(2)
1.3 主要研究内容	(11)
第 2 章 船体结构有限元模型	(12)
2.1 有限元基本理论	(12)
2.2 船体基本参数	(14)
2.3 艏部结构有限元模型	(15)
2.4 强度衡准与尺寸约束	(23)
2.5 频率禁区	(27)
2.6 动力响应衡准	(28)
2.7 小结	(28)
第 3 章 优化设计变量分析	(30)
3.1 概述	(30)
3.2 灵敏度计算与分析	(32)
3.3 船体结构设计响应灵敏度	(37)
3.4 单学科优化时设计变量的选择	(45)
3.5 多学科优化时设计变量的选择	(48)
3.6 小结	(52)
第 4 章 动力有限元分析	(53)
4.1 概述	(53)
4.2 结构动力有限元分析	(53)
4.3 船体结构实特征值分析	(59)
4.4 船体结构瞬态响应分析	(61)
4.5 小结	(68)
第 5 章 动力学优化方法研究	(69)
5.1 优化算法	(69)
5.2 动力学优化模型	(72)
5.3 船体结构动力特性优化设计	(78)
5.4 船体结构动力响应优化设计	(84)
5.5 小结	(95)
第 6 章 静动态多目标优化方法研究	(97)

6.1	概述	(97)
6.2	多目标优化模型	(99)
6.3	算例	(105)
6.4	船体结构静动态多目标优化设计	(110)
6.5	小结	(119)
第7章	静动态协同优化方法研究	(120)
7.1	协同优化算法	(120)
7.2	协同优化算法的改进	(127)
7.3	船体结构静动态协同优化设计	(138)
7.4	小结	(150)
第8章	基于并行计算的舰船多学科协同设计优化系统	(151)
8.1	并行计算	(151)
8.2	高性能网络计算机群的搭建	(156)
8.3	基于并行计算的舰船多学科协同设计优化系统	(159)
8.4	小结	(167)
第9章	总结	(168)
参考文献	(170)

第1章 绪 论

1.1 概述

集装箱船因其装卸快捷、班期短且准时、货物安全性好的特点,越来越受到国际运输市场的青睐,是目前国际船舶市场中的主要船型之一。集装箱船具有大开口、小方形系数和高航速等特点,是一种高技术含量、高附加值的船舶。现代大型集装箱船为了运载更多的集装箱,在船体首部、艉部设计中,也尽量争取更多空间运载集装箱,但这些要求给船舶的结构设计带来了新的挑战。

船舶在营运过程中总会受到主机、螺旋桨、波浪等外界激励的作用。这些外界激励将导致船舶发生不同程度的振动,甚至出现有害振动。有些振动可导致结构产生疲劳破坏,影响人员的工作效率甚至身体健康,还会影响设备和仪表的正常使用。为了获得较高的航速,集装箱船通常采用大功率主机。同时,为了节能而采用长冲程大缸径柴油机和低速大直径螺旋桨,因此出现了与其他船舶不同的激振源和船体刚度分布等新情况,这些都是船舶设计时应进行研究的新内容。

此外,为了降低建造成本和避免发生有害振动以及设计周期,新船的设计都是参考母型船和根据经验,采用试凑的方法进行的。这种设计方法费时费力,还不一定能找到最佳方案。

工程结构优化设计是20世纪50年代以来出现的一种的设计方法,其实质就是在满足各种约束条件(如应力、位移、频率、重量等)的条件下,寻找一个使目标函数(如重量、造价等)最小的设计方案。目前,结构优化设计的应用领域已从航空航天扩展到船舶、桥梁、汽车、机械、水利、建筑等更广泛的工程领域,解决的问题从减轻结构重量扩展到降低应力水平、改进结构性能和提高安全寿命等更多方面。

船舶结构优化设计就是要寻求合理的结构形式和适当的构件尺寸,使船体结构在满足强度、刚度、稳定性和频率等条件下具有较好的力学性能、工艺性能、经济性能和使用性能。但是,舰船是由空间板梁组成的庞大薄壁结构,由于结构形式的多样化、内部装载的多变性及外部载荷的随机性,致使构件受载极其复杂。若按常规数学优化方法直接对其进行优化设计,必将导致大量的设计变量和众多的约束条件。这些约束涉及总纵强度、局部强度、整体和局部稳定性及使用要求等方面,有些约束条件是设计变量的非线性函数,无法用线性表示,致使船体结构的优化往往难以进行,或陷入局部最优解。

此外,舰船设计是一项周期长、涉及面广的复杂工程,它的设计变量涉及多种类型,这些变量可能是连续的、离散的或非数值的。基于对舰船总体性能的考虑,在舰船设计工作中,要涉及多个设计目标、多种约束条件、多个关联学科。如流体力学、结构力学、声学、振动学、电磁学、控制学等学科。因此,舰船设计是一个涉及多学科且各学科高度关

联、相互影响的复杂过程。舰船多学科设计优化的困难不仅在于设计对象涉及多学科(且学科间关系复杂),而且在于隐藏在诸多学科背后的优化分析时所面临的巨大的计算量和学科之间的信息流量,以及如何将不同学科的知识有效组成一个完整的设计计算整体。^[1]这使传统优化方法在船体结构设计优化问题上存在诸多困难,主要体现在以下几个方面。

1.1.1 高计算量和高信息流量

采用传统优化方法进行设计的特点:在本学科范围内,将设计对象的优化设计过程集中在一个进程中,循环迭代求解。这个进程中主要的计算内容包括系统分析和寻优两个部分。舰船设计中各个学科的分析都很复杂,计算量都非常大。例如对全船进行一次结构动力学分析,需要数十小时的时间。而系统分析又包含了所有的学科分析,各学科设计之间相互影响,学科分析相互耦合,需要各学科组之间进行大量的信息交流,多次迭代,才能获得最终的解答。此外,舰船优化设计所使用的设计变量是连续型和离散型变量的组合,板材和骨材种类繁多,从而形成大量的设计变量,采用传统的优化方法会出现维度灾难而使优化无法进行。

1.1.2 分析方法上的困难

不同学科的计算模型、分析方法及计算机软件一般来说都是针对本学科的需要而发展完善起来的,适合本学科领域内的专家使用。如果采用传统的优化方法,设计者需要通晓各学科领域内的软件使用、模型建立、计算与分析等。这样既不利于充分发挥各独立学科的优势,也会带来建模、算法设计及程序实现等方面的困难。再说,目前还没有能够包揽一切的计算软件出现。

1.1.3 设计优化组织上的困难

在一般的设计问题中,设计对象的分析相对简单,设计师同时也能担任系统分析者的角色。因此,传统的优化方法对于解决这样的问题是适用的。但对于舰船这样的复杂对象,必须由涉及性能、结构、振动、轮机、控制等学科组成的庞大研究团队相互协作完成。这些学科本身的研究也日益复杂,又包含很多分支,不同领域里的专家一般情况下只能承担本学科的分析任务,而项目总设计师几乎不可能是所有学科领域里的专家。所以,舰船设计任务必须要求总设计师与各学科专家相互协作、相互配合。在这种情况下,传统的优化组织方法已经显得力不从心了。

本书对船体结构进行静、动力多目标和多学科设计优化的若干关键技术进行研究,目的在于高效的设计出不仅钢材消耗量小,而且具有良好动力响应的、满足规范要求的船体结构,在使用寿命内具有良好的营运性和维护性。同时,该项研究也有助于推动船舶结构力学与设计优化理论的发展。因此,本课题有着重要的工程实际应用价值和理论意义。

1.2 研究进展

下面主要从结构灵敏度分析、动力优化、多目标优化和多学科优化等方面阐述结构优化理论的研究进展。

1.2.1 灵敏度分析

计算目标函数、约束函数对设计变量求导数的过程称为设计灵敏度分析(Sensitivity Analysis)。在结构优化设计中,灵敏度信息被用于确定最优解的搜索方向、建立近似方

程、构造优化迭代计算公式或进行结构动力设计修改,故灵敏度计算与分析是结构优化设计中极为重要的一步。

从20世纪70年代早期开始,有关灵敏度的解析公式已在许多著作^{[2]~[6]}中报道,为了提高求解效率和计算时间,其后许多学者提出了灵敏度的半解析公式^{[7]~[12]}。从结构响应的角度出发,许多学者提出了不同的方法用于发展结构静态响应和结构动态响应的灵敏度计算。普通结构的灵敏度是基于结构参数完全确定的假定,而在随机优化和可靠性设计中,设计变量和采用的执行函数包含不确定性参数,有必要估计有关设计变量的随机灵敏度,逐渐发展起来的随机有限元法可用于考虑含不确定性参数系统的设计^{[13]~[16]}。

在结构动力优化问题中,由于目标和约束函数通常为设计变量的高次非线性、隐式或复合函数,故其函数的性态和灵敏度分析远比结构静力优化中的分析要复杂得多。此外,结构动力灵敏度分析除了要求解结构特征值灵敏度外,有时还需求特征向量或者结构动力响应对设计变量的灵敏度。因此,结构动力灵敏度的求解相当困难,完全利用解析方法求解几乎是不可能的。在许多情况下不得不借助于数值方法或半解析方法,即全部的或部分的以函数的数值差商近似代替其解析式的微商。当然,这种代替是以增加结构重分析次数和牺牲计算精度为代价的^[17]。Beliveau等人^[18]提出了求解模态特征值灵敏度的最小二乘迭代计算方法。Dutla等人^[19]研究了瞬态动力荷载作用下具有应力约束的结构设计灵敏度的计算。林家浩^[20]较早对结构动力优化中的灵敏度问题进行了分析研究。胡海昌^[21]提出了结构频率和振型灵敏度计算的小参数方法。郑兆昌^[22]研究了复模态及其灵敏度计算的摄动方法。冯振东等人^[23]对结构系统的固有频率和振型对质量和刚度变化的灵敏度进行了分析。林树枝等人^[24]提出了结构动力响应灵敏度分析的振型叠加法,在保证精度的前提下可明显地提高灵敏度分析的效率。王成端等人^[25]利用模态分析技术和向量原理,推导出结构特征值、特征向量和模态响应幅值随设计变量变化的灵敏度解析式。张令弥等人^[26]对计算特征向量导数的模态方法作了综合评述,对经典模态法、修正模态法及迭代模态法和移位模态法等进行了介绍与比较。张传立等人^[27]提出了一种结构动力响应灵敏度分析的Laplace变换法。邹时智等人^[28]从非线性动力响应方程出发,导出了结构动力响应灵敏度分析的一般方程,并采用迭代法和Laplace变换法求解。李书等人^[29]推导出结构动力学重特征值的灵敏度表达式。

随着工程结构的复杂性日益增加,人们对多学科设计优化给予了更多关注。问题的复杂性可归纳为计算复杂性、组织复杂性、模型复杂性以及信息交换复杂性。灵敏度分析技术是解决多学科设计优化中的4个复杂性问题的重要手段。多学科灵敏度分析又称系统灵敏度分析SSA(System Sensitivity Analysis)。系统灵敏度分析是一种处理大系统问题的方法,它在多学科设计环境中进行,考虑各子系统之间的耦合影响,研究系统设计变量或参数的变化对系统性能的影响程度,建立对整个系统设计过程的有效控制。原则上,可使用单学科中的学科灵敏度分析的方法来进行多学科灵敏度分析,但在实际应用中,将学科灵敏度分析方法通过简单扩展应用于多学科灵敏度分析并不现实。^[30]因为多学科灵敏度分析所需的数据远比学科灵敏度分析复杂得多,即存在“维数灾难”,而且多学科灵敏度分析在多学科设计优化中更多地用于衡量学科(子系统)之间、学科与系统之间的相互影响,其计算方法和学科灵敏度分析的计算方法差别较大。解决的办法是将含有多个学科的系统按不同的分解策略分解为若干较小的子系统(学科),对各子系统分别进行学科灵敏

度分析, 然后对整个系统再进行多学科灵敏度分析。相应于不同的分解策略: 层次分解、非层次分解(网状分解、耦合分解)以及混合分解。

1.2.2 动力优化

早期的结构优化设计主要考虑的是静强度问题。但许多工程结构, 例如飞行器, 其重大事故大多与动强度有关。据统计^[31]由振动引起的飞机事故约占总数的40%。

传统的优化设计往往采用“同步失效”的方法, 即构件的各个组成部分同时抵达容许强度或失稳安全限度, 由此得到一组联立方程, 它们的解析解即为构件的最优设计。随着有限元技术和计算机技术的发展, 这种优化设计方法更加容易实现, 并且容易得到较精确的收敛解。因此, 这种方法在实际工程中得到了广泛运用。在此, 本书把这种仅考虑构件强度的优化设计方法称为静力学优化设计。这种静力学优化设计在没有外加动载荷的条件下是相当实用的。但实际上, 大多数构件会受到不同程度的动载荷作用。在动载荷作用下, 这些满足静力学约束条件的构件往往会产生较大的振动, 甚至在载荷很小的情况下就发生断裂, 所以, 有必要对结构进行动力学优化, 以获得一个既节省材料, 又使产品的动力学性能达到最佳状态的结构。

动力学优化设计是指针对主要承受动载荷而动力特性又至关重要的结构, 以动力特性指标作为设计准则, 对结构进行优化设计。它既可在常规静力学设计的结构上运用优化技术, 对结构进行动力修改; 也可从满足结构动力性能指标出发, 综合考虑静、动力因素对结构进行优化设计。动力学优化可分为3个层次: 优化结构构件的参数, 称为参数优化或尺寸优化(Sizing Optimization); 优化结构的形状, 称为形状优化(Shape Optimization); 优化结构的拓扑结构, 称为拓扑优化(Topology Optimization)。

结构动力优化的基本概念和方法与结构静力学优化基本相同, 其区别在于结构动力优化必须考虑结构的动力特性和动力响应。具体来说, 在某些结构动力优化中有的要考虑结构固有频率禁区的约束问题, 有的要考虑对动应力和动位移的约束问题, 有的这两者都要考虑。

自1965年Niordson开始研究振动梁的结构动力优化问题以来, 结构动力优化设计越来越引起了人们的关注, 研究探索逐渐深入, 内容日渐丰富, 成果与日俱增, 已扩展到设计理论、方法、建模、软件设计和工程应用等诸多方面。林家浩^[32]、R. Grandhi^[33]、陈建军等人^[17]和顾松年等人^[31]分别对1983年、1993年、2001年和2005年以前的结构动力优化设计发展进行了综合评述。武超等人^[34]对结构动力模糊优化设计发展进行了简述。金咸定^[35]对船舶结构动力学的进展与信息化进行了综合评述。俞铭华等人^[36]对大型油船结构优化设计研究进展进行了综合评述。

1.2.2.1 结构动力特性优化

结构动力特性是结构设计中的重要指标之一。结构动力特性优化设计包括结构的固有频率、振型、阻尼和刚度与质量分布等诸多方面。其中以结构固有频率为目标或约束的优化设计是目前的研究热点。带频率禁区的结构动力学优化设计是结构优化设计的一种方法。由于舰船快速性、安全性等性能的需要, 所以在进行带频率禁区的结构动力优化设计时, 一般不对其结构布局和几何形状进行优化, 而只是对构件的截面尺寸进行优化设计。

目前, 结构频率优化设计的对象主要为桁架、梁、刚架和薄板等单一类型的结构, 所构建的优化设计数学模型主要有两类:^{[17][31][33][37][38][39]}①在满足频率约束条件下, 使结

构重(质)量极小化;②在满足重(质)量约束条件下,使结构的基频或多个固有频率极大化。当然,在设计中往往还需附加一些限制条件,如结构的静位移或静应力约束等等,以满足实际设计的要求。

船舶结构固有特性的基本问题:对船舶总体及其局部结构(上层建筑、机舱、尾部、桅杆等)进行物理和数学描述,同时确定在此状态下的结构的固有特性,即模态特性。强兆新^[40]建立了板梁组合结构动力优化的数学模型,在几何约束的范围里对结构进行动力优化,最后对每种优化方案都给出几种不同的满足频率禁区要求的优化结果,供设计者选用。蔡东升等人^[41]在考虑工艺可行性的基础上,对车门进行了带频率禁区的结构动态优化设计分析。赵一宁^[42]和郝清^[43]以结构质量最小为目标函数,对板梁组合结构进行了动力优化分析,使结构避开频率禁区。

1.2.2.2 结构动力响应优化

结构动力响应优化设计是以在激励作用下结构响应的物理量,如位移、速度、加速度、应力、应变等为目标或约束的结构动力学优化设计。由于该问题同时涉及结构动力特性和动力响应分析以及优化设计,因此求解更为困难和复杂。

船舶结构的动力响应是研究和确定在螺旋桨、主机、波浪等激励作用下的结构稳态响应,如由波浪所激起的弹振响应,由波浪拍击、爆炸等引起的瞬态响应和船体鞭击振动。王自力^[44]以耐撞指标作为目标函数,以结构重量作为约束条件,对某散货船舷侧结构进行了耐撞性优化设计。林哲^[45]通过罚函数将有约束优化问题转换为无约束优化问题,在考虑同时承受静、动载荷的结构响应条件下,以结构重量最轻为目标函数,以板架的局部强度、各组合板相当厚度的最小值及最大动位移作为约束条件,对船体板架进行优化设计。Mitsuru Kitamura 等人^[46]对满足静力约束条件(许用弯矩和许用剪力)、动力约束条件(船体结构基频)的机舱结构进行了优化设计。

1.2.2.3 结构动力形状优化与拓扑优化

结构动力学形状优化是指通过调整结构内外边界形状来改善结构的动力学性能和达到节省材料的目的。动力学形状优化从对象上区分,主要有桁架、框架类的杆系结构和块体、板、壳类的连续体结构。动力学形状优化方法大体可归纳为两类:解析法和数值法。解析方法通过泛函分析列出问题的变分形式,导出各种状态函数对设计变量灵敏度的解析式和最优设计应满足的条件。解析法通常用于简单的工程问题,数值法通常用于复杂的工程问题。形状优化的困难主要在于如何将坐标的变化转化为有限元网格。

结构动力学拓扑优化可以有效改善结构性能,并可以使无解的问题变得有解。由于结构拓扑优化模型描述的困难和数值算法的巨大计算量,因而发展十分缓慢。陶伟等人^[47]以总阻力和波高及其线性结合为目标函数,使用CG算法、SQP算法、SD算法对油船船体外形进行了优化设计,并与试验数据进行了对比分析。

1.2.3 多目标优化

复杂工程结构设计在本质上是多目标设计,这就要求在优化设计过程中能找到一种可以有效处理多目标的方法。普遍使用的方法是将多目标优化设计问题转换为单目标优化设计问题,然后应用已有的设计优化策略来求解。这种处理办法事先已确定了设计权衡的优先信息,是典型的搜索前决策方式。这种转换方法通常有线性加权法^{[48]-[54]}、隶属函数法^[55]、罚函数法^[56]、罚函数和加权相组合的方法^[57]、协调方法(the compromise meth-

od)^[58]、surrogate multipliers 方法^[59]等。在船舶多目标优化设计中,周玉龙等人^[60]将快速性、耐波性和操纵性 3 项性能指标加权作为优化目标函数,对 4.9 万 t 中速海洋运输船进行了船舶性能综合优化分析。而对于复杂的多学科设计优化问题,在未获得充分的设计信息条件下,做出适当的决策是十分困难的。而用传统的决策前搜索的方法求解 Pareto 最优集的方法本身存在诸多限制与缺陷,^[61]并且需多次独立运行,不能利用 Pareto 最优解之间的协同作用而浪费大量计算开销,加上有的优化设计方法过程本身容易陷入局部最优,所以用这些现有方法获得多目标多学科优化设计问题的 Pareto 最优集或近似最优集,有效逼近 Pareto 前沿是十分困难的。

直接采用多目标优化算法求解多目标优化设计问题也是一种有效方法。Abdullah Konak 等人^[62]对使用遗传算法的多目标优化现状进行了综合评述。周盛强等人^[63]基于 BP 网络和 Pareto 遗传算法对客机进行了总体多目标优化设计。魏发远等人^[64]使用以并列选择法为主要特征的多目标混合遗传算法,对浸水旋转壳进行了多目标优化设计。夏露等人^[65]采用 Pareto 遗传算法,对飞行器外形设计的气动与隐身一体化进行了多目标优化设计。Senthil S. Vel 等人^[66]、Rania A. Hassan 等人^[67]、Shantanu Gupta^[68]使用多目标遗传算法分别对厚壳、卫星、滚动轴承进行了多目标优化分析。Matthew P. Ferringer 等人^[69]对目前多目标进化算法的应用现状进行了综述,该算法成功应用于分类问题^[70]、压缩机转子结构^[71]、层合板结构^[72]和卫星结构^[69]等多目标优化分析中。陈琪锋^[61]引入非优超排序和排挤的多目标处理机制,并使用了多目标协同进化算法。Timoleon Kipouros 等人^[73]使用 Tabu 搜索算法直接对压缩机进行双目标优化分析。W. Khatib 等人^[74]通过分析,认为由于协同优化算法的层次求解方式,如果在协同优化算法的计算构架中直接使用多目标遗传算法,计算量将难于承受。汪函^[75]对国内外多目标优化与决策的研究进展进行了综述,主要涉及多性别遗传算法、向量评估算法、非劣分层算法和小组决胜算法。

1.2.4 多学科设计优化

多学科设计优化 MDO (Multidisciplinary Design Optimization) 是在传统设计优化理论基础上针对现代工程设计的特点,并与信息技术相结合发展起来的。美国国家航空航天局 (NASA) Langley 研究中心 (Langley Research Center) 的多学科优化研究小组 (Multidisciplinary Optimization Branch) 对多学科设计优化作了如下定义:多学科设计优化是一种方法学,其目的在于对复杂工程系统及其子系统进行设计,并探索它们协同工作的机理。

多学科设计优化的主要思想是在复杂系统设计的整个过程中,集成各学科的知识,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系统的设计过程。通过充分利用各学科(子系统)之间的相互作用所产生的协同效应,获得系统的整体最优解或工程满意解。

多学科设计优化的目的可概括为:①通过充分利用各个学科之间的相互作用所产生的协同效应,获得系统的整体最优解或工程满意解。②通过实现并行计算和设计,缩短设计周期。③采用高精度的分析模型,提高设计结果的可信度。

1.2.4.1 主要研究内容

对于大型复杂工程系统的设计优化问题来说,其复杂性在于某一个学科的设计变量的变化,不单只是引起本学科的状态变量改变,还将通过本学科的状态变量的改变,进一步引起系统内的其他学科的状态变量的改变,即学科设计变量的任何改变都将会通过耦合关

系引起整个系统的连锁反应,也就是多学科设计优化领域所谓的“Everything influence everything else”。因此,阻碍多学科设计优化的一个难题就是系统分析非常复杂,需要耗费大量的计算机时。对于复杂的工程系统,设计变量的数量很大,状态变量、约束和目标函数的计算涉及多门学科,由于耦合作用,一次系统分析需要在各学科的分析模型之间进行多次迭代才能完成。这一问题称为多学科设计优化的计算复杂性。

多学科设计优化的另外一个难点是如何组织和管理各个子学科(子系统)之间的信息交流。一个子学科输出参数往往是其他几个子学科的输出参数,而该子学科的学科分析又需要来自其他子学科的输出参数的支持。也就是由于耦合效应的存在,使多学科设计优化中各子学科之间的信息交换变得十分复杂。这一问题称为多学科设计优化的信息交换复杂性。

综上所述,多学科设计优化的主要研究课题是如何解决复杂系统设计中的计算复杂性和信息交换复杂性问题。

1.2.4.2 主要研究领域

多学科设计优化的主要研究领域包括:

(1) 面向设计的分析模型

进行多学科设计优化,首先要做的就是建立多学科优化模型和确定各学科优化时的分析求解方法。对于舰船这样的复杂系统,要建立一个对各个学科都适用的高精度优化模型是十分困难的。优化模型的建立一般遵循以下原则^[76]:

① 对多学科优化来说,采用不同复杂度的分析方法求解同一设计对象,进行精度与计算代价的折中是非常重要的。

② 多学科优化中所采用的分析模型通常比单学科优化的分析模型更简单、精确度更低。

③ 在同一学科中采用不同精度的分析模型,如对本学科采用精确分析模型,所需的其它学科的状态变量信息则通过简单分析模型求出。

④ 尽量减小学科间的数据传输量。

(2) 分解和组织技术

优化模型建立后,分析设计问题的学科组成及学科间的关系是进行多学科设计优化的前提。对设计对象进行多学科综合分析(即对设计问题进行多学科分解)一般按以下3种方式进行^[77]:

① 层次型系统(Hierarchic Systems)

这是一种按结构部件组成分解系统的方式。按照这种方式,舰船可以分解为首部、舱段、艉部和上层建筑等部件。这种分解方式的特点是各子系统只通过父系统进行信息交流,子系统之间没有直接联系,即子系统之间没有耦合关系或只有弱耦合关系。其结构关系如图1.1所示。对于层次系统,子学科之间的信息流程具有顺序性,有明显的起点和终点。每个子学科只与上一级和下一级的层次子学科有直接的联系,处于同一个层面上的子学科之间没有联系,这样的系统结构是一种树型结构。

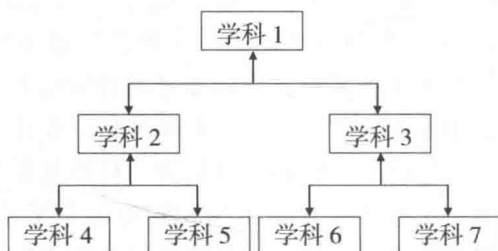


图 1.1 层次系统结构模型示意图

② 非层次型系统 (Non-Hierarchic Systems)

这种分解方式一般将系统按其所涉及的学科进行划分。例如，将舰船设计优化问题分解为流体、结构和控制等学科设计问题。由于在设计中学科间存在大量的信息交流和耦合关系，因此这种分解方式的特点是子系统间直接进行联系，各学科之间存在相互影响。其结构关系如图 1.2 所示。对于非层次系统而言，子学科之间没有等级关系，各个子学科的地位是平等的，且信息流程没有明显的起点和终点。子学科 1 的输出往往是子学科 2 的输入，而子学科 2 的输出往往又是子学科 1 的输入，即子学科之间的信息流程是耦合在一起的。从结构上看，这样的结构系统是网状结构。

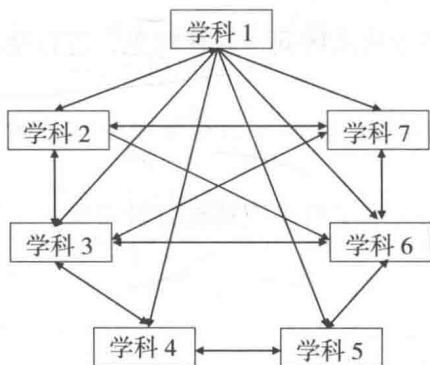


图 1.2 非层次系统结构模型示意图

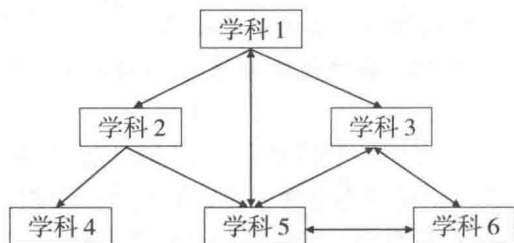


图 1.3 混合层次系统结构模型示意图

③ 混合层次系统 (Hybrid-Hierarchic Systems)

这种分解方式是层次型分解和非层次型分解的组合，既包含结构部件分解，也包含学科分解。其结构关系如图 1.3 所示。

对于层次系统设计优化问题，已经有了比较成熟的算法。而对于非层次系统和混合层次系统设计优化问题，还有待进一步的研究，它们也是目前多学科设计优化的研究热点。

(3) 优化算法

优化算法经过几十年的发展，从经典的线性规划算法和非线性规划算法，发展到目前的遗传算法、蚁群算法、粒子群算法、免疫算法等。

在多学科设计优化问题中，学科级优化与系统级优化都需要选用合适的优化算法来求解，因此优化算法也是多学科设计优化研究的一项重要内容。与单学科优化算法研究不同

的是,多学科设计优化中优化算法的研究更侧重研究在某学科中适宜采用怎样的优化算法,对某种优化模型适宜采用怎样的优化算法。

按是否分级,多学科设计优化算法可进行如图 1.4 所示的分类。^[1]

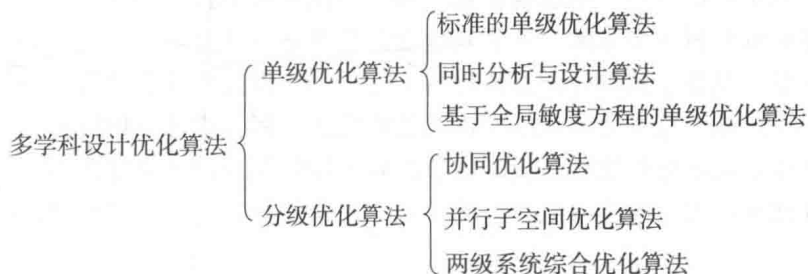


图 1.4 多学科设计优化算法分类

① 标准的单级优化算法 NAND (Nested Analysis and Design)

该方法包含两个模块:系统分析模块和优化模块。两个模块之间只有一个输入输出接口,各学科分析及信息交流均在分析模块内部完成。该算法将系统分析模块嵌套在优化模块中,从而导致每一次优化迭代都需要进行一次完整的系统分析。因此,该算法计算量大、接口复杂,不适用于设计优化关系复杂的问题。只适用于设计变量较少、优化问题规模较小、系统分析过程简单、计算量小的情况。

② 同时分析与设计算法 SAD (Simultaneous Analysis and Design)

该算法的基本思想是将各学科的状态变量作为辅助设计变量添加到原来的设计向量中,一同参与优化,而将反映学科间相互联系的耦合方程组作为等式约束添加到优化模型中,优化过程中通过这些等式约束来完成各学科的解耦和权衡,最终得到系统的最优解。由于该方法中引入了一系列等式约束,因此也称为一致性约束优化算法。该方法节省了学科间解耦所需的反复迭代时间,但由于等式约束的引入,大大增加了优化的难度;此外,为满足等式约束条件,需要大大增加优化迭代次数。

③ 基于全局敏度方程 GSE (Global sensitivity Equations) 的单级优化算法

该算法在系统分析模块与优化模块之间加入了一个全局敏度分析和线性近似过程。每一次系统分析完成后,采用 GSE 方法分析约束条件和目标函数对设计向量的敏度,以此构造约束条件和目标函数关于设计向量的线性近似函数。优化分析在这些近似函数的基础上进行。该算法将优化过程与系统分析过程分离开来,大大降低了优化计算的难度。但由于该方法需求解敏度信息,故只适用于连续变量的优化问题。

④ 协同优化算法 CO (Collaborative Optimization)

该算法将原有的设计优化问题分为一个系统级优化和多个学科级优化,通过将所有的耦合状态变量当作设计变量,解除了学科间的耦合关系,使得各学科级优化可以独立并行实现。论文将在第 7 章再作进一步介绍。

⑤ 并行子空间优化算法 CSSO (Concurrent Subspace Optimization)

在各种 CSSO 算法中,基于 GSE 的 CSSO 算法和基于响应面的 CSSO 算法是最具代表性的两种算法,它们具有相同的并行子空间优化设计思想,但其优化框架却不相同。

A. 基于 GSE 的 CSSO 算法

该算法将原优化问题分解为一个系统级优化和多个学科级优化问题。将设计向量按学科进行分配, 设定为各学科的局部设计向量, 即各学科设计向量不相交。系统分析后, 采用全局敏度方程求解设计点处的敏度信息。各学科优化模型具有相同的物理意义, 本学科状态变量采用精确分析模型求解, 所需其他学科信息通过线性近似模型得到。各学科优化各自的设计向量, 其他学科设计向量值保持不变, 局部设计向量通过协调系数来对其他学科优化过程产生影响。基于 GSE 的 CSSO 算法将优化过程与设计分析过程相分离, 降低了优化难度, 减少了系统分析次数。设计向量分解可以有效地起到降维作用。该算法的主要缺点在于: 优化过程需要敏度信息。因此, 该方法只能处理连续变量问题, 还有可能出现早熟现象。

B. 基于响应面的 CSSO 算法

该算法同样将原问题分解为一个系统级优化问题和多个学科级优化问题, 各学科可根据实际情况选择自己的设计变量, 各学科设计向量可以相交, 系统级模型优化所有设计向量。在学科级优化中, 可以采用本学科的精确分析工具和适当的优化算法来进行子空间优化, 涉及其他学科的状态变量信息可通过响应面来获取。子空间优化结束后, 利用优化结果再次进行系统分析, 并把相应的设计向量和状态向量值补充到数据库中, 更新响应面, 最后进行系统级优化。在系统级优化中, 所有的状态变量信息均由响应面获取。当该方法的近似模型采用二次响应面等显式函数构造时, 同样不能处理离散变量问题。但比基于 GSE 的 CSSO 算法更好的是该算法是稳定收敛的。该算法的主要缺点在于: 为构造足够精确的近似模型, 需要大量的设计点和相应的状态变量信息, 二次响应面所需数据点随设计变量个数 N 的增加成 N^2 增长。

⑥ 两级系统综合优化算法 BLISS (Bi-level Integrated system synthesis)

该算法将系统级目标函数进行一阶泰勒展开, 即

$$F = F_0 + D(F, X_1) \Delta X_1 + D(F, X_2) \Delta X_2 + \dots + D(F, X_N) \Delta X_N$$

式中, $D(F, X_i)$ 为原问题目标函数 F 对第 i 个学科设计向量 X_i 的敏度。学科级优化的目标是最大可能的减小系统目标函数, 也就是最小化 $D(F, X_i) \Delta X_i$ 。学科级设计向量是只影响本学科的局部设计向量 X , 系统级设计向量是影响多个学科的全局设计向量 Z 。系统级优化目标函数为原问题目标函数, 它表示为 Z 的线性近似函数。当执行学科级优化时, 系统级设计向量 Z 保持不变; 当执行系统级优化时, 学科级设计向量 X 保持不变。当学科级优化和系统级优化均完成后, 更新 X 和 Z , 重新进行系统分析。如此反复迭代, 直到收敛。该算法降低了设计变量规模, 减小了优化难度。

(4) 计算环境

计算环境也称计算框架, 是指能实现多学科设计优化方法、包括硬件配置和软件体系的计算环境。在这个计算环境中, 能够集成和完成各学科的计算, 实现学科之间的通信。

多学科设计优化计算环境可分为 3 个层次:^[78] 第一层次是通用的 MDO 计算框架, 如 ModelCenter、iSIGHT、VisualDOC 和 DAKOTA 等; 第二层次是针对某一特定 MDO 方法的计算框架, 如基于并行子空间优化的 CSD 框架、基于协同优化的 Caffe 框架; 第三层次是基于某一应用的 MDO 方法, 针对某一特定优化问题的计算框架, 如美国 NASA 针对高速民机初步设计问题开发的 CJOopt 框架。