



国防特色教材·船舶与海洋工程

船舶结构优化设计

CHUANBO JIEGOU YOUHUA SHEJI

秦洪德 主编

哈尔滨工程大学出版社
Harbin Engineering University Press

北京航空航天大学出版社 北京理工大学出版社
哈尔滨工业大学出版社 西北工业大学出版社



国防特色教材·船舶与海洋工程

船舶结构优化设计

哈尔滨工程大学出版社

北京航空航天大学出版社 北京理工大学出版社
哈尔滨工业大学出版社 西北工业大学出版社

内容简介

本书以船舶结构强度与结构设计理论为基础,通过将数学规划理论、智能优化算法等优化设计与计算机技术相结合,求解船舶结构设计中满足某种特定要求的结构最优化设计问题。

本书的主要内容有传统结构优化方法(数学规划方法理论)、现代智能优化算法、型材剖面的优化设计、船体主要结构的优化设计、船体中剖面结构的优化设计。从解决结构优化问题的优化方法入手,结合船舶结构优化设计中的问题,同时通过简单优化算例的求解过程,使读者了解船舶结构优化的思想和实现过程。

本书可作为船舶工程专业本科生、研究生课程教材,亦可为研究船舶结构优化设计的技术人员、科研人员提供参考。

图书在版编目(CIP)数据

船舶结构优化设计/秦洪德主编. —哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2010.1

ISBN 978-7-81133-599-7

I. ①船… II. ①秦… III. ①船体结构-最优设计-高等学校-教材 IV. ①U663

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第226239号

船舶结构优化设计

秦洪德 主编

责任编辑 孟凡骞

*

哈尔滨工程大学出版社

哈尔滨市南岗区东大直街124号(150001) 发行部电话:0451-82519328 传真:0451-82519699

<http://press.hrbeu.edu.cn> E-mail:heupress@hrbeu.edu.cn

哈尔滨工业大学印刷厂印刷 各地书店经销

*

开本:787×960 1/16 印张:16.25 字数:342千字

2010年1月第1版 2010年1月第1次印刷 印数:1000册

ISBN 978-7-81133-599-6 定价:41.00元

前 言

结构优化设计是二十世纪五六十年代发展起来的一门新技术。它以数学优化方法为基础,并借助电子计算机这种辅助工具来进行结构设计方案的寻优搜索。与传统结构设计方法相比较,结构优化技术应用在工程结构设计上,不仅可以大大缩短设计周期,显著提高设计质量,而且还可解决传统设计方法所无法解决的复杂结构设计问题。

在二十世纪六十年代初期,结构优化技术首先被应用于航空航天领域,后来工程技术人员又将其扩展到船舶、桥梁、汽车、机械、水利、建筑等更广泛的工程领域。在近几十年里,由于电子计算机技术的飞速发展、工程结构分析手段的逐步完善以及优化方法在工程上的研究和应用,结构优化技术发展非常迅速,它在国内外科研和生产中的应用已相当广泛。应用实践证明,优化设计可使工程造价降低5%~30%,从而带来巨大的经济效益,因此得到业界广大技术人员和研究人员的普遍关注。

船舶结构设计是工程结构设计中比较复杂的过程。由于这种大型复杂结构耗资巨大,设计方案的优劣直接影响其经济效益,船舶结构优化设计也就成为必然要求。因此,对于船舶专业的在校学生而言,掌握结构优化设计的入门知识具有十分重要的意义。

目前,国内出版的结构优化相关的著作中,有些只讲述以数学为基础的传统结构优化方法,有些只讲述以智能技术为基础的现代智能优化算法,很少有著作将这两种优化方法集中起来进行系统化阐述。另外,这些有关优化方面的书籍大多是学术性较强的专著,不便于学生和初学者学习使用。因此,为了系统讲述船舶结构优化的入门知识,作者参考大量国内外关于优化设计的书籍和文献,并融入长期以来在船舶结构优化设计中的经验、体会及科研成果,编写了本书。编写本书的主要目的是为学习船舶结构优化知识的船舶工程专业学生提供一本通俗易懂、由表及里的教科书,而不是一本对某个专题深入讨论、系统研究的学术专著。本书不仅把传统结构优化方法(如梯度法、牛顿法等)和智能优化算法(如蚁群算法、粒子群算法等)囊括其中,同时还全面阐述了船舶结构优化的基础知识和实际应用等。

本书共分为6章,第1章为绪论,主要介绍了结构优化设计的意义、优化算法的研究现状,以及船舶结构优化设计的一般概念;第2章详细介绍传统结构优化方法,它主要包括一维搜索、线性规划、不利用导数的优化方法、利用导数的优化方法,以及有约束问题无约束化的方法等;第3章阐述了现代智能优化算法,包括模拟退火算法、遗传算法、蚁群算法和粒子群算法,这些优化算法在处理离散组合优化问题时具有一定的优越性;在第4,5,6章中,对正确建立简化的船体结构分析模型,选取设计变量,确定约束条件以及建立目标函数等内容进行详细叙述。本书中不仅附有一些简单算例,同时为方便学生结构优化知识的学习,各章后面还附有思考题和练习题,通过课后练习可加深学生对课程内容的理解。

哈尔滨工业大学李惠教授、哈尔滨工程大学姚熊亮教授拨冗审阅了本书,并提出了很多宝贵的意见,在此对他们表示由衷地感谢。

限于编者水平有限,本书不当或错误之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

编 者

2009年3月于哈尔滨工程大学

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 结构优化设计的概念	3
1.3 结构优化算法及其发展现状	7
1.4 船体结构优化设计的一般概念.....	10
第 2 章 传统结构优化方法	14
2.1 一维搜索最优化方法.....	14
2.2 线性规划.....	25
2.3 不利用导数的优化方法.....	42
2.4 利用导数的优化方法.....	53
2.5 有约束问题的无约束化.....	72
思考题与练习题	78
第 3 章 现代智能优化算法	80
3.1 模拟退火算法.....	80
3.2 遗传算法.....	92
3.3 蚁群算法	130
3.4 粒子群算法	148
思考题与练习题.....	164
第 4 章 型材剖面的优化设计	166
4.1 引言	166
4.2 型材的强度要求及剖面要素计算	169
4.3 型材的稳定性要求	174
4.4 型材剖面优化设计的基本概念	178
思考题与练习题.....	182

第5章 船体主要结构的优化设计	183
5.1 建立局部强度计算模型	184
5.2 船底结构的优化设计	195
5.3 甲板结构的优化设计	201
5.4 舷侧结构的优化设计	206
5.5 舱壁结构的优化设计	209
5.6 设计算例	218
思考题与练习题.....	226
第6章 船体中剖面结构的优化设计	228
6.1 船体中剖面设计的基本任务和策略	228
6.2 中剖面纵向构件相当厚度的设计	232
6.3 板与纵骨间的最优分配	235
6.4 剖面结构优化具体算例	240
思考题与练习题.....	251
参考文献	252

第1章 绪 论

1.1 引 言

在结构设计过程中,人们总希望在给定的荷载条件下得到技术和经济上尽量理想化的设计方案。为达到这个目的,传统上采用重复设计逐次逼近的方法进行设计。首先,根据同类型结构的已有经验,加上设计者的判断,拟订初步设计方案,然后进行结构的强度、刚度和稳定性的计算分析,再通过设计人员对相关成果的分析,加以修改设计方案,再对修改后的方案进行计算分析,最后修改结构设计方案。这样,经过反复的“计算分析——修改——计算分析”的设计过程,直至得到一个令人满意的设计方案。

上述设计方法有时能够获得令人比较满意的设计方案,但是反复冗长的设计过程、较低的设计效率以及较大的人力财力花费是这种设计方法的重大缺点。通过这种方法得到的最终设计方案的经济性和合理性多受到初始设计方案的影响,在很大程度上也取决于设计者的主观经验判断。也就是说,重复设计方法所得的最终设计方案是受设计者的经验和判断力影响较大的较优设计方案。不同的设计人员,在相同的工程客观条件下,完全有可能得出不同的设计方案,因为这种传统择优方法往往伴随着一定程度的主观随意性,而非单纯地由工程客观条件所决定的最优方案。

在长期的工程实践过程中,人类经过反复的思考与探索,很早便产生了优化设计的构思,如等强度梁、米歇尔(Michell)桁架的理论研究等。但是,直到20世纪中期以后,优化设计方法才作为一门独立学科出现。

20世纪中期以来,高速、大容量电子计算机的广泛使用和一些高精度的力学分析数值方法,如有限元素法的建立与应用,以及各种计算机辅助分析、计算机辅助设计技术相继出现,使得高速度、高精度地完成复杂结构的响应分析工作成为可能。计算机已成为设计工作者进行优化设计创造性活动的有力工具,它在优化设计中占有十分重要的地位。应用计算机的优化设计技术与传统的反复设计方法相比较,主要有如下几个特点。

(1)设计遵循的原则与目的,是使设计方案达到最优。为了达到这个目的,就需要建立一个能够正确反映设计问题的数学模型。

(2)设计所使用的方法是传统的数学优化方法或现代智能算法。这些方法都会使计算机按照设计者的意图,向着使方案变得更好的方向自动地调整设计变量,从而得到一个最优设计方案或者是近似最优设计方案。

(3)设计的手段是计算机优化程序。由于电子计算机的较高运算效率,设计方案的再分

析过程可以以分钟计算甚至以秒计算,因而从大量的设计方案中选出“最优设计方案”已经不再是不可实现的事情。

随着数学规划理论以及一些智能算法的产生和发展、有限元分析技术的成熟与计算机技术的飞速发展,结构优化设计完成了从经验到理性的转变过程,现代结构优化设计技术逐渐经历了从产生到发展,并且逐渐走向成熟的过程。虽然初始设计方案的提出还需要设计人员的参与,但优化设计的过程是利用计算机自动完成,这使得设计中人为参与的成分大大减少,从而减轻了设计过程中人力资源的花费,同时可缩短设计周期,扩大设计问题的规模。由于以上各方面的原因,优化设计的思想一经提出便立即得到了广大学者和设计人员的重视,并且人们对优化方法开展了广泛而深入的研究,使得结构优化设计的学科也随之产生了飞速地发展,目前被认为是计算力学中最活跃的分支之一。

结构优化设计的发展与应用将使结构设计达到一个新的阶段,优化设计方法和电子计算机技术的应用,可迅速求得在给定条件下的最佳设计方案。这不仅可使设计人员从繁琐的重复设计工作中解放出来,还可使设计速度大幅提升,并且其设计质量也可大幅提高。据已有经验表明,与传统设计方法相比,优化设计可节省工程投资 5% ~ 25% 左右,从而使经济效益得到显著提升。

一般来讲,结构优化设计大体可分为以下三个阶段。

(1) 建立数学模型

建立数学模型的过程是根据具体的工程结构型式、结构的受力特点以及结构变形条件等,将这个工程结构的设计问题转变成一个可用于优化设计的数学问题。

(2) 选定合理的、有效的优化方法

优化方法的选取要根据所要设计的具体工程问题而定,如工程尺寸优化问题中的变量类型是离散变量或是连续变量、优化问题是有约束的优化问题或是无约束的优化问题等,这些都是选择优化方法的参考依据。

(3) 编制通用计算机程序

计算机程序编制完成之后,对于同一类型的结构设计,都可由计算机迅速给出最佳设计方案。并且对于设计部门来说,应该建立一个结构优化的程序库,其中包括各种工程结构在不同工况下的优化设计程序。建立结构优化设计的程序库以后,必将会使其设计效率大幅提高。

必须指出的是,结构优化所给出的解答从数学上来讲是在给定条件下的最佳设计方案。但是,一方面实际设计问题是十分复杂的,在建立数学模型时通常只能考虑一些主要的影响因素,而往往需要忽略一些次要因素,以便进行模型的简化计算;另一方面,有些因素对结构设计有一定的影响,其影响很难用数字进行表示,这些因素在数学模型中也是无法考虑的。因此,不能把优化设计所提供的最佳方案理解为绝对的“最优”方案,它是一个良好的设计基础,在这个基础上设计者还应根据实际情况进行全方位的分析判断,必要时可以进行一定的修改。由于结构优化的数学模型中已考虑了主要因素,所以通常不至于有较大的修改,而且所建立的

数学模型越完善,修改的余地就越小。

1.2 结构优化设计的概念

结构优化设计就是在满足各种规范或某些特定使用要求的条件下,使结构的某种性能指标(如质量、造价、刚度及频率等)达到最佳状态。简单地说,就是在所有可行的设计方案中,按照某种特定的标准找到最佳设计方案。对各种问题来讲,只要存在不同的设计方案,就可对其进行优化。

结构优化设计是集计算力学、数学规划和现代智能、计算机科学以及其他工程科学于一体的现代结构设计领域的一个重要研究方向。它为人们长期以来一直追求的最佳工程结构设计尤其是新型结构设计提供了先进的寻优工具,是现代设计方法的重要内容之一。结构优化设计作为一种新的现代结构设计方法,较传统的结构设计方法显示出巨大的优越性,可以节省大量的人力物力,对于大型工程结构的设计来说,其优越性更加明显。目前,结构优化设计的应用领域已从航空航天领域扩展到船舶、桥梁、汽车、机械、水利、建筑等更广泛的工程领域,它所解决的问题从减轻结构质量扩展到降低应力水平、改进结构刚度、强度性能和提高安全寿命等诸多方面。

1. 结构优化设计的基本定义

为了建立结构优化设计的数学模型,这里首先介绍结构优化设计过程中必不可少的几个基本定义。

(1) 设计变量和设计空间

在结构设计过程中,其设计方案一般可以用一个相应的数学模型来表示。在这种数学模型中,某些参数是预先给定的,在优化过程中这些数值是固定不变的,如结构的载荷、结构的主尺度、弹性模量以及材料的泊松比等。除此之外,数学模型中还存在一些数值可变的量,也就是结构优化设计的对象,称这些数值可变的量为设计变量。

设计变量通常用 x_1, x_2, \dots, x_n 表示,并构成一个向量

$$\mathbf{X} = [x_1 \quad x_2 \quad \dots x_n]^T$$

式中,上角标 T 表示转置。

结构优化设计的目的就是要寻找这些设计变量的最佳组合,在这些设计变量的组合下,结构的某种性能指标达到最优。这些设计变量可以是构件的截面尺寸,如面积或惯性矩等几何参数,也可以是结构的形状布置几何参数,如厚度、高度、跨度等,还可以是结构材料的力学或物理学的性能参数。这些设计变量的合理选择是结构优化设计中的一个十分重要的问题。

设计变量通常可分为连续设计变量和离散设计变量两种类型。

① 连续设计变量

这种设计变量在优化设计过程中是连续变化的,如板开孔的直径 D 、骨材的长度 L 等,都

是连续设计变量。在优化过程中,对于这种设计变量的处理相对比较方便,设计变量的数目也可能略少一些。对于某些复杂的结构形式,如拱坝等,采取连续的设计变量易于保证其外形的连续性。

②离散设计变量

这种设计变量在优化设计过程中是跳跃式变化的,如供工程结构选用的型钢的截面积、钢板厚度等都不是连续的。在优化过程中,对离散设计变量的处理比对连续设计变量的处理要稍困难一些。一种处理方法是直接按设计变量离散变化的情况逐个选取,这在变量数目不多,问题相对较简单的情况下可以采用;另一种方法是采用离散变量连续化的方法,这对于设计变量数目较大、问题相对较复杂的情况来说是很方便的,然而在设计过程中也很可能会产生一些由于离散变量连续化所导致的问题。

由各个设计变量所构成的结构设计方案的变化范围称为优化设计的设计空间。设计空间中的任意一点都是一个可行的设计方案,称为可行点。

(2)约束条件

任何一个工程结构设计都要在相应的规范和要求下进行,这些规范或要求往往会限制设计变量变化的范围,或者限制设计方案的选取,通常将这些限定条件称为约束条件。典型的工程约束条件有相关规范的规定、施工和建造要求、设计规程的要求等。有些约束条件还反映了优化设计者的设计意图。

约束条件通常包括常量约束与约束方程两类。

①常量约束

常量约束也称为界限约束,它表明设计变量的允许取值范围,一般是设计规范或公约等的有关规定,或建造要求的数值,如最小板厚要求、圆杆的最小直径要求等,这类约束条件比较简单。

②约束方程

约束方程是以优化问题中的设计变量为自变量,以要求加以限制的设计参数为因变量,按照一定的关系(如应力、应变关系、几何关系等)建立起来的函数方程式。在这些表达式中,对于一些简单的、有明确的表达式(显函数)的约束方程称为显式约束;对于一些结构比较复杂的,如结构的应力、位移、自振频率、临界荷载等约束条件,必须通过较精确的计算才能得到,这些关系是隐含的表达式(隐函数),故称为隐式约束。用来表达几何关系的式子称为几何约束,几何约束多为显式约束。应力约束、稳定性约束、频率约束等的表达式称为性态约束,性态约束多为隐式约束。

约束条件还分为等式约束和不等式约束。约束条件一般表示为:

等式约束

$$h_j(\mathbf{X}) = 0, j = 1, 2, \dots, m$$

不等式约束

$$g_k(\mathbf{X}) \leq 0, k = 1, 2, \dots, p$$

一般来说,确定结构优化设计的约束条件是比较耗时、耗力的。因为在确定约束条件时,设计者要考虑到结构设计中的各种约束条件,并将这些约束条件恰当地添加到结构设计的数学模型中去。

(3) 目标函数

一个结构设计方案的优劣总会有相应的标准来度量,在结构优化设计的数学模型中也要有相应的函数来评判设计方案的优劣,这样的函数称之为目标函数,一般将目标函数表示为 $F(\mathbf{X})$ 。它是设计变量的函数,代表所设计结构的某个最重要的特征或指标。优化设计就是从许多的可行设计方案中,以目标函数为标准,找出这个函数的极值(极小或极大),从而选出最优设计方案。

结构的体积、刚度、承载力、造价、自振特性等都可以根据需要作为优化设计中的目标函数。在一般的造价函数中还应包括材料费、加工费、运输费等。如果进一步考虑经济性能,还应考虑结构使用时的操作费、维修费、遇到灾害时所受损失的期望值和加固费用,甚至还要考虑初始造价的利息等经济因素。

确定目标函数是整个优化设计中最具有决策性的步骤,因为它代表寻优的方向和目标。一般说来,对结构设计方案的评价总是多方面的综合,所以选择目标函数时必须全面考虑结构的使用目的、功能和具体条件,并抓住主要矛盾。例如,对民用船舶来说,一般将质量最轻作为目标函数。需要指出的是,结构优化中所讲的“最优”往往是有条件的和相对的,因为所谓最优方案乃是针对所选定的目标函数和约束条件而言的最佳方案。

(4) 结构优化设计的数学模型

结构优化问题往往可表示为在给定的约束条件下,寻找使目标函数取得最小值(或最大值)的设计变量组合,其数学表达式通常可写为

$$\begin{cases} \mathbf{X} = [x_1 \quad x_2 \quad \cdots x_n]^T \\ \max(\text{或 min}) F(\mathbf{X}) \\ h_j(\mathbf{X}) = 0, j = 1, 2, \cdots, m \\ g_k(\mathbf{X}) \leq 0, k = 1, 2, \cdots, p \\ \mathbf{X} \geq 0 \end{cases}$$

2. 结构优化设计的分类

根据结构优化问题的特性,优化问题可分为以下几类。

(1) 无约束与有约束最优化问题

无约束优化问题可简化为求函数的无约束极值,最优解就是目标函数的极值。有约束优化问题可简化为求函数的条件极值。如果是等式约束,则约束数目 m 必须小于变量数目 n 。当 $m = n$ 时,问题的解是唯一的;如果 $m > n$,这种情况下的最优化问题无解。

(2) 确定性和非确定性优化问题

在确定性优化问题中,每个设计变量值都是确定的。而在随机(或概率)性优化问题中,

某些变量的取值是不确定的。但根据大量实验统计可以知道变量取值服从一定的概率分布。如计算机系统的可靠性问题就是一个随机优化问题,称为随机规划。近年来专家学者认识到由于不可能给事物明确定义和评定标准而存在着模糊性不确定因素,故将模糊性因素的最优化问题称为模糊优化设计。船舶结构的优化设计一般为确定性优化设计。

(3) 线性与非线性优化问题

如果目标函数和所有约束函数式都是随设计变量的变化而线性变化的,则称这种优化问题为线性优化。如果有某个或某几个目标函数或约束函数式是变量的非线性函数,则称之为非线性优化。

3. 结构优化设计的层次

结构优化设计从低到高依次可分为以下几个层次。

(1) 结构截面尺寸优化

结构优化设计的第一阶段是以截面尺寸优化为起点,此时以结构截面尺寸作为设计变量,以直接算法或有限元方法作为结构响应分析手段,采用常规单元的几何变量(如杆件截面积、梁的截面尺寸、板的厚度等)作为参数,优化设计目标是降低结构质量,充分发挥材料的机械性能,以此作为问题的优化设计目标函数。在结构强度、刚度等约束条件下进行寻优搜索,设计变量与刚度矩阵一般为线性关系,因此在结构响应分析与优化算法的连接中,均是以结构截面尺寸、板的厚度等为设计变量。

(2) 结构形状优化

结构形状优化也称为结构几何优化。20世纪80年代后期,结构边界形状优化设计引起了人们的普遍关注,研究重点是确定连续体结构的边界形状或其内部结构,如杆系结构的节点位置优化、连续体结构应力和温度场分布的优化等。在连续体结构形状优化设计中,设计变量是目标函数中控制微分方程的定义区域,即形成所谓可动边界问题。众所周知,只有在特别简单的区域形状中,才能得到对给定区域的形状和边界条件的微分方程的解析解。因此,对于比较复杂的结构形状,连续体结构的形状优化问题并没有真正得到解决。

(3) 结构拓扑优化

结构优化的第三阶段是进行结构拓扑优化。结构拓扑优化设计就是通过一定的算法使得设计结果在满足约束条件的前提下派生出一个或一组结构,之所以称为拓扑结构是因为派生的结构可能在几何形式、单元形式等方面突破了初始结构布局。

(4) 结构布局优化

结构优化设计的第四阶段是进行结构布局优化设计。它除了包括前面三种结构优化设计的主要内容外,还包括对结构类型的优化,是结构优化的最高层次。

优化问题层次越高,优化的范围和难度就越大,优化效率就越低,数学模型和解法就越复杂,求解也就越困难。目前对较低层次优化问题的研究已经相对成熟,高层次优化问题的研究也在逐步深入。从解决问题的复杂程度来看,已由简单的桁架结构设计发展到由梁板壳等组

成的航空、航天飞行器以及船舶建筑等领域的复杂结构设计;所能考虑的约束种类已经由最初的应力、位移约束发展到稳定性、动力特性以及颤振约束等;所能处理的设计变量的类型已经由连续设计变量优化发展到离散设计变量优化。目前多数研究工作只限于单目标的局部优化设计问题,而工程结构优化往往是多目标的,这方面优化问题也在研究之列。

1.3 结构优化算法及其发展现状

采用适当的优化算法求解数学模型,可归结为在给定条件(如约束条件)下求目标函数的极值问题。在大型复杂结构优化问题中,当取结构的最小质量,造价最低为目标,目标函数通常是线性的,而约束条件往往是非线性的。在处理这样的问题时,优化算法的选取尤为重要,对于不同层次的优化问题需要选用不同类型的优化算法。

按优化算法的理论基础划分,结构优化算法主要有以下三种类型。

1. 准则法

准则法是从工程观点出发,通过力学概念或工程经验来建立相应的优化设计准则,建立优化设计迭代公式,然后用迭代的方法求出满足这些准则的解。利用优化准则在满足各种约束的设计方案中寻求最佳设计方案,其优点是物理意义明确、方法相对简便、优化中结构分析次数与设计变量的数目无直接关系、计算量不大、收敛速度较快等。基于这些优点,这类方法在结构优化设计的早期为人们所钟爱。但其缺点是应用范围具有局限性,主要适用于结构布局及几何形状已定的情况,并且从原理上不能保证一定是最优解,收敛性也难于证明,在优化过程中往往需要设计人员根据具体的情况作某些处理。Dems 等将优化准则法用于形状优化设计中,准则规定切应力或应变能密度沿边界均匀分布。该方法通常用于减小应力集中的形状优化设计中。按目前结构拓扑优化的方法,其力学模型一般都具有极为庞大的设计变量数目,所以用得较多的优化算法也是准则法。

满应力准则法的基本思想是充分发挥材料的强度或等应变能密度状态,以达到结构最轻的目标。对于确定的结构系统,可以调整其结构参数,使其在各种工况下各部分的应力都能达到或接近容许应力,结构处于“满应力”状态,结构材料得到充分利用,以此作为获得最轻结构的判据,从而导出相应的算法。桁架结构最适合运用满应力准则法进行优化,早在 20 世纪 50 年代就开始广泛应用该方法对其进行优化。

位移准则法是用位移准则建立优化设计迭代式的方法。对于一组载荷、一个约束(指一个节点有位移约束)可由能量法和拉格朗日乘子法导出精确迭代式,但当存在多组外载荷,或多个位移,或既是多组外载荷又是多组位移时,只能近似地用“包络法”进行处理。位移准则法是一种实用的刚度优化设计方法。

2. 传统的数学规划法

在准则法快速发展的同时,以数学规划为基础的结构优化设计方法的研究也一直在进行,

到 20 世纪 70 年代中期 Schmit 等提出了结构优化的近似概念,主要包括:①设计变量连续化;②约束暂时删除;③利用导数信息对主动约束进行 Taylor 展开等。从而使规划方法有了新的生命力。近似概念的引入,实际上是将原问题转化成为序列近似优化问题,通过求解近似问题来逼近原问题的解。近似问题中的目标函数和约束函数均为显函数,故近似问题易于求解。在整个近似问题的求解过程中无须再作结构响应分析,即每形成一个近似问题,只须进行一次结构响应分析和灵敏度分析。故与结构优化概念引入初期,直接用数学规划理论求解方法相比,结构分析次数大大减少。

数学规划法是以规划理论为基础,具有理论严谨、适用面广、收敛性有保证等优点。其缺点是计算量大、收敛较慢,特别是对多变量的优化问题更为明显。20 世纪 70 年代中期以后,结构优化设计中的规划法吸收了准则法的优点,根据力学特性进行了某些改进,如显式逼近、选择有效约束条件、引入倒数变量、采用对偶求解技术等,使计算效率得到了显著提高。通常使用的数学规划法有线性规划法、序列线性规划、非线性规划、惩罚函数法、乘子法等。

3. 现代智能优化方法

许多大型复杂结构(如船舶结构)的优化设计,一般都属于混合变量优化设计问题,过去往往先进行离散变量连续化处理,再用非线性规划方法进行求解,在已获得的最优解附近进行试算,这样既额外增加了结构响应分析的工作量,又不一定能获得该问题的最优解。因此,寻找一种直接求解混合变量的优化设计方法是十分必要的。现代智能优化方法及其改进策略便是一种很好的解决方法,同时由于这种方法不需要利用目标函数的导数值信息,使其在求解大型复杂结构优化问题时具有相当的优越性。

(1) 遗传算法(Genetic Algorithms, GA)

遗传算法是通过模拟生物种群中的优胜劣汰选择机制,通过种群中优良个体的繁衍进化来实现优化的功能。该优化方法由 Holland 于 1975 年提出,并且由 Goldberg 于 1983 年在他的博士论文中第一次将遗传算法应用到实际的煤气管道工程的优化中,引起了各学科学者对遗传算法应用的广泛兴趣,使得遗传算法的理论研究更加深入,应用研究成果更加丰富。同时,人们也越来越清楚地意识到传统优化方法的局限性。并且随着计算机速度的提高及并行计算机的普及,机器计算速度要求已不再是制约遗传算法和进化计算发展的因素。

因遗传算法在机器学习、过程控制、经济预测、工程优化等领域取得的成绩,该算法引起了数学、物理学、化学、生物学、计算机科学、社会科学、经济学及工程应用等领域专家的极大兴趣。同时由于该算法在应用研究方面的长处主要得益于其求解的有效性、现有仿真环境下易于实现、可扩充性和易于与其他方法相结合等特点,可以预期在不远的将来,随着理论研究的不断深入和应用领域的不断推广,遗传算法将取得长足的发展。

与传统方法相比,遗传算法具有隐式并行性和全局搜索性两大主要特点,作为强有力且应用广泛的随机搜索和优化方法,遗传算法可能是当今影响最广泛的进化计算方法之一。最近十几年来,遗传算法主要在复杂优化问题求解和工业工程领域应用方面,取得了一些令人信服

的结果,遗传算法已成功应用于函数优化、机器学习、组合优化、人工神经网络训练、自动程序设计、专家系统、作业调度与排序、可靠性设计、车辆路径选择与调度、成组技术、设备布置与分配等。

(2) 模拟退火算法 (Stimulated Annealing, SA)

模拟退火算法早在 1954 年就被提出,直到 1982 年才引入到结构优化设计领域中。模拟退火算法将组合优化问题与热力学中的热平衡问题类比,另辟了求解组合优化问题的新途径。它通过模拟物理退火过程来进行结构优化问题的寻优搜索,并能够找到全局(或近似)最优解。模拟退火算法是基于迭代求解法的一种启发式随机搜索算法。它用于解决优化问题的出发点是基于物理中固体物质的退火过程与一般组合优化问题间的相似性。在对固体物质进行退火处理时,通常先将它加热到一定温度,使其中的粒子可自由运动,然后随着温度的逐渐下降,粒子也逐渐形成了低能态的晶格。若在凝结点附近的温度下降足够慢,则固体物质一定会形成最低能态的基态。对于组合优化问题来说,它也有着类似的过程。组合优化问题解空间中的每一点都代表一个解,不同的解有着不同的目标函数值。所谓优化,就是在解空间中寻找目标函数的最小(或最大)解。模拟退火算法在搜索过程中某种程度上容纳过渡性的非优解,并通过对过渡性的非优解进行扰动,来不断跳出局部最优解,因此用它求全局最优解的概率较大。

模拟退火算法的迭代搜索过程以 Boltzmann 分布概率来接受目标函数的“劣化解”,所以模拟退火算法具有脱离局部最优陷阱的能力,而且具有高效性、鲁棒性、通用性、灵活性等优点。但其算法中的参数难以控制:若初始温度的设置太大,该算法要花费大量的时间;若设置太小,则该算法的全局搜索性能可能会受到影响。另外,关于退火速度问题也要作合理的设置。

模拟退火算法引入优化设计问题之后得到了大量地应用,它在求解最大截问题、0-1 背包问题、图着色问题、生产调度问题等方面的效率较高。已有学者开发出了模拟退火算法与响应面方法相结合的具有全局寻优能力的优化程序,采用三维黏性流场求解程序进行流场求解,并对某些工程问题进行了优化设计。在研究新近发展起来的模拟退火算法及其各种改进算法的基础上,有学者提出并构造了一种以记忆为基础的直接搜索模拟退火算法,并将其应用于内燃机配气结构设计中,得到了更合适的全局最优解。

(3) 人工蚁群算法 (Ant Colony Optimization Algorithm, ACA)

人工蚁群算法,是人们受到自然界中真实蚂蚁群体行为的启发而提出的一种新型智能优化算法,它是基于群体智能的模拟进化,属于随机搜索算法的一种。这种算法借鉴蚂蚁群体利用信息素相互传递信息来实现路径优化的机理,通过记忆路径信息素的变化来求解组合优化问题。蚁群算法最早由意大利学者 M Dorigo 等人提出,在充分利用了蚂蚁群体搜索食物的过程和著名的旅行商问题(TSP)之间的相似性,通过人工模拟蚂蚁搜索食物的过程来求解 TSP 问题,并获得了成功,故称之为“人工蚁群算法”,简称“蚁群算法”。在随后的研究中,蚁群算法又被成功地应用于二次分配问题、生产调度问题、网络动态路由优化问题、信带频率分配问

题等。

虽然 ACA 在求解 TSP 问题、分配问题和工作调度问题等方面取得了较好的试验结果,但是这种优化方法仍处于深入探索阶段。但很多初步研究成果已经显示出了蚁群算法在求解复杂结构优化问题方面的优越性,证明了它是一种很有发展前景的优化方法。

(4) 粒子群算法(Particle Swarm Optimization, PSO)

粒子群算法最初是通过模拟鸟群觅食行为,由美国的 Eberhart 和 Kennedy 于 1995 年最早提出的。一些科学家研究了蜂群、鸟群和鱼群等各成员间的协调运动,发现了相互间没有冲撞的隐含规则,通过模拟发现每个个体在运动过程中始终保持与其相邻个体间的一定距离。通常认为群体中个体之间的信息共享能够帮助群体找到全局最优解,这就是粒子群算法发展过程中的核心思想。

与遗传算法相比,PSO 算法具有结构简单、参数少、易于实现等优点。这使得 PSO 算法在近十年内得到了很大的发展,目前已被国际进化计算会议(CEC)列为讨论专题之一。但由于粒子群算法是建立在对社会模型仿真的基础上,因而在算法提出的初期并没有严格的数学基础,随着 Clerc 和 Van den Bergh 等人研究成果的公开发表,粒子群算法的严格数学基础正在逐步建立。

结构优化设计的实践经验表明,每一种优化算法都有其优点,也难免有其不足。因此,不存在最好的优化算法,但在给定的设计要求下,最合适的优化算法总是存在的。研究各种算法的目的就在于针对给定的优化问题,能找到最合适的优化算法进行优化设计。

1.4 船体结构优化设计的一般概念

我们都知道,船舶是一个由许多子系统所组成的复杂工程结构物。船体结构是其中的一个子系统,它提供了一个使其他子系统可以结合为一个整体的实际空间,并确保完成船舶的指定功能。船体结构设计通常是在船舶总体设计完成之后进行的,此时船舶的主尺度、船体型线及总体布置(船舶建筑型式、甲板层数、甲板与内底位置及舱室的划分等)已经确定。因此,船体结构设计的基本任务是选择合适的结构材料和结构型式,决定全部的尺寸和连接方式,在保证具有足够的强度和安全性等要求下,使结构具有最佳的技术性能。

船体结构优化设计是在船体结构设计的基础上进行的。船体结构优化设计就是要在所有可行的船体结构设计方案中,找到一种满足船东要求的最佳设计方案。船体结构优化设计需要相当的理论基础和计算手段,对于不同的结构型式,需要根据相应的设计规范,建立合理可行的数学优化模型,即确定结构优化的目标函数、设计变量和约束条件,选择适当的优化策略,采用高效实用的优化算法方能实现。

1. 船体结构优化设计的一般流程

船体结构优化设计的一般流程如下。