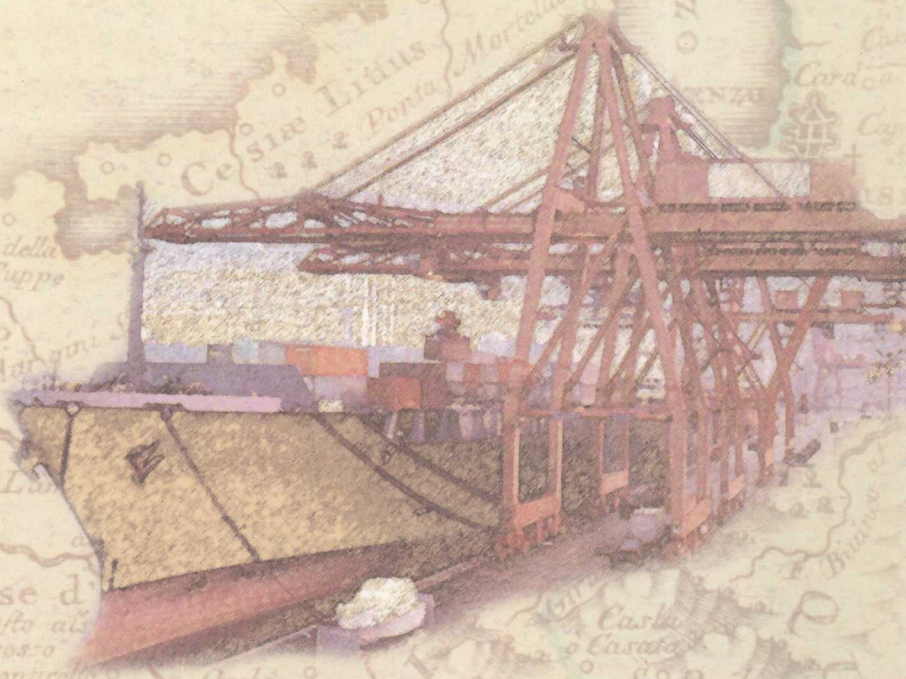


高等学校船舶类重点规划教材

船舶结构优化设计

曾广武 编著



华中科技大学出版社
<http://press.hust.edu.cn>

U663
Z023

高等学校船舶类重点规划教材

船舶结构优化设计

曾广武 编著

华中科技大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

船舶结构优化设计/曾广武 编著

武汉：华中科技大学出版社，2004年1月

ISBN 7-5609-3013-1

I. 船…

II. 曾…

III. 船舶结构-最优设计-高等学校-教材

IV. U633

船舶结构优化设计

曾广武 编著

责任编辑：叶见欣

封面设计：柳思思

责任校对：朱霞

责任监印：张正林

出版发行者：华中科技大学出版社

武昌喻家山 邮编：430074 电话：(027)87542634

录排：华中科技大学出版社照排室

印刷：湖北省通山县印刷厂

开本：787×1092 1/16

印张：13.5

字数：310 000

版次：2004年1月第1版

印次：2004年1月第1次印刷

定价：17.50元

ISBN 7-5609-3013-1/U·19

(本书若有印装质量问题，请向出版社发行科调换)

内 容 简 介

结构优化设计是最优化理论的一个应用最早和卓有成效的领域。船舶作为一种大型复杂结构物,其优化设计方法的研究和应用受到广泛的重视。本书旨在阐明结构优化的基本方法,在此基础上讨论其在船舶结构设计中的应用。内容分为五章:第一章阐述结构优化的任务、意义,以及结构优化设计问题建模和求解的基本方法。第二章概要阐明工程优化设计中常用的,和较适合于结构优化的基本算法,侧重分析各种算法的原理和思路,每个算法都用图和算例来说明其迭代过程和特性,以便于读者理解和运用。第三章较全面地概括了结构优化的基本方法,包括经典的准则法,基于有限元分析和适用于大型复杂结构优化的专门方法,以及难度较大的结构形状优化设计方法和结构可靠性优化设计方法等。第四章讨论了当前结构优化的若干新方法。包括模糊优化方法,智能优化方法和仿生遗传进化方法等。还初步探讨了计算机辅助创新设计问题。第五章概要阐述了船舶结构优化设计中的若干典型问题,涉及船舶基本结构优化,配载优化,以及一些典型局部结构的刚度和配置优化等。本章内容大都是作者及其同事教学和科研实践的总结。全书注重理论联系实际,力求深入浅出,概念清晰,算法简明。每节都附算例,以便于读者理解原理和掌握算法。

本书是根据船舶类高等学校重点规划教材的要求编写和审定的,主要用作船舶类专业本科生高年级选修课程或研究生相关课程的教材,也可供本专业科技人员,以及航空、钢结构等相关专业的学生和科技人员阅读和应用。

出版说明

根据国务院发(1978)23号文件批转试行的《关于高等学校教材编审出版若干问题的暂行规定》，中国船舶工业总公司负责全国高等学校船舶类专业规划教材编审、出版的组织工作。

为做好教材编审组织工作，中国船舶工业总公司相应地成立了“船舶工程”、“船舶动力”两个教材委员会和“船电自动化”、“惯性导航及仪器”、“水声电子工程”、“液压”、“水中兵器”五个教材小组，聘请了有关院校的教授、专家50余人参加工作。船舶类专业教材委员会(小组)是有关船舶类专业教材建设研究、指导、规划和评审方面的专家组织，主要任务是协助船舶总公司做好高等学校船舶类专业教材的编审工作，为教材质量审查把关。

经过前四轮教材建设，共出版教材300余种，建立了较完善的规章制度，扩大了出版渠道，在教材的编审依据、计划体制、出版体制等方面实行了有成效的改革，这些为“九五”期间船舶类专业教材建设奠定了良好基础。根据国家教委对“九五”期间高校教材建设要“抓好重点教材，全面提高质量，继续增加品种，整体优化配套，深化管理体制和运行机制的改革，加强组织领导”的要求，船舶总公司于1996年又制定了“全国高等学校船舶类专业教材(九五)选题规划”。列入规划的选题共133种，其中部委级重点选题49种，一般选题84种。

“九五”教材规划是在我国发展社会主义市场经济条件下第一个教材规划，为适应社会主义市场经济外部环境，“九五”船舶类专业教材建设实行指导性计划体制。即在指导性教材计划指导下，教材编审出版由主编学校负责组织实施，教材委员会(小组)进行质量审查，教材编审室组织协调。

“九五”期间要突出抓好重点教材，全面提高教材质量，为此教材建设引入竞争机制，通过教材委员会(小组)评审、择优确定主编，实行主编负责制。教材质量审查实行主审、复审制，聘请主编校以外的专家审稿，最后教材委员会(小组)复审，复审合格后由有关教材委员会(小组)发出版推荐证书，出版社方可出版。全国高校船舶类专业规划教材，就是通过严密的编审程序和高标准、严要求的审稿工作来保证教材质量。

为完成“九五”教材规划，主编学校应充分发挥主导作用。规划教材的立项是由学校申报，立项后由主编校组织实施，教材出版后由学校组织选用，学校是教材编写与教材选用的行为主体，教材计划的执行主要取决于主编校工作情况。希望有关高校切实负起责任，各有关方面积极配合，为完成“九五”船舶类专业教材规划、为编写出版更多的精品教材而努力。

由于水平和经验局限，教材的编审出版工作和教材本身还会有很多缺点和不足，希望各有关高校、同行专家和广大读者提出宝贵意见，以便改进提高。

中国船舶工业总公司教材编审室

1997年4月

前 言

本书是根据全国高等学校船舶类专业“九五”重点教材编审出版计划(船人[1997]013号文)而编写的。主要用作船舶类专业本科生高年级选修课程或研究生相关课程的教材,也可作为科技人员和相关专业学生的参考书。

为了适应深化教学改革形势,编写时着眼于加强基础,拓宽专业,注意有利培养学生分析问题、解决问题的能力。全书内容,除概要阐述结构优化设计的任务、意义,以及求解的基本方法以外,主要安排了四个方面的内容:第一部分,阐明工程优化设计中常用的和较适合于结构优化设计的基本方法。工程优化设计方法,是在最优化理论和计算技术基础上发展起来的新兴学科,是一种工程中普遍适用的设计方法。除在船舶、航空和建筑结构物的设计中应用外,还广泛用于机电、化工、水利、交通等各个工程领域,取得了显著成效。这部分内容应是全书的基础。第二部分,着重阐述结构优化设计的若干专门方法。它是将工程优化理论与结构力学原理和结构计算技术相结合的产物。结构优化设计是工程优化设计中一个应用得很早和卓有成效的领域,这部分内容是本书的重点。第三部分,概要阐述了当前结构优化设计中备受关注的若干新方法,它们也是工程优化设计和其他相关学科研究的一些新领域。限于篇幅,不可能详细讨论,着重在阐明思路和有关概念。第四部分,集中讨论船舶结构优化设计中的若干典型问题。船舶是一种大型复杂结构物,船舶结构的优化设计能在设计中发挥很好的效果,并且在结构设计中也有较好的典型性。当然,因为针对的是很复杂的具体工程结构,所以,所提出的原理和方法,不一定是很完善和很充分的。有些具体的处理方法,因较为繁杂,也不一定要在课堂上讲授,只供学生学习时参考,起到启发思路,举一反三的作用。

本教材编写中,除参考了作者本人曾经编写的教材和著作外,还广泛参考和引用了国内外同行的论著,大都在参考文献中列出,在此谨向有关作者致谢。作者的同事[郝刚]、程远胜教授等分别参加了若干实用方法的研究和程序系统的开发,也在此一并表示感谢。本书承华东船舶工程学院谢祚水教授仔细审阅,提出了许多宝贵意见,在此深表感谢。

由于作者水平有限,书中定有不当之处,祈望兄弟院校老师和广大读者批评指正。

编 者

2003年2月于武汉

目 录

第一章 绪 论

- 1.1 结构优化设计的任务和意义..... (1)
- 1.2 结构优化设计问题的数学模型..... (3)
- 1.3 结构优化设计方法概述 (10)

第二章 常用最优化算法

- 2.1 无约束最优化算法 (14)
- 2.2 约束问题的逐次无约束最优化方法 (34)
- 2.3 序列线性规划方法 (40)
- 2.4 拉格朗日乘子法 (51)
- 2.5 可行方向法 (57)
- 2.6 序列二次规划方法 (62)
- 2.7 设计变量为离散值时的处理方法 (66)
- 2.8 多目标优化方法 (72)

第三章 结构优化设计的若干专门方法

- 3.1 力学准则法 (79)
- 3.2 基于有限元分析的结构优化设计方法 (84)
- 3.3 大型复杂结构优化设计的子结构方法 (92)
- 3.4 结构优化设计的分级优化方法 (96)
- 3.5 结构形状优化设计方法 (99)
- 3.6 结构可靠性优化设计方法..... (109)

第四章 结构优化设计的新方法

- 4.1 模糊优化设计方法..... (123)
- 4.2 模拟生物遗传进化机制的方法..... (142)
- 4.3 智能型优化设计方法..... (148)
- 4.4 广义设计学探讨..... (156)

第五章 船舶结构优化设计的实用方法

5.1 概述	(162)
5.2 船舶中剖面结构优化设计	(163)
5.3 船舶板架和框架结构的优化设计	(172)
5.4 船舶配载优化	(184)
5.5 船舶坐墩配墩优化设计	(187)
5.6 船舶尾轴架结构优化设计	(194)
参考文献	(205)

第一章 绪 论

1.1 结构优化设计的任务和意义

结构物与人类的生存和发展息息相关。人们居住的房屋,旅行的车船,跨越江河的桥梁,探索海底的潜水器和太空的飞船等等,都是满足某种特定功能要求的结构物。其共同点是,在提供一定使用功能的前提下,要确保足够的强度,但这还只是最基本的。人们总希望谋求结构物尽可能重量轻,成本低,建造维修方便等,这就是“优化”。早期的结构物,往往是凭经验和才智进行设计的,一些杰出的设计师、工匠,也曾成功地设计建造出很多优秀结构物,至今仍闪烁着智慧的光辉,比如,早在我国隋朝(581—618),匠师李春在河北赵县建造了安济桥,跨长 37 m,桥两端开了很大的圆拱形孔洞,用以减轻重量,并兼具排洪泄水作用(见图 1-1-1),显然他已掌握了两端内力较小的力学原理。我国唐宋年间建造的木船,已采用隔舱板来提高船体在波浪中的弯扭强度和刚度的技术,并改善了船舶的抗沉性(见图 1-1-2)。无梁无柱的圆拱薄壳型房屋也早在一千多年前就已出现。当时在设计结构物时,虽然也可能获得一些资料或法规,如我国远古时代的“考工记”,宋代的“营造法式”等,但都还只是经验性的,没有上升到理论。

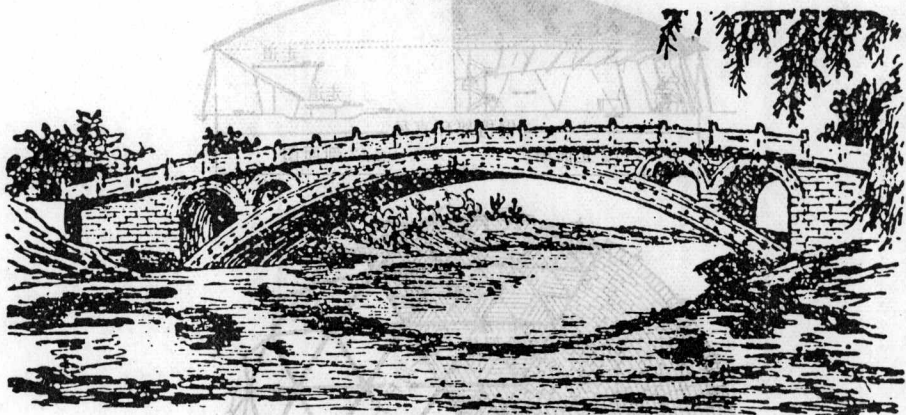


图 1-1-1 安济桥(赵州桥)

随着人类文明的发展,特别是 19 世纪工业革命的推动,社会对大型结构物的需求越来越迫切,高层建筑、大型船舶、大跨度桥梁等复杂结构物亟待开发,单纯凭借经验和个人才智,已无法获得安全可靠的设计方案,要进行一项复杂结构物的设计,设计师需要掌握在使用条件和环境条件下,结构物可能遭遇的载荷的性质和大小,需要把握在这种载荷作用下结构内部的应力、变形的规律,还要熟悉结构材料自身的力学特性和破坏特征等,只有运用这些规律,才能设计出“优”的结构物。这样就形成了材料力学、结构力学、实验力学等一系列以结构承载能力与破坏性能为基础的学科。同时,在长期实践基础上总结编制了各种设计手册、计算规则,以及很

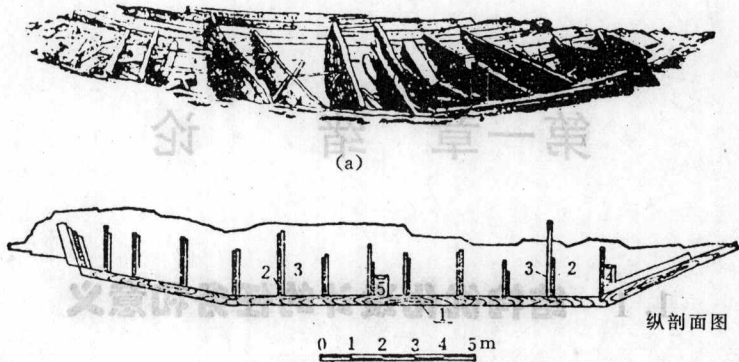


图 1-1-2 泉州湾后渚出土的南宋海船
(a)南宋海船复原图 (b)南宋海船的测绘纵剖面图

多法规和条例,如《船舶设计实用手册》、《钢质海船建造规范》等等,用以指导和规范设计行为,使结构设计逐渐发展成为一门科学。一些看似简单的规律,被用来设计出恢弘的结构。例如,主要承受拉伸内力的结构,强度性能好,利用这个特性,创造出了悬索斜拉大跨度桥;在主要承受分布外力的情况下,圆拱形、圆柱形、球形薄壳使结构主要产生膜应力,材料能充分利用,所以它成为深海潜水器、大型场馆屋顶的常用结构形式(见图 1-1-3)。桁架结构在外载荷作用下,只产生很少的弯曲应力,所以已广泛用于建造桥梁和房屋。但是一个复杂的结构物,即使选定

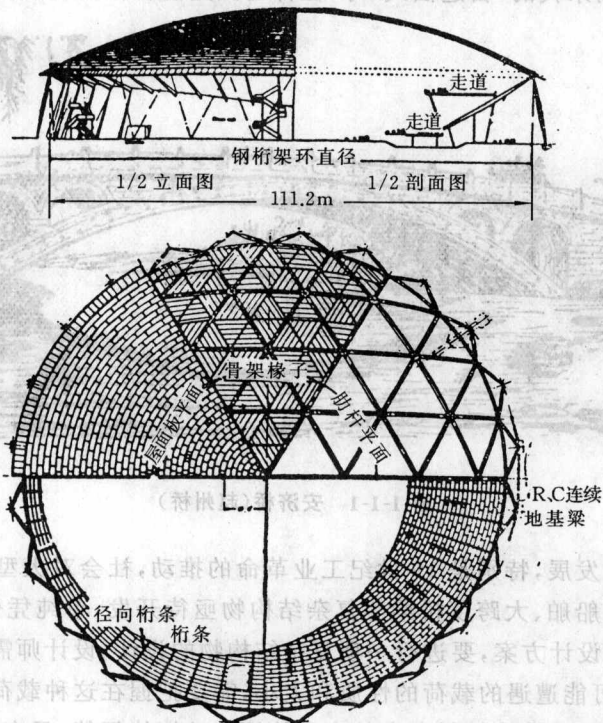


图 1-1-3 1951 年英国建造的迪斯卡弗里穹顶(铝板覆盖)

了基本结构形式,还仅仅是设计的开始,还需要确定结构各部位、各构件的尺寸,使之恰到好处,结构各部分受力均匀,材料充分利用,并且照顾到使用、建造等各方面的要求,使结构物安全、经济、合用。这是一项既需要“量化”,又需要“综合”的工作,在设计一个复杂结构物时,为了知道某个设计方案下,结构物的应力、变形等,往往要作大量的计算,花费很多的人力和时间,在计算手段不发达的情况下,设计人员往往只能凭经验或简化公式,做出若干个方案,经过挑选和校验强度,获得一个基本满意的可行方案,就投入施工建造了,即使反复调整参数,不断迭代运算,也难免挂一漏万,难以得到很“优”的方案。这样的状态维持了很长一个历史时期。

现代结构优化设计方法的出现,大约可以追溯到 20 世纪 50 年代后期,空间竞赛、海上石油开发和远洋航运的发展,不但使结构日益大型化、复杂化,同时对轻量化也提出了迫切要求,这给予结构设计由被动“验算型”转向主动“直接设计型”强大的推动力。此时,计算机和计算数学,也发展到了相当高的水平,为结构物的快速准确分析计算,提供了物质基础,这样,优化设计方法也就应运而生。L. A. Schmit 是早期研究结构最优化设计的著名学者,他于 1960 年首先提出了关于在多种载荷条件下,用数学规划方法进行弹性结构优化设计的方法,并证明了通常认为的结构满应力状态并不一定导致最轻结构的结论,他后来发表了一系列关于宇航结构优化设计的论文^[1]。在 20 世纪 60 年代后期,造船界也开始研究和运用结构最小重量设计方法,比较著名的学者有 O. F. Hughes, J. H. Evans, J. Moe 等;他们的专著有些已被翻译介绍到我国^[2]。我国在这一领域的系统研究虽然起步较晚,但开始就紧密地与实际工程相结合,在航空、造船、建筑等各个领域,取得了很多有重要理论意义和实用价值的成果,此处不作一一介绍和评述。过去,已经发表了很多评述性论文和专著^[3~15],它们对这一时期结构优化设计的进展和成果,作了十分详细的总结,并充分证明它已成为一门成熟的、能够应用于工程的学科。

但是,应该看到,设计像船舶这类大型结构物时,要使它安全、经济、合用、耐用,光靠结构力学原理、计算数学方法以及大型计算机等,还是不够的。一些大的工程项目,往往涉及很多互相矛盾的质量指标和一些不很明确的限制条件,需要设计者或主管者作出判断和决策。结构设计和结构分析不同之处也在于此。后者的结果是唯一的,评判的标准也是明确的;而前者的结果却不是唯一的,评判的标准也不是完全明确的。例如,一艘船舶,要求舱室宽敞舒适,势必增加结构尺寸、重量;好的船壳导流外形,有可能影响舱内的设备布置;大的安全可靠性能,会带来高的成本。总之,如何权衡利弊,协调矛盾,酌情处置,需要作为设计主体的人来作判断和决策,或者依据公认的观点和准则来作判断和决策。这涉及到当前潮流、长远发展、买主意愿,甚至社会文化、艺术等人文因素。所以,设计科学具有综合性的特点。同时,它还包含新的结构形式、结构风格的创造问题,正如型材、桁架、板架、悬索斜拉桥等新的结构形式的出现,推动了结构设计的进步一样;结构设计也像盼望新的方法一样,盼望能产生新的优秀的结构形式。这也是结构优化设计的重要任务。这些都是更高层次的“优化”,有待进一步探索和发展。所以,通常人们所说的“结构最优化设计”,只是一种从数学角度的提法,实际上只有“优化”,没有“最优”。

1.2 结构优化设计问题的数学模型

通常的结构优化设计问题,是指结构形式选定以后,运用数学方法、借助计算机的帮助,进行结构尺寸参数、外形参数等的优选。首先需要对所考察的问题进行工程分析,明确寻优的目标(质量指标),列出必须遵循的限制条件,选定有待优化的参数,再按一定的格式解析化,这就

是建立数学模型。一个结构优化设计问题的数学模型,一般应包含上述三要素,通常称为设计变量(Design Variable),约束条件(Constraint Condition)和目标函数(Objective Function),现将其有关概念和具体做法简介如下。

1.2.1 设计变量

对于某一具体的结构设计,把能够自由选定的要素加以数量化,就成为设计变量,记为:

$$X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$$

上式的每一个量代表一个待定的尺寸,如壳板厚度,管柱的直径,筋条的剖面积、间距等,有时也可以是外形参数,布置参数或任何其他可供选择的材料力学、物理性能等。以 x_1, x_2, \dots, x_n 为坐标,组成一个 n 维超空间,记为 R^n ,其中每一个点 $X^{(i)}$,就代表一个设计方案。

结构物总是要处于要求的使用条件和环境条件中,受到各种外加因素的作用,如载荷、热源、边界约束力等。结构在这些作用下的响应,反映了结构物的状态特征和性态特征,如应力、位移、频率、温度等等,这些响应称为状态参变量,它受使用条件和外界环境的制约,不是设计师能够自由选择和改变的。对于一个确定的结构系统,当使用条件和环境条件确定以后,每选定一个设计方案,就有与之相对应的状态参变量,所以它是设计变量的函数,整个系统则应满足一定的状态方程式或方程组。

若将状态变量记为:

$$Y = (y_1, y_2, \dots, y_m)$$

则状态方程可以表示为:

$$\phi_j(x_1, x_2, \dots, x_n; y_1, y_2, \dots, y_m), \quad j = 1, 2, \dots, m$$

对结构系统进行分析后,通常可以得到状态参变量与设计变量之间的解析表达式,可记为:

$$y_i = \bar{\phi}_j(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad j = 1, 2, \dots, m$$

当系统复杂,很难求得解析表达式时,也可以通过数值方法或实验方法、经验方法,求得各个状态参变量和设计变量之间的确定的对应关系,由一个计算过程或由图表、曲线等来描述。有限元分析就是我们常用的数值方法。

1.2.2 约束条件

结构物要能够正常使用或运行,必须满足某些规定的限制,这些限制大体上可分为两类:一类是关于状态参变量的限制,称为状态约束,如最大应力应小于或等于容许应力、特征点位移应小于或等于规定的容许位移等;另一类是直接关于设计变量变化范围的限制,称为限界约束,如壳板厚度应大于或等于最小允许厚度、构架间距应大于或等于最小允许间距等。因为状态参变量可以表示成设计变量的函数,所以,上述限制条件经过解析化和整理,都可以归结为关于设计变量的不等式条件或等式条件,称为约束条件,可以表示为:

$$\begin{aligned} g_j(X) &\leq 0, & j &= 1, 2, \dots, J \\ l_k(X) &= 0, & k &= 1, 2, \dots, K \end{aligned}$$

每个约束条件,在 n 维设计空间中,表现为一个超曲面或超平面。所有这样的超曲面或超平面共同组成约束界面,它将设计空间分为两个区域,一个是可行区,另一个是非可行区。在可行区内(包括界面上)的点所对应的设计方案,就是满足所有约束条件的,所以称为可行点或可

行方案。在非可行区中的点所对应的设计方案,是不满足或不全部满足约束条件的,因而是不可接受的,称为非可行点和非可行方案。

1.2.3 目标函数

一般来说,处于可行区内的点是非常多的,但它们所对应的设计方案往往有很大差别,有的性能好,有的性能差,探求一个最合适方案,就是设计所要追求的目标。为了能用数学方法,借助计算机的帮助来实现,需要把追求的目标解析化、数量化,这可以通过引进一个或几个表征设计优劣,由设计变量所决定的函数来实现,这种函数就称为目标函数,记为 $f(X)$ 。

对设计对象的要求不同,目标函数可以有不同的内容,它可以是结构重量,建造成本,安全可靠度或使用效能等。当存在多个质量指标时,也可以是这些指标的某种适当组合,即为:

$$f(X) = (f_1(X), f_2(X), \dots, f_p(X))$$

1.2.4 结构优化设计问题的数学表述

综上所述,结构优化设计问题可以表述如下:

$$\begin{aligned} \text{选择设计变量} & \quad X = (x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \text{满足约束条件} & \quad g_j(X) \leq 0, \quad j=1, 2, \dots, J \\ & \quad l_k(X) = 0, \quad k=1, 2, \dots, K \\ \text{并使目标函数} & \quad f(X) \Rightarrow \min(\text{或 max}) \\ \text{或简记为:} & \quad \min f(X), X \in \mathbf{R}^n \\ & \quad \text{s. t. } g_j(X) \leq 0, \quad j=1, 2, \dots, J \\ & \quad l_k(X) = 0, \quad k=1, 2, \dots, K \end{aligned}$$

式中,s. t. 为 subject to 的简称。

有时也可简写为:

$$\begin{aligned} & \min_{X \in \Omega} f(X) \\ \Omega = \{X | X \in \mathbf{R}^n, g_j(X) \leq 0, \\ & l_k(X) = 0, \quad 1 \leq j \leq J, 1 \leq k \leq K\} \end{aligned}$$

Ω 表示在 n 维设计空间中,由约束条件给出的可行域。

对于一个单目标二维问题,可以在三维空间中画出其几何图像,并在二维平面上描述其几何特征。这可用下述数值例题加以说明。

$$\begin{aligned} \min f(X) & = x_1^2 + x_2^2 - 4x_1 + 4 \\ \text{s. t. } g_1(X) & = x_1 - x_2 + 2 \geq 0 \\ g_2(X) & = -x_1^2 + x_2 - 1 \geq 0 \\ g_3(X) & = x_1 \geq 0 \\ g_4(X) & = x_2 \geq 0 \end{aligned}$$

为了叙述的方便,将四个约束条件均简记为 g_1, g_2, g_3, g_4 。

本例中,目标函数 $f(X)$ 是一个空间锥面,在二维平面上画出其等高线。约束界面 g_1 是一个平面, g_2 是一个抛物曲面,在平面图上应画出投影线,分别为一条斜线和抛物线;约束界面 g_3 和 g_4 的投影线即为坐标轴(见图 1-2-1)。从图中可以清楚地看出可行区、非可行区以及最优点。

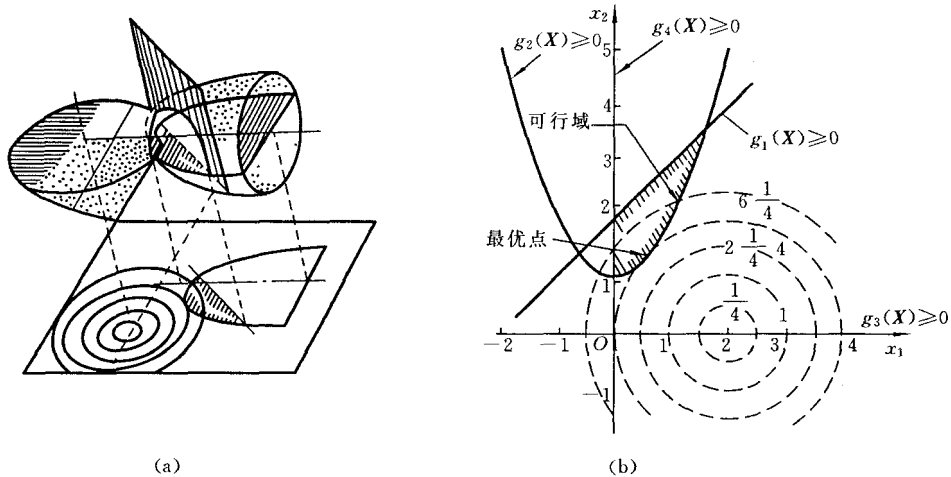


图 1-2-1 一个二维最优化问题的几何图像

1.2.5 若干简单例子

1. 船用箱形梁舱口盖的优化设计

有一箱形梁舱口盖,其横截面如图 1-2-2 所示,舱口盖的宽度 b 和长度 l_0 已由布置要求确定,材料通常采用铝合金。试进行横截面的优化设计,使结构重量最轻,并满足规范要求的强度和刚度。

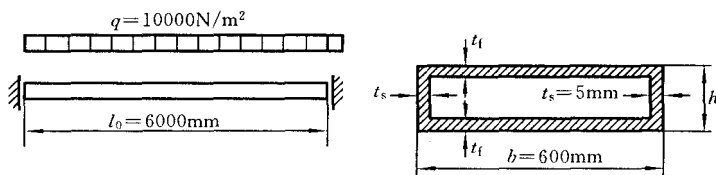


图 1-2-2 箱形梁舱口盖

(1) 选定设计变量

结构几何模式已给定。截面待定尺寸参数为面板厚度 t_f ,侧壁板高度 h 和壁板厚度 t_s 。为了将此问题的几何图像画出来,便于分析,此处设侧壁厚度已参照现有结构给出为 $t_s = 5\text{mm}$ 。因此,本例有两个设计变量,即 $x_1 \Rightarrow t_f, x_2 \Rightarrow h$ 。

设计对象是一个箱形单跨梁,其状态特征可以用三个应力、一个挠度来表征,即侧壁的最大剪应力 τ ,梁的最大挠度 δ ,面板的最大弯曲应力 σ_b ,和侧壁板的屈曲应力 σ_{cr} 。分别用常用符号表示,即

$$y_1 \Rightarrow \tau, \quad y_2 \Rightarrow \delta, \quad y_3 \Rightarrow \sigma_b, \quad y_4 \Rightarrow \sigma_{cr}$$

(2) 列出约束条件

为了保证舱口盖的安全和正常使用,根据设计计算规则,这类结构需满足强度、稳定和刚度要求。材料参数和容许应力、容许位移查出如下:

$$\nu = 0.3, \quad E = 7 \times 10^6 \text{N/cm}^2$$

$$\tau_{\text{all}} = 4500 \text{N/cm}^2, \quad \sigma_{b,\text{all}} = 7000 \text{N/cm}^2, \quad \delta_{\text{all}} = 1.5 \text{cm}$$

因此约束条件可以表示为：

$$\begin{aligned} g_1(\mathbf{X}) &\leq 0: & \tau - \tau_{\text{all}} &\leq 0 \\ g_2(\mathbf{X}) &\leq 0: & \delta - \delta_{\text{all}} &\leq 0 \\ g_3(\mathbf{X}) &\leq 0: & \sigma_b - \sigma_{b,\text{all}} &\leq 0 \\ g_4(\mathbf{X}) &\leq 0: & \sigma_b - \sigma_{\text{cr}} &\leq 0 \end{aligned} \quad (1-2-1)$$

由于设计变量为结构尺寸参数，所以自然应取大于 0 的正数，即应补充两个条件：

$$\begin{aligned} g_5(\mathbf{X}) &\geq 0: & x_1 &\geq 0, \text{ 或 } -x_1 &\leq 0 \\ g_6(\mathbf{X}) &\geq 0: & x_2 &\geq 0, \text{ 或 } -x_2 &\leq 0 \end{aligned}$$

为叙述简洁，约束条件 $g_i(\mathbf{X}) \leq 0$ ，均简记为 g_j 。

通过结构分析，可以建立状态参变量与设计变量的函数关系，此例可以列出解析表达式，因此可以建立解析形式的约束条件。简要列出其过程如下：

最大剪力 $Q_{\max} = \frac{1}{2} qbl_0 = 18\,000\text{N}$

最大弯矩 $M_{\max} = \frac{1}{8} qbl_0^2 = 2\,700\,000\text{N} \cdot \text{cm}$

截面惯性矩 $I \approx \frac{1}{2} bt_1 h^2$

侧壁最大剪应力 $\tau = \frac{Q_{\max}}{2t_s h}$

梁的最大挠度 $\delta = \frac{5}{384} \frac{qbl_0^4}{EI}$

面板最大弯曲应力 $\sigma_b = \frac{Mh}{2I}$

侧壁板屈曲应力 $\sigma_{\text{cr}} = \frac{4\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t_1}{b} \right)^2$

将上述各式及其容许值代入(1-2-1)式，即得到仅包含设计变量值的不等式约束条件为：

剪应力约束 $g_1: 18\,000x_2^{-1} - 4500 \leq 0$

挠度约束 $g_2: 482x_1^{-1}x_2^{-2} - 1.5 \leq 0$

弯曲应力约束 $g_3: 45\,000x_1^{-1}x_2^{-1} - 7000 \leq 0$

屈曲约束 $g_4: 45\,000x_1^{-3}x_2^{-1} - 7000 \leq 0$

变量非负性约束 $g_5: x_1 \geq 0$

$g_6: x_2 \geq 0$

(3) 目标函数

本例为求最小重量，可以用截面面积表征，

即

$$f(\mathbf{X}) = 1200x_1 + 10x_2$$

经过优化计算，得到最优方案为：

$$f(\mathbf{X}) = 101\text{cm}^2, t_1 = x_1 = 0.636\text{cm},$$

$$h = x_2 = 25\text{cm}$$

因只有两个设计变量所以可在二维平面上画出其几何图像如图 1-2-3 所示。

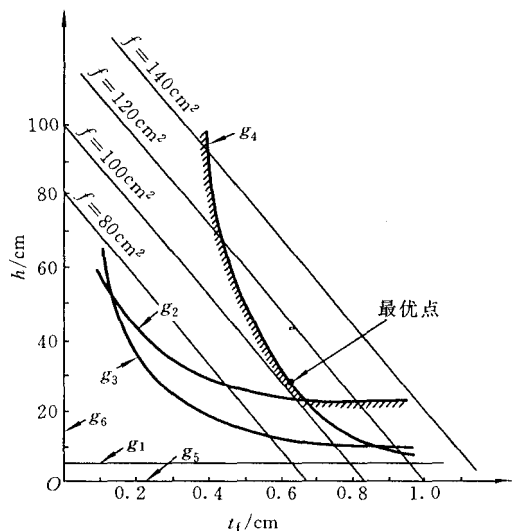


图 1-2-3 箱形梁舱口盖优化几何图像

(4) 结果分析讨论

本例是以结构尺寸参数为设计变量的最小重量优化问题,目标函数应是设计变量的单调函数。最优解一定在约束界面上。本例最优点是在约束条件 $g_4(X) \leq 0$ 的界面上,表明 $g_4(X) \leq 0$ 是积极约束,即本例的侧壁刚度(承压稳定性)成为限制结构进一步减轻的障碍。若能采取措施改善侧壁稳定性,如加设扶强支条,则可能进一步大幅度减轻这类结构的重量。

2. 简单框架结构的优化设计

设有如图 1-2-4 所示的门式刚架,结构左右对称,均为标准工字形构件组成,材料弹性模数 $E=207\text{kN/mm}^2$,试进行结构最小重量设计,确定横梁和柱子的剖面尺寸,并使最大水平位移不超过 4mm,最大弯曲应力不超过 150N/mm^2 。

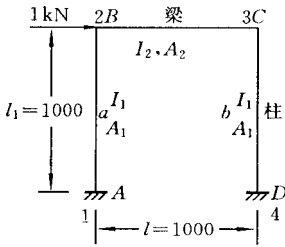


图 1-2-4 门式刚架

(1) 设计变量

本例为优选横梁和柱子的剖面尺寸,考虑到标准工字形剖面面积确定后,即确定了相对应的型材,所以可将梁和柱的剖面积选作设计变量,设柱子剖面面积为 x_1 ,记为 A_1 ,横梁剖面面积为 x_2 ,记为 A_2 。标准工字形材其剖面特性参数间有如下关系:

$$A_i = 0.78Z_i^{2/3}, \quad A_i = 0.559I_i^{1/2}$$

$$l_1 = l_2 = l, \quad l = 1000\text{mm}$$

式中, Z_i 为剖面模数; I_i 为剖面惯性矩;脚标 1 为柱子;脚标 2 为横梁。

状态参变量即为刚架的最大位移 u_B 和最大应力 σ_1 (柱)、 σ_2 (梁)。

(2) 约束条件

本例约束条件很明确,可以列出如下:

$$g_1: \quad \sigma_1 \leq 150\text{N/mm}^2$$

$$g_2: \quad \sigma_2 \leq 150\text{N/mm}^2$$

$$g_3: \quad u_B \leq 4\text{mm}$$

用矩阵位移法或有限元法进行结构分析,可分别求得节点 2 处的水平位移 u_B 和转角 θ_B ,

即

$$u_B = \frac{(2I_1 + 3I_2)l^3}{12EI_1(I_1 + 6I_2)}$$

$$\theta_B = -\frac{l^2}{4(I_1 + 6I_2)E}$$

柱上弯曲应力为:

$$\sigma_1 = \frac{6EI_1u_B}{l^2Z_1} + \frac{2EI_1\theta_B}{lZ_1}$$

梁上弯曲应力为:

$$\sigma_2 = \frac{6EI_2\theta_B}{lZ_2}$$

将已知参数 E 代入以上各式,并将剖面特征参数代换为 A ,引入约束条件,即得:

$$g_1: \quad \frac{345A_1^2 + 1035A_2^2}{6A_2^2A_1^{1.5} + A_1^{3.5}} \leq 0.15$$

$$g_2: \quad \frac{1032A_2^{0.5}}{A_1^2 + 6A_2^2} \leq 0.15$$

$$g_3: \frac{1.257 \cdot 10^5 (2A_1^2 + 3A_2^2)}{A_1^4 + 6A_1^2 A_2^2} \leq 4$$

(3) 目标函数

结构重量可以用结构体积表征,因材料密度为常数可以不予计入,即有:

$$f(X) = 2000A_1 + 1000A_2$$

经优化得:

$$f(X) = 446\,300(\text{mm}^2)$$

$$A_1 = 155\text{mm}^2, \quad A_2 = 136.3\text{mm}^2$$

本例亦为二维问题,其几何图像如图 1-2-5 所示。

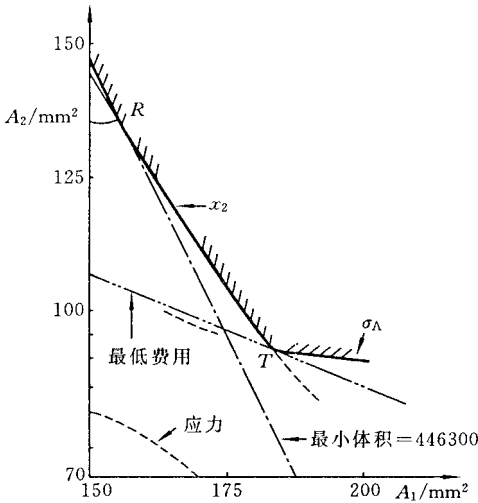


图 1-2-5 例 2 门式刚架优化的几何图像

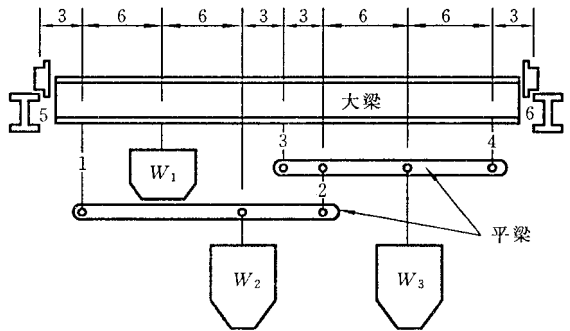


图 1-2-6 桥式吊车

(4) 结果分析讨论

本例中梁的应力很小,不可能成为积极约束;位移限制成为积极约束,若该约束条件能放宽,将可望进一步减轻重量。

若要考虑建造和安装成本,以费用指数最小为目标。设考虑建造和安装的费用指数,对柱和梁是不同的。对于柱,取为 $2l^2 + 250A_1^{0.5}$,对于梁,取为 $10l + 300A_2^{1.5}$,则新目标函数可表示为:

$$f(X) = 2000A_1 + 1000A_2 + 4 \times 10^6 + 500A_1^{0.5} + 10\,000 + 300A_2^{1.5}$$

可舍弃常数项得:

$$\bar{f}(X) = 2000A_1 + 1000A_2 + 500A_1^{0.5} + 300A_2^{1.5}$$

经优化可得最优点为图 1-2-5 中的 T 点, $f(X) = 744\,400$,最低费用指数为 $f(X) = 4\,754\,400$,此时 $A_1 = 185\text{mm}^2, A_2 = 94\text{mm}^2$ 由此看出,所追求的目标不同,设计方案的差别是很大的。

3. 结构配载优化

有一桥式吊车如图 1-2-6 所示,用来将混凝土从拌合厂运至浇注场,升降平梁用于帮助浇注混凝土和移动养护构件,要求合理分配每个吊斗的装载,使吊车每趟的总载运量最大。设缆索 1 和 2 各有 80kN 的承载力,缆索 3 和 4 各有 160kN 承载力,每个吊车钢轨(5 和 6)可以支承 200kN。吊车大梁和升降平梁的重量可以不计。

(1) 设计变量