

● 研 究 生 用 书 ●

OPTIMUM DESIGN
CALCULATION FOR LARGE
COMPLEX STRUCTURES

华中理工大学出版社



宋天霞 等

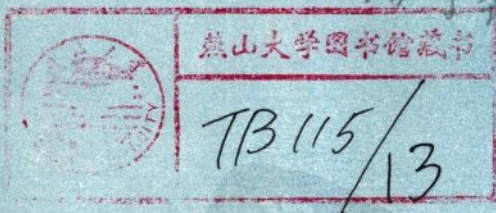
大型复杂结构优化设计计算

大型复杂结构 优化设计计算

宋天霞 杨文兵 施平

华中理工大学出版社

96 优化计算
96 6/12 同
96 工程技术
96 9/12 结构



0269619

24

· 研究生用书 ·

大型复杂结构优化设计计算

宋天霞 等

责任编辑 湛柏琼

*

华中理工大学出版社出版发行

(武昌喻家山)

新华书店湖北发行所经销

华中理工大学出版社印刷厂印刷

*

开本: 850×1168 1/32 印张: 10.25 插页: 2 字数: 248 000

1992年11月第1版 1992年11月第1次印刷

印数: 1-1 000

ISBN 7-5609-0714-8/O · 97

定价: 2.95 元

(鄂)新登字第 10 号

内容简介

本书对大型复杂结构的优化设计计算,结合具体工程结构问题进行了系统地论述,介绍了多种优化计算过程及其应用;首先,论述了四种优化方法用于大型复杂结构优化计算存在的问题,并提出了改造措施;其次,介绍了在优化计算中用有限元法进行结构分析的统一理论和相应的程序设计思路,并对单元网格划分可能出现的“变异”作了具体分析,提出了在计算过程中检查和避免“变异”的方法;最后,以大型水轮机的五大部件为例作了典型计算。

本书可作工程力学、水力发电工程、重型机械、船舶、海洋工程、大型建筑结构等专业研究生的教材,并可供从事各类结构优化分析的工程技术人员参考。

Abstract

This book systematically discusses optimal calculation of large-scale complex structures, integrated with problems of concrete engineering structures, and introduces various types of optimal calculation process and their applications. The first part of this book is devoted to a discussion of the problem of applying four kinds of search algorithm to optimal calculation of large-scale complex structures, and also a presentation of their improvements. The second part provides unified theory of optimal calculation based on finite-element analysis and corresponding thinking of computer programming. This part also deals with concrete analysis of possible "transformation" from creating finite mesh, and presents the method of inspecting and avoiding "transformation". The final part makes the typical calculations by taking the five large hydraulic turbine components for example.

This book is intended to be used as a textbook for postgraduate students in the fields of engineering mechanics, water power engineering, heavy machinery, ship and offshore engineering, and large building structures. It can also be used as reference for engineers who are engaged in structural optimization.

“研究生用书”总序

研究生教材建设是提高研究生教学质量的重要环节,是具有战略性的基本建设。各门课程必须有高质量的教材,才能使学生通过学习掌握各门学科的坚实的基础理论和系统的专门知识,为从事科学研究工作或独立担负专门技术工作打下良好的基础。

我校各专业自 1978 年招收研究生以来,组织了一批学术水平较高,教学经验丰富的教师,先后编写了公共课、学位课所需的多种教材和教学用书。有的教材和教学用书已正式出版发行,更多则采用讲义的形式逐年印发。这些讲义经过任课教师多年教学实践,不断修改、补充、完善,已达到出书的要求。因此,我校决定出版“研究生用书”,以满足本校各专业研究生教学需要,并与校外单位交流,征求有关专家学者和读者的意见,以促进我校研究生教材建设工作,提高教学质量。

“研究生用书”以公共课和若干门学位课教材为主,还有教学参考书和学术专著,涉及的面较广,数量较多,准备在今后数年内分批出版。编写“研究生用书”总的要求是从研究生的教学需要出发,根据各门课程在教学过程中的地位和作用,在内容上求新、求深、求精,每本教材均应包括本门课程的基本内容,使学生能掌握必需的基础理论和专门知识;学位课教材还应接触该学科的发展前沿,反映国内外的最新研究成果,以适应目前科学技术知识更新很快的形势;学术专著则应充分反映作者的科

研硕果和学术水平,阐述自己的学术见解。在结构和阐述方法上,应条理清楚,论证严谨,文字简炼,符合人们的认识规律。总之,要力求使“研究生用书”具有科学性、系统性和先进性。

我们的主观愿望虽然希望“研究生用书”的质量尽可能高一些,但由于研究生的培养工作为时尚短,水平和经验都不够,其中缺点、错误在所难免,尚望校内外专家学者及读者不吝指教,我们将非常感谢。

华中理工大学研究生院院长

黄树槐

1989. 11.

前 言

本书是在近几年对大型复杂结构进行优化设计计算研究的基础上写出来的。从 50 年代末到 70 年代初,优化设计从线性规划理论中独立出来发展成为一门学科后,今天已在理论和方法上有了一套完整的系统。然而,在应用上,特别是在大型复杂工程结构设计中的应用方面,又可以说是一门刚刚起步的学科。正因不太重视应用,反过来又难以促进优化设计理论和方法向更高层次发展。不应用,就提不出新的问题和新的要求,就缺乏生命力。这种情况,不仅在我国存在,在世界各国也不同程度地存在。近 4 年来,我们试图根据工程结构设计的实际需要,立意把已有的优化理论和方法用来求解复杂结构的最优设计问题。在此基础上再考察存在的一些计算问题,并进行研究,企求能起到一些充实理论和方法、推动应用的作用。这也正是我们撰写本书的目的。

全书共分五章。第一章,主要是通过实例说明优化理论和方法在解决大型复杂结构的合理设计方案中的巨大作用,以及在有限元分析基础上进行优化计算的特点和出现的问题。第二章,是在我们所涉及的范围里,提出了适用于大型复杂结构优化设计计算的四种方法。这些方法,是指在节省计算耗费的条件下,能保证计算成功的实用方法。这种实用性,是对原有方法经过扩充、修正和采取各种计算措施后得到的。第三章,是针对优化设计计算要求,提出了实用结构分析法;首先,为便于应用各类单元而提出了以位移元为基础的统一计算格式;其次,为了节省结构分析次数而推证了插值替代法,并对此建立了调用控制信息;再次,详细研究了单元的初始形状在优化计算过程中可能发生的变化形态及其对结构分

析精度的影响,并为缩小这种影响而研究了相应处理措施;最后,还指出了在实际计算中应注意的“奇异”现象.第四章,就上述理论、方法和措施等变为计算程序系统的有关问题作了具体讨论,提出了行之有效的模块化、主控分层化以及以优化方法为主导的程序系统结构设计的构想.与此同时,还讨论了设计与编制程序系统的特点和问题.第五章,详细论述了优化设计计算过程和一些特殊计算问题的处理技巧,并指出按板壳结构、壳块结构和块体结构等分类进行优化计算,不仅可充分检验前四章的理论、方法和措施的可行性和正确性,而且反过来又为前四章的理论、方法和措施提供了计算研究的实践前提.因此,这一章,既是前四章的总结,又是前四章的实例考核.

全书由宋天霞教授主笔;第五章的计算工作和§4-4、§4-5的初稿,主要由杨文兵、施平讲师主持完成;有关水轮机结构、设计要求、约束条件和试验数据等专业方面的内容,主要由周振德工程师提供.此外,还有方巧媛、万西玲、王健、李双蓓、陈寅等同志分别参加了部分计算工作.

在本书所涉及的课题研究中,始终得到了我国著名水轮机专家程良骏教授的热情鼓励和指导以及余健棠副教授的大力支持;在起步阶段,还得到了华中理工大学水力机械教研室许多同志的有力协助;本书的出版,始终得到了华中理工大学出版社的支持,在此一并致以诚挚的感谢.

由于水平有限,书中错误之处在所难免,诚望读者批评指正.

作者

于1991年8月

目 录

第一章 引 论	(1)
§ 1-1 问题的提出	(1)
§ 1-2 结构优化设计及其现状	(1)
1. 数学模型	(2)
2. 求解方法	(3)
3. 现状与趋势	(4)
§ 1-3 大型复杂结构优化设计的特点	(5)
1. 离散分析的精度要求高	(5)
2. 容差区域的敏感度高	(6)
3. 局部与整体最优解间相差不大	(7)
4. 效率是成功计算的主要因素	(7)
§ 1-4 基于有限元分析的优化计算问题	(9)
1. 导数的差分计算	(9)
2. 判别有效约束	(10)
3. 优化计算收敛	(11)
4. 优化计算中的经验	(12)
第二章 实用优化方法	(13)
§ 2-1 实用优化方法的提法	(13)
§ 2-2 最优解的实用判据	(14)
1. Lagrange 乘子法	(14)
2. Kuhn-Tucker 条件	(16)
3. 实用判据	(20)
§ 2-3 实用复合形法	(23)
§ 2-4 实用可行方向法	(28)
1. 可行方向的计算方法	(29)
2. 确定步长的方法	(32)
3. 可行方向法的实施流程图	(41)
§ 2-5 实用最速下降法	(43)

1. 梯度方向性质	(44)
2. 梯移	(46)
3. 侧移	(47)
§ 2-6 实用梯度投影法	(50)
1. 线性约束的投影矩阵	(50)
2. 非线性约束的投影矩阵	(59)
§ 2-7 线性与非线性规划的应用	(63)
1. 用线性规划确定可行方向	(63)
2. 判定有效约束的非线性规划法	(69)
第三章 实用结构分析方法	(74)
§ 3-1 实用结构分析法的统一形式	(74)
1. 基本关系	(75)
2. 力有限元法	(77)
3. 位移有限元法	(80)
4. 程序实现	(82)
§ 3-2 优化设计中的有限元计算	(95)
1. 区域内控制信息	(95)
2. 边界控制信息	(97)
3. 插值控制信息	(99)
§ 3-3 单元与单元组合	(102)
1. 组合高阶元	(102)
2. 可变节点块体元	(109)
3. 单元设计	(113)
§ 3-4 单元网格划分	(125)
1. 初始网格形状变化的影响	(125)
2. 处理途径	(128)
§ 3-5 快速重分析法	(131)
1. 矩阵分隔法	(132)
2. 迭代算法	(133)
3. 缩减基底法	(135)
§ 3-6 响应量的导数	(137)
1. 位移、应力导数	(137)
2. 特征方程解的导数	(139)
3. 特征方向的导数	(140)

4. 求导数的近似方法	(143)
第四章 结构优化程序系统设计	(145)
§ 4-1 选择优化方法的信息	(145)
1. 结构分类	(145)
2. 方法的适用性	(146)
3. 方法选择与有效信息	(148)
§ 4-2 结构分析控制信息	(150)
1. 结构分析调用信息	(150)
2. 快速重分析信息	(151)
§ 4-3 单元转换信息	(152)
§ 4-4 主程序系统结构	(154)
1. 主控制程序的模块结构	(156)
2. 主控制程序的方法流程图	(156)
3. 主控制程序流程图	(157)
§ 4-5 结构分析程序系统	(160)
1. 子程序及其功能	(161)
2. 对子程序的调用关系	(175)
3. 特点与问题	(177)
第五章 结构优化设计计算	(179)
§ 5-1 计算模型与设计变量	(180)
1. 等效模型	(180)
2. 主效变量	(181)
3. 分步计算	(182)
§ 5-2 初始方案与相对全局最优	(183)
1. 初始方案与设计经验	(183)
2. 全局最优与相对全局最优方案	(186)
3. 工程上的停机条件	(187)
§ 5-3 板壳结构的优化设计计算	(189)
1. 顶盖-支持盖的优化设计计算	(189)
2. 推力轴承支架的优化设计计算	(207)
3. 优化方法计算比较	(225)
§ 5-4 壳块结构的优化设计计算	(227)
1. 蜗壳-座环结构在打压态下的优化设计计算	(228)

2. 蜗壳-座环与水泥基础间的接触计算	(241)
3. 蜗壳-座环结构在联合受力状态下的优化设计计算	(251)
§ 5-5 转体结构的优化设计计算	(256)
1. 主轴结构的力学特点与计算模型	(257)
2. 主轴的有限元计算	(258)
3. 主轴的优化设计计算	(264)
§ 5-6 块体结构的优化设计计算	(274)
1. 转轮的力学模型	(274)
2. 转轮的约束处理	(276)
3. 转轮的单元网格划分	(279)
4. 转轮的载荷移置	(281)
5. 转轮的优化计算	(283)
§ 5-7 优化选型设计计算	(300)
1. 模型与计算	(300)
2. 近似处理	(301)
3. 优化方法	(302)
参考文献	(309)

第一章 引 论

§ 1-1 问题的提出

在广西岩滩电站水轮机组设计中,碰到顶盖-支持盖的结构尺寸与重量远远超过现有设备加工能力的问题.如若不改变尺寸、降低重量,势必要投入巨大的资金来更换加工设备.这不仅要大大地提高单机造价,而且会延误工程进度,以致造成很大的经济损失.试用优化设计计算,其结果不仅能有效地改进原有设计方案,而且重量也减轻了 36% 左右,使问题得到了圆满的解决.由此,联想到原有的设计方法及其相应的计算公式,是否适用于大型结构设计的问题.我们在哈尔滨大电机研究所的大力支持下,决定立题研究这个问题.经过近 4 年的通力合作,较全面地完成了这一课题的研究.从已有的大量工程实例计算*来看,在水轮机五大部件结构中,平均可节省原材料 22.4% 左右.由此得出结论:对大型结构应用优化设计,是改进结构设计方法,提高设计水平,保证产品质量,提高经济效益的一种有效途径.这本书就是在完成这一课题研究的基础上写出来的.尽管全书内容是针对大型水轮机的优化设计计算展开的,但基本思路、作法以及某些特定计算问题的处理技巧与经验等,对任何大型复杂结构的优化设计计算也是适用的,因而具有普遍意义.这也正是写本书的目的.

§ 1-2 结构优化设计及其现状

本书除特别说明外,结构均是指大型复杂结构;优化设计,是

* 宋天霞,周振德,杨文兵.大型水轮机优化设计程序系统研究总结报告.华中理工大学出版社,1990.

指在满足某种预定目标要求(例如,重量最轻、最经济等)下,从所有可能的设计方案中,寻求最佳方案。

1. 数学模型

方案是由若干个可变量来表述的,根据具体情况,这些可变量可以是各个构件的截面尺寸、面积、惯性矩等设计截面的几何参数,也可以是柱的高度、筋的间距、梁的长度、拱的矢高、壳的曲率和节点坐标等结构总体的几何参数,以及某种特定构件在总体结构中的选用与布局参数,还可以是材料弹性模量、混凝土标号等选用材料的参数。此外,更可以是造价、维护等费用参数。这些数量中的一部分是按照某些具体要求事先给定,在寻找最佳方案的过程(简称优化过程)中,它们始终保持不变,故称预定参数;另一部分则是要变的,故称为设计变量。

设计变量,有些是连续的,有些则是离散的,例如,钢筋截面面积、型钢的惯性矩等必须是型钢表中能够提供的规格。遇到离散设计变量,优化计算问题就要复杂得多。

能否实现某种预定目标要求,与选取的设计方案有关,换句话说,目标是设计方案的函数,即目标函数。这也说明目标函数是用来判定方案好坏的标准数。

如果把设计变量记为 $x_1, x_2, \dots, x_n$; 由设计变量确定的设计方案记为 $X = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n]^T$; 由设计方案给出的目标函数记为

$$F(X) = F(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (1-1)$$

则优化设计的数学描述(简称数学模型)为

寻求最佳方案 $X^* = [x_1^* \ x_2^* \ \dots \ x_n^*]^T$, 使目标函数取极值

$$F(X^*) \longrightarrow \min(\text{或 } \max), \quad (1-2)$$

且满足约束条件

$$g_i(x^*) \leq 0 \quad (i = 1, 2, \dots, l_1), \quad (1-3)$$

$$G_j(x^*) \leq 0 \quad (j = 1, 2, \dots, l_2). \quad (1-4)$$

在结构优化设计中,多数是将重量最轻取为目标,也有些情况

是取最经济或其它因素作为目标. 结构重量是确切可定的, 而且也常常是很重要的经济目标, 有时甚至是决定性的因素. 如果结构的造价和维护费用能够确切定量, 而且经济是工程的主要矛盾时, 则应进行最经济设计. 但作为目标函数, 应同时考虑结构重量和造价、维护等费用, 即

$$F(X) = \alpha F_w(X) + \beta F_c(X), \quad (1-5)$$

式中 $F_w(X)$ 、 $F_c(X)$ 分别为相应于方案 X 的结构重量和费用; 系数 α 、 β 随问题的不同性质而取不同的数值.

式 (1-3)、(1-4) 是结构设计中应遵守的约束条件. 这种条件, 大体上可分为两类: 第一类为保证结构正常工作的刚度、强度和稳定条件; 第二类为规范中的有关规定和构造上的合理要求.

在优化过程中, 任一满足约束条件的方案 $X = [x_1 \ x_2 \ \cdots \ x_n]^T$, 称为可行方案. 如果把 n 个设计变量 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 组成一个 n 维设计空间, 则满足式 (1-3)、(1-4) 的所有点组成的区域, 称为可行区域. 除此之外的区域, 称为非可行区域.

2. 求解方法^[1]

求解优化问题的方法很多. 目前, 已用于工程结构设计的有复合形法、最速下降法、可行方向法、模式搜索法、Powell 法、《DFP》变尺度法和改进的《DFP》变尺度法等. 然而, 真正用于大型复杂结构的优化设计计算而形成“气候”的, 只有前三种方法, 其它方法仅是由于对简单结构 (例如, 桁架、框架和杆系结构等) 计算成功而推想出的可能, 并未见到实际. 原因在于变量多、约束条件复杂, 致使不少方法在理论上可行, 而实际上困难甚大. 特别是离散型的隐式约束, 由于不易判定它是否满足方法的条件要求而无法应用. 加之, 计算冗繁、耗费巨大, 没有十分把握就不敢“轻举妄动”, 这也是许多方法难以应用于复杂结构的另一重要原因. 优化设计只有广泛应用于大型复杂结构, 才能发挥它在促进设计技术进步、提高经济效益等方面的重要作用. 要实现这一步, 就必须在离散方法 (包

括有限元法)和半离散方法(包括加权残数法)的分析基础上,开展优化方法理论和应用研究.

3. 现状与趋势^[2]

针对大型复杂结构开展优化方法理论和应用研究,在国际上受到重视. Venkayya 和 Gellatly 于 1964~1971 年间,导出了应力、位移、频率、屈曲、颤振等约束条件下的最佳准则法,紧接着, Dupper、Isakson 和 Wilkinson 等,于 1974~1977 年间,依据这个准则法研制出了基于有限元分析的大型结构优化程序,如 OPTIM、ASOP 和 FASTOP 等. 之后, Schmit 和 Fleary 将数学规划法和最佳准则法统一起来,又于 1979 年提出了对偶法与结构综合近似概念相结合的算法,并据此进一步研究出了高效率结构优化 ACCESS 程序系统. 特别是近 10 年来,在航天、航空与汽车工业,已研制出了许多更大型的优化程序系统,并用于实际. 现在,一方面正针对飞机机体,发动机工业,发动机叶片结构等项目,分别由 Wright 飞行动力实验室和 NAS-Alewis 投资,沿着非线性数学规划与最佳准则法相结合的途径,研究相应的大型结构优化程序系统. 另一方面,又集中于近似概念推广应用于存在几何非线性的复杂结构,以及外型优化、综合优化、大型敏感度分析和分解算法、多级优化等方面的研究.

在国内,根据自身的具体情况,首先注重于已有方法的应用. 在 70 年代,主要是利用满应力法对杆系、框架以及某些较简单结构等进行了一些较简单的优化计算. 到 80 年代初,在进一步扩展这方面应用研究的基础上,钱令希等研制了 DDDU 结构优化程序系统. 这是根据 Kuhu-Tucker 条件先导出迭代公式再与广义最佳性准则法相结合研制出来的. 之后,在航空、造船等系统,都针对特定结构类型(例如,机架、机壳、船架、船体等)进行了一些基于线性有限元分析的优化方法理论及其相应程序系统的研究,取得了一些成果. 但是,针对大型复杂结构进行这类的研究,则尚未见到有

关报导.这大概与其缺乏经费支持有关.

近几年来(1986~1989年),我们与哈尔滨大电机研究所合作研究了大型水轮机结构优化程序系统,并正式投入各类水轮机结构设计使用,效果很好——设计合理、平均可节省原材料22.4%左右,且计算耗费较少.这是针对大型复杂结构在线性有限元分析的基础上,采用规划法判定有效约束下,依据复合形法与最速下降法相结合研制出来的.

大型复杂结构的优化设计方法,理论及其程序实现,是当前国内外计算力学的前沿课题.从已有的研究成果来看,优化方法广泛应用于各类大型复杂结构设计所取得的技术进步和经济效益,是任何其它途径所无法比拟的.因此,西方各个工业大国,都在大型复杂线性结构广泛开展优化设计应用研究的基础上,进而把重点放在非线性结构.国内各个工业部门和基础研究,也开始注意到这个方面的研究工作.我们相信,到本世纪末,由于广泛应用优化方法而带来工程结构设计上的技术飞跃,是今后发展的必然趋势.

§ 1-3 大型复杂结构优化设计的特点

所谓大型复杂结构,就是指几何尺寸大、部件和整体的构造形状及其相应的约束条件等比较复杂,而且工况多,涉及的离散分析也比较复杂.因此,对这类结构的优化计算,必须考虑如下特点.

1. 离散分析的精度要求高

大型复杂结构的结构分析,主要是采用有限元法.在优化计算过程中,需反复调用这种分析,而且它的精度高,是保证计算成功的必要条件.换句话说,若精度较差,要么得不到合理的优化结果,要么导致计算失败而造成巨大浪费.

结构分析的精度,主要取决于单元的精度及其相应网格的布局.做到这一点,又只有依据有关理论、经验和试算来逐步“探知”.