



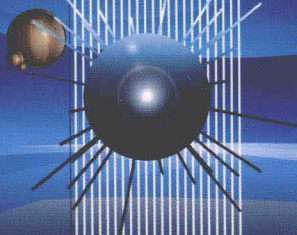
国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

工程结构 优化设计基础

Introduction to Optimum Design of Engineering Structures

程耿东 © 编著



大连理工大学出版社
Dalian University of Technology Press



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

工程结构 优化设计基础

Introduction to Optimum Design of Engineering Structures

程耿东 ©编著



大连理工大学出版社
Dalian University of Technology Press

图书在版编目(CIP)数据

工程结构优化设计基础 / 程耿东编著. —大连:
大连理工大学出版社, 2012. 8
ISBN 978-7-5611-7028-1

I. ①工… II. ①程… III. ①工程结构—结构设计
IV. ①TU318

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 139999 号

大连理工大学出版社出版

地址:大连市软件园路 80 号 邮政编码:116023

发行:0411-84708642 邮购:0411-84703636 · 传真:0411-84701466

E-mail: dutp@dutp.cn URL: http://www.dutp.cn

沈阳新华印刷厂印刷

大连理工大学出版社发行

幅面尺寸:147mm×210mm 印张:11.375 字数:255千字
2012年8月第1版 2012年8月第1次印刷

责任编辑:刘新彦 王伟 责任校对:碧海
封面设计:冀贵收

ISBN 978-7-5611-7028-1

定 价:35.00 元

本书由大连市人民政府资助出版

**The published book is sponsored
by the Dalian Municipal Government**

再版说明

在钱令希先生的帮助下,1973年我得以回到大学校园,又是在钱令希先生指导下,有幸进入结构优化的研究领域。1978~1980年,在丹麦技术大学完成了“弹性实心薄板的优化设计”博士论文,研究结构优化从此成为我的学术生涯的主要方向。1982年,应结构优化知识推广、普及及教学的需要,开始编写《工程结构优化设计基础》,并于1983年由水利电力出版社出版。

转眼之间,30年过去。30年间,结构优化理论和方法都有了迅猛的发展,研究和应用的领域大大扩展,希望了解和学习结构优化的人群也不断扩大,因此,应大连理工大学出版社之邀再版此书。再版时,我对原书作了少量修改,增加了我本人相对熟悉的一些新方法,并将原书修改为6章:结构优化设计的基本概念;准则设计法;数学规划法;线性规划和二次规划;序列近似规划法;结构优化的若干方法和技巧。但由于篇幅及这本书的目标所限,必然

挂一漏万,请读者见谅。在第6章撰写过程中,王希诚教授、李兴斯教授提出了宝贵意见。

谨以本书的再版表达我对钱令希先生的感激和敬慕之心。

于大连理工大学

2012年5月

前 言

结构优化设计是计算力学的一个分支,它致力于研究系统地和高效率地改进结构设计的方法,以达到帮助工程结构设计人员设计出既经济又可靠的工程结构的目的。

本书着重介绍工程结构优化设计的基本概念、理论和常用方法,并充分注意反映最近几年来国内外结构优化研究的新成就和新动向。全书共分 5 章:结构优化的基本概念;准则设计法;数学规划法;线性规划与二次规划;数学规划法和准则法的结合。各章均有许多例题,其中部分选材于书末参考文献。每章的最后还附有少量习题。章节的这种安排是为了较全面地向读者介绍结构优化中的两大方法:规划法和准则法。在叙述准则法时力争突出这个方法的数学基础,在介绍规划法时着重强调那些在结构优化中常用的方法,并逐步引导读者注意这两个方法的结合。在内容取舍上还注意和钱令希教授的专著《工程结构优化设计》相配合,尽

可能提供学习该专著所需的基础知识。

不仅仅在本书撰写过程中,而且在笔者近年来学习和研究计算结构力学的过程中,钱令希教授一直给予悉心的指导和热诚的鼓励。本书内容的安排参考了1979年钱令希为大连工学院力学研究所研究生开设该课程时的提纲。在修改书稿的过程中,孙焕纯副教授抽出了宝贵的时间对书稿进行了仔细的审阅,提出了许多宝贵的意见。隋允康、李兴斯同志对本书的内容亦提供了一些见解。笔者在此向钱令希教授、孙焕纯副教授、隋允康和李兴斯同志表示衷心的感谢。

于大连理工大学

1983年2月

目 录

1 结构优化设计的基本概念	1
1.1 设计变量、约束条件和目标函数	2
1.2 结构优化问题的几何表示和凸性	9
1.3 求解结构优化问题的途径	16
习 题	22
2 准则设计法	24
2.1 同步失效准则设计	24
2.2 满应力设计及其推广	32
2.2.1 满应力设计	32
2.2.2 应力比法	34
2.2.3 应力比法的若干改进	44
2.2.4 满应力法的评价	52
2.2.5 分部优化法	53
2.3 受约束最优化问题的库-塔克必要条件	56
2.3.1 一元函数的无约束优化	56
2.3.2 多元函数的无约束优化、梯度及海森矩阵	57
2.3.3 受到等式约束的多元函数的优化,拉格朗日乘法	60
2.3.4 受到不等式约束的多元函数优化	63
2.3.5 库-塔克条件的应用举例	71
2.3.6 结构优化中经常使用的库-塔克条件形式	74
2.4 受到单个位移约束的优化准则法	75
2.4.1 问题提法	75
2.4.2 用杆件断面积给出的位移表达式	76

2.4.3	单个位移约束下的最优化准则	79
2.4.4	最优化准则的物理意义	81
2.4.5	柔度最小的结构优化设计	83
2.5	基于最优准则的迭代法	85
2.5.1	静定桁架的优化设计	85
2.5.2	超静定桁架的优化设计	91
2.6	结构响应的灵敏度分析	96
2.6.1	位移对断面积的灵敏度	96
2.6.2	应力对断面积的灵敏度	99
2.6.3	结构固有频率对断面积的灵敏度	103
2.6.4	屈曲临界荷载灵敏度	104
2.6.5	结构响应灵敏度计算的有限差分法和半解析法	105
2.6.6	结构响应灵敏度的应用	107
2.7	多工况、多约束下的优化准则法	110
2.7.1	多个位移约束的准则法	110
2.7.2	包络法和最严约束法	120
2.7.3	带频率禁区的优化准则法	122
2.8	小结	127
	习题	129
3	数学规划法	132
3.1	数学规划问题的分类及解法	132
3.2	基本的下降算法、收敛速度和停止迭代准则	136
3.2.1	基本的下降算法	136
3.2.2	收敛速度	140
3.2.3	停止迭代准则	141
3.3	一维搜索	142
3.3.1	一点法, 牛顿-芮弗逊迭代法	143
3.3.2	两点格式	145
3.3.3	0.618法	147

3.4	无约束优化的单纯形法	150
3.5	无约束优化的梯度算法	157
3.5.1	最速下降法	157
3.5.2	基本的牛顿-芮弗逊算法	161
3.5.3	基本的牛顿-芮弗逊算法的缺点及补救措施	163
3.5.4	最速下降法和牛顿-芮弗逊法的推广	166
3.6	求解受约束非线性规划的原方法	170
3.6.1	梯度投影法	171
3.6.2	梯度投影法在结构优化中的应用	184
3.6.3	可行方向法	187
3.6.4	复形法	191
3.7	序列无约束优化方法	194
3.7.1	引 言	194
3.7.2	内罚函数法	196
3.7.3	外罚函数法	205
3.7.4	混合罚函数法	210
3.7.5	罚函数法与拉格朗日乘子法间的关系	212
3.7.6	小 结	216
	习 题	217
4	线性规划与二次规划	218
4.1	标准的线性规划问题提法	219
4.2	线性规划的基本性质	224
4.3	单纯形法	232
4.3.1	基底的转换	233
4.3.2	进基变量 x_p 的选择	237
4.3.3	离基变量 x_q 的选择	239
4.3.4	单纯形法的主要步骤	240
4.3.5	两相法和初始基本可行解	243
4.4	序列线性规划算法	246
4.5	二次规划	259

习 题	273
5 序列近似规划法	274
5.1 准则设计法和数学规划法的结合	275
5.2 序列近似规划法	286
5.2.1 序列凸规划	287
5.2.2 移动渐近线法	289
5.3 对偶规划	293
5.3.1 拉格朗日对偶规划	293
5.3.2 对偶问题的几何解释	296
5.3.3 线性规划的对偶规划	300
5.3.4 二次规划的对偶规划	305
5.4 序列近似规划的对偶算法与原算法	307
5.4.1 对偶算法	307
5.4.2 原算法	310
习 题	311
6 结构优化的若干方法和技巧	312
6.1 多目标优化	312
6.1.1 多目标优化问题的列式和基本概念	313
6.1.2 多目标优化问题的求解	315
6.2 凝聚函数在结构优化中的应用	320
6.3 代理模型和黑箱方法	323
6.4 启发式算法	327
6.5 提高结构优化效率的一些实际考虑	335
6.5.1 设计变量的选择和分组	335
6.5.2 约束的暂时消除	339
6.5.3 运动极限	340
6.5.4 近似重分析技术和合理的精度	341
参考文献	343
关键词索引	348

1

结构优化设计的基本概念

在生产、生活和国防中,人们需要建造各式各样的结构物,例如航天航空的空间站和大型客机,横渡重洋的巨型油轮和航空母舰,水利工程中的闸、坝、厂房,城市中的高楼大厦、桥梁和地铁等等。设计这些结构时,工程师们总是希望把它们设计得尽可能地“优”。从这个意义上看,对工程师们来说,结构优化设计并不是一个陌生的课题。可是,要做出“优化”设计,必须首先回答两个问题:一是设计“优劣”的判据;二是是否具备按判据评定结构“优劣”的工具。这就需要了解结构应该满足的性能,掌握“分析”设计性能的手段。一个实际结构物的分析常常需要复杂、冗长的计算。20世纪60年代前,由于缺乏高速的计算工具进行结构分析,也由于缺乏系统的方法指导结构设计的改进,结构优化设计是依靠人们世代累积起来的经验,以进化的方式缓慢地进行。20世纪60年代以来,电子计算机的出现,有限元方法和数学规划理论的发展,使得人们不仅有了强大的结构分析工具,而且有了一套系统的方法来改进设计和优化设计。结构优化设计这一领域就得到了迅速发展,成为计算力学的一个重要分支。随着我国经济实力的增长,自主设

计、创新设计受到国家和企业的重视，结构优化设计的理论和应用出现了迅猛发展的局面。

1.1 设计变量、约束条件和目标函数

一个结构设计的“优”和“劣”，总是以某一指标来衡量的，这个指标就是结构优化设计问题的**目标函数**，随问题不同目标函数不同。航天航空工业中的飞行器，一般地说，重量便是目标函数。如果飞行器设计超重，不仅仅消耗燃料多，运行费用高，而且会使飞行器飞不到要求的高度、速度和距离，被生产商或用户否决；土木工程中的楼房，建造成本常常比重量更重要，通常以成本为目标函数；机械工业中的许多零部件设计，常常是以应力集中系数为目标函数，因为降低了应力集中，结构的抗疲劳和断裂能力就可提高，结构的使用寿命也就得到延长。还有大量的实际问题，我们同时要实现数个目标优化，例如，为了保护乘员、车辆及道路行人的公共安全，对汽车设计的要求不仅是成本低，产生的污染少，降低单位公里的油耗，还希望具有高的耐撞性。这类问题称为**多目标优化**。

为了使结构设计得尽可能优，工程师们总是掌握一些设计参数，通过适当地调整它们来改进设计。例如，设计飞机的机翼和机身时，蒙皮的厚度和横隔框的尺寸均可以由设计人员在一定范围内调整；再如，设计拱坝时，拱圈的厚度、拱坝的上下游面曲线形状，也属于可调整之列。这一类设计人员希望调整的参数称为**设计变量**。前面提到的目标函数就是以设计变量为变量的函数。与设计变量相对，一个结构的设计中，有很多参数不允许修改。例如，高层建筑的层高、层数和使用面积往往是由业主决定；飞行器将采用材料的许用应力、弹性模量等都是给定的。这些量，称为**指定参数**。在结构设计中，除了设计变量和指定参数之外，还有一类性态变量，

例如结构在给定荷载作用下的应力、位移,结构的自振频率、失稳临界荷载,高层建筑在风荷载下的层间位移等,这类变量的特点是设计人员不能直接控制、修正它们,只有通过修改设计变量才能改变它们。这类变量也是设计变量的函数,但是这种函数关系往往是隐式的。

工程师虽然对设计变量可以进行修改和调整,但是这种修改和调整是受到各种各样限制的。例如,为了减轻机翼重量而降低蒙皮厚度时,不允许蒙皮因为应力过高而发生破坏;再如,减少桁架式吊车梁中的杆件断面积时,不应该使吊车梁刚度降低过多而导致挠度太大。这些对设计变量的限制统称为约束条件。

这样,一个工程结构优化设计问题的解决包括了以下四个步骤:首先,要明确所要解决的工程结构设计问题的目标、设计变量和约束,提出优化问题;其次,为了用数学方法求解优化问题,我们要给出目标、约束的数学列式或计算方法,建立优化问题的数学模型;然后,根据所需解决的工程优化问题的特点,采用合适的方法,寻求设计变量的最优值,使之既满足约束条件又使目标函数最优;最后,在得到优化结果后,我们要更全面地考察优化结果的正确性和可行性。下面举例进一步说明设计变量、约束条件和目标函数等基本概念,并结合简单的结构设计问题对它们进行讨论。

例 1^[1] 考虑如图 1-1 所示的由两根钢管在 F 点铰支组成的两杆平面桁架。在 F 点,结构受到垂直荷载 $2P$ 。约定管壁厚度固定为 t ,半跨长度固定为 B 。设计的要求是选择钢管的平均直径 D 和桁架的高度 H 以达到重量最小。要求这些杆子既不发生塑性变形又不失稳。给定外荷载 $P = 15\,000\text{ kgf}$, $B = 75\text{ cm}$, $t = 0.25\text{ cm}$,材料的弹性模量 $E = 2.1 \times 10^6\text{ kg/cm}^2$,密度 $\rho = 0.0078\text{ kg/cm}^3$,屈服应力 $\bar{\sigma} = 7\,030\text{ kg/cm}^2$ 。由于制造的原因,对于 D 和 H 有最大值和最小值的限制,它们是 $\underline{D} = 3.0\text{ cm}$, $\bar{D} = 6.5\text{ cm}$, $\underline{H} = 40\text{ cm}$, \bar{H}

= 75 cm(以后我们用字母下带横杠表示该字母所代表的量的下界,字母上带横杠表示相应量的上界)。

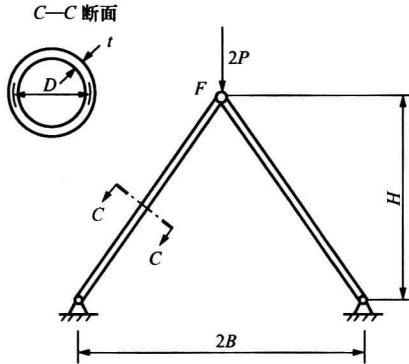


图 1-1

该问题中的指定参数为 $B, t, E, \rho, \bar{\sigma}, \underline{D}, \bar{D}, \underline{H}$ 和 \bar{H} , 设计变量为 D 和 H 。该问题的目标函数是结构的重量, 设计受到的约束条件为: 圆管杆件中的压应力应该小于或等于压杆稳定的欧拉临界应力 σ_{cr} ; 圆管杆件中的压应力应小于或等于材料的屈服应力 $\bar{\sigma}$; 管子的平均直径 D 和桁架的高度 H 受到上、下界的限制。利用设计变量和指定参数, 目标函数圆管的重量可表示成

$$W = 2\rho AL = 2\pi\rho Dt(B^2 + H^2)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

其中, L 为杆长, $L = (B^2 + H^2)^{\frac{1}{2}}$; 杆件面积 $A \approx \pi Dt$ 。

圆管杆件中的压应力为

$$\frac{P(B^2 + H^2)^{\frac{1}{2}}}{\pi t D H}$$

两端铰支压杆失稳时的欧拉临界应力 σ_{cr} 为

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 EJ}{L^2 A} = \frac{\pi^2 ED^2}{8(B^2 + H^2)}$$

式中, $J \approx \frac{\pi D^3 t}{8}$ 为圆管断面的惯性矩。

归纳起来,问题可以提成:

求最优的 D 和 H ,使目标函数最小,即

$$\min W = 2\pi\rho Dt(B^2 + H^2)^{\frac{1}{2}}$$

s. t. (约束条件 subject to 的缩写)

$$\frac{P(B^2 + H^2)^{\frac{1}{2}}}{\pi tDH} \leq \frac{\pi^2 ED^2}{8(B^2 + H^2)} \quad (2)$$

$$\frac{P(B^2 + H^2)^{\frac{1}{2}}}{\pi tDH} \leq \bar{\sigma} \quad (3)$$

$$\underline{D} \leq D \leq \bar{D} \quad (4)$$

$$\underline{H} \leq H \leq \bar{H} \quad (5)$$

将前面给出的指定参数代入这些公式中,可以把问题写得更具体。

例 2 在 $x = \pm l$ 处简支的梁(图 1-2) 受到分布荷载 $P(x)$ 的作用而发生弯曲,挠度记为 $y(x)$ 。梁的弹性模量 E ,密度 ρ ,梁的长度 $2l$ 和体积 V 均是给定的。要求确定最优的梁的断面积分布 $A(x)$,使梁中点的挠度尽可能地小。

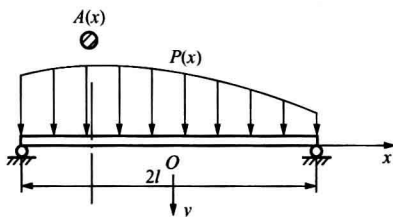


图 1-2

由问题的提法可看出,该问题的设计变量是断面积 $A(x)$,目标函数是梁中点的挠度,约束条件为:一是制作梁的材料体积应为 V ;二是梁中点的挠度应当和荷载 $P(x)$,梁的断面积 $A(x)$ 及梁的材料性质通过材料力学中建立的物理关系联系起来。下面我们写出这个问题的数学形式。

取如图 1-2 所示的坐标轴 Ox ,梁的挠度 $y(x)$ 向下为正,中点