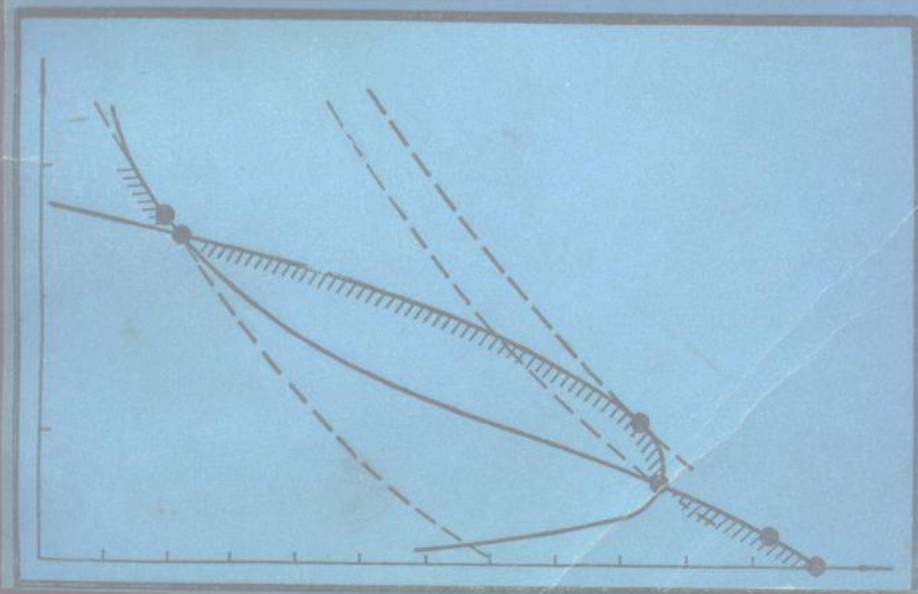


高等学校教学用书

结构优化设计

王光远 董明耀 编著



高等教育出版社

高等学校教学用书

结构优化设计

王光远 编著
董明耀

高等教育出版社

内 容 提 要

本书系统地讲授了结构优化设计的基本理论和方法。主要内容有：结构优化设计的数学模型和局部优化条件、力学准则法、直接搜索法、解析搜索法、特种规划法和模糊优化法，以及抗震结构的优化设计。本书也反映国内一些研究成果。全书共有十二章，前七章可以作为工程力学、土建类等各专业本科高年级学生选修课教材，全书又可作为有关专业研究生教材。第五章至第十二章具有独立性，可按各专业需要选学有关内容。附录中给出了阅读本书所需的大学本科以外的知识。本书还可供有关专业的教师、工程技术人员等自学和参考。

本书责任编辑 余美茵

2P36/11

高等学校教学用书

结构优化设计

王光远 董明耀 编著

高等教育出版社出版

新华书店上海发行所发行

吴江伟业印刷厂印装

开本 850×1168 1/32 印张 12.75 字数 306,000

1987年10月第1版 1987年10月第1次印刷

印数 00001—4,250

ISBN 7-04-000046-6/TU·1

书号 15010·0894 定价 2.60 元

前 言

从广泛的意义来说,所谓“优化”就是从完成某一任务的所有可能方案中按某种标准找出最好的方案。对各种问题只要存在不同的解决办法,就可进行优化。因而,优化技术必将在自然科学、工程技术以及社会活动等方面得到日益广泛的重视和应用。

“结构优化设计”就是在满足各种规范或某些特定要求的条件下使结构的某种广义性能指标(如重量、造价、刚度或频率等)为最佳。也就是在所有可用的方案中,按某种标准找出最优的方案。这里既然是按照某种标准来进行评价,因而所得“最优方案”就具有相对的意义。在这种情况下,力学在工程设计中所起的作用便从过去的“分析和校核”发展为“综合和优选”。这是一个重要的变化。

作为一个设计者或力学工作者来说,在设计一个结构时,很自然会产生上述优化的愿望。所以从本世纪初开始就不断有人对此作过一些努力,但都收效不大。这一方面是由于受到数学和力学发展水平的限制,而更主要的是没有快速计算工具以满足庞大计算工作量的需要。因此,结构优化设计这门学科只有在电子计算机在结构设计中得到较广泛的应用(六十年代)以后才迅速发展起来。

目前,结构优化设计这门学科虽然仍在继续发展,但已初具规模,并在结构设计实践中得到了一些应用,收到很好的效果。可是这种应用还远未达到与这门学科当前发展水平相适应的广泛程度。其原因主要有三点:一是这种技术尚未被广大工程技术人员所掌握(因而需要大力普及),二是还存在一些习惯上和思想上的阻

力,三是目前的优化方法有时还不能完全适应设计工作的要求。

有些设计人员的最大顾虑就是怕这种设计降低结构的安全度。他们认为,结构满应力设计是要充分利用材料的潜力,所以结构就缺少强度的储备。这是一种误解。其实满应力设计是要使材料的强度尽可能得到同等程度的应用,它与目前的常规设计一样,都满足各种规范所规定的一切条件,因而都具有规范所规定的安全度。实际上过去大家已经习惯了的静定结构的常规设计和等强度梁等都是满应力设计,而它们却从未引起设计者的怀疑和顾虑。这表明上述顾虑实际上是个习惯问题。一个结构如果部分部件强度不足,其余部分强度储备再大,结构安全度也是不高的。“千里大堤,溃于一穴”是最大的浪费,也是最大的不安全。

另一种思想阻力,就是认为结构所受荷载(特别是地震、风等)本身就是很粗糙的估计,材料品种和施工条件也不那么齐全,计算得那么细有什么用。实际上这是三个不同范畴的问题,不应混为一谈。荷载公式的改进、施工条件的改善和合理的设计方法三方面虽有一定联系,但基本上应该分别进行研究,互相促进,决不应互相迁就。例如,不管影响荷载的因素如何复杂,在设计时总是按规范计算出荷载的“精确值”,并据以进行设计。显然,在此前提下,进行设计时采用优选的办法较为合理。

此外,结构的优化设计不仅可以在保证强度和刚度的条件下降低材料消耗和造价,而且在需要时还可以提高结构的功能,使设计工作取得主动和自由。

但是我们也不应夸大结构优化设计的作用。整个结构设计工作是工程技术人员和领导人员集体的创造性劳动。在确定设计目标、了解结构所应具备的功能、为结构选型、确定结构计算简图及其计算理论等工作中,都需要上述人员运用他们的智慧、洞察力和经验来分析问题、综合问题和解决问题。这是计算机难以代替

的。简言之,就是在设计思想和结构分析的数学模型确定以后,才能利用结构优化设计的方法和电子计算机对结构方案进行优选,以达到一定的设计目标。因此,尽管结构优化设计是结构设计方法的重大发展,但它本质上只是一个工具而已,它不可能解决力学理论和设计思想所未解决的问题。

由于客观原因,我国在结构优化的研究方面起步稍晚,但也取得了一定的成绩。本书在系统地介绍结构优化设计理论和方法的同时,也介绍了国内的部分研究成果。

本书为高等学校工程力学、土建类等各专业的高年级学生和研究生所编。其中前七章可作为高年级本科学生选修课教材。约需讲授 40 学时。全书又可作为研究生教材,约需 70 学时。

本书前两章为基本理论,以后各章均为具体优化设计方法,其中除第三、四两章关系密切外,其余各章都有相当的独立性,可按各专业需要选学有关内容。

本书有一定数量的例题和习题,它们多数只有二、三个基本未知数。这是为了使读者能通过手算掌握方法,理解概念,并从而为编制电算程序和计算大型问题打好基础。

清华大学江爱川同志参加了本书前七章的第三、第四稿的讨论和修改。天津商学院李炳威、河海大学杨仲侯、浙江大学杨德铨同志审阅了本书初稿,最后由杨仲侯同志审阅了前七章的修改稿,他们对本书都提出了宝贵意见,特此致谢。

本书内容虽曾多次在校内外讲授,但由于编者水平所限,难免有不妥之处,希望读者指正。

王光远

目 录

第一章 结构优化设计的基本概念

§1.1 结构优化设计的意义和任务	1
§1.2 设计向量、可用域和目标函数	2
§1.3 结构优化设计的数学模型	7
§1.4 结构优化设计方法分类	21
§1.5 设计变量数目的缩减	24

第二章 局部最优性条件

§2.1 问题的性质	27
§2.2 N 维空间点的移动和函数值的变化	28
§2.3 Lagrange 乘子法	34
§2.4 Kuhn-Tucker 局优性条件	37
§2.5 凸规划问题	47

第三章 力学准则法

§3.1 力学准则法的基本概念	54
§3.2 满约束准则	55
§3.3 满应力设计	57
§3.4 应力比法	65
§3.5 分部优化法	71
§3.6 应变能密度准则	79

第四章 齿行法

§4.1 引言	84
§4.2 射线步	85
§4.3 只有应力约束的齿行法	87
§4.4 带有位移约束的齿行法	91
§4.5 平面框架优化设计的齿行法	101

第五章 直接搜索法

§5.1 引言	109
§5.2 一维搜索的 0.618 法	109
§5.3 直接试验法	114
§5.4 复形法	115
§5.5 解线性规划的单纯形法	123

第六章 解析规划法

§6.1 引言	150
§6.2 函数向量及其性质	151
§6.3 无约束规划的梯度法(最速下降法)	154
§6.4 梯度投影法	156
§6.5 感度向量(梯度)分析	168
§6.6 线性约束的梯度投影法	171

第七章 序列逼近法

§7.1 引言	185
§7.2 序列线性规划法	185
§7.3 序列无约束优化法	190

第八章 几何规划

§8.1 引言	199
§8.2 正定几何规划——对偶化	199
§8.3 广义几何规划——对偶化	217
§8.4 几何规划的迭代解法	219

第九章 动态规划

§9.1 引言	235
§9.2 动态规划方法的基本思路	235
§9.3 动态规划的基本概念和基本方程	239
§9.4 填表法和标号法	246

第十章 桁架设计的两相优化法

§10.1 基本概念	260
------------------	-----

§10.2	位移可用域	263
§10.3	应力符号约束	265
§10.4	最优位移状态(性态相优化)	267
§10.5	结构最轻设计(结构相优化)	270
§10.6	两相优化法	271
§10.7	最小最大总应变能准则及其在结构选型中的应用	278
第十一章 抗震结构的优化设计		
§11.1	引言	283
§11.2	抗震结构的计算方法	284
§11.3	抗震结构的满约束设计	293
§11.4	复形法用于抗震结构优化设计	303
§11.5	结构动力敏感度分析	311
§11.6	梯度投影法用于抗震结构的优化设计	316
§11.7	基于可靠性分析的优化方法的基本概念	319
第十二章 结构模糊优化设计		
§12.1	结构设计中的模糊因素	328
§12.2	普通结构的模糊优化设计	332
§12.3	地震作用下结构的模糊反应	345
§12.4	抗震结构的模糊优化设计	349
§12.5	双目标模糊优化设计法	356
结束语		361
附录 I 空间的分解及正交投影		362
附录 II 桁架计算公式		368
附录 III 有关模糊数学的准备知识		372
§III.1	模糊子集和隶属函数的概念	372
§III.2	隶属函数的确定	376
§III.3	水平截集	378
§III.4	扩展原理	380
§III.5	模糊综合评判	381

附录 IV 单位换算表	391
参考文献	392
常用符号表	396

第一章 结构优化设计的基本概念

§1.1 结构优化设计的意义和任务

工程设计过程是一个综合性的、创造性的集体劳动过程。广义来说,它包括整个工程的可行性分析、总体布置、结构设计、施工方案等环节。所有这些环节都存在对方案的优化问题。

结构设计一开始,就应该首先考虑和分析被设计的结构所应具备的功能。例如设计一座厂房就必须了解该厂房内的工艺流程和需要的空间布置,然后根据结构的功能要求和客观条件决定结构类型、结构拓扑(结构总外型、各部分间的连接型式和采用那些类型的构件等)和所用材料。这个阶段虽然可以作方案比较,存在择优问题,但目前主要还是要靠工程人员的经验和创造性思考来妥善解决。

在决定结构类型、总拓扑和材料后,即可利用优化技术求得材料最省、造价最低或某种性能最好的设计方案。这部分基本上是一个力学和数学问题,也就是目前结构优化设计所研究的主要内容。

求出优化设计方案后,如果必要,还可以根据工程经验对方案作必要的校核和修改,然后即可依次进行细部设计,求出最优施工方案并投入施工。

由上述可知,结构优化设计只是整个工程设计中的一个特定的局部问题。它根据一定的力学计算方法和规范要求进行运算以寻求最优解。所以,结构优化设计的发展不仅是结构优化技术本

身的改进,而且还依赖于力学和设计理论的不断提高。

§1.2 设计向量、可用域和目标函数

为了建立结构优化设计的数学模型, 本节首先介绍几个必要的定义。

(一) 设计变量

任何一个结构的设计方案, 总是可以用若干个数来代表。在这些数中有些是根据工程要求事先给定而不能改变的, 例如桥的跨度, 烟囱高度等。这些在设计中保持不变的数称为预定参数。另一些数则随设计方案的变更而改变, 例如桥梁各构件的尺寸, 烟囱各段截面的几何参数等。这些代表设计方案, 而在设计中可调整变化的基本参数称为设计变量。如果结构的布局(结构类型、各结点的位置和构件的外形等)和各构件所用材料已经确定, 那末设计变量就是各个构件截面的几何参数, 例如杆件截面面积、惯性矩、板的厚度等。当布局可调或部分可调时, 设计变量中将包括结点坐标或某些结点间的距离等参数。如果各构件所用材料也可有所选择时, 各构件所用材料的有关参数也将成为设计变量。

(二) 设计向量和设计空间

如果决定整个结构设计方案的设计变量共有 N 个 $[x_1, x_2, \dots, x_N]$, 则它们的集合所组成的列阵

$$\bar{x} = [x_1, x_2, \dots, x_N]^T \quad (1.1)$$

称为设计向量。 N 为设计变量的数目。

本书中符号上标横线或波纹线的表明该量为向量(列阵)或矩阵, 例如以 $\bar{A}$ 和 $\tilde{A}$ 分别表明 A 是向量和矩阵。但在零向量及有时在梯度向量上不标横线。向量或矩阵的上角标 T 表明转置。

结构设计变量有一个明显的特点, 就是除结点坐标可能为负值外(亦可调整坐标原点使其均为正值)它们全为非负量, 即

$$x_i \geq 0 \quad (i=1, 2, \dots, N) \quad (1.2)$$

亦可记为:

$$\bar{x} \geq 0 \quad (1.3)$$

上式可以作为所有结构优化设计都必须满足的一个条件。

N 维向量 $\bar{x}$ 可以用 N 维空间的一个点来代表, 记为 $\bar{x} \in R^N$ 。由于 $\bar{x}$ 的各元素非负, 所以这个点必然落在 N 维空间的“第一象限”。这样, 代表所有可能设计方案(不管能否满足设计要求)的点构成 N 维空间 R^N 的一个子域, 即 R^N 的一部分。称此为这个结构的设计空间。它的每一个点代表一个可能的设计方案, 称为设计点。

当 $N=2$ 时, 设计空间就是平面的第一象限, 可以很容易地用图解法来解题。这时物理概念清楚, 形象醒目, 所以本书常用二维问题作为代表, 用图示的方法说明一些概念。例如图 1.1a 中的坐标 $x_1^{(0)}$ 和 $x_2^{(0)}$ 就代表设计点 $\bar{x}^{(0)}$ 的二个设计变量, 也就是设计向量 $\bar{x}^{(0)}$ 的二个分量。下标 1, 2 为分量序号, 上标(0)为设计点序号。

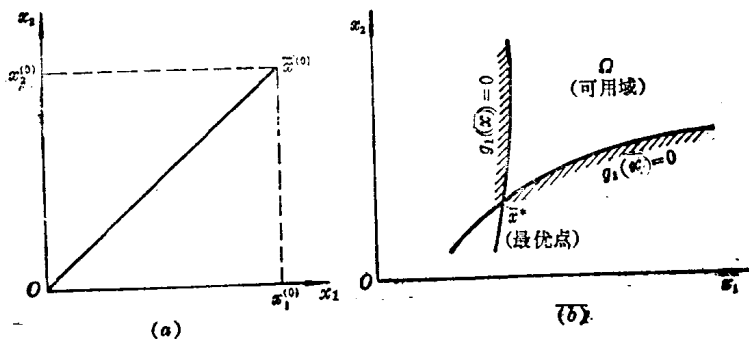


图 1.1

(三) 约束

很明显, 可用的设计方案必须满足设计要求, 也就是说并非设

计空间的每一个点都代表一个可用的设计方案。一个可用的设计方案必须满足一系列条件,这些条件称为优化设计的约束,它们按物理意义可以分为以下几类:

(1) 结构静力分析中的平衡方程、变形协调方程、物理条件,动力分析中的运动方程等,称为性态方程。

(2) 结构及其构件的强度(包括稳定性)条件和刚度条件等,分别称为应力约束和位移约束。

(3) 根据规范或材料规格所规定的构件截面的最大尺寸和最小尺寸、屋盖的最小坡度、壳体的最大高度等,称为几何约束。

(4) 由式(1.3)所表示的所有设计变量为非负的要求。

在以上的四种约束中,(1)(2)类是对结构性态(即结构反应,如应力、位移等)的要求,可称为性态约束。(3)(4)类是对结构或构件尺寸的限制,可称为尺寸约束。

结构的反应和构件的尺寸都随设计变量的改变而变化。因此,它们是设计变量的函数,称为约束函数。在数学上,约束就是限制这些函数的取值范围,从而构成一些约束方程式。

从约束函数的特点来看,尺寸约束一般可以直接用设计变量表示,是设计变量的显函数。而性态约束中的结构反应却需要根据设计向量算出,因而是设计变量的隐函数,而且一般是比较复杂的非线性函数。

从约束方程的形式来看,性态方程表现为等式,故称为等式约束;其他三类条件都表现为不等式,故称为不等式约束。总之,约束方程可分为:

等式约束

$$f_k(\bar{x}) = 0 \quad (k=1, 2, \dots, m) \quad (1.4)$$

不等式约束

$$g_j(\bar{x}) \leq 0 \quad (j=1, 2, \dots, n) \quad (1.5)$$

其中 m 、 n 分别为等式约束、不等式约束的数目。等式约束就是计算结构反应时所必须利用的那些方程，不等式约束主要是各种设计规范所规定的那些限制。

满足方程 $f(\bar{x})=C$ (C 为常数) 的点的集合, 构成 N 维空间中一个 $N-1$ 维的超曲面(当 $f(\bar{x})$ 是 $\bar{x}$ 的线性函数时, 就形成超平面), 这样的曲面称为该函数值为 C 的等值面。 C 取不同的数, 可得到该函数的一族等值面。约束方程 $g_i(\bar{x})=0$ 在设计空间形成的零等值面称为该约束的约束面。对于不等式约束 $g_i(\bar{x})\leq 0$, 约束面及其一侧的所有设计点都满足这个不等式约束, 而另一侧则相反。对于等式约束 $f_k(\bar{x})=0$, 只有约束面上的设计点满足约束方程, 约束面外的任何设计点都不满足这个约束条件。这就是式 (1.4), (1.5) 的几何意义。

若某一个设计点 $\bar{x}$ 落在第 j 个不等式约束的约束面上, 这意味着设计方案 $\bar{x}$ 使第 j 不等式约束达到临界状态或满约束状态, 例如某杆应力或某结点位移达到其允许最大值。在某点达到临界状态的约束称为该点的临界约束。

(四) 可用域

在一个优化设计问题中, 全部约束的约束面联合起来把设计空间分成二个区域, 即可用域和不可用域。可用域内任何一个设计点都满足所有约束条件, 而不可用域内则相反。也就是说, 只有可用域中的点才代表可用的结构设计方案。图 1.1(b) 为一个二维问题的可用域。可用域也称为“可行域”, 为了避免和“可行方向角锥”相混淆, 本书取前者。

本书以 Ω 代表可用域, 在表明可用域的图形中, 规定在可用域边界非可用一侧画上斜线, 如图 1.1b 所示。

(五) 工况

在进行结构设计时, 往往需要考虑该结构使用期间所可能遇

到的几种荷载情况(类似于所需考虑的几种荷载组合)。在设计中认为这些荷载情况分别发生,互不影响。在结构优化设计中称每种荷载情况为一种工况。显然在建立性态约束方程时必须考虑所有工况。

(六) 目标函数(评价函数)

至此,问题即演变为在所有可用方案中找出最优方案,也就是在可用域 Ω 中找出最优点 $\bar{x}^*$ (上角标 * 表示最优点)。

在评比设计方案的优劣时,必须有一个评比的标准。那就是在满足所有约束的条件下,要求最优方案能使结构的某种属性(约定的广义性能指标)为最佳。这个目标可以是结构总重量最小,或总造价最小,或承载能力最大,或自振周期最大,等等。这个约定的广义性能指标自然是设计向量 $\bar{x}$ 的函数,因而称为目标函数或评价函数,以 $W(\bar{x})$ 表示。

例如,对薄板和杆件所组成的结构,其总重量可表示为:

$$W(\bar{x}) = \sum_{i=1}^N \rho_i L_i A_i = \sum_{i=1}^N c_i x_i \quad (1.6)$$

式中 $c_i = \rho_i L_i$, $x_i = A_i$, 而 ρ_i 为构件 i 所用材料的容重, L_i 为杆件的长度或板件的面积, A_i 为杆件的截面面积或板件的厚度。

在一般的造价函数中应该包括材料费、加工费、运输费等。如果进一步考虑经济性,还应考虑将来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,因为它代表优化的总方向和目标。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。例如一般情况下对飞行器要求重量最轻,土建工程要求造价最低,大型天线要求变形

误差最小,等等。这样,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,它的“最优”是有条件的和相对的。

在设计空间中目标函数值相等的各点构成的超曲面称为目标函数等值面。其方程为 $W(\bar{x})=C$ 。在搜索最优点时考虑这些等值面有时会带来方便,例如,最轻设计的目标函数(结构总重量)是设计变量的线性函数,所以其等值面都是超平面,且由于所有系数 c_i 均为正值,因此设计点愈向“右上方”移动,其目标函数值愈大。这样,若图 1.1b 所示 Ω 为某结构最轻设计的可用域,很显然可用域最靠左下方的点 $\bar{x}^*$ 即为最优点。

§ 1.3 结构优化设计的数学模型

有了上节所述概念之后,即可建立结构优化设计的数学模型。但在不同情况下和采用不同的计算方法时,数学模型也有所不同。为了得到比较形象的概念,我们以图 1.2 所示三杆铰接桁架的最

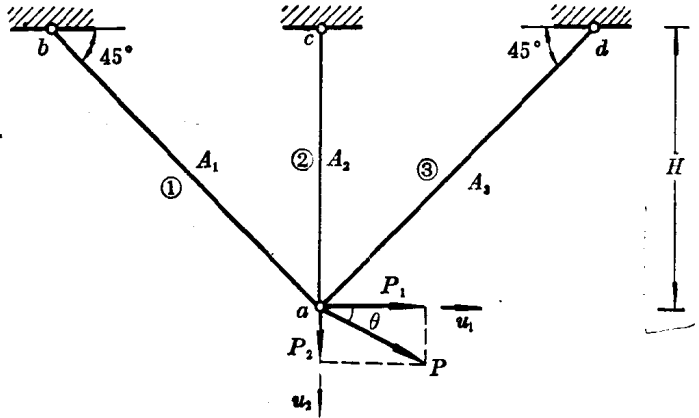


图 1.2

轻设计为例加以说明。已知各结点位置,三杆材料相同,其弹性模量为 E , 容重为 ρ , 允许应力上、下限分别为 σ^+ 和 σ^- 并且 $\sigma^+ =$