江爱川 编著

结构优化设计

JIEGOU YOUHUA SHEJI

清华大学出版社

结构优化设计

江爱川 编著

清华大学出版社

内 容 简 介

本书主要讨论钢和钢筋混凝土梁、柱、桁架、连续梁和刚架的优化设计，并对其所用的优化算法作了较系统的论述。

本书可供高等工科院校土建、水利、航空、机械和造船等结构专业的师生，研究生以及工程技术人员参考。

结 构 优 化 设 计

江爱川　编著

☆

清华大学出版社出版

（北京清华园）

北京丰华印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行　各地新华书店经售

☆

开本：787×1092　1/16　印张：21.25　字数：544千字

1986年12月第1版　　1986年12月第1次印刷

印数：00001～10000

统一书号：15235·250　　定价：3.50元

前　言

结构优化设计任务就是从各种可能的结构设计方案中寻求"最优"方案。所谓最优是相对一定条件而言。优化含义很广，既包括要达到的目标，又包括达到目标所采用的方法，因此说，结构优化设计与其它学科有着紧密联系，带有综合分析性质。

结构优化设计在工程中应用日益增多，研究工作在各个领域迅速展开，越来越多的高等院校开始设置结构优化设计课程，它必将得到迅速发展。

本书是根据编者为土建结构专业研究生讲授结构优化设计写的讲义改编的，可作为有关结构专业教材参考书。设想读者通过阅读本书，可对各种常用结构的优化设计和各种优化算法都能有较为完整的印象。再者，鉴于读者对结构分析有一定基础，而对优化算法相对说较生疏，所以全书内容采取如下安排：前六章以结构类型划分为主，讨论钢和钢筋混凝土单杆、桁架、连续梁和刚架的优化设计，同时讨论数学规划解析法，线性规划以及力学准则法；后几章则以优化算法为主、讨论非线性规划、动态规划、几何规划，并相应讨论它们在结构优化设计中的应用；最后一章讨论结构动力优化。

在内容叙述上，为了便于读者较快掌握基本概念和方法，尽量做到"看得见、摸得着、用得上"。看得见，是指多利用直观解释，图解说明来阐述基本概念；摸得着，是指大部分章节都有实例，而且尽量采用手算（利用计算器）演示计算方法；用得上，是指所讨论的内容尽量与现行设计规范结合。这是编者的一点主观愿望。

龙驭球同志审阅了本书，在此致谢。

由于水平有限，错误与缺点难免，望读者批评指正。

目　　录

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

第一章 基 本 概 念

这一章讨论结构优化设计的基本概念。通过解剖一题算例，讨论结构优化设计的任务、基本思路和方法，并解释一些术语。

§1-1 概 述

结构优化设计的概念很早已有，早期所谓"等强度梁"的理论就是这种概念的反映。桁架、刚架、拱壳等结构的应用，也都是根据这个概念发展而来的。但是长期以来由于种种条件限制，结构设计只能依赖实践经验的积累来确定设计方案。根据对结构所要求的功能，按照经验预先确定结构的几何尺寸和选用材料，然后进行结构分析，分析得出的应力和位移与容许值比较，确定其是否可行。这种设计方法，由于工作量关系，设计方案充其量也只能比较二三个。设计好坏取决于设计者的经验。

结构优化设计任务，说通俗点就是选择较好的设计方案，并进行设计。从广义说，它应包括选择结构形式，外形尺寸，采用材料，截面型式和尺寸以及支座设置等等。当然，考虑因素越多，就结构本身来说，经济效果越好。本书只重点讨论当结构形式，外形尺寸或材料性能已定的情况下的优化设计。

就结构分析来说，基本理论早已建立，并得到实践的验证。困难在于只要结构的荷载条件、几何尺寸或材料性质稍微复杂一些，就会使设计工作量非常庞大以至无法进行。当用电子计算机代替人工计算以后，情况就改观了。人们不但可以直接应用结构力学的基本理论计算，而且有可能多算几个方案进行比较，这就给寻找更优的方案提供了可能性。这里说的是可能性，意思是说多算几个方案并不保证一定能得到更优的方案。因为也许原来的方案已经最好，但我们不知道；也许它不是最好，但多算几个并没有比它好。因此要获得优化效果，不但要算的快，而且还要算得巧。

数学上优化算法的发展，给结构优化设计提供了有效的工具，它的作用就是算得巧。利用优化算法，使我们只要通过有限次的计算，就能使结构设计方案逐渐改善，趋于较为合理的方案。

因此，可以说结构分析，电子计算机的应用和优化算法是进行结构优化设计的三块基石。相应说，要进行结构优化设计，必须具有这三方面的知识。

结构优化设计虽然从本世纪五十年代末期以来发展很快，但毕竟还是不太成熟。至今没有一个通用的方法，只对有些结构在某种条件下，有了一些初步的优化方法。

§1-2 一个简单例子

下面先举一个简单例子，进一步概述结构优化设计的基本概念。

研究图1-1所示的平面桁架，杆件是钢管，铰接于 A、B、C 三点，在 C 点上承受 $2P$ 竖直向下集中荷载，跨度为$2l$，管壁厚 t。试选择管径 d 和桁架高度 h 使得在满足强度与

稳定的条件下，桁架重量最轻。已知 $t=0.5\text{cm}$，弹性模量 $E=2.1\times10^6\text{kg/cm}^2$，钢材容重 $\rho=7.85\times10^{-3}\text{kg/cm}^3$，容许应力$[\sigma]=1600\text{kg/cm}^2$，$P=30\times10^3\text{kg}$，$2l=600\text{cm}$，工艺限制$600\geqslant h\geqslant200\text{cm}$。

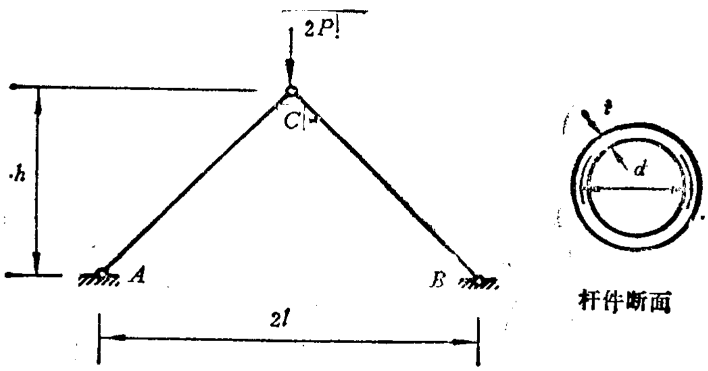

图 1-1

根据要求，这里管径 d 和桁架高度 h 为未知量。显然由于 $2l$ 是定值，杆件轴力 $N_{AC}=N_{BC}$ 随着 h 增大而减小，但杆长增大。从强度条件看，杆长轴力小，管径可以减小，即有杆长管径小，杆短管径大，但究竟什么情况下最轻！从稳定条件看，杆长轴力小，但临界荷载也减小。所以这里就有一个选择多大的 d 和 h，使既满足强度条件、稳定条件，重量又最轻。

根据设计概念，需要算出每个设计方案杆件的应力 σ，可行的设计必须满足

$$\sigma\leqslant[\sigma]$$

$$\sigma\leqslant\sigma_e$$

σ_e 为压杆临界应力。

经过结构分析，不难求得

$$\sigma=\frac{P}{\pi t}\frac{(l^2+h^2)^{\frac{1}{2}}}{hd}$$

$$\sigma_e=\frac{\pi^2E}{8}\frac{(d^2+t^2)}{l^2+h^2}$$

因此这个问题的数学表达式为

求变量 h，d，使桁架重量

$$W=2\rho\pi dt(l^2+h^2)^{\frac{1}{2}} \tag{1-1a}$$

最小，且应满足

强度要求 $$\frac{P}{\pi t}\frac{(l^2+h^2)^{\frac{1}{2}}}{dh}\leqslant[\sigma] \tag{b}$$

稳定要求 $$\frac{P}{\pi t}\frac{(l^2+h^2)^{\frac{1}{2}}}{dh}\leqslant\frac{\pi^2E}{8}\frac{(d^2+t^2)}{l^2+h^2} \tag{c}$$

工艺要求 $$600\geqslant h\geqslant200 \tag{d}$$

将已知数据代入式(1-1)，可写成

求 h, d 使

$$W = 0.0247d(300^2 + h^2)^{\frac{1}{2}} \tag{1-2a}$$

最小，且满足

$$191 \times (300^2 + h^2)^{\frac{1}{2}} \leqslant 16dh \tag{b}$$

$$191 \times \ (300^2 + h^2) \leqslant 259 \times 10^2 dh \frac{d^3 + 0.25}{300^2 + h^2} \tag{c}$$

$$600 \geqslant h \geqslant 200 \tag{d}$$

式(1-2)是求带有不等式约束的条件极值问题，也就是属于数学规划问题。下面分节初步讨论解式(1-2)的几种优化算法。

§1-3 图 解 法

实际工程中，很少应用图解法。但为了更好了解优化算法，常常借助图解加深认识。以式（1-2）为例，以 d 为横坐标，h 为纵坐标，通过适当计算把式（1-2）绘成图1-2。图中重量等值线是按式（1-2a）使 W 为定值时的 h 与 d 的函数曲线；强度约束界线为式（1-2_b）取等式时的图线；稳定约束界线为式（1-2_c）取等式时的图线，它考虑了$t \ll d$，取

$$d = \left\{73.75 \times \frac{[9 + (0.01h)^2]^{1.5}}{0.01h}\right\}^{\frac{1}{3}}$$

组成的。

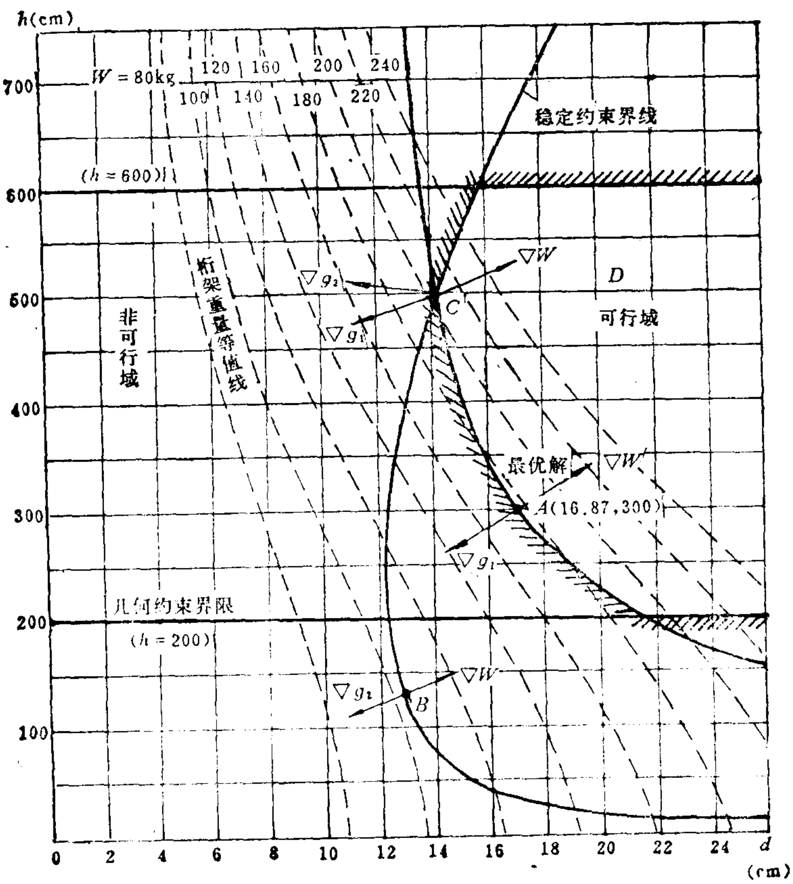

图 1-2

从图1-2可以看出，在可行设计中，A 点的 W 值最小，因此式（1-2）的解点为 A 点，即

$$d = 16.87\text{cm}, \qquad h = 300\text{cm}, \qquad W = 176.9\text{kg}$$

图1-2中的另一些术语和符号，后面再解释。

§1-4 网格搜索法

网格搜索法是数学规划中一种原始方法。它就是把问题在一定范围内划分成网点，每一点都是一个设计，其中有可行的，也有不可行的。可行点之中又有设计的优劣之分。网点搜索法就是按一定规律进行搜索以找出最优设计。

下面结合式（1-2）进行讨论。表1-1是网格搜索表，计算利用下面公式：

工作应力
$$\sigma = \frac{19100}{dh} \times (300^2 + h^2)^{\frac{1}{2}}$$
（表内方格中第一行数）

临界应力
$$\sigma_e = 259 \times 10^4 \times \frac{d^2}{300^2 + h^2}$$
（表内方格中第二行数）

桁架重量
$$W = 0.0247d(300^2 + h^2)^{\frac{1}{2}}$$
（表内方格中第三行数）

对表1-1说明几点：

（1）变量 h，d 在一定范围内等分形成网格，网格大小视精度而定。分得越细，精度越高。

（2）本例是这样搜索：先固定一个变量，如 $h = 200\text{cm}$，然后 d 由小到大验算，由于变量范围已考虑 h，d 的工艺尺寸限制，所以每点只需验算强度和稳定条件是否满足。这里先验算强度，如果它不满足，稳定就不验算，因它已经是不可行的设计点。这样一直算到强度得到满足的点，如 $h = 200\text{cm}$，$d = 22\text{cm}$的点。这时工作应力 $\sigma = 1565 < 1600\text{kg/cm}^2$，在这一行$d > 22\text{cm}$的点，都满足强度条件。这时就要验算这点稳定条件是否满足，如果满足，那么这一点是可行设计点，而且在这一行里，它是最轻的。计算该点重量。接着按同样办法搜索第二行，第三行，……。表中 $h = 500\text{cm}$，$d = 14\text{cm}$的点，虽然$\sigma = 1591 < 1600\text{kg/cm}^2$，满足强度条件，但$\sigma > 1493 = \sigma_e$，即不满足稳定条件，必须往后再搜索。表中箭头所示的方向就是搜索顺序。虚线为可行设计与不可行设计的分界线，右边为可行设计。

（3）在可行设计中，挑选重量最轻的点，即为最优解。本例为

$$h = 350\text{cm} \qquad d = 16\text{cm}$$
$$W = 182.2\text{kg}$$

图解结果是
$$h = 300\text{cm} \qquad d = 16.88\text{cm}$$
$$W = 176.9\text{kg}$$

两者有差别，主要原因是最优解一般不在网点上。

如果问题是单值的，那么上述搜索可以简化。在上述搜索过程中，当 W 从大变小又变

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

表 1-1

h \ d	10	12	14	16	18	20	22	24
200	3443 →	2869 →	2459 →	3152 →	1912 →	1721 →	1565 ↓ 9642 ↓ 195.9	—σ —σ_e —$\bar{W}$
250	2984 →	2486 →	2131 →	1865 →	1657 →	1491 ↓ 7400 ↓ 192.9		
300	2701 →	2251 →	1929 →	1688 →	1500 ↓ 4662 ↓ 188.6			
350	2515 →	2096 →	1197 →	1572 ↓ 3120 ↓ 182.2				
400	2388 →	1989 →	1705 →	1492 ↓ 2652 ↓ 197.6				
450	2295 →	1912 →	1640 →	1434 ↓ 2267 ↓ 213.7				
500	2227 →	1856 →	1591 ↓ 1493 →	1950 ↓ 230				
550	2176 →	1813 →	1554 ↓ 1291 →	1689 ↓ 247.6				
600	2135 →	1780 →	1525 ↓ 1128 →	1473				

大时，即可停止计算。如本例算到$h=400$cm，$d=16$cm即可停止。取$h=350$cm，$d=16$cm，$W=182.2$kg。

网格搜索法的优点是程序简单，易于实现，但费机时。

§ 1-5 同步失效设计

同步失效设计简称SMD。它以"结构所有可能破坏形态同时发生"作为结构优化设计的准则。以式（1-2）的问题来说，结构破坏形态有两种：强度破坏和丧失稳定。同步失效设计法认为它们同时发生时，设计是最优的。对式（1-2），同步失效设计算法是把式（1-2）

和式（1-2。）取等式联立求解 h，d。即联立求解

$$191\times(300^2+h^2)^{\frac{1}{2}}-16dh=0$$

$$191\times(300^2+h^2)^{\frac{1}{2}}-259\times10^2dh\times\frac{d^2+0.25}{300^2+h^2}=0$$

得 $h=478\mathrm{cm}$ $d=14\mathrm{cm}$ $W=195\mathrm{kg}$

此解相应图1-2中 C 点，它是强度约束界线和稳定约束界线的交点。因为同步失效设计没有涉及到目标函数，所以一般它的解不是最优解。从图1-2也可看出，C 点不是式（1-2）的最优解。

同步失效设计对于简单的结构优化设计问题还是一种很好的方法。它把求带有不等式约束条件极值问题化成求解一组代数方程。采用此法有时会遇到困难。比如解联立方程直接用解析法有困难，又如当变量数目多于方程式的数目时，无法求解。

同步失效设计的解不一定是问题的最优解这个事实告诉我们，结构优化不一定发生在所有材料都充分发挥作用的情况。

§ 1-6 等式约束消元法

许多具有简单数学形式的优化问题，可以采用解析法求解。等式约束消元法是一种解析法。它把优化问题归结为解一阶导数为零的问题。下面结合式（1-2）讨论此法的应用。讨论时暂不考虑式（1-2d）的限制。

式（1-2）整理后可改写为

求变量 h、d，使

$$W=2.47\times10^{-2}d(300^2+h^2)^{\frac{1}{2}} \tag{A}$$

最小，且满足

$$d\geqslant11.93\times(300^2+h^2)^{\frac{1}{2}}/h \tag{B}$$

$$d\geqslant0.195\times(300^2+h^2)^{\frac{1}{2}}/h^{\frac{1}{3}} \tag{C}$$

一般说，结构优化设计的最优解位于某约束界线上，图1-2中最优解点 A 就位于强度约束界线上。因此，像上式的情况，最优解时，不是式(B)取等式，就是式（C）取等式或式（B）、（C）同时取等式。在这里等式约束消元法就是把式（B）取等式代入式（A）消去 d 后再对式（A）求极值，求出 h 后代回式（B）求 d。然后判断此解是否满足其它不等式约束。同样办法用于式（C）取等式。上述具体运算如下：

（1）式（B）取等式，有

$$W=\frac{26100}{h}+0.29h$$

$$\frac{dW}{dh}=0,\qquad -\frac{26100}{h^2}+0.29=0$$

求得 $h=300\mathrm{cm}$ $d=16.87\mathrm{cm}$

$$W=176.9\mathrm{kg}$$

此解相应于图1-2中的A点。把这里 h，d 值代入式（C），式（C）成立，说明它是可行解。

（2）式（C）取等式，有

$$W=433h^{\frac{1}{3}}+4.82\times10^{-3}h^{\frac{5}{3}}$$

$$\frac{dW}{dh}=0 \qquad -144h^{-\frac{4}{3}}+0.08h^{-\frac{2}{3}}=0$$

求得 $h=134\text{cm} \qquad d=12.5\text{cm}$

$W=101\text{kg}$

此解相应于图1-2中 B 点。把这里 h、d 值代入式(B)，式(B)不成立，因此它是不可行解。

比较（1）、（2），最优解是（1）的解。

对于简单的优化问题，尤其当能够判断最优解落在那些约束界线上时，采用等式约束消元法是很有效的。

当直接消去变量不可能时，可采用拉格朗日乘子法。

§ 1-7 结构优化设计的数学模型

从前几节讨论看出结构优化设计的基本思路和方法，可归纳成两方面的问题：

1. 从实际问题中，利用结构分析理论，把问题用数学表达式表示出来，即建立数学模型，如式（1-2）。

2. 选择优化算法求解。上面我们就用了四种方法解式（1-2）。这也说明同一问题，可采用不同的优化算法，需要加以选择。

应当指出这两方面是互有关联的。如何建立数学模型与所要选的优化算法有关。采用不同的优化算法，要建立的数学模型可能就不同。

这一节讨论有关数学模型的一些问题。

前面已述及建立数学模型与所选择的优化算法有关，不仅如此，数学模型还与问题如何提出，要求的精度以及所采用的结构分析方法等有密切关系。如何建立数学模型，在结构优化设计中是非常重要的。它不仅涉及到解的精度，计算工作量大小，甚至关系到能否得到解答。

当采用数学规划法求解时，结构优化设计的数学模型一般表示为：

求设计变量x_i，使目标函数

$$W=W(x_i) \tag{1-3a}$$

最小，且满足约束条件

$$g_j(x_i)\leqslant 0 \qquad i=1,\ 2,\ \cdots,\ n \tag{b}$$

$$x_i\geqslant 0 \qquad j=1,\ 2,\ \cdots,\ m \tag{c}$$

这里 n 为设计变量数目，m 为约束条件数目，W 为以重量为目标的目标函数符号，g 为约束函数符号。

为了简单起见，式(1-3)可简写为

$$\left.\begin{array}{ll}\text{求}\quad \mathbf{X} & \min\quad W(\mathbf{X})\\ & s.t.\quad \mathbf{G}(\mathbf{X})\leqslant 0\\ & \mathbf{X}\geqslant 0\end{array}\right\} \tag{1-4}$$

其中 $\mathbf{X}$ 是由 x_1，x_2，…，x_n 组成的向量，min表示极小化，$s.t.$表示满足约束条件，$\mathbf{G}(\mathbf{X})$是由约束函数$g_1(\mathbf{X})$，$g_2(\mathbf{X})$，……，$g_m(\mathbf{X})$组成的函数向量。

这里约定对 $\mathbf{X}$ 未注明元素时，其元素数目均为n，对$\mathbf{G}$则均为m。

在往后讨论中，很大一部分问题就是要建立式(1-3)，并解式(1-3)。在这里就其中一

些术语作些讨论。

一、设计变量

在设计过程中要选优的量称为设计变量。它包括结构的形状参数(如柱距、层高)，杆件截面尺寸，使用材料等。一般说，设计变量取得越多，效果越好，但工作量越大。在实际工作中，总是把设计变量取得尽量地少，把那些对优化效果不太显著的参数作为予先给定的量。

设计变量的选择当然不能离开客观条件的许可。拿§1-2的例子来说，理论上其中的d、t、h、l均可作为设计变量。那样的话，桁架重量还可减轻。但如果由于场地和材料规格限制，l只能取300cm，t只能取0.5cm，这样l与t就不再是设计变量了。

设计变量有连续变化和离散跳跃两种。离散的设计变量如型钢规格，它们截面积选取就不是连续的，只能在一定型号上选取。数学上处理离散变量比较困难，所以通常遇到离散变量时先按连续变量处理，最后再换成适当的离散量。

设计变量的范围往往有一定的限制，如把结构层高作为设计变量，则根据使用要求，不能是任意的。

在结构优化设计中，设计变量总不会小于零，即对设计变量有非负要求，如式(1-4)中的$\mathbf{X}\geqslant 0$。

二、目标函数

目标函数是设计变量的函数，是优化设计追求的目标。目前通常是使结构最轻作为优化设计的目标。因为结构轻不但影响本身的经济效益，它还会带来其它方面的好处。也有以结构造价直接作为结构优化设计的目标，但由于影响造价的因素太多，难于确切定量，所以以造价作目标函数目前用的较少。

三、约束条件

在结构设计中应遵守的条件都属于约束条件。如保证结构正常工作的强度，刚度和稳定的要求，又如对结构自振频率范围加以限制，还有规范中有关规定及构造上的要求等等。在结构优化设计中常见的约束条件有：

(a)几何约束　即对设计变量的几何尺寸加以限制。诸如工艺上对尺寸的限制、材料规格限制以及构造上的要求等。这类约束是显约束，可表示成方程式。

(b)应力约束　如强度要求工作应力不能超过容许应力；稳定要求工作应力不能超过临界应力。对于复杂结构，工作应力很难用一个数学表达式表示出来。因此这类约束一般是隐约束。

(c)位移约束　即结构的某些部位的位移不能超过容许位移，它一般也是隐约束。

(d)频率约束　一些结构为了避免与激振频率耦合，必须对结构自振频率加以限制。如对飞机结构设计，要求固有频率高于某一值，以避免与推进器控制系统发生耦合，又如大型天线结构为防止风激振动，也规定了最低容许频率。

一般说，结构优化设计的目标函数比较容易确定。而约束函数居多是设计变量的非线性函数，确定比较困难。结构优化设计的核心问题是如何建立约束方程，它也是结构优化设计的困难所在。

四、设计空间、可行域

从图形上理解结构优化设计的数学模型比较形象和直观。图1-2是式(1-2)的图解，在那里，只有两个设计变量，以设计变量为坐标构成了二维空间，通常称为设计空间。在设计空间中每一个点都代表一个设计方案。设计空间是设计方案的集合。设计空间中每一点，也可看成二维空间的一个向量。目标函数W与设计变量构成了三维空间。W为某一定值的点在二维设计空间的投影是一条等值线。式(1-2)的约束方程取等号时在图上表示出一条曲线简称界线。根据约束不等式，这些曲线把整个二维空间划分成可行域和不可行域。本书中把曲线画阴影线的一侧作为不可行域。可行域上每一点都是一个可行的设计方案。非可行域上的设计方案是不可用的。

用设计空间这个概念有时对问题理解更为形象，往后我们经常利用它作解释。

当设计变量超过三个时，不能采用图解了。但上述概念也可应用。即有：

以n个设计变量为坐标，构成n维设计超空间。在n维超空间一个点，代表一个设计方案，该点的数学式为

$$\mathbf{X}=(x_1\ \ x_2\ \ \cdots\ \ x_n)^T$$

看成n维超空间的一个向量。目标函数W与n个设计变量构成$n+1$维超空间，W为某一定值点在n维设计超空间上的投影形成一个等值超曲面。每一个不等式约束取等号时，在n维设计空间上表示出一个超曲面，简称界面。这些界面将n维设计超空间划分两大区域：可行域和非可行域。在可行域中任意设计点满足全部约束条件，称可行解，但不一定是最优解。

五、结构优化设计的特点

目前结构优化设计主要讨论布局已定、材料已定后的参数选择问题。即使讨论布局进行调优，也只是选择有限种布局，每种布局分别得出最优参数，再进行比较。在这种情况下，结构优化设计有如下几个特点。

(*a*) 无论是以重量还是以造价作为目标函数，目标函数式中的各项系数均为正值。目标函数值恒大于零，且多为取极小化的问题。

(*b*) 设计变量总是大于或等于零或全部大于零。

(*c*) 在数学模型中可以避免等式约束条件，它通常由结构分析来代替。因此约束条件多为不等式，约束函数一般是连续可导和非线性的。

(*d*) 最优解一定位于可行域的边界上，而不在可行域的内部。

(*e*) 设计变量多，约束条件多，约束函数又多为隐函数。

了解这些特点，对如何考虑结构优化设计是有帮助的。

§1-8 优化算法概述

结构优化设计的另一个重要方面是选择优化算法。目前采用的优化算法很多，但大体上可归为两大类：准则法和规划法。

准则法是对于规定的设计条件，建立某种优化准则，以此准则作为依据来确定设计程序。§1-5的同步失效设计，就是一种准则法。它以“结构所有可能破坏形态同时发生”作为优化准则。准则法一般并没有追求结构最轻或造价最低，从这个角度说，它的解一般不是最优解。

准则法由于计算简单，优化效果也不错，因此常被采用。下面将要讨论的满应力设计就是准则法的典型代表。准则法的应用有它的局限性，因为它很不适应多种因素的约束条件。也就是说在有多种约束条件（比如既有应力约束又有位移约束）的问题，要建立什么样的优化准则就很困难。

规划法的本质是在某些约束条件下，求目标函数的极值问题。简单说，就是求条件极值问题。由于结构问题的复杂性，通常采用数值解法，即用某种规定的步骤，一步一步接近所追求的目标。对于一些简单问题，也可采用解析法求解。

规划法所用的优化算法又可分为：

（1） 图解法。

（2） 解析法，前面所用的等式约束消元法就是一种解析法。

（3） 搜索法。上述的网格搜索法就是其中一种。

数学规划在结构优化设计中常见的有

线性规划 目标函数和约束函数均为设计变量的线性函数时称为线性规划。线性规划解法比较成熟。单纯形法是线性规划最常用和最有效的解法，可以说是解线性规划问题的通用方法。

非线性规划 当目标函数或约束函数有一个或多个为设计变量的非线性函数时称为非线性规划。结构优化设计的数学模型多为非线性规划。式（1-2）就是非线性规划。非线性规划目前还没有适于各种问题的一般算法，各个方法都有自己特定的使用范围。

动态规划 动态规划是把问题分成若干阶段，利用递推关系式，一个接一个作出最优决策，达到使整个过程取得最优结果。

几何规划 一般数学规划是先求设计变量的最优值，再求目标函数最优值，而几何规划是先在目标函数的各个项寻求分配总目标值的最优方案，再定设计变量最优值。

下面列出书中要讨论的优化算法

- 结构优化算法
  - 准则法
    - 能量准则法
    - 同步失效设计，SMD
    - 满应力设计
    - 满位移设计
  - 规划法
    - 图解法
    - 解析法
      - 等式约束消元法
      - 拉格朗日乘子法
      - Kuhn-Tucker 条件应用
      - 几何规划
    - 搜索法
      - 线性规划——单纯形法
      - 非线性规划
        - 序列线性规划，SLP
        - 可行方向法
        - 序列无约束极小化法，SUMT
        - 直接搜索法
      - 动态规划
    - 解析法和搜索法联合应用
  - 准则法和规划法联合应用

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com