

JIXIEYOUHUASHEJI

陈秀宁 主编

# 机械优化设计



浙江大学出版社

!122  
C600

# 机械优化设计

---

陈秀宁 主编



浙江大学出版社

D253/06  
**内容提要**

本书从机械优化的基本概念出发,系统地阐述机械优化的基本理论及其常用优化方法的原理、迭代过程和算法框图。通过一些实例介绍应用优化方法进行机械优化的过程。书末附有习题和常用的优化设计程序,供读者进行作业练习和上机实践。全书编写力求深入浅出,着眼于基本概念和实际应用。

本书用作高等院校机械类、近机类专业的教材和从事机械设计及其他工程设计的技术人员的参考书。

## 机械优化设计

陈秀宁 主编

责任编辑 徐宝澍

\*

浙江大学出版社出版

(杭州玉古路20号 邮政编码310027)

(E-mail: zupress@public 1. hz. zj. cn)

浙江大学出版社电脑排版中心排版

浙江省煤田地质局制图印刷厂印刷

浙江省新华书店发行

\*

850mm×1168mm 32开 8.5印张 212千字

1991年9月第1版 1999年4月第7次印刷

印数:22001—25000

ISBN 7-308-00825-8/TH·029 定价:9.00元

# 前 言

机械优化设计是 60 年代迅速发展起来的一种新的设计方法。它应用近代数学规划论和电子计算机,能使一项设计在一定的技术和物质条件下寻求一个技术经济指标最佳的设计方案。它使传统的机械设计方法产生重大的变革,促进现代机械设计理论和方法的发展,获得日益显著的技术和经济效益。

本书总结了多年使用编者所写《机械优化设计基础》教材的实践经验,并吸收近年来国内外发表的一些著、译和文献资料成果,进行较大幅度地充实、提高和更新。注意突出基本知识、基本理论及基本计算方法,力求深入浅出、着眼于基本概念和实际应用。

本书共分十章:第一章阐述机械优化设计的基本概念及其意义;第二章阐述建立优化设计的数学模型;第三章阐述优化设计的若干理论基础;第四、第五、第六章介绍机械优化设计常用优化设计方法的原理、迭代过程及算法框图;第七、第八章分别介绍多目标函数和离散变量的优化设计方法;第九章进一步阐述有关优化设计的数学模型及其求解中的几个问题;第十章介绍机械优化设计若干应用实例。书末附有习题和常用优化方法的参考程序,供读者进行作业和上机实践。通过本课程学习,读者应树立优化设计的思想,掌握优化设计的基本原理和基本方法,获得解决机械优化设计问题的初步能力。

全书由陈秀宁主编,具体分工如下:陈秀宁——第一、二、三、四、五、六章;朱聘和——第七、八章和附录一;张为鄂——第九章,第十章的前三节和附录二;陈文华——第十章的后两

节。

陈祥荣副教授为本书审稿,提出了许多宝贵意见和建议,谨致衷心的感谢。胡家珍先生为本书第一到第六章精心绘图和润色书稿,志记谢忱。

限于编者水平,书中错误和不妥之处深望读者给予批评指正。

编 者

1989年12月于杭州

# 目 录

<b>第一章 引论</b> .....	1
<b>第二章 机械优化设计的基本要素及数学模型</b> .....	7
§ 2-1 设计变量.....	7
§ 2-2 约束条件 .....	10
§ 2-3 目标函数 .....	12
§ 2-4 最优化问题的数学模型 .....	13
<b>第三章 优化设计问题的若干理论基础</b> .....	16
§ 3-1 优化设计问题的几何意义 .....	16
一、目标函数的等值面(线).....	16
二、约束最优解和无约束最优解.....	17
三、局部最优解和全域最优解.....	19
§ 3-2 无约束目标函数的极值点存在条件 .....	21
一、函数的极值与极值点.....	21
二、极值点存在的条件.....	22
§ 3-3 函数的凸性 .....	28
一、凸集与非凸集.....	29
二、凸函数的定义.....	30
三、凸函数的基本性质.....	31
四、凸函数的判定.....	31
五、函数的凸性与局部极值及全域最优值之间的关系.....	32
§ 3-4 约束极值点存在条件 .....	32
§ 3-5 最优化设计的数值计算迭代方法 .....	37
一、迭代法的基本思想及其格式.....	39
二、迭代计算的终止准则.....	40

<b>第四章 一维搜索的最优化方法</b> .....	43
§ 4-1 概述 .....	43
§ 4-2 初始搜索区间的确定 .....	45
§ 4-3 黄金分割法 .....	50
一、消去法的基本原理 .....	50
二、“0.618”的由来 .....	52
三、迭代过程及算法框图 .....	53
§ 4-4 二次插值法 .....	56
一、基本原理 .....	56
二、迭代过程及算法框图 .....	59
<b>第五章 多变量无约束优化方法</b> .....	64
§ 5-1 概述 .....	64
§ 5-2 变量轮换法 .....	65
一、变量轮换法的原理与计算方法 .....	65
二、迭代过程及算法框图 .....	67
三、效能特点 .....	69
§ 5-3 原始共轭方向法 .....	72
一、共轭方向的基本概念 .....	72
二、共轭方向的原始构成 .....	77
三、迭代过程及算法框图 .....	79
§ 5-4 鲍威尔法 .....	85
一、基本原理 .....	85
二、迭代过程及算法框图 .....	87
§ 5-5 梯度法 .....	94
一、基本原理 .....	94
二、迭代过程及算法框图 .....	95
三、效能特点 .....	98
§ 5-6 牛顿法 .....	99

一、基本原理 .....	100
二、迭代过程及算法框图 .....	103
三、效能特点 .....	105
§ 5-7 变尺度法 .....	106
一、变尺度法的基本思想 .....	106
二、构造变尺度矩阵 $A^{(k)}$ 的基本要求 .....	107
三、DFP 法变尺度矩阵递推公式 .....	109
四、DFP 法迭代过程及算法框图 .....	111
五、DFP 法的效能特点 .....	116
六、BFGS 变尺度法 .....	117
<b>第六章 约束最优化方法</b> .....	<b>119</b>
§ 6-1 概述 .....	119
§ 6-2 约束随机方向搜索法 .....	119
一、基本原理 .....	120
二、初始点的选择 .....	121
三、随机搜索方向的产生 .....	123
四、迭代过程及算法框图 .....	124
§ 6-3 复合形法 .....	125
一、基本原理 .....	125
二、初始复合形的产生 .....	129
三、迭代过程及算法框图 .....	130
§ 6-4 惩罚函数法 .....	136
一、基本原理 .....	136
二、外点惩罚函数法 .....	139
三、内点惩罚函数法 .....	146
四、混合型惩罚函数法 .....	155
<b>第七章 多目标函数的优化设计方法</b> .....	<b>160</b>
§ 7-1 概述 .....	160



§ 7-2	统一目标函数法	161
一、	线性加权组合法	162
二、	目标规划法	164
三、	功效系数法	164
四、	乘除法	166
§ 7-3	主要目标法	166
§ 7-4	协调曲线法	168
<b>第八章</b>	<b>离散变量的优化设计方法</b>	<b>170</b>
§ 8-1	离散变量优化的若干基本概念	170
一、	离散设计空间和离散值域	170
二、	非均匀离散变量和连续变量的均匀离散化处理	172
三、	离散最优解	174
§ 8-2	凑整解法与网格法	176
一、	凑整解法	176
二、	网格法	178
§ 8-3	离散复合形法	178
一、	初始离散复合形的产生	179
二、	约束条件的处理	180
三、	离散一维搜索	181
四、	离散复合形算法的终止准则	182
五、	重构复合形	183
六、	离散复合形法的迭代过程及算法框图	183
<b>第九章</b>	<b>有关优化设计的数学模型及其求解中的</b>	
	<b>几个问题</b>	<b>186</b>
§ 9-1	设计变量的选取	186
§ 9-2	目标函数的建立	187
§ 9-3	约束条件的确定	187
§ 9-4	数学模型的尺度变换	188

一、设计变量的尺度变换 .....	189
二、目标函数的尺度变换 .....	190
三、约束条件的尺度变换 .....	190
§ 9-5 数据表和线图的处理 .....	191
§ 9-6 最优化方法的选择 .....	193
§ 9-7 计算结果的分析与处理 .....	195
<b>第十章 最优化方法在机械设计中的应用 .....</b>	<b>197</b>
§ 10-1 概述 .....	197
§ 10-2 轮式车辆前轮转向梯形四杆机构的 优化设计 .....	199
§ 10-3 最小体积二级圆柱齿轮减速器的 优化设计 .....	204
§ 10-4 套筒滚子链传动的优化设计 .....	209
§ 10-5 盘式制动器的优化设计 .....	214
<b>附录一 习题 .....</b>	<b>221</b>
<b>附录二 常用优化方法参考程序 .....</b>	<b>227</b>
<b>主要参考文献 .....</b>	<b>259</b>

# 第一章 引 论

机械优化设计是将机械工程设计问题转化为最优化问题,然后选择适当的最优化方法,利用电子计算机从满足要求的可行设计方案中自动寻找实现预期目标的最优设计方案。这里我们将先介绍最优化问题的提出,转而进一步阐述机械优化设计的意义。

无论做任何一件工作,人们总希望在一切可能的方案中选择一个最好的方案,这就是最优化问题。它是人们在长期生产实践和理论研究中一直不断探索的一个课题。现举两个简单的最优化实例来引出和说明优化设计问题。

引例 1-1 如图 1-1 所示,有一块边长为 6m 的正方形铝板,四角截去相等的边长为  $x$  的方块并折转,造一个无盖的箱子,问如何截法( $x$  取何值)才能获得最大容积的箱子?

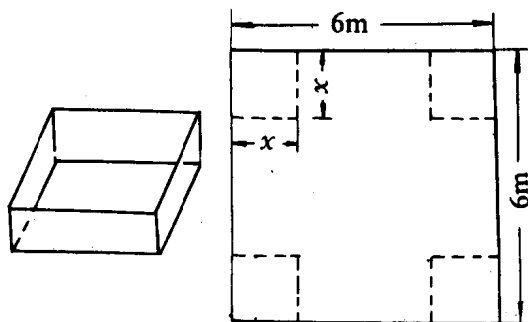


图 1-1

请注意优化设计目标:箱子容积最大。

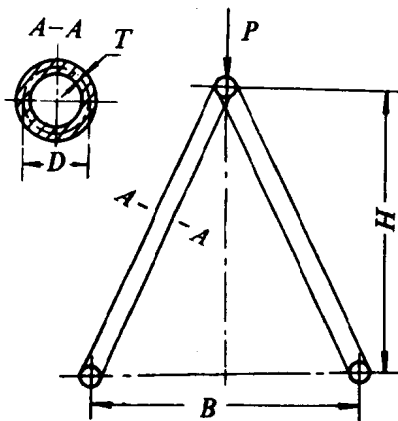


图 1-2

这个简单的最优化问题可把箱子的容积  $V$  表成变量参数  $x$  的函数  $V = x(6 - 2x)^2$ , 令其一阶导数为零 (即  $\frac{dV}{dx} = 0$ ), 求得极大点  $x = 1$ 、函数极大值  $V_{\max} = 16$ , 从而获得四角截去边长 1m 的正方形使折转的箱子容积最大 (16m<sup>3</sup>) 的最优方案。

引例 1-2 如图 1-2 所示, 在对称人字架顶端作用一个  $P = 294300\text{N}$  的

静载荷, 人字架跨度  $B = 1520\text{mm}$ , 人字架杆件为壁厚  $T = 2.5\text{mm}$  的空心圆管, 材料的弹性模量  $E = 2.119 \times 10^5 \text{N/mm}^2$ , 许用压应力  $\sigma_r = 690\text{N/mm}^2$ 。设计要求满足强度条件和稳定性条件, 在 20 ~ 140mm 范围内确定圆管平均直径  $D$ , 200 ~ 1200mm 范围内确定人字架高度  $H$ , 使人字架用料最省。

我们对这个最优化问题先作基本的分析。由图 1-2 和给定的参数可得人字架总体积为

$$V = 2\pi DT \sqrt{(B/2)^2 + H^2} = 15.708D \sqrt{577600 + H^2} \text{mm}^3$$

由静力平衡和材料力学有关公式可得:

圆管截面上的压应力

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{(P/2) \sqrt{(B/2)^2 + H^2}}{\pi DTH} \\ &= 18735.68 \frac{\sqrt{577600 + H^2}}{DH} \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

压杆稳定临界应力为

$$\sigma_c = \frac{\pi^2 E (D^2 + T^2)}{8[(B/2)^2 + H^2]} = \frac{2.614 \times 10^5 (D^2 + 6.25)}{577600 + H^2} \text{ N/mm}^2$$

设计要求满足的强度条件、稳定性条件以及结构尺寸条件可分别具体化为：

- 1) 圆管中压应力  $\sigma$  不超过许用压应力  $\sigma_r$ ，即

$$690 - 18735.68 \frac{\sqrt{577600 + H^2}}{DH} \geq 0$$

- 2) 圆管中压应力  $\sigma$  不超过压杆稳定临界应力  $\sigma_c$ ，即

$$\frac{2.614 \times 10^5 (D^2 + 6.25)}{577600 + H^2} - 18735.68 \frac{\sqrt{577600 + H^2}}{PH} \geq 0$$

- 3) 圆管平均直径  $D$  和人字架高度  $H$  不超过给定的范围，即

$$20\text{mm} \leq D \leq 140\text{mm}$$

$$200\text{mm} \leq H \leq 1200\text{mm}$$

请注意优化设计目标：满足上述条件下人字架用料最省（亦即体积  $V$  最小）。

现采用如图 1-3 所示图解分析方法求解上述最优化问题。

以变量参数  $D$  和  $H$  分别作为横坐标与纵坐标，图上每一个点（一组  $D, H$  值）相应代表一个设计方案。按上述限制条件作出曲线  $g_1(D, H) = 0$  和  $g_2(D, H) = 0$  分别代表强度和稳定性约束曲线， $g_3(D, H) = 0$  和  $g_4(D, H) = 0$  表示变量参数  $D$  的边界约束曲线， $g_5(D, H) = 0$  和  $g_6(D, H) = 0$  表示变量参数  $H$  的边界约束曲线。这些约束曲线所包围的区域（在标有阴影线里侧）即为设计方案的可行域。可行域内任一点（包括全部边界上的点）均满足所有约束条件，称为可行点。任一可行点都代表满足设计要求的可行方案。由人字架总体积  $V$  的计算公式表明  $V$  为  $D, H$  的函数  $V = f(D, H)$ ，给定一系列函数确定值  $V_1, V_2, V_3, \dots$ （图中  $V_1 = 327694\text{mm}^3$ ， $V_2 = 545812\text{mm}^3$ ， $V_3 = 767993\text{mm}^3, \dots$ ）作出一系列相应的体积函

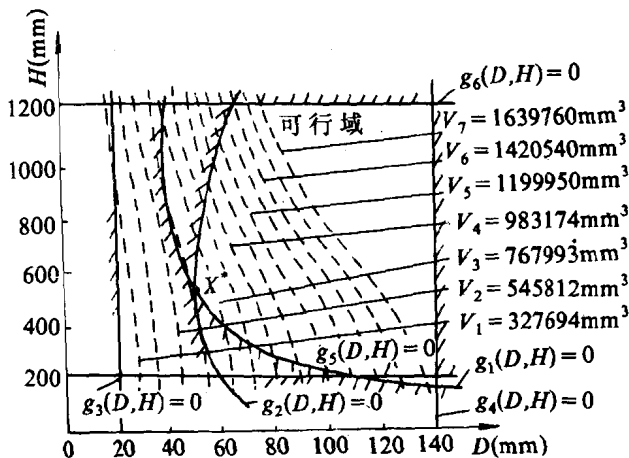


图 1-3

数等值线,这一系列体积函数等值线可反映该人字架体积变化规律。优化设计的目的就是在可行域中寻找人字架用料最省(即  $V$  最小)的一个可行设计点,现直观地由图进行分析,可知这一点为强度约束线  $g_1(D,H)=0$  和稳定性约束线  $g_2(D,H)=0$  的交点  $X^*$ 。图解可得  $X^*$  点相应的  $D=47.7\text{mm}$ ,  $H=513.1\text{mm}$ ,使人字架用料最省(体积  $V_{\min}=694711.5\text{mm}^3$ ),这就是所求的最优方案。

从这两个最优化问题引例中可以得到下述概念:引例 1-1 中变量参数  $x$ ,引例 1-2 中变量参数  $D$ 、 $H$  在设计时给定不同的数值,可得不同的方案,最优化设计就是要找出某一个  $x$  值,某一组  $D$ 、 $H$  值在满足一定的限制条件(即约束条件)下,分别达到所追求的箱子容积最大(极大)和人字架用料最省(极小)的目标。至于引例 1-1 以数学分析为工具,采用导数求函数极值寻优只能用于变量参数很少、求极值的函数和约束条件都极其简单的情况;引例 1-2 用图解分析法寻优虽然直观、清晰,但求解过程十分繁琐,且若具

有三个或三个以上的变量参数,采用图解分析方法就很困难或不能实现。这两种方法对上述二例虽然都能分别获得最优设计方案,但其适用的范围却是极其狭窄的。

关于最优化的概念在机械设计中其实早已存在。设计人员总是力图使自己的设计能得到结构最紧凑、用料最省、成本最低、工作性能最好,即技术经济指标最佳的结果。传统的设计方法往往是由设计人员作出几个候选方案,从中择其最优者。这种传统的设计方法由于时间和费用的关系,所能提供的方案数目非常有限,真正最优的方案常不在提供的这些候选方案之中;因而要想取得一个最优方案很不容易。随着工程技术发展的迫切需要和电子计算机的出现与飞速发展,推动设计方法产生重大的变革。机械优化设计作为一种新的设计方法在 60 年代迅速发展起来。这种新的优化设计方法建立在近代数学规划论和计算机程序设计的基础上,能使一项设计在一定的技术和物质条件下寻求一个技术经济指标最佳的设计方案。其寻找最优设计方案的过程是在建立最优化的数学模型、确定最优化方法并编制计算程序以后,在电子计算机上自动地进行逐步逼近和取得最优方案的。机械优化设计愈来愈多地应用于产品的设计中,如零部件的优化设计、机构的优化设计、工艺设备基本参数的优化设计、分系统的优化设计等,都取得了较明显的技术和经济效果。许多机构进行优化设计显著改善动力学性能、提高运动精度;机械结构设计应用优化设计方法较传统设计方法一般可节省材料 7 ~ 40%,如我国葛洲坝二号船闸人字门启闭机经过优化设计,使驱动力矩由  $400t \cdot m$  降为  $232.2t \cdot m$ 。据有关资料介绍,利用一个化工优化系统的计算机手段,在 16 小时内对一个化工厂进行 16000 个可行设计的选择,成功地取得最优设计方案,而在这之前求解该问题,曾用一组工程师工作一年仅作了三个设计方案,且其效率却没有一个可以和上述优化方案相比。国际市场上更是不少产品依靠采用最优化设计来获取专利与竞争力。当然,

优化设计和传统设计都要用到机械设计的许多基本理论、公式和数据,如果这些前提和基础变化了,“最优方案”也随之发生变化。“最优化”是在某种范围或条件下得到的,而不应将其理解为绝对的“最优”,这也是必须加以明确的。

机械优化设计方法的建立和得到发展距今时间并不算长,但进展速度却相当快。它可以使许多复杂的设计问题能够取得最优方案,提高设计质量和设计效率,改进产品的效能,取得较大的经济效益,越来越受到工程技术人员的重视。机械优化设计已成为现代机械设计理论和方法的一个十分重要的组成部分,它与计算机辅助设计结合起来,使设计过程完全自动化,已是设计方法的一个重要发展方向。可以预期:优化设计近几年内在我国将会被更多的工程技术人员掌握和运用,为我国机械工业的现代化,在进一步提高产品质量、降低成本、缩短生产周期等方面产生十分积极的、深远的影响。

进行机械优化设计首先要把实际的机械设计问题用数学表达式加以描述,即转化成数学模型,然后根据数学模型的特性,选择某种适当的优化计算方法及其程序,通过电子计算机,求得最优解。建立数学模型和掌握运用优化方法及其程序这两方面,将是本课程讲述的主要内容。



## 第二章 机械优化设计的基本要素及数学模型

如何将实际的机械设计问题转化成数学模型,这是机械优化设计首先需要解决的关键问题。解决这个问题必须考虑:哪些为变量参数?各变量参数之间受到什么约束和限制?优化问题追求的目标是什么?这实际就是机械优化设计建立数学模型的三个基本要素——设计变量、约束条件、目标函数。

### § 2-1 设计变量

机械设计的一个方案,通常可以用一组参数来表示。在这些参数中,有的是根据工艺、安装和使用要求等预先确定,即在设计过程中是固定不变的量,称为设计常量;有的则需要在设计过程中进行选择 and 调整,可认为是变化的量,称为设计变量。

在最优化问题中,设计变量是指那些作变量处理的独立参数,其数目被称为该问题的维数。只含有一个设计变量的最优化问题,称为一维最优化问题,如引例 1-1 就是以截角方块边长  $x$  作为设计变量的一维最优化问题;包含  $n$  个设计变量的最优化问题,称为  $n$  维最优化问题,如引例 1-2 就是以圆管平均直径  $D$  和人字架高度  $H$  作为两个设计变量、 $n = 2$  的二维最优化问题。

一组  $n$  个设计变量  $x_1, x_2, \dots, x_n$  按一定次序排列构成一个数组,这个数组在最优化设计中被看成一个  $n$  维向量  $X$  沿  $n$  个坐标轴的分量,把它写成矩阵形式则为: