轻工机械优化设计

OPTIMAL DESIGN OF LIGHT INDUSTRY MACHINERY

编著　梁基照

华南理工大学出版社

轻工机械优化设计

梁基照　编著

华南理工大学出版社
·广州·

图书在版编目（CIP）数据

轻工机械优化设计/梁基照编著. 一广州：华南理工大学出版社，1995.9

ISBN 7-5623-0840-3

Ⅰ. 轻…

Ⅱ. 梁…

Ⅲ. 轻工业-机械-最优设计

Ⅳ. TS04

华南理工大学出版社出版发行

（广州五山　邮码 510641）

责任编辑　潘宜玲

各地新华书店经销

华南理工大学出版社电脑室排版

华南理工大学印刷厂印装

1996年9月第1版　1997年1月第2次印刷

开本 850×1168　1/32　印张 9.25　字数 240 千

印数：1001—4000

定价：13.50元

序　　言

本书扼要地介绍了最优化技术的基本原理和方法，分析和讨论了轻工机械优化设计的特点，并列举了其中一些典型机构（如包装机的直线送料机构）和工作部件（如挤出机螺杆）优化设计的实例，反映了近年来最优化技术在轻工机械设计中研究和应用的新成就。

本书内容分为八章。第一章绪论；第二章最优化设计的数学分析基础；第三章一维搜索的最优化方法；第四章多维无约束最优化方法；第五章多维约束最优化方法；第六章轻工机械优化设计的特点与方法；第七章最优化方法在轻工机械设计中的应用；第八章轻工机械常用齿轮减速器的优化设计。在前五章中，力图从工程应用的角度出发，注意概念的解释和方法的介绍，尽量避免繁杂的理论论证和数学推演，并给出相应的例题。前六章均附有适量的习题，以便于读者加深对最优化设计的理论和方法的理解、消化和掌握，以及进行复习。书末还附有常用优化方法的 BASIC 语言程序，供读者参考。

本书内容覆盖塑料机械、食品机械、包装机械和造纸机械等，既适合于从事轻工行业的工程技术人员及大专院校相关专业的师生使用，又可作为机械设计及制造人员的参考用书。

迄今，有关轻工机械优化设计的系统的著述甚少。编者自 1986 年起给本科生讲授“高机优化设计”课程。本书是在自编讲义《高分子材料加工机械最优化设计》（华南理工大学，1990 年）的基础上修改和补充而成的。限于编者的学识和经验，书中的缺

点和疏漏在所难免，真诚地希望读者指正。

在本书的编写和出版过程中，得到我校教务处、出版社、化工机械系和高分子材料加工机械教研室的领导及同事的关心和支持。华南理工大学吴满副教授审阅了全书并提出宝贵意见。在此，对所有曾经帮助过本书编写和出版的同志谨致最衷心的感谢。

梁基照

1994年11月于华南理工大学

目　录

第一章 绪 论

§1-1 概 述

在现代生活中，人们的衣食住行离不开轻工产品，轻工业已成为国民经济的重要支柱。作为轻工业重要组成部分的轻工机械，对轻工产品的开发和完善起着巨大的关键的作用。轻工机械主要包括食品机械、包装机械、造纸机械、高分子材料（如塑料、化纤）加工成型机械以及装配机械（如手表、自行车）等。

机械产品的设计一般需要经过调查分析、方案拟定、技术设计、总装图及零件图绘制等环节。在传统设计中，这些环节几乎全由设计人员用手工工具完成。随着人民生活水平的提高，市场竞争的需要，轻工产品不断开发和推陈出新，这就要求轻工机械产品更新换代周期日益缩短，设计质量要求日益提高。任何机械设计，总希望获得性能好、使用可靠、成本低（包括制造及工作成本）等技术经济效益，因而要求设计者能从一系列可行的设计方案中选择出最好的方案。显然，由于分析和计算手段以及时间和费用的限制，可供选择的方案有限，且不一定能从中选出最佳者，故传统的设计方法越来越不适应发展的需要。

近 30 年来，随着电子计算机技术和计算方法的发展，机械设计领域经历了深刻的变革，出现计算机辅助设计（CAD）、机械优化设计、可靠性设计、设计系统学、设计方法学、有限元分析法等现代设计方法及相应的学科。

机械优化设计是最优化方法与机械设计的结合。最优化设计

是在现代计算机广泛应用的基础上发展起来的一项新技术，是根据最优化原理和方法综合各方面因素，以人机配合的方式或用自动探索的方式，在计算机上进行半自动或自动设计，以选出在现有工程条件下最佳设计的一种现代设计方法。其设计原则是最优设计；设计手段是电子计算机和相关设备（如绘图装置）以及计算程序；设计方法是采用最优化数学方法。

50年代以前，用于解决最优化问题的数学方法仅限于古典的微分法和变分法。50年代末，数学规划法被首次用于最优化设计，并成为其求优方法的理论基础。数学规划法包括：线性规划、非线性规划、动态规划、几何规划和随机规划等。

机械优化设计，就是在给定的载荷或工作环境条件下，在对机械产品的性态、几何尺寸关系或其他因素的限制（约束）范围内，根据设计要求及目的，选取设计变量和建立目标函数，并使其获得最优值。设计变量、目标函数和约束条件，这三者在设计空间（以设计变量为坐标轴构成的实空间）的几何表示中构成设计问题。

轻工机械属于专门的生产设备，在一些加工或成型过程中，需要完成搅拌、混合、输送等环节，如造纸中的纸浆输运、食品加工中浆料的搅拌和输运、塑料挤出中的剪切、混合和泵出等，这些液态物料多属于非牛顿流体，有的还呈现出复杂的流变行为（如聚合物熔体），成为轻工机械工作部件设计时必须考虑的重要因素。因而，轻工机械设计既具有普通机械设计的共性，又保持着自身的独特之处，从而也构成了其优化设计的特点。鉴此，先介绍一般机械优化设计的基本理论和方法。

在阐述最优化设计方法的基本原理及寻优过程时，要引用一些基本概念和术语，如前述的设计变量、目标函数、约束条件等。为便于读者理解，下面将通过举例介绍之。

§ 1-2　优化设计问题举例

例 1-1　根据实验数据求取经验方程，这类问题称为曲线拟合。如由实验得到下列 n 组数据

$$(x_1, y_1), (x_2, y_2), \cdots, (x_n, y_n)$$

现拟用方程

$$\bar{y} = a + bx^c \tag{1-1}$$

作最优拟合，其中 a，b 和 c 为待定常数。

解　评价方程 $\bar{y} = a + bx^c$ 为最优拟合的标准是：所有 x_i 对应方程(1-1)上的 $\bar{y}_i$

$$\bar{y}_i = a + bx_i^c$$

与实验值 y_i 的差的平方和为最小，即

$$\min \sum_{i=1}^{n} [(a + bx_i^c) - y_i]^2 \tag{1-2}$$

式(1-2)的几何解释是，由方程(1-1)作出的曲线尽可能通过或接近实验值，如图 1-1 所示。

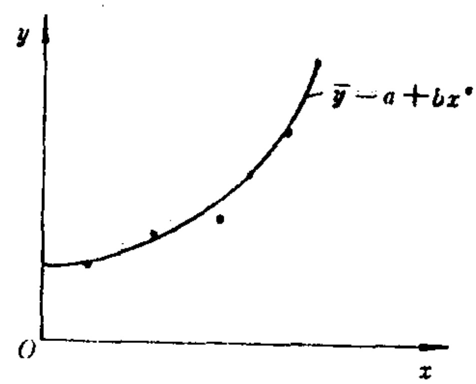

图 1-1　曲线拟合

例 1-2　图 1-2 所示的人字架由两个钢管构成，其顶点受重力 $2P$ 作用。已知人字架跨度 $2B$，钢管壁厚 T，材料的弹性模量 E，比重 γ 以及许用压应力 σ_y。求在钢管压应力 σ 不超过 σ_y 和失稳临界应力 σ_e 的条件下，人字架的高 H 和钢管平均直径 D，使钢管总重量 W 为最小。

解　依题意，可以把人字架的优化设计问题归结为：

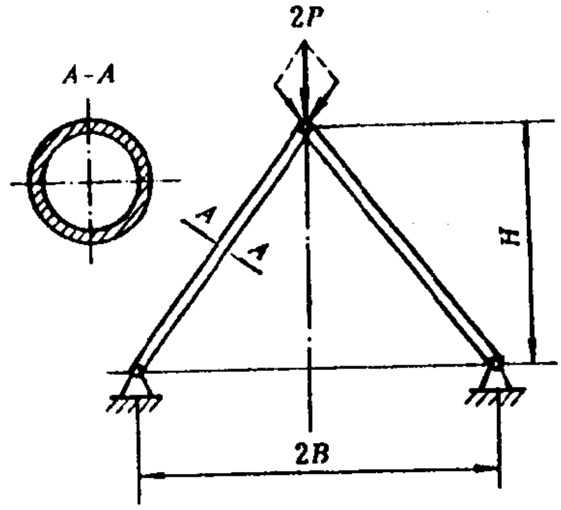

图 1-2　人字架结构与受力分析

求 $X=(D,H)^T$，使结构重量

$$W(X)=2\gamma AL=2\pi\gamma TD(B^2+H^2)^{\frac{1}{2}}\rightarrow \min \qquad (1\text{-}3)$$

但应满足强度约束条件

$$\sigma(X)=\frac{F}{A}=\frac{P(B^2+H^2)^{\frac{1}{2}}}{\pi TDH}\leqslant\sigma_y \qquad (1\text{-}4)$$

和稳定约束条件

$$\sigma(X)\leqslant\sigma_e$$

即 $$\frac{P(B^2+H^2)^{\frac{1}{2}}}{\pi TDH}\leqslant\frac{\pi^2E(T^2+D^2)}{8(B^2+H^2)} \qquad (1\text{-}5)$$

式中 $$\sigma_e=\frac{F_e}{A}$$

F_e 是压杆失稳的临界力，根据欧拉公式（见图 1-3），有

$$F_e=\frac{\pi^2EI}{L^2}$$

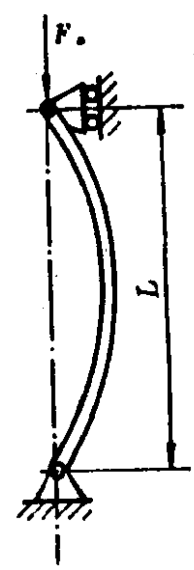

图 1-3　压杆受力分析

式中　I ——钢管截面惯性矩，

$$I = \frac{\pi}{4}(R^4 - r^4) = \frac{A}{8}(T^2 + D^2)$$

A ——钢管截面面积，

$$A = \pi DT$$

§1-3　优化设计的基本概念

一、设计变量

一个设计方案可用一组基本参数的数值来表示。依设计内容的不同，选取的基本参数可以是几何参数，如构件的外形尺寸、机构的运动尺寸等；也可以是某些物理量，如重量、惯性矩、力或力矩等；还可以是代表工作性能的导出量，如应力、挠度、频率、冲击系数等。这些参数中，有一些是预先给定的，另一些则需要在设计中优选。前者称为设计常量，而需要优选的独立参数，则被称为设计变量。设计变量的数目称为最优化设计的维数。设计变量的全体实体实际上是一组变量，可用一个列向量表示：

$$X = [x_1, x_2, \cdots, x_n]^T \tag{1-6}$$

称作设计变量向量。向量中分量的次序完全是任意的，可根据使用的方便任意选取。例如，例 1-2 中的 D，H 相当于 x_1，x_2 二个变量。

由 n 个设计变量为坐标轴所组成的 n 维实空间称作设计空间。一个设计，可用设计空间中的一点表示，此点可看成是设计变量向量的端点（始点取在坐标原点），称作设计点。

二、目标函数

设计空间是所有设计方案的集合。若设计方案满足所有对它提出的要求，就称为可行设计方案，反之则称为不可行设计方案。

在机械设计中，有许多可行的方案，因而需要有一个衡量优劣的标准。在机械优化设计中，这个被用于评选设计方案优劣的函数，被称为目标函数或评价函数，记为

$$f(X)=f(x_1,x_2,\cdots,x_n) \tag{1-7}$$

机械最优化问题，就是要追求目标函数 $f(X)$ 的极小化，常用下述形式表示：

$$\min_{X\in E^n} f(X) \tag{1-8}$$

式中 E^n 称为 n 维欧氏空间。

在一个最优化设计问题中，可以只有一个目标函数，称为单目标函数，如式(1-7)。当存在两个以上目标函数时，称为多目标函数的最优化问题。在一般的机械最优化设计中，多目标函数的情况较多。目标函数愈多，设计效果愈好，但问题求解亦愈复杂。

对于多目标函数，可以独立地列出几个目标函数式：

$$\left.\begin{aligned} f_1(X) &= f_1(x_1,x_2,\cdots,x_n) \\ f_2(X) &= f_2(x_1,x_2,\cdots,x_n) \\ &\vdots \\ f_q(X) &= f_q(x_1,x_2,\cdots,x_n) \end{aligned}\right\} \tag{1-9}$$

也可以把几个设计目标综合到一起，建立一个综合的目标函数表达式，即

$$f(X)=\sum_{j=1}^{q} f_j(X) \tag{1-10}$$

q 为最优化设计所追求的目标数目。

为了方便求解多目标函数的优化设计问题，有时可引入加权因子的概念，用一个目标函数表示若干所需特性的加权和，从而转化为单目标问题求解。引入加权因子后，式(1-10)变为：

$$f(X)=\sum_{j=1}^{q} w_j\cdot f_j(X) \tag{1-11}$$

加权因子 w_j 是个非负数，由设计者根据该项指标在最优化设

计中所占的重要程度等情况而定。若该项指标的相对重要性一般，则取 $w=1$。如何正确选择加权因子是一个比较复杂的问题，理论上尚未有完善的解决。我们将在以后章节中具体说明之。

目标函数与设计变量之间的关系，可用曲线或曲面表示。一个设计变量与一个目标函数的关系，是二维平面上的一条曲线(图1-4a)。当为两个设计变量时，其关系是三维空间的一个曲面(图1-4b)。若有 n 个设计变量时，则呈 $(n+1)$ 维空间的超越曲面关系。

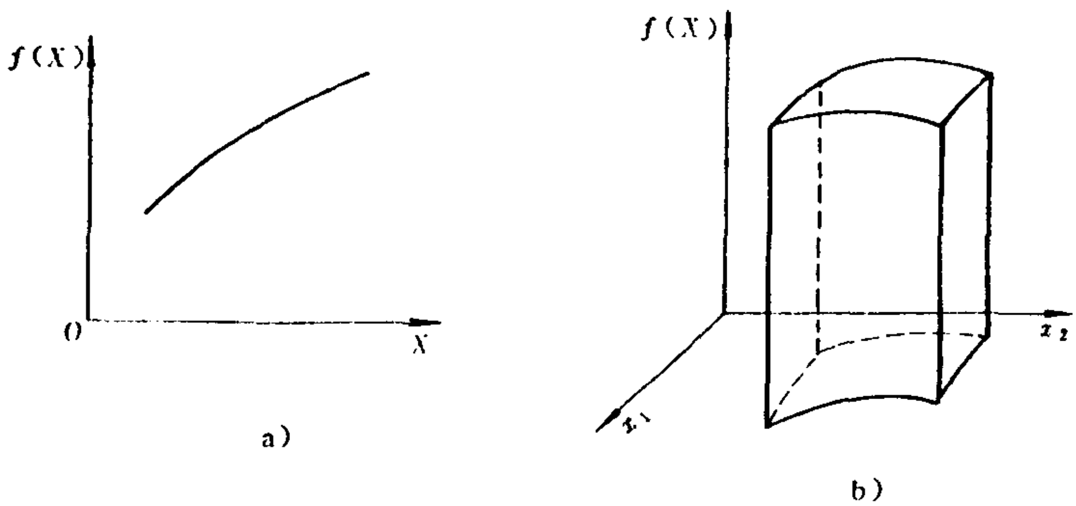

图 1-4 目标函数与设计变量之间的关系

三、约束条件

如前所述，目标函数取决于设计变量。在机械产品设计中，设计变量的取值范围有一定的限制。在最优化设计中，这种对设计变量取值时的限制条件，称为约束条件或设计约束，简称约束。约束条件可以用数学等式或不等式表示。

等式约束对设计变量的约束严格，起着降低设计自由度的作用。它可能是显约束(对设计变量直接限制)，也可能是隐约束(对设计变量间接限制)，其形式为：

$$h_v(X) = 0 \quad (v = 1,2,\cdots,p) \tag{1-12}$$

式中　p ——等式约束数。

在机械最优化设计中不等式约束更为普遍，如例 1-2 中式(1-4)和式(1-5)，其形式为：

$$\left.\begin{aligned} g_u(X) \leqslant 0 \quad 或 \quad g_u(X) \geqslant 0 \\ (u = 1,2,\cdots,m) \end{aligned}\right\} \tag{1-13}$$

式中　X—— 设计变量，见式(1-6)；

m—— 不等式约束数。

约束又可分为边界约束和性态约束。边界约束又称为区域约束或辅助约束，用以限制某个设计变量(结构参数)的变化范围，或规定某组变量间的相对关系，属于显约束。例如要求物件的长度 $l_i(X = [x_1,x_2,\cdots,x_k]^T = [l_1,l_2,\cdots,l_k]^T)$ 满足给定的最大、最小尺寸 $l_{i\max}$、$l_{i\min}$，于是其边界约束条件为：

$$\left.\begin{aligned} g_1(X) = l_{i\min} - x_i \leqslant 0 \\ g_2(X) = x_i - l_{i\max} \leqslant 0 \end{aligned}\right\} \quad (i = 1,2,\cdots,k) \tag{1-14}$$

性态约束又称为性能约束，是根据对机械的某项性能要求而构成的设计变量的函数方程。例 1-2 中式(1-4)和式(1-5)属性态约束。性态约束通常为隐约束，但也有显约束的情况。

对于约束优化问题，设计点 X 在 n 维实欧氏空间 E^n 内的集合分为两部分：(1) 满足诸约束条件的设计点集合 $\mathscr{D}$，称为可行设计区域，简称可行域；(2)否则为非可行域.可行域内的设计点称为可行设计点，否则为非可行设计点。当设计点处于某一不等式约束边界上时，称为边界设计点。边界设计点属于可行设计点，它是一个为该项约束所允许的极限设计方案。

四、数学模型

最优化设计问题的定量描述称之为数学模型。综上所述，对于一般的机械优化设计问题，其数学模型可表示如下：

选择设计变量　$X = \{x_i\} \quad (i = 1,2,\cdots,n)$

满足约束条件　$g_u(X) \geqslant 0 \quad (u = 1,2,\cdots,m)$

$h_v(X) = 0 \quad (v = 1,2,\cdots,p)$

并使目标函数　$f(X) \Rightarrow \min$ （或 max）

或简记为：

$$\left.\begin{aligned} & \min f(X) \\ & X \in \mathscr{D} \subset E^n \\ & \mathscr{D}:\quad g_u(X) \geqslant 0 \\ & \qquad h_v(X) = 0 \end{aligned}\right\} \tag{1-15}$$

式中，$X \in \mathscr{D} \subset E^n$ 表示 X 属于 $\mathscr{D}$，$\mathscr{D}$ 是 E^n 的真子集。

五、最优化设计问题的几何解析

用几何图形来解释非线性规划的最优化问题，可直观地表达出目标函数与设计变量和约束条件间的相互关系。

无约束优化问题就是在没有限制的条件下，对设计变量求目标函数的极小点。在设计空间中，目标函数是以等值面的形式反映出来，其极小点即为等值面的中心，如图 1-5 所示。

有约束优化问题是在可行域内对设计变量求目标函数的极小

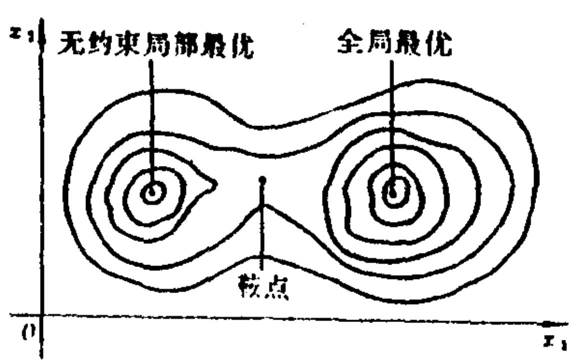

图 1-5　无约束优化问题

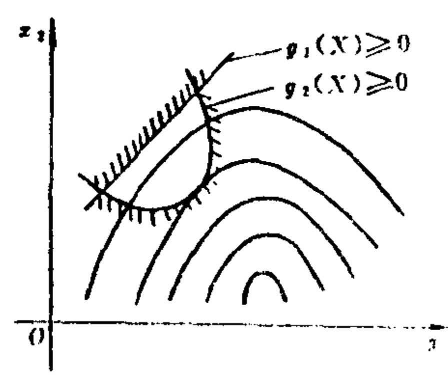

图 1-6　有约束优化问题