

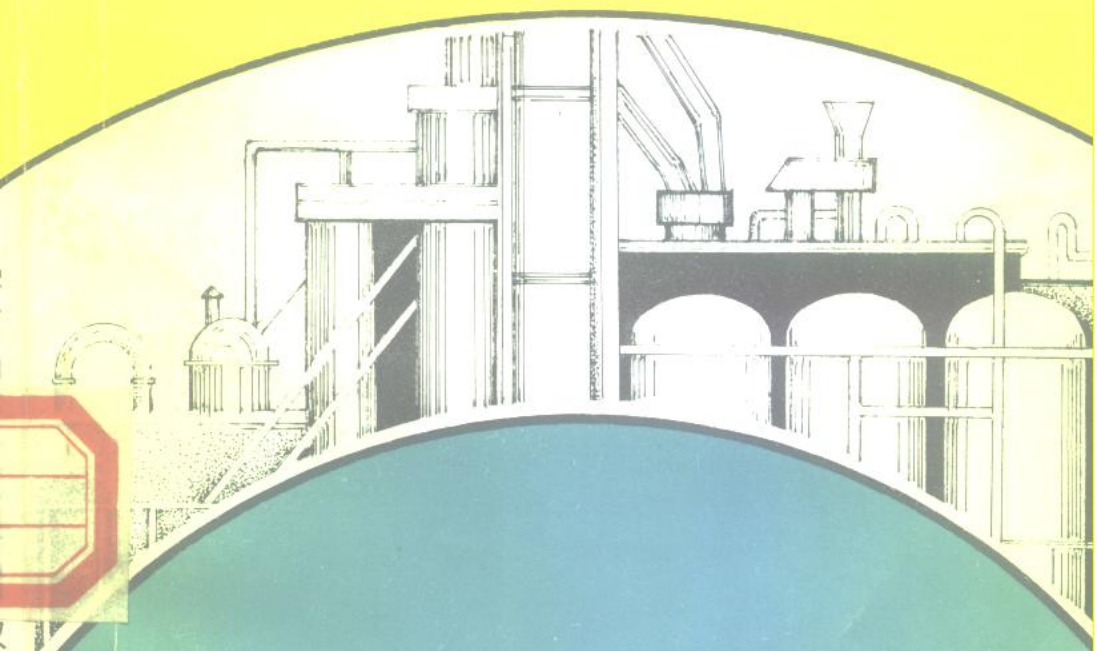
化工设备优化设计

OPTIMAL DESIGN OF PROCESS EQUIPMENT

邢慧明

黄兴仁 编著

陈卫东



华南理工大学出版社

TQ050.2

X63

化工设备优化设计

邢慧明 黄兴仁 陈卫东 编著

华南理工大学出版社

•广州•

DV19/21

图书在版编目(CIP)数据

化工设备优化设计/邢慧明等编著. —广州:华南理工大学出版社, 1995. 8

ISBN 7-5623-0799-7

I. 化…

I. 邢…

Ⅱ. 化工设备-设计, 最佳化

IV. TQ0 50.2

华南理工大学出版社出版发行

(广州五山 邮码510641)

责任编辑:张巧巧

*

各地新华书店经销

华南理工大学印刷厂印装

1995年8月第1版 1996年12月第2次印刷

开本 850×1168 1/32 印张 10.25 字数 257千

印数: 1 001—4 000

定价: 12.80元

前 言

优化设计是一种现代化的、有效的工程设计方法。自本世纪60年代高速度运算电子计算机的出现,以及优化理论与方法的发展与深化,在许多部门如机械、建筑、化工、电子、航空等工程设计和管理方面已得到日益广泛的应用。

本书从工程技术的应用实际出发,介绍与化工设备有关的优化理论和方法,介绍包括机械元件、压力容器、换热设备、制冷设备、塔设备等化工设备优化设计的大量实例。内容阐述力求深入浅出,辅以例题、计算程序框图和一些计算机程序。优化设计实例均选自近期国内外有关的生产实际及研究成果。本书可作为工科高等院校化工机械类高年级学生、研究生学习之用,也可供从事化工机械设计和研究部门的技术人员参考使用。

全书大致分为三大部分:

第一部分(1~3章),化工设备优化设计的一般性概念和基本知识。

第二部分(第4章),最优化方法,包括直接法和间接法。

第三部分(第5~8章),化工设备优化设计举例,包括机械元件、压力容器、换热设备、制冷设备、塔设备等。

本书引用了国内外一些专家学者的科研成果,且蒙

华南理工大学陈国理教授、刘永清教授审阅,在此均表示深切的谢意.

由于作者水平所限,书中缺点与错误在所难免,敬请读者批评指正.

目 录

第一章 概论	1
第一节 化工设备的优化设计	1
第二节 优化设计概述	4
一、优化设计	4
二、优化设计的特点与一般过程	4
三、化工设备优化设计举例	6
第二章 基础知识	9
第一节 正定矩阵的判定及其性质	9
一、矩阵运算的一些性质	9
二、二次型的标准形	11
三、正定矩阵及其判别法	14
四、正定二元二次函数的性质	16
第二节 函数的梯度	19
一、方向导数	19
二、梯度	20
三、Hesse 矩阵	23
第三节 Taylor 展开式的矩阵形式	24
第四节 凸集与凸函数	26
一、集合的基本概念	26
二、凸集	27
三、凸函数判别法	30
四、凸规划	31
第五节 均匀分布随机数的生成	32

一、乘同余法	32
二、混合同余法	33
第三章 优化设计的数学模型与设计评价	34
第一节 优化设计的基本要素	34
一、设计变量	34
二、设计约束	35
三、目标函数	36
第二节 优化设计的数学模型	39
一、数学模型的建立	39
二、建立数学模型举例	40
三、优化设计问题的最优解	42
第三节 设计评价	44
一、确定性问题的设计评价	44
二、随机型和不完全资料问题的设计评价	45
第四章 最优化问题的求解方法	50
第一节 间接法	50
一、无约束极值	50
二、等式约束极值	53
三、 $K-T$ 条件——不等式约束极值理论	56
第二节 无约束最优化的直接搜索法	63
一、迭代算法	63
二、斐波那契法(Fibonacci 法)	66
三、黄金分割法(0.618法)	73
四、抛物线插值法	73
五、坐标轮换法	77
六、模式搜索法	80
七、共轭方向法	86
八、单纯形法	94

九、随机搜索法	100
第三节 以梯度法为基础的多维无约束最优化 的数值解法	102
一、最速下降法(梯度法)	102
二、共轭梯度法	106
三、变尺度法	115
第四节 有约束最优化数值解法	121
一、外罚函数法	122
二、内罚函数法	126
三、SWIFT 法	129
四、复合形法	131
五、可行方向法	139
第五节 优化结果分析	146
一、问题形式化的检验	146
二、参数分析	146
第五章 机械元件的优化设计	148
第一节 一般机械元件	148
一、悬臂轴的优化设计	148
二、液压梯级轴承的优化设计	150
第二节 U 形波纹管膨胀节的工程优化设计	154
第三节 密封件的优化设计	160
第六章 压力容器的优化设计	162
第一节 壳体最小表面积	162
第二节 贮罐	163
一、容器壳体的优化设计	164
二、冷凝罐的优化设计	166
第三节 化工单元设备中的壳体	170
一、罗伯特型蒸发器的优化设计	170

二、浮头型换热器外壳的优化设计	175
第四节 化工容器	176
一、轴对称压力容器的优化设计	177
二、椭球壳体中心开孔补强的优化设计	182
三、自增强高压容器的优化设计	187
第七章 换热设备	197
第一节 换热器	197
一、概述	197
二、套管换热器的优化设计	200
三、列管换热器的优化设计	207
四、板翅式换热器的优化设计	220
第二节 传热元件的优化设计	228
一、圆形翅片的优化设计	229
二、分流管的优化设计	234
第三节 换热器系列	236
一、套管换热器系列优化设计	236
二、管壳式列管换热器的优化选型	241
第四节 制冷设备	248
一、管式蒸发器的优化设计	248
二、空气冷却器的优化设计	250
三、带翅片管冷却器中空气流雷诺数的最佳选择	252
第八章 其它设备	256
第一节 齿轮泵的优化设计	256
第二节 浮阀塔塔体刚度的优化设计	259
第三节 多级液体旋流分离器的优化设计	263
第四节 烟气加热器的优化设计	267
第五节 罗伯特型蒸发器系列的优化设计	272
附录 I 雷诺数大于1000时套管段的压力损失	278

附录 I	非线性规划的几个计算机程序(Fortran)	281
(I)	梯度法	283
(I)	共轭梯度法	287
(II)	变尺度法	292
(N)	单纯形法	298
(V)	SWIFT 法	304

第一章 概 论

第一节 化工设备的优化设计

应用于化工、石化、轻工、食品、医药等工业生产过程的设备都是一些典型的化工设备,例如带搅拌的反应器、管式换热器、蒸发器、过滤机、干燥机……等。在这些设备中进行传质、传热和化学反应等化工单元操作,当然在这些操作中也包含着动力传递的过程。这些操作大部分是连续进行的,也有间歇进行的,例如带搅拌的反应釜,在医药和食品的应用中还多数是分批间歇地进行。自从 70 年代化工产品作为商品在国际市场进行剧烈的竞争以来,要求提高产量并降低产品成本,这就提出了化工设备的优化设计问题。目前发展的趋势有两个方面,一是设备单系列大型化,以增大设备的生产能力;二是提高过程效率,即提高传热、传质及化学反应的效率,也就是提高设备的生产强度。

上述两个趋势的具体实例是很多的,年产 30 万吨合成氨,年产 48 万吨尿素的设备便是典型的单系列大型化的例子。氨合成塔的直径由年产 5 万吨的 $\phi 1200$ mm 增大至年产 30 万吨的 $\phi 3200$ mm。在提高过程效率方面,将触媒筐双管并流轴向流动,改为冷激多层径向流动,大大提高了传热、传质及化学反应的效率,并减少动力损失。双管并流触媒筐的动力损失为 1.2~1.8 MPa,冷激径向双层流动触媒筐为 0.25 MPa。许多换热设备,利用改变换热面的型式,例如螺旋槽管、变形管,从而大大提高传热系数。塔设备则改变塔板的型式,或采用高效能填料,也大大提高传质系数。间歇操作的反应釜,也采用几个串联,变间歇操作为

连续操作,以提高效率。

此外,化工设备的操作并应用计算机对化工参数(例如压强、温度、流量、液位等)进行自动控制与自动调节,使这些参数无论在任何瞬时阶段,都符合传热、传质、化学反应过程的要求,并处于最佳状态,

由此可见,化工设备的优化是由有关的技术与经济的需求而提出的。

如何评价化工设备的优化呢?评价的准则可分为三个方面:

1. 结构的准则

常用的结构准则是设备或其部件所用材料的重量或体积。提高设备的生产能力,意味着增加传热面积及扩大传质及化学反应的空间。因此出现了化工设备的大型化,氨合成反应塔的直径已由1~2 m增至3~4 m。液氨球罐直径达28 m。换热器的管子由数百根增至数千根。管板的厚度也由200~300 mm增至500~800 mm。一个加氢反应器重至560 t。这样大型的化工设备,无论是材料消耗,加工制造,运输安装其费用都是很巨大的,优化设计能精确分析,快速、准确、细致核算,尺寸能有所减少,其节省都是很可观的。对于这类化工设备,在结构合理、强度保证的条件下应尽量减少其尺寸。

2. 与化工参数有关的准则

提高设备的生产强度,往往采取提高操作压力、温度、流速等参数来强化化工过程。但是,必须考虑提高压力后设备筒体及有关部件、零件强度尺寸的增加,材料的消耗及制造费用的增加,以及在较高应力水平下如果又有较高的温度,由于应力的松弛,设备寿命的缩短,都会使设备的固定投资与折旧费增加;如果提高温度,必须考虑耐热合金的费用及高温蠕变应力松弛使设备寿命的缩短;提高工作介质的流速,对传质、传热及化学反应的效率提高均有积极的作用,传质传热系数提高对设备费用可以减少,但是必须

核算由于流速提高压力降动力损失提高,长期的操作费用提高,两者比较是否有利。此外,在提高流速时,在流量不变的条件下,对换热器来说,往往要做成结构复杂的多程式,这也增加制造费用;而对塔设备来说,往往发生泡沫夹带而造成操作损失。提高化工参数,强化化工过程往往与动力消耗存在矛盾,而优化设计能使这些矛盾得到最佳的协调。

3. 与环境有关的准则

化工设备的设计还必须考虑与外部环境有关的各种因素。例如化工生产过程往往有废气、废水、废渣的排放,硫酸生产过程的 SO_2 转化器排出的废气有 SO_2 ,制浆造纸过程的蒸发器排出有含 NaOH 的黑液。这些废气、废水对环境有着严重的影响,设计这种设备时,必须考虑排放或回收的方便。否则,即使设备固定与操作费用都不高,满足以上两个准则的要求,但环保费用高得惊人,这样的设备也不是优化的。因此,不能从单个设备的经济作为全部评价的准则,还必须考虑环境的因素、控制的方便、市场的需求或其它经济上不确定的因素。

此外,还必须注意在操作期限内,价格及成本的计算的变化,在设备设计时,这些因素往往是难以预料的。

上述讨论的评价方法仅假设为一个准则,是在设备优化设计中最简单、最常用的计算准则。然而,也可能几个准则同时地进行计算,这就是多准则优化问题。这类问题只有在特殊情况下才有唯一的最优解。

在设计化工设备的结构时,必须同时考虑操作的方便、安全和能量、材料的节省。在设计过程中,最初仅仅是最重要的参数是已知的,然后还必须确定其它的参数,例如所需的压力,冷却水速率等,这些可通过对过程的数学描述进行计算。数学描述通常可反映一些主要的物理关系,例如物料平衡、能量平衡、平衡条件及运动方程,也可对装置内的结构所发生的现象进行描述,例如应力分布

或内壁表面的腐蚀及暴露表面的磨蚀等。此外,计算某些约束也是必需的。这些约束是由工程实际以及设计规范所决定的,也与安全性、人类工程、外表要求、或是经济计算的规定、成本分析的原则、附加于成本和其他的经济指标有关。

大部分的设计问题往往有多于一个的可行解。应用优化方法则可协助选择出一个好的设计,使决策不但技术上可行而且关于某些准则为最优。

设计工作通常是按下面几个连续步骤进行的,即设计思想,初步设计和最后(详细)设计。影响设计质量主要是前面两个步骤,包括确定设备的主要尺寸和重要的过程参数,而优化方法对前面两步中起着重要的作用。

第二节 优化设计概述

一、优化设计

优化,是指在满足技术可行条件的所有设计方案中,提供一个对于评价准则或目标函数有最大或最小值的方案。

优化设计,就是根据给定的设计要求和在现有的工程技术条件下,应用专业理论和优化方法,在电子计算机上,从满足给定的设计要求的许多可行方案中,按照规定的指标(目标函数)自动选出最优的设计方案。

二、优化设计的特点与一般过程

化工设备设计过程如图 1.1 所示,其特征部分是初步设计阶段。在这一阶段中确定了所设计设备的主要特性,而在详细设计阶段则确定其余的数据。其次,模型的建立与检验可评定设计的正确性,如果检验的结果不满意,可以重复进行初步设计和详细设计的

一些过程. 若设计方案达到最优, 可进行文件编辑整理, 输出最优结果.

图 1.1(a) 表示常用的初步阶段的传统设计过程, 其特点是所提出的解是按照工程实际、直觉或模拟随意地给出的, 其工程计算方法是检查所给出的解是否满足所需的条件与限制, 例如比较在

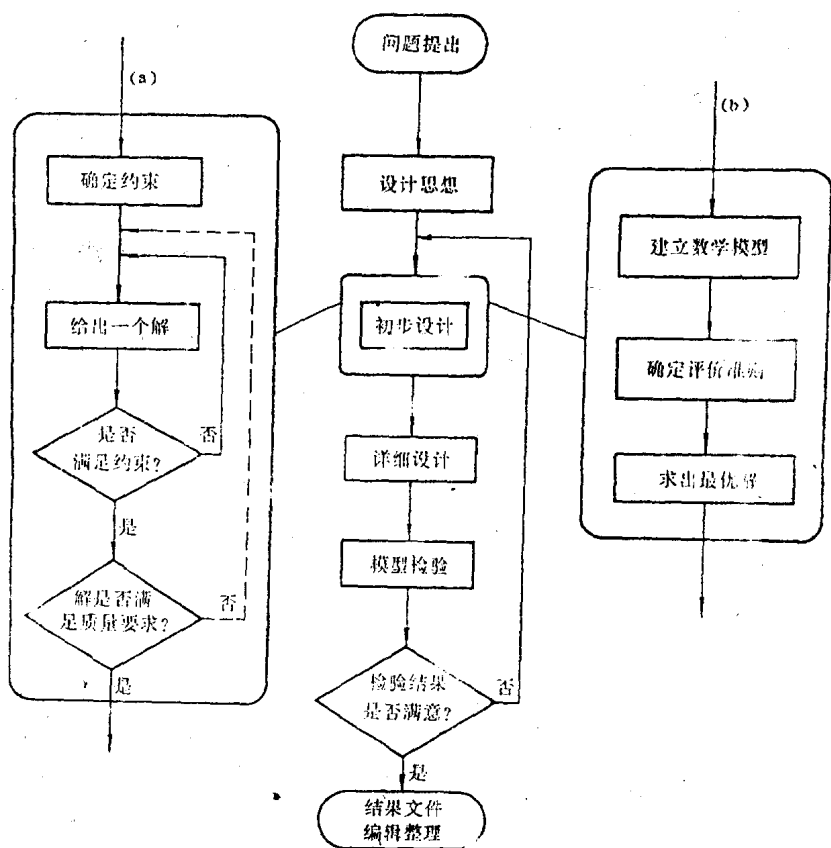


图 1.1 设计过程的主要步骤(中), 随意决策的初步设计过程(a), 优化决策的初步决策过程(b)

最大许用应力的极限条件下的应力值,最高容许温度时的操作温度或是成本的极限等.若所检验的结果不满意,则必须提出另一个解;若解是满意的,表明已达到初步设计的目的.在某些情况下,这一过程包括通过与现存模型相比较检验解的质量.

传统的工程设计由于专业理论和计算工具的限制,是根据经验和判断先制定设计方案,随后对所确定的方案进行分析的校核,是一个边试边改的过程,亦称为设计分析.而优化设计是要综合各方面的因素、要求、约束、指标、设计质量检验等等,产生一个最优设计方案,称为设计综合,其过程可见图 1.1(b).设计综合最重要的特点,是对设计问题通过数学模型的运作应用优化方法求解,从而保证了方案具有最好的质量.也为进一步详细设计奠定了良好的基础.然而,设计分析则应用边试边改的方法(亦称试凑法),不能保证求出最好的解.一般来说,即使是比较几个满意的结果并选出其中最好的,也不能知道更好的解是否存在(除非可用的方案数目是有限的并且全部加以计算和比较).

必须指出的是,上述的初步设计过程仅是设计中优化方法的应用例子.优化方法亦可应用于详细设计甚至模型检验等不同的问题,例如机械结构中各部件最合适的公差配合,最经济方案的确定等等.

三、化工设备优化设计举例

本例研究水力输送破碎的固体物料的管道设计,物料的物理性质是已知的.在初步设计阶段管道的磨损与成本费用忽略不计,同时亦假定设备用水是不受限制的,所求的固体物料其质流量为 G_s , 传送距离为 l . 由于泵寿命的原因,在水中悬浮的固体微粒其浓度不能超过值 ξ .

管道可由下列的量确定:

管直径 d , 悬浮液流速 c , 泵的动力消耗费用.

固体物料的质量平衡可由方程表达为

$$V_s = \frac{G_s}{\rho_s} \quad (1.1)$$

式中: V_s —— 物料的体积流量; ρ_s —— 物料密度.

悬浮液流速与管直径决定悬浮液体积流速

$$V = \frac{\pi d^2}{4} c \quad (1.2)$$

因此,在悬浮液中固体物料的浓度为

$$\xi = \frac{V_s}{V} \quad (1.3)$$

由问题的阐述可知,浓度受不等式的约束

$$\xi \leq \xi_i \quad (1.4)$$

物料输送的能量平衡建立泵送的动力 N 的方程,此动力是为了补偿随着悬浮液输送过程产生的压力降 Δp

$$N = V \Delta p \quad (1.5)$$

压力降由经验公式所决定

$$\Delta p = \frac{\rho c^2}{2} \frac{1}{d} \left[\lambda + 0.282 \xi \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) B^{1/3} \left(\frac{g d}{c^2} \right)^{4/3} (1 + 43 \xi^4) \right] \quad (1.6)$$

式中: λ —— 管壁的摩擦系数; B —— 物料输送的特征常量;

g —— 重力加速度; ρ —— 悬浮液密度.

能量成本可表达为单位成本指标(每单位管长的成本和每单位传送物料质量的成本).

$$C_* = \frac{N \chi_*}{l G_s \eta} \quad (1.7)$$

式中: χ_* —— 单位动力成本;

η —— 输送设备泵的效率(泵与马达).

如果已知浓度的极限值,物料常量,单位动力成本和泵的效率,对式(1.1)~(1.7)作某些代换,任一设计可以用一对 d 和 c 的