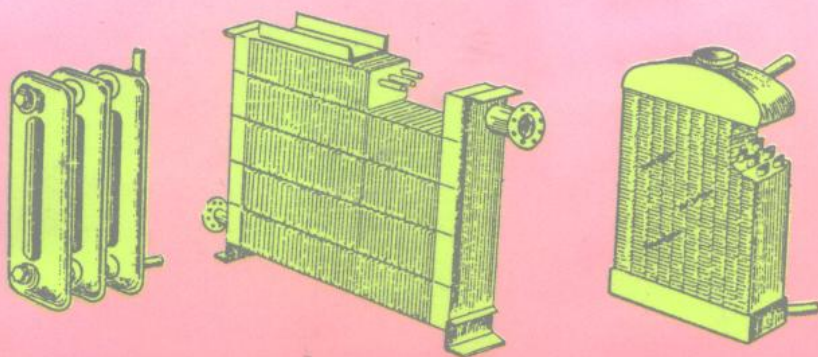


热工设备和系统 的设计优化

黄为民



高等教育出版社

71.17

1.193

热工设备和系统 的设计优化

黄为民

高等教育出版社

内 容 简 介

本书从设计的一般特征出发, 讨论了传统设计与优化设计间的联系和区别, 着重讨论了在最优化数学模型建立中设备特征方程程序化和系统设计变量分析所需采用的方法和数学工具。对无约束与有约束极值问题的算法作了简明的讲述, 并在实例中介绍了最优化数学模型上机前的规范处理。此外, 为便于读者掌握最基本的方法而设置了必要的习题。书末附有各类设备的报价方程和简捷设计用表。

本书配有用Pascal和Fortran语言编写的最优化算法程序软件, 拟由高等教育出版社出版, 需要者可与高等教育出版社联系。

本书经国家教委工程热物理专业教学指导委员会审订, 可作为热能工程专业以及与热能利用有关专业的学生和研究生教材和教学参考书, 亦可供有关工程技术人员参考。

DU 46/22

前 言

随着计算机的普及、数学规划理论的发展以及市场竞争的日益激烈，最优化设计方法在工程中的应用获得了飞速的发展。

面对参与国际竞争这样十分紧迫的任务，如何在国内更快地普及最优化设计方法已迫在眉睫。目前国内的最优化设计教材都偏重于数学规划理论的讲述，缺少与工程问题联系的入口。而建立这样一个“接口”往往是最优化设计程序的核心部分。本书试图更多地从建立最优化数学模型所要做的工作入手进行讨论。

最优化设计方法与传统设计方法有着十分紧密的联系。本书第一章从“设计”的一般特征出发，对各种各样的设计方法与最优化设计方法的区别与联系进行了讨论。第二章说明了设计的阶段性与设计的工作程序，讨论了在设计前期进行评估和最优化目标函数建立时十分有用的简捷设计方法以及投资估算方法，介绍了一些最基本的与决策评估有关的经济学概念以及现金流分析法。第三章结合设备设计和优化时如何将设备特征方程程序化的问题重点讨论了插值与回归分析的数值方法。第四章针对系统设计中最令人困惑的独立变量的分析介绍了有关方法，并介绍了系统最优化合成方法的窄点设计方法。这种方法应用于工程设计将产生重大的经济效益。第五章着重讨论了在大多数工程问题中遇到的最普遍的有约束极值问题以及一些基本处理方法，尤其是罚函数方法。第六章讨论了无约束极值问题的一些最基本的算法。第七章通过算例说明了在基本的最优化数学模型建立以后，在上机运算前对模型必须进行的规划和尺度变换处理工作。附录给出了有价值的设备估价方程和简捷设计方法用表。本书配有用Pascal和Fortran语言编写的最优化算法的程序软件，该软件拟由高等教育出版社出版发行，需要者可与高等教育出版社联系。

全书采用我国法定计量单位。

本书是国家教委《高等学校工科工程热物理专业1991~1995年教材规划》之一。为保证质量，国家教委工程热物理专业教学指导委员会详细讨论了本书教学大纲，并对书稿的初稿及修改稿召开了评审会。本书由东南大学陈善年教授担任主审，他对书稿提出了很多宝贵意见和建议。在此谨对国家教委工程热物理专业教学指导委员会主任委员吕灿仁先生以及各位委员、陈善年教授认真负责的工作以及热诚指导深表谢意。

本书的Pascal程序由华东工业大学系统工程学院徐宇清老师编写完成，阎旭、张德学、沈权、陈泽敬等同志协助完成了稿件的排版工作，在此一并表示谢意。

本书可作为大专院校热能工程专业以及与热能利用有关的冶金、暖通、空调、化工、轻工、食品等专业高年级学生和研究生教材或教学参考书，也可供有关工程技术人员自学、参考。

编 者

1996.4

目 录

绪 论	1
第一章 设计与最优化	3
1-1 设计的自由度	3
1-2 目标函数与技术经济性	6
1-3 设计变量矢量和自由度分析	9
1-4 可行设计与约束	14
第二章 设计的过程	17
2-1 设备设计和系统设计	17
2-2 设计的阶段	18
2-3 设计的步骤	20
2-3-1 工程目标和技术经济条件的确定	21
2-3-2 完善系统过程流程图	24
2-3-3 设备设计和选择——分类简捷设计方法	31
2-3-4 固定投资估算	37
2-3-5 生长成本估算方法	41
2-3-6 折旧	47
2-3-7 现金流分析	49
参考文献	57
第三章 热工设备的设计方法和优化模型	58
3-1 设备基本方程的建立	58
3-2 插值和拟合	63
3-3 插值多项式的最佳逼近	71
3-4 方程的统计回归	83
3-5 解析解和半解析解	90
3-6 设计变量的确定	93

3-7 设备最优化设计模型	94
参考文献	98
第四章 系统设计方法和系统优化设计	99
4-1 系统模拟计算	99
4-2 系统变量的确定	100
4-3 信息流图	104
4-4 分支图解法	107
4-5 独立变量组和计算顺序	108
4-6 系统的联立方程算法	113
4-7 系统最优化设计方法	116
4-8 能量系统的合成与最优化	122
4-8-1 过程能量组合方法	123
4-8-2 功能联合循环与适当配置及公用能源的选择	138
4-8-3 窄点设计方法中的最优化	147
参考文献	157
第五章 有约束规划问题	158
5-1 函数的凸性、凸集和凸规划问题	158
5-2 K-T条件	162
5-3 罚函数概念	169
5-4 线性规划	174
5-5 拉格朗日乘子法	181
第六章 最优化设计算法	184
6-1 一维搜索(单变量函数极值问题解法)	185
6-2 多变量函数无约束极值问题解法(直接法)	193
6-2-1 随机搜索	194
6-2-2 单变方向法(瞎子爬山法)	196
6-2-3 模量方向法(陡度法)	201
6-2-4 共轭模量方向法(鲍威尔法)	203
6-3 无条件极值问题解法(解析法)	208

6-3-1	梯度法(最速下降法)	208
6-3-2	共轭梯度法	211
6-3-3	牛顿法	214
6-3-4	变尺度法	216
6-3-5	方法的选择	218
6-4	有约束极值问题	219
6-4-1	罚函数法	219
6-4-2	可行方向法	222
6-4-3	梯度投影法	227
6-5	动态规划	236
6-5-1	动态规划理论与意义	236
6-5-2	动态规划应用实例	240
6-6	多目标决策问题	242
6-6-1	有限个方案的多目标决策问题的解法	243
6-6-2	无限个方案的多目标决策问题的解法	247
	参考文献	251
第七章	算 例	253
7-1	建模示例	253
7-2	锅炉设备优化设计实例	258
7-3	换热器网络优化设计	268
习 题		275
第一章	习题	275
第二章	习题	276
第三章	习题	277
第四章	习题	279
第五章	习题	280
第六章	习题	281
附录1	各类设备报价方程	283
附录2	各类设备简捷设计用表	297

表 1	固体传送设备简捷设计准则和数据	297
表 2	破碎装置简捷设计准则和数据	299
表 3	原动力机和能量回收装置简捷设计准则和参数	301
表 4	加热炉、窑等热工设备的简捷设计准则和参数	303
表 5	风机和压气机预设计准则和参数	305
表 6	气固接触设备预设计准则和参数	308
表 7	换热器预设计准则和数据	312
表 8	各种用途热交换器在工艺流程图上的预设计数据	316
表 9	水冷和空冷选用决策表	317
表 10	各种运行方式下的传热系数 k	318
表 11	空冷换热器的传热系数 k (翅片-风扇)	319
表 12	空冷器用作蒸汽冷却器的传热系数 k	320
表 13	浸在液体中的盘管换热器的传热系数 k	320
表 14	搅拌、混合装置的预设计准则和参数	322
表 15	工艺过程容器的预设计准则和参数	326
表 16	泵的设计准则和参数	329
表 17	贮槽的预设计准则和参数	332

绪 论

热工设备和系统就其通用性而言,可以说在任何工程领域都是不可缺少的。而将能源利用和转化作为主要目的的动力工程、制冷工程、核能工程、各种新能源工程,以及能源利用率对其技术经济指标有重要影响的工程领域,诸如石油、化工、冶金、食品、药品、造纸工程中,热工设备及系统的设计都占有十分重要的地位。有关各种热工设备的设计教程以及现代的系统设计和优化设计教程很多,各种文献杂志提供的设计方法更是不胜枚举。这些设计方法是前人宝贵经验的总结,不仅现在,将来也仍将作为工程设计的基础而发挥重要作用。本书并不希望能替代所有这些,只是希望能从更一般的概念出发来讨论工程设计以及传统设计与最优化设计概念之间的联系,帮助学生在工程设计中增强市场经济意识。

随着设备的大型化以及系统的复杂化,对热工设备和系统的设计要求越来越高。在现代工程设计中,已不仅要求有单机设计参数的最佳匹配,而且要求系统内所有设备之间的参数间也有最佳的匹配。

由于系统往往并非线性系统,对设备设计和系统设计都得借助非线性规划问题进行最优设计。热工系统的复杂性,使得系统设计又有本身的特点和规律,必须借助不完全相同的最优化方法。

近几年来,计算机的普及和运算能力的提高为复杂运算提供了技术保障,而线性和非线性规划问题以及组合数学的发展,为最优化设计提供了强有力的算法工具,使得包含最优设计方法在内的计算机辅助工程设计有了很大进展。虽然已有不少运筹学和最优化设计的教程,但大都偏重最优化的算法。本书将对这些算

法作最基本的介绍，详细的内容和程序可在相关的教材中找到。

本书将着重解决应用这些算法之前的数学模型建立的问题。由于这一环节如果没有必要的知识准备，常使学习过“运筹学”或者“最优化设计”课程的同学，对具体问题仍然一筹莫展。这些准备知识包括，了解热工设备和系统的传统设计方法与最优化设计的联系，建立目标函数时必须了解的经济学概念和工程界的“实用”方法，建立最优化设计模型时的一般程序和方法，以及最优系统合成的技术和一般方法。而这些知识既是目前最优化教材中极少介绍的内容，又是专门的设备设计原理这类教材中所缺少的内容。这就是热工设备和系统计算机辅助工程最优化设计在国内进展仍然比较缓慢的主要原因。

但是，可以毫不夸张地说，掌握最优化设计方法是企业界对未来工程师们的最基本要求，因为通过设计获得最大效益是企业对工程技术人员最基本的要求。这关系到在工业界走向市场的过程中，技术领域中人们观念上的一种准备。本书希望能达到上述的这些基本目标。

第一章 设计与最优化

设计是技术领域中工程师的工作，但在严密的理论科学与工程技术之间也有大量工作急待工程师们去做。正是这种工程实践活动推动着理论科学的发展和技术本身的发展。

设计是一种既基于基础科学又凭借已有经验的活动，当然也包括在这二方面获取新知识基础上的设计。对“设计”这一概念可说是众说纷纭。有人说，设计就是抄；也有人说，设计需要创新。但无论怎么讲，就一般的工程设计而言，设计至少有以下三个基本的共性：

(1) 预测性：设计是一种事先的预估活动。

(2) 实践性：以已有的知识和经验实现某种价值为目的。

(3) 自由度：设计没有唯一解，设计的自由度允许一种有前提的创新。即使在作发明创造的设计时，也只是设计的自由度更大些而已。

任何设计都具有这些共性，最优化设计概念也源于此。因此，它们在最优化设计的数学模型中得到反映也就不足为奇了。

1-1 设计的自由度

学过热力学、流体力学、传质传热动力学以及化学反应动力学的人们都了解，这些学科相应的微分方程组在相应的初、边值条件下构成的定解问题有唯一解。那么设计中的自由度从何而来呢？难道是解的唯一性被破坏了吗？当然不是解的唯一性被破坏，而是来自于积分过程。

任何工程设计，其对象总是宏观物体。我们要求取的常常就是构成定解的边值条件，而需满足的设计任务又是积分后的总量，即初值和终态。也就是说，设计中的变量数中包括边界条件

和初值。因此，且不说大多数工程设计还没有达到可以用微分方程来设计的程度。即使有可能，在上述的设计条件下也无法构成一个完整的正问题或反问题这样的定解问题，因此解也不会是唯一的。在目前水平上，设计中所利用的计算公式经常是微分方程组的积分形式。即使一个定常问题(稳态问题)，没有初值，但仍还要有几何边界的尺寸作为结构参数，在积分常数中还要出现进、出口边界上的热力学参数、流动参数。原来方程组除了原来的变量外，必须还要有积分常数，还要包括几何结构参数。因此，在积分方程组中总的变量数必定超过方程数。这样就不难理解设计问题不再是封闭问题，而不管其是正问题还是反问题以及混合问题。这也就是五花八门的设计以及设计方法的由来。正是由于存在着这种设计的自由度，才有了最优化设计的概念。

以最简单的一元管流为例。一元管流积分后的定常等截面管流的积分方程组为

$$\left. \begin{aligned} \rho v A &= \text{常数} = q_m \\ h_f &= \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g} \\ \lambda &= \lambda \left(Re, \frac{\varepsilon}{d} \right) \end{aligned} \right\} \quad (1.1)$$

式中： ρ 是流体密度； v 为速度； q_m 为质量流量； ε 为管子粗糙度； A 为截面积； d 为管径； l 为管长； h_f 为沿程阻力损失； λ 为沿程阻力系数。除由流体介质决定的 ρ 、 v 和管材决定的 ε 外，三个方程中仍有6个变量(流动参数 h_f 、 q_m 、 v ，结构参数 d 、 l ，特性参数 λ)。要求解这组方程，必须已知3个变量后才能成为定解问题。但在工程设计中，并不总是给出3个变量后才来设计的，有时只给出 q_m 一个变量，有时从现场设计条件中再给出一个 l 值。这样，对前者就有二个自由度，对后者则有一个自由度。

如何事先确定需要事先知道的变量，例如 d ，就产生了不同的设计方法。但大体上总不外乎以下几种方法。

1. 抄袭法

这种方法也常被冠冕堂皇地称之为“翻版设计”。这是一种尽可能地利用已有的成熟设计方法的设计方法，通常在设计者毫无把握的情况下或对目前已十分成熟的设计采用。在无关全局的设计中采用这种方法，经常是一种节省设计费用的十分有效的方法。因此它也是在设计中最广泛采用的方法，例如上述的管径 d ，完全可以根据已有的相同处理量的图纸来选定。

2. 经验法

把通过长期工程实践总结出的一些经验系数或参数作为经验值加以利用，就消除了原来的设计自由度。例如，在上面的管线设计问题中通常有所谓的“经济流速”，如按照单位长度允许压降决定的“经济流速”为

	允许压降	经济流速, m/s
非粘性流体	0.5 kPa/m	1~3
气体	管内压力的0.02%	15~30
低压过热蒸汽	管内压力的0.02%	10~30

这些经验参数对整个地决定上述问题(包括设备和系统)经常是至关重要的。正确地选择这些参数常导致快速而准确的设计估算，因此设计师非常重视这些经验参数。在最优化设计中利用这些值，也可起到减少设计变量，或起到提供约束条件的作用。

3. 参数分析法

在上述例子中，可通过选择一系列 d 值计算相应的压降，进行比较后确定出投资省、压降相对较小的设计。由于参数分析法已扩展到对经济性的比较，所以这种方法在相当多的冠之以“最优化”设计的文献中出现。确切地讲，这种方法是一种穷举方法，对于少数参数是可行的，但并不是严格意义上的最优化。

4. 最优化方法

这种方法按照一定的设计思想建立诸如最小成本、最大收益这样的目标函数(如变量 d 的函数)，用数学规划方法寻找最小目

标函数值所对应的变量值(如 d)。这种建立在线性规划或非线性规划方法基础上自动寻优的方法,不仅计算效率高,而且可以处理穷举法无法处理的多变量问题。最优化方法在一些情况下可以处理多至几十个乃至上百个变量的问题。在连续变量时,它不会产生穷举的参数分析法可能将最优点疏漏的问题,而在处理非连续变量时也有相应的组合数学方法可以利用。

可以说,在已有的设计原理教程中所列举的方法总不外乎上述四种方法,成功的设计师要学会在具体的工程设计中综合应用这些方法。

最优化设计是否唯一呢?常听一些设计者振振有词地介绍自己的设计是最优化的,似乎最优化解是唯一的。必须避免这种误解。不仅在设计中有最优、次优这样的序列解,更重要的是要了解,在同样的设计任务中,设计思想的改变,经济条件的改变(经常随地域而变),设备和制造工艺的改进,都将影响最优化的目标函数以及最后的结果。由于优化随目标而异,因此最优化解不是唯一的。

设计的自由度构成了一个由 n 个自由度构成的 n 维的设计空间(一个 n 维欧氏空间 E^n)。这个解空间是一个无穷解空间。对行将进入工业界参与工程设计的工科学生来说,了解和建立起这种概念是十分必要的。

1-2 目标函数与技术经济性

在 E^n 维空间中的任一点,对应着可以说是完全“平等”的可行解。我们在市场上看到的成百上千种的汽车、收音机这样的商品大千世界,正对应着这无穷的可行解。但顾客心中有一个自然而然的问题,即究竟哪一种商品是既好又便宜的呢?“上帝”的要求也就是生产者的出发点,生产价廉物美的商品,就是设计环节中的技术经济性问题。因此,在设计中如何判断设计优劣的标准就必然来自技术经济性。据此,通过建立所谓的目标函数,就可

以对从可行角度来说“平等”的设计分出优劣。对目标函数来说，它们不再“平等”。

目标函数与设计的第二个共性——实践性有关。工程设计都是为了取得使用价值和价值而进行的。虽然在一些军事和尖端技术领域中会采用安全性、可靠性作为设计目标，但随着这些领域的商品化，产品的社会化生产最终将导致目标的经济性。

技术的先进性一般地是保证取得最大的使用价值，而并不完全保证经济性。达不到可以接受的经济性，再先进的技术也会束之高阁。同时，在设计中对技术的要求还应包括取得最大的价值，亦即技术经济性，因此目标函数经常使用的是经济性目标。

在工程实践中也经常利用技术指标(如设备的某一项性能指标)来构造目标函数。当这种性能对经济指标有单调影响，或者几乎不影响经济指标时，采用技术指标与采用经济指标构造目标函数有相同的结果。在设备和系统中的某一部件的设计优化中，经常会在线性范围内满足上述情况。但如上述，一般情况下用经济指标作目标函数通常是正确的。

即使是技术指标，在设计中如何选择也需分析和判断。下面以换热器设计为例进行说明。

换热器设计所用的积分方程组为

$$\left. \begin{aligned} mc_p \Delta t &= Q \\ Q &= kA \Delta t \\ \Delta t_m &= \Delta t(t_1', t_2', t_1'', t_2'') \\ k &= k(\alpha_1, \alpha_2, \lambda_i, \delta_i) \\ \alpha_i &= \alpha(Re, Pr) \end{aligned} \right\} \quad (1.2)$$

换热器设计通常给定热负荷 Q 。在给定介质进出、口温度的条件下，设计中通常取较高的表面传热系数^① α_i ，提高 k 值，以便能尽可能地减少传热面积 A ，降低设备投资费用。强化传热技术就

① 表面传热系数即对流换热系数，见GB 3102.4-93。

是改进 k 值的问题，但 α 的提高几乎唯一地取决于 Re 。这就不仅伴随动力消耗增加的副作用，还会增加机泵的投资，因此不能单纯将 k 值和 A 值选作目标函数。由此也可看出，技术的改进仍受制于经济效益的评估。

换热器设计中常可看到有关热力学准则的讨论。仔细分析可知，有些是似是而非的。

从热力学第一定律看，要尽可能保证热量回收，除保温、减少散热损失外，重要的是允许的最小温差。换句话说，只要有足够的面积，就可以回收最多的热量。因此，事实上这是一个热力学第二定律问题。但对单台换热设备而言，经常是已给定了进、出口的介质温度，在逆流条件下可保证给定传热温差下的最小损失。所以，为了回收热量，任意缩小最小允许传热温差是与给定温度的前提相矛盾的，因此对单台换热器是无法考虑热力学第二定律准则的。至于摩阻引起的损失，则和强化传热是相容的问题，可一并加以考虑。

对热交换网络(系统)的设计，由于有一系列的冷热源，例如在乙烯裂解炉裂解气分离系统中的多股流换热器以及石油炼制装置中的换热器网络中，物料间最佳换热匹配就有尽量减少传热温差的问题，并将影响系统总的传热面积。因此，在这种系统中传热学考虑中的 k 值和 A 值(如翅片)与 $\Delta t_{\min}$ 的考虑需平行兼顾。从中可以看出单纯的技术指标的多目标性。为了综合考虑，必须从经济性目标来考察。

常用的经济学目标函数是最小成本或最大收益，即

$$\min_{\{x\}} C = \text{投资/折旧年限} + \text{年维修费用} + \text{年运行费用} \quad (1.3)$$

$$\min_{\{x\}} C = \text{年总收益} - \text{总成本} \quad (1.4)$$

看上去，这些目标函数似乎简单的一目了然，但实际上在建立设备或系统的目标函数时需做大量的细致工作。