

# 强化传热元件结构优化方法的研究

李维仲 (大连理工大学)

孟 钢 胡连喜 (抚顺石油学院)

〔摘要〕从能量综合利用的角度出发,用多目标数学规划的方法研究了强化传热元件结构尺寸的最优化问题,得到了合适的优化方法。同时还分析了权系数对优化结果的影响。这对强化传热元件的研究、设计和使用提供了重要的、更科学的方法。

关键词 强化传热元件 优化 权系数

分类号 TK 124 219

## 1 前言

在传热设备中,为了提高传热量,通常对传热过程施以强化。强化传热元件的使用就是基于这个原因。由于强化传热元件的使用,虽然获得了较高的传热量,但也增加了流体流动阻力,显然增加流动阻力是人们所不期望的。近年来对强化传热结构优化有些报导<sup>[1~3]</sup>,但从方法来讲,主要采用实验方法找出使传热量大或阻力小的结构尺寸;另一种方法是理论的方法,这种方法单从传热量的增强考虑一种最优强化传热元件的形状。由于这两种方法都不能全面地反映上述两方面得到最佳尺寸,若需全面地、科学地对强化传热元件的结构进行优化,可使用数学规划的方法,得到一个综合两方面因素在内的最佳结构尺寸。

## 2 数学模型的建立

如上所述,使用强化传热元件一方面增加了传热量,另一方面也增加了流动阻力。在实际工程应用中,总期望传热设备的传热量大、阻力小。因此本文就从这样方面建立两个目标函数。即最大传热量和最小流动阻力:

$$\begin{cases} \max Q(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \min \Delta P(x_1, x_2, \dots, x_n) \end{cases} \quad (1)$$

约束条件为:

$$\text{s. t. } a_i \leq x_i \leq b_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

式(1),(2)中, $Q$ 为传热量; $\Delta P$ 为流动阻力; $a_i, b_i$ 及 $x_i$ 分别表示设计变量的下界、上界和设计变量。

从式(1)(2)中明显看出:该问题是有约束多目标非线性数学规划问题。

## 3 优化方法的确定

解有约束多目标非线性数学规划的方法<sup>[4]</sup>很多,这里采用评价函数方法中的线性加权求和方法。由于在评价函数中各单目标

收稿日期 1992 10 19 修改定稿 1993 09 12

本文联系人 李维仲 男 36 讲师 116024 大连理工大学动力系

的量纲不同,因此要对各目标函数进行无量纲化处理。本文中所采用的无量纲化方法是将强化后的传热量和压力降与未强化时的传热量和压力降相比,即:

$$F_1 = Q_a/Q_o \quad (3)$$

$$F_2 = \Delta P_a/\Delta P_o \quad (4)$$

式(3)、(4)中,脚标“a”表示强化后的物理量;“o”表示未强化时的物理量(即光管)。

评价函数的加权求和关联式:

$$\min(-\lambda_1 F_1 + \lambda_2 F_2) \quad (5)$$

式(5)中  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  表示权系数,它们符合:

$$\lambda_1 + \lambda_2 = 100\% \quad (6)$$

式(5)中的第一项的负号是将  $F_1$  求最大变为求最小。权系数的确定,要视设计者的希望和实际工程要求来确定。为了解权系数对优化结果的影响,进一步讨论如下。

无量纲化后的数学模型为:

$$\begin{cases} \min(-\lambda_1 F_1 + \lambda_2 F_2) \\ \text{s. t. } a_i \leq x_i \leq b_i \quad i = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (7)$$

由式(7)可看出,该数学模型是一个单目标数学规划问题。解有约束非线性规划问题的方法<sup>[5,6]</sup>较多。通过各种方法的比较,我们采用了适用本问题的方法——随机试验法和 Box 复合形法的组合法。调试发现,随机法精度较差,若提高精度收敛速度慢。Box 复形法可解目标函数凸性很差的问题,而且不需对原函数进行加工。调试时发现,如能给该方法一个较好初始可行点,结果精度较高、收敛速度也较快。因此本文综合这两种方法的优点构成一组合方法。即用随机试验法为 Box 复形法产生一初始可行点,然后调用 Box 复形法求出最终的最优解。通过调试多个考题,证明这种方法是可靠的。下面通过一例说明该方法的可靠性。

#### 4 例题

为了说明该方法的使用及可靠性,在诸多的强化传热元件中选择一种具有代表性的传热元件——内螺纹管。

本例题取自文献[7]、[8]提供的单头,螺纹角为 20°;内径为  $D = 45 \text{ mm}$  的无缝轧制内螺纹钢管为研究对象。实验表明,螺纹高度  $e$ 、螺纹间距  $s$  和雷诺数  $Re$  对传热和流动阻力有很大影响。故选择  $e$ 、 $s$  和  $Re$  为设计变量。对  $e$ 、 $s$  无量纲化后得  $x_1 = e/D$ ,  $x_2 = s/D$ ,  $x_3 = Re$ 。强化后传热元件的传热面积与未强化时传热面积比为:

$$F_a/F_o = 1 - x_1/x_2 \quad (8)$$

由传热学<sup>[9]</sup>可知,对管内对流换热的传热量及流动阻力可由下式计算:

$$Q = \alpha F \Delta t \quad (9)$$

$$\Delta P = f \frac{L}{D} \frac{\rho u_m^2}{2} \quad (10)$$

- 式中  $\alpha$ —— 对流换热系数  $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ;
- $F$ —— 换热面积  $m^2$ ;
- $\Delta t$ —— 流体与壁面之间的传热温差  $^\circ C$ ;
- $f$ —— 流体流动摩擦系数;
- $\rho$ —— 流体密度  $kg/m^3$ ;
- $u_m$ —— 流体平均流速  $m/s$ ;
- $D$ —— 传热管内径  $m$ ;
- $L$ —— 传热管长度  $m$ ;

由文献[7][8]可查得内螺纹管管内强迫对流换热的关联式以及摩擦系数的关联式,即:

$$N_{ua} = 1.138 P_r^{0.4} (e/D)^{0.478} (s/D)^{-0.383} (Re)^{0.606} \quad (11)$$

$$f_a = 2.31 (e/D)^{1.55} (s/D)^{-0.7} (Re)^{-0.075} \quad (12)$$

适应范围:  $0.016 \leq e/D \leq 0.05$

$$0.35 \leq s/D \leq 2.22$$

$$2.5 \leq Re \times 10^{-4} \leq 5$$

光管管内强迫流动对流换热的准则方程及摩擦系数的准则方程为:

$$N_{uo} = 0.023 P_r^{0.4} R_e^{0.8} \quad (13)$$

$$f_o = 0.046 R_e^{-0.2} \quad (14)$$

适用范围:  $10^4 \leq Re \leq 12 \times 10^5$

$$0.7 \leq Pr \leq 120$$

将式(11)~(14)代入式(3)、(4),并取强化传热后与未强化传热时具有相同流速,相同传热温差,于是得:

$$F_1 = 2.625(1 + x_1/x_2)x_1^{0.478}x_2^{-0.383}x_3^{-0.194} \quad (15)$$

$$F_2 = 4.477x_1^{1.55}x_2^{-0.7}x_3^{0.125} \quad (16)$$

式(15)、(16)中  $x_1 = 10e/D, x_2 = s/D, x_3 = Re \times 10^{-4}$ ,再将式(15)、(16)代入式(7)且约束条件做相应的替换得如下数学模型:

$$\begin{aligned} \min = F(\bar{x}) = & -\lambda_1 2.625(1 + x_1/x_2) \\ & \times x_1^{0.478}x_2^{-0.383}x_3^{-0.194} \\ & + \lambda_2 4.477x_1^{1.55}x_2^{-0.7}x_3^{0.125} \\ \text{s. t. } & 0.16 \leq x_1 \leq 0.5 \\ & 0.35 \leq x_2 \leq 2.22 \\ & 2.5 \leq x_3 \leq 5 \end{aligned} \quad (17)$$

式(17)就是本例题的数学模型。需说明的是本例题取管内介质为水,并以平均温度  $t_m = 60^\circ\text{C}$  时为定性温度。如取其它物质作为介质则不需改变式(17)中的任何数据,这是因为有关物性项在做无量纲处理时已约掉。因此,式(17)适用于该种流动的任何介质。

## 5 计算结果及分析

该程序用 FORTRAN77 语言编写,在 386 机调试,程序框图见图 1。结果如下:

$$x_{\text{opt}1} = 0.4539$$

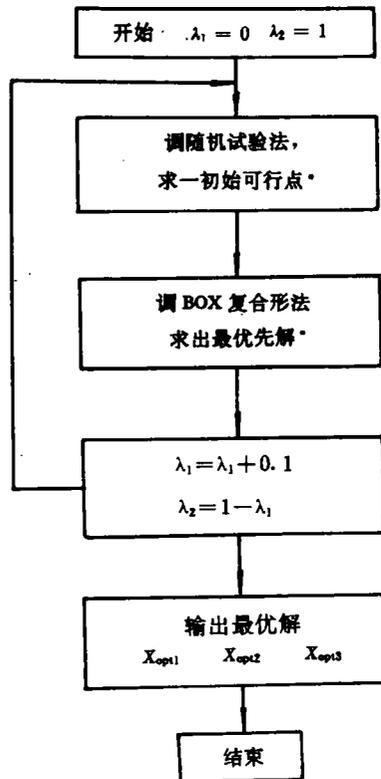
$$x_{\text{opt}2} = 0.3500$$

$$x_{\text{opt}3} = 2.7728$$

(注:该结果是在  $\lambda_1 = 0.5, \lambda_2 = 0.5$ )

从优化结果看,除  $x_{\text{opt}1}$  落在约束中间位置外,其余两个一是下界另一个接近下界。说明综合考虑传热量和流动阻力情况下,中上等螺纹高度,小螺距,较小雷诺数是内螺纹管的最佳尺寸和运行参数。该结果可从数学模型(17)中分析。由模型可见,增加螺纹高

度可增加传热量,同时也增加了流体流动阻力。螺纹间距  $x_2$  增加使传热量减小,阻力也减小,但传热量减小的幅度比阻力减小的幅度大,这样就要求较小的螺距。雷诺数的增加使传热量减小而使阻力增加,为了有较大传热量和较小的流阻,使雷诺数接近下限最合适。由此可见,优化结果正是符合上述分析的结果。这就证实了优化方法的正确性及可靠性。



\* 参阅文献[5]、[6]

图 1 程序框图

前面说过权系数对设计者来说应有一适当的选择。为了说明权系数对优化结果的影响,本文对此也进行了讨论,分别取不同的权系数进行优化计算,结果见表 1。

由表 1 可见,随  $\lambda_1$  的增加,各设计变量的

表1 权系数对优化结果的影响

$x^*$ \ $\lambda_1$	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
$x_{opt1}$	0.160	0.160	0.160	0.160	0.238	0.454	0.464	0.466	0.467	0.467	0.467
$x_{opt2}$	2.203	1.965	1.900	0.489	0.358	0.350	0.350	0.350	0.350	0.350	0.350
$x_{opt3}$	4.260	2.675	2.505	2.682	2.500	2.773	2.836	2.844	2.851	2.851	2.851

最优值是变化的,且规律不同。这些变化说明权系数起很大的作用。因为 $\lambda_1$ 的增加意味着传热量一项在评价函数中起的作用逐渐增强,而流阻一项在评价函数中起的作用就逐渐减弱。要适应这样的变化,各设计变量的最优解也在改变。例如 $x_{opt1}$ 这一设计变量,如果 $\lambda_1$ 增加就要求传热量增强。由此可知, $x_1$ 一项是使传热量增加的量,因此 $x_1$ 增加符合 $\lambda_1$ 增加的要求。由此可表明权系数对优化结果有很大影响。因此在使该方法时应注意。

## 6 结束语

通过对例题的计算表明:这种方法是行之有效的、合理的、可靠的,可在工程中应用。特别对于同类问题,只要有传热量和结构尺寸及雷诺数的变化关系,以及流阻与结构尺寸及雷诺数的变化关系,就可建立本例题相似的数学模型,用本文所述方法就可确定强化传热元件的最佳结构尺寸和运行参数。

通过对不同权系数的计算结果表明,权系数对优化结果有明显的影响,这就提醒设计人员用本方法时必须慎重考虑权系数的选

择,使其适合于设计人员的要求或工程实际的要求。

## 参 考 文 献

- 1 Honda H, Nozus. Effects of Bounde Depth and Working Fluid on the Optimization Fin Geometry of a Horizontal low Finned Condenser Tube. Proc. 2nd Int. SYMP. Condensers and Condensation. HTFS. 1990; P407
- 2 Hui—Ren Zhu, Ideroshi Honda. Optimization of Fin Geometry of a Horizontal low—Finned Condenser tube. 3rd Int. Heat Transfer SYMP. and 5th Transport Phenomena SYMP. Tsing Hua University. Beijing China Oct. 1992
- 3 Carnavos T C. An Experimental Study; Condensaing R—11 on Auhgmented Tubes. ASME. Paper 80—HT—54. 1980
- 4 胡毓达. 实用多目标最优化. 上海科学技术出版社. 1990. 4
- 5 席少林等. 最优化计算方法. 上海科学技术出版社. 1983. 8
- 6 万耀青等. 最优化计算方法常用程序汇编. 工人出版社. 1983
- 7 林宗虎. 强化传热及其工程应用. 机械工业出版社. 1987. 2
- 8 董凡等. 波纹管综合性能研究和探讨. 热能动力工程. 1990.(1)
- 9 扬世铭. 传热学. 高等教育出版社. 1989. 10

# 欢 迎 刊 登 广 告

verized anthracite coal burner. Such burners feature combustion stability, relatively high combustion efficiency and a desirable tendency of slagging prevention and low NO<sub>x</sub> emissions. **Key words:** *pulverized anthracite coal, high concentration, burner*

- (79) **An Experimental Study of Factors Exercising An Influence on the Separation Efficiency of Internal Circulation Fluidized Bed** ..... Wang Yongwu, Wang Huaibin, Chen Chongsu (*Harbin Institute of Technology*)

An experimental investigation was undertaken on a cold-state test model of the factors liable to have an effect on the separation efficiency of internal circulation fluidized bed. On the basis of an analysis of the test results an optimum range of secondary air feeding rate is given with the nozzle angle and layout mode being studied and discussed. **Key words:** *internal circulation, fluidized bed boiler, separation effectiveness, secondary air feeding rate*

- (85) **The Influence of Elevation above Sea Level on the Heat Transfer in Boilers** ..... Che Defu, Hui Shi'en, et al (*Energy & Power Engineering Dept. of Xi'an Jiaotong University*)

Based on the currently available thermal calculation method for boilers analysed and discussed in this paper is the influence of elevation above sea level on the following: boiler furnace heat exchange, convection heat transfer coefficient, radiation heat transfer coefficient, flue gas physical properties and the heat transfer rate of the boiler as a whole. The general tendency of the above influence is also given. **Key words:** *elevation above sea level, heat transfer, boiler*

- (89) **A study on the Structure Optimization of Intensified-Heat-Transfer Elements** ..... Li Weizhong, Mang Gang, Hu Lianxi (*Department of Mechanical Engineering of Fushun Petroleum Institute*)

From the viewpoint of energy comprehensive applications the structure size optimization of intensified-heat-transfer elements has been studied through the use of multi-objective mathematical programming. A suitable optimization method has been developed with the effect of weighted factor on optimization results also being analysed. As a result, the authors provide a major and highly scientific approach for the study, design and utilization of intensified-heat-transfer elements. **Key words:** *intensified-heat-transfer element, optimization, weighted factor, mathematical model*

- (93) **Two-dimensional Temperature Field Calculation of Electric Heating Tubes** ..... Xu Jinliang, Chen Tingkuan (*Xi'an Jiaotong University*)

Taking account of the fact that due to the effect of natural convection the single-phase flow and two-phase flow in horizontal and inclined tubes will lead to a non-uniformity of tube wall heat transfer factor along the peripheral direction the authors have proposed a numerical calculation model for the electric heating tube two-dimensional temperature field by employing the technique of "radial node internal contraction" and solved the problem of inadequacy of inner wall surface boundary conditions by utilizing the two boundaries of the outer wall surface. In addition, the conception of parallel network resistance heat generation has been applied to deal with the non-uniform internal heat source item. With the help of the above-cited model pro