



式 (3) 说明, 当右端列向量  $d$  有扰动  $\Delta d$  时, 所引起的解的相对误差, 不超过其相对误差的一个倍数  $\|A\| \|A^{-1}\|$ 。当系数矩阵  $A$  有扰动或二者同时有扰动时, 可以得到相似的结论。  $\|A\| \|A^{-1}\|$  即定义为线性代数方程组的条件数, 记为  $\text{cond}(A)$ 。条件数与所取的矩阵范数有关, 本文使用

2 范数, 其定义是  $\|A\|_2 = \sqrt{\lambda_1, \lambda_n}$  为  $A^T A$  的最大特征值。条件数反映了线性方程组  $Aq = d$  的解对初始数据误差的敏感程度。其值越大, 这种敏感程度越高, 即对很小的初始误差  $\Delta A$  或  $\Delta d$ , 解  $q$  的相对误差就有可能很大, 从而大大破坏了解的精确度。因此, 在测温精度大体一致时, 此测试方法的精度主要由系数矩阵的条件数来决定。系数矩阵的条件数也就反映了把一个特定导热系统用作热流测量手段的优劣。

因研究区域几何形状的复杂性以及边界条件的多样性等因素, 我们采用有限单元法数值计算求解这一导热问题<sup>[4]</sup>。

### 3 误差分析及讨论

引起系数矩阵  $A$  中各元素值变化的因素很多, 讨论中采用变换某个变量, 而其余变量保持不变的方式, 这样就可以得到所关心的变量对系数矩阵  $A$  及其条件数的影响。为便于讨论, 对图 1 所示的几何区域和边界条件, 采用以下参数作为基本工况:

$$R_i = 20 \text{ mm}, R_o = 25 \text{ mm}, H = 50 \text{ mm}, S = 50 \text{ mm},$$

$$B = 7.5 \text{ mm}, h_f = 4000 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}), h_a = 40 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}),$$

$$\lambda_m = 40 \text{ W}/(\text{m K}), \lambda_f = 0.15 \text{ W}/(\text{m K})$$

#### 3.1 测试边界上热流分段数的选择

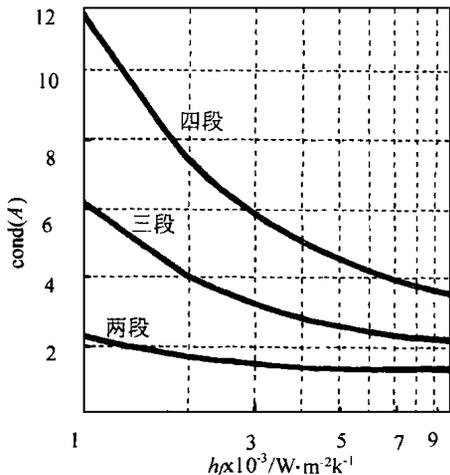


图 2 不同热流分段的  $\text{cond}(A) - h_f$  曲线

一般来说, 沿管壁外侧直至鳍片, 热流不是均匀的, 可以用一种离散的热流分布来近似连续的热流分布, 即把膜式壁沿炉膛内侧的边界分成若干段, 假定每一小段上的热流密度都是均匀的。只要求出各分段上的热流, 则整个膜式壁

上的热流及其大致分布即可得出。在上述基本工况条件下, 若将膜式壁的内边界只分为一段, 即假定膜式壁中沿管壁至鳍片的热流密度都是均匀分布的, 则条件数等于 1, 从误差传递的角度看, 这是最有利的。但在更多情况下, 为了深刻理解炉内的传热情况以指导锅炉设计和运行, 还希望了解热流沿边界的变化情况, 此时, 有必要将膜式壁假定为多个未知热流段。图 2 绘出了将膜式壁内边界划分为 2~ 4 个热流段的情况下, 系数矩阵  $A$  的条件数的变化

从图中可以看出, 在相同的工况下, 划分较多段数所得到的系数矩阵的条件数比分为较少段数时的条件数大很多。随着热流段数的增加, 条件数升高得很快, 其原因是随着需要求解的未知热流的个数增加, 系数矩阵维数增加, 稳定性变差。在本文设定的工况下, 如原始数据的精度相同, 则划分为三段均匀热流将比划分为四段热流可信度要高, 且其测试精度大致可保持在工程上可以接受的范围内。在以下的讨论中, 都以划分为三段热流进行讨论。

#### 3.2 测点位置的选择

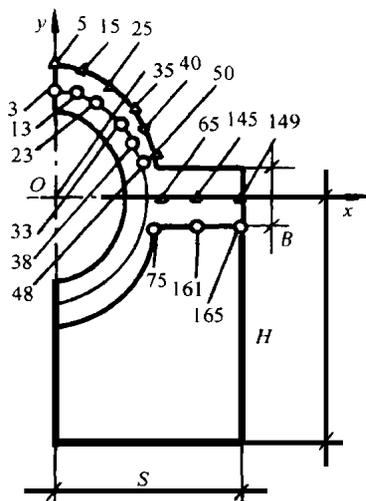


图 3 测点位置示意图

测点位置的正确选取对于应用此方法测定膜式壁热流也是十分重要的。按照本测试方法, 划分为三段均匀热流的情况时, 应该设置三个测点。计算模拟表明: 把一、二测点选择在管壁厚度的中心环上时, 即如图 3 中的 3, 13, 23, 33, 38, 48 各点, (编号为数值计算中采用的节点编号, 下同), 条件数都比选择相应的管壁最外侧的点 5, 15, 25, 35, 40, 50 时的条件数要高一些。再考虑实际安装测温元件的方便, 可把一、二测点的布置选择为图 3 中的 5, 40 两点。

对于鳍片上的测点, 选择不同位置时, 系数矩阵的条件数列于表 1。研究表明, 鳍片上热流的方向主要是从鳍片中心流向管壁 (沿  $x$  轴负方向), 因此在  $y$  轴方向上的对应各点条件数差别不大。值得注意的是, 在  $x$  轴方向上, 移动测点的位置引起的条件数差别较大, 如点 165 和点 75 其原因是: 对于条件数来讲, 系数矩阵的主对角元素起着重要的作用。计算表明, 选择点 165 作为测温点时,  $\theta_3(P_3)$  值相比于  $\theta_1(P_1)$  和  $\theta_2(P_2)$  大得较多 (3~ 5 倍), 相比于  $\theta_3(P_1)$

对于鳍片上的测点, 选择不同位置时, 系数矩阵的条件数列于表 1。研究表明, 鳍片上热流的方向主要是从鳍片中心流向管壁 (沿  $x$  轴负方向), 因此在  $y$  轴方向上的对应各点条件数差别不大。值得注意的是, 在  $x$  轴方向上, 移动测点的位置引起的条件数差别较大, 如点 165 和点 75 其原因是: 对于条件数来讲, 系数矩阵的主对角元素起着重要的作用。计算表明, 选择点 165 作为测温点时,  $\theta_3(P_3)$  值相比于  $\theta_1(P_1)$  和  $\theta_2(P_2)$  大得较多 (3~ 5 倍), 相比于  $\theta_3(P_1)$

和  $\theta_3(P_2)$  就更大,使其余系数作用减弱,误差增大;而选择点 75 时,由于此点温度比 165 点温度要低很多,则可以使  $\theta_3(P_3)$  明显减小,大致处于与  $\theta_1(P_1)$  和  $\theta_2(P_2)$  相当的水平,从而使系数矩阵得到改善,条件数降低。计算模拟表明,把该测点布置在靠近鳍片根部处,有利于降低条件数,提高总体的测试精度。

表 1 鳍片上的测点三选取不同位置时对应的条件数

测点三位置编号	65	145	149	75	161	165
cond(A)	3.20	6.32	7.48	2.82	6.21	7.37

当然,可能有比 (5, 40, 75) 三测点精度更高的测点或测点组合,但此一组合在用于实测时,测点布置较容易,且相应的条件数已足够低,能够满足实际测试的要求,在以下的讨论中即以此三测点为基础。

### 3.3 水冷壁内侧换热系数的影响

由于在计算确定系数矩阵  $A$  时,管壁内侧换热系数  $h_f$  必须预先给定,即需要从已有的对流换热关联式来确定  $h_f$ ,这样得到的  $h_f$  可能带有相当大的误差。这种误差对最终确定的热流密度的影响是需要研究的。文献 [5] 引入误差传递因子的概念对此进行了讨论,指出在绝大多数实际工况下,换热系数的误差传递因子小于 1,说明水冷壁内侧换热系数的误差在传递过程中是减弱了,并且随着换热系数的增大,其误差传递因子逐渐降低。但由于这种误差传递因子的个数为未知热流数的平方,而且它们与未知向量  $q$  本身的值有关,这就给用这种方法详尽的分析讨论这一问题带来了困难。以下的讨论中,运用条件数的概念可以得到相似的结论,但因条件数与被测值的大小无关,因此得到的结论更简明且有普遍性。

水冷壁内侧换热系数对解误差的影响可参看图 2 从图中可以看出,在换热系数  $h_f$  较小时,条件数较大,但随着  $h_f$  的增大,条件数迅速地减小。在工程实际中,膜式壁管中的换热方式是水的受迫对流沸腾换热或受迫对流换热,其对流换热系数  $h_f$  大致在  $5 \times 10^3 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$  以上,因此这一换热系数的误差对热流测量的影响不大,该方法用于膜式壁的热流测量是可行的。

### 3.4 鳍片尺寸的影响

在水冷壁传热中,鳍片的传热占有重要的地位,通常可占到水冷壁吸热的 30% 以上。鳍片尺寸的变化对其中的热流大小和分布影响很大,同样对该热流测试技术的影响亦需要研究。在基本工况的其它条件不变,且三测点分别是点 5 40 75 时,鳍片尺寸变化引起的条件数变化见表 2。

小,节距  $S$  的增大而增大。但在正常的工程应用范围内,不同鳍片尺寸所对应的条件数差别并不太大,表明其对误差的影响在当前的测点设置条件下并不明显。因此,对于实际工程范围内的各种鳍片尺寸,此测试技术都是可行的。

表 2 不同厚度和宽度的鳍片所对应的系数矩阵的条件数

$B$ (mm) / $S$ (mm)	4	6	8	10
50	3.24	2.97	2.79	2.73
60	4.29	3.87	3.55	3.34
70	5.39	4.88	4.46	4.17

## 4 结束语

系数矩阵的条件数刻划了线性代数方程组的性态,反映了解向量对原始数据误差的敏感程度。利用这一性质,本文通过所导得的线性代数方程组 (2) 的系数矩阵的条件数,讨论了膜式壁上稳态热流测量技术中,导热系统本身的各种参数对热流测量精度的影响。以下结论对于实际应用此测试技术具有指导性意义:

(1) 在实际应用此热流测量技术时,边界的热流分段数和测点位置的选择是重点考虑的因素。应该针对测试目的和测试精度的要求确定合适的测点数目。

(2) 在工业领域内,膜式壁管内侧换热系数一般较高,对温度分布和热流测试精度的影响很小,因此通过对流换热关联式估算得到的换热系数是可以接受的。

(3) 鳍片尺寸的变化在合适的测点设置条件下对误差的影响不很大。对于实验室研究用的装置,可以通过合理选取鳍片的尺寸,进一步改善测定热流分布的精度。

## 参考文献

- [1] Grace J R. Heat transfer in high velocity fluidized beds. In *Proceeding of the Ninth International Heat Transfer Conference*, Jerusalem, 1990: 329~ 339.
- [2] Anderson B and Leckner B. Experimental methods of estimating heat transfer in circulating fluidized bed boilers. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1992, 35: 3353~ 3362.
- [3] Fang Z H, Grace J R and Jim C J. Local particle convective heat transfer along surfaces in circulating fluidized beds. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1995, 38: 1217~ 1224.
- [4] Fang Z H, Xie D L, Diao N R, Grace J R and Lim C J. A new method for solving the inverse conduction problem in steady heat flux measurement. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1997, 40: 3947~ 3953.
- [5] Fang Z H, Xie D L and Diao N R. Error analysis of heat flux measurement on membrane water walls. In *Proceeding of the 11th International Conference on Heat Transfer*, Seoul, 1998.

(渠源 编辑)

〔刊,中〕/Huang Jintao, Chen Tingkuan (Xi'an Jiaotong University) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1999, 14(5). - 340~ 342

Based on process basic equations, the authors have set up a dynamic characteristics model for single-phase spiral and vertical tube coils. By way of secondary model building obtained is a group of differential equations, which can be solved directly. The comparison of theoretical results and experimental curves attests to the validity of the above-cited model. The results given in this paper may serve as reference data and information during the further study of the dynamic characteristics of once-through boiler spiral tube-coil water walls. **Key words** spiral tube coil, dynamic characteristics, integrated parameters, differential equation group

应用激光多普勒测速仪研究湍流有旋自由射流 = **Research on Turbulent and Swirling Free Jet Stream with the Help of a Laser Doppler Anemometer**〔刊,中〕/Xiao Kejian (East China University of Science & Technology) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1999, 14(5). - 343~ 346

An experimental research is conducted of a movable block swirler-produced velocity field and turbulent flow field of a strongly turbulent and swirling free jet stream. The results of study show that this type of swirler is highly conducive to the formation of a central recirculation zone. The average velocity of the jet stream assumes along the axial direction a rapid decrease with the swirling free jet exhibiting an anisotropic turbulence, especially in the recirculation zone. Also discussed in the paper is the transmission direction of the turbulent flow momentum in the flow field. **Key words** turbulent and swirling free jet, laser Doppler anemometer, average velocity distribution, turbulent flow field

汽轮机通流部分故障诊断的热力判据研究 = **A Study of the Thermodynamic Criteria for the Failure Analysis of Steam Turbine Flow Path Components**〔刊,中〕/Yang Yongping, et al (North China Electrical Power University) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1999, 14(5). - 347~ 349

A systematic analysis and study is conducted of the four categories of thermodynamic criteria (i. e., relative inner efficiency, exergy efficiency, equivalent flow path area and included angle of expansion lines) generally applied to the failure diagnosis of steam turbine flow path components. The mechanism of diagnosis and a method of execution are proposed for each kind of criteria. In addition, taking the 200 MW power generating unit of a power plant as a specific example, the authors have performed a quantitative analysis and computation concerning the above-cited criteria. **Key words** steam turbine, flow path components, failure diagnosis, thermodynamic criteria

膜式壁上稳态热流测量技术的误差分析 = **Error Analysis of the Technique for Measuring Steady-State Heat Flux on Membrane Water-walls**〔刊,中〕/Fang Zhaohong, Liu Xiaolei (Shandong Institute of Civil Engineering), Yue Guanxi (Qinghua University) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1999, 14(5). - 350~ 352

This paper focuses on a new approach for measuring heat flux density on a solid wall surface by way of solving inverse heat conduction problems. On this basis the authors have by means of a numerical simulation method further discussed from a theoretical perspective the effect of various factors of the heat conduction system itself on the error of this measuring method. Some guidelines concerning the practical use of this method are also presented. **Key words** heat flux measurement, error analysis, number of conditions

用等效热降法确定排汽压力变化对机组经济性的影响 = **Determination of the Impact on Machine unit Economic Performance of Exhaust Steam Pressure Variation by an Equivalent Enthalpy Drop Method**〔刊,中〕/Li Xiuyun, Yan Junjie, et al (Xi'an Jiaotong University) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1999, 14(5). - 353~ 355

With regard to the impact on machine unit economic performance of exhaust steam pressure variation a new quantitative method, i. e., exhaust pressure equivalent enthalpy drop calculation method, is expounded in this paper. On the basis of steam turbine off-design operating conditions the proposed method determines