

五孔探针实验数据处理的线性插值法

岳国强, 韩万金, 芦文才, 王仲奇

(哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要: 在使用五孔探针校准数据时通常采用样条插值或最小二乘法拟合, 相同的探针校准曲线用这两种方法分别插值得到的结果有较大的差异。本文通过对两种方法理论上分析, 提出了一种实用性更强的线性插值法。对于特性良好的探针, 该方法的精度接近样条插值; 对于特性较差的探针, 能够在不改变探针特性曲线的基础上保证插值精度。相对于样条插值和最小二乘法拟合, 该方法有着更为广泛的适应性。

关 键 词: 五孔探针线性插值; 样条插值; 最小二乘法

中图分类号: TK313 文献标识码: A

1 引 言

五孔探针用于测量气流的数据特性参数, 如流速的大小和方向、总压和静压。由于这种方法具有测量原理简单、使用方便和探针不易损坏及便于维修等优点, 目前仍是测量三维流场的主要手段之一^[1-3]。应用五孔探针测量三维流场有 3 种方法, (1)对向测量法; (2)半对向测量法; (3)非对向测量法。Treaster & Yocum^[4] 对五孔探针探针的分类、使用方法以及数据处理作了详细论述。五孔探针采用非对向测量三维流场时, 首先根据五孔压力可计算出两个方向校准系数, 然后将两个方向校准系数在校准曲线中插值得到偏转角和俯仰角以及总压校准系数和静压校准系数。插值方法是否适当直接影响着实验结果的准确性。在文献[4]中对探针校准曲线使用了样条插值, 而在文献[5]中探针校准曲线采用最小二乘法拟合。本文对这两种方法进行了理论研究, 并在此基础上提出了一种实用性更强的线性插值法。

2 五孔探针工作原理及校准系数

五孔探针由位于两个正交平面上的 5 个测压孔

组成, 两个平面(偏转角和俯仰角)的交线通过中心孔, 偏转角 α 、俯仰角 β 空间 3 个分量的速度如图 1 所示。应用五孔探针测量三

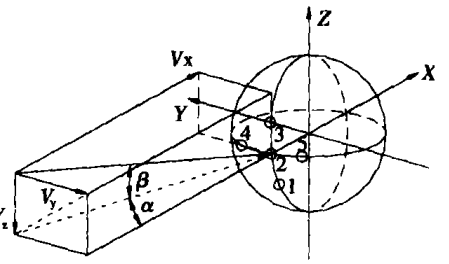


图 1 五孔探针角度定义

维流场有 3 种方法, (1)对向测量法; (2)半对向测量法; (3)非对向测量法。这 3 种方法在文献[4~5]中均有较详细的介绍, 本文仅对非对向测量的数据处理进行论述。非对向测量校准系数如下:

α 方向校准系数:

$$K_{\alpha} = \frac{p_4 - p_5}{p_2 - \bar{p}} \quad (1)$$

β 方向校准系数:

$$K_{\beta} = \frac{p_3 - p_1}{p_2 - \bar{p}} \quad (2)$$

总压校准系数:

$$C_{pt} = \frac{p_2 - p_1}{p_2 - \bar{p}} \quad (3)$$

静压校准系数:

$$C_{ps} = \frac{\bar{p} - p_s}{p_2 - \bar{p}} \quad (4)$$

$$\bar{p} = (p_1 + p_3 + p_4 + p_5) / 4 \quad (5)$$

其中: p_1 —来流总压, p_s —测点静压。

3 实验数据处理方法

应用非对向测量法测量流场时, 可测得五孔探针 1~5 孔所对应的压力 p_1, p_2, p_3, p_4, p_5 和来流总压 p_0^* , 这些值都是相对于参考压力值 P_{ref} (大气压

力)的。将这些数据按式(1)~式(5)求出 α 方向校准系数 K_α^S 和 β 方向校准系数 K_β^S (为了将实验所测的数据和校准系数曲线中的参数区别开,对实验数据使用了上标 S)。再由 K_α^S 和 K_β^S 通过在校准系数中插值可以得到实际气流向对于探针坐标系的偏转角 α^S 和俯仰角 β^S 以及总压系数 C_{pt}^S 和静压系数 C_{ps}^S 。在插值过程中国内外学者使用了不同的方法。不同插值方法所使用的方向校准系数曲线如图2所示。图2(a)为使用式(1)~式(5)计算出的校准曲线,图2(b)为样条插值后的曲线,图2(c)为最小二乘法拟合后的曲线。

3.1 样条插值

文献[4]中使用样条插值法进行数据处理。这种插值法在原理上精度高,但同时对于探针质量要求也高。作者对探针校准系数用第一种边界条件的3次样条插值后的曲线来表示,如图2(b)所示。从图中可以看出,就本探针而言在某些区域如插值效果并不理想,误差较大。对于性能不好的探针,两条相邻曲线还有可能相交,进而插出错误数据,严重时会出现数据溢出。所以样条插值法的使用范围就局限在了特性良好的五孔探针上。对于特性较差的探针,这种方法并不适用。

3.2 最小二乘法

在文献[5]中采用五次多项式拟合 $K_\alpha - K_\beta - C_{pt} - \alpha$ 和 $C_{ps} - \alpha$ 校准曲线,拟合后的方向校准系数曲线如图2(c)。校准多项式为:

$$f(x) = \alpha_0 + \alpha_1(x - x_0) + \alpha_2(x - x_0)^2 + \alpha_3(x - x_0)^3 + \alpha_4(x - x_0)^4 + \alpha_5(x - x_0)^5 \quad (6)$$

其中: x_0 —已知数据的几何平均值; $\alpha_0 \sim \alpha_5$ —多项式系数。

在使用拟合曲线 $g(x)$ 取代离散点 (x, y) 时要尽量保证这些离散点尽可能的在 $g(x)$ 附近。附近的程度取决于各种逼近的标准,用残差作为拟合的标准,其残差表示为:

$$r_i = y_i - g(x_i) \quad (7)$$

残差向量的3种范数记作:

$$\|r\|_\infty = \max_{1 \leq i \leq m} |r_i| \quad (8)$$

$$\|r\|_1 = \sum_{i=1}^m |r_i| \quad (9)$$

$$\|r\|_2 = \left(\sum_{i=1}^m r_i^2 \right)^{1/2} \quad (10)$$

残差可以表示拟合的误差,误差愈小拟合就愈好。最小二乘法取2-范数 $\|r\|_2$ 最小,同时希望1-范数 $\|r\|_1$ 或 ∞ -范数 $\|r\|_\infty$ 也较小。使用最小二乘法对方向校准系数拟合后的各曲线残差在表1中给出。

表1 α 方向各曲线的3种范数

α	$\ r\ _2$	$\ r\ _1$	$\ r\ _\infty$
-15	0.0114	0.2921	0.0628
-12	0.0309	0.4872	0.1035
-9	0.0054	0.2061	0.0337
-6	0.0216	0.4123	0.0777
-3	0.0190	0.3942	0.0760
0	0.0076	0.2404	0.0465
3	0.0030	0.1441	0.0338
6	0.0258	0.4364	0.0938
9	0.0027	0.1118	0.0321
12	0.0139	0.2629	0.0791
15	0.0041	0.1716	0.0366

从图2(c)中可以看出, α 或 β 每增加 3° , K_α 或 K_β 平均增加约为0.3。如果认为角度误差在 0.1° 以内,那么 K_α 或 K_β 的误差应该保证在0.01以内,这就要求残差的 ∞ -范数 $\|r\|_\infty \leq 0.01$ 。从表中可以看出,没有

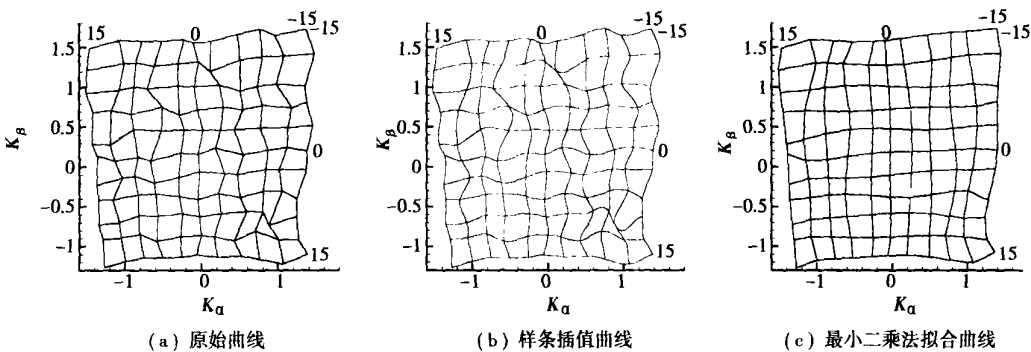


图2 方向校准系数

哪一条拟合曲线能够达到该要求。这说明最小二乘法对探针特性要求也较高。另外,对于探针特性较差的位置,最小二乘法在拟合曲线的过程中大幅度修改了这些点的参数,如 $\alpha = -12, \beta = -12$ 点,使得拟合后的校准曲线不再能够真实反映探针的特性。

3.3 线性插值方法

该方法由两部分组成,首先根据求出 K_α^S 和 K_β^S 在方向校准系数网格中的位置,然后再用线性插值法计算出方向角 α^S 和 β^S 。第一步由图 3 可以看出,如果 S 为与四边形 $ABCD$ 内部,则四边形 $ABCD$ 的面积和 4 个三角形 SAB 、 SBC 、 SCD 和 SDA 的面积之和相等,由此可求出测点 S 在方向校准系数网格中的单元格。第二步是线性插值方法。作者先后使用了两种线性插值方法。

线性插值方法 A:

$$K_\alpha^B = (K_{\alpha(I+1, J)}^N - K_{\alpha(I, J)}^N) \times \frac{K_\beta^S - K_{\beta(I, J)}^N}{K_{\beta(I+1, J)}^N - K_{\beta(I, J)}^N} + K_{\alpha(I, J)}^N \quad (11)$$

$$K_\alpha^C = (K_{\alpha(I+1, J+1)}^N - K_{\alpha(I, J+1)}^N) \times \frac{K_\beta^S - K_{\beta(I, J+1)}^N}{K_{\beta(I+1, J+1)}^N - K_{\beta(I, J+1)}^N} + K_{\alpha(I, J+1)}^N \quad (12)$$

$$\alpha^S = (\alpha_{I+1, J} - \alpha_{I, J}) \times \frac{K_\alpha^S - K_\alpha^B}{K_\alpha^C - K_\alpha^B} + \alpha_{I, J} \quad (13)$$

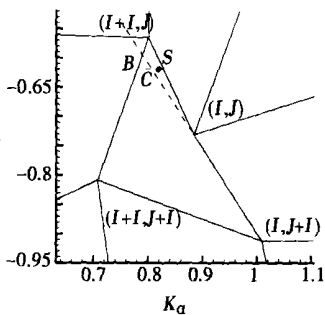


图 3 插值单元格

在使用中发现该方法对凹四边形插值不准,从图 3 中可以看出实验测点 S 位于四边形中,那么 $\alpha^S \in [\alpha_I, \alpha_{I+1}]$,但用式(11)~式(13)插值出的 α^S 却不属于该区间。主要原因是使用式(11)和式(12)后就定义了式(13)的自变量区间 K_α^B, K_α^C ,显然 $K_\alpha^S \notin K_\alpha^B, K_\alpha^C$,造成了插值出界,说明该方法不适用于凹四边形插值。

线性插值方法

B:

为改善凹四边形插值出界问题,本文提出了一种新的线性插值方法。如图 4,点 S 属于四边形 $ABCD$, S 到线段 BD 的距离为 SE , S 到线段 AC 的距离为 SA ,线段 AC 的值为 α_I ,线段 BD 的 α 值为 α_{I+1} ,那么:

$$\alpha^S = (\alpha_{I+1} - \alpha_I) \frac{SA}{SA + SE} + \alpha_I \quad (11)$$

该方程对凹四边形和凸四边形都有良好的插值效果。

线性插值方法 A 和方法 B 在凸四边形上的插值结果相差很小,在本文的实验中两种方法的角度插值结果大部分完全相同,最大的差值为 $0.000 02^\circ$,完全可以忽略不计。在对凹四边形插值时,方法 A 存在较大误差,方法 B 有着明显的优势。

和样条插值以及最小二乘法拟合相比,本文提

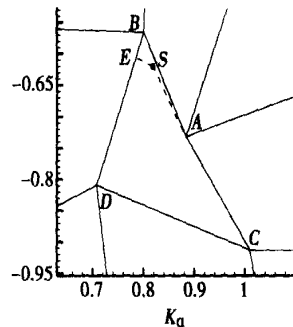


图 4 插值单元格

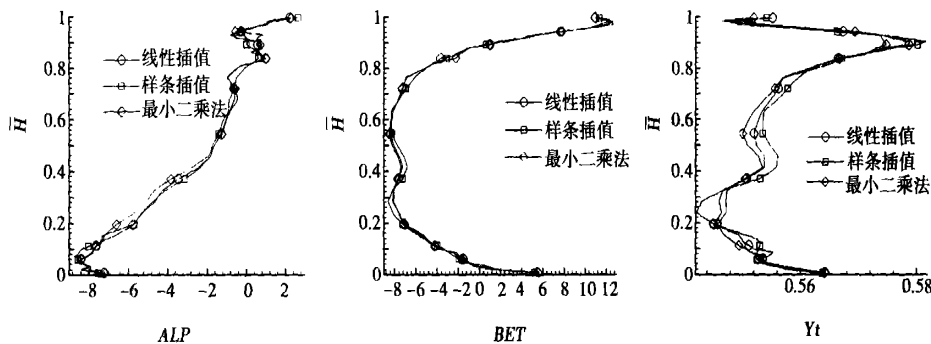


图 5 某测量站的插值结果

出的线性插值方法有更为广泛的适应性。理论上,如果探针特性良好,那么原始校准曲线就会和样条曲线基本重合,甚至可以通过加密测点来逼近样条函数,此时使用样条插值和线性插值差别不大,远小于实验台的允许误差,线性插值方法完全能够保证插值精度;对于特性较差的探针,样条函数就会严重变形甚至数据溢出,而最小二乘法则会某些测点位置上的参数大幅度改变,使得拟合后的曲线不能完全反映出探针的特性,使得校准曲线本身就有了较大的误差。

4 实验结果比较

图5为某测量站的线性插值、样条插值和最小二乘法拟合3种方法的插值结果比较。从图中可以看出,使用不同的插值方法得到的结果有着较大的差异。对于 α 角,实验台设计误差为 0.1° ,相对于 3° 的方向校准间隔理论上允许误差为3%。样条插值最大误差为 0.82° ,相对误差为27%,最小二乘法的最大误差为 0.58° ,相对误差为19%,两者都远远超过了3%的允许误差范围。

由于探针质量原因,在使用理论上高精度的样条插值时反而造成了更大的误差;而最小二乘法拟合修改了探针的特性曲线,使得该曲线不能准确反映探针的真实特性,在这些有着较大误差的曲线上插值,结果显然是不准确的。

5 结论

在使用五孔探针校准数据时通常采用样条插值或最小二乘法拟合。样条插值有着较高的精度,但只适用于特性良好的探针,对于特性较差的探针插值精度严重下降。最小二乘法拟合在处理特性较差的探针校准曲线时,会大幅度修改某些测点上的参数,不能真实的反映探针特性。根据本文对上述两种方法的理论分析和实验结果比较,提出了实用性更强的线性插值方法。对于特性良好的探针,该方法的精度接近样条插值;对于特性较差的探针,该方法能够在不改变探针特性曲线的基础上保证插值精度,有着更为广泛的适应性。

参考文献:

- [1] DOMINY R G, HODSON H P. An investigation of factors influencing the calibration of 5-hole probes for 3-D flow measurements[J]. *Journal of Turbomachinery*, 1993, 115(3): 513-519.
- [2] CORRIVEAU D, SJOLANDER S A. Influence of loading distribution on the performance of transonic HP turbine blades[R]. ASME Paper GT2003-38079, 2003.
- [3] 安柏涛. 涡扇发动机涡轮低压导向器气动性能的试验与数值研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2002.
- [4] TREASTER A L, YOCUM A M. The calibration and application of five-hole probes[J]. *ISA Transactions*, 1979, 18(3): 23-34.
- [5] 钟兢军, 宋彦萍, 芦文才, 等. 五孔探针非对向测量法在风洞自动测试系统的应用[J]. 哈尔滨工业大学学报, 1997, 29(3): 61-64.

摩擦体系的热力学研究

摩擦体系的摩擦和磨损行为是多因素综合作用的结果,这些因素具有不同的物理量纲,并具有强的相互耦合。目前摩擦学理论研究远远落后于工业需求,也落后于其它技术基础科学,还没有形成统一的定量理论。

研究以熵产生为表征量统一量纲,以熵平衡方程为基础研究建立数理模型,以居里原理为基础分析系统中各因素间的耦合,提出并发展一门交叉学科,为从宏观与微观相结合,系统和定量交融,理论发展和工业应用兼顾的角度获得对摩擦体系的新认识。

该研究意义实现并推进多变量非线性复杂体系研究方法的突破,拓宽非平衡态热力学的研究领域;该项目所采用的研究方法和模型可为相关学科(如塑性加工和机械冶金)提供借鉴;建立了摩擦磨损过程的系统和定量的唯象模型;工程上,该模型有助于已有知识的系统化归纳,改进摩擦学设计,发展新技术,提高摩擦零部件的质量。该思路用于微动磨损的研究和提高传动系统干运转能力均取得很好的效果。

Key words: boiling tube, CFX, throttling element

转子蜂窝密封封严特性的试验研究 = **Experimental Investigation of the Sealing Characteristics of a Rotor Honeycomb Seal** [刊, 汉] / WANG Xu, ZHANG Wen-ping (Nuclear and Power Engineering Institute under the Harbin Engineering University, Harbin, China, Post Code: 150001), MA Sheng-yuan (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(5). — 521 ~ 525

To study the sealing characteristics of a rotor honeycomb seal, five kinds of stator test piece for honeycomb seals and five kinds of rotor test piece were designed and fabricated. Tests were carried out on a rotor seal test rig to identify the impact on sealing characteristics of such factors as honeycomb core lattice size, seal clearance, rotor speed, honeycomb depth, and seal pressure ratio. Contrast tests were also conducted of the sealing characteristics of a seal structure composed of a honeycomb stator, labyrinth disc and smooth disc. Finally, the conclusions of the experimental study were presented.

Key words: rotor, honeycomb seal, labyrinth seal, sealing characteristics

五孔探针实验数据处理的线性插值法 = **Linear Interpolation Method for Processing the Test Data of Five-hole Probes** [刊, 汉] / YUE Guo-qiang, Han Wan-jin, Lu Wen-cai, et al (Institute of Energy Science & Engineering under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(5). — 526 ~ 529

During the calibration of data by using five-hole probes a spline interpolation and least square fit are generally employed. For the calibration of curves by the use of identical probes the results of interpolation obtained by employing respectively the above-mentioned two methods may be quite different. Through a theoretical analysis of these two methods the authors have come up with a linear interpolation method, which is more practical for general use. For probes with good characteristics the recommended method can attain a precision close to that of the spline interpolation. As for probes with relatively poor characteristics the above method is capable of ensuring interpolation precision without the change of the probe characteristics, and relative to the spline interpolation and least square fit it enjoys a higher degree of adaptability. **Key words:** five-hole probe, linear interpolation, spline interpolation, least square method

循环流化床的物料平衡和运行中的物理现象 = **Mass Balance of a Circulating Fluidized Bed and Physical Phenomena Encountered in the Latter's Operation** [刊, 汉] / MA Su-xia, WANG Ming-min, YUE Guang-xi (Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(5). — 530 ~ 533

Mass balance in a fluidized bed constitutes the core and basis of the combustion process in a circulating fluidized bed and is of utmost importance to the operation of the fluidized bed. A mass balance model is presented for a circulating fluidized bed in its steady state along with a discussion of various factors liable to influence the mass balance. The mass balance model was used to calculate the circulating mass flow rate, residue mass flow rate and fly ash flow rate (including its particle distribution) of a 75t/h circulating fluidized bed boiler. An analysis was conducted of the intrinsic causes of the physical phenomena and problems encountered in the operation of the fluidized bed boiler under the influence of the mass balance. Such phenomena include “bed quality” and the characteristics of the separator used for the circulating bed, etc. Some existing problems currently attracting the attention of a circle of theoretical and industrial workers are quantitatively explained. **Key words:** circulating fluidized bed, mass balance, model, physical phenomena

余热锅炉补燃装置的研究 = **A Study of the Supplementary-firing Burner Unit for a Heat Recovery Steam Generator** [刊, 汉] / YU Zhao-yang (Harbin Boiler Co. Ltd., Harbin, China, Post Code: 150046), WANG Jian-zhi (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036), HE Nian (Equipment Engineering Depart-