

双丝热线探头的一种标定新方法

A New Calibration Method of Double-Hotwire Probe

中航工业空气动力研究院 姚惠元 刘国政 孙楠

[摘要] 对 X 型双丝热线探头标定工作进行了研究,提出使用一种新的基于 B 样条递推最小二乘的标定方法,该方法选取具有低阶光滑特性的 B 样条函数并采用递推最小二乘的方法估计控制参数,提高了校准精度。通过分析实际的风洞试验数据,对提出的标定方法的有效性进行了验证。

关键词: 双丝热线 标定 风洞试验

[ABSTRACT] In this paper, the calibration work of X type double-hotwire probe has been researched, and a new calibration method based on B spline recursive least squares algorithm is proposed, which chooses the B spline function with low order smoothness properties and estimates the control parameters using the method of recursive least squares in order to improve the accuracy of calibration. Through data analysis from wind tunnel test, the validity of the calibration method proposed in this paper is verified.

Keywords: Double-hotwire Calibration Wind tunnel test

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.S2.120

热线双丝探头广泛用于测试气流二维速度场的各种场合。探头很容易损坏,且形变和氧化会影响其性能的稳定性,因而需要经常校准。另外在恶劣环境中工作或储存的探头,其丝的表面可能被沙、尘、油等污染,需要清洗和重校准,这也是一件比较困难的事^[1]。工程上常用多项式拟合法进行热线探头的标定,这种方法在采集数据曲线不平滑时精度低,高阶拟合效果不好,具有一定的局限性。

本文针对 X 型双丝探头,提出一种新型的标定算法。选取 B 样条函数建立具有良好低阶光滑特性的逆模型,可避免过拟合;然后采用最小二乘估计模型控制参数。在实际的风洞试验中进行验证,又加入了温度补偿、密度修正和数据滤波,提高系统的测量精度。

1 双丝探头及恒温热线风速测量原理

X 型双丝探头,是由两个相互垂直但在同一平面内的热线传感器组成,能够测量两个方向的速度分量:

U 分量和 V 分量,进而可以测量流体的速度、湍流度、雷诺应力和湍动能等参量。如图 1 所示,速度的 U 分量和 V 分量与每个传感器都成 45° 角。试验时放置 X 型探头应确保主流速在 U 方向上。

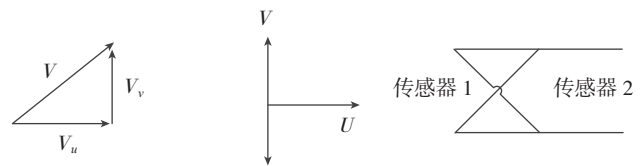


图1 X型探针测量分量示意图

Fig.1 Sketch map of measurement components of X-type probe

热线传感器通过感受暴露于气流中的一个小型电加热元件的热传导的变化测量流体速度。恒温型的热线风速仪,气体流经元件带来的冷却效果由元件中的电流平衡,使得元件的温度保持恒定。随着流速的改变,元件的电流也随之变化,表现为输出电压的变化。恒温热线风速计的校准系统包括空气压缩机、校准风洞、压力传感器、风速仪、测温热电偶、AD 采集板、X 型探针及探针支架等部分。通过标定,得到桥电压 E 与垂直传感器方向的有效速度 V_e 之间的关系。

2 标定方法

2.1 用于速度标定的新型算法

本文使用 B 样条递推最小二乘作为校准算法,得到 X 型探针两个热线传感器的有效速度和桥电压关系曲线。B 样条递推最小二乘算法的推导如下所示^[2]。

以 x 为自变量桥电压、 y 为因变量速度。给出二维空间上的样本数据点列 (x_j, y_j) ,并将 x 方向上的节点以符号 t 表示。记

$$t_0 = \min(x_j) = x_0 = a, \quad (1)$$

$$t_{N+1} = \max(x_j) = x_n = b. \quad (2)$$

以 a 和 b 为边界节点,对区域 $[a, b]$ 作内分划并进行外扩,得到含有内节点、边界节点和外节点的非递减节点序列:

$$t_{-k+1} \leq \dots \leq t_0 < \dots < t_N \leq \dots \leq t_{N+k}, \quad (3)$$

其中, N 为内节点数, k 为 B 样条函数的阶数。

节点序列确定后,关于 x 的 k 阶或 $k-1$ 次 B 样条基

函数可通过 DeBoor-Cox 工具递推计算

$$\begin{cases} B_i^1(x) = \begin{cases} 1, t_i < x \leq t_{i+1} \\ 0, \text{其他} \end{cases} \\ B_i^k(x) = \frac{x-t_i}{t_{i+k}-t_i} B_i^{k-1}(x) + \frac{t_{i+k}-x}{t_{i+k}-t_{i+1}} B_{i+1}^{k-1}(x) \end{cases}, \quad (4)$$

关于 x 的 k 阶或 $k-1$ 次 B 样条曲线可唯一地表示为:

$$y = \sum_{i=-k+1}^N c_i B_i^k(x),$$

其中, c_i 为控制系数列向量。带入样本数据点 (x_j, y_j) 并设 $B_j^k(x_j) = p_{ji}$, 在考虑到误差的情况下, 得到矩阵形式线性方程组

$$Y_n = P_n C_n + F_n, \quad (5)$$

其中:

$$Y_n = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix}, P_n = \begin{pmatrix} p_{1,-k+1} & p_{1,-k+2} & \cdots & p_{1,N} \\ p_{2,-k+1} & p_{2,-k+2} & \cdots & p_{2,N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{n,-k+1} & p_{n,-k+2} & \cdots & p_{n,N} \end{pmatrix},$$

$$C_n = \begin{pmatrix} c_{-k+1} \\ c_{-k+2} \\ \vdots \\ c_{-k+n} \end{pmatrix}, F_n = \begin{pmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_n \end{pmatrix} \text{ 为拟合残差。}$$

通常, 选取 B 样条基函数个数小于样本数据点组数, 即 $N+k < n$, 则式 (5) 为超定方程组^[3], 因而, 在控制系数的求解上采用最小二乘方法, 可得到控制系数 C_n 的最小二乘估计值:

$$\widehat{C}_n = [P_n^T P_n]^{-1} P_n^T Y_n. \quad (6)$$

2.2 偏航角标定

图 1 中, 速度一定时, 探针针对偏航角 α 的响应方程^[3]为:

$$V_{e1}^2 = V^2 [\sin^2(45^\circ + \alpha) + k_1^2 \cos^2(45^\circ + \alpha)], \quad (7)$$

$$V_{e2}^2 = V^2 [\sin^2(45^\circ - \alpha) + k_2^2 \cos^2(45^\circ - \alpha)], \quad (8)$$

假设 k_1 和 k_2 为零, 得到理想流动角表达式:

$$\alpha_{id} = \tan^{-1} \left(\frac{V_{e1} - V_{e2}}{V_{e1} + V_{e2}} \right), \quad (9)$$

及无量速度 H :

$$H = \frac{V \cos \alpha}{\sqrt{V_{e1}^2 - V_{e2}^2}}. \quad (10)$$

保持流速 V 为满量程的 40%, 多次改变偏航角 α 就可以获得 $\alpha \sim \alpha_{id}$ 和 $H \sim \alpha_{id}$ 的对应关系式, 继而得到的两个速度分量 V_u 和 V_v 。

2.3 温度及密度修正

校准热线探头是为了得到桥电压与速度的对应关系式, 采集热线数据的电路中含有电桥, 温度会影响电桥的平衡。桥电压的温度修正公式如下:

$$E_b = E \sqrt{\frac{T_s - T_c}{T_s - T_e}}, \quad (11)$$

式中: E 为原始桥电压, E_b 为修正后的桥电压, T_s 为传感器工作温度, T_c 为校准温度, T_e 为试验温度。

有效速度的密度修正公式为:

$$V_{e(\text{cor})} = \frac{P_c}{P} V_e, \quad (12)$$

其中: V_e 为未修正有效速度, $V_{e(\text{cor})}$ 为修正后的有效速度, P_c 为标准大气压, P 为试验大气压。

3 风洞试验结果

在中航工业气动院 FL-5 风洞进行热线试验, 校准 X 型双丝探头并采集数据对校准处理结果进行验证。校准的原始桥电压数据与速度数据见表 1, 共 15 个标定数据对, 分别用四阶多项式算法和 B 样条递推最小二乘算法拟合这些数据, 并画出两个热线传感器 1 和 2 的拟合相对误差对比图, 从图 2 和图 3 中可以看出, 四阶多项式拟合法的拟合最大相对误差约为 5%, 而 B 样条递推最小二乘法的拟合最大相对误差约为 2.2%, 优于多项式拟合法。

实际测量时风速为 U 方向, 采样率为 5kHz, 每次采集 8192 个点。首先对数据低通滤波, 以去除高频噪声并避免锯齿问题出现, 取平均值后根据式 (11) 和式 (12) 进行温度及密度修正, 修正后得到两个传感器的桥电压, 见表 2。

表1 X型探针校准原始数据

序号	桥电压 1/V	桥电压 2/V	速度 / (m·s ⁻¹)
1	1.2094	1.213	0
2	1.5616	1.6268	3.0851
3	1.6491	1.7145	4.0765
4	1.7109	1.7808	5.5511
5	1.7499	1.8225	6.158
6	1.7854	1.8602	7.2194
7	1.827	1.9048	8.2512
8	1.8996	1.9818	10.3493
9	1.9946	2.0812	13.9921
10	2.0352	2.1272	15.89
11	2.0744	2.1712	17.8329
12	2.125	2.2282	2.2602
13	2.1532	20.4681	22.0878
14	2.2856	2.4053	30.3677
15	2.3949	2.5252	38.1659

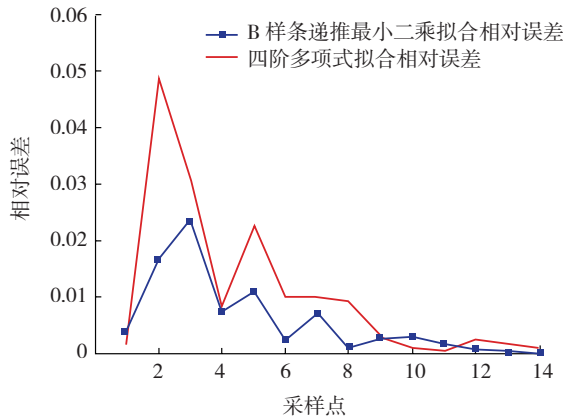


图2 传感器1标定的相对误差

Fig.2 Calibration relative error of sensor 1

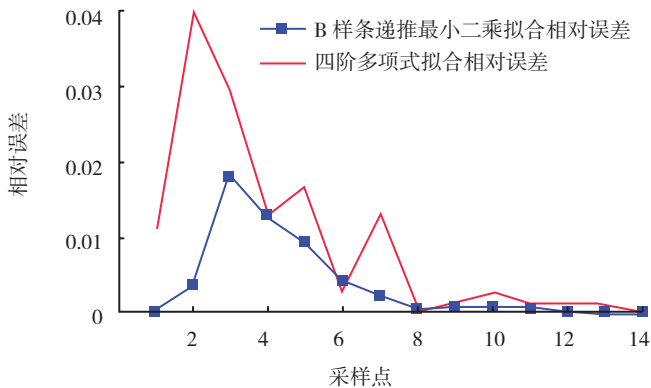


图3 传感器2标定的相对误差

Fig.3 Calibration relative error of sensor 2

表2 校准后测量数据

序号	桥电压 1/V	桥电压 2/V	速度 / (m·s ⁻¹)
1	1.8893	1.9712	10
2	2.0192	2.1181	15
3	2.1191	2.2185	20
4	2.2106	2.3099	25
5	2.2894	2.4154	30
6	2.3510	2.4671	35

用以上两种标定算法分别处理后得到测量风速与实际风速的相对误差如图4所示,从图4中可以看出,B样条递推最小二乘方法的最大测量误差小于四阶多项式方法的最大测量误差,标定的精度更好。

4 结束语

本文提出使用基于B样条递推最小二乘的新型标定方法对双丝X型热线探头进行校准。通过对采集数据的处理,表明本文方法的标定精度更高,能够得到更准确的测量结果。因此,可将本文提出的算法应用到热

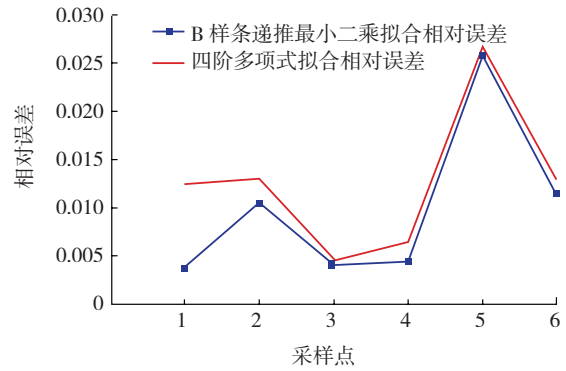


图4 使用两种标定方法处理实测数据所得风速与实际风速的相对误差

Fig.4 Relative errors between the actual wind speed and the measured wind speed processed by two kinds of calibration methods

线测量工程实践中去,得到风速、湍流度和湍动能等更加精确的测量结果。

参考文献

- [1] 陈安世,祖静,邵成忠,等. 双热线风速仪. 测试技术学报, 1996,12(10): 737-740.
- [2] 魏国,王昕,雷苗,等. 基于B样条递推最小二乘的温度传感器非线性校正. 传感器与微系统,2008,12(27):54-56.
- [3] 李国祥,刘云岗,陆辰,等. 热线风速仪X型探头的一种新标定方法. 流体力学试验与测量,1997,12(11):57-61.

(责编 宁军)

(上接第119页)

技术的基础上,将PDM技术引入到标准件库管理及标准件调用过程中。它在解决设计人员标准件创建繁琐的同时,帮助设计人员对大量数据进行管理,保证了产品全生命周期中数据的传递,方便后期BOM表的生成。系统成功应用在飞机工装设计中,有效降低了产品设计周期,提高了设计效率。

参考文献

- [1] 郑国磊,余英,朱心雄,等. 飞机装配型架标准件模型化技术. 航空学报,2002(1):38-42.
- [2] 苏铁明,王亮申,杨鑫华,等. 网络环境下三维参数化冲裁模标准件图形库. 机械科学与技术,2002(1):147-149.
- [3] 叶晓峰,李建军,王义林. 基于知识重用的标准件建库方法研究. 中国机械工程,2006(S1):368-270.
- [4] 陈靖芯,徐晶,陆国民,等. 基于CATIA的三维参数化建模方法及其应用. 机械设计,2003(8):48-50.
- [5] 叶新朝,尹文生,王启付,等. 面向装配的三维标准件库工具的研究和开发. 机械科学与技术,2000(4):662-664.
- [6] 李原,彭培林,邵毅,等. 基于CATIA的标准件库设计与实现. 计算机辅助设计与图形学报,2005(8):1873-1877.

(责编 宁军)