

# 多通道七孔探针测速系统研究

章鹏 李鹏 穆日敏 秦晓楠

(南京航空航天大学自动化学院 南京 211106)

**摘要:** 为了满足低速流场的测速要求,基于七孔探针测速原理,设计了一套多通道七孔探针测速系统,给出了七孔探针测速系统的嵌入式硬件电路及基于 Modbus 通信协议的上下位机软件系统的详细设计方案,通过对传感器的压力系数标定提高了压力测量数据的一致性。在低速风洞中进行了探针标定实验,通过对标定实验数据的分析,得出探针的俯仰角和方位角的绝对误差为  $0.2^\circ$ 。并在此基础上进一步分析了探针孔径误差和传感器测量误差对系统测量结果造成的影响。

**关键词:** 七孔探针;电路设计;Modbus;风洞实验

**中图分类号:** TN911.3 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

## Velocity measurement system of multi channel by seven-hole probes

Zhang Peng Li Peng Mu Rimin Qin Xiaonan

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

**Abstract:** In order to meet the test requirements for low speed flow field, based on the seven hole probe velocity measuring principle, this paper designed a set of multi-channel probe velocity measuring system by seven-hole probes, which is given a detailed design of the embedded hardware circuits, upper and lower computer software system. which is based on the Modbus communication protocol, improved the consistency of pressure measurement data through the pressure coefficient of sensor calibration. The probe calibration experiment was carried out in the low speed wind tunnel, by analysis the results of probe calibration wind tunnel experiment, the absolute error of the probe's pitch angle and azimuth is  $0.2^\circ$ . On the basis of the results, this paper puts a further analysis on the probe aperture and sensor measurement errors to the effects of measurement results.

**Keywords:** seven-hole probe; circuit design; Modbus; wind tunnel experiments

### 1 引言

流场测量虽然已经进入昂贵且复杂的光、电设备测量时代,但是在一些低速流场的测量场合下,多孔压力探针仍是流场测速的主要选择。一个有着精良的制造工艺、软硬件系统优化、标准压力校准后的七孔探针系统,其测速精度可超过三维热线,所以在可以忽略接触式测量对流场的干扰场合下<sup>[1]</sup>,方便实用的七孔探针在测量流场速度方面有广泛的应用前景。

对于流场测速,在流动角度较小时,七孔探针中心孔压力最大。但随着流动角度的增大,最大压力孔将逐渐移到正对横向气流的压力孔。为此根据探针7个压力孔的压力大小,流动空间可被划分为7个区域。其中探针中心孔所对的流动空间称为内区,而外围空间被划分为6个  $60^\circ$  的流

动区域,这6个区域称为外区。在流动角度较小的情况下(内区),通过迎角  $\alpha$  和侧滑角  $\beta$  来确定气流方向。迎着气流看,右侧滑为正;而在大流动角的情况下(外区),气流方向是通过俯仰角  $\theta$  和方位角  $\varphi$  来确定,俯仰角  $\theta$  是速度向量与探针轴线之间的夹角,始终为正。方位角  $\varphi$  是速度向量在 YZ 平面内的投影和 Z 平面之间的夹角,逆时针为正。 $\alpha, \beta$  与  $\theta, \varphi$  角度之间的转换关系为<sup>[2]</sup>:

$$\begin{cases} \alpha = \arctg \frac{W}{U} = \arctg(\tg\theta\cos\varphi) \\ \beta = \arctg \frac{V}{U} = -\arctg(\tg\theta\sin\varphi) \end{cases} \quad (1)$$

对于各区中的压力关系和压力系数的计算方法在关于七孔探针测量方法的文献中都有提及,具体七孔探针测量原理请参考引用文献[3]。

## 2 硬件系统开发

七孔探针压力测速系统包括七孔探针群、压力传感器工作电路、单片机工作电路、计算机等。测速系统结构如图 1 所示。

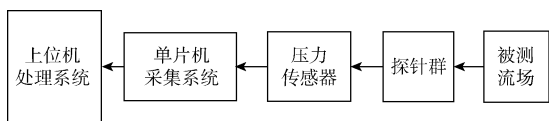


图 1 多通道七孔探针测速系统

七孔探针测量电路是由 STC15 系列单片机工作电路和 SM5852 传感器工作电路组成。单片机工作电路包括单片机最小系统、电源稳压电路,485 总线电路。SM5852 传感器工作电路即 SM5852 传感器的 I<sup>2</sup>C 工作电路。

在系统的单片机工作电路中设计的 USB 转串口工作电路和 MAX485 工作电路使得本系统可以兼容单个探针和探针群组的测量传输并且可以适用于一些工业现场。本系统因需要八路探针组成探针群组,故采用 RS485 总线标准,组成多通道的七孔探针测速系统。具体 485 通信电路如图 2 所示。

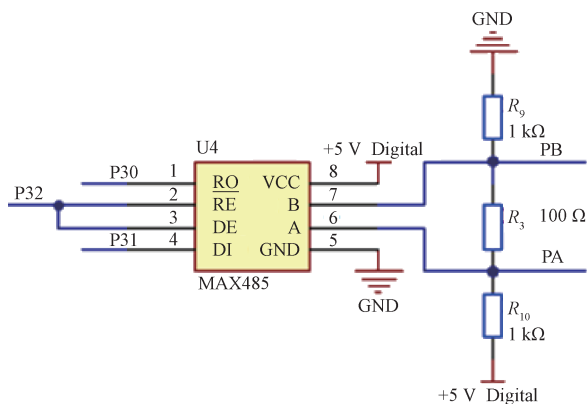


图 2 485 通信电路

STC15 单片机有 44 个通用 IO 口,本系统通过定义 16 个通用 IO 口分别对八路传感器进行模拟 I<sup>2</sup>C 的时序,一个传感器通过导压管完成对一个探针气孔压力的测量,因此一个测量电路即完成对一个探针的压力测量。对于多通道七孔探针,通过 485 总线定义从机地址完成对一个通道的单片机电路的地址定义,每一个通道有其唯一对应的通讯地址,从而形成了多通道的七孔探针硬件系统。

另外为了减少测量过程中的误差,保证输出性能稳定,对单片机和高精度的传感器分别采用专用稳压电源供电,本系统采用的是三端稳压芯片 AS1117 对单片机和传感器独立供电,是为了消除电压不稳给传感器带来的测量误差。

对于传感器电路,要保证测得的压力数据的准确性,

必须采用量程合适、精度高、输出性能稳定的压力传感器。本文引入了以 MEMS 技术为基础的扩散硅压力传感器 SM5852,该类传感器具有体积小精度高的特点<sup>[4]</sup>。其内部结构自带的温度补偿电路可以很好的减少零漂误差。SM5852 工作电路采用的即是 I<sup>2</sup>C 工作电路,在 SM5852 电源引脚上添加 II 型稳定性陶瓷电容 X7R,为了保证最优的信号输出,电容大小选择 100 nF,并且使电容在电源引脚两端的距离不超过 5 mm,具体电路如图 3 所示。

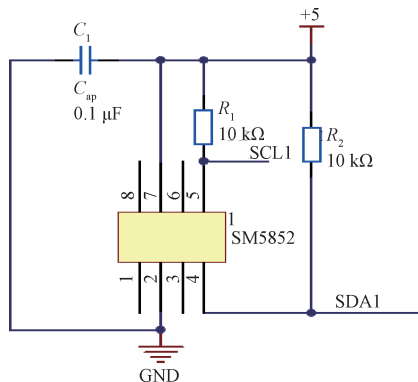


图 3 SM5852 工作电路

## 3 软件系统设计

本系统在软件设计包含下位机即单片机采集、处理、传输数据的程序设计和上位机数据采集和处理、七孔探针算法、传感器标定、结果显示保存模块的程序设计。

### 3.1 下位机软件设计

下位机软件程序主要包括 SM5852 的 I<sup>2</sup>C 数据采集程序、单片机数据处理程序和 Modbus 协议数据传输程序,具体的程序框图如图 4 所示。

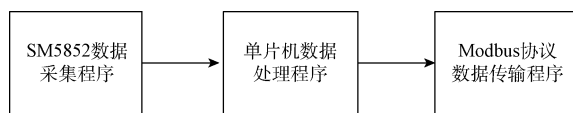


图 4 下位机程序

对于单片机测量电路,采用通用 IO 口模拟 I<sup>2</sup>C 时序对传感器进行通信,将采集到的压力数据进行压力阈值判断。对采集到的数据进行排序取中值,将取出的中值排列组合成新的均值队列,并在新的均值队列取出它的平均值数据<sup>[5]</sup>,通过 Modbus 协议传输处理过的均值数据给上位机,具体流程如图 5 所示

Modbus 协议是一个请求/应答协议,其协议自带的 CRC 校验可以避免在数据传输过程中可能发生错误。本系统中需要上位机发送具体地址和功能码为 03 的读取保持寄存器请求指令,下位机接收到请求指令后,将相应地址的单片机寄存器中的二进制数据传输给上位机,由此实现多通道数据传输。

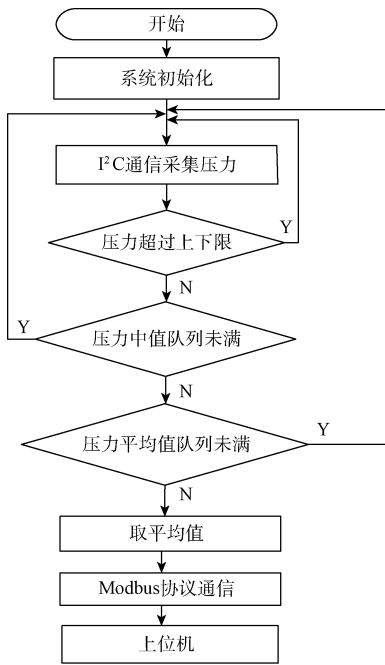


图 5 下位机软件流程

### 3.2 上位机软件设计

系统的上位机软件是采用 LabVIEW 虚拟仪器技术<sup>[6]</sup>将复杂的 Modbus 通信数据采集、压力数据处理、探针算法解算一体化,并设计友好的数据处理前后的显示界面,方便实验人员进行数据比较。具体上位机功能如图 6 所示。

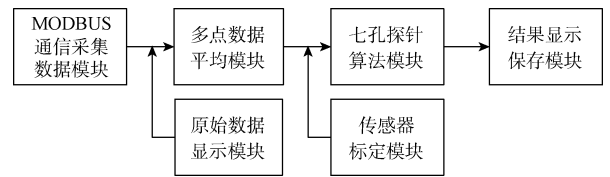


图 6 七孔探针测速系统上位机功能

另外在上位机软件系统中加入了多点数据平均模块,可以更好地对采集数据进行滤波处理。在上位机程序中有原始数据显示模块和处理后数据结果显示模块,可以更加方便和明显的看出数据处理前后的波动及差异。

## 4 系统标定实验及误差分析

### 4.1 多通道压力标定

对于是同一厂家同一批次生产的压力传感器,它们在制造工艺上也会存在着个体差异,而这种差异使得传感器在测量性能上存在不同。为了减少压力传感器采集数据的浮动,在使用前均要对压力传感器进行统一压力标定,这样可一定程度上提高测量压力数据的一致性,并且可以避免由于各测压孔的压力偏差引入的系统误差。在多通道压力标定环节用标准压力计对每个探针的 8 个传感器进行标准压力标定,经过多点压力系数的平均值拟合,最终得到压力标定系数,具体系数如表 1 所示。

表 1 压力系数标定表

标准压力	通道 1 压力	通道 2 压力	通道 3 压力	通道 4 压力	通道 5 压力	通道 6 压力	通道 7 压力	通道 8 压力
98	92.788	93.077	93.596	93.407	92.507	93.506	93.563	93.413
196	185.865	186.145	186.368	186.899	186.064	186.302	186.97	186.838
294	278.991	279.552	279.799	280.22	279.672	279.098	280.435	280.84
392	371.787	373.569	373.795	374.237	373.795	372.807	373.612	373.041
490	464.006	466.001	466.002	467.033	466.134	465.3	466.946	467.058
588	557.669	560.382	560.019	561.05	560.151	559.339	560.926	560.449
686	651.674	653.178	654.033	654.142	653.417	653.188	653.405	654.481
784	744.192	747.744	747.442	746.725	747.159	746.787	747.409	746.988
882	837.013	839.991	839.018	839.997	838.945	839.537	839.116	840.681
983	930.395	933.398	933.645	932.845	932.559	934.165	933.008	932.87
压力系数	1.05425	1.05063	1.04983	1.04909	1.05150	1.05090	1.04913	1.04915

### 4.2 探针系统标定

在七孔探针系统的标定实验中,根据七孔探针测量的每个流动角下的压力,将测量结果按照七孔探针工作原理中压力系数的关系式整理成无因次压力系数。要确定各区的流动角、总压、静压、均可用七孔探针工作原理中所述的压力系数的四次多项式表示。每个区只需要用其两个

对应的压力系数作为变量<sup>[2]</sup>,内区用  $C_{\alpha}$  和  $C_{\beta}$  表示,外区用  $C_{\theta}$  和  $C_{\varphi}$  表示。通过四次多项式来确定七孔探针各区参数:

$$A_i = K_1^A + K_2^A C_{\alpha} + K_3^A C_{\beta} + K_4^A C_{\alpha}^2 + K_5^A C_{\alpha} C_{\beta} + K_6^A C_{\beta}^2 + K_7^A C_{\alpha}^3 + K_8^A C_{\alpha}^2 C_{\beta} + K_9^A C_{\alpha} C_{\beta}^2 + K_{10}^A C_{\beta}^3 + K_{11}^A C_{\alpha}^4 + K_{11}^A C_{\alpha}^3 C_{\beta} + K_{12}^A C_{\alpha}^2 C_{\beta}^2 + K_{13}^A C_{\alpha} C_{\beta}^3 + K_{14}^A C_{\alpha}^4 C_{\beta} + K_{15}^A C_{\beta}^4 \quad (2)$$

对小流动角(内区): $A$  表示  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $C_{\alpha}$  和  $C_{\beta}$ ;对大流动角

(外区):  $A$  表示  $\theta$ 、 $\varphi$ 、 $C_o$  和  $C_q$ 。

其中  $C_o$  和  $C_q$  分别表示七孔探针总压和静压系数,  $K^A$  是七孔探针校准系数, 由式(2)可知在每个区中分别有 15 个校正系数对应不同的  $A$ , 因而每个区的校准系数个数为 60 个<sup>[7]</sup>。根据七孔探针工作原理中总压与静压的关系整理得到  $C_{a_i}$ 、 $C_{\beta_i}$ 、 $C_{o_i}$ 、 $C_{q_i}$  (内区) 和  $C_{\theta_i}$ 、 $C_{\varphi_i}$ 、 $C_{o_i}$ 、 $C_{q_i}$  (外区) 代入式(2)中, 可用矩阵形式表示:

$$\begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ \vdots \\ A_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & C_{a1} & C_{\beta1} & C_{a1}^2 & C_{a1}C_{\beta1} & \cdot & \cdot & C_{\beta1}^1 \\ 1 & C_{a2} & C_{\beta2} & C_{a2}^2 & C_{a2}C_{\beta2} & \cdot & \cdot & C_{\beta2}^1 \\ 1 & C_{a3} & C_{\beta3} & C_{a3}^2 & C_{a3}C_{\beta3} & \cdot & \cdot & C_{\beta3}^1 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 1 & C_{a1} & C_{\beta1} & C_{a1}^2 & C_{a1}C_{\beta1} & \cdot & \cdot & C_{\beta1}^1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_1^A \\ K_2^A \\ K_3^A \\ \cdot \\ \cdot \\ K_{15}^A \end{bmatrix}$$

简写为:

$$[A]_n = [C]_{n \times 15} [K]_{15 \times 1} \quad (3)$$

为得到校准系数矩阵  $[K]$ , 可以通过转置矩阵法得到:

$$[K] = [C^T C]^{-1} [C^T] [A] \quad (4)$$

其中  $[C]^T$  为  $[C]$  的转置矩阵 $[1]$ 。

七孔探针标定实验是在南航 1 m 非定常风洞中完成, 将七孔探针沿水平面安置在风洞口, 通过改变不同倾角来测量压力, 实验现场如图 7 所示。

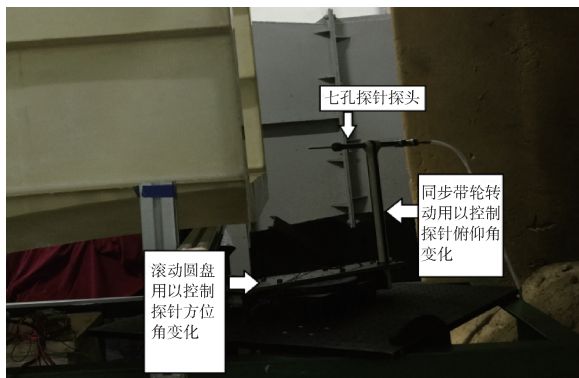


图 7 七孔探针测速系统标定实验风洞现场

在七孔探针的校准实验中, 通过改变俯仰角  $\theta$  从  $7^\circ \sim 75^\circ$ , 间隔为  $4^\circ$ 。而改变一次俯仰角  $\theta$ , 方位角  $\varphi$  在  $0^\circ \sim 360^\circ$  变化, 变化间隔为  $5^\circ$ 。由此通过建立的 1 294 个点对探针系统进行标定实验。

### 4.3 误差分析

标定实验中七通道的压力数据波形如图 8 所示, 其中横坐标为标定点, 纵坐标为压力值。从图中可以看出, 位于针孔内区的通道 7 随着俯仰角  $\theta$  的逐渐变大而变小, 而外区 6 个通道在俯仰角  $\theta$  改变, 方位角  $\varphi$  在  $0^\circ \sim 360^\circ$  变化的过程中呈现一个规律性的振荡, 且上下的压力幅值基本保持一致。这个压力数据波形的变化满足七孔探针标定实验压力数据规律。

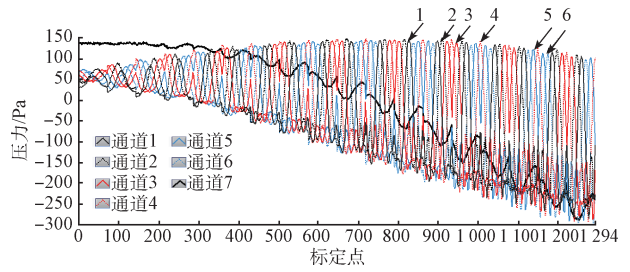


图 8 七通道压力数据波形

通过七孔探针的标定实验可以得到在不同俯仰角和方位角下的总压, 静压和各个通道的压力值。利用上节中的七孔探针校准原理中的矩阵式(4), 可以求解出  $K$  矩阵系数, 而通过  $K$  矩阵系数, 可以反推出俯仰角和方位角, 通过对俯仰角  $\theta$  和方位角  $\varphi$  实际值与计算值的误差比较<sup>[8]</sup>, 得到的结果如图 9、10 所示, 其中横坐标为标定点, 纵坐标为该点的误差幅值。

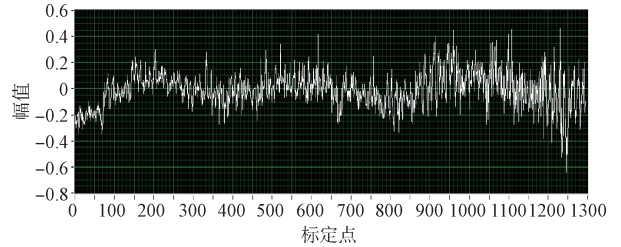


图 9  $\theta$  角度误差曲线

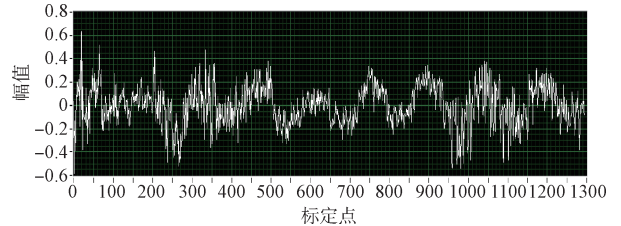


图 10  $\varphi$  角度误差曲线

从图 10 可以看出, 对于适应七孔探针测量的低速流场来说, 俯仰角和方位角的绝对误差为  $0.2^\circ$ , 而引用误差分别为  $0.27\%$  和  $0.05\%$ 。因此本文设计的多通道七孔探针测速系统是满足低速流场的测速要求的。而造成这样的误差结果一方面可能是七孔探针制造工艺上的孔径误差, 因为制造偏差造成的探针外形变化直接改变了探针头部附近在大角度流动下转捩和分离的位置, 导致了外区各区间的边界会发生移动和变形。从而影响到各区校准公式的标准偏差会发生明显的变化<sup>[9]</sup>。另一方面可能由 SM5852 传感器的测量误差造成<sup>[10]</sup>。对于 SM5852 传感器来说,  $1 \text{ kPa}$  的量程对于  $1 \text{ Pa}$  的测量误差, 其引用误差即为  $0.1\%$ 。另外从图 10 中可以看出,  $\varphi$  角度误差曲线呈现一定的规律性。而这也可能是在外区对称的测量通道中, 对

应的传感器测量数据存在一侧偏大,一侧偏小才会导致这样的误差曲线产生。

## 5 结 论

本文设计了一套基于 Modbus 传输协议的多通道七孔探针测速系统,在传输方式上兼容单个探针和探针群组的测量传输,采用 Modbus 传输协议对用 LabVIEW 构建的上位机进行数据传输。同时对于传感器存在的个体差异问题,用标准压力计对每个传感器进行压力标定,从而保证压力测量数据的一致性。从风洞标定实验中计算出测速系统的俯仰角和方位角的引用误差在 0.27% 和 0.05%<sup>[11]</sup>,得出数据处理后的测量数据满足七孔探针在低速流场的测量要求。最后分析了由探针制造误差和传感器本身测量误差会对测量结果带来的影响,为设计更优化更精确的七孔探针测速系统和移动测量提供了解决思路<sup>[12]</sup>。

## 参考文献

- [1] 王蕾. 七孔探针风洞实验技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2009.
- [2] 丁涛. 七孔探针实时测试系统及其可压缩流场测量问题研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008.
- [3] 陈丽君. 七孔探针测试系统研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2006.
- [4] 李鹏. 七孔探针动态测量技术研究[J]. 测试技术学报, 2013, 27(4): 287-293.
- [5] 乔新锋, 穆平安, 戴曙光, 等. 基于腐蚀电阻挂片的多通道测量系统的设计[J]. 电子测量技术, 2015, 38(6): 125-129.
- [6] 黄幸, 孟进, 唐健, 等. 基于 LabVIEW 的干扰消除装置测试系统设计[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(12): 57-62.
- [7] 卢志毅. 流体激励器特性研究及在流动控制中的应用[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
- [8] 马兴宇, 明晓. 七孔探针测量剪切流场的误差分析和实验验证[J]. 空气动力学学报, 2012, 30(1): 58-62.
- [9] 张震宇, 明晓. 七孔探针的神经网络校准与制造偏差分析[J]. 实验力学, 2005, 20(3): 473-478.
- [10] 李鹏, 马兴宇, 明晓. 多孔探针系统误差分析[J]. 实验流体力学, 2012, 26(5): 70-73.
- [11] 白亚磊, 明晓, 丁涛. 七孔探针可压缩流场测量研究[J]. 实验力学, 2010, 25(6): 667-672.
- [12] 李彦, 李卫东. 七孔探针三维自动测速系统[J]. 实验技术与管理, 2006, 23(1): 43-44.

## 作者简介

章鹏, 工学硕士, 主要研究方向为计算机测控系统等。  
E-mail: 253760974@qq.com