

文章编号 1004-924X(2011)01-0103-07

组合热膜式流速矢量传感器

阙瑞义, 朱 荣, 刘 鹏, 周兆英

(清华大学 精密仪器与机械学系 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 北京 100084)

摘要:针对在微型飞行器上测量空气流速矢量的需要,提出了一种比空速管轻巧、比热线式流速传感器抗干扰能力强的微型热膜式流速传感器及其组合系统。与热线式流速传感器相似,热膜流速传感器仅输出电阻值信息,对流速和流向均敏感。将多个传感器按照一定规律组合,可实现对一定角度范围内的流速矢量的测量,从而拓展其应用。结合试验推导了组合传感器测量流速矢量的原理与实现条件,讨论了传感器布置的优化方式并进行了误差分析。传感器特性的实验结果表明,按照 45° 间隔角布置的3个热膜式流速传感器联合,可以测量 180° 范围的流速矢量。结合推导与实验,证明组合测量方法可行有效,所占空间和能耗均低于阵列方案,且可推广至其它同类型流速计。

关键词:热膜式流速传感器;流速矢量;数据融合

中图分类号:TP212.17 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20111901.0103

Combined hot-film anemometers for measuring flow speed vectors

QUE Rui-yi, ZHU Rong, LIU Peng, ZHOU Zhao-ying

(*State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Department of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

Abstract: To realize the measurement of the air flow vector on a Micro Air Vehicle(MAV), a new type of hot-film anemometer which was lighter than a pitot and firmer than a hot-wire anemometer was developed and a corresponding combined system was also presented. Similar to the hot-wire anemometer, the hot-film anemometer is sensitive to both magnitude and direction of flow speed, and its output is a resistance when either the flow magnitude or direction changes. Moreover, by combining the sensor array simply, the flow speed vector could be acquired in a angle range, and thus its application area was expanded. Based on the experimental tests on the sensor characteristics, the principles and conditions of the combination scheme were researched, the method to arrange the sensor array was given and the speed vector measuring error was discussed. The experimental results indicate that arranging 3 hot-film anemometers with a separation angle of 45° to form a combination system can measure the flow vector in the angle range of 180° . Both of theoretical and experimental results prove that the presented combination method is effective and feasible, and its volume and energy consume are both lower than those of traditional methods. It can be further expanded to other flow sensors with similar characters.

Key words: hot-film anemometer; flow speed vector; data fusion

收稿日期:2010-03-30;修订日期:2010-05-10.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2006AA04Z257);清华大学自主科研计划资助项目

1 引言

微型飞行器(Micro Air Vehicle, MAV)质量轻,飞行速度低,其翼表气动载荷可能因为风速变化等原因产生较大的相对变化量^[1-2],这些特点导致其操纵难度比大型飞机大很多,也意味着 MAV 的自动驾驶系统面对的是一个干扰较大、难度较高的被控对象。

为了提高 MAV 的飞行稳定性和抗风能力,实时、精密检测其空速并应用于飞行控制非常重要。由于 MAV 所处环境的特点,其机载测控系统需要具有较低的空速测量范围以及较高的响应速度,而且需要测量流速的角度以实现对风向的识别。

目前成熟的热线式流速传感器(Hot Wire Anemometer, HWA)和皮托管(或称为空速管)式流速计分别以精密和可靠著称,并已经服务于不同的领域:前者量程处于较低速区域,多用于精确标定计算流体力学(CFD)模型;后者则服务于一般航空器和稍大的无人机中,量程处于中高速区域^[3]。近年来随着 MAV 领域的发展,其使用 HWA 还是皮托管变得难以抉择。MAV 小而轻,皮托管体积和重量都较大,飞行性能受皮托管的影响严重;而常规的热线式流速传感器也难以在充满震动、灰尘的恶劣环境下可靠工作。为此,本文研制了一种微型热膜式流速传感器(Hot Film Anemometer, HFA)^[4-5],其基本性能适合 MAV 的表面流速测定。美国加州大学、加州理工学院在 20 世纪 90 年代初期研究了微机电的剪应力传感器,并在三角翼无人机 Gryphon 机翼前缘成功应用于测量剪应力^[6]。本文提出的微型热膜式流速传感器与之不同,其主要用于微型飞行器翼表流速检测。传感器为采用薄膜磁控溅射工艺制作的薄膜带状热电阻。选取这种结构的原因在于传感器自身质量、体积较小,具有较高的时空分辨率和灵敏度,并且具有较低的成本,以及较自由、便捷的安装与使用方法^[7-8]。

HFA 和 HWA 一般用于测量风速的标量值。例如在 CFD 标定实验中,需要先采用皮托管找到当地风速方向,再将 HFA/HWA 对准流速

方向安装^[3]。在微型飞行器上应用时,风速和风向耦合,采用单个 HFA/HWA 传感器无法得到矢量解算所需信息,而需要采用多传感器组合,通过数据融合实现多信息量的在线检测。早先有研究者采用传感器阵列的方案,但尺寸较大^[7-8]。为此本文中采用 3 个 HFA 组合方案实现风速矢量的测量。理论推导和实验研究表明,设计的传感器组合测量方式可行、有效,所占的空间和功耗都要低于阵列方案。

2 热膜式流速传感器及其调理电路

2.1 传感器制备与性能

自研的微型热膜式流速传感器的外观如图 1 所示:

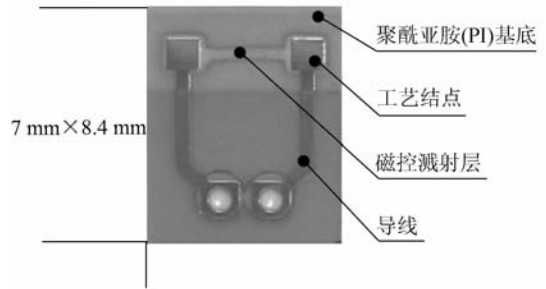


图 1 热膜式流速传感器外观

Fig. 1 Prototype of HFA

传感器的敏感材料为铬-镍-铂三层薄膜,位于磁控溅射层。

制备过程如图 2 所示,在柔性印刷电路板(PCB)工艺的基础上用磁控溅射工艺制备出敏感薄层:

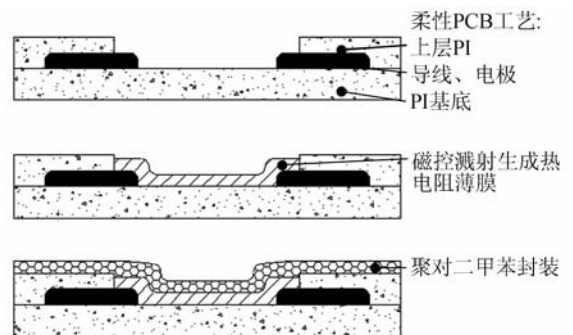


图 2 微型热膜式流速传感器制备过程

Fig. 2 Fabrication process of HFA sensor

合,通过工作台控制其转动。受工作台转向限制,实验中测试了组合系统在安装平面±45°内的转动,而实际上该三组件组合系统可实现接近±90°的流向测量。

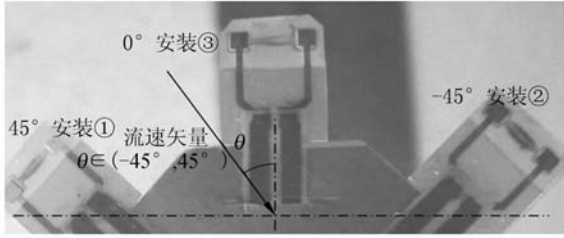


图 4 组合 HFA 的安装方式

Fig. 4 Placements of sensors in a combined HFA

假设风向角度如图 5 所示定义,不同风向角度下的实验结果如图 6 所示,各传感器按照图 4 编号。

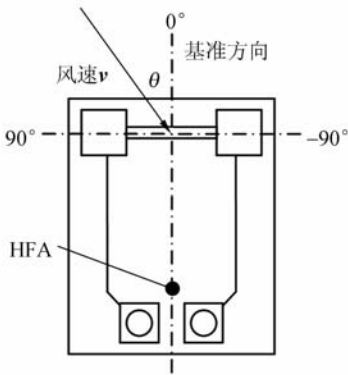


图 5 风向坐标定义

Fig. 5 Wind direction

由实验结果可知,各传感器的输出随风速增加而增加,随风向在不同区域内呈现单调特性。

分析可知,单一的 HFA 传感器具有如下特性:

$$\frac{\partial U}{\partial |\mathbf{v}|} > 0 \text{ (未饱和)}, \quad (9)$$

$$\frac{\partial U}{\partial \theta} < 0, \theta \in (0, 90^\circ), \quad (10)$$

$$U(\theta) = U(-\theta), \quad (11)$$

$$U(\theta) = U(\theta + 180^\circ), \quad (12)$$

根据式(9),(10),(11),(12),可以得到:

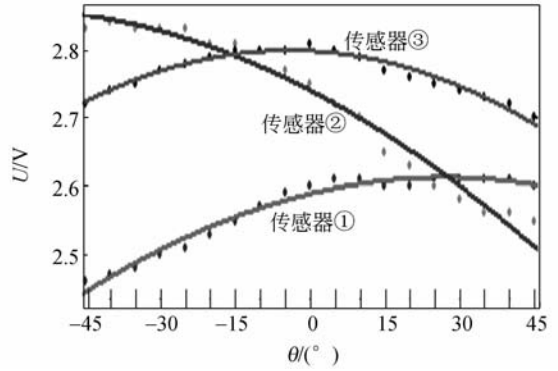
$$\frac{\partial |\mathbf{v}|}{\partial \theta} > 0 \quad \theta \in (0, 90^\circ), \quad (13)$$

$$\forall U = u \in P \Rightarrow |\mathbf{v}|(\theta) = |\mathbf{v}|(\theta + 180^\circ), \quad (14)$$

$$\forall U = u \in P \Rightarrow |\mathbf{v}|(\theta) = |\mathbf{v}|(-\theta). \quad (15)$$

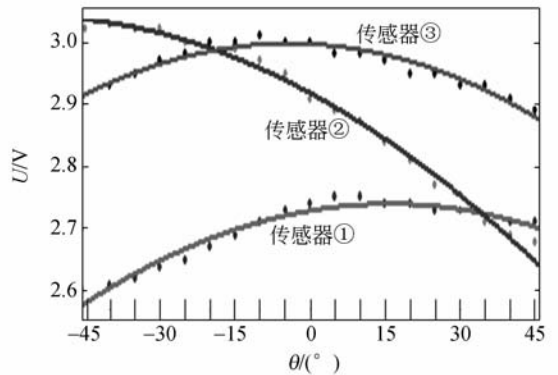
式中,集合 P 为 U 在实际工作中的取值范围。

根据上述推导,对应传感器的每一个输出值 U ,均存在一条 $|\mathbf{v}|-\theta$ 曲线,其上每一点代表的流速矢量均可以使传感器输出当前的 U ,实际流速则对应该曲线上的某一点。采用组合方式,使得各传感器的 $|\mathbf{v}|-\theta$ 曲线相交,当量程内的交点数目降为一个时,该交点就代表唯一确定的风速矢量。



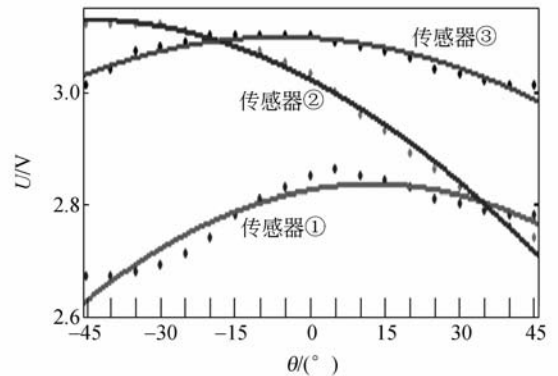
(a) 风速和流速 $|\mathbf{v}| = 2 \text{ m/s}$

(a) Wind speed and flow speed $|\mathbf{v}| = 2 \text{ m/s}$



(b) 风速和流速 $|\mathbf{v}| = 3 \text{ m/s}$

(b) Wind speed and flow speed $|\mathbf{v}| = 3 \text{ m/s}$



(c) 风速和流速 $|\mathbf{v}| = 4 \text{ m/s}$

(c) Wind speed and flow speed $|\mathbf{v}| = 4 \text{ m/s}$

图 6 HFA 在不同风速 $|\mathbf{v}|$ 、风向角度 θ 下的输出电压 U

Fig. 6 Output voltages of HFA at different flow magnitudes and directions

由于传感器制造差异的原因,零风速下各路的输出初始电压值可能不同,但趋势具有相同规律。

3.2 误差分析与分布原则

首先考虑两传感器组合,风速矢量由两传感器的输出 U_1 和 U_2 确定。

传感器系统输出的 U 不可避免会带有杂波,反映在前文所述的 $|\mathbf{v}|-\theta$ 曲线上,就是曲线具有了一定的“宽度”。根据 $Q(\mathbf{v})$ 与 U 的关系可以获得“宽度”的细节信息。

根据简单的几何推导,两条 $y-x$ 曲线 $y_1(x)$, $y_2(x)$ 的交点 P 的 x, y 坐标取值范围可以表示为:

$$\begin{cases} \Delta y_P \approx (|\delta_{y_1} \cot \varphi_1| + |\delta_{y_2} \cot \varphi_2|) / |\cot \varphi_1 - \cot \varphi_2| \\ \Delta x_P \approx (\delta_{y_1} + \delta_{y_2}) / |\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2| \end{cases} \quad (16)$$

式中, $\Delta x_P, \Delta y_P$ 为交点 P 的 x, y 坐标取值范围,即表示测量误差; $\delta_{y_1}, \delta_{y_2}$ 分别为曲线 $y_1(x)$, $y_2(x)$ 的 y 方向噪声幅值; $\tan \varphi_1, \tan \varphi_2$ 分别为 $y_1(x), y_2(x)$ 在 P 点的斜率。

显然,在噪声大小一定的情况下,增大两曲线的相交角度(即增大上式分母)有利于减小测量误差。

根据式(13), (14), (15), 单一传感器 $|\mathbf{v}|-\theta$ 曲线在 $\theta \in (0, 180^\circ)$ 内分为两个 90° 范围的单调区间。将两个传感器垂直布置则可以确保两条 $|\mathbf{v}|-\theta$ 曲线的斜率正负性处处相反,符合上述增大夹角原则。

从上述特性容易证明,在 $\theta \in [0, 360^\circ)$ 内,一对垂直布置的传感器会得到 4 个对称的矢量解 \mathbf{v}_{1-4} , 4 个解以两个传感器自身基准方向(见图 5, 6)为两对称轴。如图 7 所示。在 $\theta \in [0, 90^\circ)$ 内,矢量解唯一,因而垂直分布的两个传感器可以测量 90° 范围的风速矢量。

如果增设第三个传感器,可以将流速矢量角度测量范围从 90° 扩展到 180° 。该传感器的作用是在 180° 范围内确定出的唯一风速矢量解。

下面研究在圆周范围内划 180° 为工作量程的方法(不失一般性):如图 7 中的直线 AB 划分(取图中 \mathbf{v}_2 所在部分),做 OC 线满足 $\angle COM = \angle BOM$, 同时即有 $\angle COQ = \angle QOA$, 用对称条件易证 180° 量程内的两个解必同处于 $\angle BOC$ 内或 $\angle COA$ 内。

安装第三只传感器时,让 $\angle COA, \angle COB$ 各

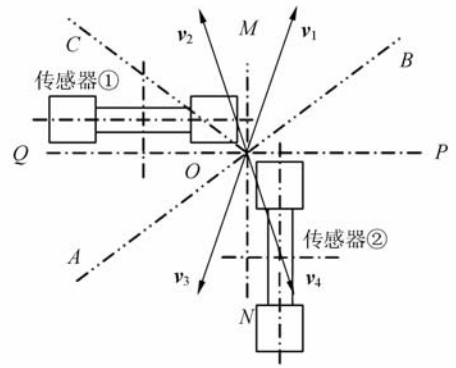


图 7 $\theta \in [0^\circ, 360^\circ)$ 范围内对称的 4 个矢量解之分布
Fig. 7 Distribution of four symmetrical vector roots for two-HFA combination in range of $\theta \in [0^\circ, 360^\circ)$

自处于其 $|\mathbf{v}|-\theta$ 单调区间内,可以确保第三只传感器能够区分 180° 内两个解的电压输出,得到唯一解,从而得到下列如图 8 所示的两种安装方式,传感器③与传感器①和②的夹角分别为 45° 。本论文中实验系统采用了 I 的组合方式。

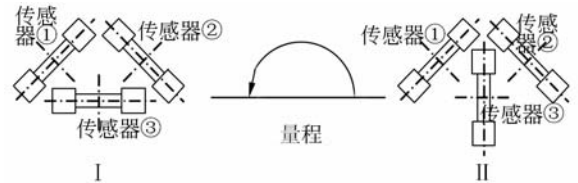


图 8 两种三 HFA 组合安装方案
Fig. 8 Two arrangement designs of three-HFA combination

3.3 布置的优化

I 和 II 两种方式只是规定了传感器指向,因此位置平移还可以衍生出更多的排列布置。

传感器组合布置还需要考虑一些其他因素,主要有协调导线排布、防止气流遮挡、防止相互之间的热干扰,以及在满足上述的情况下尽量减小间距,以减小流场分布不均带来的测量误差。

4 结 论

本文提出采用多传感器组合实现流速矢量测量的方案,从理论分析和实验的角度对矢量测量的实现条件、误差、组合优化等进行了研究。文中所提出的由 3 个间隔 45° 热膜流速传感器组合的系统可实现接近 180° 范围内的流速矢量检测。

传感器轻小、具有柔性,系统简单、容易实现,可应

用在如微型飞行器等设备上的流速、流向测量。

参考文献:

- [1] 张福星,朱荣,周兆英. 柔性翼微型飞行器气动特性的实验研究[J]. 航空学报,2008,29(6):1440-1446. ZHANG F X, ZHU R, ZHOU ZH Y. Experiment research on aerodynamics of flexible wing MAV [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2008,29(6):1440-1446. (in Chinese)
- [2] 张庆,程维明,蒋蓁,等. 微型旋翼飞行器飞行控制系统设计[J]. 光学精密工程,2001,9(6):557-560. ZHANG Q, CHENG W M, JIANG Z, *et al.*. Design of a flight control system of a micro aerial vehicle [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2001,9(6): 557-560. (in Chinese)
- [3] BRUUN H H. *Hot-Wire Anemometry Principles and Signal Analysis*[M]. New York: Oxford University Press, 1995.
- [4] 费海平,朱荣,周兆英. 微型热式流速传感器及其在微型飞行器翼表流场测量中的应用[J]. 传感技术学报,2007,20(5):1134-1138. FEI H P, ZHU R, ZHOU Z Y. Micro-Hot wire/film anemometer and its application in measuring the flow field on the wing of MAVs [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2007, 20(5): 1134-1138. (in Chinese)
- [5] ZHU R, LIU P, LIU X D, *et al.*. A low-cost flexible hot-film sensor system for flow sensing and its application to aircraft [C]. *Proceedings of 22nd IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems. Sorrento, Italy*, 2009: 527-530.
- [6] HUANG A, FOLK C, HO C M. Gryphon M(3) system: integration of MEMS for flight control [J]. *SPIE*, 2001, 4559: 85-94.

- [7] 马炳和,赵建国,邓进军,等. 全柔性热膜微传感器阵列制造工艺及性能优化[J]. 光学精密工程, 2009,17(8):1971-1977. MA B H, ZHAO J G, DENG J J, *et al.*. Fabrication of flexible hot film sensor array and its optimization [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(8):1971-1977. (in Chinese)
- [8] 肖素艳,车录锋,李昕欣,等. 基于柔性 MEMS 皮肤技术温度传感器阵列的研究[J]. 光学精密工程, 2005,13(6):674-680. XIAO S Y, CHE L F, LI X X, *et al.*. A temperature sensor array based on flexible MEMS skin technology [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2005,13(6):674-680. (in Chinese)
- [9] 王劲东,周兆英,朱荣,等. 柔性翼微型飞行器的稳定特性[J]. 清华大学学报(自然科学版),2006,46(11):1840-1843. WANG J D, ZHOU ZH Y, ZHU R, *et al.*. Flight stability of flexible wing micro air vehicle [J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2006,46(11):1840-1843. (in Chinese)
- [10] 蔡春丽,刘志远,王惠玲,等. 基于恒温法的热膜式气体流量传感器的设计[J]. 传感器与微系统, 2009,28(6):104-107. CAI C L, LIU Z Y, WANG H L, *et al.*. Design of hot-film air flow sensor based on method of constant temperature [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2009, 28(6): 104-107. (in Chinese)
- [11] FREYMUTH P. Frequency response and electronic testing for constant-temperature hot-wire anemometers [J]. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 1977, 10: 705-710.

作者简介:



阙瑞义(1987-),男,浙江松阳人,博士研究生,2009年于同济大学获得学士学位,主要从事微机电系统方面的研究。E-mail: katykob@163.com



朱荣(1968-),女,江苏南京人,博士,研究员,博士生导师,1990年、1993年、1999年于上海交通大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事微型飞行器及其协同控制技术、微米/纳米传感器及系统的研究。E-mail: rong_zhu@263.net



刘 鹏(1985—),男,山东惠民人,硕士研究生,2007年于北京航空航天大学获得学士学位,主要从事微机电系统等方面的研究。E-mail: liupeng07@mails. tsinghua. edu. cn



周兆英(1937—),男,江苏扬州人,教授,博士生导师,主要从事微机电系统、微测试、自动控制等方面的研究。E-mail: zhouzy@mail. tsinghua. edu. cn

● 下期预告

激光光谱技术在燃烧流场诊断中的应用

刘晶儒,胡志云,张振荣,关小伟,王 晟,陶 波

叶景峰,张立荣,黄梅生,赵新艳,叶锡生

(西北核技术研究所 激光与物质相互作用国家重点实验室,陕西 西安)

激光光谱技术具有非接触式在线测量、时空分辨力高和可视化等优点,广泛用于航空航天发动机、汽车内燃机等燃烧流场参量诊断,对于改进发动机设计,提高燃烧效率、减少污染具有重要意义。本文介绍了西北核技术研究所燃烧流场诊断的激光光谱技术研究进展,叙述了相干反斯托克斯喇曼散射、自发振动喇曼散射、激光诱导荧光、分子滤波瑞利散射、可调谐二极管激光吸收光谱等技术的基本原理及其实验系统。给出并分析了激光光谱技术对预混火焰稳态燃烧场和固体燃剂瞬态燃烧场的温度、主要组分及浓度、流场密度和火焰构造测量的实验结果。实验表明,基于激光光谱的燃烧诊断技术不仅能够实现对稳态燃烧场的高精度测量,而且能够应用于复杂的瞬态燃烧场诊断。