

低速流体边界层分离检测试验*

刘奎 苑伟政 钟军威 邓进军 姜澄宇
(西北工业大学微/纳米系统实验室 西安 710072)

摘要: 结合边界层分离点附近的切应力变化规律,对边界层分离特性进行研究,确定边界层分离点的判定依据。采用分立元件通过表面贴装工艺来实现柔性微型热膜传感器阵列的集成,并研究该传感器阵列中敏感元件、柔性衬底的设计及传感器的排布,解决柔性传感器阵列对微细加工工艺要求较高的难题。根据边界层分离点判定依据,在低速风洞试验中对传感器阵列的性能和传感器阵列输出信号采用统计量算法和傅里叶变换功率谱算法进行处理判断,并与计算流体力学仿真结果对比,结果表明制造的微型热敏传感器阵列能够实现对流体边界层分离位置的在线测量。

关键词: 边界层分离 切应力 柔性阵列 风洞试验

中图分类号: 130.25

Experiments of Low Speed Fluid Boundary-layer Separation

LIU Kui YUAN Weizheng ZHONG Junwei DENG Jinjun JIANG Chengyu
(MEMS/NEMS Laboratory, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

Abstract: Through analyzing the character of the shear stress near the separation point of the boundary layer, the determination methods of the location of the fluid separation point have been presented. Using the surface mount technology to integrate the discrete devices and flexible substrate, the design of the device and polyimide sub-layer are fulfilled to settle the micro sensor array craft puzzle. Based on the criterion algorithm and faster Fourier transformation methods of sensor array output voltage, the flexible sensor array with the processing system has been tested in the low speed wind tunnel. The results demonstrate that the dynamic and real-time performance of the system can be fulfilled.

Key words: Boundary layer separation Shear stress Flexible array Wind tunnel test

0 前言

长期以来,在航空航天领域内关于边界层分离研究的基本思想就是防止分离,设法使边界层中的流体获得更高能量,因此边界层中的流体易于克服逆压梯度从而防止分离。随着微机电系统(Micro-electro-mechanical systems, MEMS)技术的发展,除了以上传统的被动流动控制之外,主动流控制也逐渐成为当前流体力学中的研究热点之一。使用微型致动器改变绕流体边界层分离点附近流体的动能,使分离点的位置发生移动,实现流体动力学性能的改变和对绕流体进行宏观控制的目的。其中,对分离点位置的准确判断是进行主动流动控制的基础和关键,只有在分离点及其附近进行扰动,才能达到最佳的控制效果^[1]。

边界层分离检测技术,通常分为在线测量和非

在线测量两大类。国内普遍采用非在线测量法,如丝线法、热板法和热线风速计法等^[2]。美国加州大学洛杉矶分校研制了基于柔性衬底的微型多晶硅热膜传感器阵列,对微型三角翼飞行器前缘的边界层分离点进行在线测量,并通过机载单片机系统实时判定分离点位置^[1]。中国台湾成功大学也研制了基于柔性衬底的微型铂热膜传感器阵列^[3],用于圆柱前缘及平板表面在不同雷诺数下非定常分离流的研究,并判定分离点位置。

国内外对边界层分离的在线测量研究主要集中在制造一体化微型传感器阵列上,在利用分立传感器集成柔性阵列的结构设计及加工工艺上处于空白;同时,对边界层分离点位置的判定方法尚缺乏全面深入的研究。本文以边界层分离点检测技术为研究对象,对柔性微型传感器阵列的结构设计与集成、阵列驱动电路、滤波电路以及分离点判定算法进行研究,制作完成能够实现在线检测流体分离点位置的柔性传感器阵列检测系统,为MEMS技术在主动流动控制领域的广泛应用提供了技术方案。

* 国家自然科学基金(90305017)和航空基金(04153074、03153066)资助项目。20070216收到初稿,20070820收到修改稿

1 微型柔性传感器阵列设计

1.1 微型传感器的设计和制作

铂电阻在 0~630 °C 范围内与温度的变化成线性关系^[4]为

$$R_{\theta} = R_0(1 + \alpha\theta + \beta\theta^2 + \gamma\theta^3) \quad (1)$$

式中 R_{θ} ——测量温度 θ 下的电阻值

R_0 ——温度为 0 °C 时的标准电阻值

θ ——测量温度

α, β, γ ——电阻温度系数

$$\alpha = 3.85 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$$

$$\beta = -5.84 \times 10^{-7} \text{ K}^{-1}$$

$$\gamma = -4.22 \times 10^{-12} \text{ K}^{-1}$$

铂电阻的灵敏度与金属的电阻率和电阻温度系数有关, 忽略公式中 α 的高次项, 其关系式可化为

$$S = \frac{dR}{dT} = \alpha R_0 \quad (2)$$

式中 S ——铂电阻对温度的灵敏度

根据电阻计算公式 $R = \rho l / (bh)$, 其中 ρ 、 l 、 b 、 h 分别为电阻率、电阻长、宽及高; 当选择的材料电阻温度系数固定之后, 可以在设计传感器时, 改善传感器的几何图形将电阻值加大, 从而提高灵敏度。本文则利用栅形结构提高热膜电阻值, 从而提高其灵敏度, 如图 1 所示。设计的热膜传感器的尺寸约 1.0 mm×0.5 mm×0.2 mm, 初始阻值(0 °C 状态下)约 1 000 Ω 。

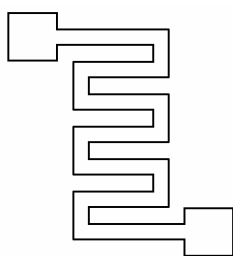


图1 栅形电阻结构

同时, 由于设计的热膜传感器没有采用具有真空腔的器件结构, 为了能够更快地达到气流与敏感元件的热平衡, 使用导热性能及绝缘性能较好的 Al_2O_3 陶瓷作为热膜电阻的载体。设计制作的表面贴装式微型热膜传感器结构照片如图 2 所示。

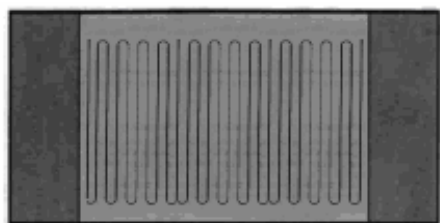


图2 表面贴装式微型热膜传感器结构照片

1.2 柔性衬底的设计和制作

聚酰亚胺(PI)具有优异的耐热性能, 使得其能够承受表面贴装的热敏电阻所形成的高温环境; 可形成平整面的能力使得 PI 适合于各种不同分辨率的光刻技术, 不溶性可保证在用化学湿法刻蚀金属层的过程中不受损伤等。

本文应用的聚酰亚胺衬底的主要作用是传感器提供物理及电气连接, 充当传感器阵列的载体, 并传输电信号。柔性聚酰亚胺衬底制作通常需要 PI 覆铜板、聚脂覆盖膜和感光膜三种基本材料, 其结构关系如图 3 所示。

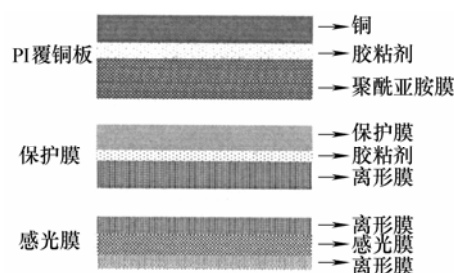


图3 柔性衬底基本材料的结构关系示意图

1.3 传感器阵列排布设计

传感器阵列排布有等间隔排布、疏密相间排布两种方案。图 4 为传感器阵列排布方式示意图。



图4 传感器阵列排布方式示意图

以上两种方案各有优缺点, 前者传感器可以排布较密, 各传感器之间的干扰量相同; 但是它在测量区域的测量分辨率不能更精细。后者相对来说排布较疏, 但是它在测量区域的测量分辨率较高, 同时各传感器之间的互相干扰也较大, 而且疏密不同传感器之间的干扰量也不相同, 这也为排除干扰增加了难度。本文选择疏密相间的方案排布微型热膜传感器阵列, 而且在二维标准翼型上进行测量时, 传感器的间隔可以根据流体力学表面压力分布式测量中的压力孔的间隔大小进行设定。

2 驱动和检测电路设计

2.1 阵列驱动电路设计

图 5 是设计的阵列驱动电路图, 该电路采用双

运算放大器来组成单路恒流源电路，放大器 U_1 电路为同相输入放大电路。

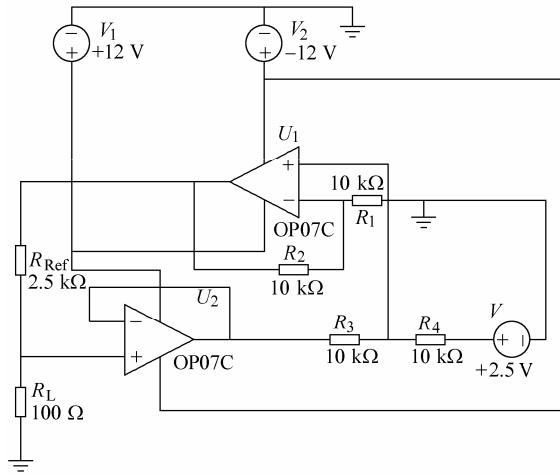


图 5 阵列驱动电路图

$$V_{Out U_1} = (1 + R_2 / R_1)(V - V_{R_4}) \quad (3)$$

$$V_{Out U_1} = 2(V - V_{R_4}) \quad (4)$$

式中 $V_{Out U_1}$ ——从放大器 U_1 输出的电压

V ——参考电压

V_{R_4} —— R_4 两端的电压

另外，放大器 U_2 起电压跟随器的作用。

$$V_{Out U_2} = V - V_{R_4} - V_{R_3} \quad (5)$$

式中 $V_{Out U_2}$ ——从放大器 U_2 输出的电压

V_{R_3} —— R_3 两端的电压

$$V_{R_{Ref}} = V_{Out U_1} - V_{Out U_2} = 2(V - V_{R_4}) - (V - V_{R_4} - V_{R_3}) = V \quad (6)$$

式中 $V_{R_{Ref}}$ ——参考电阻 R_{ref} 两端的电压

所以，由以上可推出 $I = V / R_{Ref}$ ，图 5 中的 R_L 则为负载电阻。

在负反馈中，使用放大器构建电源可以减小由于晶体管温度上升而引起的误差，具有自补偿的功能。该恒流源电路输出电流大小范围在 0.05~10 mA 之间，并且电流稳定性可达 $\pm 0.07\%$ ；对于初始阻值(0 °C 状态下)为 1 k Ω 的微型铂热膜传感器，输出电阻范围 1.00~1.36 k Ω 。

2.2 滤波衰减电路设计

由于风洞试验中，传感器阵列输出的电压信号含有随机干扰和噪声，并且电压信号在 6~8 V 范围内，在 A/D 转换器 THS1206 的输入范围(1.5~3.5 V)之外，所以除了对信号进行滤波之外，还有必要对其进行衰减。滤波衰减电路采用二阶无限增益低通滤波器，其电路图如图 6 所示。

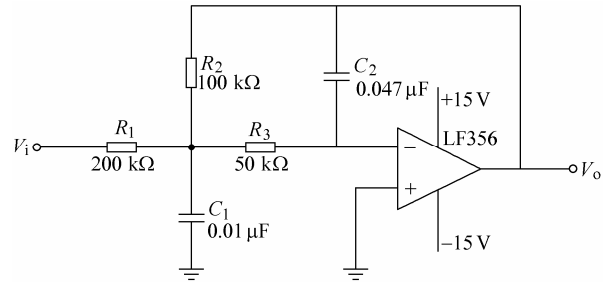


图 6 低通滤波衰减电路

滤波器的特性参数如下叙述。

增益

$$K_0 = -R_2 / R_1 \quad (7)$$

截止角频率

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{R_2 R_3 C_1 C_2}} \quad (8)$$

品质因数

$$Q = 1 / \alpha \quad (9)$$

式中 K_0 ——滤波器的增益

ω_0 ——滤波器的截止角频率

Q ——滤波器的品质因数

$$\alpha = \sqrt{\frac{C_2}{C_1}} \left(\sqrt{\frac{R_2}{R_3}} + \sqrt{\frac{R_3}{R_2}} \sqrt{\frac{R_2 R_3}{R_1^2}} \right)$$

先取经验公式

$$C = 10 / f_c$$

式中 f_c ——滤波器的截止频率

初步估算一个电容；然后取 $C_1 = C$ ， $C_2 = kC$ ；最后根据以下公式计算电阻值

$$R_1 = R_2 / K_0 \quad (10)$$

$$R_2 = \frac{\alpha}{2\omega_0 k C} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4k(K_0 + 1)}{\alpha^2}} \right] \quad (11)$$

$$R_3 = 1 / (\omega_0^2 R_2 k C^3) \quad (12)$$

式中 k 值必须满足的条件为

$$k \leq \frac{\alpha^2}{4(K_0 + 1)}$$

元器件参数如图 6 中标注所示，由此可得电路的特性参数为

$$K_0 = -R_2 / R_1 = -0.5$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{R_2 R_3 C_1 C_2}} \approx 1 \text{ kHz}$$

3 风洞试验和结果

3.1 试验模型和仿真分析

为了便于边界层分离点算法研究，风洞试验采

用二维 NACA0012 标准翼型进行试验,如图 7 所示,翼型弦长 300 mm,具有 16 个热膜传感器的柔性传感器阵列沿弦线方向疏密相间排布。为了使边界层从后缘开始分离,迎角设定为 10° ;低速低湍流风洞中其他环境参数为:雷诺数为 8×10^5 ,风速为 40 m/s。

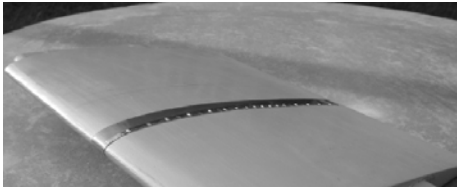


图 7 NACA0012 标准翼型

在相同环境参数条件下,采用计算流体力学进行边界层分离仿真如图 8 所示,仿真结果显示边界层分离点在第 7 个传感器(S_7)附近。

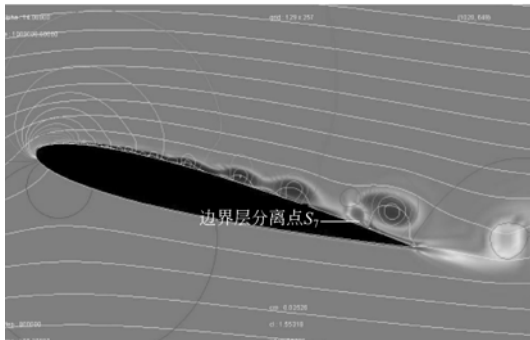


图 8 边界层分离点计算流体力学仿真结果

3.2 利用时域统计量判定边界层分离

在边界层流动中,由于随机干扰及测量噪声的影响,往往不能精确地预测被测信号随时间的变化;即使在可能控制的相同条件下重复进行试验,每次所得的数据也不尽相同。边界层流动中的这些随机现象虽然是杂乱无章的,具有不确定性,但是在统计上其仍有一定的规律性。在边界层分离点的判定中,常用的统计量有平均值和标准差^[5]。

平均值是测量信号的定常分量,同时也是真值的最小无偏估计,反映了沿弦线方向各测量点热线输出电压信号的幅度大小。

$$u_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{ij} \quad i=1 \sim 10 \quad n=1\ 000 \quad (13)$$

式中 u_i ——各数据点数值的平均值

n ——单次扫描的采样点数

x_{ij} ——第 i 个传感器的第 j 数据点

标准差是测量信号的非定常量,也是在真值未知的条件下,测量值方差的最小无偏估计,反映了沿弦线方向各测量点输出电压信号的波动强度。

$$\delta_i = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (u_i - x_{ij})^2}{n-1}} \quad i=1 \sim 10 \quad n=1\ 000 \quad (14)$$

式中 δ_i ——各数据点数值的标准差值

采用以上算法对数据进行处理,统计量值随传感器分布曲线如图 9 所示。根据边界层分离判定准则及试验数据,边界层分离点应有以下两个特征:沿弦线方向检测点输出电压均值开始变大;沿弦线方向检测点输出电压标准值也开始变大。

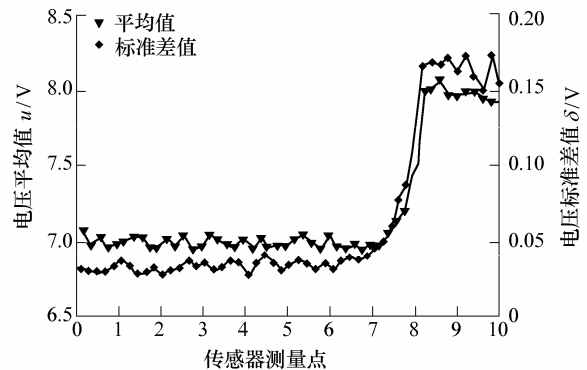


图 9 时域统计量判定算法结果

从图 10 可以判定,平均值及标准差值在 $S_1 \sim S_7$ 传感器之间一直较平稳, S_7 传感器处开始发生较大突变,在 S_9 传感器处开始趋于平稳,其中标准差值发生突变的幅度比平均值较大。由以上判定方法可以确定边界层分离点位置约在(S_7, S_9)范围。

以上判定算法的运算过程主要由加法组成,采用数字信号处理系统来实现,则面向微型三角翼前缘边界层分离点判定的运算量耗时约为^[6]

$$m \times N \times \ln N \times \frac{1}{T_s} =$$

$$60 \times 1\ 000 \times \ln 1\ 000 \times 6.25 = 3.75 \text{ ms} \quad (15)$$

式中 m 为三角翼前缘 6 组传感器阵列中 60 个传感器, N 为单个传感器的采样点数, $1/T_s$ 为数字信号处理的指令周期。

这样,加上检测系统中数据采样转换时间 10 ms,整个检测系统的总响应时间约为 13.75 ms;小于后端致动器阵列的总响应时间 20 ms,能够在控制系统完成一个控制动作之后,实时地判定出分离点位置并将其传输给控制系统。

在统计理论中,平均值和标准差在解决测量值随机及粗大误差时具有明显优势,但是处理在时域上波动起伏的非平稳随机信号时还存在着不可逾越的缺陷,造成判定出的分离点精确度较差、分离区偏大。这些统计值可以用来描述边界层分离趋势,但是还不足以精确判定分离点位置。

3.3 利用傅里叶变换法判定边界层分离

边界层分离之前,除了有主要能量的低频流动之外,还有部分中高频波动旋涡。边界层分离之后,分离流中包含各种不同波动频率的旋涡,能量在整个频谱内发散。傅里叶变换(Fourier transform, FFT)把时域信号变换到频域上,把信号分解成在各个不同频率值的正弦信号的叠加,各个频率值处的幅值组成该时刻采样信号的幅频响应;其中占信号能量较大比重的正弦信号,在该频率点的幅值较大^[7]。本节根据边界层分离前后,主流波动频率的变化,采用基于FFT功率谱估计法判定边界层分离点位置。

根据边界层分离前后主流波动频率的变化,采用Matlab软件对二维标准翼型上 S_3 、 S_5 、 S_{10} 三组数据进行FFT功率谱估计,如图10~12所示。边界层分离前,信号能量主要集中在低频约20 Hz频段处;边界层分离后,低频段能量锐减,部分能量集中在整个频段内发散。所以根据低频段模值出现的较大变化,可判定出边界层分离趋势;低频段模值开始出现较大变化的点即为边界层分离点。

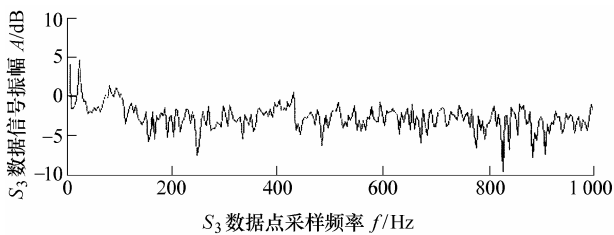


图10 数据点 S_3 的功率谱分布示意图

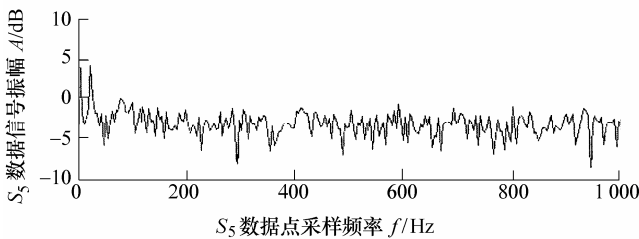


图11 数据点 S_5 的功率谱分布示意图

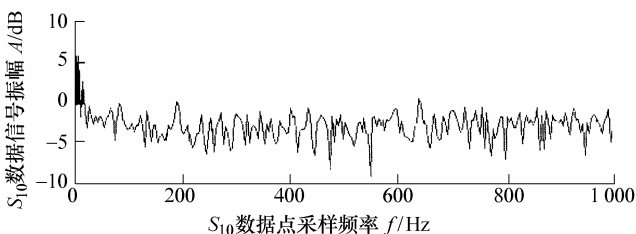


图12 数据点 S_{10} 的功率谱分布示意图

根据以上分析,对柔性微型热膜传感器阵列中的16组数据分别进行FFT功率谱估计,采用该方法判定出的边界层分离点大致在(S_7 , S_8)区间内。

4 结论

(1) 确定了边界层分离点的判定依据,并通过研究国内外柔性微型热膜传感器阵列的集成工艺,根据国内现有工艺条件,提出一种新的集成方法,即采用分立元件通过表面贴装工艺来实现柔性微型热膜传感器阵列的集成。

(2) 设计了基于双运算放大器的恒流源驱动电路和低通滤波电路,滤除传感器输出信号中的高频噪声。

(3) 根据边界层分离特性,在常用的统计量判定算法基础上,对风洞试验数据进行处理,判定分离点位置。分析结果表明,该系统满足灵巧蒙皮系统实时性、动态性的要求。

参 考 文 献

- [1] XU Y, JIANG F K. Flexible shear-stress sensor skin and its application to unmanned aerial vehicles[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2003, 105(3): 321-329.
- [2] 戴昌晖. 流体流动测量[M]. 北京: 航空工业出版社, 1991.
DAI Changhui. Flow current measurement[M]. Beijing: Aviation Industry Publishing Company, 1991.
- [3] 杜荣国. MEMS热膜传感器设计制造及应用于探讨非定常流动分离现象[D]. 中国台湾: 国立成功大学, 2003.
DU Guorong. MEMS thermal sensor design and fabrication and detection the flow separation phenomenon[D]. Taiwan, China: National Cheng Kung University, 2003.
- [4] WANG X Q, HAN Z G, JIANG F K, et al. A fully integrated shear stress sensor[J]. *Journal of Aircraft*, 2000, 37(4): 167-171.
- [5] JIANG F K, LEE G B, TAI Y C, et al. A flexible micromachined-based shear-stress sensor array and its application to separation-point detection[J]. *Inst. of Aeronautics and Astronautics*, 1999, 8: 25-28.
- [6] Texas Instrments. TMS320VC5416 fixed-point digital signal processor data sheet[G]. TI Corporation, 2003.
- [7] 程佩青. 数字信号处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.
CHENG Peiqing. Digital signal processing. Beijing: Tsinghua University Press, 2001.

作者简介: 刘奎,男,1979年出生,博士研究生。主要从事微机电系统传感器设计、制造和检测方面的研究。

E-mail: hanffer@hotmail.com

