

文章编号: 1000-6893(2006)04-0574-05

基于微型压力传感器阵列的边界层分离点检测方法

陈爽, 马炳和, 苑伟政, 姜澄宇

(西北工业大学微/纳米系统实验室, 陕西西安 710072)

Detection Method of Boundary-Layer Separation Point Based on Micro Pressure Sensor Array

CHEN Shuang, MA Bing-he, YU AN Weizheng, JIANG Cheng-yu

(Micro and Nano Electromechanical Systems Laboratory, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

摘要: 为了检测边界层的分离点, 探讨了根据表面压力分布变化判定分离点的检测方法, 提出了基于微机电系统(MEMS)技术和柔性衬底的微型压力传感器阵列的结构方案, 可实现在线实时测量, 并满足非平面表面的流体测量要求; 同时提出了 1 种分离点检测的判定方法, 并通过二维圆柱绕流仿真验证了该方法的正确性和有效性。微型压力传感器阵列的引入, 拓宽了边界层分离点检测的解决途径。

关键词: 边界层; 分离点; 表面压力分布; 微型压力传感器阵列; 柔性衬底; 实时在线测量

中图分类号: V211.7 文献标识码: A

Abstract: In order to detect the point of boundary layer separation, a measuring method based on the change of surface pressure distribution is discussed, and a design of flexible substrate based micro pressure sensor array is also proposed. This array can achieve real time online measuring while meeting the measuring requirement of non planar surface. The paper studies a determination method used to detect separation point and proves its validity through a flow simulation of 2D column. The introduction of micro pressure sensor array expands ways detecting boundary layer separation point.

Key words: boundary layer; separation point; surface pressure distribution; micro pressure sensor array; flexible substrate; real time online measuring

通过测量绕流物面的流动特性, 并根据测得的信息, 在表面对绕流物体状态影响最大的位置(如三角翼的前缘)实行流动控制, 可实现流场内待测绕流物体的主动控制。而进行主动控制的基础和关键是分离点位置的准确判断, 因为只有分离点及其附近进行扰动, 才能达到最佳的控制效果。

分离点的检测方法包括速度分布法、剪应力分布法和压力分布法等。相比其他两种方法, 压力分布法的特点在于可直接将物体表面的压力变化转换成可识别的输出信号, 并由此确定分离点的位置。

以往, 因传统的压力传感器体积较大, 不适合于边界层内的检测, 因此压力测量方法多集中于测压孔等技术, 其打孔过程使得压力检测只能局限于风洞实验等方面, 不能用于实际工程中进行绕流主动控制所要求的分离点检测。

当前, 微型压力传感器因 MEMS 技术的日趋成熟而发展极快, 因为具有体积小、重量轻、能耗

低、可直接贴附于绕流体表面等多种优势, 其在边界层分离点检测方面的应用已受到国外相关研究的关注。例如, 美国佛罗里达大学开展的采用微型压力传感器检测机翼后缘边界层分离点的研究^[1], 可看做该方向的 1 个代表, 但国内关于此方面的研究报道还很少。

基于以上背景, 本文分析确定了利用压力分布检测边界层分离点的测量原理, 进行了测量方案的比较选择, 设计了微型压力传感器阵列的结构, 并分析验证了以压力在分离点处产生压力曲线第 1 个极大值为判定准则的测定方法的有效性。

1 测量原理

流体流过不同物体表面的情况具有较大差别, 在此仅以产生分离现象的平板边界层为例进行分离现象的原理探讨。从边界层分离产生的机理可知, 边界层内的流动, 其动力过程是由惯性力、压力梯度和黏性力之间的相对平衡所决定, 其中黏性力总是对流动起阻滞作用, 使流动减速。边界层内压力梯度的方向决定于层外主流的情

收稿日期: 2005-01-18; 修订日期: 2005-07-28

基金项目: 国家自然科学基金(90305017)、航空科学基金(04153074 03153066)资助项目

况: 当顺压梯度 $\left(\frac{dP}{dx} < 0\right)$ 时, 它可使边界层内流体加速, 增加边界层内流体质点的动能, 从而保证流体质点有足够的动能克服黏性摩擦, 能顺利地达到压力最小点流向下游, 此时不存在分离现象。但是在逆压梯度 $\left(\frac{dP}{dx} > 0\right)$ 作用下, 层内流体质点受到“逆压”和“黏性”2 方面的阻滞, 使动能迅速损失, 就会在某处耗尽所有动能而停滞下来, 流体便堆积在此处。又由于愈靠近壁面, 流速愈小, 剪应力愈大, 所以这种情形总是在壁面附近 S 点首先发生。一旦这种情形发生, 下游流体便在“逆压”梯度作用下发生倒流。堆积和倒流的结果是把上游来的流体挤出“物面”, 引起边界层分离, S 点为分离点, S 点后为分离区。见图 1 (图中: U 为流速; $\frac{dP}{dx}$ 为压力梯度; ψ 为速度梯度)。

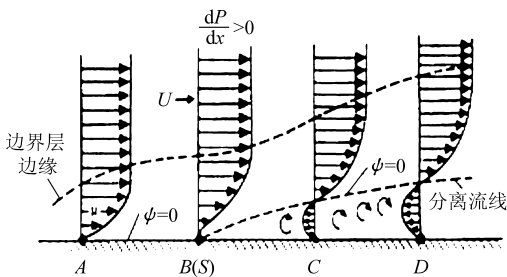


图 1 边界层流动及其分离示意图

Fig 1 Schematic of boundary layer flow and separation

从上面的分析可知, 在逆压梯度区内, 随着流体沿物面流动, 边界层内的流体的速率逐渐降低, 动能减小, 势能升高, 压力增大。分离发生时, 压力在分离点处达到逆压梯度区内第一个最大值。当流体分离并发生回流后, 压力又随着速率的逐渐增大而开始降低^[2,3]。

2 压力测量方法

传统的压力测量方法一般有测压孔法和压敏漆法 2 种, 其各自实现方式和主要特点如下:

(1) 测压孔法 制造 1 个专用的风洞实验模型, 在需要测压点的位置处, 沿垂直于壁面的方向打一个不大于 2 mm 的测压孔, 通过测压管与压力计或压力传感器相联进行测量。数据处理因稍为庞杂的系统结构而相对繁琐, 并且其打孔过程对模型产生一定的破坏, 因此只适用于风洞实验。

(2) 压敏漆法 在模型表面涂一层压敏漆, 利用压敏漆对不同压力呈现的不同颜色, 可观测到模型表面的压力分布, 优点是可简便直观地看

到绕流体表面的压力分布和表面连续的表面压力场, 缺点在于不能得到每一点的精确压力值。

相比以上 2 种方法, 微型压力传感器具有的多种特点更适用于绕流体边界层分离点的测量: 基于微机电系统(MEMS) 技术, 平面尺寸小、厚度较薄, 接近于点测量, 不对周围流场产生较大干扰; 可以直接贴附于绕流体表面, 在不破坏绕流体型面的同时完成表面压力的在线实时测量; 以 MEMS 传感器为基础的微型测控系统, 数据处理简单易行, 能够为绕流体的主动流动控制提供准确的依据。

3 微型压力传感器及其阵列

通常流体力学检测中应用的传感器类型主要为电容式和压阻式两种。前者优点是空间分辨率相对较大, 灵敏度高, 受温度影响小, 缺点在于需要具有集成电子设备用于小电容信号的放大, 工艺制造复杂; 后者虽因温度敏感性和漂移大, 需要通过温度补偿电路予以补偿, 但是制造工艺发展已比较成熟、结构和制造工艺简单、输出阻抗低, 线性度高、灵敏度高、系统集成性好^[4,5], 适合于边界层分离点检测的应用需求, 因此以其为重点展开设计。

分离点判定的前提是需要得到绕流体表面的压力值及其变化情况, 所以采用阵列测量的方式, 即将多个微型压力传感器组成一维阵列, 先将传感器阵列沿流线方向贴附在绕流体表面, 得到整个流线方向的表面压力值, 然后平行移动阵列, 获得整个被测量模型表面的压力分布情况, 最后依据上面所述的分离点处压力达到局部最大值这一原则进行计算分析, 得到分离点的位置。

因为主动流动控制通常是针对飞行器等具有一定型面的绕流体, 因此传感器阵列需要具有一定的柔性, 能够弯曲, 以适应非平面的测量要求; 传感器及阵列内用于压敏电阻连接和信号输入输出的导线和焊盘等应尽可能对流场不造成影响。

针对以上要求, 提出并设计了 1 种基于柔性衬底的微型压力传感器阵列结构(见图 2):

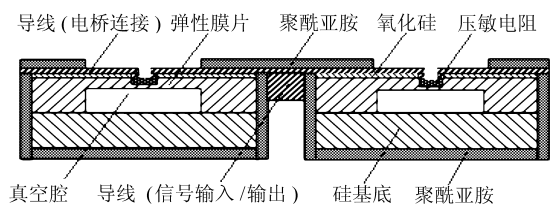


图 2 阵列结构示意图

Fig 2. Schematic of array structure

(1) 弹性膜片 膜片敏感外界压力并转换为应力变化,膜片表面上的压敏电阻可以敏感该应力变化,并通过惠斯顿电桥转换成电压输出。因弹性膜片较薄,所以响应快,灵敏度高。

(2) 真空腔 通过晶片键合方式形成真空腔,实现绝压测量,后端处理电路根据绝对压力进行分析判断。

(3) 氧化硅隔离层 敏感元件表面沉积1层氧化硅作为电绝缘层,将导线与弹性膜片隔离开来,避免互相影响。

(4) 聚酰亚胺 在微机械加工形成敏感元件结构以后,对相邻的敏感元件中间进行刻蚀形成硅岛;上下覆盖的2层聚酰亚胺,起到阵列连接与加固作用,并且正表面的聚酰亚胺经过刻蚀,仅露出弹性膜片对应的位置,表面的导线和焊盘受到覆盖保护,不会因外界空气的影响而氧化。

(5) 导线(信号输入/输出) 与外围电路相连的导线从阵列背面引出,与粘贴在被测表面上的柔性PCB板的焊盘相接。这种背引线方式对流场的干扰较小,保证了测量结果的准确性,但因难度较大,尚处于研究实验阶段。

(6) 因为阵列内每个传感器具有一定的间距,并且上下表面均有聚酰亚胺进行连接与固定,所以不仅衬底,整个阵列均为柔性的,即上下均可弯曲。

(7) 对于键合的2个硅晶片而言,具有结构层的上层硅晶片在完成表面结构以及背面硅杯以后经过一次减薄至0.07 mm,在与基底晶片键合以后经过二次减薄,使总体结构厚度在0.3 mm以内,因此可基本确保在低速(一般100 m/s)情况时对分离点的影响较小。

(8) 在器件加工完毕后,为确保传感器阵列的性能,需要对其进行测试,因为整体阵列的测试存在较高的难度,因此,同批相同工艺加工一些单独的传感器,并将其进行封装,在标准的压力传感器测试环境下完成传感器性能的测试。对于不同加工方法以及不同设备而言,加工而成的传感器性能会有较大差距,一般只要传感器能够满足80~150 kPa的绝对压力测量范围, $\frac{5 \text{ mV}}{\sqrt{V \times 10 \text{ kPa}}}$ 的灵敏度,25 kHz的频带宽度以及10~20 Pa的分辨力即可满足边界层分离点的测量需求。

4 分离点的判定

压力传感器阵列可以测量得到物体表面流体

的压力分布,并以电压信号的形式输出。虽然从输出信号的图中可以人为的看出分离的位置,但是对于送入控制系统的信号而言,应该有更为直接的数学方面的结果,以达到计算机能够识别的目的,因此下面将给出1种输出信号的处理方法,并根据1个二维圆柱绕流仿真所得的表面压力值进行计算,来验证该判断方法的有效性。

(1) 处理方法 首先采集一维微型压力传感器阵列在1个采样周期内的输出电压信号或压力数值,采用最小二乘法对数据进行拟合,形成连续曲线,并尽量减小随机误差的影响,此时得到输出电压信号或压力的拟合曲线 L_a 及其横坐标上点所对应的数组 $A[a_1, a_2, \dots, a_{n-1}, a_n]$ 。其中第1个波谷的极小值点对应驻点以后压力降低值的最低值,第1个波谷以后出现的第一个波峰极大值点对应逆压梯度区内第一个压力最大值。

然后对数组 $A[a_1, a_2, \dots, a_{n-1}, a_n]$ 求一次差分,形成数组 $B[b_1, b_2, \dots, b_{n-1}]$,采用最小二乘法对数据进行拟合,得到一次差分曲线 L_b 。 L_b 上的过零点分别对应 L_a 上波谷和波峰的极值点。对数组 B 元素值再次求差分,其数值依次排列组成数组 $C[c^1, c^2, \dots, c^{n-2}]$,绘出连续的二次差分曲线 L_c ,判断曲线 L_b 的零点在曲线 L_c 上的数值符号,如其符号为负即为分离点。

其对应的计算公式为

$$\left. \begin{aligned} b_i &= \frac{(a_{i+1} - a_i)}{(x_{i+1} - x_i)} \quad (1 \leq i \leq n-1) \\ c_i &= \frac{(b_{i+1} - b_i)}{(x_{i+1} - x_i)} \quad (1 \leq i \leq n-2) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

(2) 仿真验证

① 圆柱绕流分析 为验证上述判定方法的有效性,此处以黏性流体绕圆柱体的流动为例进行仿真。根据前面的理论分析,黏性流体绕流圆柱体的流动可以描述为:当流体速度很低时,流体在前驻点速度为零,来流沿圆柱左右两侧流动,在圆柱体前半部分速度逐渐增大,压力下降,后半部分速度下降,压力升高,在后驻点速度又为零。这时的流动与理想流体绕流圆柱体相同,无旋涡产生,如图3(a)所示。随着来流速度增加,圆柱体后半部分的压力梯度增大,引起流体边界层的分离,如图3(b)所示。当来流的雷诺数 Re 再增大,达到40左右时,由于圆柱体后半部边界层中的流体微团受到更大的阻滞,就在边界层的分离点 S 处产生一对旋转方向相反的对称旋涡。如图3(c)所示。

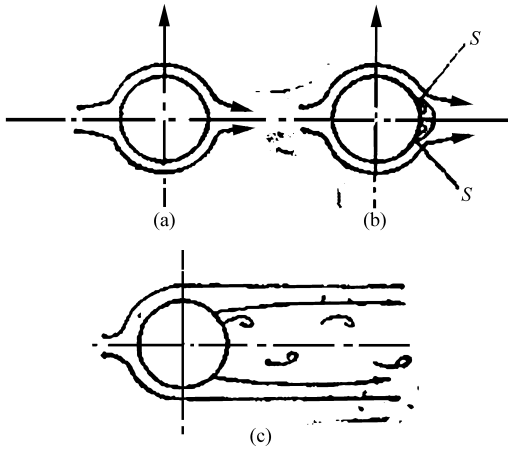
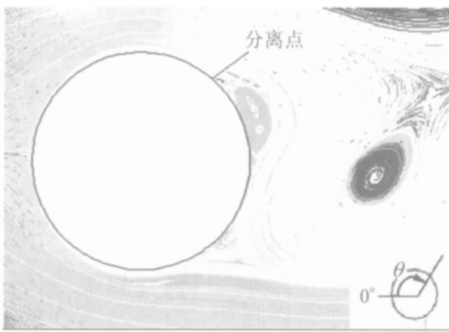


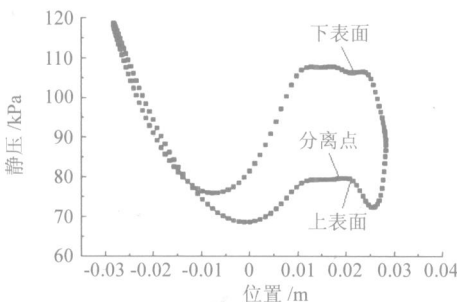
图 3 圆柱绕流分离示意图

Fig 3 Schematic of flow separation around circular cylinder

② 仿真结果及分析处理 仿真所用的模型是一个直径为 60 mm 的二维圆柱, 流场入口速度为 5000 mm/s, 仿真结果见图 4(a), 圆柱后端分离并产生卡门涡, 上表面分离涡开始的位置(即分离点)从图中可读出大约为 $\theta = 130^\circ$ 。图 4(b) 为由驻点(0°)开始, 沿着流体流向的圆柱上表面(θ 从 0° 到 180°) 和下表面(θ 从 180° 到 360°) 的壁面压力变化曲线, 上表面压力降低并再次升高以后的压力最大值点与图 4(a) 中分离点开始的位置相吻合, 为 $\theta = 130^\circ$ 。图中上下表面的压力分布并不完全对称, 初步探讨主要原因在于: 根据卡门涡街理论, 由于旋涡之间的相互影响, 其形成通常是不



(a) 圆柱绕流分离现象产生示意图



(b) 圆柱壁面压力分布曲线图

图 4 二维圆柱绕流分离仿真

稳定的, 当旋涡在圆柱体下游的下方产生时, 由于升力的作用, 使得圆柱体下方的压力比上方高一些。

从图 4(b) 中导出圆柱上表面 100 个等间距的节点(对应 θ 从 0° 到 180°) 所对应的压力值描绘曲线, 采用最小二乘法对数据进行拟合, 形成连续曲线, 并进行一次和二次差分, 计算结果见图 5, (a), (b), (c) 分别为压力值数据拟合曲线以及一次和二次差分处理结果。

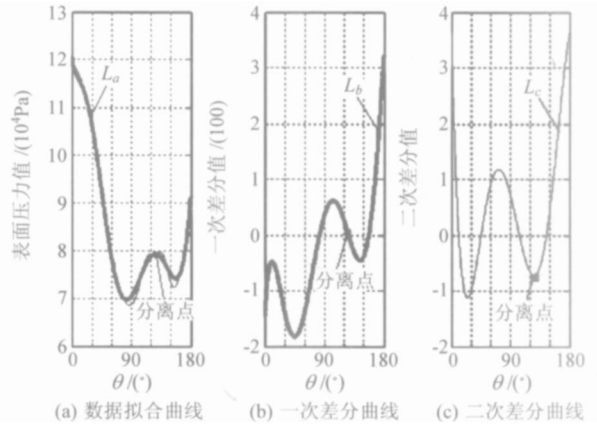


图 5 分离点位置判定方法计算结果

Fig 5 Calculation result of separation point decision method

与 1 节中理论分析相对应, 曲线 L_a 中压力值首先在驻点处为最大值, 随着流动增速, 逐渐减小至极小值; 然后压力随流速降低而增大, 在 $\theta = 125^\circ$ 处, 压力达到极大值, 根据检测原理, 此点被认为是分离点, 此时, 分离以后因为与外流掺混, 压力趋于平均并开始降低。一次差分得到的曲线 L_b 中第 2 个零点在 L_c 上的符号为负($\theta = 125^\circ$), 即为分离点。

其中差分值的单位为 Pa/单位间距, 单位间距的长度此处即为对直径 60 mm 的仿真模型上半表面进行 100 等分得到的 1.88 mm。

由以上结果可知, 仿真结果得到的分离点位置在 $\theta = 130^\circ$, 通过判定方法计算分析得到的分离点位置约在 $\theta = 125^\circ$, 误差 $\leq 5^\circ$ 。因此, 通过最小二乘法对数据进行拟合, 得到连续曲线, 消除随机误差, 并根据二次差分计算结果判定得到的圆柱绕流表面分离点的位置与仿真结果相吻合, 验证了输出信号处理方法的正确性和有效性。

5 测量系统组成

1 个完整的用于分离点判定的测量系统的原理框图见图 6^[6], 整个系统包括传感器阵列、阵列的驱动电路模块以及数据采集与处理模块, 驱动电路模块与数据采集处理模块相独立是为了减小

模拟电路与数字电路间的干涉噪声影响。

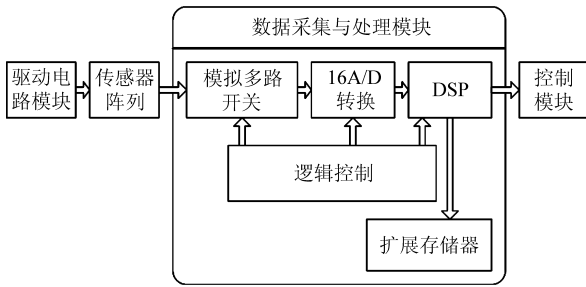


图6 测量系统原理框图

Fig 6 Block diagram of the measurement system

实际应用时,驱动电路为压力传感器阵列提供激励信号,传感器阵列的输出电压信号则送入采集与处理模块中。首先通过模拟多路开关多路复用到一个16位A/D转换器中,进行模数转换得到数字化数据,然后在一定频率的采样速度下,由DSP根据上述算法对采样数据进行处理,计算并判断分离点的位置。另外,采样数据以及处理结果还送入扩展存储器进行保存,便于以后调用。测量系统判定得到分离点位置后,送入控制模块控制相应的致动器,最终实现绕流体的主动流控制。

6 结论

通过对采用表面压力分布变化判断边界层分离点的理论依据和检测方法进行研究,提出了微型压力传感器阵列的设计方案,该方案具有在线实时测量、适用于非平面测量和数据处理简单等优点,能够较好地满足绕流体边界层分离点的检测需求。

同时,提出了1种根据传感器阵列输出信号分析确定边界层分离点的判定方法,通过二维圆柱绕流仿真对该方法的正确性和有效性进行了验证,误差 $\leq 5^\circ$ 。

参 考 文 献

[1] MEMS pressure sensor [OL]. <http://www.img.ufl.edu/>

[php/project.php/id=15](http://project.php/id=15).

- [2] 戴昌晖. 流体流动测量[M]. 北京: 航空工业出版社, 1991. 115-174.
Dai C H. Flow current measurement [M]. Beijing: Publishing Company of Aviation industry, 1991. 116-174. (in Chinese)
- [3] 王献孚, 韩久瑞. 机翼理论[M]. 北京: 人民交通出版社, 1987. 34, 38-39.
Wang X F, Han J R. Airfoil theory [M]. Beijing: China Communications Press, 1987. 34, 38-39. (in Chinese)
- [4] Löfdahl L, Gad et Hak M. MEMS based pressure and shear stress sensors for turbulent flows[J]. Measurement Science and Technology, 1999, 10(8): 665-686.
- [5] Elwenspoek M, Wiegink R. 硅微机械传感器[M]. 陶家渠等译. 北京: 中国宇航出版社, 2003. 106.
Elwenspoek M, Wiegink R. Mechanical microsensors [M]. Beijing: China Astronautics Publishing House, 2003. 106. (in Chinese)
- [6] Jiang F K, Xu Y. Flexible shear stress sensor skin for aerodynamics application[A]. Proceedings of the IEEE Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) [C]. USA: Piscataway, 1997. 465-470.

作者简介:



陈爽(1977-)女,黑龙江省五常市人,西北工业大学机电学院微/纳米系统实验室博士研究生,主要从事MEMS传感器方面的研究。
E-mail: cyxbshuang@sina.com。

马炳和(1972-)男,河北辛集人,副教授,从事MEMS设计与分析,微加工技术研究。曾在德国汉诺威大学微技术所从事先进光存储用微传感器设计开发研究。

苑伟政(1961-)男,山东掖县人,教授,博导。西北工业大学MEMS/NEMS实验室主任。从事MEMS/NEMS研究。曾在法国、香港、加拿大研究访问。发表论文40余篇,出版专著1部。

(责任编辑: 刘振国)