

MEMS-Based Solid State Wind Velocity-Direction Sensor and Its Best Structural Parameter*

YANG Fan^{1,2}, ZHAO Zhan^{1*}, DU Lidong¹

(1. The State Key Laboratory of Technology, Institute of Electronics, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China;)
(2. Graduate University, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Based on the theoretical analysis of column circuitous flow, the pressure distribution equation around the column was achieved, and a novel MEMS-based solid state wind velocity and direction sensor structure was developed. The theoretical model of internal flow was established and the sensor's best structural parameter was calculated. It is feasible to measure the direction of the wind by perpendicularly encapsulating with MEMS wind velocity sensor, and the sensor with multi-channel structure has a characteristic of higher precision.

Key words: physical sensor; structural parameter; column circuitous flow; wind velocity-direction sensor; MEMS
EEACC: 7230;7320E doi: 10.3969/j.issn.1004-1699.2011.03.006

基于 MEMS 的固态风速风向传感器及其最优结构参数*

杨帆^{1,2}, 赵湛^{1*}, 杜利东¹

(1. 中国科学院电子学研究所传感技术国家重点实验室, 北京 100190;)
(2. 中国科学院研究生院, 北京 100190)

摘要: 基于圆柱绕流的理论分析给出圆柱体周边压强分布方程, 并据此提出了一种新型的基于 MEMS 的固态风速风向传感器结构。建立了其内部流体流动的理论模型, 并利用该模型进行数值计算得到了这种传感器的最优结构参数。分析表明, 利用相互正交的 MEMS 风速传感器测量风向是可行的, 并且具有多个通风孔结构的传感器可以有更高的精度。

关键词: 物理量传感器; 结构参数; 圆柱绕流; 风速风向传感器; MEMS

中图分类号: TP212

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2011)03-0342-04

风速和风向是气象资料中非常重要的组成部分。传统的测量方法是用风杯来测量风速, 风标来测量风向, 但是这些机械装置体积较大, 且有转动部件易出故障^[1]。近年来 MEMS 技术的发展为风速风向传感器提供了更多的解决方案, 可以利用 MEMS 芯片设计更精确更稳定的新型传感器。文献[2]中提到的传感器结构是在圆柱体上打两个相互正交的通孔, 每个孔的中间放置一个 MEMS 风速传感器芯片, 若两个传感器测到的风速分别为 v_x, v_y , 则实际风速和风向就可以近似的表示为:

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}, \varphi = \arctan\left(\frac{v_x}{v_y}\right)。$$

但这种传感器精确度不够理想, 主要原因是实际情况下圆柱体周边压强分布与标准的余弦曲线有

较大误差。文献[3]提出了一种有多个通风口的传感器结构, 这种结构显然要比文献[2]中的好得多。但文献[3]没有为这种传感器建立理论模型以指出其最优结构参数, 其气流通路也显得过于复杂。本文对圆柱体绕流问题进行了理论分析, 提出一种较为简单的有多个通风口的固态风速风向传感器, 为其建立理论模型, 并且计算出了这种固态风速风向传感器理论上最优的设计参数。

1 圆柱绕流

1.1 理想圆柱绕流理论

将无限长的圆柱体放置在均流中, 就是圆柱绕流问题。

理想状态下, 均流叠加偶极子组合, 就会形成圆

柱流线。设均流速度为 V_0 (方向沿 x 轴正向) 和放在原点的偶极子 (强度为 M , 源至汇方向为 x 轴正向) 相叠加, 他们的复合流场的复势为

$$W(z) = V_0 z + \frac{M}{2\pi} \cdot \frac{1}{z} \quad (M > 0) \quad (1)$$

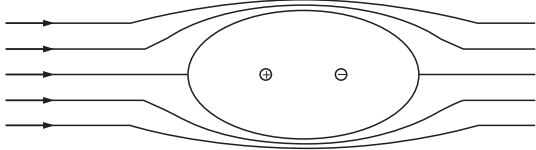


图1 均流和源汇叠加

对于这个组合流场, 如果能选择适当的偶极子强度 M , 使零流线与圆柱表面正好重合, 用 r 表示流场中一点到圆柱中轴线的垂直距离, 那么 $r > a$ 的区域就是圆柱绕流的流场。

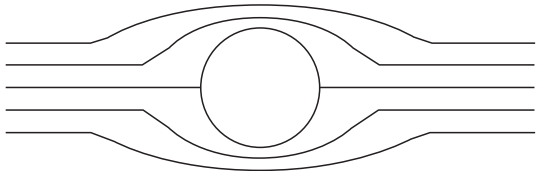


图2 圆柱绕流流场示意图

引入 $z = re^{i\varphi}$, 设无穷远处流体速度为 V_0 , 代入式(1)得

$$W(z) = V_0 r e^{i\varphi} + \frac{M}{2\pi r} e^{-i\varphi} \quad (2)$$

展开得到:

$$\text{势函数 } \Phi = V_0 r \cos\varphi + \frac{M}{2\pi r} \cos\varphi \quad (3)$$

$$\text{流函数 } \Psi = V_0 r \sin\varphi - \frac{M}{2\pi r} \sin\varphi \quad (4)$$

为确定零流线, 令 $\psi = 0$, $r = R$, 可以得到零流线与圆柱面 $r = R$ 重合的条件:

$$M = 2\pi R^2 V_0 \quad (5)$$

将式(5)代入式(3)和式(4)并且进一步求得流场的速度分布:

$$V_r = \frac{\partial\Phi}{\partial r} = V_0 \left(1 - \frac{R^2}{r^2}\right) \cos\varphi \quad (6)$$

$$V_\theta = \frac{\partial\Phi}{r\partial\varphi} = -V_0 \left(1 + \frac{R^2}{r^2}\right) \sin\varphi \quad (7)$$

对于圆柱体表面任意一点, 将 $r = R$ 代入式(6)和式(7):

$$V_r|_{r=R} = 0, V_\theta|_{r=R} = -2V_0 \sin\varphi \quad (8)$$

对于圆柱体上任意一点, 在无穷远处总存在一点与该点处于同一流线上, 而且我们上边的分析都基于不可压缩理想流体的恒定流动, 所以可以应用伯努利方程^[4]得到:

$$\frac{P_0}{\rho} + \frac{V_0^2}{2} = \frac{P_s}{\rho} + \frac{V_s^2}{2} \quad (9)$$

其中 ρ 代表流体密度, P_0 代表无穷远处的压强, P_s, V_s 分别代表圆柱表面的压强和风速。由于在圆柱体表面只有切向速度, 故 $V_s = V_\theta|_{r=R}$, 于是圆柱体周围压强

$$P_s = P_0 + \frac{1}{2}\rho V_0^2 (1 - 4\sin^2\varphi) \quad (10)$$

这是一个余弦形状的曲线。但在实际情况下, 雷诺数的不同决定了流动情况的不同^[4-7], 而雷诺数是与风速以及传感器的尺寸相关的。再加上卡门涡街的存在, 圆柱体周边压强分布并非为一个理想的余弦曲线, 而且其分布随时间变化而变化^[8-9], 要得到一个精确的分布方程是一件几乎不可能的事。但我们可以理想情况的基础上对压强分布表达式进行进一步修正, 以尽量逼近实际情况。

1.2 理想方程的修正

由于对称性, 只需考虑 $0 \leq \varphi \leq 180^\circ$ 时的情况。从实测结果^[3,6,8-12]来看, 当 $0 \leq \varphi \leq 90^\circ$ 时, φ 越大时曲线与余弦偏离越远, 所以圆柱体周边与无穷远处的压强差要乘以一个与 φ 有关的修正系数。当 φ 略大于 90° 的时候, 压强渐渐趋于一个定值, 这个定值与风速 V_0 相关。与其他函数相比, 幂函数的变化特性更适合做修正项, 所以考虑拟合方程:

$$P_s = P_0 + 0.5\rho V^2 (1 - 4\sin^2\varphi) \exp\{-k\varphi^n\} + g(V) (\exp\{-l\varphi^n\} - 1), 0 \leq \varphi \leq 180 \quad (11)$$

其中 k, l, n 均为大于零的常数。我们对上面方程进行定性的分析: 当 φ 较小时, 选取合适的 k, l, n 就可使 $\exp\{-k\varphi^n\}$ 与 $\exp\{-l\varphi^n\}$ 都接近 1, 从而压强分布接近理想状态; 随着 φ 变大, $\exp\{-k\varphi^n\}$ 与 $\exp\{-l\varphi^n\}$ 都逐渐接近 0。当 φ 足够大, 风速为 V 的情况下时, P_s 接近定值 $P_0 - g(V)$ 。

在本模型中, 通过计算机按一定步长循环代入 k, l, n 的值, 并与实际情况下压强进行比对以选取误差最小的参数组合。

当 $k = \frac{1}{120\,000}, l = \frac{1}{100\,000}, n = 3$ 时,

$$g(V) = 0.5\rho V^2 e^{-\frac{V}{5}}$$

与实际情况^[3]非常接近, 此时

$$P_s = P_0 + \frac{1}{2}\rho V^2 (1 - 4\sin^2\varphi) \exp\left\{-\frac{1}{120\,000}|\varphi|^3\right\} + \frac{1}{2}\rho V^2 e^{-\frac{V}{5}} (\exp\left\{-\frac{1}{100\,000}|\varphi|^3\right\} - 1) \quad (12)$$

$-180 < \varphi \leq 180$, (其中 $\varphi = 0$ 度为迎风方向)

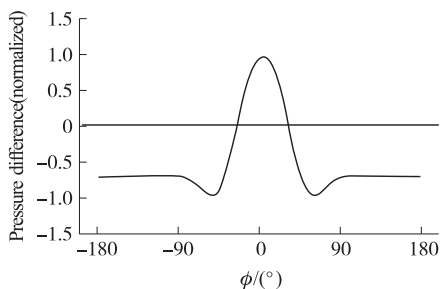


图 3 由上述方程式(12)得到的归一化曲线($V_0=1.5\text{ m/s}$)

2 固态风速风向传感器的结构

在只有相互正交的直通孔的情况下,只有当压强分布曲线为余弦曲线时,才能用 $v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$, $\varphi = \arctan(\frac{v_x}{v_y})$ 近似求得风速和风向。但在实际情况下,压强分布曲线与余弦曲线相差较远。气压在圆柱体迎风一侧气压较大,但在偏离风向 60° 左右有极小值,背风侧压强趋于平稳。而多个入风口则可以使圆柱通孔中心风速与夹角曲线 $V-\varphi$ 的归一化曲线逼近标准余弦。基于以上思路,本文设计传感器结构如下:

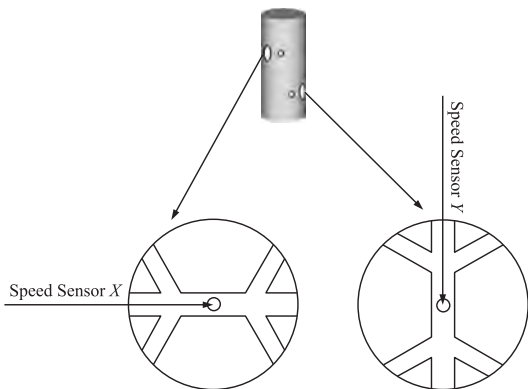


图 4 固态风向传感器横向剖面示意图

这种传感器结构仍采用正交测量风速的方式。

若采用这种结构,风速可由 $v = \lambda \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$ 表示,其中 λ 是与传感器的具体结构有关的常数,风向与 x 轴夹角仍可以由 $\varphi = \arctan(\frac{v_x}{v_y})$ 求得。

3 理论模型

我们把通过圆心的直通孔叫做主孔,把不通过圆心但与主孔交汇的孔叫做支孔,主孔与支孔的交汇处叫做节点, θ 表示主孔与支孔之间的夹角,风速传感器位于两个节点中间。

两个节点之间的气压差导致节点间的空气加速运动,假设两个节点间的压强均匀变化,其加速度就可以由欧拉方程求得^[8]:

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx} \quad (13)$$

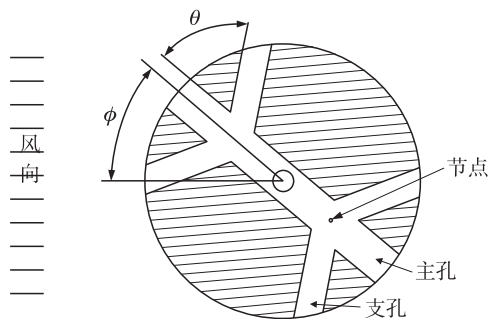


图 5 传感器剖面结构参数示意图

迎风口的空气的初速度

$$V_{0air} = \frac{\sum_i s_i V_0 \cos \beta_i}{s_1} \quad (i=1,2,3) \quad (14)$$

s_i, β_i 分别表示与节点相连的孔(包括主孔)的截面积和倾角。对于主孔, $\beta = \varphi$; 对于支孔, $\beta = \varphi + \theta$ 。于是可求得中心风速:

$$V = \frac{1}{2} \left(\sqrt{\left(\frac{\sum_i s_i V_0 \cos \beta_i}{s_1} \right)^2 - \frac{2}{\rho} (P_2 - P_1)} + \frac{\sum_i s_i V_0 \cos \beta_i}{s_1} \right), \quad (i=1,2,3) \quad (15)$$

其中两个节点的气压 P_1, P_2 可以由对应的三个孔开口处的压强按临近各孔的截面积做加权平均求得,即

$$P_j = \frac{\sum_i p_i s_i}{\sum_i s_i} \quad (j=1,2; i=1,2,3) \quad (16)$$

其中 p_i 表示与节点相连的孔开口处(即圆柱面上)的压强。

4 最优参数的计算及结果

有了中心风速 $V(\varphi)$ 的表达式,在给定风速 V_0 、主孔和支孔半径比值、夹角以及节点间距的情况下,就可以得到归一化的 $V-\varphi$ 曲线。该曲线与标准余弦曲线差别越小,传感器准确性就越好。

那么主孔和支孔半径比值、支孔倾角以及节点间距等参数选取多少合适呢?我们可以从小到大按照一定间距依次选取各个参数,并且依次与余弦曲线进行比较,采用数值计算的方式选取与标准余弦曲线误差最小的那一组参量。

采用 Visual Basic 编程,以节点间距与圆柱半径比 a 、支孔与主孔半径比 b 、环境风速 V_0 、风向与主孔夹角 θ 、支孔倾角 φ 为变化参量,分别在 $0 \leq a \leq 2$, $0 \leq b \leq 2$, $0.5\text{ m/s} \leq V_0 \leq 25\text{ m/s}$, $-180^\circ < \theta \leq 180^\circ$, $0^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$ 范围内做嵌套循环,求解中心风速归一

化曲线与标准余弦函数误差平方和为最小的参数组合,求得当节点间距与圆柱半径比 $a=1$,支孔与主孔半径比 $b=0.8$,支孔与主孔夹角 $\theta=65^\circ$ 时中心风速 $V-\varphi$ 归一化曲线与余弦曲线最为接近。图6为 $V_0=1.5\text{ m/s}$ 时不同参数组合下的 $V-\varphi$ 归一化曲线,可以看出最优参数组合条件下 $V-\varphi$ 曲线与标准余弦曲线几乎重合。

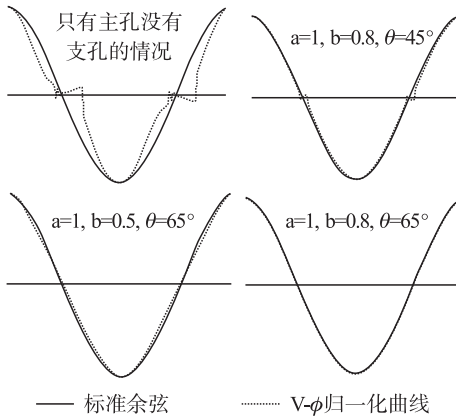


图6 $V-\varphi$ 归一化曲线

5 结论

利用相互正交的 MEMS 风速传感器测量风向是可行的,并且具有多个通风孔结构的传感器可以有更高的精度。根据本文的计算结果,节点间距与圆柱半径比为 1,支孔与主孔半径比为 0.8,支孔与主孔夹角为 $\theta=65^\circ$ 时中心风速归一化曲线与余弦曲线最为接近,这意味着具有这种结构参数的传感器具有较高的精度。

杨帆(1985-),男,河北保定人,中国科学院电子学研究所研究生,主要研究方向为物理量传感器以及基于传感器的自动控制系统,yf198557@163.com;

杜利东(1980-),男,山西大同人,2010年在中国科学院电子学研究所获得博士学位,现就职于中国科学院电子学研究所,主要研究方向为微型传感器集成与系统。

参考文献:

- [1] 沈广平,吴剑,秦明. 二维 MEMS 风速风向传感器的设计与测试[J]. 微纳电子技术,2007,7(8):285-287.
- [2] Du L D,Zhao Z,Pang C. MEMS-Based Micro Solid State Drag Force Wind Sensor[J]. Nanotechnology and Precision Engineering,2009,7(4):370-374.
- [3] Massimo P,Michele D. A Miniaturized 2D Solid State Anemometer Based on Thermal Flow Sensors[J]. Procedia Chemistry 2009,1:1463-1466.
- [4] Braza M,Chassaing P,Ha Minh H. Numerical Study and Physical Analysis of the Pressure and Velocity Fields in the Near Wake of a Circular Cylinder[J]. Journal of Fluid Mechanics,1986,165:79-130.
- [5] Dennis S C R,Chang G Z. Numerical Solutions for Steady Flow Past a Circular Cylinder at Reynolds Numbers up to 100[J]. Journal of Fluid Mechanics,1970,42(3):471-489.
- [6] Tritton D J. Experiments on the Flow Past a Circular Cylinder at Low Reynolds Numbers[J]. Journal of Fluid Mechanics,1959,6(4):547-567.
- [7] 邹琳,林玉峰. 亚临界雷诺数下波浪型圆柱绕流的数值模拟及减阻研究[J]. 水动力学研究与进展,2010,25(1):31-36.
- [8] 夏泰淳. 工程流体力学[M]. 上海:上海交通大学出版社,2005:79-80.
- [9] 马金花,金生,贺德馨. 圆柱绕流的数值模拟[J]. 山东建筑工程学院学报,2001,16(2):45-47.
- [10] Martin D P,Grant J J, Ringwood J V. Evaluation of a Prototype Thermal Anemometer for Use in Low Airspeed Drying Measure Calculations[J]. Flow Meas and Instrum,2001,12:385-396.
- [11] Olivier Darrigol. Between Hydrodynamics and Elasticity Theory: The First Five Births of the Navier-Stokes Equation[J]. Arch Hist Exact Sci,2002,56:95-150.
- [12] Han D, Kim S, Park S. Two-Dimensional Ultrasonic Anemometer Using the Directivity Angle of an Ultrasonic Sensor[J]. Microelectronics Journal,2008,39:1195-1199.

赵湛(1958-),男,中国科学院电子学研究所研究员,博士生导师,主要研究方向为基于 MEMS 技术的新型微传感器及系统、无线网络集成微传感器技术等;