

基于圆柱绕流直径压强差的二维风测量方法

刘 成^{①②} 赵 湛^{*①} 杜利东^① 方 震^①

^①(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

^②(中国科学院大学 北京 100049)

摘 要: 基于流量传感器的圆柱结构 2 维风传感器,其测量性能对地面风测量而言不够准确。由此,该文通过分析风洞实验数据,建立一种数学模型来描述圆柱绕流中直径两端压强差的分布,并根据该模型提出一种通过检测该直径压强差来计算风速风向的 2 维风测量方法。对风洞测试数据应用该方法,在 2~40 m/s 风速范围内,风速计算值误差不超过 $\pm(0.2+0.03 V)$ m/s,风向计算值误差不超过 $\pm 5^\circ$ 。相比使用流量传感器的圆柱结构 2 维风传感器,该方法提高了测量准确度。同时,该方法不需要转动部件,不受机械摩擦和惯性的制约,需要占用的空间小。

关键词: 2 维风测量; 圆柱绕流; 直径压强差; 风速风向

中图分类号: TP212.1

文献标识码: A

文章编号: 11009-5896(2017)03-0737-06

DOI: 10.11999/JEIT160468

Method of Measuring Two-dimensional Wind Based on Diametrical Pressure Differences Developed by Flow Around Cylinder

LIU Cheng^{①②} ZHAO Zhan^① DU Lidong^① FANG Zhen^①

^①(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

^②(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The cylindrical two-dimensional wind sensor employing flow meters is not accurate enough for surface wind measurement. By analyzing the data from wind tunnel experiments, a model is proposed to describe the diametrical pressure differences developed by the flow around a circular cylinder. A method is derived from the model for two-dimensional wind measurement by detecting the diametrical pressure differences. When the proposed method is applied to the data from wind tunnel tests in range of 2~40 m/s, the relative wind speed errors and the wind direction errors are no more than $\pm(0.2+0.03 V)$ m/s and $\pm 5^\circ$ respectively. The proposed method is more accurate than the cylindrical two-dimensional wind sensor using flow meters. Without moving parts, the method is immune to mechanical wear and inertia.

Key words: Two-dimensional wind measurement; Flow around a cylinder; Diametrical pressure difference; Wind speed and direction

1 引言

风速和风向是气象观测中的重要参数。在地面风测量中,风速矢量基本可以被认为 2 维矢量^[1],在大部分实际使用的场合中,风速矢量也基本是平行于某个平面^[2],因此 2 维风的测量具有实用意义。传统的旋转式 2 维风速计有转动部件,需要占用较大的空间,同时性能受机械摩擦和惯性的制约。应用 MEMS 技术能够使 2 维风传感器满足日益增多的

新需求。热学原理的单片风传感器是 MEMS 2 维风传感器的一个研究热点^[3],能大大降低传统热学原理风传感器的功耗^[2,4],适合低速^[5]、低密度^[6,7]空气的流速测量。但这类传感器的敏感元件直接接触气流,脆弱的敏感元件没有得到较好保护^[2,8],在对鲁棒性有要求的应用场合中需要额外的保护结构^[9]。

通过特定形状物体在受到风作用时表面压强分布的规律来测量风,可以使敏感元件不必直接接触被测气流。得到广泛应用的五孔皮托管利用了这种原理,但只能测量一定角度范围内的风^[10]。文献[2]于 2009 年首次提出利用圆柱的直径两端压强差来测量 2 维风速矢量的思路,设计分支管路将这一压强差转化为流量,再使用热学原理 MEMS 流量传感器来测量这一流量,进而计算出风速风向。在近似

收稿日期: 2016-05-09; 改回日期: 2016-09-23; 网络出版: 2016-11-14

*通信作者: 赵湛 zhaozhan@mail.ie.ac.cn

基金项目: 公益行业专项(GYHY201006044), 国家自然科学基金(51305423)

Foundation Items: Special Fund for Public Welfare (GYHY-201006044), The National Natural Science Foundation of China (51305423)

处理不同雷诺数对压强分布的影响时,文献[2]提出的方法引入了12%的误差。文献[11]在文献[2]的基础上,制作了圆柱形2维风传感器的原型机,在风洞中测试其风向测量误差不超过 8° 。文献[12]对圆柱形2维风传感器的设计作了改进,在风洞中测试其风速测量相对误差8%,风向测量误差 $\pm 5^\circ$ 。相比于自动气象站风速测量误差 $\pm(0.5+0.03 V)$ m/s和风向误差 $\pm 5^\circ$ 的水平^[1],这一测量准确度有待提高,其中 V 表示指示风速。

不同圆柱绕流状态下圆柱表面压强分布有明显差异,上述基于流量传感器的方法在近似处理这一差异时引入了较大的误差。由于使用热学原理MEMS流量传感器来间接测量圆柱直径两端压强差,存在流过MEMS敏感部分的气流,且流量测量对管路结构敏感。针对上述问题,本文建立了一种数学模型来描述圆柱绕流中圆柱直径两端压强差分布,并根据此模型提出一种基于圆柱绕流直径压强差的2维风测量方法。该方法在风洞测试中表现出了更高的测量准确度。同时该方法不需要转动部件,不受机械摩擦和惯性的影响。

2 理论基础

利用直径压强差测量2维风的方法,涉及到流体力学的圆柱绕流问题,常用压强系数 C_p 来描述圆柱表面压强分布,其定义^[13]为

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{(1/2)\rho U_\infty^2} \quad (1)$$

其中, p 是物体表面压强, ρ 、 p_∞ 和 U_∞ 分别是无穷远处流体密度、静压和流速。理想情况下,圆柱表面一点 X ,如图1所示,其压强系数为^[13]

$$C_p = 1 - 4 \sin^2 \theta \quad (2)$$

其中, θ 是过 X 点的直径方位角, O 为圆心, S 为前驻点, V 是风速。

式(2)表明,圆柱任意一条直径的两端压强相等。由于流体的粘性,圆柱表面压强实际分布与理想情况有明显差异,直径两端压强不一定相等。使用雷诺数来判断流体的流动状态,其定义^[14]为

$$Re = \rho V D / \mu \quad (3)$$

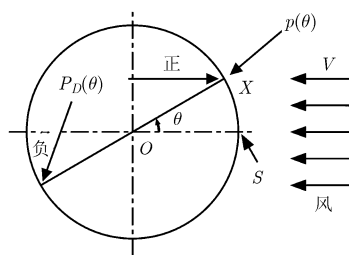


图1 圆柱表面压强与直径两端压强差

其中, ρ 、 V 和 μ 分别是流体的密度、流速和动力粘度系数, D 是阻风物体的特征尺寸,在圆柱绕流问题中, D 是圆柱的直径。

在通常雷诺数情况下,阻风圆柱一条直径的两端之间存在压强差。如图1所示,本文定义圆柱绕流中阻风圆柱直径两端压强差 $P_D(\theta)$ 为该直径正端与负端的压强之差。则可定义压强差系数 $C_{P_D}(\theta)$ 为

$$C_{P_D}(\theta) = \frac{P_D(\theta)}{(1/2)\rho U_\infty^2} \quad (4)$$

其中, ρ 和 U_∞ 的含义与式(1)相同。

在雷诺数约 $350 \sim 1 \times 10^5$ 范围内,圆柱受风阻力与动压的比值随雷诺数的变化较为平缓,并在雷诺数 $1 \times 10^4 \sim 1 \times 10^5$ 范围内几乎不变;如果高于此雷诺数范围,圆柱受风阻力急剧下降^[15]。这一阻力是由圆柱两端压强差引起的,说明在此雷诺数范围内,压强差系数分布受雷诺数影响较小。本文方法的远期目标是测量高至60 m/s的风,如果此风速在标准空气条件下对应雷诺数为 1×10^5 ,则圆柱的直径为26.04 mm。如果圆柱尺寸小于此值,圆柱受风阻力在雷诺数 $1 \times 10^4 \sim 1 \times 10^5$ 范围内的良好特性不能被充分利用。

3 测量方法设计

3.1 风洞实验

为了测量圆柱绕流中直径压强差的实际分布,在FS-003一级标准风洞中进行实验。实验使用金属圆柱,表面抛光为亮光泽面,其上开有8个测压孔。测压孔直径应尽量小以准确测量某一角度处的压强;受限于加工条件,本文采用1 mm孔径,在圆柱上对应圆心角 3.4° 。测压孔内部通过管道与压差传感器相连,测量4条直径的两端压强差,这4条直径相互间隔 45° 。根据本文第2节的描述,圆柱的直径采用26 mm。

记录风洞中标准皮托管风速计示数为参考风速,同时记录的还有气温和气压。被测阻风圆柱固定在一个角度计圆盘上,随角度计一起转动,通过角度计示数可以读出各条被测直径的方位角。皮托管在被测圆柱上游约30 cm处^[16],并且与被测圆柱上的测压孔不在同一高度,以避免相互影响。

实验中测量了11个风速点,从3.6 m/s到34.0 m/s又回到3.1 m/s,对应雷诺数范围 $5.1 \times 10^3 \sim 5.7 \times 10^4$,动压范围5.5~680 Pa,温度范围 $21^\circ\text{C} \sim 26^\circ\text{C}$,气压范围101.9~102.4 kPa。在每个风速点,选定的一条直径的方位角,从 0° 开始,在 60° 内以 5° 步长、在 60° 外以 10° 步长扫描了 360° 范围。压差传感器的读数以4 Hz的采样率输出,在每一种风速和

方位角的组合下记录 4 个压强传感器各约 50 个样本, 并按照结构对称性将对应相同方位角的来自不同压强传感器的数据整合。在测试风速范围内, 阻风圆柱下游漩涡具有规则性和周期性^[1,17,18], 使用时间平均的方法计算平均值。整理出的阻风圆柱直径两端压强差系数的平均值如图 2 所示。

从图 2(a)可以看出, 不同雷诺数下, 阻风圆柱直径两端压强差系数随直径方位角的分布基本一致, 特别是在 $0^\circ \sim 60^\circ$ 范围内。此分布呈现出非单调性, 在约 65° 附近达到最小值。图 2(b)是对压强差系数分布的另一种表示, 当直径方位角固定, 此直径对应的压强差系数在雷诺数 $5.1 \times 10^3 \sim 5.7 \times 10^4$ 范围内基本保持不变。

3.2 建立模型

图 2(a)表现出的 $C_{P_D}(\theta)$ 的非单调性不利于获得唯一解^[2], 需要寻找一个单调区间。 $C_{P_D}(\theta)$ 关于方位角的分布在 $0^\circ \sim 65^\circ$ 范围内单调, 但 55° 附近取值为零, 求解时近零值会增大测量误差, 应在更小的角度范围内建模。同时, 选取的这一角度范围越小, 需要测量的直径数越多, 应尽量增大这一角度, 故在 $0^\circ \sim 45^\circ$ 范围建模, 此时需要测量 4 条直径。

从理论上来说, $C_{P_D}(\theta)$ 除了是方位角 θ 的函数, 也是雷诺数的函数, 有

$$C_{P_D}(\theta) = f(\text{Re}, \theta) \quad (5)$$

其中, $f(\text{Re}, \theta)$ 是一个二元函数。图 2(b)表明, 在雷诺数 $5.1 \times 10^3 \sim 5.7 \times 10^4$ 范围内, $C_{P_D}(\theta)$ 几乎不随 Re 变化而变化。假设 $C_{P_D}(\theta)$ 在此范围内相对于雷诺数

是不变的, 则式(5)退化为

$$C_{P_D}(\theta) = f(\text{Re}, \theta) = g(\theta) \quad (6)$$

对于给定的方位角 θ_0 , 根据式(6)有 $C_{P_D}(\theta_0) = g(\theta_0)$, 代入式(4)得到

$$P_D(\theta_0) = g(\theta_0) \cdot \frac{1}{2} \rho U_\infty^2 = g(\theta_0) \cdot q \quad (7)$$

其中, q 是流体动压。在风洞实验中, 得到了若干方位角 θ_0 下 q 和 $P_D(\theta_0)$ 各自的一系列测量值。式(7)表明 q 和 $P_D(\theta_0)$ 之间存在着线性关系, 使用一次多项式线性拟合, 采用的拟合式为

$$P_D(\theta_0) = a(\theta_0) \cdot q + b(\theta_0) \quad (8)$$

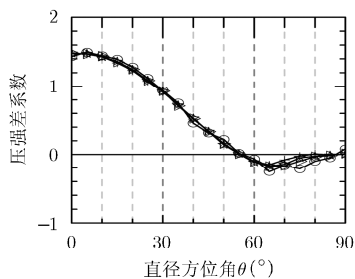
其中, $a(\theta_0)$ 和 $b(\theta_0)$ 是拟合系数。

选定一个 θ_0 值, 根据实验数据拟合得到的 $a(\theta_0)$ 是对 $g(\theta_0)$ 的一个估计值, 而 $b(\theta_0)$ 则是这一估计的误差。对于图 2 所对应的风洞实验数据, 使用式(8)对 $0^\circ \sim 45^\circ$ 内的 θ_0 情况进行拟合, 得到的结果见表 1。 $P_D(\theta_0)$ 和 q 表现出较好的线性相关性, 拟合优度不低于 0.9999。 $b(\theta_0)$ 的值所代表的误差相对 $P_D(\theta_0)$ 较小。

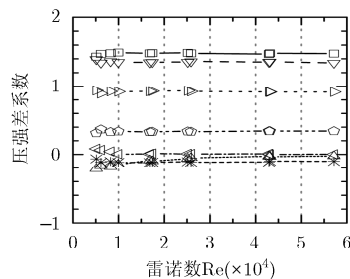
表 1 中的 $a(\theta_0)$ 值绘制成曲线如图 3 所示。结合式(2)的函数形式, 采用拟合式(9)。

$$F(\theta) = A \cos^2 \theta + B, \quad \theta \in [0^\circ, 45^\circ] \quad (9)$$

来拟合这一系列 $a(\theta_0)$ 值, 其中 A 和 B 是拟合系数。拟合的结果如图 3 所示, 此时拟合系数 A 为 2.3266, 系数 B 为 -0.8327。拟合优度为 0.9992, 具有较好的相关性; 拟合函数与 $a(\theta_0)$ 值的相对误差不超过 3.57%。将式(9)的拟合结果应用到式(6), 得到



(a) 压强差系数测量值与雷诺数的关系



(b) 压强差系数测量值与方位角的关系

图 2 压强差系数测量值与雷诺数和方位角的关系

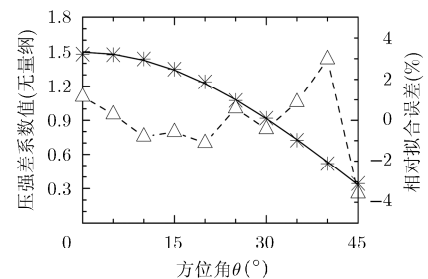


图 3 对压强差系数与方位角关系的拟合

表 1 对直径压强差与流体动压之间关系的线性拟合结果

θ_0 值($^\circ$)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
$a(\theta_0)$ 值	1.4769	1.4721	1.4352	1.3459	1.2356	1.0722	0.9163	0.7221	0.5173	0.3429
$b(\theta_0)$ 值	0.1414	0.4259	0.2620	0.8219	0.9448	0.6195	0.4668	-0.1777	0.3992	-0.3543
拟合优度	1.0000	1.0000	1.0000	0.9999	0.9999	1.0000	1.0000	0.9999	1.0000	1.0000

$$C_{p_0}(\theta) = A \cos^2 \theta + B, \quad \theta \in [0^\circ, 45^\circ] \quad (10)$$

此即为描述圆柱绕流中圆柱直径两端压强差的数学模型。

3.3 测量方法

测量方法根据本文提出的模型得到。模型建立在方位角 $0^\circ \sim 45^\circ$ 范围, 故取前驻点两侧距离前驻点分别为 θ 和 $\pi/4 - \theta$ 的两点 ($0^\circ \leq \theta \leq 22.5^\circ$), 以这两点为正端的直径压强差的测量值分别为 P_1 和 P_2 , 根据式(10)列方程, 求解出风速风向表达式为

$$\theta = \frac{1}{2} \left[\arccos \frac{\left(\frac{P_1}{P_2} - 1 \right) \left(1 + \frac{2B}{A} \right)}{\sqrt{\left(\frac{P_1}{P_2} \right)^2 + 1}} - \arctan \frac{P_1}{P_2} \right] \quad (11)$$

$$U_\infty = 2 \sqrt{\frac{P_1}{\rho(A \cos 2\theta + A + 2B)}} \quad (12)$$

其中, U_∞ 代表需要被测的风速。式(12)表明, 计算风速还需要空气密度。忽略湿度影响, 空气密度近似为^[19]

$$\rho \approx 3.48353 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{K} \cdot \text{J}^{-1} \times \frac{P}{T} \quad (13)$$

其中, P 是大气压(Pa), T 是温度(K)。

为保证获得 P_1 和 P_2 , 需要在圆柱的一个圆周上等距排列 8 个测压孔, 对应相互间隔 45° 的 4 条直径的各自两端, 即文献[20]描述的测压孔排布方式。根据式(10), 不论前驻点在圆柱表面任何方位, 最靠近前驻点的测压孔, 所连接的压差传感器有绝对值最大的读数, 该读数的绝对值是 P_1 ; 第 2 靠近前驻点的测压孔, 对应次大的读数绝对值 P_2 。根据式(11), 式(12)计算出前驻点与最靠近的测压孔之间的角度距离 θ 和风速后, 由于各测压孔的位置已知, 根据这两个测压孔的已知方位可以确定前驻点的方位, 即风向。

4 实验验证

为验证提出的测量方法的可行性, 将其应用在建模时使用的 FS-003 风洞数据上。对每一风向情况, 使用距离前驻点分别为 θ 和 $\pi/4 - \theta$ 的两点的测试数据作为计算的已知量。每个风速点下, 风速计算值按风向进行平均, 结果如图 4(a)所示; 每种风向情况下, 风向计算值按风速进行平均, 结果如图 4(b)所示。图中同时给出了计算值相对实际值的误差, 平均风速相对误差不超过 $\pm 2\%$, 平均风向误差不超过 $\pm 4^\circ$, 证明了此测量原理在雷诺数范围 $5.1 \times 10^3 \sim 5.7 \times 10^4$ 内的可行性。

为进一步验证提出的测量方法原理的可行性, 衡量其性能, 设计制作了相应原型机^[20], 在另一台

F-03 风洞中进行测试。该风洞工作段截面尺寸 $320 \text{ mm} \times 320 \text{ mm}$, 可调风速范围 $0.5 \sim 45 \text{ m/s}$, 紊流度不大于 0.5% 。在 $2.1 \sim 39.1 \text{ m/s}$ 风速范围内选择了 7 个风速点, 对应雷诺数范围 $3.55 \times 10^3 \sim 6.85 \times 10^4$, 环境温度 $19^\circ\text{C} \sim 20^\circ\text{C}$, 气压 $100.8 \sim 102.5 \text{ kPa}$ 。每个风速点下, 以 10° 步长扫描 360° 范围的风向。在每一测试点, 以 4 Hz 采集 4 个测压孔的压差数据各约 100 个样本, 并按对称性将整合数据, 计算平均值。按照和上文相同的计算方法, 计算结果如图 5 和图 6 所示。

图 5(a)是风速计算值按风向进行平均的结果, 风速计算值与实际风速的相对误差绘制在图 5(b)中, 其相对误差不超过 $\pm 5\%$ 。在风速 10 m/s 以上时, 风速相对误差不超过 $\pm 3\%$; 在 10 m/s 以下时相对误差不超过 $\pm 5\%$, 误差大小不超过 $\pm (0.2 + 0.03 V) \text{ m/s}$ 。总体来说, 风速误差小于 $\pm (0.2 + 0.03 V) \text{ m/s}$ 。图 6(a)是风向计算值按风速进行平均的结果, 风向计算值与实际风向的误差绘制在图 6(b)中, 其误差不超过 $\pm 5^\circ$ 。F-03 风洞测试数据的计算结果证明, 本文提出的测量方法在雷诺数 $3.55 \times 10^3 \sim 6.85 \times 10^4$ 范围内可行。

5 结束语

本文基于风洞实验数据, 通过两次线性拟合建立了一种数学模型来描述圆柱绕流中阻风圆柱直径两端压强差的分布。根据该模型, 本文提出了一种通过检测该压强差来计算风速和风向的 2 维风测量方法, 该方法计算步骤简单, 无需迭代。对 FS-003 风洞数据应用该方法, 验证了其在雷诺数 $5.1 \times 10^3 \sim 5.7 \times 10^4$ 范围内的可行性。对在另一台 F-03 风洞中获得的实验数据应用该方法, 风速计算值误差不超过 $\pm (0.2 + 0.03 V) \text{ m/s}$, 风向计算值误差不超过 $\pm 5^\circ$, 验证了该方法在雷诺数 $3.55 \times 10^3 \sim 6.85 \times 10^4$ 范围内的可行性。该方法相比应用 MEMS 流量传感器的圆柱形 2 维风传感器的测量方法, 近似处理引入的误差得到了降低。由于没有转动部件, 该方法不受机械摩擦和惯性的制约, 不需要占用较大的空间, 本文所用圆柱形探头直径为 26 mm 。

压差传感器在测量直径压强差时, 测压管路中几乎没有气流, 测量性能对管路结构不敏感, 制作传感器时对加工一致性的要求较低。从直观上来说, 较小的气流能更好地保护内部的传感器敏感元件, 将敏感元件与灰尘和雨水隔离。但灰尘和雨水仍有可能堵塞测压孔, 影响测量准确度, 这将是设计制作供现场测量使用的 2 维风传感器时需要解决的问题。

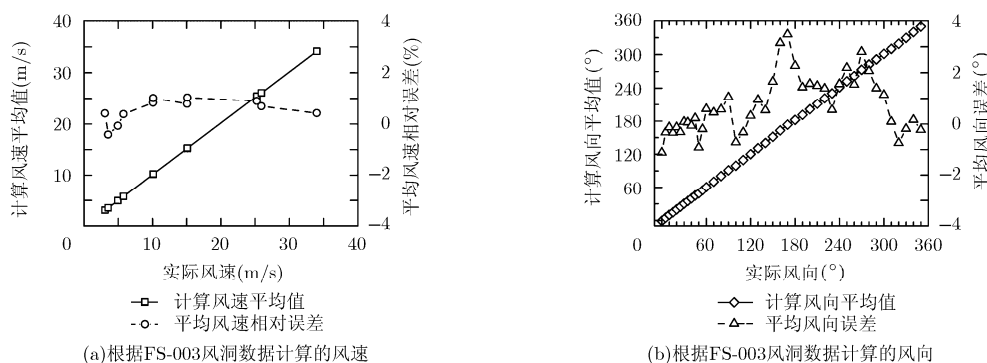


图 4 根据FS-003风洞数据计算的风速和风向

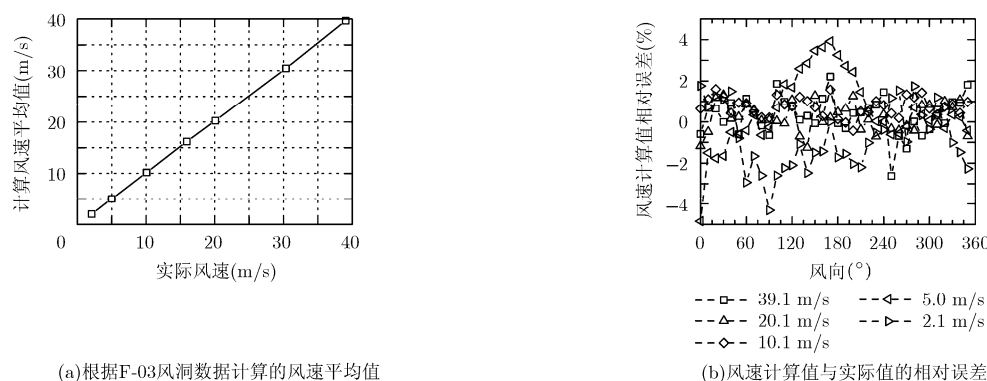


图 5 根据F-03风洞数据计算的风速及其相对误差

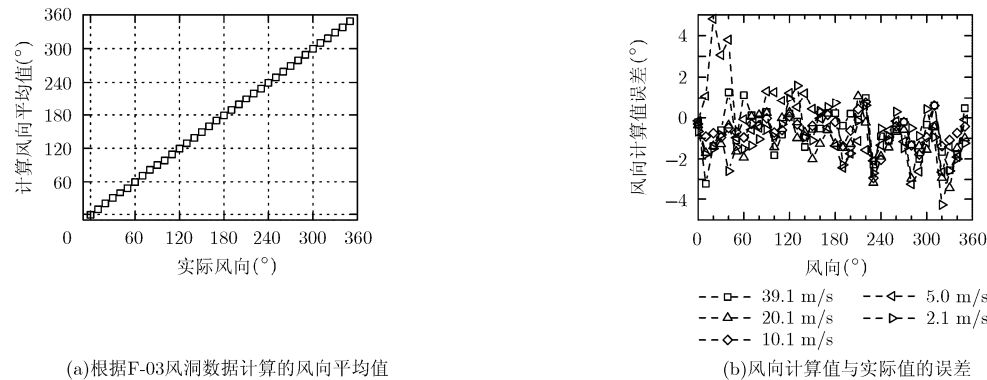


图 6 根据F-03风洞数据计算的风向及其误差

参考文献

- [1] 孙学金, 王晓蕾, 李浩, 等. 大气探测学[M]. 北京: 气象出版社, 2009: 172-247.
SUN Xuejin, WANG Xiaolei, LI Hao, *et al.* Atmospheric Observation[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2009: 172-247.
- [2] BRUSCHI P, DEI M, and PIOTTO M. A low-power 2-D wind sensor based on integrated flow meters[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2009, 9(12): 1688-1696. doi: 10.1109/JSEN.2009.2030652.
- [3] ZHU Yanqing, CHEN Bei, QIN Ming, *et al.* 2-D micromachined thermal wind sensors — A review[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2014, 1(3): 216-232. doi: 10.1109/JIOT.2014.2319296.
- [4] VERESHCHAGINA E, TIGGELAAR R M, SANDERS R G P, *et al.* Low power micro-calorimetric sensors for analysis of gaseous samples[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2015, 206: 772-787. doi: 10.1016/j.snb.2014.08.077.
- [5] LIU Haobing, LIN Nay, PAN Shanshan, *et al.* High sensitivity, miniature, full 2-D anemometer based on MEMS hot-film sensors[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2013, 13(5): 1914-1920. doi: 10.1109/JSEN.2012.2236014.
- [6] KOWALSKI L, JIMENEZ V, DOMINGUEZ-PUMAR M, *et al.* Low pressure spherical thermal anemometer for space

- missions[C]. 2013 IEEE Sensors, Baltimore, Maryland, USA, 2013: 1–4. doi: 10.1109/ICSENS.2013.6688493.
- [7] KOWALSKI L, ATIENZA M T, GORRETA S, *et al.* Spherical wind sensor for the atmosphere of Mars[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 16(7): 1887–1897. doi: 10.1109/JSEN.2015.2509168.
- [8] DONG Ziqiang, CHEN Jingjing, QIN Yukun, *et al.* Fabrication of a micromachined two-dimensional wind sensor by Au-Au wafer bonding technology[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2012, 21(2): 467–475. doi: 10.1109/JMEMS.2011.2179014.
- [9] ZHU Yanqing, CHEN Bei, GAO Di, *et al.* A robust and low-power 2-D thermal wind sensor based on a glass-in-silicon reflow process[J]. *Microsystem Technologies*, 2015, 22(1): 151–162. doi: 10.1007/s00542-015-2423-9.
- [10] GEORGIOU D P and KYPROS F M. Fabrication and calibration of a sub-miniature 5-hole probe with embedded pressure sensors for use in extremely confined and complex flow areas in turbomachinery research facilities[J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2014, 39: 54–63. doi: 10.1016/j.flowmeasinst.2014.07.005.
- [11] PIOTTO M, DEI M, PENNELLI G, *et al.* A miniaturized 2D solid state anemometer based on thermal flow sensors[J]. *Procedia Chemistry*, 2009, 1(1): 1463–1466. doi: 10.1016/j.proche.2009.07.365.
- [12] PIOTTO M, PENNELLI G, and BRUSCHI P. Fabrication and characterization of a directional anemometer based on a single chip MEMS flow sensor[J]. *Microelectronic Engineering*, 2011, 88(8): 2214–2217. doi: 10.1016/j.mee.2010.11.009.
- [13] 张兆顺, 崔桂香. 流体力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999: 167–168.
ZHANG Zhaoshun and CUI Guixiang. *Hydromechanics*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1999: 167–168.
- [14] SCHLICHTING H. *Boundary-Layer Theory*[M]. 7th Edition, New York: McGraw-Hill, 1979: 12–23.
- [15] ZURELL Cory. Aerodynamics of a circular cylinder inclined to airflow and wind-induced vibrations of dry, inclined cables at high wind speeds[D]. [Ph.D. dissertation], University of Ottawa, 2004: 22–25.
- [16] CARE I and ARENAS M. On the impact of anemometer size on the velocity field in a closed wind tunnel[J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2015, 44: 2–10. doi: 10.1016/j.flowmeasinst.2014.11.007.
- [17] CHEN Wenli, LI Hui, and HU Hui. An experimental study on a suction flow control method to reduce the unsteadiness of the wind loads acting on a circular cylinder[J]. *Experiments in Fluids*, 2014, 55(4): 1–4. doi: 10.1007/s00348-014-1707-7.
- [18] LYSENKO D A, ERTESVÅG I S, and RIAN K E. Large-eddy simulation of the flow over a circular cylinder at Reynolds number 2×10^4 [J]. *Flow, Turbulence and Combustion*, 2014, 92(3): 673–698. doi: 10.1007/s10494-013-9509-1.
- [19] GIACOMO P. Equation for the determination of the density of moist air (1981)[J]. *Metrologia*, 1982, 18(3): 33–40. doi: 10.1088/0026-1394/18/3/011.
- [20] LIU Cheng, DU Lidong, and ZHAO Zhan. A directional cylindrical anemometer with four sets of differential pressure sensors[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2016, 87(3): 035105. doi: 10.1063/1.4943222.
- 刘 成: 男, 1990 年生, 博士生, 研究方向为微传感器与系统集成以及风传感器.
- 赵 湛: 男, 1958 年生, 研究员, 研究领域为多传感器集成及微纳制造技术、无线传感器网络应用技术、生命信息感知与计算等.
- 杜利东: 男, 1980 年生, 助理研究员, 研究方向为微传感器系统与集成、无线传感器网络.
- 方 震: 男, 1976 年生, 副研究员, 研究领域为无线传感网、可穿戴技术、健康物联网.