

DOI: 10.13382/j.jemi.B2306320

多反射式超声波测风模型及算法研究*

李浩琪¹ 行鸿彦¹ 王水璋² 侯天浩¹

(1. 南京信息工程大学电子与信息工程学院 南京 210044; 2. 南京多基观测技术研究院有限公司 南京 210044)

摘要:针对当前超声波测风阵列体积大传输路径短,测量精度低的问题,设计了4个收发一体的超声波换能器,按方形排列,探头垂直朝下放置,超声波信号通过在测风区域之间多次反射完成测风,相比于一次反射超声波测风阵列体积缩小20%。基于所建模型,提出自适应测风算法以减弱阴影效应对测风精度的影响。利用SpaceClaim Design Modeler软件建立了测风阵列以及风洞模型,通过Fluent Meshing进行网格划分,使用Fluent软件改变模拟风洞内的风速和风向,验证了所设计的小型超声波测风阵列和自适应权重测风算法在减弱阴影效应提高测量精度的优越性。实验结果表明,自适应权重测风算法相比于传统测风算法的测速精度提高了12.44%,测角精度提高了10.40%。

关键词: Fluent 仿真; 阴影效应; 超声波测风; 自适应权重

中图分类号: P414 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

Multi-reflection ultrasonic wind measuring model and algorithm research

Li Haoqi¹ Xing Hongyan¹ Wang Shuizhang² Hou Tianhao¹

(1. School of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. Nanjing Institute of Multi-Platform Observation Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: Aiming at the short transmission path and low measurement accuracy of the small ultrasonic wind measurement array, four ultrasonic transducers integrating transceivers are designed, arranged in a square, with the probes placed vertically downwards, and the ultrasonic signals are reflected multiple times between the wind measurement areas. The wind measurement is completed, and the volume of the one-time reflection ultrasonic wind measurement array is reduced by 20%. Based on the built model, an adaptive wind measurement algorithm is proposed to reduce the influence of shadow effect on wind measurement accuracy. Using the SpaceClaim Design Modeler software, the wind array and wind tunnel model were established, the grid was divided by Fluent Meshing, and the wind speed and direction in the simulated wind tunnel were changed using Fluent software, and the designed small ultrasonic wind array and adaptive weight were verified. The superiority of the wind measurement algorithm in weakening the shadow effect and improving the measurement accuracy. The experimental results show that compared with the traditional wind measurement algorithm, the speed measurement accuracy of the adaptive weight wind measurement algorithm is increased by 12.44%, and the angle measurement accuracy is increased by 10.40%.

Keywords: Fluent simulation; shadow effect; ultrasonic wind measurement; adaptive weighting

0 引言

农业是我国国民经济发展的支柱产业,地面气象观

测在促进地方经济发展、保障农业生产中具有重要的作用,风作为气象观测的主要气象要素,对生产生活具有更重要意义。在现代测风技术中,常见的方法主要有传统机械式测量、皮托管式测量、热膜热线式测量、激光多普

收稿日期: 2023-03-08 Received Date: 2023-03-08

* 基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFE0105500)、国家自然科学基金(62171228)和江苏省研究生科研创新计划(KYCX22_1195)项目资助

勒式测量等^[1]。然而上述方法或多或少存在机械损耗^[2]、易受腐蚀和氧化等问题,而超声波式测风法凭借其较低的成本、更高的精度以及几乎不存在机械损耗等优势,从众多监测方法中脱颖而出并广泛应用^[3]。

超声波测风法有时差法^[4]、频差法^[5]和相位差法^[6]3种。频差法适用于中、小口径管道。其优点是精度高,受温度影响小,但是易受环境影响,工作不稳定^[7]。相位差法虽然测量精度高,但由于受相位角范围限制其测风范围十分有限^[8]。故时差法更适用于近地面测风,也因此成为了研究和应用最为广泛的方法^[9]。近年来,微电子技术的高速发展和超声波测风原理的不断完善,使得超声波测风技术逐步走向成熟^[10]。目前,科研人员主要通过优化算法来提高测量精度。例如,任晓晔等^[11]提出了一种对超声波的阴影效应进行补偿的算法,该方法可以有效地降低阴影效应的影响,提高了测量的准确性;Jiang等^[12]提出通过将时差法和相差法融合的方法来提高测量精度;Ma等^[13]使用多信号分类算法和弧形超声波传感器阵列实现三维风速测量,具有较高的精度。

现代超声波换能器阵列主要有3种:中心发射放置法、垂直放置法、等边三角放置法^[14],其中垂直放置法计算简单,测量精度较低;中心发射放置法测量精度高,但所需传感器较多,硬件成本较贵;三角放置法,相比于前两种方法其计算量较大,但成本较低。3种方法均受物理结构限制,会产生阴影效应,从而导致测量精度下降。

针对上述存在的问题,本文设计了多反射式超声波测风阵列,换能器探头垂直于地面放置,且内嵌于结构体内,以降低由换能器所产生的阴影效应。根据所设计测风阵列,设计自适应权重测风算法,将相邻超声波换能器测风结果和对角超声波换能器测风结果加权融合,从而提高测量精度。通过Fluent仿真软件进行流体仿真实验,在不同的风速和风向下来进行绕流对比分析,来验证该模型和算法的优越性。

1 多次反射时差法测风原理

超声波时差法利用超声波在介质中传播时,介质的移动速度加载到超声波的速度上,在相同的传播距离内,顺向传播的时间会小于逆向传播的时间^[15]。超声波换能器在发射时的角度特性如图1所示。

由图1可以看出,本文选用的超声波换能器是以一定的0发射角向外发射超声波,垂直放置时换能器信号将发散出去,这里取典型值(-6 dB)时其发射角为30°。

如图2所示,为多次反信号接收原理图, M 、 N 均为收发一体式的超声波换能器,距离为 L , 与地面的高度为 H 。超声波通过上下两个板之间的多次反射来时间传播,超声波换能器 M 、 N 交替收发信号,测得信号顺风传

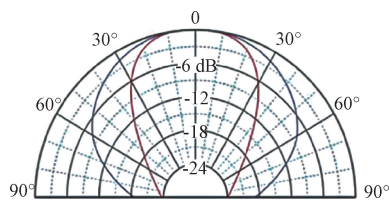


图1 超声波换能器角度特性图

Fig. 1 Ultrasonic transducer angle characteristic diagram

播的时间 t_{NM} 和逆风传播时间 t_{MN} 。

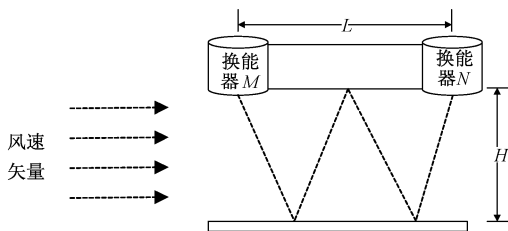


图2 多次反射测风原理

Fig. 2 Schematic diagram of multiple reflection wind measurement

假设风由水平方向 M 到 N , 风速为 V , 超声波在 25 °C 的环境中超声波的传播速度为 V_0 , 换能器超声波信号的发射方向为 θ , 则此时超声波水平的风速大小:

$$V_x = V_0 \sin \theta \tag{1}$$

由已知的条件可得:

$$\begin{cases} t_{MN} = \frac{L}{V_{MN}} = \frac{L}{V_x + V} = \frac{L}{V_0 \sin \theta + V} \\ t_{NM} = \frac{L}{V_{NM}} = \frac{L}{V_x - V} = \frac{L}{V_0 \sin \theta - V} \end{cases} \tag{2}$$

由式(2)可得水平 NM 方向的风速 V :

$$V = \frac{L}{2} \left(\frac{1}{t_{MN}} - \frac{1}{t_{NM}} \right) \tag{3}$$

当风速矢量在经过换能器时,由于换能器的阻挡,空气会做圆柱绕流运动,此时换能器 M 后方的风速会明显降低产生湍流,产生了阴影效应^[16],具体如图3所示。因此,减弱阴影效应所带来的影响是目前的重点。

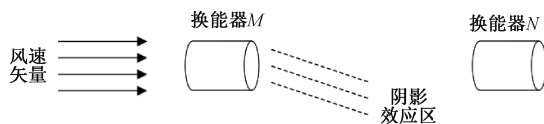


图3 阴影效应示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the shadow effect

2 多反射超声波换能器阵列设计

2.1 多反射超声波换能器模型设计

为了减弱在实际应用时产生的阴影效应,本文设计

了一种新型超声波换能器测风阵列模型,如图 4 所示。

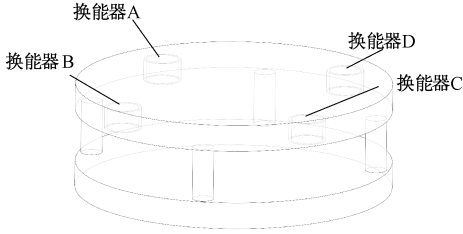


图 4 新型超声波换能器测风阵列模型

Fig. 4 Model of a new type ultrasonic transducer wind measuring array

结合实际应用场景,新型超声波阵列因考虑以下几点:

- 1) 相对换能器组(AC、BD)经过 3 次反射接收;
- 2) 相邻换能器组(AB、BC、CD、AD)经过一次反射接收;
- 3) 传输距离过大将导致声波传播过程中的损耗和干扰增加,从而影响测量精度;
- 4) 传输距离过小,将导致测风量程很小。

根据超声波换能器的发射特性图,取其发射角的典型区间 $30^\circ \sim 60^\circ$,已知换能器上下板之间的距离为 H ,超声波换能器与圆心的距离为 r 。设经过 1 次反射超声波传播路径的最小距离为 l_1 和最大距离为 l_2 ;经过 3 次反射超声波传播路径的最小距离为 l_3 和最大距离为 l_4 ,则:

$$\begin{cases} l_1 = \frac{2H}{\sqrt{3}} \\ l_2 = 2H\sqrt{3} \\ l_3 = \frac{4H}{\sqrt{3}} \\ l_4 = 4H\sqrt{3} \end{cases} \quad (4)$$

由几何关系,可得到式(5):

$$\begin{cases} \frac{2H}{\sqrt{3}} \ll \sqrt{2r} \ll 2H\sqrt{3} \\ \frac{4H}{\sqrt{3}} \ll 2r \ll 4H\sqrt{3} \end{cases} \quad (5)$$

即:

$$\frac{2\sqrt{3}H}{3} \ll r \ll \sqrt{6}H \quad (6)$$

由于超声波在传播过程中的衰减,会对测量精度造成影响,故而引入超声波衰减模型^[17]:

$$A = A_0 \times e^{-\alpha d} \quad (7)$$

式中: A 是超声波在距离 d 处的振幅, A_0 是超声波的初始振幅, α 是空气的吸收系数, d 是传播距离。空气的吸收系数 α 可以通过式(8)计得出:

$$\alpha = \alpha_0 \times \frac{f^y}{f_0} \quad (8)$$

式中: f 是超声波的频率, f_0 是超声波的参考频率。又根据超声波与电压的关系,可得出式(9):

$$\begin{cases} A = K \times U \\ A_0 = K \times U_0 \end{cases} \quad (9)$$

式中: U 是接收端换能器电压, U_0 是超声发射端电压, K 是超声换能器的电-声转换效率。由式(7)~(9)得到式(10):

$$d = - \left(\frac{1}{\alpha} \right) \times \ln \left(\frac{U}{U_0} \right) \quad (10)$$

式中: $\frac{U}{U_0}$ 由信号由滤波放大电路的特性所决定。本超声波测风仪所选取的运放为 SGM722,其高增益带宽为 G ,一直超声波换能器的中心频率 $f_0 = 40 \text{ kHz}$,故而:

$$\frac{U}{U_0} = \frac{f_0}{G} = \frac{1}{275} \quad (11)$$

超声波阵列的大小和测风的量程以及精度密切相关。假设 t 为换能器从发送第 1 个脉冲信号到接收到信号的时间, V_0 为 25°C 的环境中的超声波的传播速度, $F = 20 \text{ m/s}$ 为该测风阵列的设计量程,为了简化计算,不考虑由信号调理和 AD 转换的时间,则:

$$\min(t) = \frac{l_1}{V_0 + F} \quad (12)$$

所以:

$$\min(t) = 5 \times \frac{1}{40 \text{ kHz}} = 2 \times 10^{-4} \text{ s} \quad (13)$$

式中: $\alpha_0 = 0.1$ 和 $f_0 = 40 \text{ kHz}$; y 是一个经验系数,通常取值为 1.2。最终得到 H 的范围:

$$38 \text{ mm} < H < 82 \text{ mm} \quad (14)$$

由上述模型最终得出新型换能器阵列的直径为 120 mm,高为 63 mm,支柱距圆心 55 mm,直径为 8 mm,换能器 A、B、C、D 距圆心 50 mm,上下板之间的距离为 43 mm。

然后基于所建立的模型计算风速,设 AB、AC、AD、BD、BC、DC 6 条路径上测得的风速分别为 V_{AB} 、 V_{AC} 、 V_{AD} 、 V_{BD} 、 V_{BC} 、 V_{CD} ,由时差测风法原理可得到相邻超声波换能器之间的风速表达式:

$$\begin{cases} V_{AB} = \frac{L_0}{2} \left(\frac{1}{t_{AB}} - \frac{1}{t_{BA}} \right) \\ V_{AD} = \frac{L_0}{2} \left(\frac{1}{t_{AD}} - \frac{1}{t_{DA}} \right) \\ V_{DC} = \frac{L_0}{2} \left(\frac{1}{t_{DC}} - \frac{1}{t_{CD}} \right) \\ V_{BC} = \frac{L_0}{2} \left(\frac{1}{t_{BC}} - \frac{1}{t_{CB}} \right) \end{cases} \quad (15)$$

式中： $t_{AB}、t_{BA}、t_{AD}、t_{DA}、t_{BC}、t_{CB}、t_{CD}、t_{DC}$ 为相邻换能器超声波传播的时间。通过对两个方向的风进行矢量合成可以得到当前的风速 V_1 和风向 α_1 ：

$$\begin{cases} V_x = \frac{V_{AB} - V_{DC}}{2} \\ V_y = \frac{V_{BC} - V_{AD}}{2} \\ V_1 = \sqrt{V_x^2 + V_y^2} \\ \alpha_1 = \arcsin \frac{V_x}{V_1} \end{cases} \quad (16)$$

然后,对角的两组换能器得到另一组测风结果:

$$\begin{cases} V_{AC} = \frac{\sqrt{2}L_0}{2} \left(\frac{1}{t_{AC}} - \frac{1}{t_{CA}} \right) \\ V_{BD} = \frac{\sqrt{2}L_0}{2} \left(\frac{1}{t_{BD}} - \frac{1}{t_{DB}} \right) \end{cases} \quad (17)$$

式中： $t_{AC}、t_{CA}、t_{BD}、t_{DB}$ 为超声波传播的时间。

对其进行矢量合成得到 V_2 和 α_2 ,如式(18)所示:

$$\begin{cases} V_2 = \sqrt{V_{AC}^2 + V_{BD}^2} \\ \alpha_2 = \arcsin \frac{V_{AC}}{V_2} \end{cases} \quad (18)$$

2.2 自适应加权测风算法设计

受测风模型结构的限制,阴影效应不可避免。风在不同角度时,产生的圆柱绕流的方向也是不同的,对测风路径的影响也大不相同。为了降低这种影响,本文引入自适应加权测风算法^[18],通过调节相邻换能器测风结果 $X_1(V_1, \alpha_1)$ 和对角换能器测风结果 $X_2(V_2, \alpha_2)$ 之间的权重来提高测量的精度^[19]。

由式(15)和(17),得到了两组测风结果 X_1 和 X_2 (都含有风速 V 和风向 α),两种测风结果均由实际结果 X 以及测量误差(主要由圆柱绕流引起) C_1 和 C_2 组成,则:

$$\begin{cases} X_1 = X + C_1 \\ X_2 = X + C_2 \end{cases} \quad (19)$$

X_1 和 X_2 为两种关系的测量结果,则其测量误差的方差为:

$$\begin{cases} \sigma_1^2 = E(C_1^2) \\ \sigma_2^2 = E(C_2^2) \end{cases} \quad (20)$$

其中, $E(\cdot)$ 为均值。为了使得自相关函数与互相关函数尽可能准确,先将各个采样点测量数据求平均值来求取自相关函数和互相关函数,然后将两个测量方法的结果取平均值来求互相关函数。计算公式如下:

$$R_{12} = E(X_1 X_2) = E(X^2) \quad (21)$$

$$\begin{cases} R_{11} = E(X_1 X_1) = E(X^2) + E(C_1^2) \\ R_{22} = E(X_2 X_2) = E(X^2) + E(C_2^2) \end{cases} \quad (22)$$

$$R_{12}(k) = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k X_1(i) X_1(i) =$$

$$\frac{k-1}{k} R_{11}(k-1) + \frac{1}{k} X_1(k) X_1(k) \quad (23)$$

$$\bar{R}_{12}(k) = R_{12}(k) \quad (24)$$

式中： k 为采样点个数 $R(k)$ 为 k 时刻换能器的相关函数, R_{11} 与 R_{12} 的差即为 k 时刻换能器 1 的观测方差的估计 $\hat{\sigma}_1^2$, k 时刻的测量方差的无偏估计 $\hat{\sigma}_1^2(k)$ 的公式如下:

$$\begin{cases} \hat{\sigma}_1^2(k) = \frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^k \hat{\sigma}_1^2(i) \\ \hat{\sigma}_2^2(k) = \frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^k \hat{\sigma}_2^2(i) \end{cases} \quad (25)$$

式中： $\hat{\sigma}_1^2(i)$ 为第 i 个采样点求得的测量方差。 k 越大,方差估计越准确。通过式(25)得到的测风结果的无偏估计后,利用式(15)得到相邻测风和对角测风的权值估计 \hat{w}_1^* 和 \hat{w}_2^* :

$$\begin{cases} \hat{W}_1^* = \frac{1}{\hat{\sigma}_1^2 \left(\frac{1}{\hat{\sigma}_1^2} + \frac{1}{\hat{\sigma}_2^2} \right)} \\ \hat{W}_2^* = \frac{1}{\hat{\sigma}_2^2 \left(\frac{1}{\hat{\sigma}_1^2} + \frac{1}{\hat{\sigma}_2^2} \right)} \end{cases} \quad (26)$$

最后,将两组测量结果和权值融合得到最终的测量值 X :

$$X = \hat{W}_1^* \times X_1 + \hat{W}_2^* \times X_2 \quad (27)$$

3 实验验证

3.1 建模

首先,采用 SpaceClaim Design Modeler 进行建模,然后采用 Fluent Meshing 进行网络划分。在建模过程中,以实际超声波换能器为参考,确定超声波换能器的直径为 14 mm,长为 10 mm 的圆柱,内嵌于顶部,支柱的直径为 8 mm,用于外壳的上下支撑,内为空心,用于信号线的放置。

为了使得实验效果更好,引入体网格加密区域(body of influenet),对换能器的外围进行局部加密,其长为 200 mm,宽为 200 mm,高为 100 mm。

最后,为了让实验更加接近外部环境,需要将风洞设计的足够大,通过多次实验验证之后,最终确定了风洞的尺寸为 500 mm×500 mm×200 mm 的长方体,并命名为风洞的入口、出口和壁面。其具体实验模型如图 5 所示。

3.2 计算模型的选择

根据风在风场中的流动特性以及阴影效应是由圆柱

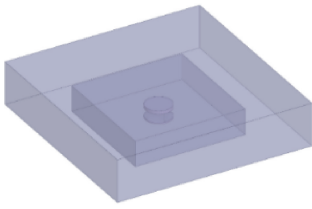


图 5 风洞模型

Fig. 5 Wind tunnel model

绕流所产生的原因,本文选取了 Transition k-kl-omega^[20-21]模型。该模型是涡流粘度三方方程类型模型,应用于尾迹流和圆柱绕流,在低的雷诺系数的风洞中有更好的表现^[22]。

3.3 实验结果分析

1) 不同模型阴影效应分析

为了测试多反射式超声测风模型降低阴影效应的性能,将当前经典的一次反射垂直相交模型和对射式超声波测风模型作为对比,其模型如图 6(a)和(b)所示。

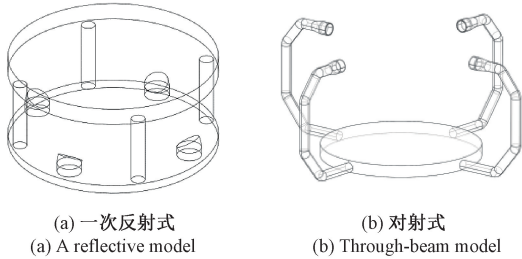


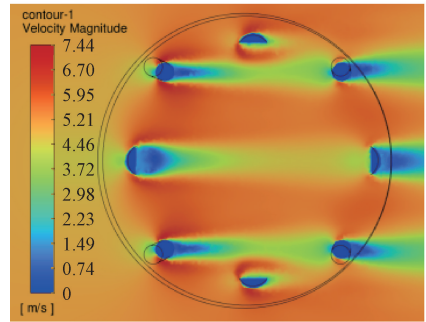
图 6 两种传统测风阵列模型

Fig. 6 Two traditional wind array models

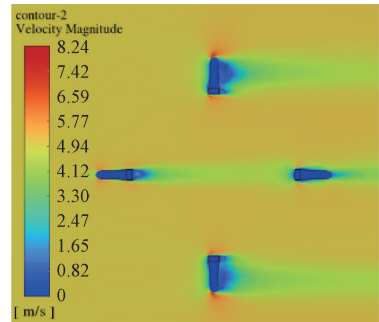
通过 3 种换能器阵列模型的扰流对比分析,来观察它们在水平和垂直两个方向的性能表现。实验在 5 m/s 自左向右的风场下进行,雷诺系数设为 4 000,具体实验结果如图 7 所示。

图 7 为两种传统测风阵列在换能器附近的水平风速分布情况,其中颜色表示风速大小。从图 7(a)可以观察到,在一次反射超声测风阵列的换能器周围区域存在显著的阴影效应和狭管效应,由这两种效应的叠加使得测风区域水平风速分布混乱,将对测风路径产生较大干扰。具体表现为,在测风阵列内部换能器与支柱之间的风速高于实际风速,换能器后方风速会远低于实际风速。而对射式超声波测风模型信号传播也是在水平方向,所以其水平方向受到阴影效应的影响最为严重。

然后,对改进阵列模型进行水平方向的扰流对比分析,实验结果如图 8 所示。可以观察到,相较于传统阵列,超声波换能器周围的阴影效应对风速分布的影响较为微弱。在此结构下,风速分布表现出较好的均匀性,进而降低了对测风路径的干扰程度。这一现象说明,该改



(a) 一次反射式阵列
(a) A reflective array



(b) 对射式阵列
(b) Opposite beam array

图 7 两种传统超声波阵列水平风速分布图

Fig. 7 Horizontal wind speed distribution diagram of two traditional ultrasonic arrays

进阵列在设计上具有较高的优越性。

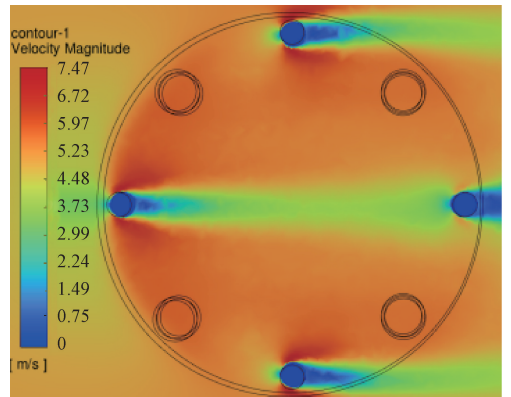


图 8 多次反射超声波阵列水平风速分布图

Fig. 8 Horizontal wind speed distribution map of multi-reflection ultrasonic array

在分析水平方向的扰流对比之后,同样对两种传统阵列在垂直方向上的风速分布进行了研究。进一步讨论不同阵列结构在垂直方向上的性能差异。首先,对比两种传统阵列垂直方向上风速分布图结果如图 9 所示。

由图 9(a)中发现,在一次反射阵列的垂直风场中,

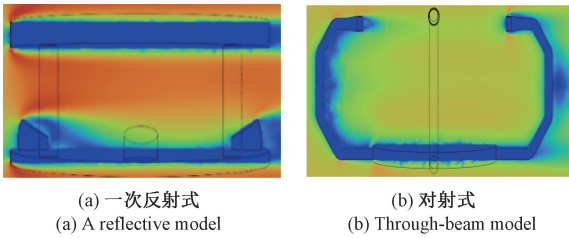


图 9 两种传统超声波阵列垂直风速分布图
Fig. 9 Vertical wind speed distribution diagram of two traditional ultrasonic arrays

换能器附近的风速显著降低,以及在换能器下方的区域内,风速呈现出下降的趋势。然而从对射式换能器阵列的垂直风场分布中(图 9(b)),可以看到对射式测风阵列,在测风路径上的垂直方向仅受到换能器产生的阴影效应,这导致了风速的降低,且始终低于实际风速。但在整个测风区间,垂直风场的分布依然保持较好的均衡性。接着对多次反射超声波测风阵列的垂直风速分布进行分析,结果如图 10 所示。

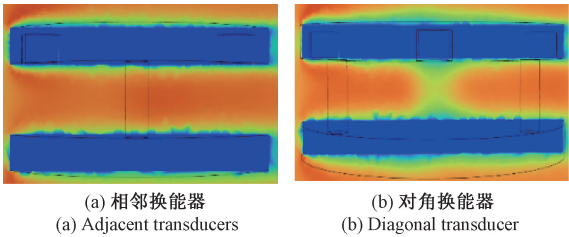


图 10 多次反射超声波阵列垂直风速分布图
Fig. 10 Vertical wind speed distribution diagram of multi-reflection ultrasonic array

由图 10 可以看出由于空气量无法大量积聚,气流在狭窄通道中加速通过,导致风速增大。当气流离开狭窄区域时,风速再次减小,但整体风速相对稳定。在对比其他两种模型后,多次反射测风模型在水平和垂直两个方向上显著降低阴影效应的表现尤为突出。能够有效地降低算法复杂度,同时提高测量精度,具有较高的研究价值和实际应用前景。

接下来对测风路径上的风速大小进行分析。实验的理想风速为 10 m/s,数据通过将仿真结果导入 CFD-Post 然后取测风路径上的风速得出。首先,在 3 种测风阵列的测风路径上等距取样 200 个采样点后,对比其在测风路径上的风速分布具体结果如图 11 所示。

由图 11 中的一次反射和多次反射风速的分布曲线可以看到在贴近测风仪顶部和底部时风速显著降低。一次反射式测风阵列的测风路径上受阴影效应和狭管效应的影响,在测风路径的前半段风速上升较慢,达到稳定时的风速在 13.7 m/s 左右,且后半段出现明显波动。对射

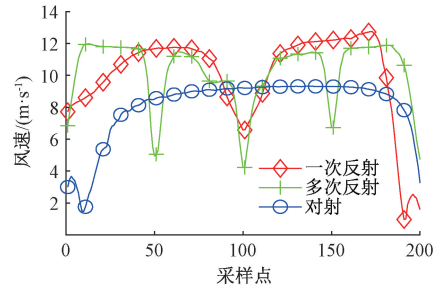


图 11 3 种阵列测风路径风速大小图
Fig. 11 Three kinds of array wind measurement path wind speed size map

模型的测风路径上受到阴影效应最为严重,可以看到其最大风速为 9.31 m/s,其在测风路径上的平均风速为 8.113 9 m/s。多次反射测风阵列的速度分布与前者两者对比有很大的区别。在上升阶段,其达到稳定值所用的时间很短,稳定之后的速度平稳达到 12 m/s 左右。

由此,可以判断一次反射阵列和对射阵列这两种测风阵列在面对圆柱绕流产生的阴影效应时的表现很不理想。其受干扰较大,内部风场分布紊乱,不利于风速的计算。而多次反射测风阵列其风速上升时间快,风速稳定。

下面对 3 种测风阵列进行量化对比,在相同的流场环境下,将每种阵列的路径速度离散取样点求平均值,并计算相对误差,对比数据如表 1 所示。

表 1 两种阵列测风路径速度均值及误差
Table 1 Velocity mean and error of two array wind measurement paths

测风阵列	测风路径	理想值	测量值	绝对误差	相对误差/%
一次反射	AC	10	11.230 4	1.230 4	12.39
	BD	10	11.560 1	1.560 1	15.60
对射模型	AC	10	8.114 0	1.886 0	18.86
	BD	10	8.205 6	1.749 4	17.64
多次反射	AB	10	10.915 5	0.915 5	9.15
	BC	10	11.025 6	1.025 6	10.26
	CD	10	10.644 7	0.644 7	6.45
	AD	10	10.516 5	0.516 5	5.17
	AC	10	11.245 7	1.245 7	12.45
	BD	10	10.824 3	0.824 3	8.24

由表 1 的数据可以提取出,一次反射阵列所测得的风速值: $V_{\text{一次反射}} = \frac{V_{\text{AC}} + V_{\text{BD}}}{2} = 11.395 3 \text{ m/s}$,其相对误差率为:

$$\delta_{\text{一次反射}} \approx 13.40\% \quad (28)$$

同理,对射模型风速的平均值为: $V_{\text{对射}} = \frac{V_{\text{AC}} + V_{\text{BD}}}{2} = 8.159 8 \text{ m/s}$,其相对误差率为:

$$\delta_{\text{对射}} \approx 18.40\% \quad (29)$$

多反射测得每条的路径上的风速的平均值为:

$$V_{\text{多次反射}} = \frac{V_{AB} + V_{BC} + V_{CD} + V_{AD} + V_{AC} + V_{BD}}{6} 10.860 \text{ m/s, 其相}$$

对误差率为:

$$\delta_{\text{多次反射}} \approx 8.60\% \quad (30)$$

因此,一次反射阵列相对误差率为 13.40%,对射阵列相对误差率为 18.40%,而多次反射阵列仅有 8.60%,相比之下改进模型的精度分别提高了 4.8%和 9.5%,由此可见多次反射阵列的测量精度远优于其他两个阵列,

表 2 常规算法实际测量结果及误差

Table 2 The actual measurement results and errors of conventional algorithms

实际风速/(m·s ⁻¹)	实际风向/(°)	测量风速/(m·s ⁻¹)	测量风向/(°)	绝对误差		相对误差/%	
				速度	角度	速度	角度
5	0	6.256	10.2	1.256	10.2	25.12	—
5	30	6.656	20.4	1.656	9.6	33.12	32.00
5	45	6.023	32.3	1.023	12.7	20.46	28.22
5	60	6.551	45.1	1.551	14.9	31.02	24.83
15	0	18.203	5.6	3.203	5.6	21.35	—
15	30	19.985	20.6	4.985	9.4	33.23	31.33
15	45	22.335	56.7	7.335	11.7	48.90	26.00
15	60	17.504	72.5	2.504	12.5	16.69	20.83

通过对表 2 的结果进行分析,得出传统算法的风速和角度的相对误差的平均值分别为 28.74%和 27.20%。当风速角为 0°时其风速风向的测量误差最小,当风速角发生变化之后,其相对误差明显会增加,说明测风路径受圆柱绕流的干扰更明显,具体表现为在风向为 45°时,其

表 3 多次反射模型中自适应加权测风算法实际测量结果及误差

Table 3 The actual measurement results and errors of adaptive weighted wind measurement algorithm

实际风速/(m·s ⁻¹)	实际风向/(°)	测量风速/(m·s ⁻¹)	测量风向/(°)	绝对误差		相对误差/%	
				速度	角度	速度	角度
5	0	5.32	6.2	0.320	6.2	6.40	—
5	30	5.431	26.2	0.431	3.8	8.62	12.67
5	45	5.541	37.8	0.541	7.2	10.82	16.00
5	60	5.504	51.1	0.504	8.9	10.08	14.83
15	0	17.887	10.6	2.887	10.6	19.25	—
15	30	17.560	24.6	2.560	5.4	17.07	18.00
15	45	18.574	54.3	3.574	9.3	23.83	20.67
15	60	18.305	48.8	3.305	11.2	22.03	18.67

通过对表 3 的结果分析,得到自适应权重算法风速和角度的相对误差的平均值分别为 14.76%和 16.81%。

对比两种方法的测量结果,得出结论自适应权重测风算法的测风速精度相比于常规算法提高了 12.44%,测角精度提高了 10.40%。可见该改进模型在降低阴影效应影响的优越性,以及自适应加权算法在降低测风路径上的干扰,从而提高测量精度方面可以发挥巨大的作用。

有效的改善了阴影效应的影响。

2) 自适应权重测风算法与传统算法对比实验

为了进一步减弱由圆柱绕流产生的尾流对测风路径的干扰,引入自适应加权测风算法,改变风速和风向来测试两种测风算法的性能。

首先,通过 CFD-Post 将测风路径上的风速矢量水平方向的 x 和 y 两个方向的风速大小导出,再求水平两个方向上风速的平均值来得到所求的 V_x 和 V_y ,最后代入式(16)来得到最后的风速和风向。其具体测量结果和误差如表 2 所示。

误差最大。另外当风速增加时其测量结果的相对误差也会明显增加。

如上相同的方式,得到相邻超声波换能器和对角超声波换能器多次反射的测量结果,再将结果导入自适应测风算法的模型中,计算的到如表 3 的计算结果。

4 结 论

本文设计的多次反射式超声波测风阵列,缓解了当前超声波测风仪体积和量程之间的矛盾,并且降低了由超声波换能器所引起的阴影效应。针对由圆柱绕流所产生的尾流对测风路径干扰的问题,在所设计的超声波测风阵列的基础上提出自适应测风算法。实验结果表明

所设计多次反射超声波测风阵列能够降低由换能器本身所引起的阴影效应,与一次反射测风阵列和对射阵列相比,其测风路径风速上升过快,上升后风速稳定,且接近实际风速,相对误差降低了4.8%和9.5%。在针对由结构本身所引起的尾流对测风路径干扰的问题,本文提出的自适应权重测风算法,将两个方向的两组测风算法进行融合可以大幅度提升测量精度,减弱了尾流对测风路径的干扰。相比于传统测风算法本算法测量精度提高了12.44%。综上所述,改进的测风阵列优势明显,能够很好的改善阴影效应,提高测量精度。此外,本算法没有涉及到温度补偿,多次反射所接收的信号弱抗干扰差,恶劣自然环境下设备老化等问题。以及全部实验数据来源于于计算机仿真缺少实物验证,这些将作为之后的研究方向和重点。

参考文献

- [1] 单泽彪,刘小松,鲁胜麟,等. 基于双阵元超声波接收阵列的风矢量测量[J]. 仪器仪表学报,2021,42(2):228-234.
SHAN Z B, LIU X S, LU SH L, et al. Wind vector measurement using dual sensors ultrasonic receiving array[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(2):228-234.
- [2] 任晓晔,陈晓,郭妍. 超声波测风换能器对风速的影响研究[J]. 电子测量技术,2019,42(7):118-124.
REN X Y, CHEN X, GUO Y. Study on the influence of ultrasonic wind transducer on wind speed[J]. Electronic Measurement Technology, 2019,42(7):118-124.
- [3] 安浩然,行鸿彦,侯天浩,等. 基于 Fluent 的超声波换能器测风阵列模型改进研究[J]. 传感技术学报,2020,33(2):252-258,271.
AN H R, XING H Y, HOU T H, et al. Research on improvement of wind array model of ultrasound transducer based on Fluent [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2020,33(2):252-258,271.
- [4] 李琦,魏永星,刘颀,等. 基于时差法超声测风系统的声场分析与研究[J]. 海洋技术学报,2016,35(1):68-73.
LI Q, WEI Y X, LIU J, et al. Analysis and research on the acoustic field of the ultrasonic wind measurement system based on the time difference method [J]. Journal of Ocean Technology, 2016,35(1):68-73.
- [5] 涂满红,曹云昌,詹国伟,等. 超声波测风仪风速的不同算法误差分析[J]. 气象与环境科学,2019,42(1):119-126.
TU M H, CAO Y CH, ZHAN G W, et al. Error analysis of different algorithms for ultrasonic wind speed meter[J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2019,42(1):119-126.
- [6] 徐从裕,胡宗久,杨雅茹,等. 基于 FFT 及 IFFT 的超声波相位差检测方法[J]. 电子测量与仪器学报,2019,33(5):180-186.
XU C Y, HU Z J, YANG Y R, et al. Method of ultrasonic phase difference detection based on FFT and IFFT[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019,33(5):180-186.
- [7] 闫志涛,敬天慧,谭覃,等. 基于超声波近完全相消相干测量声速[J]. 大学物理,2022,41(7):54-57.
YAN ZH T, JING T H, TAN T, et al. Measurement of sound speed based on nearly complete destructive interference of ultrasound [J]. College Physics, 2022,41(7):54-57.
- [8] 牛昊东,施云波,王天,等. 超声波相位比较法的风速风向传感器设计[J]. 哈尔滨理工大学学报,2021,26(1):122-129.
NIU H D, SHI Y B, WANG T, et al. Design og wind speed and direction sensor based on ultrasonic phase comparison method [J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2021,26(1):122-129.
- [9] 周川川,李傲梅. 多旋翼无人机二维超声波测风算法研究[J]. 舰船电子工程,2021,41(12):151-156,170.
ZHOU CH CH, LI AO M. Research on two-dimensional ultrasonic wind measurement algorithm of multi-rotor UAV [J]. Ship Electronic Engineering, 2021,41(12):151-156,170.
- [10] 郑玲玲,许刚,刘芳,等. 基于时差法的超声波测风系统的研究[J]. 电子测量技术,2012,35(12):31-34.
ZHENG L L, XU G, LIU F, et al. Research on the system of ultrasonic wind measurement based on time difference method [J]. Electronic Measurement Technology, 2012,35(12):31-34.
- [11] 任晓晔,陈晓,郭妍. 基于 Fluent 和 LSTM 神经网络的超声波测风仪阴影效应补偿研究[J]. 计算机应用与软件,2019,36(7):89-98.
REN X H, CHEN X, HUO Y. Shadow effect compensation of ultrasonic wind measurer based on Fluent and LSTM neural network [J]. Computer Applications and Software, 2019,36(7):89-98.
- [12] JIANG J, DANG W, DUAN F, et al. An accurate ultrasonic wind speed and direction measuring method by combining time-difference and phase-difference measurement using coded pulses combination [J]. Applied Acoustics, 2020, 159: 107093.
- [13] MA B, TENG J, ZHU H, et al. Three-dimensional wind measurement based on ultrasonic sensor array and multiple signal classification [J]. Sensors, 2020,

- 20(2): 523.
- [14] 行鸿彦,魏佳佳,徐伟,等. 超声波换能器测风阵列的改进设计[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(8): 1988-1995.
XING H Y, WEI J J, XU W, et al. Improved design of ultrasonic transducer array for wind measurement[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument 2017, 38(8): 1988-1995.
- [15] 饶家龙. 一种高精度低成本矿用超声波风速风向仪设计[J]. 自动化与仪器仪表, 2020(11): 119-121, 125.
RAO J L. Design of a high precision and low cost ultrasonic wind speed and direction meter for mining[J]. Automation & Instrumentation, 2020(11): 119-121, 125.
- [16] 张加宏,孙林峰,李敏,等. 基于 CFD 和 BP 神经网络的超声测风仪阴影效应补偿研究[J]. 传感技术学报, 2018, 31(8): 1201-1210.
ZHANG J H, SUN L F, LI M, et al. The shadow effect compensation for ultrasonic anemometer based on CFD and BP neural network[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2018, 31(8): 1201-1210.
- [17] 王大为,王召巴,陈友兴,等. 基于双高斯衰减模型的超声回波处理方法[J]. 物理学报, 2019, 68(8): 168-176.
WANG D W, WANG ZH B, CHEN Y X, et al. Ultrasonic echo processing method on dual-Gaussian attenuation model[J]. Acta Physica Sinica, 2019, 68(8): 168-176.
- [18] 唐志一,蔡颖,王会. 基于自适应加权算法的多传感器数据融合方法[J]. 指挥信息系统与技术, 2022, 13(5): 66-70.
TANG ZH Y, CAI Y, WANG H. Multi-sensor data fusion method based on adaptive weighting algorithm[J]. Command Information System and Technology, 2022, 13(5): 66-70.
- [19] 李战明,陈若珠,张保梅. 同类多传感器自适应加权估计的数据级融合算法研究[J]. 兰州理工大学学报, 2006(4): 78-82.
LI ZH M, CHEN R ZH, ZHANG B M. Study of adaptive weighted estimate algorithm of congeneric multi-sensor data fusion[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2006(4): 78-82.

- [20] BIGARELLA E D V, AZEVEDO J L F. Advanced eddy-viscosity and reynolds-stress turbulence model simulations of aerospace applications[J]. AIAA Journal, 2007, 45(10): 2369-2390.
- [21] TANG M, TAN G. CFD calculation of transonic flow around airfoil[C]. 2023 IEEE 6th Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC). IEEE, 2023, 6: 1069-1073.
- [22] AFSHARI F, ZAVARAGH H G, SAHIN B, et al. On numerical methods, optimization of CFD solution to evaluate fluid flow around a sample object at low Reynolds numbers[J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2018, 152: 51-68.

作者简介



李浩琪, 2021 年于太原工业学院获得学士学位, 现为南京信息工程大学硕士研究生, 主要研究方向为大气探测技术与仪器等。

E-mail: 772541780@qq.com

Li Haoqi received his B. Sc. degree from Taiyuan Institute of Technology. Now he is a M. Sc. candidate at Nanjing University of Information Science & Technology. His main research interest includes atmospheric sounding technology and instruments.



行鸿彦(通信作者), 1983 年于太原理工大学获得学士学位, 1990 年于吉林大学获得硕士学位, 2003 年于西安交通大学获得博士学位, 现为南京信息工程大学教授、博士生导师, 主要研究方向为微弱信号检测与处理、智能化电子测量技术与仪器等。

E-mail: xinghy@nuist.edu.cn

Xing Hongyan (Corresponding author), received his B. Sc. degree from Taiyuan University of Technology in 1983, M. Sc. degree from Jilin University in 1990 and Ph. D. degree from Xi'an Jiaotong University in 2003, respectively. Now he is a professor and supervisor for Ph. D. student in Nanjing University of Information Science & Technology. His main research interests include weak signal detection, design of intelligent electronic measurement technology and instrument.