

DOI:10.19651/j.cnki.emt.1802263

# 超声波测风换能器对风速的影响研究\*

任晓晔<sup>1</sup> 陈 晓<sup>1,2</sup> 郭 妍<sup>1</sup>(1.南京信息工程大学 电子与信息工程学院 南京 210044; 2.南京信息工程大学 大气环境与  
设备技术协同创新中心 南京 210044)

**摘 要:** 利用流体力学软件 Fluent 对两种超声波测风换能器在不同风速下进行数值模拟,得到速度云图以及测风路径上风速随时间步长的变化曲线,分析对比了两种换能器对风速的影响。其次以圆柱形换能器为研究对象,在不同风速风向下,仿真了测风路径上风速随风向的变化情况,得到了测风路径上风速随风向变化曲线图和测风路径风速的  $x$  分量速度随风向的变化曲线与标准风速  $x$  轴分量速度随风向的变化曲线对比图。从图中可以清晰地看出,不同风向下超声波换能器对风速的影响程度。通过仿真结果可以总结出,采用流线形形状的子弹头型超声波换能器在高风速下较圆柱形换能器对风速的影响更小。除此之外,在设计超声波测风仪时超声波测风路径应避免平行风,即测风路径应该与风向存在一定的角度,且该角度应当在  $60^\circ$  左右。

**关键词:** 超声波测风仪;超声波换能器;Fluent 软件;数值模拟

**中图分类号:** TN206    **文献标识码:** A    **国家标准学科分类代码:** 510.10

## Study on the influence of ultrasonic wind transducer on wind speed

Ren Xiaoye<sup>1</sup> Chen Xiao<sup>1,2</sup> Guo Yan<sup>1</sup>(1.School of Information Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;  
2. Atmospheric Environment and Equipment Technology Cooperation Innovation Center, Nanjing University of  
Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

**Abstract:** Using the fluid mechanics software fluent to numerically simulate the two ultrasonic wind transducers at different wind speed, the velocity nephogram, and the curve of the wind speed with time step on the centerline of the transducer has been obtained. And the effects of the two transducers on wind speed are analyzed and compared. Secondly, the rectangular transducer is taken as the research object. At different wind speeds and different wind directions, the variation of wind speed with wind direction on the wind path is simulated. The wind speed curve along the wind direction and the comparison chart of the curve of  $x$  component velocity with wind direction and the variation curve of  $x$  axis component velocity with wind direction of standard wind speed has been obtained. From these diagrams, we can see the influence of ultrasonic transducer on wind speed under different wind directions. From the simulation results, it can be concluded that the streamlined shape of the bullet-type ultrasonic transducer has less influence on the wind speed than the cylindrical transducer at high wind speed. In addition, the ultrasonic wind path should avoid parallel wind when designing the ultrasonic anemometer, that is, the path of wind measurement should be at an angle to the wind direction, and the angle should be about  $60^\circ$ .

**Keywords:** ultrasonic anemometer; ultrasonic wind transducer; Fluent software; numerical simulation

## 0 引 言

基于超声波换能器的流体速度的测量已经应用于各种知识领域。例如用于跟踪和发现气体羽流<sup>[1]</sup>,测量烟囱中的气体流量<sup>[2]</sup>以及测量脉动血流<sup>[3]</sup>。特别是用于确定风速

风向的研究是多个知识领域的主题,如土木工程<sup>[4]</sup>、气象<sup>[5]</sup>、发电<sup>[6]</sup>等领域。在众多测量风速风向的技术中,超声波测风技术<sup>[7-8]</sup>由于其结构更坚固并且几乎不用维修的优点脱颖而出。通过超声测量风速的方法有两种:通过时差法<sup>[9-10]</sup>和通过涡旋法<sup>[11]</sup>。然而在通过涡旋测量的方法中,

收稿日期:2018-10-22

\* 基金项目:江苏省自然科学基金(BK20161536)、江苏省第十一批“六大人才高峰”高层次人才项目、江苏省 333 高层次人才培养工程、江苏省高校优势学科 II 期建设工程项目资助

很难确定风向和强度。因此想要获取风向的信息时,要通过传输时间的方法。通过换能器形成的测量轴测量出渡越时间,而渡越时间的测量取决于入射风的风向和强度,从而测出风向。而在两个换能器组成的测量轴之间,会由于换能器的阻挡造成测量风速的降低,从而造成测量误差,这种现象被称为阴影效应<sup>[12]</sup>。超声波测风仪的阴影效应是造成超声波测风仪测量误差的主要原因之一,现如今所使用的超声波测风仪的换能器的形状有两种,一种为流线形的子弹头形<sup>[13]</sup>,另一种为圆柱形<sup>[14]</sup>。为了实验验证超声波测风仪阴影效应在不同风速风向下的具体影响,首先要测量超声波测风路径上风速的变化量,然而通过实验来测量,将会在超声波测风路径之间测量风速,这一实验流程将会十分复杂,而且会影响测量结果,因此采用理论研究的方法,利用流体力学方面的知识进行研究。

计算流体力学(CFD)在医学、机械、建筑等多种领域都有着广泛的应用,在20世纪七八十年代,计算流体动力学技术出现,并且随着计算机成本的大幅降低以及技术的进步,CFD被广泛应用于各种工程领域。如在医学领域中, Javadzadegan等<sup>[15]</sup>开发了一种用于心肌桥接的计算流体动力学(CFD)模型。在电机工程领域中,张志等<sup>[16]</sup>建立了一个新的焦炭燃烧模型使焦炭转化率在燃烧过程中的准确性得到明显的提高。在建筑领域中,胡晓蕾等<sup>[17]</sup>用Fluent软件对通风屋顶流场进行了分析。而在流体力学中钝体扰流的问题一直是广大研究者研究的重点,黄技等<sup>[18]</sup>利用Fluent软件对不同雷诺数下的圆柱扰流进行了研究,对不同雷诺数下的流场进行了分析对比;毕继红等<sup>[19]</sup>利用流体力学软件CFX模拟了方柱和圆柱下不同雷诺数的绕流问题,并分析了雷诺数 $Re$ 对绕流参数的影响;朱梦楠等<sup>[20]</sup>利用Fluent软件对单个方柱以及3种距离不同的两方柱进行了数值模拟,分析归纳了方柱绕流的脱落规律。

因此,本文通过流体力学软件Fluent对超声波换能器进行数值模拟,通过对两种形状的超声波换能器在不同风速下的仿真对比得到其优缺点,并针对较为常用的圆柱形换能器在不同风向下进行数值模拟及分析,总结出不同风向下超声波换能器阴影效应的影响程度。

## 1 超声波测风仪原理及仿真流程

### 1.1 超声波测风原理

本文针对二维超声波测风仪进行研究,其测风系统如图1所示,二维超声波测风仪由4个超声波换能器组成,其中有两测风路径,分别由超声波换能器1、2和超声波换能器3、4组成,测风路径的长度均为 $L=20\text{ cm}$ 。通过激励信号产生的超声波激励换能器后,使得超声波换能器工作,获得的信号经过收发转换电路传送到信号处理电路,进行加工处理,最后得到的数据通过显示屏和通信电路来显示输出。其测风原理采用时差法,如图2所示。如图所示,将风向划分为东西南北4个方向,风速的偏向角为 $\alpha$ ,假设东

西向的顺风传播时间和逆风传播时间分别为 $t_x$ 和 $t_{-x}$ ,南北方向的顺风传播时间和逆风传播时间分别为 $t_y$ 和 $t_{-y}$ ,则:

$$v_x = \frac{L}{2} \left( \frac{1}{t_x} - \frac{1}{t_{-x}} \right) \quad (1)$$

$$v_y = \frac{L}{2} \left( \frac{1}{t_y} - \frac{1}{t_{-y}} \right) \quad (2)$$

$$v^2 = v_x^2 + v_y^2 \quad (3)$$

将式(1)、(2)带入式(3)得:

$$v = \frac{L}{2} \sqrt{\left( \frac{1}{t_x} - \frac{1}{t_{-x}} \right)^2 + \left( \frac{1}{t_y} - \frac{1}{t_{-y}} \right)^2} \quad (4)$$

假设风速与东向的夹角为 $\alpha$ ,则风向为:

$$\alpha = \arccos \frac{\left| \frac{1}{t_x} - \frac{1}{t_{-x}} \right|}{\sqrt{\left( \frac{1}{t_x} - \frac{1}{t_{-x}} \right)^2 + \left( \frac{1}{t_y} - \frac{1}{t_{-y}} \right)^2}} \quad (5)$$

如图2所示,将东西南北风向分别归为直角坐标系的4个象限,当实际风向角在第1象限时为 $\alpha$ ,在第2象限时为 $\pi-\alpha$ ,在第3象限时为 $\pi+\alpha$ ,在第4象限时为 $2\pi-\alpha$ 。因此只要确定传播时间 $t$ 带入式(4)、(5)就可得到被测风速及风向。

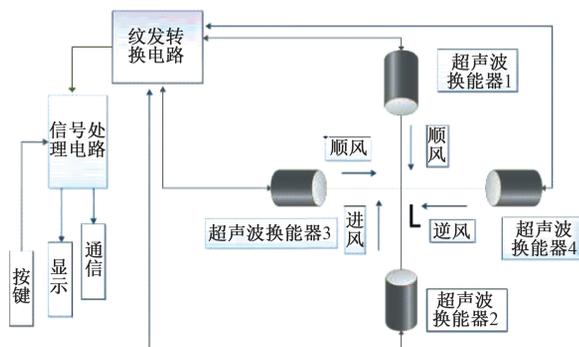


图1 超声波测风仪系统组成

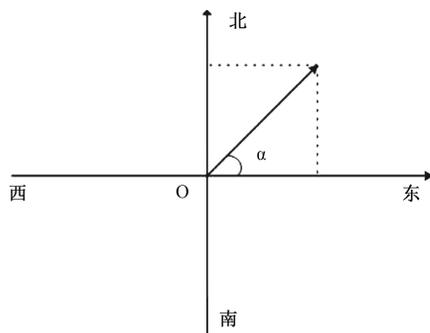


图2 测风原理

### 1.2 Fluent 仿真流程

本文针对二维超声波测风仪换能器进行研究,根据1.1节可知超声波测风仪的测风原理是要求得传播时间 $t$ ,

而传播时间会随着风速变化,若由于换能器阻碍的作用,风速减小,那么就会出现测量误差,因此利用 Fluent 软件来探讨不同风速风向下的阴影效应的影响从而为降低误差提供依据。其流程如图 3 所示。

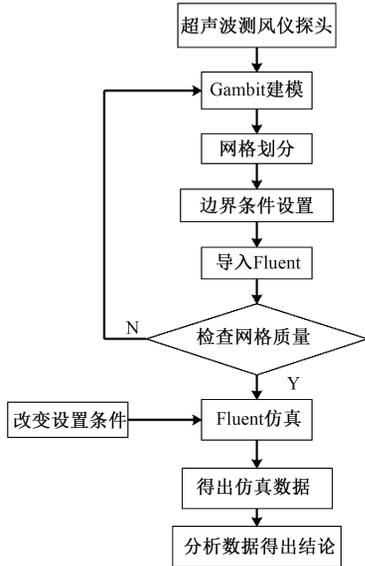


图 3 Fluent 仿真流程

## 2 计算模型

由于本数值模拟针对现有的两种形状的换能器进行数值模拟,因此需要两个计算区域,利用 Gambit 软件,进行模型的建立。为了方便模型的建立,可以把三维立体模型简化二维模型,从二维的角度,圆柱形换能器可以简化为矩形,而子弹头型换能器简化为一边呈圆弧状的矩形。圆柱形换能器和子弹形换能器的计算区域分别如图 4 和 5 所示。

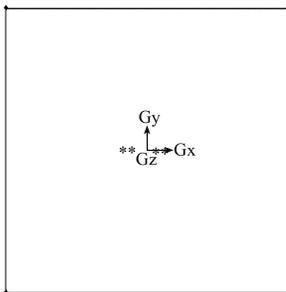


图 4 圆柱形换能器计算区域

图 4 和 5 中风场大小均为 3 m×3 m 的圆柱形区域,且子弹形和圆柱形换能器的大小均为 0.012 m×0.018 m,换能器模型均以坐标原点为中心处建立。

## 3 不同形状的超声波换能器的对比分析

针对第 2 节提到的两种换能器的形状:圆柱形和子弹

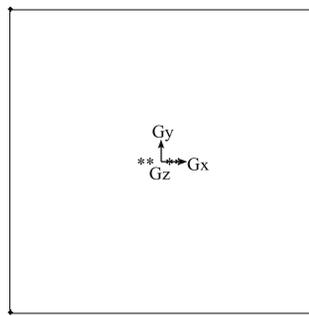


图 5 子弹形换能器计算区域

头型,分别利用 Fluent 软件对两种形状的超声波换能器在低风速风向下和高风速风向下进行数值模拟,而风速的不同导致流动状态的不同。因此需要确定流体的流动状态以便正确的选取仿真模型。在流体力学中,流动状态的区分由雷诺数  $Re$  来决定,其公式如式(6)所示。

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \tag{11}$$

式中: $\rho$  为流体密度; $v$  为流体流速; $D$  为特征长度; $\mu$  是流体的粘性系数。根据雷诺数的大小将流体流动情况进行划分,如表 1 所示。

表 1 不同雷诺数下的流动情况

雷诺数大小	流动情况
$Re < 2\ 300$	层流
$2\ 300 < Re < 8\ 000$	过渡流
$8\ 000 < Re < 12\ 000$	湍流

### 3.1 低风速下两种换能器的绕流分析

#### 1) 低风速下圆柱形换能器的绕流分析

设定风速为 0.5 m/s,根据实际情况,换能器的大小为 0.018 m×0.012 m,因此  $D=0.012$  m。经查阅文献[21],空气密度  $\rho=1.161\ 4$  kg/m<sup>3</sup>,空气运动粘性系数  $\nu=1.589\ 8\times 10^{-5}$  m<sup>2</sup>/s,由  $\mu=\nu\rho$  可求得,空气的粘性系数  $\mu=1.846\times 10^{-5}$  kg/s。因此由式(6)可求得,此时雷诺数  $Re$  的大小为 377。根据表 1 可知,此时流体的流动状态为层流。因此选择层流模型 Laminar 进行数值模拟,得到的速度云图以及换能器测风路径风速变化曲线图分别如图 6 和 7 所示。

在超声波测风仪测量风速时,由于风流经换能器时换能器的阻碍作用,使得在换能器的尾后形成涡流。由图 6 速度云图可以看到,当风速为 0.5 m/s 时,在换能器尾后形成了规则的漩涡的脱落,并且由于这些漩涡的存在,使换能器尾后的风速受到影响,使得被测风速低于实际风速。图 7 所示为两个换能器之间测风路径上的风速随着时间步长的风速变化曲线,其中中心线的长度为 20 cm,这与实际使用的超声波测风仪发射换能器与接收换能器之间的距离相符。从

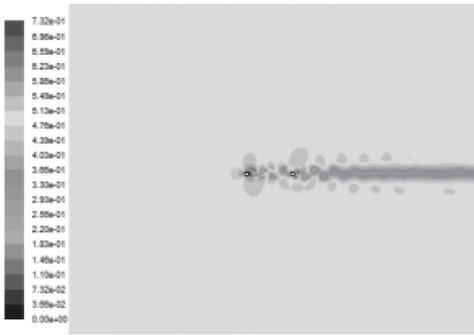


图6 0.5 m/s 圆柱形换能器速度云图

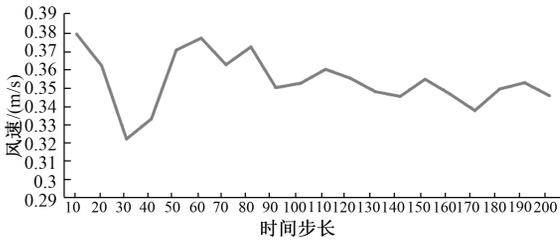


图7 0.5 m/s 圆柱形换能器测风路径风速变化曲线

图中看出最高风速为 0.38 m/s,最低风速为 0.35 m/s。将图中数据进行计算,得到平均风速  $v'$  为 0.354 m/s,此时的误差为 0.146 m/s,误差率  $\varphi_1 = \frac{v-v'}{v} = 0.292$ 。

2) 低风速下子弹型换能器的绕流分析

由于子弹型换能器与圆柱形换能器的尺寸大小均为 0.018 m × 0.012 m,在风速为 0.5 m/s 的情况下进行数值模拟,由前文可知此时的雷诺数大小为 377。因此在 Fluent 软件中依然选用层流模型 Laminar 进行数值模拟,得到的速度云图、涡量图以及中心线风速变化曲线分别如图 8 和 9 所示。

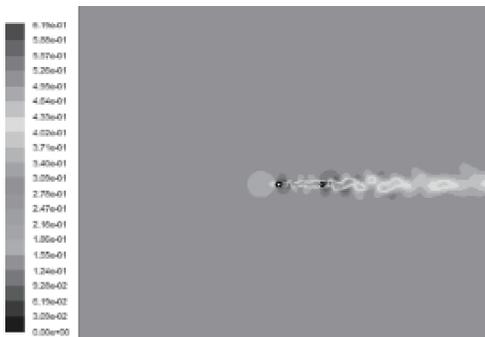


图8 0.5 m/s 子弹型换能器速度云图

从图 8 中可以看出在子弹型换能器后方也形成了规则的漩涡脱落。从图 9 中可知最高风速为 0.36 m/s,最低风速为 0.253 m/s。将图中数据进行计算,得到平均风速  $v'$  为 0.267 m/s,此时误差为 0.233 m/s,误差率  $\varphi_2 = \frac{v-v'}{v} =$

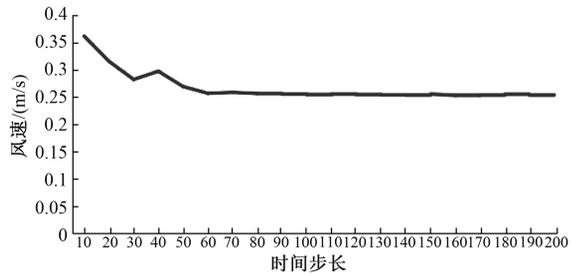


图9 0.5 m/s 子弹型换能器测风路径风速变化曲线

0.466。由上节可知圆柱形换能器在风速为 0.5 m/s 时的误差率为 0.292,可以看出圆柱形换能器对风速的影响较小一些。

3.2 高风速下两种换能器的绕流分析

3.2.1 高风速下圆柱形换能器的绕流分析

利用 Fluent 软件对高风速下的换能器进行数值模拟时,设定风速为 12 m/s,根据式(6)可求得此时雷诺数  $Re = 9\ 060$ ,由表 1 可知,此时为流体处于湍流状态。因此选取湍流模型  $k-\epsilon$  双方程进行数值模拟,并对得到的结果进行分析。由于本文主要是探讨超声波换能器对风速的影响,因此下面仅对速度云图以及中心线的速度变化曲线进行详细的分析与探讨。在风速 12 m/s 下,圆柱形换能器的速度云图以及中心线速度变化曲线分别如图 10 和 11 所示。



图10 12 m/s 圆柱形换能器速度云图

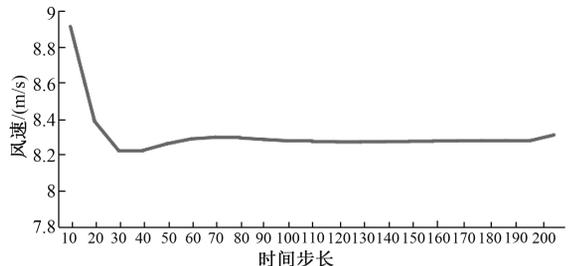


图11 12 m/s 圆柱形换能器测风路径风速变化曲线

从图 10 中可以看出,此时换能器尾后已不再是规则的卡门涡街的流动状态,探头后方的速度明显减小。从图 11 可以看出,其中最高风速为 8.92 m/s,最低风速为 8.22 m/s。

将图中数据进行计算分析得到其平均风速为  $v' = 8.3 \text{ m/s}$ , 此时误差为  $3.7 \text{ m/s}$ , 误差率  $\varphi_3 = \frac{v - v'}{v} = 0.31$ 。

2) 高风速下子弹头型换能器的绕流分析

当在高风速  $12 \text{ m/s}$  的情况下, 由上节可知此时流体流动处于湍流状态, 因此同样采用湍流模型  $k-\epsilon$  对子弹头型换能器进行数值模拟, 得到的速度云图以及中心线速度变化曲线分别如图 12 和 13 所示。

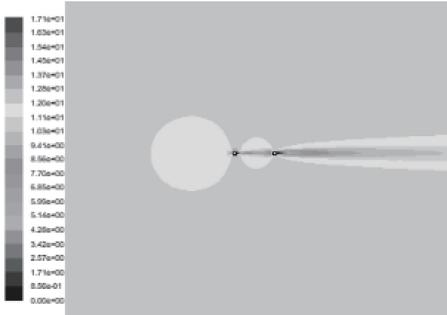


图 12 12 m/s 子弹型换能器速度云图

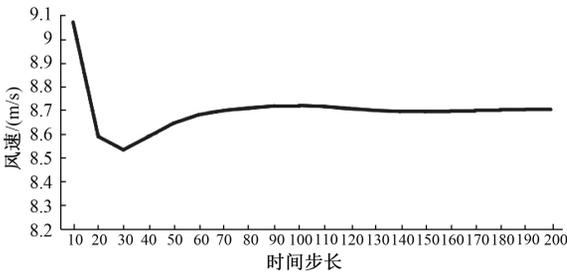


图 13 12 m/s 子弹型换能器测风路径风速变化曲线

从图 12 可以看出, 此时同样不再是规则的卡门涡街的流动状态, 已完全转换成湍流的形式, 并且在换能器尾后速度明显降低。从图 13 可以看出, 此时最高风速为  $9.07 \text{ m/s}$ , 最低风速为  $8.53 \text{ m/s}$ , 经计算得到的平均风速为  $v' = 8.7 \text{ m/s}$ , 误差为  $3.3 \text{ m/s}$ , 误差率  $\varphi_4 = \frac{v - v'}{v} = 0.275$ 。

由上节可知在风速为  $12 \text{ m/s}$  的情况下, 圆柱形换能器的误差率  $\varphi_3 = 0.31$ , 即  $\varphi_3 > \varphi_4$ , 因此子弹型换能器在高风速下对风速的影响比圆柱形换能器的影响小。

4 不同风向下对圆柱形换能器的绕流分析

在实际应用中, 超声波测风仪换能器的形状大多都可视为圆柱形态, 因此针对圆柱形超声波换能器作进一步的分析与探讨。利用 Fluent 软件在不同风速风向下进行数值模拟, 得到中心线随风向的速度变化曲线, 以及在水平  $x$  轴方向上风速分量的变化曲线。

4.1 低风速下不同风向对圆柱形换能器的绕流分析

利用流体力学软件 Fluent, 在风速为  $0.5 \text{ m/s}$  的情况

下, 每隔  $10^\circ$  进行数值模拟, 得到换能器后测风路径上的风速数据, 并进行整理归纳得到测风路径的平均风速随风向的变化图, 其中测风路径指换能器后方  $20 \text{ cm}$  中心线的位置。并得到测风路径的  $x$  轴速度分量随风向的速度变化曲线与标准  $x$  轴速度分量随风向变化曲线的对比, 分别如图 14 和 15 所示。

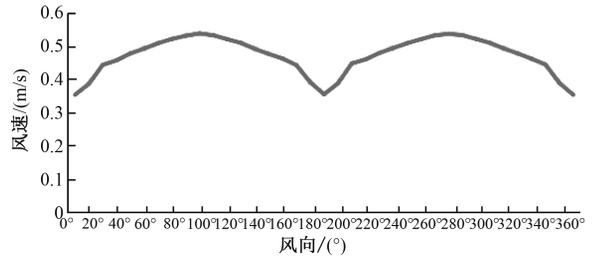


图 14 0.5 m/s 测风路径风速随风向的变化曲线

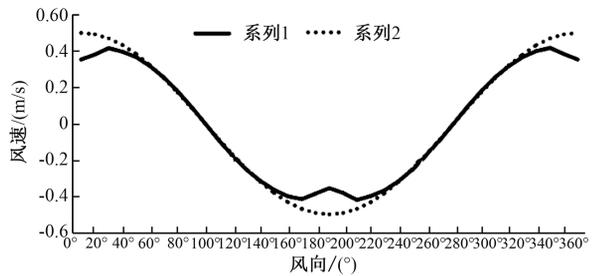


图 15 0.5 m/s  $x$  轴分量风速变化曲线对比

图 14 显示了风速在  $0.5 \text{ m/s}$  下超声波测风路径随风向  $0^\circ \sim 360^\circ$  之间的风速变化情况, 显然这是一个对称曲线, 且对称轴为  $x = 180^\circ$ , 因此只需分析  $0^\circ \sim 180^\circ$  的情况,  $180^\circ \sim 360^\circ$  和其类似。从图中可以看出, 当风向与测风路径平行时, 即风向为  $0^\circ$  或  $360^\circ$  时, 超声波换能器对被测风速的影响最大, 误差大约为  $0.15 \text{ m/s}$ 。而随着风向的偏转, 超声波换能器对风速影响随之减小, 当风向角为  $10^\circ$  时, 测风路径风速为  $0.39 \text{ m/s}$ , 此时误差为  $0.11 \text{ m/s}$ , 误差已有减小。而当角度偏转增大到  $20^\circ$  时, 测风路径的平均风速为  $0.44 \text{ m/s}$ , 此时误差已大大减小。当风向角增大至  $60^\circ$  时, 测风路径的平均风速为  $0.5 \text{ m/s}$ , 此时误差已为  $0$ 。随着风向角的继续增大, 可以看到风向在  $60^\circ \sim 120^\circ$ , 风速大于  $0.5 \text{ m/s}$ , 这是由于风速在超声波换能器周边形成涡流的原因, 使得周边流速加剧, 从而导致风速增大。

图 15 中, 系列 1 为测风路径的风速在  $x$  轴方向上的分量随风向的变化曲线, 系列 2 表示标准风速  $0.5 \text{ m/s}$  在  $x$  轴方向上的分量随风向的变化曲线。通过两条曲线的对比可以看出在  $0^\circ \sim 60^\circ$  以及  $300^\circ \sim 360^\circ$ , 由于超声波换能器对风的阻碍作用导致测风路径的风速在  $x$  轴分量的风速较标准设定风速在  $x$  轴分量上的偏差较大, 并随着偏转角的角度增大偏差随之减小。  $60^\circ \sim 140^\circ$  以及  $230^\circ \sim 300^\circ$ , 可以

看出此时超声波测风路径在  $x$  轴分量上的风速与标准设定风速的  $x$  轴方向的分量吻合程度较好。而在  $140^\circ \sim 230^\circ$  由于风向与测风路径趋于平行,使得阴影效应的影响逐渐增大,从而使得风速低于设定风速。

#### 4.2 高风速下不同风向对圆柱形换能器的绕流分析

设定风速为  $12 \text{ m/s}$  高风速下,利用 Fluent 软件的  $k-e$  模型对超声波圆柱形换能器在不同风向下进行数值模拟,并每隔  $10^\circ$  做一次仿真,得到测风路径随风向变化的风速数据,并对其进行整理归纳,得到测风路径的平均风速随风向的变化曲线,如图 16 所示。除此之外,还通过计算得到了测风路径  $x$  轴方向的风速分量随风向的变化曲线,并与标准设定风速  $12 \text{ m/s}$   $x$  轴方向分量随风向的变化曲线做对比,如图 17 所示。

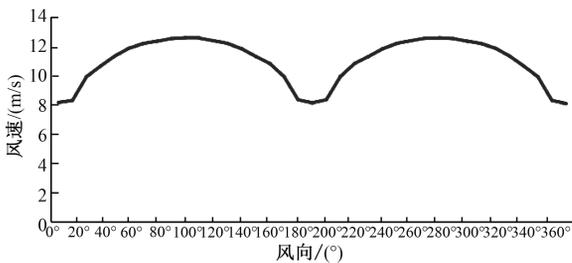


图 16  $12 \text{ m/s}$  测风路径风速随风向的变化曲线

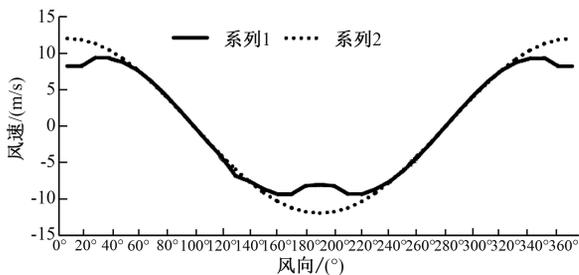


图 17  $12 \text{ m/s}$   $x$  轴分量风速变化曲线对比

与低风速下的数值模拟得到的结论相似,从图 16 中可以看出,当风向与测风路径平行时,误差最大,在  $0^\circ$  和  $360^\circ$  风向上,误差均为  $3.9 \text{ m/s}$ 。在  $0^\circ \sim 60^\circ$ ,随着风向角的增加,误差随之减小,当风向角达到  $60^\circ$  时误差减小为  $0$ 。而与低风速情况下不同的是,当风向角处于  $60^\circ \sim 130^\circ$  时,风速稍大于  $12 \text{ m/s}$ ,误差在  $0 \sim 0.627 \text{ m/s}$  波动。而在  $130^\circ \sim 180^\circ$  时,风速逐渐减小,原因已在 4.1 节中说明。当风向在  $180^\circ \sim 360^\circ$  的情况,与  $0^\circ \sim 180^\circ$  的情况类似,在此不再赘述。

图 17 中系列 1 表示超声波测风路径上的风速在  $x$  轴上的风速分量随风向的变化曲线,系列 2 为标准设定风速在  $x$  轴的速度分量随风向的变化曲线。从图中可以看出风向在  $0^\circ \sim 60^\circ$  以及  $300^\circ \sim 360^\circ$ ,随着与测风路径偏转的角度越大两条曲线之间的偏差也越小。 $60^\circ \sim 140^\circ$ 、 $230^\circ \sim 300^\circ$  以及  $140^\circ \sim 230^\circ$  的情况与低风速下的绕流情况相似。

## 5 结 论

首先,用流体力学软件 Fluent 在低风速和高风速下对圆柱形和子弹型两种形状的超声波测风换能器进行了数值模拟,得到了相应的速度云图,测风路径上的速度变化曲线,并计算了他们的误差率,通过对比发现子弹型换能器在高风速情况下对风速的影响较小,而在低风速情况下圆柱形换能器受阴影效应的影响相对较小。其次,选用圆柱形换能器作为研究对象,仿真了其在不同风速风向下测风路径上平均风速随风向的变化情况,得出当风向与测风路径平行时受阴影效应的影响最大,并且当偏转角达到  $60^\circ$  时对被测风速的影响几乎为  $0$ ,除此之外,当达到一定角度时可能由于涡流的原因会造成局部风速升高,但影响较小。最后,经过对仿真结果的分析与讨论,得出减小阴影效应的影响可以适当改造超声波换能器的形状,采用流线形的形状可有助于减小干扰。其次,从风向的角度考虑,在设计超声波测风仪时,可以设计避免与风速平行的测风路径,使被测风速与测量路径形成一定的角度更有利于减小测量误差。

由于此研究方法在模型的选取以及网格的划分在仿真过程中依然存在一定的偏差,未来准备通过实验仿真,对其做进一步的研究,并通过得到的数据来修正测量误差,使得超声波测风仪测量精度得到进一步的提高。

## 参考文献

- [1] ISHIDA H, YOSHIKAWA K, MORIIZUMI T. Three-dimensional gasplume tracking using gas sensors and ultrasonic anemometer [C]. Proceedings, IEEE Sensors, 2004:1175-1178.
- [2] OLMOS P. Ultrasonic velocity meter to evaluate the behaviour of a solar chimney[J]. Measurement Science and Technology, 2004, 15(7): 49-53.
- [3] BRODY W R, MEINDL J D. Theoretical analysis of the CW doppler ultrasonic flowmeter [J]. IEEE transactions on bio-medical engineering, 1974 (3): 183-192.
- [4] 邝建新,梁心雄.基于地铁复杂环境超声波测风仪器优势的应用分析[J].电脑知识与技术,2018,14(6):195-197,209.
- [5] 王晓蕾,郭俊,陈晓颖,等.两种测风仪的动态比对试验及分析[J].解放军理工大学学报(自然科学版),2014, 15(3):283-289.
- [6] 陈伟,张有为.2D型超声波测风仪在风力发电机上应用的分析[J].仪器仪表用户,2016,23(8):90-92,89.
- [7] RAJITA G, MANDAL N. Review on transit time ultrasonic flowmeter[C]. International Conference on Control, Instrumentation, Energy & Communication, IEEE, 2016:88-92.

- [8] REYES J. Modeling and simulation of ultrasonic flow meters: State of art[C]. Andescon, IEEE, 2010:1-7.
- [9] CHEN Z, LI Z. Robust precise time difference estimation based on digital zero-crossing detection algorithm[J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2016, 65(8):1739-1748.
- [10] 张焕胜, 马振富, 冯策, 等. WFMS-200 型风电场声雷达与测风塔测风结果比对[J]. 中国电子科学研究院学报, 2016, 11(5):562-568.
- [11] HANS V, WINDORFER H. Comparison of pressure and ultrasound measurements in vortex flow meters [J]. Measurement, 2003, 33(2):121-133.
- [12] HORST T W, SEMMER S R, MACLEAN G. Correction of a non-orthogonal, three-component sonic anemometer for flow distortion by transducer shadowing [J]. Boundary-Layer Meteorology, 2015, 155(3):371-395.
- [13] 行鸿彦, 吴红军, 徐伟, 等. 三维超声波换能器测风阵列研究[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(12):2943-2951.
- [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.
- [15] JAVADZADEGAN A, MOSHFEGH A, FULKER D, et al. Development of a computational fluid dynamics model for myocardial bridging[J]. J Biomech Eng, 2018, 140(9):091010.
- [16] 张志, 李振山, 蔡宁生. 焦炭燃烧模型的改进及其 Fluent 实现与实验验证[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(7):1681-1688.
- [17] 胡晓蕾, 高岩. 基于 Fluent 模拟的通风屋顶流场分析[J]. 山西建筑, 2018, 44(7):123-124.
- [18] 黄技, 吕鸿冠, 林灿彬, 等. 基于 Fluent 的不同雷诺系数下二元圆柱绕流的研究[J]. 广东海洋大学学报, 2015, 35(4):81-86.
- [19] 毕继红, 余化军, 任洪鹏. 静止方柱和圆柱绕流的二维数值分析[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2012, 34(1):41-45.
- [20] 朱梦楠, 曹云, 赵俊杰, 等. 方柱绕流数值模拟[J]. 水科学与工程技术, 2017(5):20-24.
- [21] 黄娟, 张志国, MUDALIAR A V, 等. 2D 非稳态方柱绕流的数值模拟与分析[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2009, 33(1):192-195.

### 作者简介

任晓晔, 硕士研究生, 主要研究方向为超声波测风仪。

E-mail: 1054419789@qq.com

陈晓(通信作者), 教授, 主要研究方向为超声波信号处理、成像、图像处理。

E-mail: chenxiao@nuist.edu.cn

郭妍, 硕士研究生, 主要研究领域为室内定位、机器学习。