

声共振风传感器用全相位风速风向解算方法

王飞^{1,2}, 王登攀^{1,2}, 王露^{1,2}, 曾祥豹^{1,2}, 向星旭^{1,2}, 廖崧琳^{1,2}, 周悦¹

(1. 中电科芯片技术(集团)有限公司, 重庆 401332; 2. 国知创芯(重庆)科技有限公司, 重庆 401332)

摘要:提出了一种超声波共振式全相位风速风向解算方法, 搭建以间距 L 呈等边三角形分布的 3 个超声波换能器 A、B、C, 测量了超声波换能器 A、B、C 回波初相, 根据得到的回波初相解算出从顶点无角度直接吹风和从顶点有角度吹风情况下的风速与风向数据。结果表明, 该文建立的全相位风速风向解算方法连续无奇点, 与其他方法相比, 在输入量相同的情况下风速波动较小, 风向解算较准确。

关键词:超声波; 共振式; 回波初相; 全相位风速风向解算方法

中图分类号: TN389; TJ715.4 **文献标识码:** A

Full-Phase Wind Speed and Direction Algorithm for Acoustic Resonance Wind Sensor

WANG Fei^{1,2}, WANG Dengpan^{1,2}, WANG Lu^{1,2}, ZENG Xiangbao^{1,2},
XIANG Xingxu^{1,2}, LIAO Songlin^{1,2}, ZHOU Yue¹

(1. CETC Academy of Chips Technology, Chongqing 401332, China;

2. NIICAS (Chongqing) Technology Co., Ltd, Chongqing 401332, China)

Abstract: In this study, an ultrasonic resonance-based method is proposed for solving full phase wind speed and wind direction. An equilateral triangular distribution of three ultrasonic transducers A, B, and C with an interval L is established. The initial phases of echo waves received by ultrasonic transducers A, B, and C are measured based on the obtained initial phases of echo waves. Furthermore, the wind speed and wind direction data under the conditions of direct wind blowing from the vertex without angle and wind blowing from the vertex with angle are calculated. Additionally, the full-phase wind speed and wind direction algorithm established in this study is continuous and singularity-free. Under the same input conditions, the proposed method exhibits smaller wind speed fluctuation and more accurate wind direction calculation when compared to other methods.

Key words: ultrasonic; resonance; echo phase; full-phase wind speed and wind direction algorithm

0 引言

大气为人类生存和发展提供了非常重要的保障。大气风场的运动与人类的生活息息相关^[1]。精确观测大气风场对检测大气污染、预报军事环境、提高航空航天的安全性、提高长期天气预报的准确性及改进气候研究模型等具有重大意义^[2]。常见的风速风向传感器包括机械式、超声波对射/反射式及超声波共振式等。机械式风速风向传感器属于第一代测风产品, 存在机械磨损、体积大、环境适应性差及低风速无法驱动等问题^[3]。对射/反射式超声波风速风向传感器属于第二代产品, 其利用超声

波时差法来实现风速风向测量。声音在空气中的传播速度与风向上的气流速度叠加, 若超声波的传播方向与风向相同, 其速度加快; 若超声波的传播方向与风向相反, 其速度变慢。因此, 在固定的检测条件下, 超声波在空气中传播的速度可与风速函数对应, 通过计算即可得到精确的风速和风向。对射/反射式超声波风速风向传感器尺寸大, 不易加热, 易受雷雨、雪、雹、霜、雾及沙尘等障碍物影响。

声共振风传感器主要结构为共振腔, 3 个呈等边三角形分布的超声换能器发送超声波在共振腔内发生上百次反射, 将某个频率的声波激振放大,

收稿日期: 2024-04-15

作者简介: 王飞(1994-), 男, 重庆市万州区人, 工程师, 硕士。

通过检测声波在发射接收换能器间的传播相位,解算出风速的矢量表达,从而获得风速风向^[6-7]。传感器由超声换能器、发射接收电路、电源模块、发射接收控制及数据分析处理中心组成。声共振风传感器由于具有体积小,对极端天气适应性强及准确度高等优点,成为高端风速风向传感器的典型代表,占领了越来越大的高端市场。

本文结合超声共振式结构研究并建立了声共振式全相位风速风向解算方法,该方法连续无奇点,输入量初始相位波动较大情况下,在风速测量 0~75 m/s、风向测量 0°~360°内可准确解算风速风向。

1 声共振式结构模型

现有声共振风速风向传感器测量风速时不连续,测量风向时往往需要分不同方向得到对应的风向数据,由于风向是根据风速通过三角函数变换得出,共振式风速风向传感器风速解算不连续会导致风速及风向数据不稳定,测量结果波动较大。

为解决上述技术问题,本文提出一种超声波共振式全相位风速风向解算方法。声共振式风速风向传感器超声换能器分布如图 1 所示,声共振超声波换能器模型包括以间距 L 呈等边三角形分布的 3 个超声波换能器 1、2、3。

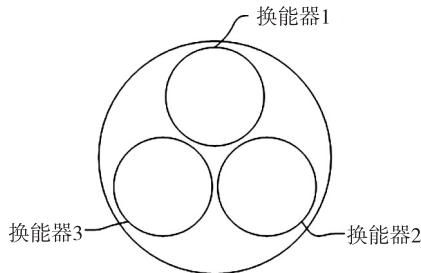


图 1 共振式超声换能器分布

共振腔及反射极板分布如图 2 所示。换能器与反射极板间距为 $L/2$, 超声换能器发射超声波到反射极板,在共振腔内反射多次后形成声共振。

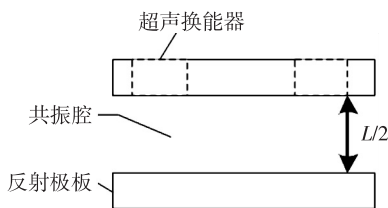


图 2 共振腔及反射极板

声共振式风速风向传感器工作方式:

1) 发射一定数量脉冲至换能器 1,此时换能器

2 处于接收状态,换能器 3 处于空闲状态,换能器 2 接收到的回波信号放大滤波后,使用模数转换器(ADC)采集放大滤波后的回波数据,得到回波初始相位 t_1 。

2) 切换发射与接收换能器,发射换能器为换能器 2,接收换能器为换能器 1,换能器 3 空闲,得到回波初相 t_2 。

3) 切换发射与接收换能器,发射换能器为换能器 2,接收换能器为换能器 3,换能器 1 空闲,得到回波初相 t_3 。

4) 切换发射与接收换能器,发射换能器为换能器 3,接收换能器为换能器 2,换能器 1 空闲,得到回波初相 t_4 。

5) 切换发射与接收换能器,发射换能器为换能器 3,接收换能器为换能器 1,换能器 2 空闲,得到回波初相 t_5 。

6) 切换发射与接收换能器,发射换能器为换能器 1,接收换能器为换能器 3,换能器 2 空闲,得到回波初相 t_6 。

根据得到的回波初始相位 $t_1 \sim t_6$ 解算出从顶点无角度直接吹风和从顶点有角度吹风情况下的风速与风向数据。

2 声共振式风速风向解算方法

2.1 从顶点无角度直接吹风

假设风从 A 点吹入,建立的坐标系如图 3 所示。由图可知,风速 v_{real} 在 AB 方向上的风速分量为 v_{AB} ,则有:

$$v_{real} = \sqrt{3} \times v_{AB} \tag{1}$$

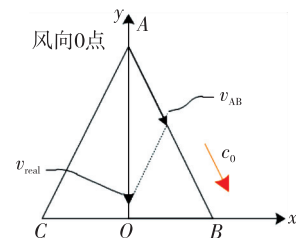


图 3 从顶点无角度吹风时风速分解到三边

换能器 1 发送脉冲换能器 2 接收时在 AB 方向上有 2 个速度,声速在 AB 方向上的速度分量及风速在 AB 方向上的分量;当换能器 1 发送换能器 2 接收时,其相位为 t_1 ,当换能器 2 发送换能器 1 接收时,其相位为 t_2 ,两超声换能器之间的距离为 L ,如图 4 所示,AB 间的相位差 $\Delta t = |t_1 - t_2|$,声速在

AB边上的分量为 c_0 ,其中声速为 c ,则有:

$$c_0 = c/\sqrt{2} \quad (2)$$

$$t_1 = \frac{L}{c_0 + v_{AB}} \quad (3)$$

$$t_2 = \frac{L}{c_0 - v_{AB}} \quad (4)$$

$$\Delta t = |t_1 - t_2| = \frac{2Lv_{AB}}{c_0^2 - v_{AB}^2} \quad (5)$$

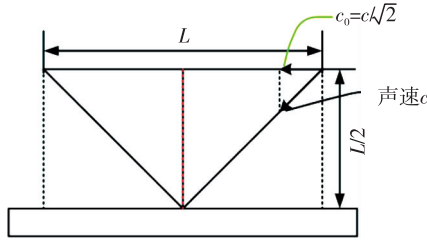


图4 水平方向上的声速分量

将式(2)-(5)整理后可得:

$$v_{AB}^2 + \frac{2L}{\Delta t}v_{AB} - c_0^2 = 0 \quad (6)$$

式(6)的解为

$$v_{AB} = \frac{-\frac{2L}{\Delta t} \pm \sqrt{\left(\frac{2L}{\Delta t}\right)^2 + 4c_0^2}}{2} \quad (7)$$

舍去负分量,则AB方向上的风速分量为

$$v_{AB} = \frac{-\frac{2L}{\Delta t} + \sqrt{\left(\frac{2L}{\Delta t}\right)^2 + 4c_0^2}}{2} \quad (8)$$

实际风速为

$$v_{\text{real}} = \sqrt{3}v_{AB} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times \left[\sqrt{\left(\frac{2L}{\Delta t}\right)^2 + 4c_0^2} - \frac{2L}{\Delta t} \right] \quad (9)$$

将式(2)代入式(9)可得:

$$v_{\text{real}} = \sqrt{3}v_{AB} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times \left[\sqrt{\left(\frac{2L}{\Delta t}\right)^2 + 2c^2} - \frac{2L}{\Delta t} \right] = \sqrt{3} \times \left[\sqrt{\left(\frac{L}{\Delta t}\right)^2 + c^2} - \frac{L}{\Delta t} \right] \quad (10)$$

2.2 从顶点有角度吹风

当环境风从顶点A吹入时,3个方向上的速度分量不变,此时需使用三角形法则合成风速分量:

$$v_{AB} = -\frac{L}{|\Delta t_{AB}|} + \sqrt{\left(\frac{L}{\Delta t_{AB}}\right)^2 + c_0^2} \quad (11)$$

$$v_{AC} = -\frac{L}{|\Delta t_{AC}|} + \sqrt{\left(\frac{L}{\Delta t_{AC}}\right)^2 + c_0^2} \quad (12)$$

$$v_{BC} = -\frac{L}{|\Delta t_{BC}|} + \sqrt{\left(\frac{L}{\Delta t_{BC}}\right)^2 + c_0^2} \quad (13)$$

换能器1发换能器2收为 t_1 ,换能器2发换能器1收为 t_2 ,换能器2发换能器3收为 t_3 ,换能器3发换能器2收为 t_4 ,换能器3发换能器1收为 t_5 ,换能器1发换能器3收为 t_6 ,传播过程如图5所示。由图可看出,3个相位差分别用作3条边风速分量计算的分子,固定相位差不能为0,当相位差为0时可强行令其为1,使风速分量不出现无穷大的情况。

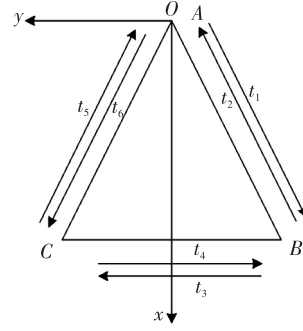


图5 不同换能器发送对应初相

3个相位差分别为

$$\Delta t_{AB} = t_2 - t_1 \quad (14)$$

$$\Delta t_{AC} = t_5 - t_6 \quad (15)$$

$$\Delta t_{BC} = t_4 - t_3 \quad (16)$$

不同顶点求解的风速与风向也不同,分别对A、B、C3个顶点求解风速,每个顶点对应的风向有4种,以A点为例,可分为:

- 1) 以A点偏右AB间风吹入。
- 2) 以A点偏左AC间风吹入。
- 3) 以A点偏右BC间风吹入。
- 4) 以A点偏左BC间风吹入。

由3条边上的速度分量可看出,规定的3条边的速度分量方向固定,为了区分不同方向吹来的风,同时简化风速风向解算过程,以相位差作为矢量判断3条边上风速的方向,从而不必分多类情况讨论,简化计算以减少风速风向的计算时间,具体判定方法为

$$\begin{cases} v_{AB} = v_{AB} & (\Delta t_{AB} > 0) \\ v_{AB} = -v_{AB} & (\Delta t_{AB} < 0) \\ v_{AB} = 0 & (\Delta t_{AB} = 0) \end{cases} \quad (17)$$

$$\begin{cases} v_{AC} = v_{AC} & (\Delta t_{AC} > 0) \\ v_{AC} = -v_{AC} & (\Delta t_{AC} < 0) \\ v_{AC} = 0 & (\Delta t_{AC} = 0) \end{cases} \quad (18)$$

$$\begin{cases} v_{BC} = v_{BC} & (\Delta t_{BC} > 0) \\ v_{BC} = -v_{BC} & (\Delta t_{BC} < 0) \\ v_{BC} = 0 & (\Delta t_{BC} = 0) \end{cases} \quad (19)$$

风速分解在坐标系上的速度分量分别为 $v_{real\ x}$ 和 $v_{real\ y}$,建立的坐标系如图 6 所示,其中风向参考 0 点为换能器 1 所在位置,矢量合成后有:

$$v_{real} = \sqrt{v_{real\ x}^2 + v_{real\ y}^2} \quad (20)$$

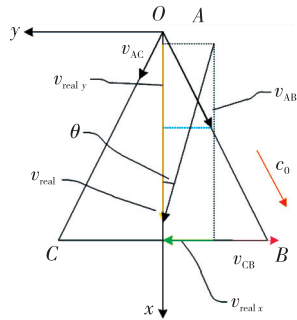


图 6 从顶点有角度吹风时风速分解

x 正方向的速度矢量有:

$$v_{real\ x} = \frac{\sqrt{3}}{2}(v_{AB} + v_{AC}) \quad (21)$$

y 正方向的速度矢量有:

$$v_{real\ y} = \frac{1}{2}(v_{AC} + v_{AB}) + v_{BC} \quad (22)$$

由式(21)、(22)可分别求得 x 、 y 轴的风速分量,从而可得实际风速 v_{real} 与相对风向 θ 分别为

$$v_{real} = \sqrt{v_{real\ x}^2 + v_{real\ y}^2} \quad (23)$$

$$\theta = \arctan 2\left(\frac{v_{real\ y}}{v_{real\ x}}\right) \quad (24)$$

电子罗盘用于指示风速风向仪相对地球坐标系方向,风速风向仪测量的风向为相对风速风向仪风向 0 点的相对风向。融合电子罗盘数据与相对风向数据,最终得到解算后的真实风速与风向角为

$$v_{real} = \sqrt{v_{real\ x}^2 + v_{real\ y}^2} \quad (25)$$

$$\theta_{real} = \theta + \alpha + \chi \quad (26)$$

式中: α 为电子罗盘与正北方向的角度; χ 为电子罗盘与风速风向仪风向参考 0 点的夹角。

3 结果与讨论

风传感器在共振状态下 1 个周期的间隔时间 $\Delta t_{max} = 20 \mu s$,按频率 50.0 kHz 计算;两换能器间距离 $L = 18.2 \text{ mm}$, c_0 为声速在水平方向上的分量,声速 $c = 331.45 + 0.607T$, T 为环境温度。根据上述计算方法测量不同相位差 Δt 对应的风速,测量结果如表 1 所示。其中风速标准器由皮托静压管及数字微压计组成,由表可知,测试结果与实际测量风速一致。

表 1 计算不同的相位差 Δt 对应的风速

标准风速	$\Delta t / (100 \mu s)$	风速 / $(m \cdot s^{-1})$	风速误差 / $(m \cdot s^{-1})$
75	2 700	75.55	-0.55
70	2 500	70.26	-0.26
65	2 300	64.90	0.10
60	2 100	59.48	0.52
55	1 900	54.01	0.99
50	1 800	51.25	-1.25
45	1 600	45.69	-0.69
40	1 400	40.08	-0.08
35	1 200	34.44	0.56
30	1 050	30.18	-0.18
25	900	25.60	-0.60
20	700	20.18	-0.18
15	550	15.27	-0.27
10	350	10.10	-0.10
5	180	5.20	-0.20
2	72	2.08	-0.08
0.3	11	0.32	-0.02

4 结束语

本文研究了一种声共振风传感器用全相位风速风向解算方法,建立了声共振共振腔结构及反射极板结构模型,该解算方法利用接收回波初相作为输入,建立的解算模型不必区分不同方向的风速,简化了计算过程。且该解算方法连续无奇点,在输入回波初相波动较大时,仍能实现风速测量 $0 \sim 75 \text{ m/s}$ 、风向测量 $0^\circ \sim 360^\circ$ 内风速风向的准确解算。

参考文献:

[1] WANG Jiyu, DING Wenbo, PAN Lun, et al. Self-powered wind sensor system for detecting wind speed and direction based on a triboelectric nanogenerator [J]. ACS Nano, 2018, 12(4): 3954-3963.

[2] 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 Congyu, HU Zongjiu, YANG Yaru, 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.

[3] 曾祥豹,胡义东,王露,等. 压电超声共振式风传感器风场闭环解算策略研究[J]. 压电与声光, 2023, 45(3): 467-470.