

文章编号: 2096-1618(2024)05-0519-08

一种应用于无人机的小型超声波风速风向仪设计

郑健^{1,2}, 卢会国^{1,2,3}, 范文娴^{1,2}

(1. 成都信息工程大学电子工程学院, 四川 成都 610225; 2. 中国气象局大气探测重点开发实验室, 四川 成都 610225; 3. 成都平原城市气象与环境四川省野外科学观测研究站, 四川 成都 610225)

摘要:利用无人机搭载风速风向仪能很好地探测近地面风场结构,进行污染物溯源及污染物扩散速度和方向的预测,但受限于无人机尺寸,搭载的风速风向仪尺寸较小且有较高的测量精度。根据声共振原理设计了一款小尺寸的超声波风速风向仪,相比传统的超声波风速风向仪,设计采用非对发对收式结构,并使用国产FPGA进行相位检测,整机尺寸小巧,重量仅120 g,整机功耗低于0.5 W,风速风向测量精度接近于同类型超声波风速风向仪。并与TP-M12D超声波风速风向仪进行风洞实测对比,实测最大风速35 m/s,低风速时风速测量误差 ± 0.5 m/s,较高风速时风速测量误差 $\pm 5\%$ 以内,固定方位角下风速段内风速波动下风向测量误差 $\pm 4^\circ$ 以内,不同方位角下风速测量最大误差在10%以内,可很好地应用于无人机测风中。

关键词:无人机测风;超声波风速风向仪;FPGA;相位检测

中图分类号:P414

文献标志码:A

doi:10.16836/j.cnki.jcuit.2024.05.001

0 引言

无人机大气污染物溯源技术在近些年已经得到迅猛发展^[1],国内外已经有大量的研究将无人机与大气污染物探测设备相结合的方式对污染物的探测溯源^[2]。在使用无人机进行污染物溯源的过程中,如果要提前预知污染物的扩散方向和扩散速度,较简便的方法是使用无人机搭载风速风向仪探测近地空中的风场变化情况。传统测量低空大气风场的方法主要使用测风塔或测风桅杆^[3-5],测风塔笨重,安装位置需要远离高楼、树木,且只能进行垂直方向的风场测量,因此使用测风塔或测风桅杆对于低空水平方向的风场测量具有一定的局限性^[6-7]。1992年Holland等^[8]首次使用固定翼无人机搭载皮托管的方式对高空中的风场进行测量,但受限于固定翼无人机的飞行方式只能测量水平风场。

相较于固定翼无人机,多旋翼无人机可以在空中垂直升降、悬停等,搭载的风速风向仪不仅能测量水平风场,还能对垂直风场变化情况进行分析。姜明等^[9]使用多旋翼无人机搭载二维超声波风传感器进行40 m低空悬停测风,实验表明无人机搭载二维超声波传感器测风与同高度梯度塔静态测风结果吻合,平均风速偏差为0.46 m/s,证明了多旋翼无人机测风的可行性。此外也有许多对多旋翼无人机二维超声波测风

算法的研究^[10]。

在无人机飞行过程中,为减小旋翼转动时湍流作用的影响需要考虑将风速风向仪放置在仪器的正上方,通过测量发现在无人机正上方有一个相对静风的区域,但这个区域极小,同时无人机的载重能力有限^[11],因此需要风速风向仪在保证测量精度的前提下体积尽可能小巧,重量轻便。

现阶段使用的小型化超声波风速风向仪多为美国Airmar的产品或英国FT的声共振式风速风向仪,这两个主流小型化风速风向仪均有较高的功耗,数据通信格式协议复杂,且这类成熟的产品不能满足气象产品国产化的需求。本文根据这些特点,采用声共振超声波测风原理设计了一款低成本、小型化、低功耗、重量轻的风速风向仪,该风速风向仪采用国产化的器件,使用安路科技FPGA进行鉴相,能够明显提高测量精度,设计风速测量范围0~40 m/s,整机设计尺寸:长70 mm,宽70 mm,高150 mm,供电范围7~28 V,设计功耗在0.5 W以内,能够满足在无人机上较长的工作时间,相比传统的超声波风速风向仪,整机重量仅为120 g,更加小巧,方便无人机携带。

1 声共振相差法测量原理

1.1 声共振法基本测量原理

超声波风速风向仪常用的原理是时差法^[12-15],声共振法核心原理属于相差法。对于相差法而言,超声

收稿日期:2023-07-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(42075129);四川省科技计划(气象联合减灾专题)资助项目(2022YFS0541)

通信作者:卢会国. Email:luhuiquo@cuit.edu.cn

波探头发射的波束具有一定的指向性,波束角度 θ 通常在从 $0^\circ \sim 360^\circ$ (图1),探头的指向性越高,对应的能量也就越集中。传统的超声波风速风向仪需要探头之间有一定的倾斜角或者组成“十”字的方式实现对风速风向的测量^[16],这种测量方法通常意味着最终的风速风向仪会有较大的体积,因此不适用于无人机测风。

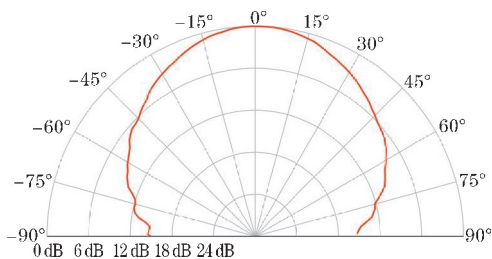


图1 一种探头的典型波束角

超声波探头所发射的超声波在某种意义接近于球面波,从二维角度看是具有一定辐射面的波束。当波束到达反射面之后会反射形成新的子波进一步向前传播,反射的子波和向前传播的波束会发生干涉。波峰与波峰,波谷与波谷的地方超声波的声压 P 会得到加强,而波峰与波谷的地方声压 P 会被抵消,超声波声压的大小还与离声源的距离 s 有关:

$$P = P_0 e^{-\alpha s} \quad (1)$$

其中 P_0 为探头的起始声压, α 为衰减系数, s 为距声源的距离。

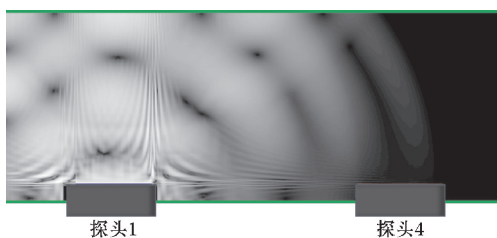


图2 超声波在长32 mm、宽12 mm的平行板间的声场

图2中使用了球面声源对平行板进行声场仿真,图中较亮的部分表示该区域的声压较强,较暗的部分则表示声压较弱。当声源探头往平行板中垂直发射超声波时,大部分超声波会被极板反射与入射超声波相互干涉形成行波向左右两边散开,接收端探头测量的便是干涉过程中的行波。实际过程中探头发射的波束角 θ 通常小于 180° ,对于放置较远的两个探头,超声波传播过程主要以反射波为主,直射波已经衰弱可以忽略,当两个探头放置较近时,直射波会比反射波先到达接收探头,造成多次接收到超声波的情况。这种较短路径接收到超声波的情况会导致无法正常测量风速,因此在使用声共振法时需要选择波束角合适的超声波换能器,且换能器之间的距离也要恰当,要尽可能避免超

声波通过探头直接传播到探头的情况。

超声波探头发射波形为圆柱形波束,最大波束角一般为 θ ,根据声共振原理设计的超声波风速风向仪通常有多组超声波传播路径。在不考虑侧面直射的情况下,最先到达接收端探头的波束路径为 S_1 ,且只需要经过一次反射。根据球面超声波在极板间反射时的对称性, S_1 的距离和此时的波束角 θ' 为

$$S_1 = 2\sqrt{h^2 + \frac{d^2}{4}} \quad (2)$$

$$\theta' = \arctan\left(\frac{d}{2h}\right) \quad (3)$$

式中, h 为上下挡板之间的距离, d 为两个探头之间的距离。

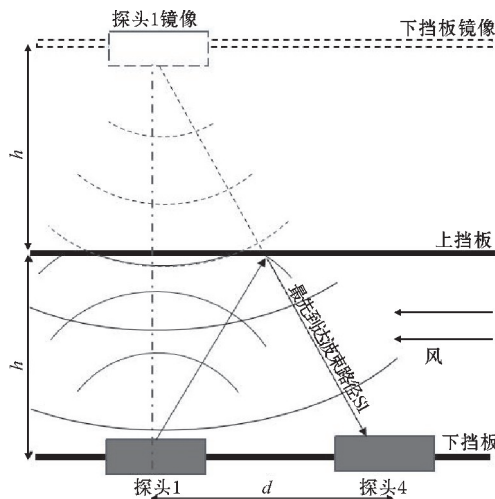


图3 逆风探头波束传播示意图

图3中此时为逆风,超声波从探头1沿波束最短路径传播至探头4时不仅要克服风的阻力,还要克服因为风导致的角度漂移,整个过程所需要的时间 t_{s1} 为

$$t_{s1} = \frac{2h}{\cos\theta'(\sqrt{v^2 \cos^2\theta' - v^2 + c^2} - v\cos\theta')} \quad (4)$$

顺风时,超声波从探头1传播到探头4所需要的时间 t_{s2} 为

$$t_{s2} = \frac{2h}{\cos\theta'(\sqrt{v^2 \cos^2\theta' - v^2 + c^2} + v\cos\theta')} \quad (5)$$

无风时超声波从探头1传播到探头4所需要的时间 t_{s0} 为

$$t_{s0} = \frac{2h}{\cos(\theta')c} \quad (6)$$

式中, c 是超声波的声速, v 是此时的风速,波束角大于 θ' 的超声波经过上挡板反射后无法被探头接收,小于 θ' 的超声波信号会被下挡板再次反射,有一部分会被探头接收,第一次反射的超声波不仅与直射波发生干涉,还会与第二次反射超声波发射干涉,第二次反射超声波同样也会与直射波干涉并与第一次反射超声波干

涉,最后整个平行板腔内的超声场主要由直射超声波和多次反射的超声波之间相互干涉并叠加而成。能被探头接收到的超声波主要是各次反射并干涉的超声波,具体的传播过程十分复杂,没有通常意义上的解。但对于多次反射的超声波,由于其波束角太小,传播路径过长,由于式(1)声强的衰减可忽略,因此超声波传输时间主要由最先到达接收端探头超声波束决定。

超声波在极板间传输过程中时间差 Δt 与相位差 $\Delta\varphi$ 之间关系为

$$\Delta\varphi = 2\pi f\Delta t \quad (7)$$

其中, $\Delta\varphi$ 表示超声波信号由探头 1 经过极板间传播至探头 4 被接收与驱动信号之间超前与滞后的关系,通过捕捉下降沿可以知道顺风时传输时间 t_{s2} 变短,相位减小,波形滞后,逆风时传输时间 t_{s1} 变长,相位增加,波形超前。

1.2 相位测量方法改进

通过式(4)~(7)可知在无风的时候也存在相差,且无风相差不是一个固定的值,会随电路的老化发生漂移,因此需要对相差测量方法进行改进,通过图3的模型可知,在顺风时超声波从探头 1 传播到探头 4 的相差为

$$\Delta\varphi_{v>0} = \frac{4\pi fh}{\cos\theta'} \left(\frac{1}{\sqrt{v^2 \cos^2\theta' - v^2 + c^2} + v\cos\theta'} \right) \quad (8)$$

逆风时对应的相差为

$$\Delta\varphi_{v<0} = \frac{4\pi fh}{\cos\theta'} \left(\frac{1}{\sqrt{v^2 \cos^2\theta' - v^2 + c^2} - v\cos\theta'} \right) \quad (9)$$

无风时的相差为

$$\Delta\varphi_{v=0} = \frac{4\pi fh}{\cos(\theta')} c \quad (10)$$

逆风情况下对应的相移值为

$$\Delta\varphi_{v<0} - \Delta\varphi_{v=0} = \frac{4\pi fh}{\cos\theta'} \left(\frac{1}{\sqrt{v^2 \cos^2\theta' - v^2 + c^2} - v\cos\theta'} - \frac{1}{c} \right) \quad (11)$$

顺风情况下对应的相移值为

$$\Delta\varphi_{v=0} - \Delta\varphi_{v>0} = \frac{4\pi fh}{\cos\theta'} \left(\frac{1}{c} - \frac{1}{\sqrt{v^2 \cos^2\theta' - v^2 + c^2} + v\cos\theta'} \right) \quad (12)$$

由式(11)、(12)可知,在顺风和逆风时的相差值是不同的,主要差别在风速 v 和波束角 θ' 上。当风速较小,波束角较窄时顺风和逆风相差可以看作相等,当以较大波束角测量较高风速时顺风和逆风相差会存在差异。因此如果选用较小的波束角,在较低风速下 ($v < 40$ m/s) 顺风和逆风相差几乎可以看作相等,这样便可抛弃无风相移引起的漂移,直接利用顺风和逆风

相差计算相移距离即可计算出具体的风速值。

2 探头布局与测量逻辑设计

小型超声波风速风向仪的探头布局如图4所示。

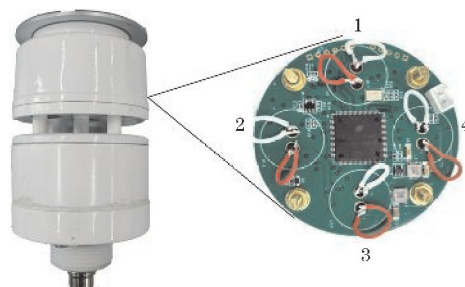


图4 小型风速风向仪与其探头布局

在图4的探头布局中,4只探头垂直向下,在风速测量的时候,探头4发射超声波探头1接收与发射信号的相差为 $\Delta\varphi_{41}$,探头1发射探头4接收的相差为 $\Delta\varphi_{14}$,探头4发射超声波探头3接收的相差为 $\Delta\varphi_{43}$,探头3发射超声波探头4接收的相差为 $\Delta\varphi_{34}$,探头3发射超声波探头2接收的相差为 $\Delta\varphi_{32}$,探头2发射超声波探头3接收的相差为 $\Delta\varphi_{23}$,最后探头1发射超声波探头2接收的相差 $\Delta\varphi_{12}$,探头2发射超声波探头1接收的相差为 $\Delta\varphi_{21}$ 。通过这样逆时针方向旋转一周测量得到8组相差,根据式(13)的近似对称关系可以得到4组有关风速与风向信息的相差对,分别是 $\Delta\varphi_{21}$ 和 $\Delta\varphi_{12}$, $\Delta\varphi_{23}$ 和 $\Delta\varphi_{32}$, $\Delta\varphi_{41}$ 和 $\Delta\varphi_{14}$, $\Delta\varphi_{43}$ 和 $\Delta\varphi_{34}$ 。

每组相差对与对称点无风相差 $\Delta\varphi_{v=0}$ 之间的相差之和为

$$|\Delta\varphi_{v<0} - \Delta\varphi_{v=0}| + |\Delta\varphi_{v=0} - \Delta\varphi_{v>0}| = \frac{8\pi fhv}{c^2 - v^2} \quad (13)$$

这样可根据FPGA测量得到的相移值确定每个探头对应的风速值,然后再将每个探头对应的风矢量在 x 和 y 方向进行分解得到 v_x 和 v_y ,如图5所示。

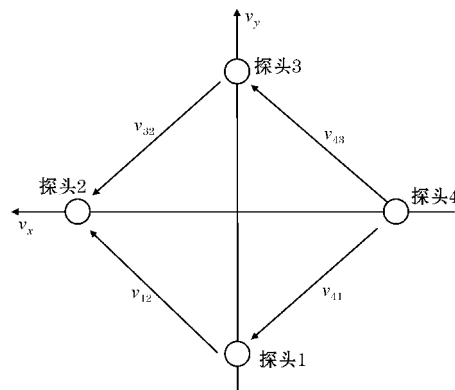


图5 各通道风速分解关系

4个探头分别按照 x 和 y 方向进行分解:

$$v_x = \frac{\sqrt{2}}{2} (v_{43} + v_{41} + v_{32} + v_{12}) \quad (14)$$

$$v_y = \frac{\sqrt{2}}{2} (v_{43} - v_{41} - v_{32} + v_{12}) \quad (15)$$

其中 $v_{43}, v_{41}, v_{32}, v_{12}$ 分别是测量探头 4 与探头 3, 探头 4 与探头 1, 探头 3 与探头 2, 探头 1 与探头 2 之间的风速值, 实际风速为 x 和 y 方向的矢量合成, 最终风速值 v 和风向 β 为

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \quad (16)$$

$$\beta = \arctan\left(\frac{v_y}{v_x}\right) \quad (17)$$

3 硬件电路设计与测试

小型风速风向仪硬件电路核心为国产 FPGA, 超声探头驱动电路和超声接收电路, 以及多路选择开关, 同时由于正弦波驱动电路实现较为复杂, 选用矩形波进行直接驱动, 如图 6 所示。

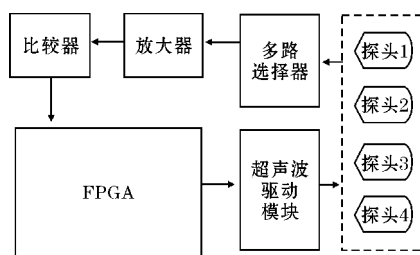


图6 小型化超声波风速风向仪硬件组成

除图 6 所示的各个部分外, 在电路中还包含单片机模块、RS232 数据传输接口。FPGA 主要用于相位测量,

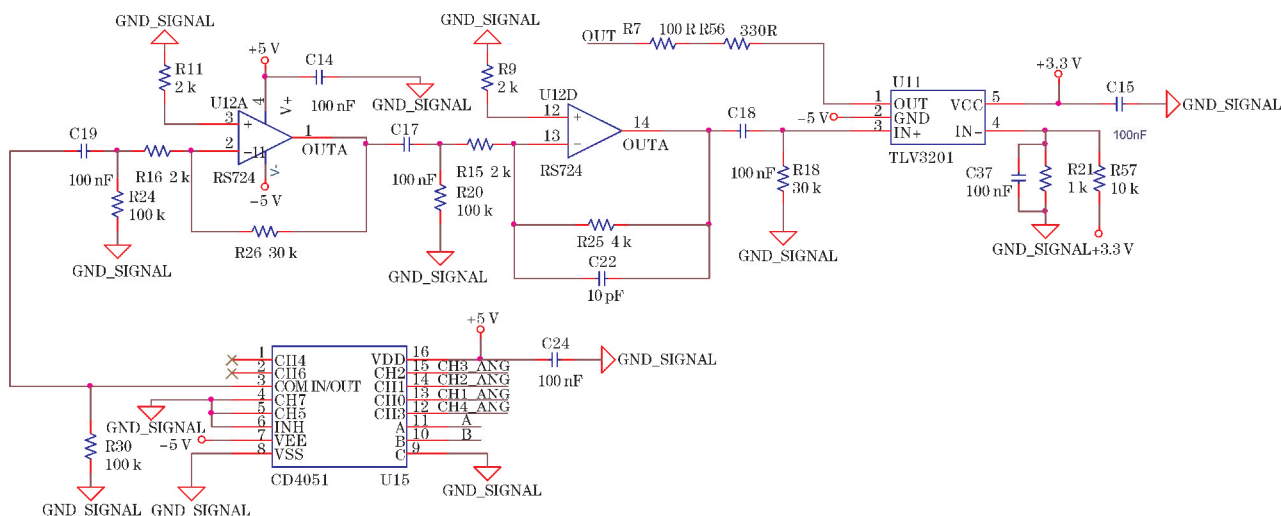


图8 超声波信号多路选择放大与比较电路

图 8 中, 电阻 $R24, R20$ 主要用来给放大器反相端提供直流反馈, 整个放大结构由两级反向比例放大器组成, 整体设计的放大倍数 A_F 为

$$A_F = \left(-\frac{R26}{R16}\right) \times \left(-\frac{R25}{R15}\right) \quad (18)$$

信号经过放大以后通过 TLV3201 比较器, 转化为

其内部有一个 PLL 可以将外部输入的 50 MHz 晶振时钟分别产生 5 MHz 低速时钟 (用于产生 40 kHz 超声波驱动信号), 50 MHz 系统时钟用于执行基本的操作包括串口收发功能和状态机跳转等以及一个 500 MHz 的测相时钟。500 MHz 的测相时钟主要用于对接收超声波的相位差测量, 相差测量分辨率为 0.0288° 。

图 7 为 4 组探头中的一组驱动电路, 驱动信号由 FPGA 的 IO 口给出, 通过 SN74LVC1G14 非门后转化为幅度值为 5 V 的矩形波驱动超声波探头; 当超声波探头处于接收状态时, FPGA 对应的驱动 IO 口置高电平, 非门输出为低电平, 此时探头进入接收状态。在 FPGA 内部通过逻辑设计使系统可以在不同探头的接收与发送之间来回切换, 不同的接收路径主要通过 CD4051 多路选择器来进行切换, 再通过 RS724 构成的放大器对超声波信号进行放大, 并提高信噪比, 增加通过比较器的信号质量。

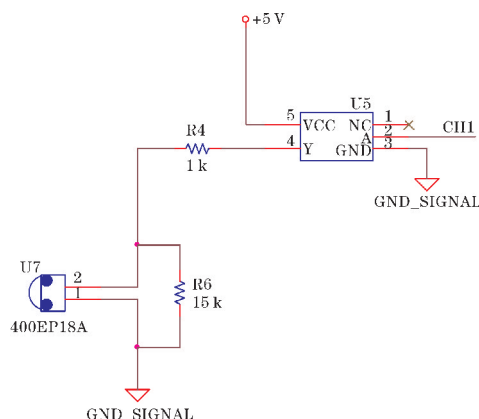
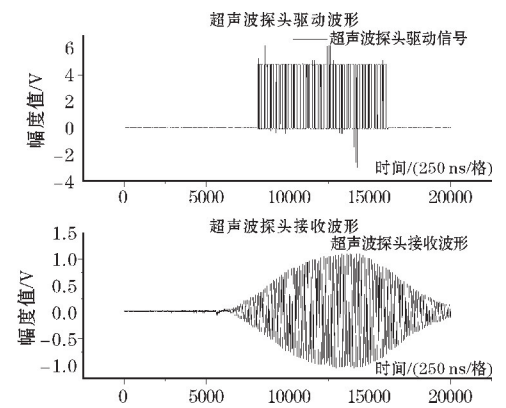
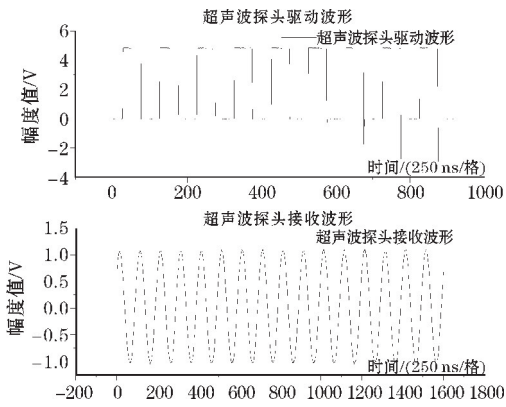


图7 超声波探头驱动电路

上升下降沿较为陡峭的矩形波,矩形波再通过电阻 $R7$ 至 FPGA 内部进行鉴相。



(a) 探头发射信号与接收信号的波形轮廓



(b) 探头发射信号与接收信号的波形

图 9 超声波探头接收与发射波形与轮廓

整机设备在12 V供电下,功耗仅为0.24 W,拥有极低的功耗,能够很好地满足无人机上较为严苛的功耗需求,整机尺寸小巧,如图 10 所示。

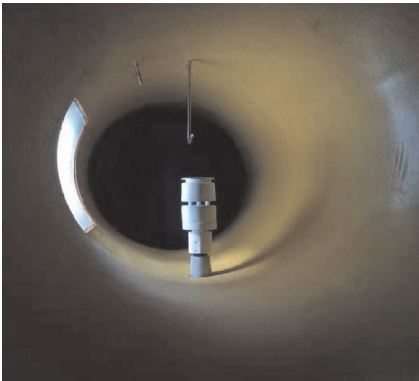


图 10 整机 12 V 供电下的功耗

4 风洞数据实测与分析

数据实测风洞为 HDF-720 低速回路风洞直径为 720 mm,风速为0.05 ~ 61.5 m/s^[17]。小型化风速风向仪(图 11a)安装于风洞中,并垂直朝来风方向,同时使用

TP-M12D 超声波风速风向仪(图 11b)进行数据实测对比,TP-M12D 超声波风速风向仪可提供测量精度为 ± 0.5 m/s或 $\pm 5\%$ 取较大者,风速测量范围为0 ~ 60 m/s,同时整机尺寸:长150 mm,宽150 mm,高240 mm。



(a) 小型超声波风速风向仪风洞数据实测



(b) TP-M12D 超声波风速风向仪

图 11 小型风速风向仪风洞实测与 TP-M12D 超声波风速风向仪

在风洞测试过程中考虑到环境及噪声的影响,小型超声波风速风向仪的实测风速为0 ~ 35 m/s,分别测试小型风速风向仪在5 m/s,10 m/s,20 m/s,30 m/s,35 m/s时的准确性与稳定性,测试结果如图 12所示。

通过分析风洞测试数据,结合数据的分布特性可发现,在20 m/s以下时,小型风速风向仪测量的相对误差在 ± 0.5 m/s以内,TP-M12D 风速测量误差也在 5% 以内,两者均满足国家标准对风速风向仪风速测量精度的要求,在 20 ~ 35 m/s风速测量误差也在 $\pm 5\%$ 以内,在30 m/s以下时风速测量精度误差较低,超过 30 m/s时误差较大,最大误差达到了 ± 1.5 m/s,出现较大的误差主要由于风速较大时由于本身结构阴影效应的影响使测量结果出现波动,同时也由于风速增加使超声波信号出现较为明显的衰减,造成所测得的相位差出现波动。而 TP-M12D 在20 m/s以上时风速测量出现较大误差主要由于风速风向仪体积较大,会受到较大风阻造成测量平台歪斜以及阴影效应的影响。

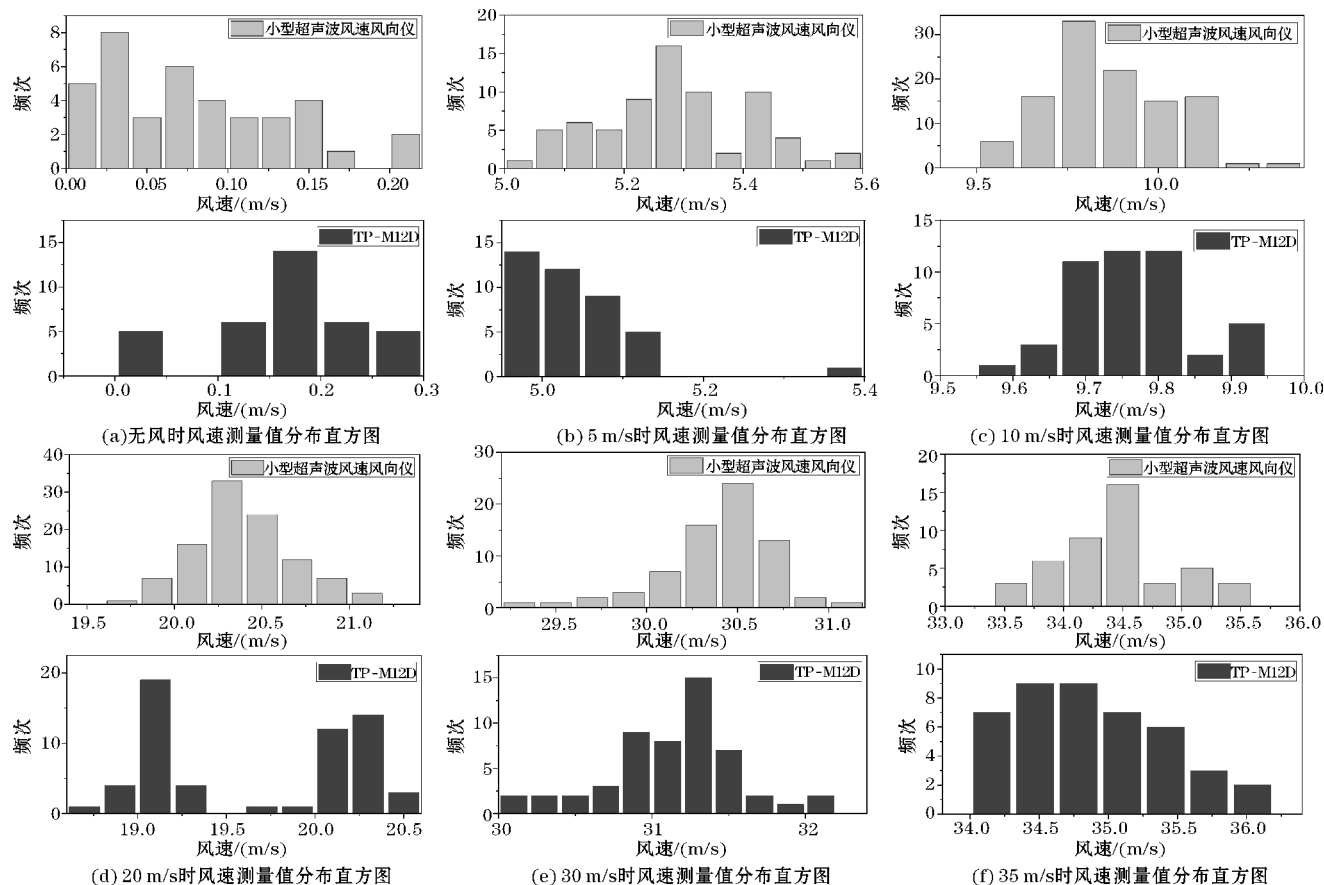


图12 各风速段小型气象仪风洞实测与 TP-M12D 实测对比图

图13测试了在不同风速段下不同方位角的风速测量相对误差,在5 m/s以下时测量误差在 ± 1 m/s以内,20 m/s以下时误差在 ± 2 m/s以内,不同方位角风速测量相对误差总体在10%以内。TP-M12D在不同方位角下

风速实测结果基本符合厂家的指标,小型超声波风速风向仪与 TP-M12D 超声波风速风向仪在不同方位角下实测风速值均出现了较大的波动,相比较于 TP-M12D 而言,小型化超声波风速风向仪在体积上更有优势。

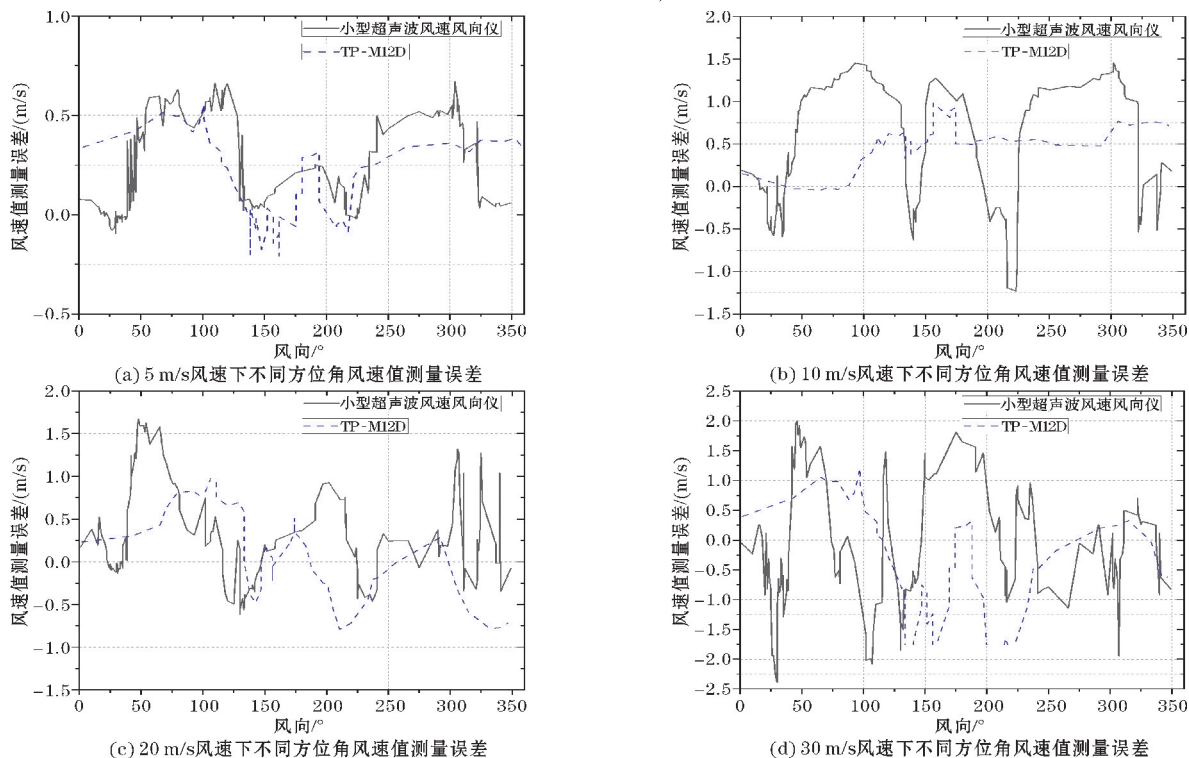
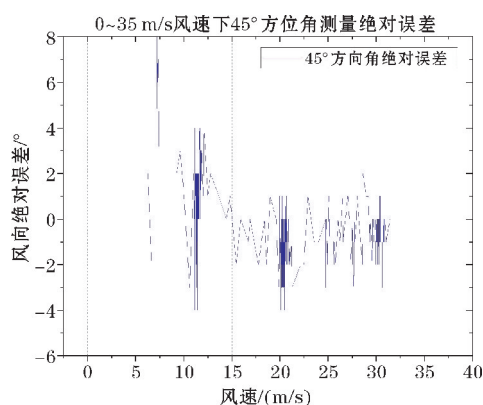
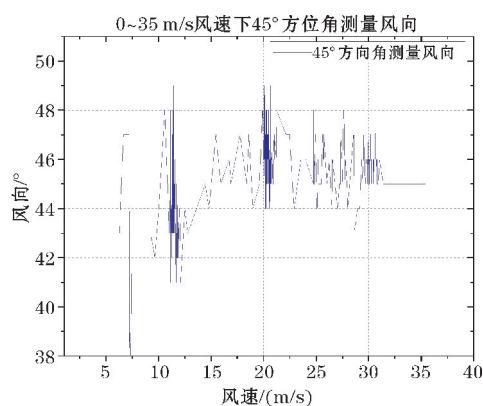


图13 不同风速下不同方位角实测风速相对误差

图14测试了在固定方位角下,调整风洞风速从无风逐步增加值35 m/s风速下的风向测量值。除了个别奇异值以外,风向测量值的绝对误差均在 $\pm 4^\circ$ 以内,图中的结果除了受自身因素的影响外,风向值的抖动还与风速处于变化中有关。



(a) 固定方位角不同风速下的风向测量误差



(b) 固定方位角不同风速下的风向测量值

图14 固定方位角下不同风速值风向测量误差与风向测量值

5 结束语

应用无人机进行污染物的溯源目前已经广泛使用,为帮助无人机能够更好地探测近地风场的结构与特征,提高对污染物来源以及扩散方向的准确性,本文利用安路科技国产FPGA设计了一款小型超声波风速风向仪,风速风向仪的整机功耗在0.5 W以内,能够满足绝大多数环境下对功耗的苛刻要求。整机设计尺寸:长70 mm、宽70 mm、高150 mm,明显优于传统的超声波风速风向仪(如TP-M12D),适用于无人机上方狭小的风场环境。同时经过风洞的实测,在较低风速时风速测量误差在 ± 0.5 m/s以内,在较高风速时风速测量相对误差在 $\pm 5\%$ 以内,风向测量误差在整个风速段均为 $\pm 4^\circ$ 以内。在不同方位角下风速的一致性较低风速时在 ± 1 m/s以内,较高风速下为 ± 2 m/s以内,整个测

量结果优于热式风,与一般的超声波风速风向仪测量结果基本相当,可以满足一般的无人机测量需求。

参考文献:

- [1] 刘奎. 基于无人机的大气污染源溯源可视化系统设计与实现[J]. 机电信息, 2021(20): 38-40.
- [2] 曲雅微, 王体健, 袁成, 等. 基于无人机的大气细颗粒物与臭氧污染探测与溯源研究进展[J]. 环境科学, 2023, 44(12): 6598-6609.
- [3] 黄本才. 结构抗风分析原理及应用[M]. 上海: 同济大学出版社, 2001: 47-49.
- [4] 李正农, 余蜜, 吴红华, 等. 某低矮模型房屋实测风场和风压的相关性研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2016, 43(5): 70-78.
- [5] Huang B, Li ZN, Zhao ZF, et al. Near-ground impurity-free wind and wind-driven sand of photovoltaic power stations in a desert area[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2018, 179: 483-502.
- [6] 李正农, 吴卫祥, 王志峰. 北京郊外近地面风场特性实测研究[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(9): 82-90.
- [7] 胡尚瑜, 李秋胜. 低矮房屋风荷载实测研究(I)——登陆台风近地边界层风特性[J]. 土木工程学报, 2012, 45(2): 77-84.
- [8] Holland G J, McGeer T, Youngren H. Autonomous Aerosondes for Economical Atmospheric Soundings Anywhere on the Globe[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1987-1998, 73.
- [9] 姜明, 史静, 李艷卿, 等. 多旋翼无人机搭载二维超声风传感器观测研究[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(5): 88-94.
- [10] 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.
- [11] 胡昊辉. 基于六旋翼无人机的测风系统研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2020.
- [14] 褚卫华, 顾正华. 风洞超声波风速风向三维测量装置设计与实现[J]. 自动化与仪器仪表, 2023(1): 36-47.
- [15] 杨阳阳, 崔永俊, 侯钰龙. 基于时差法的高精度超声波风速风向测量系统[J]. 仪表技术与传

- 感器,2022(2):79-83.
- [16] 鲁胜麟,单泽彪,刘小松,等.基于ESB波束形成的超声波传感器风速风向测量[J].仪表技术与传感器,2021(10):115-119.
- [17] 黄敏,卢会国,王保强,等.超声测风传感器在回路风洞中的测试[J].气象科技,2016,44(1):14-18.

Design of Miniature Ultrasonic Anemometer of Wind Speed and Direction Measurement for UAV

ZHENG Jian^{1,2}, LU Huiguo^{1,2,3}, FANG Wenxian^{1,2}

(1. College of Electronic Engineering, Chengdu University of Information Engineering, Chengdu 610225, China; 2. Key Open Laboratory of Atmospheric Exploration, China Meteorological Administration, Chengdu 610225, China; 3. Chengdu Plain Urban Meteorology and Environment Sichuan Field Scientific Observation and Research Station, Chengdu 610225, China)

Abstract: The use of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) equipped with anemometers allows for effective detection of near-surface wind field structures, enabling source tracing of pollutants and prediction of pollutant dispersion speed and direction. However, the size limitations of UAVs require compact and highly accurate anemometer devices. In this paper, a small-sized ultrasonic anemometer is designed based on the principle of acoustic resonance. Compared to traditional ultrasonic anemometers, the entire design adopts a non-bidirectional transmission and reception structure and utilizes a domestically-produced Field-Programmable Gate Array (FPGA) for phase detection. The overall device has a compact size, with wind speed and direction measurement accuracy comparable to similar types of ultrasonic anemometers. It weighs only 120 g and consumes less than 0.5 W of power. Wind tunnel tests were conducted comparing it with the TP-M12D ultrasonic anemometer. The maximum measured wind speed was 35 m/s, with wind speed measurement errors within ± 0.5 m/s at low wind speeds and within $\pm 5\%$ at higher wind speeds. Under fixed azimuth angles, wind direction measurement errors within $\pm 4^\circ$ were observed for wind speed fluctuations within the designated range, and the maximum wind speed measurement error under different azimuth angles was within 10%. These results demonstrate its suitability for wind measurements in UAV applications.

Keywords: UAV wind measurement; ultrasonic wind speed and direction instrument; FPGA; phase detection