

文章编号:1671-251X(2022)02-0119-06

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2021090012

高精度矿用超声波风速测量仪设计

李秉芮, 刘娜, 井上雅弘

(山东科技大学 安全与环境工程学院, 山东 青岛 266500)

摘要:针对现有风速测量仪的最低测量风速不能满足矿井低风速条件下精准测风需要的问题,基于超声波时差法风速测量原理,设计了一种具有低启动风速的高精度矿用超声波风速测量仪。采用2个超声波发射探头和2个接收探头交错设置,形成2个超声波传播通路,分别测定超声波在特定风速场中的顺风 and 逆风传播时间,利用超声波在空气中的传播速度与风流速度的叠加效应,求解发射和接收探头间的平均风速(温度对风速测量的影响可以忽略不计)。为分析超声波探头方向对测量准确性与可靠性的影响,采用4种不同探头布置方式进行实验,结果表明,超声波探头方向错位越严重,风速标准差和波动范围越大,因此,采用红外定向装置校准风速测量仪安装位置,以减小超声波探头方向错位引起的测量误差。选用滑动平均法对原始风速波形曲线进行平滑处理,以消除随机噪声,提高输出风速的稳定性。通过分析测量精度影响因素,确定超声波发射频率为40 kHz,待机时间为100 ms。理论计算和实验结果表明:该风速测量仪的分辨率为0.01 m/s,测量误差为±0.1 m/s,启动风速低于0.1 m/s,可以满足矿井低风速巷道的精准测风要求。

关键词:矿井通风; 风速测量; 超声波时差法; 低启动风速; 红外定向装置; 超声波探头
中图分类号:TD724 文献标志码:A

Design of high precision mine ultrasonic anemometer

LI Bingrui, LIU Na, INOUE Masahiro

(College of Safety and Environmental Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266500, China)

Abstract: The minimum measured wind speed of the existing anemometer can not meet the requirements of precise wind measurement under the condition of low wind speed in mines. In order to solve this problem, based on the principle of ultrasonic time difference method wind speed measurement, a high-precision mine ultrasonic anemometer with low starting wind speed is designed. Two ultrasonic transmitting probes and two ultrasonic receiving probes are arranged alternately to form two ultrasonic propagation paths. The downwind and upwind propagation times of ultrasonic waves in a specific wind speed field are measured respectively, and the average wind speed between the transmitting probes and the receiving probes is solved by using the superposition effect of the propagation speed of ultrasonic waves in the air and the wind speed (the effect of temperature on the wind speed measurement can be ignored). In order to analyze the effect of ultrasonic probe direction on the accuracy and reliability of measurement, four different probe arrangement modes are used to carry out the experiment. The results show that the more serious the ultrasonic probe direction dislocation is, the larger the standard deviation and fluctuation range of wind speed. Therefore, the infrared orientation device is used to calibrate the installation position of the anemometer to reduce the measurement error caused by the ultrasonic probe direction dislocation. The

收稿日期:2021-09-04;修回日期:2022-02-13;责任编辑:胡娟。

基金项目:国家自然科学基金项目(51804185,51804183);山东省自然科学基金项目(ZR2018BEE003)。

作者简介:李秉芮(1962—),男,山东微山人,教授,博士,研究方向为矿井通风与安全,E-mail:libingrui@sdust.edu.cn。通信作者:刘娜(1997—),女,山东济南人,硕士研究生,研究方向为矿井通风与安全,E-mail:liunana0327@163.com。

引用格式:李秉芮,刘娜,井上雅弘.高精度矿用超声波风速测量仪设计[J].工矿自动化,2022,48(2):119-124.

LI Bingrui, LIU Na, INOUE Masahiro. Design of high precision mine ultrasonic anemometer [J]. Industry and Mine Automation, 2022, 48(2): 119-124.



扫码移动阅读

moving average method is used to smooth the original wind speed waveform curve to eliminate random noise and improve the stability of output wind speed. By analyzing the factors affecting measurement precision, it is determined that the ultrasonic emission frequency is 40 kHz and the standby time is 100 ms. The theoretical calculation and experimental results show that the resolution of the anemometer is 0.01 m/s, the measurement error is ± 0.1 m/s, and the starting wind speed is lower than 0.1 m/s, which can meet the precise wind measurement requirements of the mine roadway with low wind speed.

Key words: mine ventilation; wind speed measurement; ultrasonic time difference method; low starting wind speed; infrared orientation device; ultrasonic probe

0 引言

通风智能化是指通过动态采集通风信息实现通风状态分析、故障诊断和风量调控,是矿井通风的主流发展方向^[1-2]。信息采集是通风智能化的基础,然而目前井下风速测量常用的机械式风表、压差式和超声波涡街式风速监测传感器的测量范围大多为 0.3~15 m/s,误差为 ± 0.2 m/s^[3],启动风速几乎都大于 0.3 m/s^[4-8]。《煤矿安全规程》第一百三十六条规定:输送机巷,采区进、回风巷,采煤工作面,掘进中的煤巷和半煤岩巷的最低允许风速为 0.25 m/s;掘进中的岩巷和其他通风人行巷道的最低允许风速为 0.15 m/s。现有风速传感器难以满足《煤矿安全规程》的风速测量要求,同时也难以满足通风系统异常诊断及智能调控的需要,是通风智能化需要解决的技术难题之一^[9-10]。

超声波风速测量仪可以适应恶劣环境,具有较高的精度和较宽的测量范围,因而被广泛应用于气象、军事、矿山等领域^[6,11-13]。利用超声波测风速有涡街法和时差法 2 种技术途径。之前煤矿普遍使用的超声波风速传感器多采用涡街法,如 GFW15 型矿用风速传感器^[5],但涡街法对风流稳定性及安装精度要求较高。时差法不破坏风流流场,无压力损失,几乎不受风流温度、压力等因素影响,是未来矿井风速测量技术的发展方向。国外生产的风流监测设备如 Accutron MAQS 和 Zephyr AQSTM 均采用超声波时差法。国内早期开发的基于超声波时差法的矿用风速测量仪使用 2 对超声波换能器,通过交替发射与接收超声波信号实现风速测量^[14]。文献^[15]在此基础上进行了改进,使用 1 对超声波换能器完成风速测量,最低测量风速达 0.2 m/s,性能优于传统的风速测量仪,但由于风速越低,测量误差越大,该风速测量仪仍不能满足矿井低风速条件下精准测风需要。针对该问题,本文基于超声波时差法风速测量原理,设计了一种具有低启动风速的高精度矿用超声波风速测量仪。

1 超声波时差法风速测量原理

超声波在空气中的传播速度与风速叠加,在顺风方向上传播速度加快,在逆风方向上传播速度变慢,在一定检测条件下与风速函数对应,可通过计算出精确风速。超声波在空气中的传播速度受温度的影响,但若采用 2 个通道分别检测 2 个相反方向的超声波传播速度,则温度对超声波传播速度产生的影响可以忽略不计。超声波时差法风速测量原理如图 1 所示。在巷道相对的两侧巷壁分别布置 A_1 , A_2 和 B_1 , B_2 2 组超声波探头。其中 A_1 , B_2 为超声波发射探头, A_2 , B_1 为超声波接收探头。发射探头与接收探头的距离为 L ,其连线与风流方向的夹角为 α 。

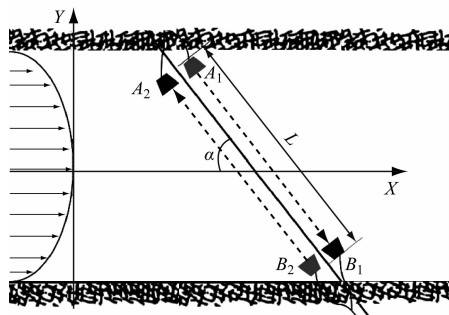


图 1 超声波时差法风速测量原理

Fig. 1 Principle of wind speed measurement of ultrasonic time-difference method

设巷道的风流方向为 X 方向(巷道轴方向),与风流方向垂直的方向为 Y 方向,沿 Y 方向的风速分布为 $v(Y)$,当 A_1 , B_2 同时发射超声波时,顺风方向超声波由 A_1 到 B_1 的传播时间为

$$T_1 = \int_0^L \frac{1}{C + v(Y) \cos \alpha} dl \quad (1)$$

式中: C 为巷道空气中超声波的传播速度, m/s , $C = 331.45 + 0.607t$, t 为巷道空气温度, $^{\circ}C$; l 为测距的积分变量。

逆风方向由 B_2 到 A_2 的传播时间为

$$T_2 = \int_0^L \frac{1}{C - v(Y) \cos \alpha} dl \quad (2)$$

用平均风速 v_m 表示沿 Y 方向的风速分布

$v(Y)$,并代入式(1)和式(2)得

$$T_1 = \frac{L}{C + v_m \cos \alpha} \tag{3}$$

$$T_2 = \frac{L}{C - v_m \cos \alpha} \tag{4}$$

由式(3)和式(4)可得

$$v_m = \frac{L}{2 \cos \alpha} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \tag{5}$$

$$L = 2C \frac{T_1 T_2}{T_1 + T_2} \tag{6}$$

当 L 已知时,测量顺风与逆风状态超声波的传播时间,根据式(5)即可求出沿 Y 方向的平均风速,且与风流温度无关。当超声波探头受外界影响而发生位移时,可根据式(6)计算位移量并校准探头间距。

2 超声波风速测量仪设计和信号调理

2.1 超声波风速测量仪设计

超声波风速测量仪工作原理如图 2 所示。超声波发射探头 A_1, B_2 和接收探头 A_2, B_1 交错设置,形成 2 个超声波传播通路,分别用于测算超声波在特定风速场中的顺风和逆风传播时间。

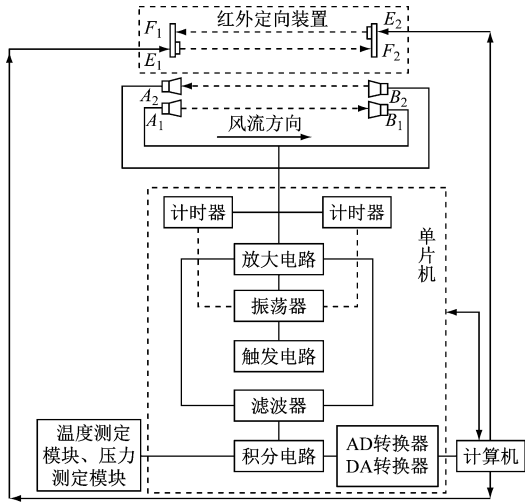


图 2 超声波风速测量仪工作原理

Fig. 2 Working principle of ultrasonic anemometer

风速测量仪由单片机、超声波收发模块及红外定向装置等组成。单片机集放大电路、计时器、振荡器、触发电路、滤波器、积分电路、信号转换器于一体,完成时差法风速测量。红外定向装置由红外线发射器 E_1, E_2 及标志区 F_1, F_2 组成,位于超声波探头 A_2, B_2 上方。 E_1, E_2 分别发射红外线至对面标志区 F_1, F_2 ,进行风速测量仪安装方向校准,以减小由安装方向偏离引起的测量误差。

风速测量仪工作电压为 5 V,通过触发电路触发振荡器,产生具有一定频率的脉冲信号,激励超声波发射探头发射规定频率的超声波,即将电信号转

换为超声波信号。在发射超声波的同时,单片机启动计时器。2 个超声波接收探头接收超声波信号,并将其转换为电信号输入单片机,同时中断计时器。信号经过放大、滤波处理后,再经过积分电路处理成方波。低电平持续时间就是超声波在空气中的传播时间,在顺风与逆风条件下低电平持续时间不同,由此可计算出超声波传播时差,根据式(5)可计算出风速并判断风向,然后实时输出风速。

2.2 超声波信号调理

超声波信号调理是指对超声波信号进行与或非逻辑运算。对振荡器产生的电信号进行信号处理及门电路运算,得到传播时间差造成的脉冲宽度,再通过滤波器及积分电路将电信号转换为稳定的输出电压。

超声波风速测量仪信号调理如图 3 所示。超声波风速测量仪由 IO 口输出一个 $10 \mu s$ 的高电平信号至 TRIG(控制端),激励超声波发射探头 A_1, B_2 发射 8 个 40 kHz 方波(波形 O),同时 A_1 和 B_2 的 TRIG 输出一个低电平。 B_1 接收到 A_1 发射的超声波后,换能器产生脉冲信号 a ,同时发生电平跳变,从 B_1 的 ECHO(接收端)输出一个高电平,经积分电路整形为方波(波形 P)并存储,低电平宽度为超声波在顺风条件下的传播时间 T_1 。 A_2 接收到 B_2 发射的超声波后,换能器产生脉冲信号 b ,同时发生电平跳变,从 A_2 的 ECHO 输出一个高电平,经积分电路整形为方波(波形 Q)并存储,低电平宽度为超声波在逆风条件下的传播时间 T_2 。图 3 中, T_r 为超声波风速测量仪的 1 个发射周期,即从超声波发射探头 A_1, B_2 第 1 次发射 8 个 40 kHz 方波到第 2 次发射方波的时间; T_0 为待机时间,即超声波发射探头发射 8 个 40 kHz 方波后至下一次发射的等待时间。

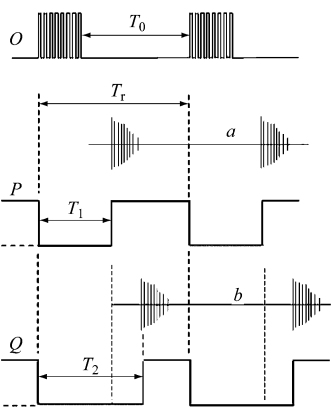


图 3 超声波风速测量仪信号调理

Fig. 3 Signal conditioning of ultrasonic anemometer

3 性能参数设定及其影响因素分析

超声波风速测量仪的测量精度除了受频率、待

机时间等性能参数影响外,还受探头方向、声噪声等因素干扰。

3.1 超声波频率

超声波在空气中传播的过程中,强度会随距离增大而衰减,频率越高,衰减率越大,长距离测量越困难;但低频超声波的工作噪声较大,易对测量精度产生影响。按照图 1 所示的超声波风速测量仪布置方式,10 m 以内的测距基本可以满足井下巷道测风要求。根据理论和实践经验,10 m 以内测距最适宜的超声波频率为 40 kHz^[16],因此,本文选用特性频率为 40 kHz 的超声波换能器。

3.2 待机时间

若超声波风速测量仪待机时间过短,则测量空间内发射探头的余振、回响信号等声噪声会降低测量精度;若待机时间过长,则测量响应速度慢。因此,需设置合理的待机时间。设探头间距 $L=10\text{ m}$, $\alpha=0$,空气温度 $t=0\text{ }^{\circ}\text{C}$,巷道平均风速 $v_m=10\text{ m/s}$,考虑反射波的影响,超声波从发射到返回所需的传播时间为

$$T|_{\text{ms}} = T_1 + T_2 = \frac{L}{C + v_m} + \frac{L}{C - v_m} \approx 60 \quad (7)$$

由式(7)可知,待机时间大于 60 ms 时,可避免反射波的影响。若探头间距 $L=1\text{ m}$,则待机时间应大于 6 ms。

设定探头间距 $L=1\text{ m}$,待机时间分别为 50, 100, 200 ms,连续进行 300 次测试,风速标准差及风速波动范围见表 1。可以看出,当待机时间大于超声波折返所需传播时间时,风速标准差很小,实测值波动小,表明测量稳定性好,几乎不受待机时间的影响。考虑风速测量仪的响应速度,设定待机时间为 100 ms。

表 1 不同待机时间的风速标准差及波动范围
Table 1 Standard deviation and fluctuation range of wind speed under different stand-by time

待机时间/ms	风速标准差/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	风速波动范围/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
50	0.089	-0.25~0.25
100	0.078	-0.20~0.20
200	0.063	-0.15~0.15

3.3 超声波探头方向性

超声波具有良好的方向性,超声波场中至波源充分远处同一横截面上各点的声压不同,轴线上的声压最高^[17]。一般实用性的超声波探头半扩散角为 $4\sim 15^{\circ}$,即测距为 1 m 时,超声波探头方向的最大允许错位为 0.268 m。因此,设超声波探头方向错位 0.25 m,采用 4 种布置方式进行室内实验,如图 4 所示。超声波连续发射 100 次。

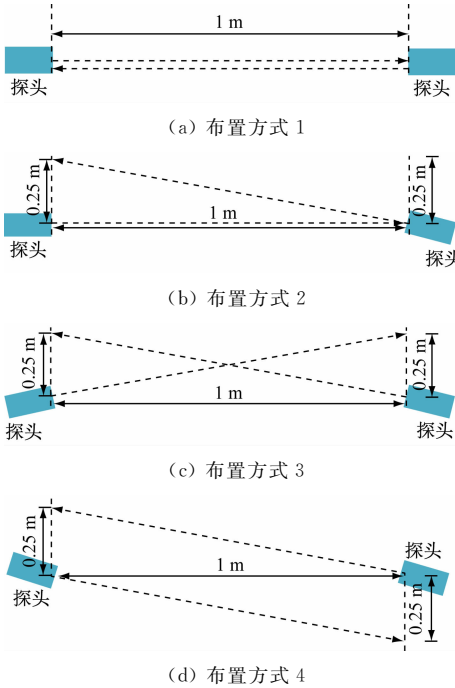


图 4 超声波探头布置方式

不同超声波探头布置方式的实测风速如图 5 所示,风速标准差及波动范围见表 2。

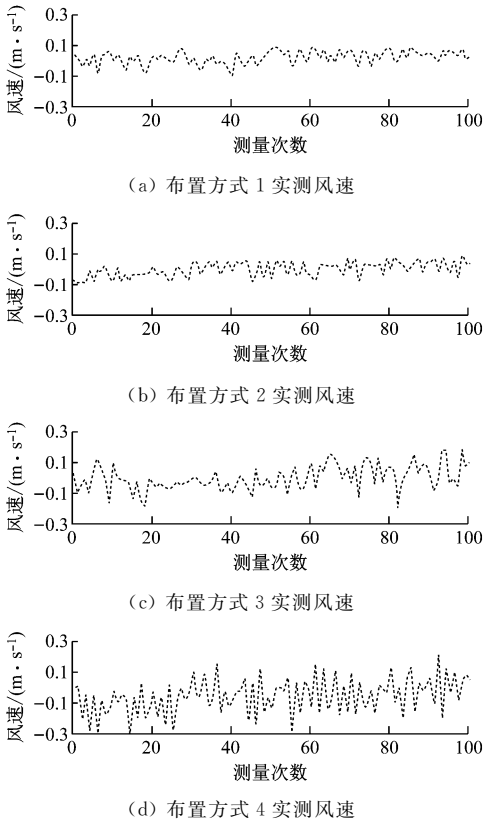


图 5 不同超声波探头布置方式的实测风速

Fig. 5 Measured wind speed under different ultrasonic probe arrangements

从图 5 和表 2 可看出,超声波探头方向错位越严重,风速标准差和波动范围越大,表明探头方向对测量的准确性与可靠性有一定影响。为减小探头方

表2 不同超声波探头布置方式的风速标准差及波动范围

Table 2 Standard deviation and fluctuation range of wind speed under different ultrasonic probe arrangements

探头布置方式	风速标准差	风速波动范围
方式1	0.042	-0.1~0.1
方式2	0.048	-0.1~0.1
方式3	0.048	-0.2~0.2
方式4	0.113	-0.3~0.3

向错位造成的误差,本超声波风速测量仪设置了红外定向装置。

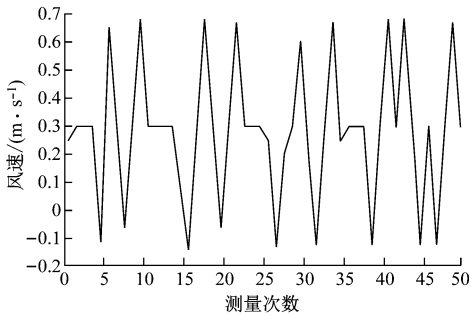
3.4 数据平滑处理

对原始风速波形曲线进行平滑处理的目的是消除随机噪声,提高输出风速的稳定性。通过比较分析,本文选用滑动平均法,其原理是对 n 个非平稳数据 $\{y_i\}(i=0,1,\cdots,n-1)$,逐个滑动取 m 个相邻数据计算算术平均值:

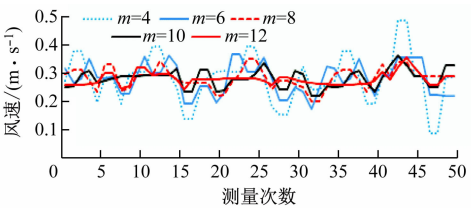
$$f_k = \frac{1}{m} \sum_{i=0}^{m-1} y_{k+i} \tag{8}$$

式中: f_k 为第 k 个算术平均值; y_{k+i} 为原始风速测量值。

m 的取值直接影响平滑效果; m 值较大有利于抑制频繁随机起伏的随机误差,但可能导致高频变化的确定性成分被平均; m 值较小不利于抑制随机误差。数据处理中多设置 m 值为5~11。为确认 m 值对风速波形曲线平滑效果的影响,分别取 m 值为4,6,8,10,12,对测距1.0 m的原始风速波形进行数据平滑处理,结果如图6所示。



(a) 原始风速波形



(b) 平滑处理后波形

图6 数据平滑处理效果

Fig. 6 Effect of data smoothing

m 值与风速标准差的关系如图7所示。可以看出, m 值越大,风速标准差越小,风速变化范围越

小,风速越稳定,但风速测量仪响应速度变慢。当 $m \geq 8$ 时,风速标准差变化小,可以认为 m 对风速平均值的影响很小,因此,本文取 $m=8$ 进行数据平滑处理。

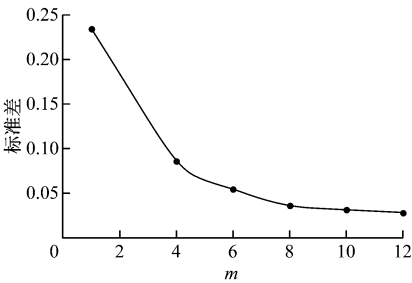


图7 m 值与风速标准差的关系

Fig. 7 Relation between m and the standard deviation of wind speed

4 性能指标分析

(1) 分辨率。设 $\alpha=0$,对式(5)求 T_1 的导数,得

$$dv_m = -\frac{L}{2T_1^2}dT_1 \tag{9}$$

将 $T_1 = \frac{L}{C+v_m}$ 代入式(9),得

$$dv_m = -\frac{(C+v_m)^2}{2L}dT_1 \tag{10}$$

已知超声波风速测量仪计时器的分辨率为 $1\ \mu\text{s}$,设 $L=5\ \text{m}$, $C=340\ \text{m/s}$, $v_m=5\ \text{m/s}$,代入式(10)得 $dv_m=0.0119\ \text{m/s}$,即超声波风速测量仪的测量分辨率为 $0.01\ \text{m/s}$ 。

(2) 测量误差。已知超声波探头的测距误差 $|dL| \leq 3\ \text{mm}$,换算为超声波传播时间误差得

$$dT_1|_{\mu\text{s}} = \frac{dL}{C+v_m} = 8.683 \tag{11}$$

将 dT_1 代入式(10)得 $dv_m=0.103\ \text{m/s}$,则超声波风速测量仪误差为 $0.1\ \text{m/s}$ 。

(3) 启动风速。因为采用非机械式传动方式,理论上超声波风速测量仪的启动风速应该等于其分辨率。根据实验室内无风、微风状态的实测,在风速小于 $0.1\ \text{m/s}$ 的情况下,超声波风速测量仪均获得了稳定的实测值,证明其启动风速低于 $0.1\ \text{m/s}$ 。

5 结论

(1) 基于超声波时差法风速测量原理,设计了具有低启动风速的高精度矿用超声波风速测量仪。通过2个发射探头同时发射超声波,形成2个超声波传播通路,温度对风速测量的影响可以忽略不计。

(2) 采用红外定向装置,可减小超声波探头方向错位引起的测量误差。选用滑动平均法对原始风速波形曲线进行平滑处理,以消除随机噪声,提高输

出风速的稳定性。

(3) 理论计算和实验结果表明:该风速测量仪的分辨率为 0.01 m/s,测量误差为±0.1 m/s,启动风速低于 0.1 m/s,可以满足矿井低风速条件下的精准测风要求,今后将通过实践进行进一步验证。

参考文献(References):

[1] 张庆华,姚亚虎,赵吉玉.我国矿井通风技术现状及智能化发展展望[J].煤炭科学技术,2020,48(2):97-103.
ZHANG Qinghua,YAO Yahu,ZHAO Jiyu. Status of mine ventilation technology in China and prospects for intelligent development [J]. Coal Science and Technology,2020,48(2):97-103.

[2] 周福宝,魏连江,夏同强,等.矿井智能通风原理、关键技术及其初步实现[J].煤炭学报,2020,45(6):2225-2235.
ZHOU Fubao,WEI Lianjiang,XIA Tongqiang,et al. Principle,key technology and preliminary realization of mine intelligent ventilation[J]. Journal of China Coal Society,2020,45(6):2225-2235.

[3] 徐新坤.煤矿用机械叶片式风速表测量准确度的影响因素[J].煤炭与化工,2016,39(5):136-137.
XU Xinkun. Influencing factor of the accuracy of mine mechanic blade type anemometer [J]. Coal and Chemical Industry,2016,39(5):136-137.

[4] 蒋泽,郝叶军,刘炎.一种矿用皮托管式风速传感器设计[J].工矿自动化,2012,38(11):61-63.
JIANG Ze,HAO Yejun,LIU Yan. Design of a mine-used air speed sensor based on pitot tube[J]. Industry and Mine Automation,2012,38(11):61-63.

[5] 周川云.高精度下限超声波风速风向传感器关键技术研究[D].北京:煤炭科学研究总院,2018.
ZHOU Chuanyun. Research of key technologies of high precision and low limit ultrasonic wind speed and direction sensor [D]. Beijing: China Coal Research Institute,2018.

[6] YUN Lei. Design of ultrasonic wind speed sensor for mine [C]//7th International Conference on Education, Management, Information and Mechanical Engineering,Shenyang,2017:602-605.

[7] LUCENA D C,FREIRE R,VILLANUEVA J M M, et al. An innovative ultrasonic time of flight method based on extended Kalman filter for wind speed measurement[J]. Journal of Instrumentation, 2020, 15(4):04024.

[8] SCHLABERG H I,LIU Yan,LI Zhihong,et al. Wind speed and direction measurement with narrowband ultrasonic sensors using dual frequencies[C]//2nd

IET Renewable Power Generation Conference, Beijing,2014.

[9] 裴晓东.灾变调风对采场煤自燃及瓦斯综合治理实验研究[D].徐州:中国矿业大学,2018.
PEI Xiaodong. Experimental study on catastrophic regulating airflow for the comprehensive control of the coal spontaneous combustion and gas in coal mine [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology,2018.

[10] 卢新明,尹红.矿井通风智能化理论与技术[J].煤炭学报,2020,45(6):2236-2247.
LU Xinming,YIN Hong. The intelligent theory and technology of mine ventilation[J]. Journal of China Coal Society,2020,45(6):2236-2247.

[11] 甘肃省电力公司,中国科学院电工研究所.一种风电场超声波风速检测方法及其装置:CN201310081679.7 [P].2013-03-14.
Gansu Electric Power Company,Institute of Electrical Engineering of Chinese Academy of Sciences. Wind power plant ultrasonic wind speed detection method and device:CN201310081679.7[P].2013-03-14.

[12] THIELICKE W,HÜBERT W,MÜLLER U, et al. Towards accurate and practical drone-based wind measurements with an ultrasonic anemometer [J]. Atmospheric Measurement Techniques,2021,14(2):1303-1318.

[13] 刘华欣.基于超声波传感器的风速风向测量研究[J].仪表技术与传感器,2018(12):101-104.
LIU Huaxin. Research on wind speed and direction measurement based on ultrasonic sensor [J]. Instrument Technique and Sensor, 2018 (12): 101-104.

[14] 冉霞,游青山.基于时差法的矿用超声波风速传感器[J].煤矿安全,2015,46(7):116-119.
RAN Xia,YOU Qingshan. Mine-used ultrasonic air velocity sensor based on time difference method[J]. Safety in Coal Mines,2015,46(7):116-119.

[15] 游青山.一种矿用超声波风速传感器的设计[J].煤矿安全,2017,48(1):88-91.
YOU Qingshan. Design for an mine-used ultrasonic air velocity sensor[J]. Safety in Coal Mines,2017, 48(1):88-91.

[16] 郭伟.超声检测[M].北京:机械工业出版社,2009.
GUO Wei. Ultrasonic testing [M]. Beijing: China Machine Press,2009.

[17] 李同岭,李清君.超声波测距[J].煤炭技术,2012,31(7):55-56.
LI Tongling, LI Qingjun. Ultrasonic distance measurement [J]. Coal Technology, 2012, 31 (7): 55-56.