

风沙环境对超声风速仪测量结果的影响

李兴财^{1,2}

(1. 宁夏大学物理电气信息学院, 宁夏沙漠信息智能感知重点实验室, 银川 750021;
2. 兰州大学西部灾害与环境力学教育部重点实验室, 兰州 730000)

摘要: 超声风速仪由于其风速、风向测量方面的卓越性能被引入风沙物理学及沙尘暴研究中以获得相关风场信息。然而, 对其在风沙环境下测量结果的准确性目前并无文献资料讨论。通过对超声风速仪测量原理及超声波在含颗粒物介质中传播速度变化的理论分析, 讨论了沙尘暴环境下沙尘颗粒物体积浓度对超声风速仪测量结果的影响。数值计算结果表明, 当沙尘颗粒体积分数超过 50% 时, 超声风速仪测量值的相对误差超过 10%, 且随着颗粒物体积分数的增加, 其测量误差呈指数形式递增。这一结果对于风沙环境中超声风速仪的正确使用具有非常重要的参考价值。

关键词: 超声风速仪; 沙尘浓度; 体积分数

中图分类号: TH76

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2013)-02-0111-04

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2013.02.008

The influence of sandstorm on the measured results of ultrasonic anemometer

LI Xing-cai^{1,2}

(1. School of Physics & Electrical Information Engineering, Ningxia Key Laboratory of Information Sensing & Intelligent Desert, Ningxia University, Yinchuan 750021, China;

2. Key Laboratory of Mechanics on Western Disaster and Environment, Department of Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Due to its superior performance in the measurement of wind speed and direction, the ultrasonic anemometer is introduced into the blown sand physics and sandstorms research to get the relevant wind field information. However, the measurement accuracy in a sandy environment has no literature discussion yet. The principle of the ultrasonic anemometer and the velocity changes of ultrasonic wave propagation in the particle contained media are firstly analyzed. Then the influence of sand or dust particle concentration on the measurement results of ultrasonic anemometer is discussed. The numerical results show that when the dust particle volume fraction is over 50%, the relative error of the equipment measured value is over 10%. And the error increases exponentially with the particle volume fraction.

Key words: ultrasonic anemometer; sand/dust concentration; volume fraction

0 引言

超声波风速测量仪是基于向量分析法, 利用超声波信号在空气中传播时所携带的气体流动信息来测量大气风速风向的仪器, 具有非接触、精度高、可测范围宽、安装维护较方便等特点^[1]。目前超声波风速测量仪已被广泛应用于大气、环境、航海、工业风道的检测与危险气体监测等领域。

另外, 随着由沙尘暴气象引发的环境、气候、生态问题日益凸显, 许多科学工作者开始关注沙尘

发生的机理原因。大风是作为沙尘颗粒启动的主要动力^[2,3], 对其详细信息的准确获得是相关科研问题的热点。超声波风速测量仪由于其属于非接触式测量且具有较高的采样频率等优点, 其测量结果可用于讨论近地层及沙尘暴期间的湍流分析, 也有部分文献报道了超声风速仪用于测量风沙环境尤其是沙尘暴环境下的风场结构^[4-6]。然而, 在此条件下超声风速仪器的测量结果是否仍然可靠, 对此问题至今没有文献报道。本文基于混杂颗粒介质等效介质密度、等效弹性模量的求解, 讨论空气中夹杂不同浓度的颗粒物(如沙尘)时声波传播速度的变化, 以此说明沙尘暴或降雨对超声风速仪测量结果的影响。同时, 本文研究结果可为沙尘暴或降雨条件下超声风速仪测量结果的修正提供依据。

收稿日期: 2012-04-24; 修回日期: 2012-06-18

基金项目: 国家科技部国际科技合作专项项目(2011DFA11780)、西部灾害与环境力学教育部重点实验室(兰州大学)开放基金、宁夏自然科学基金(NZ12117)资助项目。

作者简介: 李兴财(1984—), 男, 宁夏中卫人, 博士, 研究方向为风沙电现象及其与电磁波相互作用。

通讯作者: 李兴财, E-mail: nxulixc2011@gmail.com

1 超声风速仪测量原理

空气作为声波传播的介质，其运动会影响声波的传播速度，为此，Carrier 和 Carlson 于 20 世纪 40 年代提出了基于测量声波在已知距离的两点之间传播时间的变化来反推出两点间风速的方法^[7]。其测量原理如下^[8]：

假定净空条件下(无沙尘、无雨)大气中的声速为 v_0 ，测量期间空气运动速度为 v ，仪器超声波发射、接收段距离为 L ，则超声波传输时间为：

$$t_1 = \frac{L}{v_0 \pm v} \quad (1)$$

其中：“±”号的选择与 v_0 和 v 的方向是否相同有关，若相同则取“+”，否则取“-”。实际测量中 v_0 很难唯一确定，因此，为了消除这种不确定性，反向再发射一个超声波脉冲，此时超声传输 L 距离所需时间为

$$t_2 = \frac{L}{v_0 \mp v} \quad (2)$$

两式变形后相减，可将 v_0 消去，得新的表达式：

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{2Lv}{v_0^2 - v^2} \approx \frac{2Lv}{v_0^2} \quad (3)$$

$$v \approx \frac{v_0 \Delta t}{2L} \quad (4)$$

上式的推导使用了 v_0 的近似。由式(4)可见，风速与时间差成正比，即：当测量声波通过 L 距离的时间 t_1 、 t_2 以及大气声速 v_0 后，即可获得测量位置处的风速。为了获得风向信息，需要采用多对探头并将测量结果进行正交合成计算。

另外，由式(1)、(2)可知， t_1 、 t_2 值与声波在空气中传播的真实速度有关。对于沙尘暴或降雨天气，空气密度会发生变化。根据任意介质中声速的计算公式 $v = \sqrt{E/\rho}$ (E 为杨氏模量， ρ 为介质密度)可推断，声波在沙尘暴中的传播速度与其在净空中的传播速度并不相同，因此在式(1)、(2)中的 v 并不完全表示空气运动的速度，从而可能导致超声风速仪测量结果的不准确。为此讨论沙尘暴环境下的声速计算问题。

2 沙尘暴中声速的计算及测量误差

考虑到纵向波对剪切模量、杨氏模量方向密度的影响，任意介质中声速的计算公式修正如下^[9]：

$$v_{\text{comp}} = \sqrt{\frac{E_{\text{comp}}}{\rho_{\text{comp}}} \frac{(1-\mu)}{(1+\mu)(1-2\mu)}} = \sqrt{\frac{M_{\text{comp}}}{\rho_{\text{comp}}}} \quad (5)$$

其中： E 为杨氏模量； μ 为泊松比； ρ 为介质密度， M 为纵向弹性模量，与体弹性模量 K 、剪切弹性模量 G 的关系为： $M = K + 4/3G$ ，这里 M 并不表示材料的硬度，因此在工程行业中很少使用。以下将分别对 ρ 和 M 的求解方法进行讨论。

假如沙尘暴期间沙尘颗粒的体积浓度为 V ，空气和沙尘颗粒的密度分别为 ρ_{air} 、 ρ_{sand} ，则夹沙空气的密度可由式(7)表示：

$$\rho_{\text{comp}} = \rho_{\text{air}}(1-V) + \rho_{\text{sand}}V \quad (6)$$

纵向弹性模量 M 可由式(7)表示：

$$\frac{1}{M_{\text{comp}}} = \frac{1-V}{M_{\text{air}}} + \frac{V}{M_{\text{sand}}} \quad (7)$$

其中： $M_{\text{air}} = \rho_{\text{air}}C_{\text{air}}^2$ ， $C_{\text{air}} = v_0$ 是声波在静止空气中的传播速度，且：

$$M_{\text{sand}} = \frac{E_{\text{sand}}(1-\mu)}{(1+\mu)(1-2\mu)} \quad (8)$$

将式(6)~(8)代入式(5)，即可获得沙尘暴环境下的声速。以上计算也适用于降雨条件下的声速计算，只须对部分参数进行相应变换。

考虑到声波在夹杂沙尘的空气中传播时速度的变化，则超声风速仪风速测量产生的相对误差由式(9)获得，约为

$$\delta v = \frac{v_2 - v_1}{v_1} = \frac{v_{\text{comp}}(v_0 + v)}{v_0(v_{\text{comp}} + v)} - 1 \quad (9)$$

这里 v_1 、 v_2 分别表示空中无沙尘、有沙尘时得到的风速值， v_0 是净空条件下空气中的声速， v_{comp} 是有沙尘暴时空气中的声速， v 为真实风速值。由此可见，超声风速仪的测量误差与真实风速及超声在夹沙空气中的声速有关。

对于超声风速仪，不仅可以获得测量位置处的风速、风向信息，同时也可以给出空气的温度，在不考虑空气湿度的前提下，其计算方法为^[8]：

$$T = 273 \times \left[\left(\frac{v_0}{v_0'} \right)^2 - 1 \right] \quad (10)$$

式(10)中： v_0 、 v_0' 分别代表温度为 T 和 0°C 时的声速。显然，声速的变化必然导致超声风速仪输出温度值不准确，其误差可表示为

$$\delta T = \frac{T_2 - T_1}{T_1} = \frac{v_{\text{comp}}^2 - v_0'^2}{v_0^2 - v_0'^2} \quad (11)$$

3 数值模拟结果与分析

以下基于式(9)、(11)讨论不同沙尘环境条件下利用超声风速仪获得风速、大气温度的误差变化，并讨论了真实风速对超声仪器所得风速误差的影响。

首先给出不同浓度沙尘环境下超声风速仪测量风速、大气温度的误差，结果如图 1 所示。由图可见，在沙尘浓度较小时超声风速仪获得风速、温度值的误差很小，但是随着沙尘浓度的增加，其误差呈指数形式增长。另外，由图可见，沙尘环境下基于超声波仪器获得的大气温度测量值的误差远大于基于该仪器获得的风速测量值的误差，且当沙尘体积浓度超过 0.2 时，温度测量结果的误差超过 10%(图中虚线所示)，也就是说文中式(10)成立的前提是颗粒物体积浓度远小于 0.2。由于沙尘暴中沙尘颗粒的粒径很小，即使是黑风暴，沙尘粒子的体积分数也小于 0.1，但是地表风沙流过程中沙粒的

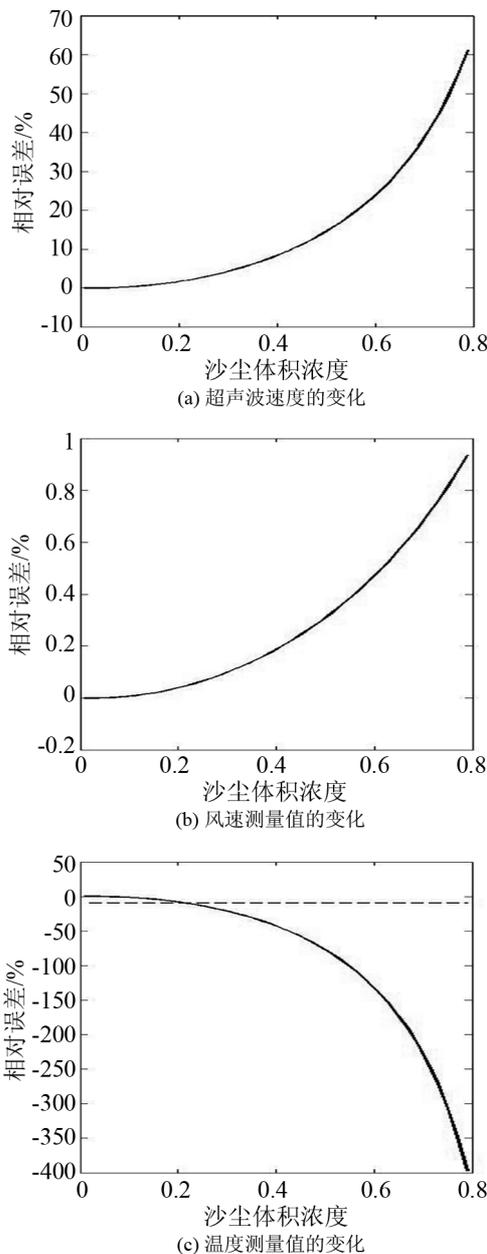


图 1 不同浓度沙尘对超声风速仪测量结果的影响
Fig.1 The influences of dust with different concentrations on the ultrasonic anemometer

体积分数可能远超该值。这一结果说明，可以使用超声风速仪对沙尘暴期间的风场信息进行测量，但是用于地表风沙流中的风速测量却可能存在很大误差。鉴于地表风场尤其是湍流对沙尘启动过程的重要影响，实际中基于超声风速计测量地表风速时亟需对其测量结果按照本文给出的模型进行修正。

考虑到式(11)所表达的“由超声测风仪器获得的空气温度值的相对误差与真实风速有关”这一结论，在图 2 中讨论了真实风速对超声风速仪测量空气温度结果的影响。由图可见，随着真实环境风速的增加，仪器温度测量结果的相对误差呈负值减小，但其绝对值较小(约 10^{-5})，说明风速变化对温度测量结果的影响程度较弱。因此在实际测量中可以不用考虑风速对所获得温度值的影响。

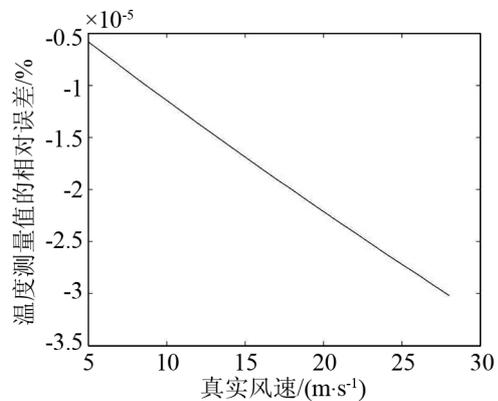


图 2 真实风速对超声风速仪测量结果的影响
Fig.2 The influences of real wind velocity on the ultrasonic anemometer

实际应用中风向与超声波传播方向并不完全相同，而是存在一定的夹角。如沙尘暴中的风场存在涡旋结构^[10]等。因此，常见的超声风速仪都是通过对共点不共面的三个特定方向的超声，在给定长度空间传播所需时间进行测量，以获得对应的风速值，然后进行类似矢量投影、合成的运算来获得真实的风场信息^[11]。不过，在每个方向上用超声波测风速的测量原理同前文所述。因此，对于三维超声风速仪只需在每个超声脉冲传播方向上对测量结果进行修正即可。

4 结语

基于混杂颗粒介质等效介质密度、等效弹性模量理论求解沙尘暴环境下超声波的传播速度，并对沙尘暴环境下超声风速仪测量结果的误差进行分析。结果表明：利用超声风速仪测量低体积浓度沙尘环境中的风速时不会带来显著的测量误差，但是对高浓度沙尘环境如地表风沙流过程中的风速测

量时有可能带来显著误差,且随着沙粒浓度的增加,其误差呈指数增加趋势变化。由此说明超声风速仪不能直接用于近地表风沙流中的风速测量,而必须通过一定方式对测量结果进行修正。

参 考 文 献

- [1] 王保强,李一丁. 超声波风速风向检测技术的研究[J]. 声学技术, 2008, 27(4): 1-5.
WANG Baoqiang, LI Yiding. Detection technology of wind direction and speed with ultrasonic transducers[J]. Technical Acoustics, 2008, 27(4): 1-5.
- [2] ZHENG X J. Mechanics of wind-blown sand movements[M]. Springer, 2009, 6-11.
- [3] 曾庆存,胡非,程雪岭. 大气边界层阵风扬尘机理[J]. 气候与环境研究, 2007, 12(3): 251-255.
ZENG Qingcun, HU Fei, CHENG Xueling, The mechanism of dust entrainment by gustwind[J]. Climate and Environmental Research, 2007, 12(3): 251-255
- [4] 张美根,胡非,邹捍,等. 大气边界层物理与大气环境过程研究进展[J]. 大气科学, 2008, 32(4): 923-934.
ZHANG Meigen, HU Fei, ZOU Han, et al. An overview of recent studies on atmospheric boundary layer physics and atmospheric environment in LAPC[J]. Chinese Journal of Atmospheric Science, 2008, 32(4): 923-934.
- [5] 郑晓静,张静红. 2010年3月19日沙尘暴期间甘肃民勤地区近地表的湍流性质[J]. 科学通报, 2010, 55(22): 2235-2240.
ZHENG Xiaojing, ZHANG Jinghong. Characteristics of near-surface turbulence during a dust storm passing Minqin on March 19, 2010[J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(22): 2235-2240.
- [6] 温雅婷,焦冰,缪启龙,等. 沙漠腹地强沙尘暴过境的近地层湍流分析[J]. 中国沙漠, 2012, 32(6): 1716-1722.
WEN Yating, JIAO Bing, MIU Qilong, et al. The analysis of turbulence on the surface land of desert hinterland during the strong sandstorms[J]. Journal of Desert Research, 2012, 32(6): 1716-1722.
- [7] 姜明,景元书,郭建侠,等. 三维超声风速仪观测中风向角计算方法[J]. 气象科技, 2011, 39(5): 615-619.
JIANG Ming, JING Yuanshu, GUO Jianxia, et al., Method for calculating wind direction in measurement using 3D Sonic Anemometer[J]. Meteorological Science and Technology, 2011, 39(5): 615-619.
- [8] 曹可劲,崔国恒,朱银兵,超声波声速仪理论建模与分析[J]. 声学技术, 2010, 29(4): 388-391.
CAO Kejing, CUI Guoheng, ZHU Yinbing, Modelling and analysis of ultrasonic anemometer[J]. Technical Acoustics, 2010, 29(4): 388-391.
- [9] Kim K S, Lee K I, Kim H Y, et al. Dependence of particle volume fraction on sound velocity and attenuation of EPDM composites[J]. Ultrasonics, 2007, 46(2): 177-183.
- [10] 于长水,王静爱,史培军,等. 沙尘暴中的能量反馈[J]. 灾害学, 2008, 23(4): 1-5.
YU Changshui, WANG Jingai, SHI Peijun, et al. Energy feedback in dust-storm[J]. Journal of Catastrophology, 2008, 23(4): 1-5.
- [11] Alberigi A Q, Aprilesi G C, Cicco G De, et al. A microprocessor based three axes ultrasonic anemometer[J]. J. Phys. E: Sci. Instrum., 1985, 18(5): 384-387.

• 简 讯 •

听力与言语医学中心第一届理事会第二次会议召开

2013年4月7日,中国科学院声学研究所东海研究站“听力与言语医学中心”第一届理事会第二次会议在上海市徐汇区中心医院召开。医学中心理事长中国科学院上海分院副院长张旭、副理事长徐汇区中心医院院长朱建民、理事东海研究站站长胡长青、中国科学院上海临床中心办公室主任韩雪松、徐汇区中心医院康复科主任杨坚等出席会议。张旭副院长主持会议。

理事会成员认真听取了医学中心主任冯海泓研究员所作的“听力与言语医学中心”2012年工作总结及2013年工作计划,对医学中心的工作进展和所取得的成绩给予了充分肯定,并就目前存在的问题和困难进行了深入的探讨,对中心未来的发展寄予了殷切的期望。

会上,中国科学院上海分院副院长张旭指出,“听力与言语医学中心”的发展十分迅速,所开展的项目具有很好的临床应用前景。他希望,“医学中心”能够延续快速发展的势头,通过不懈的努力,在听力与言语临床研究方面取得更好的成绩,实现更多的成果转化。

会议取得了圆满成功,讨论通过了2012年工作总结和2013年工作计划,确立了2013年拟开展的重点新项目,通过了理事会章程。