

邓诗茹,解震华,2019. CSAT3 三维超声风速仪观测资料质量检验[J]. 气象与减灾研究,42(2):156-160.

Deng Shiru, Xie Zhenhua, 2019. Quality inspection of observation data of CSAT3 three-dimensional ultrasonic anemometer[J]. Meteorology and Disaster Reduction Research,42(2):156-160.

CSAT3 三维超声风速仪观测资料质量检验

邓诗茹¹, 解震华²

1. 江西省气象科学研究所,江西 南昌 330096

2. 中国民用航空华东地区空中交通管理局 江西分局,江西 南昌 330114

摘要: 利用江西省永修县吉山铁塔 50 m 处 CSAT3 三维超声风速仪和常规仪器的风观测资料,以及铁塔附近气象观测站同期降水资料,通过对比分析,检验了超声风速仪水平风观测资料质量,还考察了降水(降水强度大于 3 mm/h)对观测资料质量的影响。结果表明:超声风速仪观测的水平风速的数值和演变趋势与实际基本一致;超声风速仪观测的风向方位和高频区分布与实际基本吻合。降水期间,风速和风向观测结果与实际仍然一致,降水对超声风速仪的水平风观测资料质量影响不大。

关键词: 超声风速仪,风观测,质量,检验

中图分类号: P413

文献标识码: B

文章编号: 1007-9033(2019)02-0156-05

doi: 10.12013/qxyjzyj2019-025

Quality Inspection of Observation Data of CSAT3 Three-Dimensional Ultrasonic Anemometer

Deng Shiru¹, Xie Zhenhua²

1. Jiangxi Institute of Meteorological Sciences, Nanchang 330096, China

2. Jiangxi Branch of East China Air Traffic Management Bureau CAAC, Nanchang 330114, China

Abstract: The quality of wind observation data of CSAT3 three-dimensional ultrasonic anemometer was tested, and the influence of precipitation (precipitation intensity greater than 3 mm/h) on the quality of observation data was also investigated through comparative analysis by using the wind observation data of ultrasonic anemometer and conventional instruments at 50 m in Jishan tower of Yongxiu county, Jiangxi province, and the precipitation data of meteorological observation station near the tower. The results show that the value and evolution trend of the horizontal wind speed observed by the ultrasonic anemometer are basically consistent with the actual situation; the azimuth and high frequency area distribution of the wind direction observed by the ultrasonic anemometer are also consistent with the actual situation. During the precipitation period, the observation results of wind speed and wind direction are still consistent with the actual situation, and the precipitation has little effect on the quality of the horizontal wind observation data of the ultrasonic anemometer.

Key words: ultrasonic anemometer; wind observation; quality; inspection

0 引言

近年来,铁塔观测及先进的超声风速仪观测的

资料在气象部门得到应用,特别是对研究强天气过程的大气边界层结构以及边界层过程对强天气形成和发展的作用具有重要意义(吴进等,2018)。然而,利

收稿日期: 2019-03-12; 修订日期: 2019-05-25.

基金项目: 国家自然科学基金项目(编号:41865003;41765001).

作者简介: 邓诗茹,硕士,工程师,主要从事天气气候研究, E-mail:dengshiru@nuist.edu.cn.

用铁塔进行观测存在一些问题,如由于仪器的系统误差、故障以及资料传输、记录过程中的其他原因,会出现一些虚假的数据。这些数据一旦被诊断出来就必须进行修正或者剔除,否则会影响资料分析结果的可靠性(陈明和洪钟祥,1993;Vickers and Mahrt,1997)。在处理数据时,要最大限度地保护原始资料,通过判断逻辑极值、僵值、时空一致性和人工干预等方法对明显的错误数据进行剔除和订正(金莉莉等,2016)。还可以利用精确的对比观测资料,分析另一种设备观测资料的可靠性,如林雯等(2016)通过同一层螺旋桨风速风向仪和超声风速仪的风速观测对比,发现超声风速仪的性能可靠。除了仪器系统误差和故障等原因外,降水对超声风速仪的观测结果有较大影响,以往一些研究中都直接剔除了降水时段的观测值(宋丽莉等,2004),但是也有学者开展了降水的影响研究,如 Mizutani 等(1997)通过对比探头在不同雨强中得到的观测结果的方式,研究了降水对超声风速仪观测资料的影响。

在鄱阳湖西岸的江西省永修县吉山设置 70 m 高铁塔,在铁塔的 50 m 高度处分别安装了常规风向风速传感器和 CSAT3 三维超声风速仪。文中选取 2013 年 4 月 1 日—5 月 31 日两种观测资料,对两者的差异进行分析,验证三维超声风速仪观测资料的可靠性,并检验降水对超声风速仪观测结果的影响,以为超声风速仪观测资料的应用提供参考。

1 超声风速仪观测原理

CSAT3 三维超声风速仪利用三对非正交方位的传感器来观测风速,每对传感器可以发射并接收超声信号,信号的传输时间与沿着传感器轴方向的风速大小相关。每对传感器从两个相反方向的探头上发出脉冲信号,第一次信号(发出)传输的时间为

$$t_o = \frac{d}{c + u_a} \quad (1)$$

第二次信号(返回)传输的时间为

$$t_b = \frac{d}{c - u_a} \quad (2)$$

其中, t_o 为信号沿传感器轴传输的时间, t_b 为信号沿反方向返回所需要的时间, u_a 为沿传感器轴方向的风速, d 为传感器之间的距离, c 为声速。沿任意轴的风速 u_a 为

$$u_a = \frac{d}{2} \left(\frac{1}{t_o} - \frac{1}{t_b} \right) \quad (3)$$

风速 u_a 、 u_b 和 u_c 由 3 个非正交轴上的传感器观测,

a 、 b 和 c 分别表示 3 条非正交轴。非正交风速分量转换为正交风速分量 u_x 、 u_y 和 u_z ,其计算式为

$$\begin{bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{bmatrix} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中, \mathbf{A} 为 3×3 的坐标转换矩阵。

2 资料来源与说明

观测铁塔高 70 m,位于鄱阳湖西岸江西省永修县吉山村(图 1),具体坐标为(29. 23°N,116. 07°E)。铁塔周边区域地势平坦,下垫面以低矮灌木为主(高度不超过 2 m)。铁塔上安装了 4 层(10、30、50、70 m)常规风向风速传感器(其观测值称为常规风观测资料),数据输出自动给出质控码,每 10 min 输出一平均次值。在该铁塔 50 m 高度处安装了一套美国 Campbell Science 公司生产的 CSAT3 三维超声风速仪。该仪器被广泛应用于边界层湍流和结构风工程的测量,仪器在输出数据的同时能自动给出判别码用来识别观测数据的有效性。该仪器使用环境温度 $-30 \sim 50$ °C,水平方向风速量程 ± 60 m/s,测量精度 < 0.3 m/s,垂直方向风速量程 ± 8 m/s,测量精度 < 4 mm/s,其最大动态响应频率 60 Hz。实际观测以 20 Hz 采样频率进行三维瞬时风速数据采集。文中选取铁塔观测资料有 2013 年 4 月 1 日—5 月 31 日铁塔 50 m 高度处的常规观测资料(风向、风速)和超声风速仪观测资料(经向风、纬向

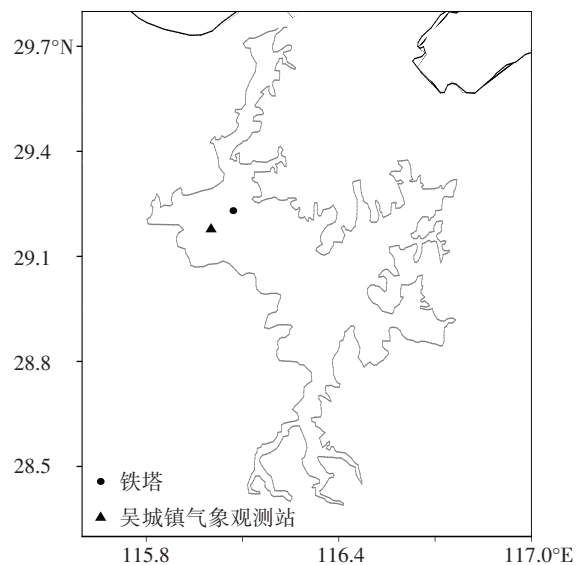


图 1 永修吉山测风铁塔位置示意图
Fig. 1 The schematic drawing of the observation tower in Jishan of Yongxiu

风)。所用的逐时降水资料为距离铁塔约 8.8 km 的吴城镇气象观测站(29. 18°N, 116. 00°E)资料(图 1), 来源于江西省气象信息中心。

3 资料处理

3.1 无效和野点数据处理

超声风速仪能够自动判别由于降水影响而产生的无效数据, 即根据超声风速仪的判别码剔除无效数据。在此基础上, 再采用陈红岩等(2000)和卞林根等(2001)给出的方法判别数据中其他野点, 并采用线性插值法进行插补。根据常规观测数据的时间分辨率, 选取连续 10 min 的观测数据为一个样本, 有效数据比例大于 98%。常规风速仪的观测数据也自带质控码, 根据质控码剔除无效数据。

3.2 坐标旋转

由于超声风速仪是用来测定垂直方向的通量, 而超声风速仪在安装时很难与地表方向达到一致。另外, 当地势不平坦时, 坐标轴选择不恰当对通量计算结果也会造成影响。因此, 对于湍流资料, 必须进行坐标旋转(刘熙明, 2006)。使得 x 轴沿主导风向, y 轴和 z 轴分别沿横向和垂直方向, 最终使得 $\bar{v} = 0$ 和 $\bar{w} = 0$ 。也就是建立一个新的 u, v, w 时间序列 u', v', w' :

$$u' = uC_t C_e + vC_t S_e + wS_t \quad (5)$$

$$v' = vC_e - uS_e \quad (6)$$

$$w' = wC_t - uS_t C_e - vS_t S_e \quad (7)$$

其中:

$$C_e = \frac{\bar{u}}{\sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2}} \quad (8)$$

$$S_e = \frac{\bar{v}}{\sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2}} \quad (9)$$

$$S_t = \frac{\bar{w}}{\sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2 + \bar{w}^2}} \quad (10)$$

$$C_t = \frac{\sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2}}{\sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2 + \bar{w}^2}} \quad (11)$$

$$\bar{u} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n u_i, \bar{v} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i, \bar{w} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n w_i \quad (12)$$

式中, n 为 30 min 内的样本数。

4 超声风速仪观测资料

4.1 常规时期观测资料检验

为了验证超声风速风向传感器观测数据的可靠性, 将其与常规观测的风资料进行比较分析, 主要包

括水平风速和风向。图 2 给出了 2013 年 4 月 1 日—5 月 31 日超声风速仪观测的 10 min 平均风速与常规观测结果比较。分析发现, 两者的数值和随时间的演变趋势都非常吻合。两种数值的相关系数达到 0.99, 标准偏差(期望差)为 -0.02 m/s , 标准差为 0.59 m/s (表 1)。这表明, 超声风速仪观测的水平风速与常规观测结果一致。

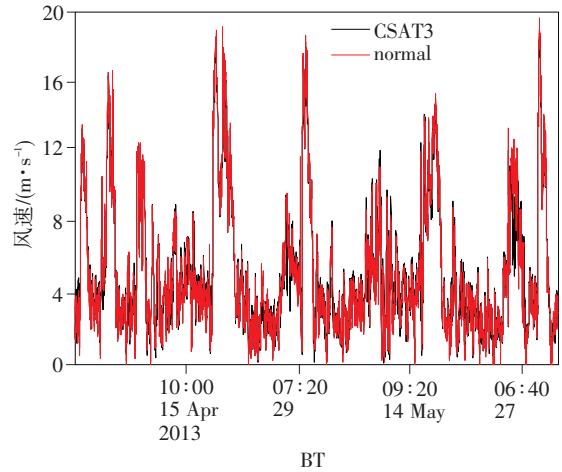


图 2 CSAT3 三维超声风速仪观测的 10 min 平均风速与常规观测结果比较

Fig. 2 Comparison of 10 min mean wind speed observed by CSAT3 three-dimensional ultrasonic anemometer with conventional observations

分析表 1 还发现, 超声风速仪观测的经向风和纬向风与常规观测结果在数值和随时间的演变趋势上也非常吻合。

表 1 CSAT3 三维超声风速仪观测的 10 min 平均风速与常规观测结果的相关统计

Table 1 Statistical relations between the 10 min mean wind speeds observed by CSAT3 three-dimensional ultrasonic anemometer and conventional observations

| 要素 | 相关系数 | 标准偏差/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) | 标准差/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) |
|-----|------|-----------------------------------------|----------------------------------------|
| 风速 | 0.99 | -0.02 | 0.59 |
| 纬向风 | 0.99 | 0.14 | 0.37 |
| 经向风 | 0.99 | -0.07 | 0.54 |

图 3 给出了超声风速仪和常规观测的 10 min 风向频率。可以看出, 常规观测的风向主要为北风、北东北风和东东南风, 其次为东风、东南风和南东南风, 超声风速仪观测的风向与常规观测风向的分布比较一致。但是, 在风向出现频率上存在一些差异: 超声风速仪观测的北风、东东南风的频率较常规观测风向的频率低, 而北东北风、南东南风和南风的频

率则偏高,唯独东风的出现频率一致。通过以上分析可知,超声风速仪观测的水平风速和风向与常规观测结果均较为一致,说明其数据可信。

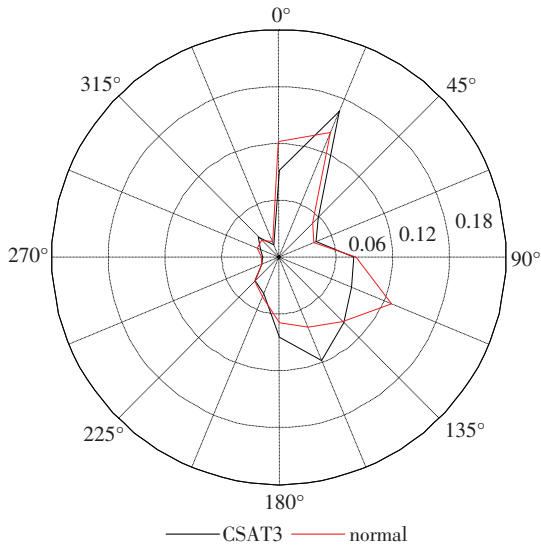


图3 CSAT3 三维超声风速仪和常规仪器观测的10 min风向频率

Fig. 3 10 min wind direction frequency observed by CSAT3 three-dimensional ultrasonic anemometer and conventional

4.2 降水期间观测资料检验

Mizutani 等(1997)研究了降水对超声风速仪观测的资料的影响,指出当降水强度超过 6 mm/h 时,采样频率小于 1 Hz 的情况下干湿状态测量的数据差异较为明显,且降水强度越大,差异越大,当降水强度小于 3 mm/h 时,超声风速仪观测的感热通量是可用的,当降水强度超过 4 mm/h 时,数据的异常值增加。CSAT3 三维超声风速仪具有自动判别由于降水影响而产生的无效数据的功能,根据判别码剔除了无效数据。为了验证超声风速仪的自动判别功能是否有效,对降水期间(降水强度超过 3 mm/h,下同)超声风速仪观测的资料与常规观测资料进行对比分析。

图 4 给出了 2013 年 4 月 1 日—5 月 31 日降水强度超过 3 mm/h 时,超声风速仪观测的 10 min 平均风速与常规观测结果的比较。分析发现,超声风速仪观测风速与常规观测风速在数值和随时间的演变趋势上都非常吻合。两者的相关系数达到 0.99,标准偏差为 -0.06 m/s,标准差为 0.63 m/s(表 2)。且不同的降水强度对两种观测资料的一致性影响不大。降水期间超声风速仪观测的经向风和纬向风与

常规观测结果在数值和随时间的演变趋势上也非常吻合,两者与常规观测结果的相关系数均达到了 0.99(表 2)。这表明,即使在降水期间超声风速仪观测的水平风速与常规观测结果一致。

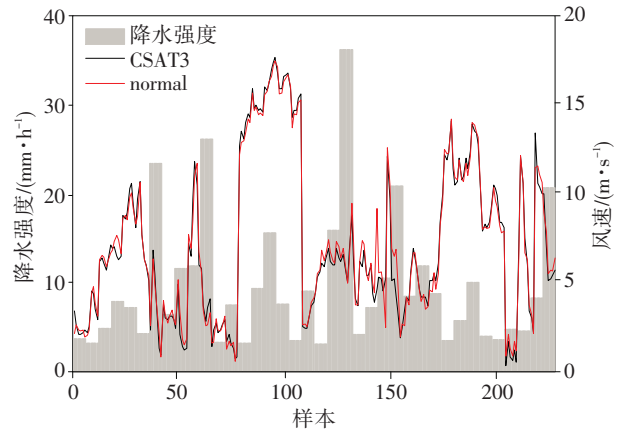


图 4 降水期间 CSAT3 三维超声风速仪观测的 10 min 平均风速与常规观测结果比较

Fig. 4 Comparison of 10 min mean wind speed observed by CSAT3 three-dimensional ultrasonic anemometer with conventional observations during precipitation

表 2 降水期间 CSAT3 三维超声风速仪观测的 10 min 平均风速与常规观测结果相关统计

Table 2 Statistical relations between the 10 min mean wind speed observed by CSAT3 three-dimensional ultrasonic anemometer and conventional observations during precipitation

| 要素 | 相关系数 | 标准偏差/($m \cdot s^{-1}$) | 标准差/($m \cdot s^{-1}$) |
|-----|------|---------------------------|--------------------------|
| 风速 | 0.99 | -0.06 | 0.63 |
| 纬向风 | 0.99 | -0.15 | 0.55 |
| 经向风 | 0.99 | -0.04 | 0.52 |

对无降水和降水期间超声风速仪观测的小时平均风速的标准偏差进行对比,进一步检验降水对超声风速仪观测结果的影响。结果显示,无降水期间风速的标准偏差为 3.64 m/s,而降水期间风速的标准偏差为 4.18 m/s,表明降水期间风速的离散程度要大于无降水期间。利用 F 检验考察两者的变化是否存在显著差异,结果通过了 90% 的置信水平,表明降水和无降水期间的超声风速仪观测的风速的差异不明显。综上所述,虽然降水期间超声风速仪观测的风速离散程度要大于无降水期间,但是差异不明显,降水对超声风速仪观测资料的影响不大。

分析图 5 发现,降水期间常规观测的风向主要为北东北风、东东北风和东风,其次为北风、东北风和南东南风,超声风速仪观测风向与常规观测风向

的分布比较一致。但是,在风向频率上存在差异:相较于常规观测结果,超声风速仪观测的北风频率偏高,而北东北风、东东北风和东风的频率则偏低,但东北风频率一致。综上所述,在降水强度超过 3 mm/h 时,超声风速仪观测的水平风速和风向与常规观测结果一致,无论降水与否数据都较为可信,表明超声风速仪的自动判别功能有效,降水对其观测的风速影响不大,且该自动判别功能不随降水强度的变化而变化。

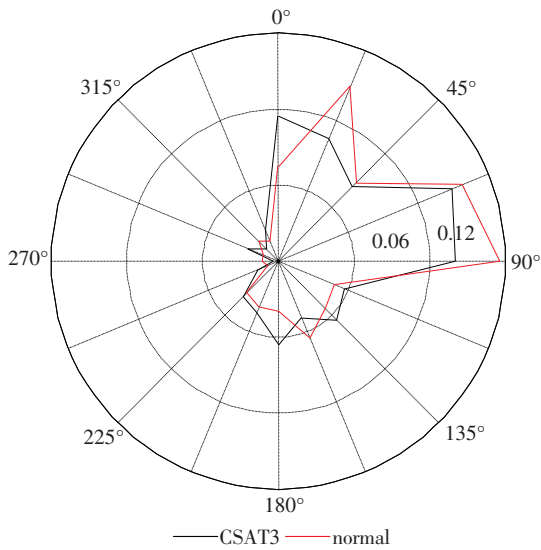


图5 降水期间 CSAT3 三维超声风速仪和常规仪器观测的 10 min 风向频率

Fig. 5 10 min wind direction frequency of CSAT3 three-dimensional ultrasonic anemometer and conventional observation during precipitation

5 结论

文中首先分析了 CSAT3 三维超声风速风向观测数据的可靠性。在此基础上,对超声风速仪观测的风速和风向与铁塔常规仪器观测结果进行对比分析,并对降水期间(降水强度超过 3 mm/h)的超声风速仪观测资料进行了质量检验,得到:

1) 超声风速仪观测风速的数值和演变趋势与实际风速具有很强的一致性。

2) 超声风速仪观测风向的方位和频率上的变化趋势与实际基本吻合。

3) 降水期间超声风速仪观测的风速和风向与实际结果仍然一致。无降水和降水期间,超声风速仪观测的逐时风速差异并不明显,超声风速仪自动

判别功能有效,观测数据可信。

参考文献 (References)

- 卞林根,陆龙骅,程彦杰,等,2001. 青藏高原东南部昌都地区近地层湍流输送的观测研究[J]. 应用气象学报,12(1):1-13. Bian L G, Lu L H, Cheng Y J, et al, 2001. Turbulent measurement over the southeastern Tibetan Plateau[J]. J Appl Meteor Sci, 12(1):1-13. (in Chinese)
- 陈红岩,胡非,曾庆存,2000. 处理时间序列提高计算湍流通量的精度[J]. 气候与环境研究,5(3):304-311. Chen H Y, Hu F, Zeng Q C, 2000. Dealing with imperfect data to improve estimation precision of turbulence flux[J]. Climatic Environ Res, 5(3):304-311. (in Chinese)
- 陈明,洪钟祥,1993. 大气边界层观测资料的质量控制方案研究及其应用[J]. 大气科学,17(1):97-105. Chen M, Hong Z X, 1993. The quality controlling method and application of the original data of the boundary layer[J]. Chinese J Atmos Sci, 17(1):97-105. (in Chinese)
- 金莉莉,何清,李振杰,等,2016. 乌鲁木齐市气象塔梯度观测资料质量控制与处理[J]. 气象,42(6):732-742. Jin L L, He Q, Li Z J, et al, 2016. Quality control method and treatment for Urumqi meteorology tower gradient observation data[J]. Meteor Mon, 42(6):732-742. (in Chinese)
- Mizutani K, Yamanoi K, Ikeda T, et al, 1997. Applicability of the eddy correlation method to measure sensible heat transfer to forest under rainfall conditions[J]. Agr Forest Meteor, 86:193-203.
- 林雯,方平治,雷小途,等,2016. 台风条件下不同时距最大平均风速之间的转换系数研究[J]. 热带气象学报,32(1):42-50. Lin W, Fang P Z, Lei X T, et al, 2016. Study on the converting coefficients of maximum wind speed with different averaging periods for landfall typhoons[J]. J Trop Meteor, 32(1):42-50. (in Chinese)
- 刘熙明,2006. 非均匀边界层结构和湍流通量特征的研究[D]. 北京:中国科学院大气物理研究所. Liu X M, 2006. Structures and turbulent fluxes of atmospheric boundary layer over heterogeneous surface[D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences Institute of Atmospheric Physics.
- 宋丽莉,毛慧琴,汤海燕,等,2004. 广东沿海近地层大风特性的观测分析[J]. 热带气象学报,20(6):731-736. Song L L, Mao H Q, Tang H Y, et al, 2004. Observation and analysis of Guangdong coastal gales in the near-surface layer[J]. J Trop Meteor, 20(6):731-736. (in Chinese)
- Vickers D, Mahrt L, 1997. Quality control and flux sampling problems for tower and aircraft data[J]. J Atmos Ocean Technol, 14(3):512-426.
- 吴进,李琛,于波,等,2018. 两类短时强降水天气边界层气象要素变化特征[J]. 气象,44(7):902-910. Wu J, Li C, Yu B, et al, 2018. Study on the variation characteristics of meteorological elements in the boundary layer of two types of short-time heavy rainfall[J]. Meteor Mon, 44(7):902-910. (in Chinese)