

三类测风仪测量近地层小尺度风场比较

戴铁丕

林有恒

(南京气象学院)

(兰州气象学校)

提 要

用LSF1-1型测风仪测量一分钟一次瞬时风速记录分析表明,该测风仪可以粗略测量比较长周期的风速脉动变化,但精度较差。FL和Dyne测风仪由于它们灵敏度低,精度不够,不太合适测量小尺度风场的脉动变化。

一、引 言

测量风速脉动变化通常要求采用启动风速小,惯性小,灵敏度高,即静态和动态特性好的热线微风仪、超声风速仪(1)、热膜探测器,矢量风标等(2)仪器。山东海洋气象仪器研究所研制的LSF1-1型螺旋桨式遥测风向风速仪是静态和动态特性较佳的一种测风仪,能否粗略测量比较长周期的风速脉动变化?精度如何?为此目的,我们尝试采用了安装在厦门气象台海拔139.4m小山上的LSF1-1型测风仪,进行一分钟一次的风速观测,同时利用Dyne、FL测风仪进行了对比观测,以便分析比较,三类测风仪安装位置、高度和相隔间距均符合规范要求。

文中采用了方差和方差谱等分析方法,经研究取得了一些结果和经验。

二、三类测风仪概述

1. LSF1-1型螺旋桨遥测风向、风速仪由风向、风速传感器,显示记录器,电源和电缆3部分组成。在显示记录部分采用微型计算机,经计算后直接输出风向、风速数字信号,可分别显示在屏幕上和打印在纸带上。

仪器测定风速的原理是:螺旋桨始终迎

着风的来向,在尾翼作用下,自动跟踪风向变化,其转速与风速成正比,通过测定其转速即可求出对应的风速。其数学表达式为

$$N = B \cdot V \cdot \sin \theta \quad (1)$$

式中 N 为螺旋桨叶转动次数, B 为仪器常数,其值有 $B = \frac{1}{2\pi r}$, r 为转轴到叶片中心的距离, V 为瞬时风速, θ 为桨叶的迎风角。

该仪器的重要特点是测定风向、风速的感应部分为同一构件,可对风矢量作准确且同步测定。另外它还具有桨叶的转数和风速之间线性关系好,启动风速小,惯性和距离常数小等优点。

2. FL型电接风向风速计是一种由感应器,指示器,记录器及电缆组成的有线遥测仪器,目前已在台站使用近20年。其测风原理是,在风力作用下,风杯绕转轴旋转,风杯中心线速度与瞬时风速成正比,通过测定风杯中心线速度,即可求得相应的瞬时风速。其数学表达式为

$$V = k \cdot v \quad (2)$$

式中 V 为瞬时风速, k 为仪器常数,由风洞实验确定, v 为风杯中心线速度。

3. Dyne风向风速计由感应器、压力传送装置和记录部分组成。其测风原理为利用流体的全压力与静压力之差来测定风速。

数学表达式为

$$V = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho(1+c)}} \quad (3)$$

式中 V 为瞬时风速, Δp 为气流全压力与静压力之差, c 为小于1的仪器常数, ρ 为空气密度, 为了测量方便, 该仪器在构造上由 Δp 转换成水位差

$$\Delta h = \frac{\Delta p}{\rho_w g} \quad (4)$$

来表示的。式中 Δh 为水位高度差, ρ_w 为水的密度, g 为重力加速度。由(3)式可见, 风速 V 值与空气密度 ρ 有关, 因此用该法测定风速必需进行空气密度订正。另外, 与LSF1-1型测风仪一样, 该测风仪测定风向、风速的感应元件也为同一个元件。

三、资料来源和预处理

取厦门气象台1987年9月24日8:00—10:00, 14:45—15:45两时段LSF1-1、FL型测风仪上每分钟瞬时风向、风速记录。Dyne测风仪每分钟瞬时风向、风速资料采用文献[3]所述方法, 从自记纸上求出, 其基线及密度订正按下述方法进行。

基线订正: 由于所用达因测风仪自记录实际基线低于自记纸0线, 幅度为 $0.2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 故在求取各时10分钟平均风速时首先加上此差值。

密度订正: 利用各定时的测绘报观测的气温 T , 本站气压 P , 由下式

$$\alpha = \sqrt{\frac{P_0}{T_0}} \sqrt{\frac{T}{P}} = 1.88 \sqrt{\frac{T}{P}} \quad (5)$$

求出相应的密度订正系数 α 。(式中已取 $P_0 = 1010.6\text{hPa}$, $T_0 = 288\text{K}$) 然后用插值法再由下式

$$V = \alpha V_0 \quad (6)$$

求出经密度订正后的相应各分钟2秒钟平均的瞬时风速。式中 V 是气压为 P 、温度为 T 时的瞬时风速, V_0 则为气压是 P_0 、温度为 T_0 时的瞬时风速。

为了大致了解小尺度风场风速脉动变化, 点绘了风速随时间变化(图1)。其中

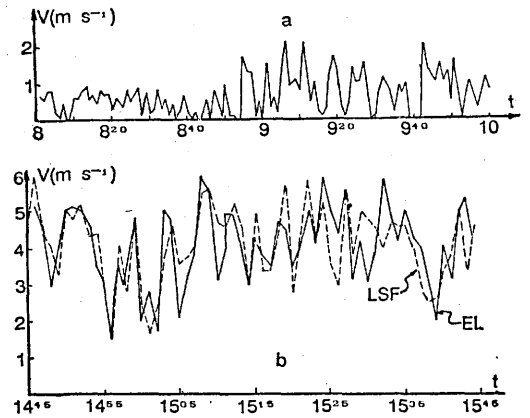


图1 风速随时间变化

图1a为1987年9月24日8:00—10:00风速随时间变化记录, 由LSF1-1型测风仪测量得到。因为当时风速较小, 在绝大部分时间里FL测风仪没有反映, 所以FL测风仪资料未点绘。图1b则为下午14:45—15:45风速随时间演变的情况。由于当时风速已较大, 两类测风仪每分钟瞬时风速资料都作了点绘。可以看到无论是图1a还是图1b, 不同分钟风速随时间变化均非常迅速。在较大的时间尺度(几十分钟)慢变化背景上叠加了短时间尺度(约几分钟)变化较快的小尺度涡旋。而且长周期涨落振幅大于短周期涨落振幅。

必须指出, 在我们所取资料中, 翻阅天气图, 确证那天无大尺度天气系统影响, 一致吹偏南风, 又取资料时间较短, 可属于平稳湍流, 因此该资料可以研究小尺度风场的风速涨落[4]。另据文献[5]报导, 当湍流度小于0.4时, 对于水平均匀流场, 水平速度模涨落(即本文所引用的资料)的统计量与速度分量涨落统计量数值上近似相等。

四、研究方法

1. 方差谱分析

自然界风速是一种振幅和周期不断变化

的脉动量,测风仪所测风速是这种脉动量的反映。应用谱分析方法,可将测风仪所测风速变化周期进行分解,使其成为许多周期性波动的组合。这种波动性周期,特别是主要的波动周期,既反映了外界水平风场风速脉动变化特征,又检验了测风仪反映周围大气风速周期性脉动变化能力,即可以体现测风仪动态特性优劣〔2〕。若同时对三种测风仪进行方差分析,就可以比较三类测风仪的性能。

进行方差谱分析,可对任何周期 T 变化的时域信号 $f(t)$ 通过傅里叶变换变成频域信号,因为在满足狄原条件,当 $f(t)$ 的数学期望为0时可得

$$f(t) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos \omega_k t + b_k \sin \omega_k t) \quad (7)$$

式中 $\omega_k = \frac{2k\pi}{T}$,是第 k 个谐波的圆频率,

a_k 与 b_k 称为傅里叶系数,它们可表示为

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) dt$$

$$a_k = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \cos \omega_k t dt$$

$$b_k = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \sin \omega_k t dt$$

对某一个实测气象要素时间序列(本文中为一分钟观测一次瞬时风速),设容量为 n ,记为 x_1, x_2, \dots, x_n ,则计算方差谱傅里叶系数公式又为

$$a_k = \frac{2}{n} \sum_{t=1}^n x_t \cos \frac{2k\pi}{n}(t-1) \quad (8)$$

$$b_k = \frac{2}{n} \sum_{t=1}^n x_t \sin \frac{2k\pi}{n}(t-1)$$

则不同波数 k 的方差谱值有

$$S_k^2 = \frac{1}{2} (a_k^2 + b_k^2) \quad (9)$$

为了据方差谱决定主周期,本文采用临界值比较法检验〔6〕。该法的基本思路为利用某一周期的波动振幅值是否大于某一信度下的临界振幅值。例如,在通常显著水平 $\alpha = 0.05$ 下临界振幅值为

$$A'_{0.05} = 2\sigma [\ln(20k)/n]^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

式中 σ 为气象时间序列样本标准差估计, $A'_{0.05}$ 为从 n 个样品点中计算 k 个波数的信度0.05的临界值。波数为 k 的最大振幅值 A' 可由下式计算

$$A'_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2} \quad (11)$$

若计算得 $A'_k > A'_{0.05}$,即可认为对应的周期为主要周期。

2. 样本标准差 σ 和自相关系数 $R(\tau)$

从统计意义上讲,该统计量是刻划观测值频率分布离散程度的重要特征量。本文研究的是风速变化,据所取资料,已基本排除了天气尺度和中尺度的慢变化,因此在 T 时间间隔,沿固定平均风向(本文资料为偏南风)的平均风速为

$$\bar{U} = \frac{1}{T} \int_{t-\frac{T}{2}}^{t+\frac{T}{2}} u(t) dt$$

而

$$U'(t) = n(t) - \bar{n}$$

就代表湍流时涨落,其标准差

$$\sigma = \left[\overline{u'^2(t)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

即代表小尺度风场风速脉动变化,式中 $u(t)$ 是 t 时间沿平均风向的风速分量, σ_n 为沿平均风向的风速标准差。脉动变化强度一般定义为

$$i_u = \frac{\sigma_k}{n} \quad (13)$$

因为相关系数反映湍流尺度的大小。自相关系数 $R(\tau)$ 的曲线形状还代表了湍流的结构(4)。所以研究自相关系数可了解湍流尺度。在风速方向不变的情况下, 时间自相关系数可定义为

$$R(\tau) = \frac{u'(t)u'(t+\tau)}{n^2} \quad (14)$$

式中 τ 为滞后的时间。

五、结果分析

1. 利用 (7)、(8)、(9) 式即可得到三类测风仪波数 k 的傅里叶系数以及方差谱值 S_k^2 。据 $T_k = \frac{n}{k}$, 也可求得相应周期 T_k 。若以波数 k 及相应周期 T_k 为横坐标, S_k^2 为纵坐标, 即可绘制方差谱 (图2和图3)。由图2可见, 不同波数 k , 即不同小尺度风场

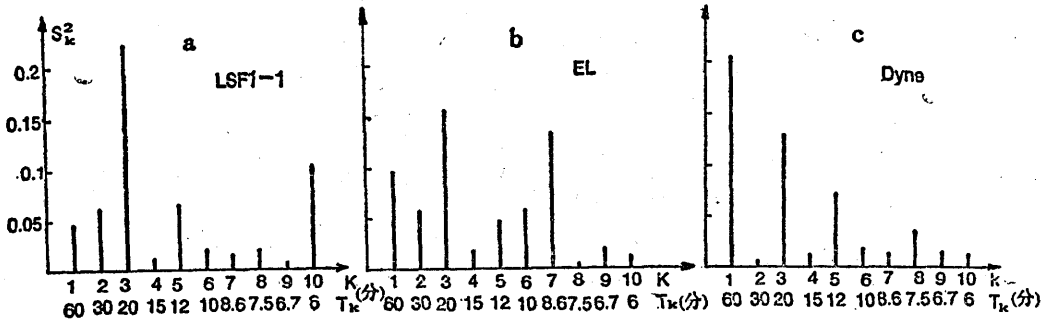


图2 瞬时风速方差谱 (厦门)

1987.9.24.14⁴⁵—15⁴⁵

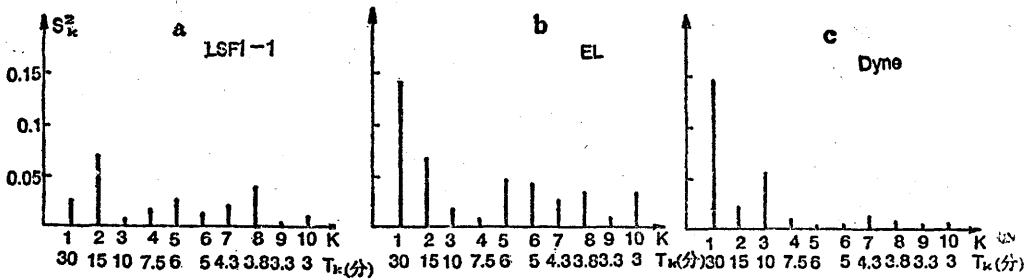


图3 瞬时风速方差谱 (厦门)

1987.9.24.8—10时

脉动和振动周期十分清楚。这就说明了总的波动确实可以分解成各种大小尺度不同的振动周期, 且其方差 S_k^2 (或能量) 相当丰富。以 LSF1-1 型测风仪来说, 当 $k=3$, 即 $T_k=20$ 分, 为主要风速振动周期, 其方差 S_k^2 值为 0.218。此外, $k=10$, $T_k=6$ 分, 风速脉动周期方差值也相当可观, 其值为 0.114。其它脉动和振动周期也有一定大小的能量。据

文献[4]论述, 前者实际上是介于中、小尺度之间的振动, 而后者则可认为是小尺度振动中的湍流脉动。对其它两类测风仪, $T_k=20$ 的主要风速振动周期与 LSF1-1 型测风仪是完全一致的。但其它风速振动和脉动周期与 LSF1-1 型测风仪不太一致。

图3是1987年9月24日上午8—10时每分钟一次风速资料的方差谱, 由图3可见: 对

LSF1-1型测风仪主要振动和脉动周期为 $k=2$ 、 $T_k=15$ 分，其次为 $k=8$ 、 $T_k=3.8$ 分。但对EL, Dyne测风仪测得的振动和脉动周期与上述不同。显然 $T_k=3.8$ 分也可认为是小尺度振动。

综合图2和图3, LSF1-1型测风仪与EL, Dyne测风仪瞬时风速方差谱振动和脉动周期不相同, 可能是由于三类测风仪风速感应元件的静态和动态特性不同所引起 (τ) 。

2. 由于EL型测风仪启动风速大, 测风速灵敏度欠佳, 又由于Dyne测风仪精度不够, 所以仅取LSF1-1型测风仪测得的 $14^{45}-15^{45}$ 每分钟风速资料利用(12)、

(13)式计算了小尺度风场风速脉动变化和湍流强度。结果为风速脉动变化 σ_n 值为1.02, 而湍流强度则为0.25。这个数值与文献[2]、[4]所述基本一致。

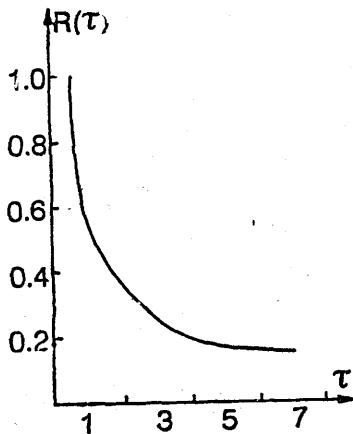


图4 $R(\tau)$ 值随 τ 值变化

同样用LSF1-1型测风仪观测的 $14^{45}-15^{45}$ 每分钟风速资料用(14)式计算了 $\tau=1, 3, 5, 7$ 时的 $R(\tau)$ 值如图4所示, 可见 $R(\tau)$ 值随 τ 值增加而减少, 还说明有一个几分钟尺度大小的涡旋存在, 使 $u'(t)$ 和 $u'(t+\tau)$ 愈来愈不相关。可以预料若有较大的中尺度系统存在的话, τ 值是不会减少那么快的。可看到这里的分析结果与前面谱分析极为一致。从而也进一步指证了LSF1-1型测风仪可以大致测量比较长周期的风速脉动变化。

3. 在资料分析中发现LSF1-1型测风仪启动风速小, 因此测量小风速较好。但却发现, 当风速超过 $5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 其测量值比FL和Dyne测风仪系统偏小。厦门气象台观测组作过统计, 在12个月时间里, Dyne型测风仪记录大风次数为31次, 在相应时段里, LSF1-1型测风仪仅观测到大风6次。经分析, 这可能由于LSF1-1型测风仪每2秒钟取样一次, 在此时段内, 可能“丢掉”了最大瞬时风速引起的。由于本文主要研究的是小尺度风场脉动变化, 所以这种误差不存在。

4. 为了比较三类测风仪性能, 附表列出了它们的一些参数, 以便比较。可见由于LSF1-1型测风仪动、静态特性好, 为此, 能粗略的反映风速较高频率变化, 测量出较大尺度湍流是可能的。EL, Dyne型测风仪动态特性参量未见报导, 但从实际比较分析可知, 测小尺度风场结构是有困难的。

附表 三类测风仪性能比较

类别 特性 仪器型	启动风速(米/分)	瞬时风速测量范围 (米/秒)	测风向范围 (分辨率)	风向不感角	距离 常数 (米)	阻尼 比	固有 波长 (米)
LSF1-1	<1.0	1.0—70.0	$0^\circ-360^\circ$ (5°)	1.0米/秒时 $\leq \pm 10^\circ$	5	0.3	10
EL	1.5	2.0—40.0	16个方位 ($\pm 11^\circ 15'$)	1.5米/秒时 $\leq \pm 10^\circ$	/	/	/
Dyne	/	/	/	/	/	/	/

六、小结和讨论

1. LSF1-1型测风仪启动风速小,测量小风速、小尺度流场变化极灵敏。但随着风速增大,测量误差随之加大。EL型测风仪启动风速大,Dyne测风仪据测风速原理要进行基线和密度订正,影响测量精度,不太适合测量小风速。

2. 标准差、方差谱和时间自相关系数分析均表明用LSF1-1型测风仪可以粗略地测量比较长的周期(小于10分钟)小尺度风场的脉动变化,但精度欠佳。

3. 据LSF1-1型测风仪性能,它能测任意2秒钟平均的瞬时风速,但遗憾的是取资料时没有想到取2秒钟一次风速记录,这是本文所用资料不足之处,也可能影响分析效果。

4. 本文所作工作只是为了证实用LSF1-1型测风仪测量小尺度风场脉动变化的可行性,今后将对该仪器的测量精度作进一步研究。

5. 建议研制LSF1-1型测风仪的山东海洋仪器研究所进一步改善该测风仪性能,例如测风速时误差大的缺点。另外若能增加风速脉动变化记录装置,那就可大大拓宽该测风仪的使用价值。

致谢: 厦门气象台李炳元同志协助取资料,在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] 中国科学院大气物理研究所,北京325m气象塔测量系统,科学出版社,1983,P50—59。
- [2] SethuRaman.S.and Brown.R.M, A comparison of turbulence measurements made by a hat-film probe,a bivance, and a directional vane in the atmospheric surface layer.Jour of appl.meteo.1976.15.P138—144。
- [3] 中央气象局编,地面气象观测规范,气象出版社1979年.P56—59.P147—148。
- [4] 王永生等,大气物理学,气象出版社,1987年.P127—447页。
- [5] 陈家宜等,湍流大气中水平风速模涨落的相关,气象学报.1963年.33,Vol4,P426—434。
- [6] 黄嘉佑,李黄,气象中的谱分析,气象出版社,1984年3月,P1—128。
- [7] Peter, L.F,Measuring the dynamic performance of wind vanes,Jour of Appl.Meteo. 1981,Vol.22,P588—594。

A comparison of small scale wind field measurements by three types of anemometers in the near surface layer

Dai Tiepi

Lin Youheng

(Nanjing Institute of Meteorology)

(Lanzhou School of Meteorology)

Abstract

An analysis of the instantaneous wind speed measurements made once every minute by LSF1-1 type anemometer has shown that such kind of instrument can be used to measure the wind speed fluctuation in a longer period while its accuracy is quite low .EL and Dyne anemometers are not suitable for measuring wind speed fluctuation in a small-scale wind field because of their low precision and sensitivity.