

涡动相关通量观测指导手册

王介民 编写

(2008年3月初稿, 2009年12月第3次修订)

涡动相关通量观测系统是当前各通量网站及其它微气象站最主要的动量、能量、水汽和二氧化碳等通量观测设备。为了保证各观测站的资料质量, 实现资料的一致性和可比性, 编写了本手册。编写中参考了美国通量观测网的涡动相关通量观测指南和欧洲通量网及有关专家的推荐文件等。

主要内容如下:

1. 测量仪器与原理
2. 数据采集系统
3. 观测站点选择与仪器安装
4. 涡动相关通量计算方法
5. 仪器维护与检定方法
6. 质量保证和质量控制
7. 通量资料格式
8. 参考文献
9. 附录
 - 1) 常用物理常数及计算公式
 - 2) 推荐的 EDIRE 处理程序

1. 测量仪器与原理

涡动相关通量系统基本设备主要包括一个三维超声风速温度计 (SAT) 以及一个快速响应红外线气体分析仪 (IRGA)。目前可供选择三维超声风速温度计的有 Campbell, Gill Instruments, R.M. Young, ATI, Metek, 以及 Kaijo-Denki 等厂家生产的。由于不同厂家传感器结构上的差异, 对环境流场的扰动略有不同, 所测声虚温上也有 5%-10% 的差别。但总的说来每种仪器都有其优点和缺点; 经过必要修正后的风、温等数据仍基本一致。国内近年应用较多的是 Campbell 开路涡动相关通量系统, 包括三维超声风速温度计 CSAT3 和红外线气体分析仪 LI-7500, 以及相匹配的数据采集系统和预处理软件等。

1.1 三维超声风速温度计原理

三维超声风速温度计的原理如图 1 所示。如声速为 c , 收发二探头间声程为 d , 沿声程的风速分量为 V_d , 测得的顺风 and 逆风向声传播时间分别为 t_1 和 t_2 , 则有 $t_1 = d/(c - V_d)$, $t_2 = d/(c + V_d)$ 。 V_d 可由下式计算:

$$V_d = \frac{d}{2} \left(\frac{1}{t_2} - \frac{1}{t_1} \right) \quad (1)$$

以常用的 CSAT3 为例 (图 1), 已知三对探头的几何配置, 由测得的三个沿风程的风速, 即可计算 ‘超声坐标系’ (见后) 三个轴向的风速分量及总的风矢量。注意: 此类风速计测量的是探头间

的声传播时间，故算得的风速是观测体积（声程）的平均风速。

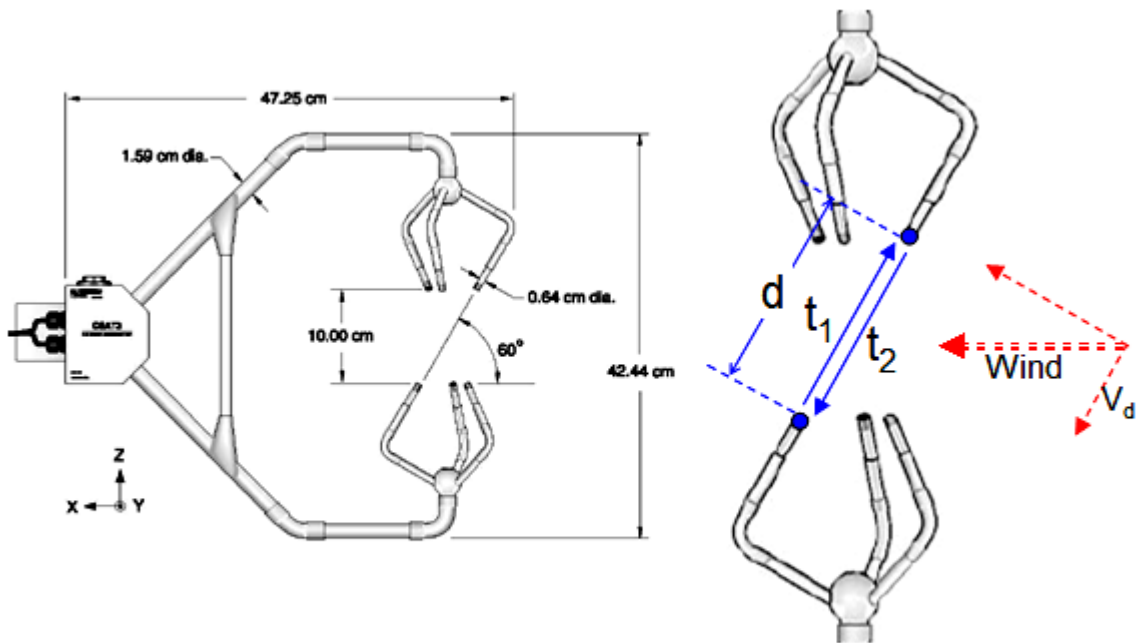


图1. 超声风速温度仪（CSAT3）探测原理

温度值则由声速 c 换算。因

$$c = \frac{d}{2} \left(\frac{1}{t_1} + \frac{1}{t_2} \right) \quad (2)$$

而声速与空气温湿度等有关；物理上有

$$c = 20.067 \sqrt{T(1 + 0.3192 \cdot e/P)} = 20.067 \sqrt{T_s} \quad (3)$$

其中， T 为空气温度 [K]， e 和 P 分别为水汽压和气压。超声仪输出的实际上是 T_s [K]，

$$T_s = T(1 + 0.3192 \cdot e/P) \quad (4)$$

它称为超声虚温。注意，空气的虚温为 $T_v = T(1 + 0.378 \cdot e/P)$ ，二者只有微小差别。

1.2 红外气体分析仪原理

以常用的快速 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 气体分析仪 LI-7500 为例，其原理如图 2 所示。这是一个开路系统；空气中的光程约为 12.5 cm。它采用在近红外波段二氧化碳和水汽的吸收带（分别为 $4.26 \mu\text{m}$ 和 $2.59 \mu\text{m}$ ），测量空气中的二氧化碳和水汽浓度；浓度单位可以是 mmol/mol ， mmol/m^3 或 g/m^3 等几种。注意：如果气体分析仪测得的浓度单位是 g/m^3 或 mg/m^3 ，则通量计算中必须做由于空

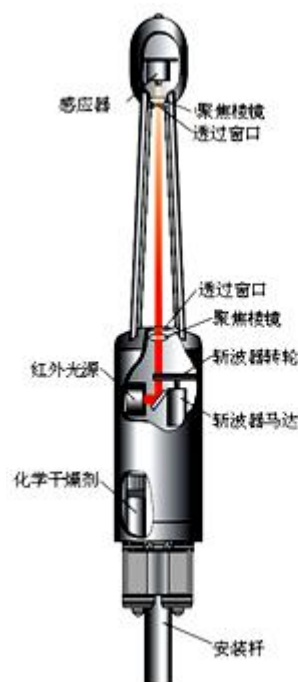


图2. 红外气体分析仪 (LI-7500)

气温度和湿度变化引起的‘密度变化’订正（见后）。此外，与超声仪一样，开路气体分析仪测得的是整个光程上的 CO₂ 和 H₂O 的浓度平均值；特别是，气体分析仪与超声仪在安装时的间距（一般 20~40 cm），会造成通量测量中较严重的高频损失。

1.3 涡动相关（涡动协方差）通量观测

涡动相关通量系统一般以 10~20 Hz 的采样频率采集传感器高度上的水平风速 (u, v [m/s])，垂直风速 (w [m/s])，温度 (T ，实际上是超声虚温 T_s ，[K]或[°C])，水汽浓度 (q ，[mol·water/mol·air] 或 [g/m³]等) 和 CO₂ 浓度 (C ，[mol·CO₂/mol·air] 或 [mg/m³]等)。在一定的‘取平均时间’（如 30 min）内，某标量 x [kg/kg] 的湍流输送通量可由下式计算：

$$Q_x = \overline{w(\rho x)} = \overline{\rho w x} \quad [\text{kg/m}^2/\text{s}] \quad (5)$$

其中，横上线表示时间平均。 ρ [kg/m³] 为空气密度，设在此‘取平均’时段内不变。将测得量做雷诺分解，即分为平均量和脉动量两部分：

$$w = \overline{w} + w' \quad (6)$$

$$x = \overline{x} + x' \quad (7)$$

则 (4) 式变成

$$Q_x = \overline{\rho w x} + \overline{\rho w' x'} = \overline{\rho w' x'} \quad (8)$$

其中已假设垂直风速的时间平均值为零 ($\overline{w} = 0$)。这样，动量通量（即切应力 τ ），摩擦速度 u_* ，感热通量 (H)，潜热通量 (λE) 和 CO₂ 通量 (F_C) 可分别由以下各式计算：

$$\tau = -\rho u_*^2 \quad [\text{N/m}^2] \quad (9)$$

$$u_* = \left(\overline{u'w'^2} + \overline{v'w'^2} \right)^{1/4} \quad [\text{m/s}] \quad (10)$$

$$H = C_p \rho \overline{w' T'} \quad [\text{W/m}^2] \quad (11)$$

$$\lambda E = \lambda \rho \overline{w' q'} \quad [\text{W/m}^2] \quad (12)$$

$$F_C = \rho \overline{w' C'} \quad [\text{kg/m}^2/\text{s}] \quad (13)$$

式中，空气密度 ρ [kg/m³]，空气定压比热 C_p [J/kg/K] 和蒸发潜热 λ [J/kg] 分别由以下各式计算（其中， P [hPa] 为气压， T_a [°C] 为气温， q [kg/kg] 为比湿， T_0 [°C] 为地表温度）：

$$\rho = 100 \times P / (287.1 \times (T_a + 273.16) \times (1 + 0.61 \times q)) \quad (14)$$

$$C_p = 1004.7 \quad (15)$$

$$\lambda = (2.501 - 0.00237 \times T_0) \times 10^6 \quad (16)$$

注意：湿度和 CO₂ 浓度的输出单位可能随仪器不同而不同。(12) 式中的 q 和 (13) 式中的 C 的单位分别是‘比湿’和‘比浓度’ [kg/kg]。如果像现在一些台站常用的， q 的单位为 [g/m³]， C 的单位为 [mg/m³]，则

$$\lambda E = \lambda \overline{w'q'} \quad [\text{W/m}^2] \quad (12a)$$

$$F_c = \overline{w'C'} \quad [\text{mg/m}^2/\text{s}] \quad (13a)$$

实际通量计算中，还有坐标旋转等一系列重要修正（见第4节）。

2. 数据采集系统

采样频率要足够高，以包含对通量有贡献的较小湍涡。一般情况下，可取采样频率为 10Hz；但有时需要根据具体地区的一些特点做调整。例如，观测高度低时，对通量有贡献的最小湍涡尺度较小，采样频率应当高些（平坦草地上观测高度为 2~5 米时，采样频率一般取 10~20Hz；而森林冠层上的观测，如观测高度为 20 米，则采样频率可为 5~10Hz）。

对于数据采集硬件的选择并不直接影响数据质量，只要硬件配置足够可靠并有足够分辨率采集各有关信号的高频脉动，有一定的运算能力进行某些资料的预处理以便于即时的监视，且有足够的存储量可以对原始湍流数据做较长期的积累就可以了。目前大都采用 Campbell 的 CR23，CR1000，或者 CR5000 采集器。

3. 观测站点选择与仪器安装

涡动相关方法最初建立在平坦地形、植被粗糙度较低的下垫面的基础上。由于地形起伏地区各种植被下垫面与大气间的能量和物质通量交换的重要意义，现在大量通量站都建立在较复杂的环境中。一般来说，观测站点的选取主要取决于具体所研究的科学问题；但有一些总的原则，包括对观测资料质量的要求，在所有情况下都应特别注意。

观测塔的位置，应使在尽可能多的时间内，气流主要来自希望测量的下垫面；并要求有足够长的上风距离（fetch）。为此，需要对盛行风先做出分析，以保证所观测的通量是来自希望研究的下垫面类型。一个极端的例子是，某站点周围具有两种不同的森林植被类型，每天风周期性地由白天从一种类型的植被吹向另一种，夜间则正好相反；那么该站点的观测得到的通量资料的日平均将毫无意义。这种极端的情况虽然极少出现，但许多站点都会有微妙的风向变化，在数据分析时需要做仔细考虑。此外，所有观测系统都可能受到水平平流的影响；需分析平流因素对通量测量的影响时段和影响程度。如果地形十分复杂，平流是一个必须关注的因子。一般来说，观测塔的位置应该选在观测区域内地形相对较平坦的地方，以减少平流的影响。对每个站点，还需要进行足迹（footprint）分析，以确定不同稳定度条件及风速、风向下的测量通量的源区。这对数据的后处理和综合分析会提供非常有价值的信息（Foken 和 Leclerc, 2004, Schmid, 1994, Schuepp 等 1990）。

观测塔应建立在受到毗邻的生态系统干扰最小的地点，但不能以塔的安全性和可靠性作为牺牲。应根据塔制造商的建议，对观测塔进行定期检查和预防性维修，以保证站点的可靠性和工作人员的安全。许多地方，常有雷电发生。需采取各种措施，以尽量减少仪器损坏和数据丢失的可能性。观测塔需要有妥善的接地，牵绳或支撑等。

仪器的妥善安装和维护，并保证观测数据的准确，比选择三维超声风速温度计的制造厂商更为重要。应仔细阅读仪器说明资料，把三维超声风速温度计安装在牢固和稳定的支座上，探头朝

向主导风向；并尽量减少由于塔结构本身形成的流场干扰或扭曲带来的数据失常。三维超声风速温度计应保持清洁，及时清理尘垢、鸟的粪便以及积雪和霜冻等。注意，超声风速温度计在声程受阻（如下雨）或潮湿、大雾等天气无法正常工作，在有霜冻时可能需要进行加热。随着长期连续使用，声波传感器可能需要更换。三维超声风速温度计应保持水平（超声坐标系的 z 轴保持在垂直方向），以减少风向变化带来的不确定性。

测量二氧化碳和水汽浓度快速变化的红外气体分析仪，有闭路式和开路式两种。当前国内多用 LI-7500 开路式气体分析仪，系统轻小，耗能低，高频响应好，信号相对于超声仪的滞后小；但与闭路气体分析仪相比有易受天气影响，无法进行自动化例行校准等缺点。

开路系统如 Li-7500 的探头可装在超声探头附近，且尽量不妨碍流场；探头可与水平成 15° - 30° 角，以减少雨水或露水对探测窗口的影响。注意定期用专用装置做二氧化碳浓度标定。雨天等恶劣天气时仪器无法正常工作。计算二氧化碳和水汽通量时要加入密度变化订正(WPL 订正，见下)。

4. 涡动相关通量计算方法

尽管涡动相关通量观测仪器（特别是传感器结构）及其野外应用已有了很大的进步，通量的计算仍然需要一些修正过程。如已由观测系统得到 $10-20\text{Hz}$ 的 u, v, w, T_s, q, C 等湍流原始记录，且取平均时间为 30min ，则通量计算过程大致如下：

- 1) 检查 u, v, w, T_s, q, C 等原始记录的异常情况；去除‘野点’；
- 2) 计算各量的平均值 ($\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}, \bar{T}_s, \bar{q}, \bar{C}$)；
- 3) 坐标旋转（倾斜修正）；
- 4) 对水汽和二氧化碳单位做必要的校正或转换（一般为浓度， g/m^3 或 mg/m^3 ）；
- 5) 温度观测的侧风修正；
- 6) 水汽和二氧化碳相对于垂直风速 (w) 的时间滞后修正；
- 7) 计算 30min 统计量 ($\rightarrow \sigma_u, \sigma_v, u_*, \overline{w'T_s'}, \overline{w'q'}, \overline{w'c'}$ 等)；
- 8) 感热通量的超声虚温（湿度影响）修正；
- 9) 水汽和二氧化碳通量的 WPL 修正（空气密度脉动修正）；
- 10) 大气稳定度计算 ($\rightarrow z/L$)
- 11) 频率响应修正；
- 12) 最终结果：感热、潜热、 CO_2 通量，湍流参数 u_* ， z/L 等。

不同的数据处理软件可能在以上修正计算中有所不同，带来处理结果的某些差异。我们这里推荐采用 EDIRE 软件(<http://www.geos.ed.ac.uk/abs/research/micromet/EdiRe>)。EDIRE 带有多种处理方法选择，包括以上 1~12 等各种，并可根据需要改变或加入新的计算公式。请参看有关教程及帮助文件。

以下仅对几个需要注意的问题加以说明：

4.1 野点去除

湍流原始资料中的野点（大的瞬发噪音）可能对方差、协方差值产生明显影响。野点由如下原因产生：1) 环境因子,如雨、雪、尘粒等对传感器声光程的干扰，瞬间断电等，称‘Hard spikes’；

2) 电子电路, 如 A/D 转换器, 电缆(特别是长电缆), 电源不稳定等, 称 ‘Soft spikes’。

对 ‘Hard spikes’, 一般 CSAT3 或 LI-7500 会出现异常标志 ($diag \neq 0$), 可直接排除。其它野点判别与去除方法, 多根据 Hoistrop(1993) 或 Vikers & Mahrt (1997) 等的方法进行。

对 30 min 资料, 一般野点数少于 10~100。野点过多时, 剔除该时次。

Edire 中所用 ‘野点去除’ 方法如下:

1) 由原始时间序列 x 求相邻点之差 Δx 的总体标准差 ($\sigma_{\Delta x}$)。逐点检查, 如某点 $\Delta x \geq n \cdot \sigma_{\Delta x}$ ($n=4\sim 6$), 则为野点。 Δx 为负值时所取的 n 值可与正值时不同。

2) 连续数 (如 5) 点都符合以上判据, 则不做 ‘野点’ 处理。

3) 为便于野点判断, 可对序列 x 做预处理, 先去除一些特大值。

一般, 在将 ‘野点’ 去除后, 将该点值用其前后相邻二点测值线性内插取代。

4.2 坐标旋转 (倾斜修正)

原始湍流资料各风速分量, 即由超声仪 (如 CSAT3) 测得的 u, v, w , 是在所谓的 ‘超声 (仪器) 坐标系’ 中, 如下图所示。

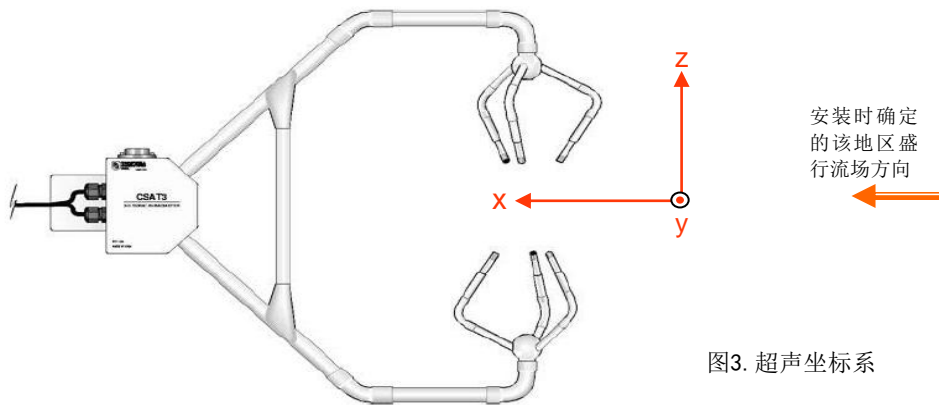


图3. 超声坐标系

坐标旋转的目的是使风矢量由超声 (仪器) 坐标系变换为自然坐标系。对水平平坦下垫面, 自然坐标系的 XY 平面与地面平行, X 轴 (u 分量) 沿 30min 时段的主导气流方向, Y 轴 (v 分量) 与 X 轴垂直, Z 轴 (w 分量) 垂直于地面。当仪器的安装杆发生倾斜, 特别在斜坡地面上观测时, 水平风 (或平行于斜坡的风) 分量会在垂直 (于地面) 方向产生分量, 严重影响 w 分量的观测精度。动量通量或摩擦速度的测定对斜坡或测杆的倾斜尤其敏感。坐标旋转就是使局地地面的法向和平均标量的梯度方向在 $x-z$ 平面, 新的 Z 轴垂直于地面, 以消除 “倾斜” 误差或湍流通量不同分量间的交叉干扰。

4.2.1 二次旋转

一般 (对每个时段资料) 进行二次旋转。第一次旋转为 $x-y$ 平面绕 z 轴旋转, 使 $x-z$ 平面与平均风向一致, 平均 $v=0$ 。如测量的风速分量用下标 m 表示, 则新坐标系的各分量为:

$$\begin{aligned} u_1 &= u_m \cos \alpha + v_m \sin \alpha \\ v_1 &= -u_m \sin \alpha + v_m \cos \alpha \\ w_1 &= w_m \end{aligned} \quad (17)$$

其中, 旋转角

$$\alpha = \tan^{-1}(\overline{v_m} / \overline{u_m}) \quad (18)$$

第二次旋转为新的 x-z 平面绕 y 轴旋转，进而使平均 $w=0$ ：

$$\begin{aligned} u_2 &= u_1 \cos \beta + w_1 \sin \beta \\ v_2 &= v_1 \\ w_2 &= -u_1 \sin \beta + w_1 \cos \beta \end{aligned} \quad (19)$$

旋转角

$$\beta = \tan^{-1}(\overline{w_1} / \overline{u_1}) \quad (20)$$

至此，平均风速 $u = U_{mean} = \sqrt{u^2 + v^2 + w^2}$ ，并沿平均流线。

过去（包括至今某些算法）还进行第三次旋转，使 $\text{cov}(v', w') = 0$ 。由于它可能给应力计算等带来更大误差，已不推荐使用。

4.2.2 ‘平面拟合 (Planar-Fit, 或 PF)’ 方法

这是由 Paw U 等（2000）和 Wilczak 等（2001）提出的一种较新的坐标旋转方法。Planar-fit 方法不是逐时段（30min）分别旋转坐标系，而是对一个较长时期（如一周），设平均风场在一个与地面平行的平面（x-y 平面）内，并确定此平面，然后将每一时次的 u, v, w 旋转到此平面上。此坐标系有时称地形跟随坐标系，包含了这一较长时段内多个风向情况，故而有更好的统计意义，且对逐次旋转可能造成的‘过量旋转’及信息丢失等有所改善。建议在小的地形起伏地区及森林下垫面采用。

Planar-fit 的具体算法参（Wilczak et al. 2001）。这里只做简单介绍：

首先，确定一个时期（如一周或更长），计算旋转之前所有观测时次各风速分量的统计值如平均值等（参（25）式）。如将坐标旋转写成矩阵形式，在 PF 旋转后的风矢量，

$$\overline{u_p} = P(\overline{u_m} - \vec{c}) \quad (21)$$

如前， $\overline{u_m}$ 为测得风矢量， \vec{c} 为一偏差量（如超声仪的‘流动畸变’常会引起一个小的正垂直风速（Dyer, 1981），但水平风速分量的偏差量即下式中的 c_1 和 c_2 相对很小可忽略不计）， P 为转换矩阵。各分量的平均量可写为，

$$\begin{aligned} \overline{u_p} &= p_{11}(\overline{u_m} - c_1) + p_{12}(\overline{v_m} - c_2) + p_{13}(\overline{w_m} - c_3) \\ \overline{v_p} &= p_{21}(\overline{u_m} - c_1) + p_{22}(\overline{v_m} - c_2) + p_{23}(\overline{w_m} - c_3) \\ \overline{w_p} &= p_{31}(\overline{u_m} - c_1) + p_{32}(\overline{v_m} - c_2) + p_{33}(\overline{w_m} - c_3) \end{aligned} \quad (22)$$

PF 旋转后的坐标系，x-y 平面与平均流线一致，z 轴与此平面垂直， $\overline{w_p} = 0$ 。各旋转角可如下求得。由（22）的最后一式，并令 $c_1 = c_2 = 0$ ，有

$$\overline{w_m} = c_3 - \frac{p_{31}}{p_{33}} \overline{u_m} - \frac{p_{32}}{p_{33}} \overline{v_m} = b_0 + b_1 \overline{u_m} + b_2 \overline{v_m} \quad (23)$$

其次，用多变量线性拟合求 b_0, b_1, b_2 。如该观测时期内，共 n 次（30 min）运行，每次各风速分量的均值为 $\bar{u}_i, \bar{v}_i, \bar{w}_i$ ；由下式求 S 最小，

$$S = \sum_n (\bar{w}_i - b_0 - b_1 \bar{u}_i - b_2 \bar{v}_i)^2 \quad (24)$$

可得：

$$\begin{aligned} nb_0 + (\sum \bar{u}_i) b_1 + (\sum \bar{v}_i) b_2 &= \sum \bar{w}_i \\ (\sum \bar{u}_i) b_0 + (\sum \bar{u}_i^2) b_1 + (\sum \bar{u}_i \bar{v}_i) b_2 &= \sum \bar{u}_i \bar{w}_i \\ (\sum \bar{v}_i) b_0 + (\sum \bar{u}_i \bar{v}_i) b_1 + (\sum \bar{v}_i^2) b_2 &= \sum \bar{v}_i \bar{w}_i \end{aligned} \quad (25)$$

解线性代数方程式（25）即可求得 b_0, b_1, b_2 。

然后，由求得的 b_0, b_1, b_2 据（23）式可得 p_{31}, p_{32}, p_{33} 等：

$$\begin{aligned} p_{31} &= \frac{-b_1}{\sqrt{b_1^2 + b_2^2 + 1}} \\ p_{32} &= \frac{-b_2}{\sqrt{b_1^2 + b_2^2 + 1}} \\ p_{33} &= \frac{1}{\sqrt{b_1^2 + b_2^2 + 1}} \end{aligned} \quad (26)$$

如(17)和(19)二式那样做二次旋转，可知 $p_{31} = \sin \alpha, p_{32} = -\cos \alpha \sin \beta, p_{33} = \cos \alpha \cos \beta$ ，进而求得：

$$\begin{aligned} \sin \alpha &= p_{31} \\ \cos \alpha &= \sqrt{p_{32}^2 + p_{33}^2} \\ \sin \beta &= -p_{32} / \sqrt{p_{32}^2 + p_{33}^2} \\ \cos \beta &= p_{33} / \sqrt{p_{32}^2 + p_{33}^2} \end{aligned} \quad (27)$$

如上所述，PF 旋转需要有一个恒定条件来确定回归面。一旦风速计被移动或调整了垂直倾斜偏差等，PF 旋转就必须依据时间变化分开多次使用。实际应用中，我们可以使用整个数据集二次采样技术和倾角的显著不一致检验来检查风速计的定位变化。

平面拟合方法不仅适用于校正超声仪的不重合现象，而且可以减少超声仪观测值的偏差量。为了获得一个可以代表局地意义风场的回归面，推荐排除掉极端风场下的观测值，如剔除风矢量大于（或小于）某一确定阈值的时次。每一个站点的阈值可能都不尽相同，需根据具体情况分析。

4.3 感热通量的超声虚温修正

如第 1 节‘测量仪器与原理’所述，超声仪输出的实际是虚温 T_s ，即与空气湿度有关。由（4）式，并令比湿为 q [kg/kg]，则有：

$$T_s = T \left(1 + 0.3192 \cdot \frac{e}{P} \right) \cong T(1 + 0.514q) \quad (28)$$

上式中代入 $T_s = \bar{T}_s + T'_s$, $T = \bar{T} + T'$, $q = \bar{q} + q'$ 等, 得到

$$T_s = \bar{T} + 0.514 \cdot \bar{T} \bar{q} + 0.514 \cdot \bar{T} q' + T' + 0.514 \cdot T' \bar{q} + 0.514 \cdot T' q' \quad (29)$$

由之, 求协方差, 逐步推导, 并利用

$$q \cong \frac{0.622 \cdot e}{P} = \frac{M_v \rho_v RT}{M_d PM_v} = \frac{\rho_v R_d T}{P} \quad (30)$$

其中, e 为水汽压, ρ_v 为 OPEC 系统观测的水汽密度 (单位变为 kg/m^3), $R_d = 8$, 进而

可得 (参 OPEC Manual, App.B):

$$\begin{aligned} \overline{w'T'_s} &= \overline{w'T'}(1 + 0.514\bar{q}) + 0.514\bar{T}\overline{w'q'} \\ &= \overline{w'T'} \frac{T_s}{T} + 0.514\bar{T}\overline{w'q'} \end{aligned} \quad (31)$$

$$\begin{aligned} &= \overline{w'T'} \frac{T_s}{T} + \frac{0.514 \cdot R_d \bar{T}^2}{P} \overline{w'\rho'_v} \\ H_s &= H \frac{\bar{T}_s}{T} + \rho C_p \frac{0.514 \cdot R_d \bar{T}^2}{P} \frac{H_L}{\lambda} \end{aligned} \quad (32)$$

式中 H_L 为实际潜热通量, λ 为蒸发潜热。所以, 最终的感热通量计算式如下:

$$H = \left[H_s - \rho C_p \frac{0.514 \cdot R_d \cdot \bar{T}^2}{P} \frac{H_L}{\lambda} \right] \cdot \frac{\bar{T}}{T_s} \quad (33)$$

注意, 有的作者采用上式的进一步近似计算对 H_s 的修正:

$$\begin{aligned} H &\approx H_s - 0.514 \cdot \bar{T}_s \cdot \frac{C_p}{\lambda} \cdot H_L \\ &\approx H_s - 0.061 \cdot H_L \end{aligned} \quad (34)$$

由之可见, 当潜热通量 $H_L = 100 W/m^2$ 时, 修正量约为 $-6.1 W/m^2$ 。

4.4 WPL 修正

对某气体成分 C (单位: 密度), 通量输送:

$$F_c = \overline{FC} = \overline{wC} + \overline{w'C'} \quad (35)$$

通常假设 $\bar{w} = 0$, 即不考虑由垂直平均流动引起的输送。但 Webb et al. (WPL) (1980) 指出, 如果空气密度有脉动, 情况不应如此。由于 \bar{w} 值很小难以实测, 可由干空气的质量守恒方程来计算:

$$\overline{w\rho_d} = \overline{w\rho_d} + \overline{w'\rho'_d} = 0 \quad (36)$$

$$\bar{w} = -\overline{w'\rho_d'}/\bar{\rho}_d \quad (37)$$

空气密度的脉动 (ρ_d') 与气温脉动 (T') 及水汽密度脉动 (ρ_v') 有关。由混合气体状态方程:

$$\rho_d' = -\mu\rho_v' - \frac{\bar{\rho}_d(1+\mu\sigma)T'}{T} \quad (38)$$

其中, μ 为干空气与水汽分子量之比, σ 为干空气与水汽的密度比:

$$\begin{aligned} \mu &= \frac{M_d}{M_v} = \frac{28.965}{18.015} = \frac{1}{0.622} = 1.608 \\ \sigma &= \frac{\bar{\rho}_v}{\bar{\rho}_d} \end{aligned} \quad (39)$$

由此,

$$\bar{w} = \frac{\mu}{\bar{\rho}_d} \overline{w'\rho_v'} + \left(1 + \mu\sigma \frac{\overline{w'T'}}{T}\right) \quad (40)$$

由此, 水汽通量:

$$E = (1 + \mu\sigma) \cdot \left(\overline{w'\rho_v'} + \frac{\bar{\rho}_v}{T} \cdot \overline{w'T'}\right) \quad (41)$$

CO₂ 通量:

$$F_c = \overline{w'\rho_c'} + \mu \cdot \frac{\bar{\rho}_c}{\bar{\rho}_d} \cdot \overline{w'\rho_v'} + (1 + \mu\sigma) \cdot \frac{\bar{\rho}_c}{T} \cdot \overline{w'T'} \quad (42)$$

由于, $\rho_d = P_a/R_dT$ 和 $\rho_v = e/R_vT$, 故有,

$$\mu\sigma = \frac{M_d}{M_v} \frac{\bar{\rho}_v}{\bar{\rho}_d} = \frac{\bar{e}}{P_a} \quad (43)$$

(38) 式可改写为 (P_a 为大气压):

$$F_c = \overline{w'\rho_c'} + \mu \cdot \frac{\bar{\rho}_c}{\bar{\rho}_d} \cdot \overline{w'\rho_v'} + \left(1 + \frac{\bar{e}}{P_a}\right) \cdot \frac{\bar{\rho}_c}{T} \cdot \overline{w'T'} \quad (44)$$

其中, ρ_c 为 CO₂ 密度, ρ_v 为水汽密度, ρ_d 为干空气密度 ($\bar{\rho}_d \approx \bar{\rho}_a$)。由 (37) 和 (38) 或 (40) 可见, 直接算得的水汽通量需加上一个感热通量修正项; 直接算得的 CO₂ 通量需加上一个水汽通量修正项和一个感热通量修正项。特别对大气痕量气体, 如 CO₂ 通量, 此修正必不可少。

4.5 频率损失修正

开路涡动相关系统观测通量时的频率损失, 包括低频损失 (较大的涡旋的贡献估计不充分) 及高频损失 (较大的涡旋的贡献估计不充分) 两部分。前者主要是由时段平均 (block average)

即取平均时间不够长及处理中有线性去趋势等引起。高频损失则主要是由传感器声程或光程引起的‘路径平均’及安装时不同传感器之间的大的间距等造成。如图 4 所示，由于间距 d ，系统可测量的涡旋尺度会大于 $2d$ 。

湍流量 $\overline{w'x'}$ 可用单边协谱 $Co_{wx}(f)$ 的频率积分表示：

$$\overline{w'x'} = \int_0^{\infty} Co_{wx}(f) df \quad (45)$$

实测流量 $(\overline{w'x'})_m$ 有频率损失影响，可表示为协谱与有关传递函数的相乘，

$$(\overline{w'x'})_m = \int_0^{\infty} T(f) \cdot Co_{wx}(f) df \quad (46)$$

对 N 个传递函数， $T(f) = \sum_{i=1}^N T_i(f)$ 。

各传递函数已有许多理论及实验研究。如 Moore (1986)：

- 取平均时间为 T_b 的 Block Average 影响为：

$$T_{T_b}(f) = 1 - \frac{\sin^2(\pi f T_b)}{(\pi f T_b)^2} \quad (47)$$

- 测风分量 (w 或 u) 的路径平均 (路径长 p) 影响为：

$$T_x(n) = \frac{2}{\pi n} \cdot \left(1 + \frac{e^{-2\pi n}}{2} - \frac{3(1 - e^{-2\pi n})}{4\pi n} \right), \quad n = \frac{f \cdot p}{u} \quad (48)$$

- 测标量 (T, H_2O, CO_2) 的路径平均 (路径长 p) 影响为：

$$T_x(n) = \frac{1}{2\pi n} \cdot \left(3 + e^{-2\pi n} - 4 \cdot \frac{1 - e^{-2\pi n}}{2\pi n} \right), \quad n = \frac{f \cdot p}{u} \quad (49)$$

- 由传感器间距 (s) 引起的影响为：

$$T_s(n) = e^{-9.9n^{1.5}}, \quad n = \frac{f \cdot s}{u} \quad (50)$$

标准情况下的湍流谱模式也有许多较成熟的理论及实验研究。如

- 稳定层结下的协谱 (Kaimal)：

$$\frac{f \cdot C_{wx}(f)}{u_* \cdot x_*} = \frac{0.88 \cdot n/n_0}{1 + 1.5 \cdot (n/n_0)^{2.1}} \quad (51)$$

$$\text{对 } uw, \quad n_0 = 0.10 \cdot [1 + 7.9 \cdot (z/L)]^{0.75}$$

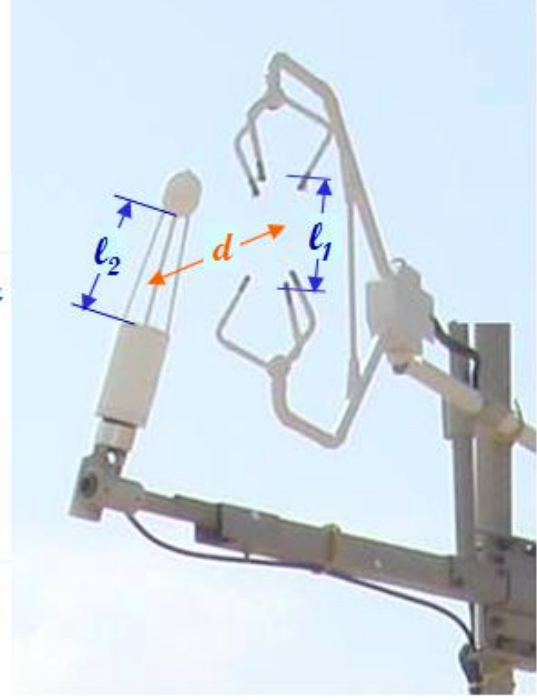


图4. 由声(光)程 l 及间距 d 引起高频损失。

对 wT 等, $n_0 = 0.23 \cdot [1 + 6.4 \cdot (z/L)]^{0.75}$

- 不稳定层结下的协谱 (Kaimal):

$$\frac{f \cdot C_{uw}(f)}{u_*^2} = \frac{14n}{(1+9.6n)^{2.4}} \quad (52)$$

$$\frac{f \cdot C_{wT}(f)}{w'T'} = \begin{cases} \frac{11n}{(1+13.3n)^{1.75}} & n < 1 \\ \frac{4.4n}{(1+3.8n)^{2.4}} & n \geq 1 \end{cases} \quad (53)$$

等, 是一组与观测高度 (z)、采样频率 (f)、平均风速 (U)、大气稳定度 (z/L) 等有关的计算协谱的方程。详细可参本手册所附文献。

进行频率损失修正, 常常可使不同通量分别增加 5% 到 30% 左右; 夜间的修正会更明显些。

5. 仪器维护、检定方法

5.1 IRGA 校正

传感器经过一定的时间后需要进行零点和量程校正。精度达到 $\pm 0.2\%$ 即可以满足一般通量测量的要求。2% 的误差会使 CO₂ 浓度产生 7ppm 或更多的不确定性, 这是不可接受的。LI-7500 的标定方法见该仪器的使用手册。

外部干燥剂及过滤器必须经常检查, 并在必要时进行更换。按要求, 不论是否被污染, 应当每 6 个月更换一次内部过滤器和干燥剂。

5.2 超声风速温度计校正

日常检查是将由超声水平风分量 (u 和 v) 计算的半小时风速和风向值, 与标准的常用风杯风速计和风向计比较, 误差应在 5% 以内。超声温度计所测温度, 经湿度订正后, 可同样与标准通风温度计比较。

5.3 温度和湿度

开路涡动相关通量观测系统一般辅以平均温度湿度计 (如 Vaisala HMP45) 观测。为避免太阳辐射影响, 其传感器需要有自然吸气式辐射屏蔽装置保护。其检定或现场校正参同类常规仪器。

5.4 辐射传感器

辐射传感器的安置必须使向上的传感器不受到塔阴影遮蔽; 向下的传感器应当高于树冠, 并依据塔的结构, 尽可能提供最远的视角, 减少塔体结构影响。辐射仪器需要至少每年校准一次。

5.5 风速和风向

最好在超声风速计之外另安装启动风速小的风杯风速风向计做辅助观测。应将仪器安置于主要障碍物的上风处。传感器应定期保养 (参同类常规仪器)。

5.6 降水

降水观测容易产生较大的不确定性。注意仪器的安装位置及于风速影响。雨量计应经常清洗并保持水平。

6. 质量保证和质量控制

质量控制（QC）是实现各台站最终通量资料产品质量保证（QA）的基础，它贯穿了从建站到最终数据产品生成的全过程。对单独一个通量站，要对该站所代表地区的陆地生态系统与大气间的相互作用过程有较好的了解，通量观测的质量控制必不可少；而对区域-全球通量网来说，各台站观测资料的质量控制，包括各通量站资料在精度和代表性上的可比性，即通过了一个统一可靠的 QC 程序，更是其工作的前提。

常规气象观测已经有较好的质量控制规范可循。但涡动相关(EC)通量观测的质量控制问题，迄今只有少数几篇文章讨论。除 EC 的普遍应用还处于初级阶段外，主要与此系统的复杂性有关。

涡动相关系统的质量控制，不仅要考虑仪器（传感器）的测量误差，还有考虑涡动相关方法建立的理论假设的满足程度。后者与观测的环境及气象条件有关，也依赖于观测点的“足迹”即源区分布；这些都涉及大气湍流的本质。大气湍流统计量的不确定性，本质上就远大于一般的平均量观测。湍流的均值、方差、协方差等的计算本身就具有多义性。涡动相关系统测得的不同大小的运动尺度中，某些尺度的大气运动可能就不是湍流的；非湍流运动对涡动相关通量计算常常带来偏差。夜间偏稳定下这些特征更为常见。非平稳性几乎普遍存在。

湍流通量资料的质量控制是一项难度较高、费时费力的工作；对初学者尤其如此。但适当的 QC 不仅会明显改善最终数据产品的质量，也会节约数据再处理及其应用的劳力和时间。

建立‘自动’判别的质量控制系统，可以大大减轻工作量。然而，人为的‘目视’检查常能在一些复杂情况下发现很有意义的特定问题。定期的、对重要资料（包括原始记录）的目视检查必不可少。

本节着重于观测资料后处理的质量控制过程，主要是对观测资料的一系列检查和筛选的过程。包括：

6.1 对原始湍流脉动（10 Hz）资料，包括对 30 min 或更小窗口的统计量的检查

6.1.1 传感器状态异常

可能由恶劣天气、人为干扰或仪器内部原因等引起。如超声仪声程被降水、尘粒等阻断或收发头故障造成的三轴声速不同、信号过大过小时，CSAT3 出现诊断标志异常（diag_cast3 ≠0）；对开路气体分析仪 LI-7500，当由镜面污染引起 AGC 超出正常范围（55~605%），或其它控制单元如斩波器（chopper）的温控单元故障时，也会有状态异常标志输出（diag_IRGA ≠0）（参仪器手册）。

6.1.2 野点

如上面第 4 节所述，实际应用中，一般首先做野点检查与去除，进而用其前后相邻测点值内插取代。如某时次野点数超出预定阈值，则该时次观测为异常。

6.1.3 瞬时值或均值超出物理上的合理范围（阈值）

分析可能原因，如 LI-7500 镜面有水滴污染时，CO₂ 异常增大，q 则出现大的负值。应舍弃明显异常的时段，不再对其做后处理。但异常时次太多时，应检查仪器故障或调。

6.1.4 偏度与峰度检验

湍流具有随机性，湍流脉动量的分布一般正态规律。对湍流正态性的检验，即偏度和峰度检验，是一些作者采用的质量控制方法之一，可检查由仪器或数采仪问题引起的异常记录 (Outliers)。

6.1.5 不连续性检验

采用 Haar 平均 (转换)，即计算前半窗口的均值与后半窗口的均值之差，检查平均值的不连续性。不连续性太大时，应将该时次剔除。

6.1.6 方差检验

各变量的方差检验是一个综合检验。许多异常 (如前述几点) 都表现为方异常大或小，故最为有用。可采用移动窗口计算方差，以确定误差时段。可以对不同变量的方差确定一些‘阈值’。但这些阈值可能随地点不同而不同。故仍然建议多用几种方法交叉检查。

6.1.7 湍流谱分析

大气湍流由不同大小涡旋组成，相应于不同时间长短 (频率谱) 的运动的迭加。对观测所得脉动时间序列的谱分析，有助于确定适当的采样频率和取平均时间。‘标准’情况下的湍流谱，已有较成熟的研究 (参 Hostrup, Kaimal 等)。分析能谱和协方谱并与‘标准谱’比较，由谱的畸变可判断资料中所含‘噪音’或其它缺陷的位置。一般低频端谱值应比谱峰值低一个量级以上；如低频段斜率不随频率减小明显减小，则可能是取平均时间偏短。如谱中包含可疑的峰值或野点，则可能是原始资料被电源和仪器噪音污染。如高频段斜率大于 $-2/3$ ，则可能是传感器响应劣化信号被平滑，或随机噪音过大。如高频段斜率小于 $-2/3$ ，则可能是原始资料含有似野点噪音或量化噪音 (A/D 转换缺位)。不必要对每次观测做谱分析，但应在仪器运行初期进行，并定期进行。

6.2 对最终产品主要是各通量 (动量通量或 u^* ，感热，潜热，CO₂ 通量等) 的检查。

有关检查主要依据涡动相关通量方法的物理基础，主要是大气定常 (平稳) 和湍流充分发展两个基本条件。此外，还有较关心的观测对被测下垫面的代表性 (即足迹或贡献源区) 问题。

6.2.1 湍流平稳性检验。

湍流平稳性 (Stationarity) 指一个观测时次内主要统计量保持稳定。非平稳情况下，在 30 min 观测时段内，一些主要统计量有变化趋势，或出现结构性变化。可采用如下方法检验 (Foken et al. 2004)：

- 将观测时段 (30 min)，分为 6 个子段，每个 5 min；
- 对 30 min 观测，计算总体协方差 CV_{30} 。
- 分别计算各子段的协方差 ($CV_1, CV_2, CV_3, CV_4, CV_5, CV_6$) 及其均值 $CV_m = \sum CV_i / 6$ 。
- 计算非平稳指数： $IST = |(CV_m - CV_{30}) / CV_{30}|$
- 根据如下 IST 分类表，进行质量判断：

表 1. IST 分类表

| 质量级 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|------------|------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|-------|
| IST 范围 (%) | 0-15 | 16-30 | 31-50 | 51-75 | 76-100 | 101-25 | 251-50 | 501-10 | >1000 |

| | | | | | | | | | |
|--|--|--|--|--|--|---|---|----|--|
| | | | | | | 0 | 0 | 00 | |
|--|--|--|--|--|--|---|---|----|--|

6.2.2 总体湍流特征检验（湍流方差相似性检验）

总体湍流特征检验，物理上，是湍流发展情况的检验。湍流充分发展情况下，Monin-Obukhov 相似理论成立，近地层大气的许多归一化无量纲参数如梯度、方差、能谱协方差等，只是稳定度 $\zeta = z/L$ 的函数。一般，参考 Foken 和 Wichura (1996)，对各变量的归一化方差做检验（称为 ITC 即 Integrated Turbulence Characteristics 检验）。归一化方差的函数形式已由许多微气象学实验给出；对各风速分量如 (45) 所示，对某标量 x 则如 (46) 所示。各系数参表 2 和表 3。

$$\frac{\sigma_{u,v,w}}{u_*} = c_1 \zeta^{c_2} \quad (54)$$

$$\frac{\sigma_x}{x_*} = c_1 \zeta^{c_2} \quad (55)$$

表 2. 近中性下的无量纲风速方差 (Thomas & Foken, 2002)

| Parameter | $-0.2 < z/L < 0.4$ |
|------------------|--|
| σ_u / u_* | $0.44 \ln(z_+ \cdot f / u_*) + 6.3 \quad z_+ = 1m$ |
| σ_w / u_* | $0.21 \ln(z_+ \cdot f / u_*) + 3.1 \quad z_+ = 1m$ |

表 3. 不同稳定度 (z/L) 范围的 c_1, c_2 常数 (Foken & Wichura, 1996)

| Parameter | z/L | c_1 | c_2 |
|------------------------|-----------------------|-------|-------|
| $\frac{\sigma_u}{u_*}$ | $0 > z/L > -0.032$ | 2.7 | 0 |
| | $-0.032 > z/L$ | 4.15 | 1/8 |
| $\frac{\sigma_w}{u_*}$ | $0 > z/L > -0.032$ | 1.3 | 0 |
| | $-0.032 > z/L$ | 2.0 | 1/8 |
| $\frac{\sigma_T}{T_*}$ | $1 > z/L > 0.02$ | 1.4 | -1/4 |
| | $0.02 > z/L > -0.062$ | 0.5 | -1/2 |
| | $0.062 > z/L > -1$ | 1.0 | -1/4 |
| | $-1 > z/L$ | 1.0 | -1/3 |

检验时，将实际计算的归一化方差值与以上‘标准’值比较，计算‘总体湍流特征指数’ (ITC)。

$$ITC_\sigma = \left| \frac{(\sigma_x/x_*)_{model} - (\sigma_x/x_*)_{measured}}{(\sigma_x/x_*)_{model}} \right| \quad (56)$$

进而得到 ITC 分类表 (Foken et al. 1999) (表 4):

表 4. ITC 分类表

| | | | | | | | | | |
|-----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 质量级 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|-----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|

| | | | | | | | | | |
|------------|------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|-------|
| ITC 范围 (%) | 0-15 | 16-30 | 31-50 | 51-75 | 76-100 | 101-25 | 251-50 | 501-10 | >1000 |
| | | | | | | 0 | 0 | 00 | |

u* 检验: 这是处理夜间通量资料时常用的一个湍流发展程度检验方法；基本原理与方差相似性检验相同。在夜间条件下，湍流主要由动力生成；u* 是最重要的湍流特征参数。u* 太小，则湍流混合太弱，通量的测量可能失去意义。有些实验工作者，对夜间观测，用给定的一个临界（阈值）u*_c 进行检验。当 u* < u*_c 时，不做分析（舍弃）。u*_c 值一般取（0.1~0.2 m/s），可根据 u* 低于一定值时 F_c（CO₂ 通量）明显减小用目视判断。此阈值常因地点而异。

6.2.3 对不同通量的检查参数及总体质量评价

对动量、感热、潜热和二氧化碳通量按以上方法做湍流平稳性检查和湍流发展性检查的参数列在表 5 中。总体质量评价（QE）是对湍流通量资料给出质量分级标志。理论基础的适用性是 QE 的基本依据。表 6 列出 Foken 等（1999）建议的总体质量标志。

表 5. 各通量检验参数

| 通量 | 湍流平稳性检验 | 湍流发展性检验 |
|-------------|------------------------------------|---|
| u_* | $\overline{u'w'}, \overline{v'w'}$ | $ITC(\sigma_u/u_*), ITC(\sigma_w/u_*)$ |
| H | $\overline{w'T_{sv}'}$ | $ITC(\sigma_w/u_*), ITC(\sigma_{T_s}/T_{s*})$ |
| λE | $\overline{w'q'}$ | $ITC(\sigma_w/u_*)$ |
| F_c | $\overline{w'C'}$ | $ITC(\sigma_w/u_*)$ |

表 6. 由湍流平稳性和湍流发展性检查确定的总体质量等级

| 总体质量级 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|---------|-----|-----|-----|-----|-----|----|----|----|---|
| 湍流平稳性等级 | 1 | 2 | 1-2 | 3-4 | 1-4 | 5 | ≤6 | ≤8 | 9 |
| 湍流发展性等级 | 1-2 | 1-2 | 3-4 | 1-2 | 3-5 | ≤5 | ≤6 | ≤8 | 9 |

根据 Foken 等（2004）对 CraboEurope 的建议，湍流通量资料的总体质量评价，可采用更简单的三类划分方法。级别 0 为高质量数据，可用于基础研究。级别 1 为中等质量数据，可用于长期观测资料处理。级别 2 为低质量数据，应舍弃。必要时对缺失值做插补。各类的判别如表 7 所示。

表 7. 简化的三类质量判别标准

| 湍流平稳性 | 湍流发展性 | 总体质量级 |
|----------------|----------------|-------|
| (1-2) 或 (<30%) | (1-2) 或 (<30%) | 0 |
| (≤5) 或 (<100%) | (≤5) 或 (<100%) | 1 |
| (≤6) 或 (>100%) | (≤6) 或 (>100%) | 2 |

6.3 通量源区分析（Footprint 分析）

Footprint 分析是检查一个通量站质量（代表性）的重要方面。在下垫面为斑块状植被分布时，常需利用 Footprint 分析了解湍流通量观测中特定传感器的‘源区’分布，包括来自感兴趣下垫面（植被）的通量贡献的大小，进而对观测数据做质量判别，或对实验方案的设计进行指导。

通量的 Footprint 与观测高度、风向风速、地面粗糙度、大气稳定度（ z/L ）等因素有关。现在已有多种模式可参考应用（Schmid, AFM, 2002），如：解析模式（Analytical）；随机拉格朗日模式（Stochastic, Lagrangian）；大涡模拟模式（Large-Eddy Simulation）；闭合模式（Closure Model）等。

对平坦均匀下垫面，任一模式都可以得到较满意的结果。复杂条件下，则因特定场景不同，多有限制。一般还只能做定性分析。

Footprint 分析是一个较专门的领域，需参阅有关文献进一步了解。

6.4 缺失数据插补（Gapfilling）

长期连续观测中，经过以上质量控制，数据筛选，数据的缺失是不可避免的。缺失数据的填充是获得年交换通量的关键问题。Falge 等（2001）讨论了三种填补碳通量数据方法的区别：平均日变化，非线性回归，以及基于气象和季节条件的查表法。很难指出哪种填补方法最好，而且，不同站点不同填补方法的效果也不是完全一样。建议采用适合于本站点的缺失资料的填补方法。亦需参阅有关文献进一步了解。

7. 通量资料格式

通过 EdiRe 软件处理得到的通量数据格式为.csv，可以直接用 Microsoft Office Excel 打开，计算所得各统计量的时间分辨率是 30min，可以直接作为基础数据用于农业、气象、水文研究。

约定格式为：站点_时间.csv

例如：Arou_flux_200807.csv

为了方便起见，现列出输出文件的描述信息：

| 变量符号 | 描述 |
|--------------|---|
| Date/Time | 日期和时间 |
| Obs_height | 观测高度[m] |
| d | 零平面位移[m] |
| Sonic_facing | 超声仪朝向 |
| SampFreq | 采样频率[Hz] |
| csat_err_pct | CSAT3 出错百分比[%] |
| co2_err_pct | 测得 CO2 浓度异常百分比[%] |
| h2o_err_pct | 测得水汽浓度异常百分比[%] |
| Spk_Ux | 对平均风速分量 U _x 做野点剔除[m/s] |
| Spk_Uy | 对平均风速分量 U _y 做野点剔除[m/s] |
| Spk_Uz | 对垂直分量 U _z 做野点剔除[m/s] |
| Spk_Ts | 对虚温 T _s 做野点剔除[°C] |
| Spk_co2 | 对 CO2 浓度做野点剔除[mg/m ³] |
| Spk_h2o | 对 H ₂ O 浓度做野点剔除[g/m ³] |
| Avg_Ux_NoRot | 坐标旋转前 U _x 的均值 |

| | |
|--------------|---|
| Avg_Uy_NoRot | 坐标旋转前 Uy 的均值 |
| Avg_Uz_NoRot | 坐标旋转前 Uz 的均值 |
| wnd_dir | 风向 |
| alpha | 坐标旋转中绕 y 轴旋转角度 |
| beta | 坐标旋转中绕 x 轴旋转角度 |
| gamma | 坐标旋转中绕 z 轴旋转角度 |
| Avg_Ux | 坐标旋转后 Ux 的均值[m/s] |
| std_Ux | 坐标旋转后 Ux 的标准差[m/s] |
| Avg_Uy | 坐标旋转后 Uy 的均值[m/s] |
| std_Uy | 坐标旋转后 Uy 的标准差[m/s] |
| Avg_Uz | 坐标旋转后 Uz 的均值[m/s] |
| std_Uz | 坐标旋转后 Uz 的标准差[m/s] |
| ustr1 | Ux-Uz 平面的摩擦风速[m/s] |
| ustr2 | Ux-Uz、Uy-Uz 三维空间的摩擦风速[m/s] |
| Avg_Ts | 平均温度[°C] |
| std_Ts | 温度的标准差[°C] |
| Avg_h2o_gm3 | 水汽均值[g/m ³] |
| std_h2o | 水汽标准差[g/m ³] |
| Avg_co2_mgm3 | CO2 均值[mg/m ³] |
| std_co2 | CO2 标准差[mg/m ³] |
| P_kPa | 大气压均值[Kpa] |
| Avg_h2o_kpa | 水汽分压均值[Kpa] |
| rho_a | 空气密度[g/m ³] |
| Tv_C | 实际温度[°C] |
| rho_cp | 空气定压比热[J/kg/K] |
| Lv | 潜热通量传输系数[J/kg] |
| cov_uw | x 方向上的 w 动量运动涡动通量[W/m ²] (Ux 与 Uz 的协方差) |
| cov_wTs | 垂直运动涡动热通量[W/m ²] (Uz 与虚温的协方差) |
| Hs | 感热通量[W/m ²] |
| zoL | 莫宁·奥布霍夫长度[m] |
| Lag_h2o | 水汽相对于垂直风速的时间滞后[s] |
| Lag_co2 | CO2 相对于垂直风速的时间滞后[s] |
| cov_wh2o | 垂直运动涡动水汽通量[W/m ²] (Uz 与 H2O 的协方差) |
| LE_irga | 潜热通量[W/m ²] |
| cov_wco2 | 垂直运动涡动 CO2 通量【mg/m ² /s】 (Uz 与 CO2 的协方差) |
| Fc_irga | CO2 通量[mg/m ² /s] |
| UW_FRCoef | Ux 和 Uz 相关的频率响应系数 |
| H_FRCoef | 感热的频率响应系数 |
| FcLE_FRCoef | CO2 和潜热的频率响应系数 |

| | |
|--------------|---|
| UW_FRC | 经过频率响应订正后的 U_x 和 U_z 的协方差 [W/m^2] |
| Hs_FRC | 经过频率响应订正后的感热通量 [W/m^2] |
| LE_irga_FRC | 经过频率响应订正后的潜热通量 [W/m^2] |
| Fc_irga_FRC | 经过频率响应订正后的 CO_2 通量 [$mg/m^2/s$] |
| LE_wpl | 潜热通量的 Web 校正项 |
| Fc_wpl | CO_2 通量的 Web 校正项 |
| H_TsCorr | 经过感热虚温校正后的显热通量 [W/m^2] |
| LE_final | 经过 Web 校正后的潜热通量 [W/m^2] |
| Fc_final | 经过 Web 校正后的 CO_2 通量 [$mg/m^2/s$] |
| Steady_w-Ts | 协方差稳定度 |
| Steady_w-h2o | ... |
| Steady_w-co2 | ... |
| ITC_Ts | 湍流平稳性检验 |
| ITC_h2o | ... |
| ITC_co2 | ... |

参考文献

Book and Papers:

- Foken (2008), *Micrometeorology*. Springer, Berlin. (320 pages)
- Lee et al. (ed.), 2004, *Handbook of Micrometeorology: A Guide for Surface Flux Measurements*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Foken, T. and Wichura, B., 1996: Tools for quality assessment of surface-based flux measurements. *Agric. Forest Meteorol.*, **78**, 83-105.
- Vickers, D. and Mahrt, L., 1997 : Quality control and flux sampling problems for tower and aircraft data. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 14, 512-526.

Guidelines and Manuals:

- Munger, J. and Loescher H., 2006: Guidelines for making eddy covariance flux measurements
- Clement, R., 2006: Edire Tutorials (<http://www.geos.ed.ac.uk/abs/research/micromet/EdiRe/Tutorials/>)
- Mauder, M. and Foken. T., 2004: TK2 Documentation and Instruction Manual.

附录:

1) 常用物理常数及计算公式

(待补)

2) 推荐的 EDIRE 处理程序

为便于‘干旱半干旱协同观测’各站资料的规范处理,参考全球通量网一些建议标准,用 Edire 有关模块编写了一个通量计算软件,用于各站湍流原始资料的后处理。

i) 程序以当前应用较多的 Campbell Scientific 开路涡动相关系统 (CSAT3 + LI-7500, 附有 HMP45 平均温湿度测量) 为准。输入资料为由原始 TOB3 转换的 TOB1 格式,可 (大大) 减小 PCMCIA 卡存储不满时下载的原始资料体积。TOB1 格式资料可直接由 Edire 读取,不必转换为 TOA5 (ASCII) 格式,不必分割为小的时段,从而节约硬盘空间。

TOB1 资料格式: 前面为 5 行 ASCII 码的文件头 (Header):

Line 1 (Environment): File type, station name, model name, serial number, os version, program name, program signature, table name

Line 2 (Field Names)

Line 3 (Field Units)

Line 4 (Field Processing)

Line 5 (Data Type)

一个例子如下:

```
"TOB1","1949","CR5000","1015","1.2","CPU:SLOWSEQ.CR5","62072","ts_data"
```

```
"SECONDS","NANOSECONDS","RECORD","Ux","Uy","Uz","Ts","co2","h2o","press","diag_csat","t_hmp","e_hmp"
```

```
"SECONDS","NANOSECONDS","RN","m/s","m/s","m/s","C","mg/m^3","g/m^3","kPa","unitless","C","kPa"
```

```
","","","Smp","Smp","Smp","Smp","Smp","Smp","Smp","Smp","Smp","Smp","Smp"
```

```
"ULONG","ULONG","ULONG","IEEE4","IEEE4","IEEE4","IEEE4","IEEE4","IEEE4","IEEE4","IEEE4","IEEE4","IEEE4"
```

此后,按文件头第 5 行的格式,给出二进制码数据。TOB1 资料格式也易于被其它软件如 Matlab 等读取。

ii) Edire 程序中,在涡动相关法计算之前,有按观测变量的测值范围进行的资料筛选。有关测值范围见下表:

| 观测变量 | 下限 | 上限 |
|---------------------|--------|-----------|
| 水平风速 u, v | -50m/s | +50m/s |
| 垂直风速 w | -10m/s | +10m/s |
| 超声温度 Ts | -4°C | 25°C |
| Licor7500 测得 CO2 浓度 | 100 | 1000mg/m3 |
| Licor7500 测得 H2O 浓度 | 0 | 50g/m3 |
| CSAT 诊断值 | 0 | 0 |

iii) 此软件主要包括如下模块:

1) ‘野点剔除’;

2) ‘坐标旋转 (2D)’;

- 3) ‘LI-7500 所测 H₂O 和 CO₂ 相对于 CSAT3 垂直风速分量的时间滞后修正’;
- 4) ‘超声虚温订正’ (及水汽通量对感热通量影响修正);
- 5) ‘WPL 订正’;
- 6) ‘高低频端损失订正’
- 7) ‘稳定度参数计算’。

根据站点具体需要, 可以增加 ‘平面拟合坐标旋转’ 等。

经检查, 与原 CR5000 (或 3000) 的在线处理结果相比, 差别在 5—10% 以内; 特别对下垫面较均一的站点, 差别很小。这样做的必要性在于更符合国际公认标准, 提高各站结果的可比性。

具体程序 “OPEC_Post_Proc.txt” 附后:

