

涡动相关通量观测指导手册

王介民 编写

(2008年3月初稿, 2011年11月第5次修订)

0. 引言

最近10-15年来,不同类型地表与大气间能量、水分和CO₂等交换过程的研究得到空前发展。以研究生态系统交换为主的国际通量网(FLUXNET),在全球不同地区的注册通量站已经超过500个(<http://www.fluxnet.ornl.gov/fluxnet>)。国内有关通量观测研究的发展速度更快,包括中国通量网(ChinaFlux)在内由不同项目在全国各地建立的长期通量观测研究站点已超过100个。这些站点,除风温湿梯度、辐射、土壤温湿及热流等观测外,普遍使用涡动相关通量观测系统进行近地层水、热、CO₂等通量的直测。涡动相关方法(或涡动协方差方法,简称EC),经过近50年的发展,无疑仍是当前地气交换研究中最先进和首选的通量观测方法。

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) 推荐的处理程序 Edire-w

1. 测量仪器与原理

涡动相关通量系统的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)。目前可供选择的三维超声风速温度计有 Campbell Scientific Inc., Gill Instruments, R.M. Young, ATI, Metek, 以及 Kaijo-Denki 等厂家的产品。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。红外气体分析仪(IRGA) CO₂/H₂O 测量系统,有 LI-COR 生产的 LI-7000 (闭路), LI-7500 (开路), 以及最新研发的兼具开路和闭路优点可以在降水等环境下应用的 LI-7200 等。国内近年应用较多的是 CSI 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。

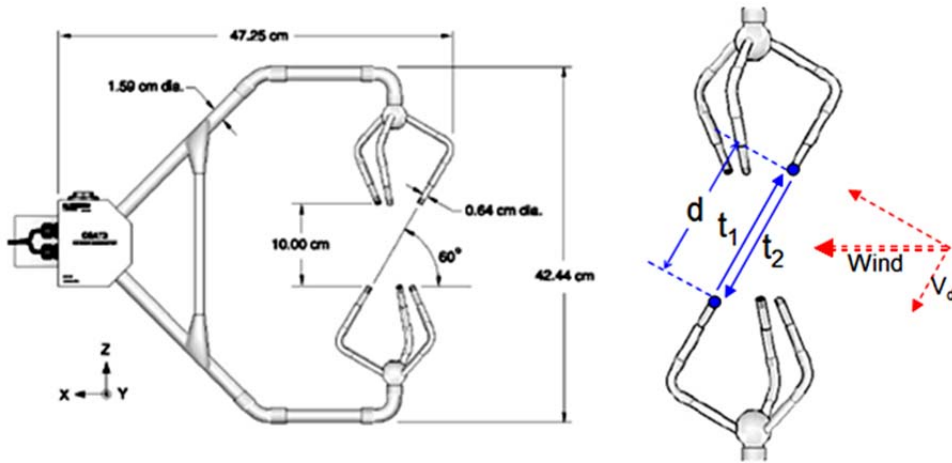


图 1. 超声风速温度仪（CSAT3）测量原理

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 μm 和 2.59 μm ），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为绝对浓度（单位一般为 mg/m^3 ），则通量计算中必须做由于空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 CO_2 和 H_2O 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 （设单位为绝对浓度[kg/m³]）的湍流输送通量可由下式计算：

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

其中，横上线表示时间平均。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（5）式变成

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

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：

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

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

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

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

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

式中， ρ_a 为空气密度 [kg/m³]， ρ_v 和 ρ_c 分别为水汽浓度和 CO₂ 浓度 [kg/m³]。空气密度，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， T_0 [°C] 为地表温度）：

$$\rho_a = 100 \times P / (287.1 \times (T_a + 273.16)) + \rho_v \quad (14)$$

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

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

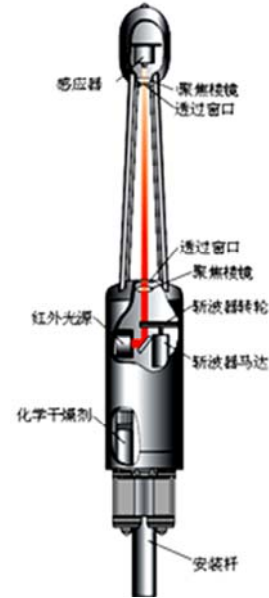


图 2. LI-7500 红外气体分析仪

利用(9)~(13)式进行通量计算中,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架上,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；探头可与垂直方向成 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（及有关质量控制与评价）一般如图 3 所示：

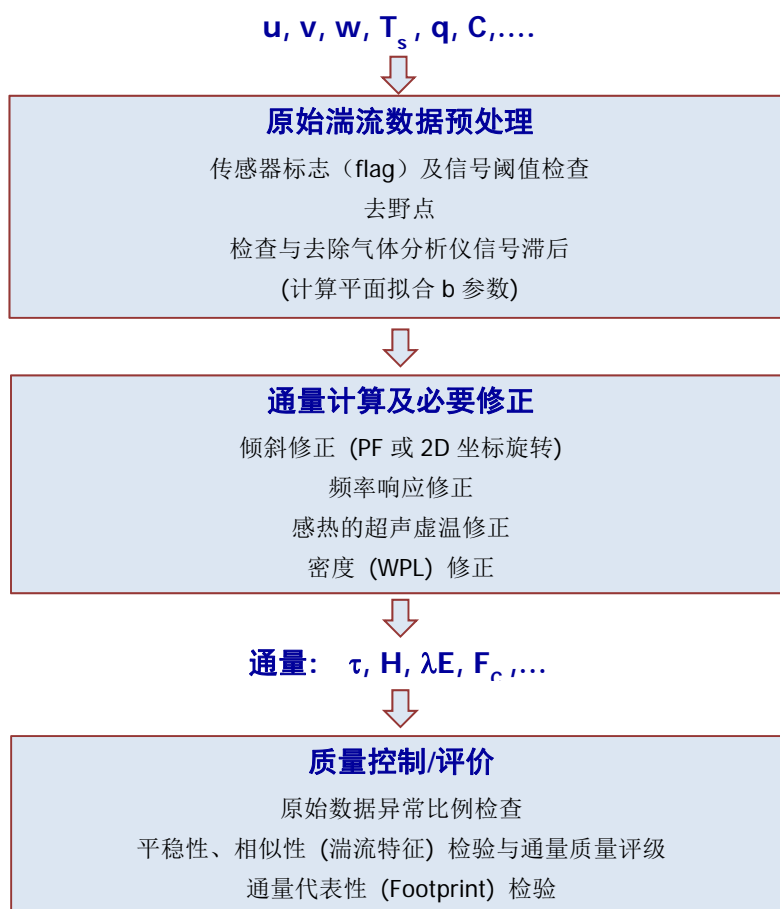


图 3. 涡动相关数据处理及通量计算流程（含质量控制欲评价）

其中，原始湍流数据的检查和预处理包括：

1) 检查超声仪和红外气体分析仪的传感器异常标志 (flag)。各标志说明参有关仪器说明书。

2) 检查 u, v, w, T_s, q, C 等原始记录的异常情况, 特别是去除超出物理上合理范围(阈值)的数值。

3) 去除‘野点’(见下 4.1 节)。

4) 计算水汽和二氧化碳信号相对于超声仪(垂直风速 w)的时间滞后并去除。

5) 给定通量计算中一些必要参数。特别是当坐标旋转采用‘平面拟合’(参 4.2.2 节)时, 需提前计算各 b 参数。

涡协方差法计算各通量((9) - (13) 式), 包含几项重要修正。主要是:

1) 倾斜修正, 即坐标旋转(参 4.2 节)。平坦下垫面, 建议用 2 次旋转; 高植被(如森林)及非平坦下垫面, 最好用‘平面拟合(PF)’方法(见下 4.2 节)。

2) 对各观测量计算均值、方差、协方差, 以及偏斜度、峰度等统计量。根据资料采集设置, 可能需要对水汽和二氧化碳单位做必要的校正或转换(如由摩尔浓度 mmol/m^3 转换为密度 mg/m^3 等)。

3) 对切应力项 ($\overline{u'w'}, \overline{v'w'}$), 感热通量 ($\overline{w'T_s'}$), 以及潜热通量和二氧化碳通量等做频率响应修正(见下 4.3 节)。

4) 对感热通量做超声虚温(湿度影响)修正(见下 4.4 节)。

5) 对潜热通量和 CO_2 通量做 WPL 修正(空气密度脉动修正)(见下 4.5 节)。

图 3 中的质量控制和质量评价部分参以下第 6 节。

注意, 不同的数据处理软件可能采用略有不同的方法进行以上各种修正, 带来处理结果的某些差异。我们这里推荐基于 EDIRE 软件 (<http://www.geos.ed.ac.uk/abs/research/micromet/EdiRe>) 编写的程序做计算。EDIRE 带有多种处理模块, 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 ($\text{diag} \neq 0$), 可直接排除。其它野点判别与去除方法, 多根据 Hoistrop(1993) 或 Vickers & 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。

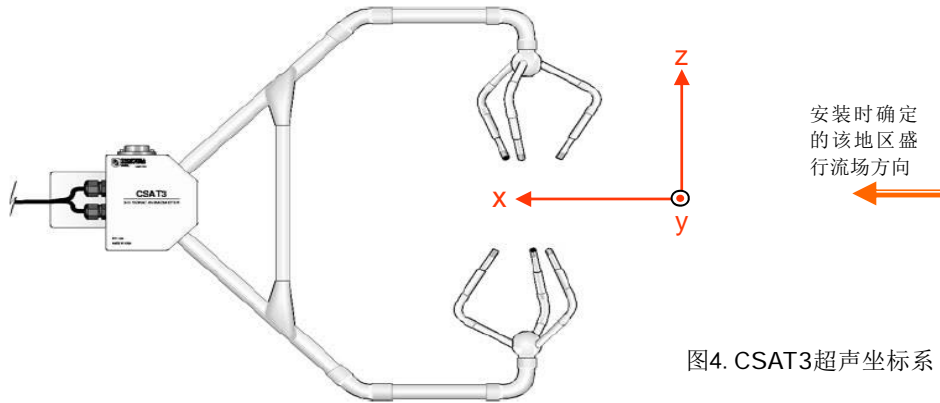


图4. CSAT3超声坐标系

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 $w=0$:

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

旋转角

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

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）。这里只作简单介绍：

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，

$$\overline{u}_p = P(\overline{u}_m - \overline{c}) \tag{21}$$

如前， \overline{u}_m 为测得风矢量， \overline{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，

$$\begin{aligned}
\overline{u}_p &= p_{11}(\overline{u}_m - c_1) + p_{12}(\overline{v}_m - c_2) + p_{13}(\overline{w}_m - c_3) \\
\overline{v}_p &= p_{21}(\overline{u}_m - c_1) + p_{22}(\overline{v}_m - c_2) + p_{23}(\overline{w}_m - c_3) \\
\overline{w}_p &= p_{31}(\overline{u}_m - c_1) + p_{32}(\overline{v}_m - c_2) + p_{33}(\overline{w}_m - c_3)
\end{aligned} \tag{22}$$

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

$$\overline{w}_m = c_3 - \frac{p_{31}}{p_{33}} \overline{u}_m - \frac{p_{32}}{p_{33}} \overline{v}_m = b_0 + b_1 \overline{u}_m + b_2 \overline{v}_m \tag{23}$$

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 $\overline{u}_i, \overline{v}_i, \overline{w}_i$ ；由下式求 S 最小，

$$S = \sum_n \left(\overline{w_i} - b_0 - b_1 \overline{u_i} - b_2 \overline{v_i} \right)^2 \quad (24)$$

可得：

$$\begin{aligned} nb_0 + \left(\sum \overline{u_i} \right) b_1 + \left(\sum \overline{v_i} \right) b_2 &= \sum \overline{w_i} \\ \left(\sum \overline{u_i} \right) b_0 + \left(\sum \overline{u_i^2} \right) b_1 + \left(\sum \overline{u_i v_i} \right) b_2 &= \sum \overline{u_i w_i} \\ \left(\sum \overline{v_i} \right) b_0 + \left(\sum \overline{u_i v_i} \right) b_1 + \left(\sum \overline{v_i^2} \right) b_2 &= \sum \overline{v_i w_i} \end{aligned} \quad (25)$$

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 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（较小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 5 所示，由于间距 d ，系统可测量的涡旋尺度会大于 $2d$ 。

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

$$\overline{w'x'} = \int_0^{\infty} Co_{wx}(f) df \quad (28)$$

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

$$(\overline{w'x'})_m = \int_0^{\infty} T(f) \cdot Co_{wx}(f) df \quad (29)$$

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

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:

$$T_{T_b}(f) = 1 - \frac{\sin^2(\pi f T_b)}{(\pi f T_b)^2} \quad (30)$$

- 测风分向量 (w 或 u) 的路径平均 (路径长 p) 影响为:

$$T_x(n) = \frac{2}{\pi n} \cdot \left(1 + \frac{e^{-2\pi n}}{2} - \frac{3(1-e^{-2\pi n})}{4\pi n} \right), \quad n = \frac{f \cdot p}{u} \quad (31)$$

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

$$T_x(n) = \frac{1}{2\pi n} \cdot \left(3 + e^{-2\pi n} - 4 \cdot \frac{1-e^{-2\pi n}}{2\pi n} \right), \quad n = \frac{f \cdot p}{u} \quad (32)$$

- 由传感器间距 (s) 引起的影响为:

$$T_s(n) = e^{-9.9n^{1.5}}, \quad n = \frac{f \cdot s}{u} \quad (33)$$

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):

$$\frac{f \cdot C_{wx}(f)}{u_* \cdot x_*} = \frac{0.88 \cdot n / n_0}{1 + 1.5 \cdot (n / n_0)^{2.1}} \quad (34)$$

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

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

- 不稳定层结下的协谱 (Kaimal):

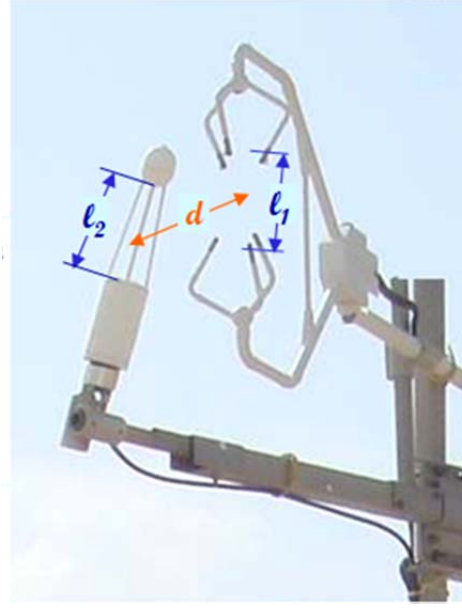


图5. 由声 (光) 程 l 及间距 d 引起高频损失。

$$\frac{f \cdot C_{uw}(f)}{u_*^2} = \frac{14n}{(1+9.6n)^{2.4}} \quad (35)$$

$$\frac{f \cdot C_{wT}(f)}{w'T'} = \begin{cases} \frac{11n}{(1+13.3n)^{1.75}} & n < 1 \\ \frac{4.4n}{(1+3.8n)^{2.4}} & n \geq 1 \end{cases} \quad (36)$$

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。

4.4 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：

$$T_s = T \left(1 + 0.3192 \cdot \frac{e}{P} \right) \cong T(1 + 0.514q) \quad (37)$$

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

$$T_s = \bar{T} + 0.514 \cdot \bar{T} \bar{q} + 0.514 \cdot \bar{T} q' + T' + 0.514 \cdot T' \bar{q} + 0.514 \cdot T' q' \quad (38)$$

由之，求协方差，逐步推导，并利用

$$q \cong \frac{0.622 \cdot e}{P} = \frac{M_v}{M_d} \frac{\rho_v RT}{PM_v} = \frac{\rho_v R_d T}{P} \quad (39)$$

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 ）， $R_d = 287.05$ ，

进而可得（参 OPEC Manual, App.B）：

$$\begin{aligned} \overline{w'T_s'} &= \overline{w'T'(1+0.514q)} + 0.514 \overline{T w'q'} \\ &= \overline{w'T'} \frac{\bar{T}_s}{\bar{T}} + 0.514 \overline{T w'q'} \\ &= \overline{w'T'} \frac{\bar{T}_s}{\bar{T}} + \frac{0.514 \cdot R_d \bar{T}^2}{P} \overline{w'\rho_v'} \end{aligned} \quad (40)$$

$$H_s = H \frac{\bar{T}_s}{\bar{T}} + \rho C_p \frac{0.514 \cdot R_d \bar{T}^2}{P} \frac{H_L}{\lambda} \quad (41)$$

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：

$$H = \left[H_s - \rho C_p \frac{0.514 \cdot R_d \cdot \bar{T}^2}{P} \frac{H_L}{\lambda} \right] \cdot \frac{\bar{T}}{\bar{T}_s} \quad (42)$$

注意，有的作者采用上式的进一步近似计算对 H_s 的修正：

$$\begin{aligned} H &\approx H_s - 0.514 \cdot \bar{T}_s \cdot \frac{C_p}{\lambda} \cdot H_L \\ &\approx H_s - 0.061 \cdot H_L \end{aligned} \quad (43)$$

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

4.5 WPL 修正

对某气体成分 C（单位：密度），通量输送：

$$F_c = \overline{FC} = \overline{wC} + \overline{w'C'} \quad (44)$$

通常假设 $\overline{w} = 0$ ，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 \overline{w} 值很小难以实测，可由干空气的质量守恒方程来计算：

$$\overline{w\rho_d} = \overline{w\rho_d} + \overline{w'\rho_d'} = 0 \quad (45)$$

$$\overline{w} = -\overline{w'\rho_d'} / \overline{\rho_d} \quad (46)$$

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：

$$\rho_d' = -\mu\rho_v' - \frac{\overline{\rho_d}(1+\mu\sigma)T'}{\bar{T}} \quad (47)$$

其中， $\mu = M_d / M_v = 28.965 / 18.015 = 1.608$ ，为干空气与水汽分子量之比。 $\sigma = \overline{\rho_v} / \overline{\rho_d}$ ，

为干空气与水汽的密度比。故可得：

$$\overline{w} = \frac{\mu}{\rho_d} \overline{w'\rho_v'} + (1+\mu\sigma) \frac{\overline{w'T'}}{\bar{T}} \quad (48)$$

进而，因水汽通量 $E = \overline{w\rho_v} = \overline{w\rho_v} + \overline{w'\rho_v'}$ ，可得：

$$E = (1+\mu\sigma) \cdot \left(\overline{w'\rho_v'} + \frac{\overline{\rho_v}}{\bar{T}} \cdot \overline{w'T'} \right) \quad (49)$$

或潜热通量：

$$\begin{aligned}\lambda E &= \lambda \cdot (1 + \mu\sigma) \cdot \left(\overline{w' \rho_v'} + \frac{\overline{\rho_v}}{T} \cdot \overline{w'T'} \right) \\ &= \lambda \cdot \overline{w' \rho_v'} + \lambda \cdot \mu\sigma \cdot \overline{w' \rho_v'} + \lambda \cdot (1 + \mu\sigma) \cdot \frac{\overline{\rho_v}}{T} \cdot \overline{w'T'}\end{aligned}\quad (50)$$

类似，CO₂ 通量（ ρ_c 为 CO₂ 密度），：

$$F_c = \overline{w' \rho_c'} + \mu \cdot \frac{\overline{\rho_c}}{\rho_d} \cdot \overline{w' \rho_v'} + (1 + \mu\sigma) \cdot \frac{\overline{\rho_c}}{T} \cdot \overline{w'T'}\quad (51)$$

注意，上二式的 $\overline{w' \rho_v'}$ ($= E_{raw}$) 是直接由原始脉动资料计算得到的。实际计算中，需要先用上 4.4 节对感热通量做超声虚温订正，得到 H ($= \overline{\rho C_p w'T'}$)；然后用 (49) 式对水汽通量作 WPL 修正。(49) 可改写为：

$$E = (1 + \mu\sigma) \left[E_{raw} + \frac{\overline{\rho_v}}{\rho} \frac{H}{C_p T} \right] \quad (52)$$

这样，算平均垂直风速的 (48) 式变为：

$$\overline{w} = \frac{\mu}{1 + \mu\sigma} \frac{E}{\rho_d} + \frac{H}{T \rho C_p} \quad (53)$$

进而，计算 CO₂ 通量。(51) 式变为：

$$F_c = \overline{w' \rho_c'} + \frac{\mu}{1 + \mu\sigma} \cdot \frac{\overline{\rho_c}}{\rho_d} \cdot E + \frac{\overline{\rho_c}}{\rho} \cdot \frac{H}{C_p T} \quad (54)$$

由 (49) 和 (51) (或 (52) 和 (54)) 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。

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±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 $\neq 0$ ）；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（55~65%），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 $\neq 0$ ）（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。对湍流量正态性的检验，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 CV30。
- 分别计算各子段的协方差（CV1, CV2, CV3, CV4, CV5, CV6）及其均值 $CV_m = \sum CV_i / 6$ 。
- 计算非平稳指数：IST = |(CV_m-CV30)/CV30|
- 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	101-250	251-500	501-1000	>1000

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；对各风速分量如式（55）所示，对某标量 x 则如式（56）所示。各系数参表 2 和表 3。

$$\frac{\sigma_{u,v,w}}{u_*} = c_1 \zeta^{c_2} \quad (55)$$

$$\frac{\sigma_x}{x_*} = c_1 \zeta^{c_2} \quad (56)$$

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_*	$0.21 \ln(z_+ \cdot f / u_*) + 3.1 \quad z_+ = 1m$

其中, f 为 Voriolis 参数, $f = 2\Omega \sin \varphi = 2 \cdot (2\pi / 86400) \cdot \sin \varphi$, φ 为纬度。

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)。

$$ITC_\sigma = \left| \frac{(\sigma_x/x_*)_{model} - (\sigma_x/x_*)_{measured}}{(\sigma_x/x_*)_{model}} \right| \quad (57)$$

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	101-250	251-500	501-1000	>1000

注意: 由表 2 和表 3 计算 σ_u / u_* 和 σ_w / u_* 的‘模式(model)’值, 只涵盖了不稳定($-0.032 < z/L$) 和近中性 ($-0.2 < z/L < 0.4$) 情况, 稳定度范围偏窄; 计算 σ_T / T_* 的模式值, 也局限在 ($-0.0625 < z/L < 0.02$) 的稳定度范围, 没有涵盖观测中常见的其它稳定度; 计算程序写起来也较麻烦。为简单计, 同时也不影响 ITC 的判断, 可采用 Panofsky 等 (1977) (见 Panofsky & Dutton, 1984: ‘Atmospheric Turbulence’, P. 161) 及 Sorbjan 等的函数形式 (见 Foken, 2008: ‘Micrometeorology’, P. 254):

$$\left(\frac{\sigma_w}{u_*}\right)_{model} = \begin{cases} 1.3(1-3z/L)^{1/3} & z/L < -0.1 \\ 1.4 & -0.1 < z/L < 0.1 \\ 1.5 & z/L > 0.1 \end{cases} \quad (58)$$

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

(根据通量网要求确定。待补)

参考文献

Books 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. 常用物理常数及微气象计算公式

水汽分子量: $M_{H_2O} = 18.015 \quad [g / mol]$

CO₂ 分子量: $M_{CO_2} = 44.01 \quad [g / mol]$

干空气分子量: $M_d = 28.965 \quad [g / mol]$

通用气体常数: $R = 8.3145 \quad [Pa \cdot m^3 / (mol \cdot K)] = [J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}]$

水汽气体常数: $R_v = R / M_{H_2O} = 461.525 \quad [J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$

干空气气体常数: $R_d = R / M_d = 287.058 \quad [J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$

气体定律: $PV = nRT \quad (P [Pa], V [m^3], T [K], n [mol])$

或 $P = \rho RT \quad (\rho [mol/m^3])$

水汽分压: $e_{[Pa]} = \rho_{v,[kg/m^3]} R_v T, \quad e_{[kPa]} = \rho_{v,[g/m^3]} R_v T \cdot 10^{-6}$

饱和水汽压: $e_{s[Pa]} = 611.2 \cdot \exp\left(\frac{17.62 \cdot T_{[^\circ C]}}{243.12 + T_{[^\circ C]}}\right)$

相对湿度: $RH_{[%]} = e / e_s \cdot 100$

虚温: $T_{v,[K]} = T_{[K]} (1 + 0.378 \cdot e / P)$

干空气密度: $\rho_{d[g/m^3]} = \frac{P_{[kPa]} - e_{[kPa]}}{287.058 \cdot (T_{[^\circ C]} + 273.15)} \cdot 10^6$

干空气定压比热: $C_{p,d} = 1004.67 \quad [J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$

空气定压比热: $C_p = C_{p,d} (1 + 0.84 \cdot q_{[kg/kg]}) \quad [J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$

比湿: $q = \frac{\rho_v}{\rho_a} = \frac{\rho_v}{\rho_d + \rho_v} = 0.622 \frac{e_{[Pa]}}{P_{[Pa]} - 0.378 e_{[Pa]}} \quad [kg / kg]$

混合比: $\chi = \rho_v / \rho_d$

蒸发潜热: $\lambda = (2.501 - 0.00237 \times T_{[^\circ C]}) \times 10^6 \quad [J / kg]$

H₂O 和 CO₂ 单位转换, 摩尔浓度 → 质量密度:

$$CO_2 [mg/m^3] = CO_2 [mmol/m^3] * 44.01$$

$$H_2O [g/m^3] = H_2O [mmol/m^3] * 0.018015$$

零平面位移: $d = 0.67 \cdot canopy_height$

粗糙度: $z_0 = 0.15 \cdot canopy_height$

附录 2. 推荐的处理程序 Edire-w

为便于通量网各站资料的规范处理，参考全球通量网一些建议和标准，用 EDIRE 有关模块编写了通量计算软件 Edire-w，用于各站湍流原始资料的后处理。

EDIRE 中约有 150 个模块。如何在涡动相关通量计算时选择适当的模块（包括用户自定义的计算方程），如何适当编排模块顺序，以及如何选定适当的模块参数等，即编排最恰当的计算程序，是非常重要的。本程序 Edire-w 经过近 3 年多的反复调整，并将计算结果与 Ameriflux 的 ‘Gold Data’ 的分析结果，与 Bayreuth 大学 Foken 研究组推荐的 TK3 软件及 4 个德国观测站资料的计算结果，进行了比较。有关平均量的计算结果几乎完全一致；摩擦速度 u_* ，感热通量 H ，潜热通量 LE ，以及 CO_2 通量 F_c 等四个通量的差别，一般都在 1% 以内。最近 Li-Cor 公司发布了开源的涡动相关通量计算软件 ‘Eddypro’。Edire-w 与其比较，结果的符合程度与前面的情况基本相同。

这样做的必要性在于更符合国际公认标准，提高通量网各站结果的可比性。

与 TK3 及 Eddypro 等比较，EDIRE 的上手较为容易，模块搭配方便，计算速度也明显较快。

Edire-w 的主要特性如下：

1. 程序以当前应用较多的 Campbell Scientific 开路涡动相关系统 (CSAT3 + LI-7500, 有的附有 HMP45 平均温湿度测量) 为准。输入资料为由原始采集器纪录格式 TOB3 转换的 TOB1 格式，可直接由读取，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，并加快计算速度。

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"
```

按文件头第 5 行的格式，TOB1 资料格式也易于被其它软件如 Matlab 等读取。

2. Edire-w 程序中，在涡动相关法计算之前，可按观测变量的测值范围进行资料筛选。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℃	25℃
Licor7500 测得 CO2 浓度	100	1000mg/m3
Licor7500 测得 H2O 浓度	0	50g/m3
CSAT 诊断值	0	0

3. 此软件主要包括如下模块：

- 1) ‘Comments’，共两处。基本说明。
- 2) ‘Set values’，给定基本参数。如有预处理文件，如气象或植被参数的随时间变化，需此前加入 ‘Pre-processed file’ 模块。
- 3) ‘Extract’，读取原始 10Hz 各量
- 4) ‘Raw Subset’，去除传感器异常标志及超阈值数据。
- 5) ‘Despike’，去野点。
- 6) ‘Remove lag’，由最大协方差法计算气体分析仪资料的相对滞后，并去除。
- 7) ‘Wind direction’，算风向。
- 8) ‘坐标旋转’。2D 或 PF（平面拟合）。
- 9) 求各量均值、方差等；计算水汽分压、感热系数（ ρC_p ）、蒸发潜热等参数。
- 10) 由原始 30min 统计量 $\overline{u'w'}$ ， $\overline{w'T_s'}$ ， $\overline{w'q'}$ ， $\overline{w'c'}$ 等计算初级通量值 u_0 , H_0 , LE_0 , Fc_0 等；计算（初级）大气稳定度（ zoL_0 ）。
- 11) 对切应力项（ $\overline{u'w'}$, $\overline{v'w'}$ ）做频率响应修正，计算摩擦速度（1 级） u_*1 。对 $\overline{w'T_s'}$ 做频率响应修正，计算感热通量（1 级） H_1 。计算大气稳定度 zoL_1 。
- 12) 对感热通量做超声虚温（湿度影响）修正，得到感热通量（2 级） H_2 。
- 13) 对潜热通量和二氧化碳通量做频率响应修正，得到（1 级） LE_1 , Fc_1 。
- 14) 利用 H_2 和 LE_1 对潜热通量做 WPL 修正（空气密度脉动修正），得到新的（2 级）潜热通量 LE_2 。
- 15) 利用 H_2 和 LE_2 对 CO_2 通量做 WPL 修正，得到新的（2 级）通量 Fc_2 。
- 16) ‘Stationarity’，对 $\overline{w'T_s'}$ ， $\overline{w'q'}$ ， $\overline{w'c'}$ 等三量做大气平稳性检验。
- 17) 利用上（58）式，对 σ_w/u_* 做相似性即湍流特征（ITC）检验。
- 18) 根据 16) 和 17) 对感热、潜热和二氧化碳通量做质量评级（0, 1, 2）

作为个例，附件 ‘Edire-w_AR08_Flux+QC_v111126.txt’ 给出阿柔站 2008 年资料的一个处理程序。不同站点的湍流观测项目数可能不同，有的站可能要求 PF 坐标旋转，有的站因下垫面变化等需要有附加的预处理文件，等等。这些都可以通过对本程序略加调整实现。

请关照：如利用 Edire-w 及本指南分析资料，请在发表报告或论文时，在致谢栏予以说明。

Edire-w 程序例: 'Edire-w_AR08_Flux+QC_v111126.txt'

Comments

Comment = For Arou TOB1; 11 data items.
Comment = RawSubset+Despike+RemoveLag
Comment = Rotation+FRC+SonicCorr+WPL
Comment = Reconstructed by J Wang, 20111126

Location Output Files

Output File Calculations = L:\EC_Comp\Arou0804\AR0804_Flux+QC_111226.csv
Output File Spectral =
Output File Wavelet =
Output File Cross Correlation =
Output File Distribution =
Output File Quadrant =
Output File Reference =

Set Values

From Time =
To Time =
Number of Variables = 6
Storage Label = Obs_height
Assignment value = 3.15
Storage Label = SampFreq
Assignment value = 10.0
Storage Label = d
Assignment value = 0.20
Storage Label = Sonic_facing
Assignment value = 86.0
Storage Label =
Assignment value =
Storage Label = Latitude
Assignment value = 38.0444

Extract

From Time =
To Time =
Channel = 1
Label for Signal = SECONDS

Extract

From Time =
To Time =
Channel = 2
Label for Signal = NANOSECONDS

Extract

From Time =
To Time =
Channel = 3
Label for Signal = RECORD

Extract

From Time =
To Time =

Channel = 4

Label for Signal = Ux

Extract

From Time =
To Time =

Channel = 5

Label for Signal = Uy

Extract

From Time =
To Time =

Channel = 6

Label for Signal = Uz

Extract

From Time =
To Time =

Channel = 7

Label for Signal = Ts

Extract

From Time =	Number of signals = 9
To Time =	Signal Subset = Ux
Channel = 8	Signal Subset = Uy
Label for Signal = co2	Signal Subset = Uz
Extract	Signal Subset = Ts
From Time =	Signal Subset = co2
To Time =	Signal Subset = h2o
Channel = 9	Signal Subset = press
Label for Signal = h2o	Signal Subset =
Extract	Signal Subset =
From Time =	Raw Subset
To Time =	From Time =
Channel = 10	To Time =
Label for Signal = press	Subset start time(s) =
Extract	Subset length(s) =
From Time =	Signal for condition = h2o
To Time =	Condition operators = Between
Channel = 11	Condition (lower limit) = 0
Label for Signal = diag_csat	Condition upper limit = 50
Raw Subset	Storage Label % removed = h2o_err_pcmt
From Time =	Number of signals = 9
To Time =	Signal Subset = Ux
Subset start time(s) =	Signal Subset = Uy
Subset length(s) =	Signal Subset = Uz
Signal for condition = diag_csat	Signal Subset = Ts
Condition operators = <	Signal Subset = co2
Condition (lower limit) = 1	Signal Subset = h2o
Condition upper limit =	Signal Subset = press
Storage Label % removed = csat_err_pcmt	Signal Subset =
Number of signals = 9	Signal Subset =
Signal Subset = Ux	Despike
Signal Subset = Uy	From Time =
Signal Subset = Uz	To Time =
Signal Subset = Ts	Signal = Ux
Signal Subset = co2	Standard Deviations = 6
Signal Subset = h2o	Spike width = 4
Signal Subset = press	Spike % consistency = 30
Signal Subset =	Replace spikes = x
Signal Subset =	Storage Label spike count = Spk_Ux
Raw Subset	Outlier Standard Deviations = 10
From Time =	Despike
To Time =	From Time =
Subset start time(s) =	To Time =
Subset length(s) =	Signal = Uy
Signal for condition = co2	Standard Deviations = 6
Condition operators = Between	Spike width = 4
Condition (lower limit) = 100	Spike % consistency = 30
Condition upper limit = 1000	Replace spikes = x
Storage Label % removed = co2_err_pcmt	Storage Label spike count = Spk_Uy

Outlier Standard Deviations = 10

Despik

From Time =

To Time =

Signal = Uz

Standard Deviations = 6

Spike width = 4

Spike % consistency = 30

Replace spikes = x

Storage Label spike count = Spk_Uz

Outlier Standard Deviations = 10

Despik

From Time =

To Time =

Signal = Ts

Standard Deviations = 6

Spike width = 4

Spike % consistency = 30

Replace spikes = x

Storage Label spike count = Spk_Ts

Outlier Standard Deviations = 10

Despik

From Time =

To Time =

Signal = co2

Standard Deviations = 6

Spike width = 4

Spike % consistency = 30

Replace spikes = x

Storage Label spike count = Spk_co2

Outlier Standard Deviations = 10

Despik

From Time =

To Time =

Signal = h2o

Standard Deviations = 6

Spike width = 4

Spike % consistency = 30

Replace spikes = x

Storage Label spike count = Spk_h2o

Outlier Standard Deviations = 10

Cross Correlate

From Time =

To Time =

Signal = Uz

Signal which lags = h2o

Correlation type = Covariance

Output Correlation curve =

Storage Label Peak Time = Lag_h2o

Storage Label Peak Value =

Remove Lag

From Time =

To Time =

Signal = h2o

Min Lag (sec) = -0.1

Lag (sec) = Lag_h2o

Max Lag (sec) = 0.3

Below Min default (sec) =

Above Max default (sec) =

Cross Correlate

From Time =

To Time =

Signal = Uz

Signal which lags = co2

Correlation type = Covariance

Output Correlation curve =

Storage Label Peak Time = Lag_co2

Storage Label Peak Value =

Remove Lag

From Time =

To Time =

Signal = co2

Min Lag (sec) = -0.1

Lag (sec) = Lag_co2

Max Lag (sec) = 0.3

Below Min default (sec) =

Above Max default (sec) =

1 chn statistics

From Time =

To Time =

Signal = Ux

Storage Label Mean = Avg_Ux_NoRot

Storage Label Std Dev =

Storage Label Skewness =

Storage Label Kurtosis =

Storage Label Maximum =

Storage Label Minimum =

Storage Label Variance =

Storage Label Turbulent Intensity =

Alt Turbulent Intensity Denominator =

1 chn statistics

From Time =

To Time =

Signal = Uy

Storage Label Mean = Avg_Uy_NoRot

Storage Label Std Dev =

Storage Label Skewness =

Storage Label Kurtosis =

Storage Label Maximum =
 Storage Label Minimum =
 Storage Label Variance =
 Storage Label Turbulent Intensity =
 Alt Turbulent Intensity Denominator =
 1 chn statistics
 From Time =
 To Time =
 Signal = Uz
 Storage Label Mean = Avg_Uz_NoRot
 Storage Label Std Dev =
 Storage Label Skewness =
 Storage Label Kurtosis =
 Storage Label Maximum =
 Storage Label Minimum =
 Storage Label Variance =
 Storage Label Turbulent Intensity =
 Alt Turbulent Intensity Denominator =
 Wind direction
 From Time =
 To Time =
 Signal (u) = Ux
 Signal (v) = Uy
 Orientation = Sonic_facing
 Wind Direction Components = U+N_V+W
 Wind Direction Output =
 N_0_deg-E_90_deg
 Storage Label Wind Direction = wnd_dir
 Storage Label Wind Dir Std Dev =
 Rotation coefficients
 From Time =
 To Time =
 Signal (u) = Ux
 Signal (v) = Uy
 Signal (w) = Uz
 Storage Label Alpha = alpha
 Storage Label Beta = beta
 Storage Label Gamma = gamma
 Optional mean u =
 Optional mean v =
 Optional mean w =
 Rotation
 From Time =
 To Time =
 Signal (u) = Ux
 Signal (v) = Uy
 Signal (w) = Uz
 Alpha = alpha
 Beta = beta
 Gamma = gamma
 Do 1st Rot = x
 Do 2nd Rot = x
 Do 3rd Rot =
 1 chn statistics
 From Time =
 To Time =
 Signal = Ux
 Storage Label Mean = Avg_Ux
 Storage Label Std Dev = std_Ux
 Storage Label Skewness =
 Storage Label Kurtosis =
 Storage Label Maximum =
 Storage Label Minimum =
 Storage Label Variance =
 Storage Label Turbulent Intensity =
 Alt Turbulent Intensity Denominator =
 1 chn statistics
 From Time =
 To Time =
 Signal = Uy
 Storage Label Mean =
 Storage Label Std Dev = std_Uy
 Storage Label Skewness =
 Storage Label Kurtosis =
 Storage Label Maximum =
 Storage Label Minimum =
 Storage Label Variance =
 Storage Label Turbulent Intensity =
 Alt Turbulent Intensity Denominator =
 1 chn statistics
 From Time =
 To Time =
 Signal = Uz
 Storage Label Mean =
 Storage Label Std Dev = std_Uz
 Storage Label Skewness =
 Storage Label Kurtosis =
 Storage Label Maximum =
 Storage Label Minimum =
 Storage Label Variance =
 Storage Label Turbulent Intensity =
 Alt Turbulent Intensity Denominator =
 1 chn statistics
 From Time =
 To Time =
 Signal = Ts
 Storage Label Mean = Avg_Ts
 Storage Label Std Dev = std_Ts

Storage Label Skewness =	Storage Label = e_kpa
Storage Label Kurtosis =	Apply to =
Storage Label Maximum =	Apply by =
Storage Label Minimum =	Equation =
Storage Label Variance =	$Avg_h2o_gm3*(8.3143/18.015)*(Avg_Ts+273.1$
Storage Label Turbulent Intensity =	$5)/1000.$
Alt Turbulent Intensity Denominator =	Variable = Avg_h2o_gm3
1 chn statistics	Variable = Avg_Ts
From Time =	User defined
To Time =	From Time =
Signal = h2o	To Time =
Storage Label Mean = Avg_h2o_gm3	Storage Label = Avg_T
Storage Label Std Dev = std_h2o	Apply to =
Storage Label Skewness =	Apply by =
Storage Label Kurtosis =	Equation =
Storage Label Maximum =	$(Avg_Ts+273.15)/(1+0.3192*e_kpa/P_kPa)-273$
Storage Label Minimum =	$.15$
Storage Label Variance =	Variable = Avg_Ts
Storage Label Turbulent Intensity =	Variable = e_kpa
Alt Turbulent Intensity Denominator =	Variable = P_kPa
1 chn statistics	Sensible heat flux coefficient
From Time =	From Time =
To Time =	To Time =
Signal = co2	Storage Label = rho_cp
Storage Label Mean = Avg_co2_mgm3	Apply to =
Storage Label Std Dev = std_co2	Apply by =
Storage Label Skewness =	Vapour pressure (KPa) = e_kpa
Storage Label Kurtosis =	Min or QC =
Storage Label Maximum =	Max or QC =
Storage Label Minimum =	Temperature (C) = Avg_T
Storage Label Variance =	Min or QC =
Storage Label Turbulent Intensity =	Max or QC =
Alt Turbulent Intensity Denominator =	Pressure (KPa) = P_kPa
1 chn statistics	Min or QC =
From Time =	Max or QC =
To Time =	Alternate rhoCp = 1230.
Signal = press	Latent heat of evaporation
Storage Label Mean = P_kPa	From Time =
Storage Label Std Dev =	To Time =
Storage Label Skewness =	Storage Label = Lv
Storage Label Kurtosis =	Apply to =
Storage Label Maximum =	Apply by =
Storage Label Minimum =	Temperature (C) = Avg_T
Storage Label Variance =	Min or QC =
Storage Label Turbulent Intensity =	Max or QC =
Alt Turbulent Intensity Denominator =	Pressure (KPa) = P_kPa
User defined	Min or QC =
From Time =	Max or QC =
To Time =	LE flux coef, L = 2500.

Friction Velocity
 From Time =
 To Time =
 Signal (u) = Ux
 Signal (v) = Uy
 Signal (w) = Uz
 Storage Label U* (uw) = ustr0_1
 Storage Label U* (uw vw) = ustr0

2 chn statistics
 From Time =
 To Time =
 Signal = Uz
 Signal = Ts
 Storage Label Covariance = cov_wTs
 Storage Label Correlation =
 Storage Label Flux = H0
 Flux coefficient = rho_cp

2 chn statistics
 From Time =
 To Time =
 Signal = Uz
 Signal = h2o
 Storage Label Covariance = cov_wh2o
 Storage Label Correlation =
 Storage Label Flux = LE0
 Flux coefficient = Lv

2 chn statistics
 From Time =
 To Time =
 Signal = Uz
 Signal = co2
 Storage Label Covariance = cov_wco2
 Storage Label Correlation =
 Storage Label Flux = Fc0
 Flux coefficient = 1

Stability - Monin Obhukov
 From Time =
 To Time =
 Storage Label = zoL0
 Apply to =
 Apply by =
 Measurement height (m) = Obs_height
 Zero plane displacement (m) = d
 Virtual Temperature (C) = Avg_Ts
 Min or QC =
 Max or QC =
 H flux (W/m2) = H0
 Min or QC =
 Max or QC =

H flux coef, RhoCp = rho_cp
 Min or QC =
 Max or QC =
 Scaling velocity (m/s) = ustr0
 Min or QC =
 Max or QC =

Comments
 Comment = Cal from raw: ustr0, H0, LE0, Fc0, zoL0
 Comment = FRC (using zoL0): ustr1, H1, zoL1
 Comment = FRC (using zoL1): LE1, Fc1
 Comment = SonicTemp corr (using H1, LE1): H2
 Comment = WPL corr (using H2, LE1): LE2
 Comment = WPL corr (using H2, LE2): Fc2

Frequency response
 From Time =
 To Time =
 Storage Label = uw_FRCcoef
 Apply to =
 Apply by =
 Correction type = UW
 Measurement height (m) = Obs_height
 Zero plane displacement (m) = d
 Boundary layer height (m) = 1000
 Stability Z/L = zoL0
 Wind speed (m/s) = Avg_Ux
 Sensor 1 Flow velocity (m/s) = Avg_Ux
 Sensor 1 Sampling frequency (Hz) =

SampFreq
 Sensor 1 Low pass filter type =
 Sensor 1 Low pass filter time constant =
 Sensor 1 High pass filter type =
 Sensor 1 High pass filter time constant =
 Sensor 1 Path length (m) = 0.11
 Sensor 1 Time constant (s) = 0
 Sensor 1 Tube attenuation coef =
 Sensor 2 Flow velocity (m/s) = Avg_Ux
 Sensor 2 Sampling frequency (Hz) =

SampFreq
 Sensor 2 Low pass filter type =
 Sensor 2 Low pass filter time constant =
 Sensor 2 High pass filter type =
 Sensor 2 High pass filter time constant =
 Sensor 2 Path length (m) = 0.11
 Sensor 2 Time constant (s) = 0

Sensor 2 Tube attenuation coef =
 Path separation (m) = 0.0
 Get spectral data type = Model
 Get response function from = model
 Reference Tag =
 Reference response condition =
 Sensor 1 subsampled =
 Sensor 2 subsampled =
 Apply velocity distribution adjustment =
 Use calculated distribution =
 Velocity distribution std dev=
 Stability distribution std dev=
 Mathematical operation
 From Time =
 To Time =
 Storage Label = uw_frc
 Apply to =
 Apply by =
 Measured variable A = cov_uw
 Operation = *
 Measured variable B = uw_FRCcoef
 Mathematical operation
 From Time =
 To Time =
 Storage Label = vw_frc
 Apply to =
 Apply by =
 Measured variable A = cov_vw
 Operation = *
 Measured variable B = uw_FRCcoef
 User defined
 From Time =
 To Time =
 Storage Label = ustr1
 Apply to =
 Apply by =
 Equation =
 $(uw_frc*uw_frc+vw_frc*vw_frc)^{0.25}$
 Variable = uw_frc
 Variable = vw_frc
 Frequency response
 From Time =
 To Time =
 Storage Label = wT_FRCcoef
 Apply to =
 Apply by =
 Correction type = WX
 Measurement height (m) = Obs_height
 Zero plane displacement (m) = d
 Boundary layer height (m) = 1000
 Stability Z/L = zoL0
 Wind speed (m/s) = Avg_Ux
 Sensor 1 Flow velocity (m/s) = Avg_Ux
 Sensor 1 Sampling frequency (Hz) =
 SampFreq
 Sensor 1 Low pass filter type =
 Sensor 1 Low pass filter time constant =
 Sensor 1 High pass filter type =
 Sensor 1 High pass filter time constant =
 Sensor 1 Path length (m) = 0.11
 Sensor 1 Time constant (s) = 0
 Sensor 1 Tube attenuation coef =
 Sensor 2 Flow velocity (m/s) = Avg_Ux
 Sensor 2 Sampling frequency (Hz) =
 SampFreq
 Sensor 2 Low pass filter type =
 Sensor 2 Low pass filter time constant =
 Sensor 2 High pass filter type =
 Sensor 2 High pass filter time constant =
 Sensor 2 Path length (m) = 0.11
 Sensor 2 Time constant (s) = 0
 Sensor 2 Tube attenuation coef =
 Path separation (m) = 0.0
 Get spectral data type = Model
 Get response function from = model
 Reference Tag =
 Reference response condition =
 Sensor 1 subsampled =
 Sensor 2 subsampled =
 Apply velocity distribution adjustment =
 Use calculated distribution =
 Velocity distribution std dev=
 Stability distribution std dev=
 Mathematical operation
 From Time =
 To Time =
 Storage Label = H1
 Apply to =
 Apply by =
 Measured variable A = H0
 Operation = *
 Measured variable B = wT_FRCcoef
 Stability - Monin Obhukov
 From Time =
 To Time =
 Storage Label = zoL1
 Apply to =
 Apply by =

Measurement height (m) = Obs_height
 Zero plane displacement (m) = d
 Virtual Temperature (C) = Avg_Ts
 Min or QC =
 Max or QC =
 H flux (W/m2) = H1
 Min or QC =
 Max or QC =
 H flux coef, RhoCp = rho_cp
 Min or QC =
 Max or QC =
 Scaling velocity (m/s) = ustr1
 Min or QC =
 Max or QC =
 Frequency response
 From Time =
 To Time =
 Storage Label = wx_FRCcoef
 Apply to =
 Apply by =
 Correction type = WX
 Measurement height (m) = Obs_height
 Zero plane displacement (m) = d
 Boundary layer height (m) = 1000
 Stability Z/L = zoL1
 Wind speed (m/s) = Avg_Ux
 Sensor 1 Flow velocity (m/s) = Avg_Ux
 Sensor 1 Sampling frequency (Hz) =
 SampFreq
 Sensor 1 Low pass filter type =
 Sensor 1 Low pass filter time constant =
 Sensor 1 High pass filter type =
 Sensor 1 High pass filter time constant =
 Sensor 1 Path length (m) = 0.11
 Sensor 1 Time constant (s) = 0
 Sensor 1 Tube attenuation coef =
 Sensor 2 Flow velocity (m/s) = Avg_Ux
 Sensor 2 Sampling frequency (Hz) =
 SampFreq
 Sensor 2 Low pass filter type =
 Sensor 2 Low pass filter time constant =
 Sensor 2 High pass filter type =
 Sensor 2 High pass filter time constant =
 Sensor 2 Path length (m) = 0.125
 Sensor 2 Time constant (s) = 0
 Sensor 2 Tube attenuation coef =
 Path separation (m) = 0.22
 Get spectral data type = Model
 Get response function from = model
 Reference Tag =
 Reference response condition =
 Sensor 1 subsampled =
 Sensor 2 subsampled =
 Apply velocity distribution adjustment =
 Use calculated distribution =
 Velocity distribution std dev=
 Stability distribution std dev=
 Mathematical operation
 From Time =
 To Time =
 Storage Label = LE1
 Apply to =
 Apply by =
 Measured variable A = LE0
 Operation = *
 Measured variable B = wx_FRCcoef
 Mathematical operation
 From Time =
 To Time =
 Storage Label = Fc1
 Apply to =
 Apply by =
 Measured variable A = Fc0
 Operation = *
 Measured variable B = wx_FRCcoef
 User defined
 From Time =
 To Time =
 Storage Label = H2
 Apply to =
 Apply by =
 Equation =

$$(H1 - (\rho_{cp} * 0.51 * (8.3143e-3/29) * (Avg_T + 273.15) * (Avg_T + 273.15) * LE1) / (P_kPa * Lv)) * ((Avg_T + 273.15) / (Avg_Ts + 273.15))$$
 Variable = H1
 Variable = rho_cp
 Variable = Avg_T
 Variable = Avg_Ts
 Variable = LE1
 Variable = P_kPa
 Variable = Lv
 User defined
 From Time =
 To Time =
 Storage Label = rho_d_gm3
 Apply to =
 Apply by =

Equation = $1000 \cdot 1000 \cdot (P_{\text{kPa}} - e_{\text{kPa}}) / 287.05 / (\text{Avg_T} + 273.15)$
 Variable = P_kPa
 Variable = e_kpa
 Variable = Avg_T
 Mathematical operation
 From Time =
 To Time =
 Storage Label = sigma
 Apply to =
 Apply by =
 Measured variable A = Avg_h2o_gm3
 Operation = /
 Measured variable B = rho_d_gm3
 User defined
 From Time =
 To Time =
 Storage Label = dLE_wpl_H2
 Apply to =
 Apply by =
 Equation =
 $Lv \cdot (1 + 1.608 \cdot \text{sigma}) \cdot \text{Avg_h2o_gm3} / (\text{Avg_T} + 273.15) \cdot (\text{H2} / \text{rho_cp})$
 Variable = sigma
 Variable = Avg_h2o_gm3
 Variable = Avg_T
 Variable = H2
 Variable = rho_cp
 Variable = Lv
 User defined
 From Time =
 To Time =
 Storage Label = dLE_wpl_LE1
 Apply to =
 Apply by =
 Equation = $1.608 \cdot \text{sigma} \cdot \text{LE1}$
 Variable = sigma
 Variable = LE1
 Mathematical operation
 From Time =
 To Time =
 Storage Label = dLE_wpl
 Apply to =
 Apply by =
 Measured variable A = dLE_wpl_H2
 Operation = +
 Measured variable B = dLE_wpl_LE1
 Mathematical operation
 From Time =

To Time =
 Storage Label = LE2
 Apply to =
 Apply by =
 Measured variable A = LE1
 Operation = +
 Measured variable B = dLE_wpl
 User defined
 From Time =
 To Time =
 Storage Label = dFc_wpl_H2
 Apply to =
 Apply by =
 Equation =
 $\text{Avg_co2_mgm3} / (\text{Avg_T} + 273.15) \cdot \text{H2} / \text{rho_cp}$
 Variable = Avg_co2_mgm3
 Variable = Avg_T
 Variable = H2
 Variable = rho_cp
 User defined
 From Time =
 To Time =
 Storage Label = dFc_wpl_LE2
 Apply to =
 Apply by =
 Equation =
 $1.608 \cdot \text{Avg_co2_mgm3} / (\text{rho_d_gm3} \cdot (1 + 1.608 \cdot \text{sigma})) \cdot \text{LE2} / Lv$
 Variable = sigma
 Variable = Avg_co2_mgm3
 Variable = rho_d_gm3
 Variable = LE2
 Variable = Lv
 Mathematical operation
 From Time =
 To Time =
 Storage Label = dFc_wpl
 Apply to =
 Apply by =
 Measured variable A = dFc_wpl_H2
 Operation = +
 Measured variable B = dFc_wpl_LE2
 Mathematical operation
 From Time =
 To Time =
 Storage Label = Fc2
 Apply to =
 Apply by =
 Measured variable A = Fc1

Operation = +
 Measured variable B = dFc_wpl
 Stationarity
 From Time =
 To Time =
 Signal (A) = Uz
 Signal (B) = Ts
 Storage Label A StdDev Stationarity =
 Storage Label B StdDev Stationarity =
 Storage Label AB Covariance Stationarity =
 = Statnrty_wTs
 Segment length, minutes = 5
 Linear detrend segments =
 Linear detrend run =
 Storage Label AB StdDev Stationarity =
 Stationarity
 From Time =
 To Time =
 Signal (A) = Uz
 Signal (B) = h2o
 Storage Label A StdDev Stationarity =
 Storage Label B StdDev Stationarity =
 Storage Label AB Covariance Stationarity =
 = Statnrty_wh2o
 Segment length, minutes = 5
 Linear detrend segments =
 Linear detrend run =
 Storage Label AB StdDev Stationarity =
 Stationarity
 From Time =
 To Time =
 Signal (A) = Uz
 Signal (B) = co2
 Storage Label A StdDev Stationarity =
 Storage Label B StdDev Stationarity =
 Storage Label AB Covariance Stationarity =
 = Statnrty_wco2
 Segment length, minutes = 5
 Linear detrend segments =
 Linear detrend run =
 Storage Label AB StdDev Stationarity =
 User defined
 From Time =
 To Time =
 Storage Label = stdw_ustr
 Apply to =
 Apply by =
 Equation = std_Uz/ustr1
 Variable = std_Uz

Variable = ustr1
 User defined
 From Time =
 To Time =
 Storage Label = model_stdw_ustr
 Apply to =
 Apply by =
 Equation = IIF((-0.1>=zoL1),
 1.3*(1+3*abs(zoL1))^(1/3), IIF((-0.1<zoL1 and
 zoL1<0.1),1.4, 1.5))
 Variable = zoL1
 User defined
 From Time =
 To Time =
 Storage Label = ITC_w
 Apply to =
 Apply by =
 Equation =
 100*ABS((stdw_ustr-model_stdw_ustr)/model_
 stdw_ustr)
 Variable = model_stdw_ustr
 Variable = stdw_ustr
 User defined
 From Time =
 To Time =
 Storage Label = QA_H
 Apply to =
 Apply by =
 Equation = IIF((Statnrty_wTs<30) and
 (ITC_w<30),0,IIF((Statnrty_wTs<100) and
 (ITC_w<100),1,2))
 Variable = Statnrty_wTs
 Variable = ITC_w
 User defined
 From Time =
 To Time =
 Storage Label = QA_LE
 Apply to =
 Apply by =
 Equation = IIF((Statnrty_wh2o<30) and
 (ITC_w<30),0,IIF((Statnrty_wh2o<100) and
 (ITC_w<100),1,2))
 Variable = Statnrty_wh2o
 Variable = ITC_w
 User defined
 From Time =
 To Time =
 Storage Label = QA_Fc
 Apply to =

Apply by =
Equation = IIF((Statnrty_wco2<30) and
(ITC_w<30),0,IIF((Statnrty_wco2<100) and
(ITC_w<100),1,2))
Variable = Statnrty_wco2
Variable = ITC_w

Plot Value
From Time =
To Time =
Left Axis Value = Avg_Ux
Right Axis Value = ustr1
Left Axis Minimum =
Left Axis Maximum =
Right Axis Minimum =
Right Axis Maximum =
Match Left/Right Axes =

Plot Value
From Time =
To Time =
Left Axis Value = Fc2
Right Axis Value = Avg_Ts
Left Axis Minimum =
Left Axis Maximum =
Right Axis Minimum =
Right Axis Maximum =
Match Left/Right Axes =

Plot Value
From Time =
To Time =
Left Axis Value = H2
Right Axis Value = LE2
Left Axis Minimum =
Left Axis Maximum =
Right Axis Minimum =
Right Axis Maximum =
Match Left/Right Axes =

Plot Value
From Time =
To Time =
Left Axis Value = Avg_h2o_gm3
Right Axis Value = Avg_co2_mgm3
Left Axis Minimum =
Left Axis Maximum =
Right Axis Minimum =
Right Axis Maximum =
Match Left/Right Axes =