

晃动平台上海-气通量观测误差校正模型

王金良¹, 宋金宝²

(1. 青岛理工大学 理学院, 山东 青岛 266520; 2. 中国科学院 海洋研究所 环流与波动重点实验室, 山东 青岛 266071)

摘要: 为了更准确地计算由平台晃动所带来的通量观测误差, 从平台晃动与风速仪测点位置变化角度以分层平均消除垂向均值差异的办法建立了新的涡相关通量误差校正模型。结果是: 在中高海况下由平台晃动引起的通量观测误差是显著的。有鉴于此, 将晃动平台视为固定平台来处理的常用通量计算公式在中高海况下可能会给出严重失真的结果, 建议采用新公式进行校正。

关键词: 涡相关方法; 海气通量; 动量观测; 误差校正; 波浪

中图分类号: P732; P731 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2011)12-0106-07

由于多数海上观测是通过船或浮标等运动平台来进行的, 因此在使用涡相关方法进行通量计算时运动补偿矫正是必需的。Anctil 等^[1], Edson 等^[2], 门雅彬^[3]等都曾对浮标观测和船基观测的运动补偿校正方法进行了研究。这些校正都需要位置传感器(电子罗盘, 角速度传感器, 加速度传感器和差分 GPS 等)来记录平台的运动状态(如水平移动、旋转、俯仰和摇摆等)。以动量通量为例, 在海气界面上动量通量通常来源于风应力其计算公式为:

$$\tau = -\rho(\overline{u'w'}i + \overline{v'w'}j) \quad (1)$$

其中 ρ 为空气密度 u' 和 v' 为水平风速脉动 w' 为垂向风速脉动。 i 和 j 分别代表两个水平速度方向。“ $\overline{\quad}$ ”表示时间平均, 一般观测中的平均时间取为 30 min。因此, 在计算海气界面通量时, 我们需要从真实海面风矢量 $V_{true}=(u, v, w)$ 中分离出湍流脉动风速 $V'=(u', v', w')$ 。具体的分离技术请参考王和宋^[4]。以浮标平台观测为例, 现场风速数据是利用安装于浮标桅杆上的超声风速仪获得的, 它是浮标坐标系下的相对风速值。为了得到海气湍流通量, 必须利用浮标的运动姿态数据对相对风速进行校正, 以得到地球坐标系下的绝对风速。

但是正如 Mahrt 等^[5]所指出的那样, 这种校正并不能完全解决晃动对涡相关方法计算通量的影响。其实该校正的默认假设是: 风速仪的测点(3 个观测通路的交点)在大地坐标系中是不变的, 平台的运动只是使得仪器相对于该测点作了旋转运动。只有在这样的假设下, 才适用上述的校正。但是这种假设是

不实际的, 因为实际海上的观测状况是海浪的存在导致平台上下、左右、前后不停地晃动。如此一来, 测点的位置就在不断地变化, 而这种变化会影响速度脉动的求取。特别是当存在比较大的上下运动起伏时, 由于平均风速在垂向上存在差异, 平台的上下起伏晃动必然会影响采集到的风速值, 进而影响脉动风速并最终影响通量。下面先介绍常用的运动补偿校正算法。

1 风速运动补偿校正算法

建立如图 1 所示的坐标系: (x, y, z) 表示运动测量

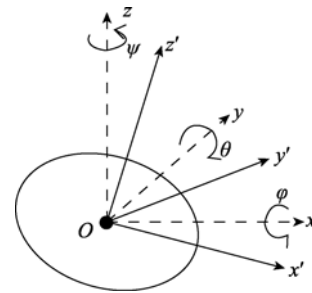


图 1 浮标坐标系相对于固定坐标系的旋转关系示意图
Fig. 1 Depict the rotation of the buoy coordinate frame relative to that of the fixed one

收稿日期: 2010-12-20; 修回日期: 2011-09-28
基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2011CB403501); 中国科学院创新重要方向项目群项目(KZCX2-YW-Q07-02); 中国科学院海洋研究所环流与波动重点实验室开放研究基金(KLOCAW1003); 青岛理工大学高层次人才科研启动基金(C2009-004)
作者简介: 王金良(1973-), 男, 山东莒县人, 副教授, 博士后, 研究方向: 海气通量观测及上层海洋动力学, E-mail: wangjinliang10@sina.com.cn

系统控件箱处相对于地球的固定坐标系, (x', y', z') 表示跟随浮标运动的相对坐标系, θ, φ, ψ 分别表示浮标的俯仰、横滚和偏航角(可由电子罗盘测得)。

依照 Anctil 等^[1]和 Edson 等^[2]的表述, 相对坐标系与绝对坐标系转换关系如下:

$$A = \begin{pmatrix} \cos \theta \cos \psi & \sin \varphi \sin \theta \cos \psi - \cos \varphi \sin \psi & \cos \varphi \sin \theta \cos \psi + \sin \varphi \sin \psi \\ \cos \theta \sin \psi & \sin \varphi \sin \theta \sin \psi + \cos \varphi \cos \psi & \cos \varphi \sin \theta \sin \psi - \sin \varphi \cos \psi \\ -\sin \theta & \sin \varphi \cos \theta & \cos \varphi \cos \theta \end{pmatrix} \quad (2)$$

其转移矩阵的形式为:

浮标旋转角速度矢量即为

$$\boldsymbol{\Omega} = \begin{pmatrix} -\dot{\theta} \sin \psi + \dot{\varphi} \cos \theta \cos \psi \\ \dot{\theta} \cos \psi + \dot{\varphi} \cos \theta \sin \psi \\ \psi - \dot{\varphi} \sin \theta \end{pmatrix}$$

另设 V_{mot} 是浮标相对于海面的移动速度矢量, 它可由安装于浮标上的加速度传感器测得浮标加速度(包括运动方向上的加速度矢量 \mathbf{a} 和重力加速度 $\mathbf{g} = (0, 0, g)^T$, 此处上标“T”表示转置), 然后积分, 并减去浮标相对于水的平均速度 V_{plat} 得到, 即:

$$V_{\text{mot}} = A \int (\mathbf{a} + \mathbf{g}) dt - V_{\text{plat}}$$

设 V_{obs} 为超声风速仪的测量值, $\mathbf{B} = (x'_0, y'_0, z'_0)^T$ 为风速仪相对于浮标的位置向量。则风速测量数据相对于地球坐标系的修正结果为:

$$V_{\text{true}} = AV_{\text{obs}} + \boldsymbol{\Omega}AB + A \int (\mathbf{a} + \mathbf{g}) dt - V_{\text{plat}} \quad (4)$$

以上就是研究者们常用的运动补偿修正公式。利用此公式可以将晃动平台上超声风速仪测得的风速数据修正为真实风速, 这是非常必要的。在此我们指出, 在此修正过程中无需知道平台的具体重心位置, 只要运动测量系统控件箱与风速仪之间是刚性连接即可。由于上述修正并不能完全消除平台晃动的影响, 下面介绍 Mahrt 等^[5]的流量误差修正算法。

2 Mahrt 等的流量误差修正算法

流量计算关键在于协方差的处理。Mahrt 等^[5]关于流量误差修正的协方差算法如下:

对于某个观测变量 ϕ (如风速分量 u 、超声温度 t_s 、湿度 q 或二氧化碳浓度 c) 来说, 要发生海-气流量其均值 $\bar{\phi}$ 必然存在垂向梯度, 即 $\partial \bar{\phi} / \partial z \neq 0$, Mahrt 等^[5]据此推导出如下的误差公式:

$$\overline{w'(z, t)\phi'(z, t)} - \overline{w'(Z, t)\phi'(Z, t)} = \overline{w'(Z, t)z'} \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial z} \quad (5)$$

在此 Z 为测点的参考高度, $z(t)$ 为晃动过程中测点的瞬时位置, $z'(t) = z(t) - Z$ 。此处垂向脉动风速和 ϕ 的脉动量满足:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{cases} w'(z, t) = w(z, t) - \overline{w(z, t)}, \phi'(z, t) = \phi(z, t) - \overline{\phi(z, t)} \\ w'(Z, t) = w(Z, t) - \overline{w(Z, t)}, \phi'(Z, t) = \phi(Z, t) - \overline{\phi(Z, t)} \end{cases}$$

在此我们指出, 其实公式(4)用到了 $\bar{\phi}(z)$ 在 Z 处 Taylor 展开式的一阶近似:

$$\bar{\phi}(z) = \bar{\phi}(Z + z') = \bar{\phi}(Z) + z' \frac{d\bar{\phi}(Z)}{dz} + \frac{(z')^2}{2} \frac{d^2\bar{\phi}(Z)}{dz^2} + \dots$$

当然这要求垂向脉动位移 z' 很小。此外, 公式(4)要成立还要求均值 $\overline{w'(z, t)} = \overline{w'(Z, t)} = 0$, 而这并非显然, 毕竟 $w'(z, t)$ 依赖于不断变动的垂向位置 $z(t)$ 。

下面我们从测点空间位置变化的角度来重新研究这一问题。

3 平台晃动模型

为了清楚地阐述平台晃动与风速观测之间的关系, 我们先考虑一个简单例子: 在一个球型浮标上只有一台超声风速仪(如 Gill 公司生产的 R3-50 型)架装在桅杆顶端而且保证其测点位于桅杆正上方。先考虑一种简单情况, 那就是在地球坐标系下浮标体在晃动中保持其重心位置不变。

设浮标体的重心刚好位于水面上, 我们取其为坐标原点 O , 则地球坐标系可以如此建立: x 轴指向正东方, y 轴指向正北方, z 轴指向正上方。设观测点 P 离浮标重心的距离为 h , 则在此坐标系下未曾发生晃动时风速仪测点的坐标为 $P(0, 0, h)$ 。相应于此固定坐标系还有一个以测点 P 为原点且跟随其移动的局部坐标系。当风速仪开始工作后, 它输出的是局部坐标系下的风速值。随着浮标体的前后左右晃动, 测点 P 的位置连同相应的局部坐标系一起变化。在固定坐标系下, 为了区分固定点 $(0, 0, h)$ 和随时变化的测点 P 我们将变化了的测点计为 $P^*(x^*, y^*, z^*)$ 。计 T 为流量测量的观测周期(通常取为 30 min), 则在此周期内应当存在桅杆的最大偏角, 设其为 α , 则如图 2 所示, 测点的轨迹全部落在球冠 O_1 上。

由于局部坐标跟随测点位置变化, 所测得的风

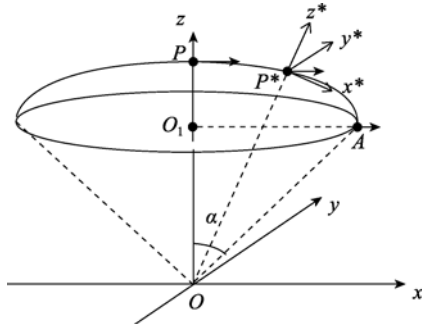


图 2 地球坐标系中的测点轨迹示意图

Fig. 2 Depict the trace of the observational point in the Earth's coordinates

速不是真实风速，所以需要将其转化为固定坐标系下的真实风速。为了与通常所用位置传感器的偏角定义方法一致，在这里我们借用船体旋转的描述方法来说明。定义初始 $t=0$ 时刻浮标的首向向东(也就是 x 方向)，左舷向北(也就是 y 方向)。俯仰角 θ 当首向向下为正，横滚角 φ 当右舷向下为正，偏航角 ψ 当从上往下看时逆时针方向为正。事实上，以 P^* 为原点的局部坐标系与以 O 为原点的固定坐标系的旋转是一样的。此时两个坐标系的转移矩阵即为前述矩阵 A 。这里 θ, φ, ψ 都是时间的函数，它们满足 $-\pi/2 \leq \theta, \varphi \leq \pi/2, 0 \leq \psi < 2\pi$ 和初始条件 $\theta(0) = \varphi(0) = \psi(0) = 0$ 。事实上，最大偏角也可以表示为：

$$\alpha = \text{Max}_{0 \leq t \leq T} \{|\theta(t)|, |\varphi(t)|\}$$

因此，局部坐标和固定坐标之间满足如下关系：

$$\begin{pmatrix} x(t) \\ y(t) \\ z(t) \end{pmatrix} = A(t) \begin{pmatrix} x^*(t) \\ y^*(t) \\ z^*(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ h \end{pmatrix} \quad (6)$$

其中 $(x(t), y(t), z(t))$ 和 $(x^*(t), y^*(t), z^*(t))$ 分别为 t 时刻某测点位置在固定坐标系和局部坐标系中的坐标。特别地，观测点 P^* 的运动轨迹可以由下式确定：

$$\begin{pmatrix} x(t) \\ y(t) \\ z(t) \end{pmatrix} = A(t) \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ h \end{pmatrix} \quad (7)$$

此时垂向坐标满足

$$z(t) = h \cos \varphi(t) \cos \theta(t) \quad (8)$$

所测得的风速 $U^* = (u^*, v^*, w^*)$ 可以通过下式转化为固定坐标系下的真实风速：

$$U = AU^* + \Omega AB$$

在此我们要指出的是：固定坐标系下的真实风速 U 是通过上述变换由局部坐标系下测得的风速 U^* 得到的，它依赖于变化着的测点位置 $P^*(x^*, y^*, z^*)$ 而不是象通常所认为的只隶属于固定测点

$P(0, 0, h)$ 。所以对于运动平台来讲，所得到的真实风速不再只是时间的函数，它还依赖于变化的测点位置。从而 U 的 3 个分量应当具有下述形式：

$$\begin{cases} u = u(x(t), y(t), z(t), t), \\ v = v(x(t), y(t), z(t), t), \\ w = w(x(t), y(t), z(t), t). \end{cases} \quad (9)$$

在后面的讨论中我们总是默认风速为矫正过的固定坐标系下的真实风速，而不再使用局部坐标。另外，对于温度、水汽、二氧化碳浓度等标量值是不需要作旋转矫正的。

当考虑波浪所导致的浮标体上下起伏时，设浮标体的重心刚好位于水面上且浮标体具有良好的随波性。当重心位置刚好位于平均海平面时，选其为固定坐标系的原点 O 。固定坐标系如前面所定义。则此时测点轨迹不仅会受晃动偏角的影响，还受垂向起伏的影响。变化后的重心和测点分别记为 O^* 和 P^* ，重心至测点的距离为 $OP=h$ ，则固定坐标、局部坐标和测点轨迹都如图 3 所示。

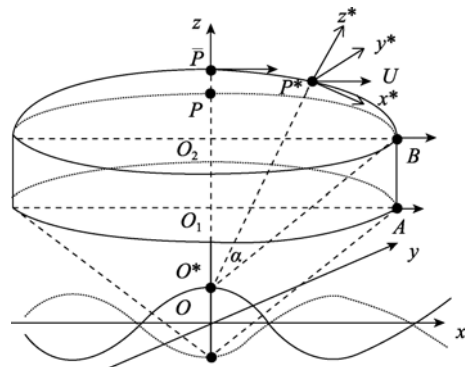


图 3 波浪影响下地球坐标系中的测点轨迹示意图

Fig. 3 Depict the trace of the observational point in the Earth's coordinates with wave effect

此时设自由表面方程为 $z = \xi(x, y, t)$ ，则变化后的重心 O^* 在固定坐标系下的坐标为 $(0, 0, \xi(t))$ ，这里 $\xi(t)$ 为 $\xi(0, 0, t)$ 的简单记法。此时测点轨迹满足：

$$\begin{pmatrix} x(t) \\ y(t) \\ z(t) \end{pmatrix} = A(t) \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ h \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \xi(t) \end{pmatrix} \quad (10)$$

特别地，此时的垂向坐标变成：

$$z(t) = h \cos \varphi(t) \cos \theta(t) + \xi(t) \quad (11)$$

4 分层平均法

在实际应用中观测数据总是离散的。设仪器的采样频率为 f ，则在一个观测周期 T 内，去掉初始

值(由于存在仪器响应时间,最初一个数据不可信)单变量观测数据的总数即为 $N = Tf$ 。当观测点固定在 $P(0, 0, h)$ 时观测变量 ϕ 只是时间的函数且其时间序列能够较好地反映湍流扩散情况。这时其均值为:

$$\bar{\phi} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \phi(t_k) \quad (12)$$

但是在仪器的测点随着平台晃动而不停地改变时这一公式就不再适用了。事实上,在这种情况下风速的各分量都与测点位置有关。对于晃动平台上所测得的数据,通常的研究者在计算通量时总是含糊地默认了下述平均公式:

$$\bar{\phi} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \phi(x(t_k), y(t_k), z(t_k), t_k) \quad (13)$$

而且会将其当成是固定点 $P(0, 0, h)$ 处的均值。很显然,这种处理是缺少理论根据的,而且由于垂向梯度的存在,特别是垂向浓度梯度很大时,这种计算可能会造成比较大的通量计算误差。就平均表达式本身而言就缺少说服力,因为测点的位置 $(x(t_k), y(t_k), z(t_k))$ 会随着平台的不规则晃动而不断变化,即便是这种晃动可以通过运动测量系统记录下来也不成。从统计角度来看,可以对同一固定点上所测得的时间序列作时间平均;也可以对同一固定时刻上所测得的不同空间分布作空间平均;但是对于上述情况,测点位置随时间作无规则变化,但还不是充分的随机运动,所以简单地作时间平均是不合适的。据我们所知也没有人论证过这样做的可行性。

在考察海-气交换时,一般认为水平方向上观测变量不存在梯度或梯度非常小,而梯度只发生在垂直方向上,于是可以用单个点的通量观测值来大概表征一个区域上的海气交换情况。这是一个基本假设,否则将违背“稳定性要求”导致涡相关方法的失效。由于垂向梯度的存在,不同高度处的平均值是不同的,所以 $\bar{\phi}$ 应当随高度 z (固定坐标系中不随时间变化的高度)变化。而如果不考虑垂向变化简单地求平均,这将导致所计算的脉动值含有非湍流成分而使幅值偏大。严格来讲,考虑到平台的无规则晃动和测点的快速变动,即使由一组低频采样的常规观测仪器来测量这一平均值也未必可信。因而,一个可行的途径是利用这些高频数据,通过分层求平均滤除垂向梯度的办法来减少脉动计算误差。具体的步骤如下:

第一步:依照关系式(11)利用运动测量数据找出相邻采样间的最大垂向间隔:

$$\sigma = \text{Max} \{ |z(t_{k+1}) - z(t_k)|, 1 \leq k \leq N \} \quad (14)$$

然后找出测点轨迹所经历的最低点和最高点并将它们之间的间隔按 σ 划分为 $m+1$ 层。各小层的端点分别记为 $\tilde{z}_0, \tilde{z}_1, \dots, \tilde{z}_m, \tilde{z}_{m+1}$, 其中前 $m+1$ 个点间距都为 σ , 最后一个点间距 $\tilde{z}_{m+1} - \tilde{z}_m < \sigma$ 。这种剖分可以保证在以各界点 $\sigma/2$ 为中心的邻域内至少含有一个采样。按这样剖分,第 1 层指区间 $I_1 = [\tilde{z}_0, \tilde{z}_0 + \sigma/2)$ 。第 2 层指区间 $I_2 = [\tilde{z}_1, \tilde{z}_1 + \sigma/2), \dots$ 第 m 层指区间 $I_m = [\tilde{z}_{m-1}, \tilde{z}_m - \sigma/2)$ 第 $m+1$ 层指区间 $I_{m+1} = [\tilde{z}_m - \sigma/2, \tilde{z}_{m+1}]$ 。

第二步:对于第 i 层 ($1 \leq i \leq m+1$) 来说,收集所有满足 $z(t_k) \in I_i$ 的采样并将其测量值取平均,则可得 $\phi(x(t), y(t), z(t), t)$ 在高度 \tilde{z}_i 处的局部均值 $\bar{\phi}_i$ 。设在一个观测周期 T 内,落在第 i 层的采样数为 n_i , 则

$$\bar{\phi}_i = \frac{1}{n_i} \sum_{k=1}^{n_i} \phi(x(t_k), y(t_k), z(t_k), t_k), \quad z(t_k) \in I_i. \quad (15)$$

第三步:利用得到的局部均值可以定义离散形式的垂向均值剖面:

$$\bar{\phi}(\tilde{z}_i) = \bar{\phi}_i$$

当然,为了考察连续问题,也可以将其定义为由这些函数值所拟合的连续曲线。

5 新通量公式

按照上述办法所定义的均值,由于考虑到了垂向不同分布情况,将会减小脉动量的计算误差。但是由于湍流脉动量时时处处都在变化,要想在测点变动情况下仍能用一个观测周期内的有限采样来反映通量大小就不得不接受如下两个假设:

假设 I: 在同一高度平面上,几乎不存在水平梯度,只要观测周期足够长垂向风速 w 和除了垂向风速之外的任何变量 ϕ 的脉动部分 w' 和 ϕ' 在协方差意义下几乎不依赖于水平位置的变化。

假设 II: 在同一水平位置的不同高度处,湍流的尺度变化不大,只要观测周期足够长垂向风速 w 和除了垂向风速之外的任何变量 ϕ 的脉动部分 w' 和 ϕ' 在协方差意义下几乎不随高度变化。

当然这两个假设针对的是晃动情况下的通量计算问题,对于固定情况不需要。我们希望借助这两个假设建立晃动情况和固定情况下通量公式间的关系。首先要计算测点的统计平均高度:

$$Z = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [h \cos \varphi(t_k) \cos \theta(t_k) + \xi(t_k)] \quad (16)$$

其次,在假设 I 成立的条件下水平参考坐标可以自由

选取, 分别记为 $x=X$ 和 $y=Y$ 。相对于固定点 (X, Y, Z) 来说, 由协方差的原始定义应当有:

$$\overline{w'(X, Y, Z, t_k)\phi'(X, Y, Z, t_k)} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N w'(X, Y, Z, t_k)\phi'(X, Y, Z, t_k) \quad (17)$$

其中

$$\begin{cases} w'(X, Y, Z, t_k) = w(X, Y, Z, t_k) - \frac{1}{N} \sum_{r=1}^N w(X, Y, Z, t_r) \\ \phi'(X, Y, Z, t_k) = \phi(X, Y, Z, t_k) - \frac{1}{N} \sum_{r=1}^N \phi(X, Y, Z, t_r) \end{cases} \quad (18)$$

但是对于晃动情况, 测点位置在变, 上述公式不再适用, 这时我们应用(15)那样的平均公式来计算。在第 i 层上对于 $z(t_k) \in I_i$ 其局部均值和脉动量为

$$\begin{cases} w'(x(t_k), y(t_k), z(t_k), t_k) = w(x(t_k), y(t_k), z(t_k), t_k) - \bar{w}_i \\ \phi'(x(t_k), y(t_k), z(t_k), t_k) = \phi(x(t_k), y(t_k), z(t_k), t_k) - \bar{\phi}_i \end{cases} \quad (19)$$

其中 n_i 是落在第 i 层的采样数且所有的采样数满足 $n_1 + n_2 + \dots + n_{m+1} = N$ 。从而由假设 II 知只要观测周期足够长(N 充分大),

$$\begin{aligned} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N w'(x(t_k), y(t_k), z(t_k), t_k)\phi'(x(t_k), y(t_k), z(t_k), t_k) &\approx \\ \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N w'(x(t_k), y(t_k), Z, t_k)\phi'(x(t_k), y(t_k), Z, t_k) &\quad (20) \end{aligned}$$

进一步由假设 I 得

$$\begin{aligned} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N w'(x(t_k), y(t_k), Z, t_k)\phi'(x(t_k), y(t_k), Z, t_k) &\approx \\ \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N w'(X, Y, Z, t_k)\phi'(X, Y, Z, t_k) &\quad (21) \end{aligned}$$

所以联合上两式可得

$$\begin{aligned} \overline{w'(x(t_k), y(t_k), z(t_k), t_k)\phi'(x(t_k), y(t_k), z(t_k), t_k)} &= \\ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{m+1} \sum_{k=1}^{n_i} [w(x(t_k), y(t_k), z(t_k), t_k) - \bar{w}_i] & \\ [\phi(x(t_k), y(t_k), z(t_k), t_k) - \bar{\phi}_i] &\approx \\ \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [w(X, Y, Z, t_k) - \bar{w}][\phi(X, Y, Z, t_k) - \bar{\phi}] &= \\ \overline{w'(X, Y, Z, t_k)\phi'(X, Y, Z, t_k)} &\quad (22) \end{aligned}$$

这一关系表明在前述两个基本假设下, 只要观测周期足够长, 晃动平台上的通量观测值就非常接近于固定平台上的。于是涡相关方法对于晃动情况基本可用且通量计算公式中的协方差就是:

$$\begin{aligned} \overline{w'\phi'} &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{m+1} \sum_{k=1}^{n_i} [w(x(t_k), y(t_k), z(t_k), t_k) - \bar{w}_i] \\ &\times [\phi(x(t_k), y(t_k), z(t_k), t_k) - \bar{\phi}_i] \quad (23) \end{aligned}$$

其中 n_i 是落在第 i 层的采样数且所有的采样数满足 $n_1 + n_2 + \dots + n_{m+1} = N$ 。此公式便于实际应用, 只要将局部坐标系中直接观测到的风速利用前述坐标变换方法换算成真实风速就可以计算通量了。

6 误差修正公式

前面得到的通量计算公式(23)由于考虑到了平台晃动引起的垂向均值的变化, 相对于通常所用公式(当成固定情况处理)应当更为合理一些。它们之间的差别可以认为是使用通常计算公式所带来的误差。用下标“C”来表示常用公式中的变量, 则类比于固定平台情况其计算公式为:

$$\begin{aligned} \overline{w'_C\phi'_C} &= \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [w(x(t_k), y(t_k), z(t_k), t_k) - \bar{w}_C] \\ &\times [\phi(x(t_k), y(t_k), z(t_k), t_k) - \bar{\phi}_C] \quad (24) \end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned} \bar{w}_C &= \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N w(x(t_k), y(t_k), z(t_k), t_k), \\ \bar{\phi}_C &= \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \phi(x(t_k), y(t_k), z(t_k), t_k) \end{aligned} \quad (25)$$

很显然, 这种平均没有考虑垂向浓度梯度的影响, 相比于我们较为精细的通量计算公式来说必然存在误差。由(23)式与(24)式得:

$$\begin{aligned} \overline{w'_C\phi'_C} - \overline{w'\phi'} &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{m+1} \sum_{k=1}^{n_i} \\ &\times [(w - \bar{w}_i)(\bar{\phi}_i - \bar{\phi}_C) + (\bar{w}_i - \bar{w}_C)(\phi - \bar{\phi}_C)] \quad (26) \end{aligned}$$

这一差别可以看成是应用通常公式所带来的误差。以动量通量为例, 对照公式(1)以 τ_C 和 τ^* 分别表示通常公式和新导出公式所算出的通量值, 则前者相对于后者的误差为:

$$\begin{aligned} \tau_C - \tau^* &= -\rho \left[\overline{(u'_C w'_C - u'w')}i + \overline{(v'_C w'_C - v'w')}j \right] \\ &= -\frac{\rho}{N} \sum_{i=1}^{m+1} \sum_{k=1}^{n_i} [(w - \bar{w}_i)(\bar{u}_i - \bar{u}_C) + (\bar{w}_i - \bar{w}_C)(u - \bar{u}_C)]i - \\ &\frac{\rho}{N} \sum_{i=1}^{m+1} \sum_{k=1}^{n_i} [(w - \bar{w}_i)(\bar{v}_i - \bar{v}_C) + (\bar{w}_i - \bar{w}_C)(v - \bar{v}_C)]j \quad (27) \end{aligned}$$

所以在计算晃动情况下的动量通量时, 除了直接应用(23)式之外, 还可以用通常的公式(24)来计算, 只不过还需要减掉上述修正误差。相比于 Mahrt 等^[5]的误差修正公式(5)来说, 此处所导出的公式可以直接应用观测数据进行计算, 不受垂向位移脉动为小量的限制。

7 数值实验

考虑到利用实测资料直接检验文中提出的晃动误差修正有效性的困难所在,我们采用实测湍流脉动风速叠加经验平均风速的办法来做。先不考虑桅杆摇摆晃动,只考虑风速仪测点随波浪起伏作上、下晃动情况。此时垂向位移满足 $z(t_k) = h + \xi(t_k)$, 其中桅杆高度取为 $h=10$ m, 波浪 $\xi(t_k)$ 采用 P-M 谱以叠加波的方式^[6]进行模拟,其 3 min 片段见图 4。

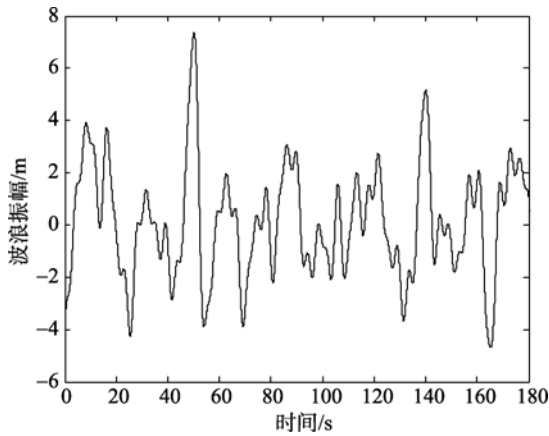


图 4 在 10 m 高处平均风速 $U_{10}=30$ m/s 时以 P-M 谱将 30 个带有随机相位的余弦波叠加成的波浪

Fig. 4 Wave composed of 30 cosine waves with stochastic phases under P-M spectrum approach with the average wind speed of $U_{10}=30$ m/s at 10 m high above sea level

平均风速由下述经验公式给出^[6]:

$$U(z(t_k)) = U_{10} \left(1 + \frac{C_D^{1/2}}{\kappa} \ln \frac{z(t_k)}{10} \right) \quad (28)$$

其中 $\kappa=0.4$ 是 von Karman 常数, C_D 是拖曳系数可由 10 m 高处风速 U_{10} 表示为:

$$C_D = 0.00104 + 0.0015 \left[1 + \exp \left(\frac{1.25 - U_{10}}{1.56} \right) \right]^{-1} \quad (29)$$

另外,湍流脉动风速我们采用 2007 年 12 月 30 日在八大峡码头获取的固定观测数据处理得到。依照我们在[4]中的处理办法,通过能谱可以找到高通滤波截断频率 $f=0.2967$ Hz。由此得到的湍流脉动风速见图 5。

直接由图 5 中的 3 个风速分量 u', v', w' 算出的动量可以认为是最理想的分层平均意义下的动量 τ^* 。有鉴于平均高度选在了 10 m 高处,通常通量公式为:

$$\tau_C = -\frac{\rho}{n} \left(\sum_{k=1}^n [U(z(t_k)) + u'(t_k) - U_{10}] w'(t_k) i + \sum_{k=1}^n v'(t_k) w'(t_k) j \right) \quad (30)$$

它相对于 τ^* 的相对误差以及 Mahrt 等^[5]给出的绝对误差相对于 τ^* 的相对误差统一画在了图 6 中。由于模拟波浪所用各个余弦波具有随机的相位,每一次给出的结果都不一样,因此我们共做了 100 次数值实验。就实验结果来讲,对于 $U_{10}=30$ m/s 情况,相对于我们导出的分层平均通量公式来说通常公式有时会高估 120%, 平均来看大约会高估 26%, 这主要是由风速仪垂向起伏晃动导致平均风速增强顺风脉动所致。而 Mahrt 等^[5]误差公式给出的相对误差却要高

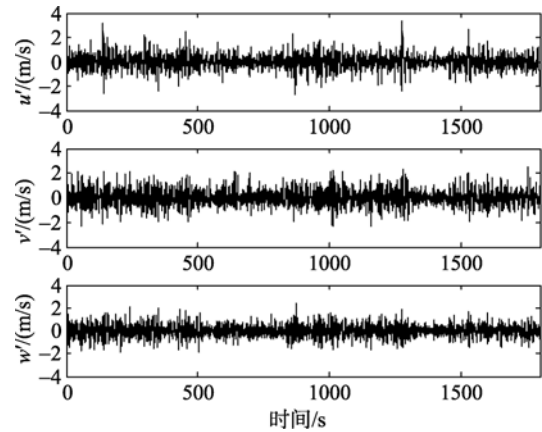


图 5 湍流脉动风速

Fig. 5 Turbulent fluctuated wind velocities

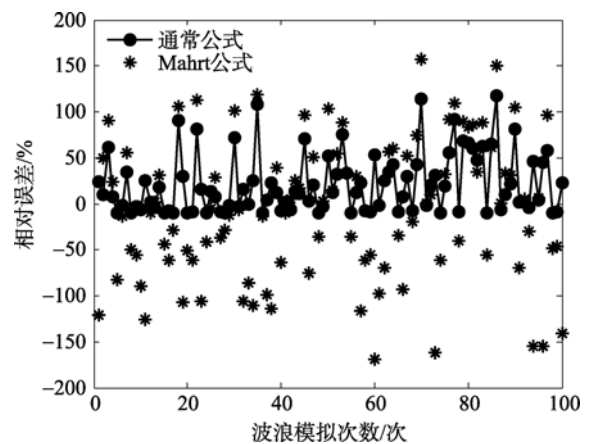


图 6 通常通量公式和 Mahrt 绝对误差公式相对于分层平均通量的相对误差比较

Fig. 6 Comparison of the errors relative to the layer-average flux for the common flux formula and Mahrt's error formula

得多,有时竟能高估或低估 170%, 平均来看误差大约为 $\pm 64\%$, 这远远高于他们所认为的晃动误差 $< 10\%$ 的结论。尽管在 $U_{10}=30$ m/s 的高海况下产生这么大的误差是可能的, 但此时波浪起伏使得垂向位移不再为小量, 破坏了该公式成立的条件。这意味着 Mahrt 等^[5]的结果此时已不足采信。

8 结论

有鉴于通常关于风速的“运动补偿修正”方法并不能完全解决平台晃动对涡相关方法计算通量的影响, 在此我们从平台晃动与风速仪测点位置变化角度重新推导了一个修正模型。该模型充分考虑到了观测变量的均值在垂向上的差异, 并以分层平均的办法予以滤除。相比之下, 将晃动情况视为固定情况来考虑的通常通量公式必然存在误差。对于这一误差我们也给出了明确的修正公式。它与 Mahrt 等^[5]给出的误差公式相比, 可以不受垂向位移脉动为小量的限制。特别是对于观测变量的垂向梯度比较大, 而且受风浪影响在垂向上平台晃动振幅也比较大的情况, 这一误差可能会非常可观。数值实验

结果显示, 在中高海况下由平台晃动引起的通量观测误差是不容忽视的。当然, 这种数值实验也存在不足, 毕竟高风速下的气流湍流与我们定点观测的低风速下的湍流会有很大不同。要真正检验这一误差还有待结合实测资料做进一步研究。

参考文献:

- [1] Anctil F, Donelan M A, Drennan W M, et al. Eddy-correlation measurements of air-sea fluxes from a discus buoy [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic technology*, 1994, 11: 1144-1150.
- [2] Edson J B, Hinton A A, Prada K E, et al. Direct covariance flux estimates from mobile platforms at sea [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic technology*, 1998, 15: 547-562.
- [3] 门雅彬. 船基系统海气通量测量方法研究[J]. *海洋技术*, 2004, 23(3): 51-54.
- [4] 王金良, 宋金宝. 关于涡相关海气通量计算的资料处理技术[J]. *海洋科学*, 2009, 33(11): 1-5.
- [5] Mahrt L, Vickers D, Drennan W M, et al. Displacement measurement errors from moving platforms [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2005, 22(7): 860-868.
- [6] 文圣常, 余宙文. *海浪理论与计算原理*[M]. 北京: 科学出版社, 1984: 276-279, 308-312.

Error correction model for air-sea flux observation on shaking platforms

WANG Jin-liang¹, SONG Jin-bao²

(1. College of science, Qingdao Technological University, Qingdao 266520, China; 2. Key Laboratory of Ocean Circulation and Waves, Institute of Oceanology, the Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China)

Received: Dec., 20, 2010

Key words: eddy-covariance method; air-sea flux; momentum flux observation; error correction; wave

Abstract: To accurately calculate the error caused by platform movement, we constructed a new eddy-covariance flux-error-correction model based on the relation between the platform's movement and the sifting of the observational-point's location. The layer-mean approach was used here to eliminate the vertical difference of the mean-value. We found that under the high and moderate sea state the observational error of the flux caused by the platform's movements was significant. In comparison, the commonly used formula that takes the moving case as the fixed case may produces an unreliable flux under the high and moderate sea state. We suggest that our new formula should be used.

(本文编辑: 刘珊珊)