

船上海气之间湍流通量的观测研究^{*}

胡敦欣 赵永平 陆蔼庆 陈永利 黄雅天

(中国科学院海洋研究所, 青岛 266071)

提要 用6个加速度计组阵系统来监测船体姿态和运动, 校正船上观测到的风湍流资料, 然后用涡动相关技术计算海气之间动量、热量和水汽通量。结果表明, 本观测系统可精确地消除船体运动对风湍流的影响, 并获得精确的海气湍流通量。

关键词 船上 海气湍流通量 观测

海气之间湍流通量的观测在全球气候变化研究中有着十分重要的意义。由于海上条件的限制, 在海上进行通量观测的难度较大。Fujitani (1985)首先采用陀螺稳定平台装置和置于平台上的三维加速度计, 测量和计算船体的运动和姿态。但由于陀螺平台是机械传递系统, 不可避免地存在观测风速与船体之间的时滞问题。为克服这一缺陷, Shao等(1992)¹⁾采用6个加速度计组阵法来监测船体运动和姿态, 取得成功。本文的观测系统是在Shao等人设计方案的基础上, 改进了加速度计的精度、量程、信号放大和数据采集、系统安装等(陆蔼庆等, 1994), 并应用改进后的系统, 在TOGA COARE强化观测期间进行了长时间的使用, 取得了可靠的数据和结果。

1 研究方法

首先对船体运动和姿态进行监测, 然后对在船上观测到的三维风湍流资料进行校正, 以消除船体运动对风资料的影响, 最后用同步观测到的三维风、温、湿脉动资料, 用涡动相关技术计算湍流通量。

1.1 船体运动和姿态监测方法 船体运动是指船坐标原点的三维平移运动、船姿态的变化引起的角速度和线速度。选取地球坐标为参考坐标, 定义 X 轴指向船首方向, Y 轴指向船左方, Z 轴垂直向上。船坐标的原点 o 为6个加速度计组阵的中心, x 轴指向船首, y 轴指向船左侧, z 轴垂直向上。相对于地球坐标, 当船头向下时, 船仰角 $\theta > 0$; 当船右倾时, 船左右旋转角 $\varphi > 0$; 当船首向左旋转时, 船头水平摆角 $\psi > 0$ 。6个加速度计安装在三个相互垂直的支架上, 一对水平向前, 用于测量船体前后运动的加速度; 一对水平向左, 用于测量横向运动加速度; 一对垂直向上, 用于测量垂直运动加速度。每对加速度计之间相隔约2m, 三个支架正交于 o 点。

在地球坐标中, 船体的平移速度(u_{sh} , v_{sh} , w_{sh})、船体姿态角速度(θ , φ , ψ)和加速度计所在位置(r_{1y} , r_{2y} , r_{3z} , r_{4z} , r_{5x} , r_{6x})处速度(V_{1x} , V_{2x} , V_{3y} , V_{4y} , V_{5z} , V_{6z})之间的关

^{*} 中国科学院重点项目: TOGA COARE 资助项目。参加本项工作的还有中国科学院地理研究所孙晓敏、王树森。胡敦欣, 男, 出生于1936年10月, 研究员。

收稿日期: 1993年5月21日, 接受日期: 1995年6月20日。

1) Shao, Y. et al., 1992, Correction of turbulent wind contaminated by irregular motion of ship, CSIRO Centre Environmental Mechanics, Australia.

系为:

$$\begin{aligned}
 C(1, 1)u_{sh} + C(1, 2)v_{sh} + C(1, 3)w_{sh} - r_{1y}\dot{\psi} &= v_{1x} \\
 C(1, 1)u_{sh} + C(1, 2)v_{sh} + C(1, 3)w_{sh} - r_{2y}\dot{\psi} &= v_{2x} \\
 C(2, 1)u_{sh} + C(2, 2)v_{sh} + C(2, 3)w_{sh} - r_{3z}\dot{\varphi} &= r_{3y} \\
 C(2, 1)u_{sh} + C(2, 2)v_{sh} + C(2, 3)w_{sh} - r_{4z}\dot{\varphi} &= r_{4y} \\
 C(3, 1)u_{sh} + C(3, 2)v_{sh} + C(3, 3)w_{sh} - r_{5x}\dot{\theta} &= r_{5z} \\
 C(3, 1)u_{sh} + C(3, 2)v_{sh} + C(3, 3)w_{sh} - r_{6x}\dot{\theta} &= r_{6z}
 \end{aligned} \tag{1}$$

这里 C 为 T 的逆矩阵。 $C = T^{-1}$, T 为船坐标转换到地球坐标的转置矩阵, 它由船体姿态角 (θ, φ, ψ) 决定, 加速度计所在位置处速度可由观测到的加速度在给定初值条件下积分得到。

由(1)式, 可先求解角速度 $\dot{\theta}$, $\dot{\varphi}$ 和 $\dot{\psi}$, 在给定初值条件下积分得到 θ , φ 和 ψ , 从而确定转置矩阵 T 及其逆矩阵 C , 进而解出 u_{sh} , v_{sh} , w_{sh} 。由于采用的 Q-Flex 加速度计不能直接测量某特定方向的加速度, 实测值中包含了重力加速度的倾斜分量, 在用(1)计算之前, 首先必须对各加速度观测值进行倾斜校正。

1.2 船上观测到的风速校正 在地球坐标中, 船上观测到风速的校正公式为:

$$V_c = TV_0 - \Omega \Lambda TR + V_{sh} \tag{2}$$

式中, V_c 为校正后相对于地球坐标系的风速; V_0 为在船上观测到风速; R 为风测头相对于加速度计组阵中心 o 的位置; Ω 为船体运动角速度; V_{sh} 为船体平移速度。(2)式中右边第一项为船上观测到的风速经转置矩阵 T 转换到地球坐标系中的风速, 第二项为风测点绕船坐标原点 o 旋转所造成的相对于地球坐标系的风量分量, 第三项为船坐标原点 o 的平移速度。经(2)式右边三项的校正, 可以获得相对于地球坐标的真风速 V_c 。

1.3 湍流通量的计算 用涡动相关技术直接计算海气之间动量、热量和水汽通量的公式为:

$$\begin{aligned}
 \tau &= -\rho \overline{\omega' c'} \\
 H &= \rho C_p \overline{\omega' \theta'} \\
 E &= \rho \overline{\omega' q'}
 \end{aligned} \tag{3}$$

式中, ω' , c' , θ' 和 q' 分别为垂直脉动速度、水平风、温度和湿度脉动值; τ , H 和 E 分别为风应力、感热和水汽通量。三维风速脉动值用经校正后风速脉动值, 温度用超声波风速温度计输出的温度脉动值, 湿度用 Lyman- α 湿度计测量得到的水汽脉动值。考虑到在海洋大气低层温度和湿度的三维同向特性, 可以认为船体运动对温度和湿度的影响略而不计。由于温度和湿度感应元件安装在船首 28.42m 高的桅杆上, 船体热力影响也可以忽略。因此感热和水汽湍流通量可以直接用船上观测的温度和湿度脉动值代入(3)式计算得到。

2 观测系统

2.1 风、温、湿湍流观测系统 由超声波风速温度计和 Lyman- α 湿度仪组成, 采样频率最高为 20Hz, 本观测中采用 10Hz。用超声波风速温度计测量三维风速和温度脉动。

2.2 船体运动和姿态监测系统 由 6 个加速度计组阵和低噪放大器组成。针对 Shao

等(1992)¹⁾实验中存在问題, 为提高测量精度, 将加速度计的测量范围由 30g 缩小为 $\pm 2g$, 同时选用高精度加速度计, 其分辨率由 $10^{-4}g$ 提高到 $0.5 \times 10^{-6}g$ 。从加速度计组阵中心到实验室主机之间用 100m 电缆传输信号。为有效抑制外界电磁场的干扰, 同时避免微弱信号长线传输衰减, 采用电流传输方式; 终端用高精度采样电阻将信号电流转换为信号电压, 并利用限幅放大器的特性, 有效压缩测量范围, 提高精度。通过三级放大, 使加速度计输入 $\pm 0.5g$ 时, 对应输出电压为 $\pm 5V$ 。本实验中, 各加速度计相对于加速度组阵中心 o 的坐标为:

$$\begin{aligned} r_{1y} &= (0, 1.670, 0) & r_{2y} &= (0, -2.595, 0) \\ r_{3z} &= (0, 0, 0.910) & r_{4z} &= (0, 0, -1.094) \\ r_{5x} &= (-1.455, 0, 0) & r_{6x} &= (1.035, 0, 0) \end{aligned}$$

2.3 数据处理系统 由 16 个通道高位数采仪和配有数据处理软件的计算机组成。为获得高精度的加速度值, 对 6 个加速度计的输入电压用 16 位 A/D 板采集, 精度达 $0.1cm \cdot s^{-2}/mV$, 比 Shao 等采用的 12 位 A/D 板采集精度提高一个量级。其余参数仍用 12 位 A/D 板采集。温度的精度为 $0.1^\circ C/mV$, 湿度的精度为 $0.1g \cdot kg^{-1}/mV$, 风速精度为 $1cm \cdot s^{-1}/mV$ 。系统安装的位置对观测结果有重大影响, 原则上, 风测头应安装在不受船体对风湍流有干扰的地方, 加速度计组阵应安装在尽可能距风测头近的地方。本次观测中, 风速、温度和 Lyman- α 湿度计测点分别安装在船前桅杆顶端右边和左边两侧 1.2m 的支架上, 距水面 16.7m, 船首离水面 7.0m。这种安装方法, 当风从船首或右侧吹来时, 船体和桅杆对风扰动影响最小, 当风从后部、左侧吹来时, 风湍流场将受到严重破坏。为减小风测头与加速度计组阵之间的距离, 这里将该组阵安装在前桅杆正下方的小仓内, 二者相对位置为 $R = (2.63, -1.45, 12.23)$ 。Shao 等人的实验中, 加速度计组阵安装在实验室内, 与风测头之间的相对位置为 $R_s = (28.42, -1.03, 8.39)$ 。二者相对位置的减小, 将有利于提高风测头位置上由于船姿态变化造成的线速度的精度。风、温、湿输出信号用屏蔽电缆输送到实验室内的数据处理系统。

3 风速校正和湍流通量计算结果

为节省篇幅, 这里仅举出一例予以说明。观测时间为 1992 年 11 月 25 日 11:00 (北京时), 样本采集频率为 10Hz, 采样时间为 24min, 观测期间风、温、湿的基本状况见表 1。

表 1 1992 年 11 月 25 日 11:00 平均风速、温度和湿度

Tab.1 Average wind velocity, temperature and humidity in November 25, 1992

项目	u (m/s)	v (m/s)	w (m/s)	θ ($^\circ C$)	q (g/kg)
平均	5.79	3.08	0.92	26.65	18.11
标准差	0.39	1.10	0.48	0.61	0.35

研究指出, 未受扰动的大气湍流场遵守 $-5/3$ 律, 检验船上观测的风脉动受船体运动的影响程度和校正效果, 可以分析校正前后的风速能量谱和湍流通量的交叉谱密度分布得到结论。从图 1、表 2 可看出, x 方向(船纵向)风脉动谱密度(P)分布校正前后的变化不大, 主要是由于该方向的风受船体运动的影响很小, 事实上该方向船体平移速度

1) Shao, Y. et al., 1992, Correction of burbulent wind contaminated by irregular motion of ship, CSIRO Centre Environmental Mechanics, Australia.

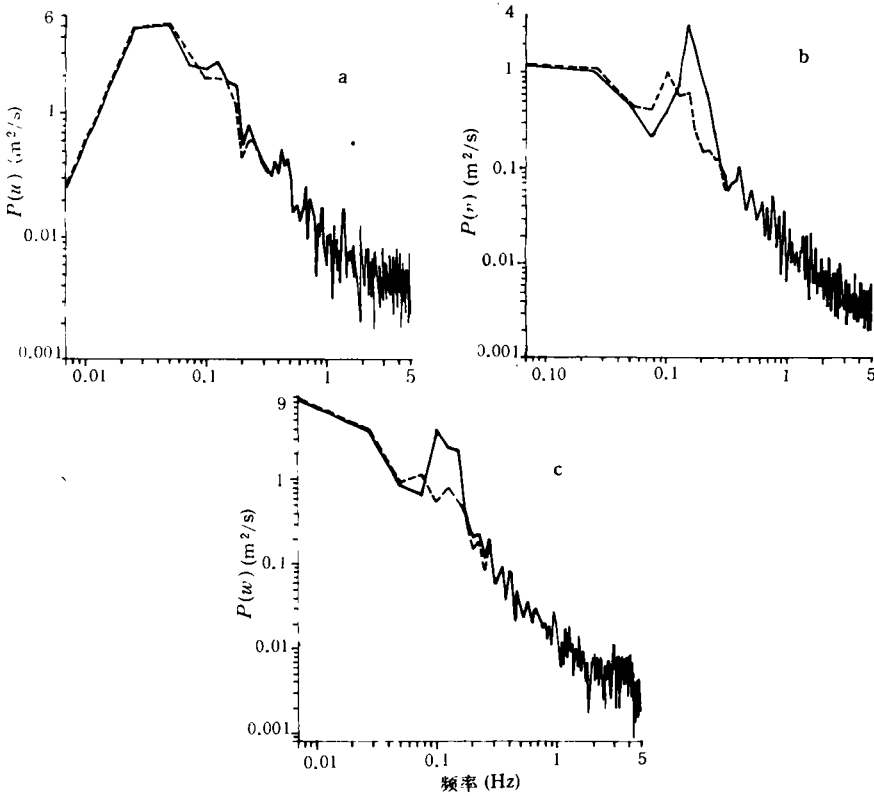


图1 观测(实线)和校正(虚线)风脉动谱密度分布

Fig.1 Spectra of observed (solid line) and corrected (dashed line) wind fluctuation
a. x 方向; b. y 方向; c. z 方向.

校正仅为 0.1cm /s, 船姿态变化造成的线速度约为 0.6cm /s; y 方向(船横向)风脉动谱密度分布表明, 经校正, 船体运动(0.1 — 0.2Hz)被十分明显地移去了, 其中船平移运动约为 2.3cm /s, 船姿态变化造成的线速度约为 8.8cm /s, 校正后的谱型符合 -5 /3 律; z 方向(垂直向)风脉动的校正效果更加明显, 其中由于船垂直向的平移运动的分量最大, 达 17.8cm /s, 与实际垂直风脉动值相当, 校正后的谱密度明显地移去了周期约为 8s 的船垂直方向上的振荡。图 2 曲线下的面积代表了海气之间的热量和水汽通量, 可以看到校正前后的明显差异。在 0.1 — 0.2Hz 频率范围内, 由于船体运动所造成的很大误差。该例用(3)式计算得的感热和潜热通量分别为 53 和 112W /m², 与同期飞机低空湍流通量的观测结果是一致的。用校正前资料计算结果, 二者分别为 112 和 63W /m², 感热输送明显偏大, 为校正后的 2 倍多, 潜热明显偏低, 仅为校正后的一半。

表 2 风速脉动校正各分量的标准偏差(cm /s)

Tab.2 Standard deviation of corrected components of wind fluctuation

方向	TV_0	$\Omega \Delta TR$	V_{sh}	V_c
x	12.7	0.6	0.1	12.1
y	49.1	8.8	2.3	32.1
z	24.2	0.2	17.8	16.5

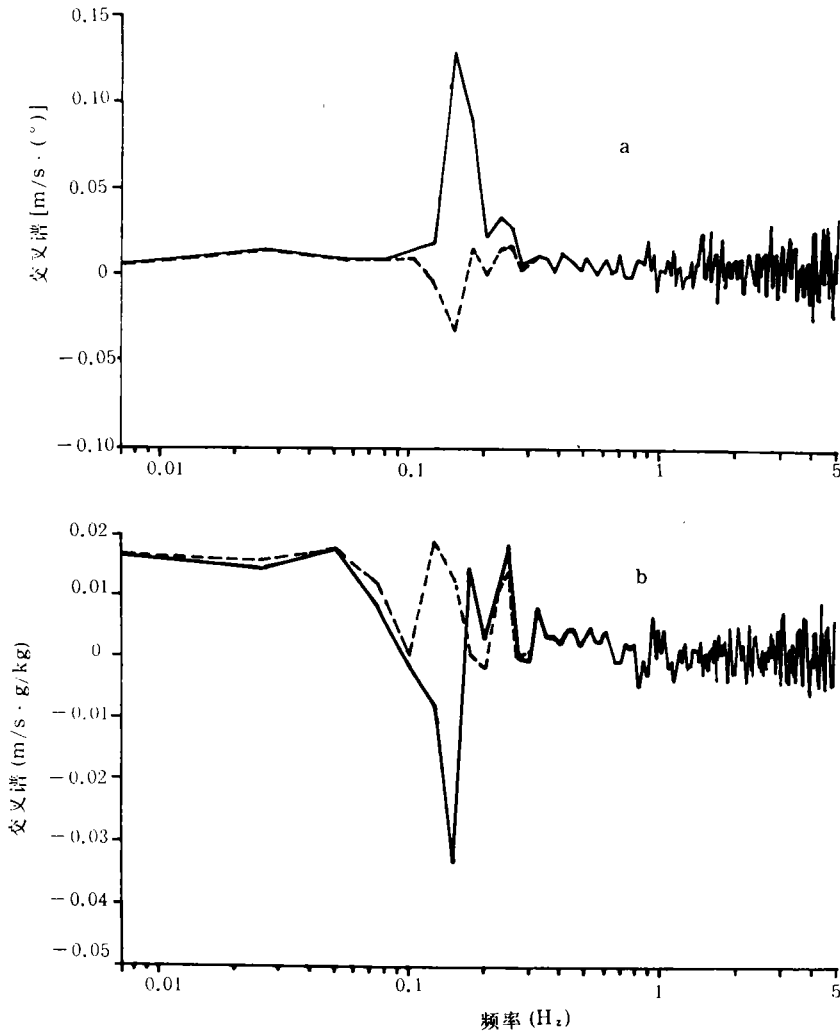


图2 校正前(实线)后(虚线)温度(θ)、湿度(q)与垂直风速脉动交叉谱密度分布

Fig.2 Cospectra of $w'\theta'$ (a) and $w'q'$ (b) before (solid line) and after (dashed line) correction
a. $w'\theta'$; b. $w'q'$.

多个例计算结果表明,改进后的系统对垂直风脉动的校正效果很好,但对水平风脉动的校正,仍有部分效果较差。因此海气之间感热和潜热通量的计算结果较好,而动量通量的计算结果则欠佳(图略)。对水平风速校正未完全成功,其主要原因,可能是由于船体本身(不是指船体运动)所产生的风扰动分量影响的结果。从总体上讲,船体的水平尺度约为垂直尺度的4倍,因而,船体的扰动影响,在水平方向上比垂直方向上明显,而这种影响在本文的校正中是很难消去的。本系统风测头安装在船前桅杆的右侧,观测期间当风从船左侧吹来,此时船体,尤其是左侧桅杆的干扰十分明显。事实上,风资料的分析结果也表明,当风速较大,风从船首或右前方吹来时,水平风脉动的校正效果很好;当风从左前方或左侧吹来时,校正效果则较差。因此正确地安装风测头以避免船体自身对风场扰动的影响,将会提高对水平风脉动的校正和湍流通量的测量结果。

4 小结

综上所述,可以清楚地看到,本观测系统能比较精确地监测船体运动和姿态,基本上能正确地校正船上观测到的三维风脉动资料,并能实时计算海气之间感热和潜热通量。这一工作的初步成功,为我国海气相互作用特别是小尺度海气交换机制的研究奠定了基础。这项研究应当继续下去,使其更加完善,以致最后建立一套完整的测定海气界面动量、热量和水汽通量的技术系统,为海气耦合模式的参数化提供可靠的数据。

参 考 文 献

- 陆贻庆、赵永平等, 1994, 海洋科学, 3: 16—19。
Fujitani, T., 1985, *Meteor. Geophys.*, 36(3): 137—170。

STUDY ON THE AIR-SEA TURBULENT FLUX MEASUREMENTS ON A SHIP

Hu Dunxin, Zhao Yongping, Lu Aiqing, Chen Yongli, Huang Yatian

(*Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071*)

Abstract The wind measurements on a ship are contaminated seriously by the ship's motion, so the air-sea fluxes based on these data are often erroneous. In this work, a 6 accelerometer array was used to monitor the ship's movement and attitude, then the turbulent wind contaminated by irregular motion of ship was corrected. Combining the simultaneous observation of air temperature and humidity fluctuation, the sensible and latent heat fluxes between air and ocean were calculated by the eddy correlation technique. The results showed that, the system of 6 accelerometer array with the resolution $\pm 0.1 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2} / \text{mV}$ can accurately measure ship motion, that the true wind can be obtained by removing the velocity components caused by the ship's motion from the wind velocity observed on a ship, and that the air-sea sensible and latent heat fluxes are largely free of the ship motion contamination.

Key words On a ship Air-sea turbulent flux Observation