

船舶运动速度及姿态角监测系统

MONITORING SYSTEM FOR SHIPSPEEDS AND ATTITUDE ANGLES

陆蔼庆 赵永平 陈永利 黄雅天

(中国科学院海洋研究所 青岛 266071)

通过大量试验证明,涡动相关法是测量湍流通量的可靠方法,但由于船舶的运动,会给观测带来很大困难。本系统能精密测量船舶运动速度和姿态角,对观测气象资料进行精密校正。

16

1 系统介绍

用 6 个加速度计组成船舶运动速度及姿态角校正

海洋科学

系统(图1)。安装时必须保证每只加速度计空间特定指向分量响应。6个加速度计分成3对,由3个2m长的梁连接,3个梁呈长方形排列。3对加速度计固定在3个不同方向,其中每对中的两个指向相同。加速度计1和2测量纵向加速度分量,3和4测量横向加速度分量,5和6测垂向加速度分量。安装时,必须保证3对加速度计的垂直和水平基线交汇于一点。

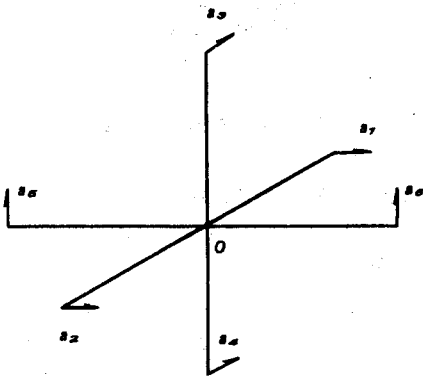


图1 加速度计的位置示意图

2 理论依据

在图2中, $OXYZ$ 表示地球坐标系, $O'X'Y'Z'$ 表示船坐标系,其中 X' 轴指向船首, Y' 轴指向船左侧, Z' 轴指向垂直于 $X'O'Y'$ 平面。船的姿态角分别为横摇角 φ ,纵摇角 θ ,偏航角 ψ 。为了便于计算,规定船的左侧上升姿态角 φ 为正,船首下降角 θ 为正,当船指向规定航向左侧时, ψ 为正。根据以上规定,船相对于地球坐标系的角速度矢量为:

$$\Omega = (\varphi, \theta, \psi) = \left(\frac{d\varphi}{dt}, \frac{d\theta}{dt}, \frac{d\psi}{dt} \right) \quad (1)$$

通过坐标变换,把相对于船坐标系的矢量转换成相对地球坐标系的矢量:

$$A = TA' \quad (2)$$

其中, A' 为船坐标系中测量的矢量; A 为地球坐标系中所表示的同一矢量; T 为变换矩阵。

$$\text{式中, } A' = CA \quad (3)$$

其中, C 为 T 的逆矩阵。

船速和位于加速度计点的速度关系可表示为:

$$V_p = V_{sh} - Tr' \Omega$$

其中, V_p 为地球坐标系中 r' 处的速度; V_{sh} 为地球坐标系中的船速; r' 为加速度计的位置矢量。通过逆变可得到:

1994年第3期

$$V_p = T^{-1}V_{sh} + \Omega \cdot r'$$

上式可以决定船的运动,矢量 V' 可用加速度积分得到。

由于系统的特殊排列形式,6个加速度计的位置矢量与上面所给相同,每一个加速度计测量一个分量,因此可以写成6个方程式:

$$\left. \begin{aligned} C(1,1)U_{sh} + C(1,2)V_{sh} + C(1,3)W_{sh} - r_{1y}\psi &= V'_{x1} \\ C(1,1)U_{sh} + C(1,2)V_{sh} + C(1,3)W_{sh} - r_{2y}\psi &= V'_{x2} \\ C(2,1)U_{sh} + C(2,2)V_{sh} + C(2,3)W_{sh} - r_{3z}\varphi &= V'_{y3} \\ C(2,1)U_{sh} + C(2,2)V_{sh} + C(2,3)W_{sh} - r_{4z}\varphi &= V'_{y4} \\ C(3,1)U_{sh} + C(3,2)V_{sh} + C(3,3)W_{sh} - r_{5x}\theta &= V'_{z5} \\ C(3,1)U_{sh} + C(3,2)V_{sh} + C(3,3)W_{sh} - r_{6x}\theta &= V'_{z6} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

这6个方程式由 $(U_{sh}, V_{sh}, W_{sh}, \varphi, \theta, \psi)$ 变量组成闭合方程组。 $V'_{x1} \dots V'_{z6}$ 是在船坐标系中测量的,这些量可以用 $t=0$ 时的初始条件来决定。即,

$$V_{x1} = \int_0^t a'_{x1} dt + V'_{x1} \quad (t=0) \dots$$

$$V'_{z6} = \int_0^t a'_{z6} dt + V'_{z6} \quad (t=0)$$

在实际测量中,所测加速度值包括重力加速度的倾斜分量,分量大小取决于船的姿态角。

$a'_{x1} \dots a'_{z6}$ 与被测的 $a'_{x1m} \dots a'_{z6m}$ 之间的关系:

$$\left. \begin{aligned} a'_{x1,2} &= a'_{x1m,2m} - C(1,3)g \\ a'_{y3,4} &= a'_{y3m,4m} - C(2,3)g \\ a'_{z5,6} &= a'_{z5m,6m} - C(3,3)g \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

因此求 $a'_{x1} \dots a'_{z6}$ 要知道船的姿态角及 $V'_{x1} \dots V'_{z6}$,已知加速度对倾斜灵敏度受到校正精度的限制,特别是水平方向的校正量。基此条件可得出:

$$\left. \begin{aligned} \psi &= \frac{\int_0^t (a'_{x1m} - a'_{x2m}) dt + [V'_{x1}(0) - V'_{x2}(0)]}{r_{2y} - r_{1y}} \\ \varphi &= \frac{\int_0^t (a'_{y3m} - a'_{y4m}) dt + [V'_{y3}(0) - V'_{y4}(0)]}{r_{4z} - r_{3z}} \\ \theta &= \frac{\int_0^t (a'_{z5m} - a'_{z6m}) dt + [V'_{z5}(0) - V'_{z6}(0)]}{r_{6x} - r_{5x}} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

用 ψ, φ, θ 的初始值,对 ψ, φ, θ 进一步积分可得出:

$$\left. \begin{aligned} \psi &= \int_0^t \dot{\psi} dt + \psi(0) \\ \varphi &= \int_0^t \dot{\varphi} dt + \varphi(0) \\ \theta &= \int_0^t \dot{\theta} dt + \theta(0) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

得出 ψ, φ, θ 后, 可以求出加速度的倾斜分量, 将(8)代入(5)解出 V_{sh} 。

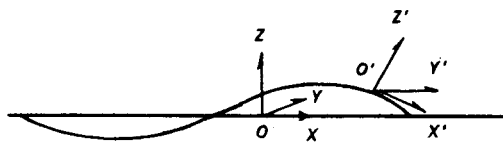


图2 地球坐标系与船坐标系示意图

3 加速度计工作参数的选取及选型

3.1 工作参数

3.1.1 最大加速度 a_{max} 由于自然界没有波面角大于 20° 的波浪, 故一般取遭遇波的波陡不大于 $1/10$ 。这时, 最大波面角 $\alpha_0 = 2R_B/\lambda = 18^\circ$ (λ 是波长, R_B 是半波长), 这样加速度计具有最佳测量范围。实际上, 涌浪接近于平面微幅进行波, 研究这种波浪时, 其垂向加速度幅值为 $\omega^2 R_B$ ($\omega = 2\pi/T$, ω 和 T 分别为角频率和周期)。波长与周期的关系为 $T = \sqrt{\frac{2\pi\lambda}{g}}$ (g 为重力加速度)。在涌浪时, 船舶随浪运动为全响应。因此, 垂向 $a_{max} = \pi g (\frac{2R_B}{\lambda})$, 因为 $\frac{2R_B}{\lambda} = 1/10$, 所以 $a_{max} = 0.314g$, 取 $a_{max} \geq \pm 0.3g$ 。

3.1.2 最小加速度 a_{min} 超声风速仪测量的最小风速为 1cm/s , 因此, 要求船运动速度为 1cm/s 。中科院海洋研究所“科学一号”调查船船体的固有运动周期为 $5\sim 7\text{s}$, 计算结果为 $a_{min} = 1.4 \times 10^{-4}g$ 。所以取 $a_{min} \leq 1.4 \times 10^{-4}g$ 。

3.2 加速度计选型

根据工作参数, 选择 Q-Flex 型石英挠性伺服式加速度计。这是一种力反馈平衡式仪表, 它以单摆效应为基础感受到被测加速度。采用力矩电流作为仪表输出, 具有高分辨率和可靠性, 动态范围可大于 120dB 。量程水平型、垂直型均为 $\pm 2g$, 频响 $0.5\sim 0.03\text{Hz}$, 阻尼 0.7 , 分辨率 $5 \times 10^{-6}g$ 。

3.3 加速度计标定方法

采用重力翻滚法。当分度仪器转动时, 使加速度计处于不同的角位置, 加速度计受到对应不同重力加速度分量的输入(标定装置图略)。其关系为:

$$a_x(t) = g \sin \theta(t) = g \theta(t)$$

式中 $\theta(t)$ 为分度头时域转角, 即角度传感器输入信号; $a_x(t)$ 为与分度头转角对应的重力加速度分量时域信号。

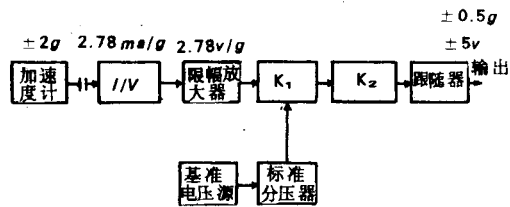


图3 通道标定放大器

4 六通道标定放大器

4.1 方框图见图3

4.2 电路特点

4.2.1 从加速度计安装点到主机间采用 100m 电缆传输信号, 为了有效抑制外界电磁干扰, 避免微弱信号长线传输产生衰减, 加速度计采用电流输出, 终端利用高精度采样电阻将信号电流转换成信号电压。

4.2.2 利用限幅放大器限幅特征, 有效地压缩测量范围扩大量程, 大大提高测量精度。通过两级放大, 使加速度计输入 $\pm 0.5g$ 时, 输出为 $\pm 5V$ (即 $10V/g$)。

4.2.3 为了使电路在动态 ($10V/g$) 时, 有效分辨出 $10^{-4}g$ (即对应输出 1mV 信号), 电路的限幅放大器及第1级前置调零放大器采用超低失调运放电路, 具有 $60\mu\text{V}$ 的失调电压, $0.5\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ 的电压温漂, $0.5\mu\text{V}/\text{MD}$ 的电压时漂及 $0.25\mu\text{V}$ 的输入噪声电压, 使两级电路噪声电平小于 $5\mu\text{V}$ 。第二级放大器及跟随器采用斩波自稳零集成运算放大器。

4.3 整机性能

(1) 通道数为6通道; (2) 每两个通道一致性误差 $< 0.5 \times 10^{-3}$; (3) 动态范围为 $\pm 0.5g$, 对应输出 $\pm 5V$; (4) 灵敏度 $10V/g$; (5) 分辨率 $10^{-4}g$ 对应输出 1mV ; (6) 非线性 $< 1 \times 10^{-3}$; (7) 环境温度 $-5^\circ\text{C} \sim +60^\circ\text{C}$; (8) 工作电压为交流 $220V \pm 10\%$ 。

5 海上试验情况

1992年10月10日至1993年2月20日中科院海洋研究所“科学一号”船在东经 156° , 南纬 4° 为期 100d 的“热带海洋全球大气计划 (TOGA COARE)”强化观测

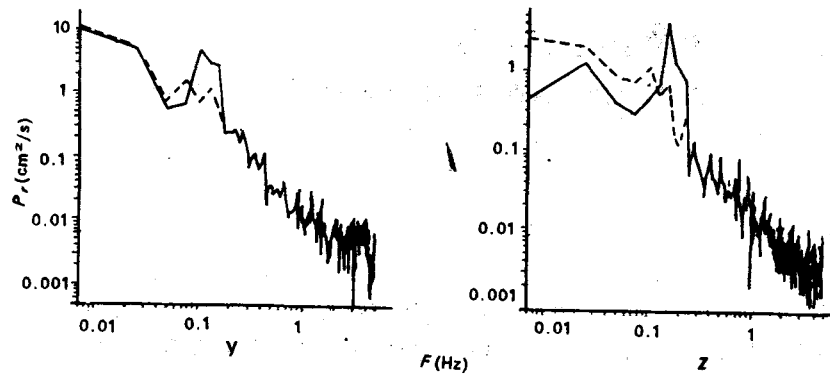


图4 校正和非校正风速的能量谱。从谱形明显看出,未校正前的风速谱在频率0.1~0.2Hz内出现明显的尖峰,这是由于船舶运动的不均匀造成的。校正后,不再出现上述尖峰。这一结果证实了本

试验中,用该系统测量的参数成功地对超声风速仪的风谱进行有效地校正,并取得了“TOGA COARE”指挥中心的承认,在我国首次实现了船体运动非均匀性影响的风速校正。

6通道输出的船舶运动的加速度姿态角及速度是船舶在深水锚定条件下观测的(图略)。

图4是使用船舶运动和姿态角监测系统测得的参数及船上观测到的水平风和垂直风的校正结

系统能够精确地对船体运动非均匀性影响的风速进行校正。

参考文献(略)