

海洋湍流的测量及相关分析*

¹李文娟 ¹冷秀华 ²魏泽勋 ²沈宁 ²方国洪

(¹ 国家海洋局第一海洋研究所 青岛 266003)

(² 中国科学院海洋研究所 青岛 266071)

提要 对海洋湍流速度脉动的一维概率密度作了测量,并把测量结果与高斯分布进行了比较。比较的结果表明,一个接近于高斯分布而另一个却差别较大。计算到直至五阶湍流相关函数并与网格湍流进行了比较,结果都表明小时间间隔中测量结果与网格湍流的结果近似一致,而大时间间隔中却相差很大。以上结论说明了较长的测量时间的必要性。

关键词 海洋湍流,测量,相关分析

湍流理论除数值方法外主要有三个方面:湍流的谱理论,物理空间方法和概率空间方法。相应地,在实验上有必要测量和计算湍流的谱函数,相关函数以及概率密度等。

1994年4月,作者用美国 Inter Ocean 公司生产的 S₄ 电磁海流计在 125.9897°E, 32.0158°N 站, 0.5s 取样间隔进行了两个多小时海流观测,获得了数十万个数据。本文就是对这些数据进行初步分析的结果。因为第一次测量只是一种尝试,所以在本文中并没有分析海洋湍流的谱结构,只是计算了两个分量(东分量,北分量)的概率密度,发现一个比较接近高斯(Gauss)分布,另一个却有较大的差异。另外,还计算了任意两点时间的直到五阶的相关函数,并估计了积分

* 国家自然科学基金资助项目。

收稿日期:1996年5月3日

尺度。这些相关曲线与 Frenkied^[1,2]等以及 C. W. Vanatta^[3]等的结果在趋势上大致相符,但是因他们使用的数据来自实验(网格湍流),因而实验条件的人为控制就使得各阶平均值严格为常数,再加之足够长的数据长度便使得用时间平均代替系综平均更加合理,所以他们的相关曲线比我们的对实际海洋湍流测算得到的相关曲线要平滑许多。

1 取样率与湍流

作为第一步,计算了北分量 u 的平均值 U 及脉动速度 $u' = u - U$ 的平方的平均值 $\langle u'^2 \rangle$, 以确定提供这些量的稳定值所必须的数据长度, $\langle \rangle$ 表示系综平均,这里根据各态历经假设用时间平均代替。发现近万个数据组成的时间序列对于计算二阶甚至五阶的两点时间相关是合适的。试图计算更高阶的相关,但发现相关曲线很弥散,这说明用这样的数据长度计算更高阶的两点时间相关是不合适的。

接下来,对两个分量时间序列分别隔 1min 和 3min 取平均,又得到两个时间序列。这相当于取样率分别为每 min 一个样本和每 3min 一个样本的取样率所得的时间序列。分别对这 3 组时间序列计算平均 Reynolds 应力,发现取样率从高到低所得的时间序列的平均 Reynolds 应力之比为 102 : 28 : 19, 因此,最高取样率对应的 Reynolds 应力与最低取样率对应的 Reynolds 应力相差较大,而中间的和最低的取样率对应的 Reynolds 应力之间差别不大。这说明海洋测量中常用的取样率(每 min 一个样本)主要反映的是平均流的效应,而 S_4 海流计最高取样率的选取较多地保留了湍流信息,因此, S_4 海流计可用以湍流的测量。

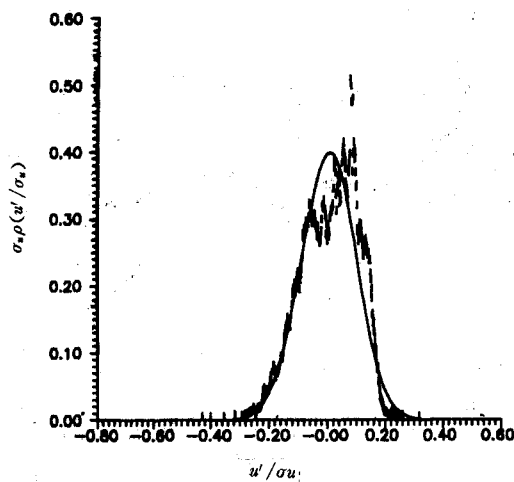


图 1 脉动速度 u' 的一维概率密度

$U = -7.55 \text{ cm/s}$, 实线是高斯分布

Fig. 1 One-dimensional probability density for velocity fluctuation u' .

$U = -7.55 \text{ cm/s}$, solid line is Gaussian distribution

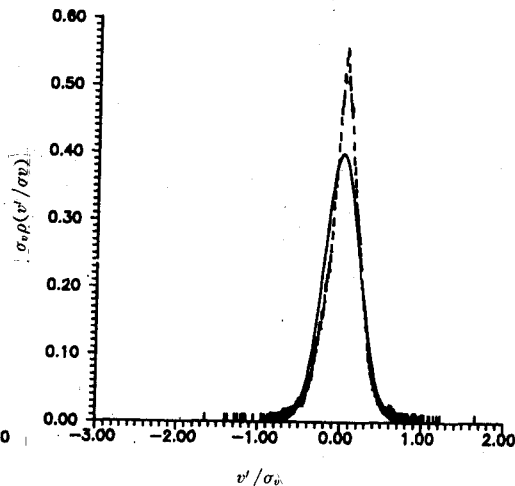


图 2 脉动速度 v' 的一维概率密度

$v = 43.50 \text{ cm/s}$, 实线是高斯分布

Fig. 2 One-dimensional probability density for velocity fluctuation v' .

$v = 43.50 \text{ cm/s}$, solid line is Gaussian distribution

2 脉动速度的概率密度

一维概率密度 $p(u'/\sigma_u)$ 与 Gauss 分布相差较大, 而 $p(v'/\sigma_v)$ 与 Gauss 分布相差不大, 其中 u' 和 v' 分别是流速脉动的北分量和东分量。 U 和 V 分别是流速北分量 u , 东分量 v 的平均值, $\sigma_u = \langle u'^2 \rangle^{1/2} = \langle (u-U)^2 \rangle^{1/2}$ 和 $\sigma_v = \langle v'^2 \rangle^{1/2} = \langle (v-V)^2 \rangle^{1/2}$ 。它们的值分别为:

$$U = -7.55 \text{cm/s}, V = 43.50 \text{cm/s},$$

$$\langle u'^2 \rangle = 112 (\text{cm/s})^2, \langle v'^2 \rangle = 21.34 (\text{cm/s})^2$$

$$\langle u'v' \rangle = 10.21 (\text{cm/s})^2$$

图 1 和图 2 中的点分别表示 u' 和 v' 的概率密度, 实线是相应的 Gauss 分布 (与实际概率密度有相同的均值和方差)。

3 相关

相关函数 $R(m, n), S(m, n)$ 定义为:

$$\langle u'^2 \rangle^{1/2(m+n)} R(m, n)(\tau) = (1/N) \sum_{t=1}^N u'^m(t) u'^n(t + \tau),$$

$$\langle v'^2 \rangle^{1/2(m+n)} S(m, n)(\tau) = (1/N) \sum_{t=1}^N v'^m(t) v'^n(t + \tau)$$

$$(\tau = 0, 1, 2, \dots, m, n = 1, 2, 3, \dots)$$

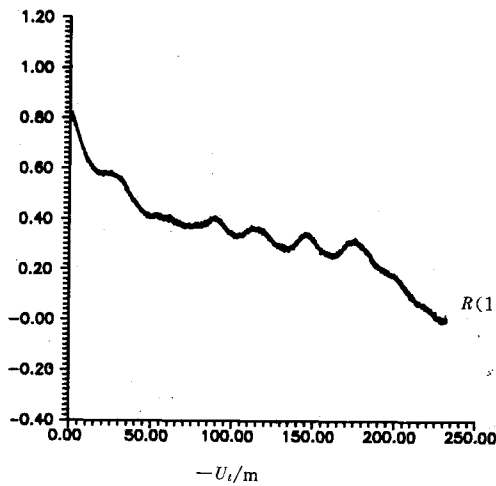


图 3 相关函数 $R(1,1)$
平均速度 $\mu = -7.55 \text{cm/s}$, 常数 $m=100 \text{cm}$
Fig. 3 Correlation function $\mu = -7.55 \text{cm/s}$, $m = 100 \text{cm}$

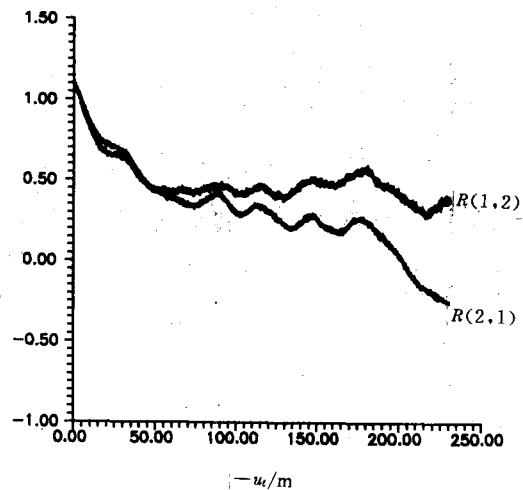


图 4 相关函数 $R(1,2), R(2,1)$, 平均速度 $\mu = -7.55 \text{cm/s}$ 常数 $m=100 \text{cm}$
Fig. 4 Correlation functions $\mu = -7.55 \text{cm/s}$, $m = 100 \text{cm}$

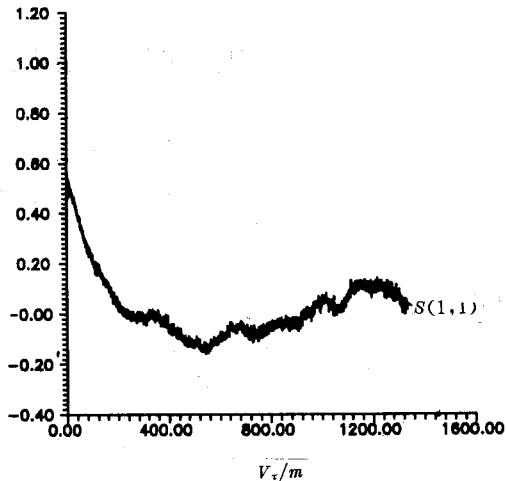


图5 相关函数 $S(1,1)$
 平均速度 $V=43.50\text{cm/s}$, 常数 $m=100\text{cm}$
 Fig. 5 Correlation functions
 $V=43.50\text{cm/s}$, $m=100\text{cm}$

当 $m+n$ 为偶数时, 称 $R(m,n)$ 和 $S(m,n)$ 为偶阶相关; 当 $m+n$ 为奇数时, 称 $R(m,n)$ 和 $S(m,n)$ 为奇阶相关。根据具体情况, 选取 $N=5940$, τ 的最大数为 3060, 约占总数据量的 $1/3$ 。

对于偶阶相关, 给出了 $R(1,1)$ 和 $S(1,1)$ (图 3, 图 5)。这些图形与 C. W. Vanatta (1968) 等的结果在趋势上很一致, 特别是时间间隔 τ 不大的时候。从图 3 和图 5 可看出二阶相关 $R(1,1)$ 和 $S(1,1)$ 的尺度近似为 12min 和 2min 左右。

对于奇阶相关, 给出了 $R(1,2), R(2,1)$, (图 4)。这些图形与 C. W. Vanatta 等(1968) 的图 10 做比较, 发现在 τ 不大时, 但 $R(1,2)$ 和 $R(2,1)$ 的图象有较大的差异。关于奇阶相

关, C. W. Vanatta 等(1968)的结果与 Frenkiel 等(1968)的结果也反映出了不一致性(偶阶相关表现出一致性)。

4 结论

脉动速度的东分量和北分量的概率密度的明显差别说明各向同性假设对海洋湍流不再成立。目前的各阶相关曲线与网格湍流曲线在时间间隔不太大时在趋势上一致, 以及每 min 取样一次的测量所得的 Reynolds 应力与 S_4 海流计最高取样率所得的 Reynolds 应力相差较大的事实说明 S_4 海流计用于海洋湍流的测量是可行的。注意到二阶相关与横轴相交后便远离横轴以及高阶相关曲线在时间间隔很大后与网格湍流相应的相关曲线吻合得不好说明在以后的测量中应增加测量的时间。

参考文献

- [1] Frenkiel, F. N. and Klebanoff, P. S., 1967. *Phys. Fluids* 10, 507.
- [2] Frenkiel, F. N. and Klebanoff, P. S., 1967. *Phys. Fluids* 10, 1737.
- [3] Vanatta, C. W. and Chen, W. Y., 1968. *J. Fluid Mech* 34, 497-515.

THE MEASUREMENT IN THE OCEANIC TURBULENCE AND CORRELATION ANALYSIS

¹ Li Wenjuan ¹ Leng Xiuhua ² Wei Zexun ³ Shen Ning and ⁴ Fang Guohong

(¹ *The First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao, 266003*)

(² *Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao, 266071*)

Received: May, 3, 1996

Key Words: Oceanic turbulence, Measurement, Correlation analysis

Abstract

One-dimensional probability densities for oceanic turbulent velocity fluctuations and comparison with the Gauss distribution are given. It is found that one is close to the Gauss distribution and another is not. Turbulent correlation functions up to the fifth order are calculated and comparison with the correlated functions in grid turbulence shows that they are approximately equal in the small time interval and greatly different in the large time interval, which explains longer measurement time to be needed.