

一次寒潮强风过程渤海海上二维风速、 风向谱分析*

赵永平 井立才 陈永利 黄雅天
张必成 杨连素
(中国科学院海洋研究所, 青岛)
吴术礼 宋珊
(渤海石油公司, 天津)

提要 本文使用渤海石油平台观测的超声波风速脉动资料, 计算了强风条件下二维风速和风向的最大熵谱和傅立叶功率谱。结果表明, 在不稳定条件下, 海上大气湍流能量主要集中在风扰动的低频段, 随着风速的加大, 高频扰动的贡献逐渐增加; 纵向风速具 99s 的主振荡周期, 侧向风速和风向具同一谱型, 它们的主振荡周期为 132s。结果还指出了不同特性的气团具不同的大气湍流特征。

自 1950 年以来, 随着观测仪器的改进, 人们对大气湍流的结构有了进一步的了解。有关风速谱的分析, Berman^[2] 提出了用平均风速、高度、稳定性和粗糙度作为参数来估计纵向风速谱; Kaimal^[3] 等全面地给出表面层乱流的谱特征; Busch^[3,4] 等综合分析了已有的谱分析资料, 讨论了各种稳定性条件下海上和陆上的风速谱特征。但以上的工作均缺乏大风条件下的风速资料, 特别是海上大风个例。本文的目的是利用在渤海辽东湾海洋石油平台上观测到的强风脉动资料, 计算二维风速(纵向风速和侧向风速)及风向的功率谱, 以了解海上强风时风扰动的特征, 同时为海上建筑的设计提供有关参数。

一、资料的采集和处理方法

谱分析所用的资料, 是用日本产的 DAT-310 型真风向风速超声仪在渤海辽东湾石油平台上观测的。该仪器测风范围为 $0 \pm 30\text{m/s}$, 分辨率为 0.005m/s , 采样时间是可调的, 最快为 20 次/s。

在石油平台上, 上层建筑较多, 为减少障碍物对观测资料的影响, 我们将超声波风速仪的探头安装在桩柱的顶端, 探头距海面的高度为 52m。为获得海上强风时的风速资料, 当海上出现 6 级以上大风时, 我们即进行观测。采样时间间隔为 0.1s。

* 中国科学院海洋研究所调查研究报告第 1536 号。本工作为原国家经费下达的“渤海海况和海水研究”项目的部分内容。该项目负责人为卞家溪、方国洪、庄国文和吴术礼、王进忠。贾汝勇、陶来玺等同志参加了海上观测。

收稿日期: 1988 年 5 月 4 日。

由于仪器观测的资料为电压模拟量,为获得真风速和真风向,必须进行模数转换。因此,我们首先在 IBM-4331 机上进行了超声波电压信号读入、原始信号转换和订正,然后在渤海石油公司的 VAX-785 机上进行谱的分析计算。

二、二维风速、风向谱分析

1. 计算方法

估计功率谱的方法有多种,如傅立叶功率谱分析,周期图方法和最大熵谱方法等。我们在分析中,主要采用最大熵谱方法^[1],辅之以傅立叶功率谱分析。

熵是信息论中用来衡量随机事件不稳定程度的量,一般表示为:

$$H = \int_{-\infty}^{\infty} \ln S(\omega) d\omega \quad (1)$$

式中, S 为功率谱密度。在随机变量中的一组现实值 X_1, X_2, \dots, X_n (采样时间 $\Delta t = 1$ 单位)的情况下,如果它们出现的熵值达到极大时的输出功率也是最大,这样的功率谱称之为最大熵谱。

根据功率谱与自相关系数的关系,按照拉格朗日乘子法,可以得到满足(1)式的最大熵谱表达式:

$$S_E(\omega) = \frac{\sigma_{k_0}^2}{\left| 1 - \sum_{K=1}^{K_0} b_K^{(K_0)} e^{-i\omega K} \right|^2} \quad (2)$$

式中, $b_K^{(K_0)}$ 为过滤系数; K_0 为阶数; $\sigma_{k_0}^2$ 为预报误差方差估计。

最大熵谱估计,实质上是对已知时间序列用落后相关或回归方法,以最大熵为原则估算其功率谱。

对过滤系数 $b_K^{(K_0)}$, 一般用最小二乘法,使用向前与向后预报误差最小来求出。有关阶数 K_0 的确定,至今尚未完全解决,一般取阶数小于 $n/2$ 为宜 (n 为资料序列长度);也有人使用 Akaike “最终预报误差”(FPE) 最小来确定最佳阶数。但在我们的计算中,因 FPE 最小时的阶数太小(在 4—8 之间),使谱值过分平滑,达不到分辨周期的目的,因此在我们的分析中,取 K_0 的值约等于样本数的 $1/3$ 。

有关大气湍流谱的分析表明,大气中存在各种不同尺度的扰动。就小尺度扰动来说,几秒到 100 多秒的周期性扰动均可出现,同时这些扰动的主周期随大气稳定度的增加而加大。为分析海上强风条件下大气小尺度湍流情况,我们首先对采样时间为 0.1s 的资料系列进行平滑滤波,滤去 1s 以下的扰动,形成时间间隔 $\Delta T = 1s$ 的样本序列。计算中样本数 $n = 200$, 取 $K_0 = 60$ 。

原始资料提供了风速的东分量和北分量。为获得纵向风速、侧向风速和风向,首先求出合成风,然后求出样本序列的风向主方向,再将各次的合成风分解为相对于主方向的纵向风 (u), 侧向风 (v) 和风向 (D)。计算公式为:

$$\begin{aligned} D &= \alpha - \bar{\alpha} \\ u &= w \cos D \\ v &= w \sin D \end{aligned} \quad (3)$$

式中, $\bar{\alpha}$ 为合成风的主方向, α 为风向, w 为合成风速。

选取 1986 年 11 月 23—25 日的寒潮大风过程, 在冷锋过境前, 每隔 20 分钟选取一组样本, 在冷锋过境后, 每隔 10 分钟选取一组样本, 共选取 90 个样本。对每个样本的纵向风速、侧向风速和风向进行最大熵谱和傅立叶功率谱分析。在进行谱分析之前, 首先用线性回归方法消去趋势项, 从而获得相对于总趋势的距平值资料序列。然后用 Kirt^[6] 的最大熵谱分析程序进行计算。

2. 主要结果

(1) 强烈不稳定条件下, 偏北大风时二维风速、风向谱特性 计算所用的资料取自一次强冷空气南下过程, 冷空气过境前为西南风, 平均风速约 10m/s; 冷锋过境后为偏北风, 最大风速为 21m/s。8 小时后风速减弱, 平均风速仍达 14m/s。11 月份该海域平均水温约 10°C, 在本过程期间, 由于冷空气影响, 海区上空气温急降, 平均气温为一 3.0°C, 这样在整个过程中, 近海面大气处于强烈的不稳定层结状态。

为获得上述偏北大风情况下的平均风速、风向谱, 将冷锋过境后 60 组样本谱经归一化后进行平均, 从而得到二维风速和风向的平均谱型(图 1)。纵向风速的平均最大熵谱见图 1a。由图可见, 纵向风扰动的主周期为 99s。此外还存在 44s 和 25s 的扰动周期。图 1b 给出的是侧向风速谱。由图可见, 侧向风扰动以 132s 为主周期, 此外还存在与纵向风速谱相同的 44s 和 23s 的周期。同时在风扰动的高频部分, 6—18s 之间的扰动也变得比较清楚。侧向风速主扰动周期(132s)比纵向风速主扰动周期(99s)长, 这说明大气近海面活动层的湍流团并不是规则的圆形, 实际上是纵轴垂直于风向的椭圆形湍流团。图 1c 为风向的平均最大熵谱, 与图 1b 侧向风速谱相比较, 两者几乎完全一致。其原因是, 侧向风速的变化主要是由相对于主方向的风向扰动引起的。

偏北大风时纵向风速、侧向风速和风向变化的标准偏差分别为 1.14, 1.23m/s 和 4.91 度。这表明, 纵向风速和侧向风速的变化具同一数量级, 后者稍大于前者。相对于主方向的风向变化平均约为 5 度。

上述三种平均谱图表明, 无论是纵向风速、侧向风速还是风向谱中, 低频扰动对总方差的贡献最大; 而高频扰动在侧向风速和风向谱中比在纵向风速谱中较明显, 虽然它们对总方差的贡献仍然很小。

(2) 偏北大风时风扰动周期与风速的关系 一个例谱分析表明, 大风过程中不同阶段具有特定的分布型。计算纵向风速分别为 12.0, 14.0, 15.5, 18.0 和 20.0m/s 时的最大熵谱和积分傅立叶功率谱(图略), 由图可以看到不同频率风扰动的贡献。风速为 12m/s 时, 风扰动以 80s 和 90s 的低频扰动为主, 高频部分不明显; 当风速增至 14m/s 时, 除去类似的低频扰动外, 还有 17s 和 6s 的风扰动; 当风速增至 20m/s 时, 高频扰动又增加了 2—3s 的扰动周期。由相应的积分傅立叶功率可以清楚地看到, 低频风扰动对风速变化总方差的贡献随着风速的增大而逐渐减小。周期 40s 以上的低频扰动对总方差的贡献, 在风速为 12, 14—16, 20m/s 时分别为 80%, 70% 和 50%。

侧向风速和风向谱与风速之间也有同上述类似的关系, 由于这两种谱型十分接近, 这里仅讨论纵向风速为 12.0, 14.0, 15.5, 18.0 和 20.0m/s 时侧向风速最大熵谱和积分傅立叶功率谱(图略)。在风扰动的低频部分, 风速较小时, 以周期为 80 和 90s 的风扰动为主;

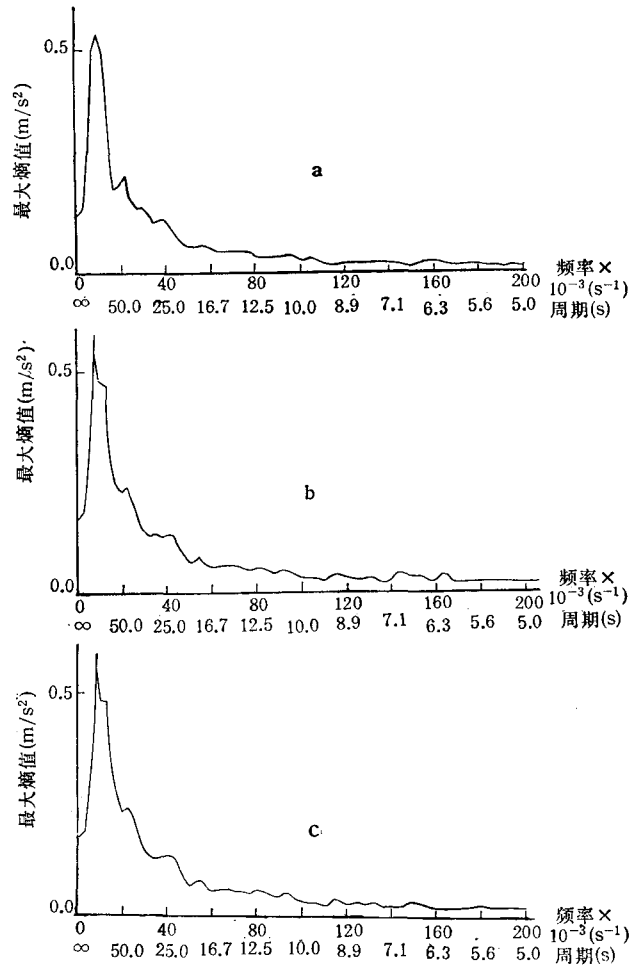


图 1 偏北风平均纵向风速谱图(a) 平均侧向风速谱图(b) 和风向谱图(c)

Fig. 1. Mean entropy spectra (northerly wind)

a. Longitudinal velocity; b. Lateral velocity; c. Wind direction

(横坐标中 \times 应为 n , 图2同。)

风速增大后,低频部分增加了以 44 和 25s 为周期的扰动。在风扰动的高频部分,当风速增至 14m/s, 周期为 18, 3, 7 及 5s 的扰动相继出现;当风速达 15.5m/s 以上时,在整个高频段(2—20s) 均出现了明显的扰动。相应的侧向风速的积分傅立叶谱也清楚地表明了类似于纵向风速谱的情况。不同的是侧向风速谱的低频风扰动的贡献随风速增大而更迅速减小。

从整个扰动状况来看,在强烈不稳定条件下,强风时以 99s 左右(80—132s) 的扰动周期为主,在风速较小时,高频扰动不明显;随着风速的加大,无论是纵向风速、侧向风速或风向,其高频扰动逐渐变得明显。

这种风扰动频率随风速强弱的变化现象可能有两方面的原因:其一,由于风速加大,大气中存在的同一尺度的湍流团移动速度加快,从而使风扰动频率变高;其二,由于超声波风速仪的探头安装在井架高达 52m 的桩柱上,因此,该仪器测量到的风速也包括了井

架的振动(强风时由于风和浪的作用有可能引起井架的高频振动)。这种反映在强风时风速谱中出现的高频扰动,究竟是强风自身固有的扰动还是井架的振动,或者两者兼而有之,仍是一个需要进一步研究的问题。

(3) 风向对风扰动周期的可能影响 偏南风一般为暖湿气流,偏北风一般为干冷气流,它们的风速、风向谱有何差异?本计算样本的大风过程中,冷空气入侵前有一段较长时间的西南风。我们也计算了这段时间西南风的二维风速和风向谱。图 2 给出了平均风速为 10m/s 的谱图。与图 1 相比较,可以清楚地看出,西南风时,风扰动的高频部分十分明显,尤其是风向谱。纵向风速谱中,主周期为 80s,此外还有 40s, 12s 及 9s 的扰动周期。侧向风速谱(图略)和风向谱中还出现 6—7s 高频扰动明显增加。与偏北大风时比较,西南风时的风扰动在高频段十分活跃,它对风扰动总方差的贡献明显加大。据上述,也可以计算来自南方的暖湿气团的扰动尺度。平均来说,它比来自北方冷气团的扰动尺度要小一些。

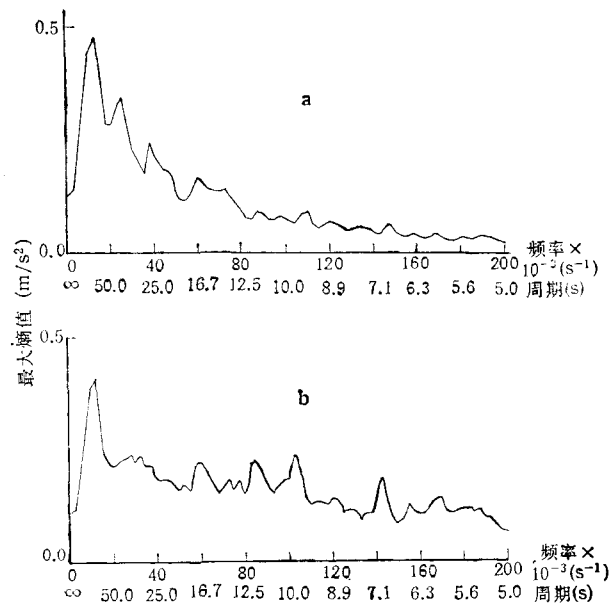


图 2 西南风平均纵向风速谱图(a)和平均风向谱图(b)
Fig. 2. Mean entropy spectra (southwesterly wind)
a. Longitudinal velocity; b. wind direction

3. 讨论

Busch^[3] 和 Kaimal^[5] 等研究结果表明,大气湍流的频率随大气稳定度变化。Busch 给出了陆地区域不同稳定度条件下的纵向风速谱,该图中横坐标为无因次频率 $f = nZ/u$, n 为频率 (s^{-1}); Z 为观测仪器探头高度; u 为平均风速。它表明,在不稳定条件下,风扰动的主频率比中性和稳定情况下的风扰动要低得多。在高度为 46m, 不稳定时,主扰动频率 $f_m = 0.06$ 。本文中观测仪器探头高度为 52m, 平均风速为 15m/s, 纵向风速的主扰动频率为 0.01, 这相当于 $f_m = 0.03$ 。该频率比 Busch 的结果还低。Busch 同时还给出了陆上和海上风速谱的比较,结果表明,海上风扰动的周期比陆地上的要长一些,这也

许就是我们的结果比陆地上结果低的原因。

本文的结果给出了进一步的证据,说明海上大气湍流谱比陆地上大气湍流谱具更多的能量,其物理解释是,陆地下垫面粗糙,近地面的大气湍流团常被切割或阻挡,但在海洋上,这些大气湍流团可以无阻挡地缓慢移动。

以往的大气湍流谱分析多采用傅立叶功率谱分析方法,但由于这种谱型比较平滑,它不能仔细分辨各种风扰动周期。本文采用最大熵谱方法,可以清楚地了解风扰动的各种频段分布,由此也获得了一些新的认识,如风速的强弱与风扰动频率的关系,气团特性(风向)与大气湍流团尺度之间的某些联系。在大气湍流的平均谱分析方面,除得出了大气的主扰动周期外,还得出了一些二级扰动的周期。

综上所述,我们可以得到以下初步结果:

(1) 强风和不稳定条件下,海上纵向风速有 99s 的主振荡周期。侧向风速和风向有 132s 的主振荡周期,与陆上相比,海上湍流团的直径稍大。

(2) 大气湍流的能量主要集中在风扰动的低频段,但随着风速的加大,高频扰动的贡献逐渐增加,风速大于 7 级时,6—7s 的扰动出现,风速大于 8 级时,2—3s 的扰动产生。

(3) 侧向风速谱与风向谱具有同一谱型,两者均有 132s 的主扰动周期,偏北大风时,风向扰动平均约 5 度。

(4) 不同特性的气团具有不同的大气湍流特征。一般地说,北方来的干冷空气中的湍流团尺度较大,移动较快,高频扰动较少;来自南方的暖湿空气中的湍流团尺度较小,高频扰动较多。

以上仅是对一次大风过程的分析,某些结论是否具普遍意义,尚需进一步探讨。

参 考 文 献

- [1] 黄嘉佑、李黄, 1976. 气象中的谱分析。气象出版社, 79—95 页。
- [2] Berman, S., 1965. Estimating the longitudinal wind spectrum near the ground. *Q. J. R. Met. Soc.* 91: 302—317.
- [3] Busch, N. E., 1972. On the mechanics of atmospheric turbulence workshop on micrometeorology, Science Press, Ephrata, pp. 1—66.
- [4] Busch, N. E. and M. A. Panofsky, 1968. Recent spectra of atmospheric turbulence. *Q. J. R. Met. Soc.* 94: 134—148.
- [5] Kaimal, B. C. et al., 1972. Spectral characteristics of surface-layer turbulence. *Q. J. R. Met. Soc.* 98: 563—589.
- [6] Kirt, B. C. et al., 1976. Time series analysis by the Maximum Entropy Method. Environmental sciences division Oak Ridge National Lab. Publication No: 1220: 1—142.

**SPECTRA ANALYSIS OF THE 2-DIMENSION WIND VELOCITY
AND WIND DIRECTION DURING A STRONG
WIND OVER BOHAI SEA***

Zhao Yongping, Jing Licai, Chen Yongli, Huang Yatian,
Zhang Bicheng, Yang Liansu

(Institute of Oceanology, Academia Sinica, Qingdao)

Wu Shuli and Song Shan

(Bohai Oil Company, Tianjin)

ABSTRACT

Using the data set of the wind fluctuation measured by the ultrasonic anemometer on the oil platform in the Bohai Sea, the spectra of 2-dimension wind velocity and wind direction were calculated. The results show that the energy of the atmospheric turbulence mainly occurs in the low frequency band and the contribution of the fluctuation at the high frequency increases as velocity increases; the dominant period of the longitudinal wind velocity is around 99 seconds, and the spectra patterns of the lateral wind velocity and wind direction are almost same with 132 seconds period. The results also show that the different air masses have different turbulent characteristics.

* Contribution No. 1536 from the Institute of Oceanology, Academia Sinica.