

直立堤上浮托力的统计分析

董吉田 陈雪英

(国家海洋局第一海洋研究所, 青岛)

摘 要

本文利用原体观测站测得的表面波与直立堤上浮托力的记录, 计算了表面波与各测点浮托力的单谱及各测点浮托力与表面波之间的互谱, 频率响应函数和凝聚函数等, 揭示了直立堤上浮托力统计特征以及它们与堤前表面波间的频率、位相、量值关系。文中还介绍了浮托力观测装置及测点的位置分布。

重力式直墙建筑物的稳定性, 除了取决于它自身的重量、波浪冲击力之外, 底部浮托力也是使其倾覆和滑动的重要因素。浮托力是在波浪的作用下, 在建筑物和基础衔接的透水部产生的一种不均匀的、随时间而变化的浮力(含向上向下两个方向)。由于它的存在, 当波峰到达时, 使建筑物产生一个倒向湾内方向的倾覆力矩, 这种力矩恰好与波浪的冲击力矩一致, 计算表明, 浮托力引起的力矩, 在量值上有时与波浪冲击力的力矩相当。因而, 由于浮托力的存在, 使得建筑物倾覆的可能性大大增加。由此看来, 浮托力对建筑物的设计是一个不可忽视的因素。目前, 计算浮托力多数按三角形的公式计算, 即把直墙前趾的浮托力看作与水底波压力相同, 而直墙后趾的浮托力为零, 浮托力沿直墙断面的分布为直线变化, 这样构成的压力三角形即为浮托力的计算公式^[1, 2]。但有的文献认为浮托力在直墙后趾处不为零, 而构成梯形的浮托力计算公式。

无论是三角形计算公式, 还是梯形计算公式, 均属理论推断, 或者采用模型实验结果, 依据都不够充分。究竟实际的直墙建筑物的浮托力如何沿断面变化, 迄今仍是一个有争议的问题。为了揭示直墙建筑物的浮托力的量值、变化及其与波浪之间的关系, 我们在黄海G港防波堤沉箱底上预埋了浮托力测量装置, 于1984年11月3—4日的大风过程中取得了直立堤上浮托力与堤前波浪的自记资料, 并对所得资料进行了某些分析计算。

一、浮托力的观测及资料

浮托力的测压管是预埋在实验沉箱底面上的, 在宽为21.6米的沉箱底上预埋了5个测压管, 测压管的间距为5米, 两端的测压管分别距堤内外侧为0.8米(图1) 测压管的下

端与抛石基床接触，抛石空隙的海水与测压管相通，测压管的上端以法兰盘与挡水阀衔接，压力传感器是通过后挡盖伸入测压管之内的，当安装压力传感器时，先将后挡盖固定在挡水阀上，打开阀门后再把传感器伸至测压管底端，使其直接与海水接触（图2）。

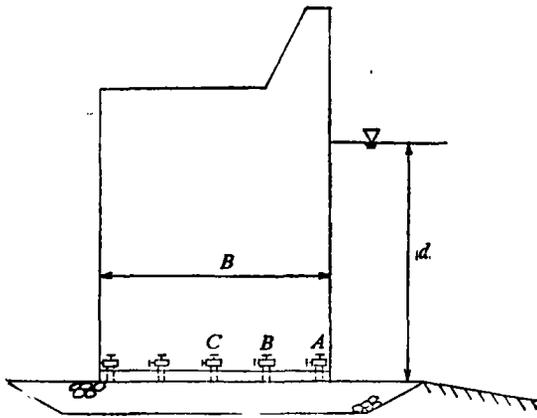


图1 测压管布置图

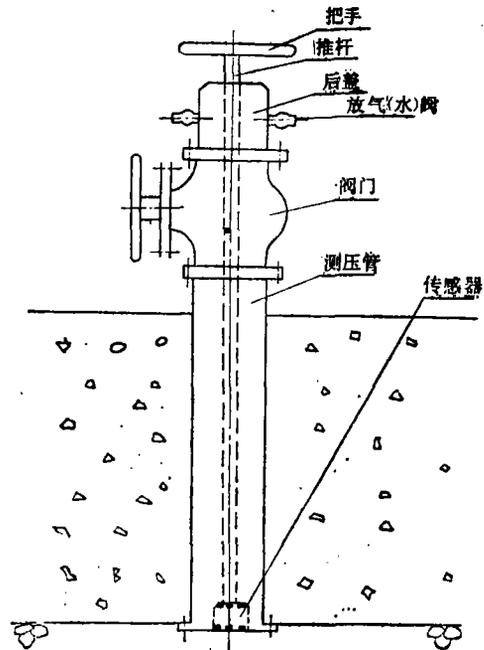


图2 测压装置结构图

在1984年11月3—4日的一次大风过程中，风暴袭击了该海区，当时平均风速10.5米/秒，堤前最大波高5.28米，该处堤前水深10米，波浪最强时潮位4米。这次过程中，取得了表面波及A、B、C 3个测点的浮托力记录，记录长度为15分钟，D、E两测点由于仪器发生故障而未能取得记录。

二、表面波和浮托力的谱分析

对于所获表面波及各测点浮托力之记录，进行了各自的单谱估计及它们之间的互谱估计，谱估计的方法采用Blackman-Tukey方法，即通过对相关函数作福里哀变换计算功率谱密度函数的方法^[3]。在谱估计中，采样间隔 $\Delta t=0.5$ 秒，Nyquist折叠频率 $f_s=1$ 赫兹，最大滞后数采用 $m=90$ 。采样容量 $N=1800$ 。权函数采用Perzen公式，即

$$D = \begin{cases} 1 - 6\left(\frac{r}{m}\right)^2 + 6\left(\frac{r}{m}\right)^3 & r = 0, 1, 2, \dots, m/2 \\ 2\left[1 - \left(\frac{r}{m}\right)\right]^3 & r = \frac{m}{2} + 1, \dots, m \\ 0 & r > m \end{cases}$$

(一) 表面波和各测点浮托力的自相关函数

表面波和A、B两测点浮托力的自相关函数均为较规则的振荡衰减形式，三者的图形十分相似，且在时间位移 $\tau=0$ 时均具有最大值，随 τ 的逐渐增大而振幅衰减〔图3(a)、(b)、(c)〕。测点C浮托力的自相关函数与A、B点及表面波的自相关函数呈明显不同的形状，测点C的自相关函数除在零点具有最大值之外，随时间位移 τ 的变大，自相关函数的值陡然下降，然后又缓慢衰减，这说明测点C的浮托力时间历程前后相关性很差〔图3(d)〕。

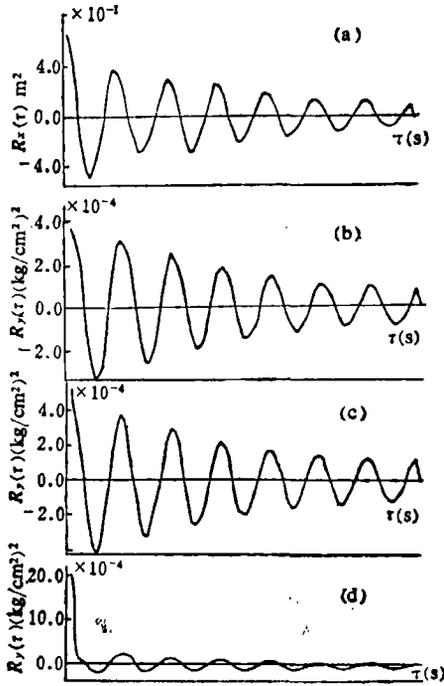


图3 自相关图

- (a) 表面波
- (b) A点的浮托力
- (c) B点的浮托力
- (d) C点的浮托力

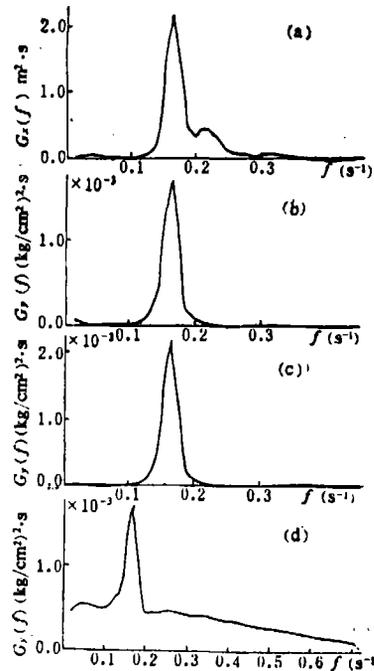


图4 单谱图

- (a) 表面波
- (b) A点的浮托力
- (c) B点的浮托力
- (d) C点的浮托力

(二) 表面波和各测点浮托力的单谱

图4(a)是表面波的频谱图形，谱形在频率为0.161赫兹处有一尖峰之外，在频率为0.208赫兹附近有一个不大的次峰出现，次峰的高度约为主峰值的百分之二十左右，次峰的形成可能与波浪撞击防波堤形成的破波有关。由频谱的图形可以看出，表面波的能量基本上集中在频率为0.071—0.357赫兹的范围之内，即在周期为2.8至14秒的范围之内。谱宽度 $e=0.762$ 。图4(b)、(c)分别为测点A和B的浮托力谱，由图看出，这两点的浮托力谱几乎完全一致，其峰值频率为0.161赫兹，与表面波的峰值频率也完全一样。二者与表面波的谱所不同的是，它们消失了次峰，谱值更加集中，基本上集中于0.10—0.23赫兹的范围之内，相当于4.3—10.0秒周期的范围。它们的谱宽度分别为 $e=0.758$ 和 $e=0.918$ 。

图4(d)是测点C浮托力的频谱,由该图看出,测点C浮托力的频谱与A、B测点浮托力频谱及表面波的频谱差异较大,它的峰值频率仍为 $f_0=0.161$ 赫兹,但在峰值两侧相当宽的范围,谱值都很大,在0—0.72赫兹的范围内,谱值均不为零,它的谱宽度 $e=0.789$ 。高频部分可能是因为测点C离开堤的迎浪面较远,波浪传递过程中受到障碍物阻挡而产生散射作用所致,而低频部分可能是由于湾内的副振动传播所致。

(三) 表面波和各测点浮托力的互相关函数

图5(a)—(c)分别是表面波和测点A、B、C的浮托力的互相关函数图。这些互相关函数的图形,除了表面波与测点C的浮托力的互相关图形有稍微的不规则外,其余的互相关基本上都是随时间位移 τ 的增大而振荡衰减,与自相关函数所不同的是:在 $\tau=0$ 时,互相关函数的值未必最大,而且 $R_{xz}(\tau)$ 与 $R_{yz}(\tau)$ 有 90° 的位相差。从互相关函数图可以看出,对于时间位移,互相关函数出现周期性峰值,这说明两过程曲线在很多时间位移点上相关性是很强的。

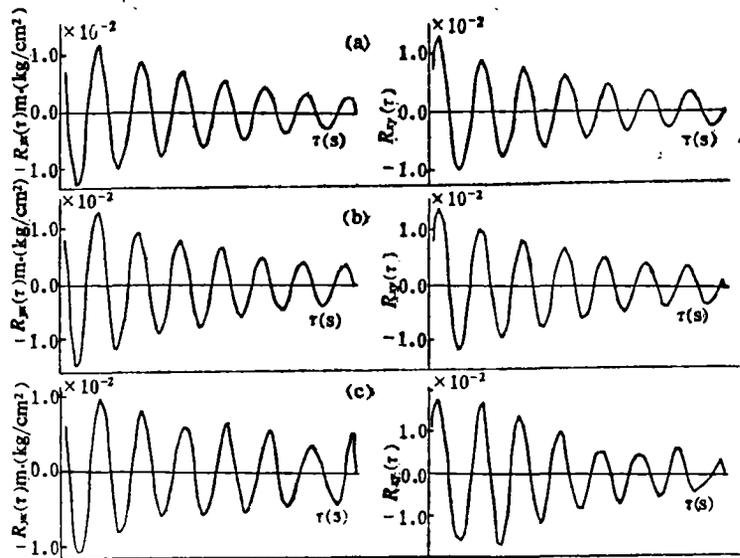


图5 互相关图

(a) 表面波与A点的浮托力 (b) 表面波与B点的浮托力 (c) 表面波与C点的浮托力

(四) 表面波和各测点浮托力的互谱

图6(a)—(c)分别是表面波与A、B、C测点浮托力的互谱图,图中实线为互谱的模,虚线为滞后角函数。从图上可以看出,表面波和浮托力的互谱,主要受表面波所制约,它们的峰值频率均与表面波单谱一致,即 $f_0=0.161$ 赫兹。互谱模的形状与浮托力的谱形基本一致,它们没有明显的二次峰值出现,谱值也均限制在一个较为狭窄的频带内。对应于测点A和B的互谱频带在0.111—0.25赫兹范围内;对应于测点C的互谱频带在0.089—

0.272赫兹范围内。测点A和B相对于表面波的滞后角在谱的主峰附近的变化为 -45° — -81° ，平均 -67.5° ，相当于滞后时间1.165秒。滞后角在主峰附近随频率的变化基本是平缓的，A、B两点浮托力相对于表面波的滞后角在主峰附近单调下降，而C点的滞后角在主峰附近稍有波动，但起伏幅度不大。滞后角在主峰两侧虽然起伏无状，但由于互谱的模接近于零值，所以这些变化是毫无意义的。

(五) 频率响应函数

频率响应函数 $H(f)$ 是描述稳定系统的动态特性的量，我们把表面波视为系统输入，各测点的浮托力视为系统输出，则系统输入的谱 $S_x(f)$ 与系统输出的谱 $S_y(f)$ 具有如下的关系：

$$S_y(f) = |H(f)|^2 S_x(f)$$

其中， $H(f) = |H(f)| e^{-i\phi(f)}$ ， $|H(f)|$ 称为系统的增益因子， $\phi(f)$ 称为系统的位相因子， $\phi(f)$ 与互谱的滞后角是相等的。图7(a)—

(c)分别是测点A、B、C相对于表面波的增益因子，由上图可知，A、B两点的增益因子均在0.094—0.250赫兹的范围内具有较大的值。而测点C在0.022—0.194赫兹处，增益因子达到最大值。由图上还可以看出，增益因子的峰频均较互谱的峰频为低。这就是说，在频率的低频段，浮托力相对于表面波有较大的增益。

(六) 表面波与各测点浮托力的凝聚函数

表面波与各测点浮托力间的凝聚函数，可以用它的互谱及各自的单谱表示成如下的关系：

$$r_{z,y}^2(f) = \frac{|G_{z,y}(f)|^2}{G_z(f)G_y(f)}$$

式中， $G_{z,y}(f)$ 为表面波与浮托力之间的互谱， $G_z(f)$ 为表面波的单谱， $G_y(f)$ 为各测

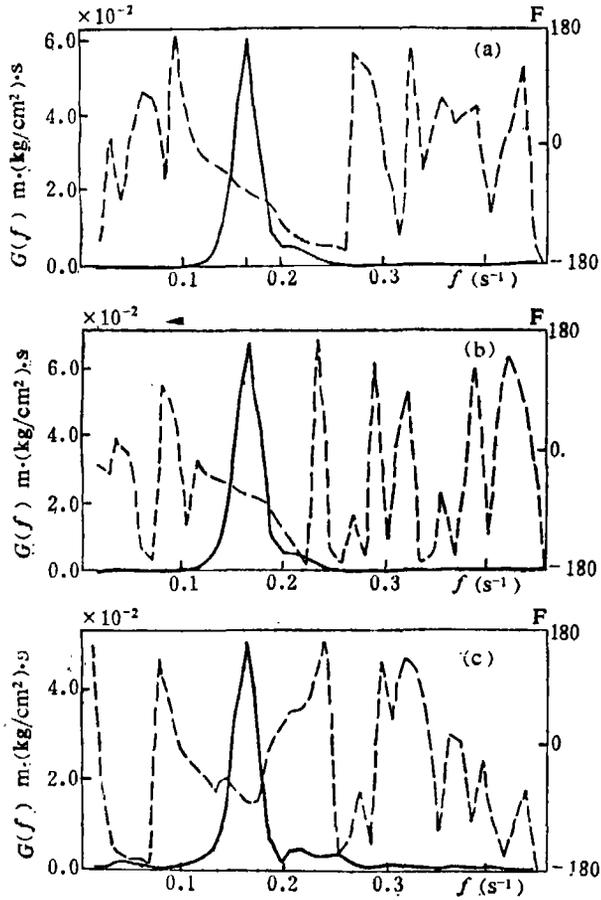


图6 互谱图

- (a) 表面波与A点浮托力
- (b) 表面波与B点浮托力
- (c) 表面波与C点浮托力

点的浮托力的单谱。这些单谱和互谱均由实测资料计算而得。

图8(a)、(b)是测点A、B和表面波间的凝聚函数。从图上可以看出，表面波与浮托力在谱的主峰附近有较强的凝聚，其值达到0.95以上。在离开主峰较远的频带上，凝聚十分微弱而不稳定。图8(c)是测点C的浮托力与表面波之间的凝聚函数图。从图上看出，测点C仅在较窄的范围内与表面波有凝聚现象，且 $r^2(f)$ 的量值最大也不足0.71，这一方面是由于测点C离开堤的迎浪面较远，另一方面从港内缝隙传入的干扰也导致凝聚函数降低。

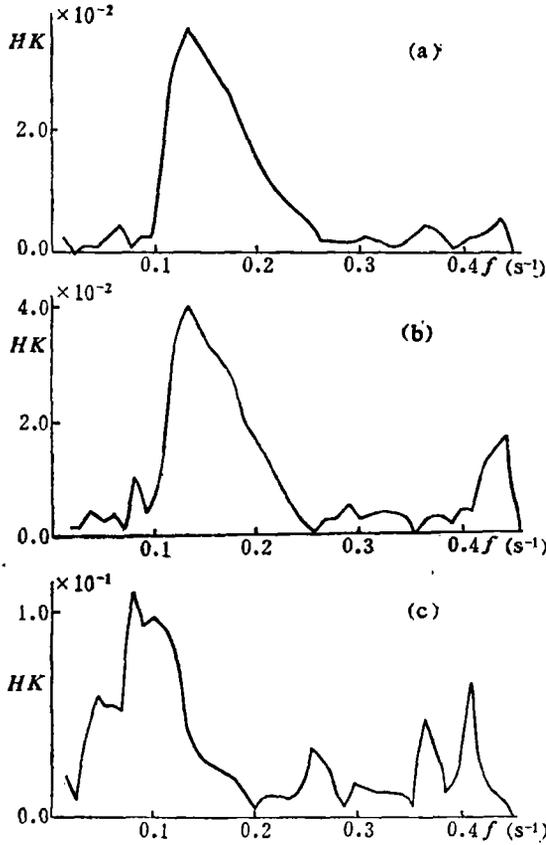


图7 频率响应函数图

- (a) 测点A的浮托力相对于表面波
- (b) 测点B的浮托力相对于表面波
- (c) 测点C的浮托力相对于表面波

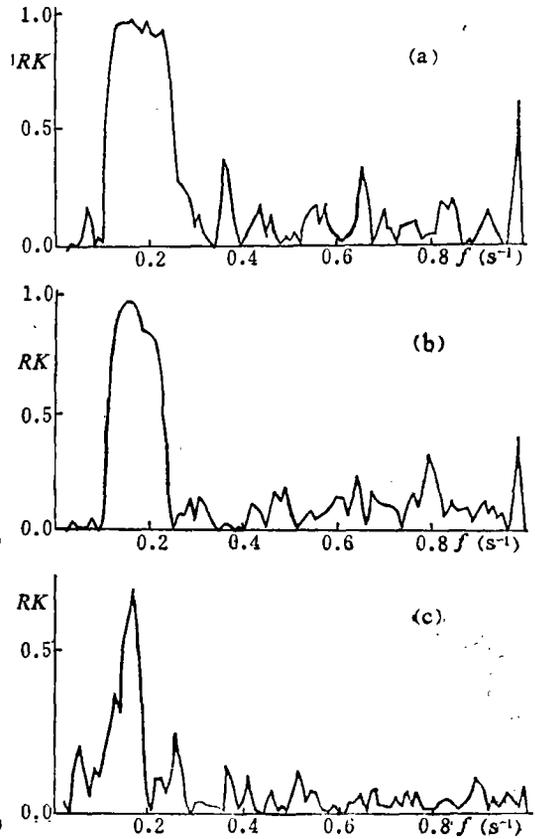


图8 凝聚函数图

- (a) 测点A的浮托力和表面波
- (b) 测点B的浮托力和表面波
- (c) 测点C的浮托力和表面波

三、表面波和浮托力之间的量值关系

各测点正负浮托力及浮托力的幅度，与表面波有着明显的依赖关系，我们把各测点正、负浮托力及浮托力幅度值与相应概率的表面波的波高值进行回归分析，求得它们的相关系数均在0.95以上。图9是3个测点浮托力正值与表面波波高的关系，从图上可以看出，测点A和B的正浮托力与表面波波高的关系基本趋势是一致的，量值也相差无几。而测点

C的正浮托力随表面波波高增加远没有前二者增加那样快,在表面波波高相同的情况下,测点C的正浮托力比A点的正浮托力小37%。负的浮托力及浮托力幅度与表面波之间的关系,也有类似的趋势和特点(图10和图11)。为便于比较,我们把各测点正、负浮托力及浮托力幅度与表面波波高间的回归方程列于表1。

表1

类 别	回 归 方 程	相 关 系 数
正 浮 托 力	A $R_+ = 1.12H$	0.96
	B $R_+ = 0.97H + 0.28$	0.97
	C $R_+ = 0.83H - 0.09$	0.95
负 浮 托 力	A $R_- = 1.48H - 0.81$	0.99
	B $R_- = 1.48H - 0.57$	0.99
	C $R_- = 0.94H - 0.098$	0.96
浮 托 力 幅 度	A $R = 2.324H + 0.26$	0.99
	B $R = 2.320H - 0.07$	0.98
	C $R = 1.694H - 0.04$	0.98

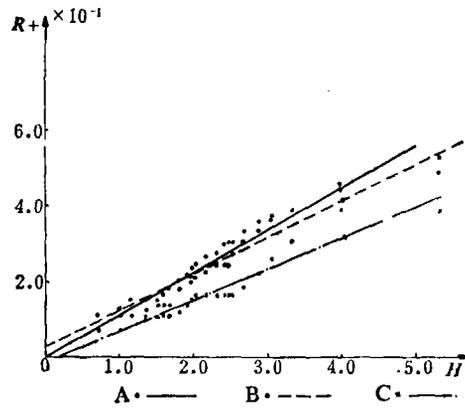


图9 正浮托力与波高的关系

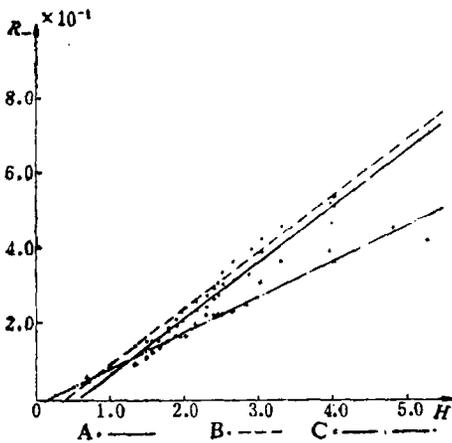


图10 负浮托力与波高的关系

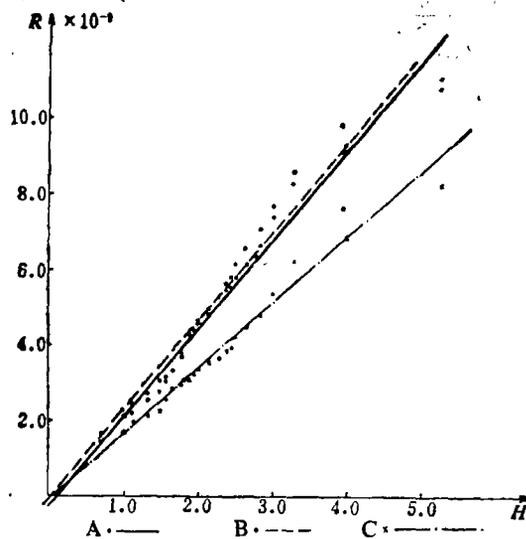


图11 浮托力幅度与波高的关系

四、结 语

通过对表面波及直立堤上浮托力测量资料的统计分析,可以看出:

1. 直立堤上浮托力的谱形与表面波的谱形基本一致，越靠近迎浪面的测点，其谱形与表面波的谱形越接近。

2. 浮托力与表面波的互谱，基本上受表面波的制约，其互谱的峰值频率与表面波的峰值频率基本一致，离开迎浪面较远的测点的浮托力与表面波的互谱，与表面波的波谱略呈不同的形状。

3. 浮托力相对于表面波的滞后角在互谱主峰左右，约在 -45° — -81° 的范围变化。

参 考 文 献

- 〔1〕 海港水文规范编写组，交通部港口工程技术规范，第二篇第一册，海港水文，人民交通出版社，1978，46—66。
- 〔2〕 Goda, Y., *Random Sea Wave and Engineering Application*, Tokyo Univ., 1985, 107—123.
- 〔3〕 凌福根译，随机数据分析方法，国防工业出版社，1976。