

胶州湾双峰海浪频谱的表示

黄培基 胡泽建

(国家海洋局第一海洋研究所, 青岛)

摘 要

本文分析了胶州湾实测双峰海浪谱的谱形特征, 提出了一个含6个参量的双峰海浪谱公式, 谱中的参量由已知实测双峰海浪谱的特征量来确定。经用胶州湾实测双峰谱的拟合检验, 结果表明所给出的双峰海浪谱公式能适应表示不同情况下于胶州湾内发生的双峰海浪谱, 其中最大偏差指数绝对值不超过30.0。

计算海浪对海岸、海洋结构物的作用力或船体运动时, 目前都是通过海浪谱乘以相应的传递函数求得相应的响应力谱或运动谱。在这种计算中, 谱形的选取, 特别是谱峰位置对结构物所受作用力或船体动力响应的计算结果有很大影响。据ISSC (the International Ship Structures Congress) 和ITTC (the International Towing Tank Conference) 的推荐, 对于充分发展的海浪采用以有效波高和平均周期为参量表示的Pierson-Moskowitz谱, 有时也称ISSC谱, 对于受制于风区的海浪, 也即发展过程中的海浪, 采用以有效波高和平均周期为参量表示的JONSWAP谱。JONSWAP谱和ISSC谱模式表示测量谱的平均状况, 同时这两个谱均表示为单峰。实际上, 很多实测海浪谱展示出双峰。当海面上同时存在着风浪和涌浪或当风向骤然改变后, 就会出现双峰海浪谱。目前, 在上述这种计算中, 几乎都是以单峰海浪谱来进行的, 对于双峰海浪谱还没有一确定推荐的谱公式。

关于双峰谱的表示, Strekalov等^[1]把谱分解成两部分, 提出以低频谱和高频谱之和来表示。他们以Phillips的谱平衡域关系表示高频部分的谱形式, 而以渐近Gauss分布形式模拟低频部分的谱形式。此后, Ochi和Hubble^[2]也以此基本思想, 提出了一个6参量谱。该谱是由两个含3参量的变形的Pierson-Moskowitz谱组合而成。近年, Soares^[3]提出了一个含4参量的双峰谱, 它是由两个以有效波高和平均周期为参量的JONSWAP谱叠加来表示的。上述这些谱中的频率指数是事先确定的不变常量, 并根据有效波高和平均周期对其系数进行调整。实际的海浪是复杂的, 没有充足的物理上的依据认为谱表示式中的频率指数是常数。为更精确地拟合实测双峰谱, 本文提出了一个含6参量的双峰海浪频谱公式。该谱也是基于双峰海浪谱是由两部分, 即低频峰部分(我们称为涌浪部分)和高频峰部分(我们称为风浪部分)叠加而成的。每一部分均由我们于文献〔4〕中给出的单峰谱, 但不事先确定谱中的系数和频率指数的表示式来描述。谱的系数和频率指数由给定的

实测谱的特征量来确定。我们将所提出的双峰海浪谱公式用于拟合胶州湾46个实测双峰谱,结果表明,对不同情况下的实测双峰谱,本文提出的双峰海浪谱表示式都能很好地拟合。

一、胶州湾双峰海浪谱谱形的分析

胶州湾位于黄海西部,山东半岛南岸,是一伸入内陆的天然海湾,我国著名的良港——青岛港即位于该湾的东岸。随着胶州湾开发事业的发展,湾内波浪对沿岸工程设施和建筑物的破坏作用引起了重视。为黄岛前湾建港工程的需要,1980—1981年在黄岛波浪站用岸用声学波浪自记仪进行了波浪观测。观测资料采用相关法进行了谱计算。计算中,离散资料采样时间间隔取0.5秒,每份资料采样总数为1024个数据,计算的谱值个数为45,折叠频率为1Hz,自由度为45。

从1980—1981年的观测资料中,选取波浪较大的129份进行了谱计算,它们分别取自一年的各月,其中有46份资料的谱计算结果显示出双峰。其中多数双峰谱出现于夏季各月,其他季节较少。这与波浪站位置有关,因夏季黄海东至东南向的浪可由胶州湾口传入该站⁽⁵⁾,加之胶州湾自生风浪,常常出现风浪与涌浪共存的情况。其他季节,黄海上东南向的浪较少。

实测双峰谱的谱形是我们关注的重点。尽管实测双峰谱的谱形是多种多样的,但从所用双峰谱资料分析结果表明,图1中所给出的实测双峰谱是经常出现的双峰谱的典型谱形。图1中的双峰谱形可分成下面3种类型:(1)以涌浪为主的混合浪,其双峰谱形如图1a和b所示。谱的大部分能量集中于低频峰左右,而高频部分的能量很小。(2)以风浪为主的混合浪,其双峰谱谱形如图1d所示。由图看出,高频部分的谱峰值远大于低频部分的谱峰值。

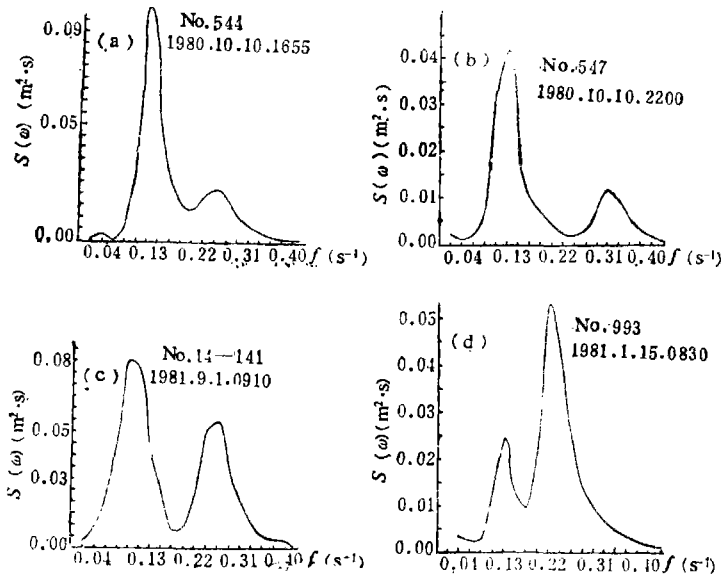


图1 实测双峰海浪谱谱形

(3) 涌浪和风浪强度相当的混合浪，其双峰谱谱形如图1c所示。图中高、低频部分的谱峰值相差较小，高频和低频部分所占的谱能量也基本相当。

二、双峰海浪频谱的表示

当海面出现两系列具有不同平均周期的波浪时，将海面某一固定点的波浪观测记录进行谱分析后，就能期望得到双峰谱。通常对此种海面状况可看成是风浪波系和涌浪波系的组合。在建立用6个参量的波谱来表示双峰谱时，先将谱分解成如图2所示的两部分，即低频部分（我们称为涌浪部分）和高频部分（我们称之为风浪部分）。每一部分都用下面的含3个参量的表示式

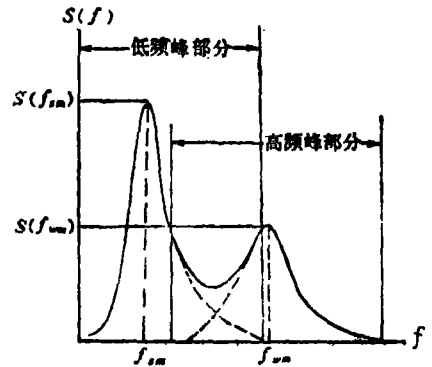


图2 双峰海浪频谱的分解

$$S(f) = C_1 \left(\frac{m_0}{f_m} \right) \left(\frac{f}{f_m} \right)^{-c_2} \exp \left[-\frac{C_2}{C_3} \left(\frac{f}{f_m} \right)^{-c_3} \right] \quad (1)$$

来表示⁽⁴⁾。其中 $m_0 = \int_0^{\infty} S(f) df$ 为谱的零阶矩，也即波面方差。 f_m 为谱峰频率。 C_i ($i=1, 2, 3$) 可由给定实测谱的特征量 (m_0 、 f_m 、 \bar{f} 和 $S(f_m)$) 解下列方程

$$C_3 = C_1 \left(\frac{C_2}{C_3} \right)^{\frac{1-c_2}{c_3}} \Gamma \left(\frac{C_2-1}{C_3} \right), \quad (2)$$

$$C_1 = S(f_m) f_m \exp \left(-\frac{C_2}{C_3} \right) / m_0, \quad (3)$$

$$(\bar{f}/f_m)^2 = \left(\frac{C_2}{C_3} \right)^{\frac{2}{c_3}} \Gamma \left(\frac{C_2-3}{C_3} \right) / \Gamma \left(\frac{C_2-1}{C_3} \right) \quad (4)$$

来确定。将式(3)代入式(2)得

$$C_3 = A \left(\frac{C_2}{C_3} \right)^{\frac{1-c_2}{c_3}} \Gamma \left(\frac{C_2-1}{C_3} \right) \exp \left(\frac{C_2}{C_3} \right), \quad (5)$$

其中

$$A = S(f_m) f_m / m_0.$$

由式(4)和(5)，原则上用迭代法可求出 C_2 和 C_3 。因两式中均有 Γ -函数，用一般迭代法其收敛性很差。我们构造一目标函数，将其用优化方法来处理。计算中采用单纯形方法^(6,7)。

我们将双峰谱 $S(f)$ 用下式

$$S(f) = S_s(f) + S_w(f) \\ = \sum_{j=1,2} C_{1,j} \left(\frac{m_{0,j}}{f_{m,j}} \right) \left(\frac{f}{f_{m,j}} \right)^{-C_{2,j}} \exp \left[- \frac{C_{3,j}}{C_{3,j}} \left(\frac{f}{f_{m,j}} \right)^{C_{3,j}} \right] \quad (6)$$

表示, 其中 $j=1, 2$, 分别表示涌浪 $S_s(f)$ 和风浪 $S_w(f)$ 分量谱.

当给定一实测双峰谱, 谱的零阶矩 (m_0)、谱的平均频率 (\bar{f})、两谱峰频率 (f_{sm} 、 f_{wm})、两谱峰密度 [$S_s(f_{sm})$ 、 $S_w(f_{wm})$], 这些谱特征量就已知. 照双峰谱表示式 (6), 若能由前述特征量分别确定出双峰谱两个分量表示式中各自的3个待定参量, 那么双峰谱就完全给定了. 由方程 (3) — (5) 可知, 还必须求得双峰谱中涌浪分量谱和风浪分量谱的零阶矩 (m_{0s} 、 m_{0w})、平均频率 (\bar{f}_s 、 \bar{f}_w).

由线性波浪理论, 双峰谱的各阶矩是两个分量谱各阶矩之和, 即

$$m_0 = m_{0s} + m_{0w}, \quad (7a)$$

$$m_2 = m_{2s} + m_{2w}. \quad (7b)$$

由式 (6), 对于双峰谱的涌浪和风浪分量谱, 可得出

$$\frac{m_{0s}}{m_{0w}} \propto \frac{S_s(f_{sm})}{S_w(f_{wm})}$$

同时, 对于狭谱而言, 其谱能主要集中于谱峰附近很狭的频率范围内, 故可近似假定两分量谱谱峰密度值之比为两分量谱零阶矩之比

$$S_R = \frac{S_s(f_{sm})}{S_w(f_{wm})} \cong \frac{m_{0s}}{m_{0w}}, \quad (8)$$

则由式 (7a) 可求得

$$m_{0w} = \left(\frac{1}{S_R + 1} \right) m_0, \quad (9)$$

$$m_{0s} = \left(\frac{S_R}{S_R + 1} \right) m_0, \quad (10)$$

同样, 由式 (6), 对双峰谱的涌浪和风浪分量谱, 可求得

$$\frac{\bar{f}_s}{\bar{f}_w} \propto \frac{f_{sm}}{f_{wm}}$$

据 Крылов^[6] 利用 Стрскалов (1965)、Вознесенский 和 Нецветаев (1964)、Цыплухин (1965) 于大洋、外海及近岸收集的不同发展阶段的风浪资料, 求得平均周期与其谱峰周期之间的关系为

$$\tau_{w \max} = 1.25 \tau_w. \quad (11)$$

又据 Дабидан 等^[6] 给出涌浪的平均周期与其谱峰频率为

$$\tau_s = 0.79 \times \frac{2\pi}{\omega_{sm \max}}, \quad (12)$$

由此可得

$$\tau_{s \max} = 1.266 \tau_s. \quad (13)$$

由式 (11) 和 (13) 可求得双峰谱的涌浪和风浪两分量谱的谱峰频率之比近似为它们的平均频率之比

$$f_R = \frac{f_{sm}}{f_{wm}} \approx \frac{\bar{f}_s}{\bar{f}_w} \quad (14)$$

另一方面, 有

$$\bar{f} = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{m_2}{m_0} \right)^{1/2} \quad (15)$$

则由式 (15), 经某些代换运算可得

$$\bar{f}_s^2 = f_R^2 (S_R + 1) \bar{f}^2 / (f_R^2 S_R + 1), \quad (16)$$

$$\bar{f}_w^2 = (S_R + 1) \bar{f}^2 / (f_R^2 S_R + 1), \quad (17)$$

至此, 只要给定一实测双峰谱, 就可由该给定双峰谱本身的一些特征量, 利用上述各式求得双峰谱表示式 (6) 中的 6 个待定参量。

三、双峰海浪频谱表示式的应用

为检查上述给出的双峰海浪频谱公式 (6), 用胶州湾 46 个实测双峰谱进行了拟合计算。为判别给出的双峰海浪频谱公式 (6) 对实测双峰谱的拟合情况, 我们用下面的偏差指数 (D, I) 作为拟合程度的度量。

$$D, I = \sum_i \left(\frac{S(f_i) - S_0(f_i)}{S(f_i)} \times 100 \right) \left(\frac{S(f_i) \Delta f}{m_0} \right) \quad (18)$$

其中, $S(f_i)$ 和 $S_0(f_i)$ 分别为当频率为 f_i 时的实测谱密度值和由式 (6) 计算的谱密度值, Δf 为谱计算时采用的频率间隔。由上式看出, 偏差指数是以实测谱密度相对值为权的计算谱密度与实测谱密度相对偏差的百分数之和。由此, 若式 (6) 完全表示了实

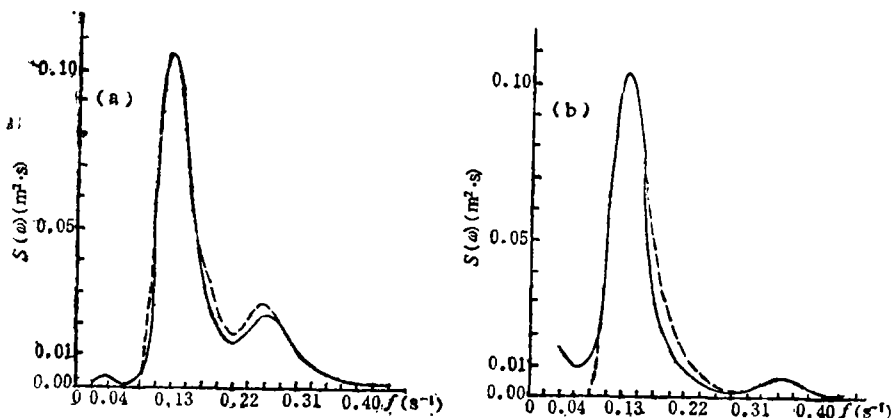


图3 以涌浪为主混合浪的实测谱与计算谱比较

(a) No. 544, m_0 : 0.0545, C_{11} : 8.2696, C_{21} : 7.7241, C_{31} : 3.8241, C_{12} : 9.5966, C_{22} : 11.3553, C_{32} : 7.1553, D, I : -3.7295; (b) No. 545, m_0 : 0.0524, C_{11} : 8.3443, C_{21} : 7.3509, C_{31} : 3.2506, C_{12} : 9.9089, C_{22} : 13.4924, C_{32} : 9.2925, D, I : 3.0946

测谱, 那么 D, I 指数应为零. D, I 指数绝对值越小, 表示拟合越好.

图3—5分别为以涌浪为主、风浪为主的混合浪及风浪和涌浪强度相当的混合浪双峰谱拟合结果的示例. 图中实测双峰谱以实曲线表示, 按式(6)计算的谱以虚曲线表示.

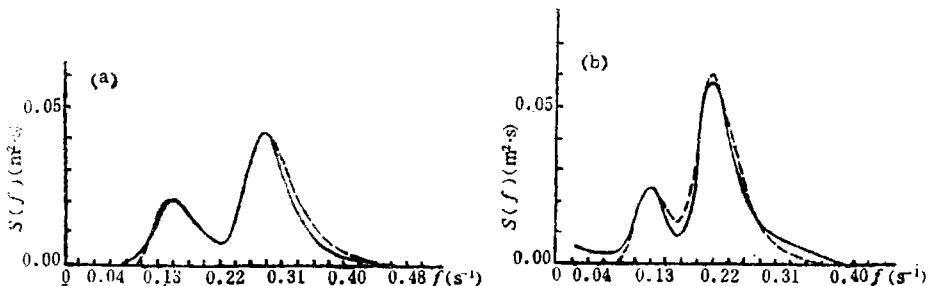


图4 以风浪为主混合浪的实测谱与计算谱的比较

(a) No.765, $m_0: 0.0315, C_{11}: 5.1349, C_{21}: 6.7939, C_{31}: 3.9939, C_{12}: 8.5077,$
 $C_{22}: 11.355, C_{32}: 7.1553, D, I: -2.6798;$ (b) No.993, $m_0: 0.0367, C_{11}: 5.0296,$
 $C_{21}: 6.7924, C_{31}: 3.9924, C_{12}: 7.8739, C_{22}: 10.776, C_{32}: 8.576, D, I: 1.5625$

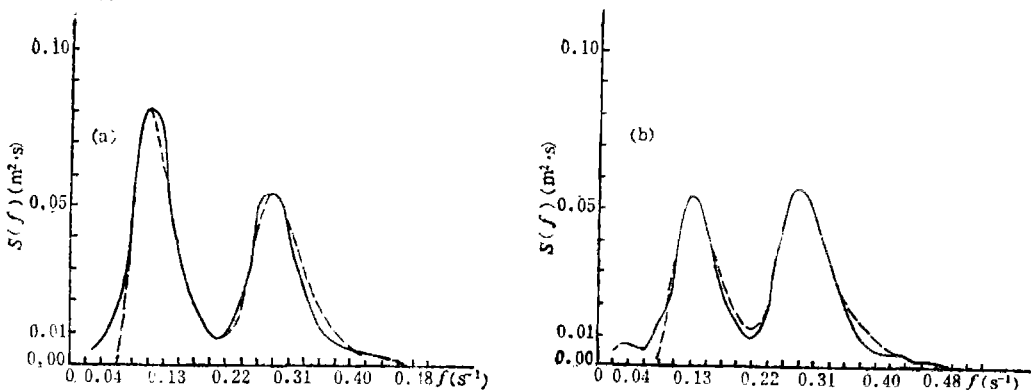


图5 以涌浪、风浪强度相当的混合浪实测谱与计算谱的比较

(a) No. 14—141, $m_0: 0.0771, C_{11}: 3.9796, C_{21}: 5.997, C_{31}: 3.197, C_{12}: 7.8752,$
 $C_{22}: 11.1881, C_{32}: 6.9679, D, I: 5.5904;$ (b) No.14—143, $m_0: 0.0687, C_{11}: 4.1835,$
 $C_{21}: 6.1056, C_{31}: 3.3057, C_{12}: 7.8842, C_{22}: 10.317, C_{32}: 6.1173, D, I: 2.0739$

由图看出, 由式(6)计算的谱的双峰位置与实测双峰谱的两峰位置一致, 但当两谱峰频率相接近时, 处在相对高频的谱峰密度有比实测谱峰密度偏大的估计, 例如图3a、图4b.

为说明对46个实测双峰谱的拟合情况, 将偏差指数分为不同范围, 分别统计其符合出现率(见表1).

由表1看出, 所有46个谱的拟合偏差指数绝对值都不大于30.0, 绝大部分谱的拟合偏差指数绝对值不超过15.0. 由此可以认为式(6)作为双峰海浪频谱的表示式, 对胶州湾实测的双峰谱而言, 不论是以涌浪为主, 或是风浪为主的混合浪, 还是风浪和涌浪强度相当的混合浪情况, 拟合结果都是相当满意的.

表 1

$ D, I $	≤ 5.0	≤ 10.0	≤ 15.0	≤ 20.0	≤ 25.0	≤ 30.0
出现个数	24	39	44	44	44	46
出现率 (%)	52.17	84.79	95.65	95.65	95.65	100

四、小 结

海浪谱形在计算海岸、海洋结构物及船舶运动对海浪的响应中是非常重要的，因为谱形，特别是谱峰相对位置对响应的量值有很大影响。为拟合胶州湾实测双峰海浪频谱和计算结构物对海浪的响应，本文给出了一个含6个参量的双峰海浪频谱公式。双峰谱被分解成两部分，每一部分都由一个含3个参量的单峰谱公式来表示，并由该两单峰谱的叠加来表示双峰海浪谱。这种表示的优点在于未事先确定谱中的系数和频率指数，谱中这些参数完全由已知的实测双峰谱的特征量来确定。因此，该表示式具有较大的“弹性”，使其能适应拟合不同情况下的双峰海浪谱。

出现于胶州湾内的双峰谱主要是在夏季，特别是当受台风影响的情况下，而其他季节则较少。从双峰谱谱形来分析，主要有3种类型：1) 以涌浪为主的混合浪，双峰谱的低频峰值比高频峰值大得多，谱的大部分能量集中于低频部分。2) 以风浪为主的混合浪，双峰谱的高频峰值比低频峰值大得多，谱的大部分能量集中于高频部分。3) 涌浪和风浪强度相当的混合浪，双峰谱的高、低频峰值相差不大，谱的高、低频部分的能量相当。

给出的双峰海浪频谱公式，经对胶州湾实测双峰谱的拟合检验，结果表明计算谱与实测谱之间的最大偏差指数绝对值不大于30.0，绝大部分的偏差指数绝对值不超过15.0。拟合计算结果相当令人满意。该公式能适应表示不同情况下的双峰海浪频谱。

参 考 文 献

- (1) Strelakov, S. S. et al., Structure of sea wave frequency spectrum, *Proc. 13th Coastal Eng. Conference*, 1972, 1: 307—314.
- (2) Ochi, M. K. and E. N. Hubble, Six-parameters wave spectra, *Proc. 15th Coastal Eng. Conference*, 1976, 1: 301—328.
- (3) Soares, C. G., Representation of double-peaked sea wave spectra, *Ocean Engineering*, 11 (1984), 2: 185—207.
- (4) 黄培基、胡泽建, 胶州湾风浪频谱的拟合模式, *黄渤海海洋*, 5 (1987), 3: 1—8.
- (5) 牛世奎, 胶州湾内、外波浪折射计算与分析, *海岸工程*, 3 (1984), 2: 71—76.
- (6) 南京大学数学系, 最优化方法, 科学出版社, 1978, 185.
- (7) 王德人, 非线性方程组解法与最优化方法, 人民教育出版社, 1979.
- (8) Крылов, Ю. М., Спектральный Методы Исследования и Расчета Ветровых Волн, Гидрометеоздат, Ленинград, 1966, 255.
- (9) Давидан, И. Н., Л. И. Лопатуин, В. А. Рожков, Ветровое Волнение как Вероятностный Гидродинамический Процесс, Гидрометеоздат, Ленинград, 1978, 287.