

杨伊妮, 陶爱峰, 曹力玮, 等. 基于江苏海域定点观测资料的双峰谱谱型研究[J]. 海洋学报, 2024, 46(2): 107–116, doi:10.12284/hyxb2024003

Yang Yini, Tao Aifeng, Cao Liwei, et al. A study on bimodal spectral patterns based on fixed-point observation data in Jiangsu sea area[J]. Haiyang Xuebao, 2024, 46(2): 107–116, doi:10.12284/hyxb2024003

基于江苏海域定点观测资料的双峰谱谱型研究

杨伊妮^{1,2,3}, 陶爱峰^{1,2*}, 曹力玮^{1,2}, 范骏^{1,2}, 王岗^{1,2}

(1. 河海大学 海岸灾害及防护教育部重点实验室, 江苏 南京 210024; 2. 河海大学 港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210024; 3. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710065)

摘要: 江苏海域作为全国海上风电重点建设海域, 走向远海是未来发展的主趋势, 外海开敞海域涌浪成分较多, 海浪谱往往以双峰谱的形式出现, 因此双峰谱海浪的谱型特征需要进一步深入研究, 为海上施工提供参考依据。基于浮标测站 2018 年全年观测数据, 经过异常值检验、双峰谱识别后得到 1 223 笔双峰谱数据, 进而研究江苏海域波浪双峰谱谱型特征, 对比不同典型双峰谱谱型并展开实测双峰谱的拟合, 提出了修正谱宽参量, 探究了修正系数、峰升高因子、谱宽参量间的依赖关系, 得到了双峰谱拟合谱型表达式。结果表明: 基于北大西洋海域提出 Ochi-Hubble 谱系及基于挪威海域提出的 Torsethaugen 谱并不适用于江苏海域双峰谱谱型, 本文提出的双峰 JONSWAP 拟合谱具有自适应性, 可以科学合理地描述江苏海域双峰谱谱型, 并推广应用于不同风场、地形条件的海域中。

关键词: 江苏海域; 双峰谱; Ochi-Hubble 六参数谱; Torsethaugen 双峰谱; 双峰 JONSWAP 拟合谱

中图分类号: P752

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2024)02-0107-10

1 引言

新时代下, 我国提出建设海洋强国的要求, 强调充分发挥风能和光电产业的优势, 实现风能与太阳能发电的互补开发, 缓解非可再生能源紧缺的问题。我国海上风能资源丰富, 开发潜力巨大, 不断推进海上风电建设是实现“双碳”战略的重要举措, 对保障能源安全、推动能源革命等方面都发挥着举足轻重的作用。江苏海域作为全国重点建设海域, 走向远海是海上风电发展的主趋势, 未来海上风电开发将瞄向外海开敞海域, 涌浪成分通常较多, 海浪谱往往以双峰谱形式出现, 低频、高频区海浪对海上施工、维修作业过程的影响机制也存在差别^[1], 因此需要深入探究

双峰谱海浪特性, 为海上施工提供参考依据。

目前工程中常用的描述波浪的波谱(如 PM 谱、JONSWAP 谱、文圣常谱)都为单峰谱, 无法描述具有两个谱峰的海浪, 由于外海开敞海域涌浪成分占比较多且涌浪、风浪生成的海况条件不同, 国内外已有部分学者提出了多种形式的双峰谱, 推动人们进一步认识海浪内部结构。Strekalov 等^[2]于 1972 年首次以两个单峰谱叠加的方法构造双峰谱; 1976 年, Ochi 和 Hubble^[3]根据北大西洋实测谱资料以低频、高频部分划分海浪谱, 每一部分包含有效波高、谱峰频率、形状参数 3 个参数, 以构成六参数谱描述双峰谱波浪; Soares^[4]于 1985 年以 JONSWAP 谱为基础根据北大西洋和北海的实测资料构造了四参数谱; 而后 Tor-

收稿日期: 2023-11-02; 修订日期: 2023-12-08。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52271271); 国家重点研发项目(2023YFC3007900); 江苏省自然科学基金杰出青年基金项目(BK20220082); 水利部重大科技项目(SKS-2022025)。

作者简介: 杨伊妮(1999—), 女, 陕西省汉中市人, 主要从事水波动力学的研究。E-mail: yangyini1999@163.com

* 通信作者: 陶爱峰(1978—), 男, 山东省聊城市人, 教授, 主要从事水波理论、极端波浪、海岸灾害防护等相关研究。E-mail: aftao@hhu.edu.cn

sethaugen 和 Haver^[5] 基于 JONSWAP 谱根据挪威大陆架的实测资料提出了 Torsethaugen 双峰谱; 宗智等^[6] 于 2018 年根据南海某典型岛礁实测波浪数据提出有理分式双峰谱形式。此外, 针对双峰谱海浪谱型表达式的拟合, 也有不少学者展开了研究。Guedes Soares 和 Henriques^[7] 利用观测数据的谱峰频率替代平均周期作为输入值以降低噪点敏感度并得到拟合双峰谱, Panahi 等^[8] 提出一种在没有风数据的情况下校准拟合特定区域标准双峰谱的方法, Akbari 等^[9] 将 2 个 JONSWAP 谱与在阿曼湾北部的实测双峰谱进行拟合后发现修改实测谱的特征参数可以最大限度地提高拟合谱型的精度。

以上研究在不同海域地形与风场条件下开展, 各双峰谱谱型表达式在江苏海域的适用性仍需进一步探究, 本文将江苏海域为研究对象, 基于 2018 年全年的观测资料, 结合已提出的双峰谱谱型表达式展开对比分析, 并针对实测双峰谱展开谱型拟合, 进一步得到适用于该海域的双峰谱谱型表达式。

2 数据处理与分析

2.1 数据来源

本文采用的波浪数据为累计一整年的现场观测资料, 时间范围为 2018 年 1 月 1 日至 12 月 31 日, 测站位置见图 1, 采用的测点波浪仪器为挪威 Nortek 公司生产的“浪龙”(AWAC-AST)声学多普勒波浪海流剖面仪。每 1 h 进行一次数据采集, 记录时间为 1 024 s(约 17 min), 采样频率为 4 Hz, 一次样本总量为 $N=4\ 096$ 。AWAC 仪器是一种通过声波对(海表面波)波面进行扫描的仪器, 与该仪器配套的 Quick-Wave 软件可以对采集到的数据进行处理。AWAC 仪

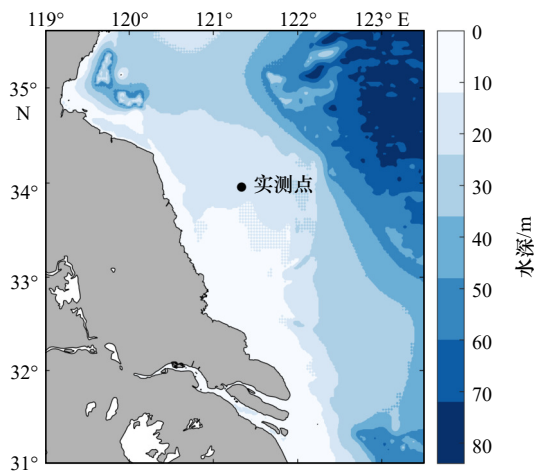


图 1 测站位置分布图

Fig. 1 Location distribution of stations

表使用范围广, 数据处理效率高, 所测得的波形偏差在 2°以内, 波高偏差在 0.15% 以内, 从而保证波浪观测资料的可靠性与精确性。

2.2 异常值检验

准确的实测数据是波浪特性分析基础, 浮标观测数据中往往存在一些由于测量设备故障、数据采集错误、环境干扰或其他异常因素引起的异常值, 因此通过筛除异常值, 得到更接近真实波浪特征的数据集, 提高统计分析的准确性和可信度。根据刘首华等^[10] 提出的浮标数据异常值质控方法, 以有效波高为检验对象, 采用 Grubbs 准则、局地检测法及波高观测误差标准进行数据清洗(图 2), 得到数据集为 $U_2 + U_3$ 或 $U - V_3$ 。经统计, 实测站 2018 年全年有效波浪数据共计 8 662 笔, 在观测期内混合浪谱型往往呈现出单峰谱、双峰谱形态。

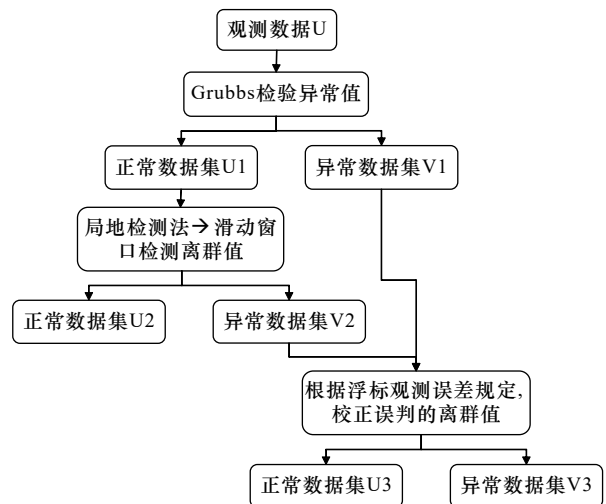


图 2 数据异常值检测流程

Fig. 2 Data outlier detection flowchart

2.3 双峰谱识别

为进一步探究双峰谱波浪特性, 首先需要识别单、双峰谱数据, 结合任叙合等^[11] 和高晨晨等^[12] 判别双峰谱的准则, 对本文中实测站点的谱数据展开识别与判断, 标准如下: ①有效波高 H_s 不小于 0.2 m; ②海浪谱在目标频段内存在两个明显的峰值, 分别对应主、次峰频率; ③主、次峰之间的频率间隔大于 0.05 Hz; ④波谱的次峰值不小于主峰谱值的 30%, 且两峰之间的谷谱值不大于次峰值的 2/3。由此, 得到双峰谱数据共 1 223 笔, 约占全年波浪数据的 14.12%。

3 双峰谱谱型的对比分析

3.1 误差指标

为进一步探究江苏海域双峰谱的谱型, 基于 2018 年实测数据集展开典型双峰谱的对比分析, 并

采用偏差指数 DI 对频谱误差进行定量分析, 该指标最早由 Liu^[13] 提出后进一步被 Guedes Soares 和 Henriques 采用^[7], 用来表征拟合谱与实测谱的偏离程度, 具体如下式:

$$DI = \sum_{i=1}^N \left\{ \left[\frac{100|S(f_i) - \tilde{S}(f_i)|}{S(f_i)} \right] \left[\frac{S(f_i)\Delta f}{m_0} \right] \right\}, \quad (1)$$

式中, N 为频率间隔; Δf 表示每个频谱 i 的频率数量; $S(f_i)$ 为实测频谱; $\tilde{S}(f_i)$ 为模拟频谱; m_0 为实测频谱的零阶谱矩值。

3.2 双峰谱表达式

在双峰谱的发展过程中, 国外学者 Strekalov 等^[2] 最早叠加两个单峰谱构造得到双峰谱, 但该谱型表达式涌浪部分采用的高斯谱具有对称性、风浪部分采用的 PM 谱参数较少, 只适用于描述特定阶段的海浪谱, 因此无法精确表征谱型而不便于工程应用; 而后在 1984 年 Soares^[4] 基于 JONSWAP 谱构造了四参数双峰谱, 给出了谱型分区特征参数的划分方法但并未给出具体的表达式; 1988 年国内学者黄培基和胡泽建^[14] 将早年提出的三参数谱拓展为六参数双峰谱形式, 该谱型的缺点为参数较多、用 Γ 函数确定指数时出现多峰值解而求解困难; 2018 年宗智等^[6] 根据南海某典型岛礁实测波浪数据提出有理分式双峰谱形式, 但该谱型在其他海域还未得到验证。在多种形式的双峰谱中, Ochi-Hubble 六参数谱和 Torsethaugen 双峰谱应用最为广泛, 前者为 Ochi 和 Hubble^[5] 在 1976 年根据大西洋实测谱数据结合概率分布提出的六参数谱谱系 [见式 (2), 式 (3)] 来表达双峰波浪谱, 后者为 Torsethaugen 和 Haver^[5] 在 1993–2004 年期间根据挪威大陆架实测数据提出的双峰谱并给出了具体的双峰谱表达式 [见式 (4) 至式 (6)] 以及谱型参数取值表。另外, 上述两种谱型表达式均已在其他海域得到应用与验证。Golpira 等^[15] 在 2019 年根据野外数据修正了 Ochi-Hubble 六参数谱进而评估阿曼湾实测数据的性能, Panahi 等^[16] 针对印度巴哈尔港口引入 Torsethaugen 双峰谱并进行参数校准, 因此后文将探究此二式 (包含其提供的谱参数值) 在江苏海域的适用性。

(1) Ochi-Hubble 六参数谱 (谱系共计 11 个谱型)

$$S(\omega) = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^2 \frac{[(\lambda_i + 1/4)\omega_{p,i}^4]^{4\lambda_i}}{\Gamma(\lambda_i)} \frac{H_{s,i}^2}{\omega^{4\lambda_i + 1}} \times \exp \left[\frac{-(\lambda_i + 1/4)\omega_{p,i}^4}{\omega^4} \right], \quad (2)$$

$$H_{s,1} = R_{p,1} H_s, \quad H_{s,2} = \sqrt{1 - R_{p,1}^2} H_s, \quad \omega_{p,i} = a_i \exp(-b_i H_s), \quad \lambda_i = c_i \exp(-d_i H_s), \quad (3)$$

式中, $H_{s,i}$ 、 $\omega_{p,i}$ 、 λ_i ($i = 1, 2$) 分别对应于低频、高频部

分的有效波高、谱峰频率、形状参数 ($i = 1$ 对应低频谱, $i = 2$ 对应高频谱); a_i 、 b_i 、 c_i 、 d_i ($i = 1, 2$) 为 Ochi 和 Hubble 提出的经验参数^[17] 并给出了 Ochi-Hubble 谱族, 编号 1~11, 编号 1 为最有可能谱, 编号 2~11 为 95% 置信区间谱系, 其中常数 $d_1 = 0$ 。

(2) Torsethaugen 双峰谱

$$S(f) = \sum_{j=1}^2 E_j S_{n_j}(f_{n_j}), \quad (4)$$

$$f_{n_j} = f \cdot T_{p,j}, \quad E_j = \frac{1}{16} H_{s,j}^2 \cdot T_{p,j}, \quad S_{n_j}(f_{n_j}) = G_0 A_\gamma f_{n_j}^{-4} e^{-f_{n_j}^{-4}} \gamma^{\lfloor \exp-(1/2\sigma^2)(f_{n_j}^{-1})^2 \rfloor}, \quad (5)$$

$$S_{n_j}(f_{n_j}) = G_0 A_\gamma f_{n_j}^{-4} e^{-f_{n_j}^{-4}} \gamma^{\lfloor \exp-(1/2\sigma^2)(f_{n_j}^{-1})^2 \rfloor}, \quad \sigma = \begin{cases} 0.07, & f_n < 1 \\ 0.09, & f_n > 1 \end{cases}, \quad (6)$$

式中, $H_{s,j}$ ($j = 1, 2$) 为有效波高; $T_{p,j}$ ($j = 1, 2$) 为谱峰周期; f_{n_j} ($j = 1, 2$) 为低频区、高频区的谱峰频率; 常数项 $A_\gamma = (1 + 1.1[\ln \gamma]^{1.19})/\gamma$; 常数 $G_0 = 3.26$, γ 、 σ 分别为峰升高因子、峰形参量^[5]。

3.3 双峰谱谱型的比较

本节将依次选取 6 月某 3 个时刻的风浪主导型、涌浪主导型、风涌浪相当型双峰谱, 进一步探究 Ochi-Hubble 六参数谱、Torsethaugen 双峰谱对江苏海域实测双峰谱的适用性, 对于前者识别低频区、高频区谱峰频率并采用 Hwang 等^[18] 提出的波谱积分法计算分区有效波高, 对于后者识别分区谱峰频率并采用 Torsethaugen 提出的经验公式及参数取值^[5] 计算分区波高、峰升高因子, 再根据式 (2) 至式 (6) 绘制上述谱与实测谱的对比图, 见图 3, 第一、二行分别为 Ochi-Hubble 六参数谱、Torsethaugen 双峰谱与实测谱的对比。由图可知, 在 Ochi-Hubble 六参数谱中, 总会出现谱峰值、谱峰频率的偏差, 谱系中仅 2 号谱在风浪主导型双峰谱中表征出双峰特征但显著高于实测谱, 10 号谱谱峰值更是远远高于实测谱; 在 Torsethaugen 双峰谱中, 谱峰频率较为一致而谱峰值存在较大偏差, 风浪主导型双峰谱中谱峰值远低于实测谱, 涌浪主导型双峰谱中未呈现出双峰特征, 仅在风涌浪相当型双峰谱中较为一致, 但在高频区依旧存在较大误差; 总之, Ochi-Hubble 六参数谱、Torsethaugen 双峰谱与江苏海域实测双峰谱的吻合程度不佳。另外, 采用 DI 指标定量分析上述谱型与实测谱的误差范围, 见表 1。由表可知, Torsethaugen 双峰谱的 DI 指标均值为 78.60 且 6 月 DI 值最小, 在 Ochi-Hubble 双峰谱谱系中, 序号为 5 的双峰谱与实测双峰谱的吻合度最佳且 DI 均值为 80.36, 序号 10 的 DI 误差最大而序号 7、1、

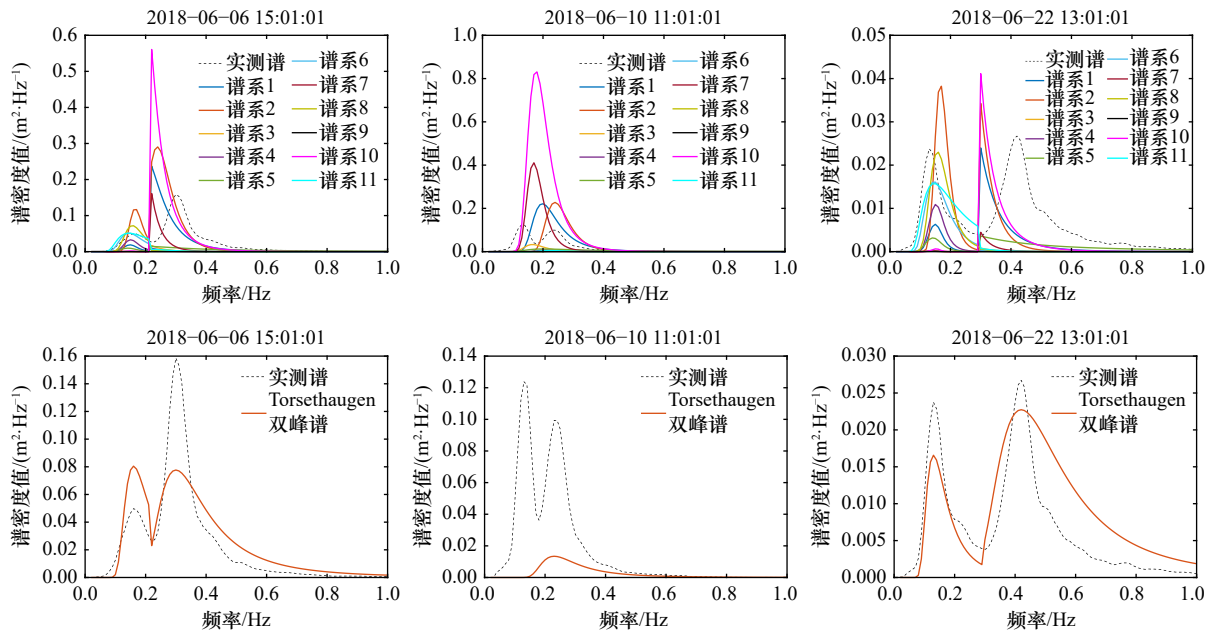


图3 双峰谱不同谱型曲线对比图

Fig. 3 Comparison of different spectral patterns of bimodal spectrum

表1 双峰谱不同谱型对比 DI 误差均值

Table 1 Comparison of DI error mean for different spectral shapes of the bimodal spectrum

月份	Torsethaugen双峰谱	Ochi-Hubble双峰谱谱系										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	79.02	113.04	102.85	89.91	95.93	80.79	95.97	167.42	95.88	99.87	394.54	93.25
2	90.91	105.43	84.99	88.02	92.25	82.28	88.18	132.03	88.02	99.89	445.32	84.88
3	95.17	147.02	150.08	90.88	95.95	80.28	96.95	188.59	97.53	99.86	423.48	94.63
4	71.62	128.43	118.17	89.77	95.35	78.45	95.09	181.64	95.78	99.87	420.46	92.36
5	67.66	110.14	120.46	88.76	94.60	80.26	96.70	152.66	93.12	99.87	324.16	90.93
6	63.66	122.07	124.24	90.77	93.58	79.32	91.91	159.33	92.79	99.89	339.74	89.23
7	69.56	115.62	140.09	88.90	94.04	80.97	94.49	155.45	94.89	99.88	323.89	91.63
8	70.67	107.78	141.96	90.27	94.26	81.99	95.22	146.26	95.31	99.89	292.95	92.30
9	79.58	112.15	138.69	89.34	95.25	82.79	95.75	149.03	95.83	99.88	313.80	92.60
10	102.83	121.63	123.84	90.55	95.69	80.47	96.53	173.07	96.56	99.87	381.21	93.68
11	75.95	130.31	118.31	89.27	96.22	77.90	96.65	187.03	96.50	99.86	443.11	94.19
12	76.61	120.25	112.54	89.44	95.40	78.76	94.56	171.41	93.39	99.87	391.99	91.77
平均值	78.60	119.49	123.02	89.66	94.88	80.36	94.83	163.66	94.63	99.88	374.55	91.79

2次之,谱系中其余双峰谱 DI 误差均在 99~100 范围。由于两种谱型的 DI 均值超出 Guedes Soares 和 Henriques^[7] 提出的 DI 合理范围误差值 70,说明了基于北大西洋海域提出 Ochi-Hubble 谱系、基于挪威海域提出的 Torsethaugen 谱并不适用于江苏海域双峰谱谱型,因此需要基于实测数据展开双峰谱谱型的拟合。

4 双峰 JONSWAP 谱的拟合

4.1 拟合过程与算法

在单峰谱经典谱型中, JONSWAP 谱与实测谱最为吻合,下文将以 JONSWAP 谱为基础展开拟合。考虑到便于工程应用,采用 Hasselmann 等^[9] 提出的式(7)所示海浪谱,该式将有效波高、谱峰频率引入 JONSWAP

谱以描述谱型特征, 这与 Akbari 等^[9] 拟合所采用的分区谱型表达式一致。另外, 考虑到地域差异性, 本文在谱型拟合过程中并未采用 Goda^[20] 提出的 α 与 γ 的经验表达式。

$$S(f) = \alpha \frac{5}{16} \frac{H_s^2}{f_p} \left(\frac{f}{f_p}\right)^{-5} \exp\left[-\frac{5}{4} \left(\frac{f}{f_p}\right)^{-4}\right] \gamma^{\exp\left[-\frac{(f-f_p)^2}{2\sigma^2 f_p^2}\right]},$$

$$\sigma = \begin{cases} 0.07, & f \leq f_p \\ 0.09, & f > f_p \end{cases}, \quad (7)$$

式中, H_s 为有效波高; f_p 为谱峰频率; α 为修正系数(与有效波高有关); σ 为峰形参数; γ 为峰升高因子(范围为 1~7, 常取均值 3.3)。

由海浪统计原理可知, 一系列正弦波系统经过叠加形成海浪, 各个波系统的谱峰值对应着频谱中的谱密度峰值, 针对双峰谱存在两个主要的波系统, 相邻两个峰值间的“波谷”可初步看做两个波系统的划分界限, 沈至淳等^[21] 在研究中指出由于“波谷”处谱值较小, 则可忽略平衡域斜率取值对谱分解的影响。由于双峰谱中低频区谱、高频区谱往往存在能量的交汇, 见图 4, 因此需要对该部分能量进行校正, 其中 $(f_s)_{\max}$ 、 $(f_w)_{\min}$ 分别为能量交叠区内低频区最大频率、高频区最小频率。根据上述波系统叠加原理, Panahi 等^[8] 提出在风场数据缺乏条件下校准双峰谱首先划分涌

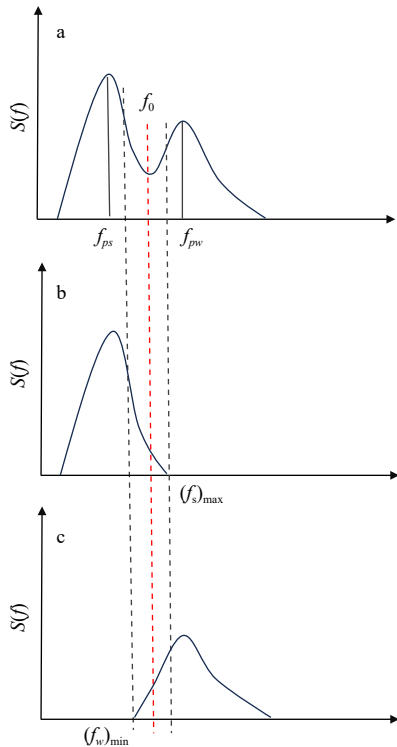


图 4 双峰谱分区谱型示意图

Fig. 4 Schematic diagram of bimodal spectrum zoning spectral pattern

浪、风浪分量再校准可以达到更好的一致性, 并应用于阿曼湾北部地区 Ochi-Hubble 六参数谱、Torsethau-gen 双峰谱的校正中。因此, 本文的双峰谱拟合算法将采用上述分区参数划分的方法, 其中分区频率计算采用 Hwang 等^[18] 在 WH 法基础上改进后得到的经验公式 [见式 (8) 和式 (9)]。

$$I_1(f) = \frac{\int_f^{f_u} f' \cdot S(f') df'}{\sqrt{\int_f^{f_u} f'^{-1} \cdot S(f') df'}}, \quad (8)$$

$$f_0 = 24.208 4 f_m^3 - 9.202 6 f_m^2 + 1.890 6 f_m - 0.042 86, \quad (9)$$

式中, f 为频率; f_u 为频谱积分上限, 浮标观测数据上限通常不超过 0.5 Hz; $S(f')$ 为频率对应的谱密度值; f_m 为 $I_1(f)$ 最大值对应的峰值频率; f_0 为风涌浪的分割频率。

经上式计算, 确定分区频率后, 分别识别并确定低频区、高频区的谱峰值及谱峰频率, 并进一步计算分区波高作为式 (7) 中的各分区参数 H_s , 具体的计算公式采用 Soares^[4] 提出的双峰谱波高计算方法 [见式 (10) 和式 (11)]:

$$S_R = \frac{S_{SP}}{S_{WP}} = \frac{H_S^2 T_S}{H_W^2 T_W} = H_R^2 T_R, \quad (10)$$

$$H_{SW} = H_S \sqrt{1/(1+H_R^2)}, H_{SS} = H_S \sqrt{H_R^2/(1+H_R^2)}, \quad (11)$$

式中, S_{SP} 、 S_{WP} 为低频区、高频区谱峰值; T_S 、 T_W 为低频区、高频区谱峰频率对应周期; H_R 、 T_R 为低频区光谱分量的有效波高和平均周期的比值; H_{SS} 、 H_{SW} 为低频区、高频区有效波高分量。

由于江苏海域一维谱的峰值偏低, 峰升高因子均值 3.3 不再适用, 且双峰谱低频区、高频区谱型均采用 JONSWAP 谱表征 [即为式 (7), 以 γ_i 、 α_i 表示峰升高因子和修正系数, $i=1$ 为低频区, $i=2$ 为高频区], 故而对低频区、高频区通过排列组合选取不同峰升高因子参数, 展开 JONSWAP 谱 + JONSWAP 谱的拟合, 以得到最佳谱型拟合曲线。这里的峰升高因子 γ_1 、 γ_2 均从 1 取至 7, 以 0.1 为间隔, 进行交叉组合, 例如 $\gamma_1=1$ 时 γ_2 可取 1.0, 1.1, ..., 7.0, 如此类推, 共计 3 721 组参数组合。具体算法过程分别见 图 5, 一次完整的谱型拟合主要分为 4 步, 分别为计算分区波高、确定 $f(s)_{\max}$ 和 $f(w)_{\min}$ 、校正分区谱型、分区谱型叠加及 DI 误差计算, 而每一组分区参数组合 γ_1 、 γ_2 都必须经历这样一次完整的谱型拟合, 在遍历了全部的峰升高因子参数组合后得到最小 DI 误差值对应的谱型曲线, 即为最佳谱型拟合曲线。如图 5 所示, 每一次完整的谱型拟合对低频区、高频区均展开了 3 次拟合, 第一次拟合的目的是找到能量交叠区内低频区最大频

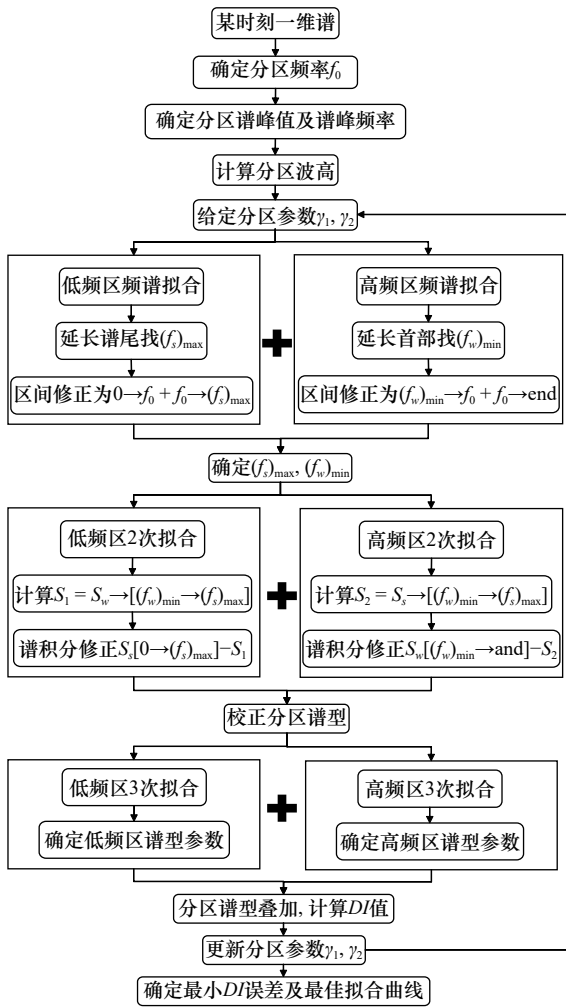


图5 双峰谱拟合算法流程

Fig. 5 Flow of bimodal spectrum fitting algorithm

率、高频区最小频率，第二次拟合的目的是通过校正能量交叠区的谱型积分修正计算分区波高，第三次拟合即为真正意义上的分区谱型拟合。另外，图中DI误差的计算是在低频区、高频区谱型叠加后谱型（即能量交叠区已修正）与实测谱型按照式(1)计算所得。

关于图5中参数 f_0 为根据式(9)计算得到的风涌浪分割频率， S_s 、 S_w 分别代表低频区、高频区2次拟

合谱，在第二次拟合中的两次计算分别为能量交叠区 $[(f_w)_{\min} \rightarrow (f_s)_{\max}]$ 、风涌浪频率修正区间 [涌浪区间 $0 \rightarrow (f_s)_{\max}$ 和风浪区间 $(f_w)_{\min} \rightarrow \text{end}$] 的谱值计算， S_1 、 S_2 分别代表低频区、高频区2次拟合谱在能量交叠区的谱值。另外，图中第一次和第二次的拟合采用了Panahi等^[8]分割叠加后修正的思想，其不同之处在于：Panahi^[8]等分割风涌浪的目的是克服“传统双峰谱校准只基于最小化误差却忽略双峰谱本质”的不足，以实现双峰谱校准收敛性为目标，修正Ochi-Hubble谱模型和Torsethaugen谱模型中的风涌浪波要素系数，但也导致了谱峰频率与峰值的偏移；而本文的算法基于风涌浪分割引入Soares^[4]的双峰谱波高计算方法确定初始分区波高，始终以谱型形态的一致性为目标，保证了谱峰频率与峰值的准确性，从而确定最小DI误差的最佳拟合曲线。

4.2 拟合结果分析

基于上述算法，开展实测站点2018年各月双峰谱谱型的拟合，得到图6所示的实测站6月双峰谱谱型拟合曲线图。由图可知，双峰JONSWAP拟合谱与涌浪主导型、风涌浪相当型、风浪主导型3种类型的实测谱在低频区、高频区均吻合趋势良好，谱峰值、谱峰频率均较为一致，且在双峰谱能量交汇频率区间得到了修正，说明JONSWAP谱+JONSWAP谱可以用于江苏海域双峰谱波浪的拟合。为进一步验证分析该拟合双峰谱，统计双峰JONSWAP拟合谱各月误差指标DI及拟合参数均值，如表2所示。由表2可知，全年DI误差的平均值仅为29.86，Liu^[13]指出当DI值低于30时拟合谱被认为是令人满意的，因此该双峰JONSWAP拟合谱对江苏海域具有适用性。此外，低频区、高频区的修正系数相近且分别为0.85、0.91，而峰升高因子却相差较大，低频区、高频区峰升高因子全年均值分别为2.94、2.04，低频区峰升高因子略高于高频区。

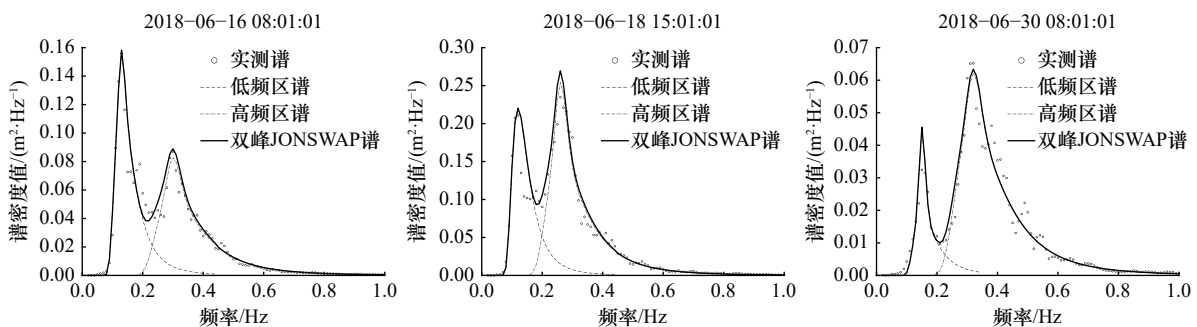


图6 实测站6月双峰谱谱型拟合曲线

Fig. 6 Fitting curve of bimodal spectrum pattern at the measured station in June

表 2 双峰 JONSWAP 拟合谱各月误差指标 DI 及拟合参数均值

Table 2 Monthly error index DI and fitting parameter mean of bimodal JONSWAP fitting spectrum

月份	DI 误差	低频区		高频区	
		α_1	γ_1	α_2	γ_2
1	29.44	0.95	3.09	0.89	2.14
2	21.13	0.80	4.02	0.95	2.10
3	36.63	0.68	2.71	0.95	1.49
4	33.98	0.92	3.18	0.90	1.88
5	27.42	0.86	3.12	0.87	2.31
6	25.78	0.82	2.80	0.87	2.16
7	31.22	0.80	2.75	0.87	2.07
8	27.09	0.86	2.23	0.86	1.95
9	32.32	0.84	2.51	1.01	2.06
10	30.67	0.87	2.84	0.92	1.82
11	31.89	0.89	3.18	0.93	1.97
12	30.80	0.86	2.86	0.85	2.51
平均值	29.86	0.85	2.94	0.91	2.04

4.3 拟合谱型表达式

为使得谱型表达式进一步便于工程应用, 引入谱型参数中的谱宽, 探究其与修正系数、峰升高因子的关系。自从海浪谱理论发展以来, 国内外学者提出了

诸多表示谱宽的参量, 包括 Longuet-Higgins 在 1956 年提出的参量 ϵ 、Longuet-Higgins 在 1975 年修正后提出的谱宽 ν 、侯一筠提出的具有几何意义的参量 B , 但由于上述参量均是针对单峰谱提出因而对双峰谱将存在局限。综上, 对侯一筠提出的谱宽 B 进行修正, 如下图 7 所示。图 7a 至图 7c 为侯一筠和文圣常^[22] 基于单峰谱提出的谱宽公式 $B = m_0/S(f_p) \cdot f_p$ 所表示的几何意义, 假设零阶谱矩 m_0 相等, 则对不同类型双峰谱的计算标准存在明显的差别; 而进行修正后的谱宽为 $B = m_0/S(f_0) \cdot f_0$, 且 $f_0 = (f_1 + f_2)/2$, 如图 7d 至图 7f 所示, 则当 m_0 相等时具有较为一致的谱宽 B 。

侯一筠和文圣常^[22] 曾指出在三参量的风浪频谱中 γ^{-1} 为 B 的孪生量, 即 γ^{-1} 的大小可以表征谱宽、窄的特征。基于此, 绘制实测站点全年双峰谱数据峰升高因子与谱宽的分布关系图, 如图 8 所示, 图中趋势线即为峰升高因子随谱宽参量变化的拟合曲线。由图可知, 峰升高因子集中分布在 1~3 之间, 低频区分布较为离散而高频区分布集中, 为探究 γ_1 、 $\gamma_2 \sim B$ 之间的函数关系, 先将 $\gamma_1 \times \gamma_2$ 看作整体, 将数据分布集中分析整体趋势, 发现整体呈现出随谱宽增大的递减趋势, 后选择分布更集中的高频区峰升高因子探究 $\gamma_2 \sim B$ 的关系。

另外, 为进一步探究修正系数与谱宽、峰升高因子的关系, 绘制了图 9 所示的分布关系。由图 9 可知, 双峰谱低频区、高频区修正系数与谱宽呈团状分布且主要分布在 0.5~2.5 之间, 其趋势线与散点分布

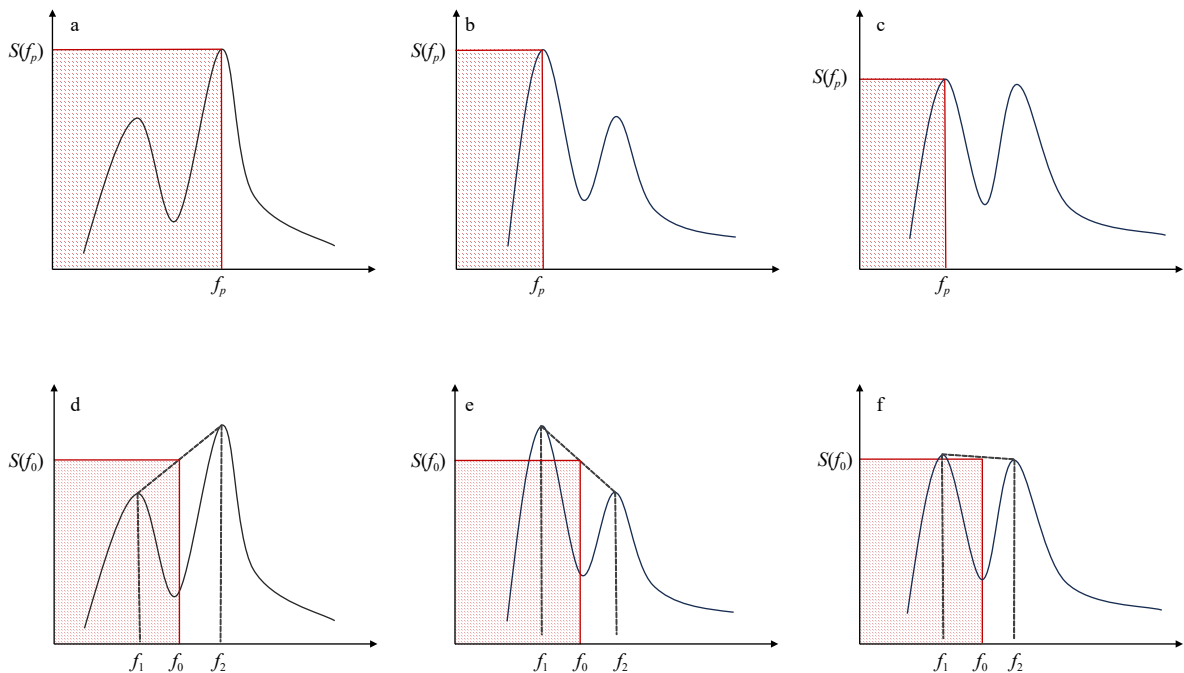


图 7 双峰谱谱宽参量的修正与对比

Fig. 7 Correction and comparison of bimodal spectral width parameters

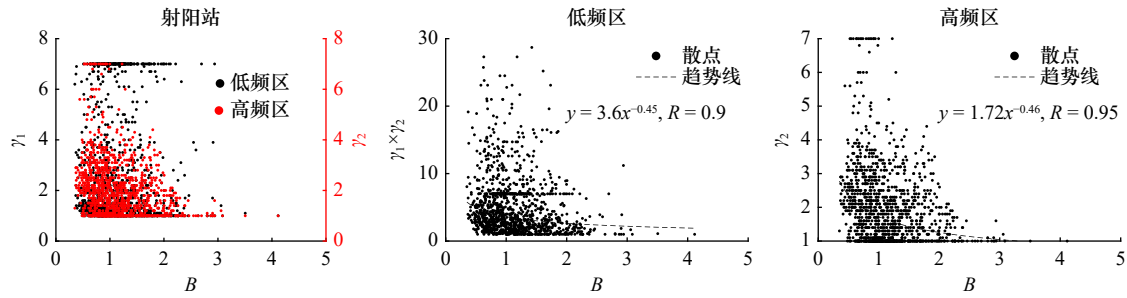


图8 双峰谱峰升高因子与谱宽分布关系

Fig. 8 Relationship between the peak rise factor and the spectral width of bimodal spectrum

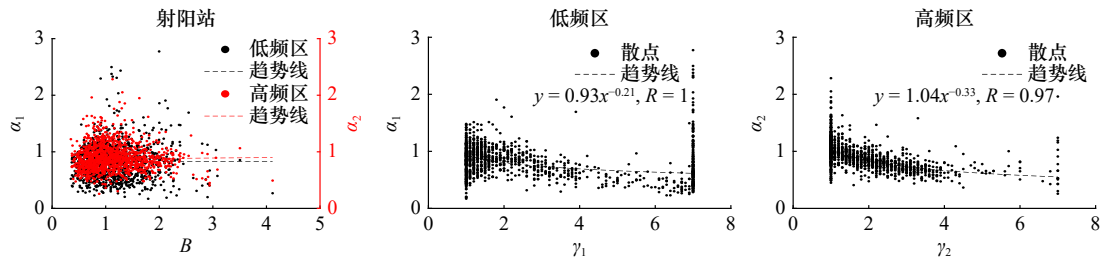


图9 双峰谱修正系数与谱宽、峰升高因子分布关系

Fig. 9 Relationship among correction coefficient, the peak rise factor and the spectral width of bimodal spectrum

并不一致,而低频区、高频区修正系数随着峰升高因子的增大呈现出明显的递减趋势,图中趋势线即为修正系数随峰升高因子变化的拟合曲线。

由此,得到式(12)所示的双峰谱谱型表达式,如下。

$$S(f) = \alpha_1 \frac{5}{16} \frac{H_{ss}^2}{f_{ps}} \left(\frac{f}{f_{ps}}\right)^{-5} \exp\left[-\frac{5}{4} \left(\frac{f}{f_{ps}}\right)^{-4}\right] \gamma_s \exp\left[-\frac{(f-f_{ps})^2}{2\sigma^2 f_{ps}^2}\right] + \alpha_2 \frac{5}{16} \frac{H_{sw}^2}{f_{pw}} \left(\frac{f}{f_{pw}}\right)^{-5} \exp\left[-\frac{5}{4} \left(\frac{f}{f_{pw}}\right)^{-4}\right] \gamma_2 \exp\left[-\frac{(f-f_{pw})^2}{2\sigma^2 f_{pw}^2}\right],$$

$$\sigma = \begin{cases} 0.07, f \in [0, f_{ps}] \cup [(f_w)_{\min}, f_{pw}] \\ 0.09, f \in (f_{ps}, (f_s)_{\max}) \cup (f_{pw}, \text{end}), \end{cases}$$

$$\gamma_1 = m_1 \cdot B^{-n_1}, c_1 = p_1 \cdot \gamma_1^{-q_1},$$

$$\gamma_2 = m_2 \cdot B^{-n_2}, c_2 = p_2 \cdot \gamma_2^{-q_2}, \quad (12)$$

式中, H_{ss} 、 H_{sw} 为低频区、高频区有效波高分量; f_{ps} 、 f_{pw} 为低频区、高频区谱峰频率; γ_1 、 γ_2 为低频区、高频区峰升高因子; α_1 、 α_2 为低频区、高频区修正系数;

$m_{1,2}$ 、 $n_{1,2}$ 、 $p_{1,2}$ 、 $q_{1,2}$ 为拟合常数。

根据图8和图9中拟合曲线经验关系式,代入式(12)中的拟合常数,为进一步说明双峰谱表达式中经验公式的合理性,选择与图6中3种典型双峰谱对应的时刻绘制经验公式谱型,如图10所示。由图可知,包含经验关系式的双峰谱谱型表达式可以很好地表征江苏海域涌浪主导型、风涌浪相当型、风浪主导型双峰谱,谱峰值、谱峰频率以及谱谷值均较为吻合,因此式(12)及拟合曲线经验关系式具有一定的科学合理性。相较而言, Guedes Soares 和 Henriques^[7]提出的双峰 JONSWAP 拟合谱在分区采用了相等的峰升高因子(即 $\gamma_1 = \gamma_2$),不具有可调节性,同时也存在高估谱峰值的问题; Akbari 等^[9]提出的双峰 JONSWAP 拟合谱通过改变谱峰频率得到最小 DI 误差的谱型,且分区波高计算采用了 Goda^[20]提出的经验公式,在一定程度上会导致谱型偏差及存在地域差异。本文

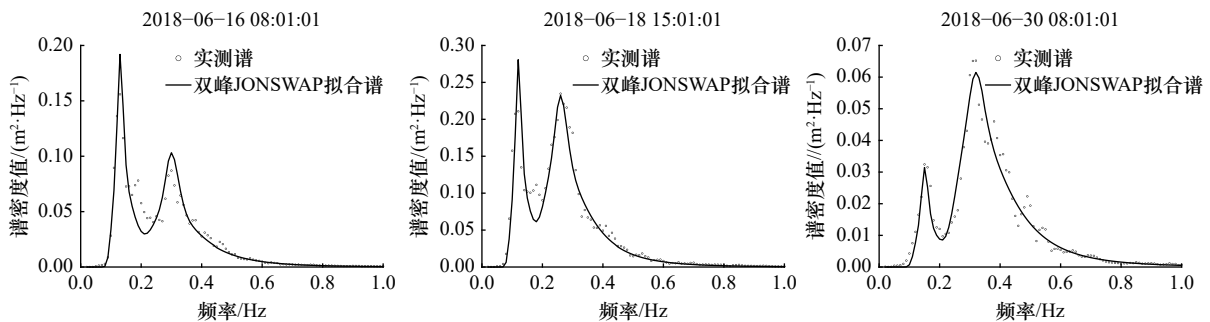


图10 含经验关系式的双峰谱谱型与实测谱型对比

Fig. 10 Comparison between bimodal spectral pattern with empirical relationship and measured spectral pattern

所提出的双峰谱表达式形式简单而易于工程应用,虽然该双峰 JONSWAP 拟合谱仅限于来自江苏海域单个测站的数据集,但所提出的方法可以在其他海域进行检验,其灵活性是由可调节的修正系数 c 、峰升高因子 γ 赋予的,可由目标频谱拟合确定,简单来说,该双峰 JONSWAP 拟合谱具有自适应性,而不局限于某一海域或者某一地形、风场条件。

5 结论

本文基于 2018 年实测站全年观测数据,对数据集展开异常值检验进行数据清洗,识别双峰谱数据并研究江苏海域双峰谱的谱型特征,从而给海上施工提供相关谱参数作为科学依据。文中首先介绍了目前已经提出的双峰谱谱型表达式并简单分析其适用性,而后探讨了 Ochi-Hubble 六参数谱、Torsethaugen 双峰谱对该测站实测双峰谱的适用性,由于受到不同海域地形与风场条件的影响,上述两种双峰谱无法科学描

述江苏海域的双峰谱,因此采用 JONSWAP 谱+ JONSWAP 谱的形式拟合实测双峰谱,在误差指标 DI 满足合理误差的条件下,结合修正后的谱宽参量 B ,探究了修正系数、峰升高因子、谱宽参量间的依赖关系,得到了双峰拟合谱型表达式。

本文的主要结论如下:

(1) 基于北大西洋海域提出 Ochi-Hubble 谱系及基于挪威海域提出的 Torsethaugen 谱在江苏海域的 DI 误差均值超出合理范围,因此不适用于江苏海域双峰谱谱型,后期将对 Ochi-Hubble 谱模型、Torsethaugen 谱模型进一步展开谱参数拟合,并与双 JONSWAP 拟合谱对比分析。

(2) 江苏海域双峰谱谱密度峰值偏低且低频区峰升高因子高于高频区,双峰 JONSWAP 拟合谱更适用于该海域双峰谱,经拟合得到双峰谱谱型表达式可为海上施工提供参考依据,该式具有自适应性,可推广应用不同风场、地形条件的海域中。

参考文献:

- [1] 丁健,杜宇. 外海开敞海域双峰谱混合浪对海上风电场施工作业的影响探讨[J]. 中国港湾建设, 2021, 41(8): 20-23, 70.
Ding Jian, Du Yu. Discussion on the influence of bimodal spectrum mixed wave on offshore wind farm construction in open seas[J]. China Harbour Engineering, 2021, 41(8): 20-23, 70.
- [2] Strelakov S S, Tsyploukhin V P, Massel S T. Structure of sea wave frequency spectrum[J]. Coastal Engineering Proceedings, 1972, 1(13): 14.
- [3] Ochi M K, Hubble E N. Six-parameter wave spectra[J]. Coastal Engineering Proceedings, 1976, 1(15): 17.
- [4] Soares C G. Representation of double-peaked sea wave spectra[J]. *Ocean Engineering*, 1984, 11(2): 185-207.
- [5] Torsethaugen K, Haver S. Simplified double peak spectral model for ocean waves[C]//Proceedings of the 14th International Offshore and Polar Engineering Conference. Toulon, France: The International Society of Offshore and Polar Engineer, 2004: 76.
- [6] 宗智,王轶赓,顾学康,等. 近岛礁有理分式波浪谱研究[J]. 水动力学研究与进展, 2018, 33(5): 570-575.
Zong Zhi, Wang Yigeng, Gu Xuekang, et al. Study on the rational form of wave spectrum near islands and reefs[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2018, 33(5): 570-575.
- [7] Henriques A C, Guedes Soares C. Fitting a double-peak spectral model to measured wave spectra[C]//Proceedings of the 17th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. New York: ASME, 1998, 2.
- [8] Panahi R, Shafieefar M, Ghasemi A. A new method for calibration of unidirectional double-peak spectra[J]. *Journal of Marine Science and Technology*, 2016, 21(1): 167-178.
- [9] Akbari H, Panahi R, Amani L. A double-peaked spectrum for the northern parts of the Gulf of Oman: revisiting extensive field measurement data by new calibration methods[J]. *Ocean Engineering*, 2019, 180: 187-198.
- [10] 刘首华,陈满春,董明媚,等. 一种实用海洋浮标数据异常值质控方法[J]. 海洋通报, 2016, 35(3): 264-270.
Liu Shouhua, Chen Manchun, Dong Mingmei, et al. A quality control method for the outlier detection of buoy observations[J]. Marine Science Bulletin, 2016, 35(3): 264-270.
- [11] 任叙合,谢波涛,宋转玲. 南海深水区双峰型海浪谱特征研究[J]. 海洋科学进展, 2014, 32(2): 148-154.
Ren Xuhe, Xie Botao, Song Zhuanling. Statistical characteristics of the double-peaked wave spectra in the deep area of the South China Sea[J]. Advances in Marine Science, 2014, 32(2): 148-154.
- [12] 高晨晨,陈国平,尹亚军. 响水海域双峰谱型海浪的统计分析[J]. 水运工程, 2016(3): 23-28.
Gao Chenchen, Chen Guoping, Yin Yajun. Statistical analysis of sea waves with double-peaked spectra in Xiangshui sea area[J]. Port and Waterway Engineering, 2016(3): 23-28.
- [13] Liu P C. A representation for the frequency spectrum of wind-generated waves[J]. *Ocean Engineering*, 1983, 10(6): 429-441.
- [14] 黄培基,胡泽建. 胶州湾双峰海浪频谱的表示[J]. 海洋学报, 1988, 10(5): 531-537.
Huang Peiji, Hu Zejian. Representation of bimodal wave spectra in Jiaozhou Bay[J]. Haiyang Xuebao, 1988, 10(5): 531-537.
- [15] Golpira A, Panahi R, Shafieefar M. Developing families of Ochi-Hubble spectra for the northern parts of the Gulf of Oman[J]. *Ocean En-*

- gineering, 2019, 178: 345–356.
- [16] Panahi R, Ghasemi K A, Shafieefar M. Development of a bi-modal directional wave spectrum[J]. *Ocean Engineering*, 2015, 105: 104–111.
- [17] 陈文伟, 刘小龙, 杭澔, 等. Ochi-Hubble 双峰谱在近岛礁海域的适用性研究 [J]. *中国造船*, 2020, 61(1): 120–130.
Chen Wenwei, Liu Xiaolong, Hang Cen, et al. Study on applicability of bi-modal wave spectrum in waters near islands and reefs[J]. *Ship-building of China*, 2020, 61(1): 120–130.
- [18] Hwang P A, Ocampo-Torres F J, García-Nava H. Wind sea and swell separation of 1D wave spectrum by a spectrum integration method[J]. *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology*, 2012, 29(1): 116–128.
- [19] Hasselmann K, Barnett T P, Bouws E, et al. Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP)[J]. *Ergänzungsheft zur Deutschen Hydrographischen Zeitschrift*, 1973, 8(12): 7–95.
- [20] Goda Y. A review on statistical interpretation of wave data[J]. *Report of the Port & Harbour Research Institute*, 1979, 18: 5–32.
- [21] 沈至淳, 陶爱峰, 李雪丁, 等. 基于实测资料的双峰标准谱研究 [J]. *海洋湖沼通报*, 2020(1): 9–17.
Shen Zhichun, Tao Aifeng, Li Xueting, et al. Study on standard double-peak spectrum based on observed data[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2020(1): 9–17.
- [22] 侯一筠, 文圣常. 三参量的风浪频谱 [J]. *海洋与湖沼*, 1990, 21(6): 495–504.
Hou Yijun, Wen Shengchang. Wind wave spectra with three parameters[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1990, 21(6): 495–504.

A study on bimodal spectral patterns based on fixed-point observation data in Jiangsu sea area

Yang Yini^{1,2,3}, Tao Aifeng^{1,2}, Cao Liwei^{1,2}, Fan Jun^{1,2}, Wang Gang^{1,2}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Coastal Disaster and Protection, Hohai University, Nanjing 210024, China; 2. College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China; 3. PowerChina Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an 710065, China)

Abstract: As a national key construction sea area, the trend of offshore wind power construction in the Jiangsu sea area towards the open sea is the main trend of future development. The open sea areas have more surge components, and the wave spectrum often appears in the form of bimodal spectrum. Therefore, the wave characteristics of bimodal spectrum waves need further in-depth research to provide reference basis for offshore construction. Based on the observation data of the buoy station throughout 2018, 1 223 bimodal spectral data were obtained through outlier testing and bimodal spectral identification. The bimodal spectral characteristics of waves in the Jiangsu sea area were studied, and different typical bimodal spectral types were compared. The fitting of the measured bimodal spectra was carried out, and the corrected spectral width parameters were proposed. The dependency relationship between the correction coefficient, peak rise factor, and spectral width parameters was explored, and the bimodal spectral fitting expression was obtained. The results indicate that the Ochi-Hubble spectrum proposed based on the North Atlantic sea area and the Torsethaugen spectrum proposed based on the Norwegian sea area are not applicable to the bimodal spectrum type in the Jiangsu sea area. The bimodal JONSWAP fitting spectrum proposed in this paper has adaptability and can scientifically and reasonably describe the bimodal spectrum in the Jiangsu sea area, and is widely applied to different wind and terrain conditions in the sea area.

Key words: Jiangsu sea area; bimodal spectrum; Ochi-Hubble six parameter spectrum; Torsethaugen bimodal spectrum; bimodal JONSWAP fitting spectrum