

海浪波群的谱特征分析*

尹宝树 吴淑萍 范顺庭 王 涛 侯一筠 程明华 杨德周

(中国科学院海洋研究所, 青岛 266071)

海浪的波谱特征分析对认识海浪有重要的意义, 因为海浪谱反映了海浪的结构成分。这对海工建筑、海洋运输、船舶制造、海浪预报和海浪模拟等均有重要的实用意义。

波群是伴随海浪经常出现的一种自然现象, 且经常伴随大浪的出现而出现。实践证明, 波群具有极大的破坏力, 其破坏性远比单个波大得多, 它是海浪破坏海工建筑物的重要因子, 许多防波堤的破坏并非是由单个波的作用, 而是由相继出现的几个大波(波群)作用的结果。早先, 人们对波群这种习见的现象研究甚少。自 1974 年葡萄牙锡尼斯港深水防波堤的破坏之后, 对波群的研究才日益受到重视。

对波群的研究目前多采用包络方法、马尔科夫链方法和波能过程线法。波群研究的主要内容是波群的统计特征(如波群链长统计); 另外, 波群的模拟也是重要的研究内容之一。目前用包络方法研究波群比较普遍, 且有不少研究成果。徐德伦等(2001)综述了这方面的研究进展及结果, 文圣常等(1984)也进行了详尽的讨论。

以往的研究大都是研究波群的统计特征, 如合田良实(1976)、Ewing(1973)、Rye(1974)。而针对地域性的波浪, 我国学者也只是以包络方法为基础讨论了不同地域海浪波群的统计特征(常德馥, 1987; 葛明达, 1986; 范顺庭, 1998)。就波群本身的结构特征而言, 即波群的波谱分析特征以往的研究涉及尚少。作者拟借助于谱分析方法, 对带有典型波群的实测的海浪记录来分析海浪波群的波谱结构, 进而借此对海浪波群的结构特征进行深入探讨。

一、数据来源和统计分析

为了得到海浪波群的谱结构, 我们用快速傅里叶变换(FFT)方法和最大熵谱法(MEM)对海浪及伴随海浪出现的波群进行了波谱分析, 分析典型波群的波谱特征。由于 MEM 方法有较高的分辨率, 从而可以用 MEM 方法得到典型波群的波谱, 进而得到海浪波群的谱结构。

* 中国科学院海洋研究所调查研究报告第 4566 号。国家自然科学基金 40076005 和中国科学院知识创新工程项目(KZCX2-202)资助

通信作者: 尹宝树, 1963 年 1 月生, 研究员, 博士生导师, E-mail: bsyin@ms.qdio.ac.cn

收稿日期: 2003 年 2 月 16 日

图 1a 是用方向波浪仪(S4DW——美国进口)观测到的一条带有明显(典型)波群特征的实际的压力波海浪记录,历时 9min。测波仪放在水面下 7m 处。图中的“×”号代表采样点,采样的时间间隔为 $\Delta t = 0.5\text{s}$, 取 $N=1\,024$ 个样本值。

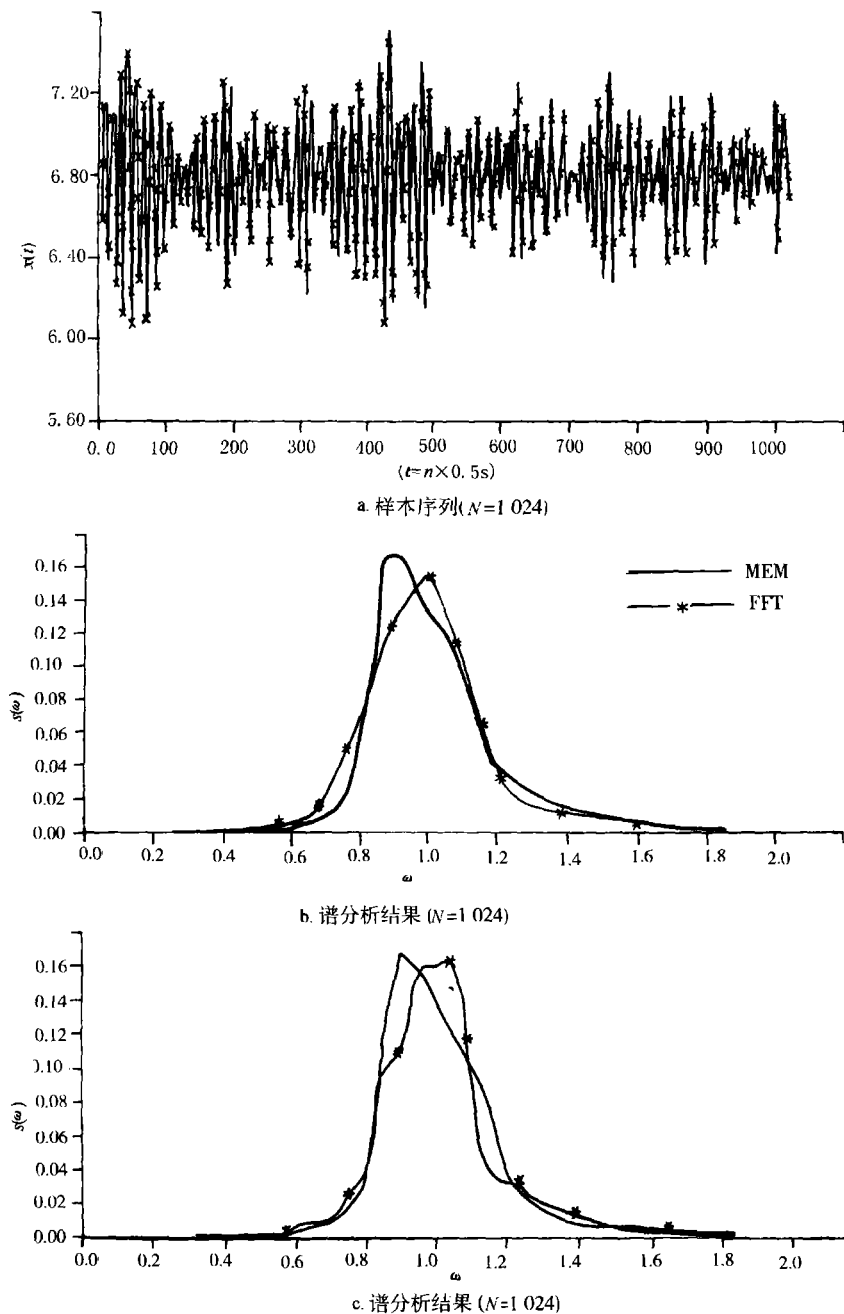


图 1 样本序列及波谱分析结果

对于本次观测的海浪的外观(表现)特征,我们统计了它的单个波的波高及其对应的周期(表 1)时也计算了海浪的一般统计特征值,如最大波高及其对应的周期($H_{\max}$, $T_{\max}$)、十分之一大波的波高及其对应的周期($H_{1/10}$, $T_{1/10}$)、有效波高及其对应的周期($H_{1/3}$, $T_{1/3}$)和平均波高及其对应的周期($\bar{H}$, $\bar{T}$)见表 1。

表 1 单个波高及对应的周期

原始波高和周期						按波高大小排列的波高和周期					
序号	波高/m	周期/s	序号	波高/m	周期/s	序号	波高/m	周期/s	序号	波高/m	周期/s
1	0.76	6.44	40	1.20	6.12	1	1.33	6.54	40	0.55	4.93
2	0.82	6.10	41	0.59	5.73	2	1.31	6.76	41	0.55	6.22
3	1.17	5.70	42	0.26	6.42	3	1.28	6.98	42	0.54	6.47
4	1.31	6.76	43	0.47	7.62	4	1.20	6.12	43	0.52	6.98
5	0.96	5.45	44	0.38	9.39	5	1.17	5.70	44	0.50	6.32
6	1.05	5.91	45	0.54	6.47	6	1.05	5.91	45	0.50	9.48
7	0.96	7.04	46	0.45	7.78	7	1.00	6.63	46	0.48	7.23
8	0.68	5.43	47	0.44	6.13	8	1.00	6.85	47	0.48	4.81
9	0.48	6.70	48	0.34	7.07	9	0.98	5.45	48	0.48	5.93
10	0.21	5.64	49	0.19	3.60	10	0.96	5.04	49	0.48	6.70
11	0.17	4.71	50	0.55	4.39	11	0.95	6.61	50	0.47	8.43
12	0.38	4.34	51	0.82	6.41	12	0.91	6.72	51	0.47	5.34
13	0.48	4.81	52	0.61	7.55	13	0.88	6.89	52	0.47	7.62
14	0.63	5.84	53	0.23	3.27	14	0.82	6.41	53	0.45	5.78
15	0.63	7.14	54	0.57	6.69	15	0.82	6.10	54	0.45	7.78
16	0.98	6.85	55	0.58	8.22	16	0.82	6.92	55	0.44	6.13
17	0.82	5.92	56	0.47	4.84	17	0.81	5.69	56	0.44	5.35
18	0.27	5.06	57	0.13	6.50	18	0.80	5.59	57	0.41	4.96
19	0.50	6.32	58	0.41	4.96	19	0.78	7.89	58	0.38	9.39
20	0.45	5.78	59	0.55	6.22	20	0.76	6.44	59	0.38	4.34
21	0.08	2.97	60	0.88	6.89	21	0.76	5.72	60	0.38	5.50
22	0.66	5.75	61	1.00	6.63	22	0.74	6.16	61	0.36	8.93
23	0.36	8.93	62	0.50	9.48	23	0.74	7.07	62	0.35	8.67
24	0.25	6.98	63	0.76	5.72	24	0.74	6.86	63	0.34	7.07
25	0.81	5.69	64	0.48	7.23	25	0.72	5.85	64	0.32	5.78
26	1.00	5.60	65	0.29	7.64	26	0.69	6.11	65	0.32	5.54
27	0.55	7.44	66	0.27	3.97	27	0.68	6.06	66	0.29	7.64
28	0.32	5.78	67	0.64	4.55	28	0.68	5.43	67	0.27	5.06
29	0.47	5.34	68	0.29	7.64	29	0.66	5.75	68	0.27	3.97
30	0.72	5.85	69	0.74	7.07	30	0.64	4.55	69	0.26	6.42
31	0.59	7.63	70	0.35	8.67	31	0.63	5.84	70	0.25	5.35
32	0.80	6.59	71	0.69	6.11	32	0.63	7.14	71	0.24	6.01
33	0.95	6.61	72	0.74	6.16	33	0.61	7.55	72	0.23	3.97
34	0.78	7.89	73	0.24	6.01	34	0.59	7.63	73	0.21	5.64
45	1.28	6.98	74	0.09	2.96	45	0.59	5.73	74	0.19	3.60
46	1.33	6.54	75	0.44	5.35	46	0.59	8.22	75	0.17	4.71
37	0.48	5.93	76	0.32	5.54	37	0.58	6.69	76	0.13	6.50
38	0.68	6.06	77	0.38	5.50	38	0.57	6.69	77	0.09	2.96
39	0.91	6.72	78	0.25	5.35	39	0.55	7.44	78	0.08	2.97
$H_{\max}=1.33$			$H_{1/10}=1.19$			$H_{1/3}=0.93$			$\bar{H}=0.60$		
$T_{\max}=6.54$			$T_{1/10}=6.23$			$T_{1/3}=6.40$			$\bar{T}=6.24$		

由表 1 可知,本次观测到的最大波高(指上跨零点波高)为 1.33m (表 1 右边序号为 1),

对应的周期为 6.54s; 次大波高为 1.31m(表 1 右边序号为 2), 对应的周期为 6.76s。

由统计分析得知, 最大的波高包含在第三次出现的波群中(图 1a 左起第三个波群), 次大波高包含在第一次出现的波群中(图 1a 左起第一个波群)。因为第一个波群比第三个波群更具有典型性, 所以本文着重对第一个波群进行详尽分析。

二、波群谱结构特征分析方法及结果

为了得到波群的波谱结构, 我们用 FFT 方法和 MEM 方法对一般的海浪谱进行了分析。分析时所取样本序列的长度为 $N=1024$ 个样本值, Nyquist 频率为 $f_n=1/(2\Delta t)$, 谱的分辨率取 $\Delta\omega=\pi/128(\text{rad})$, 得到了 129 个谱值(包括零频率点上的谱值)。由于谱的高频段谱值较小(近乎于零), 故在表 2 中仅列出了前 60 个(0~59)用 FFT 方法计算的结果。

表 2 谱分析结果

序 号	频 率	谱 值	序 号	频 率	谱 值	序 号	频 率	谱 值
0	0.000	0.000 00	20	0.989	0.158 08	40	1.979	0.000 48
1	0.049	0.002 60	21	1.039	0.167 15	41	2.028	0.000 51
2	0.099	0.000 67	22	1.088	0.117 46	42	2.078	0.000 54
3	0.148	0.000 33	23	1.138	0.050 88	43	2.127	0.000 38
4	0.198	0.000 31	24	1.187	0.031 42	44	2.177	0.000 19
5	0.247	0.000 29	25	1.237	0.033 54	45	2.226	0.000 11
6	0.297	0.000 17	26	1.286	0.020 22	46	2.276	0.000 10
7	0.346	0.000 24	27	1.336	0.017 59	47	2.325	0.000 07
8	0.396	0.000 21	28	1.385	0.012 19	48	2.375	0.000 05
9	0.445	0.000 61	29	1.435	0.011 85	49	2.424	0.000 06
10	0.495	0.000 53	30	1.484	0.006 94	50	2.474	0.000 06
11	0.544	0.001 27	31	1.534	0.005 52	51	2.523	0.000 06
12	0.594	0.004 21	32	1.583	0.003 41	52	2.573	0.000 07
13	0.643	0.008 35	33	1.633	0.004 56	53	2.622	0.000 06
14	0.693	0.010 27	34	1.682	0.003 82	54	2.672	0.000 03
15	0.742	0.026 73	35	1.732	0.001 48	55	2.721	0.000 03
16	0.792	0.036 77	36	1.781	0.001 73	56	2.771	0.000 07
17	0.841	0.100 59	37	1.831	0.001 73	57	2.820	0.000 03
18	0.891	0.109 11	38	1.880	0.000 97	58	2.869	0.000 01
19	0.940	0.163 49	39	1.929	0.000 95	59	2.919	0.000 03

图 1b 是用 FFT 方法和 MEM 方法得到的海浪谱分布图。图中带“*”号的曲线是由 FFT 方法得到的结果, 不带“*”号的曲线是由 MEM 方法得到的结果。

由图 1b 可知, 两种分析方法得到的结果除了谱峰值有所不同外, 其他部分基本一致。用 MEM 方法得到的结果只有 1 个尖峰, 用 FFT 方法得到的结果有 2 个尖峰, 而且谱峰频率较 MEM 方法得到的结果要大一些, 而峰值却比用 MEM 方法得到的结果小。

众所周知,用FFT方法直接得到的谱称粗谱。这样的谱是对观测资料所做的傅里叶展开的傅里叶系数。其谱曲线有较大的起伏跳动,谱曲线显得不够稳定。因此,必须对粗谱进行平滑处理。图1b是用叠合平滑法(平滑长度取7;范顺庭,1979)所得到的平滑谱曲线图。

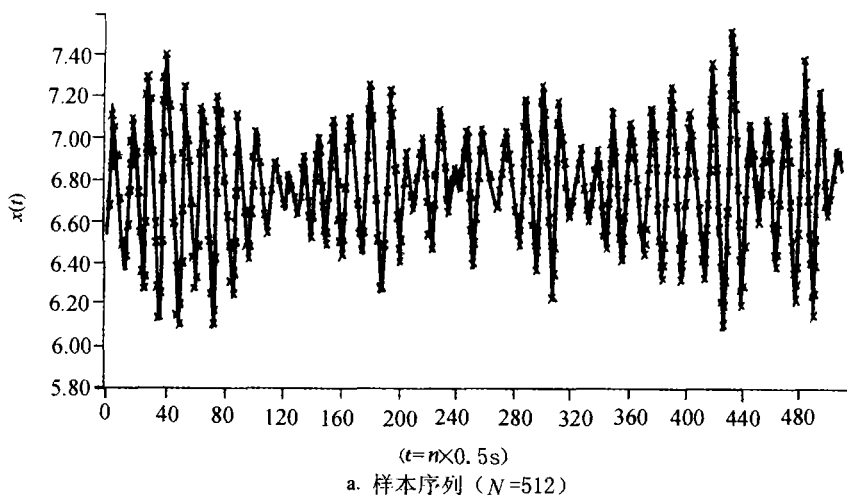
谱图曲线的平滑程度与做平滑时所取的参加平滑的粗谱个数(平滑长度)有关,如果参加平滑的长度越长(即参加平滑的粗谱的个数越多),谱曲线就越平滑。图1c是参加平滑的长度再扩大1倍后得到的64个谱值所做的谱曲线图。与图1b相比较,谱曲线由原来的2个峰变成了1个峰(即由原来的双峰谱变成了单峰谱),峰值频率也发生了变动(右移)。

最大熵谱法(MEM)是根据信息论原理导出的,它更大限度地利用了观测资料中所包含的信息,仅用较少的资料就获得较多的信息,有较高的灵敏度,无需再进行平滑。国外有人做过模拟计算,用 $\sin(\lambda t)$ 曲线,取其1/4周期长度加上白噪声,最大熵谱法能较准确地找出周期点,而其他方法则不能(罗乔林,1980;Lacoss,1971;Ullreh,1972)。最大熵谱法的优越性已在地球物理学的应用中得到了广泛地证实。所以,在以下的分析中也采用最大熵谱法,所取的滤波器的个数均取为18,对个别情况滤波器的个数取为14。

典型的波群在波列中出现仅是一个短暂的过程。在一列波中,有时会出现数个波群(在大浪过程的情况下),有时也很少出现。图1a是在我们的观测资料中挑选的出现带有较典型波群的一列海浪记录。

为了得到波群的波谱特征,利用最大熵谱法的优点,将观测记录逐步缩短,短至仅包含一个波群,乃至波群的部分记录,甚至更短,分析海浪波谱随着海浪记录的缩短其波谱结构所发生的变化,从而可以得到波群的波谱结构。

我们先将分析的数据减少一半,取512个观测记录(图2a)进行波谱分析。谱分析结果绘在图2b中。



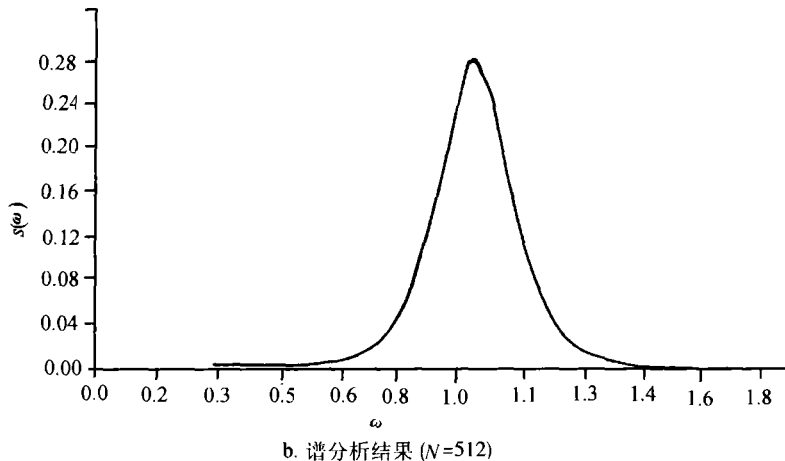
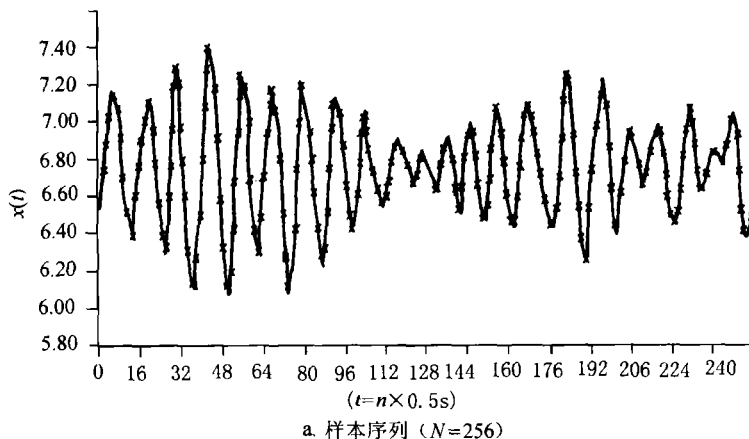


图2 采样数据减少为 1/2 后的样本序列及波谱分析结果

比较图 2b 和图 1c 可知, 当采样数据减少一半时, 谱峰显得更为凸出一些, 由谱曲线所围成的图形显得更窄瘦一些, 峰值频率没有多少改变。这就意味着海浪谱的频带变窄, 海浪的组成成分减少。如果将采样数据再减少一半, 变成 256 个观测记录, 历时曲线为图 3a, 这样长度的记录基本上包含了前两个波群, 其谱图为图 3b 所示。比较图 3b 和图 2b 可知, 图 3b 的谱形变成了锥形, 谱峰更加尖锐。这时谱峰频率为 $\omega=1.031\text{rad}$, 谱峰值对应周期为 6.10s, 均小于由统计方法得到的周期的统计值(见表 1 最后一栏)。

如果将采样数据进一步减少, 减少至 128 个数据, 此时采样数据包含了第一个典型波群, 而且包含了本次观测到的第二个大波(次大波, 波高为 1.31m。周期为 6.70s(见表 1 和图 4a)。分析这段包含一个典型波群的记录, 这段记录的谱分析结果绘在图 4b 中。从分析结果看, 谱峰频率仍为 $\omega=1.031\text{rad}$, 谱峰周期仍是 6.10s, 与记录长度为 256 个采样点的分析结果相同, 而波谱的频域变窄, 谱图变得瘦窄, 谱峰值增大。



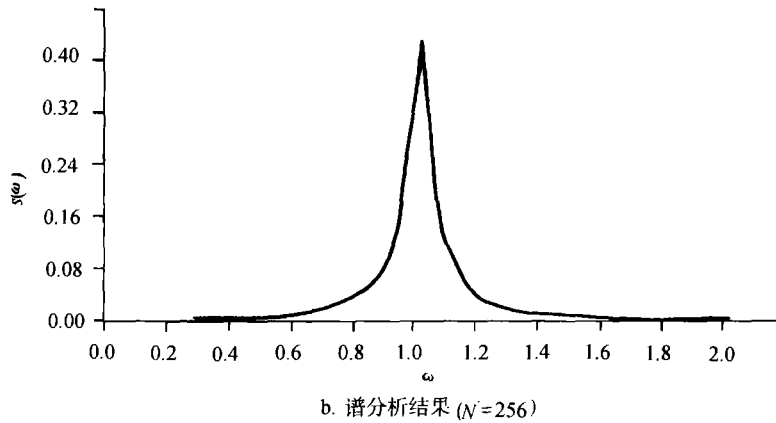


图3 采样数据减少为 1/4 后的样本序列及波谱分析结果

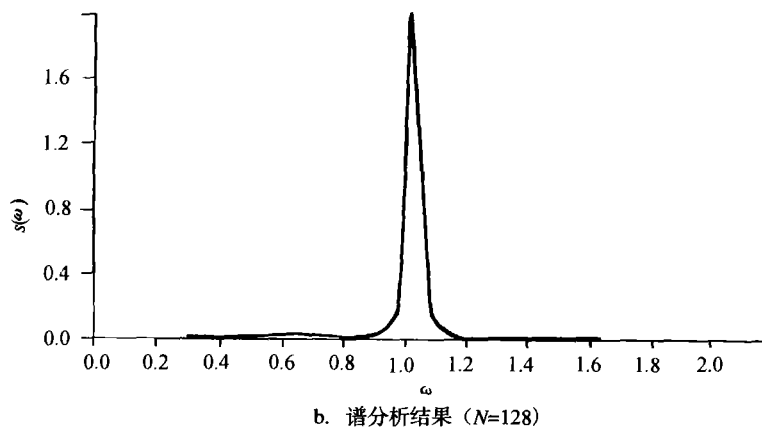
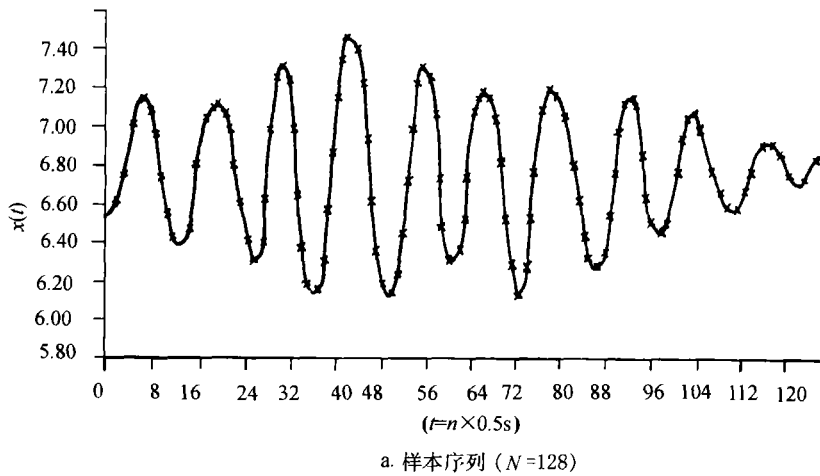


图4 采样数据减少为 1/8 后的样本序列及波谱分析结果

如果将采样数据继续减少, 减少至 64 个采样数据(图 5a), 谱分析结果见图 5b。由分

析结果可看出,就这个波群而言,即使只使用整个波群一半的数据(包含该波群中的大波),分析结果与包含整个波群数据的分析结果亦相近。由这一点说明,仅使用包含波群一半的观测资料(包含该波群中的大波),用最大熵谱法也可以得到整个波群的波谱成分。

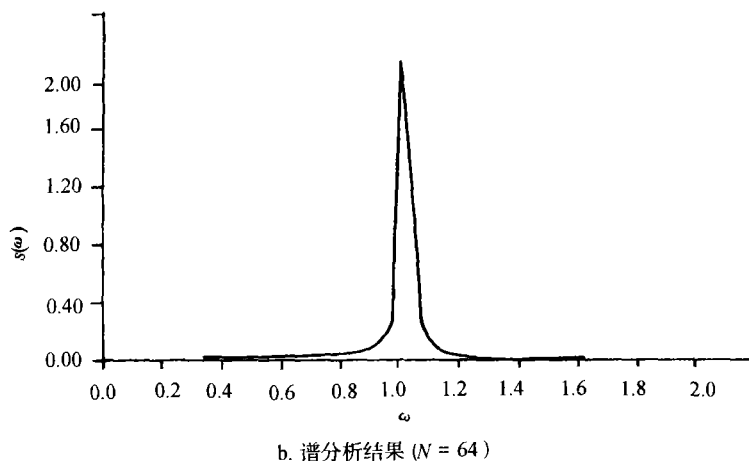
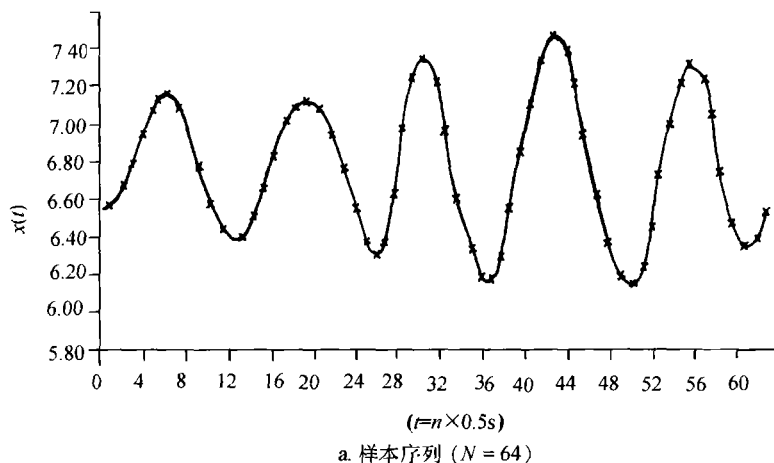


图5 采样数据减少为 1/16 后的样本序列及波谱分析结果

下面将进一步分析采样数据减少到仅含波群中大波个数少于约 2 个的情形。如数据长度缩短至 32 个采样点,谱分析结果如图 6b 所示。由图可看到,谱峰值变小了,但峰值频率仍然没有改变,在谱峰的左边出现了一个小小的次峰。次峰的周期为 9.8s。

如将采样数据减少到 20 个(图 7a),且仍将波群中最大的波包含在其内,谱分析结果如图 7b 所示。由图可以看到,主峰值变小,次峰值增大,主峰频率稍有改变,其周期变为 6.4s,与有效波周期 $T_{1/3}=6.4s$ 相同;次峰升高,但次峰周期没有变化,仍为 9.8s。如果我们选择仅包含波群内最大波的几个采样值,如图 8a 取 14 个采样值做谱分析,谱图如图 8b 所示。比较图 8b 和图 7b 可以看到,主峰值继续变小,主峰周期没有改变,仍

为 6.4s。次峰值亦继续增大，次峰周期由 9.8s 变成 8.2s，且两个主峰和次峰十分明显地被区分开来。

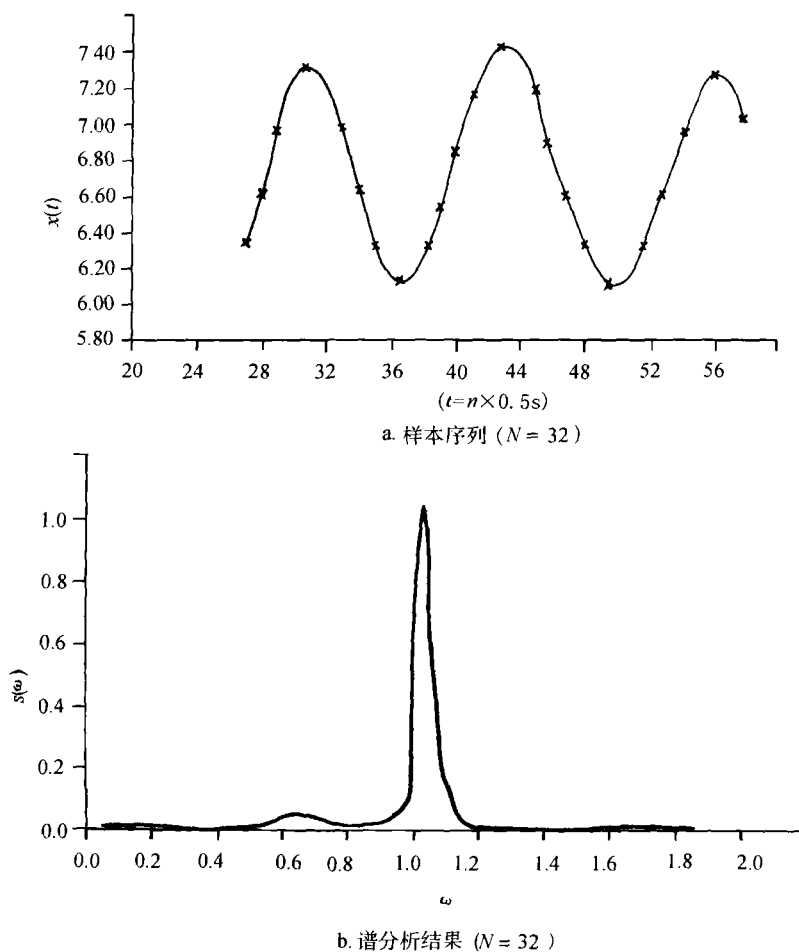
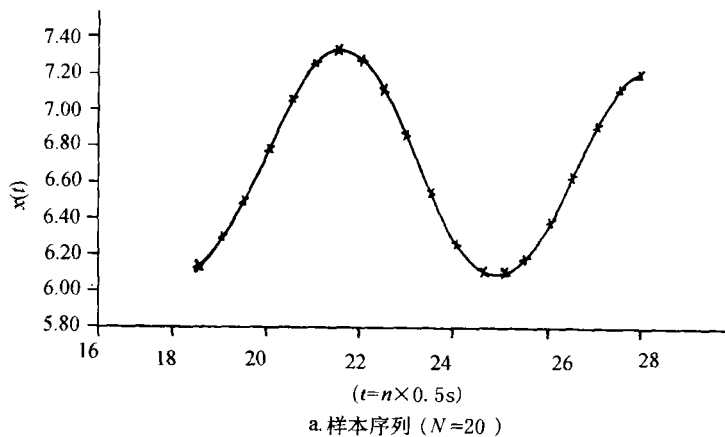


图 6 采样数据减少为 1/32 后的样本序列及波谱分析结果



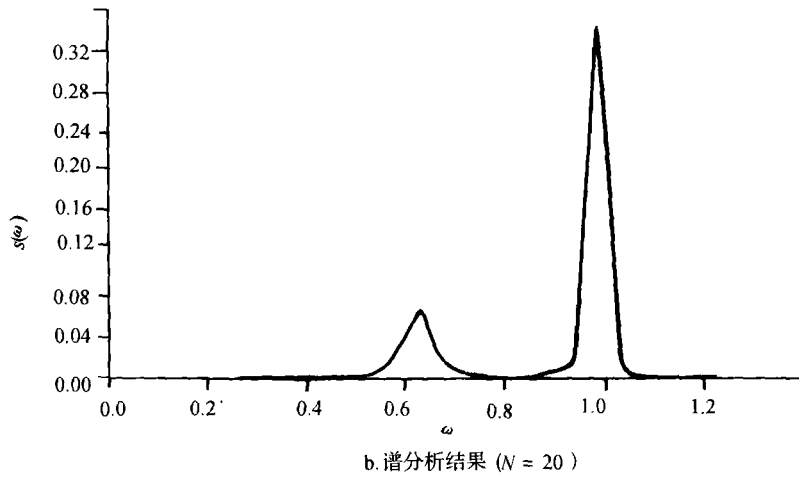


图7 采样数据为20个的样本序列及波谱分析结果

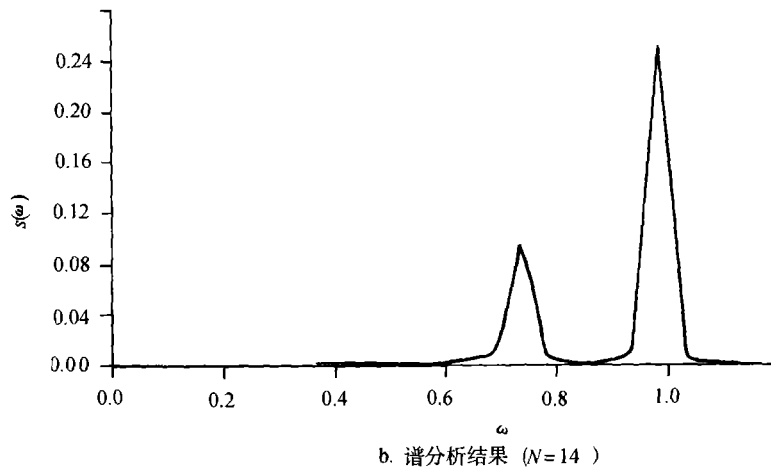
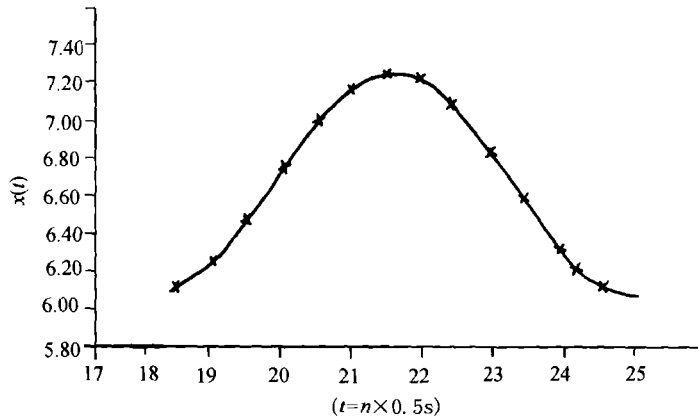


图8 采样数据为14个的样本序列及波谱分析结果

至此波群的波谱特征已经明确显示出与通常波谱有显著不同,波群波谱的频域显著变窄,谱峰值显著增大,整个谱形变成类似 δ 函数的形态。显然这种波谱形态的变化将会引起由波谱计算海洋结构物响应力谱的显著变化。由于海上结构物遭波浪破坏往往是波群中几个连续大波共同作用的结果,因此海上结构物的设计应当主要考虑波群及其波谱产生的影响。

波群中大波个数少于约两个的谱分析结果则显示出双峰谱特征,形象地讲,就像是一个载频波(主波)和一个调制波相互作用的结果。具体到本实验,笔者所观测到的波群应是一个周期为6.4s的主波和另一个周期为8.2s的次波在同一方向上传播所形成的一个较典型的波群。

需要说明的是,仅用14个点做谱分析,而且要得到较高的分辨率,用FFT方法是难以做到的,而MEM方法可以实现,这再次证明了MEM方法的优越性。不过这时要将滤波器的个数改为14或更小。

以上分析是从实测资料入手,最后分析到只包含典型波群的记录,得到了两个频率成分,对这两个频率成分作物理解释,笔者认为是合理的。但反过来是不一定成立的。因为由两个频率分量的叠加的波不一定恰是海浪中所说的波群,对这一点尚需作进一步的研究。

三、结 语

作者通过对波群的谱结构特征的分析研究得到以下结果:

- 1) 波群的波谱可以用MEM方法得到(特别当取样数较少的情况下)。
- 2) 典型波群的波谱较平稳长序列的通常的波谱有明显不同。波群谱峰值显著增大,频域显著变窄,整个谱形具有类似 δ 函数的形态。
- 3) 本研究个例中波群大波个数少于约两个的谱分析结果则显示出双峰谱特征。谱峰周期(6.4s)囿于几个特征波周期($T_{\max}$ 、 $T_{1/10}$ 、 $T_{1/3}$ 、 T)之内。
- 4) 海浪的破坏作用主要是来自波群,最大波高往往出现在波群链中,本文指出的波群波谱类似 δ 函数的形态特征将会导致由波谱计算结构物响应力谱的显著变化,这对工程设计有重要意义。

参 考 文 献

- 文圣常, 1984. 海浪理论与计算原理. 北京:科学出版社. 206~208
- 罗乔林, 1980. 介绍最大熵谱估计. 数学的实践与认识, (1): 74~80
- 范顺庭, 1979. 用快速傅立叶变换计算海浪的功率谱密度函数. 海洋湖沼通报, (2): 6~11
- 范顺庭, 1998. 渤海海浪波高群性特征的分析. 海洋科学集刊, (40): 13~22
- 徐德伦, 于定勇, 2001. 随机海浪理论. 北京:高等教育出版社. 281
- 常德馥, 1987. 胶州湾波群的统计分析. 海岸工程, (1): 37~43
- 葛明达, 1986. 连云港的波群统计分析. 黄渤海海洋, (2): 9~14
- 合田良实, 1976. 波の连なりの统计的性质について. 港湾技术研究所报告, (3): 319
- Ewing J A, 1973. Mean length of runs of high waves. *J. Geophys. Res.*, (12): 1933~1936
- Rye H, 1974. Wave group formation among storm waves. *Proc. 14th Coastal Eng. Conf.*, (7): 164~183

Lacoss R T, 1971. Data adaptive spectral analysis methods. *Geophysics*, **36**(4): 661-676

Ulirreh T J, 1972. Maximum entropy power spectrum of trumeated sinusoid. *J. Geophysical. Res.*, **77**: 1396-1401

Analysis of Characteristics of Wave Group Spectrum*

YIN Baoshu WU Shuping FAN Shunting WANG Tao HOU Yijun
CHENG Minghua YANG Dezhou

(Institute of Oceanology, The Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071)

Abstract

Wave groups as natural phenomenon often accompanying sea waves have enormous destructive power. So, studies on them have aroused keen interest, especially in the ocean engineering community. Most past studies mainly focused on their statistical properties, rarely on their structural features. In this work, a dataset on typical wave groups was chosen to analyze the characteristics of wave group spectra by the gradual reduction of sampling numbers, using Fast Fourier Transform (FFT) and Maximum Entropy Method (MEM). The results indicated that the wave group spectrum obviously differed from common wave spectrum. The frequency range of wave group spectrum becomes narrow obviously and the peak value of its spectrum becomes large obviously. The whole spectral shape is similar to δ function. Also, when the many component waves the wave groups contain gradually reduce to one large component wave, the analysis results showed the features of two peak spectrum. The spectra of typical wave groups consist of two frequency components with approximately the same frequencies but different amplitudes. That is to say, the typical wave group is the superposition resultant of two train waves whose frequencies are nearly the same and amplitudes are different, just like the "BEAT" in physics-which is the resultant of two simple harmonic motions with identical motion direction, different amplitudes and periods.

This study demonstrated that wave group spectrum is of the shape of δ function, which has important significance for engineering design and deserve our great attention.

* Contribution No.4566 from the Institute of Oceanology, The Chinese Academy of Sciences