

挪威北海最大波高的影响分析*

文 铨^{1,2}, 陶爱峰^{1,2*}, 李 硕², 颜 晋², 曹广随²

(1. 海岸灾害及防护教育部重点实验室(河海大学), 江苏 南京 210098;

2. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 最大波高作为表征海浪强度和危险程度的重要指标, 既是设计波浪推算的依据, 同时又对海洋预报有重要的作用。基于瑞利分布得到的最大波高公式, 不能体现波陡和谐宽度等非线性因素的影响, 由该公式得出的理论最大波高与实际观测值有偏差。采用相位平均方法的海浪数值模型分析, 可以根据海浪谱计算得到有效波高, 却无法给出最大波高。本文通过分析挪威北海定点十年的船测波面资料, 得出波浪谱, 进一步推算出波陡和谐宽度对最大波高的影响。首先提出一种实测波数的替代方式, 然后分别研究波陡和谐宽度对最大波高的影响。研究发现随着波陡和谐宽度的增加, H_{\max}/H_s 逐渐减小, 并拟合出最大波高与 Cartwright 谱宽度参数的公式, 得到较好的拟合效果。

关键词: 最大波高; 海浪谱; 波数; 波陡; 谱宽度

中图分类号: P731.33

文献标志码: A

文章编号: 1003-6482(2017)02-012-11

DOI: 10.13984/j.cnki.cn37-1141.2017.02.002

引 言

最大波高作为表征海浪强度和危险程度的重要指标, 既是设计波浪推算的依据, 也是海岸及海洋防灾减灾必须考虑的海洋动力因素^[1]。通过现场实测获得海上某作业区连续多年的最大波高资料, 不但耗资昂贵, 而且耗时较长, 难以满足工程需要^[2]。采用相位平均方法的海浪数值模型分析, 可以根据海浪谱计算得到有效波高, 却无法给出最大波高。结合波浪谱找出影响最大波高的因素, 对最大波高的推算具有指导作用, 同时对海浪理论研究、海浪预报、海洋船舶工程等也都有重要的意义。

Longuet-Higgins^[3]最早给出基于瑞利分布得到的最大波高理论公式。通过与 Longuet-Higgins 理论最大波高的对比, Forristall^[4]根据墨西哥湾海浪记录提出一个基于波数 N 的修正系数, Feng^[5]在 Forristall 的基础上, 通过分析挪威北海船测数据, 进一步加入有效波高因子。以上最大波高计算公式都是基于瑞利分布得到的半理论或经验公式, 而瑞利分布本身是基于波面线性和窄谱假定的前提下得到的, 不能体现海浪的非线性效应对统计分布的影响, 从而与观测的波高分布有相当大的偏离^[6]。同时实测波数 N 无法由海浪谱预测模型给出, 从而使得该类成果的意义只能停留在波浪特性的认识层面上, 无法真正用于最大波高的预测。

目前已有研究者从波陡和谐宽度对海浪波高分布的影响进行理论研究, 海浪波高分布对最大波高的推算具有重要的指导作用。当考虑波陡对波高分布的影响时, Huang^[7]导出深水条件下仅依赖于波面方差和有效波陡的波面高度分布, 定义有效波陡为 $\alpha\sigma/\lambda$ 。侯一筠^[8]发现水波波陡既可作为控制波高分布函数变化的参量, 又能通过它的大小体现波高分布偏离瑞利分布的程度。当考虑谱宽度对波高分布的影响时, Naess^[9]发现谱宽度对最大波高的估值有显著影响。Michel, K. ochi^[10]推导出当谱宽度 $\epsilon < 0.9$ 且 N 较大时, N 个系列波的最大波高和谐宽度参数 ϵ 的关系式。丁平兴、侯伟^[11]考虑谱宽度 ϵ 的影响, 凭经验用 $(1-\epsilon)\alpha$ 取代 Huang 公式中的 α 。侯一筠^[12]导出一种准确至 3 阶(是一种谱宽度参量)的非瑞利波高分布函数, 特别是对小概率波高(大波高)更符合海浪的实际情况。现有非线性波高分布, 表达式复杂,

* 基金项目: 国家自然科学基金(51579091, 41106001), 江苏省“青蓝工程”优秀青年骨干教师项目资助

第一作者简介: 文 铨(1991-), 男, 硕士, 主要从事水波动力学研究。E-mail: 1025781333@qq.com

* 通讯作者: 陶爱峰, 博士, 副教授。E-mail: aftao@hhu.edu.cn

收稿日期: 2016-09-16

计算麻烦,或其中有关参数不便确定,因此在实际问题中仍很少应用,对最大波高的推算具有局限性。

本文通过分析挪威北海定点 10 年的船测波面资料,对每组波面数据进行处理,结合波浪谱从物理意义上分析,得出波陡和谱宽度对最大波高的影响。

1 数据简介及分析

1.1 数据简介

为了从波浪谱角度分析波陡和谱宽度对最大波高的影响,通过分析挪威北海定点十年的海洋气象船 Polarfront 测得的波面资料,研究影响最大波高的因素。海洋气象船 Polarfront 位于海洋气象站 Mike (OWS Mike, 66°N, 2°E, 水深 2000m, 图 1) 处已经超过 60 年了,直到 2009 年撤出。海洋表面高程通过 ship-borne wave recorder (SBWR) 方法测得,通过该系统可以得到 2000 年到 2009 年该处的波面数据。

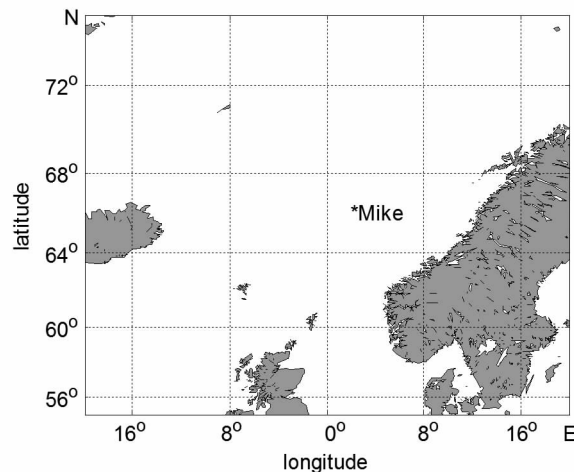


图 1 海洋气象站 Mike(66°N, 2°E)

Fig. 1 Location of ocean weather station mike (66°N, 2°E)

英国国家海洋研究所在 1950 年开发出 SBWR 方法,通过利用平台的水面跟踪性能来捕捉长波,利用船体上的压力传感器来测量短波,可靠性非常高。气象船 Polarfront 是一条 49m 长的小船,大部分时间漂泊在海面上,具有较好的连续性。

在 2000—2009 这最后 10 年 SBWR 系统记录了每个周期的海面高程,其中在 2004 年的第 250 天以前,采样周期为 90 分钟,每次采样持续 30 分钟,采样周期内每 0.59s 采样一次,此后,采样周期为 45 分钟,采样时间不变。Feng 对挪威北海定点十年的船测波面资料进行了数据质量监管,删除了可疑数据,本文所有分析都是基于 Feng 处理后的数据。

本文通过上跨零点法得到每笔数据的 30 分钟内最大的波高,定义为 H_{\max} 。同时定义有效波高 H_s 如公式(1),谱的零阶矩 m_0 采样频率范围为 0.04—0.5Hz。

$$H_s = 4 \sqrt{m_0} \quad (1)$$

1.2 数据分析

为了了解挪威北海地区的波浪基本特性,分别计算得到相关参数,参考图 2。图 2a 是当地最大波高的频率分布图,可以发现挪威北海该地最大波高主要分布在 0~10m 的范围内,大于 10m 的大浪占总组数的 2.23%,介于 3m 到 10m 间的波浪占总组数的 64.57%,在 3m 时频率最高。图 2b 是当地有效波高(公式 1)的频率分布图,可以发现有效波高主要分布在 0~8m 的范围内,大于 8m 的大浪占总组数的 0.54%,在 2m 时频率最高。图 2c 是当地实测波数的频率分布图, N 是根据上跨零点法得到的每笔 30 分钟数据的实测波数,可以发现实测波数 N 主要分布在 150~400 的范围内,在 220 时频率最高。图 2d 是总体数据谱峰周期的频率分布图, T_p 是根据每笔数据对应的海浪谱平滑后求得的谱峰周期。其中谱峰周期

大于 10s 的占总数的 45.1%，平均有效波高为 3.46m；谱峰周期小于 10s 的占总数的 54.9%，平均有效波高为 2.06m。

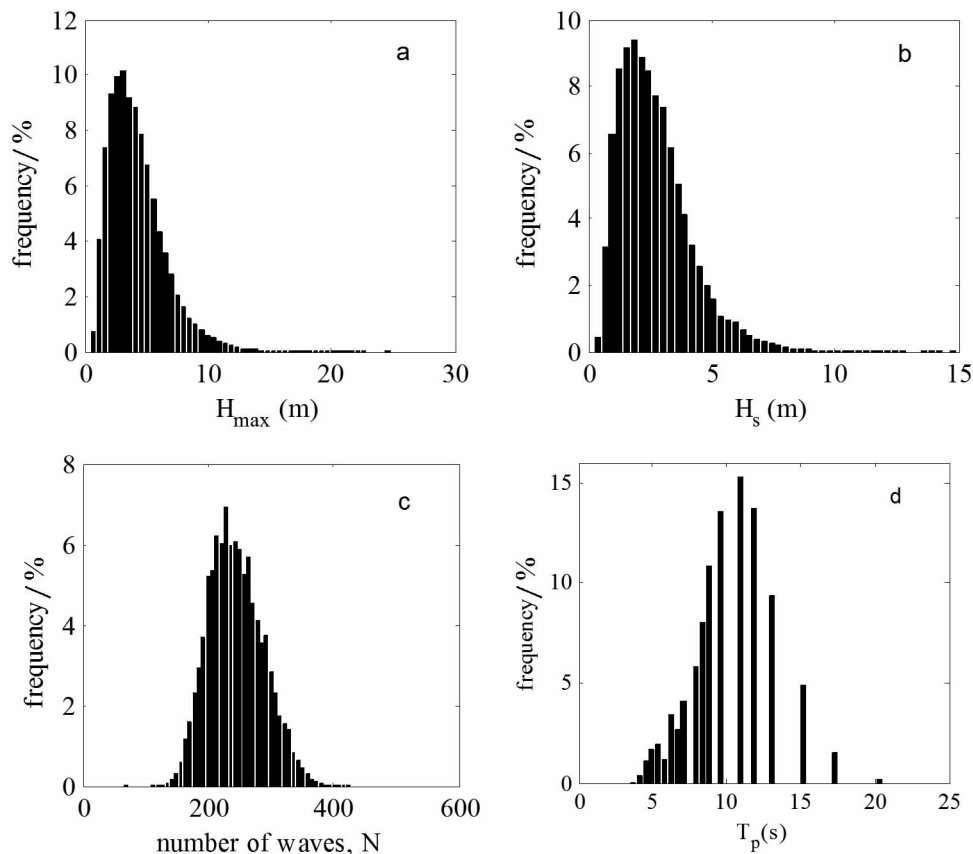


图 2 波浪参数频率分布图

Fig. 2 Frequency Distribution of Wave Parameters

1.3 波浪的统计分布

为了深入研究海浪最大波高特性,前人分别从理论角度和实测数据进行研究,取得了一系列成果。Longuet-Higgins 最早给出基于瑞利分布得到的最大波高公式(公式 2), H_{\max}^* 为理论最大波高, N 为统计时间段内的实测波数。

$$H_{\max}^* = \left(\frac{\ln N}{2}\right)^{1/2} H_s \quad (2)$$

通过对墨西哥湾海浪记录的分析,Forristall 建议采用一个经验修正系数 0.9~0.96(基于 N) 带入基于瑞利分布得到的最大波高公式,使得波高的分布更加吻合威布尔分布。Feng 在 Forristall 的基础上结合挪威北海数据提出一个新的含有 H_s 的经验拟合公式(3)。

$$\frac{H_{\max}}{H_s} = \frac{\sqrt{\ln N}}{1.555} + \frac{1.7(H_s - 1.5)}{100} \quad (3)$$

Feng 发现 H_{\max}/H_s 的误差越小时, H_{\max} 的误差也越小。并且发现通过公式(2)得到的理论最大波高和实测最大波高比值的平均值为 1.09,说明 Longuet-Higgins 基于瑞利分布得到的最大波高公式高估了最大波高 9%,Forristall 等也发现了同样的现象。Feng 发现利用公式(2)得到的理论值与实测值比值的波动范围较大,说明对最大波高的预测仍有提高的空间。通过图 3,可以发现最大波高与有效波高的相关性非常高,相关系数 R 达到 0.979,说明有效波高能够对最大波高有很好的预测性。所以提高 H_{\max}/H_s 的预测精度,对 H_{\max} 的预测有很好的帮助。

通过图 4, 可以发现 H_{\max}/H_s 的值从 1.2 波动到 2.5 左右, 均值为 1.58。

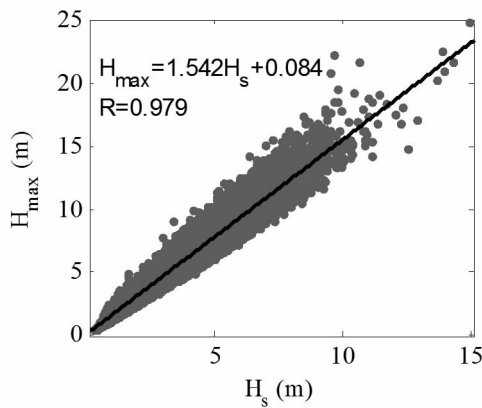


图 3 最大波高和有效波高拟合图

Fig. 3 The relationship between H_{\max} and H_s

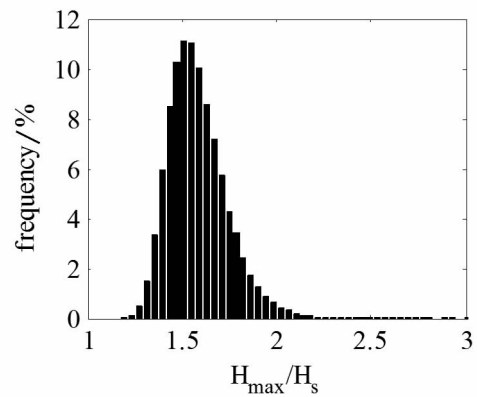


图 4 最大波高和有效波高比值频率分布

Fig. 4 Frequency distribution of H_{\max}/H_s

2 结果分析

通过对挪威北海定点十年的船测波面资料的初步处理分析, 得到了当地海况的基本特征参数, 了解了前人对最大波高的研究。针对前人公式中包含的实测波数 N , 由于其无法由海浪谱预测模型给出, 所以从海浪谱角度给出有效的替代波数 N 对最大波高的研究很有必要。基于瑞利分布得到最大波高公式, 不能体现波陡和谱宽度等非线性因素的影响, 所以结合波浪谱从物理意义上分析, 得出波陡和谱宽度对最大波高的影响具有十分重要的意义, 提高对最大波高的预测能力。

2.1 波数

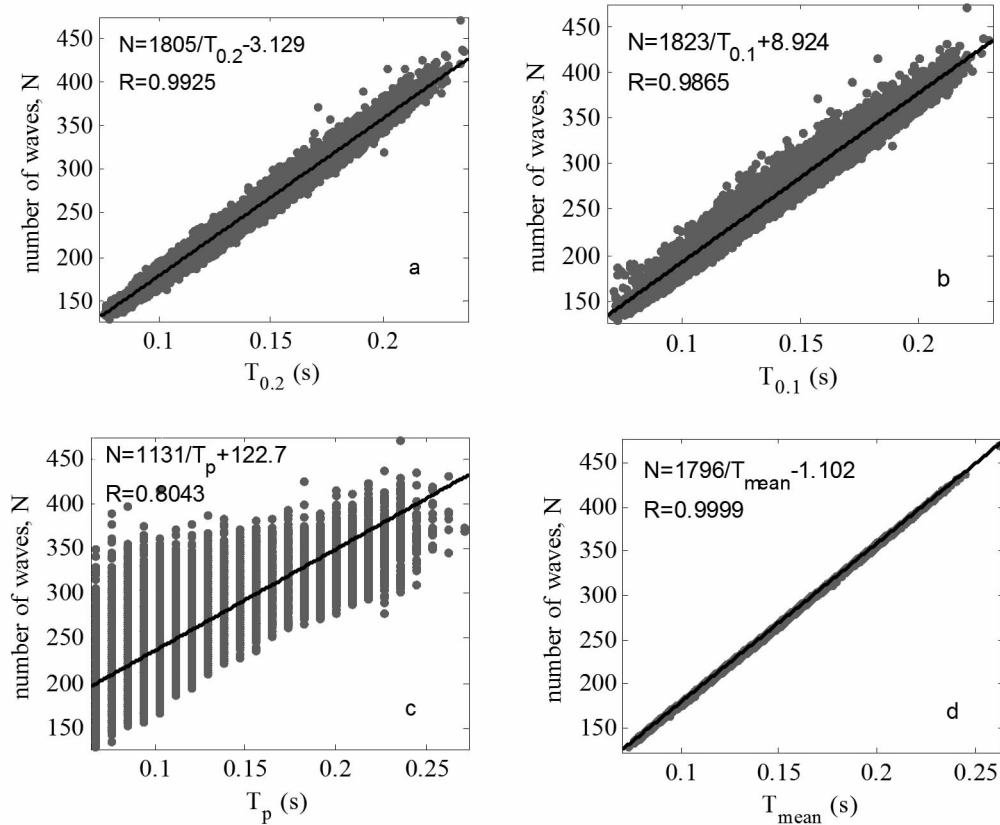
前人基于瑞利分布得到的半理论或经验最大波高计算公式, 都包含有实测波数 N 。但是波数 N 无法由海浪谱预测模型给出, 从而使得该类成果的意义只能停留在波浪特性的认识层面上, 无法真正用于最大波高的预测。为了避免对实测数据的依赖, 首先研究 $T_{0.2}$, $T_{0.1}$, T_p 和波数 N 的关系, 建立海浪谱和波数 N 之间的联系。 $T_{0.1}$ 是通过海浪谱的零阶矩和一阶矩求得, 见公式(4); $T_{0.2}$ 由理论推导出来, 并以谱的零阶矩及二阶矩表示的平均周期, 见公式(5); T_p 是由谱峰频率 f_p 求出的谱峰周期, (见公式(6))。

$T_{0.2}$, $T_{0.1}$ 都是在深水条件下推导出来的, 测量船所处地方水深 2000m, 符合深水条件。 $T_{0.2}$, $T_{0.1}$, 谱峰周期 T_p 的平均值分别为 7.51、8.06、9.93 秒, $T_{0.2} < T_{0.1} < T_p$ 。挪威北海平均波周期为 7.55s, $T_{0.2}$ 与平均波周期更为接近。通过图 5, 分别拟合 $T_{0.2}$, $T_{0.1}$, 谱峰周期 T_p 与实测波数 N 的关系, 相关系数分别为 0.9925, 0.9865, 0.8043。可以发现 $T_{0.2}$ 和实测波数 N 具有最好的拟合效果, 相关系数最高。 $T_{0.2}$ 可以通过海浪谱求得, 避免了对实测数据的依赖, 在下面提到的 N 都是以 $1800/T_{0.2}$ 来代替的, 1800s 可以认为是海浪谱对应的单笔数据总时长 30min。

$$T_{0.2} = 2\pi\left(\frac{m_0}{m_2}\right)^{1/2} \quad (4)$$

$$T_{0.1} = 2\pi\left(\frac{m_0}{m_1}\right) \quad (5)$$

$$T_p = 1/f_p \quad (6)$$

图5 不同波周期跟实测波数 N 的关系Fig. 5 The relationship between different wave period and measured wave number N

2.2 波陡

前人主要研究了波陡对海浪波高分布的影响,得到的表达式复杂繁琐,在实际中应用较少,并且缺乏直接研究波陡对最大波高的影响。通过分析海浪谱得到波陡,研究波陡对最大波高的影响,提高对最大波高的预测精度。常用的波陡是通过实测波浪中波高与波长的比值得到的,但是 DAVID W. WANG 和 PAUL A. HWANG^[13]通过谱方法得到每笔数据的有效波高与波长的比值 α ,即波陡值,见公式(7)。 H_s 代表利用谱方法的得到的有效波高,如公式(1),波长 L_* 是利用周期 $T_{0.2}$ 求得的,也可以由海浪谱求得,见公式(8)。通过图6,发现波陡的分布介于0.01与0.06之间,在0.32频率最大。

$$\alpha = \frac{H_s}{L_*} \quad (7)$$

$$L_* = \frac{gT_{0.2}^2}{2\pi} \quad (8)$$

通过图7,发现波陡和 H_{max}/H_s 的散点图分布无明显规律,为了揭示 H_{max}/H_s 随波陡增减的变化规律,把数据按照波陡大小从0到0.06分为25段,每段求得该段所有数据 H_{max}/H_s 平均值,得到 H_{max}/H_s 平均值随波陡的变化规律,(见图8)。

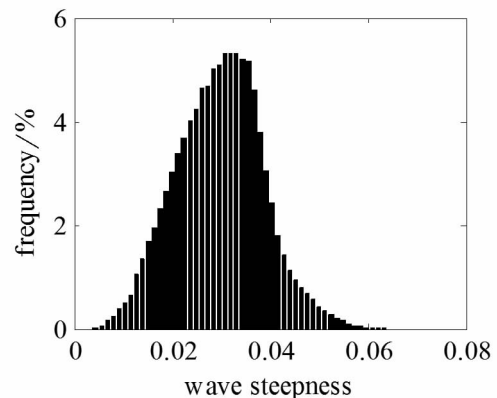


图6 波陡频率分布图

Fig. 6 Frequency distribution of wave steepness

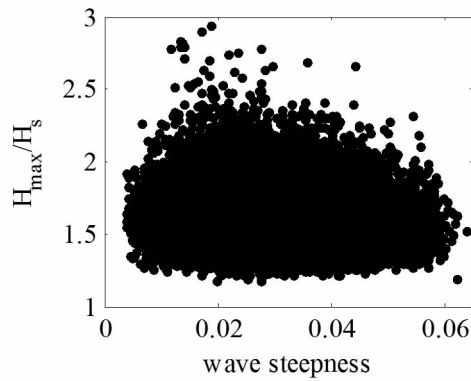


图 7 波陡和 H_{\max}/H_s 的散点图

Fig. 7 The relationship between wave steepness and H_{\max}/H_s

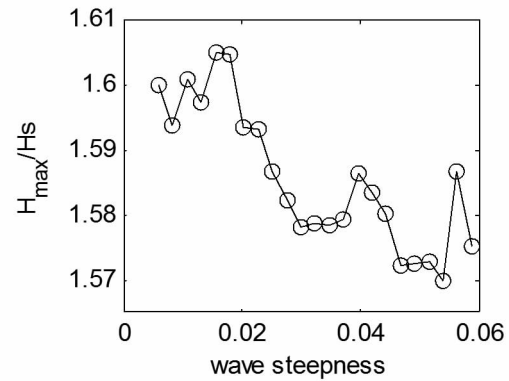


图 8 波陡和 H_{\max}/H_s 的关系图

Fig. 8 The relationship between wave steepness and H_{\max}/H_s

通过图 8, 随着波陡的增加, H_{\max}/H_s 逐渐较小, 但是波动较大, 且总体的变化范围较小。当波陡为 0.015 时, H_{\max}/H_s 接近于 1.605, 随着波陡的增加, H_{\max}/H_s 稳步下降, 当波陡为 0.055 时, H_{\max}/H_s 接近于 1.56。 H_{\max}/H_s 的总体波动范围区间只有 0.05, 占平均值的 3%, 变化范围较小, 说明波陡对 H_{\max}/H_s 的区分并不明显。

2.3 谱宽度

实际海况中理想的窄谱条件是极少的, 海浪的频谱结构是复杂和多样的, 会呈现单峰、双峰谱和多峰谱。波谱的宽度能影响到波浪的一些重要特性, 现已提出几种表示海浪谱宽度的参数。Cartwright 等^[14]、Longuet-Higgins^[15]、Goda^[16]、文圣常^[17]和 Van Vledder^[18]分别提出表征谱宽度参数的计算公式。Cartwright 和 Longuet-Higgins 的公式可直接作为谱宽度参数; Goda 和文圣常提出的谱尖度公式, 取倒数后可作为谱宽度参数; Van Vledder 提出的谱尖度公式取倒数后分布不均, 本文中直接分析不求倒数。

表 1 不同谱宽度参数的公式

Table 1 Different spectral width formulas

作者	公式	备注
Cartwright 等	$\epsilon = (1 - \frac{m_2^2}{m_0 m_4})^{1/2}$	$m_r = \int_0^\infty \omega^r S(\omega) d\omega$
Longuet-Higgins	$\nu = (m_0 m_2 / m_1^2 - 1)^{1/2}$	同上
Goda	$Q_p = \frac{2}{m_0^2} \int_0^\infty f S^2(f) df$	当谱宽度用时一般取 $\frac{1}{Q_p}$
文圣常	$P = f_p S(f_p) / m_0$	当谱宽度用时一般取 $\frac{1}{P}$
Van Vledder	$\kappa = \kappa(\tau = T_{0.2})$ $= \left \int_0^\infty S(f) \exp[i2\pi f \tau] df \right / m_0$	κ 为谱尖度参数

这里先以 Cartwright 等提出的谱宽度 ϵ 为例进行简单分析, 从图 9 可以发现谱宽度分布于 0.3~0.8, 谱宽度的平均值为 0.62, 谱宽度在 0.65 时频率最大。

从图 10 可见,随着谱宽度的增加,最大波高和有效波高同时增加,但是最大波高是谱宽度的 2.338 倍,有效波高是谱宽度的 2.445 倍,表明有效波高随着谱宽度的增加趋势相对于最大波高大。同时可以发现,当谱宽度较小时,最大波高和有效波高必然较小;当谱宽度较大时,最大波高和有效波高的分布范围较为分散,跨度较大。

从图 11 可见,随着谱宽度的增加, H_{max}/H_s 逐渐减小,但是由于波动范围仍较小。为了更加明确的发现变化规律,把数据按照谱宽度大小从 0.3 到 0.8 分为 25 段,每段求得该段所有数据 H_{max}/H_s 平均值,得到 H_{max}/H_s 平均值随谱宽度的变化规律,见图 12。

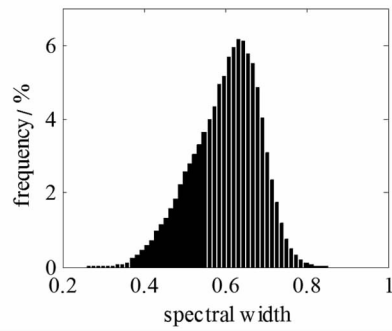


图 9 谱宽度频率分布图

Fig. 9 Frequency distribution of spectral width

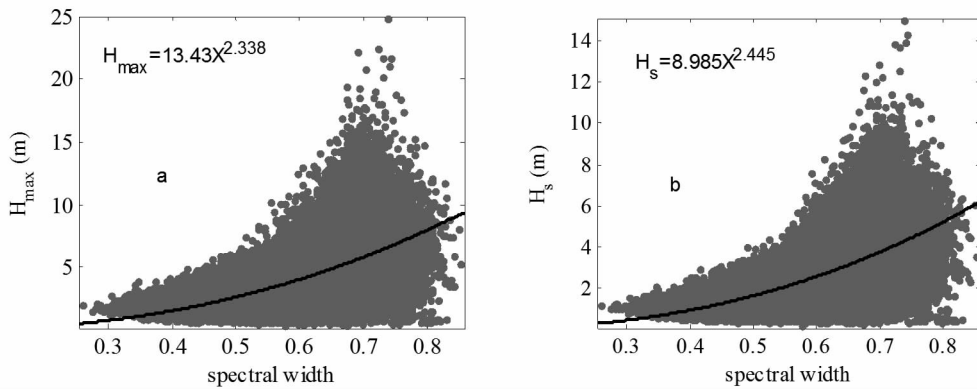


图 10 最大波高、有效波高与谱宽度的关系

Fig. 10 The relationship between H_{max} , H_s and spectral width

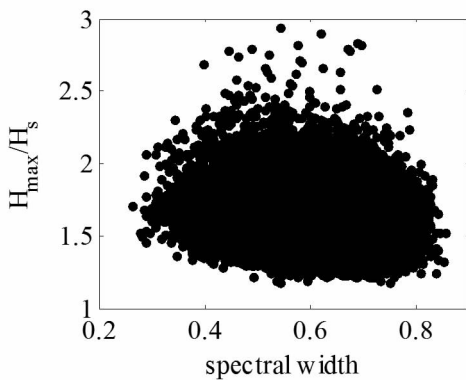


图 11 H_{max}/H_s 和谱宽度散点图

Fig. 11 The relationship between H_{max}/H_s and spectral width

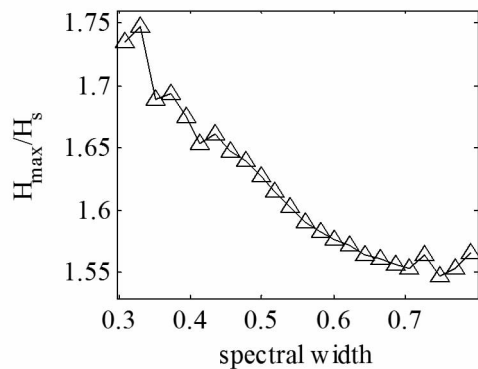


图 12 H_{max}/H_s 和谱宽度关系图

Fig. 12 The relationship between H_{max}/H_s and spectral width

通过图 12,发现随着谱宽度的增加, H_{max}/H_s 逐渐减小,十分平滑且没有明显波动,在 0.3 到 0.6 的范围内下降速度非常快,之后变化趋势较缓,变化趋势呈圆弧状。当谱宽度为 0.32 时, H_{max}/H_s 为 1.75,之后快速下降,直至基本稳定于 1.55。 H_{max}/H_s 的总体波动范围区间有 0.2,占平均值的 12.6%,变化范围较大,说明 Cartwright 谱宽度对 H_{max}/H_s 的区分十分明显,对最大波高的预测有显著的帮助。

通过前面的分析,发现 Cartwright 谱宽度对 H_{max}/H_s 有明显的影响。最初始的通过瑞利分布得到

的最大波高公式只含有波数 N , H_{\max}/H_s 随着波数 N 的增加而增大。通过研究谱宽度与波数 N 的相互关系,可以对这两种影响因素对最大波高的影响有更深入的研究。通过分析 Cartwright 谱宽度和波数 N 的关系图 13,可以发现随着波数的增加,谱宽度逐步下降,有十分好的一致性。在这里我们得出 Cartwright^[14]、Longuet-Higgins、Goda、文圣常和 Van Vledder 这 5 种谱宽度参数与波数 N 的相关系数分别为 -0.8305 、 -0.3366 、 0.1733 、 0.1037 、 -0.4762 ,从中可以看出 Cartwright 给出的谱宽度参数与波数 N 的相关系数最高,文圣常给出的谱宽度参数与波数 N 的相关系数最低。

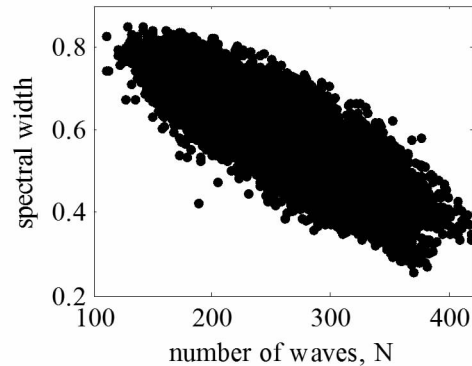


图 13 Cartwright 谱宽度和波数 N 的关系图

Fig. 13 The relationship between spectral width and wave number N

前人通过研究发现在瑞利分布的假设下, H_{\max}/H_s 跟 $\sqrt{\ln N}$ 线性相关,变化趋势较为相似。不过通过实测数据分析, H_{\max}/H_s 实测值明显低于通过基于瑞利分布公式(2)得到的理论比值。通过 Forristall 方法计算得到的 H_{\max}/H_s 均值为 1.50,比通过实测数据得到的均值小。图 14 中上面的黑实线代表基于瑞利分布得到的公式(2),下边的黑色虚线代表 Forristall 改进后的公式。

图 14 画出了 5 种谱宽度参数和波数 N 、 H_{\max}/H_s 的趋势图,可以明显的发现随着谱宽度的增加, H_{\max}/H_s 的比值逐渐减小。对于图 14a,基于 Cartwright 谱宽度的分布而言,是 5 种谱宽度分布中分布最离散的,这是本文选择采用 Cartwright 谱宽度进行分析的原因。当谱宽度较小时接近瑞利分布公式,与瑞利分布的窄谱假定相符,随着谱宽度的增加,逐渐趋向于 Forristall 分布。当谱宽度在 0.3 到 0.4 范围内时, H_{\max}/H_s 在 1.67 左右,此时波数 N 较大,在 350 左右。随着谱宽度的增加,当谱宽度为 0.6 到 0.8 时,下降趋势变缓,此时 H_{\max}/H_s 的比值为 1.55 左右。对于图 14b,基于 Longuet-Higgins 谱宽度公式也可以观察到类似的现象,不过分布较为不规则,且 H_{\max}/H_s 与关系并不线性相似。对于图 14c 和图 14d,基于 Goda 和文圣常谱宽度公式的分布基本随着谱宽度的增加上下移动,波数 N 值范围逐渐变小,波数 N 的中心值都是 260。对于图 14e,基于 Van Vledder 公式的尖度分布也可得到相同结论,这里的尖度值越小代表着谱宽度值越大。通过分析 5 种谱宽度参数分布图,均可以发现随着谱宽度的增加, H_{\max}/H_s 均值逐渐下降,有较好的一致性。

本文在瑞利分布的基础上加入 Cartwright 谱宽度参量,谱宽度取值范围为 0.3 到 0.8。考虑到图 12 中 H_{\max}/H_s 随着谱宽度的变化曲线呈圆弧状,故在修正公式中取谱宽度的倒数。波数 N 用总时长 t (1800s)除以 $T_{0.2}$ 来替代,提出一个新的拟合公式(9)。

$$\frac{H_{\max}}{H_s} = \frac{\sqrt{\ln(t/T_{0.2})}}{1.5838} + \frac{0.0454}{\varepsilon} \quad (9)$$

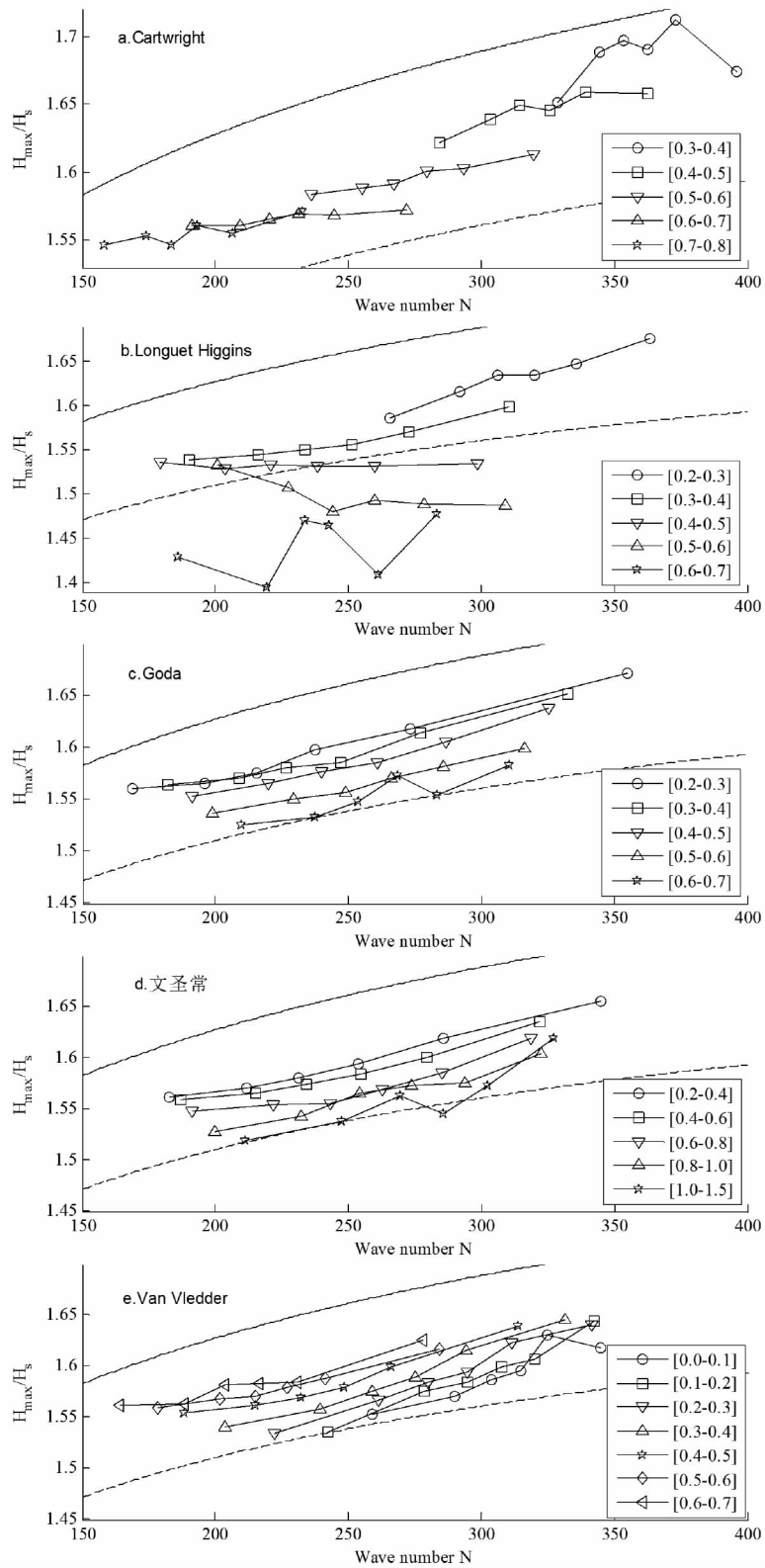


图 14 不同谱宽度公式和 H_{max}/H_s 、N 的趋势图

Fig. 14 The relationship between different spectral widths and wave number N, H_{max}/H_s

从图 15 可见,通过最大波高的预测值 H_{\max}^* 与实际最大波高 H_{\max} 的比值随着 H_s 变化对比,本文公式相较于基于瑞利分布公式(2)和 Forristall 公式有更好的拟合效果,克服了基于瑞利分布公式得到的理论结果偏大的不足和 Forristall 公式结果偏低的缺点。当有效波高在 0 到 8m 的范围内,拟合效果非常好,误差较小。当有效波高大于 8m 后,理论最大波高和实测最大波高的比值先有一个显著下降,在 9.5m 后有一个显著上升。由于该部分数据点较小,真实性和物理意义有待进一步研究。

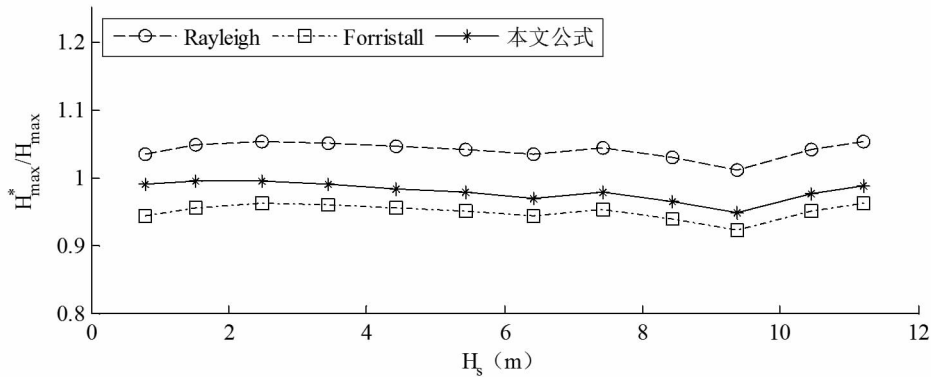


图 15 不同公式理论最大波高和实测最大波高比值

Fig. 15 Different formulas of H_{\max}^* and the measured H_{\max} ratio

3 总结

本文通过分析挪威北海定点十年的船测波面资料,分析研究各种波浪参数,对前人的最大波高进行分析。前人基于瑞利分布的最大波高公式都包含有实测波数 N ,为了建立海浪谱和波数 N 之间的联系,提出一种实测波数的替代方式,使其能够用于最大波高的预测。为了解决前人对最大波高预测影响因素分析的不足,分别研究波陡和谱宽度非线性参数对最大波高的影响。发现随着波陡的增加, H_{\max}/H_s 的平均值逐渐减小,但是波陡对 H_{\max}/H_s 的区分并不明显。对 5 种谱宽度参数同时分析,均发现随着谱宽度的增加, H_{\max}/H_s 的平均值逐渐减小,其中 Cartwright 谱宽度对 H_{\max}/H_s 区分度较好。结合挪威北海实测数据,在瑞利分布的基础上加入 Cartwright 谱宽度参量,提出一个新的拟合公式,得到较好的拟合效果。

参考文献

- [1] 许富祥, 吴学军. 灾害性海浪危害及分布[J]. 天津:中国海事, 2007(04):65-66.
- [2] 滕学春, 吴秀杰. 近海海域年最大波高计算方法的研究[J]. 青岛:海洋科学进展, 1991(2):1-8.
- [3] Longuet-higgins M S. On the statistical distribution of the heights of sea waves[J]. Journal of Marine Research, 1952, 11:245-266.
- [4] Forristall G Z. On the statistical distribution of wave heights in a Storm [J]. Journal of Geophysical Research Oceans, 1978, 83 (C5):2353-2358.
- [5] Feng X, Tsimplis M N, Quartly G D, et al. Wave height analysis from 10 years of observations in the Norwegian Sea[J]. Continental Shelf Research, 2014, 72(1):47-56.
- [6] 张军. 非线性海浪波高的最大熵分布及其应用[D]. 青岛:中国海洋大学, 2005.
- [7] Huang N E, Long S R, Tung C C, et al. A non-Gaussian statistical model for surface elevation of nonlinear random wave fields[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1983, 88(C12):7597 - 7606.
- [8] 侯一筠, 宋贵霆, 宋金宝, 等. 非线性随机海浪的波高分布[J]. 北京:中国科学:数学 物理学 天文学 技术科, 2006, 36(05):481-485.
- [9] Naess A. On the distribution of crest to trough wave heights[J]. Ocean Engineering, 1985, 12(3):221-234.
- [10] Ochi M K. Stochastic analysis and probabilistic prediction of random seas[J]. Advances in Hydrosience, 1982, 13(6):217-375.
- [11] 丁平兴, 侯伟. 海浪非线性性的实验研究:I. 波面高度分布的非正态性[J]. 北京:海洋学报, 1992(6):25-31.
- [12] 侯一筠. 非线性海浪波面与波高的统计分布[J]. 青岛:海洋与湖沼, 1990, 5: 425-432.

- [13] Wang D W, Hwang P A. An Operational Method for Separating Wind Sea and Swell from Ocean Wave Spectra[J]. Journal of Atmospheric & Oceanic Technology, 2010, 18(12):2052-2062.
- [14] Cartwright D E, Longuet-higgins M S. The statistical distribution of the maxima of a random function[J]. Proceedings of the Royal Society of London A Mathematical Physical & Engineering Sciences, 1956, 237(1209):212-232.
- [15] Longuet-higgins M S. The statistical analysis of a random moving surface[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A Mathematical Physical & Engineering Sciences, 1957, 249(966):321-387.
- [16] Goda Y. Numerical experiments on wave statistics with spectral simulation[R]. Report of the Port and Harbour Research Institute, 1970, 9(3): 3-57.
- [17] 文圣常, 张大错, 郭佩芳, 等. 改进的理论风浪频谱[J]. 北京:海洋学报, 1990(03):271-283.
- [18] Battjes J A, Van Vledder G P. Verification of Kimura's theory for wave group statistics[J]. Coastal Engineering Proceedings, 1984, 1(19): 642-648.

Influence of the Maximum Wave Height in the Norwegian Sea

WEN Cheng^{1,2}, TAO Aifeng^{1,2*}, LI Shuo², YAN Jin², and CAO Guangsui²

(1. Key Laboratory of Coastal Disaster and Defence (Hohai University), Ministry of Education, Nanjing 210098, China;

2. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The maximum wave height is used as an important indicator of wave strength and dangerous degree. It is not only the basis to calculate the design wave, but also has important effect on oceanic forecast. The maximum wave height formula based on the Rayleigh distribution cannot reflect the non-linear influence, such as wave steepness and spectral width, and thus there is a deviation between the observed value and the theoretically maximum wave height. The wave numerical model using phase-average method can get significant wave height through wave spectrum, but cannot get the maximum wave height. This paper analyses 10-year wave data of in-situ measurements from the ocean weather ship in the Norwegian Sea, gets wave spectrum, and further calculates the influence of wave steepness and spectral width on the maximum wave height. A method was suggested to replace the measured wave number and then the influence of wave steepness and spectral width on the maximum wave height was analyzed. The results show that the H_{\max}/H_s decreases gradually with the increase of wave steepness or spectral width. A formula was proposed to obtain the maximum wave height and spectral width, which gets reasonable fitting effect.

Key words: maximum wave height; wave spectrum; wave number; wave steepness; spectral width