

# 深度和流速依时变化水域中 海浪折射数值计算

李陆平 徐洪达

(国家海洋局第一海洋研究所, 青岛)

绘制海浪折射图对海岸建筑物的设计、海岸带的开发利用、近岸波的计算及其他有关问题的研究是十分重要的。在常规下, 就单一频率波绘制折射图时, 总是假定绝对频率不随空间或时间改变<sup>[1-4]</sup>, 因此, 只适用于小范围的沿岸区域, 即海浪在该区域传播的时间尺度不长。这时, 认为深度场是不随时间改变的。这些有关的理论和计算方法虽仍得到应用, 但许多研究者发现了它们的限制和困难, 并提出了各种改进途径, 其中包括在折射中考虑绕射的影响, 考虑摩擦、反射、流的影响及出现高阶谐波的影响等<sup>[1]</sup>。考虑上述诸因素对改进海浪折射理论和计算是十分重要的。但必须指出, 上述各种海浪折射的计算只适用于小范围的沿岸区域, 均属定常模式。

事实上, 为海洋工程的应用, 在绘制海浪折射图时, 所涉及的往往是一个比较大的海域, 海浪在该海域的传播时间尺度与深度场(主要是潮汐引起的水位变化)和流场(潮流)的变化时间尺度相比量级相同或更大。在这一非定常情况下, 理论和观测表明绝对频率在海浪传播过程中将随空间和时间改变。因此, 已提出的计算海浪折射的模式不再适用于这一情形。故在海浪折射的数值计算中, 即绘制波向线时, 考虑非定常深度场和流场对折射的影响则是十分必要的; 但到目前为止, 还缺乏对非定常情形下海浪折射问题的研究。本文的目的就是研究非定常深度场和流场中的海浪折射数值计算问题。由于考虑非定常深度场和流场后, 海浪传播的计算与实际更加吻合, 且在理论上更加完备。因此, 可以预期, 当研究的海域较大时, 在非定常深度场和流场中, 绘制的海浪折射图更与实际吻合, 由此预报或计算出的波要素也更加可靠。

作为非定常深度场和流场中海浪折射数值计算的一个实例, 本文以潮波数值计算模式<sup>[5]</sup>, 每半小时提供的一个潮周期内的水位和流场的输出作为非定常深度场和流场, 采用Newton-Raphson迭代方法解组合的Doppler方程和弥散关系求出波速, 再采用Griswold<sup>[4]</sup>方法, 绘制出渤海南部莱州湾在潮波影响下的海浪折射图; 并同常规方法绘制的海浪折射图进行比较。

## 一、单频率波的折射计算

为了描述海浪在非定常深度场和流场中传播时,由于流和水深的依时变化而引起的波浪传播方向的改变,下面考虑在二维深度场和流场上传播的线性表面重力波,对于固定于海底的坐标系,海浪的频率为绝对频率 $\omega$ ;对于随局部流速 $\vec{U}$ 运动的坐标系,波浪的频率为固有频率 $\sigma$ ,绝对频率 $\omega$ ,固有频率 $\sigma$ 和波数 $k$ 通过Doppler方程和弥散关系可表示为:

$$\omega = \sigma + \vec{K} \cdot \vec{U} \quad (1)$$

$$\sigma = \left\{ gk \tanh(kd) \right\}^{1/2} \quad (2)$$

其中, $\vec{K}$ 为波数矢量,由波数 $k$ 和波向 $\theta$ 所确定; $\vec{U}$ 为流速矢量,由流速 $U$ 和流向 $\varphi$ 所确定, $g$ 是重力加速度, $d$ 为水深。

由于深度场和流场是非定常的,上述 $\omega$ 、 $\vec{U}$ 、 $\vec{K}$ 、 $d$ 均为空间和时间的函数,其中, $d(x, y, t) = d_0(x, y) + L(x, y, t)$ , $d_0(x, y)$ 表示水深,是海图深度基准数在一个网格内的平均值加上平均海平面的深度; $L(x, y, t)$ 表示水位的变化,固有频率 $\sigma$ 为给定的已知值。

基于波向线方程:

$$\frac{d\theta}{ds} = \frac{1}{c} \frac{dc}{dn} \quad (3)$$

其中 $s$ 和 $n$ 表示波向线的弧和法线, $\theta$ 表示波向线的切线与 $x$ 轴交角, $c$ 表示波速,其中:

$$\frac{d}{ds} = \cos\theta \frac{\partial}{\partial x} + \sin\theta \frac{\partial}{\partial y} \quad (4)$$

$$\frac{d}{dn} = -\sin\theta \frac{\partial}{\partial x} + \cos\theta \frac{\partial}{\partial y}$$

Griswold<sup>3,4</sup>以式(4)得波向线曲率:

$$J = \sin\theta \frac{1}{c} \frac{\partial c}{\partial x} - \cos\theta \frac{1}{c} \frac{\partial c}{\partial y} \quad (5)$$

在常规的海浪折射数值计算中,先以文献[3]利用无因次波速和深度的反运算,将深度场转换成不同周期的波速网系,再以Griswold方法,若已知外海一点的位置 $x_n, y_n$ ,入射波向,则由给定周期的波速场,确定该点的波向线曲率,然后绘出波向线。

在非定常深度场和流场中,基于方程(3)~(5)进行数值计算时,要根据给定的固有频率 $\sigma$ ,在波浪传播方向上的流速 $U_p$ 和水深 $d$ ,解弥散关系和Doppler方程(1)~(2):

$$\omega = \left\{ gk \tanh(kd) \right\}^{1/2} + \vec{K} \cdot \vec{U}_p \quad (6)$$

求出未知变量波数  $k$ , 绝对频率  $\omega$  和波速  $c_w$ . 须注意的是, 由于非定常深度场和流场的影响, 某一固定点的绝对频率和波速随时间变化, 故不存在定常的波速场, 波向线每前进一步均需采用 Newton-Raphson 迭代方法求出波数  $k$  和波速  $c_w$ . 波浪折射的计算同常规方法一样, 但波浪在传播过程中, 水位场和流速场依时变化, 故需按一定时间间隔 (本文以每半小时) 读入新的水位场和流速场.

在解组合后的 Doppler 方程时, 当  $U_p = 0$  或  $U_p > 0$ , 即流沿波向有正分量时, 方程有唯一解. 当  $U_p < 0$  时, 即流沿波向有负分量时, 可以无解或有一个解或二个解. 当方程有解时, Newton-Raphson 迭代方法可以使用, 当无解时, Newton-Raphson 迭代方法不稳定, 解不存在. 这表明在强流作用下, 当波的群速度小于逆流速度时, 其波能不能逆流传播, 而被耗散或被反射 (这一现象称为 wave blocking). 发生这一现象的最低频率, 即临界频率, 是以下弥散关系中, 对波数  $k$  解存在的最大频率:

$$\omega_c - \vec{K} \cdot \vec{U}_p - \{gk \tanh(kd)\}^{\frac{1}{2}} = 0, \quad (7)$$

其中,  $\omega_c$  对应的波数为临界波数.

因此, 研究非定常深度场和流场中谱折射时, 应特别注意 wave blocking 的影响. 在单一频率波折射的研究中, 一般情况流速与波速相比是小量, 不会出现 wave blocking 现象.

方程 (2)、(3) 中所涉及的差分是按文献 [2] 的方法进行的.

## 二、数值计算实例

作为非定常深度场和流场中海浪折射数值计算应用的例子, 研究潮波影响下的海浪折射是有实用意义的. 由于考虑水位和潮流的变化, 可以预期, 在这一非定常情形下绘制的海浪折射图将是依时的. 由于潮位和潮流的周期性, 其折射图的形式和由此计算出的波要素也将是周期性的.

本文采用二维潮波数值计算模式 [5], 提供非定常深度场和流场, 计算中选用交替方向隐式差分法, 网格用空间交替网格, 并取  $\Delta x = \Delta y = 5 \text{ km}$ ,  $\Delta t = 1800 \text{ s}$ . 渤海南部莱州湾  $M_2 + S_2$  潮流数值模拟的结果见文献 [5] 中图 3、图 4、图 5 和图 6, 本文不再绘出.

基于该海湾潮流的特点, 本文绘制了入射波周期为 10 s, 入射波向为西南向, 初始时刻为高潮前一小时、高潮后一小时、高低潮的中间时刻和低潮时刻的 4 张海浪折射图, 如图 1 所示. 不考虑潮位和潮流影响, 用常规方法绘制的海浪折射图如图 2 所示.

自图 1 和图 2 容易看出, 在潮波影响下, 绘制的 4 张折射图反映了一个潮周期内, 这一特定周期和入射波向在该区域海浪折射的特点: (1) 绘制的折射图有明显的周期性; (2) 除发散区和收敛区受潮位和潮流影响外, 其他区域其折射图形式与不考虑潮位和潮流影响, 用常规方法绘制的折射图一致; (3) 波向线在其收敛区的收敛程度于某特定时刻较用常规方法绘制的有明显增加, 从而导致计算出的波要素有明显增加. 这对于海洋工程设计和有关问题的计算是十分重要的.

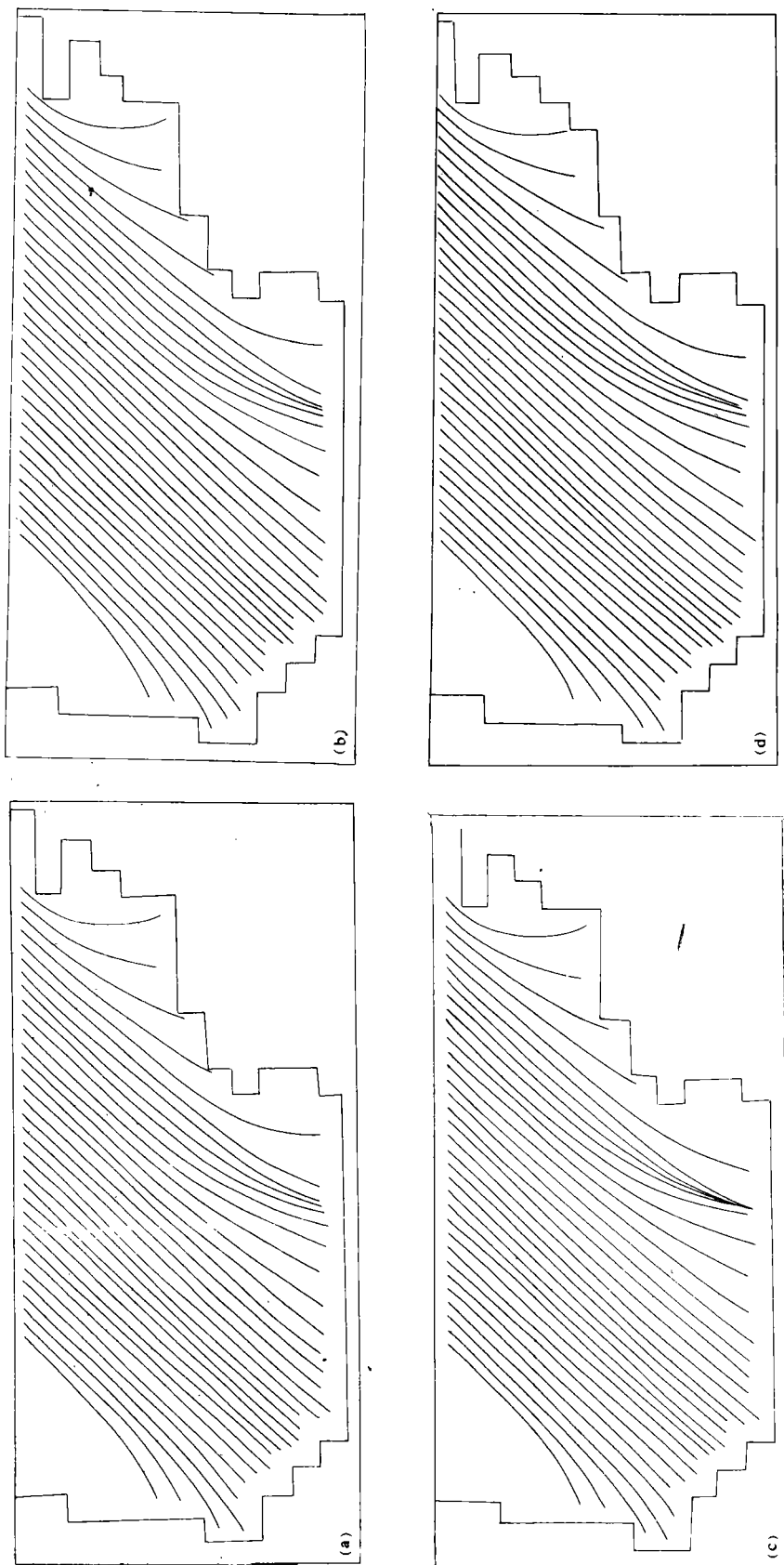


图 1 潮位和潮流影响下的海浪折射图 (周期10 s)

(a) 初始时刻 1:00, 受高潮前涨潮流影响; (b) 初始时刻 3:00, 由涨潮流转退潮流;  
 (c) 初始时刻 5:00, 受退潮流影响; (d) 初始时刻 8:00, 由退潮流转涨潮流

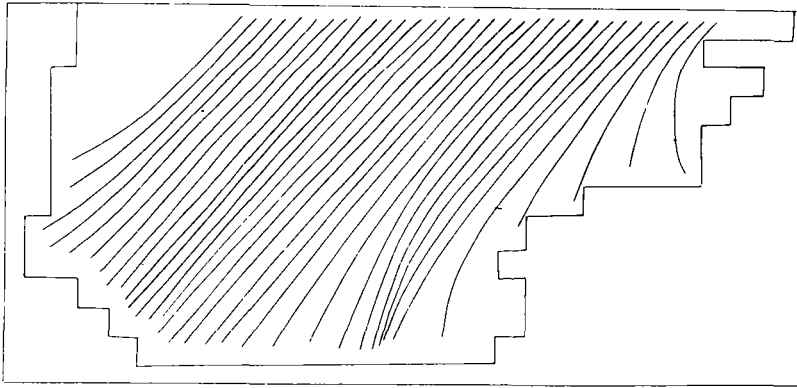


图 2 不考虑潮位和潮流影响的海浪折射图(周期 $10\text{ s}$ )

由于近岸潮波受水深、地形, 无潮点位置、潮波传播形式等诸多因素影响, 潮位和潮流随时间和空间而异。因此, 提供符合实际的潮位和潮流场是十分重要的。

### 三、小结和讨论

本文提出的非定常深度场和流场中的海浪折射数值计算适用于较大范围的近岸海域, 即海浪在该海域传播的时间尺度与水位和流场变化的时间尺度相比量级相同或更大时的情形。采用 Newton-Raphson 迭代方法解组合的 Doppler 方程和弥散关系求出波速, 然后采用 Griswold 方法绘制海浪折射图。作为非定常深度场和流场中海浪折射数值计算用的一个实例, 绘制了渤海南部莱州湾在潮波影响下的海浪折射图。本文的实例表明, 在潮波影响下, 其折射图有明显的周期性; 收敛区和发散区位置与常规方法绘制的吻合较好, 但其收敛和发散程度是依时变化的。本文认为, 这并不具有普遍性。因为潮波受其地形、水深、潮波传播方式及无潮点位置等因素影响, 即使具有相同的深度场, 但由于所处地理位置不同, 而受不同潮波系统的影响, 使之水位和流场不同, 因而绘制海浪折射图形式也有所改变。由于考虑非定常深度场和流场后, 使海浪传播的外部环境更与实际相符合, 因此, 绘制海浪折射图更逼近于实际波场情况, 由此计算出的波要素也必然更与实际相符合。

本文提出的非定常深度场和流场中的海浪折射数值计算是一个浪、流、水位的非耦合模式。当浪传到近岸, 考虑到辐射应力的影响而引起的平均水面的升降和沿岸流系, 并将其加到水位和流场中再进行计算, 则可形成一个浪、流、水位的耦合模式。可以预期, 由此得到的海浪折射图和计算出的浪要素必然有所改进。但须注意, 为使计算满足一定精度, 必须将网格间距取得足够小。这样, 当浪传到近岸时, 需取细网格, 采用嵌套方法完成。

本文的数值计算同样可用于常规的海浪折射数值计算中。但将其应用于谱折射时, 应注意 wave blocking 的影响。

### 参 考 文 献

- [1] 文圣常、余宙文, 海浪理论与计算原理, 科学出版社, 1984, 661.

- 
- 2 路季平, 海浪折射波高的数值计算, 山东海洋学院学报, **11** (1978), 3, 32-40.
  - 3 李陆平等, 海浪折射数值计算, 黄渤海海洋, **4** (1986), 1, 10-15.
  - 4 Griswold, G.M., Numerical calculation of wave refraction, *J. Geophys. Res.*, **68** (1963), 6, 1715-1721.
  - 5 徐洪达、姜太良, 莱州湾潮流和西南部海域污染物扩散的数值模拟, 海洋通报, **9** (1990), 4, 64-71.