

浪流相互作用下的波高变化 及其对船舶航行的影响*

牟少杰 吴仰儒

提要 本文分析了海浪在海流作用下的波高变化,推导出浪流相互作用时的波高公式和波陡公式,并结合大洋海区海浪预报的实际经验,得出推算大洋强流区海浪波高的计算公式。实际应用时,根据海面风场的实况资料,便可由该计算公式求得浪流相互作用下大洋强流区的可能最大波高值。

一、引言

海浪是影响船舶航行的一个重要因素。一般说来,海浪会增大航行阻力,造成船舶失速,提高营运成本;在恶劣的海况下,巨大的海浪严重威胁航行船舶的安全,是造成重大海损海难事故的一个主要原因。因此,海浪预报方法的研究,历来是航海业务部门所关心的课题。

传统的海浪预报方法,主要是考虑风对海浪要素的影响。尽管已有不少学者从不同角度探讨了浪流的相互作用(Johnson 1947, Yu Yi—Yuan 1952, Pierson 1972, 岩 桓、浅野1979)(1, 2, 3, 4);而这种作用所产生的特殊海况对航行的影响,也已为一些海事报告所证实^[3]。但迄今为止,在海浪的实际业务预报中,还未能考虑到海流对波高变化的影响。本文试从波动能量平衡的角度,推导出海浪在海流作用下的波高、波陡变化公式,并探讨了该公式的实际应用程序,供航海业务部门参考。

二、深水波的浪流效应

(一) 本文所用术语及符号规定

静水区——没有海水水平流动,或水平流动微弱的海域。

动水区——海水水平流动较强的海域。在此海域中,流向恒定。

浪向——指海浪传来的方向,其含义与风向相同。

*本文承范立群同志审阅并提出宝贵意见,特此致射。

本文于1982年12月19日收到。

流向——指海水流去的方向。

浪流交角——浪向与流向的夹角，用 α 表示。 α 的变化范围为 0° —— 180° 。

浪流相逆——当浪流交角 $\alpha = 0^\circ$ 时，即海浪的传播方向与流向相反，则称为浪流相逆。

浪流相顺——当浪流交角 $\alpha = 180^\circ$ 时，即海浪传播方向与流向相同，则称为浪流相顺。

浪流正交——当浪流交角 $\alpha = 90^\circ$ 时，即海浪传播方向与流向垂直，则称为浪流正交。

在本文的公式推导中，有关的波浪要素及物理量用下列符号表示：

C_0 ——海浪在静水区的传播速度。

C ——海浪进入动水区后的传播速度。

V ——动水区中的流速。

λ_0 ——海浪在静水区中的波长。

λ ——海浪进入动水区后的波长。

h_0 ——海浪在静水区中的波高。

h ——海浪进入动水区后的波高。

$h_{\max}$ ——浪流相逆时的最大波高值。

m ——动水区的流速与静水区的波速之比。 $m = V/C_0$ ， m 恒为正值。

δ_0 ——静水区中的波陡， $\delta_0 = h_0/\lambda_0$ 。

δ ——动水区中的波陡， $\delta = h/\lambda$ 。

$\delta_{\max}$ ——出现最大波高时对应的最大波陡值。

$\Delta_{\max}$ ——最大波陡限制值， $\Delta_{\max} = 0.142$ 。

K ——动水区的波高与静水区的波高之比， $K = h/h_0$ 。

γ ——动水区的波陡与静水区的波陡之比， $\gamma = \delta/\delta_0 = h\lambda_0/h_0\lambda$ 。

E ——一个波长内的波动总能量。

ρ ——海水密度。

g ——重力加速度。

(二) 海浪由静水区进入动水区时的波高变化

当海浪由静水区进入动水区时，由于海流的影响，便有

$$\vec{C} = \vec{C}_0 + \vec{V}$$

$\vec{C}$ 的大小为

$$C = \sqrt{C_0^2 \sin^2 \alpha + (C_0 \cos \alpha - V)^2} \quad (1)$$

在深水波中，由于

$$\lambda = 2\pi C^2/g$$

因此

$$\frac{\lambda}{\lambda_0} = \frac{2\pi C^2/g}{2\pi C_0^2/g} = \frac{C^2}{C_0^2} \quad (2)$$

将式(1)代入式(2), 便得

$$\frac{\lambda}{\lambda_0} = \frac{C_0^2 \sin^2 \alpha + (C_0 \cos \alpha - V)^2}{C_0^2} \quad (3)$$

在一个波长范围内, 有

$$E = \frac{1}{8} \rho g h^2 \lambda \quad (4)$$

海浪从静水区传入动水区, 若波面没有发生破碎, 一个波长内的能量将保持不变。在这种情况下

$$\frac{1}{8} \rho g h^2 \lambda_0 = \frac{1}{8} \rho g h^2 \lambda \quad (5)$$

将式(3)代入式(5), 得

$$\frac{h}{h_0} = \sqrt{\frac{C_0^2}{C_0^2 \sin^2 \alpha + (C_0 \cos \alpha - V)^2}}$$

引入符号 $m = V/C_0$, 则上式可写为

$$h = \frac{h_0}{\sqrt{m^2 - 2m \cos \alpha + 1}} \quad (6)$$

上式便是海浪在海流作用下的波高变化公式。由式(6)可知, 当海浪从静水区传入动水区时, 其波高的变化取决于动水区的流速与静水区的波速之比 m 和浪流交角 α 。

(三) 海流影响下的波陡

海浪从静水区传入动水区, 波长和波高都将发生变化。海浪在动水区中的波长和波高, 分别由式(3)和式(6)所确定。

由于海浪波陡 $\delta = h/\lambda$, 因此, 由式(3)和式(6), 可得出动水区中的波陡

$$\delta = \frac{\delta_0}{\sqrt{(m^2 - 2m \cos \alpha + 1)^3}} \quad (7)$$

上式就是海浪由静水区传入动水区时的波陡变化公式。根据式(7)可由 h_0 、 λ_0 、 m 和 α 的值求得海浪进入动水区后的相应波陡值。

根据季托夫、舒列金等的论述和验证^[5,6]海浪的极限波陡值 $\Delta_{\max} = 0.142$, 因此, 式(6)必须满足 $\delta \leq 0.142$ 这一条件。当 $\delta > 0.142$ 时, 波峰产生破碎, 波动能量由于波峰的破碎而被损耗, 波能不再守恒, 传入动水区后的海浪波高也就不能继续增大。由此可见

$$\frac{h_0}{\lambda_0 \sqrt{(m^2 - 2m \cos \alpha + 1)^3}} \leq 0.142$$

是决定浪流相互作用下最大波高值的一个限制因子。

上述(6)、(7)两式, 均是在假定海浪为深水波的前提下得出的, 适用于大洋水域及水深较大的海区。

三、动水区的波高公式和波陡公式的讨论

引入符号 k 和 r , 则(6)、(7)两式可写为

$$K = \frac{1}{\sqrt{m^2 - 2m\cos\alpha + 1}} \quad (8)$$

$$r = \frac{1}{\sqrt{(m^2 - 2m\cos\alpha + 1)^3}} \quad (9)$$

由于 $K = F(m, \alpha)$, $r = f(m, \alpha)$

因此, 有

$$\frac{\partial F}{\partial m} = \frac{\cos\alpha - m}{\sqrt{(m^2 - 2m\cos\alpha + 1)^3}} \quad (10)$$

$$\frac{\partial f}{\partial m} = \frac{3(\cos\alpha - m)}{\sqrt{(m^2 - 2m\cos\alpha + 1)^5}} \quad (11)$$

$$\frac{\partial F}{\partial \alpha} = \frac{-m\sin\alpha}{\sqrt{(m^2 - 2m\cos\alpha + 1)^3}} \quad (12)$$

$$\frac{\partial f}{\partial \alpha} = \frac{-3m\sin\alpha}{\sqrt{(m^2 - 2m\cos\alpha + 1)^5}} \quad (13)$$

由(10)~(13)式, 可分别讨论 m 值和 α 值对 k , r 的影响。

(一) 在 α 的不同取值范围内, 动水区的波高 h 、波陡 δ 与海流流速 V 的关系。

由(10)、(11)两式可知:

1. 当 $\cos\alpha > m$ 时, $\frac{\partial F}{\partial m} > 0$, $\frac{\partial f}{\partial m} > 0$, 这时, K 和 r 均随 m 值的增大而单调增加。这就表明, 当 $0^\circ \leq \alpha < \arccos m$ 时, 动水区中的波高 h 和波陡 δ 均随流速 V 的增大而增大。

2. 当 $\cos\alpha < m$ 时, $\frac{\partial F}{\partial m} < 0$, $\frac{\partial f}{\partial m} < 0$, 这时, K 和 r 均随 m 值的增大而单调减少。这就表明, 当 $\arccos m < \alpha \leq 180^\circ$ 时, 动水区中的波高 h 和波陡 δ 均随流速 V 的增大而减小。

(二) 当 m 为常数时, 动水区的波高 h 、波陡 δ 与浪流交角 α 的关系。

由(12)、(13)两式可知:

1. 在 α 的整个取值范围内($0^\circ \sim 180^\circ$), 均有 $\frac{\partial F}{\partial \alpha} < 0$, $\frac{\partial f}{\partial \alpha} < 0$, 这时, K 和 r 随 α 值的增大而单调减小。这就说明, 当流速 V 为定值时, 动水区中的波高 h 和波陡 δ 均随浪流交角 α 的增大而减小。

2. 当 $\alpha = 0^\circ$ 时, 海浪传播方向与流向相反, 即浪流相逆。这时, $\frac{\partial F}{\partial \alpha} = 0$, $\frac{\partial f}{\partial \alpha} = 0$, K 和 r 均达到最大值。在这种情况下

$$h = \frac{h_0}{1 - m} \quad (14)$$

$$\delta = \frac{\delta_0}{(1 - m)^3} \quad (15)$$

这就是浪流相逆时动水区中的波高公式和波陡公式。由(14)、(15)两式可知, 当 $m \rightarrow 1$ 时, $h \rightarrow \infty$, $\delta \rightarrow \infty$ 。实际上, 由于 $\Delta_{mas} = 0.142$, 因此, 当 $\delta > 0.142$ 时, 波面将发生破碎而消耗能量, 波高便不能继续增长。

3. 当 $\alpha = 180^\circ$ 时, 海浪传播方向与流向相同, 即浪流相顺。这时, $\frac{\partial F}{\partial \alpha} = 0$, $\frac{\partial f}{\partial \alpha} = 0$, K和r均达到最小值。在这种情况下

$$h = \frac{h_0}{1+m} < h_0 \quad (16)$$

$$\delta = \frac{\delta_0}{(1+m)^3} < \delta_0 \quad (17)$$

由此可见, 当浪流相顺时, 动水区的波高和波陡比静水区小, 波面将变得更平缓。

4. 当 $\alpha = 90^\circ$ 时, 海浪传播方向与流向垂直, 即浪流正交。这时

$$h = \frac{h_0}{m^2+1} < h_0 \quad (18)$$

$$\delta = \frac{\delta_0}{\sqrt{(m^2+1)^3}} < \delta_0 \quad (19)$$

这就表明, 当浪流正交时, 动水区中的波高和波陡仍比静水区小。

四、大洋海区的浪流效应和 h_{max} 值

前面讨论了动水区中的波高和波陡的变化, 这些讨论都是在理想状况下进行的。然而, 由于 Δ_{max} 和海水实际流动的限制, 理论计算所得的 h_{max} 值与实际情况还存在着一定的差距。下面, 分风浪和涌浪两种情况, 分别探讨其可能的 h_{max} 值。

(一) 风浪的浪流效应及其 h_{max} 值

在风的直接作用下形成的海浪称为风浪。在大洋海区, 风浪的浪向与风向基本一致。这里仅讨论有可能造成最大波高的风向, 即风、流相逆(风向与流向的夹角为 0°)时的浪流效应。

在无限风区的条件上, 假定风对海面的作用已达到定常。由大洋的风浪周期T与风速W的经验关系式^[7] $T = 2.96W^{0.38}$ 并根据深水波的海浪要素关系 $C_0 = 1.56T$, 可以得到

$$C_0 = 4.62W^{0.38} \quad (20)$$

$$\lambda_0 = 13.66W^{0.78} \quad (21)$$

与此同时, 由于定常风的作用, 海面将产生由风所造成的表面流。表面流的流向在风去向右方 45° , 其流速u由厄克曼经验公式^[8]确定

$$u = \frac{0.0127w}{\sqrt{\sin\varphi}} \quad (22)$$

式中, φ 为研究点的地理纬度。

因此, 在动水区中, 海水的实际流动为

$$\vec{V}' = \vec{V} + \vec{u}$$

即 $\vec{V}'$ 在 $\vec{V}$ 方向上的流速分量的大小为

$$\begin{aligned}
 V' &= V - \frac{0.0127 W}{\sqrt{\sin \varphi}} \cdot \cos 45^\circ \\
 &= V - \frac{0.009 W}{\sqrt{\sin \varphi}}
 \end{aligned} \quad (23)$$

把 V' 和 C_0 代入 $m = V'/C_0$, 便得

$$m = 0.216 v W^{-0.38} - \frac{0.002 W^{0.62}}{\sqrt{\sin \varphi}} \quad (24)$$

由式 (24) 和式 (14), 便可得到风、流相逆时动水区中的风浪最大波高值

$$h_{\max} = h_0 \left(1 - 0.216 v W^{-0.38} + \frac{0.002 W^{0.62}}{\sqrt{\sin \varphi}} \right)^{-1} \quad (25)$$

这时, 相应的波陡值为

$$\delta_{\max} = \delta_0 \left(1 - 0.216 v W^{-0.38} + \frac{0.002 W^{0.62}}{\sqrt{\sin \varphi}} \right)^{-3} \quad (26)$$

只有当式 (26) 求得的 $\delta_{\max} \leq 0.142$ 时, $h_{\max}$ 值才有意义。若 $\delta_{\max} > 0.142$, 则波面已破碎, 动水区中的 $h_{\max}$ 便不能由式 (24) 求得。

(二) 涌浪的浪流效应及其 $h_{\max}$ 值

假定所讨论的静水区和动水区均在风作用域之外, 这时, 由风作用域传来的海浪便是涌浪。由于涌浪的波动比较规则, 其传播速度可用深水波波速公式表示。因此, 把 $C_0 = 1.25 \sqrt{\lambda_0}$ 代入 (6)、(7) 两式, 便可得到涌浪在动水区中的波高和波陡。

$$h = h_0 \left(\frac{0.64 V^2}{\lambda_0} - 1.6 \frac{V \cos \alpha}{\sqrt{\lambda_0}} + 1 \right)^{-0.5} \quad (27)$$

$$\delta = \delta_0 \left(\frac{0.64 V^2}{\lambda_0} - 1.6 \frac{V \cos \alpha}{\sqrt{\lambda_0}} + 1 \right)^{-1.5} \quad (28)$$

同样, 只有在 $\delta \leq \Delta_{\max}$ 时, 所求得的 h 值才有实际意义。

当 $\alpha = 0^\circ$ 时, 动水区中的波高达最大值

$$h_{\max} = h_0 \left(\frac{0.64 V^2}{\lambda_0} - \frac{1.6 V}{\sqrt{\lambda_0}} + 1 \right)^{-0.5} \quad (29)$$

其相应的波陡值为

$$\delta_{\max} = \delta_0 \left(\frac{0.64 V^2}{\lambda_0} - \frac{1.6 V}{\sqrt{\lambda_0}} + 1 \right)^{-1.5} \quad (30)$$

(三) 计算方法举例

例 1. 某轮在北太平洋 30°N 附近的黑潮区航行。黑潮流速 4 节, 流向正东; 由于台风外缘的影响, 该海区风速为 40 节 (20.6 米/秒), 风向正东, 由海区风力推算而得的最大风浪波高为 8.5 米。求在黑潮影响下的最大波高 $h_{\max}$ 值。

解: 已知 $\varphi = 30^\circ$, $V = 2.06$ 米/秒

$$w = 20.6 \text{ 米/秒}, \quad h_0 = 8.5 \text{ 米}$$

把上列数值代入式(25), 得

$$h_{\max} = 8.5 \times \left(1 - 0.216 \times 2.06 \times 20.6^{-0.38} + \frac{0.002 \times 20.6^{0.62}}{\sqrt{\sin 30^\circ}} \right)^{-1} \\ = 9.7 \text{ (米)}$$

由式(21)得

$$\lambda_0 = 13.66 \times 20.6^{0.70} = 136 \text{ (米)}$$

$$\delta_0 = h_0 / \lambda_0 = 8.5 / 136 = 0.063$$

由式(26)得

$$\delta_{\max} = 0.063 \times \left(1 - 0.216 \times 2.06 \times 20.6^{-0.38} + \frac{0.002 \times 20.6^{0.62}}{\sqrt{\sin 30^\circ}} \right)^{-3} \\ = 0.093$$

由于 $\delta_{\max} < \Delta_{\max}$

因此, 在这种情况下, 该海区的最大波高 $h_{\max}$ 可达 9.7 米。

例 2. 某轮在西南印度洋阿古拉斯海流区顺流向南航行, 海面无风, 流速 5.5 节 (2.8 米/秒)。这时, 由于南极风暴的影响, 在海况传真图上发现波高 12.5 米, 波长 170 米的涌浪向北传播。求这群涌浪进入阿古拉斯海流区时可能出现的最大波高 $h_{\max}$ 值。

解: 已知 $V = 2.8 \text{ 米/秒}, \quad h_0 = 12.5 \text{ 米},$

$$\lambda_0 = 170 \text{ 米}$$

由式(29)得

$$h_{\max} = 12.5 \times \left(\frac{0.64 \times 2.8^2}{170} - \frac{1.6 \times 2.8}{\sqrt{170}} + 1 \right)^{-0.8} = 15.1 \text{ (米)}$$

由式(30)得

$$\delta_{\max} = \frac{12.5}{170} \times \left(\frac{0.64 \times 2.8^2}{170} - \frac{1.6 \times 2.8}{\sqrt{170}} + 1 \right)^{-1.5} = 0.129$$

由于 $\delta_{\max} < \Delta_{\max}$

因此, 在这种情况下, 阿古拉斯流区的最大涌浪波高 $h_{\max}$ 将可达 15.1 米。

五、航行船舶的浪流效应分析

在船舶条件下分析某一强流海区的浪流效应, 大体可分为如下四个步骤。

第一步: 根据大洋航路的海流资料, 确定被预报海区在该季节中的海流流向和最大流速 V 。

第二步: 根据当天传真天气图的海面风场实况, 确定被预报海区的风向和风速 W 。若被预报海区无强风出现, 则由附近的其它天气系统, 并结合海浪实况图, 确定可能影响被预报海区的涌浪浪向和涌浪波高 h_0 、波长 λ_0 。

第三步: 由式(25)或式(27)计算海浪进入被预报海区后由于浪流效应的作用而引起

的最大波高 $h_{\max}$ 值。

第四步：若被预报海区的海浪以风浪为主，则由式(21)和式(26)求得强流区中的风浪波陡 $\delta_{\max}$ ，若被预报海区的海浪以涌浪为主，则由式(28)求得强流区中的涌浪波陡 $\delta_{\max}$ 。只有在 $\delta_{\max} \leq \Delta_{\max}$ 时， $h_{\max}$ 才有实际意义。若求得的 $\delta_{\max} > \Delta_{\max}$ ，则这时波面已破碎，海浪不能继续发展，实际的可能最大波高应略低于计算所得的 $h_{\max}$ 值。

六、结 语

1. 从本文的讨论可知，大洋海流对海浪的波高变化有一定的影响。当浪流相逆时，在大洋强流区传播的海浪波高将增大，特别是在涌浪的情况下，波高的增大更为显著。这可能是某些特定海区海难事故频繁的一个原因。

2. 根据大洋海流流速分布资料，(9,10,11,12)在大洋航线中，主要的强流区有：日本东南洋面的黑潮区($V_{\max} = 4$ 节)；西印度洋的索马里海流区($V_{\max} = 6$ 节)；非洲东南洋面的阿古拉斯海流区($V_{\max} = 5.5$ 节)和百慕大群岛附近的墨西哥湾流区($V_{\max} = 5$ 节)。因此，船舶在上述海域航行时，应十分注意浪向和流向的关系。若发现浪流有相逆的可能，应立即避开强流区；若浪流相顺，则强流区的海浪波高、波陡都将变小，更有利于航行。

3. 当前，由于可编程序式电子计算器的使用日益普及，因此，将本文的计算公式编成计算程序，便可根据已知数据极其简便地求得 $h_{\max}$ 值。也可将计算公式制成表格，以便使用。

4. 由于缺乏实测资料，本文计算公式的实际使用效果，有待于海上航行实践的进一步检验和修正。

参 考 文 献

- [1] 文圣常，《海浪原理》，山东人民出版社，1964。
- [2] 薛鸿超、顾家龙、任汝述，《海岸动力学》，人民交通出版社，1980。
- [3] 交通部上海船舶运输科学研究所，《远航资料》，1979. 6, P102—112。
- [4] 华东水利学院，《华水科技情报》，1981. 3, P98—104。
- [5] A.H. 霍洛季林、A.H. 什梅列夫，《船舶的耐波性和在波浪上的稳定措施》，许百春等译，国防工业出版社，1980。
- [6] B.B. 舒列金，《海洋物理学(上册)》，尤芳湖等译，科学出版社，1963。
- [7] 中国科学院地理研究所等，《中国海及邻海气候》，1975。
- [8] 山东海洋学院海洋学教研室，《海洋学》，1973。
- [9] A.M. King, Oceanography for Geographers, Edward Arnold LTD, London, 1964。

[10] Admiralty, Japan Pilot Vol I, Hydrographic Department, London, 1964.

[11] Admiralty, Africa Pilot Vol I, Hydrographic Department, London, 1967.

[12] Admiralty, South Indian Ocean Pilot, Hydrographic Department, London 1958.

THE VARIATION OF THE WAVE HEIGHT BY THE INTERACTION BETWEEN WAVE AND CUR- RENT AND ITS INFLUENCES ON SAILING SHIPS

Mu Shaojie Wu Yangru

ABSTRACT

Wave is a great influence factor for ship Sailing. Though methods for forecasting wave are always closely studied by shipping departments, and a lot of achievements have been made, in traditional methods, wind influence on wave parameters is mainly considered. Some researchworkers have approached the interaction between wave and current from different angles, but so far, in wave forecasting, the variation of wave height caused by current has not been considered yet.

This paper analyses this interaction and gets the formulas of height and steepness variations from the angle of wave energy balance. Then the formula for forecasting wave height in strong current areas is acquired on the basis of forecasting experience in distant waters. In practical uses, according to the practical programme, the probable maximum height can be obtained under the conditions of the interaction between wave and current in strong current areas.