

目 次

1 范围	1
2 引用文件	1
3 定义	1
4 一般要求	11
5 水面和近水面波频运动计算方法	17
6 波浪中近水面波浪力计算方法	28
7 波浪中近水面低频运动水动力系数及艇体受力计算方法	37
8 波浪中近水面垂直面定深运动稳定性计算方法	39
9 波浪中近水面导弹垂直发射艇体运动计算方法	44
10 波浪中近水面低速航行时艇体运动性能评价和导弹发射概率计算方法	47
附录 A 环境条件的补充规定(补充件)	50

潜艇耐波性计算方法

1 范围

1.1 主题内容

本指导性技术文件规定了潜艇水面和近水面耐波性计算方法。

1.2 适用范围

本指导性技术文件适用于大、中型潜艇,小型潜艇可参照使用。

2 引用文件

GJB/Z 110—98 潜艇操纵性预报指南
《西北太平洋波浪统计集》1996年 国防工业出版社

3 定义

3.1 术语

3.1.1

潜艇耐波性 seakeeping of submarine

潜艇适航性的重要组成部分,要求潜艇在规定海况下水面和近水面航行时形成的舰体运动环境,能保证人员及各种武器、装备、系统正常工作的能力。

3.1.2

潜艇近水面航行状态 condition for submarine running near free-surface

潜艇接近水面的水下航行状态。一般包括通气管深度状态、潜望镜深度状态,以及风浪能影响到的导弹武器发射深度状态。

3.1.3

二阶平均波浪力 mean value of wave exciting forces in second-order

二阶波浪扰动力的平均值。它由波浪速度势和潜艇的波频运动确定。

3.1.4

波频运动 oscillation motions in waves

潜艇在波浪中随时间变化均值为零的六自由度的摇摆运动成分。

3.1.5

不规则波中潜艇非线性事件 non-linear events of submarine in irregular seas

水面航行时甲板浪、舢底出水、砰击、螺旋桨出水以及近水面航行时指挥台围壳顶、围壳舵出水、艇体露背等随机事件。

3.1.6

近水面低频非线性运动 non-linear motions in low-frequency range of submarine running near free-surface

潜艇在波浪中近水面航行时由于二阶波浪力、操舵以及导弹发射反力等低频扰动力作用引起的艇体慢变漂移和倾侧运动。

3.1.7

波浪中潜艇近水面航行垂直面定深运动稳定性 stability in depth keeping of submarine running

near free-surface in waves

波浪中潜艇近水面航行时保持定深,不出现大幅度运动和不可控制的上浮、露背的能力。

3.1.8

齐射 battery launching

以规定的时间间隔和次序连续垂直发射一枚以上的导弹。

3.1.9

波浪中近水面潜艇导弹垂直发射概率 probability of missile launching vertically of submarine under free-surface in waves

在给定海区(或海区的给定时间区间内)的海浪环境下潜艇进行垂直发射导弹作业时,该海区能保证潜艇相关的运动参数处于发射条件所容许的数值范围内的波浪统计概率。

3.2 符号

常用符号按表 1。

表 1

编号	量的符号	量的名称	单位符号	说明
3.2.1	A	角标,表示艇艏剖面	— ¹⁾	
3.2.2	A_{jk}	波频运动中艇体 k 模式运动引起的 j 模式运动的广义附加质量	$\text{kg}, \text{N} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^2$ $\text{kg} \cdot \text{m}^2, \text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2$ $\text{kg} \cdot \text{m}, \text{N} \cdot \text{s}^2$	$j, k = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ 分别表示纵荡、横荡、垂荡、横摇、纵摇、艏摇 $j = k, j, k = 1, 2, 3$ $j = k, j, k = 4, 5, 6$ $j \neq k, j = 1, 2, 3$ $k = 4, 5, 6$ $j \neq k, j = 4, 5, 6$ $k = 1, 2, 3$
3.2.3	A_{22}^0	零速时 A_{22} 的值	$\text{kg}, \text{N} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^2$	
3.2.4	A_{33}^0	零速时 A_{33} 的值	$\text{kg}, \text{N} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^2$	
3.2.5	A_{24}^0	零速时 A_{24} 的值	$\text{kg} \cdot \text{m}, \text{N} \cdot \text{s}^2$	
3.2.6	A_{44}^*	艇体表观横摇质量惯性矩	$\text{kg} \cdot \text{m}^2, \text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2$	$A_{44}^* = A_{44} + I_4$
3.2.7	a_{22}	二维剖面横荡附加质量	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}, \text{N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^2$	
3.2.8	a_{33}	二维剖面垂荡附加质量	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}, \text{N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^2$	
3.2.9	a_{44}	二维剖面横摇附加质量	$\text{kg} \cdot \text{m}, \text{N} \cdot \text{s}^2$	
3.2.10	a_{24}	二维剖面横荡—横摇附加质量惯性积	$\text{kg}, \text{N} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^2$	
3.2.11	$a \cdot L / g \zeta_a$	无因次线加速度响应	—	
3.2.12	B_{jk}	波频运动中艇体 k 模式运动引起的 j 模式运动的阻尼系数	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}, \text{N} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}$ $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}, \text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}$ $\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}, \text{N} \cdot \text{s}$	$j, k = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ 分别表示纵荡、横荡、垂荡、横摇、纵摇、艏摇 $j = k, j, k = 1, 2, 3$ $j = k, j, k = 4, 5, 6$ $j \neq k, j = 1, 2, 3$ $k = 4, 5, 6$ $j \neq k, j = 4, 5, 6$ $k = 1, 2, 3$
3.2.13	B_{22}^0	零速时 B_{22} 的值	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}, \text{N} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}$	

表 1(续)

编号	量的符号	量的名称	单位符号	说明
3.2.14	B_{33}^0	零速时 B_{33} 的值	$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}, \text{N}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}$	
3.2.15	B_{24}^0	零速时 B_{24} 的值	$\text{kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}, \text{N}\cdot\text{s}$	
3.2.16	B_{44}^*	横摇粘性阻尼拟线性系数	$\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}, \text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$	
3.2.17	B_{440}^*	零速时横摇粘性阻尼系数	$\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}, \text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$	
3.2.18	B_{44L}	横摇升力项阻尼系数	$\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}, \text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$	
3.2.19	$B_{44S.L.}$	艇体横摇升力项阻尼系数	$\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}, \text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$	
3.2.20	B_{44W}	横摇兴波阻尼系数	$\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}, \text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$	
3.2.21	b_{33}	剖面垂荡阻尼系数	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}, \text{N}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}$	
3.2.22	b_{22}	剖面横荡阻尼系数	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}, \text{N}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}$	
3.2.23	b_{33}^A	艇剖面垂荡阻尼系数值	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}, \text{N}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}$	
3.2.24	C_{jk}	潜艇流体静力回复力系数		单位见 3.2.25 至 3.2.28
3.2.25	C_{33}	水面状态垂荡回复力系数	$\text{kg}\cdot\text{s}^{-2}, \text{N}\cdot\text{m}^{-1}$	
3.2.26	C_{35}, C_{53}	水面状态垂荡——纵摇耦合回复系数	$\text{kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-2}, \text{N}$	
3.2.27	C_{55}	纵摇回复力矩系数	$\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}, \text{N}\cdot\text{m}$	
3.2.28	C_{44}	横摇回复力矩系数	$\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}, \text{N}\cdot\text{m}$	
3.2.29	D	排水量	N, kN	$D = m \cdot g$
3.2.30	D	潜艇型深、椭球体直径	m	
3.2.31	$E - \xi\eta\zeta$	大地固定坐标系	—	
3.2.32	$F, F(t)$	作用于潜艇上的力(力矩)	$\text{N}(\text{N}\cdot\text{m})$	
3.2.33	F_{11}	水动力(力矩)	$\text{N}(\text{N}\cdot\text{m})$	
3.2.34	F_j	规则波中波频波浪力和力矩复振幅	N $\text{N}\cdot\text{m}$	$j = 1, 2, 3$ $j = 4, 5, 6$
3.2.35	F_{jR}	操舵(鳍)引起的力和力矩复振幅	N $\text{N}\cdot\text{m}$	$j = 1, 2, 3$ $j = 4, 5, 6$
3.2.36	F_n	傅氏数	—	艇长傅氏数
3.2.37	F_w, F_{wk}	波浪力(力矩)	$\text{N}(\text{N}\cdot\text{m})$	
3.2.38	$F^{(1)}$	一阶作用力(力矩)	$\text{N}(\text{N}\cdot\text{m})$	
3.2.39	$F^{(2)}$	二阶作用力(力矩)	$\text{N}(\text{N}\cdot\text{m})$	
3.2.40	$\bar{F}^{(2)}$	二阶平均作用力(力矩)	$\text{N}(\text{N}\cdot\text{m})$	
3.2.41	\tilde{F}	不规则波中二阶平均作用力(力矩)	$\text{N}(\text{N}\cdot\text{m})$	$F(t) = \tilde{F} + F^0(t)$
3.2.42	$F^0, F^0(t)$	不规则波中随时间变化的作用力(力矩)成分	$\text{N}(\text{N}\cdot\text{m})$	
3.2.43	\tilde{F}_w, \tilde{M}_w	波浪引起的作用力和力矩平均值	$\text{N}, \text{N}\cdot\text{m}$	

表 1(续)

编号	量的符号	量的名称	单位符号	说明
3.2.44	$F_w^{(1)}/\zeta_n$	规则波中一阶波浪力(力矩)响应	$N \cdot m^{-1}(N)$	
3.2.45	$F_w^{(2)}/\zeta_n^2$	规则波中二阶平均波浪力(力矩)响应	$N \cdot m^{-2}(N \cdot m^{-1})$	
3.2.46	$f_j, f_j(x)$	STF 方法中剖面的傅汝德-克雷洛夫力函数	$m^2 \cdot s^{-2}$	$j = 2, 3, 4$
3.2.47	\overline{GC}	水下重心浮心间垂直距离	m	
3.2.48	\overline{GM}, h	初横稳性高	m	
3.2.49	g	重力加速度	$m \cdot s^{-2}$	取 $g = 9.80665 m \cdot s^{-2}$
3.2.50	$H, H_0, H_0(t)$	潜深、静水面至潜艇 x 轴距离	m	
3.2.51	\dot{H}	潜深对时间的一阶导数	$m \cdot s^{-1}$	
3.2.52	$h_j, h_j(x)$	STF 方法中剖面的绕射力函数	$m^2 \cdot s^{-2}$	$j = 2, 3, 4$
3.2.53	h_j^A	艇剖面 A 的 h_j 的值	$m^2 \cdot s^{-2}$	
3.2.54	I_x, I_y, I_z	对于 x, y, z 轴的潜艇质量惯性矩	$kg \cdot m^2$	
3.2.55	I_{46}	对于 x, z 轴的潜艇质量惯性积	$kg \cdot m^2$	
3.2.56	I_x, I_y, I_z	对应于 x, y, z 轴的潜艇质量惯性矩	$kg \cdot m^2$	同 I_x, I_y, I_z
3.2.57	K, M, N	潜艇受到的外力矩对 x, y, z 轴的分量	$N \cdot m$	
3.2.58	K, k	波数	$rad \cdot m^{-1}$	$K, k = 2\pi/\lambda$
3.2.59	K_H, M_H, N_H	潜艇受到的水动力矩对 x, y, z 轴的分量	$N \cdot m$	
3.2.60	K_{xx}, K_{yy}	艇体横摇、纵摇惯性半径系数	—	
3.2.61	$K_{xx} \cdot B, K_{yy} \cdot L$	横摇、纵摇惯性半径	m	
3.2.62	$K_r^{(2)}$	横倾水动力矩对转艏角速度一阶导数的无因次系数	—	$K_r' = \frac{K_r}{0.5\rho L^4 u}$
3.2.63	K_i'	横倾水动力矩对转艏角加速度一阶导数的无因次系数	—	$K_i' = \frac{K_i}{0.5\rho L^3}$
3.2.64	K_p	横倾水动力矩对横倾角速度一阶导数的无因次系数	—	$K_p' = \frac{K_p}{0.5\rho L^4 u}$
3.2.65	K_p'	横倾水动力矩对横倾角加速度一阶导数的无因次系数	—	$K_p' = \frac{K_p}{0.5\rho L^3}$
3.2.66	K_v	横倾水动力矩对横移速度一阶导数的无因次系数	—	$K_v' = \frac{K_v}{0.5\rho L^3 u}$
3.2.67	K_v'	横倾水动力矩对横移加速度一阶导数的无因次系数	—	$K_v' = \frac{K_v}{0.5\rho L^4}$
3.2.68	$K_{\delta r}$	横倾水动力矩对方向舵角线性导数的无因次系数	—	$K_{\delta r}' = \frac{K_{\delta r}}{0.5\rho L^3 u^2}$
3.2.69	L	艇长	m	

表 1(续)

编号	量的符号	量的名称	单位符号	说明
3.2.70	M	作用潜艇上的力矩在 y 轴上分量 潜艇质量	$N \cdot m$ kg, t	
3.2.71	$M^{(1)}, \bar{M}^{(2)}$	规则波中一阶、二阶平均波浪力矩在 y 轴上分量	$N \cdot m$	
3.2.72	M_i	不规则波中的水动力矩和波浪力矩	$N \cdot m$	$i = H, w$
3.2.73	M_{jk}	艇体质量矩阵的元	kg $kg \cdot m$ $kg \cdot m^2$	$j = k \begin{cases} j = 1, 2, 3 \\ k = 1, 2, 3 \end{cases}$ $j \neq k \begin{cases} j = 1, 2, 3, k = 4, 5, 6 \\ j = 4, 5, 6, k = 1, 2, 3 \end{cases}$ $j = k \begin{cases} j = 4, 5, 6 \\ k = 4, 5, 6 \end{cases}$
3.2.74	M_w	波浪力矩	$N \cdot m$	$M_w = \bar{M}_w + M_w^0(t)$
3.2.75	M_w	水动力矩对垂向速度导数	$N \cdot s$	
3.2.76	\bar{M}_w	不规则波中二阶平均波浪力矩	$N \cdot m$	
3.2.77	$M_w^0(t)$	不规则波中波浪力矩随时间变化的成份	$N \cdot m$	
3.2.78	$M_w^{(1)}/\zeta_a$	规则波中波频波浪力矩响应	N	
3.2.79	$\bar{M}_w^{(2)}/\zeta_a^2$	规则波中二阶平均波浪力矩响应	$N \cdot m^{-1}$	
3.2.80	M_0'	纵倾水动力矩系数的无因次零态值	—	$M_0' = \frac{M_0}{0.5\rho L^3 u^2}$
3.2.81	M_q'	纵倾水动力矩对纵倾角速度一阶导数的无因次系数	—	$M_q' = \frac{M_q}{0.5\rho L^4 u}$
3.2.82	$M_{\dot{q}}'$	纵倾水动力矩对纵倾角加速度一阶导数的无因次系数	—	$M_{\dot{q}}' = \frac{M_{\dot{q}}}{0.5\rho L^5}$
3.2.83	M_w'	纵倾水动力矩对垂向速度一阶导数的无因次系数	—	$M_w' = \frac{M_w}{0.5\rho L^3 u}$
3.2.84	$M_{\dot{w}}'$	纵倾水动力矩对垂向加速度一阶导数的无因次系数	—	$M_{\dot{w}}' = \frac{M_{\dot{w}}}{0.5\rho L^4}$
3.2.85	$M_{\delta b}'$	纵倾水动力矩对艏升降舵舵角的线性导数的无因次系数	—	$M_{\delta b}' = \frac{M_{\delta b}}{0.5\rho L^3 u^2}$
3.2.86	$M_{\delta s}'$	纵倾水动力矩对艉升降舵舵角的线性导数无因次系数	—	$M_{\delta s}' = \frac{M_{\delta s}}{0.5\rho L^3 u^2}$
3.2.87	$M(\delta)$	操舵形成的纵倾力矩	$N \cdot m$	$M(\delta) = M_{\delta b} + M_{\delta s}$
3.2.88	M_x	横摇力矩	$N \cdot m$	
3.2.89	m	潜艇质量	kg, t	
3.2.90	m_i	三维方法速度势求解中物面条件的参数	— $m \cdot s^{-1}$	$i = 1, 2, 3, 4$ $i = 5, 6$

表 1(续)

编号	量的符号	量的名称	单位符号	说明
3.2.91	m_i	谱密度函数的 i 次矩	—	$i = 0, 1, 2$
3.2.92	m_0	海浪谱密度曲线面积	m^2	谱密度的零次矩
3.2.93	m_1	海浪谱密度的一次矩	$m^2 \cdot s^{-1}$	
3.2.94	m_{0s}	相对运动 s 的方差	m^2	
3.2.95	$m_{0\dot{s}}$	相对运动速度 \dot{s} 的方差	$m^2 \cdot s^{-2}$	
3.2.96	m_{0j}	模式 j 运动的方差	m^2 rad^2	$j = 1, 2, 3$ $j = 4, 5, 6$
3.2.97	N_{11}	转船的水动力矩	$N \cdot m$	
3.2.98	N'_r	转船水动力矩对转船角速度一阶导数的无因次系数	—	$N'_r = \frac{N_r}{0.5\rho L^4 u}$
3.2.99	$N'_\dot{r}$	转船水动力矩对转船角加速度一阶导数的无因次系数	—	$N'_\dot{r} = \frac{N_{\dot{r}}}{0.5\rho L^3}$
3.2.100	N'_p	转船水动力矩对横倾角速度一阶导数的无因次系数	—	$N'_p = \frac{N_p}{0.5\rho L^4 u}$
3.2.101	$N'_\dot{p}$	转船水动力矩对横倾角加速度一阶导数的无因次系数	—	$N'_\dot{p} = \frac{N_{\dot{p}}}{0.5\rho L^3}$
3.2.102	N'_v	转船水动力矩对横移速度一阶导数的无因次系数	—	$N'_v = \frac{N_v}{0.5\rho L^3 u}$
3.2.103	$N'_\dot{v}$	转船水动力矩对横移加速度一阶导数的无因次系数	—	$N'_\dot{v} = \frac{N_{\dot{v}}}{0.5\rho L^4}$
3.2.104	$N'_{\delta r}$	转船水动力矩对方向舵舵角的线性导数的无因次系数	—	$N'_{\delta r} = \frac{N_{\delta r}}{0.5\rho L^3 u^2}$
3.2.105	N_j	二维剖面的广义法线分量	— m	$j = 2, 3$ $j = 4$
3.2.106	n_j	三维面元点的广义法线分量	— m	$j = 1, 2, 3$ $j = 4, 5, 6$
3.2.107	P	概率	%	
3.2.108	p, q, r	近水面运动横倾, 纵倾和转船角速度	$rad \cdot s^{-1}, (^\circ) \cdot s^{-1}$	
3.2.109	$\dot{p}, \dot{q}, \dot{r}$	近水面运动横倾, 纵倾和转船的角加速度	$rad \cdot s^{-2}, (^\circ) \cdot s^{-2}$	
3.2.110	R_k	第 k 个(对)序号附体所在艇剖面的半径	m	
3.2.111	R_k	第 k 个序号附体的面积中心距横摇轴的距离	m	
3.2.112	$R^{(1)}$	三维方法中一阶波浪力作用中心距坐标原点的距离	\cdot m	
3.2.113	$S_j(u, (\zeta_w)_{1\beta}, T_1, H_0, \beta, \omega_0)$	运动模式 j 的运动谱	$[j \text{ 模}]^2 \cdot s$	$j = 1, 2, 3 \text{ m}^2 \cdot s$ $j = 4, 5, 6 \text{ rad}^2 \cdot s$

表 1(续)

编号	量的符号	量的名称	单位符号	说明
3.2.114	$S_{\zeta}(\omega)$ 、 $S_w(\omega_0)$ 、 $S(\omega)$	海浪谱	$m^2 \cdot s$	
3.2.115	$S_{\zeta}(\omega, \mu)$	短峰海浪谱	$m^2 \cdot s$	
3.2.116	$S(\omega_0, \chi)$	短峰海浪谱	$m^2 \cdot s$	
3.2.117	$S((\zeta_w)_{1/3}, T_1, \omega_0)$	二参数海浪谱	$m^2 \cdot s$	
3.2.118	$S(x)$	艇 x 处剖面面积	m^2	
3.2.119	$S(k)$	第 k 个(对)序号附体的水平投影面积	m^2	
3.2.120	S_m	潜艇中部的横剖面面积	m^2	
3.2.121	S_L	艇体水下部份的侧面面积	m^2	
3.2.122	T_1	海浪平均周期	s	
3.2.123	T_p	谱峰周期	s	
3.2.124	T_v	目测的波浪周期	s	
3.2.125	t	时间	s	
3.2.126	U, U_0	航速、定常航速	$m \cdot s^{-1}$	
3.2.127	u, v, w	航速在 x、y、z 方向的分量	$m \cdot s^{-1}$	
3.2.128	\dot{u}	x 方向艇加速度	$m \cdot s^{-2}$	
3.2.129	V	航速	$m \cdot s^{-1}$	
3.2.130	V_s	艇速	kn	
3.2.131	v, \dot{v}	横移速度、加速度	$m \cdot s^{-1}, m \cdot s^{-2}$	
3.2.132	w, \dot{w}	垂向速度、加速度	$m \cdot s^{-1}, m \cdot s^{-2}$	
3.2.133	X, Y, Z	近水面运动中水动力在 x、y、z 轴的分量	N	
3.2.134	x_G	重心纵向坐标	m	
3.2.135	x^A	艇剖面的纵向坐标值	m	
3.2.136	x_R, y_R, z_R	给定计算点 R 的坐标值	m	
3.2.137	x, y, z	点的坐标值	m	
3.2.138	Y	横移水动力	N	
3.2.139	Y'_r	横移水动力对转艏角速度一阶导数的无因次系数	—	$Y'_r = \frac{Y_r}{0.5\rho L^3 u}$
3.2.140	Y'_i	横移水动力对转艏角加速度一阶导数的无因次系数	—	$Y'_i = \frac{Y_i}{0.5\rho L^4}$
3.2.141	Y'_p	横移水动力对横倾角速度一阶导数的无因次系数	—	$Y'_p = \frac{Y_p}{0.5\rho L^3 u}$
3.2.142	$Y'_\dot{p}$	横移水动力对横倾角加速度一阶导数的无因次系数	—	$Y'_\dot{p} = \frac{Y_p}{0.5\rho L^4}$

表 1(续)

编号	量的符号	量的名称	单位符号	说明
3.2.143	Y_v	横移水动力对横移速度一阶导数的无因次系数	—	$Y_v = \frac{Y_v}{0.5\rho L^2 u}$
3.2.144	$Y_{\dot{v}}$	横移水动力对横移加速度一阶导数的无因次系数	—	$Y_{\dot{v}} = \frac{Y_{\dot{v}}}{0.5\rho L^3}$
3.2.145	$Y'_{\delta r}$	横移水动力对方向舵舵角线性导数的无因次系数	—	$Y'_{\delta r} = \frac{Y_{\delta r}}{0.5\rho L^2 u^2}$
3.2.146	x_2, x_3	潜艇横向和垂向表观质量(质量加上附加质量)中心的纵坐标值	m	
3.2.147	X_{ij}^0	要求的艇体运动(模式 j)衡准规定值	$m, m \cdot s^{-1}, m \cdot s^{-2}$ $rad, rad \cdot s^{-1}, rad \cdot s^{-2}$	线位移、线速度、线加速度 角位移、角速度、角加速度
3.2.148	X_i^j	潜艇对应第 i 个波浪周期 T_i 下单位波高的(模式 j)运动响应	$rad \cdot m^{-1}, -$ $s^{-1}, s^{-2},$ $rad \cdot m^{-1}, -$ s^{-2}	$j = 1, 2, \dots, 7$ 分别对应纵摇、深度偏差、垂向速度、垂向加速度、横摇、横荡、横向加速度的运动响应
3.2.149	$Z(\delta)$	操舵引起的垂向力	N	
3.2.150	z_B	浮心垂向坐标	m	
3.2.151	z_G	重心垂向坐标	m	
3.2.152	Z_0^j	垂向水动力系数的无因次零态值	N	$Z_0^j = \frac{Z_0}{0.5\rho L^2 u^2}$
3.2.153	Z_q^j	垂向水动力对纵倾加速度一阶导数的无因次系数	—	$Z_q^j = \frac{Z_q^j}{0.5\rho L^4}$
3.2.154	$Z_{\dot{q}}^j$	垂向水动力对纵倾速度一阶导数的无因次系数	—	$Z_{\dot{q}}^j = \frac{Z_q^j}{0.5\rho L^3 u}$
3.2.155	$Z_{\dot{w}}^j$	垂向水动力对垂向加速度一阶导数的无因次系数	—	$Z_{\dot{w}}^j = \frac{Z_w^j}{0.5\rho L^3}$
3.2.156	Z_w^j	垂向水动力对垂向速度一阶导数的无因次系数	—	$Z_w^j = \frac{Z_w^j}{0.5\rho L^2 u}$
3.2.157	$Z'_{\delta b}$	垂向水动力对舵升降舵舵角线性导数的无因次系数	—	$Z'_{\delta b} = \frac{Z_{\delta b}}{0.5\rho L^2 u^2}$
3.2.158	$Z'_{\delta r}$	垂向水动力对舵升降舵舵角线性导数的无因次系数	—	$Z'_{\delta r} = \frac{Z_{\delta r}}{0.5\rho L^2 u^2}$
3.2.159	Z/ζ_a	垂荡规则响应	—	
3.2.160	β, β_s	相对浪向角	rad, (°)	顶浪为 180°
3.2.161	ΔB_{33}	水平附体垂荡升力项阻尼系数	$N \cdot m^{-1} \cdot s$	
3.2.162	$\Delta B_{35}, \Delta B_{53}$	水平附体纵摇垂荡耦合升力项阻尼系数	$N \cdot s$	
3.2.163	ΔB_{44}	指挥台围壳等附体横摇升力项阻尼系数	$N \cdot m \cdot s$	
3.2.164	ΔB_{55}	水平附体纵摇升力项阻尼系数	$N \cdot m \cdot s$	
3.2.165	ΔH	重心处潜深偏离	m	

表 1(续)

编号	量的符号	量的名称	单位符号	说明
3.2.166	ΔH_m	重心处潜深偏离允许值	m	
3.2.167	$\Delta\theta$	纵倾角偏离	rad、(°)	
3.2.168	$\Delta\theta_m$	纵倾角偏离允许值	rad、(°)	
3.2.169	$\Delta\omega_0$	波频积分元	rad·s ⁻¹	
3.2.170	δ_i	舵角	rad、(°)	$i = b, s, r$ 代表艏、艉、方向舵
3.2.171	δ_{bm}	最大艏升降(围壳)舵角	rad、(°)	
3.2.172	δ_{sm}	最大艉升降舵角	rad、(°)	
3.2.173	$\dot{\delta}_i$	转舵角速度	rad·s ⁻¹ 、(°)·s ⁻¹	$i = b, s, r$
3.2.174	δ_{imax}	最大转舵角速度	rad·s ⁻¹ 、(°)·s ⁻¹	$i = b, s, r$
3.2.175	ϵ_i	线性叠加时参数元的随机相位	rad	$i = 1$ 至 30
3.2.176	ϵ_j	规则波运动响应相位角	rad	$j = 1, 2, \dots, 6$
3.2.177	ϵ_{3h}	规则波垂荡响应相位角	rad	
3.2.178	ϵ_{5h}	规则波纵摇响应相位角	rad	
3.2.179	ζ	大地座标系的垂向座标	m	
3.2.180	ζ_a	规则波波幅	m	
3.2.181	$\bar{\zeta}_v$	目测波高	m	
3.2.182	$(\zeta_w)_{1/3}$	有义波高、三一浪高	m	
3.2.183	η_i, η_{in}	规则波中六个自由度的摇摆运动、运动单幅值	m rad、(°)	$j = 1, 2, 3$ $j = 4, 5, 6$
3.2.184	$\dot{\eta}_j$	规则波中六个自由度的摇摆速度;不规则波中近水面六个自由度的运动速度	m·s ⁻¹ rad·s ⁻¹	$j = 1, 2, 3$ $j = 4, 5, 6$
3.2.185	$\ddot{\eta}_j$	规则波中六个自由度的摇摆加速度;不规则波中近水面六个自由度的运动加速度	m·s ⁻² rad·s ⁻²	$j = 1, 2, 3$ $j = 4, 5, 6$
3.2.186	η_j	不规则波中近水面六个自由度的运动	m rad、(°)	$\eta_j = \tilde{\eta}_j + \eta_j^0(t)$ $j = 1, 2, 3$ $j = 4, 5, 6$
3.2.187	$\tilde{\eta}_j$	不规则波中近水面六个自由度的二阶运动平均值	m rad、(°)	$j = 1, 2, 3$ $j = 4, 5, 6$
3.2.188	$\eta_j^0(t)$	变潜深时艇体波频运动参数 η_j^0 的时间 t 瞬时值	m rad	$j = 1, 2, 3$ $j = 4, 5, 6$
3.2.189	$\ddot{\eta}_3$	波浪中近水面垂直面垂向加速度	m·s ⁻²	
3.2.190	$\ddot{\eta}_5$	波浪中近水面垂直面纵倾加速度	rad·s ⁻²	
3.2.191	$\dot{\eta}_5$	波浪中近水面垂直面纵倾速度	rad·s ⁻¹	

表 1(续)

编号	量的符号	量的名称	单位符号	说明
3.2.192	η_s	波浪中近水面垂直面纵倾角位移	rad	
3.2.193	θ, ϕ, ψ	纵倾、横倾、转艏角度	rad, (°)	
3.2.194	$\dot{\theta}$	纵倾角速度	rad·s ⁻¹	
3.2.195	$\ddot{\theta}$	纵倾角加速度	rad·s ⁻²	
3.2.196	$\theta/K\zeta_n$	无因次纵摇规则响应	—	
3.2.197	λ/L	波长船长比	—	
3.2.198	μ	短峰海浪的成份波与主浪向夹角	rad	$\mu \in (-\pi/2, \pi/2)$
3.2.199	2μ	无因次横摇衰减系数	—	$2\mu = \frac{B_{44}}{\sqrt{A_{44}^* \cdot C_{44}}}$
3.2.200	ν	水的运动粘性系数	m ² ·s ⁻¹	
3.2.201	ρ	水密度	kg·m ⁻³	
3.2.202	σ, σ^2	标准差、方差	—	$\sigma_i = \sqrt{m_{0i}}$ $\sigma_i^2 = m_{0i}$
3.2.203	σ_i	艏舵(围壳舵)、艉水平舵及方向舵的控制信号	rad	$i = b, s, r$
3.2.204	σ_{i1}	舵装置不灵敏区域的上限	rad	
3.2.205	σ_{i2}	舵装置比例区域的上限	rad	
3.2.206	σ_j	三维方法源分布强度	—	$\sigma_j = \sigma_{j0} + \tau\sigma_{j1}$
3.2.207	σ_{j0}	三维方法源分布强度(零航速)	—	
3.2.208	σ_{j1}	三维方法源分布强度(航速修正)	—	
3.2.209	τ	三维频域法中格林函数 G 和源分布函数 σ 的航速修正项的系数	—	$G = G_0 + \tau G_1$ $\sigma = \sigma_0 + \tau\sigma_1$
3.2.210	$\phi, \dot{\phi}, \ddot{\phi}$	横摇(倾)角位移、角速度和角加速度	rad, (°) rad·s ⁻¹ , (°)s ⁻¹ rad·s ⁻² , (°)s ⁻²	$\frac{d\phi}{dt} = \dot{\phi}, \frac{d^2\phi}{dt^2} = \ddot{\phi}$
3.2.211	φ_j	STF 方法柱体振荡的二维速度势	m·s ⁻¹	$j = 2, 3, 4$
3.2.212	χ	组合波波向与主浪向夹角	rad	$\chi \in (-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2})$
3.2.213	ψ	航向角、艏摇角、转艏角	rad, (°)	
3.2.214	$\dot{\psi}$	航向角速度、艏摇角速度	rad·s ⁻¹	
3.2.215	ω	圆频率	rad·s ⁻¹	
3.2.216	ω_c	遭遇频率	rad·s ⁻¹	
3.2.217	ω_0	波浪圆频率	rad·s ⁻¹	
3.2.218	ω_{0i}	成份波 i 圆频率	rad·s ⁻¹	
3.2.219	∇	相应状态下艇的全排水体积	m ³	

注: 1) 表中上标“ \cdot ”表示无因次的专用上标。
2) 表中单位符号栏中“—”表示该符号为无因次符号, 或符号单位需要根据具体问题确定。

4 一般要求

4.1 环境条件

4.1.1 风

4.1.1.1 风级规定见表 2,风压力计算按附录 A(补充件)的 A1.1 规定。

表 2

m/s

风 级	名 称	平均风速范围(海平面上 10m 处)
0	无 风	0.0~0.2
1	软 风	0.3~1.5
2	轻 风	1.6~3.3
3	微 风	3.4~5.4
4	和 风	5.5~7.9
5	清 风	8.0~10.7
6	强 风	10.8~13.8
7	疾 风	13.9~17.1
8	大 风	17.2~20.7
9	烈 风	20.8~24.4
10	狂 风	24.5~28.4
11	暴 风	28.5~32.6
12	飓 风	>32.6

4.1.1.2 风速的标准时距规定为 10min。

4.1.1.3 风速的标准高度为海平面以上 10m,若风的测定点高度不是 10m,按公式(4.1)修正:

$$U_z = U_{10}(Z/10)^{1/8} \dots \dots \dots (4.1)$$

式中:

U_z ——距海平面 Z 处的风速值, $m \cdot s^{-1}$;

U_{10} ——距海平面 10m 处的风速值, $m \cdot s^{-1}$;

Z ——风作用点距海平面的高度, m。

4.1.2 浪

4.1.2.1 浪高的标准统计值规定为三分之一最大浪高的平均值,简称有义波高,取符号为 $(\zeta_w)_{1/3}$, m。

4.1.2.2 浪高的分级按表 3。

表 3

m

浪 级	名 称	有 义 波 高 $(\zeta_w)_{1/3}$
0	无 浪	0.00
1	微 浪	>0.00~<0.10
2	小 浪	0.10~<0.50
3	轻 浪	0.50~<1.25
4	中 浪	1.25~<2.50
5	大 浪	2.50~<4.00

表 3(续)

m

浪 级	名 称	有 义 波 高 $(\zeta_w)_{1/3}$
6	巨 浪	4.00 ~ <6.00
7	狂 浪	6.00 ~ <9.00
8	狂 涛	9.00 ~ <14.00
9	怒 涛	≥ 14.00

4.1.2.3 有义波高 $(\zeta_w)_{1/3}$ 与浪高的其它统计值可分别按公式(4.2)~公式(4.8)换算:

$$(\zeta_w)_\sigma = 0.707(\zeta_w)_{1/3} \dots\dots\dots (4.2)$$

$$(\zeta_w)_{1/10} = 1.27(\zeta_w)_{1/3} \dots\dots\dots (4.3)$$

$$(\zeta_w)_{3\%} = 1.32(\zeta_w)_{1/3} \dots\dots\dots (4.4)$$

$$(\zeta_w)_{0.1\%} = 1.86(\zeta_w)_{1/3} \dots\dots\dots (4.5)$$

$$(\zeta_w)_{1/1000} = 1.94(\zeta_w)_{1/3} \dots\dots\dots (4.6)$$

$$(\zeta_w)_{1/2000} = 2.02(\zeta_w)_{1/3} \dots\dots\dots (4.7)$$

$$(\zeta_w)_{1/5000} = 2.13(\zeta_w)_{1/3} \dots\dots\dots (4.8)$$

式中:

$(\zeta_w)_\sigma$ ——波高的均方根值, m;

$(\zeta_w)_{1/10}$ ——1/10 最大波高的平均值、十一浪高, m;

$(\zeta_w)_{3\%}$ ——3% 保证率浪高值, m;

$(\zeta_w)_{0.1\%}$ ——0.1% 保证率浪高值, m;

$(\zeta_w)_{1/1000}$ ——1000 个振荡中最大浪高的期望值, m;

$(\zeta_w)_{1/2000}$ ——2000 个振荡中最大浪高的期望值, m;

$(\zeta_w)_{1/5000}$ ——5000 个振荡中最大浪高的期望值, m。

4.1.2.4 开阔海域长峰海浪谱按公式(4.9)计算,其波浪平均周期按公式(4.10)或公式(4.11)计算:

$$S_\zeta(\omega) = \frac{173(\zeta_w)_{1/3}^2}{\omega^5 T_1^4} \exp\left(\frac{-691}{\omega^4 T_1^4}\right) \dots\dots\dots (4.9)$$

$$T_1 = 2\pi \int_0^\infty S_\zeta(\omega) d\omega / \int_0^\infty \omega S_\zeta(\omega) d\omega \dots\dots\dots (4.10)$$

$$T_1 = 2\pi m_0 / m_1 \dots\dots\dots (4.11)$$

4.1.2.5 在用有义波高 $(\zeta_w)_{1/3}$ 和谱峰周期 T_p 为特征参数表征海浪时,公式(4.10)中的平均周期 T_1 与谱峰周期 T_p 之间的关系,按公式(4.12)换算:

$$T_1 = 0.7717 T_p \dots\dots\dots (4.12)$$

4.1.2.6 短峰海浪谱可由长峰海浪谱与方向扩散函数按公式(4.13)计算:

$$S_\zeta(\omega, \mu) = \Phi(\mu) \cdot S_\zeta(\omega) \dots\dots\dots (4.13)$$

4.1.2.7 在缺乏海浪方向扩散函数实际资料时,采用公式(4.14)表达的方向扩散函数:

$$\Phi(\mu) = \frac{2}{\pi} \cos^2 \mu \dots\dots\dots (4.14)$$

式中:

$\mu \in (-\pi/2, \pi/2)$ 。

4.1.2.8 采用目测波浪统计资料进行预报时,应将目测波高 $\bar{\zeta}_v$ 和目测的波浪周期 T_v 转换成有义波高 $(\zeta_w)_{1/3}$ 和海浪平均周期 T_1 或谱峰周期 T_p 。在无换算关系的实际资料时,可按公式(4.15)和公式(4.

16) 计算:

$$(\zeta_w)_{1/3} = 1.68(\bar{\zeta}_v)^{0.75} \dots\dots\dots (4.15)$$

$$T_1 = 0.82 T_v \dots\dots\dots (4.16)$$

4.1.3 海洋风、浪、浪高、周期对应关系及海浪平均资料

在缺乏潜艇活动海域的实测海浪资料和风、浪、浪高、波浪周期的对应关系资料时,北半球大洋海浪年平均统计资料可按附录 A 表 A.2 资料确定,西北太平洋各海区海浪平均统计资料可参见国防工业出版社 1996 年 5 月出版的《西北太平洋波浪统计集》。

4.2 坐标系规定

4.2.1 波频运动计算

耐波性波频运动计算采用固定在艇体上的右手直角坐标系 $Oxyz$,近水面计算时原点 O 可取在艇体重心处, Ox 轴平行于基线、艏向为正, Oz 轴向上为正, Oy 轴垂直于 Oxz 平面按右手直角坐标系确定 y 轴正向。

水面状态时耐波性波频运动计算的坐标原点 O 取在 z 轴与静水面交点处, Oxy 面与静水面重合。

沿 x 轴线运动为纵荡 η_1 ,沿 y 轴线运动为横荡 η_2 ,沿 z 轴线运动为垂荡 η_3 ,绕 x 轴角运动为横摇 η_4 ,绕 y 轴角运动为纵摇 η_5 ,绕 z 轴角运动为艏摇 η_6 。

坐标系与位移的规定见图 4.1。

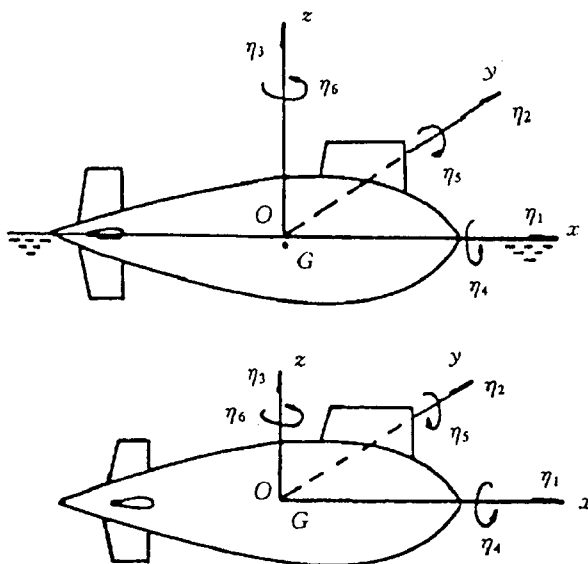


图 4.1 潜艇水面近水面耐波性坐标系与位移规定示意图

4.2.2 低频非线性运动计算

近水面耐波性低频非线性运动计算的坐标系包括大地坐标系和艇体坐标系。大地右手直角坐标系 $E\xi\eta\zeta$ 的原点设在无风静水面处, $E\zeta$ 轴铅垂指向地心。艇体右手直角坐标系 $Oxyz$ 原点 O 在潜艇重心处, Ox 轴平行于基线、艏向为正, Oz 轴垂直水线面指向基线, Oy 轴垂直于 Oxz 平面按右手系确定 y 轴正向。艇体坐标系 $Oxyz$ 原点 O 在大地坐标系 $E\xi\eta\zeta$ 中的坐标值为 ξ 、 η 、 ζ 。

沿 x 轴线运动为纵向位移,沿 y 轴线运动为横向位移,沿 z 轴线运动为垂向位移(深度偏离),绕 x 轴角运动为横倾,绕 y 轴角运动为纵倾,绕 z 轴角运动为转船(航向偏离)。

坐标系的规定见图 4.2。

4.3 耐波性计算中表征海浪的规定

4.3.1 凡涉及计算的有关文件中,应明确规定海浪等级所对应的有义波高值 $(\zeta_w)_{1/3}$,不给出有义波高值时,则理解为取上限值。同时,还应明确给出对应的海浪平均周期 T_1 (或谱峰周期 T_p)值或范围。

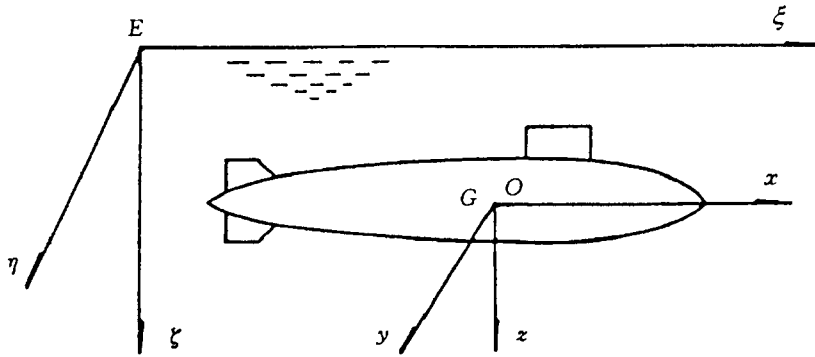


图 4.2 近水面低频非线性运动坐标系规定示意图

4.3.2 在计算中,若给定有义波高而未给出海浪周期值(范围)时,可对海浪平均周期 T_1 由 4~20s 范围内选取若干值进行计算。

4.3.3 在计算中,若未指定海浪谱时,一般可采用长峰两参数海浪谱,见公式(4.9),并采用公式(4.14)的扩展函数计算短峰波海浪谱。

4.4 耐波性计算结果的表达形式

计算的结果一般按实船状态表达。

4.4.1 波频运动

4.4.1.1 规则波中波频运动计算结果,根据计算参数分别按航行状态(水面、近水面)、航速、相对浪向,用无因次的规则波运动~波浪频率的响应曲线图或表列的形式给出:

无因次线位移	$Z/\zeta_a \sim \omega_0 \sqrt{L/g}$
无因次角位移	$\theta/K\zeta_a \sim \omega_0 \sqrt{L/g}$
无因次线加速度	$aL/g\zeta_a \sim \omega_0 \sqrt{L/g}$
无因次波浪圆频率	$\omega_0 \sqrt{L/g}$

其中: Z, θ, a 表示相应规则波波频运动的线位移、角位移和点的线加速度响应的幅值; ζ_a 为规则波波幅; K 为波数; ω_0 为波浪圆频率; L 为艇长; g 为重力加速度。

4.4.1.2 不规则波(模拟海况)计算结果给出的运动参数统计值,可按航行状态、航速、相对浪向、海况(有义波高、波浪周期)等工况组合,以曲线图或列表的形式给出。运动参数统计值一般以其有义单幅值的形式给出。

4.4.2 波浪力和力矩

4.4.2.1 规则波中潜艇波浪力和力矩的计算结果,可用无因次的波浪力(力矩)~波浪频率的形式表达;也可以波浪力(力矩)的响应~无因次波浪频率曲线的形式给出。可分别按航行状态、航速、相对浪向的工况组合以曲线图或表列形式表达。

无因次波浪力	$F^{(1)}/(\rho g \zeta_a (0.5B)^2), \bar{F}^{(2)}/(\rho g \zeta_a^2 (0.5B)) \sim \omega_0 \sqrt{L/g}$
波浪力规则响应	$F^{(1)}/\zeta_a, F^{(2)}/\zeta_a^2 \sim \omega_0 \sqrt{L/g}$
无因次波浪力矩	$M^{(1)}/(\rho g \zeta_a (0.5B)^3), \bar{M}^{(2)}/(\rho g \zeta_a^2 (0.5B)^2) \sim \omega_0 \sqrt{L/g}$
波浪力矩规则响应	$M^{(1)}/\zeta_a, \bar{M}^{(2)}/\zeta_a^2 \sim \omega_0 \sqrt{L/g}$
无因次波浪圆频率	$\omega_0 \sqrt{L/g}$

其中: F, M 为波浪力和力矩幅值,上标(1)为一阶波浪力(力矩),上标(2)及“-”为二阶平均波浪力(力矩); B 为潜艇艇宽。

4.4.2.2 不规则波浪力和力矩计算得出的时域解,可分别按航行状态、航速、相对浪向和海浪等工况组合将其时间历程用曲线图或列表的形式给出。不规则波中波浪力(矩)结果也可用统计值(波频波浪力)和平均值(二阶波浪力)表示,即用有义单幅值和平均值分别表示一定海况下的波浪力与力矩所述的两种成分。

4.4.3 波浪中近水面航行垂直面定深运动稳定性

波浪中近水面航行时垂直面定深运动稳定性计算结果按限界曲线和时域曲线方式表达。

4.4.3.1 波浪中垂直面定深运动稳定性限界曲线以潜深 H_0 或潜深 H_0 与型深 D 之比为纵轴,相对浪向 β_r 为横轴,按浪级 ($(\zeta_w)_{1/3}, T_1$)、航速组合采用图 4.3 形式所示的潜深限界曲线表达。曲线上方的潜深区为定深运动不稳定区,曲线下方的潜深区为定深运动稳定区。

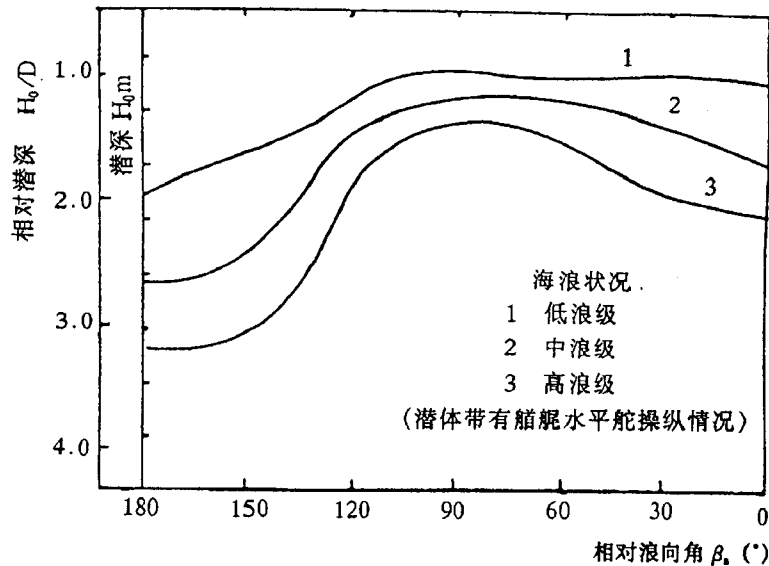


图 4.3 垂直面定深运动稳定性限界曲线

4.4.3.2 潜深变化的时域曲线以潜深 H_0 为纵轴,时间为横轴,对浪级(有义波高和波浪平均周期)、航速、浪向组合工况,采用图 4.4 形式所示的以初始潜深为起点的潜深变化时间历程曲线表达。

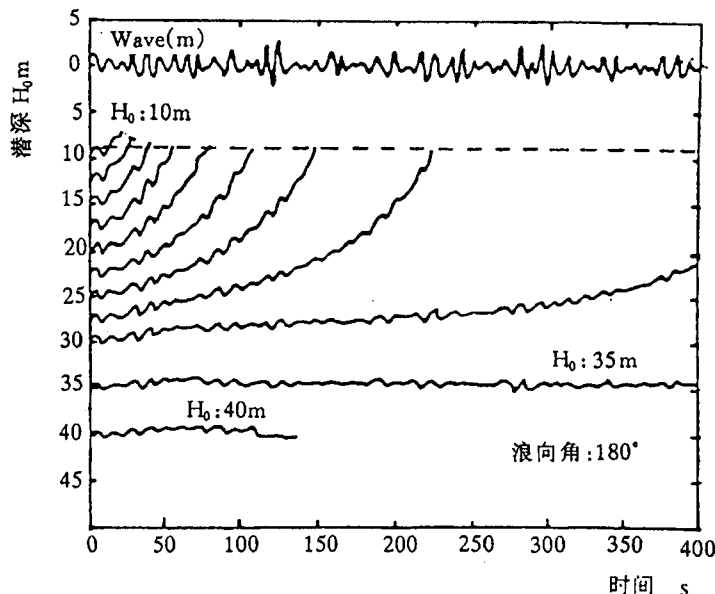


图 4.4 潜深变化的时域曲线

4.4.4 非线性事件

耐波性非线性事件计算结果得出的发生概率或频度(单位时间发生次数),可分别按航行状态、航速、相对浪向、有义波高、波浪平均周期等的工况组合用列表或曲线图的形式表达。

4.4.5 波浪中近水面作业概率预报

波浪中近水面作业概率计算结果得出潜艇的作业概率,可按规定的环境条件和航行条件以列表或曲线图的形式表达。

4.4.6 耐波性预报的可视化表达

在条件许可情况下,对近水面垂直面潜艇波浪中运动参数的时域过程计算结果进行计算机屏幕可视化表达,特别是定深运动稳定性检验中是否存在上浮露出水面现象的过程显示。

4.5 耐波性理论预报

4.5.1 环境条件

耐波性理论预报中使用的环境条件应尽可能采用潜艇主要活动海域的实测统计资料。在缺乏实测海浪资料时,可采用 4.1 规定的资料。

4.5.2 基本假定

4.5.2.1 潜艇为左右对称的细长体,横向运动和纵向运动彼此独立,运动方程可分解成由垂荡(移)和纵摇(倾)组成的纵向运动方程和由横荡(移)、横摇(倾)、艏摇(转艏)组成的横向运动方程。

4.5.2.2 潜艇在波浪中的运动与水动力以及波浪力等均是波频成分和低频成分叠加组成。

4.5.2.3 在一定的波高范围条件下,潜艇的波频运动响应与有义波高成线性关系。

4.5.2.4 波浪中潜艇近水面低频非线性运动的时间历程,采用时间步进方法通过对时间间隔 Δt 的运动方程的数值积分运算逐步形成。

4.5.3 波频运动预报的要求和要点

4.5.3.1 采用 STF 理论方法计算规则波中水面、近水面潜艇横荡、垂荡、横摇、纵摇、艏摇五个自由度的波频运动响应。纵荡运动可用元良诚三方法计算。

4.5.3.2 采用 Frank 精密拟合源分布方法求取相应状态潜艇剖面振荡模式的势流流体动力(附加质量与阻尼系数)和波浪扰动力系数;

4.5.3.3 潜艇的计算剖面不宜少于 25 个,剖面形状采用包含附体线型在内的剖面轮廓。附体对水动力粘性成份的影响另加考虑。

4.5.3.4 对艇体运动中的粘性成份的影响,主要限于横摇阻尼。

4.5.3.5 横摇阻尼值应采用实测和模型试验资料。在缺乏实测和模型试验资料时可采用经验公式估算,并计入主艇体和附体的升力项阻尼。

4.5.3.6 理论计算潜艇的横摇阻尼,由兴波、兴涡、粘性和升力项等成分叠加组成。

4.5.3.7 横摇(阻尼)的非线性性质要求采用迭代法求解横向运动方程组。

4.5.3.8 计算采用的潜艇的稳性高和转动惯量值应保证足够的准确度。

4.5.3.9 计算航速应包含巡航航速和使用武器的航速。计算浪向一般为 180° (顶浪)至 0° (顺浪),间隔 30° 。在规则波运动响应计算中,规则波波高一般取五分之一艇长。

4.5.3.10 不规则波中运动响应的计算采用线性叠加原理。通过计算海区的海浪谱与规则波中运动响应的运算得到不规则波中运动参数的统计特征值。

4.5.3.11 计算螺旋桨出水,可取其距顶部 $1/3$ 直径处露出水面的发生概率来表征。

4.5.3.12 除使用实际海区的海浪谱资料外,一般采用国际船模水池会议推荐的海浪谱,并采用两参数谱和短峰波的扩展函数。

4.5.3.13 采用非本文推荐的计算方法时应经过试验验证的考核。

4.5.4 近水面低频非线性运动预报的要求和要点

4.5.4.1 采用模型试验(如平面运动机构 PMM、悬臂回转水池等)或其他方法获取近水面潜深变化时的低频操纵运动方程的各项流体动力系数值。

- 4.5.4.2 采用理论计算方法求取变深度时的平均二阶波浪力与力矩响应和附加质量系数。
- 4.5.4.3 对于给定潜深、海浪(浪高和波浪平均周期)、航速、相对浪向时作用于潜艇的二阶波浪力,可用相应成份波的贡献叠加获得。
- 4.5.4.4 二阶波浪力及其他作用力(如导弹发射时的反力、水舱均衡力、操舵舵力等)作用下的潜艇低频慢变运动的时间历程采用时间步进的微分方程数值积分方法求解获得。
- 4.5.4.5 在潜艇低频慢变运动的时间历程计算中,应考虑潜深变化情况下各瞬时的波频运动对低频运动的耦合影响。
- 4.5.4.6 在潜艇近水面低频慢变运动的时间历程计算中,采用给定的深度偏离和纵倾偏离范围值作为其运动稳定性判别的指标。

4.5.5 耐波性理论预报内容

耐波性预报(根据需要)一般应对水面航行状态、近水面航行状态和其它需要预报的航行状态(如半潜状态)进行。

4.5.5.1 波频运动预报要素一般为:纵摇、垂荡、纵荡、横摇、横荡、艏摇(包括相应的位移、速度、加速度),以及艏部、舯部(重心处)、艉部或指定位置处的垂向和横向加速度等。

4.5.5.2 非线性事件预报的要素一般为:水面状态时的艏部甲板上浪、艏底砰击和出水以及螺旋桨出水,近水面航行时的通气管浮阀上浪、指挥台顶及围壳舵出水、艇体露背等。非线性要素可用其出现概率、频度(单位时间发生次数)和强度量值表示。

4.5.5.3 波浪中近水面垂直面运动及定深稳定性预报内容为:由于二阶波浪力引起的潜艇近水面运动预报;综合考虑波浪力、操纵控制力(舵力,水舱排注水作用力)影响和波频运动耦合作用的非线性运动参数的时间历程,以及对潜艇垂直面定深运动稳定性的评估。

4.5.5.4 波浪中近水面极低速运动性能预报一般包括潜艇波浪中近水面低速航行和导弹发射时综合二阶波浪力、操纵控制力(舵力,水舱排注水)、导弹发射作用力等低频力的作用,并考虑波频运动等耦合影响的非线性运动预报、垂直面定深运动稳定性的评估及作业概率的估算等。

4.5.5.5 波浪中作业概率预报一般包括潜艇在规定的环境和航行条件下运动参数满足给定的作业条件的可作业时间(作业窗口)概率的估算。

5 水面和近水面波频运动计算方法

5.1 数学模型

满足 4.5.2 的基本假定和 4.5.3 的要求和要点。

5.1.1 假定横向运动(横荡、横摇、艏摇)和纵向运动(纵荡、纵摇、垂荡)相互独立分别处理的原则,适用于潜艇水面、半潜和水下近水面状态的波频运动预报。

5.1.2 运动方程、流体动力系数和波浪扰动力的表达形式采用 STF 方法的体系,并可考虑航速和艇体艏艉端面的影响。

5.1.3 剖面的二维流体动力和波浪力系数采用 Frank 源分布法计算。

5.1.4 计算中流体动力的粘性成分只考虑其对横摇阻尼的影响。艇体及附体的横摇阻尼由兴波、粘性、兴涡和升力项等成分叠加组成;当缺乏实船或模型资料时可采用半经验的估算方法计算艇体和附体的横摇阻尼。

5.1.5 近水面波频运动计算中,采用一般舰船耐波性计算假定,忽略操纵系统工作对艇体运动的影响,假定潜艇在近水面时作定深常速航行,在波频波浪力作用下产生摇摆运动。

5.1.6 波频运动计算中,根据需要可考虑操舵对艇体运动的影响。包括自动操舵和舵减横摇效果的预报。

5.1.7 不规则波中运动响应的计算,应用线性叠加原理。除使用实际海区的海浪谱资料外,一般采用 ITTC 两参数海浪谱和扩展函数形式。在计算响应的统计值时,采用狭谱假定。

5.2 计算内容

5.2.1 各种潜深状态和摇摆频率下剖面的二因次流体动力(附加质量、阻尼系数)和水压力分布,艇体水动力系数及波浪力。

5.2.2 各种航速和相对浪向下,艇体对规则波的运动、速度和加速度响应。

5.2.3 不同海浪特征周期和有义波高下艇体运动的统计值。以及指定位置处的运动、速度和加速度统计值。

5.2.4 水面状态航行时的上浪、砰击、出水概率或频度,给定位置处相对波面运动。近水面状态航行时的给定位置的出水等。

5.3 计算方法

5.3.1 波频运动方程的一般表达式

潜艇在规则波中的六个自由度运动为 $\eta_j (j = 1, 2, \dots, 6)$, 分别为纵荡、横荡、垂荡、横摇、纵摇和首摇, 运动方程的一般表达式按公式(5.1):

$$\sum_{k=1}^6 [(M_{jk} + A_{jk})\ddot{\eta}_k + B_{jk}\dot{\eta}_k + C_{jk}\eta_k] = F_j e^{i\omega t} + F_{jR} e^{i\omega t}; j = 1, 2, \dots, 6 \dots\dots\dots (5.1)$$

具有横向对称性, 重心位于 $(0, 0, z_G)$ 的潜艇, 在水面状态时广义质量矩阵按公式(5.2)表述:

$$M_{jk} = \begin{bmatrix} M & 0 & 0 & 0 & M \cdot z_G & 0 \\ 0 & M & 0 & -M \cdot z_G & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -M \cdot z_G & 0 & I_4 & 0 & -I_{46} \\ M \cdot z_G & 0 & 0 & 0 & I_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -I_{46} & 0 & I_6 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (5.2)$$

对于水下状态, 当运动坐标系原点放在重心 G 上时相应的 z_G 取为零。

横向对称的潜艇其附加质量 A_{jk} (和阻尼系数 B_{jk}) 系数矩阵按公式(5.3)表述:

$$A_{jk} = \begin{bmatrix} A_{11} & 0 & A_{13} & 0 & A_{15} & 0 \\ 0 & A_{22} & 0 & A_{24} & 0 & A_{26} \\ A_{31} & 0 & A_{33} & 0 & A_{35} & 0 \\ 0 & A_{42} & 0 & A_{44} & 0 & A_{46} \\ A_{51} & 0 & A_{53} & 0 & A_{55} & 0 \\ 0 & A_{62} & 0 & A_{64} & 0 & A_{66} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (5.3)$$

$$B_{jk} = \begin{bmatrix} B_{11} & 0 & B_{13} & 0 & B_{15} & 0 \\ 0 & B_{22} & 0 & B_{24} & 0 & B_{26} \\ B_{31} & 0 & B_{33} & 0 & B_{35} & 0 \\ 0 & B_{42} & 0 & B_{44} & 0 & B_{46} \\ B_{51} & 0 & B_{53} & 0 & B_{55} & 0 \\ 0 & B_{62} & 0 & B_{64} & 0 & B_{66} \end{bmatrix}$$

对于潜艇水面状态, 非零的线性流体静力回复系数仅有 C_{33} 、 C_{44} 、 C_{55} 、 C_{35} 和 C_{53} 项, 且 C_{35} 等于 C_{53} 。对于水下状态, 非零的回复系数只有 C_{44} 和 C_{55} 项, 且 C_{55} 和 C_{44} 等于 $D \cdot \overline{GC}$, 其中 \overline{GC} 为重心与浮心的垂向距离, D 为水下状态的排水量。

5.3.2 纵向运动方程及系数的表达

5.3.2.1 纵向运动方程

在考虑操舵(鳍)情况下, 水面和水下状态潜艇纵向运动方程均可由公式(5.4)和公式(5.5)表达:

$$(M + A_{33})\ddot{\eta}_3 + B_{33}\dot{\eta}_3 + C_{33}\eta_3 + A_{35}\ddot{\eta}_5 + B_{35}\dot{\eta}_5 + C_{35}\eta_5 = F_3 e^{i\omega t} + F_{3R} e^{i\omega t} \dots\dots\dots (5.4)$$

$$A_{53}\ddot{\eta}_3 + B_{53}\dot{\eta}_3 + C_{53}\eta_3 + (I_5 + A_{55})\ddot{\eta}_5 + B_{55}\dot{\eta}_5 + C_{55}\eta_5 = F_5 e^{i\omega t} + F_{5R} e^{i\omega t} \dots\dots\dots (5.5)$$

其中,水面状态时,一般不操升降舵并忽略垂直舵的影响则 F_{3R} 和 F_{5R} 取为零;水下状态定深航行时分别为升降舵舵力、力矩的 F_{3R} 、 F_{5R} 以及 C_{33} 、 C_{35} 、 C_{53} 均取为零, C_{55} 等于 $D \cdot \overline{GC}$ 。

5.3.2.2 纵向运动方程系数表达式

采用 STF 方法,则公式(5.4)、公式(5.5)中的系数表达式分别为公式(5.6)~公式(5.16),式中的积分沿艇长进行。

$$\left. \begin{aligned} A_{33} &= A_{33}^0 - \frac{U}{\omega^2} b_{33}^A \\ A_{33}^0 &= \int a_{33} d\xi \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5.6)$$

$$\left. \begin{aligned} B_{33} &= B_{33}^0 + U a_{33}^A \\ B_{33}^0 &= \int b_{33} d\xi \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5.7)$$

$$A_{35} = - \int \xi a_{33} d\xi - \frac{U}{\omega^2} B_{33}^0 + \frac{U}{\omega^2} x_A b_{33}^A - \frac{U^2}{\omega^2} a_{33}^A \dots\dots\dots (5.8)$$

$$B_{35} = - \int \xi b_{33} d\xi + U A_{33}^0 - U x_A a_{33}^A - \frac{U^2}{\omega^2} b_{33}^A \dots\dots\dots (5.9)$$

$$A_{53} = - \int \xi a_{33} d\xi + \frac{U}{\omega^2} B_{33}^0 + \frac{U}{\omega^2} x_A b_{33}^A \dots\dots\dots (5.10)$$

$$B_{53} = - \int \xi b_{33} d\xi - U A_{33}^0 - U x_A a_{33}^A \dots\dots\dots (5.11)$$

$$A_{55} = \int \xi^2 a_{33} d\xi + \frac{U^2}{\omega^2} A_{33}^0 - \frac{U}{\omega^2} x_A^2 b_{33}^A + \frac{U^2}{\omega^2} x_A a_{33}^A \dots\dots\dots (5.12)$$

$$B_{55} = \int \xi^2 b_{33} d\xi + \frac{U^2}{\omega^2} B_{33}^0 + U x_A^2 a_{33}^A + \frac{U^2}{\omega^2} x_A b_{33}^A \dots\dots\dots (5.13)$$

$$C_{33} = \rho g \int b d\xi \dots\dots\dots (5.14)$$

$$C_{35} = C_{53} = - \rho g \int \xi b d\xi \dots\dots\dots (5.15)$$

$$C_{55} = \rho g \int \xi^2 b d\xi + \rho g \nabla (z_B - z_G) \dots\dots\dots (5.16)$$

式中:

ω ——遭遇频率, $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$;

x_A ——潜艇最后一个横剖面的纵坐标, m;

a_{33}^A 和 b_{33}^A ——最后剖面的附加质量和阻尼系数, $\text{N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^2$ 和 $\text{N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}$;

b ——潜艇剖面(水线面处)宽度, m;

z_B ——艇浮心垂向坐标, m;

z_G ——艇重心垂向坐标, m;

另外,若考虑潜艇附体的升力项阻尼影响,参见 5.3.4.3 条规定。

5.3.2.3 纵向运动方程中一阶波浪力和力矩的表达

波浪扰动力(力矩)的复振幅按公式(5.17)、公式(5.18)计算。其中剖面的傅汝德——克雷洛夫力函数按公式(5.19)计算,剖面的绕射力函数按公式(5.20)计算。

$$F_3 = \rho \zeta_a \int (f_3 + h_3) d\xi + \rho \zeta_a \frac{U}{i\omega} h_3^A \dots\dots\dots (5.17)$$

$$F_5 = -\rho \zeta_a \int [\xi(f_3 + h_3) + \frac{U}{i\omega} h_3] d\xi - \rho \zeta_a \frac{U}{i\omega} x_A h_3^A \dots\dots\dots (5.18)$$

$$f_3(x) = g e^{-ikx \cos \beta} \int_{C_x} N_3 e^{iky \sin \beta} e^{kz} dl \dots\dots\dots (5.19)$$

$$h_3(x) = \omega_0 e^{-ikx \cos \beta} \int_{C_x} (iN_3 - N_2 \sin \beta) e^{iky \sin \beta} e^{kz} \varphi_3 dl \left. \dots\dots\dots (5.20) \right\}$$

$$\omega_0 = \omega + kU \cos \beta$$

式中:

F_3, F_5 ——波浪扰动力(力矩)的复振幅, $N(N \cdot m)$;

$f_3(x)$ ——剖面的傅汝德——克雷洛夫力函数, $m^2 \cdot s^{-2}$;

$h_3(x)$ ——剖面的绕射力函数, $m^2 \cdot s^{-2}$;

h_3^A ——最后剖面的 h_3 值, $m^2 \cdot s^{-2}$;

N_2 ——二因次剖面的单位外法线矢量在 Y 方向的分量;

N_3 ——二因次剖面的单位外法线矢量在 Z 方向的分量;

φ_3 ——具有与横剖面 C_x 相同形状的柱体在自由表面上或相应潜深处作垂荡时的二因次速度势 $m \cdot s^{-1}$ 。

潜艇剖面处于不同潜深状态时, 流体动力系数 a_{33}, b_{33} 及速度势 φ_3 的计算, 可采用 Frank 源分布法进行。

5.3.2.4 纵向运动方程中能力的计算

公式(5.4)和公式(5.5)中, 水下状态操舵(升降舵)的流体动力 F_{3R} 和 F_{5R} 可通过基于模型试验的经验公式估算, 一般波频运动计算时, F_{3R} 和 F_{5R} 取为零。

5.3.3 横向运动方程及系数的表达

5.3.3.1 横向运动方程

在考虑操舵的情况下, 潜艇水面和水下的横向运动方程按公式(5.21)~公式(5.23)表达:

$$(A_{22} + M) \ddot{\eta}_2 + B_{22} \dot{\eta}_2 + (A_{24} - Mz_G) \ddot{\eta}_4 + B_{24} \dot{\eta}_4 + A_{26} \ddot{\eta}_6 + B_{26} \dot{\eta}_6 = F_2 e^{i\omega t} + F_{2R} e^{i\omega t} \dots\dots\dots (5.21)$$

$$(A_{42} - Mz_G) \ddot{\eta}_2 + B_{42} \dot{\eta}_2 + (A_{44} + I_4) \ddot{\eta}_4 + B_{44} \dot{\eta}_4 + C_{44} \eta_4 + (A_{46} - I_{46}) \ddot{\eta}_6 + B_{46} \dot{\eta}_6 = F_4 e^{i\omega t} + F_{4R} e^{i\omega t} \dots\dots\dots (5.22)$$

$$A_{62} \ddot{\eta}_2 + B_{62} \dot{\eta}_2 + (A_{64} - I_{64}) \ddot{\eta}_4 + B_{64} \dot{\eta}_4 + (A_{66} + I_6) \ddot{\eta}_6 + B_{66} \dot{\eta}_6 = F_6 e^{i\omega t} + F_{6R} e^{i\omega t} \dots\dots\dots (5.23)$$

5.3.3.2 横向运动方程系数表达式

采用 STF 方法, 则公式(5.21)~公式(5.23)中的水动力系数表达式分别为公式(5.24)~公式(5.40), 式中积分沿艇长进行。

$$\left. \begin{aligned} A_{22} &= A_{22}^0 - \frac{U}{\omega^2} b_{22}^A \\ A_{22}^0 &= \int a_{22} d\xi \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5.24)$$

$$\left. \begin{aligned} B_{22} &= B_{22}^0 + U a_{22}^A \\ B_{22}^0 &= \int b_{22} d\xi \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5.25)$$

$$\left. \begin{aligned} A_{24} &= A_{24}^0 - \frac{U}{\omega^2} b_{24}^A \\ A_{24}^0 &= \int a_{24} d\xi \\ A_{42} &= A_{24} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5.26)$$

$$\left. \begin{aligned} B_{24} &= B_{24}^0 + Ua_{24}^A \\ B_{24}^0 &= \int b_{24} d\xi \\ B_{42} &= B_{24} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5.27)$$

$$A_{26} = \int \xi a_{22} d\xi + \frac{U}{\omega^2} B_{22}^0 - \frac{U}{\omega^2} x_A b_{22}^A + \frac{U^2}{\omega^2} a_{22}^A \dots\dots\dots (5.28)$$

$$B_{26} = \int \xi b_{22} d\xi - UA_{22}^0 + Ux_A a_{22}^A + \frac{U^2}{\omega^2} b_{22}^A \dots\dots\dots (5.29)$$

$$A_{44} = \int a_{44} d\xi - \frac{U}{\omega^2} b_{44}^A \dots\dots\dots (5.30)$$

$$B_{44} = \int b_{44} d\xi + Ua_{44}^A + B_{44}^* + B_{44L} \dots\dots\dots (5.31)$$

$$A_{46} = \int \xi a_{24} d\xi + \frac{U}{\omega^2} B_{24}^0 - \frac{U}{\omega^2} x_A b_{24}^A + \frac{U^2}{\omega^2} a_{24}^A \dots\dots\dots (5.32)$$

$$B_{46} = \int \xi b_{24} d\xi - UA_{24}^0 + Ux_A a_{24}^A + \frac{U^2}{\omega^2} b_{24}^A \dots\dots\dots (5.33)$$

$$A_{62} = \int \xi a_{22} d\xi - \frac{U}{\omega^2} B_{22}^0 - \frac{U}{\omega^2} x_A b_{22}^A \dots\dots\dots (5.34)$$

$$B_{62} = \int \xi b_{22} d\xi + UA_{22}^0 + Ux_A a_{22}^A \dots\dots\dots (5.35)$$

$$A_{64} = \int \xi a_{24} d\xi - \frac{U}{\omega^2} B_{24}^0 - \frac{U}{\omega^2} x_A b_{24}^A \dots\dots\dots (5.36)$$

$$B_{64} = \int \xi b_{24} d\xi + UA_{24}^0 + Ux_A a_{24}^A \dots\dots\dots (5.37)$$

$$A_{66} = \int \xi^2 a_{22} d\xi + \frac{U^2}{\omega^2} A_{22}^0 - \frac{U}{\omega^2} x_A^2 b_{22}^A + \frac{U^2}{\omega^2} x_A a_{22}^A \dots\dots\dots (5.38)$$

$$B_{66} = \int \xi^2 b_{22} d\xi + \frac{U^2}{\omega^2} B_{22}^0 + Ux_A^2 a_{22}^A + \frac{U^2}{\omega^2} x_A b_{22}^A \dots\dots\dots (5.39)$$

$$\left. \begin{aligned} C_{44} &= \rho g \nabla (z_B - z_C) + \frac{1}{12} \rho g \int b^3 d\xi \\ \text{或 } C_{44} &= \rho g \nabla \overline{GM}^* \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5.40)$$

式中：

∇ ——水面或水下状态的全排水体积, m^3 ;

\overline{GM}^* ——经过自由液面修正的初横稳性高, m , 水下状态下时取 \overline{GM}^* 等于 \overline{GC} 。

上标 A 表示最后剖面值, B_{44L} 是升力项贡献, B_{44}^* 是横摇粘性阻尼的拟线性系数。

5.3.3.3 横向运动方程中一阶波浪力与力矩的表达

波浪扰动力的复振幅按公式(5.41)~公式(5.43)计算,其剖面的傅汝德——克雷洛夫力函数按公式(5.44)计算,剖面的绕射力函数按公式(5.45)计算。

$$F_2 = \rho \zeta_a \int (f_2 + h_2) d\xi + \rho \zeta_a \frac{U}{i\omega} h_2^A \dots\dots\dots (5.41)$$

$$F_4 = \rho \zeta_a \int (f_4 + h_4) d\xi + \rho \zeta_a \frac{U}{i\omega} h_4^A \dots\dots\dots (5.42)$$

$$F_6 = \rho \zeta_a \int [\xi(f_2 + h_2) + \frac{U}{i\omega} h_2] d\xi + \rho \zeta_a \frac{U}{i\omega} x_A h_2^A \dots\dots\dots (5.43)$$

$$f_j = g e^{-ik_x \cos \beta} \int_{C_r} N_j e^{ik_y \sin \beta} e^{kz} dl; \quad j = 2, 4 \dots\dots\dots (5.44)$$

$$h_j = \omega_0 e^{-ik_x \cos \beta} \int_{C_x} (iN_3 - N_2 \sin \beta) e^{iky \sin \beta} e^{kz} \varphi_j dl; \quad j = 2, 4 \dots \dots \dots (5.45)$$

式中:

F_2, F_4, F_6 ——波浪扰动力(力矩)的复振幅, $N(N \cdot m)$;

φ_2 和 φ_4 ——分别为具有与横剖面 C_x 相同形状的柱体在自由表面上或相应潜深处作单位振幅横荡和横摇时的两因次速度势值;

N_4 ——二因次剖面的单位外法线矢量绕 ox 轴的转动分量, m 。

5.3.3.4 横摇阻尼系数的估算

潜艇横向运动计算中,应尽可能采用实艇实测的横摇阻尼资料。利用潜艇横摇衰减曲线,包括零速横摇衰减曲线和通过随机减量法(RDM)得到的有航速下的横摇衰减曲线,通过公式(5.46)计算无因次横摇衰减系数 2μ 值。

$$2\mu = (\ln \phi_k - \ln \phi_{k+1}) / \pi \dots \dots \dots (5.46)$$

式中:

2μ ——无因次横摇衰减系数;

ϕ_k, ϕ_{k+1} ——分别为相距一个横摇周期的横摇幅值, $rad, (^\circ)$ 。

2μ 与横摇阻尼系数 B_{44} 的关系,可用公式(5.47)表达:

$$B_{44} = 2\mu \sqrt{C_{44} \cdot (A_{44} + I_4)} \dots \dots \dots (5.47)$$

式中:

B_{44} ——横摇阻尼系数, $N \cdot m \cdot s$;

I_4 ——横摇惯性矩, $kg \cdot m^2$;

其余符号同 5.3.3.2 条。

当采用半经验的理论计算方法确定横摇阻尼时,潜艇横摇阻尼系数表达式(5.31)可改写为由公式(5.48)、公式(5.49)的组成形式。

$$B_{44} = B_{44W} + B_{44}^* + B_{44L} \dots \dots \dots (5.48)$$

$$B_{44L} = B_{44S.L.} + \Delta B_{44} \dots \dots \dots (5.49)$$

式中:

B_{44} ——横摇阻尼系数, $N \cdot m \cdot s$;

B_{44}^* ——粘性阻尼系数, $N \cdot m \cdot s$;

B_{44W} ——兴波阻尼系数, $N \cdot m \cdot s$;

B_{44L} ——升力项阻尼系数, $N \cdot m \cdot s$;

$B_{44S.L.}$ ——艇体升力项阻尼系数, $N \cdot m \cdot s$;

ΔB_{44} ——附体(如指挥台围壳、舵、稳定翼等)升力项阻尼系数, $N \cdot m \cdot s$ 。

当采用国际上通常使用的舰船横摇阻尼的估算公式和方法时,应结合潜艇实际情况作必要的修正。

5.3.3.4.1 兴波阻尼系数 B_{44W} 按公式(5.50)计算。

$$B_{44W} = \int b_{44} d\xi + U a_{44}^A \dots \dots \dots (5.50)$$

式中:

B_{44W} ——兴波阻尼系数, $N \cdot m \cdot s$ 。

5.3.3.4.2 横摇粘性阻尼的拟线性系数 B_{44}^* ,按公式(5.51)表达,通过对零航速时的横摇粘性阻尼的拟线性系数 B_{440}^* 的航速修正计算确定。

$$B_{44}^* = K \dot{\eta}_{A_{max}} \dots \dots \dots (5.51)$$

式中:

- B_{44}^* ——横摇粘性阻尼的拟线性系数, $N \cdot m \cdot s$;
- K ——系数, 与振荡频率 ω 、粘性、附体(鳍、舵、指挥台围壳等)的尺度、位置、形状及艇体的线型有关, 是速度的函数;
- $\dot{\eta}_{4\max}$ ——最大横摇角速度, $rad \cdot s^{-1}$ 。

5.3.3.4.3 艇体升力项阻尼 $B_{44S.L.}$ 用公式(5.52)表达, 其系数 K_N 按公式(5.53)计算。

$$B_{44S.L.} = \frac{1}{2} \rho S_L U K_N l_0 l_R \dots\dots\dots (5.52)$$

$$K_N = \frac{2\pi T}{L} + K \left(4.1 \frac{B}{L} - 0.045 \right) \left. \vphantom{K_N} \right\} \dots\dots\dots (5.53)$$

$$K = \begin{cases} 0 & C_M < 0.92 \\ 0.1 & 0.92 \leq C_M < 0.97 \\ 0.3 & 0.97 \leq C_M < 0.98 \end{cases}$$

式中:

- S_L ——艇体水下部分的侧面面积(可近似取艇长与吃水之积), m^2 ;
- K ——升力系数 C_L 的斜率常数;
- l_0 ——横摇轴与表征攻角的作用点之间的垂直距离, m ;
- l_R ——横摇轴与横摇运动中艇体升力作用力中心之间的距离, 水面状态可取 0.5 倍吃水 T , 水下横摇计算时可取为 0.5 倍型深, m ;
- C_M ——艇的舢剖面系数。

5.3.3.4.4 指挥台围壳(或附体)的升力项阻尼系数 ΔB_{44} 按公式(5.54)计算。

$$\Delta B_{44} = \frac{1}{3} \pi \rho b U (l^3 - R^3) \dots\dots\dots (5.54)$$

式中:

- ΔB_{44} ——指挥台围壳(附体)升力项阻尼系数, $N \cdot m \cdot s$;
- b ——指挥台围壳(附体)半弦长, m ;
- l ——围壳(附体)顶至 x 轴的距离, m ;
- R ——围壳(附体)处艇体的半径, m 。

参见 5.3.4 图 5.1。

5.3.3.4.5 零航速时, 横摇粘性阻尼的拟线性系数 B_{440}^* 用公式(5.55)表达。

$$B_{440}^* = (W_1 + W_2) |\dot{\eta}_4| \dots\dots\dots (5.55)$$

式中:

- B_{440}^* ——零速时粘性阻尼拟线性系数, $N \cdot m \cdot s$;
- W_1 ——相当的圆柱形艇体的横摇粘性阻尼系数成分, $kg \cdot m^2$;
- W_2 ——舵、稳定翼等附体零速摇摆时的阻尼系数成分(主要是兴涡效应), $kg \cdot m^2$;
- $\dot{\eta}_4$ ——横摇角速度, $rad \cdot s^{-1}$ 。

对圆柱形艇体(近似于水下潜艇)的 W_1 可按经验公式(5.56)计算:

$$W_1 = 0.23 A_{44}^* \sqrt{\frac{K_{xx} B}{GM^*}} \left. \vphantom{W_1} \right\} \dots\dots\dots (5.56)$$

$$A_{44}^* = A_{44} + I_x$$

式中:

- W_1 ——相当的圆柱形艇体横摇粘性阻尼系数成分, $kg \cdot m^2$;
- $K_{xx} B$ ——艇体相对于横摇轴的横摇惯性半径, m ;

\overline{GM}^* ——经自由液面修正的艇体初横稳性高, m;

A_{44}^* ——艇体表观质量惯性矩, $\text{kg}\cdot\text{m}^2$;

A_{44} ——艇体横摇附加质量惯性矩, $\text{kg}\cdot\text{m}^2$;

I_x ——艇体横摇惯性矩, $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ 。

系数 W_2 按公式(5.57)计算:

$$W_2 = 3.92\rho \sum_K S_K R_K^3 \dots\dots\dots (5.57)$$

式中:

W_2 ——舵、稳定翼等附体零速摇摆时的阻尼系数成分, $\text{kg}\cdot\text{m}^2$;

S_K ——第 K 个附体的面积, m^2 ;

R_K ——第 K 个附体的面积中心距横摇轴的距离, m。

考虑到一个横摇周期内 $|\dot{\eta}_4|$ 的平均值与幅值 η_{40} 之间的关系, B_{440}^* 可按公式(5.58)计算:

$$B_{440}^* = \frac{2}{\pi} (W_1 + W_2) \frac{\eta_{40}}{\zeta_a} \zeta_a \omega \dots\dots\dots (5.58)$$

式中:

η_{40}/ζ_a ——横摇响应幅值, $\text{rad}\cdot\text{m}^{-1}$;

ζ_a ——规则波波幅, m;

η_{40} ——规则波中横摇幅值, rad;

ω ——横摇圆频率, $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$;

其余符号同公式(5.55)。

有航速时,按公式(5.59)进行航速修正:

$$\left. \begin{aligned} B_{44}^* &= K_v B_{440}^* \\ K_v &= 1 + \frac{0.8(1 - e^{-10F_n}) D \overline{GM}}{A_{44}^* \omega^2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5.59)$$

式中:

K_v ——艇体粘性横摇阻尼的航速修正系数。

5.3.3.5 规则波中横摇响应计算的叠代求解

计算中应给出横摇角(或角速度)初值 ϕ_0 , 计算确定 $B_{44}(\phi_0)$ 或 $2\mu(\phi_0)$ 初值, 通过横向运动耦合方程组公式(5.21)、公式(5.22)多次叠代直到横摇响应或横摇阻尼前后两次值之间误差满足给定计算精度。

5.3.4 附体升力项流体动力估算方法

5.3.4.1 附体(如指挥台围壳)作为升力面处理时, 对有航速时横摇阻尼的贡献, 可采用公式(5.60)~公式(5.62)估算。

5.3.4.2 若将指挥台围壳作为短机翼处理(弦长为 $2b$), 则单位厚度的机翼元以航速 U 前进、以 h 幅度作简谐摇摆运动(见图 5.1), 当攻角为零时所受的举力 L 按公式(5.60)计算。

$$\left. \begin{aligned} L &= \pi\rho b^2 (d^2h/dt^2) + 2\pi\rho U b C(k) (dh/dt) \\ C(k) &= \frac{H_1^{(2)}(k)}{H_1^{(2)}(k) + iH_0^{(2)}(k)} \\ k &= \omega b / U \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5.60)$$

式中:

L ——升力, N;

$H_1^{(2)}(k), H_0^{(2)}(k)$ ——分别为一阶和零阶第二类亨克尔函数。

对于航速较低时, $C(k)$ 近似等于 0.5, 举力可按公式(5.61)计算, 对于横摇, 由升力 L 产生的横摇

阻尼力矩 M_x 按公式(5.62)计算。

$$L = \pi\rho b^2(d^2h/dt^2) + \pi\rho Ub(dh/dt) \dots\dots\dots (5.61)$$

$$M_x = \frac{1}{3}\pi\rho b^2(l^3 - R^3)d^2\phi/dt^2 + \frac{1}{3}\pi\rho bU(l^3 - R^3)d\phi/dt \dots\dots\dots (5.62)$$

式中:

M_x ——横摇阻尼力矩, N·m;

ϕ ——横摇角, rad。

参照公式(5.54)的表达形式,公式(5.62)可变通改写为公式(5.63)形式:

$$M_x = \Delta A_{44} \frac{d^2\phi}{dt^2} + \Delta B_{44} \frac{d\phi}{dt} \dots\dots\dots (5.63)$$

式中:

ΔA_{44} ——指挥台围壳的横摇附加质量惯性矩, N·m·s²;

ΔB_{44} ——指挥台围壳的升力项横摇阻尼系数, N·m·s;

其余符号同公式(5.62)。

可知,低速时指挥台围壳摇摆引起的横摇附加质惯性矩可按公式(5.64)表达:

$$\Delta A_{44} = \frac{1}{3}\pi\rho b^2(l^3 - R^3) \dots\dots\dots (5.64)$$

式中:符号同公式(5.62)。

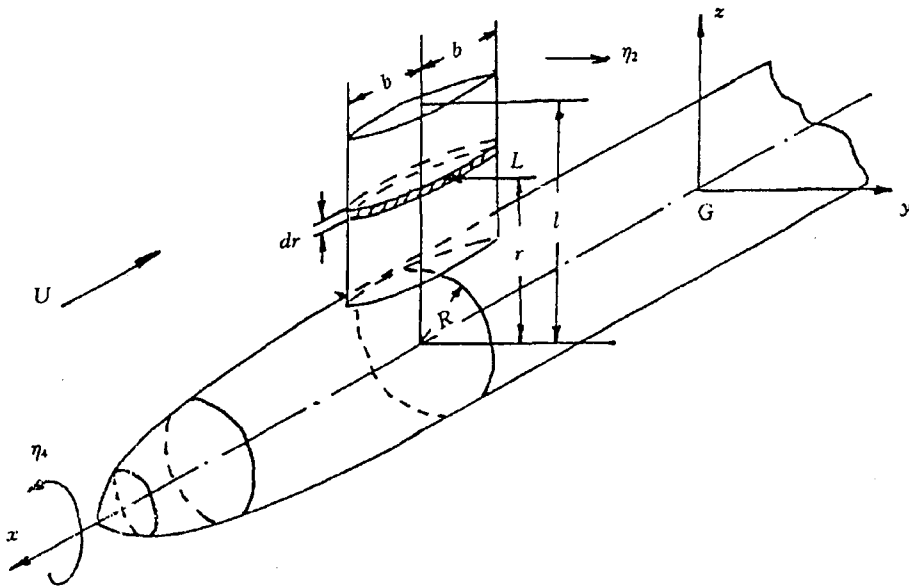


图 5.1 升力面的尺度与受力示意图

5.3.4.3 当用潜艇附体的升力项流体动力对运动方程系数进行修正时,对于具有水平投影面的升降舵、翼,其纵向运动方程系数的升力项阻尼值分别按公式(5.65)计算。

$$\left. \begin{aligned} \Delta B_{33} &= \frac{\pi\rho U}{2} \sum_k S(k) \\ \Delta B_{55} &= \frac{\pi\rho U}{2} \sum_k S(k) \cdot x^2(k) \\ \Delta B_{53} &= \Delta B_{35} = -\frac{\pi\rho U}{2} \sum_k S(k) \cdot x(k) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5.65)$$

式中:

$\Delta B_{33}, \Delta B_{55}, \Delta B_{53}$ ——附体升力项流体动力系数, $N \cdot m^{-1} \cdot s, N \cdot m \cdot s, N \cdot s$;

k ——具有水平投影面的附体序号;

$S(k)$ ——第 k 个(对)附体的水平投影总面积, m^2 ;

$x(k)$ ——该附件面积中心的 x 坐标值, m 。

5.3.4.4 其他附体(垂直稳定翼、垂直舵等)升力项流体动力的估算可按 5.3.4.2 条和 5.3.4.3 条规定进行。

5.3.5 波频运动方程求解

5.3.5.1 舵力计算

当需考虑操舵影响时,操舵时产生的力和力矩 $F_{2R}, F_{3R}, F_{4R}, F_{5R}, F_{6R}$ 可据操舵规则及舵的流体动力性能进行计算。

5.3.5.2 运动响应计算

运动方程系数确定后,按公式(5.4)、公式(5.5)、公式(5.21)~公式(5.23)计算横荡、垂荡、横摇、纵摇和艏摇五种运动的响应,即振幅响应 η_{ja}/ζ_a 和相位 ϵ_j, j 取 2、3、4、5、6。相应的速度、加速度响应可用 $\dot{\eta}_j = +i\omega\eta_j, \ddot{\eta}_j = -\omega^2\eta_j$ 确定。

5.3.5.3 纵荡运动计算

纵荡运动响应 η_{1a}/ζ_a 采用适当的单自由度运动方程(如元良诚三方法)确定。

5.3.5.4 不规则波运动统计值计算

不规则波中波频运动统计值用给定潜深情况下艇体的波频运动响应值 η_{ja}/ζ_a 和给定的海浪谱,按公式(5.66)的两参数谱计算。

$$S[(\zeta_w)_{1/3}, T_1, \omega_0] = \frac{173(\zeta_w)_{1/3}^2}{\omega_0^5 T_1^4} e^{-691/\omega_0^4 T_1^4} \dots \dots \dots (5.66)$$

式中:

$S[(\zeta_w)_{1/3}, T_1, \omega_0]$ ——长峰海浪谱密度, $m^2 \cdot s$ 。

长峰波海况下艇体运动参数按波频表达的运动谱密度按公式(5.67)计算,其运动方差按公式(5.68)计算。

$$S_j(U, (\zeta_w)_{1/3}, T_1, H_0, \beta, \omega_0) = S((\zeta_w)_{1/3}, T_1, \omega_0) \cdot |\frac{\eta_{ja}}{\zeta_a}(\omega_0, U, H_0, \beta)|^2 \dots \dots (5.67)$$

$$m_{0j}(U, (\zeta_w)_{1/3}, T_1, H_0, \beta) = \int_0^\infty S((\zeta_w)_{1/3}, T_1, \omega_0) \cdot |\frac{\eta_{ja}}{\zeta_a}(\omega_0, U, H_0, \beta)|^2 d\omega_0 \dots (5.68)$$

式中:

$S_j(U, (\zeta_w)_{1/3}, T_1, H_0, \beta, \omega_0)$ ——第 j 模式运动的谱密度,它是艇的航速,相对浪向,潜深以及海浪状况的函数, $m^2 \cdot s (j = 1, 2, 3), rad^2 \cdot s (j = 4, 5, 6)$;

$\frac{\eta_{ja}}{\zeta_a}(\omega_0, U, H_0, \beta)$ ——第 j 模式运动的规则波响应,它是艇的航速,潜深、相对浪向和波频的函数, $m \cdot m^{-1} (j = 1, 2, 3), rad \cdot m^{-1} (j = 4, 5, 6)$;

$m_{0j}(U, (\zeta_w)_{1/3}, T_1, H_0, \beta)$ ——长峰波作用下第 j 模式运动的方差值, $m^2 (j = 1, 2, 3), rad^2 (j = 4, 5, 6)$ 。

当采用波频 ω_0 计算时,令 χ 为组合波波向与主浪向之夹角,短峰波可采用公式(5.69)的扩展函数形式。第 j 个模式的运动的方差 m_{0j} 可按公式(5.70)计算。

$$S(\omega_0, \chi) = \begin{cases} \frac{2}{\pi} S(\omega_0) \cdot \cos^2 \chi & -\frac{\pi}{2} \leq \chi \leq \frac{\pi}{2} \\ 0 & \chi \text{ 为其它值} \end{cases} \dots \dots \dots (5.69)$$

$$m_{0j}(U, (\xi_w)_{1/3}, T_1, H_0, \beta) = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_0^{\infty} S((\xi_w)_{1/3}, T_1, \omega_0, \chi | \frac{\eta_{j3}}{\zeta_a}(\omega_0, U, H_0, \beta + \chi))^2 d\omega_0 d\chi$$

j=1,2,3,4,5,6

..... (5.70)

式中:

$S(\omega_0, \chi)$ ——短峰海浪谱密度, $m^2 \cdot s$;

m_{0j} ——第 j 个模式运动的方差值, m^2 (j 取 1,2,3), rad^2 (j 取 4,5,6)。

运动方差 m_{0j} 确定后,采用狭谱假定可确定其统计特征值,如:

三分之一最大单幅值的平均值(有义值)按公式(5.71)计算,十分之一最大单幅值的平均值按公式(5.72)计算,两千个振荡中最大单幅值的期望值按公式(5.73)计算。其他运动响应(如速度、加速度、相对运动等)的统计值均可用类似的公式计算。

$$\bar{\eta}_{j1/3} = 2.0 \sqrt{m_{0j}} \quad \dots\dots\dots (5.71)$$

$$\bar{\eta}_{j1/10} = 2.55 \sqrt{m_{0j}} \quad \dots\dots\dots (5.72)$$

$$\bar{\eta}_{j2000} = 4.0 \sqrt{m_{0j}} \quad \dots\dots\dots (5.73)$$

式中:

$\bar{\eta}_{j1/3}, \bar{\eta}_{j1/10}$ ——分别为三分之一、十分之一最大单幅值的平均值, m ($j = 1,2,3$), rad ($j = 4,5,6$);

$\bar{\eta}_{j2000}$ ——两千个振荡中最大单幅值的期望值, m ($j = 1,2,3$), rad ($j = 4,5,6$);

m_{0j} ——第 j 个模式运动的方差值, m^2 ($j = 1,2,3$), rad^2 ($j = 4,5,6$)。

5.3.6 给定位置加速度和非线性事件的计算

5.3.6.1 给定位置加速度计算

给定位置点 (x_R, y_R, z_R) 垂向加速度响应按公式(5.74)计算,给定位置点振幅响应按公式(5.75)计算。

$$A_R = \ddot{\eta}_3 - (x_R - x_G) \cdot \ddot{\eta}_5 \quad \dots\dots\dots (5.74)$$

$$\frac{A_{R0}}{\zeta_a} = \{ [(\frac{\eta_{3a}}{\zeta_a}) \omega_c^2 \cos(\epsilon_{3h}) - (x_R - x_G)(\frac{\eta_{5a}}{\zeta_a}) \omega_c^2 \cos(\epsilon_{5h})]^2 + [(\frac{\eta_{3a}}{\zeta_a}) \omega_c^2 \sin(\epsilon_{3h}) - (x_R - x_G)(\frac{\eta_{5a}}{\zeta_a}) \omega_c^2 \sin(\epsilon_{5h})]^2 \}^{1/2} \quad \dots\dots\dots (5.75)$$

式中:

A_R ——点 R 的垂向加速度, $m \cdot s^{-2}$;

$\ddot{\eta}_3$ ——垂向加速度, $m \cdot s^{-2}$;

x_R ——点 R 的 X 坐标值, m ;

x_G ——艇重心的 X 坐标值, m ;

$\ddot{\eta}_5$ ——纵摇角加速度, $rad \cdot s^{-2}$;

A_{R0}/ζ_a ——点 R 的垂向加速度响应, s^{-2} 。

5.3.6.2 甲板上浪概率计算

甲板上浪概率按公式(5.76)计算:

$$P(S > f) = \exp(-f^2/2m_{0s}) \quad \dots\dots\dots (5.76)$$

式中:

$P(S > f)$ ——甲板上浪概率;

S ——计算剖面相对波面的运动振幅, m ;

f ——计算点的干舷高, m ;

m_{0s} ——该剖面相对运动方差, m^2 。

5.3.6.3 船底出水概率计算

船底出水概率按公式(5.77)计算:

$$P(S > Z_T) = \exp(-Z_T^2/2m_{0s}) \dots\dots\dots (5.77)$$

式中:

$P(S > Z_T)$ ——船底出水概率;

Z_T ——该剖面船底部的竖向坐标(剖面吃水), m 。

5.3.6.4 螺旋桨出水、通气管浮阀上浪、围壳舵出水等概率计算

螺旋桨出水、通气管浮阀上浪、围壳舵出水等概率的计算同公式(5.76)和公式(5.77)类同,但计算时要用对应剖面处的相对运动方差 m_{0s} 和相对运动振幅 S 以及用计算出水(上浪)点距水面的高度 h 代替 f 或 Z_T 。

5.3.6.5 船底砰击概率计算

船底砰击概率按公式(5.78)计算:

$$P(S > Z_T, \dot{S} \geq \dot{S}_n) = \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{Z_T^2}{m_{0s}} + \frac{\dot{S}_n^2}{m_{0\dot{s}}}\right)\right\} \dots\dots\dots (5.78)$$

式中:

$P(S > Z_T, \dot{S} \geq \dot{S}_n)$ ——船底砰击概率;

S ——计算剖面的相对运动幅值, m ;

\dot{S} ——计算剖面的相对运动速度, $m \cdot s^{-1}$;

\dot{S}_n ——发生砰击的临界相对速度, $m \cdot s^{-1}$;

Z_T ——剖面吃水, m ;

m_{0s} ——剖面相对运动方差, m^2 ;

$m_{0\dot{s}}$ ——剖面相对运动速度方差, $m^2 \cdot s^{-2}$ 。

6 波浪中近水面波浪力计算方法

6.1 数学模型

6.1.1 潜艇在近水面航行时所受到的波浪作用力,主要由一阶波频波浪力和二阶平均波浪力组成。作为刚体处理的潜艇,惯量和质量较大,对高频波浪力(和频力以及倍频力)的运动响应可以忽略。

6.1.2 近水面潜艇波浪力由公式(6.1)表达:

$$\left. \begin{aligned} F_w &= \tilde{F}_w + F_w^0(t) \\ M_w &= \tilde{M}_w + M_w^0(t) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6.1)$$

式中:

F, M ——力、力矩, $N, N \cdot m$;

W ——脚标,表示波浪力;

上标 \sim ——表示时间平均项;

上标 0 ——表示与时间 t 有关的波动项。

6.1.3 潜艇近水面随深度变化的运动中,所受波浪力(力矩)是潜深的函数,并随海浪、相对浪向、航速和艇体线型而异。

6.1.4 规则波波浪力(力矩)以单位波高的响应值的形式表达,即一阶波浪力(力矩)表达为 $F^{(1)}/\zeta_a$, $M^{(1)}/\zeta_a$, 二阶平均波浪力(力矩)表达为 $F^{(2)}/\zeta_a^2$, $M^{(2)}/\zeta_a^2$ 。

6.2 近水面波浪力实用计算方法

本章节推荐的一阶、二阶平均波浪力计算方法经验证具有必要的工程精度。

6.2.1 一阶波浪力 STF 方法

一阶波浪力按公式(6.2)~公式(6.4)计算,其剖面的傅汝德——克雷洛夫力函数和绕射力函数分别按公式(6.5)、公式(6.6)计算。

$$F_j^{(1)}/\zeta_a = \rho \int_L (f_j + h_j) d\xi + \rho(U/i\omega)h_j^A \quad j = 2,3,4 \dots\dots\dots (6.2)$$

$$F_5^{(1)}/\zeta_a = -\rho \int_L [\xi(f_3 + h_3) + (U/i\omega)h_3] d\xi - \rho(U/i\omega)X_A h_3^A \dots\dots\dots (6.3)$$

$$F_6^{(1)}/\zeta_a = \rho \int_L [\xi(f_2 + h_2) + (U/i\omega)h_2] d\xi + \rho(U/i\omega)X_A h_2^A \dots\dots\dots (6.4)$$

$$f_j = g e^{-ikr \cos \beta} \int_{C_x} N_j e^{iky \sin \beta} e^{kz} dl \quad j = 2,3,4 \dots\dots\dots (6.5)$$

$$h_j = \omega_0 e^{-ikr \cos \beta} \int_{C_x} (iN_3 - N_2 \sin \beta) e^{iky \sin \beta} e^{kz} \varphi_j dl \quad j = 2,3,4 \dots\dots\dots (6.6)$$

式中:

$F_j^{(1)}, F_5^{(1)}, F_6^{(1)}$ ——一阶波浪力(力矩), $N(j$ 取 2,3), $N \cdot m(j$ 取 4,5,6);

f_j, f_3, f_2 ——剖面的傅汝德—克雷洛夫力函数值;

h_j, h_3, h_2 ——剖面的绕射力函数值;

ω ——遭遇圆频率, $rad \cdot s^{-1}$;

h_j^A ——在艇长的尾剖面处的值, $m^2 \cdot s^{-2}$;

X_A ——艇长的尾剖面处的纵坐标, m ;

N_j ——剖面方向余弦;

N_3, N_2 ——分别对应 Z, Y 轴的两维剖面广义法线分量;

φ_j ——具有 C_x 外形的剖面,在相应潜深作 j 模式振荡时的两维振荡幅射势。

纵荡波浪力采用元良诚三的波浪力表达式(6.7)

$$F_1^{(1)}/\zeta_a = 0.5 \rho g k \gamma \cos \beta_s \int_L A(\xi) \cos(k\xi \cos \beta_s) d\xi \dots\dots\dots (6.7)$$

式中:

$F_1^{(1)}/\zeta_a$ ——纵荡波浪力响应, $N \cdot m^{-1}$;

γ ——有效波倾角系数;

β_s ——相对浪向角, rad ;

$A(\xi)$ ——潜艇(ξ)处的横剖面面积, m^2 。

6.2.2 二阶平均波浪力 Newman 细长体方法

适用于潜深较大、低航速的工况计算。实际应用时,宜加三维修正;即按 6.2.3 规定的公式计算。

6.2.2.1 假定流场为无限水深、无粘性、不可压缩的理想势流流场,潜艇设定为一具有任意剖面(沿纵轴)的浮力均衡的水平潜没细长体(含附体),在自由水面下潜深 H_0 处遭遇相对浪向为 β_s 的规则来波的作用。

6.2.2.2 对细长体在潜深较大和低航速工况下,通过 Kochin 函数方法导出并简化为只与剖面面积和零频附加质量的纵向分布有关的二阶平均波浪力 Newman 细长体方法的表达式,对于约束的细长体由公式(6.8)给出,对于自由(非约束)的细长体由公式(6.9)计算。其中 x_2, x_3 按公式(6.10)的解确定。公式(6.8)和公式(6.9)中等号两边除以 ζ_a^2 ,求得二阶平均波浪力响应 $\bar{F}^{(2)}/\zeta_a^2, \bar{M}^{(2)}/\zeta_a^2$ 。

$$\left. \begin{matrix} \bar{F}^{(2)} \\ \bar{M}^{(2)} \end{matrix} \right\} = 0.5 \rho g (K \zeta_a)^2 \exp(-2KH_0) \int_L dx \left\{ \begin{matrix} 1 \\ -x \end{matrix} \right\} \left[2S_A(x) + \frac{\mu_{22}(x) \sin^2 \beta}{\rho} + \frac{\mu_{33}(x)}{\rho} \right] \dots (6.8)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\bar{F}^{(2)}}{\bar{M}^{(2)}} \Bigg\} &= 0.5\rho g(K\zeta_a)^2 \exp(-2KH_0) \int_L dx \left\{ \begin{aligned} & \left[2S_A(x) + \frac{\mu_{22}(x)\sin^2\beta}{\rho} + \right. \\ & \left. + \frac{\mu_{33}(x)}{\rho} + \int_L d\xi \cdot \cos[K(x-\xi)\cos\beta] \left\{ -\frac{S_A(x)S_A(\xi)\cos^2\beta}{\nabla} - [S_A(x) + \right. \right. \\ & \left. \left. + \frac{\mu_{22}(x)}{\rho}] \times [S_A(\xi) + \frac{\mu_{22}(\xi)}{\rho}] \times \left[\frac{1}{\nabla + \int_L \frac{\mu_{22}(x)}{\rho} dx} + \frac{(x-x_2)(\xi-x_2)}{I_{16} + I_6} \right] \sin^2\beta - \right. \right. \\ & \left. \left. - [S_A(x) + \frac{\mu_{33}(x)}{\rho}] \times [S_A(\xi) + \frac{\mu_{33}(\xi)}{\rho}] \times \left[\frac{1}{\nabla + \int_L \frac{\mu_{33}(x)}{\rho} dx} + \frac{(x-x_3)(\xi-x_3)}{I_{15} + I_5} \right] \right\} \right\} \dots (6.9) \end{aligned} \right\} \\ I_{15} &= \int_L \frac{\mu_{33}(x)}{\rho} x^2 dx \\ I_{16} &= \int_L \frac{\mu_{22}(x)}{\rho} x^2 dx \\ \int_L (x-x_j)(S_A(x) + [\mu_{jj}(x)/\rho]) dx &= 0, \quad j = 2, 3 \dots \dots \dots (6.10) \end{aligned}$$

式中:

- $\bar{F}^{(2)}$ ——二阶平均垂向波浪力, N;
- $\bar{M}^{(2)}$ ——二阶平均纵倾波浪力矩, N·m;
- $S_A(x), S_A(\xi)$ ——潜艇沿 X, ξ 轴的剖面面积分布, m^2 ;
- H_0 ——潜深, 无风静水面至潜艇中心轴的垂向距离, m;
- $\mu_{33}(x), \mu_{33}(\xi), \mu_{22}(x), \mu_{22}(\xi)$ —— x 或 ξ 处剖面(单位长度)的两维垂向和水平方向振荡的附加质量, $kg \cdot m^{-1}$;
- I_{15}, I_{16} ——分别为纵摇和艏摇附加质量惯性矩确定的体积惯性矩, m^5 ;
- I_{15}, I_{16} ——分别为潜艇对物体坐标系 Y, Z 轴的体积惯性矩, m^5 ;
- ∇ ——艇水下全排水体积, m^3 ;
- x_2, x_3 ——潜艇横向和垂向表观质量(质量加上附加质量)中心的纵坐标值, m。

6.2.2.3 对于剖面型深 D 与宽度 B 之比近似等于 1 时, 一般情况下公式(6.8)和公式(6.9)中的剖面附加质量项可简化为公式(6.11), 用剖面的型深与宽度为直径的等效圆的面积近似计算其相应模式运动的零频附加质量值。

$$\left. \begin{aligned} S_A(x) + \mu_{22}(x)/\rho &\cong S_A(x) + \pi D^2(x)/4 \\ S_A(x) + \mu_{33}(x)/\rho &\cong S_A(x) + \pi B^2(x)/4 \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (6.11)$$

式中:

- $D(x)$ —— x 处剖面的型深, m;
- $B(x)$ —— x 处剖面的艇宽, m。

6.2.3 二阶平均波浪力的三维近似修正法

细长体方法经三维近似修正后, 精度接近三维方法, 可用于潜艇近水面潜深较小及低航速工况下的波浪力计算。

6.2.3.1 细长体方法的计算公式(6.8)和公式(6.9)得出的二阶平均波浪力和力矩, 可进行三维修正处理, 三维近似修正后的波浪力与力矩的无因次值按公式(6.12)计算。

$$\left. \begin{aligned}
 K_F &= K_{F1} + K_{F2} \cdot CC \\
 K_M &= K_{M1} + K_{M2} \cdot CC \\
 K_{F1} &= \bar{F}^{(2)} / \rho g \zeta_a^2 (0.5B) \\
 K_{M1} &= \bar{M}^{(2)} / \rho g \zeta_a^2 (0.5B)^2 \\
 CC &= \exp(-2K(H_0 - D))
 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6.12)$$

式中：

- K_F, K_M ——三维修正后的二阶平均波浪力、力矩的无因次系数值；
- K_{F1}, K_{M1} ——用细长体方法计算的近水面二阶平均波浪力、力矩的无因次系数值；
- K_{F2}, K_{M2} ——Newman 椭球三维修正的波浪力、力矩的无因次系数值；
- CC ——潜深吃水(型深)比 H_0/D 的修正系数,当 $H_0/D = 1$ 时,取 $CC = 1$ ；
- $\bar{F}^{(2)}, \bar{M}^{(2)}$ ——二阶平均垂向波浪力和纵倾力矩, N, N·m；
- K ——波数；
- H_0 ——潜深, m；
- D ——艇体重心处的型深(直径), m。

6.2.3.2 Newman 椭球的三维修正波浪力与力矩无因次系数值见表 4。

表 4 近水面椭球波浪力与力矩三维修正的无因次系数 K_{F2}, K_{M2} 值表

波浪力矩修正系数 K_{M2}			波浪力修正系数 K_{F2}		
λ/L	约束状态	自由状态	λ/L	约束状态	自由状态
0.1	0.00895	0.0034	0.1	0.1142	0.0052
0.3	1.0720	1.0144	0.3	0.6594	0.5955
0.5	2.2165	2.1656	0.5	1.0145	0.9821
0.6	2.2647	1.8990	0.6	1.1159	1.1440
0.7	2.1064	1.3476	0.7	1.1667	1.2015
0.8	1.8266	0.8191	0.8	1.1667	1.0970
0.9	1.5101	0.3711	0.9	1.1058	0.8358
1.0	1.2417	0.1413	1.0	1.0348	0.6269
1.1	0.9940	0.0425	1.1	0.9435	0.4284
1.2	0.7830	-0.0081	1.2	0.8775	0.3029
1.3	0.6339	-0.0196	1.3	0.7913	0.2351
1.4	0.5101	-0.0196	1.4	0.7254	0.1567
1.5	0.4046	-0.0196	1.5	0.6594	0.1202
1.6	0.3080	-0.0173	1.6	0.5884	0.0940
1.7	0.2463	-0.0081	1.7	0.5377	0.0679
1.8	0.1982	-0.0081	1.8	0.4971	0.0522
1.9	0.1590	-0.0081	1.9	0.4464	0.0418
2.0	0.1180	-0.0081	2.0	0.4159	0.0313
2.4	0.0260	-0.0092	2.2	0.3551	0.0209
2.8	-0.0083	-0.0092	5.0	0.0254	0.0105

表 4(续)

波浪力矩修正系数 K_{M2}			波浪力修正系数 K_{F2}		
λ/L	约束状态	自由状态	λ/L	约束状态	自由状态
3.2	-0.0151	-0.0127			
3.6	-0.0220	-0.0127			
4.0	-0.0312	-0.0150			
4.4	-0.0427	-0.0150			
4.8	-0.0518	-0.0173			

注:对于 λ/L 超过 5.0 情况,修正系数可取零值。表列值适用于零速顶浪 180° 工况。

6.3 近水面波浪力其他计算方法

6.3.1 线型简化潜艇波浪力计算方法

适用于缺乏具体线型和忽略附体影响时潜艇波浪力的计算。

6.3.1.1 规则波作用在潜艇垂直面上的力

6.3.1.1.1 基本假定

- a) 潜艇附近的波浪扰动流场属势流流场;
- b) 近水面的潜艇诱导的流场速度可以忽略;
- c) 潜艇不出现摇摆并以不变的速度 U , 不变的潜深 H_0 沿 Ox 轴方向直线航行;
- d) 潜艇的横向尺度与艇长和波浪长度相比是小量;
- e) 忽略潜艇突出物对波浪力影响,以相对于中部首尾对称的二次抛物线简化替代对真实形状的表述:

$$S(x) = S_m[1 - (2x/L)^2] \dots\dots\dots (6.13)$$

式中:

$S(x)$ ——坐标值为 x 时,艇体的横剖面面积, m^2 ;

S_m ——潜艇中部横剖面面积, m^2 ;

L ——潜艇艇长, m 。

f) 波浪作用力与力矩分解为一阶波频波浪力和二阶平均波浪力,见公式(6.1);

g) 波浪力计算中,不考虑艇体存在对流场的影响,忽略绕射力项。

6.3.1.1.2 规则波中波频波浪力和力矩

波频波浪力和力矩按公式(6.14)~公式(6.16)计算:

$$\left. \begin{aligned} F_w^0 &= \rho V \left[1 + K_{33} \frac{\omega_c}{\omega} \right] \omega^2 k_1 e^{-\frac{\omega^2}{g} H} \zeta_a e^{i\omega_c t} \\ M_w^0 &= \left[I_y \left(1 + K_{55} \frac{\omega_c}{\omega} \right) \frac{\omega^4}{g} k_2 \cos\beta - \rho V K_{33} U k_1 \omega \right] e^{-\frac{\omega^2}{g} H} \zeta_a e^{i\omega_c t} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6.14)$$

$$\left\{ \begin{aligned} k_1 &= \frac{3}{v_\beta} (\sin \bar{v}_\beta - \bar{v}_\beta \cos \bar{v}_\beta) \\ k_2 &= \frac{15}{v_\beta^3} [(3 - \bar{v}_\beta^2) \sin \bar{v}_\beta - 3 \bar{v}_\beta \cos \bar{v}_\beta] \end{aligned} \right. \dots\dots\dots (6.15)$$

$$\bar{v}_\beta = \frac{L}{\lambda} \pi \cos\beta \dots\dots\dots (6.16)$$

式中:

F_w^0 ——波频波浪力, N ;

∇ ——排水体积, m^3

M_w^0 ——波频波浪力矩, $N \cdot m$;

K_{33}, K_{55} ——潜艇的垂向和纵倾的附加质量系数和附加质量惯性矩系数;

ω_e, ω ——分别为遭遇频率和波浪圆频率, $rad \cdot s^{-1}$;

k_1, k_2 ——减缩系数, 表征潜艇长度 (L) 与有效波长 ($\lambda \cos \beta$) 的比对波浪力与力矩的影响, 当相对浪向 β 为 90° 及 $\lambda/L \rightarrow \infty$ 时, 均等于 1;

\bar{v}_β ——参数。

6.3.1.1.3 规则波中二阶平均波浪力与力矩

二阶平均波浪力和力矩由公式(6.17)表达式中相关的舢剖面中心处流场速度方差及其沿潜深偏导按公式(6.18)至(6.20)计算:

$$\begin{cases} \bar{F}_w = -\frac{3 + \sin^2 \beta}{2} \rho \nabla D_v^H & \dots\dots\dots (6.17) \\ \bar{M}_w = \frac{3 + \sin^2 \beta}{2} I_y D_v^{HH} \theta \end{cases}$$

$$D_v^H = -2KD_v \dots\dots\dots (6.18)$$

$$D_v^{HH} = 4K^2 D_v \dots\dots\dots (6.19)$$

$$D_v = \frac{1}{2} (\omega \zeta_a)^2 e^{-2KH} \dots\dots\dots (6.20)$$

式中:

\bar{F}_w, \bar{M}_w ——垂向和纵倾二阶平均波浪力、力矩, $N, N \cdot m$;

θ ——潜艇的纵倾角, rad ;

K ——波数, $rad \cdot m^{-1}$;

D_v ——潜艇舢剖面中心处流场速度沿垂直轴 η 的投影沿其潜深 H 的一阶速度方差, $m^2 s^{-2}$;

D_v^H —— D_v 沿潜深 H 的偏导, $m \cdot s^{-2}$;

D_v^{HH} —— D_v 沿潜深 H 的二阶偏导, s^{-2} 。

6.3.1.2 不规则波中波浪力平均值

不规则波中平均波浪力与力矩由公式(6.21)表达, 其相关的流场速度方差沿潜深偏导由公式(6.22)和公式(6.23)表达:

$$\begin{cases} \tilde{F}_w = -\frac{14 - \cos 2\beta}{8} \rho \nabla \tilde{D}_v^H & \dots\dots\dots (6.21) \\ \tilde{M}_w = \frac{14 - \cos 2\beta}{8} \theta I_y \tilde{D}_v^{HH} \end{cases}$$

$$\tilde{D}_v^H = -\frac{2}{g} \int_0^\infty \omega^4 S(\omega) e^{-\frac{2\omega^2}{g} H} d\omega \dots\dots\dots (6.22)$$

$$\tilde{D}_v^{HH} = \frac{4}{g^2} \int_0^\infty \omega^6 S(\omega) e^{-\frac{2\omega^2}{g} H} d\omega \dots\dots\dots (6.23)$$

式中:

\tilde{F}_w, \tilde{M}_w ——不规则波中二阶平均波浪力、力矩, $N, N \cdot m$;

$\tilde{D}_v^H, \tilde{D}_v^{HH}$ ——不规则波中, 潜艇舢剖面中心处流场垂直一阶速度方差沿潜深 H 的偏导和二阶偏导, $m \cdot s^{-1}, s^{-2}$ 。

在 6.3.1 节公式中, β 规定为顶浪为 0° 。

6.3.2 三维面元频域计算方法

本条适用于要求精度较高的计算、校核。

本节公式是在平移坐标系中导出,该坐标系与潜艇一起以某个速度平移,但不随潜艇一起转动和振荡。当潜艇相对于该坐标静止时,与艇体坐标重合,坐标原点 o 在潜艇重心的垂直线与未扰动自由面的交点上, oz 轴垂直向上, oxy 平面与静水面重合。

6.3.2.1 基本方程

假定流体无粘性、不可压缩、无旋性,近水面潜艇以低速 U 定速前进,速度势可按公式(6.24)形式分解和表达求解条件,其中 m_j, n_j, ξ_j 按公式(6.25)确定。

$$\left. \begin{aligned} \phi(x, y, z, t) &= \Phi(x, y, z, t) + \bar{\phi}(x, y, z) \\ \nabla^2 \Phi(x, y, z, t) &= 0 \quad (x, y, z) \in D \\ \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} - 2U \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t \partial x} + U^2 \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + g \frac{\partial \phi}{\partial z} &= 0 \quad (x, y, z) \in S_F \\ \frac{\partial \Phi}{\partial n} &= \xi_j n_j + \xi_j m_j; \quad (x, y, z) \in S_B \\ \nabla \Phi &\rightarrow 0 \quad Z \rightarrow -\infty \\ \text{适当的远方条件} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6.24)$$

$$\left. \begin{aligned} (m_1, m_2, m_3) &= (0, 0, 0) \\ (m_4, m_5, m_6) &= (0, n_3 U, -n_2 U) \\ (n_1, n_2, n_3) &= (n_x, n_y, n_z) \\ (n_4, n_5, n_6) &= (n_z y - n_y z, n_x z - n_z x, n_y x - n_x y) \\ \xi_j &= \eta_j e^{i\omega_e t} \quad j = 1, 2, \dots, 6 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6.25)$$

式中:

- $\phi(x, y, z, t)$ ——流场速度势, $m^2 \cdot s^{-1}$;
- $\Phi(x, y, z, t)$ ——不定常运动的速度势, $m^2 \cdot s^{-1}$;
- $\bar{\phi}(x, y, z)$ ——定常运动的兴波势 $m^2 \cdot s^{-1}$;
- D ——流场;
- S_F, S_B ——分别为自由表面和艇体湿表面;
- n_x, n_y, n_z ——物面上点 (x, y, z) 处单位法向量(指向流体)在坐标轴上的三个投影分量;
- $\xi_j (j = 1, 2, \dots, 6)$ ——分别为纵荡,横荡,垂荡,横摇,纵摇,艏摇, $m (j \text{ 取 } 1, 2, 3), \text{rad} (j \text{ 取 } 4, 5, 6)$;
- $\xi_j n_j, \xi_j m_j$ ——表示对 j 求和;
- ω_e ——遭遇频率, rad s^{-1} ;
- η_j ——六自由度运动振幅, $m (j \text{ 取 } 1, 2, 3), \text{rad} (j \text{ 取 } 4, 5, 6)$ 。

当潜艇低航速时,可忽略 U^2 以上项,自由面条件可忽略二阶小量,不定常速度势按公式(6.26)表达:

$$\begin{aligned} \Phi(x, y, z, t) &= i\omega_e \eta_j \phi_j e^{i\omega_e t} + U \eta_5 \phi_3 e^{i\omega_e t} \\ &\quad - U \eta_6 \phi_2 e^{i\omega_e t} + (\phi_0 + \phi_7) e^{i\omega_e t} \end{aligned} \dots\dots\dots (6.26)$$

单位速度势 ϕ_j 的求解条件按公式(6.27)表达:

$$\left. \begin{aligned} \nabla^2 \phi_j(x, y, z) &= 0 \quad (x, y, z) \in D \\ -\omega_e^2 \phi_j - 2i\omega_e U \phi_{jx} + g \phi_{jz} &= 0 \quad (x, y, z) \in S_F \\ \nabla \phi_j \cdot \vec{n} &= n_j \quad j = 1, \dots, 6 \quad (x, y, z) \in S_B \\ \nabla \phi_7 \cdot \vec{n} &= -\nabla \phi_0 \cdot \vec{n} \quad (x, y, z) \in S_B \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6.27)$$

式中:

- ϕ_j ——物体六自由度运动单位速度振荡的速度势复振幅, m ;
- ϕ_0 ——入射波速度势复振幅, $m^2 \cdot s^{-1}$;

ϕ_7 ——绕射波速度势复振幅, $m^2 \cdot s^{-1}$;

其余符号同公式(6.24)。

6.3.2.2 方程求解

利用 Fourier 变换方法,求得方程基本解公式(6.28):

$$\left. \begin{aligned} G(x, y, z; \xi, \eta, \zeta) &= (1/r) + (1/2\pi) \int_{L_1} \int_{-\pi}^{\pi} \frac{k + \bar{k} - k\tau \cos(\theta)}{k - \bar{k} + k\tau \cos(\theta)} \\ &\exp\{k(z + \zeta) + ik[(x - \xi)\cos\theta + (y - \eta)\sin\theta]\} dk d\theta \\ r^2 &= (x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 + (z - \zeta)^2 \\ \bar{k} &= \omega_e^2/g \\ \tau &= 2\omega_e U/g \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6.28)$$

式中:

G ——格林函数;

θ ——相对于主浪向的浪向角积分变量;

k ——积分变量,对 k 积分的围道积分 $\int_{L_1} \dots dk$ 。

在精确到 U 一次项前提下, G 可采用零速基本解 G_0 与航速修正项 τG_1 之和的公式(6.29)形式求解。

$$\left. \begin{aligned} G &= G_0 + \tau G_1 \\ G_0 &= P. V. \int_0^\infty \frac{k + \bar{k}}{k - \bar{k}} e^{k(z+\zeta)} J_0(kR) dk - 2\pi \bar{k}_j e^{k(z+\zeta)} J_0(\bar{k}R) \\ G_1 &= 2i \cos(\alpha) \int_0^\infty e^{k(z+\zeta)} J_1(kR) dk - 4i \bar{k} \cos(\alpha) \int_{L_1} \frac{e^{k(z+\zeta)}}{k - \bar{k}} J_1(kR) dk - \\ &- 2i \bar{k}^2 \cos(\alpha) \int_{L_1} \frac{1}{(k - \bar{k})^2} e^{k(z+\zeta)} J_1(kR) dk \\ \cos \alpha &= (x - \xi)/R \\ \sin \alpha &= (y - \eta)/R \\ R &= \sqrt{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6.29)$$

式中:

J_0, J_1 ——零阶、一阶 Bessl 函数;

$P. V. \int$ ——主值积分;

\int_{L_1} ——围道积分;

其余符号同公式(6.28)。

用公式(6.30),即可用基本解 G 与潜艇表面的源分布强度 $\sigma(\xi, \eta, \zeta)$ 表示 $\phi_j(x, y, z)$,通过对零速问题的求解,按公式(6.31)~公式(6.33)求解 σ_{j0} 和 σ_{j1} 后可求得速度势分布与压力分布。

$$\phi_j(x, y, z) = \iint_{S_B} \sigma_j(\xi, \eta, \zeta) G(x, y, z; \xi, \eta, \zeta) ds \quad j = 1, 2, \dots, 7 \quad \dots\dots\dots (6.30)$$

$$\begin{aligned} &\iint_{S_B} \sigma_j(\xi, \eta, \zeta) \nabla_{\xi, \eta, \zeta} G(x_i, y_i, z_i; \xi, \eta, \zeta) \cdot \vec{n}_i ds \\ &= \begin{cases} n_j(x_i, y_i, z_i) & j = 1, 2, \dots, 6 \\ -\nabla \phi_0 \cdot \vec{n}_i & j = 7 \end{cases} \quad \dots\dots\dots (6.31) \end{aligned}$$

设 $\sigma_j = \sigma_{j0} + \tau \sigma_{j1}$

$$\iint_{S_B} \sigma_{j0} \nabla_{\xi, \eta, \zeta} G_0 \cdot \vec{n}_i ds = \begin{cases} n_j(x_i, y_i, z_i) & j = 1, 2, \dots, 6 \\ -\nabla \phi_0 \cdot \vec{n}_i & j = 7 \end{cases} \dots\dots\dots (6.32)$$

$$\iint_{S_B} \sigma_{j1} \nabla_{\xi, \eta, \zeta} G_0 \cdot \vec{n}_i ds = \iint_{S_B} \sigma_{j0} \nabla_{\xi, \eta, \zeta} G_1 \cdot \vec{n}_i ds \dots\dots\dots (6.33)$$

式中:

σ_j ——为未知的分布源强(包括 $\frac{1}{4\pi}$ 因子),可按方程的潜艇表面条件求得;

$\nabla_{\xi, \eta, \zeta}$ ——表示对分布源强的积分面元点(ξ, η, ζ)求函数梯度;

其余符号同公式(6.27)。

6.3.2.3 波浪力和力矩表达式

一阶波浪力(力矩)按式(6.34)计算,二阶平均波浪力和力矩分别按式(6.35)和(6.36)计算:

$$F_{wk}^{(1)} = \rho i \left(\iint_{\Sigma} \phi_{w_i} n_k ds - \iint_{\Sigma} U \phi_{w_x} n_k ds \right) \dots\dots\dots (6.34)$$

$$\phi_{w_i} = (\phi_0 + \phi_7) e^{i\omega_i t}$$

$$\begin{aligned} \vec{F}^{(2)} = & R_e [R^{(1)} \cdot (F^{(1)})^*] + \rho \iint_{\Sigma} R_e [(i\omega_e \nabla \Phi^{(1)}) \cdot (\vec{r}^{(1)})^*] \vec{n} ds + \\ & + \frac{1}{2} \rho \iint_{\Sigma} R_e [(\nabla \Phi^{(1)}) \cdot (\nabla \Phi^{(1)})^*] \vec{n} ds - \rho U \iint_{\Sigma} R_e [(\nabla \Phi_x^{(1)}) \cdot (\vec{r}^{(1)})^*] \vec{n} ds \\ & (\omega_i = \omega_j) \dots\dots\dots (6.35) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \vec{M}^{(2)} = & R_e [R^{(1)} \cdot (M^{(1)})^*] + \rho \iint_{\Sigma} R_e [(i\omega_e \nabla \Phi^{(1)}) \cdot (\vec{r}^{(1)})^*] (\vec{r}^{(0)} \times \vec{n}) ds + \\ & + \frac{1}{2} \rho \iint_{\Sigma} R_e [(\nabla \Phi^{(1)}) \cdot (\nabla \Phi^{(1)})^*] (\vec{r}^{(0)} \times \vec{n}) ds - \rho U \iint_{\Sigma} R_e [(\nabla \Phi_x^{(1)}) \cdot (\vec{r}^{(1)})^*] (\vec{r}^{(0)} \times \vec{n}) ds \\ & (\omega_i = \omega_j) \dots\dots\dots (6.36) \end{aligned}$$

式中:

$F_{wk}^{(1)}$ ——一阶波浪力($k=1,2,3$)和力矩($k=4,5,6$), $N, N \cdot m$,

$R^{(1)}$ ——用矩阵 $\begin{bmatrix} 0 & -\eta_6^{(1)} & \eta_5^{(1)} \\ \eta_6^{(1)} & 0 & -\eta_4^{(1)} \\ -\eta_5^{(1)} & \eta_4^{(1)} & 0 \end{bmatrix}$ 表达的量;

$\vec{r}^{(1)}$ ——等于 $R^{(1)} \vec{r}^{(0)}$,并用 $\begin{bmatrix} -\eta_6^{(1)} y + \eta_5^{(1)} z \\ \eta_6^{(1)} x - \eta_4^{(1)} z \\ -\eta_5^{(1)} x + \eta_4^{(1)} y \end{bmatrix}$ 表达;

向量 $(F^{(1)})^*, (\vec{r}^{(1)})^*, (\nabla \Phi^{(1)})^*$ 中各个分量分别为向量 $\vec{F}^{(1)}, \vec{r}^{(1)}, \nabla \Phi^{(1)}$ 中对应分量的共轭复数;

Φ_{w_i} ——波浪势(入射势和绕射势)对时间的导数;

n_k ——面元 ds 上与自由度 k 相应的广义法向分量;

U ——航速, $m \cdot s^{-1}$;

Φ_{w_x} ——波浪势对 x 的导数, $m \cdot s^{-1}$;

$\vec{F}^{(2)}$ ——总的二阶平均波浪力, N ;

\vec{r} ——积分面元中心点矢径;

$F^{(1)}, M^{(1)}$ ——总的一阶波浪力、力矩, $N, N \cdot m$;

$\Phi^{(1)}$ ——一阶速度势;

下标 x, y, t ——参数对 x, y, t 的导数;

上标(0)、(1)——表示参数的零阶、一阶量。

6.3.3 简化的水下圆柱剖面波浪力计算方法(Ogilvie方法)

适用于主尺度线型未定的预研、方案论证阶段波浪力估算。

6.3.3.1 横浪中一阶波浪力按公式(6.37)计算:

$$F_2^{(1)} - iF_3^{(1)} = (-2\pi\rho g \zeta_a e^{-kh_0}/k)(ka)^2 e^{i\omega t} \dots\dots\dots (6.37)$$

式中:

$F_2^{(1)}$ ——近水面单位长度水平圆柱水平方向的一阶波浪力, N;

$F_3^{(1)}$ ——近水面单位长度水平圆柱垂向方向的一阶波浪力, N;

k ——波数;

ω_0 ——波浪圆频率, $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$;

H_0 ——圆心距静水面距离, m;

a ——圆柱剖面的半径, m。

6.3.3.2 横浪中约束圆柱体波浪二阶平均力按公式(6.38)计算。

$$\left. \begin{aligned} \bar{F}_2^{(2)} &= 0 \\ \bar{F}_3^{(2)} &= 2\pi\rho g \zeta_a^2 e^{-2kh_0}(ka)I_1(2ka) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6.38)$$

式中:

$\bar{F}_2^{(2)}$ 、 $\bar{F}_3^{(2)}$ ——近水面单位长度水平圆柱二阶平均的水平、垂向波浪力, N;

$I_1(x)$ ——变形的第一类贝塞尔函数。

6.3.3.3 横浪中自由悬浮随波浪作轨圆运动的小尺度圆柱体二阶波浪平均力按公式(6.39)计算:

$$\left. \begin{aligned} \bar{F}_2^{(2)} &= 0 \\ \bar{F}_3^{(2)} &= 2\pi\rho g \zeta_a^2 e^{-2kh_0}[I_1(2ka) - (ka)](ka) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6.39)$$

式中:符号同公式(6.38)。

6.3.3.4 对于剖面近于圆形的潜艇,可用 $a(x)$ 取值 $\sqrt{S_A(x)/\pi}$ 作为 x 处剖面的相当半径, $S_A(x)$ 为潜艇该处剖面面积。

7 波浪中近水面低频运动水动力系数及艇体受力计算方法

7.1 低频运动水动力系数的确定

确定低频运动水动力系数时,忽略运动时间历程对水动力系数的影响,运动方程中的水动力系数取零频时的数值。

7.1.1 近水面附加质量

7.1.1.1 潜艇近水面垂直面内运动的水动力系数中的惯性部分——即附加质量与附加惯量采用势流理论中三维面元法计算。计算时,自由液面条件趋于固壁条件。

水面状态的潜艇相当于重叠艇体在深水中运动的势流计算,近水面状态的潜艇相当于以自由水面为映射面的艇体及其映射体在深水势流中的计算。

7.1.1.2 近水面潜艇低频运动计算时,应对潜艇的若干典型潜深状态进行计入近水面影响的附加质量系数的计算。潜深变化时的附加质量系数可用对潜深进行回归处理后的潜艇附加质量系数随潜深变化曲线,用内插法求取。当 H_0 趋于大深度时,可取深水时的值。

7.1.2 近水面水动力系数

一般可通过近水面约束模型试验(如平面运动机构 PMM,回转水池试验等)得到。初步设计阶段也可采用经验公式近似计算获取。

7.1.2.1 深水系数近似计算采用 GJB/Z110 的规定或其它有效方法,根据艇的主要几何参数采用半理论半经验公式估算水动力系数。

7.1.2.2 潜深对水动力系数的近水面影响,可通过不同潜深的试验结果,对潜深 H_0 的回归得出。

潜艇在近水面下给定潜深 H_0 与变动潜深 H 时的水动力系数的关系——近水面影响的修正,用公式(7.1)的指数函数形式表达,其参数 b^0 、 d^0 分别按公式(7.2)、公式(7.3)计算。

$$\left. \begin{aligned} C &= C_0 e^{b^0(H_0-H)} \\ M &= M_0 e^{d^0(H_0-H)} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7.1)$$

$$b^0 = - \frac{1}{C_0} \frac{\partial C}{\partial H} \Big|_{\substack{H=H_0 \\ U=U_0}} \dots\dots\dots (7.2)$$

$$d^0 = - \frac{1}{M_0} \frac{\partial M}{\partial H} \Big|_{\substack{H=H_0 \\ U=U_0}} \dots\dots\dots (7.3)$$

式中:

- C ——水动力系数 C 在潜深 H 时的值;
- C_0 ——水动力系数 C 在潜深 H_0 时的值;
- b^0 ——力系数的随潜深的衰减因子,可通过试验值确定;
- M ——水动力矩系数 M 在潜深 H 时的值;
- M_0 ——水动力矩系数 M 在潜深 H_0 时的值;
- H_0, H ——潜深, m;
- d^0 ——力矩系数的随潜深的衰减因子,可通过试验值确定;
- U, U_0 ——航速, $m \cdot s^{-1}$ 。

潜深大于 35m 时,水动力系数可以忽略近水面的影响。

7.2 近水面操舵舵力水动力计算

7.2.1 操舵舵力水动力计算

操舵舵力水动力计算一般只考虑垂直面内艏舵(围壳舵)及艉升降舵的垂向力 $Z(\delta)$ 和纵倾力矩 $M(\delta)$ 。此类力的表达式中,一般只包括函数 $Z(\delta)$ 和 $M(\delta)$ 按每一对艏舵和艏舵(围壳舵)的操舵角 δ_b 和 δ_s 的幂次展开的线性项,由公式(7.4)计算。

$$\left. \begin{aligned} Z(\delta) &= \frac{1}{2} \rho L^2 u^2 (Z'_{\delta_b} \delta_b + Z'_{\delta_s} \delta_s) \\ M(\delta) &= \frac{1}{2} \rho L^3 u^2 (M'_{\delta_b} \delta_b + M'_{\delta_s} \delta_s) \\ &\left\{ \begin{aligned} |\delta_b| &\leq \delta_{bm} \\ |\delta_s| &\leq \delta_{sm} \end{aligned} \right. \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7.4)$$

式中:

- $Z(\delta)$ ——舵的垂向力, N;
- $M(\delta)$ ——舵的纵倾力矩, $N \cdot m$;
- δ_b ——艏舵(围壳舵)舵角, rad;
- δ_s ——艉升降舵舵角, rad;
- $Z'_{\delta_b}, Z'_{\delta_s}$ ——随潜深变化的水动力系数;
- $M'_{\delta_b}, M'_{\delta_s}$ ——随潜深变化的水动力矩系数;
- δ_{bm}, δ_{sm} ——给定的舵角界限值, rad。

7.2.2 操舵舵力的水动力系数及其潜深影响的确定

近水面舵力水动力系数 $Z'_{\delta_b}, Z'_{\delta_s}, M'_{\delta_b}$ 和 M'_{δ_s} 一般通过模型试验确定。变潜深的舵力水动力系数可通过对若干潜深的试验回归曲线插值得出。在缺乏近水面舵力水动力系数时可用深水舵力水动力系数代

替。

7.3 近水面状态均衡水舱注、排水作用力计算

采用对均衡水舱注水、排水的方法,补偿由静水自由表面引起的力和力矩、平均波浪力和力矩及潜艇剩余浮力变化产生的力和力矩。近水面状态均衡水舱注、排水所产生的力 F_U 和纵倾力矩 M_U 的计算需根据所要解决的具体问题的性质来确定。其量值一般可按公式(7.5)和公式(7.6)及 7.3.3 的原则计算确定。

7.3.1 静水中近水面自由表面影响的力和力矩

静水中近水面自由表面引起的力和力矩按公式(7.5)计算:

$$\left. \begin{aligned} F_{U1} &= Z'_s \frac{1}{2} \rho U^2 L^2 \\ M_{U1} &= M'_s \frac{1}{2} \rho U^2 L^3 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7.5)$$

式中:

- F_{U1} ——由静水自由表面引起的力,N;
- Z'_s ——静水自由表面影响流体动力系数,随潜深和航速变化;
- M_{U1} ——由静水自由表面引起的力矩,N·m;
- M'_s ——静水自由表面影响流体动力力矩系数,随潜深和航速变化。

7.3.2 波浪中近水面影响的力和力矩

波浪中近水面影响是由静水中近水面自由表面影响加上平均波浪力和力矩的影响,按公式(7.6)计算,其中,平均波浪力 \tilde{F}_w 和平均波浪力矩 \tilde{M}_w 按第 6 章规定的方法计算。

$$\left. \begin{aligned} F_{U2} &= Z'_s \frac{1}{2} \rho U^2 L^2 + \tilde{F}_w \\ M_{U2} &= M'_s \frac{1}{2} \rho U^2 L^3 + \tilde{M}_w \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7.6)$$

式中:

- F_{U2}, M_{U2} ——波浪中近水面影响的力和力矩,N,N·m;
- \tilde{F}_w, \tilde{M}_w ——平均波浪力和力矩,N,N·m。

7.3.3 潜艇剩余浮力变化

海水密度、盐度、温度和艇体压缩度改变引起浮态平衡变化所产生的静力与静水中近水面自由表面及波浪中近水面波浪产生的力和力矩相比是小量,可根据实际需要加以考虑。

8 波浪中近水面垂直面定深运动稳定性计算方法

8.1 数学模型

满足 4.5.4 的要求和要点;假定潜艇近水面低速航行时运动是微幅的,并可忽略高频力的影响。

8.1.1 波浪中近水面垂直面运动方程

波浪中近水面垂直面运动方程按公式(8.1)表达:

$$\begin{cases} m(\ddot{\eta}_3 - U\dot{\eta}_5) = F_H + F_w \\ I_5 \ddot{\eta}_5 + mgh\eta_5 = M_H + M_w \end{cases} \dots\dots\dots (8.1)$$

8.1.2 艇体受力与运动的分解数学模型

潜艇所受波浪力、水动力与运动参数忽略高频项按公式(8.2)和公式(8.3)分解为波频项与低频(平均)项。

$$\begin{cases} F_i = \tilde{F}_i + F_i^0(t) \\ M_i = \tilde{M}_i + M_i^0(t) \end{cases} \quad i = H, W \dots\dots\dots (8.2)$$

$$\eta_j = \tilde{\eta}_j + \eta_j^0(t) \quad j = 3, 5 \dots \dots \dots (8.3)$$

式中:

F, M ——力,力矩, N, Nm;

脚标 W ——表示波浪力;

脚标 H ——表示水动力;

\sim ——上标,表示时间平均项;

0 ——上标,表示与时间有关的项;

η_j ——波浪中垂直面运动参数; j 取 3 表示垂向运动, j 取 5 表示纵倾运动。

潜艇近水面垂直面的波频运动方程按公式(8.4)表达,潜艇近水面垂直面的低频、慢变的漂移、纵倾运动方程按公式(8.5)表达。

$$\left. \begin{aligned} m(\ddot{\eta}_3^0 - U\dot{\eta}_5^0) &= F_H^0 + F_W^0 \\ I_5 \ddot{\eta}_5^0 + mgh\eta_5^0 &= M_H^0 + M_W^0 \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (8.4)$$

$$\left. \begin{aligned} m(\ddot{\tilde{\eta}}_3 - U\dot{\tilde{\eta}}_5) &= \tilde{F}_H + \tilde{F}_W \\ I_5 \ddot{\tilde{\eta}}_5 + mgh\tilde{\eta}_5 &= \tilde{M}_H + \tilde{M}_W \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (8.5)$$

在实际计算中,波频运动方程及其求解采用第 5 章的规定。

8.1.3 波浪力瞬时值计算

给定航行状态下作用在艇体上的总的波浪力瞬时值按公式(8.6)计算:

$$F(t) = \sum_{i=1}^{30} [(2S_w(\omega_{0i})\Delta\omega_0)^{1/2} \cos(\omega_{ei}t + \epsilon_i + \epsilon_j) F^{(1)}/\zeta_a + (2S_w(\omega_{\alpha i})\Delta\omega_0) F^{(2)}/\zeta_a^2] \dots (8.6)$$

式中:

$F(t)$ ——波浪力瞬时值, N;

S_w ——海浪谱密度, $m^2 \cdot s$;

ω_{0i} ——波浪圆频率, $rad \cdot s^{-1}$;

ω_{ei} ——遭遇圆频率, $rad \cdot s^{-1}$;

t ——时间, s;

ϵ_i ——线性叠加波浪力元的随机相位, rad;

ϵ_j ——一阶波浪力响应的相位角, rad;

$\Delta\omega_0$ ——圆频率间距, $rad \cdot s^{-1}$;

$F^{(1)}/\zeta_a, F^{(2)}/\zeta_a^2$ ——一阶、二阶波浪力响应, $N \cdot m^{-1}, N \cdot m^{-2}$ 。

圆频率间距一般取 $0.1(g/L)^{1/2}$ 。对于近水面状态,一般无因次圆频率 $\omega_{0i}(L/g)^{1/2}$ 取 $0.5 \sim 3.5$ 。

波浪圆频率与遭遇圆频率的关系,按公式(8.12)确定。

总的波浪力矩瞬时可按公式(8.6)类似的公式计算。

8.2 艇体低频非线性漂移运动计算方法

潜艇近水面的低频非线性漂移运动的求解,一般可采用龙格-库塔方法为基础的阿当姆斯预估校正方法,对 8.2.1 条的相关方程组进行时间步进的数值积分运算。

8.2.1 数值积分运算采用的运动方程和补充方程

8.2.1.1 运动方程

由平均波浪力(力矩)引起的低频运动的近水面(操纵运动)方程按公式(8.5)表达。

8.2.1.2 潜艇自动操舵运动规律的补充方程

自动操舵系统的指令舵角 δ_d (艏升降舵角 δ_{db} 和艉升降舵角 δ_{ds}) 是潜艇运动参数(垂向位移或潜深偏离量 ΔH 和纵倾偏离 $\Delta\theta$) 的函数,采用公式(8.7)表达:

$$\left. \begin{aligned} \delta_{db} &= a\Delta H + b\dot{H} \\ \delta_{ds} &= c\Delta\theta + d\dot{\theta} + e\delta_b \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (8.7)$$

式中:

- δ_{db}, δ_{ds} —— 艏、艉升降舵的自动操舵系统中的指令舵角, rad;
- a, b, c, d, e —— 指令舵角的相关系数, 按试验或经验求取。

在求解二阶平均波浪力引起的低频非线性运动方程(8.5)时, 需补充操舵规律的方程(8.7)和舵机特性方程(9.13)。

8.2.2 波浪中近水面垂直面二阶平均波浪力及其力矩响应函数的确定

二阶平均波浪力及其力矩响应函数是潜深、航速、航向和波频的函数, 按第6章的方法确定。

8.2.3 不规则波中潜艇近水面垂直面瞬时潜深时二阶平均波浪力及力矩的近似确定

采用线性叠加原理, 海浪由30个频率的规则波叠加而成, 通过对瞬时潜深 H_0 计算的二阶平均波浪力响应, 按公式(8.8)和公式(8.9)计算瞬时潜深 H_0 时的二阶平均波浪力和力矩:

$$\tilde{F}_w(H_0) = \sum_{i=1}^{30} [(2S_w(\omega_{0i})\Delta\omega_0)F_w^{(2)}(\omega_{0i})/\zeta_a^2] \dots\dots\dots (8.8)$$

$$\tilde{M}_w(H_0) = \sum_{i=1}^{30} [(2S_w(\omega_{0i})\Delta\omega_0)M_w^{(2)}(\omega_{0i})/\zeta_a^2] \dots\dots\dots (8.9)$$

式中:

- $\tilde{F}_w(H_0)$ —— 瞬时潜深 H_0 时二阶平均波浪力, N;
- $S_w(\omega_{0i})$ —— 海浪谱密度函数, $m^2 \cdot s^{-1}$;
- $F_w^{(2)}/\zeta_a^2$ —— 潜深 H_0 时, 相应于波频 ω_{0i} 的二阶平均波浪力响应, $N \cdot m^{-2}$;
- $\tilde{M}_w(H_0)$ —— 瞬时潜深 H_0 时二阶平均波浪力矩, $N \cdot m$;
- $M_w^{(2)}/\zeta_a^2$ —— 潜深 H_0 时, 相应于波频 ω_{0i} 的二阶平均波浪力矩响应, $N \cdot m^{-1}$ 。

8.2.4 流体动力项 \tilde{F}_H, \tilde{M}_H 的计算

方程(8.5)中流体动力按公式(8.10)计算:

$$\left. \begin{aligned} \tilde{F}_H &= \frac{\rho}{2} \cdot L^4 \cdot Z'_q \ddot{\eta}_5 + \frac{\rho}{2} \cdot L^3 \cdot (Z'_w \ddot{\eta}_3 + Z'_q U \dot{\eta}_5) + \frac{\rho}{2} \cdot L^2 \cdot \\ & (Z'_0 U^2 + Z'_w U \dot{\eta}_3 + Z'_{bb} U^2 \delta_b + Z'_{bs} U^2 \delta_s) \\ \tilde{M}_H &= \frac{\rho}{2} \cdot L^5 \cdot M'_q \ddot{\eta}_5 + \frac{\rho}{2} \cdot L^4 \cdot (M'_w \ddot{\eta}_3 + M'_q U \dot{\eta}_5) + \frac{\rho}{2} \cdot L^3 \cdot \\ & (M'_0 U^2 + M'_w U \dot{\eta}_3 + M'_{bb} U^2 \delta_b + M'_{bs} U^2 \delta_s) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (8.10)$$

式中:

- F_H, M_H —— 二阶平均水动力、力矩, N, Nm;
- Z'_q, M'_q —— 垂向水动力、纵倾水动力矩对纵倾加速度的无因次导数;
- Z'_q, M'_q —— 垂向水动力、纵倾水动力矩对纵倾速度的无因次导数;
- Z'_w, M'_w —— 垂向水动力、纵倾水动力矩对垂向加速度的无因次导数;
- Z'_w, M'_w —— 垂向水动力、纵倾水动力矩对垂向速度的无因次导数;
- Z'_0, M'_0 —— 垂向水动力、纵倾水动力矩的无因次零态值;
- Z'_{bb}, M'_{bb} —— Z, M 对艏升降舵舵角的线性无因次导数;
- Z'_{bs}, M'_{bs} —— Z, M 对艉升降舵舵角的线性无因次导数;
- $\ddot{\eta}_3, \ddot{\eta}_5$ —— 垂向、纵倾加速度, $m \cdot s^{-2}, rad \cdot s^{-2}$;
- $\dot{\eta}_3, \dot{\eta}_5$ —— 垂向、纵倾速度, $m \cdot s^{-1}, rad \cdot s^{-1}$;

$\tilde{\eta}_3, \tilde{\eta}_5$ ——垂向位移、纵倾角度, m、rad;
 δ_b, δ_s ——艏、艉升降舵舵角, rad。

考虑了近水面效应的垂直面的流体水动力(力矩)及升降舵舵角的无因次导数,采用潜艇模型不同潜深的水动力试验结果,按潜深 H_0 特定函数形式回归求得。

8.2.5 波浪中近水面二阶平均波浪力作用下艇体垂直面运动参数的时域确定

8.2.5.1 艇体所受二阶波浪力(力矩) \tilde{F}_w, \tilde{M}_w 和水动力 $\tilde{F}_{11}, \tilde{M}_{11}$ 是潜深 H_0 、航向 β_s 的函数,在变深度运动中艇体的漂移运动 $\tilde{\eta}_j$ 是潜深或时间的隐函数。

8.2.5.2 通过方程(8.5)、公式(8.7)、公式(9.13)或公式(9.14)的数值积分求解,得出潜深偏离 ΔH 和纵倾偏离 $\Delta\theta$ 等参数时间历程,也可得到其他物理量如垂向位移速率、纵倾角速度、舵角变化等。

8.3 波频运动与低频非线性漂移运动耦合的时域计算

8.3.1 波频运动的时域计算

8.3.1.1 变深度时,潜艇波频运动瞬时值的确定,可用线性叠加原理按公式(8.11)计算,其遭遇频率按公式(8.12)计算。

$$\eta_j^0(t) = \sum_{i=1}^{30} \{ \sqrt{2S_w(\omega_{0i})\Delta\omega_0} \cdot \cos(\omega_{ei}t + \epsilon_i + \epsilon_j) \cdot \eta_{ja}^0/\zeta_a \} \quad j = 3, 5 \dots\dots\dots (8.11)$$

$$\omega_{ei} = \omega_{0i} - \frac{\omega_{0i}^2}{g} \cdot U \cos\beta_s \dots\dots\dots (8.12)$$

式中:

$\eta_j^0(t)$ ——变潜深时,艇体波频运动参数 η_j^0 的时间瞬时值, m($j = 3$)、rad($j = 5$);

S_w ——计算海浪的谱密度函数 $S_w((\zeta_w)_{1/3}, T_1, \omega_{0i})$;

ω_{0i} ——波浪圆频率, rad·s⁻¹;

$\Delta\omega_0$ ——波频积分元, rad·s⁻¹;

ω_{ei} ——遭遇频率, rad·s⁻¹;

ϵ_j ——相应潜深时潜艇运动频率响应的相位角 $\epsilon_j(\omega_{0i}, \beta_s, H_0(t))$, rad;

ϵ_i ——线性叠加计算中 30 个频率运动的随机相位角, rad;

η_{ja}^0/ζ_a ——相应潜深 $H_0(t)$ 时的潜艇规则波运动响应, m/m($j = 1, 2, 3$), rad·m⁻¹($j = 4, 5, 6$)。

8.3.1.2 计算中,无因次波频 $\omega_0(L/g)^{0.5}$ 取值为 0.5~3.5,间隔 $\Delta\omega_0(L/g)^{0.5}$ 取为 0.1。

8.3.1.3 公式(8.11)叠加所得的波频运动参数 $\eta_j^0(t)$ 表示该运动时间历程的一个样本,参与对二阶波浪力引起的非线性漂浮运动 $\tilde{\eta}_j$ 的叠加与耦合影响。

8.3.1.4 计算时,瞬时潜深的波频运动响应,可通过潜深变化范围的若干个给定潜深的计算结果所组成的数据库文件内插求出。

8.3.2 波浪中近水面潜艇非线性运动的时间历程

运动的时间历程按公式(8.13)表达:

$$\left. \begin{aligned} \eta_j(t) &= \tilde{\eta}_j(H_0(t)) + \eta_j^0(t) \quad j = 3, 5 \} \dots\dots\dots (8.13) \\ t &= i \cdot \Delta t \quad i = 0, 1, 2, \dots, n \end{aligned} \right\}$$

式中:

$\eta_j(t)$ ——考虑了波频运动影响的波浪力作用引起的潜艇非线性运动响应时间历程;

η_j^0 ——由公式(8.11)确定的波频运动瞬时值;

$\tilde{\eta}_j$ ——由 8.2.5.2 节计算得出的低频运动的瞬时值,是瞬时潜深 $H_0(t)$ 的函数。

8.3.3 波频运动与低频漂移运动耦合的时域计算

8.3.3.1 在给定的航行状态和环境条件下,按公式(8.11)求得的波频运动 $\eta_j^0(t)$ 瞬时值,应考虑其对低频非线性运动计算的耦合影响。

8.3.3.2 低频慢变运动采用极小量的时间间隔进行时间步进法求解,在极小量的时间间隔中将动态运动的过程作简化处理,即运动方程作为常微分方程,通过逐步的数值积分求解得到运动时间历程。

8.3.3.3 对整个时域过程,均按公式(8.13)计算每个 $\eta_i(t)$ 瞬时值,得到运动参数的时间历程。

8.4 艇体指定位置处波频运动与低频非线性漂移运动耦合的时域计算

艇体指定位置处波频运动与低频非线性漂移运动耦合的时域计算按 8.3.3 条和 5.3.6 条相关方法规定进行。

8.5 垂直面定深运动稳定性的检验和判别

8.5.1 近水面垂直面潜艇运动稳定性判别方法

8.5.1.1 判别目标

近水面垂直面潜艇定深运动稳定性的判别是对在给定的航行状态和环境条件(如浪向(β_s)、浪级($(\zeta_w)_{1/3}$ 、 T_1)、航速(U)、深度(H_0)等)以及操控规律情况下,潜艇在波浪中近水面航行一段相当长时间的纵倾和潜深变化时间历程进行的,时间历程的长度根据潜艇完成战略战术任务的需要确定,航行状态、环境条件的选择根据潜艇完成战略战术任务的要求决定。

8.5.1.2 判别衡准

以潜深和纵倾偏离允许值 ΔH_m 、 $\Delta\theta_m$ 作为判别的衡准,根据计算得出的潜深 H_s 和纵倾角 θ_s 运动时间历程与初始潜深 H_0 和纵倾角 θ_0 确定艇体运动的偏离,按公式(8.14)进行判别。当满足公式(8.14)时,判别为运动稳定,否则判别为运动不稳定。

$$\left. \begin{array}{l} |H_0 - H_s| \leq \Delta H_m \\ |\theta_0 - \theta_s| \leq \Delta\theta_m \end{array} \right\} \dots\dots\dots (8.14)$$

式中:

ΔH_m —— 潜深偏离允许值, m;

$\Delta\theta_m$ —— 纵倾角偏离允许值, ($^\circ$)、rad;

H_0 —— 初始潜深, m;

H_s —— 瞬时潜深, m。

θ_0 —— 初始纵倾角, ($^\circ$)、rad;

θ_s —— 瞬时纵倾角, ($^\circ$)、rad。

8.5.1.3 近水面垂直面潜艇定深运动稳定区的临界曲线

预报结果若出现艇体出水(露背)情况,是潜艇在波浪中近水面垂直面运动稳定性处于不稳定的典型状况。

通过不同初始潜深、波高、浪向的稳定性计算,得出按航速、有义波高、波浪平均周期等组合的以潜深为纵轴、相对浪向为横轴的潜艇波浪中近水面垂直面定深运动稳定区的临界曲线,临界曲线所处的潜深是稳定性的临界初始潜深 H_{0cr} 。当在足够长时间内(根据潜艇完成任务所需要的时间确定)艇体的纵倾和深度变化满足稳定性判别式(8.14),该初始潜深 H_0 属于运动稳定区。相反,潜艇不断的非控制性上浮,超过规定的偏离值,属运动不稳定区,参见图 4.3。

8.5.1.4 稳定性计算工况

近水面垂直面潜艇定深运动稳定性判别采用的海浪、航速和相对浪向,可根据潜艇完成其战略战术任务的需要确定。相对浪向 β_s ,一般可从 $180^\circ \sim 0^\circ$ 间按间隔 30° 选择计算。

8.5.2 近水面垂直面潜艇运动定深稳定性检验步骤

8.5.2.1 舵控制状态

对仅用舵控制的潜艇按给定的航行状态、环境条件和操舵控制规律进行近水面垂直面定深运动稳定性判别。若纵倾和潜深不超过规定的偏离允许值,不出现不可控制的上浮出水现象,可认为该潜艇满足垂直面定深运动稳定性要求。不满足时,可通过修改附体、操纵面、操舵控制规律等措施,进行反复检验

判别;若仍不能满足,再按 8.5.2.2 条的规定进行检验判别。

8.5.2.2 舵、水联合控制状态

对舵、水联合控制的潜艇按给定的航行状态、环境条件和舵、水操纵控制规律进行近水面垂直面运动定深稳定性检验判别。若纵倾和潜深不超过规定的偏离允许值,不出现不可控制的上浮出水现象,可认为该潜艇在该初始潜深满足垂直面定深运动稳定性要求。

9 波浪中近水面导弹垂直发射艇体运动计算方法

9.1 基本假定

9.1.1 潜艇在近水面航行时,艇的运动参数控制在较小范围内变化(微幅机动),艇的运动用线性运动方程来描述。

9.1.2 艇的纵向加速度为零,艇体受到的阻力和推力相等。纵向运动方程与其他方向的运动参数无关。

9.1.3 艇体坐标系的 oxz 平面与艇的中线面重合,假定艇体的惯性积 I_{xy} 、 I_{xz} 、 I_{yz} 等于零。

9.1.4 潜艇艇体为刚体,艇体受到的外力为波浪力、水动力、操纵控制力、导弹垂直发射反力和其他的作用力。

9.2 数学模型

9.2.1 坐标系

采用两个坐标系即大地坐标系 $E\xi\eta\zeta$ 和艇体坐标系 $Oxyz$,见 4.2.2 条规定。

9.2.2 近水面运动方程

波浪中近水面导弹发射时潜艇六个自由度低频运动方程及其运动关系式由公式(9.1)~公式(9.7)表达:

$$\text{纵向运动方程} \quad \dot{u} = 0 \quad \dots\dots\dots (9.1)$$

$$\text{垂向运动方程} \quad m(\dot{w} - uq) = Z_H + Z_W + Z_i \quad \dots\dots\dots (9.2)$$

$$\text{纵倾运动方程} \quad I_y \dot{q} = M_H + M_W + M_i - mgh\theta \quad \dots\dots\dots (9.3)$$

$$\text{横向运动方程} \quad m(\dot{v} + ur - z_C \dot{p}) = Y_H + Y_W + Y_i \quad \dots\dots\dots (9.4)$$

$$\text{转艏运动方程} \quad I_z \dot{r} = N_H + N_W + N_i \quad \dots\dots\dots (9.5)$$

$$\text{横倾运动方程} \quad I_x \dot{p} - mz_C(\dot{v} + ur) = K_H + K_W + K_i - mgh\varphi \quad \dots\dots\dots (9.6)$$

运动关系式

$$\left. \begin{aligned} \zeta &\approx u \\ \dot{\eta} &\approx u\psi + v \\ \xi &\approx -u\theta + w \\ \dot{\varphi} &\approx p \\ \dot{\theta} &\approx q \\ \dot{\psi} &\approx r \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (9.7)$$

式中:

- I_x, I_y, I_z —— 潜艇水下状态对 x, y, z 轴的转动惯量, $\text{kg}\cdot\text{m}^2$;
- Y, Z —— 艇体受到的作用力沿 y, z 轴的分量, N ;
- K, M, N —— 艇体受到的外力矩对 x, y, z 轴的分量, $\text{N}\cdot\text{m}$;
- u, v, w —— 艇体坐标原点的线速度在 x, y, z 轴的分量, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$;
- p, q, r —— 艇的角速度在 x, y, z 轴的分量, $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$;
- m —— 潜艇水下状态的质量, kg ;
- z_C —— 潜艇水下状态的重心垂向坐标值, m ;
- h —— 潜艇水下状态的初稳心高, m ;

- ξ, ζ, η ——艇体坐标系原点在大地坐标系中的坐标值, m;
 θ ——纵倾角, rad;
 φ ——横倾角, rad;
 ψ ——艏向角, rad;
 上标(') ——表示该参数的时间导数;
 下角标 H ——艇受到的水动力和力矩;
 下角标 W ——艇受到的波浪力和力矩;
 下角标 i ——导弹发射过程中作用在艇上的其他外力和力矩。

9.2.3 水动力表达式

艇体受到的水动力是艇体运动参数的多元函数,可用台劳级数展开式表示。根据运动数学模型线性化假定,忽略水动力展开式中的二次及二次以上项,水动力表达式按公式(9.8)~公式(9.12)表达。

$$Y_H = \frac{1}{2}\rho L^4(Y'_i \dot{r} + Y'_p \dot{p}) + \frac{1}{2}\rho L^3(Y'_v \dot{v} + Y'_r ur + Y'_p up) + \frac{1}{2}\rho L^2(Y'_v uv + Y'_\delta u^2 \delta_r) \dots \dots \dots (9.8)$$

$$Z_H = \frac{1}{2}\rho L^4 Z'_q \dot{q} + \frac{1}{2}\rho L^3(Z'_w \dot{w} + Z'_q uq) + \frac{1}{2}\rho L^2(Z'_0 u^2 + Z'_w uw + Z'_\delta u^2 \delta_b + Z'_\delta u^2 \delta_s) \dots \dots \dots (9.9)$$

$$K_H = \frac{1}{2}\rho L^5(K'_p \dot{p} + K'_i \dot{r}) + \frac{1}{2}\rho L^4(K'_p up + K'_r ur + K'_v v) + \frac{1}{2}\rho L^3(K'_v uv + K'_\delta u^2 \delta_r) \dots \dots \dots (9.10)$$

$$M_H = \frac{1}{2}\rho L^5 M'_q \dot{q} + \frac{1}{2}\rho L^4(M'_w \dot{w} + M'_q uq) + \frac{1}{2}\rho L^3(M'_0 u^2 + M'_w uw + M'_\delta u^2 \delta_b + M'_\delta u^2 \delta_s) \dots \dots \dots (9.11)$$

$$N_H = \frac{1}{2}\rho L^5(N'_i \dot{r} + N'_p \dot{p}) + \frac{1}{2}\rho L^4(N'_v \dot{v} + N'_p up + N'_r ur) + \frac{1}{2}\rho L^3(N'_v uv + N'_\delta u^2 \delta_r) \dots \dots \dots (9.12)$$

式中:

- Y_H, Z_H ——横向、垂向水动力, N;
 Y'_s, Z'_s ——横向、垂向水动力对运动参数 s 的无因次导数值;
 K_H, M_H, N_H ——横倾、纵倾和转艏水动力矩, N·m;
 K'_s, M'_s, N'_s ——横倾、纵倾和转艏水动力矩对运动参数 s 的无因次导数值;
 Z'_0, M'_0 ——无因次垂向力和纵倾力矩系数的零态值;
 上角标 ' ——表示该参数的无因次值;
 下角标 s —— s 取 u, v, w 时分别表示沿 x, y, z 轴的速度参数,
 s 取 $\dot{u}, \dot{v}, \dot{w}$ 时分别表示沿 x, y, z 轴的加速度参数,
 s 取 p, q, r 时分别表示绕 x, y, z 轴的角速度参数,
 s 取 $\dot{p}, \dot{q}, \dot{r}$ 时分别表示绕 x, y, z 轴的角加速度参数,
 s 取 $\delta_b, \delta_s, \delta_r$ 时分别表示艏、艇升降舵和方向舵的舵角参数;
 $\delta_b, \delta_s, \delta_r$ ——艏、艇升降舵和方面舵的舵角, rad。

公式(9.8)至公式(9.12)中,诸无因次导数可通过近水面操纵性试验获取。

9.2.4 波浪力和力矩

波浪力和力矩的计算按本标准第6章和第8章的规定进行。

9.2.5 导弹垂直发射过程中所产生的力和力矩

根据实验台架试验、模型试验结果通过计算确定导弹垂直发射作用在潜艇上的力和力矩时域变化规

律,综合后得到总负荷及其力矩随时间变化的曲线或图表。这些曲线或图表取决于大量的数据,其中最重要的是导弹的型号、数量及分布;导弹垂直发射的方式、数量、时间间隔和发射次序;均衡补重系统的特性、容积、布置、补重时间和方式等。

9.2.6 波浪中近水面导弹垂直发射艇体运动操纵系统、运动姿态控制数学模型

9.2.6.1 舵控制和舵机操纵特性

当已有确定的自动操舵系统时,根据实际情况确定其数学模型。其它情况下舵机操纵模型按公式(9.13)~公式(9.14)和图 9.1 表达:

$$\delta_i = \begin{cases} 0 & \text{当 } |\sigma_i| < \sigma_{i1} \\ \frac{\delta_{i \max}}{\sigma_{i2} - \sigma_{i1}} (|\sigma_i| - \sigma_{i1}) \text{Sign}(\sigma_i) & \text{当 } \sigma_{i1} \leq |\sigma_i| \leq \sigma_{i2} \dots \dots \dots (9.13) \\ \delta_{i \max} \text{Sign}(\sigma_i) & \text{当 } |\sigma_i| > \sigma_{i2} \end{cases}$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma_b &= a_1 \Delta H + a_2 \dot{H} + a_3 \theta + a_4 \dot{\theta} - \delta_b \\ \sigma_s &= b_1 \Delta H + b_2 \dot{H} + b_3 \theta + b_4 \dot{\theta} - \delta_s \\ \sigma_r &= c_1 \psi + c_2 \dot{\psi} - \delta_r \\ \Delta H &= H - H_0 \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (9.14)$$

式中:

- δ_i ——操舵角速度, $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$;
- σ_i ——舵升降舵(围壳舵)、艉升降舵及方向舵的指令舵角, rad ;
- σ_{i1} ——舵装置不灵敏区域的上限, rad ;
- σ_{i2} ——舵装置比例区域的上限, rad ;
- $\delta_{i \max}$ ——最大操舵角速度, $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$;
- ΔH ——深度偏离,初始(发射)深度的变化量, m ;
- H ——深度, m ;
- H_0 ——初始(发射)深度, m ;
- \dot{H} ——深度变化率, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;
- θ ——艇体纵倾角, rad ;
- $\dot{\theta}$ ——艇体纵倾角速度, $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$;
- ψ ——艇体转舵角, rad ;
- $\dot{\psi}$ ——艇体转舵角速度, $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$;
- a_i, b_i, c_i ——系数。

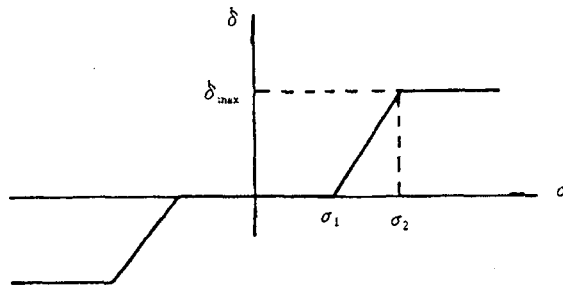


图 9.1 舵装置特性

9.2.6.2 其他控制

对于其他控制方法如舵、水联合控制,注排水均衡、艇体悬浮控制等应根据实际情况建立相应的数学

模型。当某控制量的变化是按时间进程预先设定(程序控制)时,可将其产生的控制力和力矩作为时间的已知函数计入导弹发射所产生的力和力矩中。

9.3 波浪中近水面导弹发射时艇体运动的计算方法

9.3.1 在给定(设定)航行条件要求、艇体运动姿态控制系统特性和导弹发射作用力条件下进行波浪中近水面导弹发射时艇体运动的计算。

9.3.1.1 导弹发射航行条件要求一般应包括潜深,浪级,航速,浪向等。

9.3.1.2 导弹发射作用力和力矩一般应包括不同发射的方式、数量、时间间隔和发射次序的发射作用力和力矩的实时图,以折线或直线线性近似方法表示导弹发射时艇体载荷变化的实际载荷图。

9.3.2 波浪中近水面导弹发射时艇体运动的计算可参照第八章的方法进行。这时应计算波浪力不规则波作用在艇体上的平均波浪力(低频力)和波浪力在频域的分量(波频力),发射时运动的时域计算应对足够的时间样本进行统计,按均匀分布选择 m 个随机初始发射时刻,每次齐射 n 发导弹,最后对计算得到的运动参数进行统计分析,获得波浪中近水面导弹发射时艇体运动计算结果。

10 波浪中近水面低速航行时艇体运动性能评价和导弹发射概率计算方法

10.1 低速航行时艇体运动性能评价

评价近水面垂直面运动及其稳定性的主要运动参数是给定潜深(初始潜深) H_0 下的垂向位移(潜深)偏离 ΔH 与纵倾角偏离 $\Delta\theta$ 。

10.1.1 垂向位移(潜深)偏离

近水面航行作业中,特别是波浪存在的条件下和导弹作业过程中,对潜艇重心处的垂向位移(潜深)偏离按公式(10.1)计算:

$$\left. \begin{aligned} \Delta\eta &= \Delta H \\ \Delta H &= H - H_0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (10.1)$$

式中:

$\Delta\eta$ ——重心处垂向位移偏离, m;

ΔH ——重心处潜深偏离, m;

H ——瞬时潜深, m;

H_0 ——给定潜深, m。

10.1.2 纵倾角偏离

纵倾角偏离按公式(10.2)计算:

$$\Delta\theta = \theta - \theta_0 \dots\dots\dots (10.2)$$

式中:

$\Delta\theta$ ——纵倾角偏离值, (°);

θ ——作业和操纵时的纵倾角, (°);

θ_0 ——给定纵倾角值, (°);

处于均衡状态的潜艇给定值取零。

10.1.3 运动性能评价

近水面航行中 $\Delta\theta$ 及 ΔH 均不允许超过作业要求所规定的限界值 $\Delta\theta_m$ 和 ΔH_m , 若不满足时,需用操舵与水舱排注水方法来达到。

10.1.4 重要部位运动性能评价

当需对潜艇重要部位(如导弹发射筒,深度计所在剖面)的垂向位移进行计算和检验时,可按公式(10.3)计算。

$$\eta_p = \eta - X_p \Delta\theta \dots\dots\dots (10.3)$$

式中:

- η_p —— 点 p 处的垂向位移, m ;
- η —— 艇体重心处的垂向位移, m ;
- X_p —— 点 p 的纵坐标值, 舳前为正, m ;
- $\Delta\theta$ —— 纵倾角偏离, rad 。

针对重要部位点 p 的作业要求, 可以给出对其垂向位移偏离 $\Delta\eta_p$ 的限界值。

10.1.5 垂直面定深运动稳定性评价

垂直面定深运动稳定性评价按 8.5.1 方法处理。

10.1.6 运动参数的统计偏离值

运动参数包含潜艇的波频运动及平均位移(角位移)量两种成分。在确定运动参数偏离 ΔH 、 $\Delta\theta$ 是否超过规定的最大偏离值时, 应对这诸成分叠加的时域历程与给定潜深和纵倾的差值进行统计分析, 并取 2000 个振荡中的最大偏离值作为分析是否超过运动参数最大偏离限界值的依据。

10.2 波浪中近水面潜艇导弹垂直发射概率计算方法

10.2.1 波浪中近水面潜艇导弹垂直发射概率的校核

根据导弹垂直发射所要求的海浪条件和艇体运动衡准, 计算在规定海区的波浪中潜艇的运动响应, 校核其满足要求的发射概率(即满足导弹垂直发射所要求的艇体运动数值范围的出现概率)的程度。

10.2.2 波浪中近水面导弹垂直发射概率的预报

10.2.2.1 发射概率的预报方法

确定作业海区的海浪, 按第 5 章规定预报波浪中潜艇艇体(或指定位置)运动, 以研制任务书明确规定的导弹垂直发射对艇体运动要求作为已知的艇体运动衡准, 将各衡准参数对应的各个波浪周期下的最小的有义波高限制值, 构成限制曲线, 在限制曲线下的某海区波浪样本个数与该海区波浪总样本个数之比作为该海区潜艇导弹发射概率。

10.2.2.1.1 限制曲线的确定

能保证导弹垂直发射的海区波高不得超过公式(10.4~10.5)计算的波高限制值:

$$H_i^j = \frac{X_{0i}^j}{X_i^j} \dots\dots\dots (10.4)$$

$$H_{0i} = \min\{H_i^j\} \dots\dots\dots (10.5)$$

式中:

- H_i^j —— 对于波浪周期 T_i 的潜艇第 j 模式运动的最大的有义波高限制值, m ;
- X_{0i}^j —— 要求的艇体运动(模式 j) 衡准规定值;
- X_i^j —— 潜艇对应第 i 个波浪周期 T_i 下单位波高的第 j 模式运动响应, 如令 $j = 1, 2, \dots, 7$ 分别对应纵摇、深度偏离、垂向速度、垂向加速度、横摇、横荡、横向加速度;
- H_{0i} —— 对于波浪平均周期 T_i 的最大的有义波高限制值, m 。

10.2.2.1.2 发射概率的确定

某海区波浪中近水面导弹垂直发射概率按公式(10.6)确定。

$$\left. \begin{aligned} P &= N_1/N_0 \\ N_1 &= \sum_i \sum_j f_{in}(i, j), (i, j \text{ 在限制曲线下}) \\ N_0 &= \sum_i \sum_j f_{in}(i, j), (i = 1 \dots n), (j = 1 \dots m) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (10.6)$$

式中:

- P —— 垂直发射概率;
- N_1 —— 某海区内在限制曲线下的波浪统计样本数;

N_0 ——某海区内波浪统计分布总样本数；

$f_{HT}(i, j)$ ——某海区内,分布在周期 T_i 、波高 H_j 下的波浪统计样本数；

n ——统计计算中海浪平均周期 T_i 的分段数；

m ——统计计算中波浪 H_j 的分段数。

10.2.2.1.3 发射概率的时间范围特征

计算海区的波浪可采用全年,季度,月份的统计结果。相应的发射概率也具有同样的时间范围特征。

10.2.2.2 发射概率预报的表达形式

用海区或整个海域包含时间范围特征的发射概率,发射概率分布的等值线图、表和曲线等直观形式给出。

10.2.2.3 发射概率预报的约束条件

发射概率预报的约束条件为：

- a) 最大波高限制值,应采用有义值表达；
- b) 最大波高的限制曲线应满足该波高条件下潜艇在发射深度处于其垂直面定深运动的稳定区内；
- c) 发射概率仅指潜艇的运动环境条件满足发射要求的概率值。

附 录 A
环境条件的补充规定
(补 充 件)

A.1 风

风压力按公式(A.1)计算,其风压系数按表 A.1 选取。

$$\left. \begin{aligned} Y'_w &= \frac{\rho_0 V_w^2 S}{\rho U^2 L^2} C_z(\alpha_w) \\ N'_w &= \frac{\rho_0 V_w^2 S}{\rho U^2 L^2} C_{ny}(\alpha_w) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (A.1)$$

式中:

- Y_w ——风压作用力,N;
- N'_w ——风压作用力矩,N·m;
- ρ_0 ——空气密度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$;
- V_m ——风速, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$;
- S ——水线面上艇体正投影面积, m^2 ;
- C_z, C_{ny} ——风压系数;
- α_w ——风向角, $(^\circ)$ 。

表 A.1

$\alpha_w(^\circ)$	C_z	C_{ny}
0	-0.0213	0.0473
45	-4.4985	0.7445
90	-5.5806	0.5405
135	-4.2311	0.2292
180	-0.0031	0.0168
225	4.2311	-0.2292
270	5.5806	-0.5405
315	4.4985	-0.7445
360	-0.0213	0.0473

A.2 北半球大洋海浪年平均资料

浪级中波高与波浪周期之间的关系,北半球大洋海浪的年平均统计结果见表 A.2。

表 A.2 北半球大洋海浪年平均资料

浪级	有义波高 m		维持风速 ¹⁾ m/s		北大西洋				北太平洋				北半球			
	范围	平均值	范围 ²⁾	平均值	各浪级 概率 %	谱峰周期 s		各浪级 概率 %	谱峰周期 s		各浪级 概率 %	谱峰周期 s		各浪级 概率 %	谱峰周期 s	
						范围 ²⁾	最可能值		范围 ²⁾	最可能值		范围 ²⁾	最可能值			
0-1	0.00~<0.10	0.05	0~<3	1.5	0.70	—	—	1.30	—	—	1.00	—	—	—	—	—
2	0.10~<0.50	0.30	3~<5	4.0	6.80	3.3~12.8	7.5	6.40	5.1~14.9	6.3	6.60	4.2~13.8	6.9	—	—	—
3	0.50~<1.25	0.88	5~<8	6.5	23.70	5.0~14.8	7.5	15.50	5.3~16.1	7.5	19.60	5.1~15.4	7.5	—	—	—
4	1.25~<2.50	1.88	8~<10	9.0	23.80	6.1~15.2	8.8	31.60	6.1~17.2	8.8	29.70	6.1~16.2	8.8	—	—	—
5	2.50~<4.00	3.25	10~<13	11.5	20.61	8.3~15.5	9.7	20.94	7.7~17.8	9.7	20.79	7.2~16.6	9.7	—	—	—
6	4.00~<6.00	5.00	13~<22	17.5	13.15	9.8~16.2	12.4	15.03	10.0~18.7	12.4	14.09	9.9~17.4	12.4	—	—	—
7	6.00~<9.00	7.50	22~<26	24.0	6.05	11.8~18.5	15.0	7.00	11.7~19.8	15.0	6.82	11.7~19.2	15.0	—	—	—
8	9.00~<14.0	11.50	26~<30	28.0	1.11	14.2~18.6	16.4	1.56	14.5~21.5	16.4	1.34	14.4~20.0	16.4	—	—	—
9	≥14.0	>14.00	≥30	>30.0	0.05	18.0~23.7	20.0	0.07	16.4~22.5	20.0	0.06	17.2~23.1	20.0	—	—	—

注: 1) 在海面以上 10m 处的维持环境风速, 以产生充分发展海浪。

2) 属于本范围的占 90%, 低于或高于本范围的各占 5%。

附加说明：

本指导性技术文件由原中国船舶工业总公司提出。

本指导性技术文件由中国船舶工业综合经济技术研究院归口。

本指导性技术文件由中国船舶重工集团公司七院七〇二所负责起草，七〇一所、七一九所、七〇七所九江分部参加起草。

本指导性技术文件主要起草人：冯学知、蒋强强。

参加起草的人员有：闫学琳、吴汉生、陈训铨、缪泉明、闵耀元。

本指导性技术文件计划号 8CZ28。

本指导性技术文件可代替 CB/Z 196—82《潜艇耐波性设计计算方法》。