



# 中华人民共和国国家军用标准

FL 1905

GJB/Z 205-2001

---

## 潜艇操纵性设计计算方法

Method for design calculation of submarine maneuverability

2001-11-23 发布

2002-03-01 实施

---

国防科学技术工业委员会 发布

## 潜艇操纵性设计计算方法

### 1 范围

#### 1.1 主题内容

本指导性技术文件规定了潜艇在深水状态操纵性设计计算方法。

#### 1.2 适用范围

本指导性技术文件适用于常规潜艇和核潜艇。

### 2 引用文件

本章无条文。

### 3 定义

本指导性技术文件所用的符号列于表 1。

表 1

编号	符号	名称	单位符号	说明
3.1	$A^{(i)}$	各附体实际面积;外露翼面积	$m^2$	$(i) = (hf), (vfL), (vfU), (fw), (b), (s), (r), (rU), (rL)$
3.2	$A_0^{(i)}$	各附体随边和导边沿伸到艇体中心线后的面积;内插翼面积	$m^2$	$(i) = (hf), (vfL), (vfU)$
3.3	$a_T, b_T, c_T$	螺旋桨推力无量纲系数	-	
3.4	$B$	浮力,型宽	N,m	浮力向上为正
3.5	$b_0^{(i)}$	各附体内插翼展长	m	$(i) = (hf), (vfL), (vfU), (vf)$
3.6	$\bar{C}^{(i)}$	附体外露翼平均弦长	m	$(i) = (hf), (vf), (b)$
3.7	$D_p$	螺旋桨直径	m	
3.8	$D_0$	稳定回转直径	m	
3.9	$D_0/L$	稳定回转相对直径	-	
3.10	$\bar{D}_H^{(i)}$	各艇附体处艇体平均直径	m	$(i) = (hf), (vfL), (vfU), (vf)$
3.11	$E$	固定坐标系原点	-	
3.12	$E - \xi\eta\zeta$	固定坐标系	-	
3.13	$g$	重力加速度	$m \cdot s^{-2}$	
3.14	$H$	艇高,型深	m	
3.15	$h$	水下初稳心高	m	
3.16	$J_c$	进速系数	-	
3.17	$I_x, I_y, I_z;$ $I'_x, I'_y, I'_z$	分别对应于 $x, y, z$ 轴质量惯性矩	$kg \cdot m^2$	$I'_i = I_i / (\frac{1}{2} \rho L^5) i = x, y, z$
3.18	$I_{xy}, I_{yz}, I_{zx};$ $I'_{xy}, I'_{yz}, I'_{zx}$	分别对应于 $x, y, z$ 轴质量惯性积	$kg \cdot m^2$	$I'_{ij} = I_{ij} / (\frac{1}{2} \rho L^5)$ $i, j = x, y, z; i \neq j$
3.19	$K$	舵型剖面的厚度修正系数	-	
3.20	$K, K'$	水动力矩在 $x$ 轴的分量—横倾力矩	N·m	$K' = K / (\frac{1}{2} \rho L^3 U^2)$
3.21	$K_*, K'_*$	横倾力矩零态值	N·m	$K'_* = K_* / (\frac{1}{2} \rho L^3 U^2)$
3.22	$K_{*,\eta}, K'_{*,\eta}$	$K_*$ 对 $(\eta-1)$ 的一阶系数	N·m	

表 1(续)

编号	符号	名称	单位符号	说明
3.23	$K_{hd}$	水平面动稳定性系数	-	
3.24	$K_i, K'_i$	横倾力矩系数线性项	$N \cdot s$	$i = v$
3.25	$K_{ij}, K'_{ij}$	横倾力矩系数二次项和耦合项	$N \cdot m \cdot s \cdot rad^{-1}$	$i = p, r$
			$N \cdot m \cdot rad^{-1}$	$i = \delta_r$
			$N \cdot m^{-1} \cdot s^2$	$i, j = v, w$
3.26	$K_k, K'_k$	横倾力矩加速度系数	$N \cdot s^2 \cdot rad^{-1}$	$i = v, w; j = p, q, r$
			$N \cdot m \cdot s^2 \cdot rad^{-2}$	$i, j = p, q, r$
			$N \cdot s^2$	$k = \dot{v}$
3.27	$K_j$	附加质量系数	$N \cdot m \cdot s^2 \cdot rad^{-1}$	$k = \dot{p}, \dot{r}$
		附加质量矩系数	-	$i = j = 1, 2, 3$
		附加质量惯性矩系数	-	$i = 1, 2, 3; j = 4, 5, 6$
3.28	$K_t$	推力系数	-	$i = j = 4, 5, 6$
3.29	$K_0, K_1, K_2$	推力系数的拟合系数	-	
3.30	$K_{vd}$	垂直面动稳定性系数	-	
3.31	$K_\theta, K'_\theta$	垂直面回转性指数	s	$K'_\theta = K_\theta \cdot U/L$
3.32	$L$	艇长	m	
3.33	$l^{(i)}, l'^{(i)}$	各附体面积中心到坐标原点距离	m	$(i) = (hf), (vf), (vfU), (vfL), (fw), (b), (s), (r)$
3.34	$l_{FH}, l'_{FH}$	纵倾静恢复力矩的力臂	m	$l'_{FH} = l_{FH}/L = -m'gh(U^2 Z'_w)$
3.35	$l_q, l'_q$	垂直面阻尼力臂	m	$l'_q = l_q/L = -M'_q/(m' + Z'_q)$
3.36	$L_x$	艇首至艇附体平均直径处的距离	m	
3.37	$l_t, l'_t$	水平面阻尼力臂	m	$l'_t = l_t/L = -N'_t/(m' - Y'_t)$
3.38	$l_a$	垂直面水动力倾覆力臂	m	
3.39	$l'_a$	垂直面静不稳定系数	-	$l'_a = l_a/L = -M'_w/Z'_w$
3.40	$l_\beta$	水平面水动力倾覆力臂	m	
3.41	$l'_\beta$	水平面静不稳定系数	-	$l'_\beta = l_\beta/L = N'_v/Y'_v$
3.42	$l_{\delta_b}, l'_{\delta_b}$	俯升降舵(围壳舵)力臂	m	$l'_{\delta_b} = l_{\delta_b}/L = -M'_{\delta_b}/Z'_{\delta_b}$
3.43	$l_{\delta_r}, l'_{\delta_r}$	方向舵力臂	m	$l'_{\delta_r} = l_{\delta_r}/L = N'_{\delta_r}/Y'_{\delta_r}$
3.44	$l_{\delta_s}, l'_{\delta_s}$	侧升降舵力臂	m	$l'_{\delta_s} = l_{\delta_s}/L = -M'_{\delta_s}/Z'_{\delta_s}$
3.45	$M, M'$	水动力矩在 y 轴分量 - 纵倾力矩	$N \cdot m$	$M' = M/(\frac{1}{2}\rho L^3 U^2)$
3.46	$M_i, M'_i$	纵倾力矩系数线性项	$N \cdot s$	$i = w$
			$N \cdot m \cdot s \cdot rad^{-1}$	$i = p, q$
			$N \cdot m \cdot rad^{-1}$	$i = \delta_b, \delta_s$
3.47	$M_{ij}, M'_{ij}$	纵倾力矩系数二次项和耦合项	$N \cdot m^{-1} \cdot s^2$	$i, j = v, w$
			$N \cdot s^2 \cdot rad^{-1}$	$i = v, w; j = p, q, r$
			$N \cdot m \cdot s^2 \cdot rad^{-2}$	$i, j = p, q, r$
			$N \cdot m \cdot s \cdot rad^{-2}$	$i = q; j = \delta_b, \delta_s$
3.48	$M_k, M'_k$	纵倾力矩加速度系数	$N \cdot s^2$	$k = \dot{w}$
			$N \cdot m \cdot s^2 \cdot rad^{-1}$	$k = \dot{q}$
3.49	$M_{i\eta}, M'_{i\eta}$	$M_i$ 对 $(\eta-1)$ 的一阶系数	$N \cdot s$	$i = w$
3.50	$M_{i w w\eta}, M'_{i w w\eta}$	$M_{i w w}$ 对 $(\eta-1)$ 的一阶系数	$N \cdot m \cdot rad^{-1}$	$i = \delta_s$
			$N \cdot m^{-1} \cdot s^2$	
3.51	$M_\theta, M'_\theta$	纵倾静恢复力矩系数	$N \cdot m \cdot rad^{-1}$	$M'_\theta = M_\theta/(\frac{1}{2}\rho U^2 L^3)$

表 1(续)

编号	符号	名称	单位符号	说明
3.52	$M_*, M'_*$	纵倾力矩零态值	N·m	
3.53	$m, m'$	潜艇质量	kg	$m' = m / (\frac{1}{2} \rho L^3)$
3.54	$N, N'$	水动力矩在 $z$ 轴的分量—转艏力矩或偏航力矩	N·m	$N' = N / (\frac{1}{2} \rho U^2 L^3)$
3.55	$N_i, N'_i$	转艏力矩系数的线性项	N·s $N \cdot m \cdot s \cdot \text{rad}^{-1}$ $N \cdot m \cdot \text{rad}^{-1}$	$i = v$ $i = p, r$ $i = \delta_r$
3.56	$N_{ij}, N'_{ij}$	转艏力矩的二次项和耦合项	$N \cdot m^{-1} \cdot s^2$ $N \cdot s^2 \cdot \text{rad}^{-1}$ $N \cdot m \cdot s^2 \cdot \text{rad}^{-2}$ $N \cdot m \cdot s \cdot \text{rad}^{-2}$	$i, j = v, w$ $i = v, w; j = p, q, r$ $i, j = p, q, r$ $i = r; j = \delta_r$
3.57	$N_k, N'_k$	转艏力矩加速度系数	$N \cdot s^2$ $N \cdot m \cdot s^2 \cdot \text{rad}^{-1}$	$k = \dot{v}$ $k = \dot{p}, \dot{r}$
3.58	$N_{i\eta}, N'_{i\eta}$	$N_i$ 对 $(\eta-1)$ 的一阶系数	N·s $N \cdot m \cdot \text{rad}^{-1}$	$i = v$ $i = \delta_r$
3.59	$N_{v_i v_i \eta}, N'_{v_i v_i \eta}$	$N_{v_i v_i}$ 对 $(\eta-1)$ 的一阶系数	$N \cdot s^2 \cdot m^{-1}$	
3.60	$N_*, N'_*$	转艏力矩零态值	N·m	
3.61	$p, q, r$	角速度在 $x, y, z$ 轴的分量	$(^\circ) s^{-1}, \text{rad} \cdot s^{-1}$	
3.62	$\dot{p}, \dot{q}, \dot{r}$	角加速度在 $x, y, z$ 轴的分量	$(^\circ) s^{-2}, \text{rad} \cdot s^{-2}$	
3.63	$R_x$	距艏 $L_x$ 处的雷诺数	—	$R_x = UL_x / \nu$
3.64	$T$	坐标系转换矩阵	—	
3.65	$T_\theta, T'_\theta$	操舵升降舵变纵倾运动的滞后参数	s	
3.66	$t^{(hw)}$	指挥室围壳厚度	m	
3.67	$t_a, t'_a$	初转期	s	
3.68	$U$	航速、合速度	$m \cdot s^{-1}$	
3.69	$U_{ib}$	艏升降舵(围壳舵)逆速	$m \cdot s^{-1}, \text{kn}$	
3.70	$U_{is}$	舵升降舵逆速	$m \cdot s^{-1}, \text{kn}$	
3.71	$\partial U_i / \partial \delta_i$	舵升降舵速升率	$m \cdot s^{-1} \cdot (^\circ)^{-1}$	
3.72	$u$	纵向分速度	$m \cdot s^{-1}$	$\alpha = \beta = \delta_b = \delta_r = \delta_s = 0$
3.73	$u_c$	基准定常航行速度	$m \cdot s^{-1}$	
3.74	$\dot{u}$	纵向加速度	$m \cdot s^{-2}$	
3.75	$v$	横向分速度	$m \cdot s^{-1}$	
3.76	$\dot{v}$	横向加速度	$m \cdot s^{-2}$	
3.77	$W$	重力	N	
3.78	$w$	垂向分速度	$m \cdot s^{-1}$	
3.79	$\dot{w}$	垂向加速度	$m \cdot s^{-2}$	
3.80	$w_p$	伴流分数	—	
3.81	$X, X'$	水动力沿 $x$ 轴的分量—纵向力	N	$X' = X / (\frac{1}{2} \rho U^2 L^2)$
3.82	$x_B, y_B, z_B$	浮心纵向、横向、垂向坐标	m	
3.83	$x_G, y_G, z_G$	重心纵向、横向、垂向坐标	m	
3.84	$x^{(i)}$	各附体面积中心在 $x$ 轴方向的坐标值	m	$i = (hf), (vfU), (vfL), (s), (rU), (rL), (b), (fw)$
3.85	$X_{ij}, X'_{ij}$	纵向力系数的二阶项和耦合项	$N \cdot m^{-2} \cdot s^2$ $N \cdot m^{-1} \cdot s^2 \cdot \text{rad}^{-1}$	$i, j = u, v, w$ $i = v, w; j = r, q$

表 1(续)

编号	符号	名称	单位符号	说明
3.86	$X_{i\eta}, X'_{i\eta}$	$X_i$ 对 $(\eta-1)$ 的一阶系数	$N \cdot s^2 \cdot \text{rad}^{-2}$ $N \cdot \text{rad}^{-2}$ $N \cdot m^{-2} \cdot s^2$ $N \cdot \text{rad}^{-2}$	$i, j = q, r$ $i, j = \delta_b, \delta_r, \delta_s$ $i = u, w$ $i = \delta_r, \delta_s$
3.87	$X_T$	螺旋桨轴向推力	N	
3.88	$X_u, X'_u$	纵向力加速度系数	$N \cdot m^{-1} \cdot s^2$	
3.89	$Y, Y'$	水动力在 $y$ 轴分量—横向力	N	$Y' = Y / (\frac{1}{2} \rho U^2 L^2)$
3.90	$Y_*, Y'_*$	横向力的零态值	N	
3.91	$Y_i, Y'_i$	横向力系数的线性项	$N \cdot m^{-1} \cdot s$ $N \cdot s \cdot \text{rad}^{-1}$ $N \cdot \text{rad}^{-1}$	$i = v$ $i = p, r$ $i = \delta_r$
3.92	$Y_{ij}, Y'_{ij}$	横向力系数二阶项和耦合项	$N \cdot m^{-2} \cdot s^2$ $N \cdot m^{-1} \cdot s^2 \cdot \text{rad}^{-1}$ $N \cdot s^2 \cdot \text{rad}^{-2}$ $N \cdot s \cdot \text{rad}^{-2}$	$i, j = v, w$ $i = v, w, j = p, r$ $i, j = p, r$ $i = r, j = \delta_r$
3.93	$Y_{i\eta}, Y'_{i\eta}$	$Y_i$ 对 $(\eta-1)$ 的一阶系数	$N \cdot m^{-1} \cdot s$ $N \cdot s^{-1} \cdot \text{rad}^{-1}$ $N \cdot \text{rad}^{-1}$	$i = v$ $i = r$ $i = \delta_r$
3.94	$Y_{v v\eta}, Y'_{v v\eta}$	$Y_{v v}$ 对 $(\eta-1)$ 的一阶系数	$N \cdot m^{-2} \cdot s^2$	
3.95	$Y_k, Y'_k$	横向力加速度系数	$N \cdot m^{-1} \cdot s^2$ $N \cdot s^2 \cdot \text{rad}^{-1}$	$k = \dot{v}$ $k = \dot{p}, \dot{r}$
3.96	$Z, Z'$	水动力在 $z$ 轴分量—垂向力	N	
3.97	$Z_*, Z'_*$	垂向力零态值	N	
3.98	$Z_i, Z'_i$	垂向力系数的线性项	$N \cdot m^{-1} \cdot s$ $N \cdot s \cdot \text{rad}^{-1}$ $N \cdot \text{rad}^{-1}$	$i = w$ $i = q$ $i = \delta_b, \delta_s$
3.99	$Z_{ij}, Z'_{ij}$	垂向力系数的二阶系数	$N \cdot m^{-2} \cdot s^2$ $N \cdot m^{-1} \cdot s^2 \cdot \text{rad}^{-1}$ $N \cdot s^2 \cdot \text{rad}^{-2}$ $N \cdot s \cdot \text{rad}^{-2}$	$i, j = w$ $i = v, w; j = p, q, r$ $i, j = p, q, r$ $i = q; j = \delta_b$
3.100	$Z_k, Z'_k$	垂向力加速度系数	$N \cdot m^{-1} \cdot s^2$ $N \cdot s^2 \cdot \text{rad}^{-1}$	$k = \dot{w}$ $k = \dot{q}$
3.101	$Z_{i\eta}, Z'_{i\eta}$	$Z_i$ 对 $(\eta-1)$ 的一阶系数	$N \cdot s \cdot \text{rad}^{-1}$ $N \cdot s \cdot m^{-1}$ $N \cdot \text{rad}^{-1}$	$i = q$ $i = w$ $i = \delta_s$
3.102	$Z_{w w\eta}, Z'_{w w\eta}$	$Z_{w w}$ 对 $(\eta-1)$ 的一阶系数	$N \cdot m^{-2} \cdot s^2$	
3.103	$\alpha$	攻角	rad, (°)	
3.104	$\beta$	漂角	rad, (°)	
3.105	$\delta^*$	主艇体 $L_x$ 处边界层排挤厚度	m	
3.106	$\delta_b$	舵升降舵(围壳舵)舵角	rad, (°)	
3.107	$\delta_{b, \max}$	舵升降舵(围壳舵)最大舵角	rad, (°)	
3.108	$\delta_r$	方向舵舵角	rad, (°)	
3.109	$\delta_s$	舵升降舵舵角	rad, (°)	
3.110	$\eta$	速度比值	-	$\eta = u_c/u = J_c/J$
3.111	$\theta$	纵倾角	rad, (°)	
3.112	$\dot{\theta}$	纵倾角相对时间的一阶导数	rad $\cdot$ s $^{-1}$	
3.113	$\ddot{\theta}$	纵倾角相对时间的二阶导数	rad $\cdot$ s $^{-2}$	

表 1(续)

编号	符号	名称	单位符号	说明
3.114	$\Delta_{1/4}^{(i)}$	艇鳍 1/4 弦连线后掠角	rad, (°)	$(i) = (hf), (vfL), (vfU)$
3.115	$\lambda^{(i)}$	艇鳍(外露翼)和舵展弦比	-	$(i) = (b), (fw), (hf), (vf), (vfU)$ $(vfL), (s), (r), (rU), (rL)$
3.116	$\lambda_e^{(i)}$	艇鳍(内插翼)有效展弦比	-	$(i) = (hf), (vfU), (vfL)$
3.117	$\lambda_{ij}$	附加质量	kg	$i = 1, 2, 3$
3.118	$\lambda_{ij}$	附加质量矩	kg·m	$i = 1, 2, 3; j = 4, 5, 6$
3.119	$\lambda_{ij}$	附加质量惯性矩	kg·m <sup>2</sup>	$j = 4, 5, 6$
3.120	$\mu$	考虑舵、艇体和稳定翼特点的影响系数	-	
3.121	$\nu$	水的运动粘性系数	m <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup>	
3.122	$\rho$	水密度	kg·m <sup>-3</sup>	
3.123	$\tau$	水平鳍或垂直鳍处艇体尾锥角	rad, (°)	
3.124	$\phi$	横倾角	rad, (°)	
3.125	$\dot{\phi}$	横倾角对时间一阶导数	rad·s <sup>-1</sup> , (°)·s <sup>-1</sup>	
3.126	$\chi$	综合系数	-	
3.127	$\psi$	艏向角, 偏航角	rad, (°)	
3.128	$\dot{\psi}$	艏向角对时间的一阶导数	rad·s <sup>-1</sup> , (°)·s <sup>-1</sup>	
3.129	$\nabla$	水下全排水容积	m <sup>3</sup>	

注 1:表中符号的上角标 $(i)$ 表示主艇体或附体。当 $i$ 取 $H, W, hf, vfL, vfU, fw, b, s, r, rU, rL$ 分别表示主艇体、附体、水平鳍、下垂直鳍、上垂直鳍、指挥室围壳、艏升降舵(围壳舵)、艇升降舵、方向舵、上方向舵、下方向舵。

注 2:表中符号的上角标“-”为表示无量纲量的专用标。表中符号栏项将无量纲量列于有量纲量之后,例如: $I_x, I_y, I_z; I'_x, I'_y, I'_z$ ,前者为有量纲量,后者为无量纲量。在单位符号栏中,则仅列出有量纲量的单位符号。

注 3:文中下角标-d、-d.c、-o.c、-o.t分别表示为设计艇、设计艇计算、母型艇、母型艇计算、母型艇试验。

注 4:单位符号栏中“-”表示该符号无单位符号。

## 4 一般要求

### 4.1 坐标系及主要参数

#### 4.1.1 固定坐标系

固定坐标系  $E - \xi\eta\zeta$  是坐标系原点  $E$  固定于水面上或水中某一定点的右手直角坐标系。 $E\zeta$  轴正向指向地心;  $E\xi$  轴和  $E\eta$  轴在同一水平面内,  $E\xi$  轴正向为潜艇基准方向,  $\eta$  轴正向按右手系确定,如图 1 所示。

#### 4.1.2 随船坐标系

随船坐标系  $O - xyz$  是固定于潜艇上的右手直角坐标系。坐标系原点  $O$  一般取在全排水量重心。 $xOz$  平面与中纵剖面相重合,  $xOy$  平面与基面相平行,  $yOz$  平面与中横剖面平行。 $Ox$  轴向艏为正,  $Oz$  轴向下为正,  $Oy$  轴向右舷为正。如图 1 所示。

#### 4.1.3 随船坐标系与固定坐标系关系

潜艇空间位置与姿态,可用随船坐标系原点在固定坐标系的坐标值( $\xi_0, \eta_0, \zeta_0$ )和随船坐标系相对固定坐标系的三个欧拉角( $\psi, \theta, \phi$ )来确定。如图 1 所示。

#### 4.1.4 舵角参数

艇升降舵(包括围壳舵)、艇升降舵舵角分别用  $\delta_b, \delta_s$  表示,后缘向下转舵角为正;方向舵舵角用  $\delta_r$  表示,后缘向左舷转舵角为正。

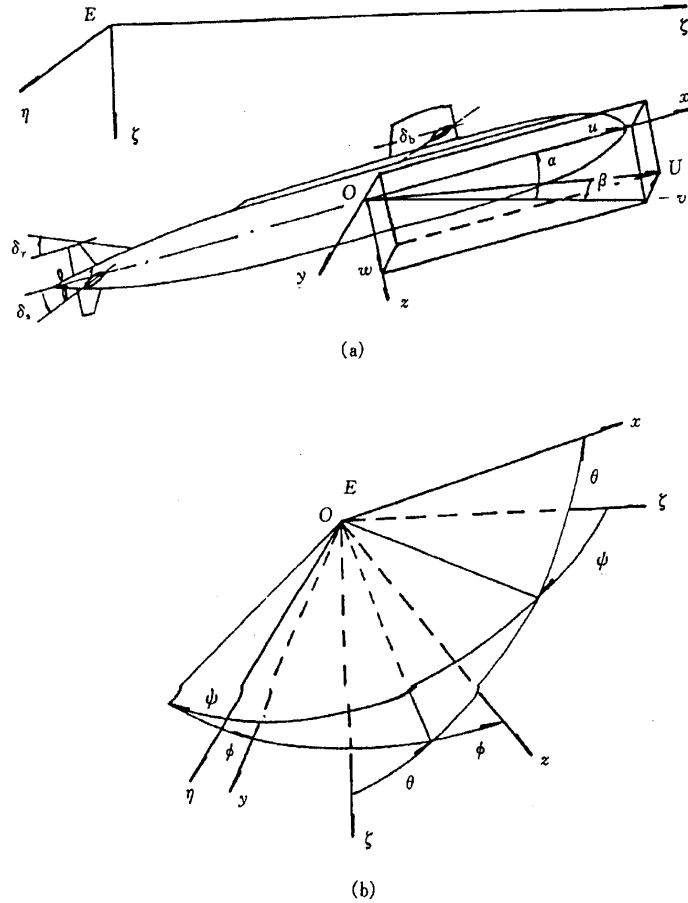


图1 坐标系

4.1.5 运动参数

4.1.5.1 线速度

潜艇线速度是指坐标原点的线速度,它在随船坐标系的投影  $u, v, w$  按公式(4.1)~公式(4.4)变换:

$$u = U \cos \beta \cos \alpha \dots\dots\dots (4.1)$$

$$v = -U \sin \beta \dots\dots\dots (4.2)$$

$$w = U \cos \beta \sin \alpha \dots\dots\dots (4.3)$$

$$U^2 = u^2 + v^2 + w^2 \dots\dots\dots (4.4)$$

潜艇线速度  $U$  在固定坐标系和随船坐标系的投影按公式(4.5)、公式(4.6)变换:

$$\begin{bmatrix} \dot{\xi}_0 \\ \dot{\eta}_0 \\ \dot{\zeta}_0 \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \dots\dots\dots (4.5)$$

$$T = \begin{bmatrix} \cos\psi\cos\theta & \cos\psi\sin\theta\sin\phi - \sin\psi\cos\phi & \cos\psi\sin\theta\cos\phi + \sin\psi\sin\phi \\ \sin\psi\cos\theta & \sin\psi\sin\theta\sin\phi + \cos\psi\cos\phi & \sin\psi\sin\theta\cos\phi - \cos\psi\sin\phi \\ -\sin\theta & \cos\theta\sin\phi & \cos\theta\cos\phi \end{bmatrix} \dots\dots\dots (4.6)$$

#### 4.1.5.2 角速度

潜艇角速度在固定坐标系和随船坐标系的投影按公式(4.7)~公式(4.9)变换:

$$\dot{\phi} = p + \tan\theta(q\sin\phi + r\cos\phi) \dots\dots\dots (4.7)$$

$$\dot{\theta} = q\cos\phi - r\sin\phi \dots\dots\dots (4.8)$$

$$\dot{\psi} = (q\sin\phi + r\cos\phi)/\cos\theta \dots\dots\dots (4.9)$$

对微幅运动,可近似按公式(4.10)~公式(4.12)变换:

$$\dot{\phi} \approx p + r\theta \dots\dots\dots (4.10)$$

$$\dot{\theta} \approx q - r\phi \dots\dots\dots (4.11)$$

$$\dot{\psi} \approx r + q\phi \dots\dots\dots (4.12)$$

## 4.2 作用在潜艇上的力

作用在潜艇上的力包括:重力、浮力、螺旋桨推力、刚体惯性力、潜艇水动力。

### 4.2.1 重力和浮力

4.2.1.1 潜艇在静平衡情况下,浮心和重心在一条铅垂线上,浮力和重力大小相等,方向相反。

在潜艇有纵倾角和横倾角时,浮力和重力对纵向轴和横向轴构成横倾力矩和纵倾力矩,按公式(4.13)和公式(4.14)计算:

$$K_{BG} = Bh\cos\theta\sin\phi \dots\dots\dots (4.13)$$

$$M_{BG} = Bh\sin\theta \dots\dots\dots (4.14)$$

式中:

$K_{BG}$  ——纵倾角和横倾角引起的横倾力矩,  $N \cdot m$ ;

$M_{BG}$  ——纵倾角和横倾角引起的纵倾力矩,  $N \cdot m$ 。

4.2.1.2 潜艇相对静平衡有重力和浮力变化时,力和力矩按公式(4.15)~公式(4.20)计算:

$$X_{WB} = -(W - B)\sin\theta \dots\dots\dots (4.15)$$

$$Y_{WB} = (W - B)\cos\theta\sin\phi \dots\dots\dots (4.16)$$

$$Z_{WB} = (W - B)\cos\theta\cos\phi \dots\dots\dots (4.17)$$

$$K_{WB} = (y_G W - y_B B)\cos\theta\cos\phi - (z_G W - z_B B)\cos\theta\sin\phi \dots\dots\dots (4.18)$$

$$M_{WB} = -(x_G W - x_B B)\cos\theta\cos\phi - (z_G W - z_B B)\sin\theta \dots\dots\dots (4.19)$$

$$N_{WB} = (x_G W - x_B B)\cos\theta\sin\phi + (y_G W - y_B B)\sin\theta \dots\dots\dots (4.20)$$

式中:

$X_{WB}$ 、 $Y_{WB}$ 、 $Z_{WB}$  ——重力和浮力变化引起的力,  $N$ ;

$K_{WB}$ 、 $M_{WB}$ 、 $N_{WB}$  ——重力和浮力变化引起的力矩,  $N \cdot m$ 。

### 4.2.2 螺旋桨推力

螺旋桨推力  $X_T$  按公式(4.21)计算,其无因次数  $a_T$ 、 $b_T$ 、 $c_T$  按公式(4.22)~公式(4.28)计算:

$$X_T = (1 - \iota)\rho n^2 D_p^4 K_i \dots\dots\dots (4.21)$$

$$= \frac{1}{2}\rho L^2 u^2 [a_T + b_T(\frac{u_\epsilon}{u}) + c_T(\frac{u_\epsilon}{u})^2]$$

$$a_T = \mu K_2 \dots\dots\dots (4.22)$$

$$b_T = \mu K_1 / J_c \dots\dots\dots (4.23)$$

$$c_T = \mu K_0 / J_c^2 \dots\dots\dots (4.24)$$

$$\mu = 2(1 - \iota)(1 - w_p)^2 D_p^2 / L^2 \dots\dots\dots (4.25)$$

$$K_t = K_0 + K_1 J + K_2 J^2 \dots\dots\dots (4.26)$$

式中:

$t$  —— 推力减额分数;

$n$  —— 螺旋桨转数,  $r \cdot s^{-1}$ 。

当  $u = u_c$  时,

$$a_T + b_T + c_T = -X'_{uu} \dots\dots\dots (4.27)$$

$$X_T = -\frac{1}{2} \rho L^2 u^2 X'_{uu} \dots\dots\dots (4.28)$$

#### 4.2.3 刚体惯性力

刚体惯性力按随船坐标系表达成公式(4.29)~公式(4.35):

$$X_{GB} = m[\dot{u} - vr + wq - x_G(q^2 + r^2) + y_G(pq - \dot{r}) + z_G(pr + \dot{q})] \dots\dots\dots (4.29)$$

$$Y_{GB} = m[\dot{v} - wp + ur - y_G(r^2 + p^2) + z_G(qr - \dot{p}) + x_G(pq + \dot{r})] \dots\dots\dots (4.30)$$

$$Z_{GB} = m[\dot{w} - uq + vp - z_G(p^2 + q^2) + x_G(rp - \dot{q}) + y_G(rq + \dot{p})] \dots\dots\dots (4.31)$$

$$K_{GB} = I_x \dot{p} + (I_z - I_y)qr + m[y_G(\dot{w} - uq + vp) - z_G(\dot{v} - wp + ur)] \dots\dots\dots (4.32)$$

$$M_{GB} = I_y \dot{q} + (I_x - I_z)rp + m[z_G(\dot{u} - vr + wq) - x_G(\dot{w} - uq + vp)] \dots\dots\dots (4.33)$$

$$N_{GB} = I_z \dot{r} + (I_y - I_x)pq + m[x_G(\dot{v} - wp + ur) - y_G(\dot{u} - vr + wp)] \dots\dots\dots (4.34)$$

$$\left. \begin{aligned} I_x &= I_{xG} + m(y_G^2 + z_G^2) \\ I_y &= I_{yG} + m(x_G^2 + z_G^2) \\ I_z &= I_{zG} + m(x_G^2 + y_G^2) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4.35)$$

式中:

$X_{GB}, Y_{GB}, Z_{GB}$  —— 刚体惯性力分量, N;

$K_{GB}, M_{GB}, N_{GB}$  —— 刚体惯性力矩分量,  $N \cdot m$ ;

$I_{xG}, I_{yG}, I_{zG}$  —— 分别对应于  $G - x, y, z$  坐标系坐标轴的质量惯性矩,  $kg \cdot m^2$ 。

#### 4.2.4 潜艇水动力及水动力系数

4.2.4.1 潜艇水动力按随船坐标系分解成三个坐标轴方向的力和力矩:  $X, Y, Z, K, M, N$ 。

4.2.4.2 潜艇水动力的诸力和力矩按潜艇运动参数和舵角参数( $u, v, w, \dot{u}, \dot{v}, \dot{w}, p, q, r, \dot{p}, \dot{q}, \dot{r}; \delta_r, \delta_b, \delta_s$ )展开成二阶多项式。

4.2.4.3 水动力在流体力学研究中,按其成因区分为流体惯性力和流体粘性力。水动力系数包含流体惯性力成分和流体粘性力成分。

### 5 操纵性运动方程

#### 5.1 垂直面运动方程

垂直面运动方程分别用公式(5.1)~公式(5.3)表达。

$$\left. \begin{aligned} m(\dot{u} + wq - x_G q^2 + z_G \dot{q}) &= \frac{1}{2} \rho L^4 X'_{qq} q^2 + \frac{\rho}{2} L^3 (X'_{uq} \dot{u} + X'_{wq} wq) \\ &+ \frac{\rho}{2} L^2 (X'_{uu} u^2 + X'_{ww} w^2) + \frac{\rho}{2} L^2 u^2 (X'_{\delta_s \delta_s} \delta_s^2 + X'_{\delta_b \delta_b} \delta_b^2) \\ &+ \frac{\rho}{2} L^2 (a_T u^2 + b_T u u_c + c_T u_c^2) - (W - B) \sin \theta \\ &+ \frac{\rho}{2} L^2 (X'_{ww\eta} w^2 + X'_{\delta_s \delta_s \eta} \delta_s^2 u^2) (\eta - 1) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5.1)$$

$$\left. \begin{aligned}
 m(\dot{w} - uq - z_G \dot{q}^2 - x_G \dot{q}) &= \frac{1}{2} \rho L^4 (Z'_{\dot{q}} \dot{q} + Z_{|q|} q | q |) \\
 &+ \frac{\rho}{2} L^3 (Z'_{\dot{w}} \dot{w} + Z'_{\dot{q}} uq + Z'_{|q|\delta_s} u | q | \delta_s + Z'_{|w|q|} w | q |) \\
 &+ \frac{\rho}{2} L^2 (Z'_{*} u^2 + Z'_{*w} uw + Z'_{|w|w|} w | w | + Z'_{|w|} u | w | + Z'_{*w} w^2) \\
 &+ \frac{\rho}{2} L^2 (Z'_{\delta_s} u^2 \delta_s + Z'_{\delta_b} u^2 \delta_b) + (W - B) \cos \theta \\
 &+ \frac{\rho}{2} L^3 Z'_{\eta} uq (\eta - 1) + \frac{\rho}{2} L^2 (Z'_{\eta} uw + Z'_{|w|\eta} w | w | + Z'_{\delta_s \eta} u^2 \delta_s) (\eta - 1)
 \end{aligned} \right\} \cdot (5.2)$$

$$\left. \begin{aligned}
 I_y \dot{q} + m[z_G(\dot{u} + wq) - x_G(\dot{w} - uq)] &= \frac{\rho}{2} L^5 (M'_{\dot{q}} \dot{q} + M'_{|q|} q | q |) \\
 &+ \frac{\rho}{2} L^4 (M'_{\dot{w}} \dot{w} + M'_{\dot{q}} uq + M'_{|w|q|} w | q | + M'_{|q|\delta_s} u | q | \delta_s) \\
 &+ \frac{\rho}{2} L^3 (M'_{*} u^2 + M'_{*w} uw + M'_{|w|w|} w | w | + M'_{|w|} u | w | + M'_{*w} w^2) \\
 &+ \frac{\rho}{2} L^3 (M'_{\delta_s} u^2 \delta_s + M'_{\delta_b} u^2 \delta_b) - (x_G W - x_B B) \cos \theta \\
 &- (z_G W - z_B B) \sin \theta + \frac{\rho}{2} L^4 M'_{\eta} uq (\eta - 1) \\
 &+ \frac{\rho}{2} L^3 (M'_{\eta} uw + M'_{|w|\eta} w | w | + M'_{\delta_s \eta} u^2 \delta_s) (\eta - 1)
 \end{aligned} \right\} \cdot (5.3)$$

5.2 水平面运动方程

水平面运动方程分别用公式(5.4)~公式(5.6)表达。

$$\left. \begin{aligned}
 m(\dot{u} - vr - x_G \dot{r}^2 - y_G \dot{r}) &= \frac{\rho}{2} L^4 (X'_{\dot{r}} \dot{r}^2) + \frac{\rho}{2} L^3 (X'_{\dot{u}} \dot{u} + X'_{*r} vr) \\
 &+ \frac{\rho}{2} L^2 (X'_{*u} u^2 + X'_{*v} v^2 + X'_{\delta_r} u^2 \delta_r^2) + \frac{\rho}{2} L^2 (a_T u^2 + b_T uv + c_T v^2) \\
 &+ \frac{\rho}{2} L^2 (X'_{\eta} v^2 + X'_{\delta_r \eta} \delta_r^2 u^2) (\eta - 1)
 \end{aligned} \right\} \cdots (5.4)$$

$$\left. \begin{aligned}
 m(\dot{v} + ur - y_G \dot{r}^2 + x_G \dot{r}) &= \frac{\rho}{2} L^4 (Y'_{\dot{r}} \dot{r} + Y'_{|r|} r | r |) \\
 &+ \frac{\rho}{2} L^3 (Y'_{\dot{v}} \dot{v} + Y'_{*r} ur + Y'_{|r|\delta_r} u | r | \delta_r + Y'_{|v|r|} v | r |) \\
 &+ \frac{\rho}{2} L^2 (Y'_{*} u^2 + Y'_{*v} uv + Y'_{|v|} v | v | + Y'_{\delta_r} u^2 \delta_r) \\
 &+ \frac{\rho}{2} L^3 Y'_{\eta} ur (\eta - 1) \\
 &+ \frac{\rho}{2} L^2 (Y'_{\eta} uv + Y'_{|v|\eta} v | v | + Y'_{\delta_r \eta} \delta_r u^2) (\eta - 1)
 \end{aligned} \right\} \cdots (5.5)$$

$$\left. \begin{aligned}
 I_z \dot{r} + m[x_G(\dot{v} + ur) - y_G(\dot{u} - vr)] &= \frac{\rho}{2} L^5 (N'_{\dot{r}} \dot{r} + N'_{|r|} r | r |) \\
 &+ \frac{\rho}{2} L^4 (N'_{\dot{v}} \dot{v} + N'_{*r} ur + N'_{|r|\delta_r} u | r | \delta_r + N'_{|v|r|} v | r |) \\
 &+ \frac{\rho}{2} L^3 (N'_{*} u^2 + N'_{*v} uv + N'_{|v|} v | v | + N'_{\delta_r} u^2 \delta_r) \\
 &+ \frac{\rho}{2} L^4 N'_{\eta} ur (\eta - 1)
 \end{aligned} \right\} \cdots (5.6)$$

5.3 空间运动方程

空间运动方程分别用公式(5.7)~公式(5.12)表达。

$$\left. \begin{aligned}
 & m[\dot{u} - vr + wq - x_G(q^2 + r^2) + y_G(pq - \dot{r}) + z_G(pr + \dot{q})] \\
 & = \frac{\rho}{2}L^4(X'_{qq}q^2 + X'_{rr}r^2 + X'_{rp}rp) + \frac{\rho}{2}L^3(X'_{\dot{q}}\dot{u} + X'_{vr}vr + X'_{wq}wq) \\
 & + \frac{\rho}{2}L^2(X'_{uu}u^2 + X'_{vv}v^2 + X'_{ww}w^2) + \frac{\rho}{2}L^2u^2(X'_{\delta_r} \delta_r^2 + X'_{\delta_s} \delta_s^2 + X'_{\delta_b} \delta_b^2) \\
 & + \frac{\rho}{2}L^2(a_T u^2 + b_T uu_c + c_T u_c^2) - (W - B)\sin\theta \\
 & + \frac{\rho}{2}L^2(X'_{wq}v^2 + X'_{ww}w^2 + X'_{\delta_r} \delta_r^2 u^2 + X'_{\delta_s} \delta_s^2 u^2)(\eta - 1)
 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5.7)$$

$$\left. \begin{aligned}
 & m[\dot{v} - wp + ur - y_G(r^2 + p^2) + z_G(qr - \dot{p}) + x_G(qp + \dot{r})] \\
 & = \frac{\rho}{2}L^4(Y'_{\dot{r}}\dot{r} + Y'_{\dot{p}}\dot{p} + Y'_{|p|}p | p | + Y'_{pq}pq + Y'_{qr}qr + Y'_{r|r}r | r |) \\
 & + \frac{\rho}{2}L^3(Y'_{\dot{v}}\dot{v} + Y'_{vq}vq + Y'_{wp}wp + Y'_{wr}wr) \\
 & + \frac{\rho}{2}L^3[Y'_{ur}ur + Y'_{vp}vp + Y'_{|r|\delta_r}u | r | \delta_r + Y'_{v|r} \frac{v}{|v|} | (v^2 + w^2)^{\frac{1}{2}} | | r |] \\
 & + \frac{\rho}{2}L^2[Y'_{*}u^2 + Y'_{uv}uv + Y'_{v|v|}v | (v^2 + w^2)^{\frac{1}{2}} |] \\
 & + \frac{\rho}{2}L^2(Y'_{vw}vw + Y'_{\delta_r}u^2\delta_r) + (W - B)\cos\theta\sin\phi + \frac{\rho}{2}L^3Y'_{rq}ur(\eta - 1) \\
 & + \frac{\rho}{2}L^2[Y'_{vq}uv + Y'_{v|v|\eta}v | (v^2 + w^2)^{\frac{1}{2}} | + Y'_{\delta_r} \delta_r u^2](\eta - 1)
 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5.8)$$

$$\left. \begin{aligned}
 & m[\dot{w} - uq + vp - z_G(p^2 + q^2) + x_G(rp - \dot{q}) + y_G(rq + \dot{p})] \\
 & = \frac{\rho}{2}L^4(Z'_{\dot{q}}\dot{q} + Z'_{pp}p^2 + Z'_{rr}r^2 + Z'_{rp}rp + Z'_{q|q}q | q |) \\
 & + \frac{\rho}{2}L^3(Z'_{\dot{w}}\dot{w} + Z'_{vr}vr + Z'_{vp}vp) \\
 & + \frac{\rho}{2}L^3[Z'_{q}uq + Z'_{|q|\delta_s}u | q | \delta_s + Z'_{w|q|} \frac{w}{|w|} | (v^2 + w^2)^{\frac{1}{2}} | | q |] \\
 & + \frac{\rho}{2}L^2[Z'_{*}u^2 + Z'_{uw}uw + Z'_{w|w|}w | (v^2 + w^2)^{\frac{1}{2}} |] \\
 & + \frac{\rho}{2}L^2[Z'_{|w|}u | w | + Z'_{ww}w(v^2 + w^2)^{\frac{1}{2}} |] \\
 & + \frac{\rho}{2}L^2(Z'_{vv}v^2 + Z'_{\delta_s}u^2\delta_s + Z'_{\delta_b}u^2\delta_b) + (W - B)\cos\theta\cos\phi \\
 & + \frac{\rho}{2}L^3Z'_{q\eta}uq(\eta - 1) \\
 & + \frac{\rho}{2}L^2[Z'_{wq}uw + Z'_{w|w|\eta}w | (v^2 + w^2)^{\frac{1}{2}} | + Z'_{\delta_s} \delta_s u^2](\eta - 1)
 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5.9)$$

$$\begin{aligned}
 & I_x \dot{p} + (I_z - I_y)qr - (\dot{r} + pq)I_{xz} + (r^2 - q^2)I_{yz} + (pr - \dot{q})I_{xy} \\
 & \quad + m[y_G(\dot{w} - uq + vp) - z_G(\dot{v} - wp + ur)] \\
 & = \frac{\rho}{2}L^5(K'_{\dot{p}}\dot{p} + K'_{\dot{r}}\dot{r} + K'_{qr}qr + K'_{pq}pq + K'_{p|p}|p| + K'_{r|r}|r|) \\
 & \quad + \frac{\rho}{2}L^4(K'_{vp}up + K'_{ur}ur + K'_{\dot{v}}\dot{v}) + \frac{\rho}{2}L^4(K_{vq}vq + K'_{wp}wp + K'_{wr}wr) \\
 & \quad + \frac{\rho}{2}L^3[K'_{*}u^2 + K'_{v}uv + K'_{v|v}|v| + (v^2 + w^2)^{\frac{1}{2}}] \\
 & \quad + \frac{\rho}{2}L^3(K'_{vw}vw + K'_{\delta_r}u^2\delta_r) + (y_GW - y_BB)\cos\theta\cos\phi \\
 & \quad - (z_GW - z_BB)\cos\theta\sin\phi + \frac{\rho}{2}L^3K'_{*\eta}u^2(\eta - 1)
 \end{aligned}
 \tag{5.10}$$

$$\begin{aligned}
 & I_y \dot{q} + (I_x - I_z)rp - (\dot{p} + qr)I_{xy} + (p^2 - r^2)I_{xz} + (qp - \dot{r})I_{yz} \\
 & \quad + m[z_G(\dot{u} - vr + wq) - x_G(\dot{w} - uq + vp)] \\
 & = \frac{\rho}{2}L^5(M'_{\dot{q}}\dot{q} + M'_{pp}p^2 + M'_{rr}r^2 + M'_{rp}rp + M'_{q|q}|q|) \\
 & \quad + \frac{\rho}{2}L^4(M'_{w}w\dot{w} + M'_{vr}vr + M'_{vp}vp) \\
 & \quad + \frac{\rho}{2}L^4[M'_{q}uq + M'_{|q|\delta_s}u|q|\delta_s + M'_{|w|q}q|(v^2 + w^2)^{\frac{1}{2}}] \\
 & \quad + \frac{\rho}{2}L^3[M'_{*}u^2 + M'_{w}uw + M'_{w|w}|w| + (v^2 + w^2)^{\frac{1}{2}}] \\
 & \quad + \frac{\rho}{2}L^3[M'_{|w|}u|w| + M'_{ww}|w|(v^2 + w^2)^{\frac{1}{2}}] \\
 & \quad + \frac{\rho}{2}L^3(M'_{w}v^2 + M'_{\delta_s}u^2\delta_s + M'_{\delta_b}u^2\delta_b) \\
 & \quad - (x_GW - x_BB)\cos\theta\cos\phi - (z_GW - z_BB)\sin\theta + \frac{\rho}{2}L^4M'_{\eta}uq(\eta - 1) \\
 & \quad + \frac{\rho}{2}L^3[M'_{w\eta}uw + M'_{w|w|\eta}|w|(v^2 + w^2)^{\frac{1}{2}} + M'_{\delta_s}\delta_s u^2](\eta - 1)
 \end{aligned}
 \tag{5.11}$$

$$\begin{aligned}
 & I_x \dot{r} + (I_y - I_x)pq - (\dot{q} + rp)I_{yz} + (q^2 - p^2)I_{xy} + (rq - \dot{p})I_{xz} \\
 & \quad + m[x_G(\dot{v} - wp + ur) - y_G(\dot{u} - vr + wq)] \\
 & = \frac{\rho}{2}L^5(N'_{\dot{r}}\dot{r} + N'_{\dot{p}}\dot{p} + N'_{pq}pq + N'_{qr}qr + N'_{r|r}|r|) \\
 & \quad + \frac{\rho}{2}L^4(N'_{\dot{v}}\dot{v} + N'_{wr}wr + N'_{wp}wp + N'_{vq}vq) \\
 & \quad + \frac{\rho}{2}L^4[N'_{vp}up + N'_{ur}ur + N'_{r|\delta_r}u|r|\delta_r + N'_{|v|r}|v|(v^2 + w^2)^{\frac{1}{2}}] \\
 & \quad + \frac{\rho}{2}L^3[N'_{*}u^2 + N'_{v}uv + N'_{v|v}|v| + (v^2 + w^2)^{\frac{1}{2}}] \\
 & \quad + \frac{\rho}{2}L^3(N'_{vw}vw + N'_{\delta_r}u^2\delta_r) + (x_GW - x_BB)\cos\theta\sin\phi \\
 & \quad + (y_GW - y_BB)\sin\theta + \frac{\rho}{2}L^4N'_{\eta}ur(\eta - 1) \\
 & \quad + \frac{\rho}{2}L^3[N'_{v\eta}uv + N'_{v|v|\eta}|v|(v^2 + w^2)^{\frac{1}{2}} + N'_{\delta_r\eta}\delta_r u^2](\eta - 1)
 \end{aligned}
 \tag{5.12}$$

6 水动力系数计算方法

6.1 水动力系数近似计算方法

6.1.1 加速度系数近似计算

6.1.1.1 加速度系数包括线加速度系数和角加速度系数。加速度系数中,流体惯性力占最主要成分,流体粘性力成分可以忽略不计,加速度系数的近似计算归结为附加质量系数计算。

6.1.1.2 加速度系数与附加质量系数之间关系为公式(6.1):

$$\left. \begin{aligned}
 X'_{\ddot{u}} &= -K_{11}m' \\
 Y'_{\ddot{v}} &= k_{22}m' \\
 Y'_{\dot{r}} &= -K_{26}m'\nabla^{1/3}/L \\
 Z'_{\ddot{w}} &= -K_{33}m' \\
 Z'_{\dot{q}} &= -K_{35}m'\nabla^{1/3}/L \\
 K'_{\dot{v}} &= -K_{24}m'\nabla^{1/3}/L \\
 K'_{\dot{p}} &= -K_{44}I'_x \\
 M'_{\ddot{w}} &= -K_{35}m'\nabla^{1/3}/L \\
 M'_{\dot{q}} &= -K_{55}I'_y \\
 N'_{\dot{v}} &= -K_{26}m'\nabla^{1/3}/L \\
 N'_{\dot{r}} &= -K_{66}I'_z
 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6.1)$$

6.1.1.3 附加质量系数的计算

当潜艇主艇体和附体线型已给出时,可采用势流理论的有限基本解数值方法计算附加质量系数,也可采用二元切片法计算,前者有较高的计算精度。

当潜艇仅给出主艇体和附体主尺度时,主艇体可按三轴椭球计算附加质量系数,附体按平板计算。

6.1.2 由加速度系数导出的耦合水动力系数

在潜艇水动力系数中,部分耦合水动力系数主要与流体惯性成分有关,流体粘性成分可忽略不计。这部分水动力系数可用公式(6.2)近似计算:

$$\left. \begin{aligned}
 X'_{vr} &= -Y'_{\dot{v}} \\
 X'_{wq} &= Z'_{\dot{w}} \\
 X'_{qr} &= Z'_{\dot{q}} \\
 X'_{rr} &= -Y'_{\dot{r}} \\
 Y'_{wp} &= -Z'_{\dot{w}} \\
 Y'_{pq} &= -Z'_{\dot{q}} \\
 Z'_{vp} &= Y'_{\dot{v}} \\
 Z'_{pr} &= Y'_{\dot{r}} \\
 K'_{vw} &= Z'_{\dot{w}} - Y'_{\dot{v}} \\
 K'_{vq} &= Y'_{\dot{r}} + Z'_{\dot{q}} \\
 K'_{wp} &= -Y'_{\dot{p}} \\
 K'_{wr} &= -Y'_{\dot{r}} - Z'_{\dot{q}} \\
 K'_{qr} &= N'_{\dot{r}} - M'_{\dot{q}} \\
 M'_{vp} &= -Y'_{\dot{p}} \\
 M'_{vr} &= -Y'_{\dot{p}} \\
 M'_{pr} &= K'_{\dot{p}} - N'_{\dot{r}} \\
 N'_{vq} &= -Y'_{\dot{p}} \\
 N'_{wp} &= Z'_{\dot{q}} \\
 N'_{pq} &= M'_{\dot{q}} - K'_{\dot{p}} \\
 N'_{qr} &= -K'_{\dot{r}}
 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6.2)$$

6.1.3 线性水动力系数的近似计算

线性水动力系数的近似计算是将线性水动力系数分解为主体和各附体线性水动力系数,同时在附体的水动力系数中考虑主体与附体的相互干扰。

6.1.3.1 主艇体线性水动力系数计算方法

6.1.3.1.1 对垂直面运动,主艇体线性水动力系数按公式(6.3)~公式(6.6)计算:

$$Z'_{\dot{w}}^{(H)} = - [0.22 - 0.35(\frac{H}{B} - 1) + 0.15 | \frac{H}{B} - 1 | ] \nabla^{2/3} / L^2 \dots\dots\dots (6.3)$$

$$M'_{\dot{w}}^{(H)} = [1.32 + 0.037(\frac{L}{B} - 6.6)] [1 - 1.13(\frac{H}{B} - 1)] \nabla / L^3 \dots\dots\dots (6.4)$$

$$Z'_{\dot{q}}^{(H)} = - [0.33 + 0.023(\frac{L}{B} - 7.5)] (2 - \frac{H}{B}) \nabla / L^3 \dots\dots\dots (6.5)$$

$$M'_{\dot{q}}^{(H)} = - [0.575 + 0.10(\frac{L}{B} - 7.5)] (1.65 - 0.65 \frac{H}{B}) \nabla^{4/3} / L^4 \dots\dots\dots (6.6)$$

6.1.3.1.2 对水平面运动,主艇体线性水动力系数按公式(6.7)~公式(6.10)计算:

$$Y'_{\dot{v}}^{(H)} = - [0.22 - 0.35(\frac{B}{H} - 1) + 0.15 | \frac{B}{H} - 1 | ] \nabla^{2/3} / L^2 \dots\dots\dots (6.7)$$

$$N'_{\dot{v}}^{(H)} = - [1.32 + 0.037(\frac{L}{H} - 6.6)] [1 - 1.13(\frac{B}{H} - 1)] \nabla / L^3 \dots\dots\dots (6.8)$$

$$Y'_{\dot{r}}^{(H)} = [0.33 + 0.023(\frac{L}{H} - 7.5)] (2 - \frac{B}{H}) \nabla / L^3 \dots\dots\dots (6.9)$$

$$N'_{\dot{r}}^{(H)} = - [0.575 + 0.10(\frac{L}{H} - 7.5)] (1.65 - 0.65 \frac{B}{H}) \nabla^{4/3} / L^4 \dots\dots\dots (6.10)$$

6.1.3.2 附体线性水动力系数计算方法

6.1.3.2.1 附体包括指挥室围壳、水平鳍、垂直鳍。附体线性水动力系数计算的关键在于附体的力  $Y'_v^{(i)}$  和  $Z'_w^{(i)}$  的计算。当各附体的力  $Y'_v^{(i)}$  和  $Z'_w^{(i)}$  确定后,可利用公式(6.11)计算该附体的其余线性水动力系数。

$$\left. \begin{aligned} N'_v^{(i)} &= Y'_v^{(i)} \cdot x^{(i)} / L; \\ Y'_r^{(i)} &= Y'_v^{(i)} \cdot x^{(i)} / L; \\ N'_r^{(i)} &= Y'_v^{(i)} \cdot (x^{(i)} / L)^2; \\ M'_w^{(i)} &= -Z'_w^{(i)} \cdot x^{(i)} / L; \\ Z'_q^{(i)} &= -Z'_w^{(i)} \cdot x^{(i)} / L; \\ M'_q^{(i)} &= -Z'_w^{(i)} \cdot (x^{(i)} / L)^2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6.11)$$

式中:

上角标 (i) —— (i) 取 fw、hf、vf, 分别表示指挥室围壳、水平鳍、垂直鳍;  
 $x^{(i)}$  —— 附体面积中心在 x 轴方向坐标值, m。

6.1.3.2.2 指挥室围壳线性水动力系数按公式(6.12)计算:

$$Y'_v^{(fw)} = \frac{-2.34\lambda^{(fw)}}{1+0.49\lambda^{(fw)}} \cdot \frac{A^{(fw)}}{L^2} \dots\dots\dots (6.12)$$

6.1.3.2.3 水平鳍线性水动力系数按公式(6.13)(公式符号见图2)或公式(6.14)(公式符号见图3)计算:

$$\left. \begin{aligned} Z'_w^{(hf)} &= -\frac{\overline{C}^{(hf)} b_0^{(hf)} (4.6b_0^{(hf)} - 6.7\overline{D}_H^{(hf)})}{(2.04\overline{C}^{(hf)} + b_0^{(hf)}) \times L^2} \\ \overline{C}^{(hf)} &= \frac{A^{(hf)}}{b_0^{(hf)} - \overline{D}_H^{(hf)}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6.13)$$

$$\left. \begin{aligned} Z'_w^{(hf)} &= \frac{-1.8\pi\lambda_e^{(hf)}}{[\cos \Lambda_{1/4}^{(hf)} \sqrt{(\frac{\lambda_e^{(hf)}}{\cos^2 \Lambda_{1/4}^{(hf)}} + 4)} + 1.8]} [1 - (\frac{\overline{D}_H^{(hf)} + 2\delta^*}{b_0^{(hf)}})^2]^2 [1 - \frac{\text{tg} \frac{\tau}{2}}{\lambda_e^{(hf)}}]^2 \frac{A_0^{(hf)}}{L^2} \\ \lambda_e^{(hf)} &= \frac{(b_0^{(hf)})^2}{A_0^{(hf)}} \\ \delta^* / L_x &= 0.0467(UL_x / \nu)^{-1/5} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6.14)$$

6.1.3.2.4 垂直鳍线性水动力系数按公式(6.15)(公式符号见图4)或公式(6.16)(公式符号见图5)计算。

$$\left. \begin{aligned} Y'_v^{(vf)} &= -\left[ \frac{\overline{C}^{(vf)} b_0^{(vf)} (4.6b_0^{(vf)} - 6.7\overline{D}_H^{(vf)})}{(2.04\overline{C}^{(vf)} + b_0^{(vf)}) L^2} \right] \\ \overline{C}^{(vf)} &= \frac{A^{(vU)} + A^{(vL)}}{2(b_0^{(vf)} - \overline{D}_H^{(vf)})} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6.15)$$

$$\begin{aligned}
 Y'_v^{(\nu)} &= Y'_v^{(\nu U)} + Y'_v^{(\nu L)} \\
 Y'_v^{(\nu U)} &= \frac{1.8\pi\lambda_e^{(\nu U)}}{\cos\Lambda_{1/4} \sqrt{\left[\frac{(\lambda_e^{(\nu U)})^2}{\cos^4\Lambda_{1/4}} + 4\right] + 1.8}} \left[1 - \left(\frac{\bar{D}_H^{(\nu U)} + 2\delta^*}{b_0^{(\nu U)}}\right)^2\right]^2 \left[1 - \frac{\text{tg}\left(\frac{\tau}{2}\right)}{\lambda_e^{(\nu U)}}\right]^2 \frac{A_0^{(\nu U)}}{2L^2} \\
 Y'_v^{(\nu L)} &= \frac{1.8\pi\lambda_e^{(\nu L)}}{\cos\Lambda_{1/4} \sqrt{\left[\frac{(\lambda_e^{(\nu L)})^2}{\cos^4\Lambda_{1/4}} + 4\right] + 1.8}} \left[1 - \left(\frac{\bar{D}_H^{(\nu L)} + 2\delta^*}{b_0^{(\nu L)}}\right)^2\right]^2 \left[1 - \frac{\text{tg}\left(\frac{\tau}{2}\right)}{\lambda_e^{(\nu L)}}\right]^2 \frac{A_0^{(\nu L)}}{2L^2} \dots\dots\dots (6.16) \\
 \lambda_e^{(\nu U)} &= \frac{(b_0^{(\nu U)})^2}{A_0^{(\nu U)}} \\
 \lambda_e^{(\nu L)} &= \frac{(b_0^{(\nu L)})^2}{A_0^{(\nu L)}}
 \end{aligned}$$

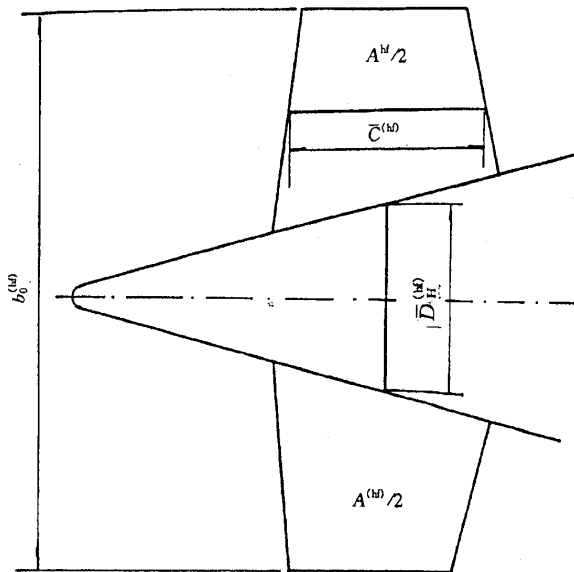


图 2

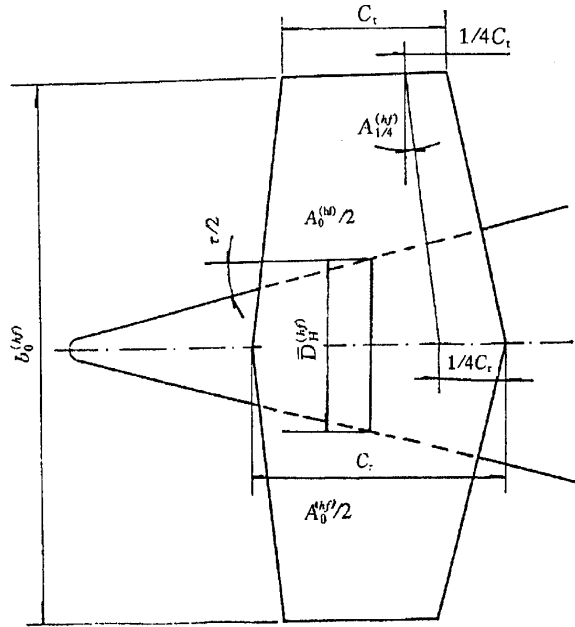


图 3

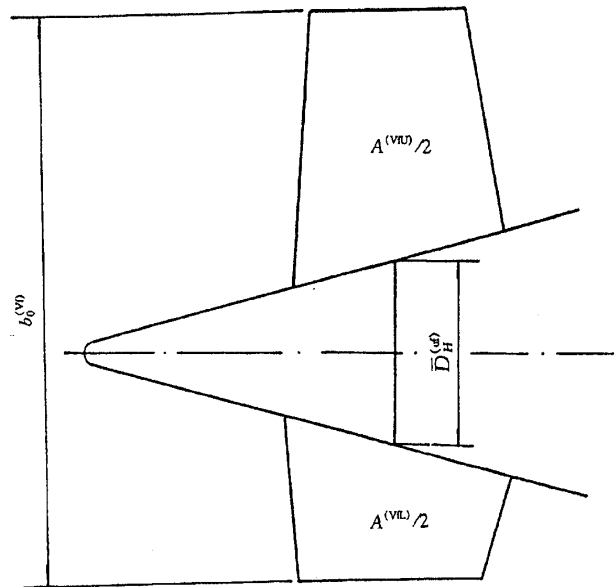


图 4

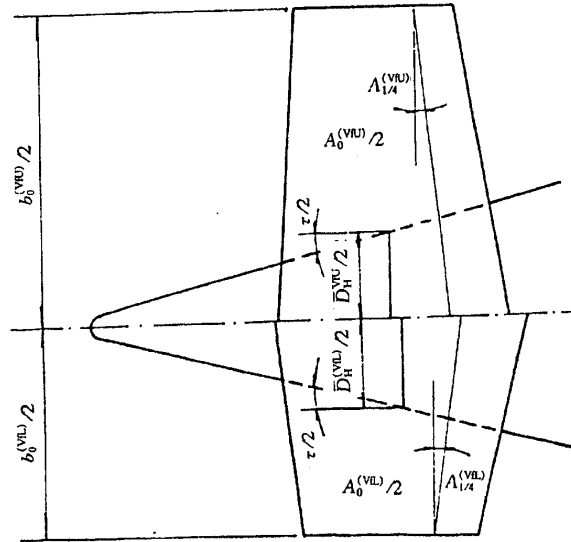


图 5

6.1.4 操舵引起的水动力系数估算

操舵引起的水动力系数按公式(6.17)~公式(6.27)估算,其影响系数  $\mu_i$  和修正系数  $k_i$  由表 2 确定。

$$X'_{\delta_s \delta_s} = -1.0 \frac{A^{(s)}}{L^2} \dots\dots\dots (6.17)$$

$$X'_{\delta_b \delta_b} = -1.0 \frac{A^{(b)}}{L^2} \dots\dots\dots (6.18)$$

$$X'_{\delta_r \delta_r} = -1.0 \frac{A^{(r)}}{L^2} \dots\dots\dots (6.19)$$

$$Y'_{\delta_{tU}} = G \cdot \mu_r \cdot k_r \cdot \frac{2.75\lambda^{(rU)}}{1 + 0.49\lambda^{(rU)}} \cdot \frac{A^{(rU)}}{L^2} \dots\dots\dots (6.20)$$

$$Y'_{\delta_{tL}} = \mu_r \cdot k_r \cdot \frac{2.75\lambda^{(rL)}}{1 + 0.49\lambda^{(rL)}} \cdot \frac{A^{(rL)}}{L^2} \dots\dots\dots (6.21)$$

$$Z'_{\delta_b} = -\mu_b \cdot k_b \cdot \frac{2.75\lambda^{(b)}}{1 + 0.49\lambda^{(b)}} \cdot \frac{A^{(b)}}{L^2} \dots\dots\dots (6.22)$$

$$Z'_{\delta_s} = -\mu_s \cdot k_s \cdot \frac{2.75\lambda^{(s)}}{1 + 0.49\lambda^{(s)}} \cdot \frac{A^{(s)}}{L^2} \dots\dots\dots (6.23)$$

$$M'_{\delta_b} = -Z'_{\delta_b} \frac{x^{(b)}}{L} \dots\dots\dots (6.24)$$

$$M'_{\delta_s} = -Z'_{\delta_s} \frac{x^{(s)}}{L} \dots\dots\dots (6.25)$$

$$N'_{\delta_{tU}} = Y'_{\delta_{tU}} \frac{x^{(rU)}}{L} \dots\dots\dots (6.26)$$

$$N'_{\delta_{tL}} = Y'_{\delta_{tL}} \frac{x^{(rL)}}{L} \dots\dots\dots (6.27)$$

式中:

$G$  ——弹舱盖影响系数,有高大弹舱盖时取 0.6,无弹舱盖时取 1.0。

表 2

舵 类 型		$k_i$	$\mu_i$	
方向舵和 艇升降舵	单舵和稳定翼后大间隙舵	0.92	1.0	
	稳定翼 组合体	独立剖面	0.92	1.3
		成一体剖面	0.85	1.5
艇升降舵		0.92	见公式(6.28)	
围壳舵		0.92	1.0	

注:表中  $i$  取  $r, rU, rL, s, b$  分别表示方向舵、上方向舵、下方向舵、艇升降舵、艇升降舵或围壳舵。

对艇升降舵  $\mu_b$  值按公式(6.28)确定:

$$\mu_b = (1.76 - 0.467\sqrt{\frac{\Delta}{C^{(b)}}})(1 - 0.32\frac{z^{(b)}}{R_{\max}}) \dots\dots\dots (6.28)$$

式中:

- $z^{(b)}$  ——艇升降舵舵轴的  $z$  向坐标值, m;
- $R_{\max}$  ——主艇体最大半径, m;
- $\Delta$  ——艇升降舵与艇体之间间隙, m。

6.2 用母型法确定潜艇水动力系数

6.2.1 具有模型试验水动力系数资料的潜艇,均可作为接近设计艇的母型艇。

6.2.2 设计艇与母型艇接近程度可用下列几何特性参数来度量:

- a) 主艇体几何特性参数,包括:  $L/B, H/B, x_B/L, L/\nabla^{1/3}$ ;
- b) 指挥室围壳几何特性参数,包括:  $x^{(fw)}/L, \bar{C}^{(fw)}/L, t^{(fw)}B, b^{(fw)}/H$ ;
- c) 附体 ( $i = hf, vfU, vfL, s, rU, rL, b$ ) 的几何特性参数,包括:  $\lambda^{(i)}, A^{(i)}/L^2, x^{(i)}$ 。

6.2.3 设计艇线性水动力系数(包括线加速度系数、角加速度系数、线速度系数和角速度系数)可用公式(6.29)确定:

$$F'_{j-d} = F'_{j-d.c} \frac{F_{j-o.t}^{(i)}}{F_{j-o.c}^{(i)}} \dots\dots\dots (6.29)$$

式中:

- $F'_{j-d}$  ——表示设计艇的线性水动力系数;
- $F'_{j-d.c}$  ——表示设计艇用近似计算公式计算得到的线性水动力系数;
- $F'_{j-o.c}$  ——表示母型艇用近似计算公式计算得到的线性水动力系数;
- $F'_{j-o.t}$  ——表示母型艇通过拘束速模试验得到的线性水动力系数;
- 下角标  $j$  ——分别表示线加速度、角加速度、线速度和角速度诸分量;
- 上角标 ( $i$ ) ——分别表示主艇体、指挥室围壳和各附体。

6.2.4 对主艇体、指挥室围壳、附体可采用一条母型艇,也可按接近程度分别采用不同的母型艇。设计艇与母型艇越接近,越能精确估算设计艇水动力系数值。

7 操纵性衡准参数计算方法

7.1 垂直面衡准参数计算方法

7.1.1 潜艇无控直线运动稳定性衡准参数按公式(7.1)计算:

$$K_{vd} = \frac{M'_q \cdot Z'_w}{(m' + Z'_q)M'_w} \dots\dots\dots (7.1)$$

7.1.2 潜艇静不稳定系数按公式(7.2)计算:

$$l'_a = -\frac{M'_w}{Z'_w} \dots\dots\dots (7.2)$$

7.1.3 潜艇定深等速航行时,艇、船升降舵逆速分别按公式(7.3)、公式(7.4)计算:

$$U_{is} = \left( \frac{m'ghZ'_{\delta_s}}{Z'_{\delta_s}M'_w - Z'_wM'_{\delta_s}} \right)^{1/2} \dots\dots\dots (7.3)$$

$$U_{ib} = \left( \frac{m'ghZ'_{\delta_b}}{Z'_{\delta_b}M'_w - Z'_wM'_{\delta_b}} \right)^{1/2} \dots\dots\dots (7.4)$$

7.1.4 艇升降舵速率按公式(7.5)计算:

$$\frac{\partial U_s}{\partial \delta_s} = \frac{U^3}{57.3m'gh} \left( \frac{M'_w}{Z'_w} - \frac{M'_{\delta_s}}{Z'_{\delta_s}} + \frac{M'_{\theta}}{Z'_w} \right) Z'_{\delta_s} \dots\dots\dots (7.5)$$

7.1.5 有纵倾定深直线运动时平衡角指标按如下计算:

a) 单操船升降舵(围壳舵)平衡角按公式(7.6)、公式(7.7)计算:

$$\delta_b = \frac{-(M'_w + M'_{\theta})Z'_* + M'_*Z'_w}{(M'_w + M'_{\theta})Z'_{\delta_b} - M'_{\delta_b}Z'_w} \times 57.3 \dots\dots\dots (7.6)$$

$$\theta = \frac{Z'_*M'_{\delta_b} - M'_*Z'_{\delta_b}}{(M'_w + M'_{\theta})Z'_{\delta_b} - M'_{\delta_b}Z'_w} \times 57.3 \dots\dots\dots (7.7)$$

b) 单操艇升降舵平衡角按公式(7.8)、公式(7.9)计算:

$$\delta_s = \frac{-(M'_w + M'_{\theta})Z'_* + M'_*Z'_w}{(M'_w + M'_{\theta})Z'_{\delta_s} - M'_{\delta_s}Z'_w} \times 57.3 \dots\dots\dots (7.8)$$

$$\theta = \frac{Z'_*M'_{\delta_s} - M'_*Z'_{\delta_s}}{(M'_w + M'_{\theta})Z'_{\delta_s} - M'_{\delta_s}Z'_w} \times 57.3 \dots\dots\dots (7.9)$$

7.1.6 无纵倾定深直线定常运动时平衡角衡准参数按公式(7.10)、公式(7.11)计算:

$$\delta_s = \frac{-M'_*Z'_{\delta_b} + M'_{\delta_b}Z'_*}{M'_{\delta_s}Z'_{\delta_b} - M'_{\delta_b}Z'_{\delta_s}} \times 57.3 \dots\dots\dots (7.10)$$

$$\delta_b = \frac{M'_*Z'_{\delta_s} - M'_{\delta_s}Z'_*}{M'_{\delta_s}Z'_{\delta_b} - M'_{\delta_b}Z'_{\delta_s}} \times 57.3 \dots\dots\dots (7.11)$$

7.1.7 无纵倾上浮或下潜时达到的最大攻角衡准参数按公式(7.12)计算:

$$\left. \begin{aligned} \alpha_{max} &= \frac{Z'_{\delta_b}}{Z'_w} (1 + \chi) \delta_{b,max} \\ \chi &= \frac{l'_{\delta_b} - l'_a}{l'_a - l'_{\delta_s}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7.12)$$

7.1.8 垂直面中不定常运动衡准参数按如下计算:

a) 潜艇垂直面不定常运动可用常系数线性微分方程(7.13)描述:

$$\left. \begin{aligned} T_0 \frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{d\theta}{dt} &= K_{\theta} \delta_s(\tau) \\ T_{\theta} &= \frac{I'_y - M'_q}{|M'_q| (1 - \frac{l'^a}{l'_q})} \cdot \frac{L}{U} \\ K_{\theta} &= \frac{|M'_{\delta_s}|}{|M'_q| (1 - \frac{l'^a}{l'_q})} \cdot \frac{L}{U} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7.13)$$

b) 操舰升降舵变纵倾运动响应时间滞后参数按公式(7.14)计算:

$$T'_\theta = \frac{I'_y - M'_q}{|M'_q| (1 - \frac{I'_a}{I'_q})} \dots\dots\dots (7.14)$$

c) 操舰升降舵纵倾响应参数按公式(7.15)计算:

$$\frac{K'_\theta}{T'_\theta} = \frac{|M'_{\delta_s}|}{I'_y - M'_q} \dots\dots\dots (7.15)$$

7.2 水平面衡准参数计算方法

7.2.1 无控直线运动稳定性衡准参数按公式(7.16)计算:

$$K_{hd} = - \frac{N'_r Y'_v}{(m' - Y'_r) N'_v} \dots\dots\dots (7.16)$$

7.2.2 方向舵满舵回转时,稳定回转直径按如下方法计算:

方向舵满舵稳定回转时,  $\dot{u}$ 、 $\dot{v}$  和  $\dot{r}$  等于零,水平面运动方程式(5.4)~公式(5.6)退化为非线性代数方程组。令  $\delta_r$  为满舵舵角值,用迭代法可解得稳定回转时的  $u, v, r$ 。利用公式(7.17)和公式(7.18)可求出稳定回转直径  $D_0$ 。

$$U = (u^2 + v^2)^{1/2} \dots\dots\dots (7.17)$$

$$D_0 = \frac{2U}{r} \dots\dots\dots (7.18)$$

7.2.3 Z型机动初转期  $t'_a$  可按近似公式(7.19)计算:

$$t'_a \approx 2 \sqrt{\frac{I'_z - N'_i}{N'_{\delta_s}}} \dots\dots\dots (7.19)$$

8 操纵面的设计计算

8.1 舰升降舵(围壳舵)尺度的确定

8.1.1 舰升降舵(围壳舵)面积的确定

8.1.1.1 母型分析法

根据设计艇主艇体形状、排水量和战术技术要求,选取最接近上述条件并经检验证明操纵性良好的潜艇为母型艇,按公式(8.1)计算设计艇的舰升降舵(或围壳舵)面积初值。

$$A_{-d}^{(b)} = \frac{A_{-o}^{(b)}}{L_{-o} \times B_{-o}} L_{-d} B_{-d} \dots\dots\dots (8.1)$$

式中:

$A_{-d}^{(b)}$ ——设计艇的舰升降舵(围壳舵)面积,  $m^2$ ;

$A_{-o}^{(b)}$ ——母型艇的舰升降舵(围壳舵)面积,  $m^2$ ;

$L_{-o}$ ——母型艇艇长,  $m$ ;

$B_{-o}$ ——母型艇艇宽,  $m$ ;

$L_{-d}$ ——设计艇艇长,  $m$ ;

$B_{-d}$ ——设计艇艇宽,  $m$ ;

8.1.1.2 统计分析法

在缺乏合适的母型时,也可采用艇的统计资料作为舰升降舵(围壳舵)的面积初值,并按公式(8.2)计算:

$$A^{(b)} = \epsilon_b LB \dots\dots\dots (8.2)$$

式中:

$\epsilon_b$ ——经验系数,推荐值范围 0.010~0.019,下限对应于舰升降舵,上限对应于围壳舵。

8.1.1.3 指标算法

舵面积由无纵倾定常潜浮时的最大攻角指标确定,并按公式(8.3)计算:

$$\left. \begin{aligned} \frac{A^{(b)}}{L^2} &= 0.194 \left( 1 + \frac{2}{\lambda^{(b)}} \right) \frac{Z'_w}{\mu_b(1+\chi)} \frac{\alpha_{\max}}{\delta_{b\max}} \dots\dots\dots (8.3) \\ \chi &= \frac{l'_{\delta_b} - l'_a}{l'_a - l'_{\delta_s}} \end{aligned} \right\}$$

式中:

- $\alpha_{\max}$  ——选定的最大攻角,(°);
- $\delta_{b\max}$  ——舵升降舵最大转舵角,(°);
- $l'_{\delta_b}, \lambda^{(b)}$  ——舵升降舵无量纲力臂和展弦比,由设计意图确定;
- $l'_a$  ——选定的静不稳定系数,由设计意图确定;
- $l'_{\delta_s}$  ——舵升降舵无量纲力臂,由设计意图确定;
- $\mu_b$  ——舵升降舵的影响系数,其值见表 2。

8.1.2 舵升降舵(围壳舵)展弦比的确定

舵展弦比  $\lambda_b$  是影响升力系数及其他舵特性的重要参数,在既能提供较大的升力系数,又不希望失速角过小的原则下,一般舵升降舵(围壳舵)展弦比范围取 1.4~2.0。

8.1.3 舵升降舵(围壳舵)翼型剖面的确定

舵的剖面形状取对称翼型,目前广泛使用 NACA 翼型剖面。在选择翼型剖面相对厚度时,要结合舵杆直径和布置来确定。

8.2 水平鳍和舵升降舵尺度的确定

8.2.1 水平鳍和舵升降舵面积的确定

8.2.1.1 母型分析法

根据 8.1.1.1 条原则选取母型艇,按公式(8.4)计算设计艇水平鳍和舵升降舵的面积初值。

$$A_{-d}^{(hf)} = \frac{A_{-o}^{(hf)}}{L_{-o} \times B_{-o}} L_{-d} B_{-d} \dots\dots\dots (8.4)$$

$$A_{-d}^{(s)} = \frac{A_{-o}^{(s)}}{L_{-o} \times B_{-o}} L_{-d} B_{-d} \dots\dots\dots (8.5)$$

式中:

- $A_{-d}^{(hf)}$  或  $A_{-d}^{(s)}$  ——设计艇的水平鳍或舵升降舵面积,  $m^2$ ;
- $A_{-o}^{(hf)}$  或  $A_{-o}^{(s)}$  ——母型艇的水平鳍或舵升降舵面积,  $m^2$ ;
- 其余符号同公式(8.1)。

8.2.1.2 统计分析法

可采用现有艇的统计资料作为舵升降舵的面积初值,并按公式(8.6)计算:

$$A^{(s)} = \epsilon_s LB \dots\dots\dots (8.6)$$

式中:

- $\epsilon_s$  ——经验值,推荐值范围 0.014~0.023。

8.2.1.3 指标算法

水平鳍总面积由静不稳定性条件确定,并按公式(8.7)计算:

$$\frac{A^{(hf)}}{L^2} = 0.194 \left( 1 + \frac{2}{\lambda^{(hf)}} \right) \frac{(M'_w^{(H)} - l'_a Z'_w^{(H)})}{\epsilon_{hf}(l'_a - l'^{(hf)})} \dots\dots\dots (8.7)$$

式中:

- $l'_a$  ——选定的静不稳定系数设计指标;

$l'^{(hf)}, \lambda^{(hf)}$  ——水平鳍的相对力臂和展弦比,由设计意图确定;

$\epsilon_{hf}$  ——艇体和水平鳍的相互干扰系数,按母型艇或设计意图确定。

艇升降舵面积由速升率指标确定,并按公式(8.8)计算:

$$\left. \begin{aligned} \frac{A^{(s)}}{L^2} &= 11.1 \left( 1 + \frac{2}{\lambda^{(s)}} \right) \frac{m'gh}{\mu_s (l'_a - l'_{\delta_s} - l'_{FH}) U^3 \left( \frac{\partial U_s}{\partial \delta_s} \right)} \\ l'_{FH} &= - \frac{m'gh}{U^2 Z'_w} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (8.8)$$

式中:

$\frac{\partial U_s}{\partial \delta_s}$  ——选定的速升率设计指标,  $m \cdot s^{-1} \cdot (^{\circ})^{-1}$ ;

$l'_a$  ——静不稳定系数,由设计意图确定;

$l'_{\delta_s}, \lambda^{(s)}$  ——艇升降舵的无量纲力臂和展弦比,由设计意图确定;

$U$  ——与速升率相对应的航速,  $m \cdot s^{-1}$ ;

$\mu_s$  ——艇升降舵的影响系数,按母型艇或设计意图确定。

8.2.2 水平鳍和艇升降舵展弦比的确定

展弦比是影响升力系数及其翼和舵特性的重要参数,展弦比的选定在服从于总体布局的前提下,遵循既提供较大升力系数又防止过早失速的原则,一般水平鳍展弦比范围为 0.8~1.5,艇升降舵展弦比范围为 1.5~2.0。

8.2.3 水平鳍和艇升降舵翼型剖面的确定

水平鳍剖面形状按照主艇体形状的需要和鳍与主艇体的相对位置来确定,其原则是使全艇的纵倾力矩零态值尽可能地减小,以利于潜艇行进间均衡。

艇升降舵剖面宜取对称翼型,并应与水平稳定翼相协调,以减小翼、舵结合部的流动分离,从而降低阻力和流体动力噪声。翼型厚度应与舵杆直径相匹配。

8.3 垂直鳍和方向舵尺度的确定

8.3.1 垂直鳍和方向舵面积的确定

8.3.1.1 母型分析法

根据 8.1.1.1 条原则选取母型艇,按公式(8.9)计算设计艇垂直鳍和方向舵的面积初值。

$$\left. \begin{aligned} A_{-d}^{(d)} &= \frac{A_{-o}^{(d)}}{L_{-o} \times H_{-o}} \cdot L_{-d} H_{-d} \\ A_{-d}^{(r)} &= \frac{A_{-o}^{(r)}}{L_{(-o)} \times H_{-o}} \cdot L_{-d} H_{-d} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (8.9)$$

式中:

$A_{-d}^{(d)}, A_{-o}^{(d)}, A_{-d}^{(r)}, A_{-o}^{(r)}$  ——分别为设计艇和母型艇的垂直鳍和方向舵面积,  $m^2$ ;

$H_{-d}, H_{-o}$  ——分别为设计艇和母型艇的型深,  $m$ ;

$L_{-d}, L_{-o}$  ——分别为设计艇和母型艇的艇长,  $m$ 。

设计艇有上、下垂直鳍和方向舵时,可按母型艇上、下垂直鳍和方向舵面积的比例来划分其总面积。

8.3.1.2 统计分析法

在没有适合的母型时,也可采用各类潜艇的统计资料作为面积近似值。

垂直鳍面积按公式(8.10)计算:

$$A^{(d)} = K \nabla^{2/3} \dots\dots\dots (8.10)$$

式中:

$A^{(d)}$  ——垂直鳍面积,  $m^2$ ;

$\nabla^{2/3}$  ——全排水容积的三分之二次方,  $m^2$ ;

$K$  ——经验系数, 一般取 0.11~0.12。

方向舵面积按公式(8.11)计算:

$$A^{(r)} = \epsilon_r LH \dots \dots \dots (8.11)$$

式中:

$A^{(r)}$  ——方向舵面积,  $m^2$ ;

$H$  ——型深,  $m$ ;

$\epsilon_r$  ——经验系数, 一般取 0.014~0.022。

如果有上、下垂直鳍和方向舵, 则上、下垂直鳍和方向舵各按 55%~60%、40%~45% 的比例来划分已求得的总面积。

### 8.3.1.3 指标算法

垂直鳍面积由静不稳定性条件确定, 按公式(8.12)计算:

$$\frac{A^{(v)}}{L^2} = 0.194 \left( 1 + \frac{2}{\lambda^{(v)}} \right) \frac{l'_\beta (Y'_v{}^{(H)} + Y'_v{}^{(fw)}) - (N'_v{}^{(H)} + N'_v{}^{(fw)})}{\epsilon_{v1} (l'_\beta - l'^{(v)})} \dots \dots \dots (8.12)$$

式中:

$\epsilon_{v1}$  ——艇体和垂直鳍的相互干扰系数, 按母型艇和设计意图确定;

上角标  $(H)$ ,  $(fw)$  ——分别表示主艇体和指挥室围壳。

如果有上、下垂直鳍, 则上、下垂直鳍各按 55%~60%、40%~45% 的比例来划分已求得的总面积。

方向舵面积以水下满舵相对回转直径作为设计指标, 按公式(8.13)计算。

$$\frac{A^{(r)}}{L^2} = 11.1 \frac{2L}{D_0 \delta_{r \max}} \cdot \left( 1 + \frac{2}{\lambda^{(r)}} \right) \cdot \frac{(m' - Y'_r) \cdot (l'_r - l'_\beta)}{\mu_r (l'_\beta - l'_{\delta_r})} \dots \dots \dots (8.13)$$

式中:

$\frac{D_0}{L}$  ——选定的满舵相对回转直径;

$\lambda^{(r)}$  ——方向舵展弦比, 由设计意图确定;

$\delta_{r \max}$  ——方向舵最大转舵角,  $(^\circ)$ ;

$\mu_r$  ——方向舵的影响系数, 按母型艇或设计意图确定。

如果有上、下方向舵, 则上、下方向舵各按 55%~60%、40%~45% 的比例来划分已求得的总面积。

### 8.3.2 垂直鳍和方向舵展弦比的确定

展弦比的确定要服从于总体布局, 垂直鳍(特别是下垂直鳍), 一般受条件限制取为小展弦比机翼, 舵的展弦比在条件允许的前提下尽可能取大些。

### 8.3.3 垂直鳍和方向舵翼型剖面的确定

垂直鳍和方向舵均宜取对称翼型, 舵和垂直稳定翼间应相互协调, 舵杆处翼型厚度在大于舵杆直径的条件下可适当小些。

### 8.4 艉鳍的布置

艉鳍(包括水平鳍和垂直鳍)布置在艇尾, 并尽量往后布置。但尾鳍后缘与螺旋桨的间距建议不小于螺旋桨的 0.5 倍直径。

---

**附加说明：**

本指导性技术文件可取代 CB/Z 250—88《潜艇操纵性设计计算方法》。

本指导性技术文件由(原)中国船舶总公司提出。

本指导性技术文件由中国船舶工业综合技术经济研究院归口。

本指导性技术文件由中船重工集团公司七院七〇二所、七〇一所、七一九所、中船工业集团公司综合技术经济研究院起草。

本指导性技术文件主要起草人：孙张群、江 宏。

参加起草的人员有：王文琦、吴汉生、何春荣、吴 军、杨玉伟、吴宝山、梁中刚、蔡大明、赵 华。

计划项目代号：8CZ27