

由惯性系下的牛顿运动定律, 有

$$\begin{cases} X \cos \theta + Z \sin \theta = m \ddot{\xi}_G \\ -X \sin \theta + Z \cos \theta = m \ddot{\zeta}_G \\ I_y \ddot{\theta} = M \end{cases} \quad (1)$$

式中, ξ_G 、 ζ_G 为重心在大地坐标系中的坐标; M 为艇体所受合力矩对 y 轴的分量; θ 为纵倾角; I_y 为艇体对 y 轴的转动惯量; m 为艇体质量.

因

$$\begin{cases} \xi_G = u \cos \theta + \omega \sin \theta \\ \zeta_G = -u \sin \theta + \omega \cos \theta \end{cases} \quad (2)$$

式中, u 、 ω 是艇速度在 x 、 z 轴上的分量. 将(2)式两边求导并代入(1)式, 得

$$[X - m(\dot{u} + \omega \dot{\theta})] \cos \theta + [Z - m(\dot{\omega} - u \dot{\theta})] \sin \theta = 0$$

对任意角, 上式均应成立, 令 $\dot{\theta} = q$, 故必有

$$\begin{cases} m(\dot{u} + \omega q) = X \\ m(\dot{\omega} - u q) = Z \\ I_y \dot{q} = M \end{cases} \quad (3)$$

式中, q 为艇体绕 G_y 轴旋转角速度.

根据“缓慢运动”假设^[1], 垂直面运动中, 作用于潜艇的流体动力可以具体写成:

$$X = f_x(u, \omega, q, \dot{u}, \dot{\omega}, \dot{q}, \delta_b, \delta_s)$$

$$Z = f_z(u, \omega, q, \dot{u}, \dot{\omega}, \dot{q}, \delta_b, \delta_s)$$

$$M = f_m(u, \omega, q, \dot{u}, \dot{\omega}, \dot{q}, \delta_b, \delta_s)$$

式中, δ_b 、 δ_s 分别为艏舵角和艉舵角.

选择潜艇作等速直航的平稳状态, 即: $u = U$, $\omega = q = \delta_b = \delta_s = 0$, $\dot{u} = \dot{\omega} = \dot{q} = 0$, 依照多元函数 $f(x, y, z, \dots)$ 在点 (x_0, y_0, z_0, \dots) 的泰勒展开式, 在忽略二次项的线性条件下展开后可得:

$$\begin{aligned} X &= X_0 + X_u \Delta u + X_\omega \omega + X_q q + X_{\delta_b} \delta_b + X_{\delta_s} \delta_s + X_{\dot{u}} \dot{u} + X_{\dot{\omega}} \dot{\omega} + X_{\dot{q}} \dot{q} \\ Z &= Z_0 + Z_u \Delta u + Z_\omega \omega + Z_q q + Z_{\delta_b} \delta_b + Z_{\delta_s} \delta_s + Z_{\dot{u}} \dot{u} + Z_{\dot{\omega}} \dot{\omega} + Z_{\dot{q}} \dot{q} \\ M &= M_0 + M_u \Delta u + M_\omega \omega + M_q q + M_{\delta_b} \delta_b + M_{\delta_s} \delta_s + M_{\dot{u}} \dot{u} + M_{\dot{\omega}} \dot{\omega} + M_{\dot{q}} \dot{q} \end{aligned} \quad (4)$$

式中, $X_0 = f_x(U, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)$

$$X_u = \left. \frac{\partial f}{\partial u} \right|_{u=U, \omega=q=\delta_b=\delta_s=\dot{\omega}=\dot{q}=\dot{\delta}_b=\dot{\delta}_s=0}, \text{其余类推.}$$

潜艇的实际操纵表明: 一般情况下操纵运动参数变化较小^[2], 对水动力系数有重要影响的冲角及其变化都很小, 纵倾角因安全性要求, 通常在 $7^\circ \sim 10^\circ$ 以内, 特别是常规动力潜艇, 垂直面运动方程的非线性影响较小^[1], 因此用线性方程就可以描述了.

将(4)式代入(3)式, 并计及剩余静载 ΔP , ΔM 和扶正力矩 $M(\theta)$ 和浆产生的推力矩 M_T , 并考虑艇体前、后不对称, 可得动系坐标原点与重心重合的垂直面操纵运动线性方程式:

$$(m - z_\omega) \dot{\omega} - z_q \dot{q} = z_0 + z_\omega \omega + (mU + z_q) q + z_{\delta_b} \delta_b + z_{\delta_s} \delta_s + \Delta P$$

$$(I_y - M_q) \dot{q} - M_\omega \dot{\omega} = M_0 + M_\omega \omega + M_q q + M_{\delta_b} \delta_b + M_{\delta_s} \delta_s + M_\theta \theta + M_t + \Delta M$$

由于某些特殊原因, 上述参数的获取极为不易, 这里根据搜集到的有关间接资料, 经换算、估算后得到实际参数, 代入方程中并推导得:

$$\begin{cases} \dot{\omega} = a_1 U \omega + a_2 U q + a_3 U^2 \delta_b + a_4 U^2 \delta_s + a_5 U^2 + \Delta p \times K_1 \\ \dot{q} = b_1 U \omega + b_2 U q + b_3 U^2 \delta_b + b_4 U^2 \delta_s + b_5 \theta + b_6 U^2 + \Delta m p \times K_2 \end{cases} \tag{5}$$

式中, $a_1、a_2、a_3、a_4、a_5、b_1、b_2、b_3、b_4、b_5、b_6、K_1、K_2$ 为系数.

2 仿真及结果

2.1 仿真模型

(5) 式在输入艏、艉舵角和车令后, 可解算出 ω 和 q , 为解得潜艇的运动位置和运动姿态, 综合 $\theta = q$ 、(2) 式和 (5) 式, 考虑 $u = U$ 的展开状态, 有:

$$\begin{cases} \dot{\omega} = a_1 U \omega + a_2 U q + a_3 U^2 \delta_b + a_4 U^2 \delta_s + a_5 U^2 + \Delta p \times K_1 \\ \dot{q} = b_1 U \omega + b_2 U q + b_3 U^2 \delta_b + b_4 U^2 \delta_s + b_5 \theta + b_6 U^2 + \Delta m p \times K_2 \\ \dot{\theta} = 57.3 q \\ \dot{\zeta}_G = \omega \cos \theta - U \sin \theta \\ \dot{\xi}_S = U \cos \theta + \omega \sin \theta \end{cases} \tag{6}$$

2.2 仿真结果^[3]

取车钟 8 节, 分别操不同舵角进行仿真, 运动轨迹如图 3 所示.

- (1) 操平行下潜舵 $\delta_b = -10^\circ、\delta_s = -10^\circ$, 设置好初始艇深, 轨迹如图 3(a).
- (2) 操平行上浮舵 $\delta_b = 15^\circ、\delta_s = 15^\circ$, 设置好初始艇深, 轨迹如图 3(b).
- (3) 操艉下潜舵 $\delta_b = 0^\circ、\delta_s = 10^\circ$, 设置好初始艇深, 轨迹如图 3(c).
- (4) 操相对下潜舵 $\delta_b = -10^\circ、\delta_s = 10^\circ$, 设置好初始艇深, 轨迹如图 3(d).

从仿真曲线可以看出, 操下潜舵时, ζ_G 增大, 潜艇下潜, 操上浮舵时, ζ_G 减小, 潜艇上浮; 对比 (a)、(c)、(d) 曲线可以看出, 操相对下潜舵时, 潜艇的下潜速度较快, 操平行下潜舵时的下潜速度较慢. 仿真轨迹与物理意义相符合.

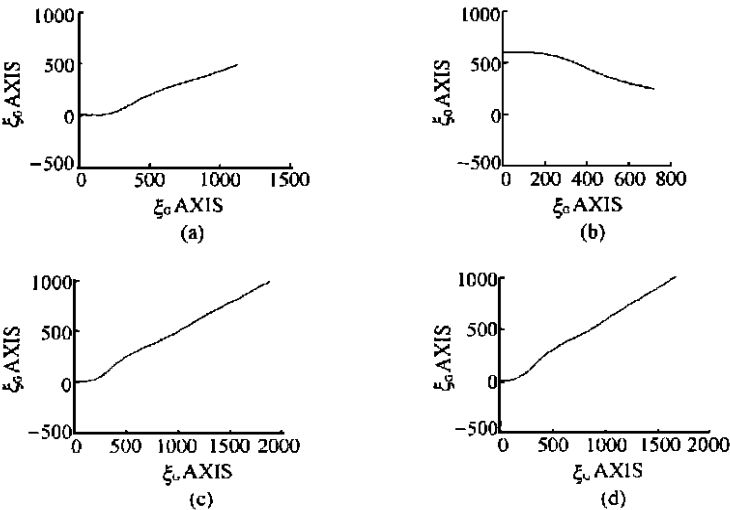


图 3 上浮与下潜运动仿真轨迹

3 结束语

潜艇模拟训练器的研究是很有应用价值的,本文分析了潜艇水下运动的受力情况,建立起潜艇运动参数与控制量之间的关系,提出了仿真模型,仿真曲线与物理意义相符,证明了作者所推算、估算的参数正确性.仿真研究表明,潜艇变深模型可以应用于模拟训练器的设计中.

参 考 文 献

- 1 施生达.潜艇操纵性.北京:国防工业出版社,1996
- 2 海军潜艇学院.潜艇操纵.武汉:海军潜艇学院出版,1994
- 3 薛定宇.控制系统计算机辅助设计——MATLAB语言及应用.北京:清华大学出版社,1997

Design and study on submarine depth control model for training machine

Liu Qinxian

(Zhijiang College, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310024)

Lü Wei

(Hangzhou Xiaoshan Airport, Hangzhou 311243)

Abstract This paper analyzes the hydraulic force acting on submarine moving in the sea. The relationship of motion parameters and control rudder is researched. The math model of motion and emulation model are built. The simulation results show that this model is accurate and useful for submarine training machine.

Key words submarine training-machine control-model emulation