

潜艇空间运动的滑动控制

赵国良

季鲁慧

(哈尔滨船舶工程学院自动控制系, 150001) (中国船舶工业总公司七〇七所·天津, 300131)

丛 望

(哈尔滨船舶工程学院自动控制系, 150001)

摘要: 本文利用改进的滑动控制方法设计了潜艇空间运动集中操纵系统. 结果表明, 该系统在克服潜艇运动的强耦合, 严重非线性和时变性等方面有较为明显的效果, 系统的鲁棒性强.

关键词: 潜艇; 集中操舵系统; 滑动控制; 非线性; 时变; 耦合

1 引言

潜艇在水下的空间运动具有六个自由度, 三个线位移(进退, 横荡和升沉), 及三个角位移(偏航, 纵倾和横倾). 人们可以通过方向舵, 首尾升降舵, 均衡水柜和发动机来实施操纵. 但每种操纵动作都会对潜艇运动的各个自由度产生不同程度的影响, 潜艇将产生明显的升沉运动, 严重影响了潜艇的战斗使命. 同时, 潜艇运动的严重非线性和参数时变性, 都给潜艇空间运动控制器的设计带来了很大困难, 而且潜艇运动的控制又希望有较大的安全系数和较好的适应能力. 因此, 若采用一些常规的设计方法, 如解耦、最优等控制算法^[1,2], 是难以达到这些要求的.

众所周知, 滑动控制方法^[3]的优点在于可以采用不准确的数学模型; 可以计入不确定干扰作用的影响; 同时, 还可以用来消除非线性和耦合的影响. 因此用滑动控制方法来设计潜艇空间运动控制器将可取得较好的效果.

2 潜艇运动的两种数学模型

由流体力学原理, 我们可以求得潜艇水下空间运动的完整数学模型^[4]. 显然, 这个模型不仅过于复杂, 无法为控制界接受, 而且方程内所含的许多参数至今还难以得到. 因此, 从控制器设计角度出发, 我们提出了潜艇空间运动的二种数学模型: 仿真模型和设计模型^[5]. 仿真模型既考虑运动仿真的准确性, 又考虑模型参数是否可以测取而得到的一种简化模型. 系统仿真时它可作为潜艇运动特征的代表. 而设计模型则是在牺牲一些准确性的代价下得到的一种便于控制器设计的简化模型. 它可作为控制器设计的依据. 为简单起见, 下面仅列出潜艇运动设计模型的一部分.

$$\begin{aligned} m' \dot{w} - m'(uq - vp) = & \frac{1}{2} \rho L^4 [z_q \dot{q}] + \frac{1}{2} \rho L^3 [z_w \dot{w} + z_q uq + z_v vp] \\ & + \frac{1}{2} \rho L^2 [z'_0 u^2 + z'_w uw + z'_{w|w} |w| (v^2 + w^2)^{1/2} + z'_{vv} v^2] \\ & + \frac{1}{2} \rho L^2 [z'_\delta u^2 \delta_\delta + z'_\delta u^2 \delta_b], \end{aligned} \quad (1)$$

$$I_y \dot{q} - (I_z - I_x)pr = \frac{1}{2}\rho L^5[M'_q \dot{q} + M'_{pr} pr] + \frac{1}{2}\rho L^4[M'_w w + M'_q u \dot{q}] \\ + M'_{q|w|} |(v^2 + w^2)^{1/2}| q] + \frac{1}{2}\rho L^3[M'_0 u^2 + M'_w uw + M'_{vv} v^2] \\ + \frac{1}{2}\rho L^2[M'_\delta u^2 \delta_s + M'_\delta u^2 \delta_b] - m'gh \sin \theta, \quad (2)$$

$$I_z \dot{r} = \frac{1}{2}\rho L^5[N'_r \dot{r}] + \frac{1}{2}\rho L^4[N'_v v + N'_r ur + N'_{|v|} |(v^2 + w^2)^{1/2}| r] \\ + \frac{1}{2}\rho L^3[N'_u uv] + \frac{1}{2}\rho L^2[N'_\delta u^2 \delta_r]. \quad (3)$$

式中, L, m', I_x, I_y, I_z : 潜艇的长度, 质量和绕潜艇坐标系 x, y, z 轴的转动惯量. u, v, w, p, q, r : 潜艇运动的线速度和角速度沿三个轴的分量. h : 稳心高. θ : 潜艇纵倾角. $Z(\cdot), M(\cdot), N(\cdot)$: 潜艇水动力系数. $\delta_s, \delta_a, \delta_r$: 潜艇前、后升降舵和方向舵舵角. ρ : 海水密度.

3 改进的滑动控制算法

如果系统运动的数学模型为

$$\dot{x}^{(n)}(t) = b(x, t)[f(x, t) + u(t) + d(t)]. \quad (4)$$

式中, $x^{(n)}(t)$ 是系统状态的 n 阶导数. $x^T = [x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)}]$ 是系统的状态向量. $u(t)$ 是控制量. $b(x, t)$ 是符号及上限已定的连续函数, 且有 $\frac{1}{\beta} \leq \frac{\hat{b}(x, t)}{b(x, t)} \leq \beta, \beta \geq 1$. $f(x, t)$ 是时变的(非)线性项, 且有 $f(x, t) = \hat{f}(x, t) + \Delta f(x, t)$ 及 $|\Delta f(x, t)| \leq F(x, t), F(x, t)$ 为极限值. $d(t)$ 是时变干扰, 上限可定, 即 $|d(t)| \leq D(t)$. $\hat{\cdot}$ 表示相应的估值.

若取空间滑动曲面为

$$S(x, t) = \left[\frac{d}{dt} + \lambda \right]^{n-1} \int e(\tau) d\tau, \quad \lambda > 0. \quad (5)$$

式中, λ 是系统的期望频带^[3]. $e(t) = x(t) - x_d(t)$ 是跟踪误差. $x_d(t)$ 是系统理想状态. 那么可得滑动控制规律^[6]

$$u(t) = \hat{u}(t) + \text{sat}\left(\frac{s}{\Phi}\right) K(x, t). \quad (6)$$

式中 $\hat{u}(t) = -\hat{f}(x, t) + [\dot{x}_d^{(n)}(t) + \sum_{i=1}^n C_i \lambda^i e^{(n-i)}(t)] / \hat{b}(x, t), \quad (7)$

$$\text{sat}\left(\frac{s}{\Phi}\right) = \begin{cases} s/\Phi, & |s/\Phi| < 1, \\ \text{sgn}(s/\Phi), & |s/\Phi| \geq 1, \end{cases} \quad \Phi: \text{边界层厚度},$$

$$K(x, t) = C_1 F(x, t) + C_2 D(t) + (\beta - 1)[x_d^{(n)}(t) + \sum_{i=1}^n C_i \lambda^i e^{(n-i)}(t)]. \quad (8)$$

C_1, C_2 为大于 1 的系数.

但是, 由(6), (7), (8)式所示的滑动控制规律存在着严重的振荡现象, 这是工程实践中所不允许的. 为了消除这种振荡现象, 我们对控制作用 $u(t)$ 作如图 1 所示的变换. 图中 $u_{\max}$ 为系统允许的最大控制量; α 为大于 1 的系数; u' 为实际作用于系统的控制

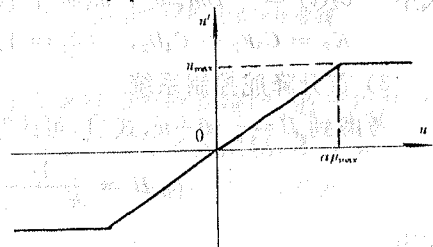


图 1 控制作用变换

量. 作此变换后, 滑动控制的振荡现象即可消除^[7].

4 潜艇集中操纵系统的设计

由于滑动控制器设计时对系统的数学模型要求比较宽松, 也就是说在式(4)中对 $b(x, t)$, $f(x, t)$ 及 $d(t)$ 的要求并不苛刻, 只需知道一定的范围就可. 因此, 在潜艇运动控制系统设计时模型的处理就方便多了, 特别是各耦合项和非线性项均可以归入不可测干扰 $d(t)$ 内, 从而多变量系统的设计问题就可以分解为各个单变量系统的设计问题了. 现分别讨论如下:

1) 方向舵控制系统

将式(3)所示的偏航方程改写成

$$\ddot{\psi} = \frac{1}{L^2(I_z - N_r')} [LN_r'u\dot{\psi} + \delta_1(t) + d_1(t)]. \quad (9)$$

式中

$$\delta_1(t) = N_r'u^2\delta_r,$$

$$d_1(t) = LN_r'\dot{v} + N_r'uv + LN_{|v|r}|(v^2 + w^2)^{1/2}|\gamma.$$

上式表明, 我们是将其它自由度的运动对偏航运动的耦合影响和偏航运动本身的非线性特性均按不可测干扰 $d_1(t)$ 来处理, 并取其上限为

$$D_1 = LN_r'\dot{v}_{\max} + N_r'u_{\max}v_{\max} + LN_{|v|r_{\max}}|(v_{\max}^2 + w_{\max}^2)^{1/2}|,$$

$$F_1 = LN_r'u_{\max}\dot{\psi}_{\max}.$$

式中下标 max 表示最大值.

于是, 滑动控制规律为

$$\delta_1(t) = \hat{\delta}_1(t) + \text{sat}(s_1/\Phi_1)K_1,$$

$$\hat{\delta}_1(t) = -LN_r'u\dot{\psi} + [\ddot{\psi}_d + 2\lambda_1(\dot{\psi}_d - \dot{\psi}) + \lambda_1^2(\psi_d - \psi)]L^2(I_z - N_r'),$$

$$K_1 = C_1F_1 + C_2D_1, \quad (\beta = 1).$$

2) 尾升降舵控制系统

将式(2)所示纵倾方程改写成

$$\ddot{\theta} = \frac{1}{L^2(I_y - M_q'u)} [LM_q'u\dot{\theta} - mgh\theta + \delta_2(t) + d_2(t)]. \quad (10)$$

式中

$$d_2(t) = LM_q'u\dot{w} + L^2(I_z - I_x)pr - M_q'u^2 + M_w'uw + M_w'v^2 + LM_{q|w|}|(v^2 + w^2)^{1/2}|q + M_{\delta_q}'u^2\delta_b + L^2M_{pr}'pr,$$

$$\delta_2(t) = M_{\delta_q}'u^2\delta_s.$$

相应的尾升降舵控制规律为

$$\delta_2(t) = \hat{\delta}_2(t) + \text{sat}(s_2/\Phi_2)K_2.$$

$$\text{式中 } \hat{\delta}_2(t) = -LM_q'u\dot{\theta} + mgh\theta + [\ddot{\theta}_d + 2\lambda_2(\dot{\theta}_d - \dot{\theta}) + \lambda_2^2(\theta_d - \theta)]L^2(I_y - M_q'),$$

$$K_2 = C_3F_2 + C_4D_2, \quad (\beta_2 = 1).$$

3) 首升降舵控制系统

考虑到 $\dot{H} = -u\theta + w$, 式(1)可改写成

$$\ddot{H} = \frac{1}{m - z_w'} [L^{-1}z_w'u\dot{H} + \delta_3(t) + d_3(t)]. \quad (11)$$

式中

$$\delta_3(t) = L^{-1}z_{\delta_q}'u^2\delta_b,$$

$$d_3(t) = (m' + z'_q)uq + (z'_{vp} - m')vp + L^{-1}z'_0u^2 + L^{-1}z'_{vv}v^2 \\ + L^{-1}z'_{w|w}|w|(v^2 + w^2)^{1/2} + L^{-1}z'_{w\theta}u^2\theta + L^{-1}z'_{\theta}u^2\delta_s.$$

相应的首升降舵控制规律为

$$\delta_3(t) = \hat{\delta}_3(t) + \text{sat}(s_3/\Phi_3)K_3.$$

式中 $\hat{\delta}_3(t) = -L^{-1}z'_{w\theta}u\dot{H} + [\dot{H}_d + 2\lambda_3(\dot{H}_d - \dot{H}) + \lambda_3^2(H_d - H)](m' - z'_{vb}),$

$$K_3 = C_5F_3 + C_6D_3, \quad (\beta_3 = 1).$$

5 系统仿真

在设计控制器的控制规律时,我们采用的是潜艇运动的设计模型.在作系统仿真时,我们将采用准确度较高但比较复杂的仿真模型^[6],以便能更好地检验所设计的控制器工作的好坏.下面我们将分别就几种情况来检验潜艇空间运动控制系统的性能.

1) 定深旋回

众所周知,当潜艇旋回时,由于侧洗流的影响会出现深度变化而影响潜艇的正常航行.因此在操纵方向舵的同时,必须辅之以适当的升降舵变化来保证潜艇定深旋回.由于上述滑动控制器的设计思想是将耦合影响计入有界干扰 $d_1(t)$ 内,因而可以达到控制作用的解耦效果.

图 2 和图 3 给出了定深旋回时的仿真曲线.图 2 是航向、深度和纵倾的变化曲线.图 3 是方向舵 δ_r 、首尾升降舵 δ_b 和 δ_s 的变化曲线.由图可见该系统可以保证潜艇实现定深旋回的机动运动.

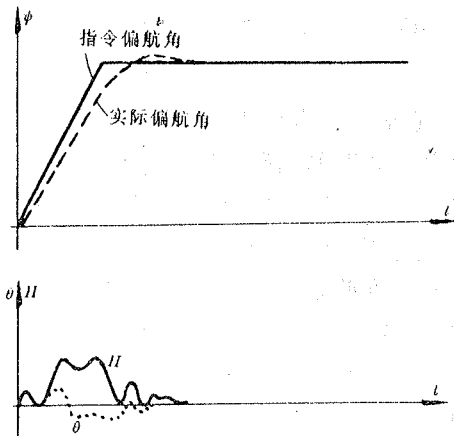


图 2 定深旋回时输出量变化曲线

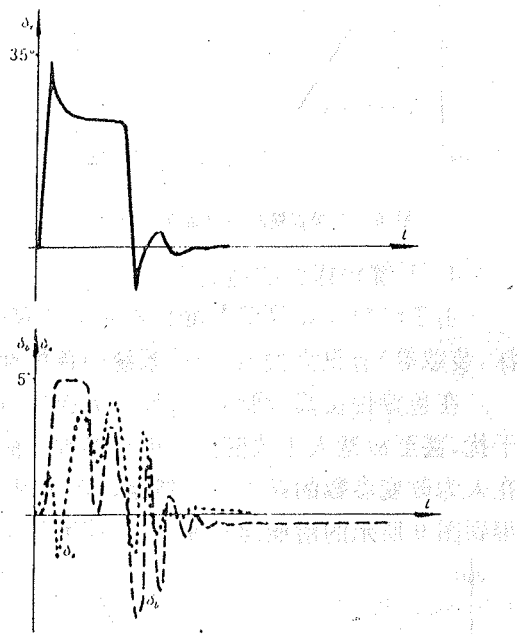


图 3 定深旋回时控制量变化曲线

2) 定深直航

这是潜艇航行的一种常见方式.用其它方法设计潜艇运动控制系统时,通常均需要假定潜艇均衡处于良好的状态.而本设计方法对此可以不必加以过多的限制.图 4,5 所示即为在均衡不佳,且有海流干扰时潜艇的定深直航运动曲线.图中曲线表明,控制效果是甚为理想的.

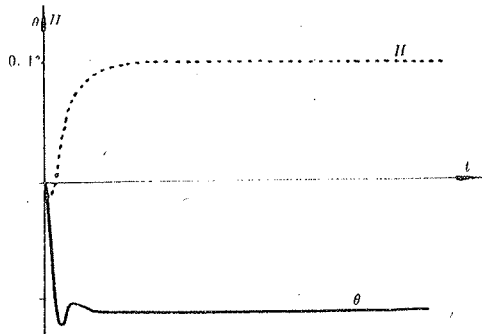


图 4 定深直航时输出量变化曲线

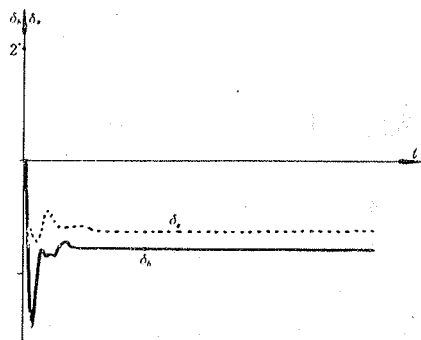


图 5 定深直航时控制量变化曲线

3) 变深直航

我们按高速潜浮、中速潜浮、低速潜浮及无纵倾潜浮四种方式进行了仿真. 相应的曲线分别示于图 6, 7. 由图可见, 采用滑动控制方案, 可以在保证深度改变无超调的情况下以要求的潜浮速度, 准确到达指令深度.

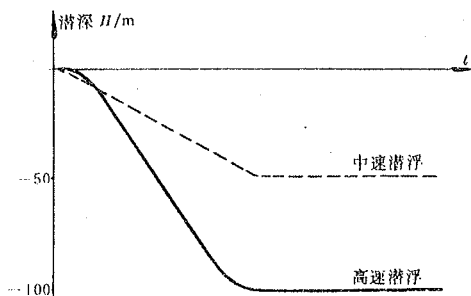


图 6 变深直航时输出量变化曲线

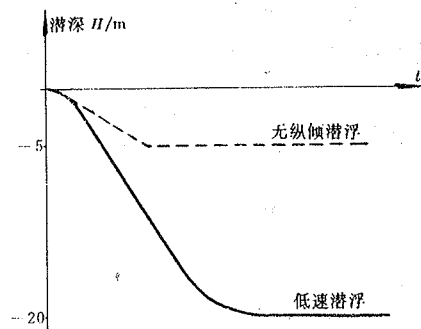


图 7 变深直航时输出量变化曲线

4) 系统鲁棒性的仿真检验

由于潜艇运动模型各参数不易准确获得, 而且, 它们还与潜艇的运动状态(如速度, 潜深, 装载等)有很大关系, 因此系统的鲁棒性是一个甚为重要的问题, 必须予以重视.

在鲁棒性仿真检验时, 我们一方面使潜艇的航行速度不断发生改变, 还引入附加海流干扰, 甚至故意人为改变潜艇模型参数使潜艇本身成为不稳定的情况. 图 8 所示曲线表示在人为改变参数的条件下潜艇运动已呈现不稳定现象. 在此条件下, 引入上述滑动控制器得到图 9 所示的潜艇运动曲线. 由此可见, 整个系统工作良好, 呈现出较好的鲁棒性.

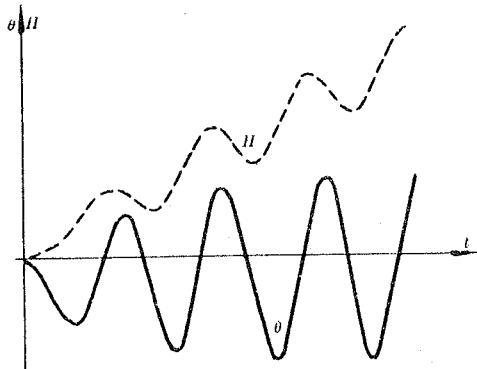


图 8 不稳定潜艇(人为的)的运动曲线

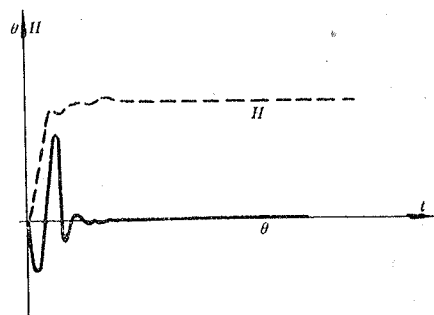


图 9 不稳定潜艇(人为的)闭环控制运动曲线

6 结 论

本文利用改进后的滑动控制器的设计思想所设计的潜艇空间运动控制系统,解决了潜艇运动的强耦合特性、严重的非线性及参数的时变特性对系统设计所造成的困难,而且所得到的控制器对潜艇航行时所受到的各种干扰有较强的抑制作用。

参 考 文 献

- [1] Lively, K. A. . Multivariable Control System Design for a Submarine. AD-A144771, 1984
- [2] Drurey, H. L. . Automatic Control of Submarine Depth, Pitch and Trim. AD-A017691, 1975
- [3] Yoerger, D. R. , Slotine, J. E. . Robust Trajectory Control of Underwater Vehicles. IEEE, Journal of Oceanic Engineering, 1985, 10(4):462-470
- [4] 陈厚泰. 潜艇操纵性. 北京:国防工业出版社, 1981
- [5] 赵国良, 季鲁慧. 潜艇空间运动模型的简化和仿真. 船舶工程, 1991, (4):23-31
- [6] 安宏声, 蒋新松. 滑动控制理论在海洋机器人动态定位系统中的应用. 机器人, 1989, 3(2):1-8
- [7] 赵国良, 季鲁慧. 消除滑动控制振荡现象的方法. 黑龙江省自动化学会 1990 年学术年会论文集, 1990, 65-69

Sliding Mode Controller for Submarines

ZHAO Cuoliang

(Department of Automatic Control, Harbin Shipbuilding Engineering Institute • Harbin, 150001, PRC)

JI Luhui

(CSSC 707 Research Institute • Tianjin, 300131, PRC)

CONG Wang

(Department of Automatic Control, Harbin Shipbuilding Engineering Institute • Harbin, 150001, PRC)

Abstract: An improved sliding mode controller was used in the design of a central steering system for submarines. The simulation results have shown that the proposed controller is effective to eliminate the effects of strong coupling between all dimensions of movements, severe nonlinearities and time-varying characteristics. Moreover, the robustness of the system is good enough.

Key words: submarine; central steering system; sliding mode control; nonlinear; time-varying; coupling

本文作者简介

赵国良 1939 年生. 1960 年毕业于北京航空航天大学自动控制系. 现为哈尔滨船舶工程学院教授. 发表论文 30 多篇. 主要研究方向是自适应控制理论及其应用, 船舶操纵自动化和导航系统数据处理.

季鲁慧 1965 年生. 分别于 1987 年和 1990 年在哈尔滨船舶工程学院自动控制系获得工学学士、工学硕士学位. 现为船舶工业总公司七〇七所工程师. 主要研究方向是数据处理, 智能通信等.

丛 望 1958 年生. 分别于 1982 年和 1987 年在哈尔滨船舶工程学院自动控制系获工学学士和工学硕士学位, 现为哈尔滨船舶工程学院副教授. 主要研究方向是船舶操纵自动化和舰船电力系统.