

文章编号: 1002-0446(2003)03-0209-04

AUV 深度的模糊神经网络滑模控制*

汪 伟 边信黔 王大海

(哈尔滨工程大学动力与核能工程学院 哈尔滨 150001)

摘 要: 本文设计了一个模糊神经网络滑模变结构控制器, 通过模糊神经网络对滑模控制律的控制增益进行在线调整, 并在海浪干扰条件下, 用此控制器对 AUV 进行深度控制. 仿真结果验证了该智能控制方法具有很好的控制性能和鲁棒性.

关键词: AUV; 模糊神经网络; 滑模控制; 航深

中图分类号: TP24 文献标识码: B

FUZZY NEURAL NETWORK SLIDING-MODE CONTROL OF AUTO DEPTH FOR AUV

WANG Wei BIAN Xin-qian WANG Da-hai

(College of Power and Nuclear Energy, Harbin Engineering University, Harbin 150001)

Abstract A fuzzy neural network (FNN) sliding-mode controller is studied in this paper. The FNN is adopted to adjust the control gain in a switching control condition. The controller is applied to control the depth of AUV motion under the influence of ocean waves. The simulation results reveal the advantage and robustness of the method.

Keywords: AUV; fuzzy neural network; sliding mode control; depth control

1 引言(Introduction)

AUV 在近水面的运动中, 在波浪的作用下, 运动状态会发生改变, 在不同的航速下, AUV 的水动力特性也不尽相同, 因此, AUV 的定深控制是比较困难的. 滑模控制(SMC)是近些年发展起来的一种方法, 已经有不少成功的应用, 由于滑动面的设计与控制对象的参数以及各种干扰无关, 使得滑模控制具有快速响应, 对参数和外干扰变化不灵敏, 无需系统在线辨识、物理实现简单的优点. 当系统状态到达滑模面后, 在没有参数变动和外部干扰时, 只需一个很小的非线性控制增益就可使其保持在滑模面上, 当受到干扰系统偏离滑模面时, 就需要一个合适大小的控制增益使其返回到滑模面. 过大的增益将给系统带来不利的抖振问题, 而过小的增益又不足以克服干扰. 为解决这个问题, 本文引进了模糊神经网络(FNN)对控制增益进行在线调整, 以期获得良好的控制性能, 增强系统的鲁棒性.

2 波浪作用下的 AUV 运动方程(Vehicle motion model with ocean current)

根据 AUV 的总体外形和模型试验结果分析, 参考用于潜艇模拟的标准方程进行适当的简化, 把随艇坐标原点放在重心上得到运动方程如下

$$m[\ddot{u} - v\dot{r} + w\dot{q}] = 0.5\rho L^3[X'_{uu}\dot{u} + X'_{wq}\dot{w}q + X'_{vr}\dot{v}r] + 0.5\rho L^2[X'_{uuu}u\dot{u} + X'_{vov}\dot{v}^2 + X'_{wvw}\dot{w}^2] + 0.5\rho L^4[X'_{rrr}r^2 + X'_{qqq}q^2 + X'_{ppr}p\dot{r}] - (w - B)\sin\theta \quad (1)$$

$$m[\ddot{v} + v\dot{r} - w\dot{q}] = 0.5\rho L^4[Y'_{rr}\dot{r} + Y'_{pq}p\dot{q} + Y'_{qr}q\dot{r} + Y'_{\eta\eta}\dot{\eta}|\dot{\eta}|] + 0.5\rho L^3[Y'_{\sigma}\dot{\sigma} + Y'_{ur}u\dot{r} + Y'_{wp}w\dot{p} + Y'_{vq}v\dot{q} + Y'_{\eta|\eta}|\dot{\eta}|\dot{\eta}|] + 0.5\rho L^2[Y'_{uv}u\dot{v} + Y'_{vw}v\dot{w} + Y'_{v|\eta}|\dot{v}|\dot{\eta}|] + (W - B)\cos\theta\sin\varphi + 0.5\rho L^2Y'_{\delta r}u^2\dot{\delta}r \quad (2)$$

$$m[\ddot{w} - u\dot{q} + v\dot{p}] = 0.5\rho L^4[Z'_{qq}\dot{q} + Z'_{rp}r\dot{p} + Z'_{pp}p^2$$

* 收稿日期: 2002- 11- 17

$$\begin{aligned}
 &+ Z'_{q|q} q | q |] + 0.5 \rho L^3 [Z'_{w\dot{w}} \dot{w} + Z'_{vp} vp + Z'_{uq} uq \\
 &+ Z'_{w|q} w | q |] + 0.5 \rho L^2 [Z'_{uw} uw + Z'_{w|w} w | w |] \\
 &+ (W - B) \cos \theta \cos \varphi + 0.5 \rho L^2 Z'_{\delta\delta} u^2 \delta \delta + Z_{wave}
 \end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{aligned}
 &I_X \dot{p} + (I_z - I_y) q r - I_{yz} (q^2 - r^2) - I_{xz} (pq + \dot{r}) \\
 &= 0.5 \rho L^5 [K'_{p\dot{p}} \dot{p} + K'_{pq} pq + K'_{qr} qr + K'_{p|p} p | p |] \\
 &+ 0.5 \rho L^4 [K'_{wp} wp + K'_{wr} wr + K'_{up} up + K'_{vq} vq] \\
 &+ Z_B B \cos \theta s \sin \varphi
 \end{aligned} \tag{4}$$

$$\begin{aligned}
 &I_Y \dot{q} + (I_X - I_z) p r + I_{xz} (p^2 - r^2) \\
 &= 0.5 \rho L^5 [M'_{q\dot{q}} \dot{q} + M'_{pp} p^2 + M'_{rr} r^2 + M'_{pr} p r \\
 &+ M'_{q|q} q | q |] + 0.5 \rho L^4 [M'_{w\dot{w}} \dot{w} + M'_{uq} uq \\
 &+ M'_{vr} vr + M'_{w|q} w | q |] + M'_{vp} vp] \\
 &+ 0.5 \rho L^3 [M'_{uw} uw + M'_{w|w} w | w |] \\
 &+ Z_B B s \sin \theta + 0.5 \rho L^2 M'_{\delta\delta} u^2 \delta \delta + M_{wave}
 \end{aligned} \tag{5}$$

$$\begin{aligned}
 &I_Z \dot{r} + (I_Y - I_X) p q + I_{xz} (q r - p \dot{r}) \\
 &= 0.5 \rho L^5 [N'_{r\dot{r}} \dot{r} + N'_{pq} pq + N'_{r|r} r | r | \\
 &+ N'_{qr} qr] + 0.5 \rho L^4 [N'_{v\dot{v}} \dot{v} + N'_{vq} vq + N'_{wp} wp \\
 &+ N'_{ur} ur + N'_{v|r} v | r | + N'_{v|q} v | q |] \\
 &+ 0.5 \rho L^3 N'_{uv} uv + 0.5 \rho L^3 N'_{\delta r} u^2 \delta r
 \end{aligned} \tag{6}$$

方程中除 Z_{wave} 和 M_{wave} 外各符号意义与文献[1]相同, Z_{wave} 和 M_{wave} 为波浪力和波浪力矩。

选用 ITTC 推荐的标准风浪谱密度公式

$$\begin{aligned}
 S_{\zeta}(\omega) &= \frac{A}{\omega^5} \exp(-\frac{B}{\omega^4}), \quad A = 0.78, \\
 B &= \frac{3.11}{\zeta_{w/3}^2}, \quad \zeta_{w/3} \text{ 为有义波高}
 \end{aligned} \tag{7}$$

在波浪仿真中, 随机波浪由一定数量的规则波叠加而成, 可表示为

$$\eta(t) = \sum_{i=1}^n A_i s \sin(\omega_i t + \alpha_i) \tag{8}$$

其中 A_i 为第 i 个规则波的波幅, α_i 为随机选择的相角。

3 滑模深度控制器 (Sliding mode depth controller)

由于 AUV 六自由度运动是一个强耦合的系统, 在深度控制中, 忽略水平面运动的影响并在速度 $u_0 = 2\text{m/s}$ 线性化, 得到垂直面状态方程。

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & m_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \dot{z} \\ \dot{q} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ A_{21} & 0 & 0 \\ A_{31} & 0 & A_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ z \\ q \end{bmatrix} \\
 &+ \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ B_3 \end{bmatrix} \delta_s + \begin{bmatrix} D_1(t) \\ D_2(t) \\ D_3(t) \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{9}$$

式中: $M_{33} = I_y - 0.5 \rho L^5 M'_{q\dot{q}}$, $A_{21} = -u_0$, $A_{31} = Z_B w$, $A_{33} = 0.5 \rho L^4 M_{q u_0}$, $B_3 = 0.5 \rho L^3 M_{\delta_s} u_0^2$, $D_1(t)$, $D_2(t)$ 和 $D_3(t)$ 包括了控制模型中线性近似产生的误差、不确定性和外干扰, 对系统的有界输入, 这个不确定项是有界的。

对方程(9)作线性变化可得到如下的形式

$$\begin{aligned}
 \dot{X}(t) A x + B u + h(x, t) \\
 x \in R^3, \quad u \in R^1
 \end{aligned} \tag{10}$$

滑模面采用状态变量的线性组合

$$\sigma(x; t) = s x \tag{11}$$

定义一个正定义的 Lyapunov 函数

$$V(x) = \frac{1}{2} \sigma^2 \tag{12}$$

根据 Lyapunov 第二定理可知, 要使系统滑动模态具有全局渐进稳定性 ($\sigma \rightarrow 0$), 需满足 $\dot{v}(x)$ 关于 σ 为负定。而当 $\sigma \dot{\sigma} < 0$ 成立时一定满足 $\dot{v}(x)$ 关于 σ 为负定, 也使得滑模面满足“广义滑模条件”, 必然同时保证了滑模的存在性和可达性。为了改善系统从任意初始状态到达滑模面这段运动的动态品质, 可以采用“趋近率”的办法来加以控制。

$$\dot{\sigma} = -k \text{sign}(\sigma), \quad k > 0 \tag{13}$$

则有

$$\dot{\sigma} = s \dot{x} = s(Ax + Bu) = -k \text{sign}(\sigma) \tag{14}$$

得到

$$u = - (sB)^{-1} sAx - (sB)^{-1} k \text{sign}(\sigma) \tag{15}$$

上式右边即由等效控制量 u_{eq} 与非线性控制量 u_N 组成, 其中 u_{eq} 的作用是使系统在滑动平面上配置到期望的极点上, u_N 补偿模型的不精确和干扰, 并强迫系统进入滑模面。采用极点配置法求取 s 矩阵, 从而使得最终滑动模态具有预先给定的极点集, 得到滑模面方程

$$\begin{aligned}
 \sigma(x) &= [0.5847 \quad 0.0297 \quad 1.0] \\
 &[\theta \quad z - z_{com} \quad q]^T
 \end{aligned} \tag{16}$$

得到控制量为

$$\begin{aligned}
 \delta_{\delta_s} &= [0 \quad -0.3117 \quad -0.7812] \\
 &[\theta \quad z - z_{com} \quad q]^T + 4.22k \text{sign}(\sigma)
 \end{aligned} \tag{17}$$

取控制增益 $k = 0.15$ 。

4 模糊神经网络滑模深度控制器 (FNN sliding mode depth controller)

式(17)中控制增益 k 在补偿模型误差、抑制干扰起到非常重要的作用。当系统处于初始状态开始向滑模面运动时, 需要较大的 k 以减少达到时间; 当系统已处于滑模面存在较大的不确定因素的影响

时,系统状态会偏离滑模面而需要一个合适的 k 值使系统返回到滑模面上;当系统处于滑模面没有干扰时,只需要很小的 k 值就使系统保持在滑模面上而且抖振很小. k 值的选择应与不确定性影响因素的大小有关,过大的 k 会给系统带来抖振问题,而过小的 k 又不足以补偿各种不确定因素的影响.一般,因为不确定因素很难测量而在滑模控制器中保守地选择较大的 k .为解决此问题,本文引入了一个 FNN 来在线调整增益 k ,其原理见图 1.

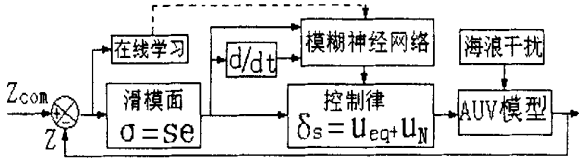


图 1 模糊神经网络滑模深度控制原理图

Fig. 1 Principle diagram of FNN sliding mode depth control

4.1 模糊神经网络的结构

FNN 采用四层结构,模糊神经网络的输入为 $\delta(x; t)$ 和 $\sigma(x; t)$ 输出为 k_N ,当 $e = z - z_{com}$ 趋于零时, k_N 停止调整,取 $k = k_N$.

① 输入层

$$\begin{aligned} net_i^1 &= x_i^1, \quad i = j \\ y_j^1 &= f_j^1(net_i^1) = net_i^1, \quad i = 1, 2 \end{aligned} \quad (18)$$

其中, x_i^1 就是 FNN 的第 i 个输入. 此层共 2 个节点.

② 隶属函数层

$$net_j^2 = - \frac{(x_i^2 - m_{ij})^2}{\sigma_{ij}^2}, \quad y_j^2 = \exp(net_j^2) \quad (19)$$

其中, m_{ij} 和 σ_{ij} 分别为第 i 个输入变量的第 j 个模糊集合的高斯型函数的均值和标准差,它们都是 FNN 的可调参数. 此层共有 10 个节点.

③ 规则层

$$net_j^3 = \prod_i w_{ij}^3 x_i^3, \quad y_j^3 = net_j^3 \quad (20)$$

其中, y_j^3 即第 j 条规则的激活度 α_j . 此层共由 25 个节点.

④ 输出层

$$net_1^4 = \sum_{i=1}^M w_i^4 x_i^4, \quad y_1^4 = net_1^4 \quad (21)$$

其中, y_1^4 即为 FNN 的输出, w_i^4 为可调的权系数. 此层只有一个节点.

4.2 在线学习方法

模糊神经网络具有多层感知器的结构形式,因此,也可用 BP 算法来修正其中的可调参数. 定义目标函数为 $E = 0.5(z - z_{com})^2 = 0.5e^2$, 当 $t \rightarrow \infty$ 时有 e

$\rightarrow 0$, 也即有 $\sigma(x) \rightarrow 0$.

① 输出层

$$\begin{aligned} \delta_1^4 &= - \frac{\partial E}{\partial net_1^4} = - \frac{\partial E}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial y_1^4} \frac{\partial y_1^4}{\partial net_1^4} \\ &\approx e [CB]^{-1} \text{sign}(\sigma) \text{sign}(net_1^4) \text{sign}(\partial E / \partial z) \end{aligned} \quad (22)$$

$$\Delta w_i^4 = - \eta_w \frac{\partial E}{\partial w_i^4} = \eta_w \delta_1^4 x_i^4 \quad (23)$$

② 规则层

$$\begin{aligned} \delta_j^3 &= - \frac{\partial E}{\partial net_j^3} = - \frac{\partial E}{\partial net_1^4} \frac{\partial net_1^4}{\partial net_j^3} = \delta_1^4 w_j^4 \\ j &= 1, 2, \dots, 25 \end{aligned} \quad (24)$$

③ 隶属层

$$\begin{aligned} \delta_j^2 &= - \frac{\partial E}{\partial net_j^2} = - \frac{\partial E}{\partial y_1^4} \frac{\partial y_1^4}{\partial net_1^4} \frac{\partial net_1^4}{\partial y_j^3} \frac{\partial y_j^3}{\partial net_j^2} \frac{\partial net_j^2}{\partial y_j^2} \\ &= \sum_i \delta_i^3 y_i^3, \quad j = 1, 2, \dots, 10 \end{aligned} \quad (25)$$

$$\Delta m_{ij} = - \eta_m \frac{\partial E}{\partial m_{ij}} = \eta_m \delta_j^2 \frac{2(x_i^2 - m_{ij})}{(\sigma_{ij})^2} \quad (26)$$

$$\Delta \sigma_{ij} = - \eta_\sigma \frac{\partial E}{\partial \sigma_{ij}} = \eta_\sigma \delta_j^2 \frac{2(x_i^2 - m_{ij})^2}{(\sigma_{ij})^3} \quad (27)$$

④ FNN 中可调参数的学习算法为

$$\begin{aligned} w_i^4(N+1) &= w_i^4(N) + \Delta w_i^4 \\ i &= 1, 2, \dots, 25 \end{aligned} \quad (28)$$

$$m_{ij}(N+1) = m_{ij}(N) + \Delta m_{ij}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{ij}(N+1) &= \sigma_{ij}(N) + \Delta \sigma_{ij} \\ i &= 1, 2; \quad j = 1, 2, \dots, 5 \end{aligned} \quad (29)$$

5 仿真结果分析(Simulation results)

仿真中, AUV 在水平面作定航向运动保持初始航向角不变. 垂直舵的时间常数 10s, 推进器的时间常数 5s. 垂直面运动过程为当给定期望深度后, AUV 首先使纵倾角由 0 改变到 20°或- 20°作定纵倾运动(未给出纵倾控制器), 当 AUV 运动到距期望深度 8m 时, 开始作定深控制. 由舵角响应图中可看出存在着控制器切换的舵角跳变过程(如图 4 中约为 35s 处).

图 2 和图 3 为滑模深度控制的阶跃响应, 控制增益 $k = 0.15$, 虚线代表在速度 2m/s 时, AUV 下潜到水下 30m 的仿真过程, 效果很好, 而实线则为航速增大为 $u = 5\text{m/s}$ 的仿真, 可以看到由于航速变化的影响, 舵角和深度产生了波动过程; 图 4 和图 5 则是 FNN 滑模深度控制阶跃响应, 虚线表示航速 $u = 2\text{m/s}$, 实线为航速 5m/s, 可以看到在航速增大到 5 时, 在 FNN 的在线调整下舵角和深度的波动基本消除, 控制效果依然良好; 图 6 表示在海浪干扰条件下的滑模深度控制, AUV 在上升到水下 5m 的过程中由

于二阶平均波浪力是一个纯粹向上的力而使深度控制存在一个静差,约为0.18m.而图7加入FNN,可以看到在35s时AUV由定纵倾控制切换为定深控制后,FNN开始在线调整增益 k 值,由于起始段 k 迅

速增大而使得深度响应时间变短,而经过约310s的在线学习调整,AUV的深度静差趋于0.图9给出波浪垂向力的仿真曲线,其反映了AUV由水下30m上升到5m并作定深运动过程中波浪力的作用情况.

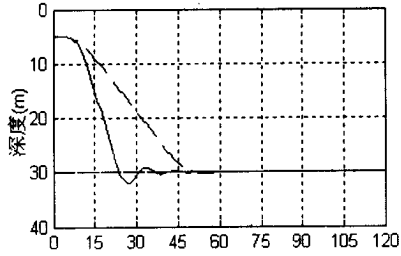


图2 滑模深度响应曲线
Fig. 2 Depth response of SMC

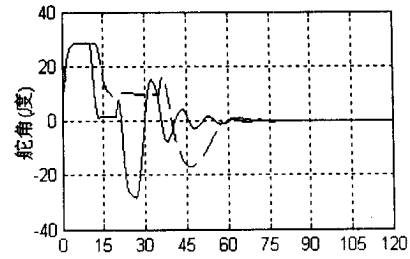


图3 滑模舵角响应曲线
Fig. 3 Rudder response of SMC

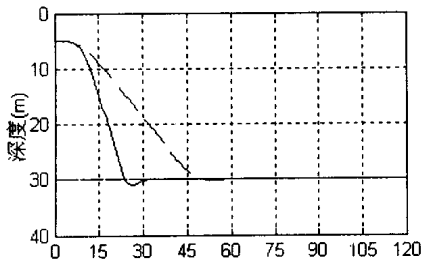


图4 FNN滑模深度响应曲线
Fig. 4 Depth response curve of FNNSMC

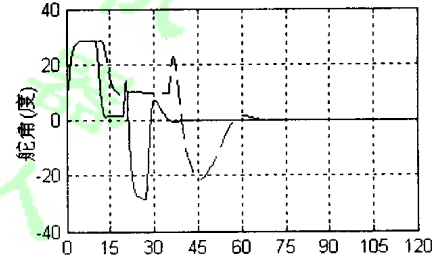


图5 FNN滑模舵角响应曲线
Fig. 5 Rudder response curve of FNNSMC

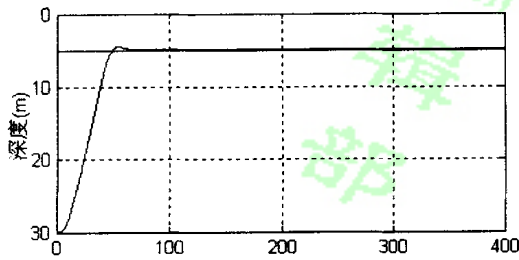


图6 海浪干扰下滑模深度响应曲线
Fig. 6 Depth response of SMC with current

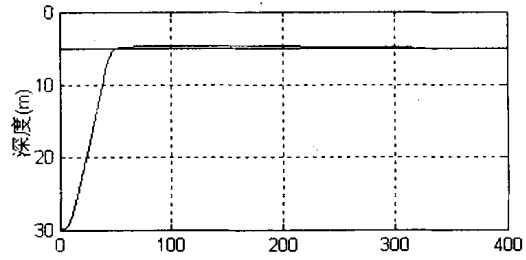


图7 海浪干扰下FNN滑模深度响应曲线
Fig. 7 Depth response of SMC with current

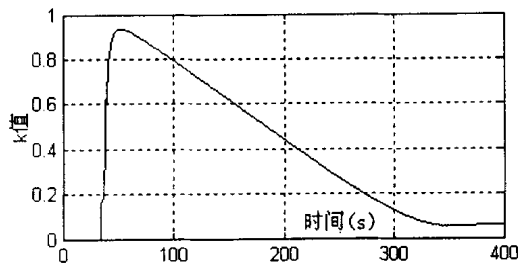


图8 FNN在线调整 k 值变化曲线
Fig. 8 Adjusting curve of k in FNNSMC

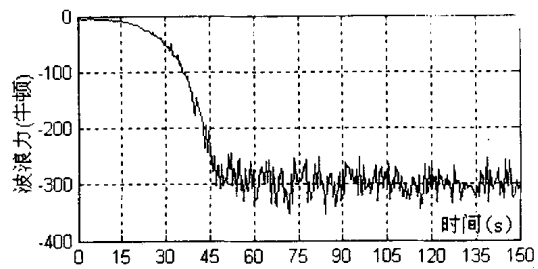


图9 海浪干扰的垂向力仿真
Fig. 9 Vertical force simulation of wave