

基于 L_2 干扰抑制的水下机器人三维航迹跟踪控制

张利军, 贾鹤鸣, 边信黔, 严浙平, 程相勤

(哈尔滨工程大学 自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 为实现自治水下机器人(AUV)的三维航迹跟踪控制, 考虑了非线性水动力阻尼对AUV系统的影响和外界海流干扰作用, 提出了基于 L_2 干扰抑制的鲁棒神经网络控制方法. 该方法基于李雅普诺夫稳定性理论, 设计神经网络控制器补偿非线性水动力阻尼和外部的海流干扰, 再将神经网络的估计误差当做AUV系统的外部干扰用 L_2 干扰抑制控制器予以消除. 最后针对某AUV进行了螺旋线三维下潜跟踪控制仿真实验, 结果表明设计的控制器可以较好地克服时变非线性水动力阻尼对系统的影响, 并对外界海流干扰有较好的抑制作用, 可以实现AUV三维航迹的精确跟踪.

关键词: 自治水下机器人; 三维航迹跟踪; 神经网络控制; L_2 干扰抑制
中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Three-dimensional path tracking control for an autonomous underwater vehicle based on L-two disturbance attenuation method

ZHANG Li-jun, JIA He-ming, BIAN Xin-qian, YAN Zhe-ping, CHENG Xiang-qin

(College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin Heilongjiang 150001, China)

Abstract: In the three-dimensional path tracking of an autonomous underwater vehicle (AUV), we consider the external current disturbances and the nonlinear hydrodynamic damping effects of the AUV, and propose a robust neural network control based on Lyapunov stability theory for L-two disturbance attenuation. A neural network controller is designed to compensate for the nonlinear hydrodynamic damping and external currents disturbances, and the estimated error of neural network is eliminated as external disturbances in AUV system by the L-two disturbance attenuation controller. A three-dimensional path tracking simulation is carried out for an experimental AUV. The simulation results show that the designed controller suppresses the influence of time-varying nonlinear hydrodynamic damping to the AUV system, and attenuates the external currents disturbances as well.

Key words: autonomous underwater vehicle; three-dimensional path tracking; neural network control; L-two disturbance attenuation

1 引言(Introduction)

自治水下机器人(autonomous underwater vehicle, AUV)三维航迹精确跟踪能力是完成AUV作业任务(如海底地形探查、水下打捞和施工等)的一种重要技术前提, 同时也是AUV自身避障的重要保证. AUV的三维航迹跟踪是指AUV在航迹制导器和动态跟踪控制器的共同作用下, 能够沿着指令航线航行^[1]. 传统的AUV三维跟踪动态控制方法是分别对解耦后的水平面和垂直面运动单独设计控制器来实现三维航迹跟踪的综合控制目标^[2~5], 然而在某些实际工况下如AUV进行三维航迹跟踪操纵性实验时, 即AUV以三维螺旋线方式下潜时, 航向改变的同时其深度也在改变(即对艏向运动和纵倾运动需要实现同步控制), 此时必须考虑水平面和垂直面

间的耦合作用对系统的影响, 复杂的耦合作用将直接导致AUV系统水动力阻尼的时变性和不确定性, 而基于解耦思想设计的控制器由于无法实现水平面和垂直面的同步综合控制, 忽略了非线性水动力阻尼对系统的影响, 必然无法实现航迹精确跟踪控制^[6]. 如何设计AUV三维航迹综合动态跟踪控制器也就成为了当前具有挑战性的问题. 在理想的情况下, 当AUV精确保持在指令航线上时, AUV的航迹偏差(即AUV中心到航线的垂直距离)为零. 但由于外部海流干扰的影响, 必然会出现航迹偏差, 考虑到AUV自身携带能量有限, 应该尽量减小实际航线与指令航线的偏差, 如何对未知变化的海流干扰进行估计并加以抑制就成为了AUV三维航迹跟踪的亟待解决的研究难题^[7,8].

目前,对AUV的动态控制问题的研究多集中于水平面航迹跟踪和动力定位控制,Repoulias, Filoktimon基于Lyapunov稳定性理论和反步法设计航迹跟踪控制器,实现了AUV水平面航迹规划和跟踪控制^[9,10],而基于精确模型和反步法思想设计的航迹跟踪控制器,控制器结构复杂不利于工程实现,难于保证实际工况下系统的控制品质.针对海流干扰影响导致AUV出现航迹偏差的问题,封锡盛等提出基于模型预测-校正控制策略的神经网络逆控制方法,提高了AUV动态控制的抗海流干扰能力和跟踪精度,实现了AUV水平面的航迹精确跟踪控制^[11].俞建成等分别利用基于模糊神经网络的直接自适应控制方法^[12]和神经网络自适应控制方法^[13]对AUV水平面跟踪控制问题和动力定位问题进行了水池实验研究,结果表明设计的控制器可以实现较好的跟踪控制和定位控制.上述研究在设计AUV航迹跟踪控制器时未考虑AUV垂直面的潜浮运动,忽略垂直面对水平面的耦合影响,即未充分考虑AUV系统中非线性阻尼的时变性和不确定性给控制器设计带来的影响,基于上述控制器无法实现AUV三维航迹的精确跟踪控制.

本文针对AUV三维航迹精确跟踪控制问题,考虑了非线性水动力阻尼对AUV系统的影响和外界海流干扰作用,提出了基于 L_2 干扰抑制的鲁棒神经网络控制方法.该方法基于李雅普诺夫稳定性理

论,设计神经网络控制器用来补偿非线性水动力阻尼和外界的海流干扰,再将神经网络的估计误差当做AUV系统的外部干扰用 L_2 干扰抑制控制器予以消除.这种方法一方面可以保证整个系统的稳定性,另一方面可以保证系统具有良好的暂态性能.基于AUV虚拟仿真平台,通过航迹制导器对一序列航迹点进行拟合产生指令航线,并利用本文的控制方法进行了AUV三维螺旋线下潜跟踪控制仿真实验,结果表明所设计的控制器可以很好的克服时变非线性水动力阻尼对系统的影响,并对慢变海流干扰有较好的抑制作用,可以实现AUV三维航迹的精确跟踪.

2 AUV三维航迹跟踪控制系统(Three-dimensional path tracking control system of AUV)

AUV三维航迹跟踪可以认为是水平面内的航迹跟踪与垂直面内的航迹跟踪的综合控制问题.水平面的航迹控制可以由航速控制和艏向控制来综合协调完成,垂直面的航迹控制可由航速控制和纵倾控制协调实现.本文从提高AUV三维航迹的跟踪精度和节省能源的工程需求的角度出发,通过设计AUV三维航迹综合动态跟踪控制系统,实时同步的完成航向、航速与纵倾的综合协调控制以实现三维航迹的精确跟踪,其结构框图如图1所示.

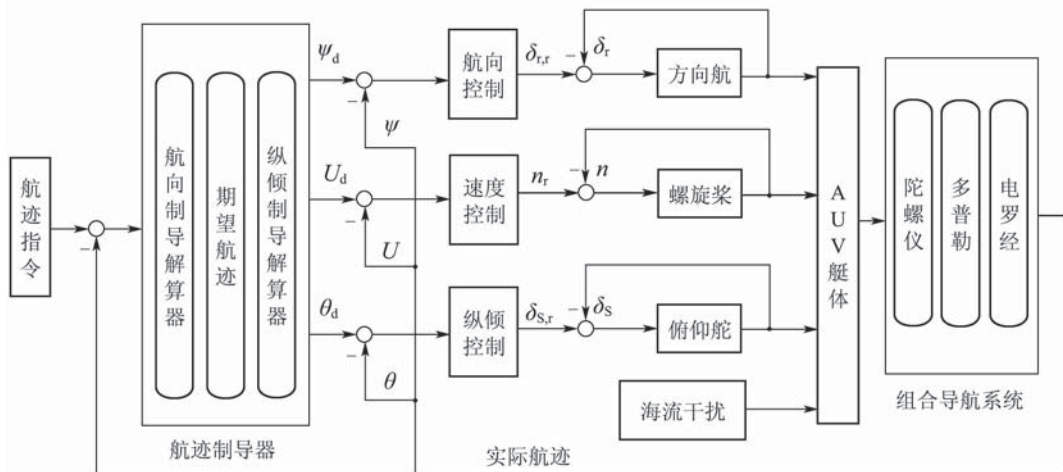


图1 AUV三维航迹跟踪控制系统

Fig. 1 Three-dimensional path tracking control system of AUV

图1中, U_d, ψ_d, θ_d 分别代表由航迹综合制导器解算出的期望航速、期望艏向角和期望纵倾角, U, ψ, θ 分别代表AUV的实际航速、实际艏向偏航角和实际纵倾角. 其中AUV的艏向偏航角 ψ 和垂向纵倾角 θ 可以通过电罗经测量获得, 而实际航速 U 可由多普勒测速仪实时测得.

3 水下机器人建模(AUV modelling)

AUV在惯性坐标系下的模型为^[14]:

$$M_\eta(\eta)\ddot{\eta} + C_\eta(\eta, \dot{\eta})\dot{\eta} + D_\eta(\eta, \dot{\eta})\dot{\eta} + g_\eta(\eta) + \tau_{d\eta} = J^{-T}(\eta)\tau, \quad (1)$$

其中:

$$\begin{aligned}
 M_{\eta}(\eta) &= J^{-T}(\eta)MJ^{-1}(\eta), \\
 C_{\eta}(\eta, \dot{\eta}) &= J^{-T}(\eta)[C(\nu) - MJ^{-1}(\eta)\dot{J}(\eta)]J^{-1}(\eta), \\
 D_{\eta}(\eta, \dot{\eta}) &= J^{-T}(\eta)D(\nu)J^{-1}(\eta), \\
 g_{\eta}(\eta) &= J^{-T}(\eta)g(\eta), \\
 \tau_{d\eta} &= J^{-T}(\eta)\tau_d,
 \end{aligned}$$

其中: M 为惯性矩阵, 包括附加质量; $C(\nu)$ 为科氏力和向心力矩阵, 包括附加质量产生的向心力和科氏力; $D(\nu)$ 表示非线性水动力阻尼矩阵, $g(\eta)$ 表示恢复力和力矩向量, τ_d 表示外界干扰力和力矩向量. $J(\eta)$ 表示AUV运动坐标系和固定坐标系的转换矩阵. η 表示AUV的位置和姿态向量; ν 表示AUV在载体坐标系下的速度向量; τ 表示作用在AUV载体坐标系下的控制量向量.

4 基于L₂干扰抑制的AUV三维航迹跟踪控制器设计(Design of three-dimensional path tracking controller of AUV based on L₂ disturbance attenuation method)

4.1 控制策略(Control scheme)

AUV三维航迹跟踪控制系统的主要目的是通过给定各自由度的驱动力矩, 使得AUV在保证期

望航速的航行工况下, 实际航迹能够精确跟踪期望指令航迹. 设AUV的期望航迹和期望航速分别由 η_d 和 $\dot{\eta}_d$ 表示, 则AUV三维航迹精确跟踪控制问题即为要求设计反馈控制器, 使得

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|\eta - \eta_d\| = 0, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} \|\dot{\eta} - \dot{\eta}_d\| = 0.$$

考虑AUV系统中的非线性阻尼的影响和外部海流的干扰作用, 采用神经网络来估计AUV系统中的非线性水动力阻尼和海流干扰, 将神经网络的逼近误差当做系统的外部干扰, 通过设计L₂干扰抑制控制器予以消除. 如图2所示为基于L₂干扰抑制的AUV三维航迹跟踪控制原理图.

4.2 L₂干扰抑制方法简述(Brief description of L₂ disturbance attenuation method)

对于仿射非线性系统

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + g_1(x)\omega + g_2(x)u, \\ z = h(x) + d(x)u, \end{cases} \quad (2)$$

式中: $x \in \mathbb{R}^n$ 表示状态变量, ω 表示系统的干扰信号, u 表示控制输入信号, z 表示系统的评价信号. $f(x)$, $g_1(x)$, $g_2(x)$, $h(x)$, $d(x)$ 均为适当维数的函数向量或函数矩阵.

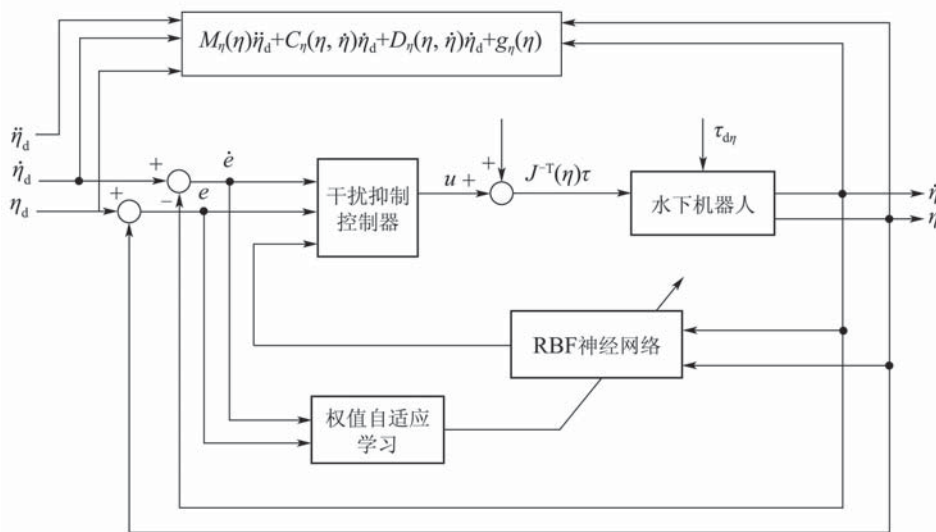


图 2 基于L₂干扰抑制的AUV三维航迹跟踪控制原理图

Fig. 2 Three-dimensional path tracking control schematic diagram of AUV based on L₂ disturbance attenuation method

L₂干扰抑制问题指的是设计控制输入 u , 使得系统的增益尽可能小, 同时保证干扰为零时闭环系统渐进稳定^[15].

L₂干扰抑制问题可以等价求解一个基于Lyapunov稳定性理论的耗散不等式问题, 即

$$H = \dot{V} - \frac{1}{2}(\gamma^2 \|\omega\|^2 - \|z\|^2) \leq 0, \quad (3)$$

其中 γ 称作干扰抑制水平因子. 为了获得满足不等

式(3)的正定存储函数 $V(x)$, 需要求解HJI偏微分不等式, 这是很困难的. 所以常用递推Lyapunov函数的思想来构造系统的存储函数, 从而使得系统稳定.

4.3 AUV三维航迹跟踪控制器设计(Design of three-dimensional path tracking controller of AUV)

定义AUV航迹跟踪误差为 $e = \eta - \eta_d$, 则AUV

三维航迹跟踪控制器可设计为

$$J^{-T}(\eta)\tau = u + M_\eta(\eta)\ddot{\eta}_d + C_\eta(\eta, \dot{\eta})\dot{\eta}_d + D_\eta(\eta, \dot{\eta})\dot{\eta}_d + g_\eta(\eta), \quad (4)$$

其中 $M_\eta(\eta)\ddot{\eta}_d + C_\eta(\eta, \dot{\eta})\dot{\eta}_d + D_\eta(\eta, \dot{\eta})\dot{\eta}_d + g_\eta(\eta)$ 为设计用来进行非线性补偿的前馈项. 将式(4)代入系统(1)中, 得到AUV系统的误差状态方程为

$$M_\eta(\eta)\ddot{e} + C_\eta(\eta, \dot{\eta})\dot{e} + D_\eta(\eta, \dot{\eta})\dot{e} + \tau_{d\eta} = u, \quad (5)$$

设

$$\Delta f(\eta, \dot{\eta}) = D_\eta(\eta, \dot{\eta})\dot{e} + \tau_{d\eta},$$

其中 $D_\eta(\eta, \dot{\eta})$ 和 $\tau_{d\eta}$ 分别表示AUV系统的非线性水动力阻尼和外界海流干扰.

采用RBF神经网络^[16]来估计 Δf , 用 ε_f 代表神经网络的逼近误差, 则 $\Delta f = W_f^* \sigma_f + \varepsilon_f$, RBF网络的辨识结构如图3所示.

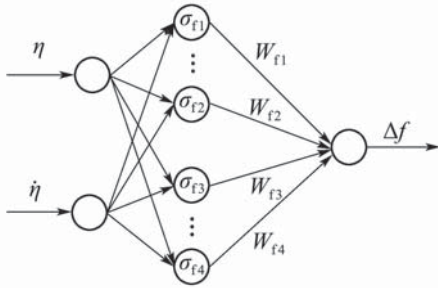


图3 RBF神经网络结构

Fig. 3 RBF neural network architecture

其中 σ_f 为RBF神经网络隐层的高斯基函数, 它与AUV的实际位置信息 η 和速度信息 $\dot{\eta}$ 有关. W_f^* 为网络的输出层权值, 权值自适应学习率由航迹误差 e 和速度误差 \dot{e} 设计, 则式(5)可化为

$$\begin{cases} M_\eta(\eta)\ddot{e} + C_\eta(\eta, \dot{\eta})\dot{e} + W_f^* \sigma_f + \varepsilon_f = u, \\ z_R = pe, \end{cases} \quad (6)$$

其中: z_R 为定义的评价信号, p 为设计的评价参数. 将RBF网络输出的估计误差 ε_f 看作AUV系统的外部干扰, 利用 L_2 干扰抑制控制器予以消除, 则AUV系统的 L_2 增益可表示为

$$J_R = \sup_{\|\varepsilon_f\| \neq 0} \frac{\|z_R\|_2}{\|\varepsilon_f\|_2},$$

基于李雅普诺夫稳定性理论设计AUV三维航迹跟踪控制器和神经网络学习率, 使得系统(6)满足 $J_R \leq \gamma$.

定义AUV航迹误差 $x_1 = e$ 和一阶滤波器 $x_2 = \dot{e} + \alpha e$, 其中 α 为给定的正数, 则

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 - \alpha x_1, \\ M_\eta(\eta)\dot{x}_2 = -C_\eta(\eta, \dot{\eta})x_2 + \xi - W_f^* \sigma_f - \varepsilon_f + u. \end{cases} \quad (7)$$

其中 $\xi = M_\eta(\eta)\alpha\dot{e} + C_\eta(\eta, \dot{\eta})\alpha e$.

定理1 对于AUV航迹误差系统(6), 如果神经网络的权值学习算法为

$$\dot{W}_f = -\eta(x_2 \sigma_f^T + \lambda(W_f - W_0)), \quad (8)$$

其中: $\eta > 0$ 为学习率, $\lambda > 0$, W_0 为神经网络的初始权值, 则AUV三维航迹跟踪控制器可设计为

$$u = -x_1 - \xi + \hat{W}_f \sigma_f - \frac{1}{2\gamma^2} x_2. \quad (9)$$

这里评价信号 z_R 中的参数 p 满足 $\alpha - \frac{1}{2}p^2 = \varepsilon_1$, 其中 $\varepsilon_1 > 0$ 为给定常数, 则系统(6)的 L_2 增益 J_R 小于 γ .

证 证明过程详见稳定性分析式(11)的推导. 证毕.

5 稳定性分析(Stability analysis)

定义李雅普诺夫函数为

$$V = \frac{1}{2} x_1^T x_1 + \frac{1}{2} x_2^T M_\eta(\eta) x_2 + \frac{1}{2\eta} \text{tr}(\tilde{W}_f^T \tilde{W}_f), \quad (10)$$

其中 $\tilde{W}_f = \hat{W}_f - W_f^*$, 求导得

$$\begin{aligned} \dot{V} &= x_1^T \dot{x}_1 + x_2^T M_\eta(\eta) \dot{x}_2 + \frac{1}{2} x_2^T \dot{M}_\eta(\eta) x_2 + \\ &\quad \frac{1}{\eta} \text{tr}(\tilde{W}_f^T \dot{\tilde{W}}_f) = \\ &\quad x_1^T (x_2 - \alpha x_1) + x_2^T (-C_\eta(\eta, \dot{\eta}) x_2 + \xi - \\ &\quad W_f^* \sigma_f - \varepsilon_f + u) + \frac{1}{2} x_2^T \dot{M}_\eta(\eta) x_2 + \\ &\quad \frac{1}{\eta} \text{tr}(\tilde{W}_f^T \dot{\tilde{W}}_f) = \\ &\quad x_1^T (x_2 - \alpha x_1) + x_2^T (-\varepsilon_f - x_1 - \frac{1}{2\gamma^2} x_2 + \\ &\quad \tilde{W}_f \sigma_f) + \frac{1}{2} x_2^T [\dot{M}_\eta(\eta) - 2C_\eta(\eta, \dot{\eta})] x_2 + \\ &\quad \frac{1}{\eta} \text{tr}(\tilde{W}_f^T \dot{\tilde{W}}_f). \end{aligned} \quad (11)$$

由于AUV系统状态方程满足性质^[17]

$$x_2^T (\dot{M}_\eta(\eta) - 2C_\eta(\eta, \dot{\eta})) x_2 = 0,$$

则

$$\dot{V} = -\alpha \|x_1\|^2 + x_2^T \tilde{W}_f \sigma_f - x_2^T \varepsilon_f - \frac{1}{2\gamma^2} x_2^T x_2 + \frac{1}{\eta} \text{tr}(\tilde{W}_f^T \dot{\tilde{W}}_f). \quad (12)$$

将神经网络的估计误差 ε_f 看做AUV系统的外部干

扰, 利用L₂干扰抑制方法加以约束:

$$\begin{aligned}
 H &= \dot{V} - \frac{1}{2}\gamma^2 \|\varepsilon_f\|^2 + \frac{1}{2} \|z_R\|^2 = \\
 &-\alpha \|x_1\|^2 + x_2^T \tilde{W}_f \sigma_f - x_2^T \varepsilon_f - \frac{1}{2\gamma^2} x_2^T x_2 + \\
 &\frac{1}{\eta} \text{tr}(\tilde{W}_f^T \dot{\tilde{W}}_f) - \frac{1}{2}\gamma^2 \|\varepsilon_f\|^2 + \frac{1}{2} \|z_R\|^2, \quad (13)
 \end{aligned}$$

则

$$\begin{aligned}
 H &\leq -\alpha \|x_1\|^2 + x_2^T \tilde{W}_f \sigma_f + \frac{1}{\eta} \text{tr}(\tilde{W}_f^T \dot{\tilde{W}}_f) + \\
 &\frac{1}{2} \|px_1\|^2 = \\
 &-\varepsilon_1 \|x_1\|^2 + x_2^T \tilde{W}_f \sigma_f + \frac{1}{\eta} \text{tr}(\tilde{W}_f^T (-\eta x_2 \sigma_f^T) - \\
 &\eta \lambda \tilde{W}_f^T (\hat{W}_f - W_0)) = \\
 &-\varepsilon_1 \|x_1\|^2 + x_2^T \tilde{W}_f \sigma_f - \text{tr}(\sigma_f x_2^T \tilde{W}_f) - \\
 &\lambda \text{tr}(\tilde{W}_f^T (\hat{W}_f - W_0)) = \\
 &-\varepsilon_1 \|x_1\|^2 - \frac{\lambda}{2} \|\tilde{W}_f\|_F^2 - \frac{\lambda}{2} \|\hat{W}_f - W_0\|_F^2 + \\
 &\frac{\lambda}{2} \|W_f^* - W_0\|_F^2. \quad (14)
 \end{aligned}$$

令 $\bar{W} = \frac{\lambda}{2} \|W_f^* - W_0\|_F^2$, 由于

$$\begin{aligned}
 -\varepsilon_1 \|x_1\|^2 &\leq 0, \quad -\frac{\lambda}{2} \|\tilde{W}_f\|_F^2 \leq 0, \\
 -\frac{\lambda}{2} \|\hat{W}_f - W_0\|_F^2 &\leq 0,
 \end{aligned}$$

由式(3)可知下列任意一个条件成立时,

$$\begin{aligned}
 \|x_1\| &> \sqrt{\frac{\bar{W}}{\varepsilon_1}}, \quad \|\tilde{W}_f\|_F > \sqrt{\frac{2\bar{W}}{\lambda}}, \\
 \|\hat{W}_f - W_0\|_F &> \sqrt{\frac{2\bar{W}}{\lambda}}
 \end{aligned}$$

都可使

$$\dot{V} \leq \frac{1}{2}\gamma^2 \|\varepsilon_f\|^2 - \frac{1}{2} \|z_R\|^2$$

成立, 即AUV误差动态系统(6)的L₂增益小于γ.

6 仿真实验(Simulation experiment)

仿真实验对象为哈尔滨工程大学北飒海洋装置与控制技术研究所自主研发的某实验AUV, 其质量为 $m = 6783.1 \text{ kg}$, 长度为 $L = 5.720 \text{ m}$. 基于AUV半实物仿真平台, 针对由实测水动力系数构建的某实验AUV的6自由度动力学模型, 对上述研究的基于干扰抑制的鲁棒神经网络控制方法的正确性和有效性进行验证. 验证了AUV在慢变海流干扰条件下三维航迹跟踪控制系统的精确跟踪能力.

图4为仿真实验中AUV半实物仿真系统硬件拓扑结构. 该拓扑结构以网络为中心, 包括数字化AUV计算机、仿真管理计算机、三维视景仿真

计算机、AUV任务管理计算机和AUV运动控制计算机.

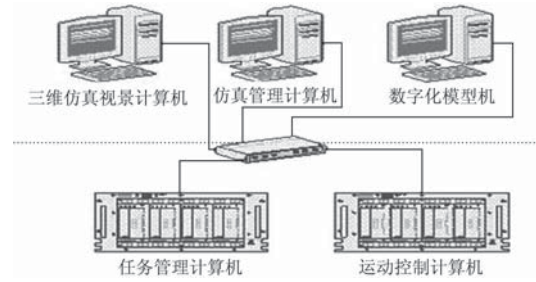


图 4 AUV半物理仿真系统硬件实现示意图
Fig. 4 Schematic of hardware implement of hybrid simulation system for AUV

整个仿真平台受时序控制, 仿真启动、结束等同步指令均由仿真管理计算机发出; 使命管理计算机负责制订整个使命作业执行路线和所采用的任务序列; 动态控制计算机是AUV的动态控制器部分, 根据使命管理计算机发出的指令行为进行相应的运动控制, 向AUV的数字化平台计算机发出执行机构动作指令; 数字化平台计算机接到动作指令后进行AUV运动模型、执行机构模型解算得到仿真状态下AUV在控制器作用下动态运动的位置状态信息和执行机构动态响应信息, 再通过所建立的前视声纳视域仿真模型进行探测扫描仿真计算(即模拟仿真AUV在海洋环境中的真实运动过程), 再将上述信息作为测量数据反馈至三维视景仿真机, 实时演示AUV在海洋环境中的动态运动的过程.

设定AUV航迹制导器生成的期望航迹点为

$$\begin{aligned}
 (x_i, y_i, z_i) &= (R \cos(i \cdot 10^\circ), R \sin(i \cdot 10^\circ), \\
 &(i + 1)d),
 \end{aligned}$$

其中: $R = 100, i = 1, 2, \dots, 72, d$ 为AUV初始深度. 利用AUV航迹跟踪控制器驱动AUV沿着由期望航迹点拟合产生的三维航迹进行三维航迹跟踪控制. 外界干扰主要来自海流对AUV的影响, z 的单位为m, 海流流速(m/s)为

$$u_{\text{current}} = \begin{cases} 1.00, & 0 \leq z \leq 95, \\ 0.75, & 95 < z \leq 185, \\ 0.50, & 185 < z \leq 275, \\ 0.25, & 275 < z \leq 365, \end{cases}$$

流向为0°(与X轴负半轴夹角). 设AUV初始位置为 $(x, y, z) = (100, 0, 5)$, 初始姿态角为 $(\varphi, \theta, \phi) = (0^\circ, 0^\circ, 90^\circ)$, 初始航速为 $u = 0 \text{ m/s}$, 期望速度为 $u_d = 1 \text{ m/s}$.

根据式(9)设计AUV三维航迹跟踪控制器, 控制系统的采样周期设定为0.1s, 控制器设计相关参数选取为 $\alpha = 30, \varepsilon_1 = 0.1, p = 5, \lambda = 0.05$, 干扰抑

制水平因子为 $\gamma = 0.3$. 根据式(8)设计RBF神经网络的学习算法, 学习率选取为 $\eta = 20$. 神经网络的隐层节点数选择为100, 初始权值为0. 图5~图10给出了AUV三维航迹跟踪控制的仿真实验结果.

图5为AUV螺旋线方式三维下潜航迹跟踪曲线. 为验证本文所设计控制器的性能, 以PID控制器对AUV三维航迹跟踪的仿真数据加以对比. 图5中P1至P2点为螺旋线的第1圈, P2至P3点为螺旋线的第2圈.

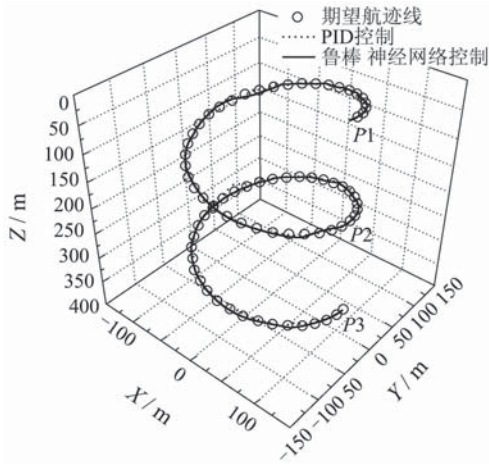


图5 AUV三维航迹跟踪曲线图
Fig. 5 Three-dimensional path tracking curve diagram of AUV

图6和图7为AUV螺旋下潜第1圈的仿真数据分别在XY平面和XZ平面投影而成的航迹曲线, 图8为三维航迹跟踪误差曲线. 由图6和图7可以清晰的看到与传统PID控制相比, 基于 L_2 干扰抑制的鲁棒神经网络控制方法对海流干扰有较好的抑制作用, 鲁棒性强. 设计的神经网络可以补偿非线性水动力阻尼和外界的海流干扰, 提高了航迹跟踪的精度, 缩短了AUV的冗余航迹, 使其与期望航迹线更为接近. 通过图8可以看出鲁棒神经网络控制的两大优点: 第1, 航迹误差小, 可以实现AUV三维航迹的精确跟踪; 第2, 完成AUV航迹跟踪任务时间短, 比PID控制器提前60s完成螺旋线下潜任务, 达到了省时节能的目的, 具有较高的工程实用价值.

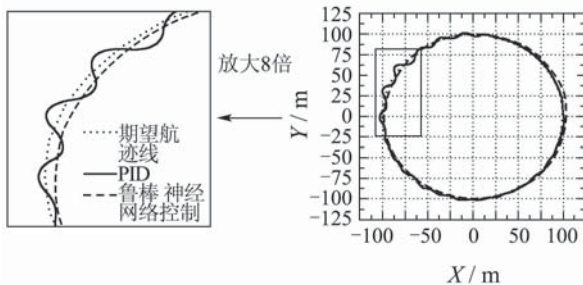


图6 AUV水平面航迹跟踪投影图

Fig. 6 Projection diagram for horizontal path tracking of AUV

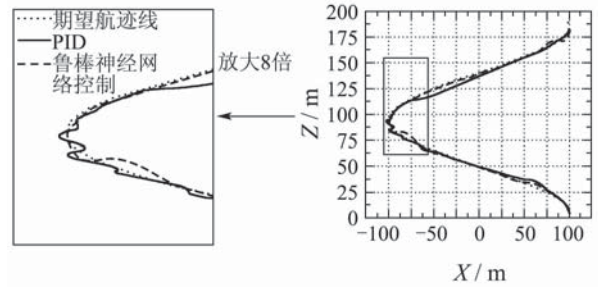


图7 AUV垂直面航迹跟踪投影图

Fig. 7 Projection diagram for vertical path tracking of AUV

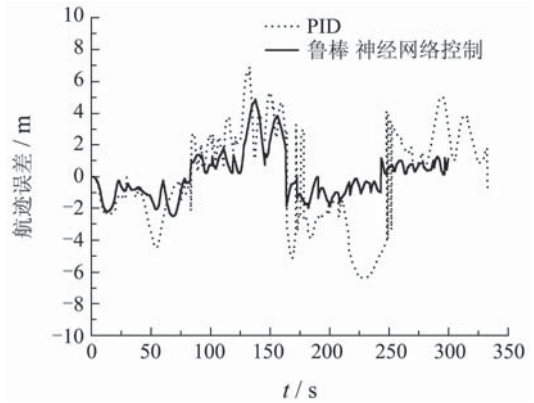


图8 AUV三维航迹误差曲线图

Fig. 8 Three-dimensional path error curve diagram of AUV

图9和图10分别为AUV螺旋线下潜第1圈的航向舵响应曲线图和俯仰舵响应曲线图. 由图9可以看出采用鲁棒神经网络控制时航向舵操舵幅值要大于传统的PID控制, 这是由于AUV的航向与海流方向垂直, 水动力和海流对AUV横向作用力较大, 设计的控制器需对AUV模型误差和外界海流干扰进行非线性补偿作用所致, 由此可以实现抑制海流干扰的作用, 具有强鲁棒性的优点. 图10表明本文设计的控制器与传统PID控制相比, 具有较好的俯仰舵舵效, 使AUV在垂直面上运动时具有更加稳定的控制能力.

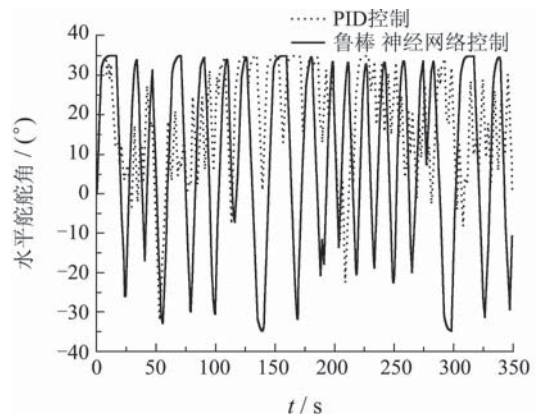


图9 AUV航向舵响应曲线图(P1点到P2点)

Fig. 9 Rudder transient response curve diagram of AUV(P1 to P2)

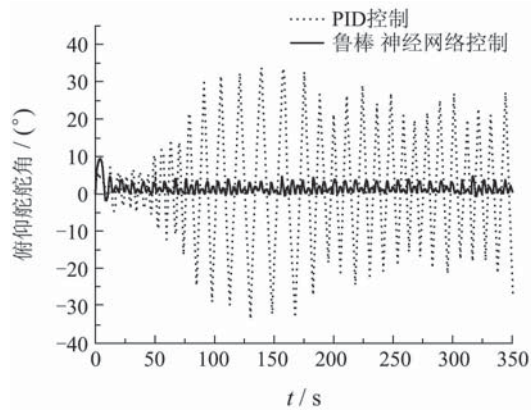


图10 AUV俯仰舵响应曲线图(P1点到P2点)

Fig. 10 Elevator transient response curve diagram of AUV(P1 to P2)

7 结论(Conclusion)

本文针对水下机器人三维航迹跟踪控制问题,考虑了非线性水动力阻尼对AUV系统的影响和外界海流干扰作用,提出了基于 L_2 干扰抑制的鲁棒神经网络控制方法. 控制器设计利用神经网络补偿非线性水动力阻尼和外界海流干扰,再将神经网络的估计误差当做AUV系统的外部干扰,用 L_2 干扰抑制控制器予以消除. 通过理论研究和仿真实验可以得到以下结论: 采用基于 L_2 干扰抑制的鲁棒神经网络控制策略进行水下机器人的三维航迹跟踪控制,可以较好的克服时变非线性水动力阻尼对系统的影响,并对外界海流干扰有较好的抑制作用,实现精确跟踪的理想效果.

参考文献(References):

- 蒋新松, 封锡盛, 王棣棠. 水下机器人[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2000.
- WANG Y T, YAN W S, GAO B, et al. Backstepping-based path following control of an underactuated autonomous underwater vehicle[C] // *Proceedings of IEEE International Conference on Information and Automation*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2009, 6: 466 – 471.
- LI J H, LEE P M. Path tracking in dive plane for a class of torpedo-type underactuated AUVs [C] // *Proceedings of the 7th Asian Control Conference*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2009, 8: 360 – 365.
- JON E R, ASGEIR J S, KRISTIN Y P. Model-based output feedback control of slender-body underactuated AUVs: theory and experiments[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2008, 16(5): 930 – 946.
- 唐旭东, 庞永杰, 李晔. 一种水下机器人运动的过程神经元控制. 控制理论与应用[J]. 2009, 26(4): 420 – 424. (TANG Xudong, PANG Yongjie, LI Ye. A process neural control algorithm for autonomous underwater vehicle[J]. *Control Theory & Applications*, 2009, 26(4): 420 – 424.)
- MORTEN B, THOR I F. Unified control concept for autonomous underwater vehicles[C] // *Proceedings of the 2006 American Control Conference*. New York: IEEE, 2006, 6: 4920 – 4926.
- 刘健, 于闯, 刘爱民. 无缆自治水下机器人控制方法研究[J]. 机器人, 2004, 26(1): 7 – 10. (LIU Jian, YU Chuang, LIU Aimin. Research on untethered autonomous underwater vehicle control method[J]. *Robot*, 2004, 26(1): 7 – 10.)
- 徐玉如, 肖坤. 智能海洋机器人技术进展[J]. 自动化学报, 2007, 33(5): 518 – 521. (XU Yuru, XIAO Kun. Technology development of autonomous ocean vehicle[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2007, 33(5): 518 – 521.)
- REPOULIAS F, PAPAPOULOS E. Trajectory planning and tracking control design of underactuated AUVs[C] // *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. New York: IEEE, 2005, 4: 1622 – 1627.
- JREPOULIAS F, PAPAPOULOS E. Planar trajectory planning and tracking control design for underactuated AUVs[J]. *Ocean Engineering*, 2007, 34(12): 1650 – 1667.
- 邢志伟, 封锡盛. 水下机器人神经网络自适应逆控制. 控制工程[J]. 2003, 10(3): 235 – 238. (XING Zhiwei, FENG Xisheng. Adaptive inverse control of neural network for underwater vehicles[J]. *Control Engineering*, 2003, 10(3): 235 – 238.)
- 俞建成, 张艾群, 王晓辉, 等. 基于模糊神经网络水下机器人直接自适应控制[J]. 自动化学报, 2007, 33(8): 840 – 846. (YU Jiancheng, ZHANG Aiqun, WANG Xiaohui, et al. Direct adaptive control of underwater vehicles based on fuzzy neural networks[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2007, 33(8): 840 – 846.)
- 俞建成, 李强, 张艾群, 等. 水下机器人的神经网络自适应控制. 控制理论与应用[J]. 2008, 25(1): 9 – 13. (YU Jiancheng, LI Qiang, ZHANG Aiqun, et al. Neural network adaptive control for underwater vehicles[J]. *Control Theory & Applications*, 2008, 25(1): 9 – 13.)
- FOSSEN T I. *Marine Control Systems: Guidance, Navigation, and Control of Ships, Rigs and Underwater Vehicles*[M]. Trondheim, Norway: Marine Cybernetics, 2002.
- 梅生伟, 申铁龙, 刘志康. 现代鲁棒控制理论与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- 刘金琨. 机器人控制系统的设计与MATLAB仿真[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- GIANLUCA ANTONELLI. *Underwater Robots: Motion and Force Control of Vehicle-Manipulator Systems*[M]. New York: Springer, 2003.

作者简介:

张利军 (1973—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为非线性系统控制技术, E-mail: zhanglj@hrbeu.edu.cn;

贾鹤鸣 (1983—), 男, 博士研究生, 研究方向为水下机器人控制技术、非线性系统控制技术, E-mail: jiaheminglucky99@126.com;

边信黔 (1941—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为潜器与水下机器人控制技术, 船舶动力定位技术, E-mail: bianxinqian@hrbeu.edu.cn;

严浙平 (1972—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为潜器与水下机器人控制技术, 船舶运动综合控制技术, E-mail: yanzheping@hrbeu.edu.cn;

程相勤 (1983—), 男, 博士研究生, 研究方向为潜器与水下机器人控制技术, E-mail: chengxianqin@hrbeu.edu.cn.