

自主式水下航行器三维路径跟踪的神经网络 H_∞ 鲁棒自适应控制方法

葛 晖¹, 敬忠良¹, 高 剑²

(1. 上海交通大学 航空航天学院, 上海 200240; 2. 西北工业大学 航海学院, 陕西 西安 710072)

摘要: 本文研究了存在模型不确定以及外界未知扰动情况下的自主式水下航行器(AUV)的三维路径跟踪控制问题. 针对此问题, 首先利用时标分离原理及正交投影Serret-Frenet坐标系建立了描述AUV质心运动及姿态运动的仿射非线性数学模型. 其次, 在控制器设计中运用神经网络 H_∞ 鲁棒自适应算法克服了模型的不确定性及扰动, 同时在控制器设计中利用了主导输入的思想, 降低了闭环系统的复杂度, 减少了实时计算工作量, 便于工程应用. 基于Lyapunov理论的分析保证了系统的稳定性. 仿真结果表明, 路径跟踪控制律可以保证AUV沿期望路径运动, 并且具有良好的动态性能.

关键词: 自主式水下航行器(AUV); 三维路径跟踪; Serret-Frenet坐标系; 质心回路; 姿态回路; 神经网络
中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Neural network H -infinity robust adaptive control for autonomous underwater vehicle in 3-dimensional path following

GE Hui¹, JING Zhong-liang¹, GAO Jian²

(1. School of Aeronautics and Astronautics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;
2. College of Marine Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an Shaanxi 710072, China)

Abstract: The 3-dimensional path following control of autonomous underwater vehicle (AUV) with uncertain model and unknown disturbance is investigated. First, the time singular perturbation method and the orthogonal projection reference frame are used to model the position motion, and the attitude dynamic model of the AUV is described by an affine nonlinear system. Next, a neural network robust adaptive control algorithm is employed in the controller design to overcome the uncertainties of the model and the influence of external disturbances. Meanwhile, the dominant input idea is adopted to reduce the complexity of the closed-loop. The stability performance of the system is proved by using Lyapunov stability theory. Simulation indicates that the path following controller keeps the motion of AUV along the prescribed path with desirable performances.

Key words: autonomous underwater vehicle; 3D path following; Serret-Frenet frame; centroid loop; attitude loop; neural network

1 引言(Introduction)

随着人类开发利用海洋的进程不断加速, 对自主式水下航行器(autonomous underwater vehicle, AUV)的要求也不断增加, 要求AUV能够在工作区域定点悬停, 能够完成水下远距离精确的路径跟踪与轨迹跟踪等多种任务. 总的来说AUV的运动控制模式包括: 1) 点镇定控制, 即使AUV在空间中某个点保持姿态稳定; 2) 轨迹跟踪控制, 即使AUV沿着空间中一条和时间相关的轨迹运动, 也就是说对于AUV到达指定点的时间有要求; 3) 路径跟踪控制, 即使得AUV跟踪一条空间中和时间无关的曲线, 要求AUV的运动收敛于给定的空间曲线, 但对于何时到达何地没有要求. 因此在实际的工程应用中, 路径跟踪具有较高

的实用价值, 因为在海洋石油勘探、海底电缆维护等, 都要求AUV能够以一定的速度跟踪预先设定好的路径航行, 并不要求AUV一定要在某一时刻到达特定的位置. 由于没有时间的要求, 使得路径跟踪在控制上具有更大的灵活性. 和轨迹跟踪控制模式相比, 路径跟踪的航迹和控制曲线更加平滑、抖动比较小.

关于海洋运动体(包括各种船舶、潜艇、水下航行器)的路径跟踪控制, 国内外学者进行了内容广泛的研究工作, 但是总的来说, 到目前为止, 这些研究主要集中在3个方面: 第一是运动体在水平面的二维路径跟踪控制, 采用的方法主要是将运动分解成质心运动和姿态运动再分别设计控制器; 第二是运动

体系统模型存在的不确定性以及外界扰动的影响,采用的方法主要是通过引入鲁棒及自适应控制克服系统的不确定性,通过设计观测器对于外界扰动进行估计及补偿;第三是具有更好稳定性指标的控制算法,如指数稳定甚至全局稳定算法。

刘杨等在文献[1]中借鉴导航系统概念,把船舶运动系统分为运动回路和动力回路分别设计控制器,在运动回路,根据微分同胚等效变换把惯性坐标系的位置误差转换为路径坐标系下的位置误差,利用Lyapunov直接法设计参考航向和参考速度;在动力回路控制中,对船舶参数不确定的操纵环路设计神经网络稳定自适应控制器跟踪参考航向和参考速度。K. D. Do对于船舶的路径跟踪控制进行了一系列的研究,基本方法是:在质心运动部分,采用极坐标变换描述船舶运动并且采用了LOS导引律,在姿态运动部分采用李雅普诺夫直接法和改进的自适应反演算法,作者将研究重点放在了不同的模型描述上,在文献[2]中,在控制器设计中作者在船舶模型中采用了简化的对角形式的惯性矩阵;在文献[3]中,则进一步考虑了模型惯性矩阵中的非对角项,处理的方法是通过非线性变换使得惯性矩阵在新的速度变量下是对角型的;为了能够适用于高速船舶的动力学特性,文献[4]在前文的基础上又加上了动力学模型中的非线性阻尼项,通过重新选择体坐标系的原点并引入坐标变换解决了这一问题。葡萄牙学者Dragan. B研究了运动体动力学非线性特性,针对存在不稳定零动态的非线性系统的路径跟踪控制进行了研究^[5], A. Pedro Aguiara进一步针对零动态对于路径跟踪和轨迹跟踪两种运动模式的影响进行了对比研究^[6],文献[7]采用自适应切换控制研究了存在系统不确定性时的运动体路径跟踪以及轨迹跟踪控制。马岭等^[8]采用了模糊混合控制对上述问题进行了研究。此外,由于目前针对水下航行器及船舶的非线性路径跟踪控制通常只能得到局部稳定的结果,如何得到具有指数稳定、全局稳定甚至是全局稳定的控制算法,一些学者也进行了尝试,但是得到的结果具有诸多限制^[9-10],且仅局限在水平面内。Even Borhaug等基于级联系统理论研究了AUV在三维空间中的直线航迹跟踪问题^[11],导引过程采用了传统的视线角方法,用于获得俯仰角和偏航角指令,获得了指数稳定的控制器,但是无法得到全局稳定性的结果。

本文根据时标分离原理将路径跟踪控制系统划分为质心回路和姿态回路。选择正交投影Serret-Frenet坐标系描述路径跟踪误差,采用神经网络鲁棒自适应控制算法分别设计了路径控制器和自动驾驶仪,降低了传统上的动态逆控制算法对于模型精度的依赖程度;同时在控制器设计中利用了主导输入的思想,降低了闭环系统的复杂度,减少了实时计算

工作量,便于工程应用。用Lyapunov理论对系统进行了稳定性分析,取得了良好的控制效果。

2 AUV三维路径跟踪问题综合建模 (Modelling of AUV 3D path following)

AUV三维路径跟踪过程如图1所示,定义:地面系 $o_e x_e y_e z_e$,体轴系 $o x_b y_b z_b$,速度系 $o x y z$,路径坐标系(Serret-Frenet坐标系) $c x_{sf} y_{sf} z_{sf}$ 。c为AUV的浮心o在路径 Γ 上的正交投影, l_n, l_b 表示c点相对于o点的距离。 α, β 为AUV的攻角和侧滑角, ϕ_e, θ_e, ψ_e 是速度系相对路径系的姿态角, V_t 表示速度。AUV刚体在三维空间中的运动可以分为质心运动和姿态运动两部分进行分别建模。

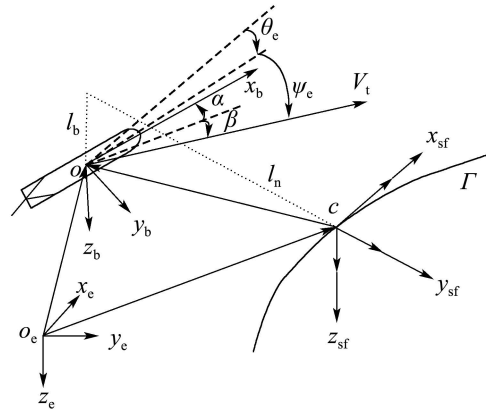


图1 AUV三维空间运动坐标系

Fig. 1 AUV3D motion reference frame

2.1 质心运动模型(Centroid motion model)

质心运动模型描述了AUV质心相对于期望路径的运动。选择系统状态为 $\mathbf{x}_1 = [l_n \ l_b]^T$,系统输入为 $\mathbf{u}_1 = [\theta_e \ \psi_e]^T$ 。将质心运动模型写成仿射非线性系统形式为

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}_1 &= \mathbf{f}_1(\mathbf{x}_1) + \mathbf{g}_1(\mathbf{x}_1)\mathbf{u}_1, \quad \mathbf{y}_1 = [l_n \ l_b]^T, \quad (1) \\ \mathbf{f}_1(\mathbf{x}_1) &= \begin{bmatrix} V_t \cos \theta_e \sin \psi_e \\ -V_t \sin \theta_e \end{bmatrix}, \\ \mathbf{g}_1(\mathbf{x}_1, \mathbf{u}_1) &= \begin{bmatrix} \frac{\tau l_b}{1 - l_n k} V_t \cos \theta_e \cos \psi_e \\ -\frac{\tau l_n}{1 - l_n k} V_t \cos \theta_e \cos \psi_e \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

从式(1)可以看出,通过控制 θ_e 和 ψ_e ,可以使得位置误差 l_n, l_b 收敛到0,其中 $l_n k \neq 1$ 。

2.2 姿态运动模型(Attitude motion model)

姿态运动模型包括相对姿态角方程和角速度方程两部分,相对姿态角方程可表示为

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}_2 &= \mathbf{f}_2(\mathbf{x}_2) + \mathbf{g}_2(\mathbf{x}_2)\mathbf{u}_2, \quad \mathbf{y}_2 = [\varphi_e \ \theta_e \ \psi_e]^T, \quad (2) \\ \mathbf{x}_2 &= \begin{bmatrix} \varphi_e \\ \theta_e \\ \psi_e \end{bmatrix}, \quad \mathbf{f}_2(\mathbf{x}_2) = \begin{bmatrix} k_1^{\varphi_e} \\ k_2^{\theta_e} \\ k_3^{\psi_e} \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

$$\mathbf{u}_2 = \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix}, \mathbf{g}_2(\mathbf{x}_2) = \begin{bmatrix} a_{11}^{\varphi_e} & a_{12}^{\varphi_e} & a_{13}^{\varphi_e} \\ 0 & a_{22}^{\theta_e} & a_{23}^{\theta_e} \\ 0 & a_{32}^{\psi_e} & a_{33}^{\psi_e} \end{bmatrix}.$$

角速度方程可以表示为

$$\dot{\mathbf{x}}_3 = \mathbf{f}_3(\mathbf{x}_3) + \mathbf{g}_3(\mathbf{x}_3) \mathbf{u}_3, \mathbf{y}_3 = [p \ q \ r]^T, \quad (3)$$

$$\mathbf{x}_3 = \mathbf{u}_2 = \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix}, \mathbf{u}_3 = \begin{bmatrix} \delta_d \\ \delta_e \\ \delta_r \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{f}_3(\mathbf{x}_3) = \begin{bmatrix} k_1^p \\ k_2^q \\ k_3^r \end{bmatrix}, \mathbf{g}_3(\mathbf{x}_3) = \begin{bmatrix} a_{11}^p & 0 & 0 \\ 0 & a_{22}^q & 0 \\ 0 & 0 & a_{33}^r \end{bmatrix}.$$

式(1)–(3)中的相关参数可以参考文献[12]. 在路径跟踪控制中, 不考虑海流作用的条件下, 要求 $l_n, l_b, \varphi_e, \theta_e, \psi_e$ 都收敛为0. 实质上路径跟踪控制的目标就是实现AUV的速度坐标系和路径坐标系的最终重合.

3 AUV三维路径跟踪控制系统设计(AUV 3D path following control system design)

AUV三维路径跟踪控制系统原理方块图如图2所示, 其设计思路是: 根据时标分离原理, 将AUV路径跟踪控制系统分成两个部分: 第1部分是质心运动控制回路, 设计路径控制器, 将相对姿态角 ϕ_e, θ_e, ψ_e 作为外回路的控制输入来使位置误差 l_n, l_b 收敛到0; 第2部分是自动驾驶仪回路, 自动驾驶仪回路又分为外回路和内回路, 外回路是将角速度 p, q, r 作为控制输入, 使得相对姿态角 ϕ_e, θ_e, ψ_e 收敛到0; 内回路是AUV的作动器 $\delta_e, \delta_r, \delta_d$ 作为控制输入, 使得角速度 p, q, r 跟踪期望信号. 式(1)–(3)分别表示了AUV路径跟踪系统模型中的质心运动回路模型和姿态稳定回路模型(又分为内外环), 这3个模型均为仿射非线性形式, 下面采用基于神经网络 H_∞ 鲁棒自适应控制理论分别针对3个模型设计控制器.

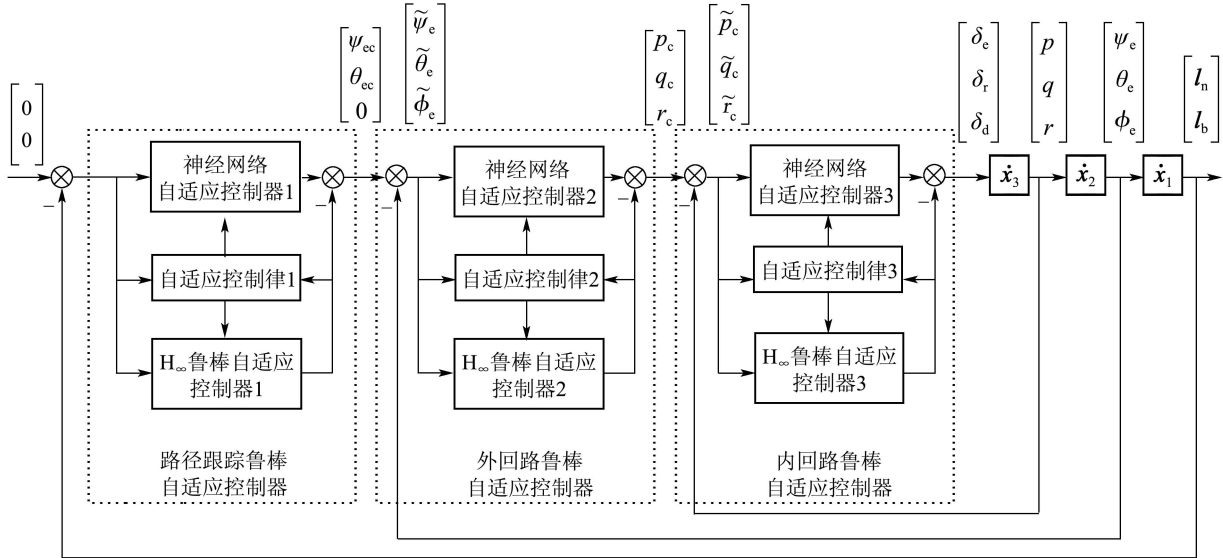


图2 AUV神经网络 H_∞ 鲁棒自适应控制系统结构图

Fig. 2 AUV neural network H_∞ robust adaptive control system

3.1 神经网络 H_∞ 鲁棒自适应控制器设计(H_∞ robust adaptive controller design based on neural network)

AUV是高度耦合的不确定非线性MIMO系统, 尤其是其流体动力参数通常是通过水洞及水池实验获得的, 具有较大的不确定性, 如何克服参数不确定性就成为AUV运动控制中的重要课题. MIMO不确定非线性系统的控制是控制理论界的一个难题和热点, 传统的基于神经网络的控制方法都是用神经网络来逼近未知函数, 然而这些方法都需要逼近控制增益矩阵中的每一个未知函数, 导出的结果非常复杂, 实际应用中难以实现. 刘国荣等针对这类系统提出了一种间接模糊自适应控

制^[13], 其突出的特点是应用了“主导输入”的概念, 将一个 $m \times m$ 的耦合系统分解成 m 个单输入单输出系统进行控制器设计, 这样降低了闭环系统的复杂程度, 减少了实时计算工作量, 便于工程应用.

正因为该算法具有上述显著的特性, 本文应用“主导输入”的思想, 将径向基神经网络应用在AUV控制器的设计中, 并且结合 H_∞ 鲁棒控制, 提出了一种神经网络 H_∞ 间接自适应控制算法. 引入神经网络是为了对系统非线性函数进行逼近, 又由于神经网络存在逼近误差, 又引入鲁棒控制器对神经网络的逼近误差进行补偿. 考虑如下MIMO不确定非线性系统:

$$\begin{cases} y_1^{(r_1)} = f_1(\mathbf{x}) + \sum_{i=1}^m g_{1i}(\mathbf{x}) u_i + d_1(\mathbf{x}), \\ \vdots \\ y_m^{(r_m)} = f_m(\mathbf{x}) + \sum_{i=1}^m g_{mi}(\mathbf{x}) u_i + d_m(\mathbf{x}), \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)^T \in \mathbb{R}^n$ 是系统的状态向量; $\mathbf{u} = (u_1, \dots, u_m)^T \in \mathbb{R}^m$ 和 $\mathbf{y} = (y_1, \dots, y_m)^T \in \mathbb{R}^m$ 分别是系统的输入和输出; $\mathbf{r} = (r_1, \dots, r_m)^T \in \mathbb{R}^m$ 是系统的相对阶向量, $\mathbf{d} = (d_1, \dots, d_m)^T \in \mathbb{R}^m$ 为外部有界的不确定干扰; $f_i(\mathbf{x})$ 和 $g_{ij}(\mathbf{x})$ 是未知的光滑函数. 写成矩阵向量形式为

$$\begin{bmatrix} y_1^{(r_1)} \\ \vdots \\ y_m^{(r_m)} \end{bmatrix} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{g}(\mathbf{x}) \begin{bmatrix} u_1 \\ \vdots \\ u_m \end{bmatrix} + \mathbf{d}(\mathbf{x}). \quad (5)$$

本算法的设计思想首先设计各个子系统的基于神经网络的 H_∞ 鲁棒自适应控制器, 再考虑系统式(5)的稳定性. 给出下面的假设:

在某紧集上 $\mathbf{g}(\mathbf{x})$ 范数有界且非奇异, 同时最小奇异值 $\sigma(\mathbf{g}(\mathbf{x})) \geq b > 0$, b 是正常数. $\mathbf{f}(\mathbf{x})$ 和 $\mathbf{g}(\mathbf{x})$ 光滑, $\mathbf{d}(\mathbf{x})$ 有界. 对任意 $i, j = 1, \dots, m$ 都存在神经网络权值 \mathbf{w}_{fi} 和 \mathbf{w}_{gij} , 使得神经网络的输出 $\hat{f}_i(\mathbf{x}|\mathbf{w}_{fi})$ 和 $\hat{g}_{ij}(\mathbf{x}|\mathbf{w}_{gij})$ 能任意逼近 $f_i(\mathbf{x})$ 和 $g_{ij}(\mathbf{x})$. 定义逼近误差满足

$$\begin{aligned} \max |\hat{f}_i(\mathbf{x}, \mathbf{w}_i) - f(\mathbf{x})| &\leq \varepsilon, \\ \max |\hat{g}_{ij}(\mathbf{x}, \mathbf{w}_{gij}) - g_{ij}(\mathbf{x})| &\leq \varepsilon. \end{aligned}$$

应用“主导输入”的思想, 第 i 个子系统为

$$y_i^{(r_i)} = f_i(\mathbf{x}) + \sum_{j=1}^m g_{ij}(\mathbf{x}) u_j + d_i(\mathbf{x}). \quad (6)$$

有 m 个输入都影响着第 i 个子系统的输出, 在这 m 个输入中, 选择一个起主导作用的控制输入, 记为 u_i , 其余均看作是系统的外来干扰, 则有

$$\begin{cases} y_i^{(r_i)} = f_i(\mathbf{x}) + g_{ii}(\mathbf{x}) u_i + d_{zi}, \\ d_{zi} = \sum_{j=1, j \neq i}^m g_{ij}(\mathbf{x}) u_j + d_i. \end{cases} \quad (7)$$

这样就把一个 $m \times m$ 的 MIMO 系统分解成 m 个单输入单输出子系统. 假设 $g_{ii}(\mathbf{x}) \neq 0$. 如果函数 $f_i(\mathbf{x})$, $g_{ii}(\mathbf{x})$ 是已知的, 并且 $d_{mi} = 0$, 则可以选择简单的动态逆控制器; 如果 $f_i(\mathbf{x})$, $g_{ii}(\mathbf{x})$ 未知, 且 $d_{mi} \neq 0$, 则通过使用径向基神经网络 $\hat{f}_i(\mathbf{x}|\mathbf{w}_i)$ 和 $\hat{g}_{ii}(\mathbf{x}|\mathbf{w}_{gii})$ 分别进行逼近, 加入鲁棒控制器 u_{ri} 来克服未知干扰, 可以得到等价的非线性鲁棒自适应控制器

$$u_i = \frac{1}{\hat{g}_{ii}(\mathbf{x}|\mathbf{w}_{gii})} [-\hat{f}_i(\mathbf{x}|\mathbf{w}_{fi}) + y_i^{(n_i)} + \mathbf{K}_c^T \mathbf{e}_i - u_{ri}], \quad (8)$$

式中: $u_{ri} = -\mathbf{B}_i^T \mathbf{P}_i \mathbf{e}_i / \eta$ 为鲁棒控制器 ($\eta > 0$ 是常数), $\mathbf{P}_i = \mathbf{P}_i^T$ 满足黎卡提方程

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_i \mathbf{A}_i + \mathbf{A}_i^T \mathbf{P}_i + \mathbf{Q}_i - 2\mathbf{P}_i \mathbf{B}_i \mathbf{B}_i^T \mathbf{P}_i / \eta + \\ \mathbf{P}_i \mathbf{B}_i \mathbf{B}_i^T \mathbf{P}_i / \kappa^2 = 0, \end{aligned} \quad (9)$$

其中: $\mathbf{A}_i \in \mathbb{R}^{r_i \times r_i}$, $\mathbf{B}_i \in \mathbb{R}^{r_i \times 1}$, $\mathbf{Q}_i \in \mathbb{R}^{r_i \times r_i}$, 根据推导可知, 上述 Riccati 方程存在正定解的充分条件是 $\eta \leq 2\kappa^2$, κ 是干扰减弱水平, 并且有 $Q_i > 0$. 将控制器代入系统方程并进行整理可得

$$\dot{\mathbf{e}} = \mathbf{A}_i \mathbf{e} + \mathbf{B}_i u_{ri} + \mathbf{B}_i \{ \hat{f}_i(\mathbf{x}|\mathbf{w}_{fi}) - f_i(\mathbf{x}) \} + [\hat{g}_{ii}(\mathbf{x}|\mathbf{w}_{gii}) - g_{ii}(\mathbf{x})] u_i - \mathbf{B}_i d_{zi}(\mathbf{x}). \quad (10)$$

构造径向基神经网络

$$\begin{cases} \hat{f}_i(\mathbf{x}|\mathbf{w}_{fi}) = \mathbf{w}_{fi}^T \boldsymbol{\varphi}_i(\mathbf{x}), \\ \hat{g}_{ii}(\mathbf{x}|\mathbf{w}_{gii}) = \mathbf{w}_{gii}^T \boldsymbol{\varphi}_{ii}(\mathbf{x}). \end{cases} \quad (11)$$

定义神经网络的最佳逼近权值为

$$\begin{cases} \mathbf{w}_{fi}^* = \arg \min_{\mathbf{w} \in \Omega_{fi}} [\sup_{\mathbf{x} \in S} |\hat{f}_i(\mathbf{x}|\mathbf{w}_{fi}) - f_i(\mathbf{x})|], \\ \mathbf{w}_{gii}^* = \arg \min_{\mathbf{w} \in \Omega_{gii}} [\sup_{\mathbf{x} \in S} |\hat{g}_{ii}(\mathbf{x}|\mathbf{w}_{gii}) - g_{ii}(\mathbf{x})|], \end{cases} \quad (12)$$

式中: $\Omega_{fi} = \{\mathbf{w}_{fi} : \|\mathbf{w}_{fi}\| \leq M_{fi}\}$, $\Omega_{gii} = \{\mathbf{w}_{gii} : \|\mathbf{w}_{gii}\| \leq M_{gii}\}$ 分别是神经网络参数的可行域, 其中 M_{fi} , M_{gii} 是设计参数. 定义 RBF 神经网络的逼近误差为

$$\begin{aligned} \omega_{ei} = [\hat{f}_i(\mathbf{x}|\mathbf{w}_{fi}^*) - f_i(\mathbf{x})] + \\ [\hat{g}_{ii}(\mathbf{x}|\mathbf{w}_{gii}^*) - g_{ii}(\mathbf{x})] u_i, \end{aligned} \quad (13)$$

则子系统误差动态模型为

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{e}}_i = \mathbf{A}_i \mathbf{e}_i + \mathbf{B}_i u_{ri} + \mathbf{B}_i [\tilde{\mathbf{w}}_{fi}^T \boldsymbol{\varphi}_{fi}(\mathbf{x}) + \\ \tilde{\mathbf{w}}_{gii}^T \boldsymbol{\varphi}_{gii}(\mathbf{x}) u_i] + \mathbf{B}_i \omega_i, \end{aligned} \quad (14)$$

式中: $\omega_i = \omega_{ei} - d_{zi}(\mathbf{x})$ 为复合干扰, $\tilde{\mathbf{w}}_{fi} = \mathbf{w}_{fi} - \mathbf{w}_{fi}^*$, $\tilde{\mathbf{w}}_{gii} = \mathbf{w}_{gii} - \mathbf{w}_{gii}^*$ 为误差向量.

3.2 稳定性分析(Stability analysis)

为了证明系统的稳定性, 定义第 i 个通道的 Lyapunov 函数

$$V_i = \frac{1}{2} \mathbf{e}_i^T \mathbf{P}_i \mathbf{e}_i + \frac{1}{2\mu_{1i}} \tilde{\mathbf{w}}_{fi}^T \tilde{\mathbf{w}}_{fi} + \frac{1}{2\mu_{2i}} \tilde{\mathbf{w}}_{gii}^T \tilde{\mathbf{w}}_{gii}, \quad (15)$$

则整个系统的 Lyapunov 函数可以表示为 $V = V_1 + V_2 + \dots + V_m$. 则有

$$\begin{aligned} \dot{V}_i = \frac{1}{2} \{ \mathbf{e}_i^T \mathbf{A}_i^T + u_{ri} \mathbf{B}_i^T + \\ [\boldsymbol{\varphi}_{fi}^T(\mathbf{x}) \tilde{\mathbf{w}}_{fi} + u_i \boldsymbol{\varphi}_{gii}^T(\mathbf{x}) \tilde{\mathbf{w}}_{gii}] \mathbf{B}_i^T + \\ \omega_i^T \mathbf{B}_i^T \} \mathbf{P}_i \mathbf{e}_i + \frac{1}{2} \mathbf{e}_i^T \mathbf{P}_i \{ \mathbf{A}_i \mathbf{e}_i + \mathbf{B}_i u_{ri} + \\ \mathbf{B}_i [\tilde{\mathbf{w}}_{fi}^T \boldsymbol{\varphi}_{fi}(\mathbf{x}) + \tilde{\mathbf{w}}_{gii}^T \boldsymbol{\varphi}_{gii}(\mathbf{x}) u_i] + \\ \mathbf{B}_i \omega_i \} + \frac{1}{\mu_{1i}} \tilde{\mathbf{w}}_{fi}^T \dot{\tilde{\mathbf{w}}}_{fi} + \frac{1}{\mu_{2i}} \tilde{\mathbf{w}}_{gii}^T \dot{\tilde{\mathbf{w}}}_{gii}. \end{aligned} \quad (16)$$

将鲁棒补偿控制器带入, 考虑到黎卡提方程(9), 上式可以简化为

$$\begin{aligned} \dot{V}_i = & -\frac{1}{2}e_i^T Q_i e_i - \frac{1}{2\kappa^2}e_i^T P_i B_i B_i^T P_i e_i + \\ & \frac{1}{2}[\omega_i^T B_i^T P_i e_i + e_i^T P_i B_i \omega_i] + \\ & \frac{1}{\mu_{1i}}[\dot{\tilde{w}}_{fi}^T + \mu_{1i} B_i^T P_i e_i \varphi_{fi}^T(\mathbf{x})]\tilde{w}_{fi} + \\ & \frac{1}{\mu_{2i}}[\dot{\tilde{w}}_{gii}^T + \mu_{2i} B_i^T P_i e_i u_i \varphi_{gii}^T(\mathbf{x})]\tilde{w}_{gii}. \end{aligned} \quad (17)$$

显而易见, 如果自适应律 $\dot{\tilde{w}}_{fi}$, $\dot{\tilde{w}}_{gii}$ 分别选择为

$$\begin{cases} \dot{\tilde{w}}_{fi} = -\mu_{1i} \varphi_{fi}(\mathbf{x}) B_i^T P_i e_i, \\ \dot{\tilde{w}}_{gii} = -\mu_{2i} \varphi_{gii}(\mathbf{x}) u_i B_i^T P_i e_i, \end{cases} \quad (18)$$

则Lyapunov函数的导数可以进一步简化为

$$\begin{aligned} \dot{V}_i = & -\frac{1}{2}e_i^T Q_i e_i - \frac{1}{2\kappa^2}e_i^T P_i B_i B_i^T P_i e_i + \\ & \frac{1}{2}(\omega_i^T B_i^T P_i e_i + e_i^T P_i B_i \omega_i). \end{aligned} \quad (19)$$

将上式中的后面两项配平方, 可以得到

$$\dot{V}_i \leq -\frac{1}{2}\lambda_{\min}(Q_i)\|e_i\|^2 + \frac{1}{2}\kappa^2\omega_i^2, \quad (20)$$

于是, 当满足条件

$$\|e_i\| \geq \kappa|\omega_i|\sqrt{\lambda_{\min}(Q_i)}, \quad (21)$$

可以得到

$$\dot{V}_i \leq 0. \quad (22)$$

将式(20)两边积分可以得到

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \int_0^T e_i^T Q_i e_i dt \leq \\ V(0) - V(T) + \frac{1}{2}\kappa^2 \int_0^T \omega_i^2 dt. \end{aligned} \quad (23)$$

由于 $V_i(t) \geq 0$ 可以得到

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \int_0^T e_i^T Q_i e_i dt \leq V(0) - V(T) + \frac{1}{2}\kappa^2 \int_0^T \omega_i^2 dt = \\ \frac{1}{2}e_i^T(0)P_i e_i(0) + \frac{1}{2\mu_{1i}}\tilde{w}_{fi}^T(0)\tilde{w}_{fi}(0) + \\ \frac{1}{2\mu_{2i}}\tilde{w}_{gii}^T(0)\tilde{w}_{gii}(0) + \frac{1}{2}\kappa^2 \int_0^T \omega_i^2 dt, \end{aligned} \quad (24)$$

即达到 H_∞ 跟踪性能指标. 同理 $V(t) = \sum_{i=1}^m V_i(t)$ 也满足 H_∞ 跟踪性能指标. 需要指出的是加权因子 η 与衰减水平常数 κ 有关. 对于一个任意小的 κ , 可选择一个加权因子 η , 使 $\eta \leq 2\kappa^2$, 但随着 η 减小, 控制量 u_i 增大, 控制能量增加, 所以实际工程中要在控制量与 H_∞ 跟踪性能指标之间作折衷处理.

4 AUV 三维路径跟踪仿真研究(Simulation of AUV 3D path following)

为了验证本文提出的算法的有效性, 采用文

献[12]中的模型参数进行了仿真研究. 设AUV从A点开始, 跟踪空间中一条直线 $BC(x=t, y=0, z=-10)$, 其中 $t \in (-\infty, +\infty)$, 给定AUV对于水的速度 2 m/s , 初始位置 $x_0 = 0, y_0 = -15, z_0 = -20$; 姿态角 $\theta_0 = 0, \psi_0 = -90, \varphi_0 = 0$; 速度为 $u_0 = 2, v_0 = 0.5, w_0 = 0.5$; 角速度 $p_0 = 0, q_0 = 0, r_0 = 0$. 在本文的研究中, 将整个AUV路径跟踪控制系统分成了3层(如图2所示), 由于篇幅所限, 在此仅以质心运动回路为例进行控制器设计, 姿态角回路和角速度回路的设计方法类似. 质心运动回路的输入为 $\mathbf{u}_1 = [\theta_e \ \psi_e]^T$, 输出为 $y_1 = [l_n \ l_b]^T$, 为2输入2输出非线性系统, 控制的目的是使得 l_n, l_b 收敛到零, 因此该回路参考输入为 $\mathbf{y}_m = [0 \ 0]^T$, 选择黎卡提方程中的矩阵 $\mathbf{Q}_1 = \mathbf{Q}_2 = \text{diag}\{15, 15\}$, $\eta = 0.005, k = 0.08, \mu_{1i} = 0.1; \mu_{2i} = 0.1; i = 1, 2, \mathbf{k}_1 = \mathbf{k}_2 = [2 \ 5]$, 根据黎卡提方程可以得到矩阵 $\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2$, 再代入式(18)和 u_{ri} 可以得到相应的自适应神经网络控制律及鲁棒控制律.

为了验证算法对流体动力参数的不确定的鲁棒性, 将 $X_u, X_{u|u|}, Y_v, Y_{v|v|}, N_r, N_{r|r|}$ 等项增加50%, 并进行了仿真, 同时, 为了比较本文所设计的控制算法和经典控制算法的特性, 同时采用PID控制算法进行了仿真, AUV的航迹如图3所示; AUV三维空间直线的路径跟踪位置、姿态角仿真结果如图4所示. 从图中可看出, 当模型参数发生50%摄动的时候, 本文所提出的非线性鲁棒自适应控制器(NRA)的动态特性仍然较好, 而PID控制器存在明显的稳态误差, 性能较差. 从仿真结果可以看出, 本章设计的AUV路径跟踪控制系统很好地实现了AUV对于三维空间中的直线进行跟踪, 在存在侧向和垂向以及航向角偏差的情况下, 使得AUV的航迹最终收敛于空间中给定的直线, 并且具有良好的控制性能.

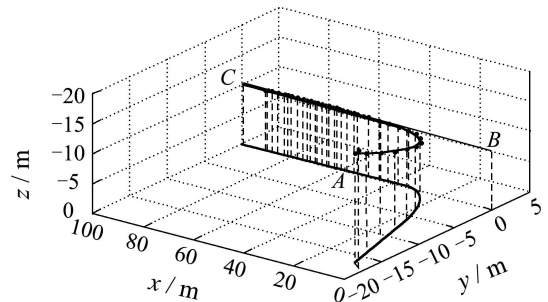


图3 AUV三维空间运动轨迹

Fig. 3 AUV motion trajectory in 3D space

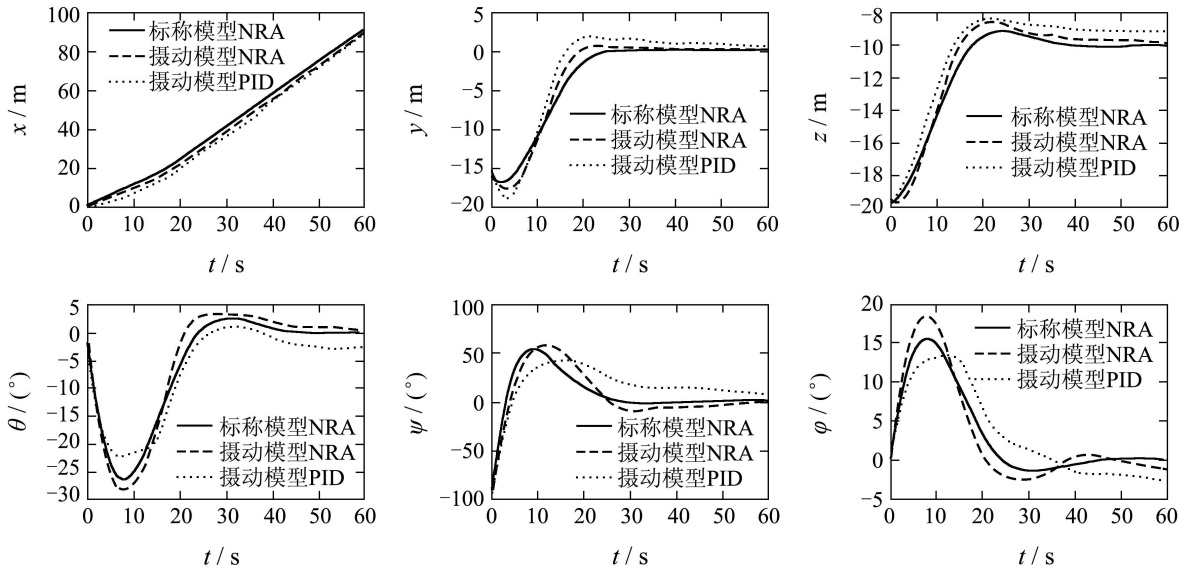


图4 AUV路径跟踪过程中的位置及姿态角

Fig. 4 AUV position and attitude in path following

5 结论(Conclusion)

AUV是一个典型的MIMO强耦合不确定非线性系统。 H_∞ 鲁棒控制对外界干扰和未建模动态补偿具有良好的性能,因此将动态逆控制、神经网络自适应控制和 H_∞ 鲁棒控制方法结合起来设计全驱动AUV非线性系统的控制。本文选择Serret-Frenet坐标系描述了AUV三维空间路径跟踪问题,推导出适合路径跟踪控制系统设计的仿射形非线性数学模型;根据时标分离原理,将路径跟踪控制系统划分为质心运动回路和姿态稳定回路,结合动态逆控制、神经网络自适应控制、 H_∞ 鲁棒控制的方法,分别设计了路径控制器和自动驾驶仪,并证明了该控制系统的稳定性,仿真研究验证了路径跟踪控制算法的有效性。

参考文献(References):

- [1] 刘杨, 郭晨, 沈智鹏, 等. 欠驱动船舶路径跟踪的神经网络稳定自适应控制[J]. 控制理论与应用, 2010, 27(2): 169 – 174. (LIU Yang, GUO Chen, SHEN Zhipeng, et al. Stable adaptive neural network control of path following for underactuated ships[J]. *Control Theory & Applications*, 2010, 27(2): 169 – 174.)
- [2] DO K D, PAN J. Global robust adaptive path following of underactuated ships[J]. *Automatica*, 2006, 42(10): 1713 – 1722.
- [3] DO K D, PAN J. Global tracking control of underactuated ships with nonzero off-diagonal terms in their system matrices[J]. *Automatica*, 2006, 41(1): 87 – 95.
- [4] DO K D, PAN J. Practical control of underactuated ships[J]. *Ocean Engineering*, 2010, 37(13): 1111 – 1119.
- [5] DRAGAN B. Path-following for nonlinear systems with unstable zero dynamics[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2007, 52(3): 481 – 487.
- [6] PEDRO AGUIAR A. Performance limitations in reference tracking and path following for nonlinear systems[J]. *Automatica*, 2008, 44(3): 598 – 610.
- [7] PEDRO AGUIAR A. Trajectory-tracking and path-following of underactuated autonomous vehicles with parametric modeling uncertainty[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2007, 52(8): 1362 – 1379.
- [8] 马岭, 崔维成. 基于模糊混合控制的自治水下机器人路径跟踪控制[J]. 控制理论与应用, 2006, 23(3): 341 – 346. (MA Ling, CUI Weicheng. Path following control of autonomous underwater vehicle based upon fuzzy hybrid control[J]. *Control Theory & Applications*, 2006, 23(3): 341 – 346.)
- [9] JAMES B. Optimal kinematic control of an autonomous underwater vehicle[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2009, 54(7): 1623 – 1626.
- [10] SO-RYEOK OH. Path following of underactuated marine surface vessels using line-of-sight based model predictive control[J]. *Ocean Engineering*, 2010, 37(3): 289 – 295.
- [11] BORHAUG E, PANTELEY E. Straight line path following for formations of underactuated marine surface vessels[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2010, 23(4): 134 – 143.
- [12] PENCARNACAO A. Pascoal 3D path following for autonomous underwater vehicle[C] // *Proceedings of the 39th IEEE Conference on Decision and Control*. New York: IEEE, 2005: 182 – 187.
- [13] 刘国荣, 万百五. 一类非线性MIMO系统的直接自适应模糊鲁棒控制[J]. 控制理论与应用, 2002, 19(5): 693 – 698. (LIU Guorong, WAN Baiwu. Direct adaptive fuzzy robust control for a class of nonlinear MIMO systems[J]. *Control Theory & Applications*, 2002, 19(5): 693 – 698.)

作者简介:

葛 晖 (1978—), 男, 博士, 现在上海交通大学做博士后研究, 研究方向为空间运动体的导航制导与控制, E-mail: gehui-2010@sjtu.edu.cn;

敬忠良 (1960—), 男, 博士, 教授, 长江学者, 研究方向为目标跟踪、智能信息融合与控制, E-mail: zljing@sjtu.edu.cn;

高 剑 (1979—), 男, 副教授, 研究方向为导航制导与控制, E-mail: gaojian@nwpu.edu.cn.