

文章编号:1005-9865(2018)06-0069-08

基于分布式控制力矩陀螺的水下航行器轨迹跟踪控制

黄道敏^{1,2}, 徐瑞昆¹, 唐国元¹, 冯 雷³, 刘 智³, 徐国华¹

(1. 华中科技大学 船舶与海洋工程学院, 湖北 武汉 430074; 2. 武汉空军预警学院, 湖北 武汉 430010;
3. 武汉第二船舶设计研究所, 湖北 武汉 430064)

摘 要: 基于控制力矩陀螺群(CMGs)的水下航行器具有低速或零速机动的能力。采用基于分布式 CMGs 的水下航行器方案, 并研究其水平面的轨迹跟踪控制问题。通过全局微分同胚变换将非完全对称的动力学模型解耦成标准欠驱动控制模型, 并根据简化的模型构建其轨迹跟踪的误差动力学模型, 将轨迹跟踪控制问题转化为误差模型镇定问题。基于一种分流神经元模型和反步法设计了系统的轨迹跟踪控制律, 该控制器不需要对任何虚拟控制输入进行求导计算, 且能确保跟踪误差的最终一致有界性。仿真结果表明该控制器能够实现在不依赖动力学参数先验知识的情况下对光滑轨迹的有效跟踪。

关键词: 分布式; 控制力矩陀螺; 水下航行器; 轨迹跟踪控制; 路径规划; 反步法

中图分类号: U674.76 **文献标志码:** A **DOI:** 10.16483/j.issn.1005-9865.2018.06.008

Trajectory tracking control of underwater vehicle based on distributed control moment gyros

HUANG Daomin^{1,2}, XU Ruikun¹, TANG Guoyuan¹, FENG Lei³, LIU Zhi³, XU Guohua¹

(1. School of Naval Architecture & Ocean Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. Air Force Early-Warning Academy, Wuhan 430064, China; 3. Wuhan Second Ship Design and Research Institute, Wuhan 430064, China)

Abstract: The underwater vehicle equipped with control moment gyros (CMGs) has the capability to maneuver at a low or zero speed. The scheme of an underwater vehicle based on the distributed CMGs is adopted, and its trajectory tracking control problem is considered in the horizontal plane. A global diffeomorphism transformation is used to decouple the incomplete symmetry dynamic model to the normal underactuated control model, and then the trajectory tracking error dynamic model, built based on the simplified model, is employed to transform the trajectory tracking control problem into the stabilization problem of the error system. Based on a shunting neural dynamic model and backstepping techniques, the trajectory tracking control law is developed without any derivative calculations of virtual control inputs and can guarantee the tracking errors to be semi-globally uniformly bounded. Finally, simulation results illustrate the performance and effectiveness of the proposed controller, which is capable of tracking smooth trajectories with no prior knowledge of the dynamic parameter.

Keywords: distributed style; control moment gyros; underwater vehicle; trajectory tracking control; path planning; backstepping

作为一种重要的水下运载工具,水下航行器是机器人与先进制造技术在水下的特殊应用,其精确的轨迹跟踪能力是完成水下勘探、搜救和水下特种作业等任务的技术基础^[1]。通常在设计水下航行器的姿态控制

收稿日期:2018-04-18

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助(2018KFYYXJJ012);湖北省自然科学基金(2016CFB305);海洋防务技术创新中心创新基金资助

作者简介:黄道敏(1971-),女,安徽凤阳人,博士研究生,主要水下机器人及水下作业系统的研究。E-mail: Daominhuang@163.com

通信作者:唐国元。E-mail: tgyuan@hust.edu.cn

系统时会采用外置的舵和桨作为执行机构。舵需要在航行器具有一定速度时才有明显舵效,当速度降低时则往往用桨来控制姿态,二者均依赖于与流体的相互作用所产生的动力。而作为内置式姿态控制执行机构,控制力矩陀螺(CMGs)与传统外置式的舵桨不同,其不依赖于流体的相对运动,而是通过较小的框架转动改变飞轮动量的方向来产生力矩,且具有突出的力矩放大能力^[2],合理的 CMGs 构型可以提供三个方向的力矩,能够实现任意姿态角的机动。CMGs 也使航行器具有零速状态下的姿态控制能力,且由于内置,可避免外界流场影响,实现水下航行器在狭小空间内的作业,同时避免螺旋桨工作时带来的噪声。Thornton 等^[3]已对该类航行器开展了初步研究。

控制力矩陀螺装置已经成功应用于航空航天领域^[4],但尚未能在水下航行器领域实现工程应用^[5-6]。其中困难之一在于 CMGs 的配置优化问题。由于水下航行器宝贵的内部空间,若按航空航天领域常用的构型来配置 CMGs,往往会占用航行器内部较大空间,给航行器的设计带来困难。其二是对于轨迹跟踪控制问题,需要通过联合姿态控制及推进控制得以实现,而其内置式姿态控制机构本身具有较多控制量导致航行器的轨迹跟踪变得较复杂。

Hu 等^[7]在注意到 CMGs 奇异性与操纵律的设计问题时,提出采用分布式 CMGs 执行器来实现挠性航天器姿态机动控制。分布式 CMGs 的配置方案使 CMGs 系统的各框架控制力矩陀螺并不集中布置在一起,而是分布于航行器内的不同部位,从而尽量节约航行器内部空间。

在航行器轨迹跟踪控制方面,Thornton 等^[3]虽然提出了基于控制力矩陀螺的航行器姿态控制方法并进行了试验研究,但没有开展轨迹跟踪研究。针对自治式水下航行器水平面轨迹控制,曹永辉等^[8]提出采用横向轨迹误差法和视线法组合导引的控制策略,确保 AUV 可进行各种循迹航行任务。万磊等^[9]通过两次全局微分同胚变换简化了控制模型,并基于级联系统理论和 Lyapunov 直接法设计了控制器,实现了非完全欠驱动高速无人艇的跟踪控制。Zheng 等^[10]利用简化的线性模型预测控制和非线性模型预测控制算法对水平面的船舶进行轨迹跟踪控制,但未考虑干扰对控制效果的影响。针对 AUV 在平面轨迹跟踪控制的学习能力问题,曾德伟等^[11]基于 RBF 神经网络结合反步法和确定学习理论设计了一种自适应神经网络控制器,在满足持续激励的条件下,从动态模式中学到的知识进行静态保存,提取存储知识设计学习控制器,实现了对参考轨迹更加快速精确地跟踪。针对欠驱动 AUV, Ji 等^[12]提出了在参数不确定条件下的航行器的路径跟踪方法。杨则文等^[13]则对欠驱动 AUV 水平面轨迹跟踪控制中的非完整约束问题,基于高增益观测器与反步法控制策略在保证跟踪精度的前提下解决了模型中的耦合性和外部干扰问题。耦合 CMGs 动力学的水下航行器是一个非完全欠驱动模型,通过引入全局微分同胚变换实现了标准欠驱动模型解耦,基于一种分流神经元模型和反步法设计了轨迹跟踪控制器,避免了虚拟输入的高阶导数计算,通过仿真验证了所设计控制律的有效性。

1 基于分布式控制力矩陀螺的水下航行器

控制力矩陀螺(CMG)是利用框架的转动来改变飞轮动量的方向,从而产生力矩。如图 1 所示,飞轮在绕自身轴转动的同时,框架带动飞轮转动,迫使飞轮的旋转轴方向在空间发生改变,飞轮角动量进动将产生陀螺反作用力矩(简称陀螺力矩)作用在框架基座上,陀螺力矩等于框架转速矢量($\boldsymbol{\Omega}_f$)与飞轮角动量矢量($\boldsymbol{L}_f$)的叉积,其方向沿角动量变化的负方向^[2]。多个控制力矩陀螺按一定构型组成控制力矩陀螺群(CMGs)^[3],如图 2 是三棱锥构型示意图。

与传统的舵桨联合执行姿态控制的水下航行器不同,利用多个框架飞轮系统按一定几何构型可组成响应速度不依赖于流体动力的水下航行器姿态控制机构,其具有空间力矩输出能力。基于内置分布式 CMGs 的水下航行器可装配三个以上的 CMG(如图 3 所示)以联合提供姿态控制所需力矩,辅以螺旋桨增加其敏捷性与机动能力来确保水下航行器应对各种水下环境作业的能力。航行器中段部分用于容纳 CMGs、电源和控制器,电源分别与 CMGs 和控制器连接,三个 CMG 在壳体内采用分散布置方式,可事实上形成如图 2 所示的三棱锥构型。

相较于飞轮和滑动质量块,CMGs 可以利用较小的框架运动来实现大角度姿态控制^[5],因此当水下航行器处于零速状态时,其姿态控制所需的力矩可完全由 CMGs 产生^[3],可实现狭小空间与复杂流场中作业,当航行器以大于零速的速度航行时,可由螺旋桨和 CMGs 联合作用保持水下航行器的高效机动性,即由螺旋桨

提供纵向推进力,姿态与航向控制由分布式 CMGs 实现。

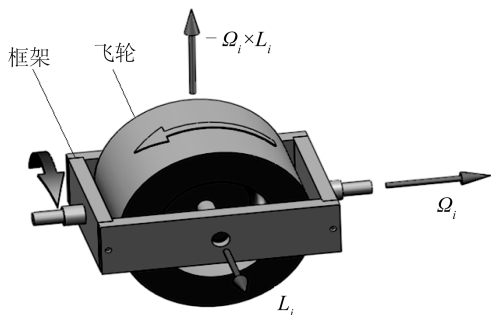


图 1 CMG 力矩输出示意

Fig. 1 Diagram of the CMG moment output

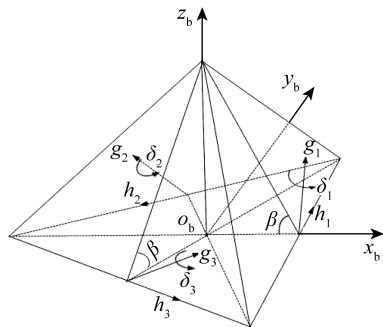


图 2 三棱锥 CMGs 构型

Fig. 2 Triangular pyramid CMGs configuration

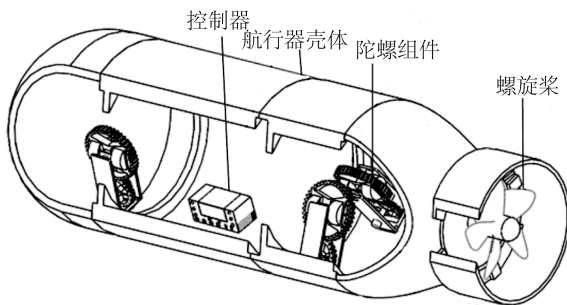


图 3 基于分布式控制力矩陀螺的水下航行器

Fig. 3 Underwater vehicle based on distributed CMGs

2 水下航行器水平面运动模型

2.1 运动学和动力学模型

针对基于三个分布式 CMGs 的水下航行器的水平面轨迹跟踪控制,即忽略航行器所有垂直面的运动作用。当三个 CMGs 呈分布式安装时,最终形成三棱锥构型(如图 2 所示)。系统的运动学模型可以写成如下形式

$$\dot{\boldsymbol{\eta}} = \mathbf{R}(\varphi) \mathbf{v} \quad (1)$$

式中: \$\boldsymbol{\eta} = [x, y, \varphi]^T\$ 表示航行器在惯性系下的纵向位移、横向位移和艏向角,旋转矩阵 \$\mathbf{R}(\varphi)\$ 定义为

$$\mathbf{R}(\varphi) = \begin{bmatrix} \cos\varphi & -\sin\varphi & 0 \\ \sin\varphi & \cos\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

\$\mathbf{v} = [u, v, r]^T\$ 表示随体系航行器纵荡、横荡线速度和偏航角速度向量。

基于分布式控制力矩陀螺的水下航行器动力学模型为^[14]

$$\mathbf{M}\dot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}(\mathbf{v})\mathbf{v} + \mathbf{D}\mathbf{v} = \boldsymbol{\tau} \quad (3)$$

式中: \$\mathbf{M}\$ 为惯性系数矩阵, \$\mathbf{C}(\mathbf{v})\$ 为哥氏力和向心力矩阵, \$\mathbf{D}\$ 为阻尼系数矩阵。 \$\boldsymbol{\tau} = [\tau_u, 0, \tau_r]\$ 为控制输入向量, \$\tau_u\$ 为螺旋桨推进力, \$\tau_r\$ 为控制力矩陀螺机构提供的偏航力矩^[4]。上式展开可得

$$\begin{cases} \dot{u} = [X_u|_u|u| + X_{uv}vr + X_{ur}r^2 + \tau_u]/m_{11} \\ \dot{v} = [m_{33}f(v) - m_{23}f(r) - m_{23}\tau_r]/N \\ \dot{r} = [m_{23}f(r) - m_{33}f(v) + m_{22}\tau_r]/N \end{cases} \quad (4)$$

式中: \$f(v) = Y_{uv}uv + Y_{ur}ur + Y_{v|v}|v| + Y_{r|r}|r|\$, \$f(r) = N_{uv}uv + N_{ur}ur + N_{v|v}|v| + N_{r|r}|r|\$, \$N = m_{22}m_{33} - m_{23}m_{32}\$; 惯性矩阵 \$\mathbf{M}\$ 的分量为 \$m_{11} = m - X_{\ddot{u}}\$, \$m_{22} = m - Y_{\ddot{v}}\$, \$m_{23} = -Y_{\ddot{r}}\$, \$m_{32} = -N_{\ddot{v}}\$, \$m_{33} = I_z - N_{\ddot{r}}\$, \$m\$ 为装配有陀螺机构的水下航行器总质量, \$I_z\$ 为航行器本体绕着运动坐标系 \$z\$ 轴的转动惯量。

2.2 全局微分同胚变换

由于该水下航行器的惯性矩阵非对角元素不全为零,得到式(4)为非完全欠驱动模型,该水下航行器的横荡速度和艏摇角速度都受到控制力矩陀螺机构提供的控制力矩影响,相比一般的欠驱动水下航行器具有更强的不确定性的动态特性,给系统的误差动力学分析与控制器的设计带来了很大的困难。现引入全局微分同胚变换如下:

$$\begin{cases} z_1 = x + \lambda(\cos\varphi - 1) \\ z_2 = y + \lambda\sin\varphi \\ z_3 = \varphi \\ z_4 = u \\ z_5 = v + \lambda r \\ z_6 = r \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\lambda = m_{23}/m_{22}$ 。为方便计,使用相同符号表示相关运动参数,则经同胚变换后的水下航行器运动学与动力学方程可分别表示为

$$\begin{cases} \dot{x} = u\cos\varphi - v\sin\varphi \\ \dot{y} = u\sin\varphi + v\cos\varphi \\ \dot{\varphi} = r \end{cases} \quad (6)$$

和

$$\begin{cases} \dot{u} = [F(u) + \tau_u]/m_{11} \\ \dot{v} = F(v)/m_{22} \\ \dot{r} = [m_{22}F(r) - m_{32}F(v) + m_{22}\tau_r]/N \end{cases} \quad (7)$$

式中: $F(u) = X_u|u| + X_{ur}(v - \lambda r)r + X_{rr}r^2$, $F(v) = Y_{uv}u(v - \lambda r) + Y_{ur}ur + Y_{vv}|v - \lambda r| + Y_{vr}|r|$, $F(r) = N_{uv}u(v - \lambda r) + N_{ur}ur + N_{vv}|v - \lambda r| + N_{vr}|r|$ 。

3 控制器的设计

3.1 轨迹跟踪误差模型

基于变换后的水下航行器运动学与动力学模型,对于假定的有界连续可微的运动轨迹 $P = [x, y]$,给出相应的控制输入与运动参数假设。

假设:存在控制输入与速度约束 $|\tau_u| \leq \bar{\tau}_u$, $|\tau_r| \leq \bar{\tau}_r$, $|u| \leq \bar{u}$, $|v| \leq \bar{v}$ 和 $|r| \leq \bar{r}$, 其中 $\bar{\tau}_u, \bar{\tau}_r, \bar{u}, \bar{v}$ 和 $\bar{r}$ 为正常数。

考虑被跟踪艇的运动学与动力学方程为^[15]

$$\begin{cases} \dot{x}_d = u_d \cos\psi_d - v_d \sin\psi_d \\ \dot{y}_d = u_d \sin\psi_d + v_d \cos\psi_d \\ \dot{\psi}_d = r_d \\ \dot{u}_d = (\bar{m}_{22}v_d r_d - \bar{X}_u u_d - \bar{X}_{u|u}|u_d| + T_u)/\bar{m}_{11} \\ \dot{v}_d = (-\bar{m}_{11}u_d r_d - \bar{Y}_v v_d - \bar{Y}_{v|v}|v_d|)/\bar{m}_{22} \\ \dot{r}_d = [- (\bar{m}_{22} - \bar{m}_{11})u_d v_d - \bar{N}_r r_d - \bar{N}_{r|r}|r_d| + T_r]/\bar{m}_{33} \end{cases} \quad (8)$$

式中: T_u 为被跟踪艇的控制力; T_r 为其控制力矩; $\bar{m}_{(\cdot)}$, $\bar{X}_{(\cdot)}$, $\bar{Y}_{(\cdot)}$, $\bar{N}_{(\cdot)}$ 为被跟踪艇水动力参数,其数值详见下文表 2,其他符号意义详见文献[15]。

定义运动坐标系下航行器的位置与姿态误差变量为

$$\begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ \varphi_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\varphi & \sin\varphi & 0 \\ -\sin\varphi & \cos\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x - x_d \\ y - y_d \\ \varphi - \varphi_d \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中: $\varphi_d = \arctan(\dot{y}_d/\dot{x}_d)$ 只依赖于参考被跟踪艇的位置信息。定义航行器的速度跟踪误差为 $u_e = u - u_d$, $v_e = v - v_d$, $r_e = r - r_d$ 。根据式(6),对位置误差变量求导有

$$\begin{cases} \dot{x}_e = u - v_p \cos\varphi_e + r y_e \\ \dot{y}_e = v + v_p \sin\varphi_e - r x_e \end{cases} \quad (10)$$

式中: $v_p = \sqrt{\dot{x}_d^2 + \dot{y}_d^2}$ 。

基于误差运动学分析,下面基于一种分流神经元模型和反步设计方法来实现装配有分布式 CMGs 的水下航行器水平面轨迹跟踪控制。

3.2 分流神经元模型

分流神经元模型已经成功应用于实时路径规划,移动机器人跟踪与控制^[16-18],其一般模型可表示为

$$\dot{\zeta}_i = -A\zeta_i + (B - \zeta_i)\xi_i^+(t) - (C + \zeta_i)\xi_i^-(t) \quad (11)$$

式中: ζ_i 为第 i 个神经元的膜电位,非负常数 A, B, C 表示其被动衰变率,变量 $\xi_i^+(t)$ 表示神经元总外部正输入, $\xi_i^-(t)$ 表示为神经元的总外部负输入。水下航行器的轨迹跟踪控制器的设计主要是基于上述式(11)的分流神经元动力学模型与反步法设计技巧。

3.3 控制器的设计

为镇定航行器位置误差,定义下面的 Lyapunov 函数:

$$V_1 = \frac{1}{2}(x_e^2 + y_e^2) \quad (12)$$

对上式求导,并将式(10)代入得

$$\dot{V}_1 = x_e(u - v_p \cos\varphi_e) + y_e(v + v_p \sin\varphi_e) \quad (13)$$

与传统的反步法设计法利用 φ_e 来镇定误差 y_e 不同,为避免初始状态引起的奇异问题,这里引入虚拟速度变量 $w = v_p \sin\varphi_e$,为使 $\dot{V}_1$ 变负,选择 u 作为虚拟控制输入。相应地,它们的期望值定义为

$$\begin{cases} \hat{u}_d = -k_1 x_e/E + v_p \cos\varphi_e \\ \hat{w}_d = -k_2 y_e/E - v \end{cases} \quad (14)$$

式中: k_1, k_2 为正常数; $E = \sqrt{1 + x_e^2 + y_e^2}$ 。为避免对虚拟控制输入期望值 $\hat{u}_d, \hat{w}_d$ 求导带来项数膨胀问题,利用式(11)的分流神经元模型,得到虚拟控制输入 u_i, w_i 的导数。

$$\begin{cases} \dot{u}_i = -A_1 u_i + (B_1 - u_i)g^+(\hat{u}_d) - (C_1 + u_i)g_-(\hat{u}_d) \\ \dot{w}_i = -A_2 w_i + (B_2 - w_i)g^+(\hat{w}_d) - (C_2 + w_i)g_-(\hat{w}_d) \end{cases} \quad (15)$$

式中: $A_i (i = 1, 2)$ 为非负常数; B_1, C_1 分别表示 u_i 的上界与下界; B_2, C_2 分别表示 w_i 的上界与下界。函数 $g^+(x), g_-(x)$ 分别定义为 $g^+(x) = \max\{x, 0\}$, $g_-(x) = \max\{-x, 0\}$ 。由此,得到新引入虚拟控制输入的误差变量 $\kappa_u = u_i - \hat{u}_d$, $\delta_u = u - u_i$, $\kappa_w = w_i - \hat{w}_d$, $\delta_w = w - w_i$ 。由此,式(13)可化简为

$$\dot{V}_1 = -(k_1 x_e^2 + k_2 y_e^2)/E + (\kappa_u + \delta_u)x_e + (\kappa_w + \delta_w)y_e \quad (16)$$

考虑到引入的 w_d 为虚拟控制输入,为实现其误差 δ_w 和艏向角 φ_e 的镇定,将偏航角速度 r 作为虚拟控制输入,构造下面的 Lyapunov 函数:

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2}\delta_w^2 + \frac{1}{2}\varphi_e^2 \quad (17)$$

对 Lyapunov 函数 V_2 求导,结合上述定义,将式(6)代入得

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 = & -(k_1 x_e^2 + k_2 y_e^2)/E + (\kappa_u + \delta_u)x_e + \delta_w(y_e + \dot{v}_p \sin\varphi_e - \dot{w}_i) + \\ & \kappa_w y_e + (r - \dot{\varphi}_d)(\varphi_e + \delta_w v_p \cos\varphi_e) \end{aligned} \quad (18)$$

根据上式,容易选取虚拟控制输入 r 的期望值为 $\hat{r}_d = -k_3(\varphi_e + \delta_w v_p \cos \varphi_e) + \dot{\varphi}_d$ 。同时,注意到虚拟控制输入 r 的引入,相似地,由式(11)得到

$$\dot{r}_t = -A_3 r_t + (B_3 - r_t)g^+(\hat{r}_d) - (C_3 + r_t)g_-(\hat{r}_d) \tag{19}$$

式中:参数 A_3, B_3, C_3 的定义与式(15)类似,并得到其误差变量为 $\kappa_r = r_t - \hat{r}_d, \delta_r = r - r_t$,则有 $r = \hat{r}_d + (\kappa_r + \delta_r)$ 。对新引入的误差变量 δ_u, δ_r 求得

$$\begin{cases} \dot{\delta}_u = [F(u) + \tau_u]/m_{11} - \dot{u}_t \\ \dot{\delta}_r = [m_{22}F(r) - m_{32}F(v) + m_{22}\tau_r]/N - \dot{r}_t \end{cases} \tag{20}$$

为镇定 Lyapunov 函数 V_2 的导数中包含的误差项 δ_u 和 δ_r ,考虑下面的 Lyapunov 函数

$$V_3 = V_2 + \frac{1}{2}\delta_u^2 + \frac{1}{2}\delta_r^2 \tag{21}$$

对上式求导,将式(20)代入得

$$\begin{aligned} \dot{V}_3 = & -(k_1 x_e^2 + k_2 y_e^2)/E - k_3(\varphi_e + \delta_w v_p \cos \varphi_e)^2 + \delta_u(\tau_u + x_e + F(u) - m_{11}\dot{u}_t)/m_{11} + \\ & \delta_r[m_{22}\tau_r + m_{22}F(r) - m_{32}F(v) + N(\varphi_e + \delta_w v_p \cos \varphi_e - \dot{r}_t)]/N + \sigma \end{aligned} \tag{22}$$

式中: $\sigma = \kappa_u x_e + \kappa_w y_e + \delta_w(y_e + \dot{v}_p \sin \varphi_e - \dot{w}_t) + \kappa_r(\varphi_e + \delta_w v_p \cos \varphi_e)$ 。由此,容易选取控制输入 τ_u, τ_r 为

$$\begin{cases} \tau_u = -k_4 \delta_u - x_e - F(u) + m_{11}\dot{u}_t \\ \tau_r = -k_5 \delta_r - \varphi_e - \delta_w v_p \cos \varphi_e + \dot{r}_t - F(r) + m_{32}F(v)/m_{22} \end{cases} \tag{23}$$

从而式(22)变为

$$\begin{aligned} \dot{V}_3 = & -(k_1 x_e^2 + k_2 y_e^2)/E - k_3(\varphi_e + \delta_w v_p \cos \varphi_e)^2 + \sigma \\ \leq & -(k_1 x_e^2 + k_2 y_e^2)/E - 2k_3 \varphi_e \delta_w v_p \cos \varphi_e + \sigma \end{aligned} \tag{24}$$

基于上述反步法设计可知,通过分流神经元模型的引入避免了对虚拟控制输入期望值 $\hat{u}_d, w_d, \hat{r}_d$ 的导数计算,简化了控制器的设计,但由控制输入 τ_u, τ_r 的表达式易知,它需要较为精确的水动力参数,考虑到 σ 为有界小量,可以证明通过选择合适的控制参数,该控制器可以保证轨迹跟踪的误差最终一致有界性^[18],即确保整个控制系统的全局渐近稳定性。

4 仿真分析

为验证所提出控制器对该水下航行器在水平面进行轨迹跟踪控制的有效性,对其进行仿真分析研究。水下航行器的水动力学参数由 Prestero^[19]实验获得(见表1),被跟踪艇水动力参数参考文献[15](见表2)。

表 1 航行器水动力参数

Tab. 1 Hydrodynamic parameters of the underwater vehicle

参数	数值	参数	数值	参数	数值
m/kg	31.4	$I_z/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	3.45	X_u/kg	-0.93
Y_v/kg	-35.5	$Y_r/(\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{-1})$	1.93	$N_v/(\text{kg} \cdot \text{m})$	1.93
$N_r/(\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{rad}^{-1})$	-4.88	$X_{u u }/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-1})$	-1.62	$X_{ur}/(\text{kg} \cdot \text{rad}^{-1})$	35.5
$X_{rr}/(\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{-1})$	-1.93	$Y_{v v }/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-1})$	-1 310	$Y_{r r }/(\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{-2})$	-6.32
$Y_{ur}/(\text{kg} \cdot \text{rad}^{-1})$	5.22	$Y_{ww}/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-1})$	-28.6	$N_{v v }/\text{kg}$	-3.18
$N_{r r }/(\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{rad}^{-2})$	-94	$N_{ur}/(\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{-1})$	-2	N_{ww}/kg	-24

相应的控制器参数设置为: $k_1 = 5, k_2 = 150, k_3 = 12, k_4 = k_5 = 0.01, A_1 = A_2 = A_3 = 10, B_1 = C_1 = 5, B_2 = C_2 = 15, B_3 = C_3 = 15$ 。该水下航行器初始位置和方向设置为: $x(0) = 1 \text{ m}, y(0) = 2 \text{ m}, \varphi(0) = \pi/4 \text{ rad}$; 初始线速度和角速度设置为: $u(0) = 0, v(0) = 0, r(0) = 0$ 。被跟踪艇的初始位置和方向设置为: $x_d(0) = 2 \text{ m}, y_d(0) = 2 \text{ m}, \psi(0) = \pi/2 \text{ rad}$, 其初始线速度和角速度设置为: $u_d(0) = 2 \text{ m/s}, v_d(0) = 1 \text{ m/s}, r_d(0) = 0$, 且控制力 $T_u = 50 \text{ N}$, 控制力矩 T_r 为

$$T_r = \begin{cases} 0, & t < 40 \text{ s} \\ 10 \text{ N} \cdot \text{m}, & t \geq 40 \text{ s} \end{cases} \quad (25)$$

表 2 被跟踪艇水动力参数

Tab. 2 Hydrodynamic parameters of the mother submarine

参数	数值	参数	数值	参数	数值
$\bar{m}_{11}/\text{kg}$	215	$\bar{m}_{22}/\text{kg}$	265	$\bar{m}_{33}/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	80
$\bar{X}_u/(\text{kg} \cdot \text{s}^{-1})$	70	$\bar{X}_u _u/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-1})$	100	$\bar{Y}_v/(\text{kg} \cdot \text{s}^{-1})$	100
$\bar{Y}_v _v/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-1})$	200	$\bar{N}_r/(\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	50	$\bar{N}_r _r/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	100

如图 4 所示,该水下航行器实现了有限时间内对被跟踪艇轨迹的快速跟踪,且由图 5 其位置和艏向角响应曲线可知,除了艏向角跟踪有较小误差外,该水下航行器跟踪被跟踪艇效果良好。事实上,由于控制器的设计仅依赖于被跟踪艇的位置信息,其定义艏向角的跟踪误差如式(9)所示,与被跟踪艇实际艏向角的误差存在一个漂角差,可记为 ϕ ,可以证明该角正切值为 $\tan\phi = v_d/u_d$ 。随着时间的变化,该角也是航行器对被跟踪艇实现稳定位置跟踪后艏向角的误差来源。

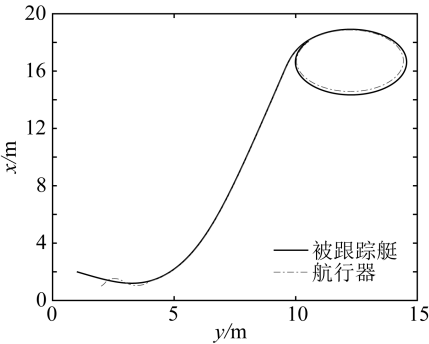


图 4 航行器水平面轨迹跟踪

Fig. 4 Trajectory tracking for the vehicle in xy plane

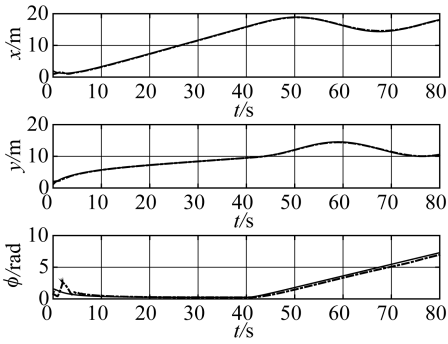


图 5 航行器位置和方向响应曲线

Fig. 5 Position and heading angle response of the vehicle

从图 6 可以看到,纵向速度跟踪效果良好,但是横向速度和偏航角速度存在较小误差,这正是由控制器设计时仅依赖被跟踪艇位置信息对其艏向角进行估计造成的。通过该控制器反步法的设计可知,控制输入 τ_u 和 τ_r 是间接对横移进行控制,并由图 4 得到最后稳定跟踪阶段被跟踪艇的轨迹为圆,受到艏向角误差影响和欠驱动控制效果的耦合作用,最后航行器与被跟踪艇的横向速度误差稳定值约为 0.15 m/s,图 7 为该水下航行器的控制力和由 CMGs 提供的控制力矩。

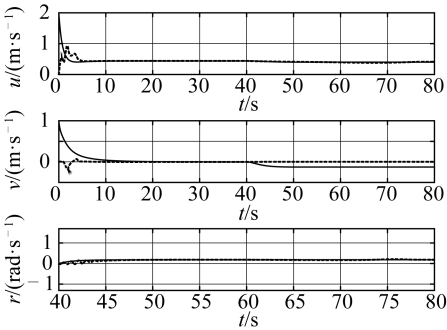


图 6 航行器线速度和角速度响应曲线

Fig. 6 Linear and angular velocity response of the vehicle

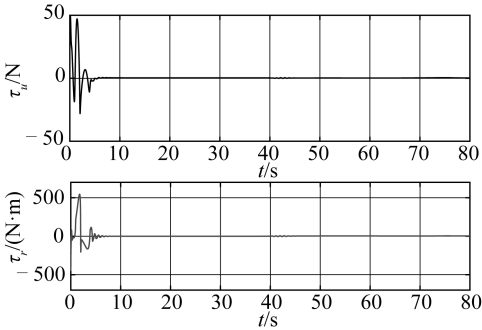


图 7 航行器控制输入

Fig. 7 Control inputs of the vehicle

5 结 语

讨论了基于分布式 CMGs 水下航行器的设计与其水平面跟踪控制问题,经过模型分析引入了全局微分同胚变换实现了欠驱动模型的解耦,并基于反步法和一种分流神经元模型简化了控制器的设计,避免传统反

步法对引入虚拟控制输入的导数计算。同时,该控制器的设计仅依赖于被跟踪艇的位置信息,其全局渐近稳定性可由 Lyapunov 稳定性理论保证,仿真结果验证了该控制器的有效性。注意到该控制器的设计较为依赖于航行器水动力学参数的精确性,后续的工作可在有水下干扰和模型参数不确定的情况下对耦合 CMGs 动力学特性的水下航行器进一步展开控制研究。

参考文献:

- [1] 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. Tehnology development of autonomous ocean vehicle[J]. Acta Automatica Sinica, 2007, 33(5): 518-521. (in Chinese))
- [2] LAPPAS V J, STYN W H, UNDERWOOD C I. Torque amplification of control moment gyros[J]. Electronics Letters, 2002, 38(15): 837-839.
- [3] THORNTON B, URA T, NOSE Y, et al. Zero-G class underwater robots: unrestricted attitude control using control moment gyros[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2007, 32(3): 565-583.
- [4] 吴忠, 吴宏鑫. “和平号”空间站 SGCMG 系统及其操纵[J]. 航天控制, 1999(2): 76-80. (WU Zhong, WU Hongxin. SGCMG system and its steering of the mir space station[J]. Aerospace Control, 1999(2): 76-80. (in Chinese))
- [5] 连伦, 吴忠. 基于控制力矩陀螺的水下运载器动力学与仿真[J]. 北京航空航天大学学报, 2010, 36(9): 1108-1112. (LIAN Lun, WU Zhong. Dynamics and simulation of autonomous underwater vehicle based on control moment gyros[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2010, 36(9): 1108-1112. (in Chinese))
- [6] XU Ruikun, TANG Guoyuan, XIE De, et al. Underactuated tracking control of underwater vehicles using control moment gyros[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2018; 10.1177/1729881417750759.
- [7] HU Q, GUO C, ZHANG J. Singularity and steering logic for control moment gyros on flexible space structures[J]. Acta Astronautica, 2017, 137: 261-273.
- [8] 曹永辉, 石秀华. 水下航行器轨迹跟踪控制与仿真[J]. 计算机仿真, 2006, 23(7): 19-21. (CAO Yonghui, SHI Xiuhua. Trajectory tracking control and simulation of AUV[J]. Computer Simulation, 2006, 23(7): 19-21. (in Chinese))
- [9] 万磊, 董早鹏, 李岳明, 等. 非完全对称欠驱动高速无人艇轨迹跟踪控制[J]. 电机与控制学报, 2014, 18(10): 95-103. (WAN Lei, DONG Zaopeng, LI Yueming, et al. Trajectory tracking control of incomplete symmetry underactuated USV at high speed[J]. Electric Machines and Control, 2014, 18(10): 95-103. (in Chinese))
- [10] ZHENG H R, NEGENBORN R R, LODEWIJKS G. Trajectory tracking of autonomous vessels using model predictive control[J]. World Congress, 2014, 47(3): 8812-8818.
- [11] 曾德伟, 吴玉香, 王聪. 不确定 AUV 的神经网络辨识和学习控制[J]. 计算机仿真, 2017, 34(6): 314-318. (ZENG Dewei, WU Yuxiang, WANG Cong. Neural network identification and learning control of uncertain AUV[J]. Computer Simulation, 2017, 34(6): 314-318. (in Chinese))
- [12] JI D, LIU J, ZHAO H, et al. Path following of autonomous vehicle in 2D space using multivariable sliding mode control[J]. Journal of Robotics, 2014, 2014: 1-6.
- [13] 杨泽文, 贾鹤鸣, 宋文龙, 等. 基于高增益观测器的 AUV 水平面轨迹跟踪控制[J]. 计算机工程与应用, 2017, 53(11): 26-30. (YANG Zewen, JIA Heming, SONG Wenlong, et al. Horizontal trajectory tracking control of AUV based on high gain observer[J]. Computer Engineering and Applications, 2017, 53(11): 26-30. (in Chinese))
- [14] 唐国元, 冯雷, 黄道敏, 等. 陀螺效应作用下水下航行体动力学模型及其运动特性研究[J]. 海洋工程, 2012, 30(3): 112-118. (TANG Guoyuan, FENG Lei, HUANG Daomin, et al. Research on the dynamics model and motion characteristics of submerged vehicle considering the gyroscopic effect[J]. The Ocean Engineering, 2012, 30(3): 112-118. (in Chinese))
- [15] YAN Z, YU H, ZHANG W, et al. Globally finite-time stable tracking control of underactuated UUVs[J]. Ocean Engineering, 2015, 107: 132-146.
- [16] YANG S X, MENG M Q. Neural network approaches to dynamic collision-free trajectory generation[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, 2001, 31(3): 302-318.
- [17] YANG S X, ZHU A, YUAN G F, et al. A bioinspired neurodynamics-based approach to tracking control of mobile robots[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(8): 3211-3220.
- [18] PAN C Z, LAI X Z, YANG S X, et al. A biologically inspired approach to tracking control of underactuated surface vessels subject to unknown dynamics[J]. Expert Systems with Applications, 2015, 42(4): 2153-2161.
- [19] PRESTERO T. Verification of a six-degree of freedom simulation model for the REMUS autonomous underwater vehicle[D]. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology and Woods Hole Oceanographic Institution, 2001.