

基于分层滑模方法的水下球形无人航行器姿态控制研究^①兰晓娟^{②*} 陈 强^{*} 孙汉旭^{***} 贾庆轩^{***}

(* 海军装备研究院 北京 100161)

(** 海军装备研究院博士后科研工作站 北京 100161)

(***) 北京邮电大学自动化学院 北京 100876)

摘 要 针对水下球形无人航行器 BYSQ-2 型的姿态调节控制问题,对欠驱动姿态调节系统进行了运动学与动力学分析,建立了其动力学模型,并对模型进行微分同胚变换。将模型划分为 2 个子系统,并分别采用反演滑模变结构方法设计了控制律。由于模型中的系统之间存在耦合作用,还引入了对应于耦合作用的控制律,并构造了第二层滑动平面。仿真结果表明,所设计的反演分层滑模控制律能够使系统快速收敛,有效地实现了对水下球形无人航行器姿态的控制。

关键词 水下球形无人航行器,姿态控制,欠驱动系统,分层滑模方法

0 引 言

水下球形无人航行器是指外壳为球形的水下无人航行器。水下球形无人航行器具有耐压性能好、流体动力学计算无耦合、各向流体动力参数相等等优点,因而有广泛的应用前景。本文针对欠驱动水下球形无人航行器 BYSQ-2 型的姿态控制方法进行研究。

对于欠驱动系统来说,由于可以用维数较少的输入控制其在维数较多的广义坐标空间的运动,属于二阶非完整系统,且具有本质上的强非线性。目前,在研究欠驱动系统的控制中通常采用的方法有 σ 变换法(σ -Transformation)、微分平滑法(Differentially Flatness)与反演法(Backstepping)。 σ 变换法将非线性系统变换为等价的线性系统,针对该线性定常系统设计时不变反馈镇定律,再通过 σ 反变换获得原系统的时不变反馈镇定律。对存在奇异点的情况,首先采用附加控制将奇异点引出,然后再进行上述变换,这将导致控制方法的不连续性^[1]。微分平滑法是对系统进行动态反馈线性化,该方法的缺点是只对微分平滑系统有效,并且平滑输出往往不易找到^[2]。反演控制方法是将李雅普诺夫函数的选取与控制器的设计相结合的一种回归设计方法。

将复杂非线性系统分解为多个子系统,首先设计最基本子系统的稳定控制器,引入虚拟控制的概念,把每个子系统状态坐标的变化和一个已知李雅普诺夫函数的虚拟控制系统的镇定函数联系起来,然后通过积分器后推,逐步修正算法,从而设计镇定的控制器,获得系统最终真正的控制律^[3-5]。在反演法的基础上,考虑到外界干扰的影响,融合滑模变结构、神经网络、自适应等智能化方法,可以进一步优化和完善控制器的性能。滑模变结构方法对系统的干扰和参数的摄动具有完全自适应性^[6,7],本文将反演法与滑模变结构方法结合使用,将复杂的非线性系统分解成不超过系统阶数的子系统,然后分别设计滑模控制律,实现对多输入多输出系统的控制。

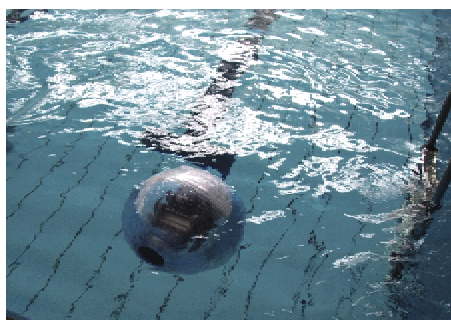
1 BYSQ-2 型的结构

BYSQ-2 型是一型在水下可以灵活转向的新型单推进器水下球形无人航行器,如图 1 所示。

BYSQ-2 型的结构为:外壳为球形,一个圆筒形导管两端的外侧与球壳内壁相连接,导管内侧中心位置放置螺旋桨推进器,导管外侧安装用于调节姿态的转向机构,如图 2 所示。取导管中心轴为长轴,短轴与长轴相垂直,转向机构中的两个电机驱动配重分别绕长轴和短轴转动。导管外侧安装一个长

① 高等学校博士学科点专项科研基金(200800130002)资助项目。

② 女,1981 年生,博士,工程师;研究方向:水下无人航行器;联系人,E-mail:lanbupt@gmail.com
(收稿日期:2012-10-15)



(漂浮状态, 取掉部分配重块)

图 1 BYSQ-2 型作业图



图 2 BYSQ-2 型结构图

方体空心套筒, 套筒正面安装长轴电机, 长轴电机输出轴联接的齿轮与导管外侧的齿轮相啮合; 套筒背面安装短轴电机, 两侧安装配重摆杆固定轴, 短轴电机输出轴联接的齿轮通过一个链条与配重摆杆联接的齿轮相啮合, 如图 3、图 4 所示。



图 3 长轴电机位置图

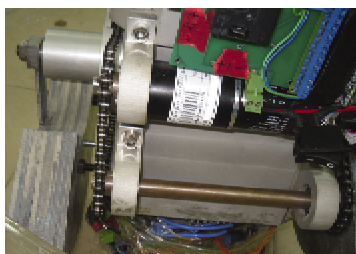


图 4 短轴电机位置图

将水下球形无人航行器 BYSQ-2 型的组成构件均看作刚体, 忽略一些质量较小的构件, 该无人航行器可看作由三个刚体组成。球壳、导管和推进器之间相互固连, 为刚体 B_1 , 总质量为 m_1 ; 套筒为刚体 B_2 , 质量为 m_2 ; 配重分为两块, 分别由臂杆固定于套筒两端, 通过齿轮与链条连接电机输出轴来实现同步转动, 将两块配重合称为刚体 B_3 , 质量为 m_3 。

对水下球形无人航行器姿态的调节是指对推进器输出推力方向的调节, 由于推进器为刚体 B_1 的一部分, 因此本文首先研究用于刚体 B_1 姿态控制的动力学模型, 然后基于此模型研究运动控制方法。

2 姿态调节系统的运动学分析

为了便于研究刚体 B_1 的受力情况, 分析刚体 B_1 在每个时刻的各种运动参数的方向与大小, 需要建立适用于水下球形无人航行器运动控制的坐标系。研究水下球形无人航行器的运动, 就是研究水下球形无人航行器相对地面的运动, 由此建立如下 4 个坐标系 $\{0\}$ 、 $\{1\}$ 、 $\{2\}$ 、 $\{3\}$, 如图 5 所示。

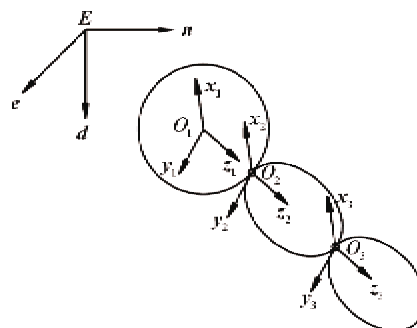


图 5 多刚体系统坐标系示意图

坐标系 $\{0\}$ 为固连于大地的惯性参考系, En 轴正向指向北, Ed 轴正向竖直向下; 坐标系 $\{1\}$ 为固连于刚体 B_1 的动参考系, 原点位于球心, O_1x_1 轴沿长轴方向, 初始时与坐标系 $\{0\}$ 平行, 且 O_1x_1 轴与 En 轴重合; 坐标系 $\{2\}$ 固连于刚体 B_2 , 原点位于球心, O_2x_2 轴沿长轴方向, 坐标系 $\{2\}$ 可绕 O_2x_2 轴相对于坐标系 $\{1\}$ 转动, 初始时, 坐标系 $\{2\}$ 平行于坐标系 $\{1\}$, 且 O_2x_2 轴与 O_1x_1 轴重合; 坐标系 $\{3\}$ 固连于刚体 B_3 , 原点位于球心, 初始时, 坐标系 $\{3\}$ 平行于坐标系 $\{2\}$, 且 O_3x_3 轴与 O_2x_2 轴重合, 坐标系 $\{3\}$ 可绕 O_3y_3 轴相对于坐标系 $\{2\}$ 转动, O_3y_3 轴为短轴。

使用 u, v, w, p, q, r 分别表示刚体 B_1 在 O_1x_1 轴、 O_1y_1 轴、 O_1z_1 轴的线速度和角速度, X, Y, Z, K, M, N 分别表示刚体 B_1 在 O_1x_1 轴、 O_1y_1 轴、 O_1z_1 轴的作用力和力矩。

刚体 B_1 在水中的位置与姿态, 可以用本体坐标系原点 O_1 在地面坐标系中的坐标值 n, e, d 以及本体坐标系相对于地面坐标系的三个欧拉角 ϕ, θ, ψ 确定, 欧拉角的转动次序为: 绕 En 轴转 ϕ 角, 绕 Ee 轴转 θ 角, 绕 Ed 轴转 ψ 角。这三个欧拉角依次称为横滚角、俯仰角和偏航角^[8]。

令

$$z_1 = \phi, z_2 = \theta, z_3 = \psi \quad (1)$$

则坐标系 $\{1\}$ 相对坐标系 $\{0\}$ 的角速度 ω_0 、角加速度 ε_0 为

$$\omega_0 = \begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \\ \dot{z}_3 \end{bmatrix}, \quad \varepsilon_0 = \begin{bmatrix} \ddot{z}_1 \\ \ddot{z}_2 \\ \ddot{z}_3 \end{bmatrix} \quad (2)$$

由于刚体 B_1 绕 x_1 轴的角速度为 p , 在 O_1y_1 轴方向的角速度为 q , 在 z_1 轴方向的角速度为 r , 令

$$z_4 = p, z_5 = q, z_6 = r \quad (3)$$

可得刚体 B_1 在本体坐标系 $\{1\}$ 中的角速度 ω_1 和角加速度 ε_1 为

$$\omega_1 = \begin{bmatrix} z_4 \\ z_5 \\ z_6 \end{bmatrix}, \quad \varepsilon_1 = \begin{bmatrix} \dot{z}_4 \\ \dot{z}_5 \\ \dot{z}_6 \end{bmatrix} \quad (4)$$

刚体 B_1 相对惯性坐标系 $\{0\}$ 和本体坐标系 $\{1\}$ 的角速度的关系为

$$\begin{aligned} \dot{\phi} &= p + q \sin \phi \tan \theta + r \cos \phi \tan \theta \\ \dot{\theta} &= q \cos \phi - r \sin \phi \\ \dot{\psi} &= q \frac{\sin \phi}{\cos \theta} + r \frac{\cos \phi}{\cos \theta} \end{aligned} \quad (5)$$

设坐标系 $\{2\}$ 相对坐标系 $\{1\}$ 的 O_1x_1 轴的旋转角为 α , 可得坐标系 $\{2\}$ 到坐标系 $\{1\}$ 的姿态变换矩阵为

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (6)$$

设刚体 B_2 绕 O_2x_2 轴的角速度为 z_7 , 则有

$$\dot{\alpha} = z_4 + z_7 \quad (7)$$

并且令

$$z_8 = \alpha \quad (8)$$

设坐标系 $\{3\}$ 相对坐标系 $\{2\}$ 的 O_2y_2 轴的旋转

角为 β , 刚体 B_3 绕 y_3 轴的角速度为 z_9 , 则有

$$\dot{\beta} = z_5 + z_9 \quad (9)$$

可得坐标系 $\{3\}$ 到坐标系 $\{2\}$ 的姿态变换矩阵为

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & \tan \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\cos \beta} \end{bmatrix} \quad (10)$$

3 姿态调节系统的动力学分析

根据 Fossen 的建模方法^[8], 并结合 BYSQ-2 型外形的球对称性, 简化流体动力参数, 可得螺旋桨推进器不工作时刚体 B_1 的动力学方程为

$$\begin{cases} I_{1x} \dot{p} + (I_{1x} - I_{1y})qr - (\dot{r} + pq)I_{1xz} \\ \quad + (r^2 - q^2)I_{1yz} + (pr - \dot{q})I_{1xy} = M_1 \\ I_{1y} \dot{q} + (I_{1x} - I_{1z})rp - (\dot{p} + qr)I_{1xy} \\ \quad + (p^2 - r^2)I_{1xz} + (pq - \dot{r})I_{1yz} = M'_{2y} \\ I_{1z} \dot{r} + (I_{1y} - I_{1x})pq - (\dot{q} + rp)I_{1yz} \\ \quad + (q^2 - p^2)I_{1xy} + (rq - \dot{p})I_{1xz} = M'_{2z} \end{cases} \quad (11)$$

其中, I_{1x}, I_{1y}, I_{1z} 分别为刚体 B_1 绕 O_1x_1 轴、 O_1y_1 轴、 O_1z_1 轴的转动惯量; M'_{2y} 和 M'_{2z} 是作用在刚体 B_1 上的短轴电机力矩的分量在 O_1y_1 轴和 O_1z_1 轴上分量; I_{1xy}, I_{1xz} 和 I_{1yz} 分别为刚体 B_1 对 $x_1O_1y_1$ 平面、 $x_1O_1z_1$ 平面和 $y_1O_1z_1$ 平面的惯性积。

I_{1x}, I_{1y} 和 I_{1z} 为

$$\begin{aligned} I_{1x} &= \int_{\Delta} \rho(y^2 + z^2) dx dy dz \\ I_{1y} &= \int_{\Delta} \rho(x^2 + z^2) dx dy dz \\ I_{1z} &= \int_{\Delta} \rho(x^2 + y^2) dx dy dz \end{aligned} \quad (12)$$

I_{1xy}, I_{1xz} 和 I_{1yz} 为

$$\begin{aligned} I_{1xy} &= \int_{\Delta} \rho xy dx dy dz \\ I_{1xz} &= \int_{\Delta} \rho xz dx dy dz \\ I_{1yz} &= \int_{\Delta} \rho yz dx dy dz \end{aligned} \quad (13)$$

由于结构的对称性, 可得

$$I_{1y} = I_{1z} \quad (14)$$

$$I_{1xy} = I_{1xz} = I_{1yz} = 0$$

由于 I_x 与 I_y 和 I_z 的数值相近, 这里近似认为

$$I_{1x} = I_{1y} = I_{1z} \quad (15)$$

所以式(11)可化简为

$$I_{1x}\dot{p} = M_1, I_{1y}\dot{q} = M'_{2y}, I_{1z}\dot{r} = M'_{2z} \quad (16)$$

由于套筒形状规则,可近似认为

$$I_{2y} = I_{2x} = I_{2yz} \quad (17)$$

其中, I_{2y} 和 I_{2x} 分别为套筒(刚体 B_2)绕 O_2y_2 轴和 O_2z_2 轴的转动惯量, I_{2yz} 为套筒绕 $y_2o_2z_2$ 平面内任意轴的转动惯量。

由此可得

$$I_{1x}\dot{p} = M_1$$

$$(I_{1y} + I_{2yz})\dot{q} = M'_{2y} \quad (18)$$

$$(I_{1z} + I_{2yz})\dot{r} = M'_{2z}$$

令

$$I'_y = I_{1y} + I_{2y}, I'_z = I_{1z} + I_{2z} \quad (19)$$

由于 $I_{1y} = I_{1z}$, 可得 $I'_y = I'_z$ 。则系统模型式(11)可改写为

$$I_{1x}\dot{p} = M_1, I'_y\dot{q} = M'_{2y}, I'_z\dot{r} = M'_{2z} \quad (20)$$

短轴电机力矩在坐标系 {3} 中可表示为

$$\begin{bmatrix} 0 \\ M_2 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (21)$$

从而可得

$$\begin{bmatrix} 0 \\ M'_{2y} \\ M'_{2z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \tan\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\cos\beta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ M_2 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 0 \\ M_2\cos\alpha \\ M_2\sin\alpha \end{bmatrix} \quad (22)$$

则式(20)可化简为

$$\dot{p} = \frac{M_1}{I_{1x}}, \dot{q} = \frac{M_2\cos\alpha}{I_{1y} + I_{2y}}, \dot{r} = \frac{M_2\sin\alpha}{I_{1z} + I_{2z}} \quad (23)$$

4 姿态调节系统动力学模型的建立

根据上述分析,令

$$k_1 = \frac{1}{I_{1x}}, k_2 = \frac{1}{I_{1y} + I_{2y}} \quad (24)$$

$$k_3 = k_2 = \frac{1}{I_{1z} + I_{2z}}, k_4 = \frac{1}{I_{2x} + I_{3x}}$$

再作输入变换,令 $\tau_1 = M_1, \tau_2 = M_2$, 则可得球壳姿态调节系统状态方程为

$$\dot{z}_1 = z_4 + z_5\sin z_1 \tan z_2 + z_6\cos z_1 \tan z_2$$

$$\dot{z}_2 = z_5\cos z_1 - z_6\sin z_1$$

$$\dot{z}_3 = z_5 \frac{\sin z_1}{\cos z_2} + z_6 \frac{\cos z_1}{\cos z_2}$$

$$\dot{z}_4 = k_1\tau_1 \quad (25)$$

$$\dot{z}_5 = k_2\tau_2\cos z_8$$

$$\dot{z}_6 = k_3\tau_2\sin z_8$$

$$\dot{z}_7 = -2k_4\tau_1$$

$$\dot{z}_8 = z_4 + z_7$$

令 $\varepsilon_{11} = z_1, \varepsilon_{21} = z_2, \varepsilon_{31} = z_3, \varepsilon_{41} = z_8$, 对式(25)进一步化简,并考虑建模误差和外部干扰,可得

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon}_{11} &= \varepsilon_{12} \\ \dot{\varepsilon}_{12} &= f_1(\varepsilon) + F_1(\varepsilon)\tau_2 + k_1\tau_1 + d_1 \\ \dot{\varepsilon}_{21} &= \varepsilon_{22} \\ \dot{\varepsilon}_{22} &= f_2(\varepsilon) + F_2(\varepsilon)\tau_2 + d_2 \\ \dot{\varepsilon}_{31} &= \varepsilon_{32} \\ \dot{\varepsilon}_{32} &= f_3(\varepsilon) + F_3(\varepsilon)\tau_2 + d_3 \\ \dot{\varepsilon}_{41} &= \varepsilon_{42} \\ \dot{\varepsilon}_{42} &= (k_1 \times 2k_4)\tau_1 \end{aligned} \quad (26)$$

其中, d_1, d_2, d_3 为建模误差和外加干扰, $|d_1| \leq D_1, |d_2| \leq D_2, |d_3| \leq D_3$ (D_1, D_2, D_3 为正常数); $f_1(\varepsilon) = \varepsilon_{12}\varepsilon_{22}\tan\varepsilon_{21} + \varepsilon_{22}\varepsilon_{32}\sin\varepsilon_{21}\tan\varepsilon_{21} + \varepsilon_{22}\varepsilon_{32}\cos\varepsilon_{21}$;

$$f_2(\varepsilon) = -\varepsilon_{12}\varepsilon_{32}\sin\varepsilon_{21}; f_3(\varepsilon) = \frac{\varepsilon_{12}\varepsilon_{22}}{\cos\varepsilon_{21}} + \varepsilon_{22}\varepsilon_{32}\tan\varepsilon_{21};$$

$$F_1(\varepsilon) = k_2\tan\varepsilon_{21}(\sin\varepsilon_{11}\cos\varepsilon_{41} + \cos\varepsilon_{11}\sin\varepsilon_{41});$$

$$F_2(\varepsilon) = k_2(\cos\varepsilon_{11}\cos\varepsilon_{41} - \sin\varepsilon_{11}\sin\varepsilon_{41}); F_3(\varepsilon) =$$

$$\frac{k_2}{\cos\varepsilon_{21}}(\sin\varepsilon_{11}\cos\varepsilon_{41} + \cos\varepsilon_{11}\sin\varepsilon_{41})。$$

由于 ε_{41} 与 ε_{42} 的值只是控制系统设计中需要的两个状态量,没有期望值,因此在设计控制系统时可将式(25)进行简化。然后将式(25)写成仿射非线性方程的形式

$$\dot{\varepsilon} = f(\varepsilon) + \sum_{i=1}^2 g_i(\varepsilon)\tau_i \quad (27)$$

$$\text{其中 } \tau = [\tau_1 \ \tau_2]^T, g_1(\varepsilon) = [0 \ k_1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T,$$

$$g_2(\varepsilon) = [0 \ F_1(\varepsilon) \ 0 \ F_2(\varepsilon) \ 0 \ F_3(\varepsilon)]^T,$$

$$f(\varepsilon) = [\varepsilon_{12} \ f_1(\varepsilon) + d_1 \ \varepsilon_{22} \ f_2(\varepsilon) + d_2 \ \varepsilon_{32} \ f_3(\varepsilon) + d_3]^T, \varepsilon = [\varepsilon_{11} \ \varepsilon_{12} \ \varepsilon_{21} \ \varepsilon_{22} \ \varepsilon_{31} \ \varepsilon_{32}]^T$$

($\varepsilon \in M, M$ 为 6 维光滑流形)。

根据李括号的定义,可得

$$\begin{aligned} & \text{rank}\{g_1, g_2, [f, g_1], [f, g_2], [g_2, [f, g_1]], \\ & [f, [g_2, [f, g_1]]]\} = 6 \end{aligned} \quad (28)$$

可知系统(式(26))在李括号意义下满秩且呈对合分布,是可控的。由于从式(25)到式(26)的转换是微分同胚变换,所以系统式(25)也是可控的。

5 姿态控制方法的研究

由于系统的控制输入少于系统的位形自由度,是通过动力学耦合来实现驱动输出,因此本节采用反演分层滑模变结构方法设计姿态调节控制律。

为便于设计控制律,将系统(式(26))划分为两个子系统:

$$\begin{aligned} [1] \begin{cases} \dot{e}_{21} = e_{22} \\ \dot{e}_{22} = f_2(\varepsilon) + F_2(\varepsilon)\tau_2 + d_2 \\ \dot{e}_{31} = e_{32} \\ \dot{e}_{32} = f_3(\varepsilon) + F_3(\varepsilon)\tau_2 + d_3 \end{cases} \\ [2] \begin{cases} \dot{e}_{11} = e_{12} \\ \dot{e}_{12} = f_1(\varepsilon) + F_1(\varepsilon)\tau_2 + k_1\tau_1 + d_1 \end{cases} \end{aligned} \quad (29)$$

然后分别为两个子系统设计反演滑模控制律。

第一步:对于子系统[1],系统位置误差为

$$e_2 = e_{21} - e_{21d}, \quad e_3 = e_{31} - e_{31d} \quad (30)$$

设计滑模函数为

$$s_2 = c_2 e_2 + \dot{e}_2, \quad s_3 = c_3 e_3 + \dot{e}_3 \quad (31)$$

其中, c_2 和 c_3 为正常数。

根据式(30)可得

$$\begin{aligned} \dot{e}_2 &= \dot{e}_{21} - \dot{e}_{21d} = e_{22} \\ \ddot{e}_2 &= \ddot{e}_{21} - \ddot{e}_{21d} = f_2(\varepsilon) + F_2(\varepsilon)\tau_2 + d_2 \\ \dot{e}_3 &= \dot{e}_{31} - \dot{e}_{31d} = e_{32} \\ \ddot{e}_3 &= \ddot{e}_{31} - \ddot{e}_{31d} = f_3(\varepsilon) + F_3(\varepsilon)\tau_2 + d_3 \end{aligned} \quad (32)$$

则

$$\begin{aligned} s_2 &= c_2(e_{21} - e_{21d}) + e_{22} \\ \dot{s}_2 &= c_2(\dot{e}_{21} - \dot{e}_{21d}) + \dot{e}_{22} \\ &= c_2 e_{22} + f_2(\varepsilon) + F_2(\varepsilon)\tau_2 + d_2 \\ s_3 &= c_3(e_{31} - e_{31d}) + e_{32} \\ \dot{s}_3 &= c_3(\dot{e}_{31} - \dot{e}_{31d}) + \dot{e}_{32} \\ &= c_3 e_{32} + f_3(\varepsilon) + F_3(\varepsilon)\tau_2 + d_3 \end{aligned} \quad (33)$$

设计控制律为

$$\begin{cases} \tau_{21} = \frac{1}{F_2(\varepsilon)}(-c_2 e_{22} - f_2(\varepsilon) - D_2 \text{sgn}(s_2)) \\ \tau_{22} = \frac{1}{F_3(\varepsilon)}(-c_3 e_{32} - f_3(\varepsilon) - D_3 \text{sgn}(s_3)) \end{cases} \quad (34)$$

其中, sgn 是符号函数,其定义为

$$\text{sgn}(s) = +1, s > 0; \text{sgn}(s) = -1, s < 0 \quad (35)$$

将式(34)代入式(33)可得,

$$\dot{s}_2 = -D_2 \text{sgn}(s_2) + d_2, \quad \dot{s}_3 = -D_3 \text{sgn}(s_3) + d_3 \quad (36)$$

则 $s_2 \dot{s}_2 \leq 0, s_3 \dot{s}_3 \leq 0$ 。

由于系统内的两个分系统之间存在耦合作用,所以不能简单地把两者的控制律相加,还需要引入对应于耦合作用的控制律。取系统总的控制律为

$$\tau_2 = \tau_{21} + \tau_{22} + \tau_{2h} \quad (37)$$

其中, τ_{2h} 为系统在趋近阶段的耦合切换控制律。

构造第二层滑动平面 $S = C s_2 + s_3$ (C 为正常数),利用李雅普诺夫定理来求取系统的耦合切换控制量。定义李雅普诺夫函数为

$$V_1 = \frac{1}{2} S^2 \quad (38)$$

则 $\dot{V}_1 = S \dot{S} = S(C \dot{s}_2 + \dot{s}_3)$ 。

将式(33)代入式(38)可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= S((CF_2(\varepsilon)\tau_{22} + F_3(\varepsilon)\tau_{21}) + (CF_2(\varepsilon) \\ &+ F_3(\varepsilon))\tau_{2h}) \end{aligned} \quad (39)$$

设系统从初始状态到达切换面的阶段取指数趋近律,则得到

$$\begin{aligned} & (CF_2(\varepsilon)\tau_{22} + F_3(\varepsilon)\tau_{21}) \\ & + (CF_2(\varepsilon) + F_3(\varepsilon))\tau_{2h} \\ & = -p_1 \text{sgn}(S) - p_2 S \end{aligned} \quad (40)$$

其中, p_1, p_2 为正常数。

由式(40)可得

$$\begin{aligned} \tau_{2h} &= -\frac{1}{CF_2(\varepsilon) + F_3(\varepsilon)}(CF_2(\varepsilon)\tau_{22} + F_3(\varepsilon)\tau_{21} \\ &+ p_1 \text{sgn}(S) + p_2 S) \end{aligned} \quad (41)$$

则 $\dot{V}_1 = -p_1 |S| - p_2 S^2 \leq 0$ 。

可得控制输入 τ_2 为

$$\begin{aligned} \tau_2 &= \tau_{21} + \tau_{22} + \tau_{2h} \\ &= \frac{1}{CF_2(\varepsilon) + F_3(\varepsilon)}(F_3(\varepsilon)\tau_{22} + CF_2(\varepsilon)\tau_{21} \\ &- p_1 \text{sgn}(S) - p_2 S) \\ &= \frac{-1}{CF_2(\varepsilon) + F_3(\varepsilon)}(c_3 e_{32} + f_3(\varepsilon) + D_3 \text{sgn}(s_3)) \end{aligned}$$

$$+ Cc_2\dot{e}_{22} + Cf_2(\varepsilon) + CD_2\text{sgn}(s_2) + p_1\text{sgn}(S) + p_2S) \quad (42)$$

第二步:对于子系统[2],系统位置误差为 $e_1 = \varepsilon_{11} - \varepsilon_{11d}$, 设计滑模函数为 $s_1 = c_1 e_1 + \dot{e}_1$ (c_1 为正常数)。由于

$$\begin{aligned} \dot{e}_1 &= \dot{\varepsilon}_{11} - \dot{\varepsilon}_{11d} = \varepsilon_{12} \\ \ddot{e}_1 &= \ddot{\varepsilon}_{11} - \ddot{\varepsilon}_{11d} = f_1(\varepsilon) + F_1(\varepsilon)\tau_2 + k_1\tau_1 \end{aligned} \quad (43)$$

则

$$\begin{aligned} \begin{cases} s_1 = c_1(\varepsilon_{11} - \varepsilon_{11d}) + \varepsilon_{12} \\ \dot{s}_1 = c_1(\dot{\varepsilon}_{11} - \dot{\varepsilon}_{11d}) + \dot{\varepsilon}_{12} \\ = c_1\varepsilon_{12} + f_1(\varepsilon) + F_1(\varepsilon)\tau_2 + k_1\tau_1 \end{cases} \quad (44) \end{aligned}$$

定义李雅普诺夫函数为

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2}s_1^2 \quad (45)$$

设系统从初始状态到达切换面的阶段取指数趋近律,则得到

$$\begin{aligned} c_1\varepsilon_{12} + f_1(\varepsilon) + F_1(\varepsilon)\tau_2 + k_1\tau_1 \\ = -p'_1\text{sgn}(s_1) - p'_2s_1 \end{aligned} \quad (46)$$

其中, p'_1, p'_2 为正常数。

由式(46)可得若控制输入 τ_1 为

$$\begin{aligned} \tau_1 = -\frac{1}{k_1}(p'_1\text{sgn}(s_1) + p'_2s_1 + c_1\varepsilon_{12} + f_1(\varepsilon) \\ + F_1(\varepsilon)\tau_2) \end{aligned} \quad (47)$$

则 $\dot{V}_2 = \dot{V}_1 + s_1\dot{s}_1 = \dot{V}_1 - p'_1|s_1| - p'_2s_1^2 \leq 0$ 。

根据所设计的反演滑模控制律对水下球形无人航行器姿态控制进行仿真研究。取刚体 B_1 的姿态 (ϕ, θ, ψ) 初始值为 $(\pi/2, \pi/4, \pi/4)$, 通过控制调节希望达到的目标值 $(\phi_d, \theta_d, \psi_d)$ 为 $(\pi/6, \pi/3, \pi/2)$ 。控制参数取 $c_1 = 50, c_2 = 50, c_3 = 100, C = 100, p_1 = 10, p_2 = 10, p'_1 = 10, p'_2 = 10$, 建模误差和干扰为 $D_1 = 0.1, D_2 = 0.1, D_3 = 0.1$ 。

仿真计算的结果如图 6 ~ 图 10 所示。

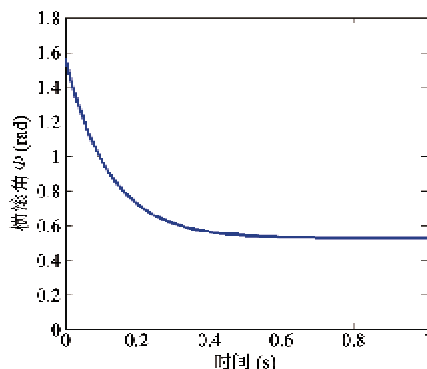


图 6 横滚角变化图

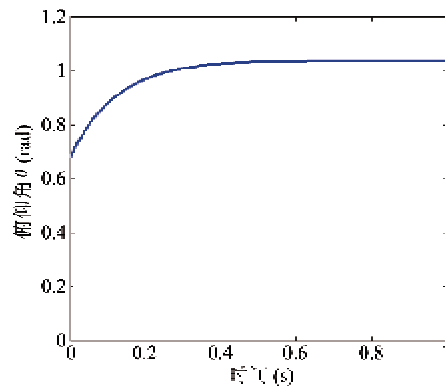


图 7 俯仰角变化图

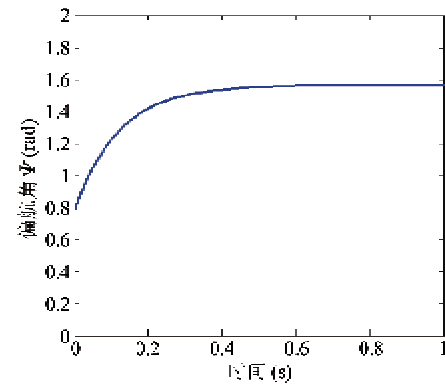


图 8 偏航角变化图

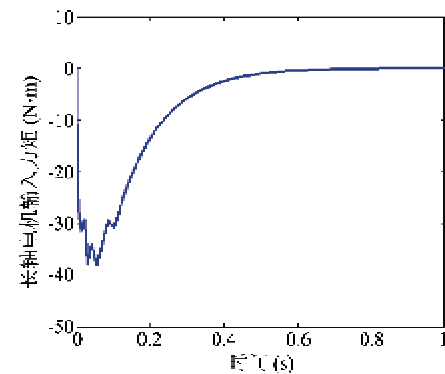


图 9 长轴电机输入力矩变化图

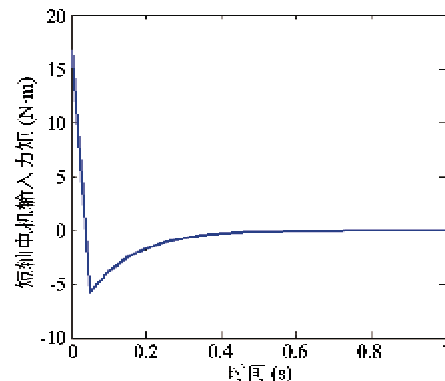


图 10 短轴电机输入力矩变化图

仿真结果分析:

(1)根据图6~图8可知,横滚角、俯仰角和偏航角的响应曲线都没有振荡,上升时间小于0.6s,过渡过程时间小于1s,系统具有良好的动态性能;

(2)根据图10可知,短轴电机的输入力矩没有抖振发生;根据图9可知,长轴电机的输入力矩有较小的抖振,但是不影响系统的输出。

上述仿真结果说明了所设计的滑模控制律在水下球形无人航行器BYSQ-2型姿态控制方面的有效性。

6 结 论

本文通过对水下球形无人航行器BYSQ-2型的欠驱动姿态调节系统的运动学与动力学分析,建立了用于姿态控制的动力学模型,并对该模型进行了微分同胚变换;由于在系统模型中存在建模误差与外部干扰项,因此采用反演滑模变结构方法设计了姿态调节控制律;由于模型中的系统之间存在耦合作用,引入了对应于耦合作用的控制量,并构造了第二层滑动平面。仿真结果表明,所设计的反演分层

滑模控制律能够使系统快速收敛,有效地实现了对水下球形无人航行器姿态的控制。

参考文献

- [1] 张晓华,张勇,程金. 拖挂式移动机器人反馈锁定的非连续控制方法. 电机与控制学报, 2011, 15(6): 67-72
- [2] 韩冰,赵国良. 基于微分平滑的欠驱动船舶航迹控制. 哈尔滨工程大学学报, 2004, 25(6): 709-713
- [3] 刘宇. 基于自适应反演方法的自主水下航行器控制. 系统工程与电子技术, 2011, 33(3): 638-642
- [4] 高剑,赵宁宁,徐德民等. 水下航行器轴向运动的自适应积分反演跟踪控制. 兵工学报, 2008, 29(3): 374-378
- [5] 万磊,崔士鹏,张国成等. 欠驱动水下机器人航迹跟踪控制. 电机与控制学报, 2013, 17(2): 103-110
- [6] 刘金琨. 滑模变结构控制. 北京: 清华大学出版社, 2008. 420-513
- [7] 贾鹤鸣,张利军,程相勤等. 基于非线性迭代滑模的欠驱动UUV三维航迹跟踪控制. 自动化学报, 2012, 38(2): 308-314
- [8] Roberts G N, Suttom R. 任志良,张刚译. 无人水下航行器进展. 北京: 电子工业出版社, 2009. 15-30

Research on a spherical unmanned underwater vehicle's attitude control based on hierarchical sliding mode method

Lan Xiaojuan^{***}, Chen Qiang^{*}, Sun Hanxu^{***}, Jia Qingxuan^{***}

(^{*} Naval Academy of Armament, Beijing 100161)

(^{**} Postdoctoral Research Workstation, Naval Academy of Armament, Beijing 100161)

(^{***} School of Automation, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876)

Abstract

The study was conducted to aim at the attitude control of the spherical unmanned underwater vehicle BYSQ-2. The BYSQ-2's dynamics model was built based on the kinematics and dynamics analyses of its underactuated attitude adjusting system, and the model was transformed into the standard equation by the differentiable homeomorphism transformation. The dynamics model was divided into two parts, and the control law was designed by using the backstepping sliding mode method for each part. The control law for the coupling was adopted because of the coupling in the model, and the second slide plane was constructed. The simulation results show that with the designed control law, the good dynamic and static performance can be obtained.

Key words: spherical unmanned underwater vehicle, attitude control, underactuated system, Hierarchical Sliding Mode Method