

油浸式变压器内部检测球形机器人的深度悬停控制研究

冯迎宾¹, 赵小虎^{1,2†}, 何震¹, 李智刚¹, 王亚彪¹

(1. 中国科学院沈阳自动化研究所水下机器人研究室, 沈阳 110016; 2. 中国科学院大学, 北京 101400)

摘要: 为实现设计的油浸式变压器内部检测机器人在实际作业过程中能针对深度方向某具体点进行观测, 对机器人的深度悬停控制进行研究. 通过对机器人控制策略的分析, 根据水下机器人动力学理论, 建立机器人在变压器油特殊介质的动力学模型. 基于鲁棒反演控制方法及滑模自适应控制理论, 提出一种鲁棒反演滑模控制方法, 采用模糊控制器设计滑模面切换增益, 以削弱不确定干扰带来的系统抖振, 并通过 Lyapunov 理论分析证明控制器稳定性. 解决了机器人在变压器油中因耦合、外界扰动等造成的深度悬停定点过程自旋及抖动问题, 仿真及实验表明了所提出控制器的有效性.

关键词: 球形机器人; 水下机器人; Lyapunov; 反演控制; 模糊控制; 滑模控制; 运动控制

中图分类号: TP273

文献标志码: A

Depth hover control of spherical robot for internal detection of oil-immersed transformer

FENG Ying-bin¹, ZHAO Xiao-hu^{1,2†}, HE Zhen¹, LI Zhi-gang¹, WANG Ya-biao¹

(1. URV Lab, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101400, China)

Abstract: The depth hovering control problem of robots is studied such that the designed oil-immersed transformer inner detect robot can observe a specific depth direction point during the practical operation. By analyzing the control strategy of robots, according to the underwater robot dynamic theory, the dynamic model of robots in the transformer oil special medium is established. A robust backstepping sliding mode control method is proposed based on the robust backstepping control method and the adaptive sliding mode control theory. Meanwhile, a fuzzy controller is used to design the sliding mode surface switching gain to reduce the chattering caused by uncertain disturbances, and the stability of the control system is analyzed based on Lyapunov theory. Consequently, the spin and chattering problem of robots caused by coupling and external disturbance during the depth hover in transformer oil is solved. Finally, simulation and experiment results show the effectiveness of the proposed controller.

Keywords: spherical robot; underwater robot; Lyapunov; backstepping control; fuzzy control; sliding mode control; motion control

0 引言

变压器内部结构复杂, 空间狭小, 且充满变压器油, 故障点精准识别与精准定位是变压器故障检测的难点问题^[1]. 基于温度分析、变压器油成分分析、色谱分析等^[2-3]常规的变压器故障检测方法仅能初步判断变压器是否存在故障, 无法确定精确的故障类型和故障点, 而人工检测方法则需抽干内部几十吨变压器油后, 工作人员进入变压器内开展检测工作, 存在危险性高、工作强度大且易带入污染等问题. 针对以上故障检测手段存在的问题, 人们设计了一种可进入变压器内部开展故障检测的机器人, 采用球形结构设

计, 通过喷射泵驱动, 具有小体积、零回转半径、多自由度灵活运动的特点^[4-5], 非常适用于在变压器内部狭窄区域复杂环境作业.

本文主要研究机器人在变压器油内的深度悬停控制问题. 为避免碰撞及有效完成检测作业任务, 机器人需在狭窄区域环境下保持很高的机动性和稳定性, 并实现精准运动控制^[6-8]. 受推进结构加工精度及安装误差的影响, 球形机器人水平运动与垂直运动存在耦合问题, 机器人在作垂向运动时会产生自旋运动, 同时由于机器人体积小, 其姿态容易受外界干扰. 传统机器人大多单独针对机器人的定向或者定

收稿日期: 2018-07-11; 修回日期: 2018-09-26.

责任编辑: 方勇纯.

†通讯作者. E-mail: zhaoxiaohu@sia.com.

深运动设计控制器,取得了一定的应用效果,但有很大的局限性.文献[9]通过设计一种模糊PID控制策略,改善了传统PID控制调节速度慢、超调量大等局限性,使得AUV能够以较小超调量快速到达目标深度,但该方法稳定后AUV深度震荡明显,稳定效果不够理想;文献[10]将AUV的深度控制问题转换为对非线性严格反馈系统的分析,提出一种神经网络辨识和学习的自适应控制方法,避免了在执行同样任务时的重复训练,但针对不同环境需进行学习测试,不利于复杂环境的实际应用;文献[11]提出的非线性鲁棒动态逆姿态控制法在一定程度上有效抑制了逆误差的影响,使得AUV控制系统具有较强的鲁棒性,但文章对AUV水动力部分进行了简化,在复杂环境下AUV受到强烈扰动时该方法效果不理想;文献[12]针对水下机器人的水平面镇定问题,提出一种基于有限时间镇定理论的切换控制律,但该控制器将切换面分为5个阶段,易造成高频振荡.

在机器人的悬停控制系统中,控制系统中的“抖振”问题常常给系统带来很大不便^[13-14].基于上述分析,本文提出一种鲁棒反演模糊自适应的滑模控制器,通过反演方法结合滑模控制增强系统的鲁棒性,同时组合模糊控制器估计滑模面切换律,以降低系统抖振,提高控制器的调节速度.首先根据机器人喷射泵的推力分配,建立了机器人欠驱动情况下的动力学模型;然后考虑系统定向与定深运动耦合及外界干扰情况,结合鲁棒反演控制与模糊控制设计滑模自适应变结构控制器,以实现机器人在变压器油中深度悬停;最后基于仿真及实验表明所提出控制器的稳定性和有效性,并通过对比传统滑模控制器证明该控制器的优越性.

1 问题描述

变压器油属于流动性较好的流体^[15],可依据水下机器人分析机器人在油中运动情况.如图1所示,机器人通过对称安装在中环的4路水平喷射泵实现

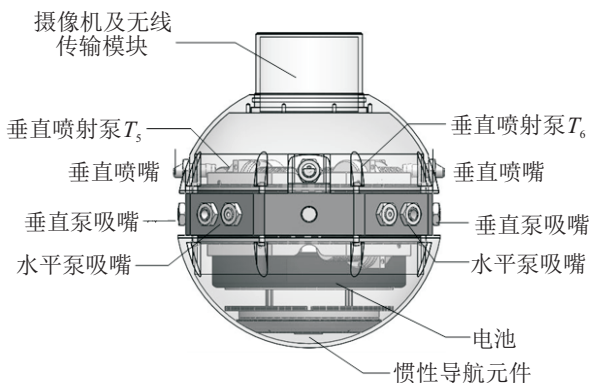


图1 机器人内部结构

水平面运动控制,两路垂直安装的喷射泵实现垂直面运动控制.

机器人水平方向主要受到推力、阻力和水动力作用,根据机器人喷射泵分布情况,定义如下规则:

- 1) 水平方向4个喷射泵喷口面积相同,相同电压下喷射泵推力大小一致,喷射泵1~喷射泵4产生的推力大小分别为 $T_1 \sim T_4$.
- 2) 为保证机器人具有自旋能力,喷射泵喷嘴中心垂线与球中心垂线偏移 L .
- 3) 通过改变水平方向各喷射泵推力调整机器人运动方向,其水平方向喷射泵相隔 90° 均匀分布在中环上.

机器人水平方向的喷射泵推力分布如图2所示.

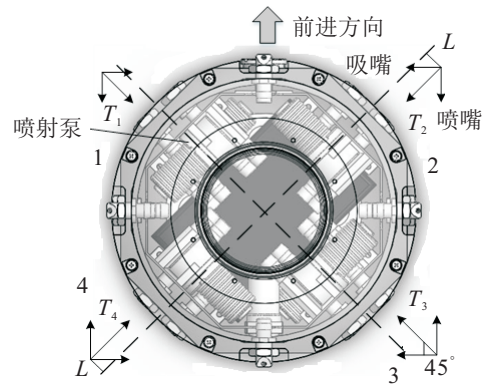


图2 机器人水平方向喷射泵推力分布

分别用 T_{re} 与 T_{ce} 表示4个喷射泵在 Oxy 平面上沿机器人切面的合力,当喷射泵1与喷射泵3喷射时,其反作用力 T_1 与 T_3 的合力使机器人围绕球心作逆时针旋转运动,合力为

$$T_{re} = (T_1 + T_3) \cdot L \tag{1}$$

当喷射泵2与喷射泵4喷射时,其推力 T_2 与 T_4 使机器人围绕球心作顺时针旋转运动,合力为

$$T_{ce} = (T_2 + T_4) \cdot L \tag{2}$$

机器人在垂直方向主要受到推力、浮力、重力及水动力作用.为保证机器人在无动力推动时悬浮于油表面,设计机器人具有微小正浮力,即浮力 B 略大于重力 P ,二者合力

$$F_{bp} = B - P, \tag{3}$$

方向垂直向上.

机器人在向下运动时,其垂直方向的喷射泵合力

$$T_{dn} = T_5 + T_6, \tag{4}$$

推动机器人下潜.

由于喷射泵不能反向运动,只能向上喷射,机器

人向上运动时只能依靠正浮力 F_{bp} 。机器人在垂直方向运动时属于欠驱动控制,球形机器人转艏和垂向的动力方程^[16]为

$$\begin{aligned}
 & m[x_g(\dot{v} + ur - wp) - y_g(\dot{u} + wq - vr)] + \\
 & I_z \dot{r} + (I_y - I_x)pq = \\
 & N_r \dot{r} + N_v \dot{v} + N_p \dot{p} + \Delta f_N + N_v v + \\
 & N_{wq} wq + N_{vw} v|w| + T_\varphi + N_{wu} w|u| + \\
 & N_{wv} w|v| + N_{pp} p|p| + N_{ru} r|u| + N_{rv} r|v| + \\
 & (x_g P - x_b B) \cos \theta \sin \varphi - (y_g P - y_b B) \sin \theta, \quad (5) \\
 & m[-z_g(p^2 + q^2) + x_g(rp - q^2) + y_g(rq + p^2)] + \\
 & m[\dot{w} - uq + vp] = \\
 & Z_w w + Z_q q + Z_{uu} u^2 + \Delta f_z + Z_{uw} uw + \\
 & Z_{vu} v|u| + T_z + (P - B) \cos \theta \cos \varphi. \quad (6)
 \end{aligned}$$

其中: m 为球形机器人的质量, I_x 、 I_y 、 I_z 分别为机器人相对运动坐标系 x 、 y 、 z 轴的转动惯量, $r_g = [x_g \ y_g \ z_g]^T$ 为机器人重力中心坐标, u 、 v 、 w 分别为机器人沿 x 、 y 、 z 轴方向的速度, p 、 q 、 r 分别为沿 x 、 y 、 z 轴的角速度, T_φ 为坐标轴 z 轴的推力矩, N_* 与 Z_* 为流体阻尼系数, θ 、 φ 分别为 $E\xi$ 轴与 Ox 轴之间在垂直面和水平面的夹角, T_z 为 z 轴上的推力, Δf_z 和 Δf_N 为不确定干扰项。机器人坐标系如图3所示。

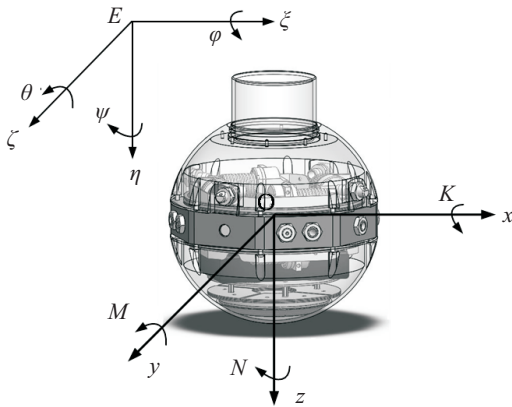


图3 机器人坐标系

机器人在油中的运动速度不高于0.1 m/s,由耦合运动造成的姿态偏转力较小,且不利于直接预测,与外界扰动类似,因此在进行机器人姿态滑模控制器设计时,可将由纵向运动引起的航向角变化和水平运动引起的深度变化视为外界干扰,便于滑模控制器处理耦合现象,简化控制器设计,并增强系统的适应能力。球形机器人在静止油中运动时受到油流动带来的扰动较小,可忽略横倾及纵倾带来的影响,所以可将式(5)和(6)简化^[17]为

$$(m - Z_w)\dot{w} = Z_w w + T_z + \Delta f_z, \quad (7)$$

$$(I_z - N_r)\dot{r} = N_r r + T + \Delta f_N. \quad (8)$$

水下球形机器人的深度悬停控制问题可描述为:设计符合要求的控制律,使得机器人系统在有限时间内通过控制输入 $T_1 \sim T_6$ 的作用,到达并保持预设定的期望深度 z_d 和期望航向角 φ_d 。

2 鲁棒反演模糊滑模自适应控制系统设计

2.1 鲁棒反演控制器设计

根据式(7)和(8),被控对象可分别表示为

$$\begin{cases} \dot{Z} = w, \\ \dot{w} = A_w w + B_w T_z + \frac{1}{(m - Z_w)} \Delta f_z; \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} \dot{N} = r, \\ \dot{r} = A_r r + B_r T + \frac{1}{(I_z - N_r)} \Delta f_N. \end{cases} \quad (10)$$

其中: Z 为深度坐标, N 为航向角,且有

$$A_w = \frac{Z_w}{m - Z_w},$$

$$B_w = \frac{1}{m - Z_w},$$

$$A_r = \frac{N_r}{I_z - N_r},$$

$$B_r = \frac{1}{I_z - N_r},$$

均为已知常数。为便于设计控制器,根据式(9)和(10),整理被控对象为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = Ax_2 + Bu + d(t). \end{cases} \quad (11)$$

其中: A 、 B 为式(9)和(10)中对应的常数项; x 为系统状态量,包括深度及航向角; $d(t)$ 为扰动项且 $|d(t)| < D$ 。

定义系统位置指令为 x_d , 控制系统误差

$$z_1 = x_1 - x_d, \quad (12)$$

则有

$$\dot{z}_1 = \dot{x}_1 - \dot{z}_d = x_2 - \dot{z}_d. \quad (13)$$

定义Lyapunov函数

$$V_1 = \frac{1}{2} z_1^2, \quad (14)$$

则有

$$\dot{V}_1 = z_1 \dot{z}_1 = z_1(x_2 - \dot{z}_d). \quad (15)$$

定义

$$x_2 = -k_1 z_1 + \dot{x}_d + z_2. \quad (16)$$

其中: $k_1 > 0$, z_2 为虚拟量, $z_2 = x_2 + k_1 z_1 - \dot{x}_d$ 。得到

$$\dot{V}_1 = -k_1 z_1^2 + z_1 z_2. \quad (17)$$

2.2 滑模自适应控制器设计

定义滑模面切换函数为

$$s = c_1 z_1 + z_2, \quad (18)$$

其中 $c_1 > 0$. 由于 $\dot{z}_1 = z_2 - k_1 z_1$, 则有

$$s = c_1 z_1 + \dot{z}_1 + k_1 z_1 = (c_1 + k_1) z_1 + \dot{z}_1. \quad (19)$$

显然, 若 $s = 0$, 则 $z_1 = 0, z_2 = 0$ 且 $\dot{V}_1 \leq 0$.

进一步, 定义 Lyapunov 函数

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2} s^2, \quad (20)$$

则有

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= \dot{V}_1 + s \dot{s} = \\ &-k_1 z_1^2 + z_1 z_2 + s(c_1 z_1 + \dot{z}_2) = \\ &-k_1 z_1^2 + z_1 z_2 + s(c_1(z_2 - k_1 z_1) + \\ &A(z_2 + \ddot{z}_d - k_1 z_1) + Bu + d + k_1 \dot{z}_1 - \ddot{z}_d). \end{aligned} \quad (21)$$

设计控制器

$$\begin{aligned} u &= \\ &B^{-1}(-c_1(z_2 - k_1 z_1) - A(z_2 + \ddot{z}_d - k_1 z_1) - \\ &D \operatorname{sgn}(s) + \ddot{z}_d - k_1 \dot{z}_1 - h(s + \beta \operatorname{sgn}(s))), \end{aligned} \quad (22)$$

其中 h 和 β 为正常数.

2.3 模糊自适应估计设计

考虑机器人在变压器油内部作业过程中干扰项来源复杂且未知, 由式(22)可知, 当干扰 D 增大时切换增益也会增大, 从而造成系统不稳. 为减弱系统抖动, 提高收敛速度, 本文通过采用乘积推理机、单值模糊器和中心平均解模糊器设计模糊系统对其进行逼近估计. 模糊系统可以表达为

$$\hat{f}_d(s) = \theta_h^T \phi(s). \quad (23)$$

其中: $\hat{f}_d(s)$ 为模糊系统输出; $\theta_h^T = (y^1, y^2, \dots, y^k)^T$; $\phi(s) = (\phi_1(s), \phi_2(s), \dots, \phi_k(s))^T$ 为模糊向量, $\phi(s)$ 的第 j 项为

$$\phi_j(s) = \frac{\sum_{\chi=1}^n \mu_{A_i^\chi}(s_i)}{\sum_{\chi=1}^k \left(\prod_{i=1}^n \mu_{A_i^\chi}(s_i) \right)}, \quad (24)$$

$\mu_{A_i^\chi}(s_i)$ 为高斯隶属函数, $j = 1, 2, \dots, k$ 为模糊规则数.

根据模糊系统万能逼近理论^[18], 存在最优模糊系统 $f_d(s|\hat{\theta}_h^*)$, 使得

$$\hat{f}_d(t) = f_d(s|\hat{\theta}_h^*) + \tau = \hat{\theta}_h^{*T} \phi(s) + \tau. \quad (25)$$

其中: τ 为逼近误差, 且满足 $|\tau| < \tau_d$; τ_d 为逼近误差上界, 且 $\tau_d > 0$; 由于 $f_d(s|\hat{\theta}_h^*)$ 未知, 采用 $f_d(s|\hat{\theta}_h)$ 对其进

行估计, $\hat{\theta}_h$ 为 $\hat{\theta}_h^*$ 的估计值.

式(22)控制器变为

$$\begin{aligned} u &= B^{-1}(-c_1(z_2 - k_1 z_1) - A(z_2 + \ddot{z}_d - k_1 z_1) + \\ &\ddot{z}_d - k_1 \dot{z}_1 - hs - \hat{f}_d(s)). \end{aligned} \quad (26)$$

设计自适应律为

$$\dot{\hat{\theta}}_h = \gamma \phi(s), \quad (27)$$

其中 $\gamma > 0$.

由式(26)可分别设计深度悬停控制器为:

1) 深度控制器

$$\begin{aligned} u_w &= B_w^{-1}(-c_{w1}(z_{w2} - k_{w1} z_{w1}) - A_w(z_{w2} + \ddot{z}_{wd} - \\ &k_{w1} z_{w1}) + \ddot{z}_{wd} - k_{w1} \dot{z}_{w1} - h_w s_w - \hat{f}_{dw}(s)). \end{aligned} \quad (28)$$

2) 航向角控制器

$$\begin{aligned} u_r &= B_r^{-1}(-c_{r1}(z_{r2} - k_{r1} z_{r1}) - A_r(z_{r2} + \ddot{z}_{rd} - \\ &k_{r1} z_{r1}) + \ddot{z}_{rd} - k_{r1} \dot{z}_{r1} - h_r s_r - \hat{f}_{dr}(s)). \end{aligned} \quad (29)$$

2.4 系统稳定性证明

定义最优参数为

$$\theta_h^* = \arg \min_{\hat{\theta}_h \in \Omega_h} [\sup |h(s|\hat{\theta}_h) - h\beta|s||], \quad (30)$$

其中 Ω_h 为 $\hat{\theta}_h$ 的集合. 根据式(11)、(12)和(18)可知

$$\begin{aligned} \dot{s} &= c_1 z_1 + Ax_2 + Bu + d(t) - \ddot{z}_d = \\ &-\hat{f}(s|\hat{\theta}_h) + d(t) = \\ &-\hat{f}(s|\hat{\theta}_h) + d(t) + f_d(s|\hat{\theta}_h^*) - f_d(s|\hat{\theta}_h^*) = \\ &\tilde{\theta}_h^T \phi(s) + d(t) - f_d(s|\hat{\theta}_h^*), \end{aligned} \quad (31)$$

其中 $\tilde{\theta}_h^T = \hat{\theta}_h^* - \hat{\theta}_h$.

定义 Lyapunov 函数

$$V_3 = V_2 + \frac{1}{2\gamma} \tilde{\theta}_h^T \tilde{\theta}_h. \quad (32)$$

将式(20)、(26)和(27)代入(32)得

$$\begin{aligned} \dot{V}_3 &= -k_1 z_1^2 + z_1 z_2 + s \dot{s} + \frac{1}{\gamma} \tilde{\theta}_h^T \dot{\tilde{\theta}}_h = \\ &-k_1 z_1^2 + z_1 z_2 + hs^2 - hs^2 + s(\tilde{\theta}_h^T \phi(s) + \\ &d(t) - f_d(s|\hat{\theta}_h^*)) + \frac{1}{\gamma} \tilde{\theta}_h^T \dot{\tilde{\theta}}_h = \\ &-z^T Qz - hs^2 + s \tilde{\theta}_h^T \phi(s) + \frac{1}{\gamma} \tilde{\theta}_h^T \dot{\tilde{\theta}}_h + \\ &s(d(t) - f_d(s|\hat{\theta}_h^*)) = \\ &-z^T Qz - hs^2 + \frac{1}{\gamma} \tilde{\theta}_h^T (\gamma \phi(s) - \dot{\tilde{\theta}}_h) + \\ &s(d(t) - f_d(s|\hat{\theta}_h^*)) \leq \\ &-z^T Qz - hs^2 + \frac{1}{\gamma} \tilde{\theta}_h^T (\gamma \phi(s) - \dot{\tilde{\theta}}_h) + \\ &s(d(t) - (D + h\beta) \operatorname{sgn}(s)) = \end{aligned}$$

$$-z^T Qz - hs^2 + d(t)s - (D + h\beta)s, \quad (33)$$

其中

$$Q = \begin{bmatrix} k_1 + hc_1^2 & hc_1 - \frac{1}{2} \\ hc_1 - \frac{1}{2} & h \end{bmatrix}. \quad (34)$$

由于

$$z^T Qz = [z_1 \ z_2] \begin{bmatrix} k_1 + hc_1^2 & hc_1 - \frac{1}{2} \\ hc_1 - \frac{1}{2} & h \end{bmatrix} [z_1 \ z_2]^T = k_1 z_1^2 - z_1 z_2 + hc_1^2 z_2^2 + 2hc_1 z_1 z_2 + h z_2^2 = k_1 z_1^2 - z_1 z_2 + h s^2, \quad (35)$$

其中 $z^T = [z_1 \ z_2]^T$, 如果矩阵为正定矩阵, 则有

$$-z^T Qz \leq 0. \quad (36)$$

由式(11)可知 $d(t)s - (D + h\beta)s < 0$, 由于

$$|Q| = h(k_1 + hc_1^2) - \left(hc_1 - \frac{1}{2}\right)^2 = h(k_1 + c_1) - \frac{1}{4}, \quad (37)$$

可通过选取 h, k_1 和 c_1 的值使 $|Q|$ 正定, 从而保证

$$\dot{V}_2 = -z^T Qz - hs^2 + d(t)s - (D + h\beta)s \leq 0, \quad (38)$$

即系统稳定.

3 仿真结果分析

设计的球形机器人质量 M 为 3.274 kg, 球体直径 190 mm, 航行速度最大为 0.1 m/s, 采用无线方式通讯, 内部搭载姿态传感器、深度传感器及摄像机, 可实时获取机器人当前航向角信息及深度信息. 机器人由 12 V 电池供电, 短时间内可忽略电池电压变化带来的喷射泵推力变化. 为了验证所设计控制器的有效性, 在进行实际实验操作前, 首先利用 Matlab 对设计的控制器进行仿真实验, 比较所设计的滑模控制器与常规滑模控制器的控制效果. 机器人实验平台如图 4 所示.



图 4 球形机器人

选定机器人初始航向角 $\varphi = 0$, 深度 $z = 0$, 航向控制器参数 $c_1 = 0.1, k_1 = 55.30, h = 18, \beta =$

0.01, 深度控制器参数 $c_1 = 3.8035, k_1 = 29.8, h = 3.8036, \beta = 1$, 外界扰动 $d = 0.2 \sin(2\pi t)$, 设定目标角度为 170° , 目标深度为 0.5 m. 航向滑模控制器参数 $K = 0.005, \varepsilon = 0.001, k_d = 0.003$, 深度滑模控制器参数 $K = 2.45, \varepsilon = 3.25, k_d = 1.5$.

由图 5 可见, 机器人在经过航向角校正后, 航向角稳定在 180° . 相比传统滑模控制调节效果, 该控制器震荡幅度更小, 收敛稳定后误差不超过 1° , 调节时间比滑模控制更短. 在机器人稳定后, 施加一个持续 5 s 的随机强扰动力, 所设计的鲁棒反演滑模控制器能有效减小扰动及调节过程带来的角度震荡, 使机器人快速稳定地收敛到目标角度, 具有良好的鲁棒性.

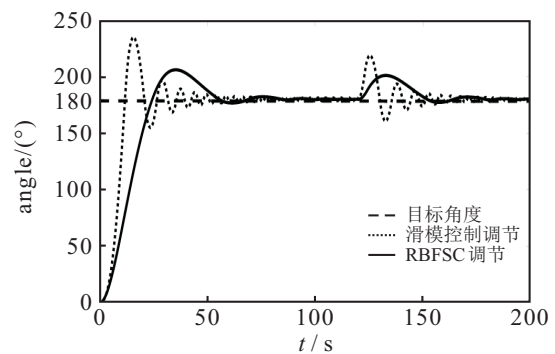


图 5 机器人定向仿真

分析定深仿真结果图 6 可知, 相比传统滑模控制, 机器人在作定深运动时能快速收敛, 到达稳定状态只需 15 s, 且不产生超调, 收敛后震荡幅度小, 误差 ± 1 cm. 相比滑模控制器, 机器人在受扰动后很快趋于稳定, 并保持深度不变, 具有良好的自适应能力和鲁棒性.

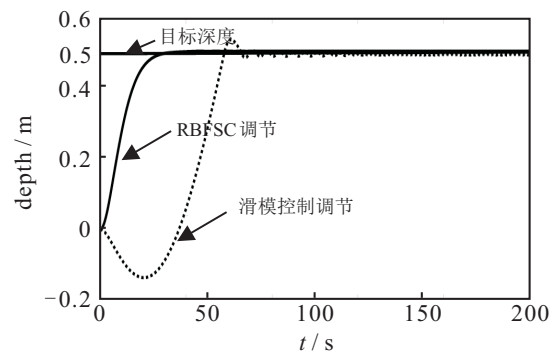


图 6 机器人定深仿真

4 样机实验

为进一步验证球形机器人在鲁棒反演模糊自适应滑模控制器下的运动效果, 在变压器油中进行现场实验. 机器人悬浮于油面时深度计深度为 10 cm, 起始速度与航向角均为 0, 设定目标悬停点深度为 50 cm, 角度为 180° , 观察机器人姿态调节情况, 其调节结果如图 7 所示.

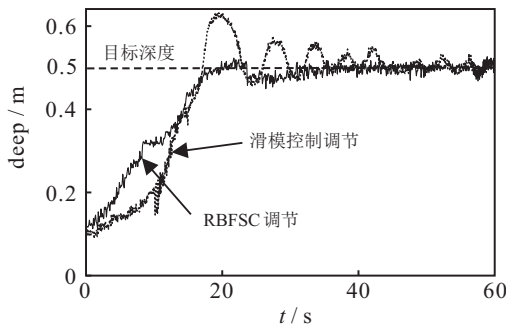


图7 机器人悬停定深实验调节图

由图7可见,机器人在开始调节后,能快速实现目标深度,且调节过程中曲线基本平滑,机器人最终稳定在50cm左右,误差不超过±2cm,抖动较为平缓,调节效果比滑模控制器具有更小的超调量与震荡幅度,且调节时间更短,与仿真结果类似.图8所示为机器人悬停定深稳定后,施加强扰动观察机器人的调节情况,结果表明,该控制器能以较快速度收敛回稳定状态,具有较强的抗干扰能力.

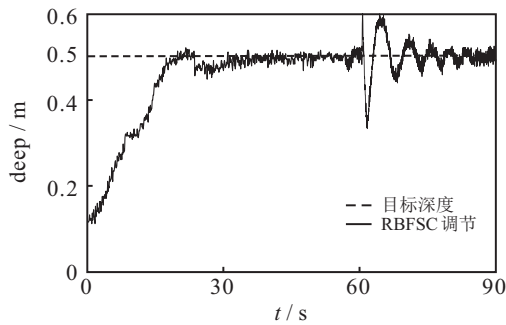


图8 机器人悬停定深扰动实验图

保持机器人当前深度不变,观察机器人悬停时角度调节情况,其调节结果如图9和图10所示.实验结果表明,机器人能在油中快速完成定向运动,且调节效果与仿真结果相似,超调量较小,调节过程较为平缓,调节完成后抖动不超过2°,没有出现自旋情况,系统稳定后施加一个强扰动使机器人在当前深度下角度发生跳变,机器人快速响应,能在较短的调节时间达到稳定状态.实验结果表明,所设计的鲁棒反演滑模自适应控制器在深度悬停控制过程中对外界扰动不敏感,具有良好的自适应能力和鲁棒性.

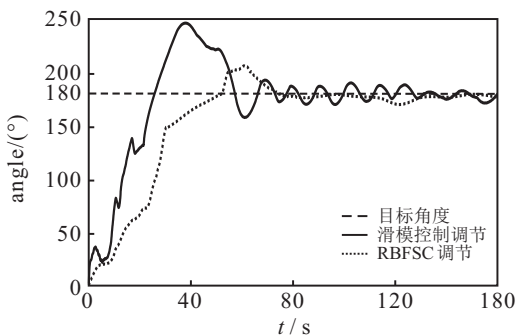


图9 机器人悬停定向实验调节图

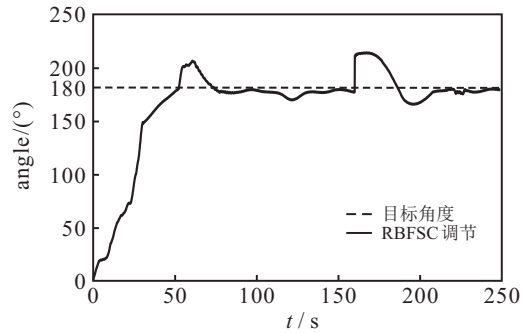


图10 机器人悬停定向扰动实验图

5 结论

本文分析了变压器内部检测球形机器人特性,并依据水下机器人的动力学建模方法,建立了机器人在油中的运动学及动力学模型,设计了机器人深度悬停的鲁棒反演模糊自适应滑模运动控制器,理论分析了控制器的收敛性,并进行了相关仿真实验和样机实验.结果表明,所提出控制器能以较快速度收敛并达到目标角度和深度,且稳定误差较小,鲁棒性强,解决了机器人运动过程中的自旋与抖振问题,适用于变压器内部结构复杂环境下机器人控制应用.仿真及实验结果表明,该控制器比传统滑模控制器具有更好的控制效果.

参考文献(References)

- [1] 翟季青, 刘志清. 变压器故障诊断的综述[J]. 电力设备, 2003, 4(6): 60-61.
(Zhai J Q, Liu Z Q. Summary of transformer fault diagnosis[J]. Power Equipment, 2003, 4(6): 60-61.)
- [2] Melucci D, Bendini A, Tesini F, et al. Rapid direct analysis to discriminate geographic origin of extra virgin olive oils by flash gas chromatography electronic nose and chemometrics[J]. Food Chemistry, 2016, 204: 263-273.
- [3] Das A K, Chatterjee S. Finite element method-based modelling of flow rate and temperature distribution in an oil-filled disc-type winding transformer using COMSOL multiphysics[J]. Iet Electric Power Applications, 2017, 11(4): 664-673.
- [4] 肖爱平, 孙汉旭, 谭月胜, 等. 一种球形机器人运动轨迹与控制[J]. 机器人, 2004, 26(5): 444-447.
(Xiao A P, Sun H X, Tan Y S, et al. Movement trajectory planning and control for a spherical robot[J]. Robot, 2004, 26(5): 444-447.)
- [5] 梁霄. 微小型水下机器人运动控制及可靠性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学船舶工程学院, 2009.
(Liang X. Research on motion control and reliability of micro-sized underwater robots[D]. Harbin: College of Design and Building of Ship and Ocean Structure, Harbin Engineering University, 2009.)

- [6] 刘祥庆. 水下球形机器人嵌入式运动控制系统研究[D]. 北京: 北京邮电大学自动化学院, 2011.
(Liu X Q. Research on embedded motion control system of underwater spherical robot[D]. Beijing: College of Automation, Beijing University of Posts and Telecommunications, 2011.)
- [7] Zhan Q, Zhou T, Chen M, et al. Dynamic trajectory planning of a spherical mobile robot[C]. 2006 IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics. Piscataway: IEEE, 2006: 1-6.
- [8] Mukherjee R, Das T. Feedback stabilization of a spherical mobile robot[C]. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway: IEEE, 2002: 2154-2162.
- [9] Hu B, Tian H, Qian J, et al. A fuzzy-PID method to improve the depth control of AUV[C]. IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Piscataway: IEEE, 2013: 1528-1533.
- [10] 曾德伟, 吴玉香, 王聪. AUV深度的神经网络辨识和学习控制仿真研究[J]. 计算机工程与应用, 2017, 53(6): 258-263.
(Zeng D W, Wu Y X, Wang C. Deep neural network identification and learning control simulation of AUV[J]. Computer Engineering and Application, 2017, 53(6): 258-263.)
- [11] 白瑜亮, 史晓宁, 王思. AUV非线性鲁棒动态逆姿态控制系统设计[J]. 战术导弹技术, 2016(4): 93-97.
(Bai Y L, Shi X N, Wang S. Design of AUV nonlinear robust dynamic inverse attitude control system[J]. Tactical Missile Technology, 2016(4): 93-97.)
- [12] Sankaranarayanan V, Mahindrakar A D, Banavar R N. A switched controller for an underactuated underwater vehicle[J]. Communications in Nonlinear Science & Numerical Simulation, 2008, 13(10): 2266-2278.
- [13] Liang X, Qu X, Wan L, et al. Three-dimensional path following of an underactuated AUV based on fuzzy backstepping sliding mode control[J]. International Journal of Fuzzy Systems, 2017, 20(1): 1-10.
- [14] 廖煜雷, 万磊, 庄佳园. 欠驱动船路径跟踪的反演自适应动态滑模控制方法[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2012, 43(7): 2655-2661.
(Liao Y L, Wan L, Zhuang J Y. Backward adaptive dynamic sliding mode control method for underactuated ship path tracking [J]. Journal of Central South University: Nature Science Edition, 2012, 43(7): 2655-2661.)
- [15] 赵可人, 沙宏伟. 变压器油粘度的测定[J]. 变压器, 1989(12): 20-23.
(Zhao K R, Sha H W. Determination of oil viscosity of transformer[J]. Transformer, 1989(12): 20-23.)
- [16] 杜娟. 水下球形机器人的运动控制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学自动化学院, 2013.
(Du J. Research on motion control of underwater spherical robot[D]. Harbin: College of Automation, Harbin Engineering University, 2013.)
- [17] Woolsey C A. Review of marine control systems: Guidance, navigation, and control of ships, rigs and underwater vehicles[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2005, 28(3): 574-575.
- [18] Wang L X. Fuzzy systems are universal approximators[C]. IEEE International Conference on Fuzzy Systems. Piscataway: IEEE, 1992: 1163-1170.

作者简介

冯迎宾(1986—), 男, 副研究员, 博士, 从事水下机器人控制及其应用等研究, E-mail: 781787793@qq.com;

赵小虎(1993—), 男, 硕士生, 从事水下机器人控制的研究, E-mail: zhaoxiaohu@sia.com;

何震(1974—), 男, 副研究员, 从事水下机器人结构设计的研究, E-mail: kez@sia.cn;

李智刚(1970—), 男, 研究员, 硕士, 从事水下机器人等研究, E-mail: lzg@sia.cn;

王亚彪(1991—), 男, 博士, 从事水下机器人的研究, E-mail: wangyabiao@sia.cn.

(责任编辑: 郑晓蕾)