

高速无人遥控潜水器永磁推进器的无位置传感器控制^{*}

解玉文¹, 胡 凯², 罗 响³, 姜淑忠³

(1. 北京国网富达科技发展有限公司, 北京 100070;

2. 国网浙江省电力有限公司舟山供电公司, 浙江 舟山 316021;

3. 上海交通大学 电气工程系, 上海 200030)

摘 要: 高速电动无人遥控潜水器 (ROV) 用于浅海严酷水下环境中的观测和作业。ROV 上的推进器电机内部充油, 需用旋转变压器测量转子磁极位置, 旋转变压器反馈的模拟信号容易受电机相线电流干扰。为此, 提出了一种使用新型连续饱和函数的滑模观测器, 通过使用连续饱和函数和锁相环方法, 可以估算磁极位置。所提算法与传统滑模观测器相比, 可有效减小电机运行时的抖振。通过仿真与试验, 验证了该算法的可行性。

关键词: 无人遥控潜水器; 推进器; 无传感器; 连续饱和函数; 锁相环

中图分类号: TM 351 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2018)12-0036-04

Sensorless Control of High Speed ROV Permanent Magnetic Propeller^{*}

XIE Yuwen¹, HU Kai², LUO Xiang³, JIANG Shuzhong³

(1. Beijing Guowang Fuda Science & Technology Development Co., Ltd., Beijing 100070, China;

2. Zhoushan Power Supply Company, State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Zhoushan 316021, China;

3. Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: High speed remotely operated vehicle (ROV) was used for observing and working in shallow sea. The propeller motor used in the ROV was often filled with oil to fight against the water pressure. Resolver was employed in the propeller motor as the position sensor, which may be easily affected by the running current. To solve this problem, a sliding mode observer based sensorless control strategy with continuous saturation function was proposed, which was used to estimate the motor position and take the place of the resolver. To improve the estimation accuracy, a phase locked loop (PLL) based position estimation method was introduced. In comparison with the traditional sliding mode observer, this algorithm could reduce the chattering. The proposed strategy was proved by simulations and experiments.

Key words: remotely operated vehicle (ROV); propeller; sensorless control; continuous saturation function; phase locked loop (PLL)

0 引 言

发展海洋装备是开发海洋资源的基础。众多海岛和长期作业的海洋装备需要从陆上供电, 在

近岸浅海区域铺设了大量的海底电缆, 需要无人遥控潜水器 (Remotely Operated Vehicle, ROV) 定期对海缆进行智能巡检。ROV 必须能够抵抗急流湍流等严酷海况, 根据该作业要求, ROV 水面

^{*} 基金项目: 国家重点研发计划子课题 (2016YFC0300703); 国家电网公司科技项目 (52110115007J)

作者简介: 解玉文 (1975—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力机器人技术。

胡 凯 (1983—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为海洋输电技术。

罗 响 (1983—), 男, 博士, 讲师, 研究方向为电机驱动控制技术。

前进速度达到 5 kn, 配备 2 台永磁主推进器、5 台永磁辅推进器和 1 台永磁操纵舵机。为了解决推进器电机密封问题, 水下电机内部充油以平衡外部海水压力, 电机内部的位置传感器常采用耐液压的旋转变压器, 其反馈信号为模拟信号, 容易受电机相线中的电流干扰。有时为旋变信号增加的一组水密接插件, 还会额外引起绝缘问题。因此去掉电机上的旋转变压器及其水密接插件, 成为一种理想的工程技术方案。

基于滑模观测器 (Sliding Mode Observer, SMO) 的永磁同步电机 (Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM) 无位置传感器算法一直是研究的热点^[1-4]。该算法具有结构简单、可靠性高、鲁棒性好、抗扰动能力强等特点^[5], 通过简洁的开关控制对电机的反电势进行观测, 进一步计算出转子位置。但是传统 SMO 算法由于其开关控制的特性, 容易带来转矩波动和电机抖振^[6]。本文提出的 SMO 使用新型连续饱和函数, 基于锁相环 (Phase Locked Loop, PLL) 方法, 估算永磁磁极位置及速度, 相对传统 SMO 无位置传感器算法, 可以有效减小电机运行时的抖振。通过仿真与试验, 验证了该算法在工程上的可行性。

1 SMO 无位置传感器控制

根据 PMSM 电机方程建立观测器, 对电机的反电动势进行估测。由于电机反电势与电机位置之间有直接关系, 因此通过这种方法可以完成对电机位置的估计。在位置观测器中, SMO 结构简单, 鲁棒性好, 使用较多。在高速 ROV 中, 一般会采用 4 台以上的电机, 如果采用传统的 SMO 控制方法对电机进行控制, 带来的抖振问题会由于多电机扰动而成倍放大, 影响航行稳定和通信等。因此本文针对该应用环境, 用连续饱和函数代替了传统 SMO 的符号饱和函数, 用线性控制代替了传统 SMO 的 bang-bang 控制, 可有效提高角度估测平滑性。

1.1 电机方程

永磁转子电机的定子绕组在 $\alpha\beta$ 坐标系下的电压与反电动势方程如式(1)所示:

$$\begin{bmatrix} \frac{di_\alpha}{dt} \\ \frac{di_\beta}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{1}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $i_\alpha, i_\beta, e_\alpha, e_\beta, v_\alpha, v_\beta$ ——每相的电流、反电动势和电压;

R, L ——电机的电阻和电感。

反电动势中包含了永磁转子的位置信息, 即:

$$\begin{bmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_f \omega_r & 0 \\ 0 & \lambda_f \omega_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\sin \theta \\ \cos \theta \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: λ_f ——转子磁链;

ω_r ——转子转速;

θ ——转子角度。

1.2 基于连续饱和函数的 SMO 设计

从式(1)可以看出, 电机的电压为已知量, 电流通过电流传感器测量可得, 因此, 可以针对式(1)构建一个观测器来观测反电动势的值, 再根据式(2), 通过对反电动势的估测来完成对电机位置的估计。

本文建立了一个带连续饱和函数的 SMO 来进行反电动势的观测, 如式(3)所示:

$$\begin{bmatrix} \frac{d\hat{i}_\alpha}{dt} \\ \frac{d\hat{i}_\beta}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_\alpha \\ \hat{i}_\beta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{1}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} kZ(\tilde{i}_\alpha) \\ kZ(\tilde{i}_\beta) \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: 上标 $\hat{\cdot}$ ——估计值;

$\tilde{i}_s (s=\alpha, \beta)$ ——电流误差, $\tilde{i}_n = \hat{i}_n - i_n$;

k ——滑模增益;

$Z_s(\cdot)$ ——本文提出的连续饱和函数。

$$Z(\tilde{i}_n) = \begin{cases} \operatorname{sgn}(\tilde{i}_n), & |\tilde{i}_n| > \delta \\ \sin(\pi \tilde{i}_n / 2\delta), & |\tilde{i}_n| \leq \delta \end{cases} \quad (4)$$

式(4)为连续饱和函数, 代替了传统 SMO 用到的符号函数, 可以改善传统 SMO 无位置控制的抖振问题。

SMO 控制框图如图 1 所示。

1.3 位置及速度估算

根据式(2), 可以得到估测反电动势与估测

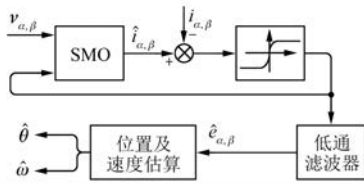


图1 SMO 框图

角度的关系如下：

$$\begin{cases} \hat{e}_{\alpha} = -\lambda_f \omega_r \sin \theta_{\text{est}} \\ \hat{e}_{\beta} = \lambda_f \omega_r \cos \theta_{\text{est}} \end{cases} \quad (5)$$

由式(5)可得估测角度为

$$\theta_{\text{est}} = \arctan(-\hat{e}_{\alpha}/\hat{e}_{\beta})$$

在 $\pm 90^\circ$ 附近,使用定点类型的电机控制芯片进行 $\arctan$ 计算容易出现误差,因此本文引入了锁相环进行角度和速度的估算。其控制框图如图2所示。

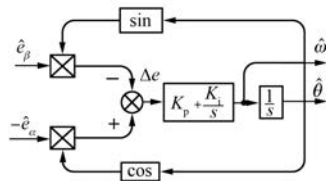


图2 PLL 位置速度估算框图

PLL 进行位置估计的理论推导如下：

$$\begin{aligned} \Delta e &= -\hat{e}_{\alpha} \sin \hat{\theta} - \hat{e}_{\beta} \cos \hat{\theta} = \\ &= -\lambda_f \omega_r \cos \theta_{\text{est}} \sin \hat{\theta} + \lambda_f \omega_r \sin \theta_{\text{est}} \cos \hat{\theta} = \\ &= \lambda_f \omega_r \sin(\theta_{\text{est}} - \hat{\theta}) \approx \lambda_f \omega_r (\theta_{\text{est}} - \hat{\theta}) \end{aligned} \quad (6)$$

由式(6)可以看出,当反电动势估测准确时(即 Δe 趋向于零时),PLL 输出之估测角趋向于原估测角。

2 仿真结果

图3所示为使用所提控制方法在同样转速情况下与传统滑模控制方法的仿真波形对比。

仿真情况如下:在0~0.1 s时,仿真为位置闭环控制,此时角度观测器仅作计算,不参与电机控制;在0.1~0.3 s时,观测器估测角度参与电机控制,此时进入估测角度闭环控制过程;从0.3 s到仿真结束,转速指令发生变化,观测器估测角度继续参与电机控制。

通过仿真对比可知,基于SMO的无位置传感器技术适用于本文的应用场合,能够较好地完

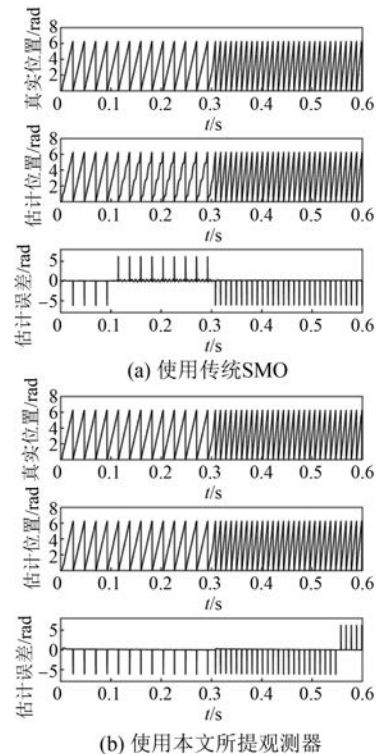


图3 转速改变情况下无位置传感器控制的仿真波形对比

在使用观测器估测角度情况下的位置闭环控制。相对于传统SMO,本文所提观测器在估测位置平滑度方面明显优于传统SMO,因此带来的转矩脉动也会更小。

3 试验结果

本文研制的高速ROV推进器空间布置如图4所示。高速ROV上的辅推推进器如图5所示。该推进器供电电压为直流300 V,永磁电机8极,额定功率为700 W,最高转速为2 000 r/min,最大正向推力196 N。为便于试验对比,电机内部装了旋转变压器,6根信号输入输出线和电机3根相线共用10芯水密件。

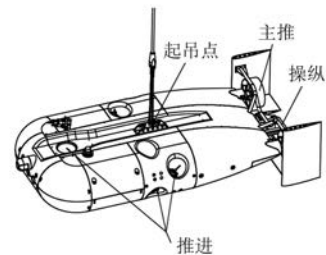
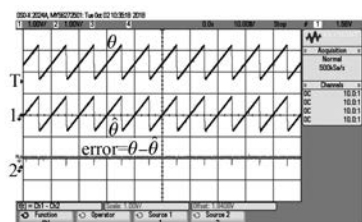


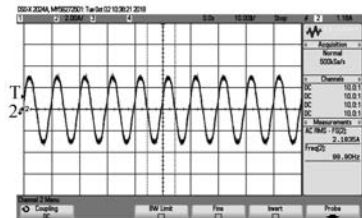
图4 高速ROV推进器分布图



图5 高速 ROV 辅推推进器



(a) 实际位置与估算位置对比试验波形



(b) 电机相电流波形

图6 推进器负载试验波形

图6所示为使用所提出的控制算法,推进器在静水水池运行情况下的试验波形。旋变测得的旋转频率与算法计算的频率相同(运行转速1 500 r/min)。在主推进器上也进行了同样的试验。

图6(a)中,第一排波形为实际角度,第二排波形为控制器输出的估测角度,第三排为实际角度减去估测角度。可以看出,在1 500 r/min时,电机估测角度与实际角度基本无误差,且估测角度输出平滑。图6(b)为电机相电流波形,可见电

流正弦度较好,电流输出平稳。在负载试验中,推进器在水池中运行平稳,推力稳定。因此本文所提算法能够满足应用要求。

4 结 语

永磁推进器是水下潜器的重要动力部件,由于旋转变压器的存在,给系统电磁兼容设计和密封设计增加了难度。无位置传感器的永磁推进器工程化应用和推广,对提高我国浅海和深海潜器的可靠性大有裨益。

【参考文献】

- [1] LUO X, NIU S, FU W N. Design and sensorless control of a novel axial-flux permanent magnet machine for in-wheel applications [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, 26 (9): 0608105.
- [2] FAN Y, ZHANG L, CHENG M, et al. Sensorless SVPWM-FADTC of a new flux-modulated permanent magnet wheel motor based on a wide-speed sliding mode observer [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62 (11): 3143-3151.
- [3] 徐志威,张旺,吴克伟,等.基于改进型 SMO 的 PMSM 无位置传感器控制策略[J].电力电子技术, 2014, 48 (9): 20-22.
- [4] DOMINGUEZ J R, NAVARRETE A, MEZA M A, et al. Digital sliding mode sensorless control for surface-mounted PMSM [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2014, 10 (1): 137-151.
- [5] 鲁文其,黄文新,胡育文.永磁同步电动机新型滑模观测器无传感器控制[J].控制理论与应用, 2009, 26 (4): 429-432.
- [6] 易伯瑜,康龙云,陶思念,等.永磁同步电机抗扰高阶滑模观测器设计[J].电工技术学报, 2014, 29 (8): 132-140.

收稿日期: 2018-08-01