

# 船舶推进电机无速度传感器矢量控制仿真研究

许鹏鹏<sup>1</sup>, 曹 翔<sup>2</sup>

(1. 南通航运职业技术学院 机电系, 江苏 南通 226010; 2. 南通航运职业技术学院 航海系, 江苏 南通 226010)

**摘 要:**船舶电力推进技术的核心是船舶推进电机控制技术。采用异步电机作为船舶推进电机,以船-桨负载模型作为船舶推进交流异步电机的负载模型,对船-桨负载模型进行仿真分析,同时对船舶推进异步电机的实测转子转速和估算转子转速进行了对比。经验证,改进后的模型参考自适应算法性能更优。

**关键词:**异步电机;船-桨负载模型;矢量控制;模型参考自适应

**中图分类号:**U664.14

**文献标识码:**A

**文章编号:**1671-9891(2018)02-0046-07

## 0 引言

近年来,船舶电力推进技术取得了飞速发展,各种交流推进电机在船舶电力推进中都得到了实际应用。与传统的机械式推进方式相比,使用电力推进技术的船舶具有动态性能良好、可靠性高、易于实现船舶自动化控制等一系列优点。<sup>[1]</sup>交流电机调速系统有多种调速方案,目前矢量控制与直接转矩控制均已在船舶电力推进系统中得到了实际的应用。跟直接转矩控制系统相比,虽然矢量控制系统的转矩响应速度较慢,但是其具备调速范围比较宽的优势。<sup>[2]</sup>转速闭环在矢量控制系统中必不可少,如果要得到船舶推进电机的实际转速信号,则需要转速检测装置,但在船舶推进电机中安装机械传感器会存在电机体积增大、结构复杂、维护困难、成本上升等一系列问题。基于这个原因,无速度传感器矢量控制在船舶电力推进中越来越受到人们的重视。

## 1 船-桨负载模型理论分析

### 1.1 推进螺旋桨的数学模型

螺旋桨在水中旋转时会产生与船舶前进方向相同的推力,该推力可以推动船舶前进或后退。由于螺旋桨在旋转的同时,海水会对其产生阻力,因此船舶推进电机必须为螺旋桨提供电磁转矩,使螺旋桨能克服阻力旋转起来。依据螺旋桨的工作原理,其旋转时产生的推力  $P$  和转矩  $T_L$  分别如式(1)和式(2)所示。<sup>[3]</sup>

$$P = K_p \rho n^2 D_p^4 \quad (1)$$

$$T_L = K_m \rho n^2 D_p^5 \quad (2)$$

式中  $\rho$  为螺旋桨旋转产生的推力,单位是 N;  $p$  为海水密度,单位是  $\text{kg/m}^3$ ,通常情况下取值为  $1\,025\,\text{kg/m}^3$ ;  $n$  为螺旋桨转速,单位是  $\text{r/min}$ ;  $D_p$  为螺旋桨旋转时,其叶梢轨迹圆的直径,单位是 m;  $K_p$  为螺旋桨旋转所产生推力的无因次系数;  $K_m$  为螺旋桨所受阻力矩的无因次系数,它们都是进速比  $J$  的函数。

将螺旋桨相对于水的轴向前进速度定义为螺旋桨的进速  $v_p$ ,将螺旋桨回转一周的进程  $h_p$  ( $v_p = h_p n$ ) 与螺旋桨直径  $D_p$  的比值定义为螺旋桨的进速比  $J$ ,则进速比的计算如式(3)所示。

$$J = \frac{h_p}{D_p} = \frac{v_p}{n D_p} \quad (3)$$

进速比是描述船舶运动状态的一个重要参数,式(1)和式(2)中的  $K_p$ 、 $K_m$  会随着进速比的变化而发生变化。在敞水条件下,推力无因次系数  $K_p$ 、阻力无因次系数  $K_m$  与螺旋桨进速比  $J$  的关系称为螺旋桨的敞水特

收稿日期:2017-09-25

作者简介:许鹏鹏(1987—),男,江苏南通人,南通航运职业技术学院机电系助教,硕士。

性。由于  $K_p$ 、 $K_m$  都是关于进速比  $J$  的函数,所以当  $J$  发生变化时  $K_p$  和  $K_m$  也会随之变化,螺旋桨产生的推力  $P$  和船舶所受到的阻力矩  $T_L$  也因此而发生变化。

$K_p$  和  $K_m$  的表达式需要通过实船数据才能求出。在实际应用中,先通过实验得到敞水特性相关的数据,将这些实验所得的离散数据通过曲线拟合的方式,便可以得到  $K_p$  和  $K_m$  关于进速比  $J$  的表达式。由于螺旋桨进速度  $v_p$  和螺旋桨转速  $n$  会随着船舶的动态过程发生大幅度的变化,而且  $v_p$  和  $n$  的变化并不同步,这就导致进速比  $J$  会出现大幅度的变化。自变量变化范围很大的函数  $J$  出现在仿真模型中对仿真是很不利的。因此,由以上方法得到的  $K_p$  和  $K_m$  不能直接用在仿真中,还需把  $J$  修正为  $J'$ ,使其在 0 到 1 范围内变化,如式(4)所示。

$$J' = \frac{v_p}{\sqrt{v_p^2 + n^2 D_p^2}} = \frac{J}{\sqrt{1 + J^2}} \quad (4)$$

除此之外,推力  $P$  和阻力矩  $T_L$  的无因次系数也需要修正,分别如式(5)、式(6)所示。

$$K_p' = \frac{P}{\rho D_p^2 (v_p^2 + n^2 D_p^2)} = \frac{K_p}{1 + J^2} = K_p (1 - J'^2) \quad (5)$$

$$K_m' = \frac{M}{\rho D_p^3 (v_p^2 + n^2 D_p^2)} = \frac{K_m}{1 + J^2} = K_m (1 - J'^2) \quad (6)$$

## 1.2 船体运动数学模型

假设船舶做的是直线运动,根据牛顿第二定理,其运动方程如式(7)所示。

$$k M_s \frac{dv_s}{dt} = P - R \quad (7)$$

式中  $R$  为船舶所受到的阻力,单位是 N;  $v_s$  为船舶航速,单位是 m/s;  $k$  为附水系数,其取值范围为 1.05 至 1.15;  $M_s$  为船体质量,单位是 kg;  $P$  为螺旋桨产生的有效推力,单位是 N。

依靠船体运动的数学模型计算船体所受的阻力存在一定困难,船体阻力  $R$  可以分为两个组成部分:摩擦阻力  $R_f$  与剩余阻力  $R_r$ ,如式(8)所示,船体受到的摩擦阻力  $R_f$  的计算如式(9)所示。

$$R = R_f + R_r \quad (8)$$

$$R_f = \frac{1}{2} \rho v_s^2 S (C_f + \Delta C_{AR}) \quad (9)$$

式(9)中  $C_f$  为摩擦阻力系数,  $\Delta C_{AR}$  为粗糙度补贴系数,其取值一般为  $\Delta C_{AR} = 0.4 \times 10^{-3}$ ;  $v_s$  为船速,单位是 m/s;  $S$  为浸润面积,单位是  $m^2$ ;  $\rho$  为水的密度,单位是  $kg/m^3$ 。

在实际应用时,可以按照以下四个步骤来计算摩擦阻力。

(1) 计算浸润面积  $S$ ,如式(10)所示

$$S = K \sqrt{VL} \quad (10)$$

式中  $V$  为船舶的排水容积,  $L$  为设计水线长度,  $K$  为面积系数。

(2) 给定一系列的船速,可以计算雷诺系数,如式(11)所示。

$$R_n = v_s L / \nu \quad (11)$$

式中  $L$  为船的长度,  $\nu$  为水的运动粘度,按照规定,对实船该值取 15 °C 时的数值 ( $\nu = 1.183 \times 10^{-6} m^2/s$ );  $C_f$  的值由计算得到的雷诺系数,查所用的平板公式表格得到。

(3) 确定粗糙度补贴系数  $\Delta C_{AR}$ ,其取值一般为  $0.4 \times 10^{-3}$ 。

(4) 代入给定数据,可以计算得出船体摩擦力,船体所受的剩余阻力可以用式(12)计算。

$$R_r = \frac{1}{2} C_r \rho v_s^2 S \quad (12)$$

## 2 船—桨负载 simulink 仿真模型

船—桨负载模型的建立需要实时数据,本文所选取的仿真对象为某型号渡轮,船长为 183.5 m,船舶方行系数  $C_B$  为 0.59,通过计算可以得到伴流系数  $w$  为 0.134 9,推力减额系数  $t$  为 0.154 79,螺旋桨直径  $D_p$  为 3.6 m,海水密度  $\rho$  为  $1\,025 kg/m^3$ 。

给定的螺旋桨敞水特性曲线上的离散点通过查表获得,由此可得到  $K_p$ 、 $K_m$  与  $J$  之间的函数关系,分别如式(13)、式(14)所示。

$$K_p = 0.389\,43 - 0.271\,19J - 0.102\,53J^2 \quad (13)$$

$$10K_m = 0.495\,46 - 0.218\,39J - 0.209\,76J^2 \quad (14)$$

根据上述计算得到的数据,螺旋桨推力和阻力矩无因次系数的仿真模型如图 1 所示。

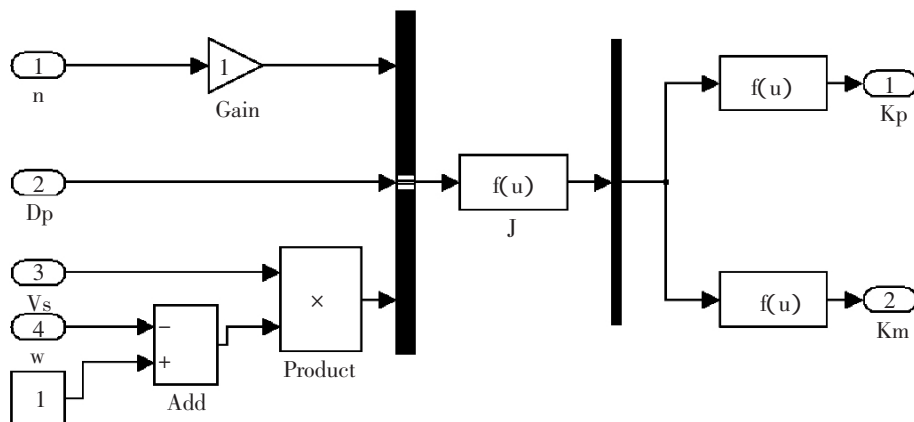


图 1 螺旋桨系数计算模型

将螺旋桨转速、螺旋桨直径以及船的行进速度作为该模型中的输入,将计算得到的螺旋桨推力和阻力矩无因次系数作为模型的输出。螺旋桨推力及阻力矩的仿真模型搭建如图 2 所示。

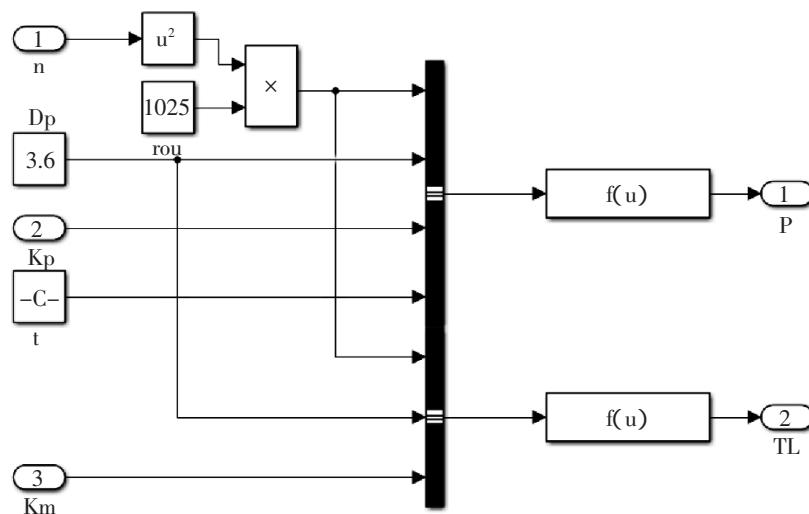


图 2 螺旋桨推力和阻力矩计算模型

在不同的船速下,以船体所受阻力数据作为样本,得到船只所受阻力与船速之间的函数关系,如式(15)所示。

$$R = 0.201\,43 - 0.059V_s + 0.017\,68V_s^4 \quad (15)$$

由此可以建立船体运动的仿真模型如图 3 所示。

螺旋桨推力  $P$  为该模型中的输入,船只航速  $V_s$  为该模型的输出。其中的附水系数取值为 1.07,船舶满载质量为 162 290 kg。综合上述模型,可得到螺旋桨及船体相互作用的仿真模型如图 4 所示。

根据上述分析对船—桨模型进行仿真,仿真的时间为 500 秒,螺旋桨给定转速为 100 r/min,得出的仿真结果如图 5、图 6、图 7 所示。

由仿真图可知,随着螺旋桨转速的增加,螺旋桨的推力和阻力迅速增加。螺旋桨阻力值迅速增加至 30 kN·m,并逐渐趋于稳定。而螺旋桨的推力值在经历短暂急速增大的过程后,于  $t = 25$  s 时达到 50 kN·m,并趋于稳定。随着航速的增加,推力系数和扭矩系数会随之减小,推力值和扭矩值开始慢慢变小。船速随着

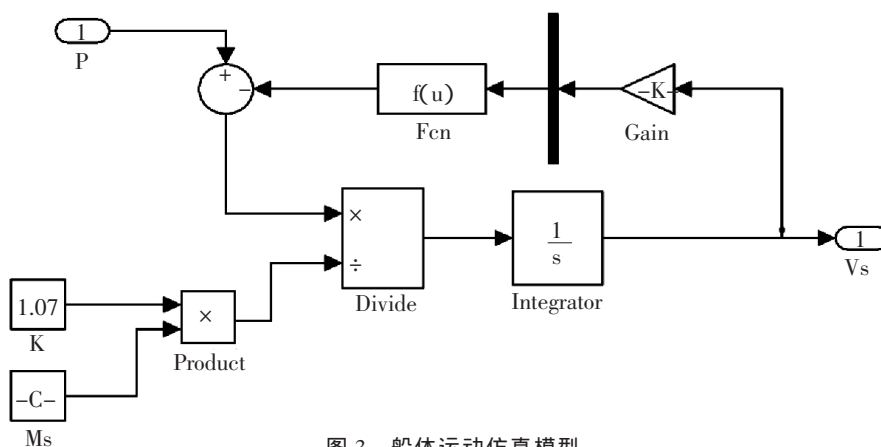


图3 船体运动仿真模型

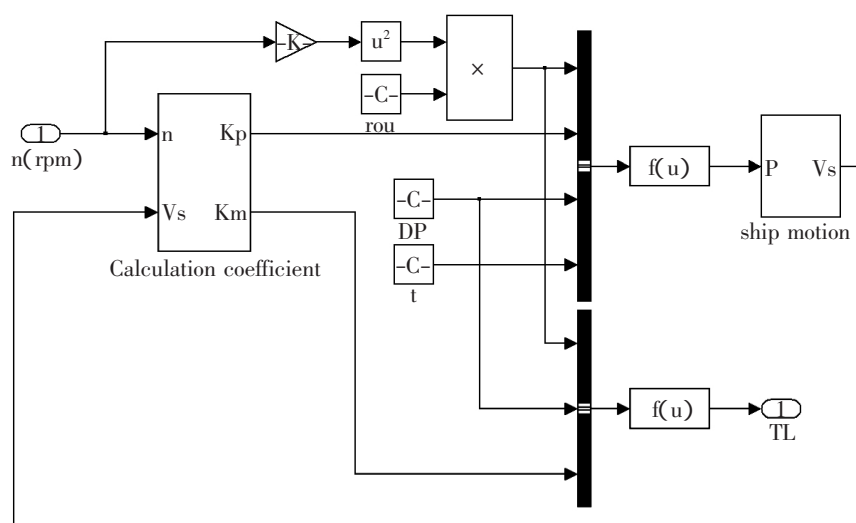


图4 船—桨模型仿真模型

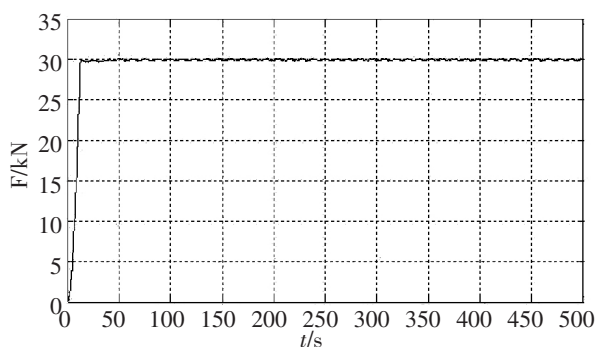


图5 螺旋桨阻力

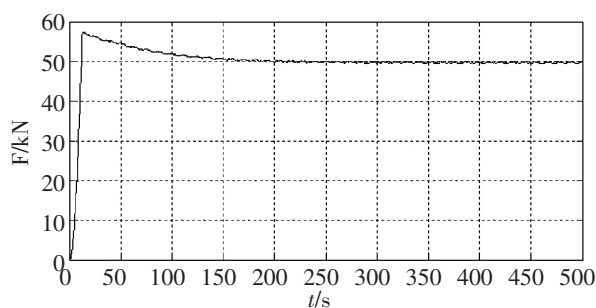


图6 螺旋桨推力

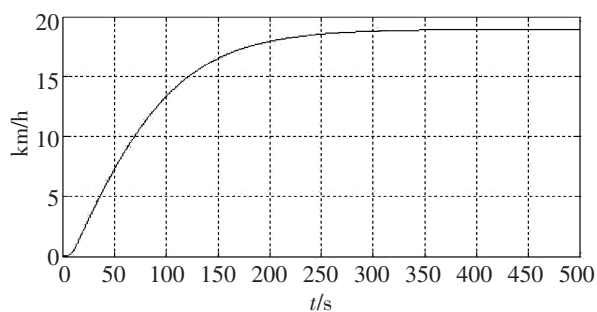


图7 船舶航速

螺旋桨推力的作用慢慢增大,并最终趋于稳定。

### 3 船舶推进异步电机无速度传感器矢量控制仿真

转速闭环控制在高性能的矢量控制系统中必不可少,如果要得到实际转速信号,则需要转速检测装置,目前通用的转速检测装置一般为光电编码盘这样的传感器。在实际的船舶电力推进系统中,由于推进电机工作环境比较恶劣,不适合安装机械传感器。因此,需要使用无速度传感器的方法,对船舶推进电机转速进行实时辨识。

以船—桨负载模型为电机负载,建立船舶推进异步电机无速度传感器矢量控制系统,系统原理如图 8 所示。图中的 MRAS 模块分别使用基于转子磁链模型的模型参考自适应算法、改进后的基于全阶状态观测器的模型参考自适应算法。

仿真中所用直流母线电压为 660 V,所用电机为三相鼠笼式异步电机,其具体参数如下:额定功率  $P = 37.3 \text{ kW}$ ,额定电压  $U = 460 \text{ V}$ ,额定频率  $f = 50 \text{ Hz}$ ,定子电阻  $R_s = 0.099 \text{ } \Omega$ ,定子电感  $L_s = 0.000 \text{ } 867 \text{ H}$ ,转子电阻  $R_r = 0.058 \text{ } 37 \text{ } \Omega$ ,转子漏感  $L_{lr} = 0.000 \text{ } 867 \text{ H}$ ,互感  $L_m = 0.030 \text{ } 39 \text{ H}$ 。

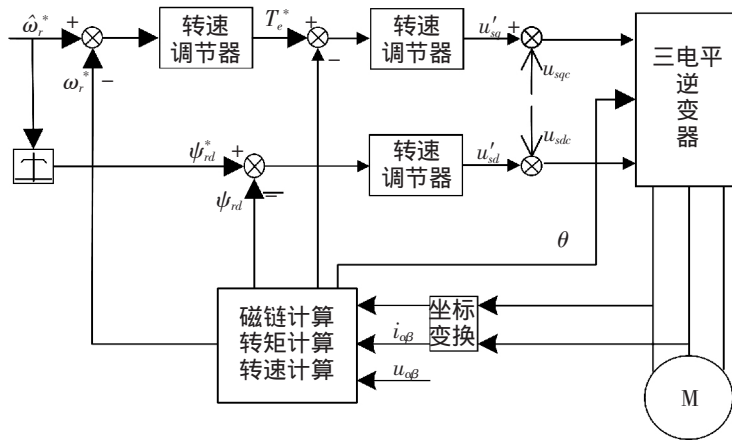


图 8 船舶推进异步电机无速度传感器矢量控制仿真图

#### 3.1 基于转子磁链模型的参考自适应算法仿真

根据图 8,基于转子磁链模型的 MRAS 转速辨识模块如图 9 所示。

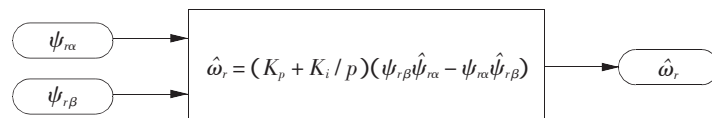


图 9 MRAS 转速辨识模块

在图 9 中,把定子电压和定子电流在静止坐标系下的分量,作为转速估算模型的输入。参考值选择经过转子磁链电压模型计算得出的  $\psi_{r\alpha}$  和  $\psi_{r\beta}$ ,估算值选择以转子磁链电流模型作可调模型算出的  $\hat{\psi}_{r\alpha}$  和  $\hat{\psi}_{r\beta}$ 。比例系数取  $K_p = 4 \text{ } 900$ ,积分系数取值  $K_i = 5.3$ ,转速的初始设定值为  $100 \text{ r/min}$ 。仿真结果如图 10、图 11、图 12 所示。

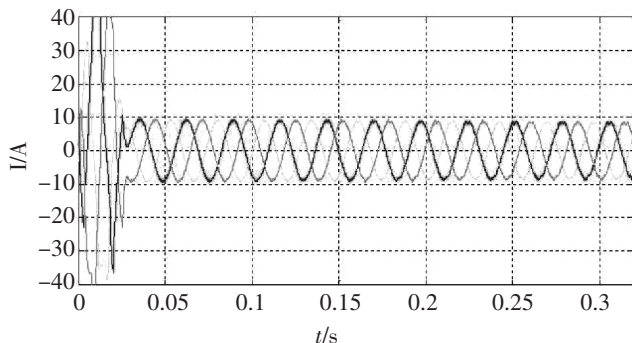


图 10 电机定子电流图

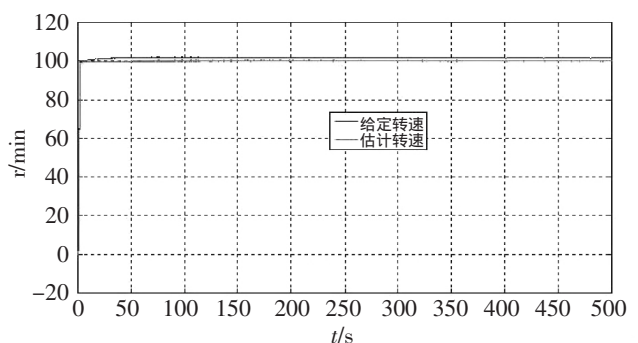


图 11 电机给定转速和估计转速



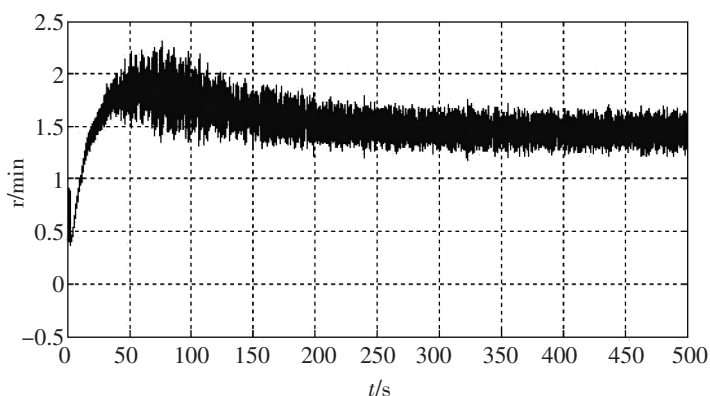


图12 电机给定转速和估计转速差值

### 3.2 基于全阶状态观测器的模型参考自适应算法仿真

基于全阶状态观测器的参考自适应转速辨识模块如图13所示。

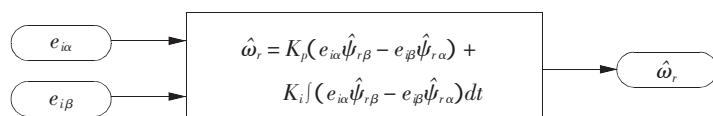


图13 MRAS转速辨识模块

图13中,转速估算模型的4个输入同样分别是定子电压和定子电流在静止坐标系下的分量。转子磁链 $\hat{\psi}_r$ 以及定子电流 $\hat{i}_s$ 可以通过相应的公式求得,并将其作为状态变量。在整个系统中,只有定子电流 $i_s$ 是可以被测量的量,因此取 $i_s$ 和 $\hat{i}_s$ 的差值作为补偿误差,并由此构成一个闭环的估计系统。电机转速设定为100 r/min。其仿真结果如图14、图15、图16所示。

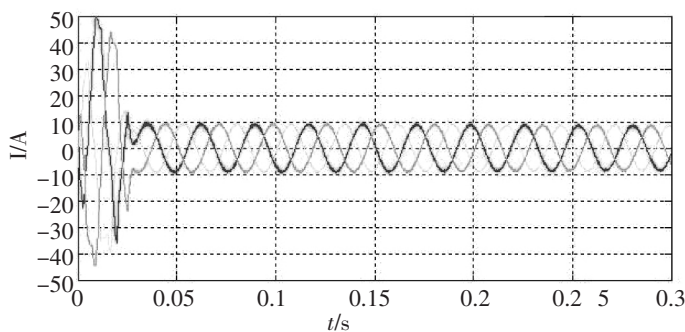


图14 电机定子电流图

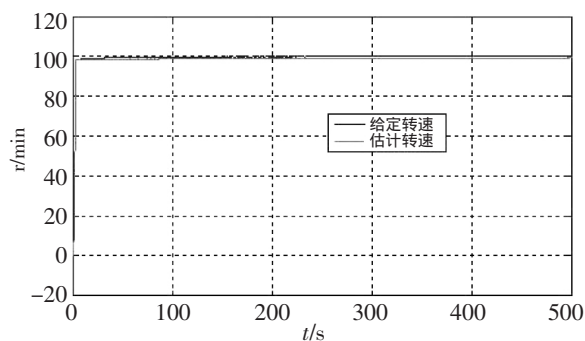


图15 电机给定转速和估计转速

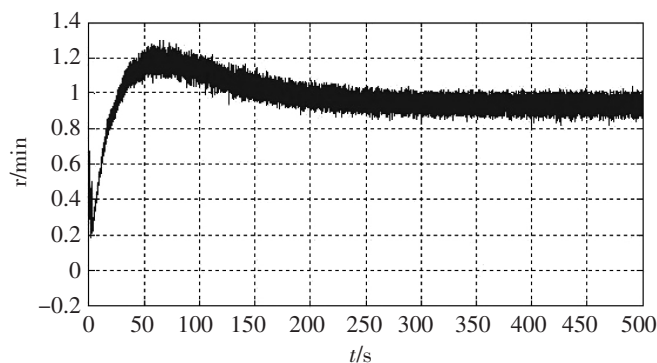


图16 电机给定转速和估计转速差值

对比图10和图14可以看出,电机刚启动时定子电流比较大,此时相应的电磁转矩值也比较大,定子电流脉动比较大,但是很快便会趋于平稳。由于改进后的算法中增加了定子电流反馈,因此,改进后的算法使

得定子电流波形畸变得得到改善。由图 11 和图 15 可以看出,在两种不同的算法下,电机的转速上升都较快,而且转速不会发生超调现象。但是跟传统的基于转子磁链的模型参考自适应算法相比,使用改进后的算法所观测到的电机转速,能更好地追踪给定转速。对比图 12 以及图 16 可以看出,使用改进后的模型参考自适应算法,两者之间的差值明显较小。

#### 4 结束语

本文根据螺旋桨负载的工作特性,简单分析了螺旋桨的推力扭矩特性及船舶的阻力特性,以船—桨负载模型作为船舶推进交流异步电机的负载模型,并对船—桨负载模型进行了仿真,验证了构建模型的准确性。同时建立了船舶推进异步电机无速度传感器矢量控制系统,对系统中的速度辨识模块,分别采用传统的模型参考自适应算法和基于全阶状态观测器的模型参考自适应算法进行了仿真研究。通过对仿真结果的分析可知,系统运行状态良好,能够适应较高的电压等级,电流谐波含量小,可以实现无速度传感器矢量控制。由此可知,改进后的模型参考自适应算法性能更优。

#### 参考文献:

- [1]张翔.船舶电力推进的应用研究[J].广东造船,2003,(2):27-30.
- [2]李永东.交流电机数字控制系统[M].北京:机械工业出版社,2002.
- [3]任俊杰.船用永磁同步电动机推进系统建模与仿真研究[D].大连:大连海事大学,2010.

(责任编辑 乔红宇)

## Simulation Study on Speed Sensorless Vector Control for Vessel Propulsion Motor

XU Peng-peng<sup>1</sup>, CAO Xiang<sup>2</sup>

- (1. Dept. of Mechatronics, Nantong Vocational & Technical Shipping College, Nantong 226010, China;
- 2. Dept. of Navigation, Nantong Vocational & Technical Shipping College, Nantong 226010, China)

**Abstract:** The core of vessel electric propulsion technology is the control technology of vessel propulsion motor. Taking the asynchronous motor as the propulsion motor and the vessel-propeller load model as the load model of the vessel propulsion asynchronous motor, a simulation analysis of the vessel-propeller load model is carried out. Meanwhile, a comparison of the measured rotor speed and the estimated rotor speed is made. As verified, the improved model reference adaptive algorithm method has much better performance.

**Key words:** asynchronous motor; vessel-propeller load model; vector control; model reference adaptiveness