

文章编号:1671-1637(2014)06-0059-08

## 船舶吊舱 SSP 推进电机的无模型 自适应矢量控制方法

姚文龙<sup>1</sup>, 张均东<sup>1</sup>, 池荣虎<sup>2</sup>, 张桂臣<sup>3</sup>, 施振华<sup>4</sup>

(1. 大连海事大学 轮机工程学院, 辽宁 大连 116026; 2. 青岛科技大学 自动化与电子工程学院,  
山东 青岛 266042; 3. 哈尔滨工程大学 船舶工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;  
4. 麻省理工学院 机械工程系, 马萨诸塞 剑桥 02139)

**摘要:**考虑具有不确定动态和航行中负载变化与海况干扰的船舶吊舱 SSP 推进电机控制问题, 提出了一种无模型自适应矢量控制方法, 推导了 SSP 推进电机的动态线性方程, 设计了基于速度跟踪误差无模型自适应矢量控制器和进行了收敛性证明, 在线调整伪偏导数, 保证了推进电机控制系统跟踪误差一致有界, 并对比了无模型自适应矢量控制器与自整定 PI 矢量控制器的控制性能。计算结果表明: 基于复合无模型自适应矢量控制的 SSP 推进系统在恶劣海况下转速平均振荡小于  $6 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ , 转矩平均振荡小于  $8.20 \times 10^4 \text{ N} \cdot \text{m}$ , 机动航行时对应的值分别小于  $7 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  与  $1.08 \times 10^5 \text{ N} \cdot \text{m}$ , 而采用自整定 PI 矢量控制时, 在恶劣海况下转速平均振荡达到  $13 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ , 转矩平均振荡达到  $2.13 \times 10^5 \text{ N} \cdot \text{m}$ , 机动航行时对应的值分别达到  $12 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  与  $2.81 \times 10^5 \text{ N} \cdot \text{m}$ , 因此, 复合无模型自适应矢量控制下的转速与转矩抖动和稳态运行静差较小, 具有良好的动态响应。

**关键词:**轮机工程; 船舶吊舱; SSP 推进电机; 无模型自适应矢量控制; 自整定 PI 矢量控制

**中图分类号:** U665.11

**文献标志码:** A

### Model-free adaptive vector control method of SSP propulsion motor for ship pod

YAO Wen-long<sup>1</sup>, ZHANG Jun-dong<sup>1</sup>, CHI Rong-hu<sup>2</sup>, ZHANG Gui-chen<sup>3</sup>, SHI Zhen-hua<sup>4</sup>

(1. School of Marine Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, Liaoning, China; 2. School of Automation and Electronic Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266042, Shandong, China; 3. School of Shipbuilding Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, Heilongjiang, China; 4. Department of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge 02139, Massachusetts, USA)

**Abstract:** Considering the control problems of propulsion motor of ship SSP (siemens schottel propulsor) system under uncertain dynamic state, load change and sea condition disturbance, a model-free adaptive vector control method was proposed. The dynamic linearization equations of propulsion motor were derived. A model-free adaptive vector controller was designed based on the speed tracking error and its convergence was proved. The pseudo-partial-derivative was online adjusted to ensure the tracking error of propulsion motor control system uniformly bounded. The control performances of model-free adaptive vector controller and self-adjusting PI vector

收稿日期: 2014-08-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(51179102); 中国博士后科学基金项目(2012M520710); 山东省高等学校科技计划项目(J13LN72); 山东省青岛市市南区科技发展项目(2012-5-004-ZH)

作者简介: 姚文龙(1981-), 男, 山东青岛人, 大连海事大学工学博士研究生, 从事船舶电力推进控制技术研究。

导师简介: 张均东(1967-), 男, 辽宁大连人, 大连海事大学教授, 工学博士。

controller were compared. Computed result shows that based on model-free adaptive vector control, the speed average oscillations are within  $6 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  and  $7 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  in rough sea and maneuverable navigation, respectively, and the torque average oscillations are  $8.20 \times 10^4 \text{ N} \cdot \text{m}$  and  $1.08 \times 10^5 \text{ N} \cdot \text{m}$ , respectively. But based on self-adjusting PI vector control, the average speed oscillations reach  $13 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  and  $12 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ , respectively, and the torque average oscillations are  $2.13 \times 10^5 \text{ N} \cdot \text{m}$  and  $2.81 \times 10^5 \text{ N} \cdot \text{m}$ , respectively. Obviously, the model-free adaptive vector control system has lower speed and torque fluctuations and smaller static error of steady state operation, so its dynamic responses are better. 6 figs, 21 refs.

**Key words:** marine engineering; ship pod; SSP propulsion motor; model-free adaptive vector control; self-adjusting PI vector control

**Author resumes:** YAO Wen-long(1981-), male, doctoral student, +86-411-84726338, yaowenlong@dlmu.edu.cn; ZHANG Jun-dong(1967-), male, professor, PhD, +86-411-84726338, zhjundong@dlmu.edu.cn.

## 0 引 言

目前,矢量控制和直接转矩控制是永磁同步电机的 2 种主流控制策略<sup>[1-2]</sup>。陆文斌等基于模型参考自适应系统理论,对电压、电流模型的闭环磁链观测器进行了改进,在不需转速的条件下可以准确观测转子磁链的幅值与角度,实现了电机转速的估算<sup>[3]</sup>;Ozkop 等根据电机的数学模型,建立了磁链、转矩双闭环 PI 控制策略,提出基于空间矢量调制的直接转矩控制方法,减小了转矩脉动,改善了电流和磁链波形<sup>[4]</sup>。

但是船舶吊舱 SSP(Siemens Schottel Propulsor)推进系统是典型的复杂非线性系统,其推进电机两端直接驱动螺旋桨,转子为螺旋桨的共同轴。由于没有中间轴承等传动机构,SSP 推进电机对负载的变化和外部扰动更敏感,如推力纹波、齿槽效应和端部效应等非线性因素对跟踪精度影响非常大<sup>[5]</sup>,很难建立 SSP 推进电机精确的数学模型,因此,以往基于模型的电机控制策略受到了挑战,如自适应控制<sup>[3,6]</sup>、反推控制<sup>[7]</sup>、滑模变结构控制<sup>[8]</sup>等。

在船舶吊舱 SSP 推进电机的实船应用中,内外环均采用 PI 矢量控制调速系统仍占主要地位,国内外学者在这方面做了大量工作<sup>[9-15]</sup>。纪锋等针对船舶电力推进系统的螺旋桨特性,提出了 PI 矢量调节,并对不同工况下电机起动和调速时系统的暂态状况进行了分析<sup>[13]</sup>;李鹏等提出了基于模型的离线式整定与模糊 PI 在线整定相结合的混合整定法<sup>[14]</sup>;杨明提出了以电磁转矩误差和定子磁链误差作为 PI 控制器输入的矢量控制算法,研究了电力推进系统的控制性能<sup>[15]</sup>。

需要说明的是在实船应用中当海况发生变化时,基于 PI 调节的矢量控制方法<sup>[9-15]</sup>需要重新对调节器的参数进行整定,并且需要较大的比例增益系数才能使电流很好地跟随,而这会导致超调,很难适应较大的非线性不确定性和扰动变化。另外,由于 SSP 推进电机电流与逆变器驱动电压较大,当速度阶跃给定较大时,由于控制器积分饱和会出现 Windup 现象,从而在实船应用中具有一定的局限性。

最近侯忠生教授给出了一种新的非参数动态线性化方法,提出了无模型自适应控制理论(Model-free Adaptive Control, MFAC)<sup>[16-17]</sup>,并在各个领域得到了广泛的应用<sup>[18-21]</sup>。无模型自适应控制是一种新型的数据驱动控制方法,摆脱了对受控系统数学模型的依赖与未建模动态对控制系统的影响,仅用系统的 I/O 数据设计控制器,计算量小,响应速度快。

本文将无模型自适应控制的基本思想和分析手段引入矢量控制过程中,提出了船舶吊舱 SSP 推进电机的无模型自适应矢量控制方法。

## 1 吊舱 SSP 推进电机模型

船舶吊舱 SSP 推进电机是一个多变量、强耦合、参数时变的复杂非线性系统,本文参考了 Andon 等提出的 SSP 推进电机模型<sup>[9]</sup>,其动态转速方程为

$$\begin{aligned}\dot{\omega} &= \frac{1}{J}(T_e - F\omega - T_L) \\ \omega &= 2\pi n/60\end{aligned}\quad (1)$$

式中: $\omega$  为电机转子的角速度; $n$  为螺旋桨转速; $J$  为 SSP 系统转动惯量; $F$  为 SSP 系统摩擦因数; $T_e$  为

电磁转矩;  $T_L$  为负载转矩。

在同步旋转坐标系下,采用直轴( $d$ 轴)电流  $i_d$  为 0 控制时,对 SSP 推进电机来说,单位定子电流可获得最大转矩。电磁转矩为

$$T_e = K_L i_q \quad (2)$$

$$K_L = 3P\varphi/2$$

式中:  $K_L$  为负载转矩系数;  $P$  为 SSP 推进电机极对数;  $i_q$  为交轴( $q$ 轴)电流;  $\varphi$  为永磁体磁链。

SSP 负载转矩为

$$T_L = \text{sgn}(\omega) K_L \rho D^5 \omega^2 / 4\pi^2 \quad (3)$$

式中:  $\rho$  为水的密度;  $D$  为螺旋桨直径。

将式(2)、(3)代入式(1),经整理,可得

$$n(t+1) = -\text{sgn}\left[\frac{\pi n(t)}{30}\right] \frac{15K_L \rho D^5 h^2}{2\pi^3 J} \left[\frac{\pi n(t)}{30}\right]^2 + \frac{30K_L h i_q(t)}{\pi J} + \left(1 - \frac{Fh}{J}\right) n(t) = f[n(t)] + An(t) + Bi_q(t) \quad (4)$$

$$A = 1 - \frac{Fh}{J}$$

$$B = \frac{30K_L h}{\pi J}$$

$$f[n(t)] = -\text{sgn}\left[\frac{\pi n(t)}{30}\right] \frac{15K_L \rho D^5 h^2}{2\pi^3 J} \left[\frac{\pi n(t)}{30}\right]^2$$

式中:  $n(t)$  为  $t$  时刻船舶吊舱 SSP 推进系统螺旋桨输出转速;  $h$  为采样周期;  $i_q(t)$  为  $t$  时刻的交轴电流。

为了严格讨论,对 SSP 离散时间系统式(4)假设如下。

**假设 1:** 式(4)关于控制输入信号  $i_q(t)$  的偏导数存在且连续。

**假设 2:** 式(4)是广义 Lipschitz 的,即满足对任意的  $t$ , 当  $\Delta i_q(t) \neq 0$  时,有

$$|\Delta n(t+1)| \leq Q |\Delta i_q(t)| \quad (5)$$

$$\Delta n(t+1) = n(t+1) - n(t)$$

$$\Delta i_q(t) = i_q(t) - i_q(t-1)$$

式中:  $Q$  为一个正常数。

由于 SSP 系统模型式(1)~(4)对于全局变量均连续可微,显然控制输入信号  $i_q(t)$  的偏导数存在且连续。另外,对于 SSP 系统而言,有限的定子电流的变化不会引起 SSP 系统转速的无限增加,所以假设 2 显然成立。

## 2 SSP 推进电机的无模型自适应矢量控制

### 2.1 动态线性化

类似于文献[16], SSP 非线性系统的动态线性

化定理可总结如下。

**定理 1:** 对于 SSP 系统动态转速式(4),当  $\Delta i_q(t) \neq 0$  时,一定存在一个称为伪偏导数的量  $\theta(t)$ ,使得

$$\Delta n(t+1) = \theta(t) \Delta i_q(t) \quad (6)$$

$$|\theta(t)| \leq Q$$

**证明:** 由式(4)可得

$$\Delta n(t+1) = f[n(t)] + An(t) + Bi_q(t) - f[n(t-1)] - An(t-1) - Bi_q(t-1) = B\Delta i_q(t) + \xi(t) \quad (7)$$

$$\xi(t) = f[n(t)] + An(t) - f[n(t-1)] - An(t-1) \quad (8)$$

由于  $\Delta i_q(t) \neq 0$ , 故方程

$$\xi(t) = \eta(t) \Delta i_q(t) \quad (9)$$

一定有解  $\eta(t)$ 。令

$$\theta(t) = B + \eta(t) \quad (10)$$

则由式(7)、(9)直接可以得到式(6)。显然可得  $|\theta(t)| \leq Q$ , 证毕。

### 2.2 控制器设计

对于船舶吊舱 SSP 推进电机控制系统,假设期望船速为  $n^*(t+1)$ , 控制目标是寻找一个合适的控制输入  $i_q(t+1)$ , 使得跟踪误差

$$e(t+1) = n^*(t+1) - n(t+1)$$

随着采样周期趋于无穷而收敛于 0。

控制输入准则函数  $H$  为

$$H = e^2(t+1) + \lambda [i_q(t) - i_q(t-1)]^2 \quad (11)$$

式中:  $\lambda$  为一个正的电流的权重因子。

准则函数中由于  $\lambda [i_q(t) - i_q(t-1)]^2$  的引入,使得控制输入量的变化受到限制,且能克服稳态跟踪误差。

根据式(11)和  $e(t+1)$  的定义,可得  $H$  新的表达式如下

$$H = \left\{ n^*(t+1) - n(t) - \theta(t) [i_q(t) - i_q(t-1)] \right\}^2 + \lambda [i_q(t) - i_q(t-1)]^2 \quad (12)$$

利用最优条件

$$\frac{\partial H}{\partial i_q(t)} = 0$$

可得

$$i_q(t) = i_q(t-1) + \frac{\gamma_t \theta(t)}{\lambda + \theta^2(t)} \cdot [n^*(t+1) - n(t)] \quad (13)$$

式中:  $\gamma_t$  为步长,它的引入是为了使算法式(13)更具有一般性。

由于  $\theta(t)$  未知, 可用  $\theta(t)$  的在线估计值  $\hat{\theta}(t)$  给出控制算法的表达式, 为

$$i_q(t) = i_q(t-1) + \frac{\gamma_t \hat{\theta}(t)}{\lambda + \hat{\theta}^2(t)} \cdot [n^*(t+1) - n(t)] \quad (14)$$

$\hat{\theta}(t)$  的在线更新律为如下估计准则函数的最优解

$$H = [n(t) - n(t-1) - \hat{\theta}(t) \Delta i_q(t-1)]^2 + \mu [\hat{\theta}(t) - \hat{\theta}(t-1)]^2 \quad (15)$$

式中:  $\mu$  为估计值的权重因子。

利用最优条件与式(15)可得伪偏导数为

$$\hat{\theta}(t) = \hat{\theta}(t-1) + \frac{\eta_t \Delta i_q(t-1)}{\mu + [\Delta i_q(t-1)]^2} \cdot [\Delta n(t) - \hat{\theta}(t-1) \Delta i_q(t-1)] \quad (16)$$

式中:  $\eta_t$  为步长序列。

为了使  $|\Delta i_q(t)| \neq 0$  总能满足, 给出重置算法如下

$$\hat{\theta}(t) = \hat{\theta}(1) \quad \hat{\theta}(t) \leq \epsilon \text{ or } |\Delta i_q(t-1)| \leq \epsilon \text{ or } \text{sgn}[\hat{\theta}(t)] \neq \text{sgn}[\hat{\theta}(1)] \quad (17)$$

式中:  $\epsilon$  为一个充分小的正数。

综合前面所得到的 PPD 估计算法式(16)、重置算法式(17)和控制算法式(14), 可以给出船舶吊舱 SSP 推进电机控制系统的无模型自适应矢量控制方案如下

$$\left\{ \begin{array}{l} \hat{\theta}(t) = \hat{\theta}(t-1) + \frac{\eta_t \Delta i_q(t-1)}{\mu + [\Delta i_q(t-1)]^2} \cdot [\Delta n(t) - \hat{\theta}(t-1) \Delta i_q(t-1)] \\ \hat{\theta}(t) = \hat{\theta}(1) \quad \hat{\theta}(t) \leq \epsilon \text{ or } |\Delta i_q(t-1)| \leq \epsilon \text{ or } \text{sgn}[\hat{\theta}(t)] \neq \text{sgn}[\hat{\theta}(1)] \\ i_q(t) = i_q(t-1) + \frac{\gamma_t \hat{\theta}(t)}{\lambda + \hat{\theta}^2(t)} \cdot [n^*(t+1) - n(t)] \end{array} \right. \quad (18)$$

可以看出, 无模型自适应矢量控制算法控制律与受控系统的数学模型与阶数无关, 可仅利用系统 I/O 数据进行设计, 且只有一个在线调整的参数, 即伪偏导数, 这正是无模型自适应矢量控制应用于船舶吊舱 SSP 推进电机控制的优势所在。

### 2.3 收敛性分析

为了严格讨论, 对 SSP 系统的伪偏导数给出如下假设与定理。

**假设 3:** 对于任意时刻  $t$  与  $\Delta i_q(t) \neq 0$ , 系统的符号保持不变。

**定理 2:** 对于船舶吊舱 SSP 推进电机控制系统式(4), 在假设 1~3 均成立的条件下, 当  $n^*(t+1)$  为常数时, 采用无模型自适应矢量控制方案式(18), 存在一个正数  $\lambda_{\min} > 0$ , 使得  $\lambda > \lambda_{\min}$  时有: 系统输出跟踪误差是单调收敛的, 且  $\lim_{t \rightarrow \infty} |n^*(t+1) - n(t+1)| = 0$ ; 闭环系统是 BIBO 稳定的, 即输出序列  $\{n(t)\}$  和输入序列  $\{i_q(t)\}$  有界。

**证明:** 定理 2 的证明包括 3 部分, 分别是伪偏导数估计值  $\hat{\theta}(t)$ 、控制信号  $i_q(t)$  与系统输出转速  $n(t)$  的有界性。

#### 2.3.1 $\hat{\theta}(t)$ 的有界性

当  $|\Delta i_q(t)| \leq \epsilon$  时, 显然, 由式(17)可得  $\hat{\theta}(t)$  有界。当  $|\Delta i_q(t)| > \epsilon$  时, 将式(16)两边同时减去  $\theta(t)$ , 定义

$$\begin{aligned} \tilde{\theta}(t) &= \hat{\theta}(t) - \theta(t) \\ \Delta \theta(t) &= \theta(t) - \theta(t-1) \end{aligned}$$

可以得

$$\tilde{\theta}(t) = \tilde{\theta}(t-1) - \theta(t) + \theta(t-1) + \frac{\eta_t \Delta i_q(t-1)}{\mu + [\Delta i_q(t-1)]^2} \cdot [\Delta n(t) - \hat{\theta}(t-1) \Delta i_q(t-1)] \quad (19)$$

根据定理 1, 可将式(19)重新写为

$$\begin{aligned} \tilde{\theta}(t) &= \tilde{\theta}(t-1) - \Delta \theta(t) + \frac{\eta_t \Delta i_q(t-1)}{\mu + [\Delta i_q(t-1)]^2} \cdot [\Delta n(t) - \hat{\theta}(t-1) \Delta i_q(t-1)] = \\ &= \tilde{\theta}(t-1) - \frac{\eta_t [\Delta i_q(t-1)]^2 \tilde{\theta}(t-1)}{\mu + [\Delta i_q(t-1)]^2} - \\ &= \Delta \theta(t) = \left\{ 1 - \frac{\eta_t [\Delta i_q(t-1)]^2}{\mu + [\Delta i_q(t-1)]^2} \right\} \cdot \\ &= \tilde{\theta}(t-1) - \Delta \theta(t) \end{aligned} \quad (20)$$

对式(20)取绝对值, 得

$$|\tilde{\theta}(t)| \leq \left| 1 - \frac{\eta_t [\Delta i_q(t-1)]^2}{\mu + [\Delta i_q(t-1)]^2} \right| \cdot |\tilde{\theta}(t-1)| + |\Delta \theta(t)| \quad (21)$$

显然, 函数  $\frac{\eta_t [\Delta i_q(t-1)]^2}{\mu + [\Delta i_q(t-1)]^2}$  关于变量  $[\Delta i_q(t-1)]^2$

是单调递增的, 其最小值为  $\frac{\eta \epsilon^2}{\mu + \epsilon^2}$ 。当  $0 < \eta \leq 1$  和  $\mu > 0$  时, 一定存在常数  $d_1$ , 满足

$$0 \leq \left| 1 - \frac{\eta_t [\Delta i_q(t-1)]^2}{\mu + [\Delta i_q(t-1)]^2} \right| \leq 1 - \frac{\eta \epsilon^2}{\mu + \epsilon^2} = d_1 < 1 \quad (22)$$

因为  $|\theta(t)| \leq Q$  有界,可知  $|\Delta\theta(t)| \leq 2Q$ ,利用式(21)、(22),有

$$|\tilde{\theta}(t)| \leq d_1 |\tilde{\theta}(t-1)| + 2Q \leq d_1^2 |\tilde{\theta}(t-2)| + 2d_1 Q + 2Q \leq \dots \leq d_1^{t-1} |\tilde{\theta}(1)| + \frac{2Q(1-d_1^{t-1})}{1-d_1} \quad (23)$$

显然,式(23)意味着  $\tilde{\theta}(t)$  有界,由于  $\theta(t)$  有界,故  $\hat{\theta}(t)$  也有界。

### 2.3.2 控制信号与系统输出转速的有界性

跟踪误差绝对值为

$$|e(t+1)| = |n^*(t+1) - n(t+1)| \quad (24)$$

根据式(6)、(24),得到

$$|n^*(t+1) - n(t+1)| = \left| n^*(t+1) - n(t) - \theta(t) \Delta i_q(t) \right| \leq \left| 1 - \frac{\gamma_i \hat{\theta}(t) \theta(t) |e(t)|}{\lambda + \hat{\theta}^2(t)} \right| \quad (25)$$

由重置算法式(17)可知,  $\hat{\theta}(t) \theta(t) \geq 0$ 。令  $\lambda_{\min} = Q^2/4$ ,若选取  $\lambda > \lambda_{\min}$ ,则一定存在一个常数  $0 < M_1 < 1$ ,使得下式成立

$$0 < M_1 \leq \frac{\gamma_i \hat{\theta}(t) \theta(t)}{\lambda + \hat{\theta}^2(t)} \leq \frac{Q \hat{\theta}(t)}{\lambda + \hat{\theta}^2(t)} \leq \frac{Q \hat{\theta}(t)}{2\sqrt{\lambda} \hat{\theta}(t)} < \frac{Q}{2\sqrt{\lambda_{\min}}} = 1 \quad (26)$$

根据式(26),及  $0 < \gamma_i \leq 1$  和  $\lambda > \lambda_{\min}$ ,一定存在一个常数  $d_2 < 1$ ,使得

$$\left| 1 - \frac{\gamma_i \hat{\theta}(t) \theta(t)}{\lambda + \hat{\theta}^2(t)} \right| = 1 - \frac{\gamma_i \hat{\theta}(t) \theta(t)}{\lambda + \hat{\theta}^2(t)} \leq 1 - \gamma_i M_1 = d_2 < 1 \quad (27)$$

结合式(25)、(27),有

$$|e(t+1)| \leq d_2 |e(t)| \leq d_2^2 |e(t-1)| \leq \dots \leq d_2^t |e(1)| \quad (28)$$

由式(28)可得,定理 2 的结论(1)成立。

由于  $n^*(t)$  为常数,则输出跟踪误差  $e(t)$  的收敛性意味着  $n(t)$  有界。利用不等式

$$(\sqrt{\lambda})^2 + \hat{\theta}^2(t) \geq 2\sqrt{\lambda} \hat{\theta}(t)$$

$$\lambda > \lambda_{\min}$$

由式(14)可得

$$|\Delta i_q(t)| = \left| \frac{\gamma_i \hat{\theta}(t) [n^*(t) - n(t)]}{\lambda + \hat{\theta}^2(t)} \right| \leq \left| \frac{\gamma_i \hat{\theta}(t)}{\lambda + \hat{\theta}^2(t)} \right| |e(t)| \leq$$

$$\left| \frac{\gamma_i \hat{\theta}(t)}{2\sqrt{\lambda} + |\hat{\theta}(t)|} \right| |e(t)| \leq \left| \frac{\gamma_i}{2\sqrt{\lambda_{\min}}} \right| |e(t)| = M_2 |e(t)| \quad (29)$$

$$M_2 = \gamma_i / 2\sqrt{\lambda_{\min}}$$

式中:  $M_2$  为一个有界常数。

利用式(28)、(29),有

$$\begin{aligned} |i_q(t)| &\leq |i_q(t) - i_q(t-1)| + |i_q(t-1)| \leq \\ &|i_q(t) - i_q(t-1)| + |i_q(t-1) - i_q(t-2)| + \\ &|i_q(t-2)| \leq \dots \leq |\Delta i_q(t)| + |\Delta i_q(t-1)| + \\ &\dots + |\Delta i_q(2)| + |i_q(1)| \leq M_2 [|e(t)| + \\ &|e(t-1)| + \dots + |e(2)|] + |i_q(1)| \leq \\ &M_2 [d_2^{t-1} |e(1)| + d_2^{t-2} |e(1)| + \dots + \\ &d_2 |e(1)|] + |i_q(1)| \leq \frac{M_2 d_2 |e(1)|}{1-d_2} + \\ &|i_q(1)| \end{aligned} \quad (30)$$

从而可证系统的输出转速有界。

## 3 仿真结果分析

在 MATLAB/Simulink 仿真环境下建立船舶 SSP 推进电机无传感器双闭环调速系统,螺旋桨模型采用 S 型函数实现。SSP 推进电机参数部分参考“泰安口”半潜船,具体为:额定功率为 4 700 kW;额定电压为 660 V;额定转速为 155 r · min<sup>-1</sup>;额定转矩为 1 185 kN · m;转子永磁体磁链为 4.55 Wb;定子电阻为 1.632 Ω;电机极对数为 8; d 轴电感为 0.25 mH; q 轴电感为 0.47 mH。速度外环由 MFAC 控制器构成,采用 S 型函数实现,用来生成期望的交轴参考电流  $i_q(t)$ ,直轴参考电流  $i_d(t)$  为 0,内环电流调节仍由 PI 控制器实现,其控制系统见图 1。为了比较起见,对速度外环采用基于自整定 PI 算法的矢量控制<sup>[22]</sup>,其控制系统见图 2,即

$$i_q(t) = K_p [n^*(t) - n(t)] +$$

$$K_i \sum_{j=0}^t n^*(j) - n(j)$$

式中:  $K_p$ 、 $K_i$  分别为 PI 控制器的比例与积分增益。

图 2 中:  $u_d(t)$ 、 $u_q(t)$  分别为  $t$  时刻两相旋转坐标系 d、q 轴电压;  $u_a(t)$ 、 $u_b(t)$ 、 $i_a(t)$ 、 $i_b(t)$  分别为两相静止坐标系 α、β 轴电压与电流;  $i_a(t)$ 、 $i_b(t)$ 、 $i_c(t)$ 、 $u_a(t)$ 、 $u_b(t)$ 、 $u_c(t)$  分别为三相静止坐标系 a、b、c 轴的电流与电压;  $\vartheta(t)$  为转子角度。

### 3.1 恶劣海况

对于船舶海上定速航行时,当海况发生变化,螺旋桨负载转矩随之发生变化的工况进行仿真分



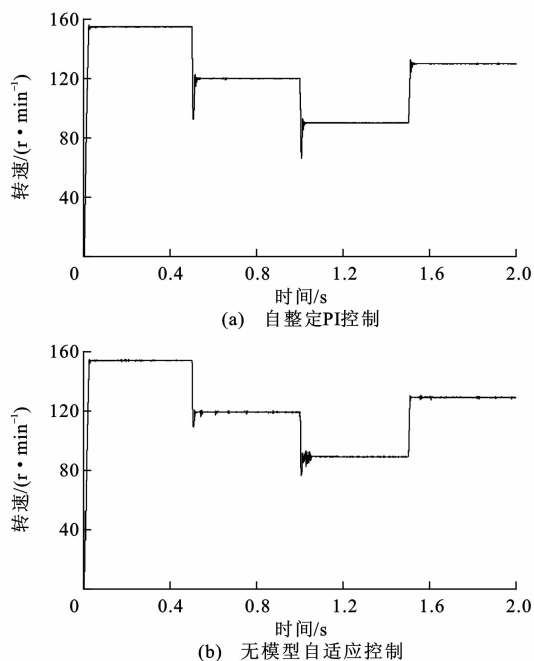


图5 机动航行时 SSP 推进电机转速曲线

Fig. 5 Speed curves of SSP propulsion motor in maneuverable navigation

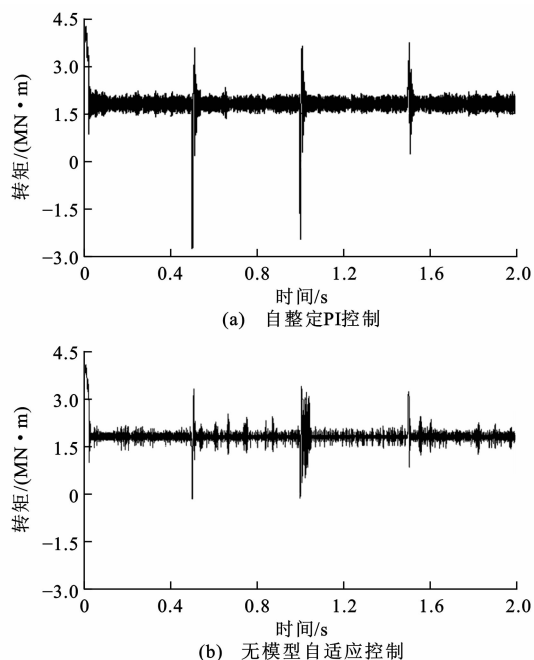


图6 机动航行时 SSP 推进电机转矩曲线

Fig. 6 Torque curves of SSP propulsion motor in maneuverable navigation

## 4 结 语

本文对采用矢量控制的船舶吊舱 SSP 推进电机控制系统进行了研究,提出了 SSP 推进电机无模型自适应矢量控制方案,以改善 SSP 推进电机的速度与转矩跟踪性能,提高系统的抗干扰能力。该控

制器的设计本质上是一种无模型的控制方法,只依赖于系统的输入、输出数据,克服了传统矢量控制的设计和分析依赖于系统某些知识的局限。仿真结果验证了无模型自适应矢量控制算法应用于船舶吊舱 SSP 推进电机控制系统的有效性,控制器超调小,动态响应快,具有较强的抗干扰性和鲁棒性。

## 参考文献:

### References :

- [1] 高宏伟,杨贵杰,刘 剑. 三次谐波注入式五相永磁同步电机矢量控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(24): 4101-4108.  
GAO Hong-wei, YANG Gui-jie, LIU Jian. A vector control strategy for five-phase PMSM with third harmonic injection[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(24): 4101-4108. (in Chinese)
- [2] HARTANI K, SEKOUR M, DRAOU A. A new direct torque control scheme for PMSM with on-line stator resistance tuning[C]// IEEE. Fourth International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives. Istanbul: IEEE, 2013: 721-726.
- [3] 陆文斌,姚文熙,吕征宇. 基于改进闭环磁链观测器的感应电机无速度矢量控制[J]. 电工技术学报, 2013, 28(3): 148-153.  
LU Wen-bin, YAO Wen-xi, LU Zheng-yu. Speed sensorless vector control with improved closed-loop flux observer for induction machines[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(3): 148-153. (in Chinese)
- [4] OZKOP E, OKUMUS H I. Direct torque control of induction motor using space vector modulation (SVM-DTC) [C]// IEEE. 12th International Middle-East Power System Conference. Aswan: IEEE, 2008: 368-372.
- [5] 李 巍,汪 蕾,杨晨俊,等. 吊舱推进器定常水动力性能[J]. 上海交通大学学报, 2009, 43(2): 204-207.  
LI Wei, WANG Lei, YANG Chen-jun, et al. The steady hydrodynamics performance of pod-propeller[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2009, 43(2): 204-207. (in Chinese)
- [6] TABBACHE B, KHELOUI A, BENBOUZID M E H. An adaptive electric differential for electric vehicles motion stabilization[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011, 60(1): 104-110.
- [7] 刘栋梁,郑谢辉,崔丽丽. 无速度传感器永磁同步电机反步控制[J]. 电工技术学报, 2011, 26(9): 67-72.  
LIU Dong-liang, ZHENG Xie-hui, CUI Li-li. Backstepping control of speed sensorless permanent magnet synchronous motor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(9): 67-72. (in Chinese)
- [8] JAFARIFAR M, KIANINEZHAD R, SEIFOSSADAT S G, et al. Sliding mode and disturbance observer: two viable schemes for sensorless control of induction machines[C]// IEEE. 4th IEEE Conference on Industrial Electronics and

- Applications. Xi'an: IEEE, 2009: 2329-2334.
- [9] ANDON V T, GIUSEPPE L C, VINCENZO G, et al. Sliding mode neuro-adaptive control of electric drives[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54(1): 671-679.
- [10] 周华伟, 温旭辉, 赵峰, 等. 基于内模的永磁同步电机滑模电流解耦控制[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(15): 91-99.  
ZHOU Hua-wei, WEN Xu-hui, ZHAO Feng, et al. Decoupled current control of permanent magnet synchronous motors drives with sliding mode control strategy based on internal model[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(15): 91-99. (in Chinese)
- [11] 王礼鹏, 张化光, 刘秀舫. 永磁同步电动机无速度传感器矢量调速系统的积分反步控制[J]. 控制理论与应用, 2012, 29(2): 199-204.  
WANG Li-peng, ZHANG Hua-guang, LIU Xiu-chong. Integral backstepping controller in the sensorless vector-control system for permanent magnet synchronous motor[J]. Control Theory and Applications, 2012, 29(2): 199-204. (in Chinese)
- [12] 李兵强, 林辉. 面装式永磁同步电机电流矢量直接控制技术[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(增): 288-294.  
LI Bing-qiang, LIN Hui. Direct control of current vector for surface-mounted permanent magnet synchronous motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(S): 288-294. (in Chinese)
- [13] 纪锋, 付立军, 叶志浩, 等. 舰船电力推进系统的矢量控制及其仿真[J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2011, 35(2): 361-364.  
JI Feng, FU Li-jun, YE Zhi-hao, et al. Study on vector control for vessel electric propulsion[J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology: Transportation Science and Engineering, 2011, 35(2): 361-364. (in Chinese)
- [14] 李鹏, 王胜勇, 卢家斌, 等. PI 参数混合整定法在闭环矢量控制系统中的应用[J]. 智能系统学报, 2013, 8(5): 446-452.  
LI Peng, WANG Sheng-yong, LU Jia-bin, et al. The application of hybrid PI parameters tuning method to the closed-loop vector control system[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2013, 8(5): 446-452. (in Chinese)
- [15] 杨明. 船舶电力推进永磁同步电机非线性反步控制器设计与优化研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2012.
- YANG Ming. Research on nonlinear backstepping controller design and optimization of permanent magnet synchronous motor for ship electric propulsion[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2012. (in Chinese)
- [16] 侯忠生. 无模型自适应控制的现状与展望[J]. 控制理论与应用, 2006, 23(4): 586-592.  
HOU Zhong-sheng. On model-free adaptive control: the state of the art and perspective[J]. Control Theory and Applications, 2006, 23(4): 586-592. (in Chinese)
- [17] 侯忠生, 许建新. 数据驱动控制理论及方法的回顾和展望[J]. 自动化学报, 2009, 35(6): 650-667.  
HOU Zhong-sheng, XU Jian-xin. On data-driven control theory: the state of the art and perspective[J]. Acta Automatica Sinica, 2009, 35(6): 650-667. (in Chinese)
- [18] WANG Jing, JI Chao, CAO Liu-lin, et al. Design and realization of automatic control system for boiler based on model free adaptive control[C]//IEEE. 2011 Chinese Control and Decision Conference. Mianyang: IEEE, 2011: 1881-1886.
- [19] 崔双喜, 王维庆, 张新燕. 大型风力发电机组无模型独立变桨载荷控制[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(5): 54-59.  
CUI Shuang-xi, WANG Wei-qing, ZHANG Xin-yan. Model free and individual pitch load control for large-scale wind turbine[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(5): 54-59. (in Chinese)
- [20] YAO Wen-long, LIU Yuan, ZHANG Jun-dong, et al. Ship electrical propulsion control system based on improved model-free adaptive control[C]//IEEE. The 26th Chinese Control and Decision Conference. Changsha: IEEE, 2014: 1526-1529.
- [21] JOHN A, YANG Zai-li, RIAHI R, et al. Application of a collaborative modelling and strategic fuzzy decision support system for selecting appropriate resilience strategies for seaport operations[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering: English Edition, 2014, 1(3): 159-179.
- [22] SHIN H B, PARK J G. Anti-windup PID controller with integral state predictor for variable-speed motor drives[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronic, 2012, 59(3): 1509-1516.