

基于参数辨识的永磁伺服系统转速自适应控制

罗伟维

(广东工业大学 自动化学院, 广东 广州 510006)

摘要: 针对伺服电机驱动中转速控制器性能因伺服系统参数变化而下降的问题, 提出一种基于参数辨识的转速自适应控制方法。对于转动惯量的变化, 在连续域建立模型参考自适应系统(MRAS), 通过 Popov 超稳定性理论设计一种比例+积分(PI)型自适应律, 提高了惯量辨识的收敛速度和稳态精度。对于负载转矩, 提出一种基于中间变量设计的扰动观测器。将辨识值反馈至速度控制器中, 实现控制器参数在线自整定。试验结果表明, 所提转速自适应控制方法能准确辨识出转动惯量和负载转矩从而进行控制器参数调整, 该方法对参数变化具有良好的鲁棒性。

关键词: 伺服控制; 负载转矩观测; 惯量辨识; 转速自适应控制

中图分类号: TM 351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)10-0040-06

doi: 10.12177/emca.2020.126

Speed Adaptive Control of Permanent Magnet Servo System Based on Parameter Identification

LUO Weiwei

(School of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: With the change of servo system parameters, the performance of the speed controller in the servo motor drive decreases. Aiming at this problem, a speed adaptive control method based on parameter identification is proposed. For the change of inertia, the model reference adaptive system (MRAS) is established in the continuous domain, and a proportional integral (PI) adaptive law is designed based on Popov hyperstability theory, which improves the convergence speed and steady-state accuracy of inertia identification. For load torque, a disturbance observer based on intermediate variable design is proposed. The identified values are fed back to the speed controller to realize on-line self-tuning of controller parameters. The experimental results show that the proposed method can accurately identify the moment of inertia and load torque for parameter adjustment of the controller and improve the controller's robustness to parameter change.

Key words: servo control; load torque observation; inertia identification; speed adaptive control

0 引言

永磁同步电机(PMSM)已广泛运用于高性能的伺服控制系统,是工具机、机器人以及自动化产业的关键零组件之一。伺服控制系统要求具有动态稳定性和稳态精度,其中转速控制器是伺服系统的主导控制器,常采用PI结构。在伺服系统运行过程中,系统的总转动惯量及负载转矩的变化,

使伺服系统运行前整定的控制器参数与所控对象不匹配,导致伺服控制系统的快速性和稳定性变差。为了使系统保持快速和稳定的响应,伺服控制系统需要实时获取负载转动惯量和负载转矩的信息,并根据这些参数信息及时调整控制器来适应变化。

为了解决上述问题,国内外学者对伺服系统的参数实时辨识进行了大量研究,常用的方法如

收稿日期: 2020-05-28; 收到修改稿日期: 2020-08-16

作者简介: 罗伟维(1997—),男,硕士研究生,研究方向为伺服驱动控制。

最小二乘法、朗道离散时间递推法、卡尔曼滤波法、观测器法等^[1-6]。如文献[1]利用带遗忘因子的递推最小二乘法(FRLS),同时辨识了转动惯量和负载转矩,为转速自适应控制提供了依据,但该方法涉及三阶矩阵运算,微处理器计算负担较大。文献[2]采用朗道离散时间递推法用于负载转矩以及惯量辨识,其本质是一种离散积分(I)型模型参考自适应(MRAS)辨识法,设计过程简单,提高了系统抗扰动变化的能力,但该方法存在参数辨识收敛速度与稳态精度的矛盾。对于转动惯量辨识收敛慢以及辨识初期波动等问题,文献[4]运用全阶卡尔曼滤波器与递推最小二乘法(RLS)构成自适应卡尔曼-递推最小二乘算法,提升了参数辨识速度,但该算法设计过程复杂。文献[6]提出一种定阶频域经验最优参数估计法辨识伺服系统参数,相比RLS提高了辨识的精度以及对扰动的鲁棒性,利用参数自整定策略提高了速度环刚度。

针对文献[2]中存在的问题,本文所提转速自适应控制方法,通过简单的扰动观测器观测负载转矩,并在连续域建立MRAS,在I型自适应律的基础上引入比例(P)型自适应律形成PI型MRAS转动惯量辨识自适应律,实现控制器参数在线调整。最后,通过试验验证了所提方法的有效性。

1 参数辨识

1.1 负载转矩观测器

在伺服控制系统中,负载转矩的变化会导致转速的波动。为了降低波动,可对负载转矩进行实时观测,将观测值前馈补偿至转矩给定上。本文将负载转矩观测值用于转动惯量辨识。

考虑扰动信号的影响,线性系统的时域微分方程可以表达为

$$\dot{\mathbf{v}} = \mathbf{M}\mathbf{v} + \mathbf{N}\boldsymbol{\tau} + \mathbf{P}\mathbf{d} \quad (1)$$

式中: \mathbf{v} 、 $\boldsymbol{\tau}$ 和 \mathbf{d} 分别为状态变量、系统输入和扰动信号; \mathbf{M} 、 \mathbf{N} 和 \mathbf{P} 为相应的系数矩阵。

定义 $\hat{\mathbf{d}}$ 为扰动估计值,估计误差 $\mathbf{e}_d = \hat{\mathbf{d}} - \mathbf{d}$ 。当扰动量变化缓慢,即 $\dot{\mathbf{d}} = 0$ 时,扰动观测器可以表示为

$$\dot{\hat{\mathbf{d}}} = -\mathbf{L}(\mathbf{P}\hat{\mathbf{d}} - \mathbf{P}\mathbf{d}) \quad (2)$$

式中: \mathbf{L} 为扰动观测器的增益矩阵。

将式(1)代入式(2)得:

$$\dot{\hat{\mathbf{d}}} = -\mathbf{L}\mathbf{P}\hat{\mathbf{d}} + \mathbf{L}(\dot{\mathbf{v}} - \mathbf{M}\mathbf{v} - \mathbf{N}\boldsymbol{\tau}) \quad (3)$$

由式(3)可知,扰动量的估计需要对状态变量求导。为了避免求导过程中噪声的放大影响扰动量估计,文献[7]借助中间变量设计该扰动观测器:

$$\dot{\hat{\mathbf{d}}} - \mathbf{L}\dot{\mathbf{v}} = -\mathbf{L}\mathbf{P}\hat{\mathbf{d}} - \mathbf{L}(\mathbf{M}\mathbf{v} + \mathbf{N}\boldsymbol{\tau}) \quad (4)$$

令中间变量 $\mathbf{z} = \hat{\mathbf{d}} - \mathbf{L}\mathbf{v}$,则改进后的扰动观测器为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{z}} = -\mathbf{L}\mathbf{P}(\mathbf{z} + \mathbf{L}\mathbf{v}) - \mathbf{L}(\mathbf{M}\mathbf{v} + \mathbf{N}\boldsymbol{\tau}) \\ \hat{\mathbf{d}} = \mathbf{z} + \mathbf{L}\mathbf{v} \end{cases} \quad (5)$$

PMSM 伺服控制系统的运动方程为

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_e - T_l - D_m \omega_m \quad (6)$$

式中: J 为伺服系统的等效转动惯量; ω_m 为转子机械角速度; T_e 和 T_l 分别为电磁转矩和负载转矩; D_m 为摩擦系数。

将电机转子机械角速度 ω_m 作为状态变量 \mathbf{v} ,电磁转矩 T_e 作为系统输入 $\boldsymbol{\tau}$,负载转矩 T_l 作为扰动量 \mathbf{d} ,对式(6)整理得其状态方程:

$$\dot{\omega}_m = -\frac{D_m}{J}\omega_m + \frac{1}{J}T_e - \frac{1}{J}T_l \quad (7)$$

因此,根据式(5),可得负载转矩观测器:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{z}} = \frac{l}{J}[\mathbf{z} + (l + D_m)\omega_m - T_e] \\ \hat{T}_l = \mathbf{z} + L\omega_m \end{cases} \quad (8)$$

式中: \mathbf{z} 为中间变量; l 为观测器增益。

负载转矩观测器结构框图如图1所示。

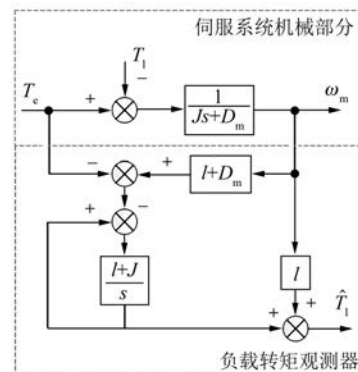


图1 负载转矩观测器结构框图

由式(2)可得负载转矩观测器的动态误差方

程为

$$\dot{e}_d - \frac{l}{J}e_d = 0 \quad (9)$$

其中: $e_d = \hat{T}_1 - T_1$ 。

根据 Lyapunov 稳定性理论对负载转矩观测器进行稳定性分析, 构建 Lyapunov 函数:

$$V = 0.5e_d^T e_d \quad (10)$$

求导得:

$$V' = \frac{l}{J}(\hat{T}_1 - T_1)^2 \quad (11)$$

由式(11)可知, 仅当 $l < 0$, 即 $V' < 0$ 时, 所设计的负载观测器是稳定的。与文献[2]设计的降阶龙伯格负载转矩观测器相比, 该扰动观测器只需设计一个观测器增益, 更易于工程实现。

1.2 转动惯量辨识算法

为了使伺服系统保持较好的动态性能, 需要先解决转动惯量辨识的问题。图2所示为根据伺服系统的运动方程建立的 MRAS。通过 Popov 超稳定性理论设计改进的 PI 型辨识自适应律, 提高辨识算法的收敛性能。

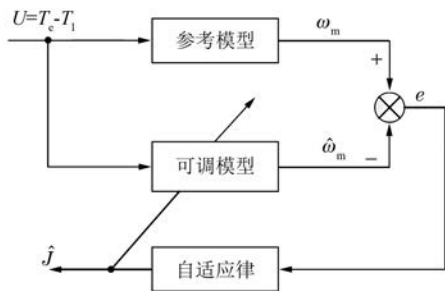


图2 MRAS 辨识结构框图

将式(6)的机械运动方程变形为

$$\frac{d\omega_m}{dt} = -\frac{D_m}{J}\omega_m + \frac{1}{J}(T_e - T_1) \quad (12)$$

则式(12)可由状态方程表示为

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx \end{cases} \quad (13)$$

式中: x 、 u 、 y 分别为状态变量 ω_m 、系统输入 $(T_e - T_1)$ 和系统输出 ω_m ; A 、 B 和 C 为相应的系数矩阵, $A = -D_m/J$, $B = 1/J$, $C = 1$ 。

构建相应的观测模型为

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}} = \hat{A}\hat{x} + \hat{B}u \\ \hat{y} = \hat{C}\hat{x} \end{cases} \quad (14)$$

式中: \hat{x} 为 x 的估计值; \hat{A} 、 \hat{B} 、 \hat{C} 分别为 A 、 B 、 C 的估计值, $\hat{C} = C$ 。

模型观测的误差方程为

$$\dot{x} - \dot{\hat{x}} = A(x - \hat{x}) + (A - \hat{A})\hat{x} + (B - \hat{B})u \quad (15)$$

MRAS 辨识的核心是将辨识系统等效成线性时变常系统和非线性时变反馈系统组成的并联反馈系统, 如图3所示。再结合 Popov 超稳定性理论设计待辨识参数的自适应律, 使等价系统的前向部分传递函数严格正实, 反馈部分满足 Popov 积分不等式, 此时观测模型与参考模型的输出误差将会收敛到零。

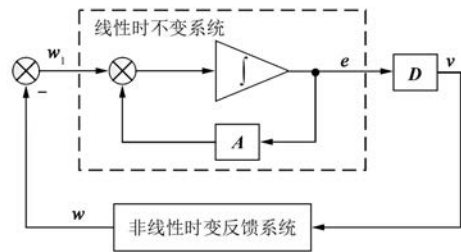


图3 并联 MRAS 的等价反馈表示

构建误差系统:

$$\begin{cases} \dot{e} = Ae + I(-w) \\ v = De \end{cases} \quad (16)$$

其中: $e = x - \hat{x}$; $I(-w) = (A - \hat{A})\hat{x} + (B - \hat{B})u$ 。

令: $w_1 = -w$, 构成非线性反馈部分。式(16)构成了一个线性时不变系统。文献[8]通过引入正实引理, 取 $D = 1$, 保证了等效系统前向部分传递函数严格正实。再考虑 Popov 积分不等式:

$$\eta(0, t_1) = \int_0^{t_1} w^T v dt = \int_0^{t_1} e^T [\Delta A \hat{x} + \Delta B u] dt \geq -\gamma_0^2, \forall t_1 \geq 0, \gamma_0^2 \geq 0 \quad (17)$$

其中: $\Delta A = \hat{A} - A$; $\Delta B = \hat{B} - B$ 。

选取如式(18)所示 PI 形式自适应律, 将其代入式(17), 可以证明式(17)成立:

$$\begin{cases} \hat{A} = K_{ap} e \hat{x} + K_{ai} \int_0^t e \hat{x} dt + A_0 \\ \hat{B} = K_{bp} e u + K_{bi} \int_0^t e u dt + B_0 \end{cases} \quad (18)$$

式中: K_{ap} 、 K_{bp} 、 K_{ai} 、 K_{bi} 分别为自适应律中的比例和积分系数; A_0 和 B_0 分别为待辨识参数的初值。

由式(18)得到转动惯量的辨识值为

$$\begin{cases} \hat{J} = 1/\hat{B} \\ \hat{D}_m = -\hat{A}\hat{B} \end{cases} \quad (19)$$

2 伺服系统转速自适应

提出的转速自适应控制方法原理框图如图4所示,采用电流内环、转速外环的级联嵌套PI控制结构,位置编码器用于获取转速 ω_m 以及电角度 θ ,电流*i*通过电流传感器测得,电磁转矩 T_e 通过电流计算。在转动惯量辨识算法中, T_l 用负载转矩观测的输出 \hat{T}_l 替换;同样,负载转矩观测器中的*J*和 D_m 用其辨识值 \hat{J} 和 \hat{D}_m 替换。将转动惯量的辨识值 \hat{J} 用于转速控制器参数自整定,使伺服系统保持快速和稳定的响应。此外,转动惯量*J*以及摩擦系数 D_m 的初值由文献[9]中的方法测得,并且由于摩擦系数 D_m 远远小于转动惯量对系统的影响,可将摩擦系数固定为其初值以简化算法,提高算法实用性。

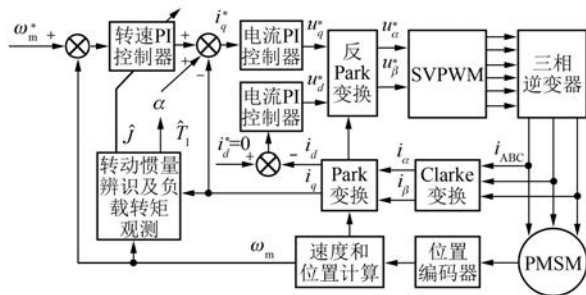


图4 伺服系统转速自适应控制方法原理框图

将图4中电流环等效成一阶惯性环节:

$$G_c(s) = \frac{K_T}{T_c s + 1} \quad (20)$$

式中: K_T 为转矩系数; T_c 为电流环的等效时间常数。

由式(6)、式(20)可得转速环开环传递函数为

$$G_{so}(s) = \left(K_{sp} + \frac{K_{si}}{s} \right) \frac{K_T}{T_c s + 1} \frac{1}{Js + D_m} \quad (21)$$

式中: K_{sp} 为转速PI控制器的比例系数; K_{si} 是积分系数。

PMSM 伺服系统转速环要求较好的动态抗扰性能,故将转速环校正成典型II型系统。根据文献[10]提出的工程整定法,得到转速环PI控制

器的比例系数与积分系数的调整规则分别为

$$\begin{cases} K_{sp} = \omega_{sc} \frac{J}{K_T} \\ K_{si} = \frac{K_{sp}}{hT_c} \end{cases} \quad (22)$$

式中: ω_{sc} 为期望的转速环开环截止频率; h 为中频宽,一般取5。

3 试验验证

为了验证所提转速自适应控制方法的有效性,基于TI公司F28335处理器搭建PMSM 伺服驱动控制试验平台,功率器件开关频率16 kHz,采用CCS软件的graph工具采集试验数据。试验平台如图5所示。



图5 试验平台

辨识值的波动通常与噪声、转速和电流响应延迟不一致有关,而辨识值波动大时不适合用于控制过程,因此为了降低待辨识参数的波动,对辨识值进行低通滤波。取滤波截止频率为50 Hz。

3.1 参数辨识验证

为了验证所提方法的辨识性能,与朗道离散时间递推法转动惯量辨识进行对比。伺服电机空载启动,给定转速为250~500 r/min之间阶跃变化,周期为1 s。此时总转动惯量为电机本体惯量 $1.75 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。朗道转动惯量辨识结果如图6所示,本文所提方法转动惯量辨识结果如图7所示,负载转矩辨识结果如图8所示。

朗道转动惯量辨识周期设为1 ms,自适应增益设为5。由图6可知,转动惯量辨识在25 s左右收敛,辨识值约为 $1.92 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$,辨识误差约为9.71%。此时若增大自适应增益,辨识时间能减少,但辨识稳态误差会更大。

由图7可知,本文所提方法的转动惯量辨识

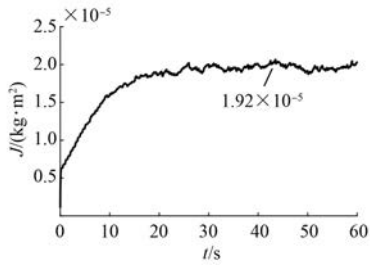


图6 朗道离散时间递推法转动惯量辨识结果

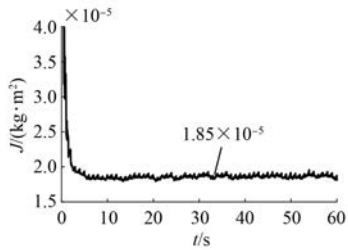


图7 PI型MRAS转动惯量辨识结果

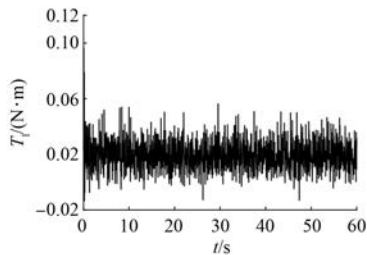


图8 负载转矩辨识结果

收敛时间约为 8 s, 辨识值约为 $1.85 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, 辨识误差为 5.72%。对比图 6 朗道转动惯量辨识的结果, PI 型自适应律的 MRAS 辨识算法由于 P 型自适应律的引入, 其收敛时间更短, 稳态精度更高。

由图 8 的负载转矩辨识结果可知, 观测器收敛时间在 1 s 以内, 观测值却约为 $0.02 \text{ N} \cdot \text{m}$, 这是由于基于时域设计的观测器在离散化时产生的误差导致的。

3.2 伺服系统转速自适应测试

为了验证所提转速自适应方法的抑制惯量扰动性能, 采用转速自适应控制前后的阶跃响应进行对比。伺服系统电机带惯量负载 ($2.50 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$), 此时总转动惯量为 $4.25 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。初始运行时, 程序中使用的转动惯量值为电机本体惯量值 $1.75 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, 未采用

转速自适应控制; 运行 15 s 后加入转速自适应控制。

转速重复阶跃给定 $250 \sim 500 \text{ r/min}$, 周期为 2 s。转动惯量辨识结果如图 9 所示, 辨识值约为 $4.53 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, 辨识误差为 6.59%。

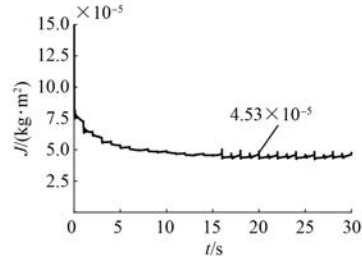


图9 转速自适应测试转动惯量辨识结果

在第 15 s 时加入转速自适应控制, 加入前后的速度阶跃响应如图 10 所示。加入转速自适应控制前, 转速阶跃响应出现较大超调: 给定为 250 r/min 时超调量约为 21.08%, 给定为 500 r/min 时超调量约为 11.36%。而加入转速自适应控制后, 给定为 250 r/min 时超调量为 9.52%, 给定为 500 r/min 时超调量为 3.94%, 对比 15 s 前未加入转速自适应控制时, 超调量大幅度降低。

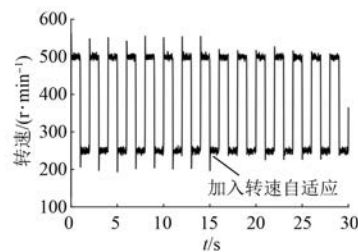


图10 转速自适应测试转速响应

为了进一步验证转速自适应控制的有效性, 在转速重复阶跃 $250 \sim 1500 \text{ r/min}$ 条件下进行了测试。转动惯量辨识结果如图 11 所示, 辨识值约为 $4.56 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, 辨识误差为 7.29%。速度阶跃响应如图 12 所示。加入转速自适应控制前, 给定为 1500 r/min 时超调量约为 6.53%。而加入转速自适应控制后, 给定为 1500 r/min 时超调量为 2.33%。

综上, 测试结果表明本文所提转速自适应控制能根据转动惯量的变化实时调整 PI 控制器参数, 使伺服系统在负载转动惯量变化时的转速响应性能得到大幅改善, 超调量大幅降低。

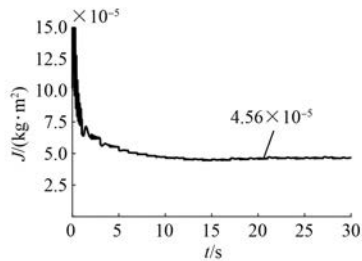


图 11 转速自适应测试转动惯量辨识结果
(250~1 500 r/min 转速重复阶跃)

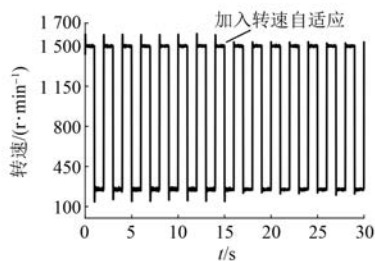


图 12 转速自适应测试转速响应
(250~1 500 r/min 转速重复阶跃)

4 结 语

本文提出了一种基于参数辨识的转速自适应控制方法。对于负载转矩的变化,基于中间变量设计了特殊的扰动观测器,无需微分计算,简单地设置一个观测器增益就可以准确得出观测负载转矩;对于转动惯量变化,在时域通过 Popov 超稳定性理论设计一种 PI 型转动惯量的自适应律,提高了辨识算法的收敛性能,并将转动惯量辨识值用于控制器参数自整定。试验结果表明,该方法待辨识参数收敛后误差在 10% 以内;改善了转速环的动态响应性能,有效提高了伺服控制系统对参数变化的鲁棒性。

【参考文献】

- [1] 荀倩,王培良,李祖欣,等. 基于递推最小二乘法的永磁伺服系统参数辨识[J]. 电工技术学报,2016,31(17): 161.
- [2] 鲁文其,胡育文,梁骄雁,等. 永磁同步电机伺服系统抗扰动自适应控制[J]. 中国电机工程学报,2011,31(3): 75.
- [3] 李嘉诚,全力,左月飞,等. 考虑测量噪声的朗道自适应惯量辨识方法[J]. 电机与控制应用,2019,46(2): 32.
- [4] CHEN Y, YANG M, LONG J, et al. A moderate online servo controller parameter self-tuning method via variable-period inertia identification [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34 (12): 12165.
- [5] HUANG W, LIU C, HSU P, et al. Precision control and compensation of servo motors and machine tools via the disturbance observer [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(1): 420.
- [6] NIU L, XU D, YANG M, et al. On-line inertia identification algorithm for PI parameters optimization in speed loop [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(2): 849.
- [7] CHEN W. Disturbance observer based control for nonlinear systems [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2004, 9(4): 706.
- [8] 陈再发,刘彦呈,卢亨宇. 具有参数辨识的船舶永磁同步推进电机无位置传感器控制[J]. 电机与控制学报,2020,24(3): 53.
- [9] YANG S, LIN K. Automatic control loop tuning for permanent-magnet AC servo motor drives [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(3): 1499.
- [10] 陈伯时. 电力拖动自动控制系统:运动控制系统 [M]. 北京:机械工业出版社,2003.

欢迎订阅 2021 年《电机与控制应用》

联系地址:上海市武宁路 505 号《电机与控制应用》编辑部

邮编:200063

电话:021-62574990-462

邮箱:eec@seari.com.cn

国内邮发代号:4-199

每册定价:12.00 元

全年定价:144.00 元