

基于 CMPSO 算法的永磁同步电机转动惯量识别研究

田 峰, 林荣文, 吴雅琳

(福州大学 电气工程与自动化学院, 福建 福州 350108)

摘 要: 永磁同步电机(PMSM)是一种具有很强非线性的动态系统,在工业驱动应用中发挥着重要作用。实时辨识转动惯量对于高精度 PMSM 系统控制和稳定性状态监测具有重要意义,但传统转动惯量识别方法精度较低。在传统离散模型参考自适应理论基础之上,用柯西变异粒子群优化(CMPSO)算法代替待辨识参数自适应设计环节,以实现 PMSM 转动惯量识别。该转动惯量辨识方法充分利用了 CMPSO 算法的快速高效收敛性,仿真结果和试验结果表明了可行性、正确性和准确性。

关键词: 永磁同步电机; 改进粒子群优化算法; 柯西变异; 矢量控制; 转动惯量识别

中图分类号: TM 351 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2019)10-0014-05

Research on Moment of Inertia Identification of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on CMPSO Algorithm

TIAN Feng, LIN Rongwen, WU Yalin

(College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: Permanent magnet synchronous motor (PMSM) was a highly nonlinear dynamic system, which played an important role in industrial driving applications. Real-time identification of moment of inertia was of great significance to the control and stability monitoring of high-precision PMSM systems. However, traditional identification methods lacked accuracy. Based on the traditional discrete model reference adaptive theory, the Cauchy mutation particle swarm optimization (CMPSO) algorithm was used to replace the adaptive law design of parameters to be identified to realize the identification of PMSM moment of inertia. This method made full use of the fast and efficient convergence of CMPSO algorithm. The simulation and experimental results proved the feasibility, correctness and accuracy of the method.

Key words: permanent magnet synchronous motor (PMSM); improved particle swarm optimization algorithm; Cauchy mutation; vector control; moment of inertia identification

0 引 言

永磁同步电机(PMSM)是一个非线性、时变、大延时的复杂系统,存在转子惯量变化扰动等多种扰动,对系统的精度、稳定性、动静态性能等造成了影响。为了识别转动惯量,研究者提出了基于朗道离散时间递推算法^[1]、递推最小二乘法^[2]

等,但是 PMSM 工作环境复杂多变,难以准确地、实时地识别出转动惯量。为此,有学者提出引进智能算法^[3],如粒子群优化算法(PSO)、遗传算法(GA)等。但是,标准智能算法各有不足之处,如标准 PSO 容易局部最优^[4],GA 算法实现复杂、耗时长^[5]。文献[6]提出采用柯西变异的策略,较好地解决了标准 PSO 容易陷入局部最优的问题。

作者简介: 田 峰(1994—),男,硕士研究生,研究方向为新型电机理论与控制。

林荣文(1963—),男,教授,硕士生导师,研究方向为新型电机理论与控制。

吴雅琳(1994—),女,硕士研究生,研究方向为新型电机理论与控制。

文献[7-8]虽然采用智能算法识别 PMSM 参数,但是缺少对于 PMSM 转动惯量识别的研究。

本文采用模型参考自适应方法的基本原理,无需设计自适应率迭代识别算法,利用柯西变异粒子群优化(CMPSO)算法代替自适应律,通过迭代更新粒子值从而识别得到转动惯量。利用仿真和试验验证了 CMPSO 辨识算法的可行性、正确性和准确性。

1 PMSM d - q 数学模型

在理想化条件下,能够简化 PMSM 数学模型^[9]。本文 PMSM 采用的控制策略是 $i_d=0$ 的双闭环矢量控制^[10]。该控制策略简单,没有去磁效应,所有电流均用来产生电磁转矩。本质是控制 PMSM 的直流电流 i_d 和交轴电流 i_q ,可等效为直流电机控制。因此,本文给出在 d - q 坐标系下 PMSM 数学方程。PMSM 结构图如图 1 所示。

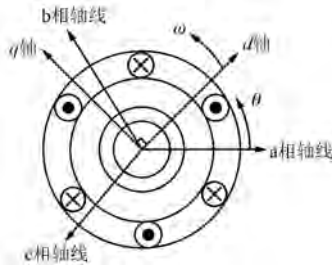


图 1 PMSM 结构图

在 d - q 坐标系下,PMSM 电压方程为

$$\begin{cases} U_d = R_s i_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \omega_r \psi_q \\ U_q = R_s i_q + \frac{d\psi_q}{dt} + \omega_r \psi_d \end{cases} \quad (1)$$

磁链方程为

$$\begin{cases} \psi_d = L_d i_d + \psi_f \\ \psi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (2)$$

电磁转矩方程为

$$T_e = \frac{3}{2} p (\psi_d i_q - \psi_q i_d) = \frac{3}{2} p [\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (3)$$

当 $L_d=L_q$ 时,式(3)可变为

$$T_e = \frac{3}{2} p \psi_f i_q \quad (4)$$

机械运动方程为

$$J \frac{d\omega_m}{dt} + B_m + T_L = T_e \quad (5)$$

式中: U_d 、 U_q —— d 、 q 轴电压;

R_s ——定子绕组的电阻;

i_d 、 i_q —— d 、 q 轴电流;

ψ_d 、 ψ_q ——定子磁链 d 、 q 分量;

ω_r ——转子电角速度;

L_d 、 L_q —— d 、 q 轴等效电感;

ψ_f ——转子磁极磁链;

p ——极对数;

J ——电机转动惯量;

ω_m ——机械角速度;

B_m ——黏滞系数。

2 基于 CMPSO 的 PMSM 转动惯量辨识方法

2.1 CMPSO 算法

PSO 起源于鸟群捕食行为,于 1995 年由 Kennedy 等^[11]提出。PSO 是一种随机化进化算法,在具体应用中,其粒子含义往往明确,可将微粒子表述为可能产生的解信息。在粒子数为 m 的粒子群中,每个粒子包含 d 维信息,而每一维又包括位置和速度信息。利用 PSO 中的目标适应度函数值、个体极值和全局极值等共享信息不断迭代更新粒子群信息(位置和速度),直至粒子群搜索到全局最优粒子信息。

微粒子 i 的速度和位置更新公式如下:

$$v_{id}^{k+1} = w v_{id}^k + c_1 \text{rand}_1^k (Pbest_{id}^k - x_{id}^k) + c_2 \text{rand}_2^k (Gbest_{id}^k - x_{id}^k) \quad (6)$$

$$x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + v_{id}^{k+1} \quad (7)$$

式中: v_{id}^k ——粒子 i 第 k 次第 d 维速度;

c_1 、 c_2 ——加速常数;

w ——惯性因子;

rand_1 、 rand_2 ——(0,1)之间的随机数;

$Pbest_{id}^k$ ——粒子 i 第 d 维个体极值;

$Gbest_{id}^k$ ——粒子 i 第 d 维全局极值;

x_{id}^k ——粒子 i 第 k 次第 d 维位置。

标准 PSO 容易陷入局部最优值,使算法寻优能力受到极大扼制,而且无法保证粒子群体的多样性,从而影响 PSO 算法的全局搜索能力。为了

解决这一缺陷,提高算法的全局最优值搜索能力,可采用 CMPSO。

个体极值平均值:

$$Pbest_{md}^k = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Pbest_{id}^k \quad (8)$$

$Pbest_{md}^k$ 柯西变异公式:

$$Pbest_{md1}^k = Pbest_{md}^k \cdot [1 + U(\cdot)] \quad (9)$$

式中: $Pbest_{md1}^k$ —— $Pbest_{md}^k$ 柯西变异之后的粒子平均极值;

$U(\cdot)$ ——符合标准柯西变异分布的随机连续型变量。

标准柯西分布的密度函数和标准柯西分布逆累积分布函数如下:

$$f(x) = \frac{1}{\pi(1+x^2)}, \quad -\infty < x < \infty \quad (10)$$

$$F(p) = \tan[\pi(p - 1/2)], \quad 0 < p < 1 \quad (11)$$

将 $Pbest_{md1}^k$ 代替 $Pbest_{id}^k$, 则粒子速度迭代更新, 式(6)可变为

$$v_{id}^{k+1} = wv_{id}^k + c_1 \text{rand}_1^k(Pbest_{md1}^k - x_{id}^k) + c_2 \text{rand}_2^k(Gbest_{id}^k - x_{id}^k) \quad (12)$$

至此, PSO 算法已经改进为 CMPSO 算法。采用柯西变异的方法, 改进思想: 当某个粒子代表着平均个体最优值时, 通过柯西变异有可能生成新的偏离原先粒子位置的粒子, 即可使 CMPSO 算法更具有多样性和更好的全局搜索能力。相比标准 PSO, CMPSO 降低了陷入局部最优的可能性, 且提高了全局寻得最优解的能力。

2.2 CMPSO 辨识 PMSM 转动惯量算法实现

当 PMSM 机械运动参考模型已知, 而待辨识的参数转动惯量看作未知, 此类问题可以看作误差函数的最优化问题。基本思想: 以 PMSM 检测的转速和可调模型的计算转速为差值, 通过 CMPSO 算法不断寻求基于转速差值的适应度函数的最小值, 从而改变最优粒子信息, 完成对于转动惯量的识别。

为了简化分析, 忽略黏滞系数 B 的影响。将 PMSM 运动方程式(5)离散化处理, 有:

$$\omega_m(k) = \omega_m(k-1) + \frac{T}{J} [T_e(k-1) - T_L(k-1)] \quad (13)$$

第 $k-1$ 时刻:

$$\omega_m(k-1) = \omega_m(k-2) + \frac{T}{J} [T_e(k-2) - T_L(k-2)] \quad (14)$$

式(13)与式(14)相减变形可得参考模型:

$$\begin{aligned} \omega_m(k) &= 2\omega_m(k-1) - \omega_m(k-2) + \\ &\frac{T}{J} [T_e(k-1) - T_e(k-2)] = \\ &2\omega_m(k-1) - \omega_m(k-2) + \\ &b(k-1)\Delta T_e(k-1) \end{aligned} \quad (15)$$

根据式(15), 设计出可调模型:

$$\begin{aligned} \hat{\omega}_m(k) &= 2\omega_m(k-1) - \omega_m(k-2) + \\ &\hat{b}(k-1)\Delta T_e(k-1) \end{aligned} \quad (16)$$

式中: $\omega_m(k)$ ——实测转速;

T ——离散采样周期;

$\hat{\omega}_m(k)$ ——速度估计值;

$\hat{b}$ ——待辨识参数, 对应 CMPSO 算法中的粒子信息。

为了识别转动惯量, 需要不断地通过新的粒子信息使参考模型的输出转速逼近可调模型的输出转速。为了衡量这种逼近程度, 需要定义适应度函数。适应度函数为转速误差的平方, 即:

$$f(j) = [\omega_m(k) - \hat{\omega}_m(k)]^2 \quad (17)$$

式中: j ——转动惯量。

基于 CMPSO 算法辨识 PMSM 转动惯量的算法流程图和原理图分别如图 2 和图 3 所示。图 2 和图 3 中, 结合式(15), 所需采集的数据包含不

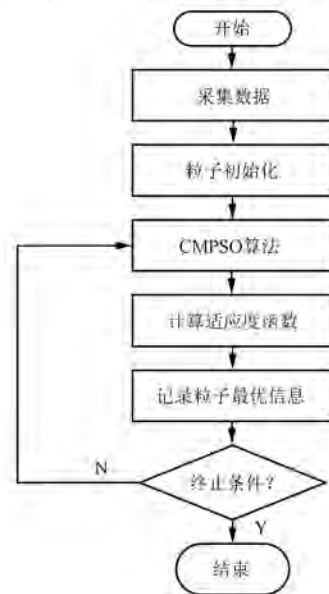


图2 CMPSO 算法辨识转动惯量算法流程图

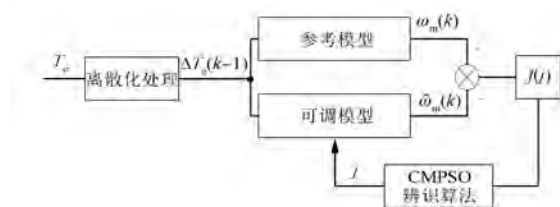


图3 CMPSO 算法辨识转动惯量算法原理图

同时刻的转速信息, $\omega_m(k)$ 是 PMSM 机械运动方程参考模型式 (15) 的输出, $\hat{\omega}_m(k)$ 是可调模型式 (16) 的输出, 参考模型和可调模型的输入均是电磁转矩差值 $\Delta T_e(k-1)$ 。根据适应度函数式 (17), 迭代更新粒子当前的个体极值和全局极值、位置和速度。该算法的终止条件为达到迭代

次数,当适应度函数等于零或者接近零,可认为粒子信息代表全局最优解,即完成 PMSM 转动惯量辨识。

3 CMPSO 算法辨识转动惯量仿真分析

在 MATLAB2016a/Simulink 中搭建 PMSM 双闭环矢量控制系统,在同一工作空间里 m 文件中编写 CMPSO 算法,在 m 文件中控制 PMSM 控制系统的运行,并且在 PMSM 仿真模型中完成相关数据的采集并保存在工作空间 (Workspace)。数据采集完成之后,再完成 CMPSO 算法迭代,即可实现 PMSM 转动惯量识别。PMSM 双闭环矢量控制系统结构图如图 4 所示。

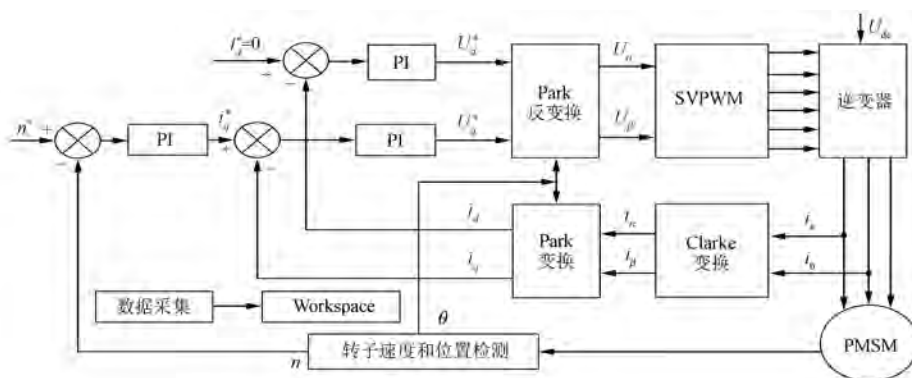


图 4 PMSM 双闭环矢量控制系统结构图

基于 CMPSO 算法识别 PMSM 转动惯量的参数设置表如表 1 所示。

表 1 基于 CMPSO 算法识别 PMSM 转动惯量的
参数设置表

仿真参数名称	参数值
迭代次数	100
种群粒子数 m	20
粒子空间维数 D	1
惯性因子 w	1
加速常数 ($c_1 = c_2$)	1.494 45
采样周期 T_c/s	10^{-5}
转动惯量 $J/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	0.000 632 9

系统仿真结果图如图 5 和图 6 所示。图 5 为适应度函数随迭代次数变化曲线,图 6 为转动惯量识别过程曲线。可以看到,CMPSO 算法适应度曲线为第 8 代左右时,适应度值已经趋近于零,说

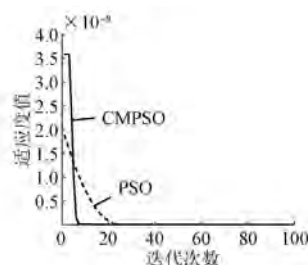


图 5 适应度值迭代曲线

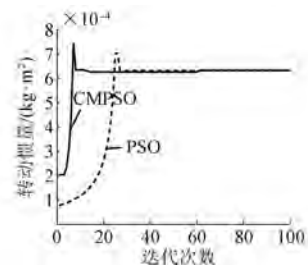


图 6 转动惯量识别过程曲线

明算法开始收敛,在第 15 代左右适应度值已经为零,粒子已经达到最优解,但是在第 61 代左右由于受到柯西变异的影响,转动惯量辨识值有所增大,相当于增加了粒子种群多样性,提高了全局搜索最优解能力。

由图 5 还可以看出,CMP SO 算法比 PSO 算法收敛性更快,CMP SO 第 8 代已经接近收敛,PSO 约第 23 代才开始收敛。由图 6 还可以看出,在 PSO 算法开始收敛之后,识别参数并没有发生改变,说明 PSO 陷入局部最优,粒子并没有能力逃离当前位置。

结合表 1 的 PMSM 转动惯量仿真数值,可得 PMSM 转动惯量识别过程中柯西变异的影响结果,如表 2 所示。

表 2 PMSM 转动惯量识别过程中柯西变异的影响		
柯西变异	转动惯量 J 辨识结果/($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)	误差/%
前	0.000 624 990 2	1.24
后	0.000 632 042 9	0.14

由表 2 可以发现,柯西变异之后的转动惯量 J 辨识精度更高。

4 试验平台分析

基于 TMS320F28035 搭建 PMSM 双闭环矢量控制的试验平台,如图 7 所示。通过 XDS100V2 仿真器与 PC 上位机相连,软件开发环境为 CCS V5.2。在试验中,需要在线仿真,实时调试程序,以及通过 JTAG 接口实时观测 PMSM 运行时的曲线波形。

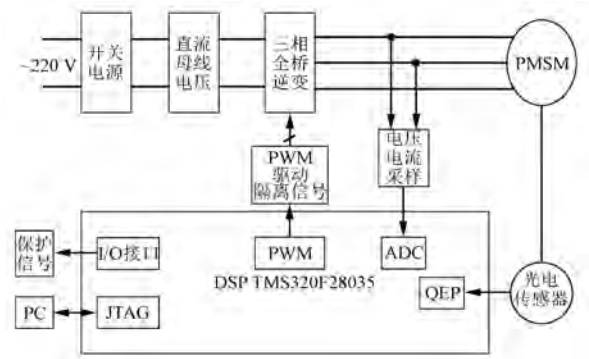


图 7 PMSM 试验平台

试验测试时,电机空载运行在 300 r/min 的状态下,三相逆变电路开关频率为 10 kHz,数据采

样周期 $T_c=0.000\ 1\ \text{s}$,PMSM 数据手册转动惯量为 $2.05\times10^{-5}\ \text{kg}\cdot\text{m}^2$,迭代次数为 20,粒子种群数 $m=10$,其他硬件 CMP SO 算法参数与表 1 相同。CMP SO 转动惯量识别算法设计时,将在每次数据采集完毕后执行一次识别算法。为了更好地对比 CMP SO 算法的识别效果,采用传统的“离散朗道参数辨识方法”^[12]识别 PMSM 转动惯量。试验波形见图 8,辨识增益 β 取 0.02。由图 8 可知,辨识结果为 $2.5\times10^{-5}\ \text{kg}\cdot\text{m}^2$ 。

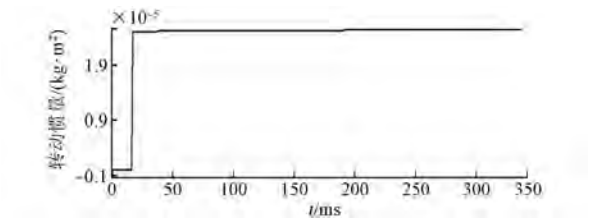


图 8 离散朗道参数辨识转动惯量($\beta=0.02$)

与 MATLAB 仿真不同,在 PMSM 试验平台中,CMP SO 算法中需要实时辨识 PMSM 的转动惯量。通过试验获得适应度函数变化曲线和 PMSM 转动惯量辨识曲线,分别如图 9 和图 10 所示。

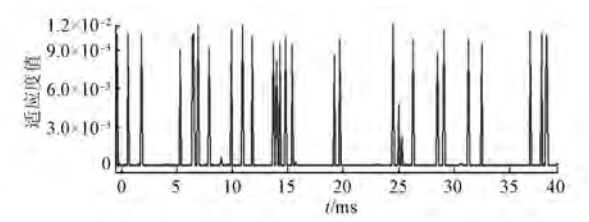


图 9 适应度函数变化曲线

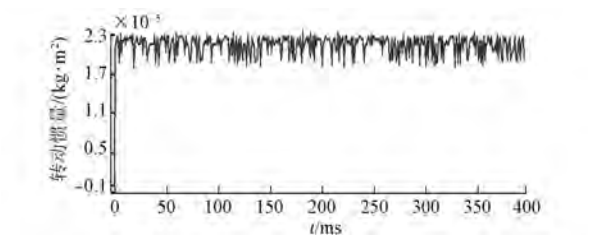


图 10 CMP SO 识别 PMSM 转动惯量曲线

从图 9 可以看出,适应度函数重复地由大趋近于零,说明 CMP SO 算法在不断地迭代寻优,且可以认为当前一次 CMP SO 算法迭代结束时全局最优粒子信息代表了当前识别的 PMSM 转动惯量,从而验证了 CMP SO 算法的可行性和正确性。

(下转第 65 页)

- stator winding of a five-phase permanent magnet motor on postfault operations [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(5): 1978.
- [4] SHAMSI-NEJAD M A, NAHID-MOBARAKEH B, PIERFEDERICI S, et al. Fault tolerant and minimum loss control of double-star synchronous machines under open phase conditions [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(5): 1956.
- [5] WALLMARK O, HARNEFORS L, CARLSON O. Control algorithms for a fault-tolerant PMSM drive [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54(4): 1973.
- [6] 林晓刚, 周扬忠, 程明. 基于虚拟变量的六相永磁同步电机缺任意两相容错型直接转矩控制[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(1): 231.
- [7] 赵美玲, 全力, 张超, 等. 基于铜耗最小的五相永磁同步电机单相断路故障解耦容错控制[J]. 电机与控制应用, 2017, 44(12): 126.
- [8] 刘国海, 高猛虎, 周华伟, 等. 五相永磁同步电机磁链改进型容错直接转矩控制[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(2): 359.
- [9] 王鹏飞. 电动汽车用五相永磁容错电机的设计及运行控制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [10] DWARI S, PARSA L. Open-circuit fault tolerant control of five-phase permanent magnet motors with third-harmonic back-EMF [C] // 2008 34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, 2008.
- [11] 闫震, 周扬忠, 王凌波. 反电动势非正弦的五相 PMSM 缺一相容错型 DTC [J]. 微特电机, 2019, 47(6): 49.
- [12] 赵品志, 杨贵杰, 李勇. 五相永磁同步电动机单相开路故障的容错控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(24): 68.

收稿日期: 2019-06-21

(上接第 18 页)

对比图 10 和图 8 可知, CMPSO 算法识别精度明显高于传统识别算法。

5 结 语

本文基于 MATLAB/Simulink 仿真系统和 DSP TMS320F28035 试验平台使用 CMPSO 算法实现了对 PMSM 转动惯量的识别。通过分析仿真和试验结果, 证明了该算法具备较好的全局寻优能力, 能够准确地识别 PMSM 转动惯量。

【参 考 文 献】

- [1] 滕福林, 李宏胜, 张建华, 等. 基于朗道离散时间递推算法的转动惯量辨识研究[J]. 微电机, 2012, 45(1): 16.
- [2] 向纯靖, 李长兵. 基于最小二乘法的永磁同步电动机参数辨识[J]. 微特电机, 2012, 40(2): 30.
- [3] 刘金琨. 智能控制[M]. 4 版. 北京: 电子工业出版社, 2017.
- [4] CHEN Z, ZHONG Y, LI J. Parameter identification of induction motors using ant colony optimization [C] // 2008 IEEE Congress on Evolutionary Computation (IEEE World Congress on Computational Intelligence), 2008.
- [5] 刘杨磊. 基于量子遗传算法的改进的粒子群算法及其应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2011.
- [6] 王晖. 基于柯西变异的混合粒子群算法研究[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2008.
- [7] 傅小利, 顾红兵, 陈国呈, 等. 基于柯西变异粒子群算法的永磁同步电机参数辨识[J]. 电工技术学报, 2014, 29(5): 127.
- [8] 袁玉敏. 基于自适应粒子群优化算法的永磁同步电机参数辨识[J]. 测控技术, 2018, 37(7): 42.
- [9] 林荣文. 电机学[M]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- [10] 李能. 永磁同步电机矢量控制系统的建模与仿真研究[J]. 机械工程师, 2017(2): 46.
- [11] KENNEDY J, EBERHART R C. Particle swarm optimization [C] // Proceedings of IEEE Conference on Neural Networks, 1995: 1942.
- [12] LANDAU L D. Adaptive Control [M]. New York: Springer, 1988.

收稿日期: 2019-06-03