

# 改进 GPC 算法在永磁同步电机控制系统中的应用

赵肖旭<sup>1</sup>, 黄声华<sup>1</sup>, 王正昊<sup>2</sup>, 周竟<sup>3</sup>, 孙耀程<sup>4</sup>

(1. 华中科技大学 电气工程与电子工程学院, 湖北 武汉 430074; 2. 国网新乡供电公司, 河南 新乡 453002;  
3. 河海大学 能源与电气学院, 江苏 南京 211100; 4. 南京航空航天大学 自动化学院, 江苏 南京 210016)

**摘要:** 为了使永磁同步电动机(PMSM)矢量控制系统适用于更高要求的场合, 在给出 PMSM 在  $d-q$  旋转坐标系中的模型表达式和传动系统机械运动方程的基础上, 推导出了系统的基于受控自回归积分滑动平均(CARIMA)模型。基于此模型和金元郁等提出的改进广义预测控制算法(JGPC)设计出了适用于 PMSM 驱动系统的速度环的改进广义预测控制器。仿真实验表明, JGPC 控制器可以很好的跟踪给定速度曲线, 辨识出的参数跟实际电机的相关参数一致, 且动态及稳态性能良好。

**关键词:** 永磁同步电动机; 受控自回归积分滑动平均模型; 改进广义预测控制算法; 在线辨识

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3886.2014.02.003

[中图分类号] TM341 [文献标志码] A [文章编号] 1000-3886(2014)02-0008-03

## A New GPC Applied to the Permanent Magnet Synchronous Motors Control System

ZHAO Xiao-xu<sup>1</sup>, HUANG Sheng-hua<sup>1</sup>, WANG Zheng-hao<sup>2</sup>, ZHOU Jing<sup>3</sup>, SUN Yao-cheng<sup>4</sup>

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science Technology, Wuhan, Hubei 430074, China;  
2. State Grid Xinxiang Power Supply Company, Xinxiang Henan 453002, China;  
3. School of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing Jiangsu 211100, China;  
4. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing Jiangsu 210016, China)

**Abstract:** In order to make the permanent magnet synchronous motor (PMSM) vector control system is suitable for the higher requirements of the occasion, On the basis of the given system of permanent magnet synchronous motor (PMSM) in the  $d-q$  rotating coordinate system model and mechanical equations of motion, controlled auto regressive integrated moving average (CARIMA) model have been introduced. A new Generalized Predictive Controller of PMSM speed loop drive system have been designed based on this model and Yuanyu Jin's proposed improvements generalized predictive control algorithm (JGPC). Simulation results show that the design of JGPC controller can track a given speed curve, identify the parameters with the actual motor parameters, and the dynamic and steady-state performance.

**Keywords:** permanent magnet synchronous motors; CARIMA; JGPC; online identification

## 0 引言

永磁同步电动机(PMSM)具有高功率密度、高效率、高可靠等优良的动态特性, 而且过载能力强、转矩密度大, 逐渐成为新型电梯拖动系统发展的主流。由于 PMSM 转子磁场的方向与转子位置一致, 所以按转子磁链定向矢量控制实现比异步电机简单, 适合矢量控制变频器。

从控制观点看, PMSM 调速系统往往是需要快速响应且动态性能高的系统。通常的解决方案是采用 PI 控制器串联于控制回路。通过串联 PI 控制器可以方便地配置系统的工作点, 从而提供了更大的调整范围。然而, 为了使系统获得更好的动态性能, 需要设置合适的 PI 参数以满足永磁同步电机的控制需求。对于 PI 参数的设置则经常需要依靠经验来不断尝试获得, 这给实际运用带来了一定的麻烦。

本文讨论的方案是基于更详细的数学分析的永磁同步电机控制系统设计。基于模型的算法可以优化控制过程, 可以自然地生成与实时操作要点相关的控制行为。如图 1 所示为预测控制基本结构。D. W. Clarke 等提出的 GPC 算法就是一种很有发展前

景的基于模型的控制算法, 它通过在控制过程中产生预测输出序列, 以使系统性能指标达到最优。但也有其固有缺陷, 如计算量较大、算法过于复杂等。所以, 本文采用金

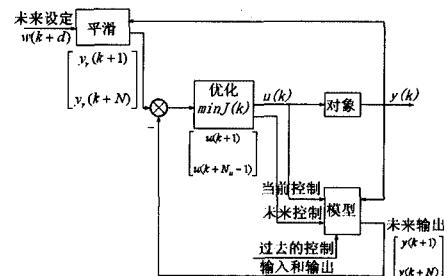


图 1 预测控制的结构

元郁等提出的基于 CARIMA 模型的 JGPC 对 PMSM 的控制进行研究。这种算法简单、计算量较小, 保留了 GPC 的基本特征和优点。在系统中, 速度环 CARIMA 模型中含有机械阻尼系数、转动惯量等机械参数, 这些参数在电机运行的不同时期会产生一定的变化, 定时的运行在线辨识程序能够实现对模型参数定时更新, 抵消因参数变换引起的模型误差。

## 1 永磁同步电机驱动系统的 CARIMA 模型

文献[1]介绍了广义预测控制及其他系统辨识与自适应控制算法, 根据介绍的方法, 设计一种 PMSM 的速度环 CARIMA

定稿日期: 2013-07-25

模型。

假设磁路不饱和,忽略磁滞、涡流损耗,PMSM 在  $d-q$  旋转坐标系中的模型表达式为:

$$\begin{cases} \psi_d = L_d i_d + \psi_r \\ \psi_q = L_q i_q \\ u_d = r_s i_d + p\psi_d - \omega\psi_q \\ u_q = r_s i_q + p\psi_q + \omega\psi_d \\ T = \frac{3}{2}p[\psi_r i_q + (L_d - L_q)i_d i_q] \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中  $\psi_r$  为转子磁钢在定子上的耦合磁链,  $L_d, L_q$  分别为永磁同步电动机的直、交轴主电感,  $i_d, i_q$  分别为定子电流矢量的直( $d$ )轴、交( $q$ )轴分量,  $\psi_d, \psi_q$  分别为  $d$  轴、 $q$  轴磁链,  $\omega$  为转子电角速度,  $R_s$  为定子电阻,  $p$  为极对数。

传动系统机械运动方程为:

$$T - T_L = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega_r \quad (2)$$

式(2)中  $T$  为电机电磁转矩;  $T_L$  为负载转矩;  $J$  为转动惯量;  $B$  为阻尼系数(包括风阻与粘滞系数),  $\omega_r$  为机械角速度,  $\omega_r = \omega/p$ 。

取以转子磁场定位的矢量控制方式,令  $i_d = 0$ ,则电机的电磁转矩  $T$  只和  $i_q$  有关,  $T$  将正比于  $q$  轴电流  $i_q$ ,即:

$$T = k_T i_q \quad (3)$$

式(3)中  $k_T = 3/2p\psi_r$ ,再令  $T_L = 0$ ,由式(2)得 PMSM 机械运动开环传递函数:

$$G(s) = \frac{\omega_r(s)}{i_q(s)} = \frac{k_T}{Js + B} \quad (4)$$

对式(4)加入零阶保持器,并进行  $z$  变换后得 PMSM 机械运动  $z$  传递函数:

$$Z\left\{\frac{1 - e^{-T_s}}{s}G(s)\right\} = \frac{bz^{-1}}{1 + az^{-1}} \quad (5)$$

式(5)中  $a = -e^{-T_s B/J}$ ,  $b = k_T(1 - e^{-T_s B/J})/B$ ,  $T_s$  为采样周期。

这里将负载转矩  $T_L$  看做系统扰动折算后写入方程,可得如下系统差分方程:

$$\omega_r(k) + a\omega_r(k-1) = bi_q(k-1) + c\Delta T_L \quad (6)$$

式(6)两边乘以差分算子  $iz^{-1}$ ,写成如下形式:

$$(1 + az^{-1})\Delta\omega_r(k) = b\Delta i_q(k-1) + \xi(k) \quad (7)$$

其中  $\xi(k) = c\Delta T_L(k)$  为负载转矩波动的函数,可以看做系统的噪声。

则系统 CARIMA 模型为:

$$A(z^{-1})y(k) = B(z^{-1})\Delta u(k-1) + \xi(k) \quad (8)$$

式(8)中  $A(z^{-1}) = (1 + az^{-1})\Delta = 1 + (-1 + a)z^{-1} - az^{-2}$ ,  $B(z^{-1}) = b$ 。

## 2 广义预测控制器的设计

### 2.1 基于 CARIMA 模型的改进 GPC 控制律

由式(8)递推,系统将来时刻的最小方差输出模型<sup>[2-3]</sup>为:

$$\hat{\omega} = \omega_m + G\Delta i_q \quad (9)$$

式(9)中,

$$\begin{cases} \hat{\omega} = [\hat{\omega}(k+1|k), \hat{\omega}(k+2|k), \dots, \hat{\omega}(k+N|k)]^T \\ \omega_m = [\omega_m(k+1), \omega_m(k+2), \dots, \omega_m(k+N)]^T \\ \Delta i_q = [\Delta i_q(k), \Delta i_q(k+1), \dots, \Delta i_q(k+N-1)]^T \end{cases} \quad (10)$$

( $N$  为预测长度)

$$\Delta i_q(k+i) = i_q(k+1) - i_q(k+i-1), \quad i = 0, \dots, N-1 \quad (11)$$

$$G = \begin{bmatrix} b_{1,0} & 0 & \dots & 0 \\ b_{2,0} & b_{1,0} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{N,0} & b_{N-1,0} & \dots & b_{1,0} \end{bmatrix}_{N \times N} \quad (12)$$

式(10)中的  $\omega_m(k+j)$  完全由过去的控制输入和输出确定,可由下式推出:

$$\omega_m(k+j) = (1-a)\omega_m(k+j-1) + a\omega_m(k+j-2) + b\Delta i_q(k+j-1|k) + \xi(k+j|k), \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (13)$$

$$\text{式(13)中 } \Delta i_q(k+i|k) = \begin{cases} 0, i \geq 0 \\ \Delta i_q(k+i), i < 0 \end{cases}$$

$$\xi(k+i|k) = \begin{cases} 0, i > 0 \\ \xi(k+i), i \leq 0 \end{cases}$$

式(12)中矩阵元素由右式递推算出:

$$b_{j,0} = b_{1,j-1} - \sum_{i=1}^{j-1} a_{1,i} b_{j-i,0}, \quad j = 2, 3, \dots, N \quad (14)$$

式(14)中  $j_1 = \min\{j-1, 2\}$ ; 当  $j > 1$  时,  $b_{1,j-1} = 0$ , 且  $b_{1,0} = 0$ 。若令  $\omega^*$  为参考转速,则目标函数为:

$$J = E\{\omega - \omega^*\}^T(\omega - \omega^*) + \lambda\Delta i_q^T\Delta i_q \quad (15)$$

将(9)式带入(15)后,对  $\Delta i_q$  求偏导,得 GPC 控制率:

$$\Delta i_q = (G^T G + \lambda I)^{-1} G^T (\omega^* - \omega_m) \quad (16)$$

则当前时刻的控制量为:

$$\begin{aligned} i_q(k) &= i_q(k-1) + [1, 0, \dots, 0] \cdot \\ &\quad (G^T G + \lambda I)^{-1} G^T (\omega^* - \omega_m) \end{aligned} \quad (17)$$

式(17)中  $\lambda$  为控制量加权项。

### 2.2 CARIMA 模型参数在线辨识

PMSM 在运行过程中,模型参数会随之产生一定的变化,这种变化将会导致 2.1 节中所提及的 CARIMA 模型不准确,进而影响预测控制器的性能。由于在电机实际运行过程中,电机参数的变化是非常缓慢的,故只需对参数进行定时的在线辨识和更新就可以解决模型不准确的问题。在线辨识模型参数的方法有很多种,最常见的就是递推最小二乘法(RLS)。RLS 是一种适用于定常系统参数未知的参数在线辨识算法,但多数实际系统模型参数是时变的,在参数随时间缓慢变化的同时,算法本身对参数的修正能力也越来越弱,使新采集的输入输出数据对参数估计值的更新作用不大。为了克服这个问题,本文使用了带遗忘因子递推最小二乘法。

应用于本系统的参数辨识方法<sup>[4]</sup>如下:

$$\begin{cases} \hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + K(k)[\omega(k) - \hat{\phi}^T(k)\hat{\theta}(k-1)] \\ K(k) = \frac{P(k-1)\hat{\phi}(k)}{\lambda + \hat{\phi}^T(k)P(k-1)\hat{\phi}(k)} \\ P(k) = \frac{1}{\lambda}[I - K(k)\hat{\phi}^T(k)]P(k-1) \end{cases} \quad (18)$$

式(18)中  $\theta$  为待估参数矩阵,  $\phi(k)$  为  $k$  时刻之前的输入和输出矩阵。

$$\begin{cases} \hat{\phi}(k) = [-\omega(k-1), -\omega(k-2), \Delta i_q(k-1)] \\ \hat{\theta} = [\hat{a}-1, \hat{a}, \hat{b}] \\ \hat{\xi}(k) = \omega(k) - \hat{\omega}(k) = \omega(k) - \hat{\phi}^T(k)\hat{\theta} \end{cases} \quad (19)$$

### 3 传统 GPC 算法与改进 GPC 算法在永磁同步电机控制系统中的应用对比

GPC 算法所用 CARIMA 模型与改进 GPC 算法模型一致。建立 CARIMA 模型后, 需要引入 Diophantine 方程<sup>[5]</sup>:

$$1 = E_j(z^{-1})A(z^{-1}) + z^{-j}F_j(z^{-1}) \quad (20)$$

$$E_j(z^{-1})B(z^{-1}) = F_j(z^{-1}) \quad (21)$$

GPC 所用的预测输出模型矩阵形式为:

$$Y = F_1\Delta U + F_2\Delta U(k-j) + GY(k) + E\xi \quad (22)$$

上式的系数矩阵是根据 Diophantine 方程的结果求出的。矩阵方程组的计算过程较复杂, 计算时间较长, 占用系统资源较多, 不利于基于 DSP 的实际应用。本文采用的改进 GPC 用新的途径建立预测模型, 避免了求解矩阵方程组等复杂运算, 而且这种算法不像传统 GPC 那样受到了  $C(z^{-1})$  稳定的限制。其算法简单、计算量较小, 基本保留了 GPC 的基本特征和优点。

### 4 系统仿真及分析

采用 MATLAB 软件对改进广义预测控制器仿真实验。永磁同步电机参数如表 1 所示。

表 1 永磁同步电机参数表

符号	描述	值
$P$	额定功率	10.7/kW
$R_s$	定子电阻	0.28/Ω
$L_s$	定子电感	0.003 465/H
$\varphi_r$	转子磁链	0.198 9/Wb
$B$	阻尼系数	0.68/S <sup>-2</sup>
$p$	极对数	4
$J$	转动惯量	0.04/kg m <sup>2</sup>

文中改进广义预测控制器的采样周期取 0.001 s, 预测长度取 8, 输出柔化系数为 0.7, 辨识算法遗忘因子为 1。则转速跟踪曲线如图 2 所示, 参数估计曲线如图 3 所示。

由图 2 可以看出, 本文所设计的 JGPC 控制器可以很好的跟踪给定速度曲线; 且由辨识出的参数可知, 本文第二节中提及的  $a$  约等于 -0.983,  $b$  约等于 0.27, 这与由实际所用电机参数计算出的  $a, b$  一致, 由此表明参数辨识的算法是可行的。

由图 3 传统 GPC 算法的仿真实验波形可以看出, 采用改进 GPC 的 PMSM 驱动系统与传统的 GPC 驱动系统相比, 其控制效果基本一致, 但其计算较复杂, 不利实际应用。因此本文采用的 JGPC 算法因其算法简单, 且控制效果和传统 GPC 算法基本一致, 故比于传统的 GPC 算法在 PMSM 控制系统中的应用更具有前景。

由图 4 可以看出, 采用传统的速度 PI 控制器的 PMSM 驱动

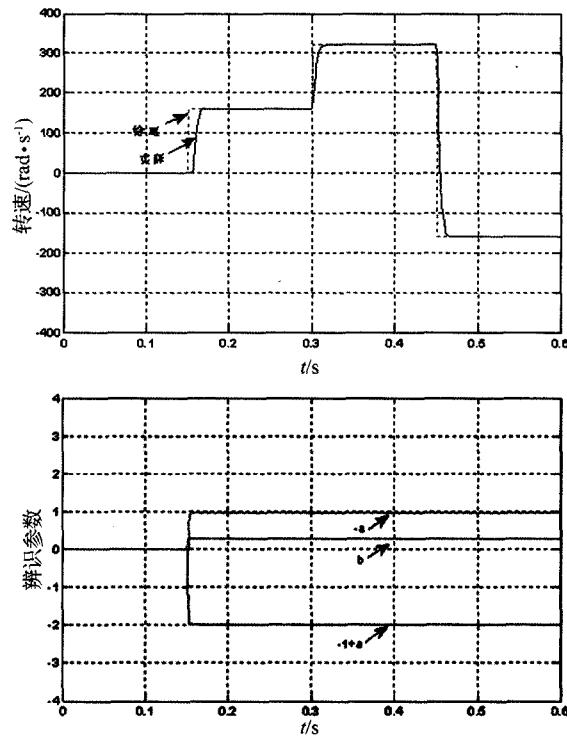


图 2 采用改进 GPC 算法的转速跟踪及参数辨识曲线

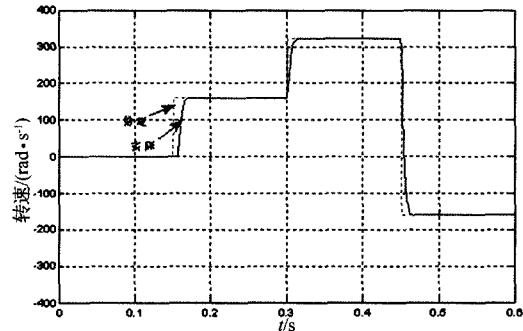


图 3 采用 GPC 算法的转速跟踪曲线

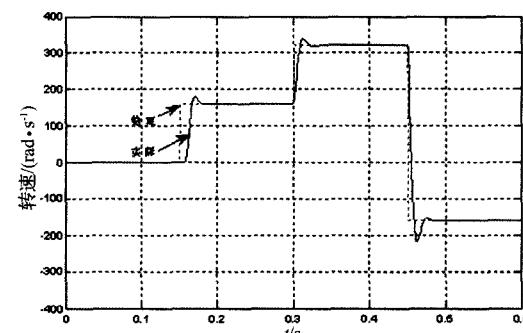


图 4 采用传统 PI 控制器的转速跟踪曲线

系统具有一定的超调量, 且快速性不如本文所介绍的采用改进的 GPC 控制算法的 PMSM 控制系统。实验结果表明, 该控制算法在 PMSM 驱动系统中的是可行的, 且比采用传统 PI 控制器更具优越性。

(下转第 38 页)

## 2.2 刀闸状态监测

变电站的断路器、隔离刀闸的辅助接点均接入电力监控系统,可以实时查看其开关状态。但刀闸的实际分合状态可能与检测状态不符。本文提出了一种基于霍尔磁检测开关原理的方法来准确可靠的检测刀闸的分合状态,并通过Zigbee通信将状态信息传输至巡检机器人<sup>[7-8]</sup>。

在隔离刀闸的动触头上安装永磁体,在静触头上安装带有霍尔开关器件和Zigbee通信模块的刀闸状态检测传感器,其安装示意图如图5所示。在开关合闸时,永磁体处于传感器的检测范围内,开关打开后,永磁体与传感器间的距离拉开,远离其检测范围。

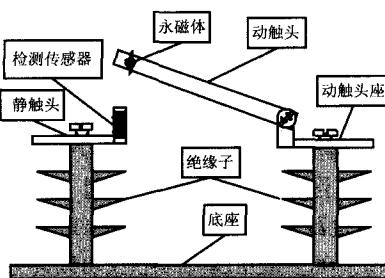


图5 刀闸状态检测示意图

## 2.3 远程遥控及诊断系统

正常情况下,巡检机器人按照预先设定好的时间和路线进行巡检,特殊情况下,通过监控系统可对机器人的行为进行干预,临时获得机器人的控制权,遥控其巡检时间、路线和监测方式。

监控系统获得机器人控制权后,可遥控机器人在整个变电站WLAN覆盖范围内运行,运行期间可遥控机器人上的视频检测系统,获得行进范围内的视频图像。若机器人驶出WLAN范围,将默认慢速原方向退回直至重新获得WLAN信号。遥控结束时,若机器人当前位置不在宿舍,必须遥控机器人遥控返回至具有金属引导线的巡检线路上,否则机器人将失去巡航线路,发出“不在巡检路线”的告警信息至监测系统。

通过远程遥控可以异地查看变电站的突发情况,并可与电力综合自动化系统配合如遥控、负荷切换等实际问题。同时可建立一套专家系统,与综自系统联动。如当继电保护动作时,综自系统立即给巡检机器人发出巡检命令,令其立即到发生事故的间隔采集视频、状态等信息,有利于分析事故原因,缩短检修时间,减小停电损失。

## 3 控制流程

变电站自动巡检机器人的控制流程如图6所示。

(上接第10页)

## 5 结束语

考虑传统广义预测控制器计算量较大,PI控制器鲁棒性不强且对于PI参数的设置经常需要依靠经验来不断尝试获得等缺点,本文采用一种改进的广义预测控制算法。理论上该控制算法可以保留传统GPC的主要优点,同时克服传统PI调节器的缺点。仿真实验表明,本文所设计的JGPC控制器可以很好的跟踪给定速度曲线,辨识出的参数跟实际电机的相关参数一致,且动态及稳态性能良好,达到了所预期的效果。

### 参考文献:

- 杨承志,孙棣华,张长胜.系统辨识与自适应控制[M].重庆:重庆大学出版社,2009:69-71.
- 金元郁,顾兴源.改进的广义预测控制算法[J].信息与控制,1990,19

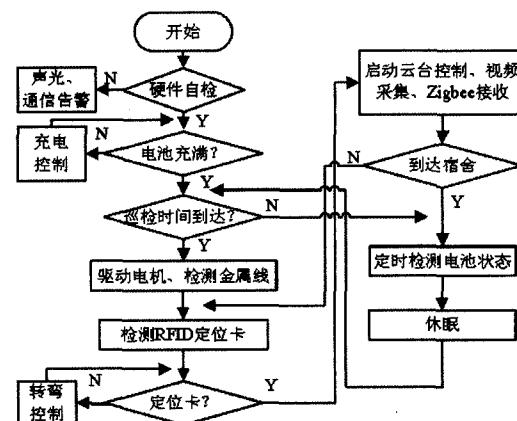


图6 机器人控制流程图

## 4 结束语

本文提出了一种基于多种无线技术的变电站自动巡检机器人系统,在设定时间、设定路线自动巡航,获得沿途各种监测传感器数据和视频信息,通过WLAN网络实时上传给监控系统,并能自动进行充电和管理。亦可通过后台实行远程遥控,进行相应操作,与综自系统一起迅速查看现场情况,实现远程诊断功能。

此系统的实施,为变电站构建了基本的无线通信网络和无线监测网络,对全面在线监测系统的实施提供了基础条件。

### 参考文献:

- 鲁守银,钱庆林,张斌,等.变电站设备巡检机器人的研制[J].电力系统自动化,2006,30(13):94-98.
- 周立辉,张永生,孙勇,等.智能变电站巡检机器人研制及应用[J].电力系统自动化,2011,35(19):85-88.
- 杨森,董吉文,鲁守银.变电站设备巡检机器人视觉导航方法[J].电网技术,2009,53(5):11-16.
- 王海鹏,王飞,王骞,等.基于变电站巡检机器人的超声波检测系统的设计与实现[J].制造业自动化,2012,34(15):37-39.
- 邢晓敏,李波,陈静.电力高压触点温度无线监测系统的研发[J].电力系统保护与控制,2010,38(22):174-178.
- 李强,王艳松,刘学民.光纤温度传感器在电力系统中的应用现状综述[J].电力系统保护与控制,2010,38(1):135-139.
- 王鹏程.刀闸辅助触点状态对母差保护的影响[J].电力系统保护与控制,2010,38(5):124-126.
- 王一清,杨志强,高海龙.综合自动化变电站中隔离刀闸防误操作的闭锁策略分析[J].电力自动化设备,2011,39(5):137-140.

**【作者简介】**张金贵(1963-),男,江苏南通人,高级工程师,主要从事电力系统自动装置的研究与设计。李从飞(1981-),男,湖北黄梅人,工程师,硕士,主要从事电力系统自动装置的研发工作。

(3):8-14.

- 庞中华,崔红.系统辨识与自适应控制[M].北京:北京航空航天大学出版社,2009:137-174.
- 林瑞全,黄娟,王春迎.一种新型GPC算法及其在PMSM直接转矩控制中的实现[J].哈尔滨理工大学学报,2011,16(5):65-71.
- Guoliang Wang, Hexu Sun, Lianbing Li. Applying Generalized Predictive Control to PM Synchronous Motor [C]. Proceedings of the 5th World Congress on Intelligent Control and Automation, Hangzhou, P. R. China, 2004.

**【作者简介】**赵肖旭(1988-),男,江苏镇江人,硕士研究生,专业:电气工程,主要研究方向:电力电子与电力传动。黄声华(1951-),男,湖北武汉人,教授,博士生导师,主要研究方向:新型特种电机及其控制系统、电力电子装置与系统、电力电子在电力系统中的应用等。王正昊(1986-),男,河南新乡人,工程师,硕士,主要研究方向:电力系统、电网监控与调度自动化等。周竞(1988-),男,江苏扬州人,硕士研究生,专业:电力系统及其自动化,主要研究方向:电力系统无功优化与电压控制。孙耀程(1988-),男,江苏扬州人,硕士研究生,专业:电机与电器,主要研究方向:新型电机驱动与控制。