

一种开关磁阻电机无位置传感器控制效率优化策略^{*}

黄向慧¹, 朱立群¹, 周奇勋^{1,2}

(1. 西安科技大学 电气与控制工程学院, 陕西 西安 710054;

2. 同济大学 嵌入式系统与服务计算教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 针对开关磁阻电机(SRM)的简化磁链法只能实现单相导通运行且导通区间固定的缺点, 提出了一种结合固定关断角和自适应调节开通角的无位置传感器控制技术。利用曲线拟合关断位置磁链取代传统存储数据表, 通过对比实时计算的动态磁链和曲线拟合的静态磁链, 确定关断位置信号并估计转速和其他位置。考虑电机阻抗和电感的非线性特点, 优化电感最小区域的开通角自调节模型确定导通区间。仿真结果验证了该方案的可行性和正确性, 能够实现转子位置的间接检测, 电机的运行效率得到进一步优化。

关键词: 开关磁阻电机; 无位置传感器控制; 改进磁链法; 效率优化

中图分类号: TM 352 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2019)08-0041-06

Efficiency Optimization Strategy for Sensorless Control of Switched Reluctance Motor^{*}

HUANG Xianghui¹, ZHU Liqun¹, ZHOU Qixun^{1,2}

(1. College of Electrical and Control Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

2. The Key Laboratory of Embedded System and Service Computing, Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In view of the fact that the simplified flux linkage method of switched reluctance motor (SRM) could only realize single-phase on-line operation and the conduction interval was fixed, a sensorless control technology combining fixed turn-off angle and adaptive adjustment of turn-on angle was proposed. Using the curve-fitting turn-off position flux to replace the traditional stored data table, the turn-off position signal and the estimated speed and other positions were determined by comparing the real-time calculated dynamic flux linkage and the curve-fitted static flux linkage. Considering the non-linear characteristics of the impedance and inductance of the motor, the conduction interval was determined by optimizing the self-regulating model of the opening angle in the minimum inductance region. The simulation results verified the feasibility and correctness of the scheme, which could realize the indirect detection of rotor position and further optimize the operation efficiency of the motor.

Key words: switched reluctance motor (SRM); sensorless control; improved flux linkage method; efficiency optimization

^{*} 基金项目: 同济大学嵌入式系统与服务计算教育部重点实验室开放课题基金项目(ESSCKF2016-05)

作者简介: 黄向慧(1967—), 女, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为检测技术与自动化装置、电机与电器。

朱立群(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力电子与电力传动。

周奇勋(1979—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为新能源汽车电力驱动与控制技术。

0 引言

开关磁阻电机(SRM)具有结构简单、坚固、成本低、调速范围广和可靠性高等特点,广泛应用于矿山机械、电动汽车和航空航天等传动领域^[1]。SRM运行需要位置传感器提供的换相信号使绕组正确通断,但增加位置传感器使原本结构简单的SRM变得复杂,降低了传动系统的可靠性,同时增加了系统的维护量,还使SRM应用于矿用机车等工作环境恶劣的场合受限制^[2]。因此,研究无位置传感器控制技术对SRM的推广使用具有重要意义。

国内外学者对SRM无位置传感器控制技术进行了大量研究,主要分为导通相检测法、非导通相检测法、附加元件法和智能控制检测法等^[3-6]。文献[7]首先提出磁链电流法,利用磁链-电流-转子位置间对应的关系确定位置信息,但储存的三维数据表需要大量试验测量和存储空间。文献[8]采用神经网络方法拟合磁链-电流-转子位置的非线性模型,无需建立精确的电机模型,但训练过程所需样本多、耗时久。文献[9]提出的简化磁链法选取电感最大位置作为换相时刻,并存储参考位置的磁链-电流二维数据表,实时比较积分计算磁链和参考位置磁链确定换相信号,但只能实现单相导通运行。文献[10]在文献[9]的基础上,提出比较特征位置磁链的方法,利用SRM的对称性确定各相绕组的换相信号,能够实现多相导通运行,但导通区间固定。文献[11]提出开通角给定且与关断角无关的改进型简化磁链法,导通区间可调,有利于调速系统的性能优化。

本文在文献[9-11]的基础上对简化磁链法进行了改进,采用一种简便的方法快速测量并拟合电感最大位置的磁链-电流数据,将固定关断角的简化磁链法和自适应调节开通角相结合。该无位置传感器控制方案不需要存储磁链数据表,节省了处理器内存并提高了实时性。开通位置的自适应调节可以实现多相导通运行,同时能够在不同的运行状态下获得较高的运行性能。最后,通过仿真试验,验证了所提方案的可行性和正确性。

1 关断位置确定及磁链获取

在SRM电流斩波控制中,位置信号被用于确

定换相时刻,包括关断位置信号和开通位置信号。关断位置往往接近电感最大位置,同时此处的磁链电流数据容易获取,因此以最大位置作为特征位置点检索关断位置信号,进而估算出转速和其他角度位置。

随着导通时间的增加,当积分计算的动态磁链增加至大于或等于关断位置拟合的静态磁链时,此相到达关断位置,关断该相绕组并检索关断位置信号。其中,第 k 相动态磁链表达式为

$$\psi_k(t) = \int_0^t (u_k - i_k R_k) dt + \psi_k(0) \quad (1)$$

式中: u_k 、 i_k ——第 k 相绕组的电压、电流;

R_k ——第 k 相绕组的阻抗;

$\psi_k(0)$ ——第 k 相绕组的初始磁链。

关断位置静态磁链的获取一般有2种方法:有限元法和试验测量法。有限元法可以获得整个位置的磁链数据,但是需要详细的电机本体参数。本文采用试验测量法只需获取最大位置磁链数据,无需转子夹紧装置(如机械分度仪),可以简便地得到任意一台SRM的静态磁链。对一相绕组通电后电流逐渐增大,当产生的转矩大于摩擦转矩时,转子开始转动并固定在最大位置。采样该相电流和电压,可得静态磁链:

$$\psi_k(n) = \left\{ \sum_{n=1}^N [u_k(n) - i_k(n) R_k] T \right\} + \psi_k(0) \quad (2)$$

式中: n ——采样点;

$u_k(n)$ 、 $i_k(n)$ ——第 k 相绕组的电压和电流采样值;

T ——采样周期;

$\psi_k(0)$ ——第 k 相绕组的初始磁链。

试验测量获取的磁链数据在MATLAB中进行曲线拟合,结果如图1所示。

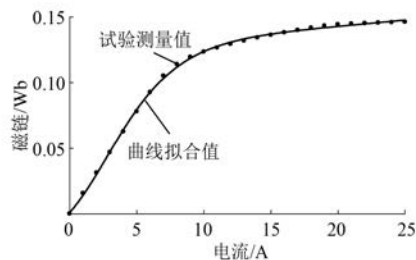


图1 最大位置磁链数据拟合

实际测量离散磁链值和曲线拟合值的和方差

为 3.373×10^{-5} , 标准差为 1.299×10^{-3} , 确定系数为 0.999。结果表明拟合误差小、精度高。

在关断位置处的磁链为电流的单值函数, 由拟合结果可得静态磁链函数解析式为

$$\psi(i) = \frac{p_1 i^3 + p_2 i^2 + p_3 i + p_4}{i^2 + q_1 i + q_2} \tag{3}$$

p 和 q 为磁链拟合曲线参数, 如表 1 所示。

表 1 磁链拟合曲线参数

参数名称	参数值
p_1	0.001 626
p_2	0.076 4
p_3	0.689 2
p_4	0.066 19
q_1	-2.93
q_2	60.41

2 转速和其他位置估计原理

在 12/8 型 SRM 中相邻关断位置间的机械角度为 15° , 检索相邻两相的关断位置信号, 可以估算转子转速:

$$\omega = \frac{\Delta\theta}{\Delta T} \tag{4}$$

式中: $\Delta\theta$ ——相邻关断位置间的机械角度;

ΔT ——经过 $\Delta\theta$ 的时间。

由于 ΔT 较短从而假定该时间段内转速恒定, 则其他位置估计为

$$\theta(k+1) = \theta(k) + \omega\Delta T \tag{5}$$

式中: $\theta(k)$ —— k 次转速更新后估计的位置角;

$\theta(k+1)$ —— $(k+1)$ 次转速更新后估计的位置角。

每到一处关断位置, 估计转速和角度更新 1 次。一个电周期内转速和角度更新 3 次, 累加起来获得整个周期内的转子位置。此法估计的转速和角度位置, 在一个机械角度周期里更新 24 次, 且不存在累积误差, 保证了一定的精度。

3 开通位置的自适应调节

3.1 开通位置的电感模型

SRM 相电感和角度的关系如图 2 所示。在电感最小区域的电感值变化较小, 线性模型中为定值, 忽略了反电动势的影响, 在该模型中建立的

开通位置解析模型存在误差。为了建立更精确的开通位置电感模型, 应考虑非线性电感模型。

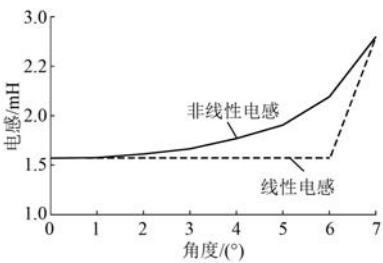


图 2 相电感和转子角度关系

将实际电感数据在 MATLAB 中拟合, 如图 3 所示。实际电感值和曲线拟合值的和方差为 5.808×10^{-9} , 标准差为 3.81×10^{-5} , 确定系数为 0.991。结果表明, 拟合误差小、精度高。

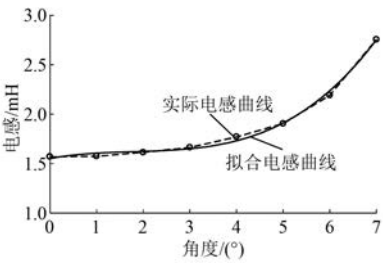


图 3 最小位置附近电感拟合

最小区域忽略电流影响时, 电感为角度的单值函数, 拟合电感最小区域的非线性模型为

$$L(\theta) = a_1 \theta^3 + a_2 \theta^2 + a_3 \theta + a_4 \tag{6}$$

a 为电感拟合解析式参数, 如表 2 所示。

表 2 电感拟合解析式参数

参数名称	参数值
a_1	0.000 007 609
a_2	-0.000 041 36
a_3	0.000 088 65
a_4	0.001 551

3.2 最优开通位置数学模型

图 4 所示为电流斩波控制方式下, 导通相电流、线性电感模型和位置角度的关系。为了实现 SRM 在不同运行状态下效率最优, 应保证首个电流峰值出现在电感上升位置 θ_2 处^[12], 因此开通角的调节范围在 $\theta_1 \sim \theta_2$ 之间。

SRM 绕组电压方程为

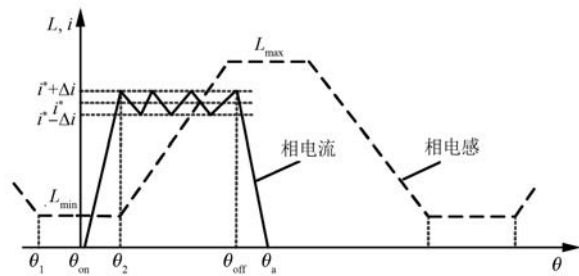


图4 相电流、线型电感和角度的关系

$$U = iR + L(\theta) \frac{di}{dt} + i\omega \frac{dL}{d\theta} \quad (7)$$

式中: i ——绕组电流;

R ——绕组阻抗;

L ——相电感;

ω ——转子角速度。

在考虑绕组阻抗 R 和非线性电感模型 $L = L(\theta)$ 时,由式(7)可推导相电流表达式为

$$i(t) = \frac{U}{\tau L(\theta)} + Ce^{-t/\tau} \quad (8)$$

其中:

$$\tau = \frac{\omega}{L(\theta)} \frac{dL}{d\theta} + \frac{R}{L(\theta)} \quad (9)$$

当 $t=0$ 时,相电流初始值为零,从而可以求出常数变量 C 的值,式(9)可以变为

$$i(t) = \frac{U}{\tau L(\theta)} (1 - e^{-t/\tau}) \quad (10)$$

当绕组在 θ_{on} 处导通后,电流开始上升,直至 θ_2 处出现首个电流峰值,电流上升过程时间 t 为

$$t = \frac{\theta_2 - \theta_{on}}{\omega} \quad (11)$$

将式(9)和式(11)代入式(10)整理后,可得电流上升期间的表达式为

$$i(t) = \frac{U}{\omega \frac{dL}{d\theta} + R} \left\{ 1 - e^{\left[\frac{\theta_{on} - \theta_2}{L(\theta)} \right] \left(\frac{dL}{d\theta} + \frac{R}{\omega} \right)} \right\} \quad (12)$$

对式(12)两边取对数整理后,可得优化开通位置的解析式:

$$\theta_{on} = \theta_2 + \ln \left[1 - \frac{i_p \omega}{U} \frac{dL}{d\theta} - \frac{iR}{U} \right] \frac{L(\theta)}{dL/d\theta + R/\omega} \quad (13)$$

式中: θ_2 ——电感上升位置;

i_p ——首个电流峰值。

基于比较时间阈值可以确定 i_p 大小。通过计算实时导通相的电流 i 、电压 U 和转速 ω ,可以实现开通位置的自适应调节。

4 仿真分析

为了验证所提无位置传感器控制方案的可行性,基于 MATLAB/Simulink 环境搭建系统的电路模型,在电流斩波控制方式下,系统采用双闭环控制结构。仿真试验用电机为 12/8 型 SRM,额定电压为 120 V,额定转速为 1 500 r/min,额定功率为 3 kW,绕组阻抗为 0.5 Ω ,电感上升位置 θ_2 为 6° 。无位置传感器控制系统如图 5 所示。

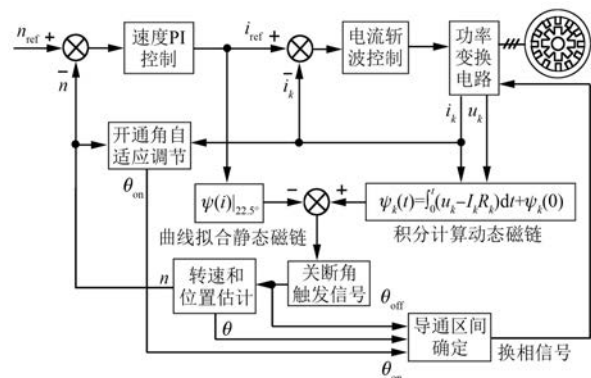


图5 无位置传感器控制系统

图 6 所示为关断位置信号在 500 r/min 下的仿真结果。图 6 表明动态磁链和静态磁链能够准确跟随绕组电流变化,在电流关断位置处通过比较磁链能够准确产生关断位置触发信号。

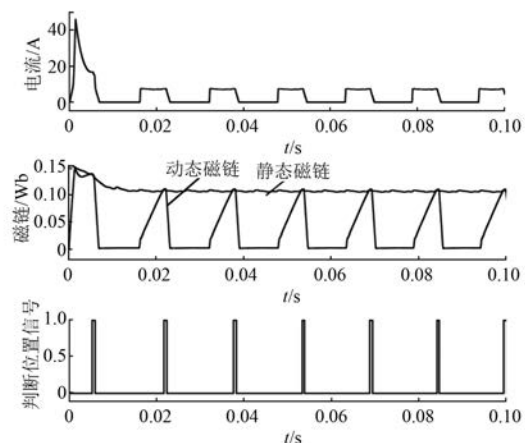


图6 500 r/min 下磁链和关断位置信号

图 7 所示为关断位置信号在 0.14 s 时给定转速由 500 r/min 变化到 1 200 r/min 的仿真结果。

结果表明:在转速突变过程中磁链仍能够正确比较,关断位置信号能够快速跟踪给定转速;比较不同转速下的运行结果,高速运行时关断位置信号更加精确。

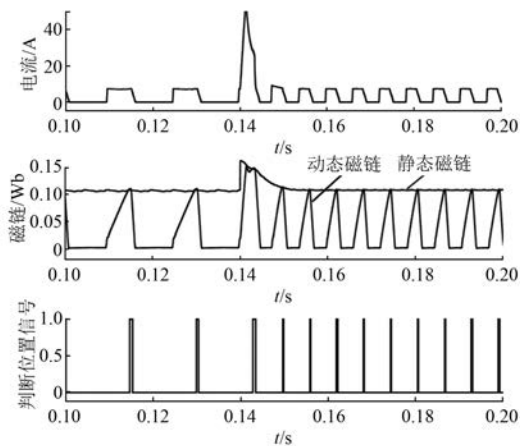


图7 1 200 r/min 下磁链和关断位置信号

图8所示为位置和转速估计在500 r/min下的仿真结果。通过对比实际位置和估计位置,结果表明估计位置能够很好地跟踪实际位置。电机起动阶段,转速和位置估计出现抖动。在PI控制和电流斩波调节后,经过0.02 s快速达到参考转速,转速和位置能够准确跟踪实际值,500 r/min时估计误差为1.49°。

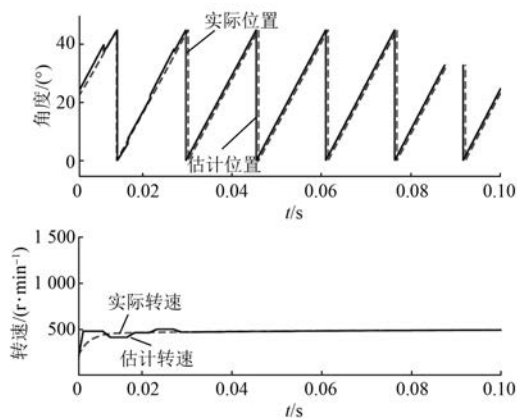


图8 500 r/min 下位置和转速估计

图9所示为位置和转速估计在0.14 s时给定转速由500 r/min变化到1 200 r/min的仿真结果。估计原理中假设相邻关断位置间的转速恒定,因此在转速突变时位置和转速估计出现抖动,1 200 r/min时估计误差为0.98°,随着转速增加位

置估计精度将进一步提高。

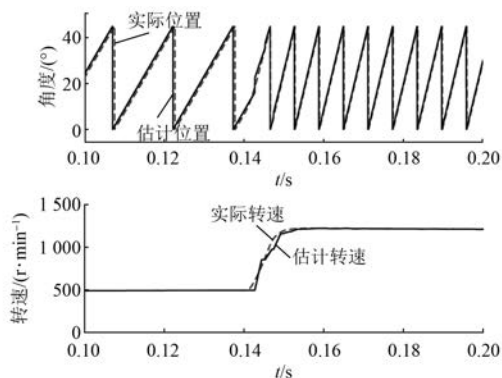


图9 1 200 r/min 下位置和转速估计

平均转矩 T_{av} 和电流有效值 i_{ev} 的比值与运行效率成正相关,因此用转矩电流比 T_{av}/i_{ev} 作为衡量性能的指标。电感上升位置为6°,对比开通位置固定为6°和自调节在不同运行状态下的性能。

图10所示为转矩、电流及开通位置在500 r/min、2 N·m下的仿真结果。通过计算平均转矩和电流有效值,开通位置固定时 T_{av}/i_{ev} 为0.448、开通位置自调节为5.57°的 T_{av}/i_{ev} 为0.453。此时开通位置自调节值接近固定值,因此 T_{av}/i_{ev} 的值相差较小。

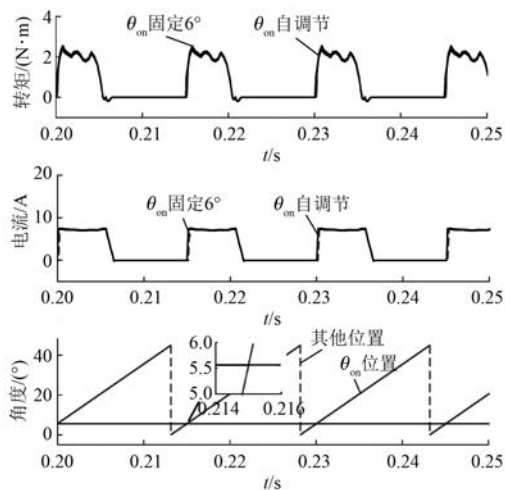


图10 500 r/min 下转矩、电流和开通位置

图11所示为转矩、电流及开通位置在1 200 r/min、8 N·m下的仿真结果。开通位置固定时 T_{av}/i_{ev} 为0.611、开通位置自调节为2.69°时 T_{av}/i_{ev} 为0.701。此状态下开通位置明显提前,固定开通位置无法获取最大 T_{av}/i_{ev} 。结果表明在不

同运行状态下,开通位置自调节方案能够通过改变导通区间,从而改善系统的运行效率。

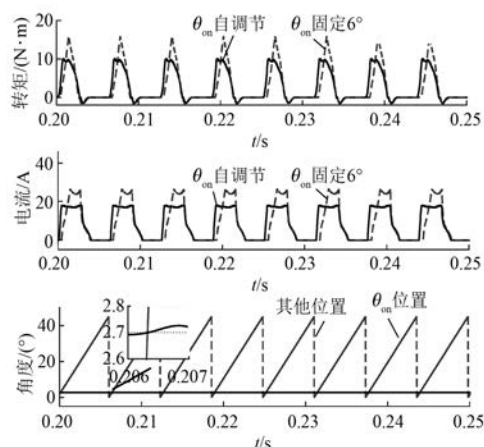


图 11 1 200 r/min 下转矩、电流和开通位置

5 结 语

本文提出了一种基于简化磁链法的 SRM 无位置传感器控制策略,将固定关断角的改进型磁链法和开通位置自适应调节相结合,解决了传统简化磁链法导通区间固定、效率无法达到最优的问题。曲线拟合关断位置磁链模型和开通位置电感模型,在考虑电机阻抗和反电动势时,建立了更加精确的开通位置数学模型。仿真结果表明:所提方法可以准确估计位置和转速,并且能够优化整个系统的运行效率。

【参考文献】

- [1] 王宏华.开关型磁阻电动机调速控制技术[M].2版.北京:机械工业出版社,2014: 31.
- [2] 张小平,周艳红,张铸.矿用电机车开关磁阻电机传动系统控制策略研究[J].系统仿真学报,2016,28(11): 2771.
- [3] 李姗姗,李爱民,王青,等.基于特殊位置检测的开关磁阻电机无位置传感器控制策略[J].电机与控制应用,2018,45(12): 12.
- [4] 蒯松岩,赵帅,张中,等.基于有限元分析的开关磁阻电机电感模型无位置传感器技术[J].电机与控制应用,2017,44(2): 70.
- [5] SHEN L, WU J H, YANG S Y. Initial position estimation in SRM using bootstrap circuit without predefined inductance parameters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26 (9): 2449.
- [6] 张磊,刘闯.基于电流阈值的开关磁阻电机位置估计容错分析[J].电机与控制应用,2018,45(5): 58.
- [7] LYONS J P, MACMINN S R, PRESTON M A. Flux-current methods for SRM rotor position estimation[C] // Conference Record of the 1991 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, 1991.
- [8] 夏长亮,王明超,史婷娜,等.基于神经网络的开关磁阻电机无位置传感器控制[J].中国电机工程学报,2005,25(13): 123.
- [9] 邱亦慧,詹琼华,马志源,等.基于简化磁链法的开关磁阻电机间接位置检测[J].中国电机工程学报,2001,21(10): 60.
- [10] 曾文禹,刘闯.基于改进型磁链法的开关磁阻电机无位置检测的研究[J].电气传动,2010,40(7): 18.
- [11] 李珍国,李彩红,阚志忠,等.基于改进型简化磁链法的开关磁阻电机无位置传感器速度控制[J].电工技术学报,2011,26(6): 62.
- [12] SOZER Y, TORREY D A. Optimal turn-off angle control in the face of automatic turn-on angle control for switched-reluctance motors[J]. IET Electric Power Applications, 2007, 1(3): 395.

收稿日期: 2019-04-18

(上接第 40 页)

- [8] 沈广通.异步电机逆变器的非线性特性及控制策略研究[D].杭州:浙江大学,2014.
- [9] 范波,徐翔.应用于感应电机矢量控制中的逆变器死区补偿[J].计算机测量与控制,2017,25(2): 70.
- [10] 王明渝,陈杨裕,邓威,等.定转子电阻在线辨识的感应电机转速估计方法[J].电机与控制学报,2010,14(4): 66.
- [11] 徐翔,范波,马建伟.基于全阶状态观测器的转子电阻辨识及反馈矩阵设计[J].电机与控制应用,2017,44(1): 51.

收稿日期: 2019-04-26