

无刷直流电动机转速模糊PID控制系统仿真

无刷直流电动机被控过程具有很大的时变不确定性和高度非线性,采用常规PID控制方法存在参数优化困难、负载适应力差等缺点。发挥模糊控制对系统参数变化有较强鲁棒性的优势,在传统PID算法的基础上设计了一种模糊PID控制器,自动调整控制参数,获得最佳的过程响应。确定了控制器参数自整定原则,建立了输入输出变量隶属函数以及模糊控制规则表。基于Matlab软件建立了无刷直流电动机转速、电流双闭环控制系统的仿真模型,通过仿真对比分析了传统PID与模糊PID控制时电动机转速、转矩和电流波形。结果表明,采用模糊PID控制使系统响应速度加快,动态过程、静态特性及鲁棒性能变得更好。

仇月仙/昆明理工大学城市学院

0 引言

无刷直流电动机具有能量密度大、控制简单、运行稳定和转矩大等优点^[1]。因算法简单、操作方便以及可靠性较高,比例、积分和微分控制(PID控制)被广泛应用于工业控制过程^[2],包括运动控制。而无刷直流电动机调速系统属非线性、多变量、时变性和强耦合系统,其运动状态复杂,过程变量影响因素较多,尤其是系统存在转矩脉动^[3]。要提高无刷直流电动机的控制准确度和调速性能,仅采用传统直流调速方法和PID控制策略很难达到令人满意的效果。因此,研究并提出更为先进的无刷直流电动机控制器成为一个普遍关注的课题。

将神经网络算法与PID控制相结合,发挥神经元自适应控制的优势,实现PID调节参数在线校正功能,该算法易于调试、现场调整参数较少^[4]。文献[5]针对常规PID控制系统存在参数难以整定、超调量大等问题,提出了单神经元控制在

系统中的总体设计方法,并建立了单神经元控制器;文献[6]在BP神经网络优化PID参数的基础上,设计了一种遗传算法和BP神经网络结合的PID控制器;文献[7-8]提出了模糊算法与径向基函数神经网络相结合的控制策略,设计了一个四层的神经网络,使控制系统具备自适应能力;文献[9-10]提出了一种可以自整定参数的模糊PI控制方法,并设计了一种DSP无刷直流电动机模糊PI转速控制系统;文献[11]提出了一种新型模糊PI预测函数控制算法,运用模糊逻辑控制实现PIFPC控制参数在线自整定,完善了常规的控制策略;文献[12-13]在分析模糊自适应PID控制器的基础上,提出一种优化模糊算子的优化方法,具有更好的动、静态性能及较强的自适应能力。

本文在分析无刷直流电动机特征的基础上引入模糊控制策略,设计了模糊PID转速控制器,构建了基于Matlab/Simulink无刷直流电动机仿真系统,并通过与常规控制比较验证模糊PID控制效果。

1 无刷直流电动机控制原理

无刷直流电动机主要由电动机本体、转子位置传感器和逆变器电路三部分组成。其中位置传感器将转子的位置信号反馈给控制器,控制器根据转子当前所处的角度数据,按照一定算法,并将控制信号送到逆变器进行换相,在运行过程中,始终保持无刷直流电动机定子与转子所产生的磁场为90°的电角度,从而使电动机转子按一定方向转动。这



仇月仙/讲师

关键词/Keywords

无刷直流电动机 ·
模糊控制 ·
PID控制 ·
Matlab仿真 ·
动态性能 ·

里逆变器的导通次序与转子转角同步,起到了与机械换相器控制功能一致的控制作用和控制效果。

在无刷直流电动机控制电路中,逆变器可用功率开关管三相全控桥^[14],电动机绕组为Y形联结,用六只功率开关型晶体管构成逆变电源,采用两-两导通工作方式,根据位置传感器反馈的转子位置信号判断导通的两相,将直流转变为三路相位差为120°电角度的脉动交流电源,保证电动机按照一定方向旋转。设电动机三相绕组全对称,则三个绕组电压方程为

$$\begin{pmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} L-M & 0 & 0 \\ 0 & L-M & 0 \\ 0 & 0 & L-M \end{pmatrix} p \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中, u_a 、 u_b 和 u_c 为绕组端电压; i_a 、 i_b 和 i_c 为定子电流; e_a 、 e_b 和 e_c 为绕组反电动势; R 、 L 和 M 分别为绕组的电阻、自感和互感; p 为微分算子。

定子绕组产生的电磁功率为

$$P_M = e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c \quad (2)$$

电动机的电磁转矩方程为

$$T_M = \frac{1}{\omega} (e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c) \quad (3)$$

式中, ω 为无刷直流电动机的角速度。

无刷直流电动机的调速系统一般采用转速、电流双闭环控制系统,内环是电流环,用来抑制冲击电流;外环是转速环,用来实现稳定转速,并采用PWM调制方式。将外部转速给定值与实际检测值相比较,得到转速偏差值;经增量式PID调节后,输出值作为电流环调节器的给定值,与实际检测到的电流值相比较,得到电流偏差值;经增量式PI调节器调节后,输出量为PWM调制的占空比。

为防止无刷直流电动机定子电流过大,设置了一个限幅环节,用于限制PWM占空比输出的最大值。而且每一次电流循环都重新调整一次PWM信号的占空比。PWM信号与位置信号通过逻辑编译模块得到六路触发控制信号,触发信号被送至

三相逆变桥实现无刷直流电动机的换相和控制。

由于采用传统PID控制,其控制参数无法根据被控对象参量的变化做出相应的调整,鲁棒性欠佳。

2 模糊PID控制器设计

2.1 模糊控制器控制方案

系统模糊PID控制器采用双输入三输出结构,将位置检测霍尔传感器测量的速度反馈信号与给定速度信号相比较,并计算出偏差值 e 和偏差的变化率 ec ,然后进行模糊化处理得到模糊变量 E 和 EC 。将模糊变量 E 、 EC 作为模糊控制器的输入,按模糊规则推理得到模糊集合,通过解模糊运算得到模糊控制器的三个输出量 Δk_p 、 Δk_i 和 Δk_d ,最后加到上一周期的 k_p 、 k_i 和 k_d ,这样就完成了对控制系统PID参数的在线校正^[15]。图1为模糊PID控制器结构原理图。

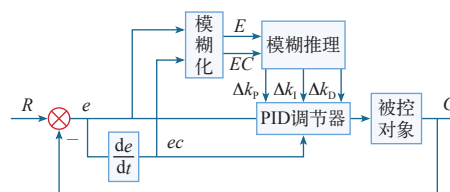


图1 模糊PID控制器结构

综合系统稳定性、快速性、稳态误差和超调量等因素,PID参数自整定原则如下:

- 1) 当 E 较大时, Δk_p 取较大值;为防止 EC 瞬时值过大, Δk_d 取较小值。
- 2) 当 E 值处于中等大小时, Δk_p 取较小值, Δk_i 、 Δk_d 取中值。
- 3) 当 E 较小时, Δk_p 、 Δk_i 取较大值;当 EC 较小时, Δk_d 取较大值;当 EC 较大时, Δk_d 取较小值。

2.2 变量隶属函数的确定

这里将模糊化得到的转速偏差 e 和转速偏差变化率 ec ,以及模糊控制器输出量 Δk_p 、 Δk_i 和 Δk_d 的变化范围均设定为区间 $[-3, 3]$ 的连续变化量,离散化处理并统一规定到模糊论域 $\{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$ 内。在模糊论域内定义 $\{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$ 七个模糊集,相应语言变

量模糊集可描述为{负大, 负中, 负小, 不变, 正小, 正中, 正大}。输入、输出量的隶属度函数都采用三角形分布函数。

2.3 模糊控制规则表的建立

参考无刷直流电动机调速系统实际操作数据, 确定模糊输出变量 Δk_p 、 Δk_i 和 Δk_d 的模糊控制规则如下表所示, 表中输出结果对应为 Δk_p 、 Δk_i 和 Δk_d 。

表 模糊控制规则

$E \backslash EC$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PB	PB	PM	PS	ZO
NM	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO
NS	PS	NS	NB	NB	NB	NM	PS
ZO	PB	PB	PB	PB	PM	ZO	ZO
PS	NB	NB	NM	NS	NS	ZO	ZO
PM	PS	NS	NB	NM	NM	NS	ZO
PB	PM	PM	PM	PS	ZO	PS	PS
	NB	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
	ZO	NS	NM	NS	NS	NS	ZO
	PM	PM	PS	ZO	NS	NS	NM
	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PM
	ZO	NS	NS	NS	NS	NS	ZO
	PS	PS	ZO	NS	NM	NM	NM
	NM	NS	ZO	PS	PS	PM	PB
	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
	PS	ZO	NS	NM	NM	PB	NB
	ZO	ZO	PS	NM	PM	PS	PB
	ZO	PS	PS	PS	PS	PS	PB
	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB
	PB	ZO	PS	PM	PM	PB	PB
	PB	PM	PM	PM	PS	PS	PB

根据上表所列模糊控制规则, 用程序语言可写出49条模糊条件语句, 如: If E is NM and EC is NB then Δk_p is PB, Δk_i is NB, Δk_d is NS; If E is ZO and EC is NM then Δk_p is PB, Δk_i is NS, Δk_d is NM, 等。每一条语句确定一个模糊关系, 将每一个模糊关系采用“并”运算, 就可得到模糊控制器的总模糊关系 R 。用不同时刻的输入变量与总模糊关系 R 进行矩阵合成, 运算得到修正参数 Δk_p 、 Δk_i 和 Δk_d 的模糊输出量。然后采用重心平均法进行清晰化处理, 得到 Δk_p 、 Δk_i 和 Δk_d 的准确输出值,

最后用式(4)计算出PID控制三个参数为

$$\begin{cases} k_p = k'_p + \Delta k_p \\ k_i = k'_i + \Delta k_i \\ k_d = k'_d + \Delta k_d \end{cases} \quad (4)$$

式中, k'_p 、 k'_i 和 k'_d 为初始值。模糊控制器的三个输出值分别乘以设定的量化因子, 针对不同的被控对象, 通过实验方法可适时调整量化因子的大小。

建立好模糊推理系统后, 在Matlab环境下通过模糊逻辑编辑器选择控制器类型, 确定各变量的隶属函数和量化区间, 输入模糊控制规则, 建立得到模糊PID智能控制器模型。

3 控制系统仿真

基于Matlab7.0/Simulink平台, 建立无刷直流电动机电流、转速双闭环控制系统仿真模型。转速闭环控制采用模糊PID控制器, 电流闭环控制采用传统PI控制器。电流控制器的输出信号作为产生PWM脉冲控制信号, 并且采用电压脉宽调制方式, 通过调节PWM脉冲的宽度来改变逆变器输出电压的平均值, 进而控制无刷直流电动机的转速^[16]。

系统仿真模型如图2所示, 这里选用系统提供的梯形波永磁同步电动机作为无刷直流电动机的本体模块, 选用三相全控桥模型作为逆变电源模块, 构建霍尔传感器Hall信号解码模块以及PWM脉冲等模块。PWM脉冲模块六路输出信号分别控制逆变电源各桥。

4 仿真结果分析

仿真模型中, 无刷直流电动机参数为: 极对数 $P=4$, 额定电压 $U=300$ V, 定子电阻 $R=2.86$ Ω , 定子电感 $L-M=8.5$ mH, 反电动势系数 $F=0.175$ KRPM。仿真时长0.7 s, 空载起动, 先设定转速为1 500 r/min, 在0.3 s时突加负载4 N, 在0.5 s时调速到1 800 r/min的额定转速。

分别采用传统PID控制策略和模糊PID控制策略, 并对无刷直流电动机的调速过程进行实验比对, 图3为电动机转速响应波形, 图4为电动机转矩变化波形, 图5为电动机定子电流变化波形。

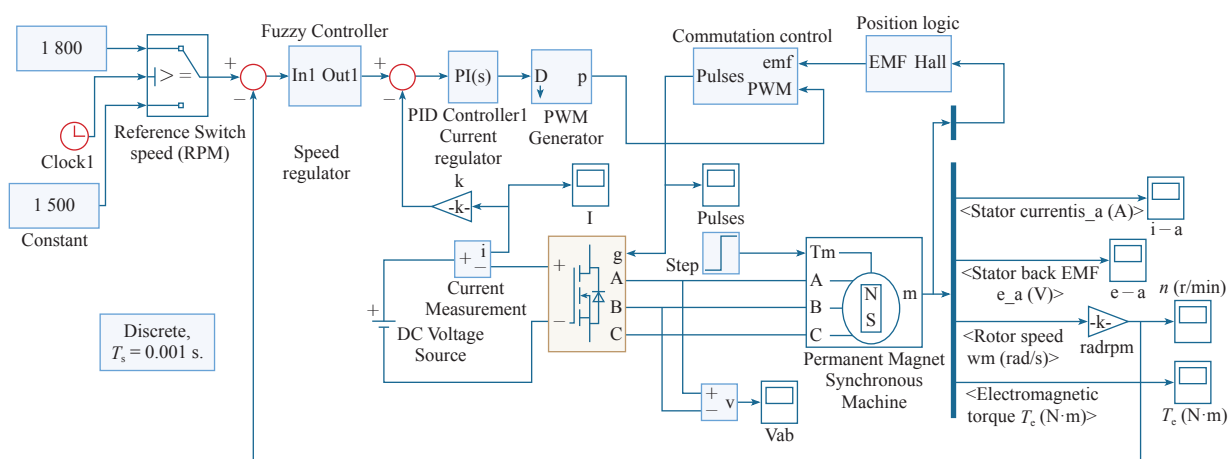
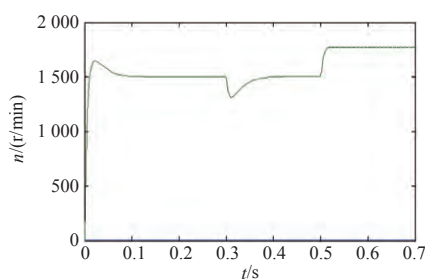
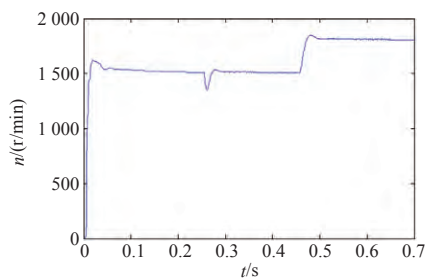


图2 无刷直流电动机控制系统仿真模型

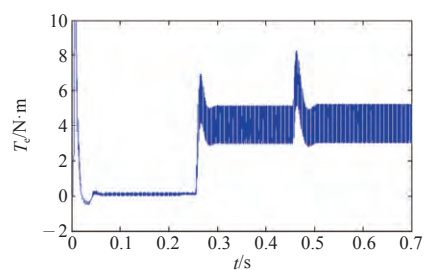


(a) 传统PID控制

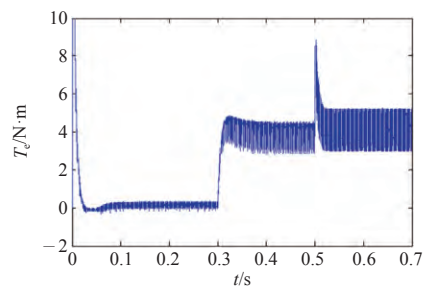


(b) 模糊PID控制

图3 转速响应曲线比较



(a) 传统PID控制



(b) 模糊PID控制

图4 转矩特性曲线

(1) 转速响应比较

从图3a、b两个转速仿真曲线可以看出：

采用传统PID控制，起动时转速从0突升到1 650 r/min，时间为0.08 s时逐渐降低达到给定值的1 500 r/min，之后稳定运行；突加负载后，转速从1 500 r/min突降到1 300 r/min，然后回升到1 500 r/min，整个过程用时0.1 s；当给定转速调整为1 800 r/min时，转速逐渐上升到给定值，用时0.02 s。

采用模糊PID控制结果后，起动时转速从0突升到1 620 r/min，时间为0.06 s时逐渐降低达到给

定值的1 500 r/min，之后稳定运行；突加负载后，转速从1 500 r/min突降到1 450 r/min，然后回升到1 500 r/min，整个过程用时0.08 s；当给定为额定转速时，曲线从1 500 r/min上升到1 850 r/min，再回到给定值，用时0.01 s。

对比上面两组数据可知，采用模糊PID控制，空载起动超调量减少了2%，稳定时间减少了0.02 s；突加干扰后，转速变化量减少了10%，恢复时间减少了0.02 s；突加给定转速后的调节时间缩短了0.01 s。可见，采用模糊自适应PID控制，系统在

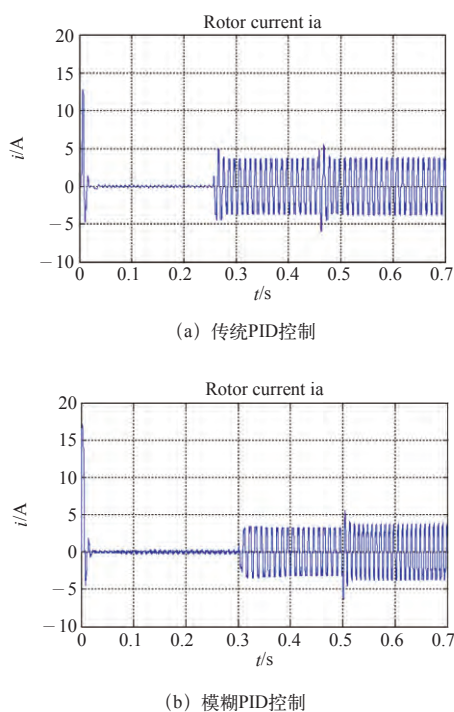


图5 定子电流曲线

较短的时间内进入稳态,说明无刷直流电动机转速响应快;突然增加负载时,电动机转速响应曲线有一个变化,但波动较小,并且能迅速回到给定转速值,动态过程调节时间短。说明控制系统对负载扰动有较强的抗干扰性能,表现出较好的动态特性。

(2) 转矩性能比较

图4a采用传统PID控制,起动时转矩产生一个短暂脉冲,且有振荡,从 $10T_e$ 下降到 $-0.5T_e$,然后回到平衡点;突加负载时,转矩从0跃变到 $7\text{ N}\cdot\text{m}$,然后降到 $5\text{ N}\cdot\text{m}$,用时约 0.02 s ,然后保持在 $3\sim 5\text{ N}\cdot\text{m}$ 之间;改变转速时,转矩同样存在突变,从 $5\text{ N}\cdot\text{m}$ 上升到 $8.2\text{ N}\cdot\text{m}$,之后保持在 $3\sim 5\text{ N}\cdot\text{m}$ 之间。

图4b采用模糊PID控制策略,起动时转矩也存在一个短暂脉冲,但几乎没有振荡;突加负载后,转矩曲线稳步上升到 $5\text{ N}\cdot\text{m}$,比传统控制减少了 $2\text{ N}\cdot\text{m}$,而且没有明显超调,曲线较平滑,保持在 $3\sim 5\text{ N}\cdot\text{m}$ 之间;改变转速时,转矩也存在一个脉冲突变,从 $5\text{ N}\cdot\text{m}$ 上升到 $8.3\text{ N}\cdot\text{m}$,比传统PID略有增大,之后回到并保持在 $3\sim 5\text{ N}\cdot\text{m}$ 之间,但动态时间缩短了 0.1 s 。

综合分析可知,采用模糊PID控制,电动机转

矩脉动程度明显减小。

(3) 定子电流波形比较

图5a采用传统PID控制,空载起动时定子电流在 $+15\sim -5\text{ A}$ 之间有两次振荡,后接近 0 A ;加载及调速时,定子电流分别有一次脉冲,然后保持在 $+4\sim -4\text{ A}$ 之间,转速的改变引起的定子电流变化不明显。

图5b采用模糊PID控制,空载起动时定子电流在 $+16\sim -5\text{ A}$ 之间有两次振荡,后接近 0 A ;加载后电流上升到 $+3.7\sim -3.7\text{ A}$ 之间,比传统PID减少了 0.3 A ,而且无超调;调速时,有一次脉冲,后保持在 $+4\sim -4\text{ A}$ 之间。

分析可得,采用模糊PID控制,定子电流振荡趋势减小,转速上升,电流上升。

综上所述,模糊PID控制由于是在PID原有参数的基础上进行参数在线自整定,因此具有更强的鲁棒性和自适应性。采用模糊PID控制,无论是转速、转矩还是电流,波动情况都有较大改善,控制效果更优。

仿真结果表明:相对传统PID控制而言,采用模糊PID控制,可加快系统响应速度,减小转矩脉动,改善动态性能,提高控制准确度,对负载扰动具有较强的鲁棒性,且有节能效果。

5 结束语

在研究无刷直流电动机工作原理的基础上,通过分析其转动特点,将模糊控制与传统PID控制相结合,设计了一种无刷直流电动机模糊PID控制器,并应用于无刷直流电动机转速控制中。利用Matlab仿真工具建立了无刷直流电动机电流-转速双闭环控制系统的仿真模型,电流环采用传统PI控制,速度环采用模糊PID控制。仿真与比对实验分析表明,波形与理论分析相符,系统运行稳定、可靠。较传统PID控制,模糊PID控制使系统具有更好的动、静态性能和更强的鲁棒性。

参考文献

- [1] 王大方,卜德明,朱成,等.一种减小无刷直流电机换相转矩脉动的调制方法[J].电工技术学

- 报, 2014, 29 (5) : 160-166.
- [2] KiamHeongAng, Gregory Chong, et al. PID control system analysis, design, and technology [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2005, 13 (4) : 559-564.
- [3] Liu Yong, Zhu Ziqiang, David Howe. Direct torque control of brushless DC drives with reduced torque ripple [J]. IEEE Transactions Ind.-Appl., 2005, 41 (2) : 599-608.
- [4] Omatu S, Iwasa T, Yoshioka M. Skill-based PID control by using neural networks [C]. IEEE International Conference, 1998.
- [5] 李书舟, 容慧. 单神经元自适应PID算法在无刷直流电机控制系统上的应用研究 [J]. 自动化与仪器仪表, 2014, 147 (4) : 44-46.
- [6] 李红亮, 王加祥, 曹闹昌, 等. 无刷直流电机调速智能优化控制 [J]. 计算机仿真, 2015, 32 (10) : 426-429.
- [7] 王晓远, 傅涛. 基于模糊RBF神经网络的无刷直流电机控制 [J]. 微电机, 2015, 48 (11) : 33-36.
- [8] 程声烽, 程小华. 神经网络在无刷直流电机控制系统中的应用 [J]. 电机与控制应用, 2014, 41 (4) : 12-15.
- [9] 王霞, 朱景伟. 基于模糊PI控制的无刷直流电机调速系统 [J]. 电气传动, 2014, 44 (1) : 63-67.
- [10] 付子义, 邢阳. 无刷直流电机的变论域模糊自适应控制 [J]. 计算机仿真, 2015, 32 (5) : 336-339.
- [11] 郭伟, 郁雯雯, 夏友亮, 等. 无刷直流电机转速控制策略仿真研究 [J]. 计算机仿真, 2015, 32 (9) : 372-375.
- [12] 刘慧博, 王静, 吴彦合. 无刷直流电机模糊自适应PID控制研究与仿真 [J]. 控制工程, 2014, 21 (4) : 583-587.
- [13] 张奎, 雷勇. 无刷直流电机智能PID控制系统建模与仿真 [J]. 测控技术, 2015, 34 (4) : 81-84.
- [14] 姜卫东, 胡杨, 黄辉, 等. 采用坐标变换的无刷直流电机换相过程分析及减小换相转矩脉动的方法 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35 (24) : 6527-6533.
- [15] 胡包钢, 应浩. 模糊PID控制技术研究发展回顾及其面临的若干重要问题 [J]. 自动化学报, 2001, 27 (4) : 567-581.
- [16] 揭贵生, 马伟明. 考虑换相时无刷直流电机脉宽调制方法研究 [J]. 电工技术学报, 2005, 20 (9) : 66-71.

(收稿日期: 2016-09-13) **EA**

(上接第23页)

作用优势互补, 使气化管压力稳定在工艺要求的范围内, 性能指标得到改善, 提高了控制质量, 获得了比较理想的控制效果, 具有重要的实用价值。

参考文献

- [1] 鲁选民, 张煜行, 王永芳, 等. 酒厂稻壳储存用钢板仓出料形式及仓底结构设计 [J]. 粮食与饲料工业, 2015 (10) : 5-6.
- [2] 刘柱金. 我国大型煤粉灰钢板仓储存工艺与输送技术的应用 [J]. 粉煤灰, 2013 (2) : 4-5.
- [3] 王蕊. 造纸生产中压缩机防喘振保护控制系统 [J]. 中国造纸, 2015, 34 (10) : 61-63.
- [4] 史冬琳, 门洪, 李峰, 等. 基于PCS 7的过程控制实验设计 [J]. 自动化与仪表, 2015 (7) : 45-48.
- [5] 王蕊. 间歇式化学反应器分程控制系统的实现 [J]. 现代化工, 2014, 34 (7) : 157-158, 160.

(收稿日期: 2016-06-14) **EA**