

真空开关动作时间的自适应控制

陈明帆, 段雄英, 黄智慧, 邹积岩, 董恩源

(大连理工大学电气工程学院, 辽宁省大连市 116024)

Adaptive Control for Operating Time of Vacuum Switch

CHEN Mingfan, DUAN Xiongying, HUANG Zhihui, ZOU Jiyan, DONG Enyuan

(College of Electrical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning Province, China)

ABSTRACT: The phase-control switching technology of circuit breakers, which provides an important technical approach for smart grid construction, can effectively mitigate the transient caused by switching operations in power systems. The key technology of phase selections with vacuum switches is to control the operating characteristic of permanent magnetic actuators in vacuum switches, so as to realize a stable operating time for vacuum switches under different environmental conditions. This paper proposed a new type of control-driven program for vacuum switches with permanent magnetic actuators using the fuzzy self-adaptive PID control technology. And the design of this new type of control-driven system for permanent magnetic actuators in vacuum switches was accomplished based on the TMS320LF2407A processor. According to the experimental results, the system can keep the switching time error within $\pm 0.25\text{ms}$ under different environmental conditions.

KEY WORDS: vacuum switch; permanent magnetic actuator; stable operating time; self-adaptive control; fuzzy PID

摘要: 相控开关技术可以有效地削弱电网各类负载投切操作引起的系统暂态过程, 是建设智能电网的重要技术之一。真空开关选相操作的技术关键是控制真空开关机构的运动特性, 实现真空开关在不同环境下的动作时间稳定。利用模糊PID自适应控制技术, 针对基于永磁机构的真空开关提出一种新型控制驱动方案; 并基于 TMS320LF2407A 处理器实现了新型真空开关永磁机构驱动控制系统的设计。实验研究验证了该控制系统在环境因素变化时可保持合闸时间误差稳定在 $\pm 0.25\text{ms}$ 以内。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50877006, 50807006); “十一五”国家科技支撑计划资助项目(2009BAA19B03); 国家电网公司科技攻关项目(SG0846)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50877006, 50807006); Key Project of the National Eleventh-Five Year Research Program of China (2009BAA19B03); Sci & Tech project of State Grid Corporation of China (SG0846)。

关键词: 真空开关; 永磁机构; 动作时间稳定; 自适应控制; 模糊PID

0 引言

开关选相操作技术可以减小系统过电压, 提高电能质量及系统稳定性, 延长电力设备的寿命, 还可以提高开关的分断能力^[1]。从文献[2]对智能电网的特征、技术组成及所依靠的智能设备等分析可看出, 开关选相操作技术的实现当前智能电网的建设具有重要的意义。

选相操作技术的实施要求开关操动机构合分闸时间的分散性要小, 显然, 传统的操作机构是无法满足要求的, 而永磁机构的出现及其在真空开关中的应用, 为开关选相操作技术创造了很好的实现条件^[3-5]。永磁操作机构虽然动作时间的分散性小, 但外界条件仍会影响动作时间的稳定性。而且, 真空开关选相操作理想状态不仅是保证动作时间为常数, 而且要使开关触头运动曲线保持理想运动特性曲线。要想同时接近这两个理想状态, 使用现代智能控制技术是必要的。

双稳态永磁机构有分闸和合闸两个线圈, 分闸线圈通电可以将机构铁心从合闸位置推动到分闸位置, 合闸线圈通电则机构铁心从分闸位置推动到合闸位置^[6]。本文针对双稳态真空开关永磁机构, 提出一种开关行程闭环控制方案, 以实现开关动作时间稳定, 并设计该运动特性智能控制系统。该系统包含了机构参数的检测、机构的驱动及控制算法部分。通过对开关进行合闸实验, 验证该智能控制方案的控制可行性。研究中采用脉宽调制(pulse width modulation, PWM)驱动控制来达到电流大小灵活控制的功能, 开关器件选用 IGBT, IGBT 驱动电路选用了高速光耦合器 HCPL316J。

1 真空开关永磁机构模糊PID 智能控制系统

1.1 系统模型分析

针对控制系统的设计需要，本文主要对永磁机构的动态特性模型进行分析。永磁机构的动态特性是由电磁吸力和负载反力配合过程决定，其动态特性模型不仅要计算磁路、电路及运动状态等参数，还要考虑在动铁芯运动过程中各种参数的变化和相互影响，需要将电路磁路方程、动力学方程及热方程等关系进行综合考虑^[7-8]。

永磁机构可有两种不同的励磁方式：直流电压励磁和电容放电励磁。在电容放电励磁下，永磁机构动态特性的微分方程组^[9-11]为

$$\begin{cases} U_C = iR(T) + \frac{d\psi}{dt} \\ i = -C \frac{dU_C}{dt} \\ m \frac{d^2x}{dt^2} = F_m - F_f(x, \frac{dx}{dt}) \\ F_m = f_F(W_m) \\ \psi = f_\psi(i, \delta) \\ \frac{dT}{dt} = f_T(P, t, T_0, D_c, H_c) \end{cases} \quad (1)$$

式中： U_C 为电容电压； C 为电容容量； i 、 R 分别为线圈电流和线圈电阻； ψ 为电磁系统全磁链； t 为时间； m 为系统运动部件归算到铁芯处的质量； x 为动铁芯位移； F_m 为电磁吸力，与电磁系统磁能 W_m 有关； F_f 为运动反力，包括了弹簧负载反力和空气阻力，分别与位移 x 和速度 (dx/dt) 有关； W_m 为电磁系统磁能，是 ψ 与 i 的函数； T 、 T_0 分别为线圈工作温度和环境温度； P 为永磁机构的功耗； D_c 、 H_c 分别为线圈的外径及高度。

真空开关永磁机构自身某个参数或其某个环境因素的改变都会引起永磁机构动态特性和动作时间的改变，比如：控制电压、环境温度、触头烧蚀、累积运行次数等。而且，各个参数的改变对其它参数的影响及对整个动态过程的影响是一个比较复杂的关系，这给真空开关永磁机构运动特性的控制提出了难题。真空开关永磁机构的动态过程中，所有参数或环境因素的变化都将最终反映到机构的运动特性上，也就是机构的位移参量上。可以将关注点集中在对位移参量的控制上，并对其研究相应的控制策略。

1.2 系统控制方案

在真空开关永磁机构选相操作分合闸控制中，

对机构运动行程进行控制，保证一定的运动特性，便能使机构在不同环境下尽可能的保持一定的动作时间稳定性。通过控制永磁机构线圈电流来控制机构受力大小，从而控制机构的运动行程。线圈电流控制得越精确，机构的运动越能接近理想曲线。线圈电流的控制由 PWM 技术来实现，建立适当的闭环控制，根据给定的理想曲线和测得的机构运动状态量，实时调整相应的 PWM 波来控制 IGBT，从而实现实时控制线圈电流大小，以控制机构跟随理想行程曲线运动，可补偿各种环境因素变化引起的行程曲线偏差及动作时间不稳定。该闭环控制系统结构如图 1 所示。

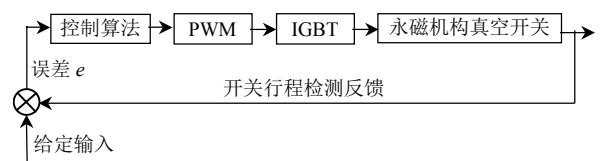


图 1 闭环控制系统结构图

Fig. 1 Structure of closed-loop control system

目前控制应用中大量采用了常规 PID 控制，并取得了较好的控制效果。常规 PID 控制具有结构简单且有一定的鲁棒性等特点。但对真空开关永磁机构这种非线性时变高阶且难以建立精确数学模型的系统，PID 控制很难达到理想的控制效果。模糊理论很好地解决了不能精确描述经验和难以建立精确数学模型的控制问题，结合 PID 控制良好地稳态误差及动态稳定性，可以构成模糊自适应 PID 控制，其为一种更好的控制策略^[12-16]。

模糊自适应 PID 控制器的输入为位置误差 e 及位置误差变化率 e_c ，其根据不同时刻的 e 和 e_c ，利用模糊控制规则对 PID 3 个控制参数进行在线修改，以满足不同 e 和 e_c 对 PID 控制参数的不同要求，从而改善被控对象的动态性能，控制结构图如图 2 所示。

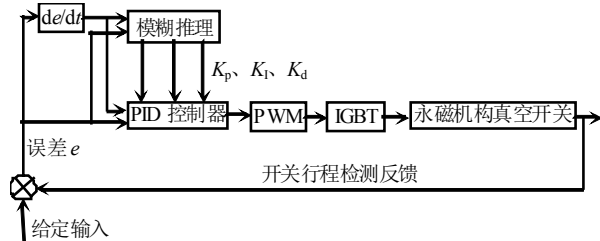


图 2 永磁机构真空开关模糊自适应整定 PID 控制结构图

Fig. 2 Structure of fuzzy self-adaptive PID control for a vacuum switch with permanent magnetic actuator

1.3 模糊自适应整定 PID 控制算法

模糊 PID 控制器控制规律是以 PID 控制为基

础, 离散 PID 控制算法规律如式(2)所示^[16]。

$$U(n) = K_p e(n) + K_I \sum_{i=0}^{n-1} e(i) + K_D e_c(n) \quad (2)$$

式中: $U(n)$ 为第 n 个采样时刻控制器的输出量; $e(n)$ 为第 n 个采样时刻控制器的输入量(即偏差信号); K_p 、 K_I 、 K_D 分别为比例系数、积分系数和微分系数; $e_c(n)$ 为第 n 个采样时刻的偏差变化率。

模糊控制器输入变量为位置偏差绝对值 $|e|$ 和位置偏差变化率绝对值 $|e_c|$ 。为这两个语言变量均取 7 个语言值{NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB}; 其隶属函数分别为图 3(a)、(b)所示。其中, 可在实验中通过调整隶属函数的各个转折点来调整各个控制点。

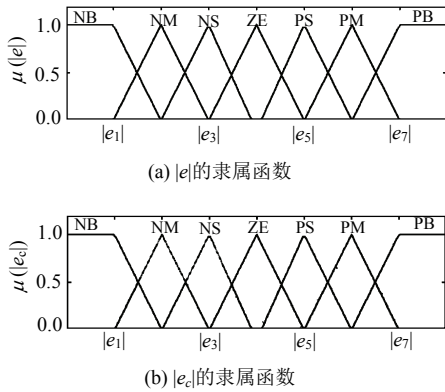


图 3 $|e|$ 及 $|e_c|$ 的隶属函数

Fig. 3 Membership functions of $|e|$ and $|e_c|$

各个状态隶属度的计算为:

$$\mu_1(|e|, |e_c|) = \mu_{NB}(|e|);$$

$$\mu_2(|e|, |e_c|) = \mu_{NM}(|e|) \wedge \mu_{NB}(|e_c|);$$

...

$$\mu_{36}(|e|, |e_c|) = \mu_{PM}(|e|) \wedge \mu_{PB}(|e_c|);$$

$$\mu_{37}(|e|, |e_c|) = \mu_{PB}(|e|).$$

根据位置检测计算后得到的 $|e|$ 、 $|e_c|$ 及以上隶属度, 通过式(3)–(5)计算 PID 的 3 个参数:

$$K_p = \frac{\sum_{i=1}^{37} [\mu_i(|e|, |e_c|) \times K_{Pi}]}{\sum_{i=1}^{37} \mu_i(|e|, |e_c|)} \quad (3)$$

$$K_I = \frac{\sum_{i=1}^{37} [\mu_i(|e|, |e_c|) \times K_{Ii}]}{\sum_{i=1}^{37} \mu_i(|e|, |e_c|)} \quad (4)$$

$$K_D = \frac{\sum_{i=1}^{37} [\mu_i(|e|, |e_c|) \times K_{Di}]}{\sum_{i=1}^{37} \mu_i(|e|, |e_c|)} \quad (5)$$

式中: K_{Pi} 、 K_{Ii} 、 K_{Di} 为参数 K_p 、 K_I 、 K_D 在各个不同状态下的加权, 各个加权值由模糊控制整定规则来确定和修改。在对算法进行 DSP 的软件实现时, 采用制定模糊规则表的方法可以减小计算量, 规则表需根据模糊整定规则及控制对象来进行制定, 并在后期的调试及实验中进行修改和再整定, 以得到更符合控制对象的控制规则。各初始规则表略。初始整定规则为: $|e|$ 较大时, 取较大的 K_p 、较小的 K_D 并让 K_I 取零; $|e|$ 中等大小时, 取较小的 K_p 、适当的 K_I 及 K_D ; $|e|$ 较小时, 取较大的 K_p 及 K_I , K_D 根据 $|e_c|$ 取值且不能取得太大。依据调试经验加入自学习控制算法代替人工调试, 实现控制器在多次调试实验后通过自学习改善控制规则表。

最后采用增量式(6)计算出输出的控制增量:

$$\Delta U(n) = K_p [e(n) - e(n-1)] + K_I e(n) + K_D [e(n) - 2e(n-1) - e(n-2)] \quad (6)$$

根据得到的控制增量求取得相应的 PWM 输出增量值, 控制输出的 PWM 波, 从而控制线圈电流值。

1.4 控制系统的组成

为研究真空开关永磁机构的智能控制, 设计了以 DSP 为硬件平台的控制实验系统, 其结构如图 4 所示, 由闭环控制系统和实验辅助系统两部分组成。

闭环控制系统中, 当开关进行分合闸操作时, 利用机构行程检测电路和 DSP 的 AD 采样模块进行实时的机构运动行程的检测。将检测到的行程数据进行储存, 并与程序中的行程给定值进行比较得到比较误差值。将误差值输入到控制算法程序, 根据控制算法算出需要的 PWM 脉宽值来相应改变 DSP 的 PWM 模块的输出脉宽。DSP 输出 PWM 脉宽的改变通过电力电子驱动电路便可调节控制电容的放电情况, 即调节机构的线圈电流大小, 从而使得机构的运动行程可以控制, 且可以按给定的行程曲线来运动。

图 4 中的实验辅助系统可以实现控制系统参数的输入输出、系统当前状态显示及对控制系统发出命令。键盘部分负责给控制系统发出相应的实验命令, 如开始分合闸、参数设定、显示行程值及 PWM 值、显示值翻页、显示总时间值、开始与上位机进行 SCI 通信等等; 与计算机进行通信的 SCI 模块方便了计算机到控制系统的数据通讯, 可利用计算机对实验数据进行处理分析。

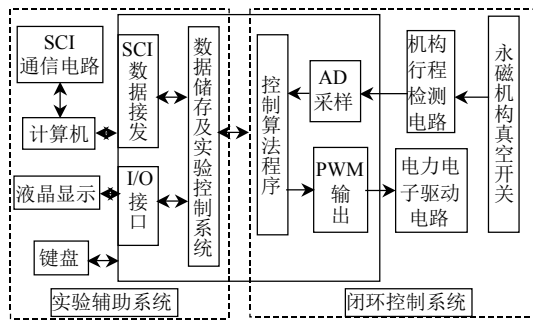


图 4 永磁机构真空开关控制实验系统结构图

Fig. 4 Structure of the experimental system to control the vacuum switch with permanent magnetic actuator

2 控制系统实验测试及分析

2.1 实验简述

根据上述设计的控制系统结构图，对各个模块进行硬件和软件的设计，为保证控制器在各种高温高寒的户外环境下仍能正常可靠工作，最终设计完成的智能控制系统所选用的器件及传感器的工作温度等均能满足高温高寒环境要求。

利用所设计的控制系统对真空开关永磁机构进行合闸控制实验。真空灭弧室的开距实测为 20.8 mm，行程检测扣除触头超行程。以电容电压为 290 V 左右时的行程曲线为参考，得到给定的合闸行程曲线如图 5 所示。该曲线的总合闸时间为 33.75 ms，前 14 ms 为起始励磁时间，即 14 ms 时刻机构开始运动。所以，该运动曲线下机构的合闸速度为 $20.8 / (33.75 - 14) = 1.05 \text{ (m/s)}$ 。将该曲线数据存储在 DSP 控制器中，作为控制给定输入值。

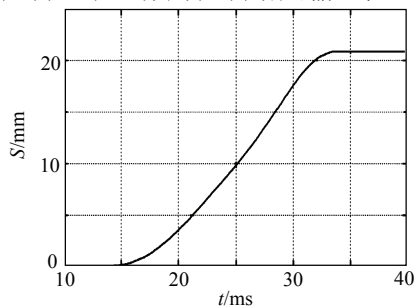


图 5 行程给定曲线

Fig. 5 Given movement curve

2.2 简单控制下的合闸实验

为验证智能控制的效果，作为比较，先直接合分励磁电源进行简单开关控制实验。环境因素的影响一般反映为电容电压的改变，改变电容的实验电压值，观测合闸时间及曲线的变化。

对检测到的行程曲线进行曲线拟合和数据处理，并消去机构弹跳过程和超行程，以第一次机构接触为合上时间点，得到不同电容电压下的行程曲

线，如图 6 所示。

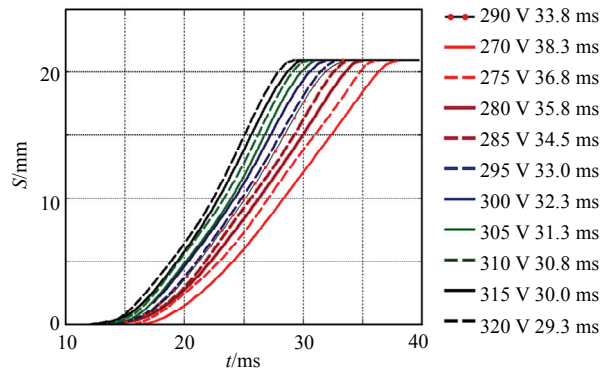


图 6 简单控制下的合闸实验

Fig. 6 Closing experiment under the simple control

实验结果表明，以电压的变化来模拟环境的变化，当环境变化时，机构的运动轨迹和合闸时间均发生了变化。而且影响较大，对于此实验，当电压在 270~320 V 间变化时，合闸时间变化范围达到了 29.3~38.3 ms，时间相差 9 ms 之多，这对于要实现选相控制是不允许的。

2.3 模糊 PID 控制实验

将模糊 PID 控制算法程序加入 DSP 控制器中，经过多次实验和反复调试制定了模糊控制规则，并将规则写入到控制器中，重新对以上情况进行了实验。且此实验的时间与环境与简单控制时的实验均不同，即各次实验环境温度等有所变化，可说明对环境因素的补偿作用。

对检测到的行程曲线进行曲线拟合和数据处理，并消去机构弹跳过程，以第一次机构接触为合上时间点，得到不同控制电压下的行程曲线，如图 7 所示。

以上实验结果说明，该模糊 PID 自适应控制使得合闸时间保证为了 33.5~34 ms 范围内，与简单控制相比改善了很多。在系统控制下，保证了机构尽量靠近给定曲线来运动，保证了合闸的时间稳定性。

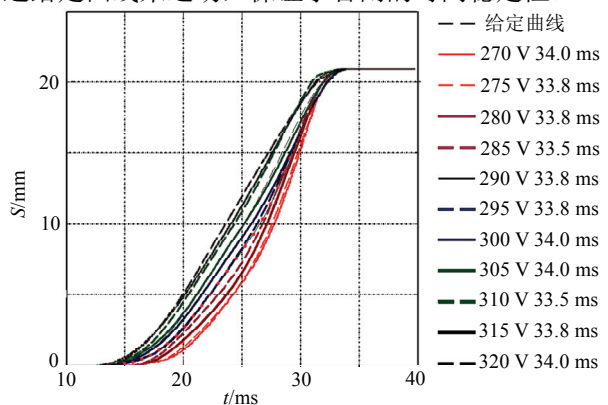


图 7 模糊 PID 控制下的合闸实验

Fig. 7 Closing experiment under the fuzzy PID control

3 结论

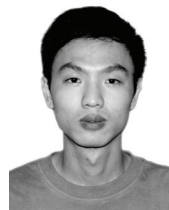
本文根据真空开关永磁机构的动态模型分析,提出了一种开关行程闭环控制的方案来对开关运动特性进行控制,并为真空开关永磁机构设计了一种模糊 PID 智能控制系统,以满足当前选相开关对时间稳定性及动作特性可控性的要求。以 TMS320LF2407A 处理器为平台,设计实现了该系统,通过合闸实验验证了该方案的可行性。在环境变化时,该智能控制系统使得原来 29.3~38.3 ms 的合闸时间变化范围改善为 33.5~34 ms,实现了合闸时间误差稳定在 ± 0.25 ms 以内。

本文为了模拟环境因素大幅度变化时该控制方案的控制效果,所以并未加入控制电压及线圈电流的补偿。控制过程中,控制电压的变化是影响开关动作时间的主要环境因素之一。对该系统设置控制电压及线圈电流的补偿后,将会使得最终的控制系统具有更好的控制效果。

本文所提出的智能控制方案仍有许多可以改进的余地。为了达到更好的运动特性控制效果,该控制方案的研究可以进行以下改进:提高开关位置检测精度及 PWM 波频率;增加离散控制点数以提高控制精度等。

参考文献

- [1] 段雄英, 廖敏夫, 丁富华, 等. 相控开关在电网中的应用及关键技术分析[J]. 高压电器, 2007, 43(2): 113-117.
Duan Xiongying, Liao Minfu, Ding Fuhua, et al. Application and key technology analysis of controlled switching[J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(2): 113-117(in Chinese).
- [2] 余贻鑫, 栾文鹏. 智能电网评述[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(34): 1-8.
Yu Yixin, Luan Wenpeng. Smart grid and its implementations [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(34): 1-8(in Chinese).
- [3] Li Wei, Fang Chunen, Zhou Lili, et al. Simulation and testing of operating characteristic of 27.5 V vacuum circuit breaker with permanent magnetic actuator[C]//23rd International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. Bucharest: IEEE, 2008: 125-128.
- [4] Horinouchi K, Tsukima M, Tohya N, et al. Synchronous controlled switching by vacuum circuit breaker (VCB) with electromagnetic operation mechanism[C]// IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies. Hong Kong: IEEE, 2004: 529-534.
- [5] Mcken B A R, Reuber D C. Magnets and vacuum-the perfect match[C]//Fifth International Conference on Trends in Distribution Switchgear: 400V-145kV for Utilities and Private Networks. London: IEEE, 1998: 73-79.
- [6] Li Z, Renforth L A, Auckland D W, et al. Computer aided optimal design of magnetic actuator for autorecloser application[C]//Fifth International Conference on Trends in Distribution Switchgear: 400 V-145 kV for Utilities and Private Networks. London: IEEE, 1998: 80-85.
- [7] Kawase Y, Mori H, Ito S. 3-D finite element analysis of electrodynamic repulsion force in stationary electric contacts taking into account asymmetric shape[J]. IEEE Trans. on Magnetics, 1997, 33(2): 1994-1999.
- [8] Kang J H, Bae C Y, Jung H k. Dynamic behavior analysis of permanent magnetic actuator in vacuum circuit breaker[C]//The Sixth International Conference on Electrical Machines and Systems. Beijing: IEEE, 2003: 100-103.
- [9] Liu Fugui, Guo Hongyong, Yang Qingxin, et al. An improved approach to calculate the dynamic characteristics of permanent magnetic actuator of vacuum circuit breaker[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2004: 1918-1921.
- [10] Lin Xin, Gao Huijun, Cai Zhiyuan. Magnetic field calculation and dynamic behavior analyses of the permanent magnetic actuator [C]//XIXth International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. Xi'an: IEEE, 2000: 523-535.
- [11] 林莘. 永磁机构与真空断路器[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002: 49-54.
Lin Xin. Vacuum circuit breaker with permanent magnetic actuator [M]. Beijing: China Machine Press, 2002: 49-54(in Chinese).
- [12] Cai Kaiyuan, Zhang Lei. Fuzzy reasoning as a control problem [J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2008, 16(3): 600-614.
- [13] Santos M, Cruz J M de la, Dormido S, et al. Between fuzzy-PID and PID-conventional controllers: a good choice[J]. Fuzzy Information Processing Society, 1996, 123-127.
- [14] 程武山. 智能控制理论与应用[M]. 上海: 上海交通大学, 2006: 21-50.
Chen Wushan. Intelligent control theory and applications [M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 2006: 21-50(in Chinese).
- [15] Petrov M, Ganchev I, Taneva A. Fuzzy PID control of nonlinear plants[C]//First International IEEE Symposium "Intelligent Systems". Sofia: IEEE, 2002: 30-35.
- [16] 刘金琨. 先进 PID 控制 Matlab 仿真[M]. 2 版. 北京: 电子工业出版社, 2004: 115-129.
Liu Jinkun. Matlab simulation of advanced PID control[M]. 2nd Edition. Beijing: Electronic Industry Press, 2004: 115-129(in Chinese).



陈明帆

收稿日期: 2010-11-10.

作者简介:

陈明帆(1986), 男, 硕士研究生, 主要从事智能化电器、电力电子及智能控制技术等研究, mingfan2005@163.com;

段雄英(1974), 女, 副教授, 博士生导师, 目前主要从事智能化高压电器及智能检测技术的研究, 着重研究高压电子式互感器和相控开关(同步开关)技术, dxy@dlut.edu.cn, xy_duan@263.net;

黄智慧(1982), 男, 博士研究生, 主要从事智能化高压电器研究;

邹积岩(1954), 男, 教授, 博士生导师, 目前主要从事智能化高压电器及脉冲功率技术研究;

董恩源(1973), 男, 副教授, 目前主要从事智能化高压电器研究。

(责任编辑 吕鲜艳)