

自适应模糊 PID 算法在软化击穿试验仪温度控制中的应用^①

徐立娟^{②*} 雷翔霄^{③**}

(* 长沙民政职业技术学院电子信息工程学院 长沙 410004)

(** 湖南大学电气与信息工程学院 长沙 410082)

摘 要 为满足漆包线新品种热性能的检测要求,设计了一种基于 STM32 的软化击穿试验仪温度控制系统。系统 CPU 选用 STM32,配以外围温度检测电路、信号调理电路、电流检测电路、驱动电路。控制算法采用自适应模糊 PID 算法。仿真和实物实验结果表明,该系统能快速精确地完成对软化击穿试验仪的温度控制,符合相关国家标准的要求。

关键词 漆包线;模糊 PID 算法;自适应;软化击穿;温度控制

0 引言

漆包线是指在高温软化后的导体表面涂刷绝缘涂层,用于绕制电磁线圈的金属导线,是绕组线的主要品种之一。我国已成为漆包线的主要生产制造基地,年产量约占世界漆包线产量的 30%。漆包线是电机、变压器、家用电器、继电器等产品电磁绕组的主要组成部分,电机和变压器是漆包线的主要用户。漆包线绝缘涂层的耐热性能影响电机的正常运转、使用寿命和过载能力,通常用热冲击实验和软化击穿实验来测试漆包线的热性能。热冲击实验是检测漆包线的绝缘涂层在机械应力作用下的热承受能力,软化击穿实验是测试漆包线绝缘涂层在压力 and 高温下塑化变软的能力。无论是检测漆包线的热承受能力还是高温下塑化变软的能力,均需要热源。目前市面上主流漆包线热性能检测的主要仪器为智能软化击穿试验仪,加热装置为电阻炉,利用数字温度控制仪自动调节和显示实验温度。

近年来,为了适应变频电机的需求,一些工业发达国家开发了漆包线的新品种,比如日本研发了自润性漆包线、耐高温漆包线等。随着漆包线新品种

的出现,传统的软化击穿试验仪已不能满足高品质漆包线的检测要求。

温度与人类的生产生活有密切的关系,国内外诸多学者对温度控制进行了大量的研究,提出了各式的温度控制算法。文献[1]将比例积分微分(proportion integration differentiation, PID)应用于温室温度控制。文献[2]将 smith 预估控制应用于波峰焊温度控制中。文献[3]为解决火电厂锅炉主蒸汽温度控制,提出基于单变量分布估计优化算法整定的模糊 PID 控制算法。文献[4]将模糊 PID 控制算法应用于回转窑煅烧带温度的控制,在仿真实验中达到了回转窑温度控制的精度。文献[5]将二维模糊控制器应用于软化击穿试验仪温度控制系统中,达到了控制要求。文献[6]针对比例积分微分参数难整定的问题,提出一种 PID 参数在线整定的模糊免疫算法,并将其应用于无时滞过程、一阶惯性加时滞过程、二阶惯性加时滞过程、高阶系统过程中,在仿真实验中取得了较好的控制效果。文献[7]利用模糊算法良好的收敛性及运算优势、神经网络的自适应特性,提出模糊径向基神经网络(radial basis function, RBF)的 PID 控制算法,并应用于茶叶的杀青工艺中,静态误差控制在 $\pm 2^{\circ}\text{C}$,保证了茶叶的杀青质

① 国家自然科学基金(51677063)资助项目。

② 女,1970 年生,硕士,副教授;研究方向:智能控制,数字图像处理,高职教育研究等;E-mail: 306400605@qq.com

③ 通信作者,E-mail: 305444938@qq.com

(收稿日期:2019-04-23)

量。文献[8]设计了基于 S3C2440 的嵌入式控制系统和模糊 PID 控制算法,并应用于整体自阻电加热渐进成行温控系统,通过仿真和实验验证了算法的合理性。文献[9]在传统 PID 的比例项部分引入比例权重,利用模糊规则实时在线调节 PID 的比例系数和权重,在温度反馈过程中加入灰色预测模型,提前预判削弱反应釜温度的滞后性,提高了反应釜温度控制的响应速度和稳态精度。文献[10]将模糊 PID 控制算法应用于 AZ61 镁合金锻造温度控制系统中,使合金强度和磨损性得到提高,晶粒更为细化, AZ61 镁合金的抗拉强度和屈服强度提高了 10%,磨损体积和平均晶粒尺寸减少了 50%。文献[11]将参数自适应模糊 PID 算法应用于半导体激光器温度控制系统中,响应速度和控温精度均得到提高,其控温精度达到了 $\pm 0.002\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

模糊控制无需控制对象的精确数学模型,通过模糊语言或模糊规则来仿照人的经验进行控制,具有较强的鲁棒性和适应性^[12]。鉴于模糊 PID 算法在上述应用中取得的良好控温效果,将自适应模糊 PID 控温算法应用于新型智能软化击穿试验仪中,并通过 Matlab 仿真和实物实验验证了该算法在智能软化击穿试验仪中的科研实用性。

1 软化击穿试验仪温度控制系统结构

为测试漆包线的绝缘涂层在压力和高温下塑化变软的能力,设计了软化击穿试验仪温度控制系统,该系统主要由电阻炉加热单元、温度检测单元、电流检测单元、驱动单元以及核心控制单元构成。加热单元由电阻丝加热和风扇冷却组成,采用固态继电器控制;温度检测单元为 K 型铠装镍铬镍硅传感器和信号调理电路,采集电阻炉当前温度传给核心控制单元 STM32,模糊自适应 PID 算法根据当前温度与目标温度的偏差、偏差的变化趋势等计算出输出量,送给驱动单元执行,驱动单元为控制电阻丝或电风扇的固态继电器,实现对电阻炉的加热或冷却控制;电流检测单元由 LM339 和外围电路构成,主要是检测漆包线试样间通过的电流,当测试时间内试样间通过的电流值为 $5 \pm 0.5\text{ mA}$,则仪器报警,显示

试样击穿。系统硬件框图如图 1 所示。

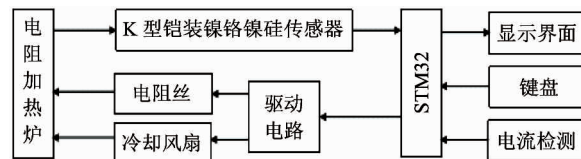


图 1 系统硬件框图

1.1 温度检测单元电路设计

温度检测单元电路由冷端补偿和放大电路构成,由于 P-N 结温度传感器具备线性度较好、原理简单等优点,故选用 P-N 结温度传感器对环境温度进行热电偶的冷端补偿。放大电路采用 2 级 LF356 串联放大。电路如图 2 所示。

1.2 电流检测单元电路设计

LM339 的电压失调小、共模范围大,设计成双限比较器,当电流范围在 $5 \pm 0.5\text{ mA}$ 时为正常状态,否则报警、卸荷、卸压。电路如图 3 所示。

1.3 驱动单元电路设计

由于 STM32 的 IO 口抗干扰能力不足,因此在 STM32 输出口串接光电隔离芯片 TLP521。STM32 输出的是 TTL 电平,其功率不足以直接控制电阻加热炉的通断电,选用 ULN2003A 芯片驱动固态继电器的控制端,固态继电器的输出端接电阻炉的电源控制端,只需控制固态继电器在一个控制周期内的通断时间,就能实现温度调节的目的。

2 自适应模糊 PID 算法

模糊控制不需要控制对象的精确数学模型^[13],能够较大范围地适应参数变化,适用于动态特性变化显著的非线性和滞后系统^[13,14]。

自适应模糊控制将人们长期积累的先验知识存入规则库,单片机根据实时输入、输出推理最佳参数,实施精确控制。将自适应模糊控制与传统 PID 结合后得到自适应模糊 PID 算法。2 维模糊控制器能满足绝大多数温度控制系统的精度要求和动态响应特性,本系统以偏差 e 和偏差变化 ec 为输入构成 2 维模糊控制器。其结构图如图 4 所示。

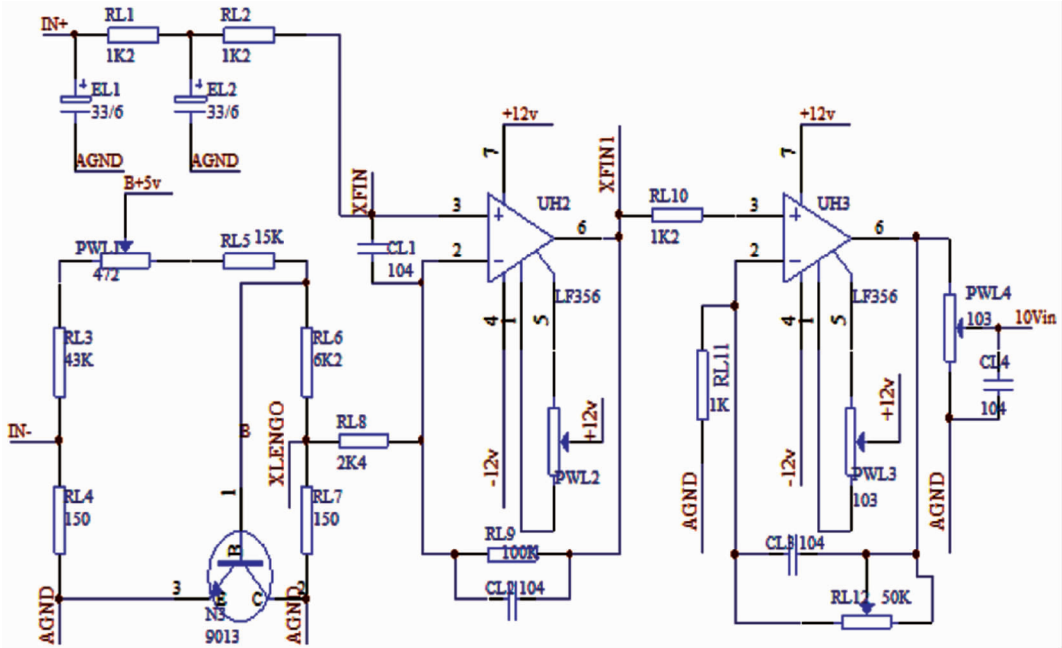


图 2 温度检测单元电路

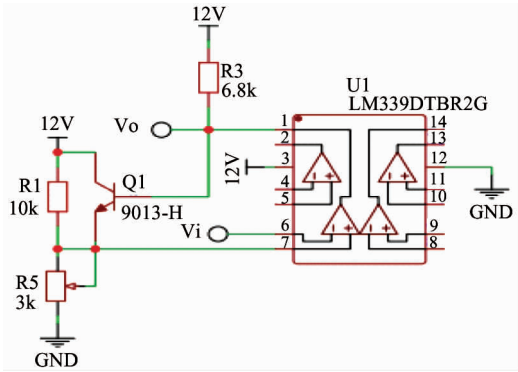


图 3 电流检测单元电路

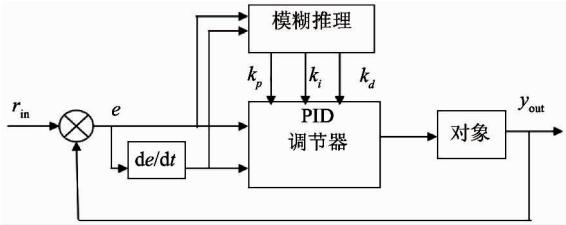


图 4 自适应模糊 PID 结构

参数自整定是根据 e 和 ec 的变化趋势,根据模糊规则在线修正 PID 的比例、积分、微分系数,使被控对象具有良好的动、静态特性。PID 参数计算公式为:

$$\begin{cases} k_p = k_p + \Delta k_p \\ k_i = k_i + \Delta k_i \\ k_d = k_d + \Delta k_d \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中, k_p 、 k_i 、 k_d 分别为 PID 控制算法中的比例系数、积分系数和微分系数。

根据 Matlab 多次实验结果,设定 $e \in [-5, 5]$, $ec \in [-5, 5]$, $k_p \in [0, 1]$, $k_i \in [0, 1]$, $k_d \in [0, 2]$ 。建立 k_p 、 k_i 、 k_d 的模糊控制规则如表 1 所示。

表 1 k_p 、 k_i 、 k_d 的模糊控制规则

e	ec						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS
NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB

e 、 ec 的量化论域设为 $[-5, -3, -1, 0, 1, 3, 5]$, 分别代表 NB(负大)、NM(负中)、NS(负小)、ZO(零)、PS(正小)、PM(正中)、PB(正大)。 e 、 ec 、 k_p 、

k_i 、 k_d 的隶属函数选用三角形隶属函数^[9]。据表 1 可得以下 49 条模糊控制规则：

1. If (e is PM) and (ec is PB) then (k_p is NB)
(k_i is PB) (k_d is PB)
2. If (e is PB) and (ec is NB) then (k_p is Z) (k_i
is Z) (k_d is PB)
3. If (e is PB) and (ec is NM) then (k_p is Z)
(k_i is Z) (k_d is PM)
4. If (e is PB) and (ec is NS) then (k_p is NM)
(k_i is PS) (k_d is PM)
-

3 仿真分析

被控对象的传递函数为：

$$Gp(s) = \frac{412300}{s^3 + 76.35s^2 + 10260s + 1} \tag{2}$$

k_p 、 k_i 、 k_d 的初始值设为 $k_p = 0.4$ 、 $k_i = 0$ 、 $k_d = 1$ ，采用上文分析算法在 Matlab 中进行阶跃响应测试，在 0.5 s 时加 1.2 的外部扰动,仿真结果如图 5 ~ 10 所示。

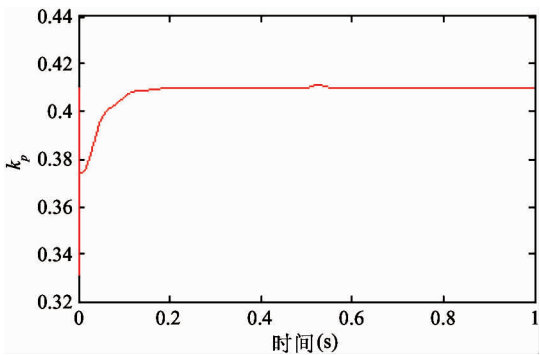


图 7 k_p 实时变化图

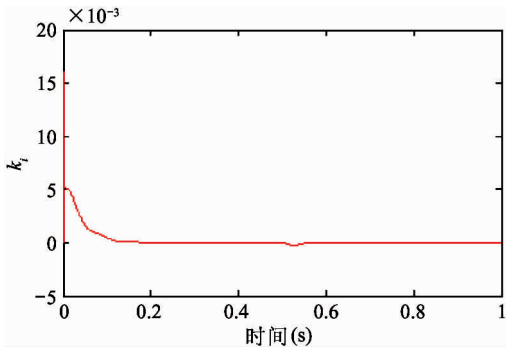


图 8 k_i 实时变化图

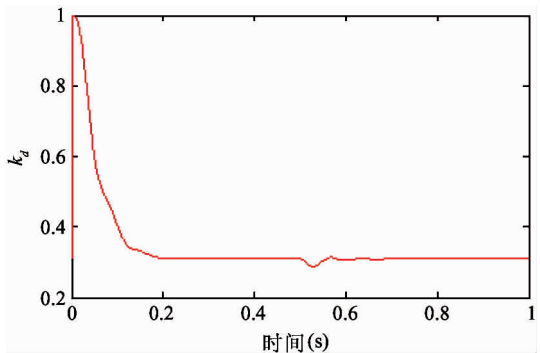


图 9 k_d 实时变化图

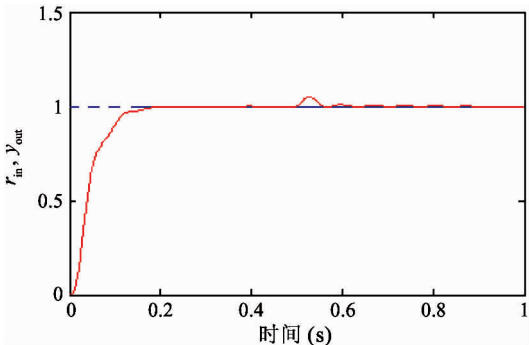


图 5 系统在 0.5 s 受到干扰的阶跃响应图

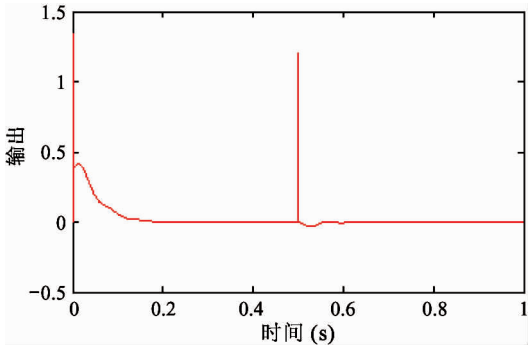


图 6 系统响应输出

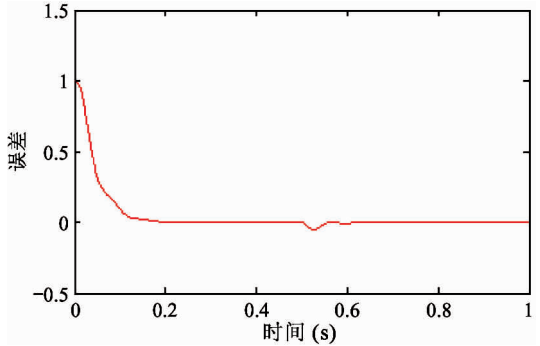


图 10 误差动态响应图

由图 5 ~ 10 可以发现,在 Matlab 中利用自适应模糊 PID 算法对 3 阶系统进行仿真时,当系统在 0.5 s 受到外界阶跃扰动时,系统的误差随之发生变化, k_p 、 k_i 、 k_d 在调节率的调节下自动修正,改变系统输出,直至系统到达新的平衡。仿真曲线显示了系统在自适应模糊 PID 控制算法的调节下具有极好的跟踪特性,系统的超调量很小,几乎没有;过渡时间短,静态误差小,具有更好的稳定性能和动态特性。

4 实验结果分析

为验证自适应模糊 PID 控制算法的有效性,本文对软化击穿试验仪温度控制系统进行了实物验证。实验系统照片如图 11 所示。在环境温度为 25 ℃,目标温度为 90 ℃时,每隔 1 s 采集 1 次温度数据,将数据在 Matlab 中绘制出来,如图 12 所示。

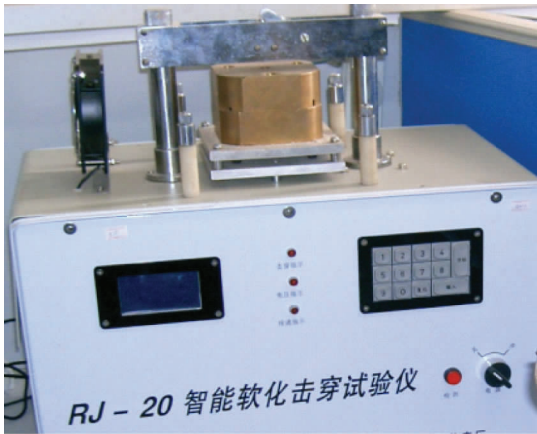


图 11 实验系统

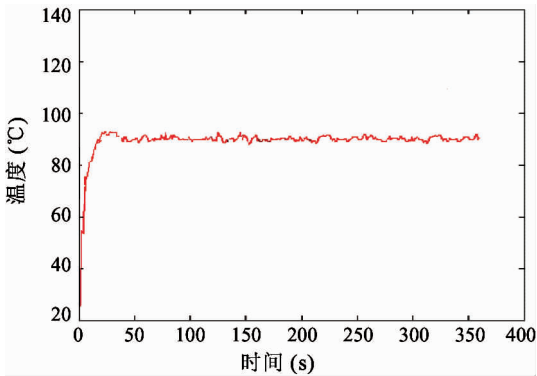


图 12 实验温度曲线图

从图 12 可知,在实物验证实验中,系统具有良好的响应速度和跟随性,其稳定时间小于 50 s,系统超调量小于 2 ℃,稳态误差小于 ±2 ℃,符合 GB4074.5、GB4074.11 以及 ide IEC60851-5 标准的要求。

5 结 论

为检测漆包线新品种热性能的需要,将自适应模糊 PID 算法应用于软化击穿试验仪的温度控制系统中,经 Matlab 仿真和实物验证实验表明,该控制方法具有良好的跟随性、适应性和控温精度,动态特性和静态特性亦较好,符合漆包线相关检测标准的要求。本文研究对于软化击穿试验仪温度控制系统有应用与推广价值。

参考文献

[1] 王冠龙,崔靛,朱学军. 基于数字 PID 算法的温度控制系统设计[J]. 传感器与微系统, 2019,38(1):86-88, 96

[2] 雷翔霄,徐立娟. Smith 预估控制在波峰焊温度控制系统的应用[J]. 高技术通讯, 2018,28(5):457-461

[3] 王天堃. 火电厂主蒸汽温度 UMDA 整定模糊 PID 控制算法[J]. 动力工程学报,2017,37(7):546-551,557

[4] 蔡红梅,张光利. 基于模糊 PID 控制算法的回转窑温度控制系统研究[J]. 现代电子技术, 2015, 38(23):167-170

[5] 雷翔霄,徐立娟. 基于二维模糊控制器的恒速升温控制系统的实现[J]. 中国农机化, 2012(6):152-154, 161

[6] 汤伟,王帅,王玲利. 基于遗传模糊免疫算法的比例-积分-微分参数整定优化[J]. 科学技术与工程,2018, 18(31):152-159

[7] 潘玉成,刘宝顺,黄先洲,等. 茶叶杀青机模糊 RBF 神经网络 PID 温控系统设计与试验[J]. 茶叶科学, 2019(2):139-149

[8] 张春,鲁世红,李正芳,等. 整体自阻电加热渐进成形温度控制系统[J]. 锻压技术, 2019,44(2):119-125

[9] 魏小宇,郑晟. 运用灰色预测与模糊加权 PID 的反应釜温度控制[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2019,33(2):82-86

[10] 李光平,唐月夏. 基于模糊 PID 温度控制的锻造 AZ61 镁合金性能研究[J]. 热加工工艺,2018,47(23):130-

132, 136

- [11] 韩团军, 韦平平, 黎高峰. 基于 FPGA 的高精度半导体激光器温度控制系统设计[J]. 激光杂志, 2018, 39(9): 47-50
- [12] Wang Y J, Dong X Y, Qu Z W. Research on fuzzy-PID temperature control system for double helix resistor[J]. *Applied Mechanics & Materials*, 2015, 738-739: 1022-1025
- [13] Keum O L, Soon B L. A comparison of methods for predicting the fatigue life of gray cast iron at elevated temperatures[J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2016, 39(4): 439-452
- [14] Jatain Rahul. Wi-Fi network technology technical view[J]. *International Journal of Computer Trends and Technology*, 2013, 4(5): 969-972

Applied adaptive fuzzy PID in the temperature control system of softening breakdown tester

Xu Lijuan^{*}, Lei Xiangxiao^{**}

(^{*} Electronic Information Engineering School, Changsha Social Work College, Changsha 410004)

(^{**} College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082)

Abstract

In order to detection the temperature performance of the enameled wire, a temperature control system based on STM32 is designed. STM32 is used as the system CPU. The system hardware circuit is composed of temperature detecting circuit, the signal conditioning circuit, the current detecting circuit, the drive circuit. The algorithm used the adaptive fuzzy proportion integration differentiation (PID) control algorithm. The simulation and experimental results shows that the system can quickly and accurately complete the temperature control of softening breakdown tester. The results has met the requirements of the national standard.

Key words: enameled wire, fuzzy proportion integration differentiation (PID) algorithm, adaptive, softening breakdown, temperature control