

熔盐电化学反应炉温度控制系统研究

彭卫东¹, 董政², 张德银¹

(1. 中国民航飞行学院航空工程学院 四川 广汉 618307; 2. 电子科技大学机械电子工程学院 成都 610054)

【摘要】设计了适合熔盐电化学反应炉阳极氧化工艺的电化学反应炉及其温度控制系统,研究了模糊参数自整定PID控制器在电化学反应炉温度控制系统中的应用。对常规PID控制器和模糊参数自整定PID控制器进行了仿真对比,结果表明基于模糊参数在线自整定的PID控制器系统超调量明显减小,控制系统的动静态性能均得到改善。现场实验结果也证明了该设计方案是合理有效的。

关键词 熔盐电化学反应炉; 温度控制; 参数自整定; 模糊PID控制器

中图分类号 TP273.4 文献标识码 A

Research of Temperature Control System for Melting-Salt Electrochemistry Furnace

PENG Wei-dong¹, DONG Zheng², ZHANG De-yin¹

(1. Aviation Engineering Institute, Civil Aviation Flight University of China Sichuan Guanghan 618307;

2. School of Electromechanical Engineering, UEST of China Chengdu 610054)

Abstract The design of an electrochemistry furnace for melting-salt electrochemistry tantalum anodic oxidation process and its temperature control system is introduced in this paper. The application of the parameter self-tuning fuzzy proportional-integral-derivative (PID) controller in this temperature control system is studied. In comparison with the conventional PID temperature control system, the simulation results indicate that the electrochemistry furnace with the parameter self-tuning PID controller has high control precision, good dynamic and static performances. The spot experiment result shows that the design has good practicability and validity.

Key words melting-salt electrochemistry furnace; temperature control; parameter self-tuning; fuzzy PID controller

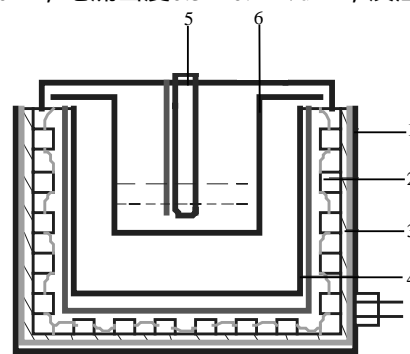
熔盐电化学反应炉温度系统是一个具有大惯性、纯滞后、多变量、时变参数的复杂被控系统。熔盐电化学反应炉阳极氧化工艺对熔盐电加热炉结构、加热温度范围和升温曲线有特定要求^[1]。文献[2-3]介绍了熔盐电加热炉和温控系统的设计,但常规比例-积分-微分控制器(Proportional-Integral-Derivative, PID)不能在线调整参数,简单模糊控制器不具有积分环节,在模糊控制的系统中很难完全消除稳态误差,且在平衡点附近容易出现振荡现象^[4]。近年来,已有学者提出并采用了过程控制中应用广泛、稳定性好、可靠性高的模糊参数自整定PID控制器^[5],获得了良好的加热和温度控制效果。本文结合钽阳极氧化工艺特点,设计了带模糊参数自整定PID控制器的熔盐电化学反应炉,提高了系统温度控制精度,改善了动静态性能,使之更适用于钽阳极氧化工艺的实现。

收稿日期: 2005-04-24

作者简介: 彭卫东(1968-),男,硕士,讲师,主要从事计算机测控、数字信号处理方面的研究。

1 熔盐电加热炉的构成

熔盐电化学反应钽阳极氧化最佳工艺条件是^[1]: 反应温度 $480 \sim 500$, 电流密度 $0.3 \sim 0.4 \text{ A/dm}^2$, 反应时间4 h左右。熔盐电化学反应炉为钽阳极氧化提供反应条件, 主要由炉体和熔盐反应平台两部分组成, 如图1所示。炉体由电加热炉盘和壳体组成, 分为供热层、隔热层、传热层和加热室。其主要工作过程是: 电热丝通电加热, 对加热室空气进行加热, 以强制对流方式传热, 对坩埚加热, 进行钽阳极氧化熔盐电化学反应。通过铂电偶探测熔盐的温度, 使坩埚内温度达到平衡, 温度控制系统控制温度恒定在设定值。为了充分利用热量, 且防止熔盐滴落到电阻丝上造成短路, 以耐火砖密布作“隔墙”, 贴在加热炉盘表面形成辐射传热面, 接受电加热丝所产生的热能, 在加热室内进行热传导。熔盐反应平台包括镍坩埚、铂电偶和升降机构。



1. 不锈钢壳 2. 供热层 3. 隔热层
4. 传热层 5. 铂电偶 6. 镍坩埚

图1 熔盐电化学反应炉结构图

熔盐温度要求高达 $350 \sim 550$,在对动态工艺进行准确计算的基础上, 对加热炉进行温度设定与调节是极为重要的。熔盐温度控制系统是整个电加热炉的关键, 直接关系到钽阳极氧化工艺的成败, 因此是熔盐电加热炉须严格控制的重要指标^[6]。

2 温度控制系统

电加热炉是一个特性参数随炉温变化而变化的被控对象, 常规PID控制方法难以满足工艺随温度在大范围变化时的控制要求^[5]。当温度大范围变化时, 需要温控系统中的PID参数随熔盐温度变化而改变, 对此本文设计了一种参数自整定模糊PID控制器。其具体实现过程就是用数字单片机为硬件基础, 以软件实现模糊控制实现变积分系数模糊PID控制, 用各种算法实现其推理过程。

2.1 控制系统的硬件设计

系统硬件主要包括: 温度测量电路、传感器输入信号调理/放大/采样电路、按键扫描控制电路、程序存储器、A/D转换电路、可控硅控制电路及温度显示电路。熔盐电加热炉温度控制系统以80C196单片机为核心, 根据程序存储器内固化的监控程序, 按时间-温度工艺曲线控制加热炉的温度, 输出标准电信号。熔盐的实际温度由铂电阻温度传感器检测并转换成电压信号, 通过桥路变送出去, 经前置放大器放大到 $0 \sim 5 \text{ V}$, 控制可控硅执行器对加热器加温过程进行闭环温度调节控制, 再经有源低通滤波器滤波后, 由A/D转换器转换成数字量, 经数字滤波、标度变换后, 一方面将熔盐反应温度显示出来, 另一方面与被控值(由按键输入设定的温度值)进行比较, 根据其偏差值的大小, 采用PID智能控制, 通过温度控制器控制电热炉加热。如果实际测得的温度值超过了系统要求的温度范围, 单片机就会向加热装置发出指令, 进行温度调节, 使其逐渐趋于给定值且达到平衡。温度控制系统工作原理如图2所示:

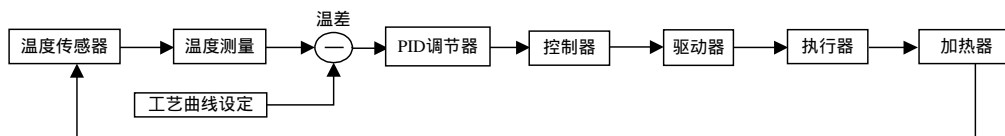


图2 温度控制器原理图

2.2 参数自适应模糊PID控制器的设计

温度控制系统中, 采用了非线性的隶属度函数, 以模糊控制为粗调、PID为细调。在模糊控制的基础上, 由PID控制系统向零点移动, 实现无差控制。模糊控制结构参数自整定PID控制器的系统结构主要由参数可调PID和模糊控制系统两部分组成, 模糊参数自整定PID控制系统结构如图3所示^[7]。其中 $r(t)$ 为设定值, $y(t)$ 为炉温的跟踪测量值, $e(t)$ 是测量值 $y(t)$ 与设定值 $r(t)$ 的偏差, e_0 为偏差的阈值。模糊推理系统以误差 $e(t)$ 和误差变化率 $de(t)/dt$ 作为输入, 采用模糊推理方法对PID参数 K_p , K_i , K_d 进行在线整定, 以满足不同的误差 $e(t)$

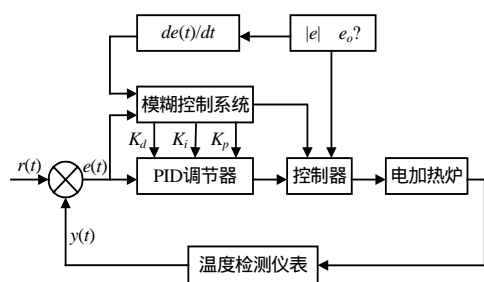


图3 模糊参数自整定PID控制系统结构图

$$K_i = K_p(T/T_i) \quad K_d = K_p(T_d/T) \quad (2)$$

采用文献[7]中的PID参数整定原则,根据系统在受控过程中对应不同的 $|e|$ 和 $|de(t)/dt|$ 大小,对PID参数进行自整定,系统实现模糊控制。将PID参数的整定原则归纳如下:1)当 $|e|$ 较大时,取较大的 K_p 与较小的 K_d ,使系统具有较好的跟踪性能,同时为避免出现较大的超调,应对积分作用加以限制,通常取 $K_i=0$;2)当 $|e|$ 处于中等大小时,为使系统响应超调较小, K_p 应取小些。该情况下, K_d 的取值对系统响应影响较大, K_i 的取值要适当;3)当 $|e|$ 较小时,为使系统具有较好的稳定性, K_p 与 K_i 均应取大些,同时为避免系统在设定值附近出现振荡, K_d 值的选择根据 $|de(t)/dt|$ 值较大时, K_d 取较小值,通常 K_d 为中等大小。

2.3 温度控制系统的软件设计

系统首先进行参数初始化,然后进行自诊断。通过按键设定所需要的温度值,启动温度测量模块,温度测量模块将测得的温度值通过显示模块显示出来,并与设定的温度值进行比较,当测量温度等于设定温度,程序返回自诊断模块;当测量温度不等于设定温度时,启动智能PID自整定控制。当温度偏差大于阈值时采用模糊控制,当偏差小于阈值时启动PID控制。控制后重新启动测量模块进行测量,如此循环直到测量值与设定值相等。系统软件框架、控制器程序切换框图如图4所示。由于温度具有非线性和不确定性,仅采用常规PID调节不能满足控制要求,因此,软件模块也相应地设计成带PID参数智能化自整定功能。

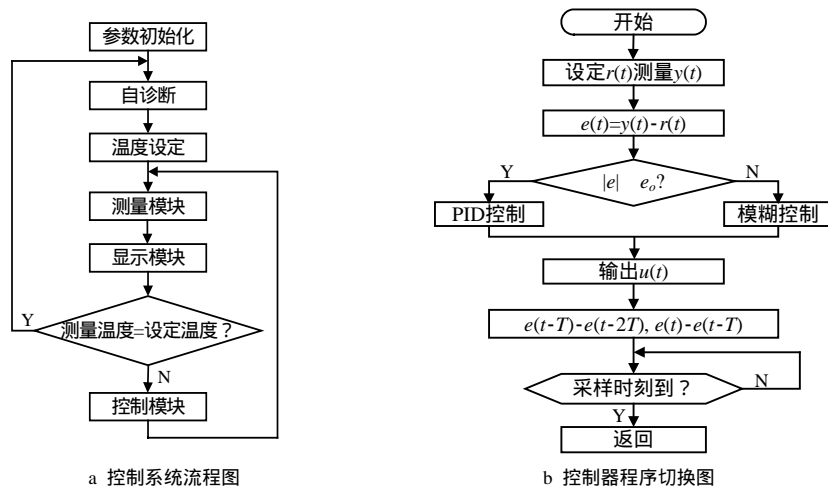


图4 软件设计系统框图

3 系统模型与仿真

熔盐电加热炉是一种具有大惯性、大时滞和非线性的被控系统,熔盐温度模型可采用“一阶惯性加滞后”环节近似描述。系统的传递函数模型为:

$$G(s) = Ke^{-\tau s} / (T_p s + 1) \quad (3)$$

式中 τ 为等效纯滞后时间常数; T_p 为等效时间常数, K 为静态增益。PID控制器的传递函数可由式(1)、(2)得出:

$$G(s) = K_p [1 + (1/T_i)s + T_d s] \quad (4)$$

本文在仿真时,取 $K=2.8$, $T_p=1546.5$ s, $\tau=108$ s,由Ziegler-Nichols整定公式确定 K_p 、 K_i 、 K_d 的初始值分别为 $K_{p0}=1.907$, $K_{i0}=0.022$, $K_{d0}=38.142$ 9,阶跃值设为500以模拟熔盐控制温度500。在Matlab6.5中SIMULINK环境下画出模糊参数自整定PID控制系统仿真框图^[8],采用常规PID控制器和模糊参数自整定PID控制器得到仿真对比结果图,如图5所示。图中曲线1和曲线2分别为常规PID和模糊参数自整定PID控制器的阶跃输入仿真计算结果。仿真结果表明,该模糊参数自整定PID控制器比常规PID控制器的系统超调量明显减小,控制系统的动静态性能均得到改善。

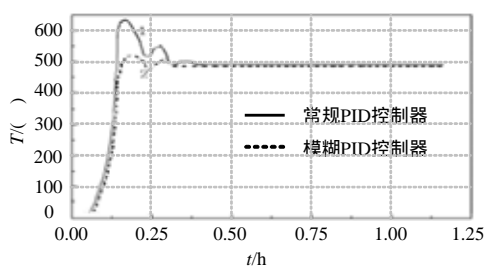


图5 温度控制系统仿真对比图

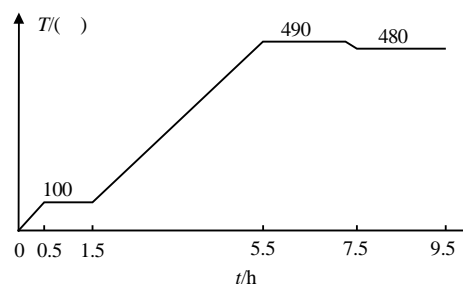


图6 熔盐电化学反应炉升温曲线图

4 温控实验结果

采用自行开发的熔盐电化学反应炉和温控系统进行钽阳极氧化制备钽氧化物的试验,实现了对升温曲线的精确控制。图6所示为电化学反应炉温度升降控制记录曲线,给定温度在100 °C恒温1h后,以100 °C/h的升温速率升温,升至490 °C处恒温2h后,再以100 °C/h的速率降温至480 °C后恒温2h。恒温控制过程中,温度的基本偏差在 ± 0.2 °C,升降温过程中温度偏差为 ± 1 °C。

5 结论

本文设计了适合熔盐电化钽阳极氧化工艺的熔盐电加热炉,采用80C196单片机实现了参数自整定模糊PID控制器对自动恒温控制系统的实时控制。在温度控制系统中,采用了非线性的隶属度函数,以模糊控制为粗调、PID为细调。在模糊控制的基础上,由PID控制系统向零点移动,实现无差控制。实验仿真结果表明,系统的动静态性能均得到改善。经过现场反复实验,熔盐电加热炉运行情况良好,超调量小于0.5%,稳态精度小于0.2%,取得了较好的控制品质,目标温度控制精度超过设计指标,能满足系统的应用要求。

参 考 文 献

- [1] 黄云辉, 袁 洁, 张振洲. 钽的熔盐阳极化工艺研究[J]. 表面技术, 1995, 24(1): 19-21
- [2] 常富明, 姚海峰, 朱宇立. 熔盐加热炉控制系统[J]. 自动化与仪器仪表, 2001, (1): 31-32
- [3] Radakovic Z R, Milosevic V M, Radakovic S B. Application of temperature fuzzy controller in an indirect resistance furnace[J]. Applied Energy, 2002, 73(2): 167-182
- [4] 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): 591-597
- [5] Ramírez M, Haber R, Peña V, et al. Fuzzy control of a multiple hearth furnace[J]. Computers in Industry, 2004, 54(1): 105-113
- [6] Aguilar R, Poznyak A, Guerra R M, et al. Temperature control in catalytic cracking reactors via a robust PID controller[J]. Journal of Process Control, 2002, 12(6): 695-705
- [7] 屠乃威, 付 华, 阎 馨. 参数自适应模糊PID控制器在温度控制系统中的应用[J]. 测控自动化, 2004, 20(6): 20-21
- [8] 黄晓宇. 基于MATLAB的模糊自整定PID参数控制器计算机仿真[J]. 自动化与仪器仪表, 2001, (3): 21-24

编 辑 孙晓丹