

· 自动化技术 ·

## 在模式识别下的萃取液温度控制方法研究

金燕华, 秦开宇, 白泰礼

(电子科技大学空天科学技术研究院 成都 610054)

**【摘要】**离子污染测试仪是用于对清洗后PCB板残存的离子污染物含量进行测试的仪器。由于萃取液温度直接影响离子污染物的溶解程度,因而需通过精确控制萃取液温度的方式来保证更高级别的污染物被检测到。在工程应用中,采用常规PID控制方法难以达到要求的控制精度。该文提出了一种基于模式识别的萃取液温度智能控制方法,通过对系统动态特征的模式分类,结合专家经验在线自动调整控制规律,使系统保持预定的温度。仿真研究表明,该方法与传统PID控制方法相比,具有更好的控制效果和更强的鲁棒性。实际应用时超调量小于0.5℃,控制精度可达±0.2℃,满足系统设计要求。

**关键词** 智能控制; 离子污染测试; 模式识别; 温度控制

中图分类号 273.2

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2009.03.014

## Solution Temperature Control Method Based on Pattern Recognition

JIN Yan-hua, QIN Kai-yu, and BAI Tai-li

(Institute of Astronautics and Aeronautics, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054)

**Abstract** Ionic contamination (IC) tester is used to test the IC content retained on the cleaned printed circuit board (PCB) surface. Because the solution temperature has direct effect on the level of IC, a high rate of IC test should be ensured by precise control of solution temperature. In practice, however, it is very difficult to control temperature precisely via the traditional PID control methods. An intelligent PID control method for the solution temperature based on pattern recognition is proposed in this paper. With the identified pattern parameters and expert experience, the PID control rules can be adaptively adjusted on line, and the temperature can be kept on its predetermined values. The simulation results show the proposed method has more excellent performance and robustness than conventional PID controllers. The practical control precision can be achieved to  $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$  and the overshoot can be less than  $0.5^{\circ}\text{C}$  in the application of ionic contamination testor, which can meet the engineering requirement.

**Key words** intelligent control; ionic contamination testing; pattern recognition; temperature control

电子线路板在其组装生产过程中引入的微粒污垢、离子性导电污垢和有腐蚀作用的污垢等,对电子产品的使用寿命、稳定性和可靠性产生重要影响,甚至可能因腐蚀导致短路<sup>[1-2]</sup>。离子污染测试仪通过对PCB板清洗后残存的离子污染物进行测试,进而达到对清洗工艺进行控制和监测的目的。

因松香的残余不能在室温下完全溶解,通常采用加热萃取溶液的方法来提高离子污染测试的精度。文献[3]从降低离子污染的角度研究了温度对IC值的影响,当水洗温度从25℃到35℃最后升高到45℃,可以明显且较快地将PCB表面离子污染降低到一个较低的水平。其根本原因是温度的升高使更多的离子污染物被溶解,同样的道理,为保证更高级别的污染物被检测到,离子污染测试仪中设计

了萃取液温度控制系统,且全部实现自动控制。

萃取液水洗过程的温度控制本身是一个大惯性、大滞后、非线性过程,采用常规PID控制方法易引起大超调和较长的控制时间,难以达到要求的控制精度。将智能控制与传统PID控制相结合以提高系统性能是近年来十分热门的研究课题。目前较为常见方案包括:基于BP神经网络整定的PID控制方案<sup>[4-5]</sup>,基于模糊推理的参数自整定PID控制方案<sup>[6-7]</sup>,基于模式识别的智能控制方案<sup>[8-9]</sup>等。在离子污染测试仪萃取液温度控制算法设计中,考虑到计算的复杂性、对硬件运算速度的要求以及仪器成本的控制,本文将模式识别方法和常规PID控制相结合,根据系统动态过程不同状态的特征信息提取,结合专家经验来改善PID控制性能,与传统PID控制方法相比,具有

收稿日期: 2008-08-01; 修回日期: 2008-12-24

基金项目: 国家自然科学基金(60672029)

作者简介: 金燕华(1973-),女,博士生,讲师,主要从事智能控制及测试仪器方面的研究。

更好的控制效果和更强的鲁棒性。在离子污染测试仪项目的实际应用中证明了该方案的有效性, 该方案计算量不大, 在尽量少增加仪器原有硬件成本的基础上使仪器性能更优。

### 1 离子污染测试仪结构

离子污染测试仪采用非破坏式的动态检测方法, 通过把 PCB 置入超纯净萃取溶液中清洗, 移去工艺过程中留下的残余污染物, 使印制板表面污染离子化, 测量清洗液的电阻值和电导率, 并与标准条件下 NaCl 的电阻率(或电导率)进行比较, 以给出 NaCl 质量/区域数值作为对清洁结果的评判依据。测试过程中采用加热和搅拌方式加快离子溶解, 要求整个测试过程全部实现自动控制。

离子污染测试仪结构如图 1 所示。温度控制部分采用基于模式识别的智能 PID 控制算法, 在控制单元内实现计算, 改变输出 PWM 脉冲的占空比, 进而合理控制加热单元的输出, 使萃取溶液的温度保持恒定。该方法只需在仪器原有硬件基础上增加温度传感器和加热单元。

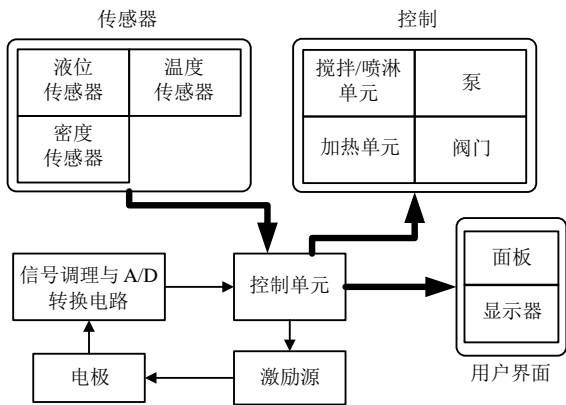


图 1 离子污染测试仪组成

工艺要求: 为保障萃取充分, 萃取液需加热到最佳温度 45 °C 因温度过高可能对 PCB 内部造成伤害, 整个控制过程需严格控制超调。目前通用的离子污染测试仪中大多未考虑对温度的有效控制(采用简单的开关式控制方法), 导致温度严重超调, 给使用者带来不便。另一方面考虑到仪器的成本, 需尽量在少增加已有硬件成本的基础上, 在已有软件资源的前提下进行功能扩展, 达到理想的控制效果。

### 2 基于模式识别的智能控制器设计

#### 2.1 特征模式类的划分

对系统动态特征的模式识别, 主要是对动态特征模式的分类。一个控制系统不论是设定值发生变

化还是受到干扰作用, 或是对象本身特性发生变化, 系统的动态特性都会反映到系统误差  $e$  及其一阶导数  $\dot{e}$  上, 被控系统动态输出的轨迹在相平面  $e-\dot{e}$  上所处的不同区域, 就对应了系统的不同动态行为。因此, 将相平面  $e-\dot{e}$  划分为不同的特征模式类, 通过不同的特征模式来形象、直观地反映系统的动态特征。图 2 的相平面  $e-\dot{e}$  划分为 4 个特征模式类<sup>[10]</sup>, 它们的具体定义及含义如下:

$\omega_1 = \{\omega \mid |e| > e_{max}\}$ , 阶跃响应的起始阶段, 系统偏差很大;

$\omega_2 = \{\omega \mid |e| < e_0, |\dot{e}| < \dot{e}_0\}$ , 阶跃响应趋于稳态, 此时  $e$  和  $\dot{e}$  都趋于 0;

$\omega_3 = \{\omega \mid e \cdot \dot{e} \geq 0, \omega \notin \omega_1, \omega \notin \omega_2\}$ , 系统向误差增大的方向运动;

$\omega_4 = \{\omega \mid e \cdot \dot{e} < 0, \omega \notin \omega_1, \omega \notin \omega_2\}$ , 系统向误差减小的方向运动。

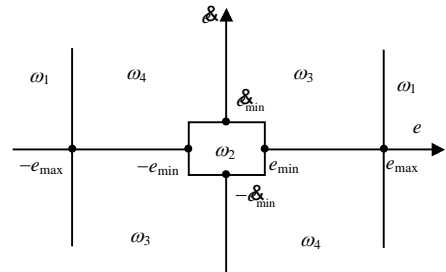


图 2 4 个特征模式

为了更全面细致地描述系统的动态特征, 获得更好的控制效果, 可引入误差的二次导数  $\ddot{e}$ , 并对每个特征模式类可划分若干个子模式。原则上说划分的子模式较多, 对系统特性的描述也越细致, 但所需的计算量和推理规则会越来越复杂, 不利于在线修正。考虑到离子污染测试仪萃取液的温度控制是一个加热过程(常温至 45 °C)在对算法的复杂度和控制效果综合分析后, 最终选择了 12 个模式构成模式集  $M = \{M_1, M_2, \dots, M_{12}\}$ 。其中每个模式分别为:

- $M_1 = \{|e| \geq e_{max}\}$
- $M_2 = \{|e| < \varepsilon, |\dot{e}| < \varepsilon\}$
- $M_3 = \{e = 0\}$
- $M_4 = \{e \cdot \dot{e} < 0, \dot{e} \geq -c, \dot{e} < 0, \ddot{e} < 0\}$
- $M_5 = \{e \cdot \dot{e} < 0, \dot{e} \geq -c, \dot{e} < 0, \ddot{e} \geq 0\}$
- $M_6 = \{e \cdot \dot{e} < 0, \dot{e} \geq -c, \dot{e} > 0, \ddot{e} > 0\}$
- $M_7 = \{e \cdot \dot{e} < 0, \dot{e} \geq -c, \dot{e} > 0, \ddot{e} \leq 0\}$
- $M_8 = \{e \cdot \dot{e} < 0, \dot{e}/e < -c\}$
- $M_9 = \{e \cdot \dot{e} \geq 0, \dot{e} < 0, \ddot{e} < 0\}$
- $M_{10} = \{e \cdot \dot{e} \geq 0, \dot{e} > 0, \ddot{e} > 0\}$
- $M_{11} = \{e \cdot \dot{e} > 0, \dot{e} \cdot \ddot{e} < 0\}$

$$M_{12} = \left\{ P(M) - \sum_{i=1}^{11} M_i \right\}$$

式中  $\varepsilon$  为一小正数;  $c$  为控制器的一个控制参数。

### 2.2 控制器结构

基于模式识别的自整定 PID 控制器结构框图由 3 部分组成, 如图 3 所示。

特征信息的获取和处理: 根据输入采样数据计算出当前时刻的  $e$ 、 $\dot{e}$  和  $\ddot{e}$ , 并对必要的符号量  $\text{sgn}[e]$ 、 $\text{sgn}[\dot{e}]$ 、 $\text{sgn}[\ddot{e}]$  及  $\text{sgn}[e \cdot \dot{e}]$  等加以判断, 求出模式识别所必需的特征变量  $\dot{e}/e$ 。

模式识别: 根据获得的当前时刻特征变量得到相应的特征模式类, 为控制决策提供前提条件。

控制规则集: 实现从特征模式集到控制规则集的映射, 通过推理得到控制器参数的整定值。

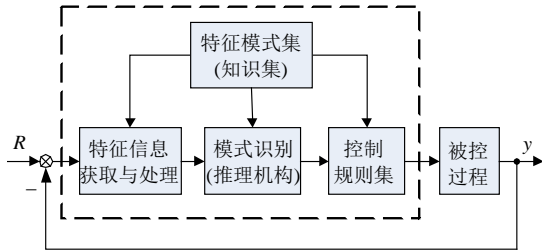


图3 基于模式识别的智能控制器结构图

### 2.3 控制算法及推理规则集设计

图 4 给出了一个典型的设定值跟踪过程, 同时给出了偏差  $e$  和偏差变化率  $\dot{e}$  的变化曲线。从图中可以看出, AB 段的超调是由于 OA 段控制作用较大, 且过程存在惯性造成的。因此可根据被控过程动态特性的特点进行控制算法的设计, 采用开环、闭环相结合, 负反馈、正反馈相结合, P、PI、PID 相结合等多种控制规律, 下面对其设计原则进行说明。

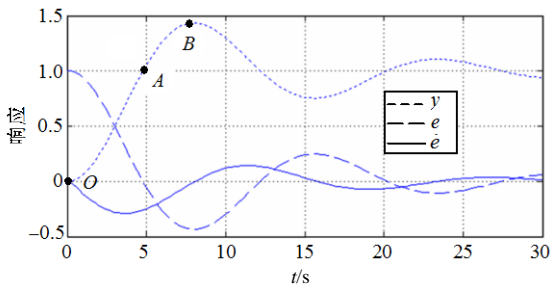


图4 典型设定值跟踪过程

(1) 输出响应的开始阶段,  $e$  值很大, 为加快系统的响应速度, 采用比例控制且取较大的  $K_p$ , 甚至可直接使控制器输出为最大或最小。

(2) 在响应曲线的中间阶段, 可采用 PID 控制算法将被控对象输出的误差状态点引入到特征稳定子空间。此时, 为使系统响应的超调量减小和保证

一定的响应速度,  $K_p$  值应适当减小,  $K_i$  取较小值。

(3) 输出响应接近设定值阶段, 此时误差状态点进入特征稳定子空间, 系统在惯性作用下自动趋向平衡, 此时可采用开环控制模式, 保持控制器输出不变, 目的在于释放系统的惯性能量, 以防止超调。

(4) 若系统输出已超过设定值, 此时误差状态点即将快速离开特征稳定子空间, 偏差反向, 控制作用应力图抑制超调, 可采取正反馈控制对系统进行“紧急刹车”。

根据上面的分析, 设计控制算法集为:

$$U_1 = \{u(k) = K_{p1}e(k)\}$$

$$U_2 = \{u(k) = u(k-1)\}$$

$$U_3 = \{u(k) = u(k-1) + K_p[e(k) - e(k-1)] + K_i e(k)\}$$

$$U_4 = \{u(k) = u(k-1) + K_p[e(k) - e(k-1)] - K_i e(k)\}$$

$$U_5 = \left\{ \begin{aligned} &u(k) = u(k-1) + K_p[e(k) - e(k-1)] + K_i e(k) \\ &+ K_D[e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \end{aligned} \right\}$$

根据 12 种预定模式和上述设计原则, 归纳出相应的推理规则集, 如表 1 所示。推理形式以模式集  $M$  为条件, 控制算法  $U$  为结论, 表示为:

$R_i$ : if  $M_i$   $i=1,2,L,12$  then  $U_j$   $j=1,2,L,5$

表 1 推理规则表

$R$	$M$	$U$
$R_1$	$M_1$	$U_1$
$R_2$	$M_2$	$U_4$
$R_3$	$M_3$	$U_3$
$R_4$	$M_4$	$U_3$
$R_5$	$M_5$	$U_2$
$R_6$	$M_6$	$U_3$
$R_7$	$M_7$	$U_2$
$R_8$	$M_8$	$U_4$
$R_9$	$M_9$	$U_3$
$R_{10}$	$M_{10}$	$U_3$
$R_{11}$	$M_{11}$	$U_5$
$R_{12}$	$M_{12}$	$U_5$

基于该推理规则的算法流程如图 5 所示。

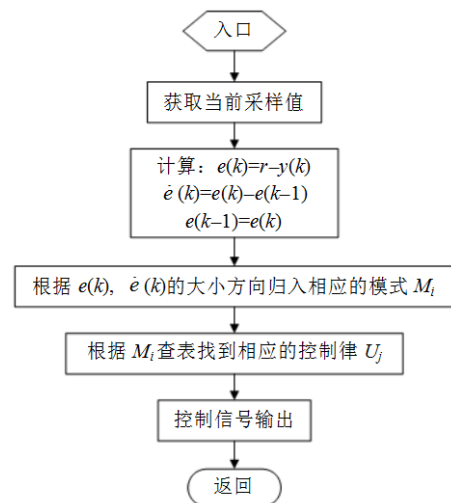
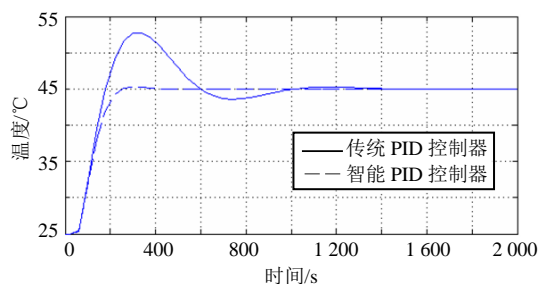


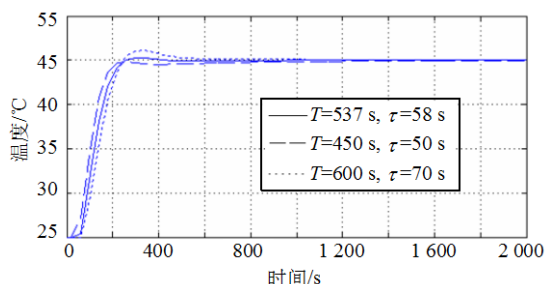
图5 在线校正智能控制算法流程

### 3 仿真实验及应用结果

萃取液温度模型可采用“一阶惯性加滞后”环节近似描述。故仿真对象取  $G(s) = \frac{K}{Ts+1}e^{-\tau s}$ ,  $K=3.8$ ,  $T=537$  s,  $\tau=58$  s, 设定值为 20 °C 模拟萃取液温度从初始 25 °C 升至 45 °C 仿真结果如图 6a 所示。实际应用中, 不同仪器萃取液注入体积存在一定的差异, 导致模型的参数(主要是时间常数)发生变化。为保证该算法的通用性, 仿真研究了过程参数发生变化时, 本方案的控制效果。分别取  $T=450$  s、 $\tau=50$  s 和  $T=600$  s、 $\tau=70$  s, 仿真结果如图 6b 所示。



a. 本文方法与传统 PID 方法控制效果对比图



b. 参数变化时本文方法控制效果对比图

图 6 萃取液温度控制仿真对比图

仿真结果表明: (1) 采用本文提出的自整定方案, 超调量明显减小, 系统响应速度加快, 系统性能得到较大的改善。(2) 过程参数发生变化时, 本方案仍具有较好的自适应能力和鲁棒性。

在自行开发的某信号离子污染测试仪中, 采用文中提出的智能控制方案进行试验, 萃取液总体积约为 20 L, 在室温下(约 20 °C)系统的动态响应时间约 10 min, 超调小于 0.5 °C 萃取液温度可稳定在 45 °C 控制精度超出指标规定, 完全满足系统设计的要求。

### 4 结 论

论文针对离子污染测试仪萃取液温度控制, 设

计了基于模式识别的智能 PID 控制器, 根据系统所处的特征模式类对控制规律进行在线调整。与常规 PID 控制相比, 控制效果明显改善, 受控过程的适应能力更强, 鲁棒性好, 且结构简单、计算量小、易于工程实现。

### 参 考 文 献

- [1] RASIAH I J, SZE H P. Ionic contamination in the component materials of IC packages[C]// International Symposium on Electronic Materials and Packaging (EMAP2000). Hong Kong: [s. n.], 2000: 383-387.
- [2] 黄汉松. 关于离子污染测试的发展和讨论[J]. 洗净技术, 2004, 2(1): 67-73.  
HUANG Han-song. Development and discussion about the ionic contamination test[J]. Cleaning Technology, 2004, 2(1): 67-73.
- [3] 刘信安, 陈双扣, 高焕方, 等. 降低电路板表面离子污染值的工艺研究[J]. 表面技术, 2003, 32(6): 38-39.  
LIU Xin-an, CHEN Shuang-kou, GAO Huan-fang, et al. Improving technique for reducing ionic contamination on PCBs' surface[J]. Surface Technology, 2003, 32(6): 38-39.
- [4] YU Zhun, XIE Ying-bai, JING You-yin, et al. Applying neural networks to PID controllers for time-delay systems[C]// Proc of the Fifth International Conference on Machine Learning and Cybernetics. Piscataway, NJ, USA: IEEE Computer Society, 2006: 3173-3176.
- [5] GUO Cheng-yi, SONG Qing, CAI Wen-jian. A neural network assisted cascade control system for air handling unit[J]. Industrial Electronics, 2007, 54(1): 620-628.
- [6] WANG Juan-juan, FU Chuang, ZHANG Yao. SVC control system based on instantaneous reactive power theory and fuzzy PID[J]. Industrial Electronics, 2007, 55(4): 1658-1665.
- [7] TAO C W, TAUR J S. Robust fuzzy control for a plant with fuzzy linear model[J]. Fuzzy Systems, 2005, 13(1): 30-41.
- [8] ZHOU Xiao-jie, CHAI Tian-you. Pattern-based hybrid intelligent control for rotary kiln process[C]// Proc of the IEEE International Conference on control Applications. New York, NY, USA: IEEE Press, 2007: 30-35.
- [9] CHU J U, MOON I, MUN M S. A real-time EMG pattern recognition system based on linear-nonlinear feature projection for a multifunction myoelectric hand[J]. Biomedical Engineering, 2006, 53(11): 2232-2239.
- [10] 李士勇. 模糊控制·神经控制和智能控制论[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1998.  
LI Shi-yong. Fuzzy control · neurocontrol and intelligent cybernetics[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 1998.

编辑 张俊