

Smith 预估控制在波峰焊温度控制系统的应用^①

雷翔霄^{②*} 徐立娟^{③**}

(* 湖南大学电气与信息工程学院 长沙市 410082)

(** 长沙民政职业技术学院电子信息工程学院 长沙市 410004)

摘 要 针对波峰焊机温度控制系统的滞后、惯性等属性,以及波峰焊机不允许有较大的超调量,使传统控制算法的控制效果不理想这个问题,在建立波峰焊机数学模型的同时,采用 Smith 预估器的积分分离控制算法,较好地解决了滞后效应带来的积分累计问题。实验结果表明,该控制算法可使波峰焊机温度控制系统的超调量小,稳态精度高,具有良好的控制效果。

关键词 波峰焊, Smith 预估, 数学模型, 温度控制

0 引 言

随着自动化程度的提高,越来越多的无人工厂出现,传统的手工焊接 PCB 板已逐渐被机器焊接所取代。热风回流焊、波峰焊成为机器焊接 PCB 板的主流产品,电子产品的焊接质量取决于焊点的质量,焊点的质量直接与回流焊机、波峰焊机的焊接温度曲线有关。大量的理论和实践表明,合适的焊接温度直接影响到 PCB 板的焊接色质、焊点光亮和有无虚焊点等焊接质量。但由于波峰焊机内部系统的复杂性,温度控制系统的滞后特性,各种环境因素之间的相互影响,如送料速度、PCB 板大小、环境温度、加热管的工作强度等均为实时变化,采用传统的控制方法很难达到理想的控制效果。

许秀锋等^[1]提出将 Smith 预估器的 PID 控制方法应用于 PCR 仪温度控制系统。孟磊等^[2]将 Smith 预估算法引入反应釜温控系统。尚亚锐等^[3]等提出将 Smith-Fuzzy 算法应用与盘管出水口温控系统。段英宏^[4]将预估模糊 PID 应用于空调房间温度控制,均得到了满意的控制效果。

为此,本文将 Smith 预估算法与常规 PID 控制律相结合,充分利用 Smith 预估算法在解决纯滞后环节^[1-3]的优势,并将其运用到波峰焊机温度控制系统中,实现了波峰焊机温度控制,达到了很好的效果。

1 波峰焊机温度控制系统数学模型

温度控制系统是一个复杂系统^[5],波峰焊机中的温度不仅与焊机保温层的散热系数有关,还与焊机所处的环境温度、PCB 板的供给速度、PCB 板的大小以及厚度等有密切关系。

因尺寸、外形、材质等条件的不同,所建立的波峰焊机温度控制系统模型有很大的不同。本文对小型无铅波峰焊机的温度控制系统进行分析,采用热电偶为温度检测单元,利用固态继电器来控制加热部件的通断电。

依据该波峰焊机的实际情况,为重点突出研究对象的本质,在建立数学模型时对研究对象作必要的简化:(1)PCB 板上的温度分布均匀;(2)加热炉内的空气分布均匀,温度分布均匀;(3)在计算传热时,只考虑加热炉与外部的纵向热交换,不考虑加热

① 国家自然科学基金(51677063)资助项目。
② 男,1974 年生,副教授,博士生;研究方向:智能控制,智能计算的研究;E-mail: 305444938@qq.com
③ 通信作者,E-mail: 306400605@qq.com
(收稿日期:2017-11-30)

炉内的横向传热。

考虑上述因素,建立波峰焊机温度的动态模型关系为:

$$V_{\rho}C_{\rho}\frac{dT_{in}}{dt} = h_cA_c(T_{out}(t) - T_{in}(t)) + \rho C_{\rho}V_{in}(t)(T_{out}(t) - T_{in}(t)) + \rho_b C_b V_b(t)(T_{out}(t) - T_{in}(t)) + C_h H_{heat}(t - t_d) \quad (1)$$

$$V_b(t) = vSt \quad (2)$$

式(1)右边各项依次为通过波峰焊机保温层交换的热量、PCB 板输送时空气流动产生的热量交换、焊接过程中 PCB 板带走的热量和加热部件所提供的热量。

其中 T_{in} 为波峰焊机炉腔内的温度($^{\circ}\text{C}$); T_{out} 为波峰焊机 PCB 板入口所处的环境温度($^{\circ}\text{C}$); V 为炉腔内的体积(m^3); ρ 为空气密度($1.2\text{kg}/\text{m}^3$); C_{ρ} 为炉腔内气体定容比热($1.005\text{J}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$); h_c 为波峰焊机保温层与炉腔内气体的对流换热系数; A_c 为波峰焊机保温层的面积(m^2); V_{in} 为 PCB 板流动时所带动的波峰焊机炉腔内的空气流动率(m^3/s); ρ_b 为 PCB 板的密度($1.9\text{g}/\text{cm}^3$); C_b 为 FR-4 PCB 板在 20°C 的定容比热($1280\text{J}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$ 铜材质)^[6]; V_b 为单位时间内通过波峰焊机炉腔的 PCB 板的体积(m^3), v 为波峰焊机传送带的速度(m/s); S 为 PCB 板的截面面积(m^2); t 为时间(s); C_h 为加热源的传导系数; $H_{heat}(t)$ 为温度调控设施控制输出的函数。

经现场测试,波峰焊机在工作过程中,焊机外表面的温度基本恒定保持在 $30^{\circ}\text{C} \sim 40^{\circ}\text{C}$,也就是说式(1)右边通过波峰焊机保温层交换的热量为一个恒定的值,在温度控制时不予考虑,则式(1)变为:

$$V_{\rho}C_{\rho}\frac{dT_{in}}{dt} = \rho C_{\rho}V_{in}(t)(T_{out}(t) - T_{in}(t)) + \rho_b C_b V_b(t)(T_{out}(t) - T_{in}(t)) + C_h H_{heat}(t - t_d) \quad (3)$$

将式(3)进行整理得:

$$\frac{dT_{in}}{dt} = -\frac{\rho C_{\rho}V_{in}(t) + \rho_b C_b V_b(t)}{V_{\rho}C_{\rho}} \cdot T_{in}(t) + \frac{(\rho C_{\rho}V_{in}(t) + \rho_b C_b V_b(t)) \cdot T_{out}(t) + C_h H_{heat}(t - t_d)}{V_{\rho}C_{\rho}} \quad (4)$$

$$H(t) = \rho C_{\rho}V_{in}(t) + \rho_b C_b V_b(t) \quad (5)$$

将式(5)代入式(4)得到式(6):

$$\frac{dT_{in}}{dt} = -\frac{H(t)}{V_{\rho}C_{\rho}} \cdot T_{in}(t) + \frac{H(t) \cdot T_{out}(t) + C_h H_{heat}(t - t_d)}{V_{\rho}C_{\rho}} \quad (6)$$

式中, $H(t)$ 受波峰焊机炉腔内气体定容比、炉腔体积、PCB 板的密度、PCB 板的定容比、传送带的速度、PCB 板截面积等影响。

考虑到在一个生产班组中,波峰焊机传送带的速度基本一致、PCB 板截面积、PCB 板大小亦大体相同,故 $H(t)$ 可认为是一个常数,可用一个参考值 $\hbar$ 替代。则式(6)变为:

$$\frac{dT_{in}}{dt} = -\frac{\hbar}{V_{\rho}C_{\rho}} \cdot T_{in}(t) + \frac{\hbar \cdot T_{out}(t) + C_h H_{heat}(t - t_d)}{V_{\rho}C_{\rho}} \quad (7)$$

对式(7)两端取 Laplace 变换并整理得:

$$(V_{\rho}C_{\rho}S + \hbar)T_{in}(S) = C_h e^{-t_d S} H_{heat}(S) + \hbar \cdot T_{out}(S) \quad (8)$$

式(8)可变换为:

$$T_{in}(S) = \frac{C_h}{V_{\rho}C_{\rho}S + \hbar} \cdot e^{-t_d S} H_{heat}(S) + \frac{\hbar}{V_{\rho}C_{\rho}S + \hbar} \cdot T_{out}(S) \quad (9)$$

对式(9)进行整理得式(10):

$$T_{in}(S) = \frac{C_h}{\hbar} \cdot \frac{e^{-t_d S} H_{heat}(S)}{\frac{V_{\rho}C_{\rho}}{\hbar} \cdot S + 1} + \frac{1}{\frac{V_{\rho}C_{\rho}}{\hbar} \cdot S + 1} \cdot T_{out}(S) \quad (10)$$

由式(10)可看出,波峰焊机温度控制系统可近似看作一阶惯性加滞后环节。将波峰焊机温度控制理想数学模型与典型一阶惯性加滞后环节进行对比,得到式(11)和式(12):

$$T_{in}(S) = \frac{C_h}{\hbar} \cdot \frac{e^{-t_d S} H_{heat}(S)}{\frac{V_{\rho}C_{\rho}}{\hbar} \cdot S + 1} + \frac{1}{\frac{V_{\rho}C_{\rho}}{\hbar} \cdot S + 1} \cdot T_{out}(S) = \frac{Ke^{-\tau S}}{TS + 1} \cdot H_{heat}(S) + \frac{1}{TS + 1} \cdot H_{out}(S) \quad (11)$$

其中:

$$K = \frac{C_h}{\hbar}, \tau = t_d, T = \frac{V_{\rho}C_{\rho}}{\hbar} \quad (12)$$

式中, K 为系统的静态增益, τ 为滞后时间常数, T

为系统时间常数。

2 波峰焊机 Smith 预估 PID 控制器原理

温度调控设施输出的函数为 $H_{\text{heat}}(t - t_d)$ ，为一个含有滞后时间 t_d 的系统，亦就是说，当温度调控设施输出一定的热量要等到时间 t_d 之后才能在波峰焊机炉腔温度中体现出来。在 PCB 板的焊接过程中，由于电子元器件对温度的敏感性，需要将焊接温度控制在 $\pm 5^\circ\text{C}$ 的范围内，因此控制系统的滞后作用就成为无法绕过的一个因素。

Smith 预估器是 Smith 于 1958 年率先提出^[1,3]，为时滞预估补偿算法，其基本思路是，预先估计出被控对象的动态特性，构建一个预估补偿环节，补偿控制系统的纯滞后环节，力图使滞后环节的被调量提前反映到调节器，使调节器提前动作，从而减小超调量和加速调节过程。

图 1 中， $G_c(S)$ 为控制器的传递函数， G_p 为不含时滞部分的被控对象传递函数， τ 为滞后时间常数。 $r(t)$ 为目标值， $y(t)$ 为监测值， $e(t) = r(t) - y(t)$ ， $u(t)$ 为控制器的输出。

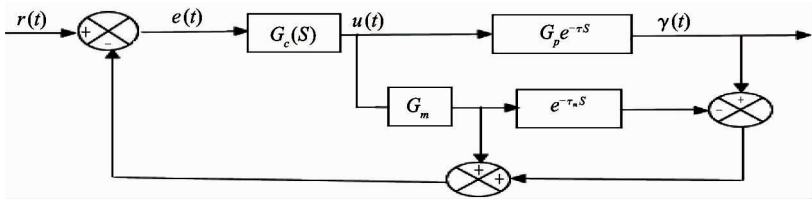


图 2 含 Smith 预估的控制系统框图

3 温度控制系统及实验现象分析

为验证波峰焊机数学模型的正确性以及 Smith

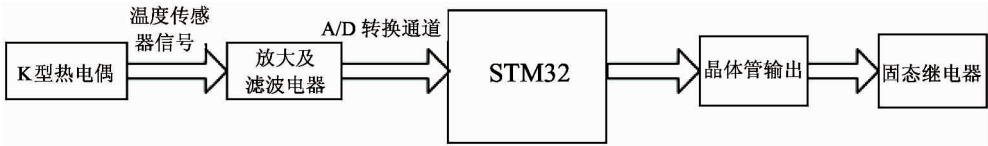


图 3 波峰焊机温度控制系统框图

由于波峰焊机的保温性能很好，实验发现炉腔温度持续达到 280°C 一段时间后，波峰焊机外壳温度小于 40°C ，炉腔内温度超调量一旦超过 10°C ，温

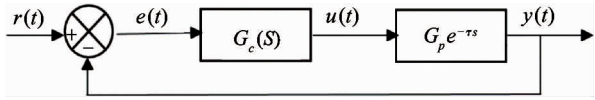


图 1 不含 Smith 预估的控制系统框图

G_m 为不含时滞部分的被控对象模型传递函数， τ_m 为模型的滞后时间常数。由图 2 可知，系统经补偿后的闭环传递函数为：

$$G(S) = \frac{G_c(S)G_p(S) \cdot e^{-\tau S}}{1 + G_c(S)(G_m(S) + G_p(S)e^{-\tau S} - G_m(S)e^{-\tau_m S})} \quad (13)$$

当 $G_p(S) \cdot e^{-\tau S} = G_m(S)e^{-\tau_m S}$ 时，则式(13)变为：

$$G(S) = \frac{G_c(S)G_p(S)}{1 + G_c(S)(G_m(S)) \cdot e^{-\tau S}} \quad (14)$$

由式(14)可看出，系统经补偿后，波峰焊机温度控制系统的滞后特性 $e^{-\tau S}$ 已处于系统闭环回路之外，则系统可按无时滞系统设计，改善了系统的反应速度和动态性能。

预估补偿控制器在波峰焊机温度控制系统中的有效性，本文利用 STM32CPU、K 型热电偶、固态继电器、电阻丝等构成了波峰焊机的温度控制系统。实验系统框图如图 3 所示。

度调节将变得比较困难。为避免产生过大的超调量，采用积分分离^[7]的 PID 算法：当 $e(t) > 30$ 时，采用 PD 控制，避免由于积分作用而使超调量增

大^[8];当 $e(t) \leq 30$ 时,采用 PID 控制,以便消除静差^[9],提高控制精度。采用周期 $T = 10\text{s}$, $K_p = 0.9$, $K_i = 0.006$, $K_d = 3.5$, 电压为 220V 。波峰焊机的数学模型为:

$$G(S) = \frac{2e^{-15S}}{45S^2 + 60S + 1} \tag{15}$$

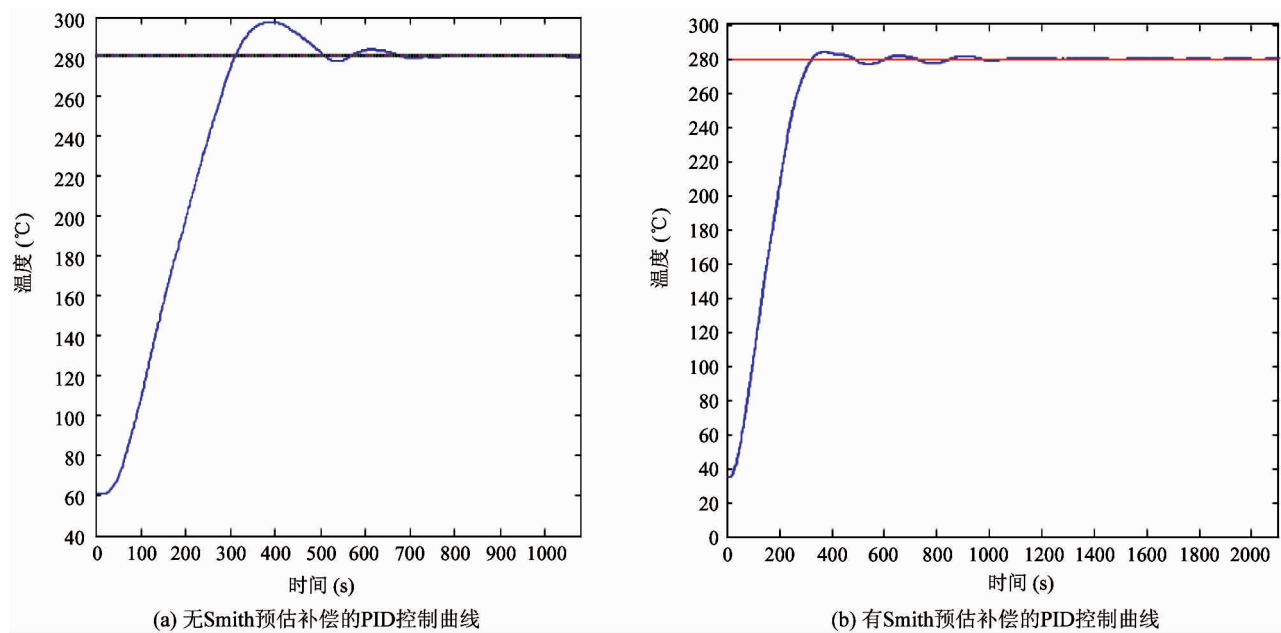


图 4 波峰焊机温度控制曲线

从图 4 可以看出,在控制对象和 PID 控制参数相同的情况下,由于 Smith 预估补偿器在一定程度上消除了系统的滞后效应,使得系统超调量小于 2%,稳态误差小于 1℃,振荡幅度亦大幅改善。

4 结 论

本文建立了波峰焊机温度控制系统的数学模型,针对该数学模型中的一阶滞后环节,提出采用基于 Smith 预估器的积分分离 PID 控制算法,构建了以 STM32 为核心器件的温度控制系统。实验结果表明,Smith 预估器的积分分离 PID 控制方法充分发挥了 Smith 预估器的预估补偿作用,提高了波峰焊机温度控制系统的动态响应速度并且解决了超调问题,能有效地实现波峰焊机的温度实时控制。

在 Matlab 的 Simulink 仿真环境下,对波峰焊机温度控制系统进行常规积分分离的 PID 控制和 Smith 预估器的积分分离 PID 控制,其控制效果如图 4。

参考文献

[1] 许秀锋,陆敏恂,周爱国,等. 基于 Smith 预估器的 PCR 仪时滞温控系统[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2015,43(2):293-298

[2] 孟磊,邹志云,刘兴红,等. 基于 Smith 预估与仿人智能的反应釜温度控制设计与仿真[J]. 化工自动化及仪表, 2015,(6):613-615,637

[3] 尚亚锐,马胜毅,尹绍清,等. Smith-Fuzzy 控制器在盘管出水口温度滞后控制中的应用研究[J]. 制造业自动化, 2014(3):62-64

[4] 段英宏. 空调房间温度预估模糊 PID 控制器的研究[J]. 系统仿真学报, 2008,20(3):620-622,626

[5] 屈毅,宁铎,赖展翅,等. 温室温度控制系统的神经网络 PID 控制[J]. 农业工程学报, 2011,27(2):307-311

[6] 龚雨兵. 再流焊炉温曲线优化研究[J]. 热加工工艺, 2013,42(15):187-189

[7] 王海青,姬长英,刘同召,等. 模糊自整定 PID 温度控制系统的建模与仿真[J]. 计算机工程,2012,38(7):233-

235,239

[9] 屈毅,宁铎,赖展翅,等. 基于模糊 PID 控制的温室控制

[8] 王磊,冯茜. 嵌入式智能加热炉在线温度控制方法研究
[J]. 计算机仿真,2016,33(2):373-377

系统[J]. 计算机应用, 2009,29(7):1996-1999

Application of Smith predictive control in wave soldering temperature control system

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

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

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

Abstract

It is difficult for wave-solder machine to control temperature because of its big inertia, big lagand, and it does not allow great overshoot. Therefore, a mathematical model of wave-solder machine temperature is established, and a kind of integral separating PID controller algorithm based on Smith predictor compensator is introduced into the proposed system. The experimental results demonstrate that a high performance is achieved with smaller overshoot, steady-state precision.

Key words: wave-solder, Smith predictor, mathematic model, temperature control