

● 焊接设备 ●

基于热平衡机理的热风回流焊机多温区系统动态建模及仿真

鲁五一¹, 汪学军¹, 向涛¹, 郭益安²

(1. 中南大学信息科学与工程学院, 湖南长沙 410075; 2. 大连海事大学信息科学与工程学院, 辽宁大连 116026)

摘要:建立了基于热平衡机理的热风回流焊机机理模型——多温区对象的动态数学模型, 根据该系统三种不同的工况分别建立了动态数学模型, 并在此模型基础上进行了 MATLAB 仿真和现场数据采集, 根据仿真数据和现场实际采集的数据, 对动态数学模型进行了检验, 结果表明, 动态数学模型的误差控制在较小范围内, 所建立的数学模型具有很高的应用价值。将该动态模型应用到实际控制中, 控温精度达到了 $\pm 0.8\%$ 以内的较好效果。

关键词:热风回流焊机; 多温区系统; 动态模型; 建模; 仿真

中图分类号: TG439.1

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2006)19-0051-05

Dynamic Modeling and Simulation for Multiple Temperature Zones System of Reflow Soldering Machine Based on Heat Balance Mechanism

LU Wu-yi¹, WANG Xue-jun¹, XIANG Tao¹, GUO Yi-an²

(1. School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410075, China;

2. School of Information Science and Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract: The reflow soldering machine mechanism model—the dynamic mathematical model of multiple temperature zones was set up on the basis of heat balance mechanism initially, and then dynamic mathematical models were respectively set up according to three different states of multiple temperature zones system, MATLAB simulation and data-acquisition from the scene were also researched. Based on the data gathered from the scene and simulation, the dynamic mathematical model was tested. The results indicate that the error of the model can be controlled within very small range, and the mathematical model has significant practical value. A good result that the temperature is controlled at the inside of $\pm 0.8\%$ is obtained from the model when the model is used in the system.

Key words: reflow soldering machine; multiple temperature zones system; dynamic model; modeling; simulation

多温区热风回流焊的自动化控制属于复杂工业过程控制, 多温区热风回流焊系统的结构和参数具有高维性、时变性和高度非线性, 并且具有强耦合与时滞等特性, 系统及其外部环境具有许多未知和不确定的因素, 具有较大的随机干扰^[1], 面对复杂的多温区热风回流焊的工艺控制如果能够建立足够精确和简单的模型, 将极大地有助于对这个复杂系统的控制, 特别是对焊接过程的优化^[2]。本文将热风回流焊机每个温区内的热空气所影响到的所有个体, 包括温区热空气、链条、链网、PCB、炉壁等所有不能忽略的因素视为控制模型的一部分, 从热学机理出发, 推导出控制对象的状态空间方

程, 实现了真正意义上的动态模型, 并提出了三种热风回流焊机工况的划分, 针对不同的工况建立不同的动态模型, 对其实施不同的控制算法, 经过大量的仿真实验后, 将此模型应用于热风回流焊机实际的温度控制中均取得了比较好的效果。

1 系统描述及建模分析

1.1 系统描述

本文研究的热风回流焊机型属全热风回流焊, 它是当今 SMT 行业中回流焊工艺的主流焊接方法之一^[3], 热风回流焊机的整体结构由加热系统、电路板传输系统、控制系统及其它辅助部分构成, 共有八组十六个加热温区, 每组分为上下两个温区, 每个温区都单独采用电加热管对流换热升温, 发热系统由 380 V 交流供电, 由固态继电器来控制, 温度采集器件热电偶安放在每个温区靠近

收稿日期: 2006-07-25

作者简介: 鲁五一(1957-), 男, 湖南长沙人, 教授, 中南大学自动化工程研究所所长, 研究领域: 智能检测、工业自动化、电子工程等; 电话: 13755032900; E-mail: wylu@csu.edu.cn

输送链通道的表面上, 它的温度采集点尽可能地靠近 PCB, 这就更好地反应了温度控制效果。该热风回流焊炉采取由传输系统(输送链)连续地将电路板从炉膛入口处送入, 经过预热区第一、二温区, 保温区第三、四、五温区, 回流区第六、七温区和最后第八温区冷却区, 再由下载线体上的热风整平, 最后送入电路板储存装置中。

1.2 建模分析

因为热气流从炉膛内部以比较缓和的速度释放到温区空间内, 并未对 PCB 形成很大的射流冲击力, 故在温区内各点温度基本上是一致的, 这时炉气温度仅是时间 τ 的一元函数而与笛卡尔坐标系无关^[4], 为了适当简化动态数学模型, 现作如下推断和假设:

(1) 在稳定情况下, 对于每个温区而言, 内部空气各点温度一致, 并未存在温度梯度。

(2) 各温区炉气成分一样, 只是温度不一样, 所以空气的物理参数均匀一致。

(3) 空气是完全透热体, 忽略对炉体表面、器件表面辐射能量的吸收。

(4) 每组上下温区之间由于设定温度一致, 并且各自热风马达风机以相同功率运行^[5], 那么上下温区热风各自以相同速度流向对方温区, 两者只存在气体质量交换, 并不存在热量交换。

2 动态数学模型的建立

首先列出本文涉及较多的符号表示的意义, 而个别符号文中具体解释: λ —导热系数, 单位为 $W/(m \cdot K)$; E_{CV} —微元体的总能, 单位为 J ; $\dot{\Phi}$ —微元体总的内热源, 单位为 W/m^3 , 其中 $\dot{\Phi}_m$ 分别表示各项内热源, 具体的含义下文有介绍; Φ' —通过微元体边界由外界导入微元体的热流量(经导热方式进入微元体的热流量), 其下标“in”及“out”表示进及出; q_m —质量流量, 单位为 kg/s ; h —流体的比焓, 单位为 J/kg , 其下标“in”及“out”表示进及出; A_m —表示发生对流换热时, 两者的接触面积, 单位为 m^2 , 下标“m”表示具体的换热对象; T_i —表示某一对象的温度, 单位为 $^{\circ}C$, 下标“i”表示具体的换热对象; ρ_m —表示某一对象的密度, 单位为 kg/m^3 , 下标“m”表示具体的换热对象; c_m —表示某一对象的比热, 单位为 $J/(kg \cdot K)$, 下标“m”表示具

体的换热对象; V_m 、 S_m 、 l_m —分别表示某一对象的体积、面积和长度, 下标“m”表示具体的换热对象。

2.1 热平衡微分方程的理论推导

建立基于热平衡机理的动态模型就必须掌握整个热传递的过程, 列出炉膛内温度场的数学表达式。根据能量守恒定律可得炉膛内气体能量守恒方程^[6]:

$$\frac{dE_{CV}}{d\tau} = (\Phi'_{in} - \Phi'_{out}) + [(q_m)_{in} - (q_m)_{out}]h_{out} + \dot{\Phi} dxdydz \quad (1)$$

根据傅里叶定律, 对于三维问题, 这 $d\tau$ 时间内两者之差为:

$$(\Phi'_{in} - \Phi'_{out})d\tau = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) dxdydzd\tau \quad (2)$$

在 $d\tau$ 时间内, 微元体中流体温度改变了 $\frac{\partial T}{\partial \tau} d\tau$, 其总能的增量为:

$$dE_{CV} = \rho c_p dxdydz \frac{\partial T}{\partial \tau} d\tau \quad (3)$$

流体流出、流进微元体所带进带出的焓差可分别从 x 、 y 及 z 方向加以计算, 流体的焓差便是其通过对流方式进入微元体的热量, 假设流体做匀速运动, 于是在 $d\tau$ 时间内由于流体的流动而带出微元体的净热量为:

$$\begin{aligned} & [(q_m)_{out}h_{out} - (q_m)_{in}h_{in}]d\tau \\ & = \rho c_p \left[\left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) + T \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right] dxdydzd\tau \\ & = \rho c_p \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) dxdydzd\tau \end{aligned} \quad (4)$$

将(2)、(3)、(4)式代入式(1)即可得出气体的对流换热微分方程:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial T}{\partial \tau} + \underbrace{\left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right)}_{\text{非稳态项}} + \underbrace{\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right)}_{\text{对流项}} \\ & = \underbrace{\frac{\lambda}{\rho c_p} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right)}_{\text{扩散项}} + \underbrace{\frac{\dot{\Phi}_{(x,y,z)}}{\rho c_p}}_{\text{内热源项}} \end{aligned} \quad (5)$$

在对流换热过程中, 热量的传递除了依靠流体的流动所产生的对流项外, 还有导热引起的扩散项, 这表示运动中的流体除了依靠流体的宏观位移来传递热量外, 还依靠导热传递热量^[6]。

2.2 炉膛内热传递过程分析和微分方程的建立

根据热力学第一定理、炉膛中气体对流换热的方式以及上面提到的合理推断和假设, 式(5)中

的对流项和扩散项可忽视为零,故可得:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\dot{\Phi}_{(s,y,z)}}{\rho c_p} \quad (6)$$

这里取某一温区做热平衡分析,图1所示,在式(6)的基础上,温区内热源生成热是由图1中各项构成,以下分别推导出各项表达式:

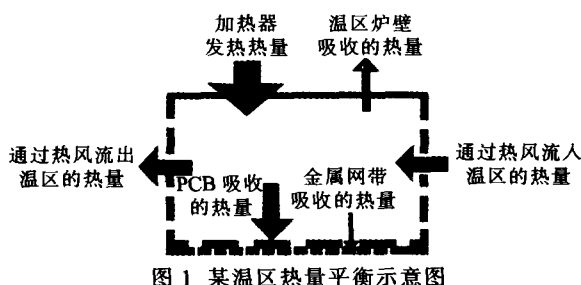


图1 某温区热量平衡示意图

2.2.1 加热器产生的热流量传递公式

$$\dot{\Phi}_1 V = (N/N_f) UI \quad (7)$$

式中: $\dot{\Phi}_1$ 为热空气内热源生成热的加热器生成热部分; V 为温区的体积; N/N_f 是继电器控制的通断比,这个值的大小依据控制策略来定, N_f 是最大的控制量,即满加热的脉冲数; U 、 I 分别为加热器的额定电压、额定电流。

2.2.2 PCB 吸收的热流量分析

对这里研究的热风回流焊机而言,已知热风马达的功率、全压等参数,可计算出热风从马达的出风速度为 3.6 m/s。热风以该速度吹至印刷电路板上时,会向四周扩散,在印刷电路板表面上形成紊流气体。纵掠等温平板的无内热源的紊流对流换热问题的分析解^[6]为:

$$Nu = C Re^n Pr^{1/3} \quad (8)$$

式中: Nu 为努塞尔数,为无量纲量; Re 为雷诺数,惯性力与粘性力的比较,它是个无量纲量; Pr 为普朗特数,流体中动量扩散厚度与热量扩散厚度之比的一种度量,对于空气而言,大致为 1;系数 C 和 n 分别取为^[6]0.228、0.731。在假设条件下,忽略 PCB 内部的导热热阻,可认为整块 PCB 在同一瞬间均处于同一温度下,这时 PCB 的温度仅是时间 τ 的一元函数而与方向坐标无关。把 PCB 与温区内热空气对流换热的热流量折算成 PCB 的内热源,对(8)式进行计算和推导后得热量传递公式和热量传递微分方程为:

$$-\dot{\Phi}_2 V = -h_{pcb} A_{pcb} (T - T_{pcb}) \quad (9)$$

$$\rho_{pcb} c_{pcb} V_{pcb} \frac{dT_{pcb}}{d\tau} = h_{pcb} A_{pcb} (T - T_{pcb}) \quad (10)$$

上式中 $\dot{\Phi}_2$ 标上负号是因为对温区而言是损失了热量。

2.2.3 金属网带吸收的热流量分析

根据表达式:

$$Nu = C Re^n Pr^m \quad (11)$$

(式中符号代表的意义和(8)式中符号代表的意义相同,其中 $C=0.228$, $n=0.731$, $m=0.33$)进行计算和推导后得热量传递公式和热量传递微分方程为:

$$-\dot{\Phi}_3 V = -h_{chain} A_{chain} (T - T_{chain}) \quad (12)$$

$$\rho_{chain} c_{chain} V_{chain} \frac{dT_{chain}}{d\tau} = h_{chain} A_{chain} (T - T_{chain}) \quad (13)$$

2.2.4 炉壁吸收的热流量分析

热风回流焊机整个炉膛不断向外释放热量,其中一部分便是炉膛各外表面与外界空气的自然对流换热,另一部分是与外界的辐射换热。这两部分向外释放的热量都是由温区内对流循环气体在不断地跟炉壁进行对流换热,再经由炉壁内部传导得来。在稳定时,温区内炉壁跟热空气的对流换热吸收的热量便等于外炉壁向外界环境自然对流换热以及辐射换热所损失热量。

$$-\dot{\Phi}_4 V = -h_{wall} A_{wall} (T - T_{wall}) \quad (14)$$

$$\rho_{wall} c_{pwall} V_{wall} \frac{dT_{wall}}{d\tau} = h_{wall} A_{wall} (T - T_{wall}) \quad (15)$$

经过大量计算以及试验,热风回流焊机在三种工作状态时(后面有划分工作状态的分析)炉壁内表面温度与目标温度保持一个恒定的差值。我们研究的这种热风回流焊机炉壁内表面温度 T_{wall} 与目标温度相差 40℃,因此在以后的计算中可以把此项合并到 $\dot{\Phi}_1$ 中。

2.2.5 相邻温区之间交换的热流量

热风回流焊机 8 组 16 温区分布如图 2 所示,现将所有温区按图中所示方向标明序号。针对现有的热风回流焊机,在图 2 中已标记三台抽风管道入口所在的位置,分别位于 1 号炉膛的左侧,

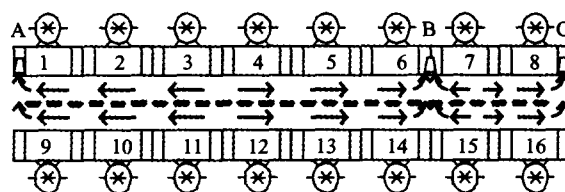


图2 热风回流焊机 16 温区分布图

6、7 号炉膛之间,8 号炉膛的右侧,记为 A、B、C。

这一部分的热量传递分为两部分,一部分是从本温区流至相邻温区的热流量:

$$-\dot{\Phi}_5 V = -\rho c_p Q T \quad (16)$$

其中: $\dot{\Phi}_5$ 为热空气内热源生成热的本温区流出热部分; Q 为本温区流出至相邻温区热风流量。而另一部分是从相邻温区流至本温区的热流量:

$$-\dot{\Phi}_6 V = -\rho_{ne} c_{p,ne} Q_{ne} T_{ne} \quad (17)$$

其中: $\dot{\Phi}_6$ 为热空气内热源生成热的相邻温区流入热部分; ρ_{ne} 为相邻温区热空气的密度; $c_{p,ne}$ 为相邻温区热空气的定压比热容; Q_{ne} 为相邻温区流至本温区的热风流量,单位为 m^3/s ; T_{ne} 为相邻温区热空气的温度。

2.3 热风回流焊机工况的划分

设热风回流焊机各个温区存在 3 个工作状态:当热风回流焊机空载运行时,也就是炉膛内未加 PCB,将各个温区升温至目标温度,此为工况 1;开始往炉膛内加入 PCB,但并未充满单个温区,此为工况 2,这是一个过渡状态;单个温区内均匀充满 PCB,各个温区温度达到基本稳定时为工况 3。对于工况 1,热风回流焊机只是稳定升温过程,并未加入 PCB 板,因此,温区内热空气的热量传递微分方程为:

$$\frac{dT}{d\tau} = \frac{\dot{\Phi}_1 - \dot{\Phi}_2 - \dot{\Phi}_3 - \dot{\Phi}_4 - \dot{\Phi}_5 + \dot{\Phi}_6}{\rho c_p} \quad (18)$$

对于工况 2 和工况 3,温区内热空气的热量传递微分方程为:

$$\frac{dT}{d\tau} = \frac{\dot{\Phi}_1 - \dot{\Phi}_2 - \dot{\Phi}_3 - \dot{\Phi}_4 - \dot{\Phi}_5 + \dot{\Phi}_6}{\rho c_p} \quad (19)$$

因热风回流焊机绝大部分时间是处于工况 3,这里分别列出各状态变量的微分方程,将式(7)~(17)代入式(19)得到温区空气的动态微分方程为:

$$\begin{aligned} \rho c_{p,i} V_i \frac{dT_i}{d\tau} = & \frac{U_i I_i}{1000} (N_i + \frac{1000 \times h_{wall-i} A_{wall} T_{wall-i}}{U_i A_i}) \\ & - (h_{pcb-i} A_{pcb-i} + h_{wall-i} A_{wall-i} + n h_{chain-i} A_{chain-i} + \rho c_{p,i} Q_i) T_i \\ & + \rho_{ne-i} c_{p,ne-i} Q_{ne-i} T_{ne-i} + h_{pcb-i} A_{pcb-i} T_{pcb-i} + n h_{chain-i} A_{chain-i} T_{chain-i} \end{aligned} \quad (20)$$

PCB 板表面温度的动态微分方程为:

$$\rho_{pcb} c_{pcb} S_{pcb} \frac{dT_{pcb-i}}{d\tau} = h_{pcb-i} l_{pcb} (T_i - T_{pcb-i}) + h_{pcb-i} l_{pcb} (T_{i+8} - T_{pcb-i})$$

$$= h_{pcb-i} l_{pcb} T_i + h_{pcb-i} l_{pcb} T_{i+8} - 2 \times h_{pcb-i} l_{pcb} T_{pcb-i} \quad (21)$$

$$i=1,2L,8$$

输送链网带的动态微分方程为:

$$\begin{aligned} \rho_{chain} c_{chain} V_{chain} \frac{dT_{chain}}{d\tau} = & h_{chain-i} A_{chain} (T_i - T_{chain-i}) + h_{chain-i} A_{chain} (T_{i+8} - T_{chain-i}) \\ = & h_{chain-i} A_{chain} T_i + h_{chain-i} A_{chain} T_{i+8} - 2 h_{chain-i} A_{chain} T_{chain} \end{aligned} \quad (22)$$

$$i=1,2L,8$$

在 2.2.4 节已经分析出 T_{wall} 是一个恒值。另外这里的推导过程不再写出,如需要者可直接与作者取得联系。

2.4 建立多温区对象的动态模型

对于三种工况均选取加热器的控制脉冲作为模型的输入量,那么: $U=[N_1, L, N_{16}, U_0]^T$, N_1, L, N_{16} 分别表示 16 个温区加热器的控制脉冲值,是一个零矩阵。对于工况 1 的状态量为每个温区的实际温度以及链网温度 $X=[T_1, L, T_{16}, T_{chain-1}, LT_{chain-8}]^T$, 输出量为各温区的实际温度 $Y=[T_1, L, T_{16}]^T$; 工况 2 和工况 3 的输入量、状态量、输出量均一样,状态量为每个温区的实际温度、PCB 温度和链网温度 $X=[T_1, L, T_{16}, T_{pcb-1}, LT_{pcb-8}, T_{chain-1}, LT_{chain-8}]^T$, 输出量为 PCB 板上的温度 $Y=[T_{pcb-1}, L, T_{pcb-8}]^T$ 。因此,可将热风回流焊机多温区动态模型统一为一种形式,即:

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + BU \\ Y = CU \end{cases} \quad (23)$$

其中: A, B, C 矩阵在三种工况下各不相同。

3 仿真和实验验证

3.1 模型验证

固定选取一组目标温度,在 PCB 已经充满了热风回流焊机的所有温区时进行焊接曲线测试,在记录 PCB 板温度数据的同时打印出模型的输入数据,因为采用的是积分分离的 PID 控制器进行温度控制,所以 PID 控制器的输出数据便是对象模型的输入数据,可以通过工控机的监控界面获取。这里取 320 个模型输出温度,并记录对应 320 个模型输入量,利用此组数据来进行模型验证,鉴于篇幅所限,这里抽取回流区第 8 组温区的部分实际输入输出数据及仿真输出数据见表 1。

将 320 个模型的输入量代入模型进行计算,可得出 320 个模型仿真输出量,用 MATLAB 绘

表 1 部分现场采集数据及仿真数据

时间/s	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19
模型实际输入(控制脉冲)	414	442	414	470	481	398	440	400	366	385
模型实际输出(PCB 温度)/℃	234.5	234.8	235.03	235.35	235.74	236.19	236.3	236.38	236.42	236.43
模型仿真输出(PCB 温度)/℃	234.5	234.61	234.61	234.72	235.02	235.36	235.5	235.88	236.19	236.28
时间/s	21	23	25	27	29	31	33	35	37	39
模型实际输入(控制脉冲)	418	412	459	452	436	373	379	387	400	423
模型实际输出(PCB 温度)/℃	236.4	236.36	236.26	236.09	236.02	235.88	235.73	235.52	235.19	234.9
模型仿真输出(PCB 温度)/℃	236.48	236.74	236.81	237.1	237.36	237.63	237.7	237.69	237.56	237.37

制成曲线,列出热风回流焊最重要的回流区(第七温区)、冷却区(第八温区)的 PCB 板实际焊接曲线与仿真曲线,以及 PCB 板经过整个回流焊机的实际焊接曲线与仿真曲线,分别如图 3、4、5 所示。

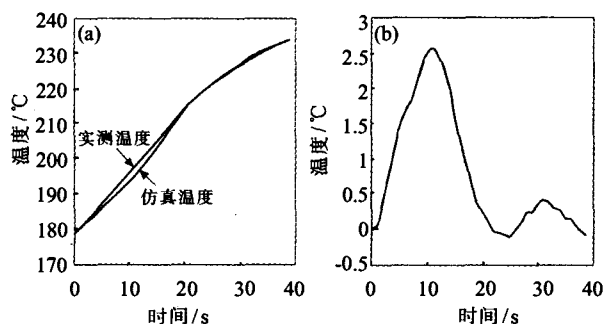


图 3 第七组温区的实测与仿真焊接曲线(a)、实测与仿真温度误差(b)

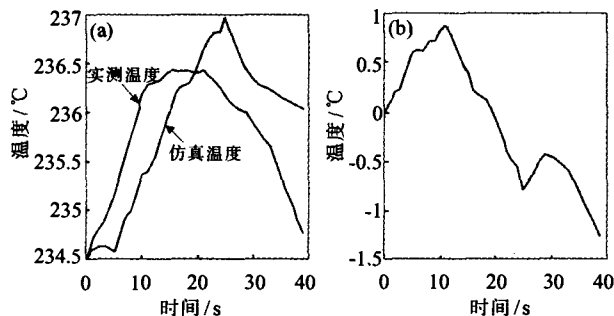


图 4 第八组温区实测与仿真焊接曲线(a)、实测与仿真温度误差(b)

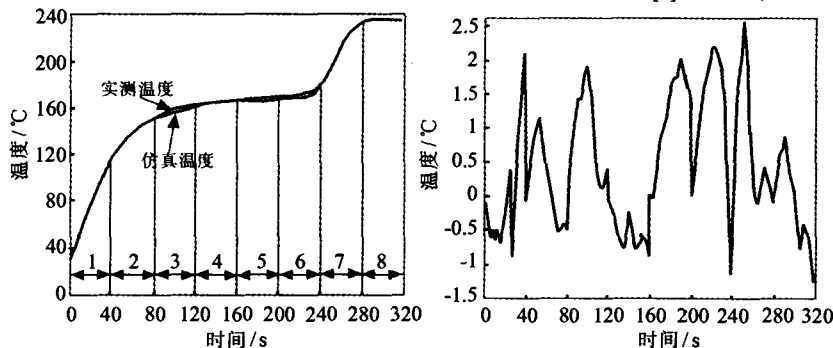


图 5 PCB 经过各温区的实际与仿真焊接曲线(a)、实测与仿真温度误差(b)

从焊接曲线仿真温度与实际温度对比来看,两者之间的误差控制在+2.5~-1.5℃之内,在热风回流焊工艺环境中是比较小的温度误差,说明

基于热平衡机理建立的对象动态数学模型跟文中选定的热风回流焊机原型在很大程度上吻合。

4 结语

本文根据热风回流焊机不同的工作时间与状态,将正常的生产过程分为 3 个工况,这对建立动态模型提供了便利;对热风回流焊机多温区对象进行热工学机理动态建模,对建立出来的动态模型用积分分离的 PID 进行了仿真,仿真结果和实际结果进行了比较,结果表明该动态数学模型与热风回流焊机原型在很大程度上相吻合,缩短了升温时间,提高了温控的精确度。由于各温区还存在相互之间的耦合,因此其后续工作是利用先进的解耦方法对其解耦,以便进一步提高控温精度。

参考文献:

- [1] Simon J Arbib. Forecasting the reflow soldering process [J]. Electronic Packaging and production, 1999, (2): 93-96.
- [2] David C Whalley, Stuart M Hyslop. A simplified model of the reflow soldering process [J]. Soldering & Surface Mount Technology, 2002, 14(1):30-37.
- [3] Motohiro Yamane, Nobuaki Orita, Koichi Miyazaki, et al. Development of new model reflow oven for lead-free soldering [J]. Furukawa Review, 2004, (26):31-36.
- [4] Hao Yu, Jorma Kivilahti. CFD modeling of the flow field inside a reflow oven [J]. Soldering & Surface Mount Technology, 2002, 14(1):38-44.
- [5] 毛信龙,韩国明,黄丙元,等. SMT 中再流焊工艺建模与仿真 [J]. 焊接技术, 2004, 33(6):17-20.
- [6] 杨世铭, 陶文铨. 传热学 (第三版) [M]. 北京:高等教育出版社, 1999.
- [7] 向涛. 基于热平衡机理的多温区动态建模及控制研究 [D]. 长沙:中南大学, 2006.
- [8] 李敏,熊红云,鲁五一. C8051F005 微处理器在热风回流焊机温控系统的应用[J]. 机电一体化, 2005, (1):61-63.
- [9] 向涛,鲁五一,熊红云. 基于 LabWindows/CVI 的 MODBUS 通信在温度控制系统的实现 [J]. 工业控制计算机, 2005, 18(10):41. H