

一种激光选区 BGA 型芯片智能温控返修系统

万洪波¹, 周杰², 柳邦², 张浩然¹, 瞿少成¹

(1. 华中师范大学 物理科学与技术学院, 武汉 430079;

2. 湖北三江航天红峰控制有限公司, 湖北 孝感 432000)

摘要: 针对手机主板高密度器件布局环境下热风加热 BGA 型芯片返修控制系统的局限性, 研发了一种激光选区 BGA 型芯片智能温控返修系统; 以固高 GTN 卡为核心, 结合红外测温仪、三段式传动装置、威图相机、光纤激光器与电机平台等设计了温度采集单元、电机控制单元、影像定位单元与激光控制单元; 基于 Windows 操作系统, 采用 MFC 技术设计了上位机检测与控制软件系统; 采用了激光选区精准加热关键技术与模糊 PID 控制算法, 实现了返修过程的实时检测与电机、温度、激光的实时控制; 实验结果表明, 该系统激光选区温控精度高, 具有操作简单、时延短与稳定性高等优点, 具有良好的推广价值。

关键词: BGA 型芯片; 激光选区; 温控技术; 模糊 PID 控制; MFC

Realization of a BGA Chips Repair System Based on Intelligent Temperature Control of Laser Selected Areas

WAN Hongbo¹, ZHOU Jie², LIU Bang², ZHANG Haoran¹, QU Shaocheng¹

(1. College of Physical Science and Technology, Central China Normal University, Wuhan 430079, China;

2. Hubei Sanjiang Aerospace Hongfeng Control Co., Ltd., Xiaogan 432000, China)

Abstract: To solve the limitation of repair control system on hot-air heating BGA chip in the high-density device layout environment of mobile phone motherboard, a BGA Chip Repair System based on intelligent temperature control of laser selected areas is studied. Firstly, the Googol GTN card is chosen as the core control unit, by combined with an infrared thermometer, three-stage transmission, a Vertu camera, a fiber laser and motor platform, the temperature acquisition unit, motor control unit, image positioning unit and laser control unit are designed. Secondly, the upper computer detection and control software system is developed by using MFC technology based on the windows operating system. Then the algorithm of fuzzy PID control and the key technology of laser selective heating are designed to realize the real time detection of repair process and the real time control of motor, temperature and laser. Finally, the experimental results show that the proposed system has high precision in temperature control of laser selected areas, and has the advantages of simple operation, short time delay and high stability, which has the good popularizing value.

Keywords: BGA chip; laser selection; temperature control technology; fuzzy-PID control; MFC

0 引言

随着科技发展的进步, 激光已经从一个遥不可及的高科技产品慢慢步入人们的生活当中, 激光技术的应用已被广泛关注^[1]。中国光学工程学会在先进激光制造产业发展大会上提出将智能制造、电子、航空航天、国防军工等产业与激光技术相结合, 合力打造高规格、高水平的先进激光制造业并推进经济发展^[2]。

电子制造技术飞快发展, 集成电路及其相关技术发展逐步趋向于高密度, 尤其以球栅阵列封装 (BGA, ball grid array) 芯片为代表, 底部焊点直径越来越小, 焊点数量越来越多。因此, 该种元器件返修成为行业的热点问题。韩满林等人研究了一种利用红外对 BGA 芯片进行拆除和利用

预成型方式对芯片进行植球焊接^[3]。中船重工集团倪宏俊对 BGA 返修过程进行了详细介绍, 提出使用热气流的方式对器件进行局部加热, 并依据不同规格的芯片更换不同的热风嘴尺寸^[4]。刘焱、明正东等人研发了一种带视觉功能的 BGA 返修台, 首先, 选择与被拆 BGA 芯片口径大小合适的热风头; 然后, 将被拆电路板固定在特制治具上; 最后, 使用视觉对中系统实现对 BGA 芯片的拆解与焊接^[5]。

BGA 芯片的返修是一项技术性与时巧性都很强的操作, 而常规基于热风红外加热的拆解与焊接方式存在以下局限性, 第一, 附带效应明显: 热风加热装置的热影响范围较大, 容易对周围的元器件造成影响, 严重时会造成周围元器件虚焊或者脱焊; 第二, 无法精确定位: 热风的加热装置的对位采取人为观察, 对位时间较长、精度差, 极大地

收稿日期: 2021-11-09; 修回日期: 2021-12-07。

基金项目: 国家自然科学基金(61673190)。

作者简介: 万洪波(1996-), 男, 湖北蕲春人, 硕士研究生, 主要从事嵌入式与智能控制技术方向的研究。

通讯作者: 瞿少成(1971-), 男, 湖北武汉人, 教授, 博士生导师, 主要从事智能信息处理与非线性控制技术方向的研究。

引用格式: 万洪波, 周杰, 柳邦, 等. 一种激光选区 BGA 型芯片智能温控返修系统[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(5): 103-108.

降低了返修效率；第三，无法实现温度闭环：热风的温度控制仅限于出口处风的温度，难以实现对器件精确测温，无法较好的实现温度闭环。针对以上问题，将激光加热技术与 BGA 返修相结合，通过高精度的红外测温仪检测器件表面的实时温度，基于激光选区光束整形技术^[6-7]、模糊控制技术^[8-9]、PID 控制技术^[10]，基于 Windows 操作系统，运用 MFC 框架设计出一种激光选区 BGA 型芯片智能温控返修系统。

1 系统整体框架

在 BGA 型芯片返修过程中，一般采用热风枪或者红外对器件进行局部加热，人工观察达到解焊状态，迅速用镊子取下芯片，这种方法存在加热温度、加热范围、加工时间不可控等因素。为了降低热风枪的热影响范围、提高出风口与器件表面的对位精度、实现对器件表面加热温度可控，设计了一种激光选区 BGA 型芯片智能温控返修系统，该系统整体拓扑图如图 1 所示。

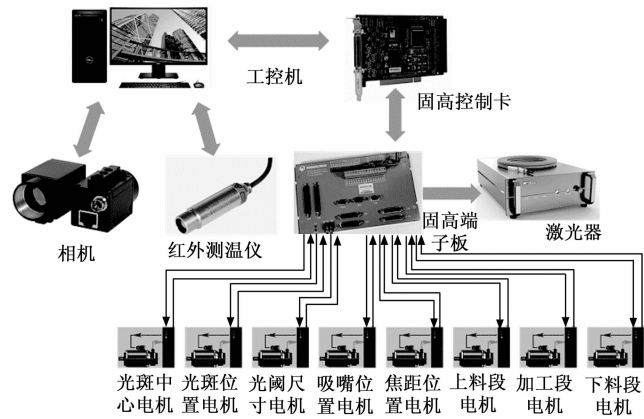


图 1 BGA 型芯片返修温控系统拓扑图

系统主要由上位工控机控制平台、固高运动控制系统、光束整形系统、温度采集系统、激光控制系统、影像定位系统六部分组成。在上位工控机控制平台上基于 Windows 系统开发 BGA 型芯片返修软件控制系统，包括影像定位与监测、电机参数设定、激光加热参数设定、温度监测与曲线显示、电机位置调整、传送带运动控制、文件保存与调用、工站切换、管理权限切换等。固高运动控制系统主要对光斑中心电机、光斑位置电机、光阑尺寸电机、吸嘴位置电机、焦距位置电机、三段式机械传动电机进行控制，实现对加工器件精准定位及加工。光束整形系统是由准直镜、光栅、电动光阑和调焦机构组成，根据器件的尺寸大小自动调节光斑尺寸，同时调整物料表面能量分布。温度采集系统采用高精度的红外测温仪，实时监测器件表面的温度，并将温度反馈给上位机，通过处理器进行分析，通过固高控制卡输出信号控制激光输出功率。CCD 相机辅助定位，观察待拆解的器件形状大小是否和光斑一致，并且可根据人为在画面中绘画形状，相机进行自动识别定位，另外可观测器件“塌陷”过程。BGA 型芯片智能返修软件

系统采用 MFC 设计可行的 GUI，并使用 C++ 语言进行编写控制程序，从而实现对激光加工过程实时控制与监测。

2 温度控制器设计

激光选区 BGA 型芯片智能温控返修系统是通过激光选区光斑照射的方式对芯片表面加热升温，经高精度的红外测温仪对监测点温度实时采集，与设定的最佳温度比对，再将结果反馈给处理器，不断的调整激光输出功率，从而使芯片表面温度控制在最佳范围内。温度控制是 BGA 型芯片自动化返修过程中的关键^[11]，采用传统的阈值控制、PID 控制或模糊控制难以满足时变非线性系统控制要求，为此，基于 PID 控制和 Fuzzy 控制各自优点，设计了一种运用 Fuzzy 控制动态调整 PID 控制中、与 3 个参数的 Fuzzy-PID 控制器。

2.1 Fuzzy-PID 温度控制器基本结构

Fuzzy-PID 温度控制器主要由自整定 PID 控制器和模糊控制器组成。Fuzzy-PID 温度控制器结构图如图 2 所示。

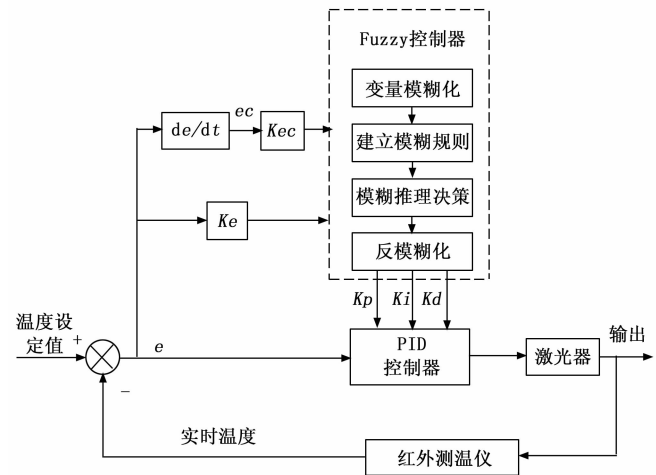


图 2 Fuzzy-PID 温度控制器结构图

模糊控制器是由输入量模糊化、建立模糊规则库、模糊推理决策、解模糊组成。自整定 PID 控制器是比例控制单元、积分控制单元、微分控制单元组成^[12]，凭借其结构简单、调整方便在工业控制中广泛应用，连续控制系统的理想 PID 控制输出一般形式为^[13]：

$$u(t) = K_p(e(t)) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

其中： K_p 为比例系数， T_i 为积分时间常数， T_d 为微分时间常数， $u(t)$ 表示 PID 控制器的输出信号， $e(t)$ 表示设定最佳值与实时检测值的差值。

2.2 Fuzzy-PID 控制器的模糊规则

2.2.1 输入输出变量模糊化

设定与监测温度差值设为偏差 e ，温度差变化率设为偏差变化率 ec ，将 e 、 ec 变量作为模糊控制器的输入，PID 控制器的 3 个参数 K_p 、 K_i 、 K_d 变化量作为模糊控制器的输出。定义 e 、 ec 、 K_p 、 K_i 、 K_d 的模糊论域分别为： $[-6, 6]$ 、 $[-6, 6]$ 、 $[-4, 4]$ 、 $[-0.3, 0.3]$ 、 $[-0.5, 0.5]$ ，

在 e 的论域上定义语言变量偏差 E , 在 ec 的论域上定义语言变量误差变化 EC , 输入输出变量的模糊语言值均设为 {负大、负中、负小、零、正小、正中、正大}, 记为 {NB、NM、NS、ZO、PS、PM、PB}。

2.2.2 确定隶属度函数

隶属度函数是模糊控制的应用基础, 正确构造隶属度函数是用好模糊控制的关键。一般遵循, 温差波动范围大选择低分辨率, 温差波动范围小选择高分辨率^[14]。为了保证温控系统稳定性、鲁棒性, 温度控制器中 e 与 ec 的隶属度函数设计为图 3 所示。其中模糊控制器 3 个输出变量 K_p 、 K_i 、 K_d 的隶属度函数曲线除论域范围不一样, 其它与图 3 一致。

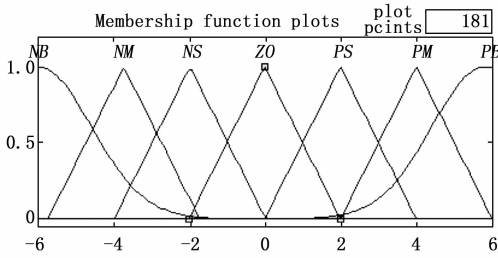


图 3 e , ec 的隶属度函数曲线

2.2.3 建立模糊控制表

通过相关专家学者经验^[15]和 BGA 型芯片激光选区温控返修装置实验数据观测, 推理得出 3 个参数调控规则如表 1 所示。

表 1 K_p 、 K_d 、 K_i 调控规则表

变化值		e		
		较小	适中	较大
ec	较小	$K_p \uparrow, K_i \uparrow, K_d$ 取大	$K_p \uparrow, K_i \uparrow, K_d$ 取中	$K_p \uparrow, K_i \uparrow, K_d$ 取小
	适中	K_i, K_j 取较小, $K_p \downarrow$	K_i, K_d 适中, $K_p \downarrow$	K_d, K_i 取小, $K_p \downarrow$
	较大	$K_p \uparrow, K_d \downarrow, K_i$ 取较小	$K_p \uparrow, K_d \downarrow, K_i$ 取适中	$K_p \uparrow, K_d \downarrow, K_i$ 取小

在满足 BGA 芯片正常返修的前提下, 制定了 Fuzzy-PID 温度控制器逻辑规则表, 如表 2~4 所示。

表 2 K_p 的模糊控制表

K_p		EC						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
E	NB	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NB
	NM	PB	PB	PM	PS	ZO	ZO	NM
	NS	PM	PM	PM	PM	ZO	NM	NM
	ZO	PS	PS	PS	ZO	NS	NM	NM
	PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
	PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
	PB	PS	ZO	NM	NM	NM	NB	NB

表 3 K_i 的模糊控制表

K_i		EC						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
E	NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO
	NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZO	NS
	NS	NB	NB	NM	NS	ZO	PM	PS
	ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PM
	PS	NM	NS	ZO	PS	PM	PM	PB
	PM	NS	ZO	PS	PM	PM	PB	PB
	PB	ZO	ZO	PS	PS	PM	PB	PB

表 4 K_d 的模糊控制表

K_d		EC						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
E	NB	PS	NS	NB	NB	NM	NM	PS
	NM	PS	NS	NB	NM	NM	NS	ZO
	NS	ZO	NS	NM	NM	NS	NS	ZO
	ZO	ZO	NM	NS	NS	NS	ZO	ZO
	PS	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
	PM	ZO	NS	PS	PS	PS	PS	PB
	PB	PB	PM	PM	PM	PS	PS	PB

2.3 PID 控制器参数自整定的模糊推理

依据 PID 控制器 3 个参数 K_p 、 K_i 、 K_d 的模糊控制表, 得出二维输入的模糊规则, 每个参数对应 49 条模糊规则:

if E is E_i and EC is EC_j
then (K_p is p_{ij}) (K_i is I_{ij}) (K_d is D_{ij})

其中: $i, j = 1, 2, \dots, 7$, E_i 表示偏差的模糊子集, E_j 表示偏差变化率的模糊子集, P_{ij} 表示表 2 中 K_p 的所有模糊子集, I_{ij} 表示表 3 中 K_i 的所有模糊子集, D_{ij} 表示表 4 中 K_d 的所有模糊子集。

可用模糊向量的笛卡尔积表示模糊关系 R 。描述为^[16]:

$$R_o = (E \times EC)^T \times U_o \quad (2)$$

式中, $(E \times EC)^T$ 为由模糊关系矩阵 $(E \times EC)$ $n \times m$ 构成的 nm 维行向量, U_o 表示模糊控制器某一个输出矩阵。将模糊控制规则看作是或的关系, 按照上述推理方法, 求出每条规则对应的模糊关系, 得出 K_p 、 K_i 、 K_d 控制规则对应的模糊关系 Q 、 T 、 S 为:

$$Q = Q_1 \cup Q_2 \cup Q_3 \dots \cup Q_{49} \quad (3)$$

$$T = T_1 \cup T_2 \cup T_3 \dots TQ_{49} \quad (4)$$

$$S = S_1 \cup S_2 \cup S_3 \dots SQ_{49} \quad (5)$$

再按照模糊关系合成运算法则, 得出模糊控制器输出模糊集 U_{K_p} 、 U_{K_i} 、 U_{K_d} 分别为:

$$U_{K_p} = (E \times EC)^T \cdot Q \quad (6)$$

$$U_{K_i} = (E \times EC)^T \cdot T \quad (7)$$

$$U_{K_d} = (E \times EC)^T \cdot S \quad (8)$$

式中, “ \cdot ” 为模糊矩阵合成运算。类似于普通矩阵乘积运算, 只是把乘积运算换成“取小”, 把加法运算换成“取大”^[17-18]。

依据模糊控制关系矩阵和模糊决策，对输出结果进行解模糊，使得到的 K_p 、 K_I 、 K_D 为精确值，采用重心法对模糊控制向量的模糊判决清晰化，得出模糊控制器输出如下：

$$u_p = \frac{\sum_{i,j=1}^n P_{ij} \cdot \mu_{K_p}(P_{ij})}{\sum_{i,j=1}^n \mu_{K_p}(P_{ij})} \quad (9)$$

$$u_i = \frac{\sum_{i,j=1}^n I_{ij} \cdot \mu_{K_i}(I_{ij})}{\sum_{i,j=1}^n \mu_{K_i}(I_{ij})} \quad (10)$$

$$u_d = \frac{\sum_{i,j=1}^n D_{ij} \cdot \mu_{K_d}(D_{ij})}{\sum_{i,j=1}^n \mu_{K_d}(D_{ij})} \quad (11)$$

式中， $\mu_{K_p}(P_{ij})$ 、 $\mu_{K_i}(I_{ij})$ 、 $\mu_{K_d}(D_{ij})$ 分别表示 K_p 、 K_I 、 K_D 模糊分类的隶属函数^[19]。

2.4 Fuzzy-PID 控制器的具体实现

系统采用激光加热技术，激光加工温控系统的传递函数可近似为一阶惯性环节和滞后环节的形式。系统传递函数模型^[20]为：

$$G(s) = \frac{K}{T_s + 1} e^{-\tau s} \quad (12)$$

式中， K 为被控对象增益系数， T 为被控对象时间常数， τ 为被控对象滞后时间。

通过常用的阶跃响应法对 BGA 型芯片温控返修系统进行测试，再通过 Cohn-Coon 公式^[21] 求解参数，得出 $K = 0.74$ ， $T = 16.5$ ， $\tau = 1.8$ 。根据系统函数，在 Simulink 中搭建 Fuzzy-PID 控制器数学模型，其仿真模型图如图 4 所示。

PID 控制器具体实现是采用增量式数字 PID 算法，其形式为^[22]：

$$\Delta u(k) = u(k) - u(k-1) = K_p[e(k) - e(k-1)] + K_i e(k) + K_d[e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \quad (13)$$

根据动态参数特性法和工程经验法对 PID 控制器进行参数整定和调节，最终确定实验中初值的 $K_p = 3$ 、 $K_i = 2.25$ 、 $K_d = 0.4$ 。

3 系统软件设计

3.1 影像定位单元程序设计

该单元主要作用方便观察器件加工整个过程及对器件表面进行定位，在相机视场中观察到待加工器件，将其移到视场中心，运用鼠标左键围绕待加工器件边缘画矩形，电动光阑系统根据像素坐标与实际坐标的对应关系，将光斑运动到待加工器件位置，并且光斑大小形状与其一致，从而减少加工过程中对其它器件的热影响，实现区域化加工。影像定位程序流程如图 5 所示。

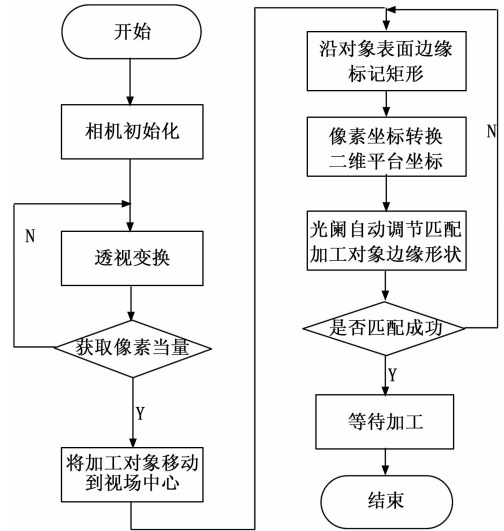


图 5 影像定位程序流程图

3.2 全自动化控制程序设计

工业产品日趋自动化，本系统对于同种形状大小的 BGA 型芯片，加工前调整一次激光加工参数和电机参数，后续加工直接可调用模板参数，整个流程即可实现自动化。

首先，选择自动模式，打开模板参数，开始上料投板，到达加工段，传感器探测治具达到预定位置，检测到位触发气动夹具进行夹持。

其次，加工装置自动定位到待加工器件位置，电动光阑自动调节光斑，使其完全覆盖待加工器件外轮廓。

然后，调用工站模式，依据预定温度曲线对待返修器件进行加工，直到加工完成。

最后，若是拆解工站，启动气动装置将拆解后的器件放到指定位置，解除夹持，治具运动至冷却下料段进行冷却，若是焊接工站，直接接触气动夹具挡板下移，解除夹持，治具运动至冷却下料段进行冷却。系统全自动化流程如图 6 所示。

4 系统测试与分析

BGA 型芯片返修软件系统包括图像模块、温度监控模块、电压转换模块、运动控制模块、调试功能模块、数据分析模块、其它模块。

图像模块具有图像旁轴校正、图像采集、虚拟框定位功能；温度监控模块具有中心点温度反馈、边缘点温度反馈功能；电压转换模块具有通过电压的变化量化激光功率的变化；运动控制模块具有光路运动控制、三段式传送带运动控制、拆解装置运动控制功能；调试模块具有升温参数设置、电机位置参数设置、各电机微调功能；数据分析模块具有对保存的数据进行查看分析功能；其它模块具有文件保存

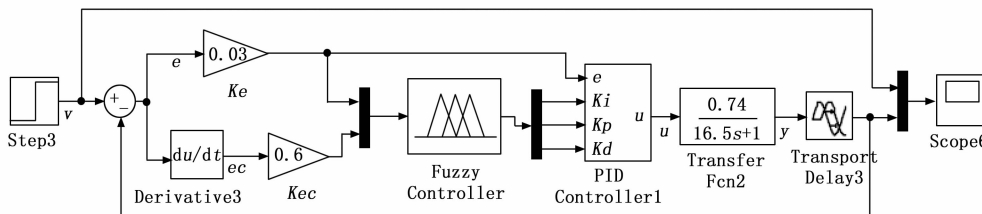


图 4 Fuzzy-PID 仿真模型图

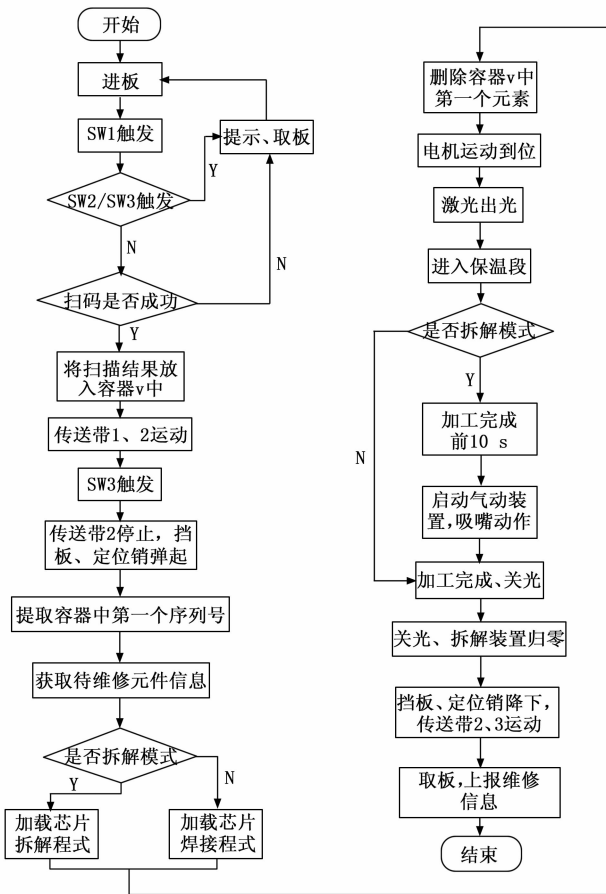


图 6 系统全自动化流程图

与调用、工作模式切换、权限切换、工站切换功能。系统软件控制界面图如图 7 所示。

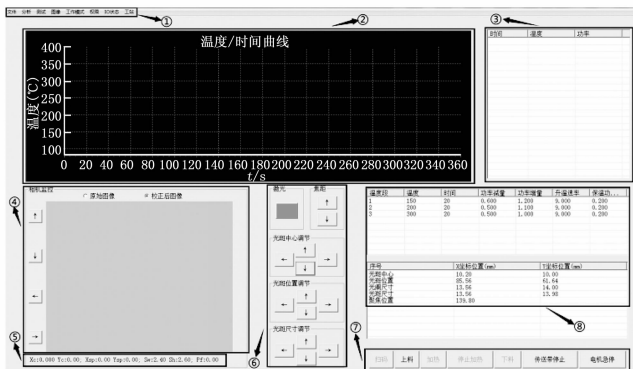


图 7 系统软件控制界面图

在图 7 中，①表示菜单栏模块，包括文件、分析、测试、图像、工作模式、权限设置、工站选择；②表示实时温度-时间曲线模块，将③中记录的数据，进行曲线分析，更能直面的观察温度随时间的变化；③表示加热过程时间、温度、功率列表实时显示模块，此模块显示加热时间、采集到的温度变化以及当时的激光输出功率变化，便于对芯片的加热过程分析；④表示相机实时监控模块，该模块用来观察加热的整个过程；⑤表示像素坐标和实际坐标实时

显示模块；⑥表示光斑位置、光斑中心等电机调节模块；⑦表示运动流程控制模块，该模块包括上料、加热、停止加热、下料、解焊、传送带停、电机急停。⑧表示升温参数设置、电机参数设置模块，根据不同的作用对象设置不同的参数。依次对以上模块进行功能测试，均能满足要求。

在升温段，激光参数设置中的升温速率是判断激光功率大小变换的重要指标。设定升温速率后，实时检测实际升温速率，若在设定升温速率变换范围内，激光输出功率保持不变；若大于设定升温速率上限，激光输出功率按照功率减量降低；若小于设定升温速率下限，激光输出功率按照功率增量增加。

在保温段，运用设计的 Fuzzy-PID 控制器对系统进行温度控制。对不同的升温速率作 A、B 两组测试，测试结果如图 8、图 9 所示。

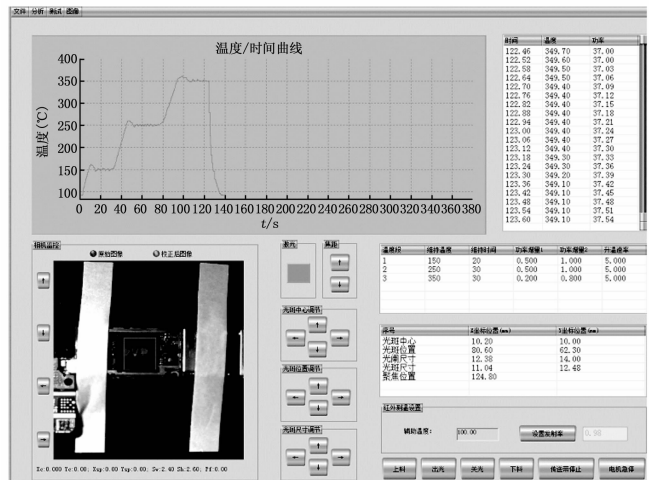


图 8 升温速率为“5”系统测试图

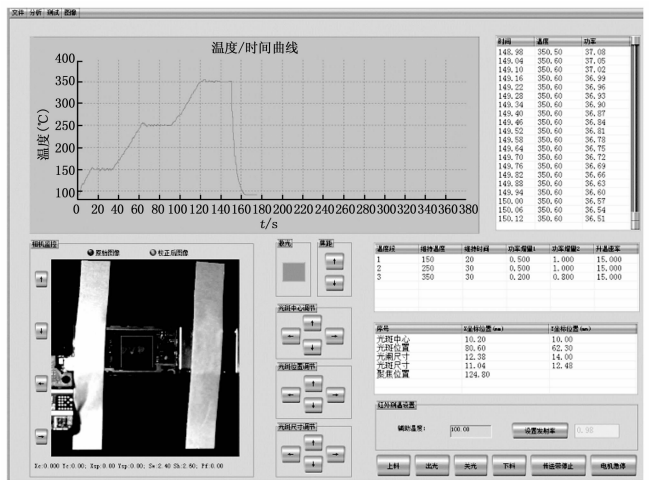


图 9 升温速率为“15”系统测试图

从系统测试结果上看，A 组测试时长大约 125 s，B 组测试时长大约 150 s。升温速率可通过升温段的倾斜角观察出，和预测的结果保持一致。升温速率设置越小，实际温度上升越快；升温速率设置越大，实际温度上升越慢。在保温段，运用 Fuzzy-PID 控制器后，观察到温度曲线平滑稳

定, 误差小, 从而实现了热影响范围可控、芯片对位精准、加热温度闭环的 BGA 型芯片智能返修系统的设计, 达到了预期目标。

5 结束语

通过了解 BGA 型芯片返修台的国内外研究现状和发展趋势, 分析此种类型芯片返修的技术需求, 基于激光选区和 Fuzzy-PID 温控技术, 设计了一种激光选区 BGA 型芯片智能温控返修系统。通过在 Windows 操作系统下, 采用 MFC 编写软件控制系统的 GUI, 采用 C++ 编写上位机控制与监测软件系统, 实现了对温度、激光、电机、相机的实时监测与控制。实验结果表明, 该系统操作简单、运行稳定、时延较短、自动化程度高, 且可控性强, 对 BGA 型芯片的返修具有良好的实用价值。在后续工作中, 对拆解与焊接操作步骤进行优化, 设计出更加简单、可靠、稳定的返修系统。

参考文献:

[1] 余霞, 罗佳琪, 肖晓晨, 等. 高功率超快光纤激光器研究进展 [J]. 中国激光, 2019, 46 (5): 85-96.

[2] 本刊编辑部. 2018 年先进激光制造产业发展大会将在张家港举行 [J]. 中国表面工程, 2018, 31 (5): 166.

[3] 韩满林, 赵雄明. BGA 返修工艺 [J]. 电子工艺技术, 2007 (4): 214-217.

[4] 倪宏俊. BGA 芯片的返修与锡球重整 [J]. 印制电路信息, 2011 (9): 65-67.

[5] 刘焱, 明正东. 浅析 BGA 元件的返修技术 [J]. 广东科技, 2015, 24 (12): 45-47.

[6] 吴政南, 谢江容, 杨雁南. 高功率半导体激光器光束整形的设计和实现 [J]. 激光技术, 2017, 41 (3): 416-420.

[7] 丁铠文, 王聪, 罗志, 等. 超快激光光束整形原理与方法及其在功能性微结构制造中的应用 [J]. 中国激光, 2021, 48 (2): 59-72.

[8] CAI C, GUO L, LIU J. Fuzzy Sliding Mode Predictive Control of Air Flow Rate for a High-Speed High-Temperature Heat-Air-flow Test System [J]. International Journal of Aeronautical and Space Sciences, 2020, 21 (3): 806-815.

[23] 陈乐鹏, 谭晓东. ip-iq 的改进算法与小波变换谐波检测方法研究 [J]. 电子测量技术, 2020, 43 (19): 69-74.

[24] 张建忠, 耿治, 徐帅, 等. 一种有源电力滤波器的改进自适应谐波检测算法 [J]. 电工技术学报, 2019, 34 (20): 4323-4333.

[25] CLEARY-BALDERAS A, MEDINA-RIOS A, CRUZ-HERNÁNDEZ O. Hybrid active power filter based on the IRP theory for harmonic current mitigation [C] //2016 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC). Ixtapa: IEEE, 2016: 1-5.

[26] 张国胜, 胡海兵, 夏玉政, 等. 一种简易的三电平 APF 中点电位控制方法 [J]. 电力电子技术, 2021, 55 (6): 122-124.

[27] 王素娥, 王鹏萱, 郝鹏飞. 有源电力滤波器改进快速重复控制

[9] BOLDBAATAR E A, LIN C M. Self-Learning Fuzzy Sliding-Mode Control for a Water Bath Temperature Control System [J]. International Journal of Fuzzy Systems, 2015, 17 (1): 31-38.

[10] 张宝峰, 张耀, 朱均超, 等. 基于模糊 PID 的高精度温度控制系统 [J]. 传感技术学报, 2019, 32 (9): 1425-1429.

[11] 徐元飞, 胡晓冬, 姚建华, 等. 半导体直接输出激光加工系统开发与温度控制策略研究 [J]. 应用激光, 2015, 35 (1): 115-123.

[12] 齐艺超, 陈伟, 穆春元, 等. 基于粒子群自整定 PID 算法的激光器温度控制系统 [J]. 激光技术, 2019, 43 (5): 60-64.

[13] 余明亮, 杨维明, 赵明俊. 空调自动调温控制系统的设计研究 [J]. 计算机测量与控制, 2018, 26 (7): 57-61.

[14] 李杰, 田俊. 基于模糊和反步算法的 EHA 力控制 [J]. 控制工程, 2021, 28 (7): 1382-1389.

[15] 李良喆, 陈锋, 张广, 等. 波浪式生物反应器温度控制系统模糊 PID 算法设计及 simulink 仿真 [J]. 军事医学, 2016, 40 (10): 824-828.

[16] 周凯, 杨嵇森. 磁粉离合器自调整模糊 PID 励磁控制技术 [J]. 电机与控制学报, 2017, 21 (2): 87-93.

[17] WANG L, WANG W, DU Y, et al. A novel adaptive fuzzy PID controller based on piecewise PID controller for dynamic positioning of sandglass-type FDPSSO [J]. Journal of Marine Science and Technology, 2019, 24 (3): 720-737.

[18] ESFANDYARI M, FANAIEI M A, ZOHREIE H. Adaptive fuzzy tuning of PID controllers [J]. Neural Computing and Applications, 2013, 23 (1): 19-28.

[19] 王慧, 赵国超, 宋宇宁, 等. 采煤机调高过程的轨迹跟踪模糊 PID 控制 [J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32 (8): 164-171.

[20] 王明宇. 激光加热辅助切削温度自适应系统研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2021.

[21] 庄源昌, 高罗卿, 郑湃, 等. 基于 Labview 和 Matlab 的模糊 PID 温度控制系统研发 [J]. 计算机测量与控制, 2014, 22 (8): 2485-2487, 2507.

[22] 文波, 孟令军, 张晚春, 等. 基于增量式 PID 算法的水温自动控制器设计 [J]. 仪表技术与传感器, 2015 (12): 113-116.

[23] 文波, 孟令军, 张晚春, 等. 基于增量式 PID 算法的水温自动控制器设计 [J]. 仪表技术与传感器, 2015 (12): 113-116.

[24] 文波, 孟令军, 张晚春, 等. 基于增量式 PID 算法的水温自动控制器设计 [J]. 仪表技术与传感器, 2015 (12): 113-116.

[25] 文波, 孟令军, 张晚春, 等. 基于增量式 PID 算法的水温自动控制器设计 [J]. 仪表技术与传感器, 2015 (12): 113-116.

[26] 文波, 孟令军, 张晚春, 等. 基于增量式 PID 算法的水温自动控制器设计 [J]. 仪表技术与传感器, 2015 (12): 113-116.

[27] 文波, 孟令军, 张晚春, 等. 基于增量式 PID 算法的水温自动控制器设计 [J]. 仪表技术与传感器, 2015 (12): 113-116.

[28] 管声启, 张潇, 杨栋峰, 等. 绳驱动机械手抓取力自整定模糊 PID 控制 [J]. 西安工程大学学报, 2021, 35 (6): 96-103.

[29] 徐健, 惠楠, 苏泽斌. 基于 BAS-PID 算法的介电弹性体执行器控制研究 [J]. 西安工程大学学报, 2021, 35 (4): 84-89.

[30] 贾东旭, 刘梁, 徐照平. 电动负载模拟器的自适应模糊 PI 控制策略 [J]. 上海航天 (中英文), 2021, 38 (5): 131-137.

[31] 侯川川, 朱森, 刘纯, 等. 并网逆变器的谐波放大机制与应用 [J/OL]. 中国电机工程学报: 1-13 [2021-12-25]. (2022-03-07). <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20211223.1942.022.html>.