

文章编号:1671-4229(2024)06-0087-08

激光软钎焊过程温度的模型预测控制研究

吴伟民, 洪培清, 陈智华*

(广州大学 计算科技研究院, 广东 广州 510006)

摘要: 在激光软钎焊过程中, 焊点温度的精确控制对焊接质量至关重要。现有的激光软钎焊的焊接温度控制基于比例积分微分 Proportional-Integral-Derivative (PID) 控制实现。传统的 PID 控制方法因其固定参数, 无法有效应对钎料比热容和激光吸收率随温度变化的问题。在使用传统 PID 控制温度的过程中, 降低了系统的响应速度和控制精度, 实际输出的温度与目标温度的误差值偏大, 输出功率波动也比较大。为此, 文章提出了一种基于模型预测控制 Model-Predictive-Control (MPC) 的温度控制方法, 通过利用过程模型预测未来的温度变化, 能够动态调整控制参数, 减少了 PID 面对温度变化时候的滞后或过冲问题。实验结果表明, MPC 方法显著提升了焊点的温度控制精度, 其温度误差方差值为 PID 控制的 32%, 最大绝对误差为 PID 控制的 67%。这些改进有效提高了钎料的润湿性和流动性, 改善了焊点的均匀性和焊接质量, 显著提升了激光软钎焊的良品率。

关键词: 激光软钎焊; MPC 控制; 温度控制; 传热学模型

中图分类号: TP273

文献标志码: A

Model predictive control study of laser soft brazing process temperature

WU Wei-min, HONG Pei-qing, CHEN Zhi-hua*

(Institute of Computing Science and Technology, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: In laser soldering, the Precise control of the temperature of the weld joint is critical to the quality of the weld. Existing soldering temperature control for laser soft brazing is realized based on Proportional-Integral-Differential (PID) control. The traditional PID control method cannot effectively deal with the problem of brazing material specific heat capacity and laser absorption rate changing with temperature due to its fixed parameters. In the process of using the traditional PID to control the temperature, the response speed and control accuracy of the system are reduced, the error value between the actual output temperature and the target temperature is large, and the output power fluctuation is also large. For this reason, this paper proposes a temperature control method based on Model-Predictive Control (MPC), which can dynamically adjust the control parameters and reduce the hysteresis or overshoot of PID when facing temperature changes by predicting the future temperature changes using a process model. Experimental results show that the MPC method significantly improves the temperature control accuracy of the solder joints, with a temperature error variance value of 32% of that of PID control and a maximum absolute error of 67% of that of PID control. These improvements effectively enhance the wettability and fluidity of the brazing material, improve the uniformity and solder quality of the solder joints, and significantly enhance the yield of laser soft brazing.

Key words: laser soft brazing; MPC control; temperature control; heat transfer modeling

收稿日期: 2024-09-28; 修回日期: 2024-10-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62272112); 广东省自然科学基金资助项目(2023A1515011998)

作者简介: 吴伟民(1997—), 男, 硕士研究生. E-mail: 2112306088@e.gzhu.edu.cn

*通信作者. E-mail: czhgd@gzhu.edu.cn

引文格式: 吴伟民, 洪培清, 陈智华. 激光软钎焊过程温度的模型预测控制研究[J]. 广州大学学报(自然科学版), 2024, 23(6): 87-94.

激光软钎焊技术是一种通过激光束直接加热钎焊部位,使得温度急剧上升到钎焊温度的技术。这项技术促使钎料融化、润湿并铺展。当激光照

射停止后,焊接区域迅速冷却,钎料凝固,从而形成牢固可靠的焊点^[1]。具体激光软钎焊过程如图 1 所示。

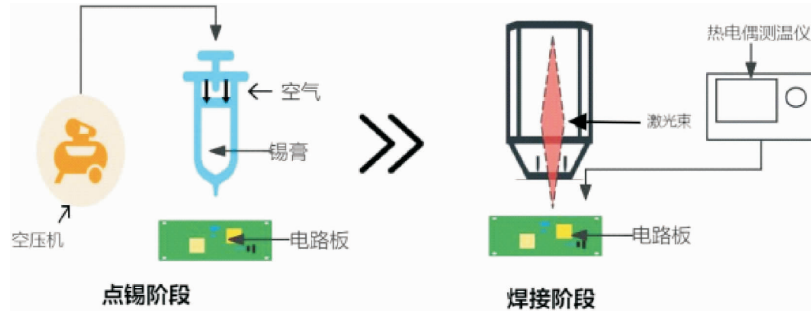


图 1 激光软钎焊示意图

Fig. 1 Schematic diagram of laser soft brazing

激光软钎焊技术作为一种现代新型焊接技术,已在微电子^[2]、新能源汽车^[3]、航空航天^[4]等众多领域被广泛应用。这特别适合焊接狭小空间内焊点或小焊点精密焊接,以及对于品质要求特别高的产品和必须采用局部加热的产品^[5]。由于是小焊点或者高要求焊点,焊接过程的温度控制尤其重要,温度控制直接决定了焊点的焊接质量。激光软钎焊温度控制有多个影响因素,如激光功率、光斑直径、钎料类型等,这些因素决定了焊接过程的焊点温度,影响了焊接质量和效率^[6]。而钎料的散热系数、吸收率等都是随温度变化的,这使得焊接温度难以精确控制^[7-8]。因此,提高激光软钎焊过程的温度控制精度是提升焊接质量的关键。激光软钎焊过程的温度控制已经有不少团队在研究。文献[9]针对在激光钎焊过程中需要高稳定度的恒温环境这一问题,设计了一款基于双闭环 PID 结构的温度控制系统,分别在硬件和软件两方面对激光器焊接温度进行控制,有效保证焊接段和保温段的控温精度。文献[10]为消除滞后系统的超调,改善温度因素对制件质量和强度的影响,设计了一种基于 BP-PID 算法的温度控制系统,利用 BP 神经网络改进传统 PID 算法。文献[11]为实现半导体激光器在设定温度条件下正常工作,设计了论域可变的模糊 PID 控制算法。文献[12]为改善温度控制系统的滞后性,针对传统 PID 算法在温度调节上具有响应速度慢、超调量大、调节时间长等问题,引入改进的鹰栖息优化(IEPO)算法。

随着工业 4.0 智能制造的提出,传统焊接方

法和控制技术存在局限性,随着新材料与复杂工艺的引入,焊接技术领域的研究重点逐渐转向控制算法的优化和创新。Zhou 等^[13]针对塑料激光焊接温度控制系统的非线性和时变特性,以及传统 PID 控制存在的精度低、超调量大等问题,提出了一种改进的蛇形优化(ISO)算法。Chen 等^[14]提出了激光焊接过程传热学模型和基于模型的前馈 PID 温度控制方法,从而实现对目标温度曲线的跟踪,提升了焊点的良品率。党丽^[15]利用变论域模糊 PID 技术,依靠控制器对热处理过程进行温度控制。程龙等^[16]设计了一种遗传算法和滑膜控制相结合的控制,能够保证锅炉温度系统具有更好的稳态响应。周根弟^[17]提出单神经网络整定 PID 参数的控制算法,提高了系统的响应速度并保持稳定工作状态。滕瑞^[18]构建了温度控制系统模型,通过对优化算法的适应度函数进行优选,获得较优的 PID 控制参数,降低了模糊 PID 控制算法设计成本,实现了热压焊温度控制系统的高动态响应。传统 PID 算法逐渐满足不了复杂封装电子行业对于激光焊接过程中的温度控制精度的要求。与传统的比例积分微分(PID)控制相比,模型预测控制(MPC)可以用来处理一些模型难以精确建模、带有纯滞后的系统,对多输入、多输出和多耦合的系统有比其他控制更好的效果^[19]。MPC 需要在每个控制周期内求解一个优化问题,这对计算资源提出较高的要求,在工业过程中涉及的计算和工程实验成本较高。但近些年随着 GPU 和 FP-GA 等硬件加速技术的发展,MPC 的计算问题有望得到解决,此外,基于模型的自适应控制和数据驱

动的模型改进技术(如机器学习与深度学习的结合)也为 MPC 在复杂工业过程中的应用开辟了新的方向。

1 热力学模型的建立与验证

1.1 模型的建立

根据能量守恒原则,建立激光软钎焊的传热学数学模型所涉及的参数包括激光功率、光斑面积、散热系数、比热容、环境温度、锡膏质量、吸收率等^[20]。在钎焊过程中,焊点通常指的是连接两个金属部分的区域,钎料在加热后熔化,冷却后形成固态连接,从而将电子元器件固定在电路板上。因为激光软钎焊针对的焊点大部分是精密电子元器件,尺寸很小,所以,模型对参数会很敏感,锡膏对激光的吸收率、锡膏的比热容和锡膏对焊盘的热传导系数,会随着温度的变化而变化。而且由于不同锡膏的成分不同,并含有助焊剂成分,因此,只能通过实验数据来辨识这些参数和温度的对应关系和变化范围。该模型涉及到的所有参数及其单位见表1。

表1 模型中涉及的参数

Table 1 Parameters involved in the model

参数	符号	单位
光斑面积	A	m^2
比热容	c	$\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$
温度	T	K
锡膏质量	m	kg
吸收率	α	
散热系数	h	$\text{W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$
激光功率	P	W

根据能量守恒定律,通过集中参数法,建立焊接过程传热学数学模型^[20]:

$$mc(T_i - T_0) + \int (T_i - T_0) * hAdt = \int P * \alpha dt, \quad (1)$$

其中, T_i 为锡膏温度, T_0 为环境温度,等式左边第一部分为锡膏吸收激光热量导致内能增加部分的热量,等式左边第二部分为锡膏对周围环境散热的热量,等式右边为吸收的激光总热量。

激光软钎焊过程中,激光停止加热后锡膏的散热模型吸收激光能量为0,其他不变,得出方程(2):

$$mc(T_i - T_{\text{top}}) + \int (T_i - T_0) * hAdt = 0, \quad (2)$$

其中, T_{top} 为加热最后时刻的温度值,即焊接过程温度最大值。

1.2 参数辨识

本文实验所采用的激光软钎焊设备主要由红外测温系统、激光发射器、电机控制系统、工控软件设备以及显示界面组成。该套激光软钎焊设备的激光输出功率 $\leq 60 \text{ W}$,发射激光波长为 $980 \pm 10 \text{ nm}$,如图2所示。



图2 激光软钎焊设备

Fig.2 Laser brazing equipment

在模型(1)中,质量 m 、焊盘面积 A 、激光功率 P 和锡膏实时温度 T 是能够测量或者控制的量,是已知的。锡膏是混合物,含有挥发性的助焊剂,组成成分复杂,其对激光的吸收率、比热容和散热系数是随温度变化的。通过开环实验数据,可以辨识出这些参数值与温度的变化规律。

对方程(1)进行微分,整理得:

$$m \frac{c}{h} \frac{dT_i}{dt} + A(T_i - T_0) = P * \frac{\alpha}{h}. \quad (3)$$

对方程(2)进行微分,整理得:

$$m \frac{dT_i}{dt} + \frac{h}{c} A(T_i - T_0) = 0. \quad (4)$$

只需要辨识出 α/h 、 h/c 这两组参数随温度变化的规律即可得到激光软钎焊过程的参数模型。首先是散热实验,用红外测温传感器测量出焊点散热时的温度数据,带到方程(4)便可以得到 h/c 和温度 T_i 的函数关系,如图3(a)所示。然后是恒功率加热实验,通过热电偶测量出锡膏加热时的温度数据,带到方程(3),结合散热过程中辨识的 h/c ,得到 α/h 和温度 T_i 的函数关系,如图3(b)所示。

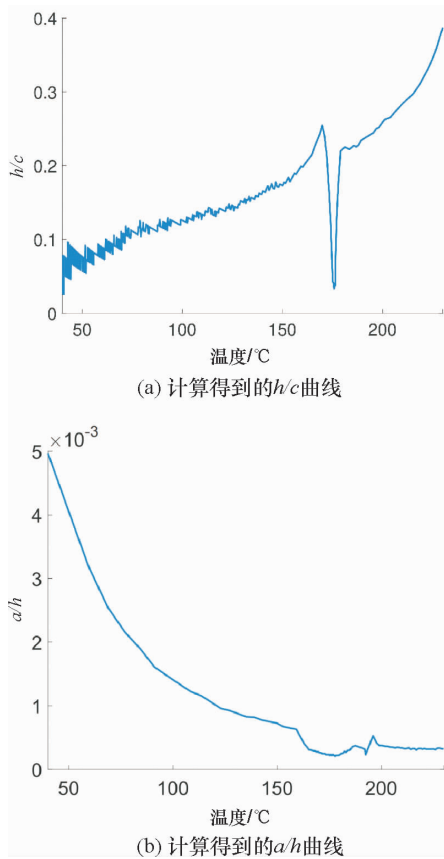


图 3 参数随温度变化示意图

Fig. 3 Parameter variation with temperature graphs

α/h 和 h/c 与温度的关系辨识结果,如表 2 所示。

表 2 参数辨识结果

Table 2 Welding experiment parameters

参数	温度	
	$T < 160\text{ }^\circ\text{C}$	$T > 160\text{ }^\circ\text{C}$
h/c	$0.000\ 9T + 0.06$	
α/h	$0.25T^{-1} - 0.001$	$0.000\ 33$

1.3 模型验证

实验选用以铜为基底的打孔焊盘,半径为 $2 \times 10^{-3}\text{m}$,选用 305 锡膏,主要成分为锡(96.5%)、银(3%)、铜(0.5%),采用恒功率模式将激光功率设置为 15.93 W 进行加热,加热时间设置为 6 s。在激光功率、加热时长相同的情况下,模型数据和实际实验数据的拟合效果,如图 4 所示。

由图 4 可知,在整个激光软钎焊加热过程的温度曲线和模型仿真的温度曲线能够基本拟合,误差标准差在 $5.77\text{ }^\circ\text{C}$ 左右,最大误差绝对值不超过 $15.31\text{ }^\circ\text{C}$ 。这表明了模型的准确性良好。基于

该模型,可以预测加热过程的温度。

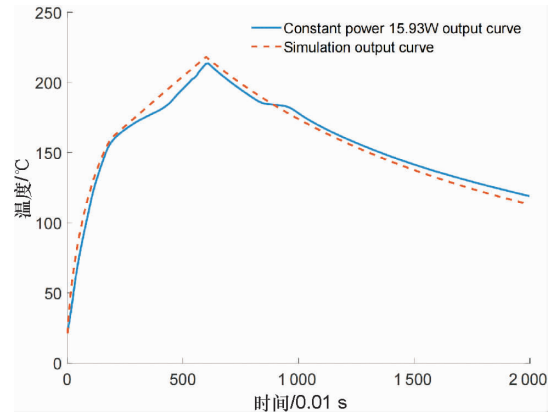


图 4 同功率下模型仿真曲线与实验曲线对比

Fig. 4 Comparison of model simulation curves and experimental curves at the same power

2 MPC 控制方法

模型预测控制(Model-based Predictive Control, MPC)是基于系统模型或者实验数据对系统未来行为进行预测,通过滚动优化实现控制过程的优化和鲁棒性。在焊点温度控制中,预测模块用于预测未来一段时间内的温度变化;滚动优化模块用于在满足所述约束条件的情况下,使代价函数最小,求解得到最优控制序列;从控制窗口最优控制序列中选择当前控制功率,驱动激光软钎焊设备加热焊点完成焊接。

在激光软钎焊过程中,如果不能按照准确的温度进行加热,那么焊点以及外观对比,如图 5 所示。

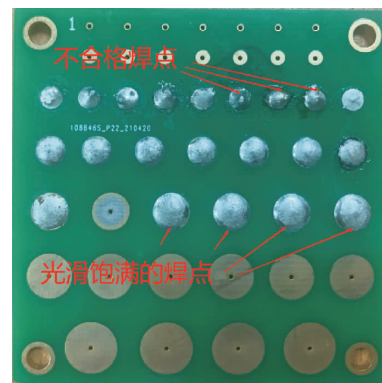


图 5 焊点对比图

Fig. 5 Comparison of solder joints

为了确保激光软钎焊质量,根据实际工程经

验、温度、温度变化速率和加热持续时间这些影响焊点质量的关键因素,可以设计出一条符合工业生产的温度曲线。本研究使用的目标温度曲线 R_k 的数学表达式为式(5)所示,可以设计一条能产生高质量焊点的目标温度曲线图,如图6所示。

$$\left. \begin{array}{l} \text{if } 0 < t \leq 200 \quad 0.065t + 30 \\ \text{if } 200 < t \leq 400 \quad 0.01t + 140 \\ \text{if } 400 < t \leq 550 \quad 0.04t + 20 \end{array} \right\} R_k, \quad (5)$$

其中, R_k 为目标温度函数, t 为时间,单位周期为 10 ms。

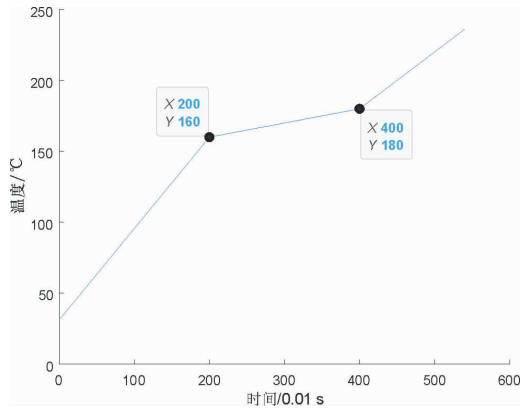


图6 目标温度曲线图

Fig. 6 Target temperature profile chart

可以利用 MPC 控制器来追踪这条曲线,使得实际生产过程中的温度曲线更加贴合目标曲线。根据图6的目标温度曲线,将其设置为参考值,具体地,定义目标温度序列为式(6):

$$R_k = [r(k+1|k)^T \quad r(k+2|k)^T \quad \dots \quad r(k+n|k)^T]^T, \quad (6)$$

其中, $r(k+1|k)^T$ 是表示第 $k+1$ 个控制周期的目标温度。

根据模型来预测未来一段时间内的预测温度序列,由于激光软钎焊设备内部使用的是数字控制器,而上述传热学模型为连续函数,因此,须对模型进行离散化近似处理,离散化结果为式(7):

$$X(k+1) = [A * x(k) + B * u(k)] / d_k, \quad (7)$$

其中, $A = \frac{MC}{H * \Delta t}$, $B = \frac{\alpha}{H}$, $d_k = \frac{MC}{H * \Delta t} + s$ 。

得到目标温度序列后,再利用传热学模型式(3)根据目标温度计算出对应的激光功率 P ,将功率 P 作为输入 $u(k)$ 代入预测模型式(7)求出未来一段时间内的预测温度序列 X_k 。所述 n 个控制周期预测公式如下:

$$\begin{cases} x(k|k) = x_k \\ x(k+1|k) = Ax(k) + Bu(k|k) \\ x(k+2|k) = A^2x(k) + ABu(k|k) + Bu(k+1|k) \\ \vdots \\ x(k+n|k) = A^n x(k) + \sum_{i=0}^{n-1} A^{n-1-i} Bu(k+i|k), \end{cases}$$

其中, x_k 为初始室温,将上式中每一个控制周期的预测温度整合成矩阵形式,得到式(8):

$$X_k = Mx(k) + CU_k, \quad (8)$$

其中, $x(k)$ 为所述当前温度, U_k 为所述目标控制

$$\text{功率, } M = \begin{bmatrix} I \\ A^1 \\ A^2 \\ \vdots \\ A^n \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 0 \\ B \\ AB & B \\ A^2B & AB & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A^{n-1}B & A^{n-2}B & \dots & B \end{bmatrix}。$$

集合 n 个控制周期的预测温度得到未来一段时间内的预测温度序列 X_k 后,此处预测温度序列要作为下一周期的运算还需要经过预测误差的修正,即上一时刻的预测温度与当前实际温度之差 Δx 。让预测误差乘以反馈量 K 后再加上预测温度序列 X_k ,即 $X = X_k + K\Delta x$ 。

此时,已经得到了目标温度序列和预测模型的预测温度,可以由此建立代价函数,并且规定约束条件。约束条件是用来约束控制信号的取值范围的,控制信号的取值遵循实际激光焊接设备的功率输出范围。在满足约束条件的情况下,使代价函数最小,便能求解得到最优控制序列。

利用传热学模型根据所预测温度序列,得到预测控制序列,表达式为式(9):

$$U_k = [u(k|k)^T \quad u(k+1|k)^T \quad \dots \quad u(k+n-1|k)^T]^T. \quad (9)$$

代价函数是用来评价控制性能的指标,控制的目标除了使实际输出温度和目标温度尽可能小,还应该使控制信号动作尽量小,因此,建立的代价函数是预测温度与目标温度差值的平方和与控制功率的平方之和。代价函数表达式(10)如下:

$$J(U_k) = (X - R_k)^T Q (X - R_k) + U_k^T W U_k, \quad (10)$$

其中, $J(U_k)$ 为代价函数值,控制的目标是在约束

条件下使该值最小, X 为未来一段时间的预测温度序列, R_k 为目标温度序列, Q 和 W 分别表示温度误差和控制信号的控制权重矩阵。

根据代价函数的表达式, 将代价函数转换为二次型函数, 具体为令 $\bar{R}_k = -K\Delta x + R_k$, 将代价函数(9)展开后合并同类项:

$$\begin{aligned}
 J(U_k) &= (X_k - \bar{R}_k)^T Q (X_k - \bar{R}_k) + U_k^T W U_k = \\
 &= (Mx(k) + CU_k - \bar{R}_k)^T Q (Mx(k) + CU_k - \bar{R}_k) + \\
 &= U_k^T W U_k = (E + CU_k)^T Q (E + CU_k) + U_k^T W U_k = \\
 &= E^T Q E + (CU_k)^T Q (CU_k) + 2E^T Q (CU_k) + U_k^T W U_k = \\
 &= U_k^T C^T Q C U_k + U_k^T W U_k + 2E^T Q C U_k + E^T Q E = \\
 &= U_k^T (C^T Q C + W) U_k + (2E^T Q C) U_k + E^T Q E,
 \end{aligned}$$

其中, $E = Mx(k) - \bar{R}_k$, C, Q, W 为常数项, 最终可化简为式(11):

$$J(U_k) = U_k^T E_1 U_k + E_2 U_k + E_3. \quad (11)$$

其中, $E_1 = C^T Q C + W, E_2 = 2E^T Q C, E_3 = E^T Q E$ 。

此时将问题转化成了求解令代价函数 J 最小的 U 值, 计算出控制序列 U_k 。同时根据预测模型在这样的控制序列下计算出预测温度序列。在完成控制量的计算和模型预测之后, 只取第一个控制元素 $u(k)$ 作为当前周期的控制功率驱动激光发射器对焊点进行加热, 而舍去其余控制序列。并将加热后的温度作为下一个采样时刻以及预测模型的初始条件, 重新预测下一个时刻的预测温度和滚动优化模型, 形成一个滚动优化和反馈校正的控制系统。

图 7 为激光焊接设备的温度控制的流程图。

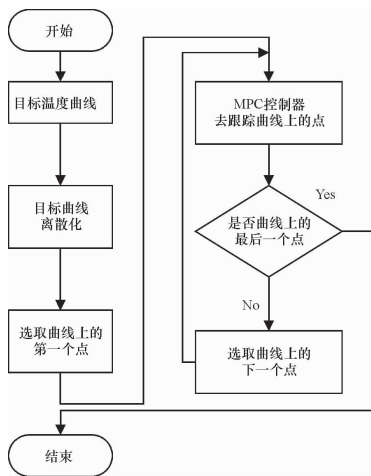


图 7 温度控制方法流程图

Fig. 7 Temperature control method flow chart

图 8 为 MPC 控制器示意图。

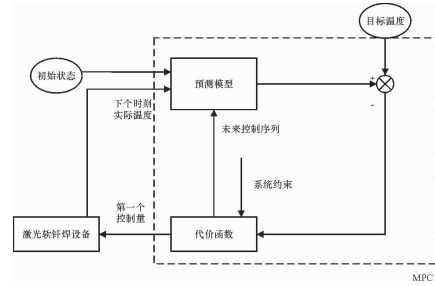


图 8 MPC 控制器示意图

Fig. 8 Schematic diagram of MPC controller

3 实验结果与对比分析

本文实验采用以铜为基底的打孔焊盘, 半径为 $2 \times 10^{-3} \text{m}$, 如图 9 所示。

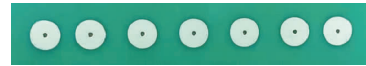


图 9 实验焊盘图

Fig. 9 Experimental pads diagram

焊接锡膏为 305 锡膏, 采用恒功率模式将激光功率设置为 15.93 W 进行加热, 加热时间设置为 6 s。具体成分如下: 96.5% 的锡、3% 的银以及 0.5% 的铜。测量温度所使用工具为热电偶测温仪器, 具体如图 10 所示。



图 10 热电偶测温仪器

Fig. 10 Thermocouple temperature measuring instrument

系统参数如表 3 所示。

表 3 系统参数

Table 3 System parameters

项目	参数	数值
焊膏质量	m/kg	4.2×10^{-5}
环境温度	$T_0/^\circ\text{C}$	15
焊盘半径	r/m	2×10^{-3}
焊膏表面积	A/m^2	1.26×10^{-5}
激光功率	P/W	15.93
采样周期	T_s/s	0.01

经由上述实验测得,系统开环给定恒功率实验温度曲线和目标温度曲线,对比结果如图 11 所示:

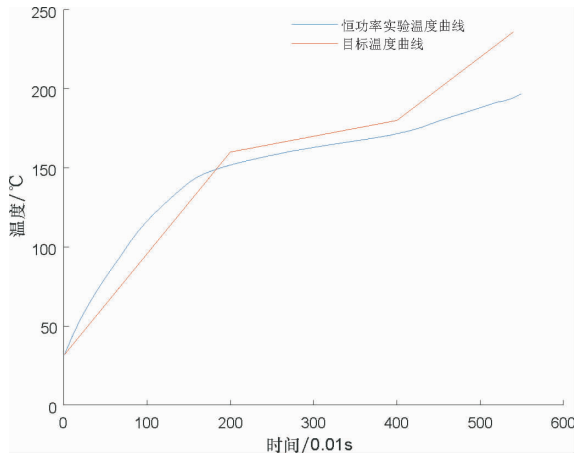


图 11 实验温度和目标温度曲线图

Fig. 11 Curve plot of experimental and target temperatures

将系统在 MPC 和 PID 控制下的激光焊接功率值分别输出,并且作为激光软钎焊设备的输入进行实验。实验依旧采用图 2 所示的激光软钎焊设备,锡膏采用 305 锡膏,焊盘仍为 4 mm 焊盘。经过电子天平测量,锡膏质量为 4.2×10^{-5} kg。实验过程先采取将激光软钎焊设备调节至温度模式下,在 220 °C 下预热 2 s 后,再在 240 °C 下预热 2 s,最后在 260 °C 下预热 6 s。完成预热以后,将激光软钎焊设备设置为功率模式,分别将 MPC 控制下的功率以及 PID 控制下的功率输入设备中完成开环实验。实验结果如图 12 所示,对比结果见表 4。

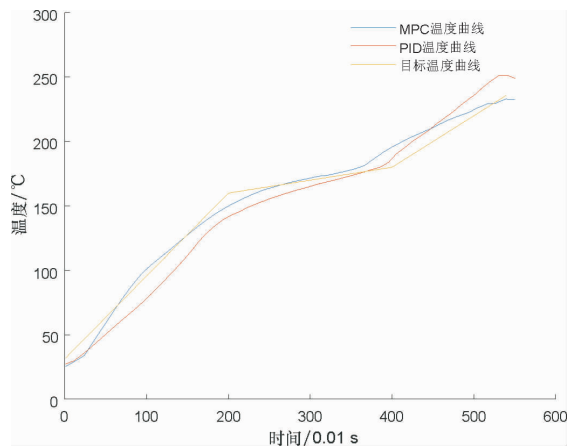


图 12 实验温度曲线对比图

Fig. 12 Comparison chart of experimental temperature profiles

参考文献:

- [1] 王志敏. TC31 高温钛合金激光焊接工艺与接头性能研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2023.

表 4 实验性能对比

Table 4 Experimental performance comparison

实验	实验温度与目标温度方差	最大绝对误差值/°C
PID 控制	120.70	19.28
模型预测控制	39.39	13.00

从图表和数据来看,PID 控制与模型预测控制(MPC)在实验温度跟踪性能上的比较可以从以下几方面进行讨论:

根据表格数据,PID 控制的温度方差为 120.70,而 MPC 的温度方差为 39.39。这表明 MPC 的控制精度明显优于 PID 控制,温度与目标温度的偏差波动较小,控制系统更加稳定。MPC 的方差显著小于 PID 控制,说明 MPC 能够更好地预测系统的未来温度,提前调整控制量,从而减少误差波动。

在最大绝对值误差方面,PID 控制的误差为 19.28 °C,而 MPC 的最大误差为 13.00 °C。MPC 的最大绝对值误差相对较小,这表明在应对较大扰动或非线性变化时,MPC 通过其预测功能依旧能够较好地跟踪目标温度。

结合实验结果,可以得出在激光软钎焊领域,MPC 方法不仅降低了控制系统地温度波动,还减少了大幅度误差,从而有助于提高焊接的质量和一致性。

4 结 论

本文基于能量守恒定律和集中参数法,构建焊接过程中激光加热的传热学数学模型,并应用 MPC 控制激光软钎焊过程中的温度,来实现焊点质量的控制。实验和比较结果验证了本文所提出的控制方法的正确性和有效性。对比传统 PID 控制方法,本文所述方法在焊接过程中不仅可以降低温度误差,而且可以降低温度变化差异过大的情况。通过滚动优化,可以实现温度误差在允许范围内,同时功率变化量也尽量小。算法计算量不大,效果明显,可以应用到设备中,以提高产品的生产效率和良品率。

- [2] 彭必荣,肖华,欧阳忠华,等. 激光软钎焊在微电子焊接领域的应用及发展[J]. 电焊机, 2023, 53(10): 65-70,89.
- [3] 宋建强,周燕红. 新能源汽车电机定子铁心的焊接生产设备及其焊接工艺[J]. 电器工业, 2024(1): 79-82.
- [4] 李欣,宋绮梦,张学强,等. 激光加工碳纤维增强符合材料及其在航空航天领域应用[J]. 中国激光,2024,51(4): 1-41.
- [5] 檀正东,周旋,王海英. 中国高端 SMT 学术会议,10 月 30-31 日,2020 年[C]. 西安:机械工业出版社,2020.
- [6] 张旭东,贝松伟. 激光钎焊质量影响因素及对策分析[J]. 汽车工艺与材料, 2021(10): 1-6.
- [7] 蒋振国. 基于能量分布调控的中厚板激光焊接质量优化研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2021.
- [8] 周卓挥. 激光软钎焊焊点成型控制与质量评价[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2018.
- [9] 易先军,周敏,刘健,等. 激光钎焊温度控制系统设计[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2016(9): 82-84,87.
- [10] 肖亚宁,孙雪,郭艳玲,等. 基于 BP-PID 的选择性激光烧结温度控制系统设计[J]. 机床与液压, 2021, 49(24): 95-100.
- [11] 张安迪,张艳荣,李涛. 论域可变的模糊 PID 控制在半导体激光器温度控制系统中的应用[J]. 光学学报, 2021, 41(12): 153-161.
- [12] 侯亚平. 碳罐电磁阀塑料激光焊接机温度控制策略优化及控制系统设计[D]. 赣州:江西理工大学, 2023.
- [13] Zhou K L, Xiong J T, Yang C H. Research on temperature control of plastic laser welding based on improved snake optimization algorithm[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2023, 2665(1): 012011.
- [14] Chen Z H, Cheng H, Ying Z, et al. A novel thermodynamic model and temperature control method of laser soldering systems[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2015:509031.
- [15] 党丽. 基于变论域模糊 PID 的金属热处理过程温度控制方法[J]. 自动化技术与应用,2024,43(1):14-17,21.
- [16] 程龙,韩森,李彤彤,等. 基于遗传算法的滑模控制系统在锅炉温度控制中的应用研究[J]. 现代计算机(专业版), 2016(24):7-10.
- [17] 周根弟. 高稳定度激光光源温度控制算法研究和实现[D]. 北京:北京邮电大学,2019.
- [18] 滕瑞. 高动态热压焊电源及其温度智能控制方法研究[D]. 贵阳:贵州大学,2023.
- [19] 梁龙,刘丕亮,陆建立,等. 模型预测控制在破碎机料位控制中的应用研究[J]. 电工技术,2023(20):4-8.
- [20] 陶文铨. 传热学[M]. 5 版. 北京:高等教育出版社, 2019.

【责任编辑:陈 钢】