

回流焊炉温曲线优化设计

孙沛源¹ 吴双琪¹ 吉风池²

(1.河海大学环境学院,江苏 南京 211100;2.河海大学理学院,江苏 南京 211100)

摘要:回流焊技术在电子制造领域应用广泛,现基于回流焊炉腔的传热机理,依据牛顿冷却定律和斯特藩-玻耳兹曼定律,将辐射传热换算为对流传热,建立非稳态的热传递常微分方程模型;基于能量守恒定律,推导电路板温度随时间变化的能量方程,利用欧拉递推公式求解模型得到小温区温度,并从优化产品质量、降低生产成本的角度,遍历搜索求解不同温度下过炉速度的最优值。同时,对模型炉温曲线与实验数据曲线进行了对比研究。

关键词:常微分方程;单目标规划模型;炉温曲线;回流焊;欧拉公式

DOI:10.19514/j.cnki.cn32-1628/tm.2021.14.019

0 引言

回流焊技术在电子制造领域应用广泛。采用回流焊工艺进行焊接时,是用局部加热的方式完成焊接任务,无须将印刷电路板浸入熔融的焊料中,因而被焊接的元器件受到的热冲击小;同时,在焊接过程中还能避免元器件被氧化,减少对元器件的损坏,从而相应地降低制造成本。

在生产过程中,控制回焊炉各部分温度满足工艺要求,对保证产品质量至关重要。因此,在实际生产前需通过实验测试对回焊炉各部分的温度设计进行控制和调整,得到生产过程中的最优控制方案。本文基于2020全国大学生数学建模竞赛A题,对炉温曲线模型进行探究。

1 问题重述

回焊炉内部包括4个大温区(预热区、恒温区、回流区和冷却区)、炉前区域和炉后区域,已知回焊炉的相关技术信息如下:

1.1 回焊炉内部尺寸

回焊炉内部含有11个小温区,长度均为30.5 cm,相邻小温区之间的间隙为5 cm。炉前、炉后区域长度均为25 cm。

1.2 温度和过炉速度控制

各温区温度和过炉速度可设定,要求小温区1~5温度保持一致,小温区8~9温度保持一致,小温区10~11保持25℃,具体区间范围如表1所示。炉前、炉后区域和小温区间隙不做温度控制,其温度与相邻温区温度有关;各温区边界温度与其相邻温区有关;生产车间温度恒定为25℃。回焊炉启动后,炉内空气温度稳定所需时间可忽略不计。

表1 控制信息表

项目名称	过炉速度/ (cm/min)	小温区 1~5/℃	小温区 6/℃	小温区 7/℃	小温区 8~9/℃	小温区 10~11/℃
区间范围	[65, 100]	[165, 185]	[185, 195]	[225, 245]	[245, 265]	25

1.3 温度检测方式

利用温度传感器检测。具体方法为设定各温区温度及传送带速度后,在焊接区域中心温度达到30℃时开始计时测温,记录数据并绘制炉温曲线。

1.4 制程界限

制程界限即炉温曲线满足的要求,具体如表2所示。

表2 制程界限表

界限名称	区间范围	单位
温度上升斜率	[0, 3]	℃/s
温度下降斜率	[3, 0]	℃/s
温度上升中在 90~150℃的时间	[60, 120]	s
温度大于 217℃的时间	[40, 90]	s
峰值温度	[240, 250]	℃

2 问题分析

印刷电路板在回焊炉中的炉温曲线问题,实质上是回焊炉内部与印刷电路板的非稳态传热问题,需综合考虑回焊炉控制约束以及制程界限,明确环境温度对印刷电路板的影响^[1],在此基础上建立炉温曲线模型,并对模型进行优化。

传热的基本方式包括热对流、热辐射以及热传导^[2]。印刷电路板的焊接区域中心温度传递以热对流和热辐射为主。首先,由于印刷电路板在回焊炉内匀速运动,炉内气体与印刷电路板之间存在质点的相对宏观位移,符合热对流的基本条件;其次,任一物体在绝对零度以上,都能发生辐射传热,而炉内温度较高,应考虑热辐射传热的影响;最后,由于印刷电路板较薄,且焊接中心的有效区域仅为表面含有锡膏的部分,炉内气体温度在短时间内达到稳定,可忽略热传导对印刷电路板的影响。传送带的过炉速度受制作工艺影响。印刷板的升温速度、电路板温度平衡情况等决定电路板的焊接质量,过高或过低的升温速度都会影响电路板成品的质量。因此,电路板焊接过程的炉温曲线应在制程界限范围内,并且传送带速度也应控制在一定范围内^[3]。

问题一:在已知传送带过炉速度和各温区温度前提下,要求解电路板焊接区域的温度变化规律。通过分析考虑可建立基于热对流和热辐射的常微分方程模型。

问题二:在问题一的基础上仅改变各温区的控制温度,要求解电路板的最大过炉速度,在满足制程界限的前提下最大化产品数量。

问题二实质上是在问题一模型基础上建立的传送带过炉速度的单目标规划模型。

3 模型假设

(1) 炉内气体垂直方向上分布均匀,水平方向上连续分布,且温度恒定;

(2) 只考虑电路板所处小温区段内的热辐射,忽略小温区之间的热辐射;

(3) 假设回焊炉内电路板为对称双面加热,且热传递在电路板的厚度方向上相等;

(4) 假设电路板的初始温度与车间温度相同。

4 模型建立

4.1 热传递的基本方式

导热有三种基本方式,即对流传热、热辐射以及热传导^[2]。由问题分析可知,印刷电路板在回焊炉中的传热以热对流和热辐射为主。

4.2 模型的准备

以传送带中心线为基准建立 x 轴,将预热区和恒温区合并为小温区1~5,此外将小温区6~9划分为回流区,小温区10~11划分为冷却区。已知印刷电路板两侧搭在传送带上,传送带不与焊接区域中心直接接触,因此炉内小温区的上下部分均可以通过炉内气体热对流直接对印刷电路板进行加热,为双面传热。

回焊炉分区及热传递方式示意图如图1所示。

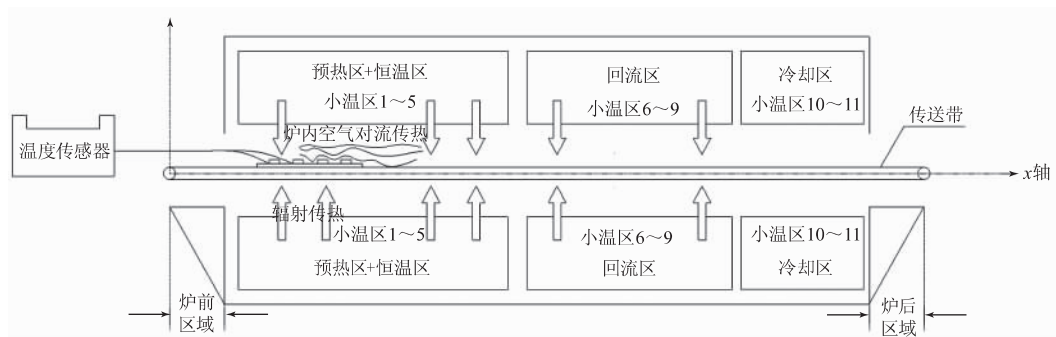


图1 回焊炉分区及热传递方式示意图

由于2020年全国大学生数学建模竞赛A题附件中所给数据为温度传感器从30℃开始每间隔0.5s自动监测记录的离散数据,不便于分析观察,又因为温度是连续变化的,所以采用最小二乘法将附件实验数据进行曲线拟合,运行调试后定性绘制炉温分区曲线,如图2所示。

对曲线的解释:

(1) 炉温曲线的斜率与温差有关。如图2所示,印刷电路板焊接中心温度与小温区炉腔内温度的温差越大,印刷电路板的炉温曲线就越陡,曲线斜率越大。随着温差减小,如恒温区,炉温曲线放缓,曲线斜率变小,并逐渐趋于水平。

(2) 由于温区间隙温度受到相邻温区温度的影响,并

且温度是连续变化的,所以从回流区到冷却区,温度由255℃连续降低到25℃,即印刷电路板经过回流区后的一小段时间内,炉内空气以及炉腔壁仍可将热量传递给印刷电路板,因此炉温曲线的峰值温度应在回流区外部达到。

4.3 模型的建立

明确回流焊工艺过程中能量的传递、吸收,在此基础上根据热量守恒定律建立模型如下:

4.3.1 能量的传递

首先,回焊炉内焊接区域中心的一个边界条件为对流,因此根据牛顿冷却公式可以得到:

$$Q_{11}=Ah_c(T_1-\mu) \quad (1)$$

式中: Q_{11} 为通过热对流传送的总能量; A 为焊接区域锡膏的表面积(m^2); h_c 为总热传递系数 $[\text{J}/(\text{m}^2\cdot\text{K})]$; T_1 为炉内气体的温度(K); μ 为焊接区域中心的温度(K)。

其次,回焊炉内焊接区域中心的另一个边界条件为辐射,因此根据热辐射传热公式可以得到:

$$Q_{12}=\frac{\sigma_0(T_2^4-\mu^4)}{\frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1 A_1}+\frac{1-\varepsilon_2}{\varepsilon_2 A_2}+\frac{1}{A_2\phi_{1,2}}} \quad (2)$$

式中: Q_{12} 为通过热辐射传递的总能量; σ_0 为黑体辐射系数; T_2 为炉腔壁的绝对温度(K); A_1 、 A_2 分别为锡膏的表面积及小温区加热板的表面积(m^2); ε_1 、 ε_2 分别为锡膏的灰度和小温区加热板的灰度; $\phi_{1,2}$ 为锡膏和小温区加热板的角系数。

为简化计算,将辐射传热换算为对流传热^[3],转化为牛

顿冷却公式的形式:

$$Q_{12}=Ah_r(T_2-\mu) \quad (3)$$

式中: h_r 为辐射换算后的对流传热系数。

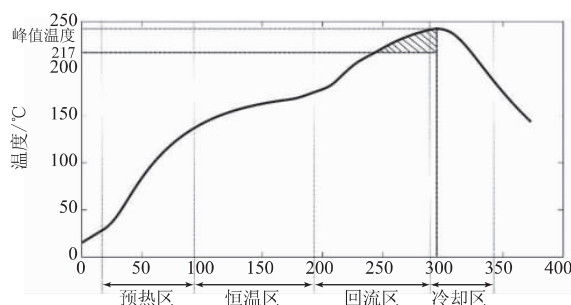


图2 实验炉温曲线

由于炉内空气温度竖向分布均匀且变化连续,即 $T_1=T_2$,因此可将对流传热系数与辐射转换后的对流传热系数进行相加,得到总对流传热系数 H :

$$H=h_r+h_c \quad (4)$$

最后得到 Δt 时间内边界传递的总能量为:

$$Q_i=AH(T_1-\mu)\Delta t \quad (5)$$

4.3.2 能量的吸收

电路板从炉内气体中吸收的总能量:

$$Q_n=Cm[\mu(t+\Delta t)-\mu(t)] \quad (6)$$

式中: Q_n 为印刷电路板焊接区域吸收的总能量; C 为锡膏的比热容; m 为焊接区域中心锡膏的质量。

由于:

$$m=\rho\varrho A \quad (7)$$

式中: ρ 为焊接区域锡膏的密度; ϱ 为焊接区域锡膏的厚度; A 为焊接区域锡膏的面积。

因此式(6)可以化为:

$$Q_n=C\rho\varrho A[\mu(t+\Delta t)-\mu(t)] \quad (8)$$

4.3.3 能量守恒定律

忽略空气与电路板热对流过程中的能量损失,由能量守恒定律得:

$$2Q_i=Q_n \quad (9)$$

将4.3.1和4.3.2中的表达式代入得:

$$2H[T(t)-\mu(t)]\Delta t=C\rho\varrho A[\mu(t+\Delta t)-\mu(t)] \quad (10)$$

式中:系数2是由于印刷电路板双面传热,两面都有能量传递。

常微分方程模型建立流程图如图3所示。

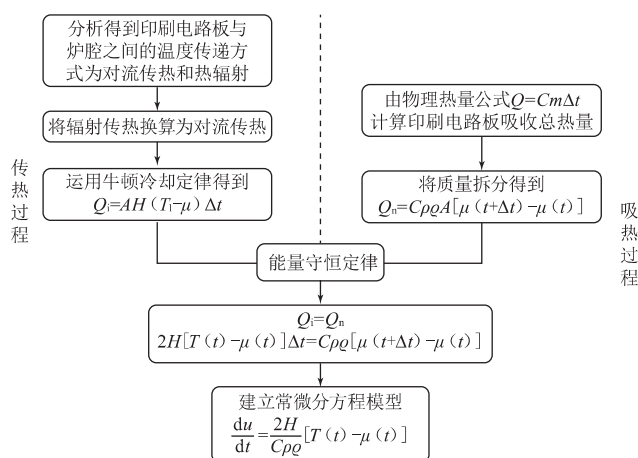


图3 常微分方程模型建立流程图

4.4 模型的求解

建立回焊炉焊接印刷电路板的热量传递模型:

$$2H[T(t)-\mu(t)]\Delta t=C\rho\varrho A[\mu(t+\Delta t)-\mu(t)] \quad (11)$$

将模型改写成常微分方程的标准形式,即:

$$\frac{d\mu}{dt}=\frac{2H}{C\rho\varrho}[T(t)-\mu(t)] \quad (12)$$

其中, C 、 ρ 、 ϱ 、 H 均为和印刷电路板相关的常量,因此

可以令:

$$K_0=C\rho\varrho/2H$$

K_0 定义为印刷电路板的热传递系数,由于电路板比热容、热对流传热系数是温度的函数,因此 K_0 也是温度的函数,但回焊炉内温度有所控制,上下波动幅度不大,因此可以合理推断猜想 K_0 在回焊炉内导热过程中为一个定值。对 K_0 的验证和模型求解如下:

第一步,计算热传递系数 K_0 。

根据附件数据以及各温区初始温度计算印刷电路板的 K_0 值,由于 $T(t)$ 的分布情况与各个温区温度以及电路板所在位置相关,因此选取温区1~5内 $T(t)$ 分布均匀的時刻进行计算,利用最小二乘法进行拟合。 K_0 的拟合曲线如图4所示。

$$\min\left\{\sum_{i=1}^n[K_0(\mu(t+\Delta t)-\mu(t))-(T(t)-\mu(t))]\right\} \quad (13)$$

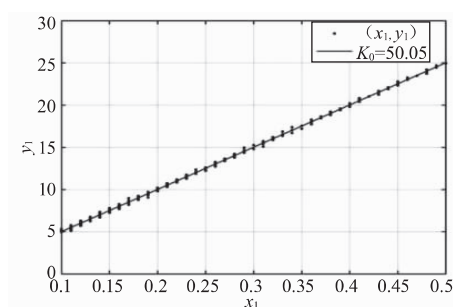


图4 K_0 的拟合曲线

从图4可以看出,横坐标回焊炉与印刷电路板的温度差随纵坐标印刷电路板相邻0.5 s间隔的温度差增大而线性增大,因此 K_0 为一个定值,至此验证了模型的简化是合理的,并对 K_0 进行求解得到 K_0 的数值为50.05。

第二步,根据新的温区温度求解出 $T(x)$ 温度分布曲线,如图5所示。

第三步,计算常微分方程的数值解。

$$\begin{cases} K[\mu(k+1)-\mu(k)]=[T(k)-\mu(k)]\Delta t, \\ T(k)=T[x(k)], \quad k=1, \dots, n, \\ x=vk, \quad k=1, \dots, n, \\ \mu(0)=25, \\ T(0)=25 \end{cases} \quad (14)$$

将时间 t 以0.5 s为间隔离散化为网格点 k ,利用欧拉公式法递推求解出焊接区域中心温度随时间的变化。

$$\begin{cases} \frac{d\mu(t)}{dt}=\frac{1}{K_0}[T(t)-\mu(t)], \\ T(t)=T[x(t)], \\ \Delta t=0.5 \end{cases} \quad (15)$$

模型炉温曲线如图6所示。

由于温度设定值与附件实验测试的温度设定值相近,因此若将问题一的传送带速度改为70 cm/min,所建模型的炉温曲线与实验测试炉温曲线应接近重合,绘制附件实验炉温曲线与模型炉温曲线对比图,如图7所示。

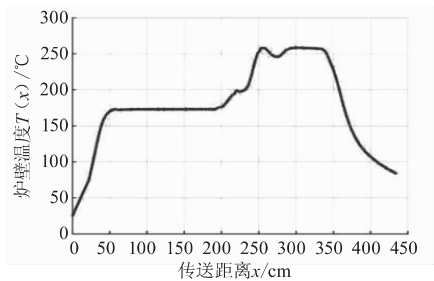


图5 炉壁温度沿传送距离的分布曲线

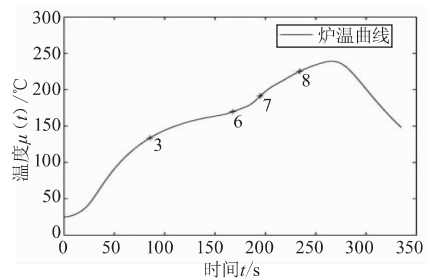


图6 模型炉温曲线

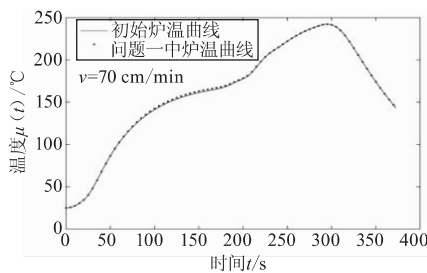


图7 炉温曲线对比

从图7可以看出,两条炉温曲线接近重合,所建立模型的准确度较高。小温区3、6、7中点以及小温区8结束处焊接区域中心的温度如表3所示。

表3 小温区温度

区域	3中点处	6中点处	7中点处	8结束处
温度 $\mu/^\circ\text{C}$	133.7	169.8	191.4	225.2

5 模型延伸

实际生产中,需要在保证印刷电路板产品质量的前提下最大化产品数量,即通过改变各温区的控制温度,使目标函数过炉速度 v 最大。

5.1 建立单目标规划模型

不改变回焊炉温度场传热模型的边界条件和传热方程,依据炉温曲线满足的制程界限,建立传送带最大过炉速度的单目标规划模型如下^[4]:

$$\text{s.t.} \begin{cases} -3 \leq \frac{d\mu(t)}{dt} \leq 3, \\ 60 \leq t_{\max}^{\mu=190} - t_{\min}^{\mu=150} \leq 120, \\ 40 \leq t_{\max}^{\mu=217} - t_{\min}^{\mu=217} \leq 90, \\ 240 \leq \mu(t)_{\max} \leq 250, \\ 65 \leq v \leq 100 \end{cases} \quad (16)$$

5.2 模型求解

根据上述建立的单目标规划模型进行求解。

第一步,由题给出的各温区温度的设定值拟合求出此时的 $T(x)$ 温度分布曲线。

第二步,结合问题一满足的边界条件和传热方程,在传送带过炉速度 $65 \sim 100 \text{ cm/min}$ 的调节范围内,不断改变 v 的大小,绘制出不同速度下的炉温曲线,如图8所示。

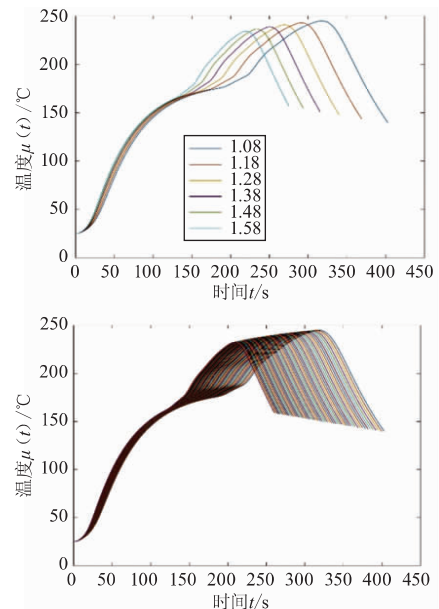


图8 不同传送速度下的炉温曲线

第三步,由于炉温曲线受到制程界限的限制,所以在第二步的基础上,加上限制条件,去除不符合制程界限的 v 值,绘制出符合条件的速度的炉温曲线,如图9所示。经过不断调试,得到传送带过炉速度 v 的取值区间 $[1.13, 1.31] \text{ cm/s}$ 。

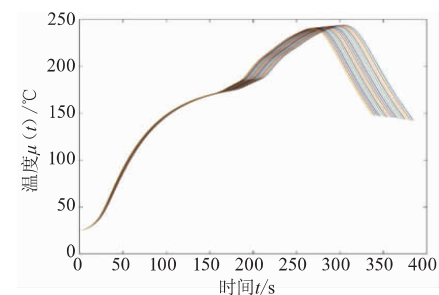


图9 允许传送速度范围内炉温曲线

第四步,得出传送带允许的最大过炉速度 v_{\max} 为 78.6 cm/min 。

遍历搜索的所有情况都满足温度上升和下降的斜率的限制区间,求解结果如表4所示。

6 灵敏度分析

在建立的模型中,对流传热系数由已知数据通过最小二乘拟合合法得到,存在一定的计算误差,研究模型对对流传热系数 K (本文为 K_0) 的灵敏性以探究模型的可靠性。基于对流传热系数 K 对传送带最大过炉速度 v_{\max} 的影响来进行灵敏度分析,具体结果如表5所示。(下转第52页)

用广泛的现场总线,由以研发和生产汽车电子产品著称的德国博世公司开发。CAN总线支持分布式控制、实时控制的串行通信总线协议,采用短报文帧及带有信息优先权及冲突检测的载波监听多路访问的媒介访问控制方式。CAN总线节点一般由单片机、CAN控制器以及CAN收发器三部分组成。CAN收发器电路如图5所示,采用CAN收发器专用芯片TJA1040实现。第1脚与单片机的CAN总线模块输出脚PM0相连,第4脚与PM1脚连接,第3脚接电源,第2脚接地,以此来实现车载自动伸缩挡雨帘智能系统CAN总线控制器与收发器之间的数据传输。为稳定共模输出,设计SPLIT为共模稳压的输出脚。第7和第8脚为CAN信号的差分输出脚,为使阻抗连续并消除反射,外接了2个60 Ω的终端电阻。

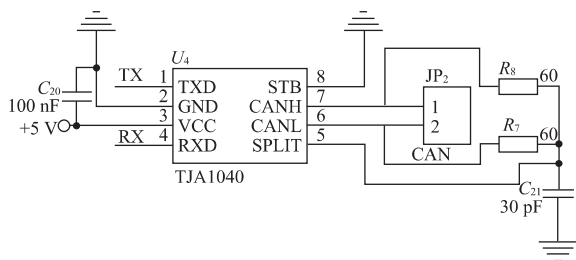


图5 收发器电路

5 结语

本文基于MC9S12XS128单片机设计与研发了一款车载自动伸缩挡雨帘智能系统,该系统主要包括MC9S12XS128

(上接第49页)

表4 各界限的求解结果

界限名称	区间范围	界限的数值	单位
温度上升中在 90~150 ℃的时间	[60, 120]	88.5	s
温度大于 217 ℃的时间	[40, 90]	85.5	s
峰值温度	[240, 250]	240.2	℃

表5 灵敏度分析结果

对流传热系数 K	50.00	50.05	50.10	50.20	50.30	50.40	50.50	50.60
传送带最大过炉速度 $v_{\max}/(\text{cm/s})$	1.30	1.31	1.31	1.31	1.31	1.31	1.30	1.30

从表5可以看出,对流传热系数 K 的小范围变化对最大过炉速度的影响不大,说明此时模型对 K 的敏感度较小, K 值的小范围误差不会对最终结果产生明显影响。

7 结语

本文基于2020全国大学生数学建模竞赛A题,探究回流焊炉腔的传热机理,以实验回流焊炉曲线数据为例进行分析,依据牛顿冷却定律和斯特藩-玻耳兹曼定律,将辐射传热换算为对流传热,建立非稳态的热传递常微分方程模型,经对比分析,模型炉温曲线与实验数据曲线重合度较高;并根据能量守恒定律,推导电路板温度随时间变化的能量方程,利用欧拉递推公式求解模型得到小温区温度,优化设计不同温度下过炉速度的最优值。此外,本文对传

单片机、微型气泵、卷帘电机、电子气阀、开关等。通过该系统硬件/软件方案、车辆原CAN总线通信节点、主程序进行创新设计,以及对整个系统的调试与优化,实现了车载自动伸缩挡雨帘智能系统的正常运行,从而有效解决了人们上下车时被雨淋湿的问题。

[参考文献]

- [1] 关宇豪,蒋园园. 智能网联汽车技术应用与发展趋势[J]. 汽车实用技术, 2018(22): 25-27.
- [2] 方志鹏,王帅,谢正华. 基于BDS和GPRS的智能汽车定位器设计[J]. 中国新技术新产品, 2018(22): 22-24.
- [3] 古冉,焦俊,孟珠李,等. 基于MC9S12XS128和LTC6803-4的WSN节点光伏充电管理系统[J]. 安徽大学学报(自然科学版), 2016, 40(6): 64-72.
- [4] 谢敏. 基于MC9S12XS128智能小车控制系统的应用研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2012.
- [5] 韩团军. 基于MC9S12XS128的直流电机PWM闭环控制系统设计[J]. 机床与液压, 2016, 44(7): 109-111.
- [6] 王维斌. 基于MC9S12XS128单片机的CAN总线通信节点设计[J]. 通信电源技术, 2019, 36(5): 36-38.

收稿日期: 2021-03-11

作者简介: 李亚鹏(1988—),男,宁夏人,硕士,讲师,研究方向: 汽车新能源。

热系数 K 进行了灵敏度分析,结果显示模型对 K 的敏感度较小,进一步验证了模型的可靠性。本文提出的优化设计方法对优化回流焊炉生产的产品质量、降低生产成本具有一定的指导意义。

[参考文献]

- [1] 彭传谦. 红外回流焊环境温度的设置及影响焊接质量的几个因素[J]. 舰船电子工程, 2001(2): 62-64.
- [2] 陈敏恒,潘鹤林,齐鸣斋. 化工原理[M]. 2版. 上海: 华东理工大学出版社, 2013.
- [3] 宋巍. 基于加热机理分析的回流焊过程仿真建模与有限元分析[D]. 沈阳: 东北大学, 2012.
- [4] 司守奎,孙玺菁. 数学建模算法与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.

收稿日期: 2021-03-08

作者简介: 孙沛源(2001—),男,江苏宿迁人,研究方向: 给排水科学与工程。

吴双琪(2000—),女,江西九江人,研究方向: 环境生态工程。

吉凤池(2000—),男,江苏盐城人,研究方向: 信息与计算科学。