

炉温曲线的设定

摘要

针对问题一，要求建立焊接中心温度随时间变化的数学模型。首先，建立间隙一维稳态导热线性温度模型。其次，根据一维非稳态导热的微分方程推导出焊接区域中心温度随时间变化的过程。焊接区域中心温度变化主要分为加热和冷却两大类：当环境温度大于焊接中心温度时，中心温度将随时间单调递增，是加热过程；当环境温度小于焊接中心温度时，中心温度将随时间单调递减，是冷却过程。接着，引入焊接区域中心的热物理性质系数（定义的电路板传热系数比上电路板的密度与比热容之积）参数b，化简得到温度变化速率的微分方程模型。故建立以参数b为决策变量，以制程界限为约束条件，以同一时间下模拟的焊接中心温度与附件中真实的温度误差平方和最小为目标函数的优化模型。针对模型的求解，首先需要求解焊接中心到电路板运动方向边缘的距离L为10.6cm，以求得某时间下焊接处具体的位置。其次利用夹逼法分别以步长为0.1、0.01、0.001三次逐次缩小b的范围。接着，对b进行进一步优化调参得到优化后的 b' 。最终，求得的模拟-实际温度误差平方和最小为4311.1。小温区3、6、7中点及小温区8结束处焊接区域中心的温度分别为138.72、174.15、194.23和229.03°C，并将每隔0.5s焊接区域中心的温度存放在“支撑材料”中的“result.csv”中。

针对问题二，建立以电路板传送速度为决策变量，以满足所有约束条件的传送速度集合中速度的最大值为目标函数的优化模型。根据制程界限的五个约束条件遍历传送速度，能够得到5个条件同时满足的传送带的过炉速度的集合，即为上述5个集合的交集U，求在U范围内的最大传送速度，即允许的最大传送带过炉速度。首先将各温区温度代入第一题分稳态热传导模型中。其次，由于已知传送带的过炉速度范围为65~100，范围较小，故直接利用MATLAB遍历过炉速度。接着，求得满足5个条件的所有传送带的过炉速度，最终求得在问题二给定的各温区温度设定值下，求出此时允许的最大传送带的过炉速度为87cm/min。

针对问题三，建立以焊接中心温度为217°C和峰值温度对应的时间*i*、*k*为决策变量，以阴影部分面积最小值为目标函数的优化模型。*i*、*k*作为阴影面积的直接影响因素受小温区的温度和电路板的传送速度影响。本题我们将阴影部分的面积转化为时间 ξ 由*i*到*k*比217 °C高出的温度值的积分方程。针对模型的求解，首先判断主次影响因素，主要影响因素有小温区7，小温区8~9的设定温度和传送带的过炉速度；次要影响因素为小温区1~5和小温区6的设定温度。利用MATLAB遍历夹逼计算，最终得出当各个小温区的设定温度分别为：174°C（小温区1~5），196°C（小温区6），225°C（小温区7），262°C（小温区8~9）；传送带的过炉速度为94cm/min。此时得到炉温曲线超过217°C到峰值温度所覆盖的面积最小为566.7639。

针对问题四，建立以阴影面积和对称位置温度差和分别由其最小值比上函数关系式后相加和的最大值为目标函数的双目标优化模型。首先将多目标优化问题转化为阴影面积小和以峰值温度对应的时间为对称轴两侧尽可能对称的双目标优化问题。其次，为了防止其中一个目标的数值过小导致双目标优化模型向一个目标倾斜，而忽略了另一个目标函数的优化，分别将阴影面积最小值比上阴影面积对应的函数关系式，对称位置温度差和的最小值比上对称位置温度差和对应的函数关系式，将两个分式均转化为(0,1)的范围内。此外，两分式前的系数均为1，在该目标优化模型中两个目标同等重要，两个分式和的范围为(0,2)。最终，MATLAB夹逼法遍历求得当各温区设定温度为174.8°C（小温区1~5），195.2°C（小温区6），225.4°C（小温区7），265°C（小温区8~9）；传送带的过炉速度为99.2cm/min，两个分式和的最大值为1.99565。此时对应的阴影部分面积为540.6913。

关键词：炉温曲线、一维稳态导热、一维非稳态导热、夹逼法

一、问题重述

1.1 背景介绍

在众多集成电路板生产加工的过程中，需将装有电子元件的印刷电路板放置在回焊炉的传送带上，利用高温加热将电子元件焊接在电路板上。在焊接过程中，回焊炉各个区域保持的工艺要求温度，对产品质量影响重大。回焊炉内部由众多小温区组成，整体上根据功能进行分区，可以分为预热区、恒温区、回流区、冷却区4个大温区。电路板在传送带上匀速进入回焊炉内进行加热焊接。

现有一个回焊炉由11个小温区和炉前、炉后区域构成。当回焊炉启用之后，炉内空气温度会在短时间内达到稳定，之后再进行焊接工作。炉前、炉后区域以及小温区之间的空隙不做特殊的温度处理，其温度与相邻温区的温度有关，边界温度同样受相邻温区温度影响。设定回焊炉各个部分温度以及传送带的过炉速度，通过温度传感器测得各个位置上的焊接区域中心的温度，即可得到炉温曲线。温度传感去在焊接区域中心温度到达30℃时开始工作，从电路板进入回焊炉开始计时。

在实际生产过程中，需要通过调节各温区的温度以及传送带的过炉速度使得产品质量尽可能好。此外，对小温区的的温度进行调整时，要求小温区1～5中温度保持一致，小温区8～9中的温度保持一致，小温区10～11中温度保持在25℃。传送带的过炉速度调节范围为65～100cm/min。

1.2 相关数据及条件

1. 该回焊炉中每个小温区长度为30.5cm，相邻小温区的间隙长度为5cm，炉前、炉后区域长度均为25cm。
2. 生产车间的温度保持在25℃。附件中所示实验中，各温区设定的温度分别为175℃（小温区1～5）、195℃（小温区6）、235℃（小温区7）、255℃（小温区8～9）以及25℃（小温区10～11）。且设定传送带的过炉速度为70cm/min；焊接区域的厚度为0.15mm。
3. 在附件中所作实验以及设定温度的基础上，各个小温区设定温度可以在±10℃的范围内进行调整。传送带的过炉速度调节范围为65～100cm/min。
4. 在焊接过程中，炉温曲线应满足一定要求，即制程界限，如下表：

表 1：炉温曲线制程界限

界限名称	最低值	最高值	单位
温度上升斜率	0	3	℃/s
温度下降斜率	-3	0	℃/s
温度在150℃和190℃之间的时间	60	120	s
温度大于217℃的时间	40	90	s
峰值温度	240	250	℃

1.3 需要解决的问题

1. 通过焊接区域温度变化规律建立数学模型。当假设过炉速度为78 cm/min，各个温区设定温度为173℃（温区1～5）、198℃（小温区6）、230℃（小温区7）、257℃（小温区8～9），给出该种状况下焊接区域中心的温度变化情况，同时列出小温

区3、6、7的中点和小温区8结束处的中心点温度，画出对应炉温曲线，并将每隔0.5s的温度结果在表格中列出。

2. 在各个温区设定温度为182°C（温区1~5）、203°C（小温区6）、237°C（小温区7）、254°C（小温区8~9）的情况下，确定允许的最大传送带过炉速度。
3. 为使焊接区域中心温度超过217°C的时间尽可能短，峰值温度尽可能低，即炉温曲线中超过217°C到峰值温度之间覆盖面积最小。求得在该情况下最优的炉温曲线，以及此时各温区设定温度和过炉速度以及相应面积。
4. 炉温曲线除需满足制程界限，还需使得以峰值为中心线，两侧超过217°C的炉温曲线尽可能对称。给出满足条件的最优炉温曲线，以及此时各温区的设定温度和过炉速度，同时给出相应指标值。

二、模型假设

1. 假设两小温区间间隙的温度不受人为等其他因素的影响，炉前、炉后区域的温度只受相邻温区和车间温度影响。
2. 假设炉内空气温度稳定，不受电路板进出而发生变化。
3. 假设间隙的温度呈线性变化。

三、符号说明

符号表示	文字说明
ξ	表示电路板自进入回焊炉开始计时的第 ξ 个时刻
t	表示第 ξ 个时刻电路板焊接区域中心的温度
a	表示热扩散率
$\nabla^2 t$	表示温度的Laplace算子
$\dot{\varphi}$	表示广义热源
ρ	表示电路板密度
c	表示电路板比热容
V	表示电路板的体积
A	表示电路板的表面积
h	表示表面传热系数
t_s	表示第 ξ 时刻对应的环境温度
θ	表示过余温度，即电路板与环境温度的温差
D	表示两个小温区间间隙的长度
T_i	表示第 <i>i</i> 个小温区的温度
T_r	表示间隙中到上一个小温区的距离为 r 的位点的温度
v	表示传送带的过炉速度
U	表示满足制程界限的传送带的过炉速度的集合
$t(\xi)$	表示第 ξ 时刻下的实际温度
$\xi(t)$	表示当温度为 t 时，对应的时刻
d_i	表示当温度为 i °C时，对应的时刻与中心线距离之差

注：其他符号将在下文给出具体说明

四、问题分析

4.1 对问题一的分析

问题一要求建立电路板焊接中心温度随时间变化的数学模型，给出焊接中心的温度变化情况，并画出随着传送时间变化的炉温曲线，计算出小温区3、6、7中点及小温区8结束处焊接区域中心的温度，给出每隔0.5 s焊接区域中心的温度。首先，根据各个温区设定的温度，确定小温区的温度，接着需要分析各个小温区间隙的温度分布。对此，我们将其视为一维稳态导热的微分方程。接着，分析焊接中心温度时间分布规律，转化为电路板比热容 c 、密度 ρ 、传热系数 h 、 θ 、电路板体积 V 和表面积 A 之间的关系式，前两者转化为定义系数 b ，后两者根据 $B_i < 0.1$ ，忽略侧面积。转化为厚度 d 。最后得到焊接中心温度变化速率与 b 、电路板厚度 d 和焊接中心的温度与环境温度差值 θ 之间的关系式。根据 θ 判断电路板经历的是冷却过程还是加热过程。此外，由于我们需要知道在某一时间下焊接处的具体位置，而即使则是从电路板的头部进入开始计时的，因此我们需要求出由焊接中心到电路板传送方向边缘的距离 L 。最终将各项已知数据代入，通过MATLAB遍历 b 可以求得一个模拟的理论温度变化曲线，在满足约束条件的前提下理论与实际的差方和最小，即为此时的最优温度变化曲线。故建立以 b （定义的电路板传热系数比上电路板的密度与比热容之积）为决策变量，以制程界限为约束条件，以同一时间下模拟的焊接中心温度与附件中真实的温度均方差关于时间的求和最小为目标函数的优化模型。

4.2 对问题二的分析

问题二要求已知各温区温度的设定值，确定满足约束条件的最大送带过炉速度。由题目已知传送速度的大范围为[65,100]cm/min。首先，根据制程界限的五个约束条件遍历传送速度，能够得到到5个条件同时满足的传送带的过炉速度的集合，即为上述5个集合的交集U，求在U范围内的最大传送速度，即允许的最大送带过炉速度。其次，由于题目中明确传送带的过炉速度调节范围为65~100，范围较小，故直接利用MATLAB以步长为1对传送带的过炉速度进行遍历。接着，求得满足5个条件的所有传送带的过炉速度，最终求得在问题二给定的各温区温度设定值下的最大送带的过炉速度。

4.3 对问题三的分析

问题三要求当理论的炉温曲线应使超过217℃到峰值温度所覆盖的面积最小。确定此时的最优炉温曲线，以及各温区的设定温度和传送带的过炉速度，并给出相应的覆盖面积。首先，将阴影部分的面积转化为时间 ξ 由*i*到*k*比217℃高出的温度值的积分方程，并且由于温度随时间分布是离散分布，而非连续分布的，故直接确定峰值温度为最近于240℃且大于240℃的某个值。其次，判断主次影响因素，主要影响因素有小温区7，小温区8~9的设定温度和传送带的过炉速度；次要影响因素为小温区1~5和小温区6的设定温度。其中各因素对阴影面积影响作用由大到小关系式为传送速度>小温区7的温度>小温区8~9的温度>小温区6的温度>小温区1~5的温度。因此，利用MATLAB遍历传送速度先大致确定传送速度对应的最小阴影面积，接着针对其他因素按照对阴影面积发挥的影响作用由大到小依次逐项优化，最终可以求得各温区对应的温度以及传送速度等参数，即可求得其对应的最小阴影面积和炉温曲线。

4.4 对问题四的分析

问题四，满足制程界限时，以峰值温度为中心线的两侧超过217℃的炉温曲线

应尽量对称，且焊接区域中心的温度超过217°C的时间不宜过长，峰值温度也不宜过高，阴影面积尽可能小。要求结合上述目标条件给出最优炉温曲线、各温区设定的温度及传送带过炉速度。首先将题目中的多目标优化问题转化为阴影面积尽可能小和以峰值温度对应的时间为对称轴两侧尽可能对称的双目标优化问题。其次，为了防止其中一个目标的数值过小导致双目标优化模型向一个目标倾斜，而忽略了另一个目标函数的优化，我们分别将阴影面积最小值比上阴影面积对应的函数关系式，对称位置温度差和的最小值比上对称位置温度差和对应的函数关系式，将两个分式均转化为(0,1)的范围内。此时两个分式的和的范围为(0,2)，此时我们的最终的目标函数是求和的最大值，即和越趋向于2，说明相对而言该条件下的阴影面积尽可能最小，两侧区域尽可能对称。最终，MATLAB夹逼法遍历求得当各温区设定温度和传送带的过炉速度。

五、模型的建立与求解

5.1 问题一的建模与求解

5.1.1 模型的建立

5.1.1.1 两小温区间隙温度模型的建立

假设在间隙的温度呈线性变化。若用 $T_e(r)$ 表示位于第 e 和第 $e+1$ 个小温区之间，且到第 e 个温区的距离为 r 时的温度， r 表示间隙中一点距离上一个小温区结束处的距离，用 D 表示两个小温区之间间隙的长度，则间隙中各个位点的温度表达式如下：

$$T_e(r) = \frac{T_e - T_{e-1}}{D} \cdot r + T_{e-1}, 2 \leq e \leq 11, e \in Z$$

上述表示相邻小温区的间隙温度满足线性均匀分布，且其中已知 $D = 5cm$, $r \in [0, 5]$ 。

5.1.1.2 炉前、炉后区域温度梯度模型的建立

温度变化规律同前所述，则对于炉前区域，可以得到如下表达式：

$$T'_r = \frac{T_1 - 25}{D'} \cdot r + 25$$

其中， T'_r 表示距离回焊炉入口处为 r' 时的温度，25表示生产车间温度为25°C。 T_1 表示第1个小温区的温度。 D' 表示炉前区域和炉后区域的长度，且已知 $D' = 25cm$, $r \in [0, 25]$ 。

对于炉后区域，可以得到如下表达式：

$$T''_r = \frac{25 - T_{11}}{D'} \cdot r + T_{11}$$

其中， T''_r 表示距离第11个温区出口处为 r'' 时的温度，25表示生产车间温度为25°C。 T_{11} 表示第11个小温区的温度。且其中已知 $D' = 25cm$, $r \in [0, 25]$ 。

5.1.1.3 各时刻温度变化模型的建立

在进行电路板焊接生产过程中，电路板在回焊炉中加热一定时间，以达到规定的温度，该热传递过程为典型的非稳态导热。同时电路板自身经过一个小温区后具

有一定的温度，即具有内热源。因此电路板在回焊炉中导热类型即为非稳态且有内热源的导热。满足的导热偏微分方程表达式^[1]如下：

$$\frac{\partial t}{\partial \xi} = a \nabla^2 t + \frac{\dot{\varphi}}{\rho c}$$

其中， ξ 表示电路板自进入回焊炉开始计时的第 ξ 个时刻， t 表示第 ξ 个时刻电路板焊接区域中心的温度， a 表示热扩散率， $\nabla^2 t$ 表示温度的Laplace 算子， $\dot{\varphi}$ 表示广义热源， ρ 表示电路板密度， c 表示电路板比热容。

由于物体的内部热阻可以忽略，温度与空间坐标无关，所以上式中温度的二阶导数项为0，则上述偏微分方程可以简化为常微分方程如下：

$$\frac{\partial t}{\partial \xi} = \frac{\dot{\varphi}}{\rho c} \quad (1)$$

$\dot{\varphi}$ 为广义热源，表示为热交换边界的热源计算，因而界面上交换的热量可以折算成整个物体的体积热源，表达式如下：

$$-\dot{\varphi}V = Ah(t - t_s) \quad (2)$$

其中 V 表示电路板的体积， A 表示电路板的表面积， h 表示表面传热系数， t_s 表示第 ξ 时刻对应的环境温度。

下面我们从冷却过程和升温过程对其进行分类讨论。

(1) 冷却过程

当电路板位于冷却区时，第 ξ 时刻电路板焊接区域中心温度 t 大于此时对应的环境温度 t_s ，即 $t > t_s$ 。因此，此时 $\dot{\varphi}$ 应为负值，即 $\dot{\varphi} < 0$ 。将式(2) 代入式(1) 中，可以得到：

$$\rho c V \frac{dt}{d\xi} = -Ah(t - t_s)$$

引入过余温度（电路板与环境的温差） $\theta = t - t_s$ ，则上式变成：

$$\rho c V \frac{d\theta}{d\xi} = -Ah\theta$$

即：

$$\frac{d\theta}{d\xi} = -\frac{A}{V} \cdot \frac{h}{\rho c} \cdot \theta \quad (3)$$

同时过余温度满足初始条件如下：

$$\theta(0) = t_0 - t_s = \theta_0 \quad (4)$$

对于厚度为 d 的电路板，得到其特征长度 $l = d/2$ ，则定义的 Bi 数满足下述表达式时，可以采用集中参数法。表达式如下：

$$Bi = \frac{hl}{\lambda} \leq 0.1$$

其中 λ 表示平板的导热系数。平板的导热系数、表面传热系数、特征长度都为固定常量。

查阅资料^[2], 大致可以得到某个电路板在一定环境下的导热系数为 $h = 1.70(w/m \cdot k)$ 。百度搜索^[3]得到, 电路板(成分以无机材料为主)的比热容 $c \in [0.84, 1.26](kj/kg \cdot k)$, 再加上已知电路板的厚度 $d = 2l$, 所以 $l = 0.075mm$ 。

将以上各数据代入公式大致可计算求得 $Bi \ll 0.1$, 即 Bi 很小, 可以采用集中参数法^[1]。

因此可以忽略电路板平板的侧面积, 用 S 表示电路板的上表面积, 则可以得到 $A = 2S$ 。将上式代入厚度表达式 $d = V/S$ 可以得到:

$$\frac{A}{V} = \frac{2}{d}$$

将上式代入式(3)中, 可以得到:

$$\frac{d\theta}{d\xi} = -2 \cdot \frac{h}{\rho c} \cdot \frac{\theta}{d} \quad (5)$$

假设电路板热物理性质参数(表面传热系数 h , 电路板密度 ρ , 电路板比容 c)为常数, 即不考虑电路板热物理性质参数随温度的变化, 则我们引入一个常数 b 表示:

$$b = \frac{h}{\rho c}$$

将上式代入式(5)中, 可以化简得到表达式如下:

$$\frac{d\theta}{d\xi} = -2b \cdot \frac{\theta}{d} \quad (6)$$

(2) 升温过程

当电路板位于炉内加热区域时, 第 ξ 时刻电路板焊接区域中心温度 t 小于此时对应的环境温度 t_s , 即 $t < t_s$ 。因此, 此时 $\dot{\varphi}$ 应为正值, 即 $\dot{\varphi} > 0$ 。同电路板在冷却区的方法相同, 同理可以得到:

$$\frac{dt}{d\xi} = \frac{A}{V} \cdot \frac{h}{\rho c} \cdot (t_s - t)$$

代入常数 b 和过余温度 θ 表达式, 可以得到:

$$\frac{d\theta}{d\xi} = -\frac{A}{V} \cdot \frac{h}{\rho c} \cdot \theta = -2b \cdot \frac{\theta}{d} \quad (7)$$

综上所述, 温度随时刻变化的最终模型如下:

$$\begin{cases} \frac{d\theta}{d\xi} = -2b \cdot \frac{\theta}{d} \\ \theta = t - t_s \\ b = \frac{h}{\rho c} \end{cases} \quad (8)$$

5.1.1.4 焊接中心到电路板运动方向边缘的长度 L

我们对电路板进行加热, 主要是对焊接区域中心进行加热, 但是题目中没有给出焊接区域中心到电路板运动方向边缘的长度, 我们也无从得知焊接区域中心从何

时进行加热。题目中从电路板进入回焊炉开始计时，但是此时，焊接区域中心并没有进入回焊炉，因此为考虑其对结果的影响，我们建立数学模型求得焊接区域中心到电路板运动方向边缘的长度 L ，从而得出某时刻焊接区域中心的具体位置，提高精度使结果更加贴合实际。图示如下：

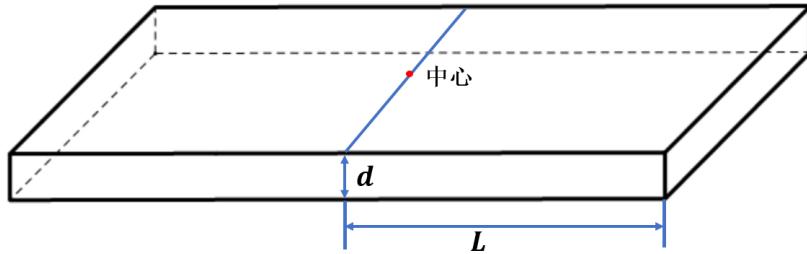


图 1：焊接区域中心到电路板运动方向边缘长度示意图

用 j 表示自焊接区域中心进入回焊炉开始至中心区域温度达到30 摄氏度的时长， L 表示焊接区域中心到电路板运动方向边缘的长度， v 表示回焊炉传送带的传送速度。 $(19 - j)$ 表示电路板运动距离等于 L 时的耗时，则可得 L 关于传送度 v 和 j 表达式如下：

$$L = v(19 - j)$$

每个 j 对应一个 L 值。接着，利用 j 时刻对应的温度与30℃的差值最小，建立如下目标函数表达式：

$$\min(t(j) - 30)$$

其中 $t(j)$ 表示在第 j 时刻时对应的焊接区域中心温度。因此将 L 进行遍历可以求解得到对应的 j 值，代入上式中可以求得使得温差最小的值对应的 j 值，此时即可求得的焊接中心到电路板边缘的长度 L 。

5.1.1.5 优化模型的建立

(1) 目标函数及决策变量的确定

利用上述模型可以求解得到一个理论近似曲线，我们对其进行优化，使得理论曲线与附件所给数据曲线尽可能一致，即使得理论值与实际值之间的差值平方和最小，用 $t(\xi)$ 表示第 ξ 时刻下的实际温度，用 $t'(\xi)$ 表示第 ξ 时刻下的理论温度，则目标函数表达式如下：

$$\min \sum_{\xi=19}^{373} (t(\xi) - t'(\xi))^2$$

由式(8)可以得到第 ξ 时刻下的理论温度由 b 决定，即决策变量为 b 。

(2) 约束条件的确定

在回焊炉电路板焊接生产中，炉温曲线应满足一定的要求，即制程界限，见表1。

1、炉温曲线中温度上升斜率在 $0 \sim 3$ 之间，温度下降斜率在 $-3 \sim 0$ 之间，表达式如下所示：

$$\begin{cases} -3 \leq \frac{d\theta}{d\xi} \leq 0, & t - t_s > 0 \\ 0 \leq \frac{d\theta}{d\xi} \leq 3, & t - t_s < 0 \end{cases}$$

2、 $\xi(t)$ 表示以温度 t 为自变量对应的时间函数，当已知温度为某一固定值 t' 时， $\xi(t')$

表示电路板中心为该温度 t' 时对应的时间。约束条件炉温曲线中温度上升过程中在150°C和190°C之间的时间在60s 到120s 之间，将 $t' = 150, 190$ 分别代入，得电路板中心该温度150度和190度时对应的时间分别为 $\xi(190)$ 和 $\xi(150)$ ，该约束条件表达式如下：

$$60 \leq \xi(190) - \xi(150) \leq 120, t - t_s < 0$$

3、用 $\xi^1(217)$ 表示温度上升过程中第一次上升到217°C的时刻， $\xi^2(217)$ 表示温度冷却过程中温度下降到217°C的时刻。温度大于217°C的时间在40s 到90s 之间，其具体表达式如下：

$$40 \leq |\xi^1(217) - \xi^2(217)| \leq 90$$

4、 $t(\xi)$ 表示以时间 ξ 为自变量的温度函数。 k 表示峰值温度对应的时间，根据时间-温度函数 $t(\xi)$ 表示峰值温度函数为 $t(k)$ ， ξ' 表示极小的时间步长。控制峰值温度在240°C和250°C之间的表达式如下：

$$\begin{cases} t(k - \xi') \leq t(k) \geq t(k + \xi') \\ 240 \leq t(k) \leq 250 \end{cases}$$

(3) 最终模型的确定

决策变量

$$b$$

目标函数

$$\min \sum_{\xi=19}^{373} (t(\xi) - t'(\xi))^2$$

约束条件

$$\begin{cases} \frac{d\theta}{d\xi} = -2b \cdot \frac{\theta}{d} \\ -3 \leq \frac{d\theta}{d\xi} \leq 0, t - t_s > 0 \\ 0 \leq \frac{d\theta}{d\xi} \leq 3, t - t_s < 0 \\ 60 \leq \xi(190) - \xi(150) \leq 120, t - t_s < 0 \\ 40 \leq |\xi^1(217) - \xi^2(217)| \leq 90 \\ t(k - \xi) \leq t(k) \geq t(k + \xi) \\ 240 \leq t(k) \leq 250 \end{cases}$$

5.1.2 模型的求解

(1) 夹逼法缩小 b 的范围，求解 b 的最优解

因为决策变量为 b ，取不同的 b 可以得到不一样的炉温曲线。利用模型进行炉温曲线求解。对 b 进行粗略调整得到大致范围在(0.1, 2)内，我们运用夹逼法缩小 b 的遍历范围来减少运行时间，提高精度。用MISS值表示拟合曲线的理论值与附件中实际值温度之差的平方和。在一定范围内MISS值随着 b 的增大，先减小后增大。故据此通过夹逼法来缩小 b 的范围，首先在(0.1, 2) 的范围内，以步长为0.1进行遍历，得到20个MISS 值如下表所示：

表 2: (0.1,2)范围内, 步长为0.1, 求得的20个MISS值

b	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
MISS	5112172.33	1945644.74	844787.22	452627.09	350872.88
b	0.6	0.7	0.8	0.9	1
MISS	382088.88	478189.35	608182.09	753293.22	904817.97
b	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
MISS	1053301.58	1200654.86	1340359.26	1471370.34	1599713.83
b	1.6	1.7	1.8	1.9	2
MISS	1719488.94	1830835.69	1934055.38	2036957.11	2125342.23

由表2可知, 当 $b \in (0.4, 0.6)$ 范围内时, MISS值先减小后增大, 说明 b 的最优解在该范围内, 取步长为0.01进行遍历, 求得20个MISS值如下表所示:

表 3: (0.4,0.6)范围内, 步长为0.01, 求得的20个MISS 值

b	0.41	0.42	0.43	0.44	0.45
MISS	445298.03	425946.43	409282.88	395110.50	383249.01
b	0.46	0.47	0.48	0.49	0.5
MISS	373533.1	365811.02	359943.13	355800.91	353265.82
b	0.51	0.52	0.53	0.54	0.55
MISS	350737.94	349724.37	351223.75	353939.72	357791.84
b	0.56	0.57	0.58	0.59	0.6
MISS	362705.38	368610.86	375443.61	383143.37	391653.93

由表3可知, 当 $b \in (0.50, 0.52)$ 范围内, MISS值先减小后增大, 说明 b 的最优解在(0.50, 0.52)范围内, 取步长为0.001进行遍历, 求得20个MISS值如下表所示:

表 4: (0.50,0.52)范围内, 步长为0.001, 求得的20 个MISS值

b	0.501	0.502	0.503	0.504	0.505
MISS	349486.65	349458.86	349444.85	349444.50	349457.74
b	0.506	0.507	0.508	0.509	0.51
MISS	349484.47	349524.58	349578.00	349559.89	349483.01
b	0.511	0.512	0.513	0.514	0.515
MISS	349574.40	349678.72	349795.90	349925.83	350068.44
b	0.516	0.517	0.518	0.519	0.52
MISS	350223.64	350391.33	350571.44	350763.88	3350968.56

由表4中可知, 最终选取 $b = 0.504$ 作为最优解的近似解, 此时 $MISS = 349444.85$, 将 $b = 0.504$ 代入模型之中推导拟合出随时间变化的温度理论值, 同时绘制出温度理论值与温度实际值(附件)的曲线图, 如下:

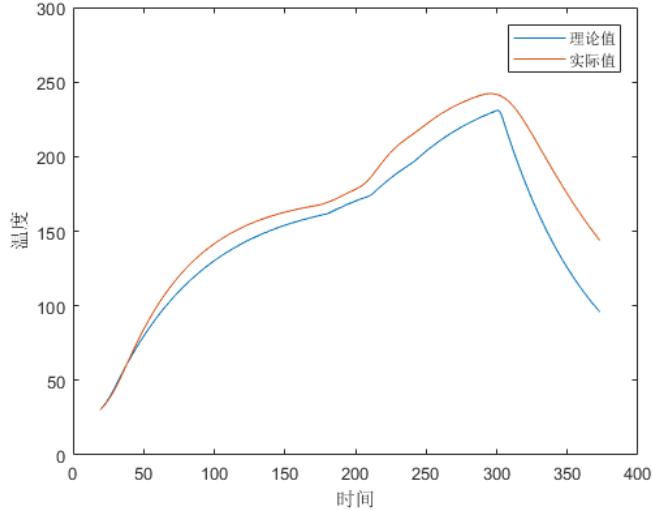


图 2: 焊接区域中心温度随时间变化的理论值与实际值对比曲线

从图中可以看出焊接区域中心温度随时间变化的理论值和实际值曲线相差较大，重合率低，同时从 $MISS = 349444.85$ ，也可以看出拟合效果不佳。

(2) 模型的优化

由上述直观结果可以看出，将决策变量 b 看成一个常量，并对其进行遍历求得最优解的方式得到最终理论值结果曲线与实际值曲线相差较大，因此直接将其看作常数行不通。

通过查阅文献^[2]可知，决策变量 b 不单单是个恒定不变的值，而应该随着温度变化而发生变化。优化之后的决策变量用 b' 表示，则在温度升温过程中，优化前决策变量加一个常数 λ 即为优化后的决策变量；在温度下降过程中，优化前决策变量减一个常数 μ 即为优化后的决策变量。得到优化后的决策变量 b' 表达式如下：

$$b' = \begin{cases} b + \lambda t, & t < t_s \\ b - \mu t, & t > t_s \end{cases}$$

其中两个常数同上利用夹逼法减少遍历范围，最终求得使得 $MISS'$ 值（理论值与实际值温度之差的平方和）最小时的两个常数即为所求。计算求得 $\lambda = 0.0015, \mu = 0.0011$ ，将求得常数代入上述表达式中，则有：

$$b' = \begin{cases} b + 0.0015t, & t < t_s \\ b - 0.0011t, & t > t_s \end{cases}$$

将上述表达式代入原模型中，形成一个优化之后的模型，推导出随时间变化的温度理论值，绘制出随时间变化的温度理论值和实际值曲线图如下：

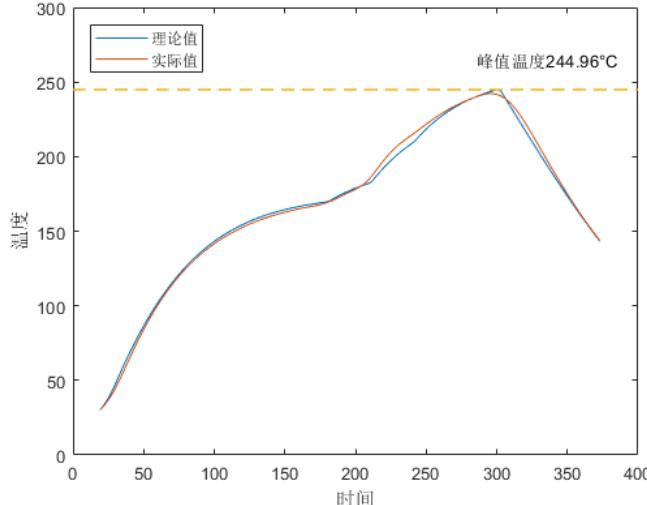


图 3: 优化后焊接区域中心温度随时间变化的理论值与实际值对比曲线

从图2中可以看出优化后焊接区域中心温度随时间变化的理论值与实际值曲线重合度很高，同时根据求得的 $MISS$ 值为4311.7，比原来模型的 $MISS$ 值减小了很多，说明模型的优化是有很大作用的。

(3) 优化后模型合理性分析:

在回焊炉电路板焊接生产中，炉温曲线应该满足一定的要求，称为制程界限，具体要求见表1。利用优化后模型，将题目中所给实验的各温区设定温度175°C（小温区1~5）、195°C（小温区6）、235°C（小温区7）、255°C（小温区8~9）和传送带的过炉速度为70cm/min的情况下，代入数据对相关参数进行求解，得到结果如下表：

表 5: 改进后模型求解得到的制程界限

界限名称	数值	是否满足制程界限
温度上升斜率	2.1876	是
温度下降斜率	-1.4875	是
温度上升过程中在150~190°C的时间	106.5290	是
温度大于217°C的时间	72.744	是
峰值温度	244.9617	是

由表2中可以求得改进后的炉温曲线的制程界限满足制程界限，因此我们认为改进后模型较为合理。

同时求得 $MISS = 4311.7$ 较小，理论曲线与实际曲线相似度高，可以认为改进后模型较为合理，采用优化后模型进行求解。

(4) 结果求解

将问题1中给出的过炉速度、各温区温度设定值代入上述优化后的模型中，即可求解得到相应的炉温曲线以及每隔0.5s焊接区域中心温度的具体数据见result.csv。绘制炉温曲线如下：

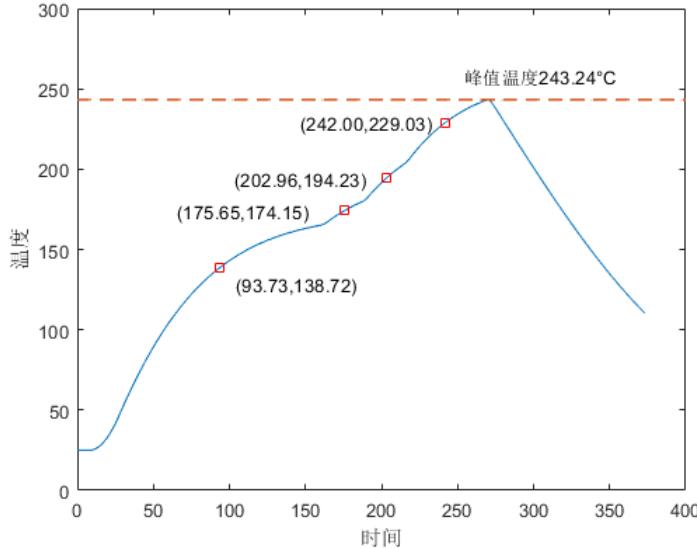


图 4: 问题一情况下绘制的炉温曲线示意图

从计算结果和图像可知，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为如下表：

表 6: 各个特征点焊接区域中心温度

特征点	小温区3中点	小温区6中点	小温区7中点	小温区8结束处
时间(s)	93.73	175.65	202.96	242.00
温度(°C)	138.72	174.15	194.23	229.03

利用模型可以求解得到焊接区域中心到电路板运动方向边缘的长度 $L = 10.6cm$ ，据此即可求得计数器开始计时至19s期间的焊接区域中心温度变化，具体结果见result.csv。

5.1.3 结果分析

根据计算求解得到的焊接区域中心温度随时间的变化数据，我们可以求得在炉内加热区时，温度上升斜率由大变小，在大致恒温区时趋于0，后再次由小变大，到达峰值温度为243.24°C。之后焊接区域中心进入冷却区，温度下降速度快。在问题一的条件下的制程界限结果表格如下：

表 7: 问题一条件下的制程界限

界限名称	数值	是否满足制程界限
温度上升斜率	2.1794	是
温度下降斜率	-1.4875	是
温度上升过程中在150 ~ 190°C的时间	86.135	是
温度大于217°C的时间	61.2020	是
峰值温度	243.2380	是

从上述表格中可以进一步证明模型的合理性。同时根据表格中给出焊接区域中心温度随时间变化的数据结果得出，当时间在8s之前时，焊接区域中心温度与车间温度一致为25°C。与利用焊接中心到电路板运动方向边缘的长度 $L = 10.6cm$ ，当传送带速度为78cm/min，计算可得焊接区域中心开始进入回焊炉的时间为8.15s，与结果给出的数据一致，进一步验证了模型的准确性和合理性。

5.2 问题二的建模与求解

5.2.1 模型的建立

问题二假设给定各温区的温度设定值，求得在炉温曲线满足一定要求，即满足制程界限时的所有传送带过炉速度，并从中选取最大值。根据制程界限表格（见表1），我们可以得出：

1、求得满足温度上升斜率在 $0 \sim 3$ 之间的所有传送带的过炉温度，组成一个集合记为 A_1 ，即炉温曲线满足以下等式时，求得的传送带的过炉速度 $v \in A_1$ 。等式如下：

$$0 \leq \frac{d\theta}{d\xi} \leq 3, t < t_s$$

2、求得满足温度下降斜率在 $-3 \sim 0$ 之间的所有传送带的过炉温度，组成一个集合记为 A_2 ，即炉温曲线满足以下等式时，求得的传送带的过炉速度 $v \in A_2$ 。等式如下：

$$-3 \leq \frac{d\theta}{d\xi} \leq 0, t > t_s$$

3、求得满足在温度上升过程中在 $150 \sim 190^\circ\text{C}$ 的时间在 $60 \sim 120\text{s}$ 之间的所有传送带的过炉温度，组成一个集合记为 A_3 ，即炉温曲线满足以下等式时，求得的传送带的过炉速度 $v \in A_3$ 。等式如下：

$$60 \leq \xi(190) - \xi(150) \leq 120, t < t_s$$

其中用 $\xi(t)$ 表示以温度 t 为自变量对应的时间函数，则 $\xi(190), \xi(150)$ 分别表示焊接区域中心为 $190^\circ\text{C}, 150^\circ\text{C}$ 时对应的时刻。

4、求得满足温度大于 217°C 的时间在 $40 \sim 90\text{s}$ 之间的所有传送带的过炉温度，组成一个集合记为 A_4 ，即炉温曲线满足以下等式时，求得的传送带的过炉速度 $v \in A_4$ 。等式如下：

$$40 \leq \xi^1(217) - \xi^2(217) \leq 90$$

其中 $\xi^1(217), \xi^2(217)$ 分别表示焊接区域中心为 217°C 时对应的两个时刻，其一时刻在温度上升过程中，另一时刻在冷却过程中。

5、求得满足峰值温度在 $240 \sim 250\text{s}$ 之间的所有传送带的过炉温度，组成一个集合记为 A_5 ，即炉温曲线满足以下等式时，求得的传送带的过炉速度 $v \in A_5$ 。等式如下：

$$240 \leq t(k) \leq 250$$

其中 $t(k)$ 分别表示峰值温度，且此时时刻为 k ，同时用 ξ' 表示极小的时间步长，则以下等式可以表示出 $t(k)$ 为峰值温度，表达式如下：求得满足温度大于 217°C 的时间在 $40 \sim 90\text{s}$ 之间的所有传送带的过炉温度，组成一个集合记为 A_4 ，即炉温曲线满足以下等式时，求得的传送带的过炉速度 $v \in A_4$ 。等式如下：

$$40 \leq \xi^1(217) - \xi^2(217) \leq 90$$

其中 $\xi^1(217), \xi^2(217)$ 分别表示焊接区域中心为 217°C 时对应的两个时刻，其一时刻在温度上升过程中，另一时刻在冷却过程中。

综上，可以得到5个条件同时满足的传送带的过炉速度的集合，即为上述5个集合的交集，表达式如下：

$$U = A_1 \cap A_2 \cap A_3 \cap A_4 \cap A_5$$

即传送带的过炉速度 $v \in U$ 。因此目标函数即为在集合 U 中选取一个最大值，即为问题中要求求得的允许的最大传送过炉速度，目标函数表达式如下：

$$\max v, v \in U$$

5.2.2 模型求解

题目中明确传送带的过炉速度调节范围为 $65 \sim 100$ ，范围较小，利用MATLAB对传送带的过炉速度进行遍历，步长为1。求得满足5个条件的所有传送带的过炉速度，并最终求得在问题二给定的各温区温度设定值下，允许的最大传送带的过炉速度。利用MATLAB求解得到，当各温区温度设定值分别为 182°C （小温区1~5）、 203°C （小温区6）、 237°C （小温区7）、 254°C （小温区8~9），允许的最大传送带的过炉速度为 87m/s 。

5.2.3 结果分析

(1) 初步验证结果准确性

求解得到传送带过炉速度为 87cm/min 时的制程界限的表格如下：

表 8: 问题二中过炉速度为 87cm/min 时的制程界限

界限名称	数值	是否满足制程界限
温度上升斜率	2.3439	是
温度下降斜率	-1.4875	是
温度上升过程中在 $150 \sim 190^\circ\text{C}$ 的时间	77.0350	是
温度大于 217°C 的时间	56.0330	是
峰值温度	240.2269	是

根据题意分析可得，在各温区温度设定值相同的情况下，随着传送带过炉速度增大，焊接区域中心加热时间缩短，即峰值温度降低。因此传送带过炉速度与峰值速度之间具有单调关系，过炉速度越大，峰值速度越小。

在本题中，要求求得满足条件时的最大传送带过炉速度，即使得峰值速度在许可范围内，尽可能小即大于 240°C 且尽可能趋于 240°C 。同时表8中的峰值温度为 240.2269 ，大于 240°C 且趋于边界值，可以验证得出满足条件时传送带的最大过炉速度为 87cm/min 是正确的。

(2) 进一步验证结果准确性

为进一步验证结果的准确性，我们对传送带的过炉速度为 86cm/min 和 88cm/min 的情况进行比较说明，进一步验证结果的准确性。同理可以求解得到两种情况下的制程界限表格如下：

表 9: 问题二中过炉速度为 86cm/min 时的制程界限

界限名称	数值	是否满足制程界限
温度上升斜率	2.3415	是
温度下降斜率	-1.4875	是
温度上升过程中在 $150 \sim 190^\circ\text{C}$ 的时间	78.5500	是
温度大于 217°C 的时间	57.1660	是
峰值温度	240.5452	是

表 10: 问题二中过炉速度为88cm/min时的制程界限

界限名称	数值	是否满足制程界限
温度上升斜率	2.3463	是
温度下降斜率	-1.4875	是
温度上升过程中在150 ~ 190°C 的时间	75.5620	是
温度大于217°C 的时间	54.9130	是
峰值温度	239.9066	否

表9, 表10中的数据更加证实了传送带过炉速度与峰值速度之间的单调关系规律: 过炉速度越大, 峰值速度越小。且当传送带的过炉速度再一次提高时, 峰值温度不满足处在[240, 250]区间的条件, 可以说明传送带的过炉速度为87cm/min时确定为允许的最大传送带的过炉速度。

5.3 问题三的建模与求解

5.3.1 模型的建立

问题三中要求求得的理想炉温曲线应使得超过217°C 到峰值温度 $t(k)$, 所覆盖的面积最小。设 i 表示温度上升过程中的某一时刻, 该时刻对应温度为217°C。且 $i < k$, $t(i)$ 表示第*i*时刻对应的焊接区域中心温度, 则其满足如下表达式:

$$t(i) = 217$$

同时峰值温度满足以下等式:

$$t(k - \xi') \leq t(k) \leq t(k + \xi')$$

其中 ξ' 表示极小的时间步长。

由上述两个表达式可以求解 i, k , 则阴影部分面积的表达式如下:

$$S_{\text{阴}} = \int_i^k (t(\xi) - 217) d\xi$$

则目标函数为:

$$\min S_{\text{阴}}$$

在焊接过程中, 焊接区域中心的温度超过217°C 的时间不宜过长, 峰值温度也不宜过高, 焊接区域中心的温度超过217°C 的时间和峰值温度决定理想炉温曲线应使超过217°C 到峰值温度所覆盖的面积。换而言之, 当理想炉温曲线超过217°C 到峰值温度所覆盖的面积最小时, 焊接区域中心温度超过217°C 的时间一定不长, 峰值温度一定不会很高。因此该约束条件可以忽略不计。

同时各小温区设定温度可以在题目中描述的实验设定温度的基础上, 进行±10°C 范围内的调整, 则各个温区的环境设定波动范围为约束条件, 表格如下:

表 11: 各温区设定温度变化范围

各温区编号	1 ~ 5	6	7	8 ~ 9	10 ~ 11
温度范围	[165,185]	[185,205]	[225,245]	[245,265]	25

其他约束条件同问题一中所示制程界限。

建立最终优化模型:

决策变量:

$$i, k$$

目标函数:

$$\min S_{\text{阴}}$$

约束条件:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\theta}{d\xi} = -2b \cdot \frac{\theta}{d} \\ -3 \leq \frac{d\theta}{d\xi} \leq 0, t - t_s > 0 \\ 0 \leq \frac{d\theta}{d\xi} \leq 3, t - t_s < 0 \\ 60 \leq \xi(190) - \xi(150) \leq 120, t - t_s < 0 \\ 40 \leq |\xi^1(217) - \xi^2(217)| \leq 90 \\ t(k - \xi') \leq t(k) \geq t(k + \xi') \\ 240 \leq t(k) \leq 250 \\ t_{s(1-5)} \in [165, 185] \\ t_{s6} \in [185, 205] \\ t_{s7} \in [225, 245] \\ t_{s(8-9)} \in [245, 265] \\ t_{s(10-11)} = 25 \end{array} \right.$$

5.3.2 模型的求解

(1) 判断主次影响因素

1、当小温区1~5的设定温度在[165, 185]范围内波动时，随机取两个数值，固定其他因素保持不变得到炉温曲线图；当小温区6的设定温度在[185, 205]的范围内随机取两个值，固定其他因素保持不变，得到炉温曲线图。曲线图如下：

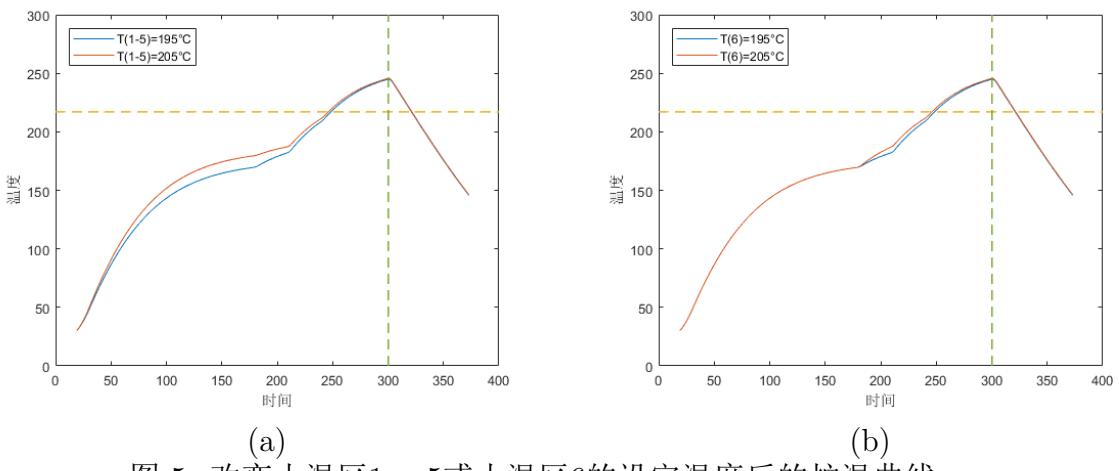


图 5: 改变小温区1~5或小温区6的设定温度后的炉温曲线

由上图5中是(b)图中可以观察得出，保持其他条件不变，只改变小温区1~5的设定温度对整体阴影部分面积变化不大，即小温区1~5的设定温度对炉温曲线超

过 217°C 到峰值温度所覆盖的面积影响程度较小，视作次级影响因素。同理得出小温区6的设定温度对阴影面积的影响程度较小，同小温区1~5的设定温度一致，都为次级影响因素。

2、小温区7的设定温度在 $[225, 245]$ 的范围内波动，随机取两个数值，固定其他因素，可以得到炉温曲线图如下图(c)。同理小温区8~9的设定温度在 $[245, 265]$ 的范围内波动，随机取两个数值，得到对应变化的炉温曲线图如下图(d)：

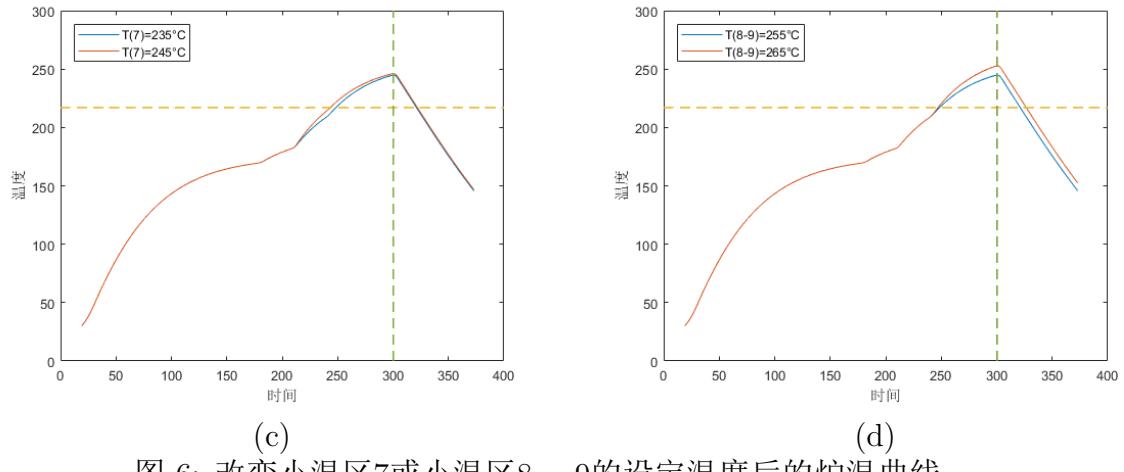


图 6: 改变小温区7或小温区8~9的设定温度后的炉温曲线

由上图可以观察得出，小温区7的设定温度对阴影面积影响程度相较于前两个参数较大，较(d)较小，视为主要影响因素。则影响更大的小温区8~9的设定温度同样为主要影响因素。

传送带的过炉速度在 $[65, 100]$ 的范围内波动，随机取两个数值，固定其他因素，可以得到炉温曲线图如下图：

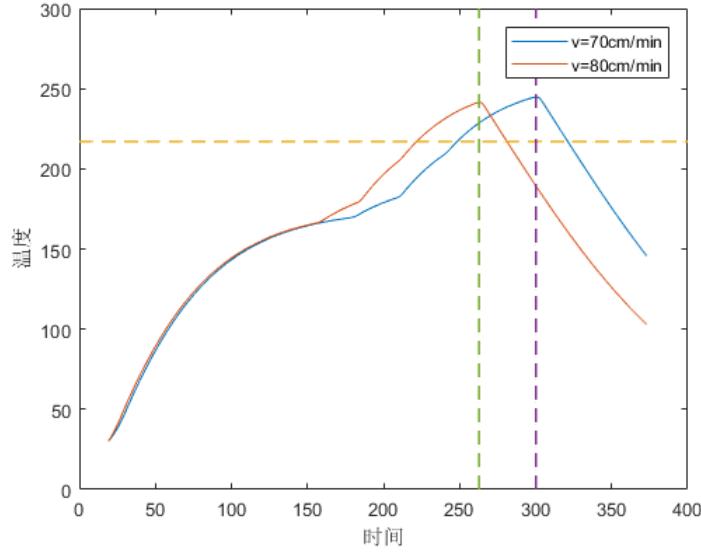


图 7: 改变传送带过炉速度后的炉温曲线

可以得出，当传送带过炉速度减小，阴影部分面积也随之减少，且传送带过炉速度对阴影部分面积的影响在五个因素中最大，自然也是主要影响因素。

综上所述，可以得出主要影响因素有小温区7，小温区8~9的设定温度，传送带的过炉速度；次要影响因素为小温区1~5，小温区6的设定温度。

(2) 优先考虑主要影响因素，夹逼法遍历求解

判断得到小温区1～5，小温区6的设定温度为次要影响因素。因为小温区1～5设定温度范围为[165, 185]，小温区6的设定温度范围为[185, 205]，我们将设定温度范围中间值作为暂定设定温度，即小温区1～5的设定温度为175℃，小温区6的设定温度为195℃。在此种情况下，对于另外几个影响因素进行遍历探究，从而求得阴影面积较小的情况。

首先小温区7设定温度范围为[225, 245]，小温区8～9的设定温度范围为[245, 265]，传送带的过炉速度范围为[65, 100]，分别对3个影响因素以1为步长进行遍历，得到阴影面积最小时各个参数的数值以及此时对应的阴影面积，如下表：

表 12: 在范围内分别以步长为1遍历主要影响因素得到最优结果

参数	温区1～5	温区6	温区7	温区8～9	过炉速度	阴影面积
数值	175	195	225	260	99	541.5644

当在三个影响因素范围内分别以步长为1进行遍历时，得到阴影部分面积最小值为541.5644，此时小温区7的设定温度为225℃，小温区8～9的设定温度为260℃，过炉速度为99cm/min。

利用夹逼法缩小范围，得到小温区7的遍历范围缩小为[224, 226]，小温区8～9设定温度的遍历范围缩小为[264, 266]，传送带的过炉速度的遍历范围缩小为[98, 100]，都以步长为0.1，进行遍历，求得此时阴影面积最小的情况，如下：

表 13: 步长为0.1遍历主要影响因素得到最优结果

参数	温区1～5	温区6	温区7	温区8～9	过炉速度	阴影面积
数值	175	195	225.1	265	99.1	540.7154

从表13中可以得出当固定小温区1～5设定温度和小温区6设定温度，对另外三个因素利用夹逼法进行遍历求解得到阴影面积最小值为540.7154。此时，此时小温区7的设定温度为225.1℃，小温区8～9的设定温度为265摄℃，过炉速度为99.1cm/min。

(3) 进一步考虑次要影响因素

以上求解的阴影面积都是在固定两个次要影响因素上，事实上，虽然小温区1～5和小温区6的设定温度对阴影面积影响较小，但是还是有一定的影响。因此我们对两个影响因素的设定温度分别在范围[165, 185]，[185, 205]，以步长为1进行遍历，求得此时阴影面积最小的情况同表13中显示。

利用夹逼法缩小范围，得到小温区1～5的遍历范围缩小为[174, 176]，小温区6设定温度的遍历范围缩小为[194, 196]，都以步长为0.1，进行遍历，求得此时阴影面积最小的情况，如下：

表 14: 步长为0.1遍历次要影响因素得到最优结果

参数	温区1～5	温区6	温区7	温区8～9	过炉速度	阴影面积
数值	175.1	194.8	225.1	265	99.1	540.4573

最终得出当各个小温区的设定温度分别为：175.1℃（小温区1～5），194.8℃（小温区6），225.1℃（小温区7），265℃（小温区8～9）；传送带的过炉速度为99.1cm/min。

此时得到炉温曲线超过217°C到峰值温度所覆盖的面积最小为540.4573, 即 $\min S_{\text{阴}} = 540.4573$ 。

绘制出在问题三的情况下的最优炉温曲线图像如下:

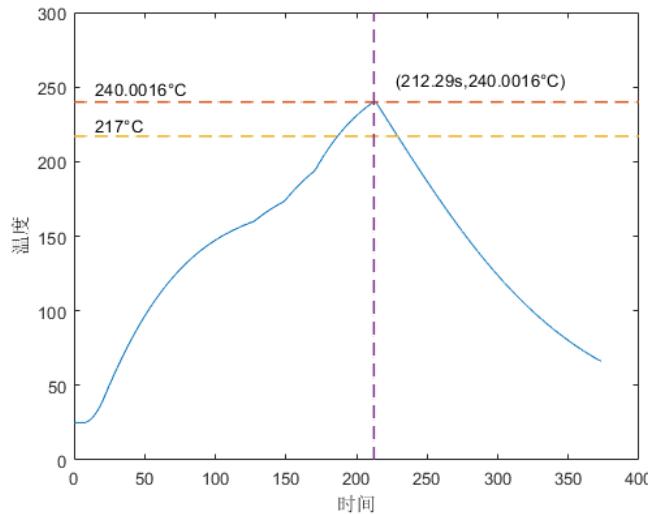


图 8: 问题三最优炉温曲线

此种情况下, 制程界限表格如下:

表 15: 问题三中最优情况下的制程界限

界限名称	数值	是否满足制程界限
温度上升斜率	2.2610	是
温度下降斜率	-1.4875	是
温度上升过程中在150 ~ 190°C的时间	60.89	是
温度大于217°C的时间	42.57	是
峰值温度	240.0016	是

5.4 问题四的建模与求解

5.4.1 多目标优化模型的建立

问题四指出, 在焊接过程中, 除满足制程界限之外, 还需满足以峰值温度为中心线两侧超过217°C的炉温曲线应尽量对称。用 x 表示距离峰值温度所在时刻的相同时间步长。用 k 表示达到峰值温度时的时刻, 用 $t(k - x)$, $t(k + x)$ 表示距离峰值温度所在时刻相同距离 x 的两个时刻对应的温度。 $t(\xi)$ 表示在时刻 ξ 使的温度, i 表示温度上升过程中温度到达217°C的时刻。关于为使以峰值温度为中心线两侧超过217°C的炉温曲线尽可能对称, 需使当时刻 $\xi \in [i, k]$ 时, 对应的温度差值平方和最小。用 D 表示 $t(k - x)$, $t(k + x)$ 的差值平方和, 因此 D 的表达式如下:

$$D = \sum_{x=0}^{k-i} [t(k - x) - t(k + x)]^2$$

则目标函数即为:

$$\min D$$

因此使得以峰值速度为中心线两侧超过 217°C 的炉温曲线尽量对称，即使得离中心时刻距离相等的两个时刻对应的温度的差值平方和最小，为多目标中的其中一个目标。同时结合问题三，使得理想的炉温曲线超过 217°C 到峰值速度所覆盖的面积最小，为另一个目标，具体表达式见问题三。因此，得到：

$$f = \frac{\min D}{D} + \frac{\min S_{\text{阴}}}{S_{\text{阴}}}$$

则最终的目标函数即为：

$$\max f$$

约束条件同问题三。

5.4.2 模型的求解

(1) 求解温度误差平方和 D 的最小值

同理，问题三中分析可得小温区 $1 \sim 5$ ，小温区 6 的设定温度为次要影响因素。假定小温区 $1 \sim 5$ 的设定温度为 175°C ，小温区 6 的设定温度为 195°C 。在此种情况下，对于另外几个影响因素进行遍历探究，从而求得误差平方和较小的情况。

首先小温区 7 设定温度范围为 $[225, 245]$ ，小温区 $8 \sim 9$ 的设定温度范围为 $[245, 265]$ ，传送带的过炉速度范围为 $[65, 100]$ ，分别对3个影响因素以1为步长进行遍历，得到误差平方和最小时各个参数的数值以及此时对应的误差平方和，如下表：

表 16: 在范围内分别以步长为1遍历主要影响因素得到最优结果

参数	温区 $1 \sim 5$	温区 6	温区 7	温区 $8 \sim 9$	过炉速度	误差平方和
数值	175	195	225	265	99	5.02×10^5

当在三个影响因素范围内分别以步长为1进行遍历时，得到误差平方和最小值为 5.02×10^5 ，此时小温区 7 的设定温度为 225°C ，小温区 $8 \sim 9$ 的设定温度为 265°C ，过炉速度为 99cm/min 。

利用夹逼法缩小范围，得到小温区 7 的遍历范围缩小为 $[224, 226]$ ，小温区 $8 \sim 9$ 设定温度的遍历范围缩小为 $[264, 266]$ ，传送带的过炉速度的遍历范围缩小为 $[98, 100]$ ，都以步长为0.1，进行遍历，求得此时误差平方和最小的情况，如下：

表 17: 步长为0.1遍历主要影响因素得到最优结果

参数	温区 $1 \sim 5$	温区 6	温区 7	温区 $8 \sim 9$	过炉速度	误差平方和
数值	175	195	225.4	265	99.2	4.99×10^4

从表13中可以得出当固定小温区 $1 \sim 5$ 设定温度和小温区 6 设定温度，对另外三个因素利用夹逼法进行遍历求解得到误差平方和的最小值为 4.99×10^4 。此时，此时小温区 7 的设定温度为 225.4°C ，小温区 $8 \sim 9$ 的设定温度为 265°C ，过炉速度为 99.2cm/min 。

同问题三，在固定主要影响因素的条件下，再对次要影响因素进行分析遍历。我们对两个影响因素的设定温度分别在范围 $[165, 185]$ ， $[185, 205]$ ，以步长为1进行遍历，求得此时阴影面积最小的情况同表16中显示。

利用夹逼法缩小范围, 得到小温区1~5的遍历范围缩小为[174, 176], 小温区6设定温度的遍历范围缩小为[194, 196], 都以步长为0.1, 进行遍历, 求得此时误差平方和最小的情况, 如下:

表 18: 步长为0.1遍历次要影响因素得到最优结果

参数	温区1~5	温区6	温区7	温区8~9	过炉速度	阴影面积
数值	174.8	195.2	225.4	265	99.2	4.98×10^4

最终得出当各个小温区的设定温度分别为: 174.8°C (小温区1~5), 195.2°C (小温区6), 225.4°C (小温区7), 265°C (小温区8~9); 传送带的过炉速度为99.2cm/min。此时得到误差平方和的最小值为 4.98×10^4 , 即 $\min D = 4.98 \times 10^4$ 。

(2) 结果求解

对于目标函数, $\min D$, $\min S_{\text{阴}}$ 均为已知量, 其中 $\min D = 4.98 \times 10^4$, $\min S_{\text{阴}} = 540.4573$ 。为尽可能满足两个参数尽量取最小值, 即求解 $\min f$ 。分母 D 越趋向于 $\min D$, 则该部分的值越接近于1, 同理分母 $S_{\text{阴}}$ 趋向于 $\min S_{\text{阴}}$, 该部分的值接近于1。即使得 f 最接近于2的值, 即为 f 的最小值。

分析两个目标的最优情况, 可以得到小温区1~5设定温度在范围[174, 176]; 小温区6设定温度在范围[194, 196]; 小温区6设定温度在范围[194, 196]; 小温区7 设定温度在范围[225, 226]; 小温区7设定温度在范围[264, 265]; 传送带的过炉速度在范围[98, 100]。以步长为0.1, 进行遍历求解得到最终使得 $\min f$ 最趋于2, 即于2的差值最小的情况如下图:

表 19: 步长为0.1遍历得到最优结果

参数	温区1~5	温区6	温区7	温区8~9	过炉速度
数值	174.8	195.2	225.4	265	99.2
参数	阴影面积	误差平方和	$\max f$ 与2的差值		
数值	540.6913	4.98×10^4	4.35×10^{-4}		

最终当各温区设定温度为174.8°C (小温区1~5), 195.2°C (小温区6), 225.4°C (小温区7), 265°C (小温区8~9); 传送带的过炉速度为99.2cm/min。此时对应的阴影部分面积为540.6913。

此种情况下的制程界限表格如下:

表 20: 问题四中最优情况下的制程界限

界限名称	数值	是否满足制程界限
温度上升斜率	2.2548	是
温度下降斜率	-1.5476	是
温度上升过程中在150~190°C的时间	60.15	是
温度大于217°C的时间	41.86	是
峰值温度	240.0003	是

绘制得到最优炉温曲线如下:

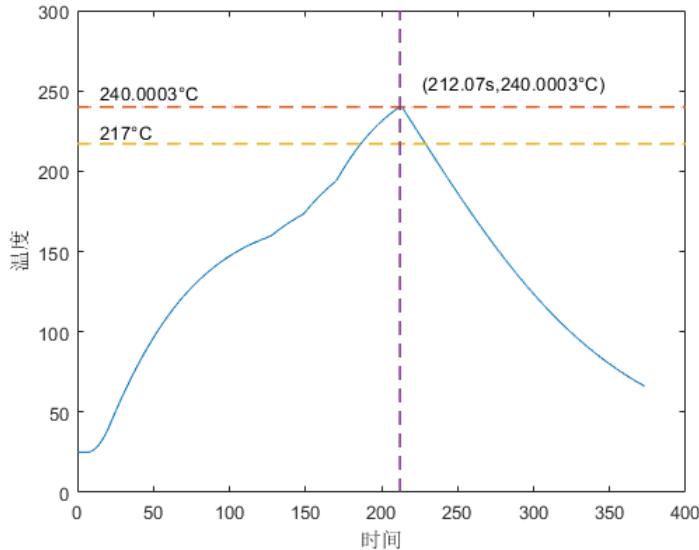


图 9: 问题四最优炉温曲线

六、模型评价

6.1 模型的优点

1. 一维非稳态热传导微分方程转化为常微分方程，简化模型，减少计算量。
2. 利用夹逼法缩小遍历范围，提高计算效率。

6.2 模型的缺点

1. 各小温区间隙的温度热传导为一维稳态热传导微分方程，模型将此简单转化为线性分布，与实际情况不符，在一定程度上扩大了误差。
2. 第一题中在确定 b 的大致范围之后，根据该范围模拟出来的温度曲线与实际温度曲线相差较大，此后对 b 进行调参，使得两者差和大大缩小，但是调参依据缺乏考量。

参考文献

- [1] 杨世铭, 陶文铨. 传热学(第4版) [Heat Transfer][M]. 高等教育出版社, 2006.
- [2] <https://www.docin.com/p-2112798237.html>
- [3] <https://www.docin.com/p-781765239.html>
- [4] 姜启源, 谢金星, 叶俊. 数学模型(第5版)[M]. 高等教育出版社, 2018.5.
- [5] <https://wenku.baidu.com/view/04530406e87101f69e31951d.html>

附录：

第一题程序（MATLAB）：

初始数据：

%初始数据

```
v_transport=70/60;%运输速度  
T_range_1_5=175;  
T_range_6=195;  
T_range_7=235;  
T_range_8_9=255;
```

第一题程序（MATLAB）：

画出附件所给数据温度随时间变化的关系图：

%导入附件数据，命名为 time_temperature_fact，第一列为时间，第二列为温度

%画出回焊炉温度随距离分布的曲线图

```
distance=[0;25];  
for i=1:21  
    if mod(i,2)==1  
        distance(i+2)=distance(i+1)+30.5;  
    else  
        distance(i+2)=distance(i+1)+5;  
    end  
end  
distance(i+3)=distance(i+2)+25;  
  
temperature=[25];  
for i=1:10  
    temperature(i+1)=T_range_1_5;  
end  
for i=1:2  
    temperature(i+11)=T_range_6;  
end  
for i=1:2  
    temperature(i+13)=T_range_7;  
end  
for i=1:4  
    temperature(i+15)=T_range_8_9;  
end  
for i=1:5  
    temperature(i+19)=25;  
end  
plot(distance,temperature)  
xlabel('距离')
```

```

ylabel('温度')
hold on
plot([distance(2) distance(2)], [0 300], 'color', 'k', 'LineStyle', '--', 'LineWidth', 0.1)
hold on
for i=10:19
    plot([distance(i+1) distance(i+1)], [0 300], 'color', 'k', 'LineStyle', '--', 'LineWidth', 0.1)
    hold on
end

```

第一题程序（MATLAB）：

用初次建立的模型遍历寻求最优的参数 a:

```

%开始计算
min=inf;
o=1;
for a=0.1:0.1:2; %遍历求得最优的参数 a
    dif=0;
    MIN=inf;
    for d=0.5:0.1:21 %遍历求得最满足条件的电路板到焊接中心的距离
        clear T_center_before T_oven_before
        c=1;
        T_center_before(1)=25;
        e=19-floor(100*d/v_transport)/100;
        for t=0:0.01:e
            d_transport=v_transport*t;
            T_oven_before(c)=(175-25)/25*d_transport+25;

        T_center_before(c+1)=T_center_before(c)+(T_oven_before(c)-T_center_before(c))*2*0.015*0.01
        *a;
        c=c+1;
    end
    dif=abs(T_center_before(o)-30.0);
    if dif<MIN
        MIN=dif;
        d_board_center=d;
    end
end
k=1;
MISS(o)=0;
T_center(1)=30;
for t=19.001:0.001:373
    d_transport=v_transport*t-d_board_center;
%建立到炉前区域的距离与回焊炉温度的函数映射关系

```

```

if d_transport<25
    T_oven(k)=(T_range_1_5-25)/25*d_transport+25;
else if 25<=d_transport && d_transport<197.5
    T_oven(k)=T_range_1_5;
else if 197.5<=d_transport && d_transport<202.5
    T_oven(k)=(T_range_6-T_range_1_5)/5*(d_transport-197.5)+T_range_1_5;
else if 202.5<=d_transport && d_transport<233
    T_oven(k)=T_range_6;
else if 233<=d_transport && d_transport<238
    T_oven(k)=(T_range_7-T_range_6)/5*(d_transport-233)+T_range_6;
else if 238<=d_transport && d_transport<268.5
    T_oven(k)=T_range_7;
else if 268.5<=d_transport && d_transport<273.5
    T_oven(k)=(T_range_8_9-T_range_7)/5*(d_transport-268.5)+T_range_7;
else if 273.5<=d_transport && d_transport<339.5
    T_oven(k)=T_range_8_9;
else if 339.5<=d_transport && d_transport<344.5
    T_oven(k)=T_range_8_9-(T_range_8_9-25)/5*(d_transport-339.5);
else if 344.5<=d_transport
    T_oven(k)=25;
end

T_center(k+1)=T_center(k)+(T_oven(k)-T_center(k))*2*0.015*0.001*a;
time(k)=t;
if mod(k,500)==0
    MISS(o)=MISS(o)+(T_center(k)-time_temperature_fact((0.5+k*0.001)/0.5,2))^2;%最小
二乘法
    end
    k=k+1;
end
    if  MISS(o)<min
        min=MISS(o);
        best_parameter(1,1)=d_board_center;
        best_parameter(1,2)=a;
    end

```

```
o=o+1;  
end
```

第一题程序（MATLAB）：

夹逼法逐步求精——STEP1

求解参数 a 在 0.4~0.6 范围内，步长为 0.01、参数 d 在 10.4~10.6 范围内，步长为 0.01 的最优解：

%夹逼法逐步求精——STEP1

%求解参数 a 在 0.4~0.6 范围内，步长为 0.01、参数 d 在 10.4~10.6 范围内，步长为 0.01 的最优解

```
min=inf;  
o=1;  
for a=0.41:0.01:0.6; %遍历求得最优的参数 a  
    dif=0;  
    MIN=inf;  
    for d=10.4:0.01:10.6 %遍历求得最满足条件的电路板到焊接中心的距离  
        clear T_center_before T_oven_before  
        c=1;  
        T_center_before(1)=25;  
        e=19-floor(100*d/v_transport)/100;  
        for t=0:0.01:e  
            d_transport=v_transport*t;  
            T_oven_before(c)=(175-25)/25*d_transport+25;  
  
            T_center_before(c+1)=T_center_before(c)+(T_oven_before(c)-T_center_before(c))*2*0.015*0.01  
            *a;  
            c=c+1;  
        end  
        dif=abs(T_center_before(c)-30);  
        if dif<MIN  
            MIN=dif;  
            d_board_center=d;  
        end  
    end  
    k=1;  
    MISS(o)=0;  
    T_center(1)=30;  
    for t=19.001:0.001:373  
        d_transport=v_transport*t-d_board_center;  
    %建立到炉前区域的距离与回焊炉温度的函数映射关系  
    if d_transport<25  
        T_oven(k)=(T_range_1_5-25)/25*d_transport+25;  
    else if 25<=d_transport && d_transport<197.5
```


第一题程序（MATLAB）：

夹逼法逐步求精——STEP2

求解参数 a 在 0.50~0.52 范围内，步长为 0.001、参数 d 在 10.60~10.62 范围内，步长为 0.001 的最优解：

%夹逼法逐步求精——STEP2

%求解参数 a 在 0.50~0.52 范围内，步长为 0.001、参数 d 在 10.60~10.62 范围内，步长为 0.001 的最优解

```
min=inf;
o=1;
for a=0.50:0.001:0.52; %遍历求得最优的参数 a
    dif=0;
    MIN=inf;
    for d=10.60:0.001:10.62 %遍历求得最满足条件的电路板到焊接中心的距离
        clear T_center_before T_oven_before
        c=1;
        T_center_before(1)=25;
        e=19-floor(100*d/v_transport)/100;
        for t=0:0.01:e
            d_transport=v_transport*t;
            T_oven_before(c)=(175-25)/25*d_transport+25;

        T_center_before(c+1)=T_center_before(c)+(T_oven_before(c)-T_center_before(c))*2*0.015*0.01
        *a;
            c=c+1;
        end
        dif=abs(T_center_before(c)-30);
        if dif<MIN
            MIN=dif;
            d_board_center=d;
        end
    end
    k=1;
    MISS(o)=0;
    T_center(1)=30;
    for t=19.001:0.001:373
        d_transport=v_transport*t-d_board_center;
    %建立到炉前区域的距离与回焊炉温度的函数映射关系
    if d_transport<25
        T_oven(k)=(T_range_1_5-25)/25*d_transport+25;
    else if 25<=d_transport && d_transport<197.5
        T_oven(k)=T_range_1_5;
    else if 197.5<=d_transport && d_transport<202.5
        T_oven(k)=(T_range_6-T_range_1_5)/5*(d_transport-197.5)+T_range_1_5;
```

第一题程序（MATLAB）：

画出该条件下的温度随时间的变化曲线(炉温曲线)

%画出该条件下的温度随时间的变化曲线(炉温曲线)

```

d_board_center=best_parameter(1,1);
a=best_parameter(1,2);
k=1;
T_center(1)=30;
for t=19.001:0.001:373
    d_transport=v_transport*t-d_board_center;
%建立到炉前区域的距离与回焊炉温度的函数映射关系
if d_transport<25
    T_oven(k)=(T_range_1_5-25)/25*d_transport+25;
else if 25<=d_transport && d_transport<197.5
    T_oven(k)=T_range_1_5;
else if 197.5<=d_transport && d_transport<202.5
    T_oven(k)=(T_range_6-T_range_1_5)/5*(d_transport-197.5)+T_range_1_5;
else if 202.5<=d_transport && d_transport<233
    T_oven(k)=T_range_6;
else if 233<=d_transport && d_transport<238
    T_oven(k)=(T_range_7-T_range_6)/5*(d_transport-233)+T_range_6;
else if 238<=d_transport && d_transport<268.5
    T_oven(k)=T_range_7;
else if 268.5<=d_transport && d_transport<273.5
    T_oven(k)=(T_range_8_9-T_range_7)/5*(d_transport-268.5)+T_range_7;
else if 273.5<=d_transport && d_transport<339.5
    T_oven(k)=T_range_8_9;
else if 339.5<=d_transport && d_transport<344.5
    T_oven(k)=T_range_8_9-(T_range_8_9-25)/5*(d_transport-339.5);
else if 344.5<=d_transport
    T_oven(k)=25;
end
end
end
end
end
end
end
end
end
T_center(k+1)=T_center(k)+ (T_oven(k)-T_center(k))*2*0.015*a *0.001;
time(k)=t;
k=k+1;
end

plot(time,T_center(1:k-1))

```

```

axis([0 400 0 300])
hold on
plot(time_temperature_fact(:,1),time_temperature_fact(:,2))
xlabel('时间')
ylabel('温度')

```

第一题程序（MATLAB）：

模型的改进：

```

%模型的进一步改进——将 a 视为与温度有关
d_board_center=best_parameter(1,1);
a=best_parameter(1,2);
min_2=inf;
for parameter_rise=0.0014:0.00001:0.0016
    for parameter_down=-0.0012:0.00001:-0.001
        k=1;
        MISS_2=0;
        T_center(1)=30;
        for t=19.001:0.001:373
            d_transport=v_transport*t-d_board_center;
        %建立到炉前区域的距离与回焊炉温度的函数映射关系
        if d_transport<25
            T_oven(k)=(175-25)/25*d_transport+25;
        else if 25<=d_transport && d_transport<197.5
            T_oven(k)=175;
        else if 197.5<=d_transport && d_transport<202.5
            T_oven(k)=(195-175)/5*(d_transport-197.5)+175;
        else if 202.5<=d_transport && d_transport<233
            T_oven(k)=195;
        else if 233<=d_transport && d_transport<238
            T_oven(k)=(235-195)/5*(d_transport-233)+195;
        else if 238<=d_transport && d_transport<268.5
            T_oven(k)=235;
        else if 268.5<=d_transport && d_transport<273.5
            T_oven(k)=(255-235)/5*(d_transport-268.5)+235;
        else if 273.5<=d_transport && d_transport<339.5
            T_oven(k)=255;
        else if 339.5<=d_transport && d_transport<344.5
            T_oven(k)=255-(255-25)/5*(d_transport-339.5);
        else if 344.5<=d_transport
            T_oven(k)=25;
        end
        end
        end

```

```

end
end
end
end
end
end
end

if T_oven(k)-T_center(k)>0
    T_center(k+1)=T_center(k)+(T_oven(k)-T_center(k))*2*0.015*0.001...
        *(a+parameter_rise*T_center(k));
else if T_oven(k)-T_center(k)<=0
    T_center(k+1)=T_center(k)+(T_oven(k)-T_center(k))*2*0.015*0.001...
        *(a+parameter_down*T_center(k));
end
end
time(k)=t;
if mod(k,500)==0
    MISS_2=MISS_2+(T_center(k)-time_temperature_fact((0.5+k*0.001)/0.5,2))^2;%最小二乘法
end
k=k+1;
end
if MISS_2<min_2
    min_2=MISS_2;
    best_parameter(2,1)=parameter_rise;
    best_parameter(2,2)=parameter_down;
end
end
end

```

第一题程序（MATLAB）：

画出最优参数下的炉温曲线、制程数据：

```

%画出在最佳参数下的温度随时间的变化曲线(炉温曲线)
d_board_center=best_parameter(1,1);
a=best_parameter(1,2);
parameter_rise=best_parameter(2,1);
parameter_down=best_parameter(2,2);
k=1;
T_center(1)=30;
for t=19.001:0.001:373
    d_transport=v_transport*t-d_board_center;
%建立到炉前区域的距离与回焊炉温度的函数映射关系
if d_transport<25

```

```

T_oven(k)=(T_range_1_5-25)/25*d_transport+25;
else if 25<=d_transport && d_transport<197.5
    T_oven(k)=T_range_1_5;
else if 197.5<=d_transport && d_transport<202.5
    T_oven(k)=(T_range_6-T_range_1_5)/5*(d_transport-197.5)+T_range_1_5;
else if 202.5<=d_transport && d_transport<233
    T_oven(k)=T_range_6;
else if 233<=d_transport && d_transport<238
    T_oven(k)=(T_range_7-T_range_6)/5*(d_transport-233)+T_range_6;
else if 238<=d_transport && d_transport<268.5
    T_oven(k)=T_range_7;
else if 268.5<=d_transport && d_transport<273.5
    T_oven(k)=(T_range_8_9-T_range_7)/5*(d_transport-268.5)+T_range_7;
else if 273.5<=d_transport && d_transport<339.5
    T_oven(k)=T_range_8_9;
else if 339.5<=d_transport && d_transport<344.5
    T_oven(k)=T_range_8_9-(T_range_8_9-25)/5*(d_transport-339.5);
else if 344.5<=d_transport
    T_oven(k)=25;
end
if T_oven(k)-T_center(k)>0
    gradient(k)=(T_oven(k)-T_center(k))*2*0.015*(a+parameter_rise*T_center(k));
else if T_oven(k)-T_center(k)<0
    gradient(k)=(T_oven(k)-T_center(k))*2*0.015*(a+parameter_down*T_center(k));
end
T_center(k+1)=T_center(k)+gradient(k)*0.001;
time(k)=t;
k=k+1;
end

%寻找关键参数——制程界限
f=find(gradient==max(gradient));
curve_parameter(1,1)=gradient(f);%温度上升斜率最高值

```

```

clear min
g=find(gradient==min(gradient));
curve_parameter(2,1)=gradient(g);%温度下降斜率最低值
m=length(find(gradient>0));
curve_parameter(3,1)=(length(find(T_center(1:m)>150 & T_center(1:m)<190))+1)...
*0.001;%温度上升过程中在 150° C~190° C 的时间
curve_parameter(4,1)=(length(find(T_center>217))+1)...
*0.001;%温度大于 217° C 的时间
n=find(T_center==max(T_center));
curve_parameter(5,1)=T_center(n);%峰值温度
t_top=time(n);

plot(time,T_center(1:k-1))
axis([0 400 0 300])
hold on
plot(time_temperature_fact(:,1),time_temperature_fact(:,2))
hold on
plot(0:1:400, curve_parameter(5,1)*ones(1,401),'LineStyle','--','LineWidth',1)
xlabel('时间')
ylabel('温度')
text(t_top-15, curve_parameter(5,1)+20,'峰值温度 244.96° C')

```

第一题程序（MATLAB）：

根据问题一中所给数据求得炉温曲线等数据并作图、求制程参数

```

%%根据问题一中所给数据求得炉温曲线等数据
%基础数据
clearvars -EXCEPT best_parameter time_temperature_fact
v_transport=78/60;%运输速度
T_range_1_5=173;%温区温度
T_range_6=198;
T_range_7=230;
T_range_8_9=257;
d_trange_center_3=25+(3-1)*(5+30.5)+30.5/2;%距离
d_trange_center_6=25+(6-1)*(5+30.5)+30.5/2;
d_trange_center_7=25+(7-1)*(5+30.5)+30.5/2;
d_trange_end_8=25+(8-1)*(5+30.5)+30.5;

%画出在最佳参数下的温度随时间的变化曲线(炉温曲线)
d_board_center=best_parameter(1,1);
a=best_parameter(1,2);
parameter_rise=best_parameter(2,1);
parameter_down=best_parameter(2,2);
k=1;

```

```

T_center(1)=25;
T_center_halfsecond(1,1)=0;
T_center_halfsecond(1,2)=25;
for t=0:0.001:373
    d_transport(k)=v_transport*t-d_board_center;
%建立到炉前区域的距离与回焊炉温度的函数映射关系
if d_transport(k)<0
    T_oven(k)=25;
else if 0<=d_transport(k) && d_transport(k)<25
    T_oven(k)=(T_range_1_5-25)/25*d_transport(k)+25;
else if 25<=d_transport(k) && d_transport(k)<197.5
    T_oven(k)=T_range_1_5;
else if 197.5<=d_transport(k) && d_transport(k)<202.5
    T_oven(k)=(T_range_6-T_range_1_5)/5*(d_transport(k)-197.5)+T_range_1_5;
else if 202.5<=d_transport(k) && d_transport(k)<233
    T_oven(k)=T_range_6;
else if 233<=d_transport(k) && d_transport(k)<238
    T_oven(k)=(T_range_7-T_range_6)/5*(d_transport(k)-233)+T_range_6;
else if 238<=d_transport(k) && d_transport(k)<268.5
    T_oven(k)=T_range_7;
else if 268.5<=d_transport(k) && d_transport(k)<273.5
    T_oven(k)=(T_range_8_9-T_range_7)/5*(d_transport(k)-268.5)+T_range_7;
else if 273.5<=d_transport(k) && d_transport(k)<339.5
    T_oven(k)=T_range_8_9;
else if 339.5<=d_transport(k) && d_transport(k)<344.5
    T_oven(k)=T_range_8_9-(T_range_8_9-25)/5*(d_transport(k)-339.5);
else if 344.5<=d_transport(k)
T_oven(k)=25;
end
if T_oven(k)-T_center(k)>0
    gradient(k)=(T_oven(k)-T_center(k))*2*0.015*(a+parameter_rise*T_center(k));
else if T_oven(k)-T_center(k)<=0
    gradient(k)=(T_oven(k)-T_center(k))*2*0.015*(a+parameter_down*T_center(k));

```

```

else if d_transport(k)<0
    gradient(k)=0;
end
end
end
T_center(k+1)=T_center(k)+gradient(k)*0.001;
time(k)=t;
if mod(k,500)==0
    T_center_halfsecond((k*0.001+0.5)/0.5,1)=k*0.001;
    T_center_halfsecond((k*0.001+0.5)/0.5,2)=T_center(k);
end
k=k+1;
end

%求出所有的可能出现的运输距离与题中所给的具体位置的距离
dis_to_center_3=abs(d_trange_center_3-d_transport);
dis_to_center_6=abs(d_trange_center_6-d_transport);
dis_to_center_7=abs(d_trange_center_7-d_transport);
dis_to_end_8=abs(d_trange_end_8-d_transport);

%寻找最接近的距离对应的时间
t3=0.001*(find(dis_to_center_3==min(dis_to_center_3))-1);
t6=0.001*(find(dis_to_center_6==min(dis_to_center_6))-1);
t7=0.001*(find(dis_to_center_7==min(dis_to_center_7))-1);
t8=0.001*(find(dis_to_end_8==min(dis_to_end_8))-1);
t_top=0.001*(find(T_center==max(T_center))-1);

%寻找最接近的距离对应的温度
T3=T_center(find(dis_to_center_3==min(dis_to_center_3)));
T6=T_center(find(dis_to_center_6==min(dis_to_center_6)));
T7=T_center(find(dis_to_center_7==min(dis_to_center_7)));
T8=T_center(find(dis_to_end_8==min(dis_to_end_8)));
T_top=T_center(find(T_center==max(T_center)));

%画图
plot(time,T_center(1:k-1))
axis([0 400 0 300])
xlabel('时间')
ylabel('温度')
hold on
plot(t3,T3,'sr')
hold on
plot(t6,T6,'sr')
hold on
plot(t7,T7,'sr')

```

```

hold on
plot(t8,T8,'sr')
hold on
plot(0:1:400,T_top*ones(1,401),'LineStyle','--','LineWidth',1)
text(t3+10,T3-10,'(93.73,138.72)')
text(t6-110,T6,'(175.65,174.15)')
text(t7-100,T7,'(202.96,194.23)')
text(t8-95,T8,'(242.00,229.03)')
text(t_top-15,T_top+15,'峰值温度 243.24° C')

```

第二题程序（MATLAB）：

```

%基础数据
clearvars -EXCEPT best_parameter time_temperature_fact
T_range_1_5=182;%温区温度
T_range_6=203;
T_range_7=237;
T_range_8_9=254;

%对不同速度进行遍历
p=1;
for v_transport=65/60:1/60:100/60
%求出在最佳参数下的温度随时间的变化
d_board_center=best_parameter(1,1);
a=best_parameter(1,2);
parameter_rise=best_parameter(2,1);
parameter_down=best_parameter(2,2);
k=1;
T_center(1)=25;
T_center_halfsecond(1,1)=0;
T_center_halfsecond(1,2)=25;
for t=0:0.001:373
    d_transport(k)=v_transport*t-d_board_center;
%建立到炉前区域的距离与回焊炉温度的函数映射关系
if d_transport(k)<0
    T_oven(k)=25;
else if 0<=d_transport(k) && d_transport(k)<25
    T_oven(k)=(T_range_1_5-25)/25*d_transport(k)+25;
else if 25<=d_transport(k) && d_transport(k)<197.5
    T_oven(k)=T_range_1_5;
else if 197.5<=d_transport(k) && d_transport(k)<202.5
    T_oven(k)=(T_range_6-T_range_1_5)/5*(d_transport(k)-197.5)+T_range_1_5;
else if 202.5<=d_transport(k) && d_transport(k)<233

```

```

T_oven(k)=T_range_6;
else if 233<=d_transport(k) && d_transport(k)<238
    T_oven(k)=(T_range_7-T_range_6)/5*(d_transport(k)-233)+T_range_6;
else if 238<=d_transport(k) && d_transport(k)<268.5
    T_oven(k)=T_range_7;
else if 268.5<=d_transport(k) && d_transport(k)<273.5
    T_oven(k)=(T_range_8_9-T_range_7)/5*(d_transport(k)-268.5)+T_range_7;
else if 273.5<=d_transport(k) && d_transport(k)<339.5
    T_oven(k)=T_range_8_9;
else if 339.5<=d_transport(k) && d_transport(k)<344.5
    T_oven(k)=T_range_8_9-(T_range_8_9-25)/5*(d_transport(k)-339.5);
else if 344.5<=d_transport(k)
T_oven(k)=25;
end
if T_oven(k)-T_center(k)>0
    gradient(k)=(T_oven(k)-T_center(k))*2*0.015*(a+parameter_rise*T_center(k));
else if T_oven(k)-T_center(k)<=0
    gradient(k)=(T_oven(k)-T_center(k))*2*0.015*(a+parameter_down*T_center(k));
else if d_transport(k)<0
    gradient(k)=0;
end
end
end
T_center(k+1)=T_center(k)+gradient(k)*0.001;
time(k)=t;
if mod(k,500)==0
    T_center_halfsecond((k*0.001+0.5)/0.5,1)=19+k*0.001;
    T_center_halfsecond((k*0.001+0.5)/0.5,2)=T_center(k);
end
k=k+1;
end
f=find(gradient==max(gradient));
curve_parameter(1,1)=gradient(f);%温度上升斜率最高值

```

```

g=find(gradient==min(gradient));
curve_parameter(2,1)=gradient(g);%温度下降斜率最低值
n=find(T_center==max(T_center));
curve_parameter(3,1)=(length(find(T_center(1:n)>150 & T_center(1:n)<190))+1)...
    *0.001;%温度上升过程中在 150° C~190° C 的时间
curve_parameter(4,1)=(length(find(T_center>217))+1)...
    *0.001;%温度大于 217° C 的时间
curve_parameter(5,1)=T_center(n);%峰值温度
if curve_parameter(1,1)<3 && curve_parameter(2,1)>-3 && ...
    60<curve_parameter(3,1) && curve_parameter(3,1)<120 &&...
    40<curve_parameter(4,1) && curve_parameter(4,1)<90 &&...
    240<curve_parameter(5,1) && curve_parameter(5,1)<250
    v_fit(p)=v_transport;
    p=p+1;
end
end

%找到符合条件的最大速度
v_fit_max=v_fit(find(v_fit==max(v_fit)))-0.0167;
%求出该速度下炉温曲线的制程参数
d_board_center=best_parameter(1,1);
a=best_parameter(1,2);
parameter_rise=best_parameter(2,1);
parameter_down=best_parameter(2,2);
k=1;
T_center(1)=25;
T_center_halfsecond(1,1)=0;
T_center_halfsecond(1,2)=25;
for t=0:0.001:373
    d_transport(k)=v_fit_max*t-d_board_center;
%建立到炉前区域的距离与回焊炉温度的函数映射关系
if d_transport(k)<0
    T_oven(k)=25;
else if 0<=d_transport(k) && d_transport(k)<25
    T_oven(k)=(T_range_1_5-25)/25*d_transport(k)+25;
else if 25<=d_transport(k) && d_transport(k)<197.5
    T_oven(k)=T_range_1_5;
else if 197.5<=d_transport(k) && d_transport(k)<202.5
    T_oven(k)=(T_range_6-T_range_1_5)/5*(d_transport(k)-197.5)+T_range_1_5;
else if 202.5<=d_transport(k) && d_transport(k)<233
    T_oven(k)=T_range_6;
else if 233<=d_transport(k) && d_transport(k)<238
    T_oven(k)=(T_range_7-T_range_6)/5*(d_transport(k)-233)+T_range_6;

```

```

else if 238<=d_transport(k) && d_transport(k)<268.5
    T_oven(k)=T_range_7;
else if 268.5<=d_transport(k) && d_transport(k)<273.5
    T_oven(k)=(T_range_8_9-T_range_7)/5*(d_transport(k)-268.5)+T_range_7;
else if 273.5<=d_transport(k) && d_transport(k)<339.5
    T_oven(k)=T_range_8_9;
else if 339.5<=d_transport(k) && d_transport(k)<344.5
    T_oven(k)=T_range_8_9-(T_range_8_9-25)/5*(d_transport(k)-339.5);
else if 344.5<=d_transport(k)
    T_oven(k)=25;
end
if T_oven(k)-T_center(k)>0
    gradient(k)=(T_oven(k)-T_center(k))*2*0.015*(a+parameter_rise*T_center(k));
else if T_oven(k)-T_center(k)<=0
    gradient(k)=(T_oven(k)-T_center(k))*2*0.015*(a+parameter_down*T_center(k));
else if d_transport(k)<0
    gradient(k)=0;
end
end
end
T_center(k+1)=T_center(k)+gradient(k)*0.001;
time(k)=t;
if mod(k,500)==0
    T_center_halfsecond((k*0.001+0.5)/0.5,1)=19+k*0.001;
    T_center_halfsecond((k*0.001+0.5)/0.5,2)=T_center(k);
end
k=k+1;
end
f=find(gradient==max(gradient));
curve_parameter(1,1)=gradient(f);%温度上升斜率最高值
g=find(gradient==min(gradient));
curve_parameter(2,1)=gradient(g);%温度下降斜率最低值
n=find(T_center==max(T_center));

```

```

curve_parameter(3,1)=(length(find(T_center(1:n)>150 & T_center(1:n)<190))+1)...
    *0.001;%温度上升过程中在 150° C~190° C 的时间
curve_parameter(4,1)=(length(find(T_center>217))+1)...
    *0.001;%温度大于 217° C 的时间
curve_parameter(5,1)=T_center(n);%峰值温度

```

第三题程序：(MATLAB)

对题中温区数据以及传送带速度的部分参数进行调整并作比较画图：

%%画图，作出调整部分参数（运输速度）时的炉温曲线图（其他参数限于篇幅，略）

```
clearvars -EXCEPT best_parameter time_temperature_fact
```

%初始数据

```
T_range_6=195;
```

```
T_range_7=235;
```

```
T_range_8_9=255;
```

```
v_transport=70/60;
```

```
for i=1:2
```

```
T_range_1_5=175+10*(i-1);%运输速度
```

%画出在最佳参数下的温度随时间的变化曲线(炉温曲线)

```
d_board_center=best_parameter(1,1);
```

```
a=best_parameter(1,2);
```

```
parameter_rise=best_parameter(2,1);
```

```
parameter_down=best_parameter(2,2);
```

```
k=1;
```

```
T_center(1,i)=30;
```

```
for t=19.001:0.001:373
```

```
    d_transport=v_transport*t-d_board_center;
```

%建立到炉前区域的距离与回焊炉温度的函数映射关系

```
if d_transport<25
```

```
    T_oven(k)=(T_range_1_5-25)/25*d_transport+25;
```

```
else if 25<=d_transport && d_transport<197.5
```

```
    T_oven(k)=T_range_1_5;
```

```
else if 197.5<=d_transport && d_transport<202.5
```

```
    T_oven(k)=(T_range_6-T_range_1_5)/5*(d_transport-197.5)+T_range_1_5;
```

```
else if 202.5<=d_transport && d_transport<233
```

```
    T_oven(k)=T_range_6;
```

```
else if 233<=d_transport && d_transport<238
```

```
    T_oven(k)=(T_range_7-T_range_6)/5*(d_transport-233)+T_range_6;
```

```
else if 238<=d_transport && d_transport<268.5
```

```
    T_oven(k)=T_range_7;
```

```
else if 268.5<=d_transport && d_transport<273.5
```

```
    T_oven(k)=(T_range_8_9-T_range_7)/5*(d_transport-268.5)+T_range_7;
```

```
else if 273.5<=d_transport && d_transport<339.5
```

```

T_oven(k)=T_range_8_9;
else if 339.5<=d_transport && d_transport<344.5
    T_oven(k)=T_range_8_9-(T_range_8_9-25)/5*(d_transport-339.5);
else if 344.5<=d_transport
    T_oven(k)=25;
end
if T_oven(k)-T_center(k,i)>0
    gradient(k)=(T_oven(k)-T_center(k,i))*2*0.015*(a+parameter_rise*T_center(k,i));
else if T_oven(k)-T_center(k,i)<0

gradient(k)=(T_oven(k)-T_center(k,i))*2*0.015*(a+parameter_down*T_center(k,i));
end
T_center(k+1,i)=T_center(k,i)+gradient(k)*0.001;
time(k)=t;
k=k+1;
end
%寻找关键参数——制程界限
f=find(gradient==max(gradient));
curve_parameter(1,1)=gradient(f);%温度上升斜率最高值
clear min
g=find(gradient==min(gradient));
curve_parameter(2,1)=gradient(g);%温度下降斜率最低值
m=length(find(gradient>0));
curve_parameter(3,1)=(length(find(T_center(1:m,i)>150 & T_center(1:m,i)<190))+1)...
*0.001;%温度上升过程中在 150° C~190° C 的时间
curve_parameter(4,1)=(length(find(T_center(:,i)>217)))+1...
*0.001;%温度大于 217° C 的时间
n=find(T_center(:,i)==max(T_center(:,i)));
curve_parameter(5,1)=T_center(n,i);%峰值温度
t_top(i)=time(n);

end

```

```

h1=plot(time,T_center(1:k-1,1));
axis([0 400 0 300])
hold on
h2=plot(time,T_center(1:k-1,2));
hold on
h3=plot(0:1:400,217*ones(1,401),'LineStyle','--','LineWidth',1);
hold on
h4=plot(t_top(1)*ones(1,301),0:1:300,'LineStyle','--','LineWidth',1);
hold on
h5=plot(t_top(2)*ones(1,301),0:1:300,'LineStyle','--','LineWidth',1);
legend([h1,h2],'T(1-5)=195°C','T(1-5)=205°C','Location','NorthWest');
axis([0 400 0 300])
xlabel('时间')
ylabel('温度')

```

第三题程序：（MATLAB）

夹逼法求得使阴影面积最小的温区 7、温区 8 到 9 的最优温度以及传送带的最优速度——

STEP1

对不同温区温度、传送带速度进行遍历,现对温区 7、温区 8 到 9 的温度以 1 度的步长进行遍历；对传送带速度以 1cm/min 的步长进行遍历：

```

%%夹逼法求得使阴影面积最小的温区 7、温区 8 到 9 的最优温度以及传送带的最优速度
%对不同温区温度、传送带速度进行遍历,现对温区 7、温区 8 到 9 的温度以 1 度的步长进...
%...行遍历；对传送带速度以 1cm/min 的步长进行遍历
clearvars -EXCEPT best_parameter time_temperature_fact
p=1;
u=inf;
for T_range_1_5=175
    for T_range_6=195
        for T_range_7=225:1:245
            for T_range_8_9=245:1:265
                for v_transport=65/60:1/60:100/60
d_board_center=best_parameter(1,1);
a=best_parameter(1,2);
parameter_rise=best_parameter(2,1);
parameter_down=best_parameter(2,2);
k=1;
T_center(1)=25;
T_center_halfsecond(1,1)=0;
T_center_halfsecond(1,2)=25;
for t=0:0.01:373
    d_transport(k)=v_transport*t-d_board_center;
%建立到炉前区域的距离与回焊炉温度的函数映射关系
if d_transport(k)<0

```

```

T_oven(k)=25;
else if 0<=d_transport(k) && d_transport(k)<25
    T_oven(k)=(T_range_1_5-25)/25*d_transport(k)+25;
else if 25<=d_transport(k) && d_transport(k)<197.5
    T_oven(k)=T_range_1_5;
else if 197.5<=d_transport(k) && d_transport(k)<202.5
    T_oven(k)=(T_range_6-T_range_1_5)/5*(d_transport(k)-197.5)+T_range_1_5;
else if 202.5<=d_transport(k) && d_transport(k)<233
    T_oven(k)=T_range_6;
else if 233<=d_transport(k) && d_transport(k)<238
    T_oven(k)=(T_range_7-T_range_6)/5*(d_transport(k)-233)+T_range_6;
else if 238<=d_transport(k) && d_transport(k)<268.5
    T_oven(k)=T_range_7;
else if 268.5<=d_transport(k) && d_transport(k)<273.5
    T_oven(k)=(T_range_8_9-T_range_7)/5*(d_transport(k)-268.5)+T_range_7;
else if 273.5<=d_transport(k) && d_transport(k)<339.5
    T_oven(k)=T_range_8_9;
else if 339.5<=d_transport(k) && d_transport(k)<344.5
    T_oven(k)=T_range_8_9-(T_range_8_9-25)/5*(d_transport(k)-339.5);
else if 344.5<=d_transport(k)
T_oven(k)=25;
end
if T_oven(k)-T_center(k)>0
    gradient(k)=(T_oven(k)-T_center(k))*2*0.015*(a+parameter_rise*T_center(k));
else if T_oven(k)-T_center(k)<=0
    gradient(k)=(T_oven(k)-T_center(k))*2*0.015*(a+parameter_down*T_center(k));
else if d_transport(k)<0
    gradient(k)=0;
end
end
end
T_217(k)=abs(T_center(k)-217);
T_center(k+1)=T_center(k)+gradient(k)*0.01;

```

```

time(k)=t;
if mod(k,50)==0
    T_center_halfsecond((k*0.01+0.5)/0.5,1)=k*0.01;
    T_center_halfsecond((k*0.01+0.5)/0.5,2)=T_center(k);
end
k=k+1;
end

f=find(gradient==max(gradient));
curve_parameter(1,1)=gradient(f);%温度上升斜率最高值
g=find(gradient==min(gradient));
curve_parameter(2,1)=gradient(g);%温度下降斜率最低值
n=find(T_center==max(T_center));
curve_parameter(3,1)=(length(find(T_center(1:n)>150 & T_center(1:n)<190))+1)...
    *0.01;%温度上升过程中在 150° C~190° C 的时间
curve_parameter(4,1)=(length(find(T_center>217))+1)...
    *0.01;%温度大于 217° C 的时间
curve_parameter(5,1)=T_center(n);%峰值温度

if curve_parameter(1,1)<3 && curve_parameter(2,1)>-3 && ...
    60<curve_parameter(3,1) && curve_parameter(3,1)<120 &&...
    40<curve_parameter(4,1) && curve_parameter(4,1)<90 &&...
    240<curve_parameter(5,1) && curve_parameter(5,1)<250
r=find(T_center==max(T_center));
q=find(T_217(1:r)==min(T_217(1:r)));
s(p)=0;
for i=q:1:r-1
    s(p)=s(p)+(T_center(i)-217)*0.01*v_transport;
end
if s(p)<u
    u=s(p);
    parameter_fit(1,1)=T_range_1_5;
    parameter_fit(1,2)=T_range_6;
    parameter_fit(1,3)=T_range_7;
    parameter_fit(1,4)=T_range_8_9;
    parameter_fit(1,5)=v_transport;
end
p=p+1;
end
end
end
end
end

```

第三题程序：（MATLAB）

夹逼法求得使阴影面积最小的温区 7、温区 8 到 9 的最优温度以及传送带的最优速度——

STEP2

对不同温区温度、传送带速度进行遍历,现对温区 7、温区 8 到 9 的温度以 0.1 度的步长进行遍历；对传送带速度以 0.1cm/min 的步长进行遍历:

```
%%夹逼法求得使阴影面积最小的温区 7、温区 8 到 9 的最优温度以及传送带的最优速度
%对不同温区温度、传送带速度进行遍历,现对温区 7、温区 8 到 9 的温度以 0.1 度的步长进...
%...行遍历；对传送带速度以 0.1cm/min 的步长进行遍历
clearvars -EXCEPT best_parameter time_temperature_fact
p=1;
u=inf;
for T_range_1_5=175
    for T_range_6=195
        for T_range_7=225:0.1:226
            for T_range_8_9=264:0.1:265
                for v_transport=98/60:1/600:100/60
d_board_center=best_parameter(1,1);
a=best_parameter(1,2);
parameter_rise=best_parameter(2,1);
parameter_down=best_parameter(2,2);
k=1;
T_center(1)=25;
T_center_halfsecond(1,1)=0;
T_center_halfsecond(1,2)=25;
for t=0:0.01:373
    d_transport(k)=v_transport*t-d_board_center;
%建立到炉前区域的距离与回焊炉温度的函数映射关系
if d_transport(k)<0
    T_oven(k)=25;
else if 0<=d_transport(k) && d_transport(k)<25
    T_oven(k)=(T_range_1_5-25)/25*d_transport(k)+25;
else if 25<=d_transport(k) && d_transport(k)<197.5
    T_oven(k)=T_range_1_5;
else if 197.5<=d_transport(k) && d_transport(k)<202.5
    T_oven(k)=(T_range_6-T_range_1_5)/5*(d_transport(k)-197.5)+T_range_1_5;
else if 202.5<=d_transport(k) && d_transport(k)<233
    T_oven(k)=T_range_6;
else if 233<=d_transport(k) && d_transport(k)<238
    T_oven(k)=(T_range_7-T_range_6)/5*(d_transport(k)-233)+T_range_6;
else if 238<=d_transport(k) && d_transport(k)<268.5
    T_oven(k)=T_range_7;
else if 268.5<=d_transport(k) && d_transport(k)<273.5
    T_oven(k)=(T_range_8_9-T_range_7)/5*(d_transport(k)-268.5)+T_range_7;
```

```

else if 273.5<=d_transport(k) && d_transport(k)<339.5
    T_oven(k)=T_range_8_9;
else if 339.5<=d_transport(k) && d_transport(k)<344.5
    T_oven(k)=T_range_8_9-(T_range_8_9-25)/5*(d_transport(k)-339.5);
else if 344.5<=d_transport(k)
    T_oven(k)=25;
end
if T_oven(k)-T_center(k)>0
    gradient(k)=(T_oven(k)-T_center(k))*2*0.015*(a+parameter_rise*T_center(k));
else if T_oven(k)-T_center(k)<=0
    gradient(k)=(T_oven(k)-T_center(k))*2*0.015*(a+parameter_down*T_center(k));
else if d_transport(k)<0
    gradient(k)=0;
end
end
end
T_217(k)=abs(T_center(k)-217);
T_center(k+1)=T_center(k)+gradient(k)*0.01;
time(k)=t;
if mod(k,50)==0
    T_center_halfsecond((k*0.01+0.5)/0.5,1)=k*0.01;
    T_center_halfsecond((k*0.01+0.5)/0.5,2)=T_center(k);
end
k=k+1;
end
f=find(gradient==max(gradient));
curve_parameter(1,1)=gradient(f);%温度上升斜率最高值
g=find(gradient==min(gradient));
curve_parameter(2,1)=gradient(g);%温度下降斜率最低值
n=find(T_center==max(T_center));
curve_parameter(3,1)=(length(find(T_center(1:n)>150 & T_center(1:n)<190))+1)...
    *0.01;%温度上升过程中在 150° C~190° C 的时间
curve_parameter(4,1)=(length(find(T_center>217)))+1...

```

```

*0.01;%温度大于 217° C 的时间
curve_parameter(5,1)=T_center(n);%峰值温度
if curve_parameter(1,1)<3 && curve_parameter(2,1)>-3 && ...
    60<curve_parameter(3,1) && curve_parameter(3,1)<120 &&...
    40<curve_parameter(4,1) && curve_parameter(4,1)<90 &&...
    240<curve_parameter(5,1) && curve_parameter(5,1)<250
r=find(T_center==max(T_center));
q=find(T_217(1:r)==min(T_217(1:r)));
s(p)=0;
for i=q:1:r-1
    s(p)=s(p)+(T_center(i)-217)*0.01*v_transport;
end
if s(p)<u
    u=s(p);
    parameter_fit(1,1)=T_range_1_5;
    parameter_fit(1,2)=T_range_6;
    parameter_fit(1,3)=T_range_7;
    parameter_fit(1,4)=T_range_8_9;
    parameter_fit(1,5)=v_transport;
end
p=p+1;
end
end
end
end
end

```

第三题程序：(MATLAB)

夹逼法求得使阴影面积最小的温区 1 到 5 和温区 6 的最优温度，对不同温区温度进行遍历

——STEP1

现对温区 1 到 5 和温区 6 的温度以 1 度的步长进行遍历：

%%夹逼法求得使阴影面积最小的温区 1 到 5 和温区 6 的最优温度，对不同温区温度进行遍历

%现对温区 1 到 5 和温区 6 的温度以 1 度的步长进行遍历

clearvars -EXCEPT best_parameter time_temperature_fact

p=1;

u=inf;

for T_range_1_5=165:185

 for T_range_6=185:205

 for T_range_7=225.1

 for T_range_8_9=265

 for v_transport=99.1/60

```

d_board_center=best_parameter(1,1);
a=best_parameter(1,2);
parameter_rise=best_parameter(2,1);
parameter_down=best_parameter(2,2);
k=1;
T_center(1)=25;
T_center_halfsecond(1,1)=0;
T_center_halfsecond(1,2)=25;
for t=0:0.01:373
    d_transport(k)=v_transport*t-d_board_center;
%建立到炉前区域的距离与回焊炉温度的函数映射关系
if d_transport(k)<0
    T_oven(k)=25;
else if 0<=d_transport(k) && d_transport(k)<25
    T_oven(k)=(T_range_1_5-25)/25*d_transport(k)+25;
else if 25<=d_transport(k) && d_transport(k)<197.5
    T_oven(k)=T_range_1_5;
else if 197.5<=d_transport(k) && d_transport(k)<202.5
    T_oven(k)=(T_range_6-T_range_1_5)/5*(d_transport(k)-197.5)+T_range_1_5;
else if 202.5<=d_transport(k) && d_transport(k)<233
    T_oven(k)=T_range_6;
else if 233<=d_transport(k) && d_transport(k)<238
    T_oven(k)=(T_range_7-T_range_6)/5*(d_transport(k)-233)+T_range_6;
else if 238<=d_transport(k) && d_transport(k)<268.5
    T_oven(k)=T_range_7;
else if 268.5<=d_transport(k) && d_transport(k)<273.5
    T_oven(k)=(T_range_8_9-T_range_7)/5*(d_transport(k)-268.5)+T_range_7;
else if 273.5<=d_transport(k) && d_transport(k)<339.5
    T_oven(k)=T_range_8_9;
else if 339.5<=d_transport(k) && d_transport(k)<344.5
    T_oven(k)=T_range_8_9-(T_range_8_9-25)/5*(d_transport(k)-339.5);
else if 344.5<=d_transport(k)
    T_oven(k)=25;
end
end
end
end
end
end
end
end
end

```

```

end
if T_oven(k)-T_center(k)>0
    gradient(k)=(T_oven(k)-T_center(k))*2*0.015*(a+parameter_rise*T_center(k));
else if T_oven(k)-T_center(k)<=0
    gradient(k)=(T_oven(k)-T_center(k))*2*0.015*(a+parameter_down*T_center(k));
else if d_transport(k)<0
    gradient(k)=0;
end
end
end
T_217(k)=abs(T_center(k)-217);
T_center(k+1)=T_center(k)+gradient(k)*0.01;
time(k)=t;
if mod(k,00)==0
    T_center_halfsecond((k*0.001+0.5)/0.5,1)=k*0.01;
    T_center_halfsecond((k*0.001+0.5)/0.5,2)=T_center(k);
end
k=k+1;
end
f=find(gradient==max(gradient));
curve_parameter(1,1)=gradient(f);%温度上升斜率最高值
g=find(gradient==min(gradient));
curve_parameter(2,1)=gradient(g);%温度下降斜率最低值
n=find(T_center==max(T_center));
curve_parameter(3,1)=(length(find(T_center(1:n)>150 & T_center(1:n)<190))+1)...
*0.01;%温度上升过程中在 150°C~190°C 的时间
curve_parameter(4,1)=(length(find(T_center>217))+1)...
*0.01;%温度大于 217°C 的时间
curve_parameter(5,1)=T_center(n);%峰值温度
if curve_parameter(1,1)<3 && curve_parameter(2,1)>-3 && ...
60<curve_parameter(3,1) && curve_parameter(3,1)<120 &&...
40<curve_parameter(4,1) && curve_parameter(4,1)<90 &&...
240<curve_parameter(5,1) && curve_parameter(5,1)<250
r=find(T_center==max(T_center));
q=find(T_217(1:r)==min(T_217(1:r)));
s(p)=0;
for i=q:1:r-1
    s(p)=s(p)+(T_center(i)-217)*0.01*v_transport;
end
if s(p)<u
    u=s(p);
    parameter_fit(1,1)=T_range_1_5;
    parameter_fit(1,2)=T_range_6;

```

```

        parameter_fit(1,3)=T_range_7;
        parameter_fit(1,4)=T_range_8_9;
        parameter_fit(1,5)=v_transport;
    end
    p=p+1;
end
end
end
end
end

```

第三题程序：（MATLAB）

夹逼法求得使阴影面积最小的温区 1 到 5 和温区 6 的最优温度，对不同温区温度进行遍历

——STEP2

现对温区 1 到 5 和温区 6 的温度以 1 度的步长进行遍历：

%%夹逼法求得使阴影面积最小的温区 1 到 5 和温区 6 的最优温度，对不同温区温度进行遍历

%现对温区 1 到 5 和温区 6 的温度以 1 度的步长进行遍历

clearvars -EXCEPT best_parameter time_temperature_fact

p=1;

u=inf;

for T_range_1_5=174:0.1:176

 for T_range_6=194:0.1:195

 for T_range_7=225.1

 for T_range_8_9=265

 for v_transport=99.1/60

d_board_center=best_parameter(1,1);

a=best_parameter(1,2);

parameter_rise=best_parameter(2,1);

parameter_down=best_parameter(2,2);

k=1;

T_center(1)=25;

T_center_halfsecond(1,1)=0;

T_center_halfsecond(1,2)=25;

 for t=0:0.01:373

 d_transport(k)=v_transport*t-d_board_center;

%建立到炉前区域的距离与回焊炉温度的函数映射关系

if d_transport(k)<0

 T_oven(k)=25;

else if 0<=d_transport(k) && d_transport(k)<25

 T_oven(k)=(T_range_1_5-25)/25*d_transport(k)+25;

else if 25<=d_transport(k) && d_transport(k)<197.5

```

T_oven(k)=T_range_1_5;
else if 197.5<=d_transport(k) && d_transport(k)<202.5
    T_oven(k)=(T_range_6-T_range_1_5)/5*(d_transport(k)-197.5)+T_range_1_5;
else if 202.5<=d_transport(k) && d_transport(k)<233
    T_oven(k)=T_range_6;
else if 233<=d_transport(k) && d_transport(k)<238
    T_oven(k)=(T_range_7-T_range_6)/5*(d_transport(k)-233)+T_range_6;
else if 238<=d_transport(k) && d_transport(k)<268.5
    T_oven(k)=T_range_7;
else if 268.5<=d_transport(k) && d_transport(k)<273.5
    T_oven(k)=(T_range_8_9-T_range_7)/5*(d_transport(k)-268.5)+T_range_7;
else if 273.5<=d_transport(k) && d_transport(k)<339.5
    T_oven(k)=T_range_8_9;
else if 339.5<=d_transport(k) && d_transport(k)<344.5
    T_oven(k)=T_range_8_9-(T_range_8_9-25)/5*(d_transport(k)-339.5);
else if 344.5<=d_transport(k)
T_oven(k)=25;
end
if T_oven(k)-T_center(k)>0
    gradient(k)=(T_oven(k)-T_center(k))*2*0.015*(a+parameter_rise*T_center(k));
else if T_oven(k)-T_center(k)<=0
    gradient(k)=(T_oven(k)-T_center(k))*2*0.015*(a+parameter_down*T_center(k));
else if d_transport(k)<0
    gradient(k)=0;
end
end
end
T_217(k)=abs(T_center(k)-217);
T_center(k+1)=T_center(k)+gradient(k)*0.01;
time(k)=t;
if mod(k,00)==0
    T_center_halfsecond((k*0.001+0.5)/0.5,1)=k*0.01;
    T_center_halfsecond((k*0.001+0.5)/0.5,2)=T_center(k);

```

```

    end
    k=k+1;
end
f=find(gradient==max(gradient));
curve_parameter(1,1)=gradient(f);%温度上升斜率最高值
g=find(gradient==min(gradient));
curve_parameter(2,1)=gradient(g);%温度下降斜率最低值
n=find(T_center==max(T_center));
curve_parameter(3,1)=(length(find(T_center(1:n)>150 & T_center(1:n)<190))+1)...
*0.01;%温度上升过程中在 150° C~190° C 的时间
curve_parameter(4,1)=(length(find(T_center>217))+1)...
*0.01;%温度大于 217° C 的时间
curve_parameter(5,1)=T_center(n);%峰值温度
if curve_parameter(1,1)<3 && curve_parameter(2,1)>-3 && ...
60<curve_parameter(3,1) && curve_parameter(3,1)<120 &&...
40<curve_parameter(4,1) && curve_parameter(4,1)<90 &&...
240<curve_parameter(5,1) && curve_parameter(5,1)<250
r=find(T_center==max(T_center));
q=find(T_217(1:r)==min(T_217(1:r)));
s(p)=0;
for i=q:1:r-1
    s(p)=s(p)+(T_center(i)-217)*0.01*v_transport;
end
if s(p)<u
    u=s(p);
    parameter_fit(1,1)=T_range_1_5;
    parameter_fit(1,2)=T_range_6;
    parameter_fit(1,3)=T_range_7;
    parameter_fit(1,4)=T_range_8_9;
    parameter_fit(1,5)=v_transport;
end
p=p+1;
end
end
end
end
end

```

第三题程序：(MATLAB)

画出在最佳参数下的温度随时间的变化曲线(炉温曲线)、计算该曲线的制程参数：

%对于满足要求的最优的参数，画出该条件下的炉温曲线

```

clearvars -EXCEPT best_parameter time_temperature_fact
T_range_1_5=175.1;%温区温度
T_range_6=194.8;
T_range_7=225.1;
T_range_8_9=265;
v_transport=99.1/60;%运输速度

%画出在最佳参数下的温度随时间的变化曲线(炉温曲线)
d_board_center=best_parameter(1,1);
a=best_parameter(1,2);
parameter_rise=best_parameter(2,1);
parameter_down=best_parameter(2,2);
k=1;
T_center(1)=25;
T_center_halfsecond(1,1)=0;
T_center_halfsecond(1,2)=25;
for t=0:0.01:373
    d_transport(k)=v_transport*t-d_board_center;
%建立到炉前区域的距离与回焊炉温度的函数映射关系
if d_transport(k)<0
    T_oven(k)=25;
else if 0<=d_transport(k) && d_transport(k)<25
    T_oven(k)=(T_range_1_5-25)/25*d_transport(k)+25;
else if 25<=d_transport(k) && d_transport(k)<197.5
    T_oven(k)=T_range_1_5;
else if 197.5<=d_transport(k) && d_transport(k)<202.5
    T_oven(k)=(T_range_6-T_range_1_5)/5*(d_transport(k)-197.5)+T_range_1_5;
else if 202.5<=d_transport(k) && d_transport(k)<233
    T_oven(k)=T_range_6;
else if 233<=d_transport(k) && d_transport(k)<238
    T_oven(k)=(T_range_7-T_range_6)/5*(d_transport(k)-233)+T_range_6;
else if 238<=d_transport(k) && d_transport(k)<268.5
    T_oven(k)=T_range_7;
else if 268.5<=d_transport(k) && d_transport(k)<273.5
    T_oven(k)=(T_range_8_9-T_range_7)/5*(d_transport(k)-268.5)+T_range_7;
else if 273.5<=d_transport(k) && d_transport(k)<339.5
    T_oven(k)=T_range_8_9;
else if 339.5<=d_transport(k) && d_transport(k)<344.5
    T_oven(k)=T_range_8_9-(T_range_8_9-25)/5*(d_transport(k)-339.5);
else if 344.5<=d_transport(k)
    T_oven(k)=25;
end
end

```

```

end
end
end
end
end
end
end
end
end
if T_oven(k)-T_center(k)>0
    gradient(k)=(T_oven(k)-T_center(k))*2*0.015*(a+parameter_rise*T_center(k));
else if T_oven(k)-T_center(k)<=0
    gradient(k)=(T_oven(k)-T_center(k))*2*0.015*(a+parameter_down*T_center(k));
else if d_transport(k)<0
    gradient(k)=0;
end
end
end
T_center(k+1)=T_center(k)+gradient(k)*0.01;
time(k)=t;
k=k+1;
end

%制程参数
f=find(gradient==max(gradient));
curve_parameter(1,1)=gradient(f);%温度上升斜率最高值
g=find(gradient==min(gradient));
curve_parameter(2,1)=gradient(g);%温度下降斜率最低值
n=find(T_center==max(T_center));
curve_parameter(3,1)=(length(find(T_center(1:n)>150 & T_center(1:n)<190))+1)...
*0.01;%温度上升过程中在 150° C~190° C 的时间
curve_parameter(4,1)=(length(find(T_center>217))+1)...
*0.01;%温度大于 217° C 的时间
curve_parameter(5,1)=T_center(n);%峰值温度

t_top=0.01*(find(T_center==max(T_center))-1);
T_top=T_center(find(T_center==max(T_center)));


%画图
plot(time,T_center(1:k-1))
axis([0 400 0 300])
xlabel('时间')
ylabel('温度')

```

```

hold on
plot(0:1:400,T_top*ones(1,401),'LineStyle','--','LineWidth',1)
hold on
plot(0:1:400,217*ones(1,401),'LineStyle','--','LineWidth',1)
hold on
plot(t_top*ones(1,301),0:1:300,'LineStyle','--','LineWidth',1)
text(15,217+8 ,217°C)
text(15,217+32 ,240.0016°C)
text(t_top+15,T_top+15,(212.29s,240.0016°C))

```

第四题程序：（MATLAB）

求出以左右到对称轴距离相等且符合条件的点的温度的差值平方和的最小值：

夹逼法求得使差值平方和最小的温区 7、温区 8 到 9 的最优温度以及传送带的最优速度——

STEP1

对不同温区温度、传送带速度进行遍历，现对温区 7、温区 8 到 9 的温度以 1 度的步长进行遍历；对传送带速度以 1cm/min 的步长进行遍历：

```

%%夹逼法求得使差值平方和最小的温区 7、温区 8 到 9 的最优温度以及传送带的最优速度
%对不同温区温度、传送带速度进行遍历，现对温区 7、温区 8 到 9 的温度以 1 度的步长进...
%...行遍历；对传送带速度以 1cm/min 的步长进行遍历
clearvars -EXCEPT best_parameter time_temperature_fact
p=1;
w=inf;
for T_range_1_5=175
    for T_range_6=195
        for T_range_7=225:1:245
            for T_range_8_9=245:1:265
                for v_transport=65/60:1/60:100/60
                    d_board_center=best_parameter(1,1);
                    a=best_parameter(1,2);
                    parameter_rise=best_parameter(2,1);
                    parameter_down=best_parameter(2,2);
                    k=1;
                    T_center(1)=25;
                    T_center_halfsecond(1,1)=0;
                    T_center_halfsecond(1,2)=25;
                    for t=0:0.01:373
                        d_transport(k)=v_transport*t-d_board_center;
                    %建立到炉前区域的距离与回焊炉温度的函数映射关系
                    if d_transport(k)<0
                        T_oven(k)=25;
                    else if 0<=d_transport(k) && d_transport(k)<25
                        T_oven(k)=(T_range_1_5-25)/25*d_transport(k)+25;
                    end
                end
            end
        end
    end
end

```

```

else if 25<=d_transport(k) && d_transport(k)<197.5
    T_oven(k)=T_range_1_5;
else if 197.5<=d_transport(k) && d_transport(k)<202.5
    T_oven(k)=(T_range_6-T_range_1_5)/5*(d_transport(k)-197.5)+T_range_1_5;
else if 202.5<=d_transport(k) && d_transport(k)<233
    T_oven(k)=T_range_6;
else if 233<=d_transport(k) && d_transport(k)<238
    T_oven(k)=(T_range_7-T_range_6)/5*(d_transport(k)-233)+T_range_6;
else if 238<=d_transport(k) && d_transport(k)<268.5
    T_oven(k)=T_range_7;
else if 268.5<=d_transport(k) && d_transport(k)<273.5
    T_oven(k)=(T_range_8_9-T_range_7)/5*(d_transport(k)-268.5)+T_range_7;
else if 273.5<=d_transport(k) && d_transport(k)<339.5
    T_oven(k)=T_range_8_9;
else if 339.5<=d_transport(k) && d_transport(k)<344.5
    T_oven(k)=T_range_8_9-(T_range_8_9-25)/5*(d_transport(k)-339.5);
else if 344.5<=d_transport(k)
T_oven(k)=25;
end
if T_oven(k)-T_center(k)>0
    gradient(k)=(T_oven(k)-T_center(k))*2*0.015*(a+parameter_rise*T_center(k));
else if T_oven(k)-T_center(k)<=0
    gradient(k)=(T_oven(k)-T_center(k))*2*0.015*(a+parameter_down*T_center(k));
else if d_transport(k)<0
    gradient(k)=0;
end
end
end
T_217(k)=T_center(k)-217;
T_center(k+1)=T_center(k)+gradient(k)*0.01;
time(k)=t;
k=k+1;
end

```

```

f=find(gradient==max(gradient));
curve_parameter(1,1)=gradient(f);%温度上升斜率最高值
g=find(gradient==min(gradient));
curve_parameter(2,1)=gradient(g);%温度下降斜率最低值
n=find(T_center==max(T_center));
curve_parameter(3,1)=(length(find(T_center(1:n)>150 & T_center(1:n)<190))+1)...
*0.01;%温度上升过程中在 150° C~190° C 的时间
curve_parameter(4,1)=(length(find(T_center>217))+1)...
*0.01;%温度大于 217° C 的时间
curve_parameter(5,1)=T_center(n);%峰值温度
if curve_parameter(1,1)<3 && curve_parameter(2,1)>-3 && ...
60<curve_parameter(3,1) && curve_parameter(3,1)<120 &&...
40<curve_parameter(4,1) && curve_parameter(4,1)<90 &&...
240<curve_parameter(5,1) && curve_parameter(5,1)<250
miss(p)=0;
s(p)=0;
r=find(T_center==max(T_center));%找出峰值温度的序数
x=find(T_217(1:r)>0);
q=x(1);%曲线中温度高于 217 度的左邻界点序数
y=find(T_217(r:k-1)<0);
v=y(1)+r-2;%曲线中温度高于 217 度的右邻界点序数
if r-q-(v-r)>0 %判断位于峰值温度两边的温度在 217 左右的点的横坐标到峰值温
度的横坐标之间的距离大小
    pace_total=v-r;
else if r-q-(v-r)<=0
    pace_total=r-q;
end
end
for i=1:pace_total
    miss(p)=miss(p)+(T_center(r-i)-T_center(r+i))^2;%到峰值左右距离相同的点对
应的温度的误差平方和
end
if miss(p)<w
    w=miss(p);
    parameter_fit(1,1)=T_range_1_5;
    parameter_fit(1,2)=T_range_6;
    parameter_fit(1,3)=T_range_7;
    parameter_fit(1,4)=T_range_8_9;
    parameter_fit(1,5)=v_transport;
    parameter_fit(1,6)=miss(p);
end
p=p+1;
end

```

```

        end
    end
end
end
end

```

第四题程序：(MATLAB)

求出以左右到对称轴距离相等且符合条件的点的温度的差值平方和的最小值：

夹逼法求得使差值平方和最小的温区 7、温区 8 到 9 的最优温度以及传送带的最优速度——

STEP2

对不同温区温度、传送带速度进行遍历,现对温区 7、温区 8 到 9 的温度以 0.1 度的步长进行遍历；对传送带速度以 0.1cm/min 的步长进行遍历：

%%夹逼法求得使差值平方和最小的温区 7、温区 8 到 9 的最优温度以及传送带的最优速度
%对不同温区温度、传送带速度进行遍历,现对温区 7、温区 8 到 9 的温度以 0.1 度的步长进...

%...行遍历；对传送带速度以 0.1cm/min 的步长进行遍历

```

clearvars -EXCEPT best_parameter time_temperature_fact
p=1;
w=inf;
for T_range_1_5=175
    for T_range_6=195
        for T_range_7=225:0.1:226
            for T_range_8_9=264:0.1:265
                for v_transport=98/60:1/600:100/60
d_board_center=best_parameter(1,1);
a=best_parameter(1,2);
parameter_rise=best_parameter(2,1);
parameter_down=best_parameter(2,2);
k=1;
T_center(1)=25;
T_center_halfsecond(1,1)=0;
T_center_halfsecond(1,2)=25;
for t=0:0.01:373
    d_transport(k)=v_transport*t-d_board_center;
%建立到炉前区域的距离与回焊炉温度的函数映射关系
if d_transport(k)<0
    T_oven(k)=25;
else if 0<=d_transport(k) && d_transport(k)<25
    T_oven(k)=(T_range_1_5-25)/25*d_transport(k)+25;
else if 25<=d_transport(k) && d_transport(k)<197.5
    T_oven(k)=T_range_1_5;
else if 197.5<=d_transport(k) && d_transport(k)<202.5
    T_oven(k)=(T_range_6-T_range_1_5)/5*(d_transport(k)-197.5)+T_range_1_5;
else if 202.5<=d_transport(k) && d_transport(k)<233
    T_oven(k)=(T_range_6-T_range_1_5)/5*(d_transport(k)-202.5)+T_range_1_5;
end;
k=k+1;
end;
end;
end;
end;

```

```

T_oven(k)=T_range_6;
else if 233<=d_transport(k) && d_transport(k)<238
    T_oven(k)=(T_range_7-T_range_6)/5*(d_transport(k)-233)+T_range_6;
else if 238<=d_transport(k) && d_transport(k)<268.5
    T_oven(k)=T_range_7;
else if 268.5<=d_transport(k) && d_transport(k)<273.5
    T_oven(k)=(T_range_8_9-T_range_7)/5*(d_transport(k)-268.5)+T_range_7;
else if 273.5<=d_transport(k) && d_transport(k)<339.5
    T_oven(k)=T_range_8_9;
else if 339.5<=d_transport(k) && d_transport(k)<344.5
    T_oven(k)=T_range_8_9-(T_range_8_9-25)/5*(d_transport(k)-339.5);
else if 344.5<=d_transport(k)
T_oven(k)=25;
end
if T_oven(k)-T_center(k)>0
    gradient(k)=(T_oven(k)-T_center(k))*2*0.015*(a+parameter_rise*T_center(k));
else if T_oven(k)-T_center(k)<=0
    gradient(k)=(T_oven(k)-T_center(k))*2*0.015*(a+parameter_down*T_center(k));
else if d_transport(k)<0
    gradient(k)=0;
end
end
end
end
T_217(k)=T_center(k)-217;
T_center(k+1)=T_center(k)+gradient(k)*0.01;
time(k)=t;
k=k+1;
end
f=find(gradient==max(gradient));
curve_parameter(1,1)=gradient(f);%温度上升斜率最高值
g=find(gradient==min(gradient));
curve_parameter(2,1)=gradient(g);%温度下降斜率最低值
n=find(T_center==max(T_center));

```

```

curve_parameter(3,1)=(length(find(T_center(1:n)>150 & T_center(1:n)<190))+1)...
    *0.01;%温度上升过程中在 150° C~190° C 的时间
curve_parameter(4,1)=(length(find(T_center>217))+1)...
    *0.01;%温度大于 217° C 的时间
curve_parameter(5,1)=T_center(n);%峰值温度
if curve_parameter(1,1)<3 && curve_parameter(2,1)>-3 && ...
    60<curve_parameter(3,1) && curve_parameter(3,1)<120 &&...
    40<curve_parameter(4,1) && curve_parameter(4,1)<90 &&...
    240<curve_parameter(5,1) && curve_parameter(5,1)<250
miss(p)=0;
s(p)=0;
r=find(T_center==max(T_center));%找出峰值温度的序数
x=find(T_217(1:r)>0);
q=x(1);%曲线中温度高于 217 度的左邻界点序数
y=find(T_217(r:k-1)<0);
v=y(1)+r-2;%曲线中温度高于 217 度的右邻界点序数
if r-q-(v-r)>0 %判断位于峰值温度两边的温度在 217 左右的点的横坐标到峰值温度的横坐标之间的距离大小
    pace_total=v-r;
else if r-q-(v-r)<=0
    pace_total=r-q;
end
end
for i=1:pace_total
    miss(p)=miss(p)+(T_center(r-i)-T_center(r+i))^2;%到峰值左右距离相同的点对应的温度的误差平方和
end
if miss(p)<w
    w=miss(p);
    parameter_fit(1,1)=T_range_1_5;
    parameter_fit(1,2)=T_range_6;
    parameter_fit(1,3)=T_range_7;
    parameter_fit(1,4)=T_range_8_9;
    parameter_fit(1,5)=v_transport;
    parameter_fit(1,6)=miss(p);
end
p=p+1;
end
end
end
end

```

第四题程序：(MATLAB)

固定之前求得的温区 7、温区 8 到 9 的最优温度以及传送带的最优速度，用夹逼法求得使差值平方和最小的温区 1 到 5、温区 6 的最优温度 ——STEP1

对不同温区温度进行遍历,现对温区 1 到 5、温区 6 的温度以 1 度的步长进行遍历

%%固定之前求得的温区 7、温区 8 到 9 的最优温度以及传送带的最优速度，用夹逼法求得...

%...使差值平方和最小的温区 1 到 5、温区 6 的最优温度

%对不同温区温度进行遍历,现对温区 1 到 5、温区 6 的温度以 1 度的步长进行遍历

clearvars -EXCEPT best_parameter time_temperature_fact

p=1;

w=inf;

for T_range_1_5=165:185

 for T_range_6=185:205

 for T_range_7=225.4

 for T_range_8_9=265

 for v_transport=99.2/60

d_board_center=best_parameter(1,1);

a=best_parameter(1,2);

parameter_rise=best_parameter(2,1);

parameter_down=best_parameter(2,2);

k=1;

T_center(1)=25;

T_center_halfsecond(1,1)=0;

T_center_halfsecond(1,2)=25;

 for t=0:0.01:373

 d_transport(k)=v_transport*t-d_board_center;

%建立到炉前区域的距离与回焊炉温度的函数映射关系

if d_transport(k)<0

 T_oven(k)=25;

else if 0<=d_transport(k) && d_transport(k)<25

 T_oven(k)=(T_range_1_5-25)/25*d_transport(k)+25;

else if 25<=d_transport(k) && d_transport(k)<197.5

 T_oven(k)=T_range_1_5;

else if 197.5<=d_transport(k) && d_transport(k)<202.5

 T_oven(k)=(T_range_6-T_range_1_5)/5*(d_transport(k)-197.5)+T_range_1_5;

else if 202.5<=d_transport(k) && d_transport(k)<233

 T_oven(k)=T_range_6;

else if 233<=d_transport(k) && d_transport(k)<238

 T_oven(k)=(T_range_7-T_range_6)/5*(d_transport(k)-233)+T_range_6;

else if 238<=d_transport(k) && d_transport(k)<268.5

 T_oven(k)=T_range_7;

else if 268.5<=d_transport(k) && d_transport(k)<273.5

 T_oven(k)=(T_range_8_9-T_range_7)/5*(d_transport(k)-268.5)+T_range_7;

```

else if 273.5<=d_transport(k) && d_transport(k)<339.5
    T_oven(k)=T_range_8_9;
else if 339.5<=d_transport(k) && d_transport(k)<344.5
    T_oven(k)=T_range_8_9-(T_range_8_9-25)/5*(d_transport(k)-339.5);
else if 344.5<=d_transport(k)
T_oven(k)=25;
end
if T_oven(k)-T_center(k)>0
    gradient(k)=(T_oven(k)-T_center(k))*2*0.015*(a+parameter_rise*T_center(k));
else if T_oven(k)-T_center(k)<=0
    gradient(k)=(T_oven(k)-T_center(k))*2*0.015*(a+parameter_down*T_center(k));
else if d_transport(k)<0
    gradient(k)=0;
end
end
end
T_217(k)=T_center(k)-217;
T_center(k+1)=T_center(k)+gradient(k)*0.01;
time(k)=t;
k=k+1;
end
f=find(gradient==max(gradient));
curve_parameter(1,1)=gradient(f);%温度上升斜率最高值
g=find(gradient==min(gradient));
curve_parameter(2,1)=gradient(g);%温度下降斜率最低值
n=find(T_center==max(T_center));
curve_parameter(3,1)=(length(find(T_center(1:n)>150 & T_center(1:n)<190))+1)...
    *0.01;%温度上升过程中在 150° C~190° C 的时间
curve_parameter(4,1)=(length(find(T_center>217)))+1)...
    *0.01;%温度大于 217° C 的时间
curve_parameter(5,1)=T_center(n);%峰值温度
if curve_parameter(1,1)<3 && curve_parameter(2,1)>-3 && ...
    60<curve_parameter(3,1) && curve_parameter(3,1)<120 &&...

```

```

40<curve_parameter(4,1) && curve_parameter(4,1)<90 &&...
240<curve_parameter(5,1) && curve_parameter(5,1)<250
miss(p)=0;
s(p)=0;
r=find(T_center==max(T_center));%找出峰值温度的序数
x=find(T_217(1:r)>0);
q=x(1);%曲线中温度高于 217 度的左邻界点序数
y=find(T_217(r:k-1)<0);
v=y(1)+r-2;%曲线中温度高于 217 度的右邻界点序数
if r-q-(v-r)>0 %判断位于峰值温度两边的温度在 217 左右的点的横坐标到峰值温
度的横坐标之间的距离大小
    pace_total=v-r;
else if r-q-(v-r)<=0
    pace_total=r-q;
end
end
for i=1:pace_total
    miss(p)=miss(p)+(T_center(r-i)-T_center(r+i))^2;%到峰值左右距离相同的点对
应的温度的误差平方和
end
if miss(p)<w
    w=miss(p);
    parameter_fit(1,1)=T_range_1_5;
    parameter_fit(1,2)=T_range_6;
    parameter_fit(1,3)=T_range_7;
    parameter_fit(1,4)=T_range_8_9;
    parameter_fit(1,5)=v_transport;
    parameter_fit(1,6)=miss(p);
end
p=p+1;
end
end
end
end

```

第四题程序：(MATLAB)

固定之前求得的温区 7、温区 8 到 9 的最优温度以及传送带的最优速度，用夹逼法求得使差值平方和最小的温区 1 到 5、温区 6 的最优温度 ——**STEP2**

对不同温区温度进行遍历，现对温区 1 到 5、温区 6 的温度以 0.1 度的步长进行遍历

%固定之前求得的温区 7、温区 8 到 9 的最优温度以及传送带的最优速度，用夹逼法求得...

```

%...使差值平方和最小的温区 1 到 5、温区 6 的最优温度
%对不同温区温度进行遍历,现对温区 1 到 5、温区 6 的温度以 1 度的步长进行遍历
clearvars -EXCEPT best_parameter time_temperature_fact
p=1;
w=inf;
for T_range_1_5=174:0.1:176
    for T_range_6=194:0.1:196
        for T_range_7=225.4
            for T_range_8_9=265
                for v_transport=99.2/60
d_board_center=best_parameter(1,1);
a=best_parameter(1,2);
parameter_rise=best_parameter(2,1);
parameter_down=best_parameter(2,2);
k=1;
T_center(1)=25;
T_center_halfsecond(1,1)=0;
T_center_halfsecond(1,2)=25;
    for t=0:0.01:373
        d_transport(k)=v_transport*t-d_board_center;
%建立到炉前区域的距离与回焊炉温度的函数映射关系
if d_transport(k)<0
    T_oven(k)=25;
else if 0<=d_transport(k) && d_transport(k)<25
    T_oven(k)=(T_range_1_5-25)/25*d_transport(k)+25;
else if 25<=d_transport(k) && d_transport(k)<197.5
    T_oven(k)=T_range_1_5;
else if 197.5<=d_transport(k) && d_transport(k)<202.5
    T_oven(k)=(T_range_6-T_range_1_5)/5*(d_transport(k)-197.5)+T_range_1_5;
else if 202.5<=d_transport(k) && d_transport(k)<233
    T_oven(k)=T_range_6;
else if 233<=d_transport(k) && d_transport(k)<238
    T_oven(k)=(T_range_7-T_range_6)/5*(d_transport(k)-233)+T_range_6;
else if 238<=d_transport(k) && d_transport(k)<268.5
    T_oven(k)=T_range_7;
else if 268.5<=d_transport(k) && d_transport(k)<273.5
    T_oven(k)=(T_range_8_9-T_range_7)/5*(d_transport(k)-268.5)+T_range_7;
else if 273.5<=d_transport(k) && d_transport(k)<339.5
    T_oven(k)=T_range_8_9;
else if 339.5<=d_transport(k) && d_transport(k)<344.5
    T_oven(k)=T_range_8_9-(T_range_8_9-25)/5*(d_transport(k)-339.5);
else if 344.5<=d_transport(k)
T_oven(k)=25;

```

```

end
if T_oven(k)-T_center(k)>0
    gradient(k)=(T_oven(k)-T_center(k))*2*0.015*(a+parameter_rise*T_center(k));
else if T_oven(k)-T_center(k)<=0
    gradient(k)=(T_oven(k)-T_center(k))*2*0.015*(a+parameter_down*T_center(k));
else if d_transport(k)<0
    gradient(k)=0;
end
end
end
T_217(k)=T_center(k)-217;
T_center(k+1)=T_center(k)+gradient(k)*0.01;
time(k)=t;
k=k+1;
end
f=find(gradient==max(gradient));
curve_parameter(1,1)=gradient(f);%温度上升斜率最高值
g=find(gradient==min(gradient));
curve_parameter(2,1)=gradient(g);%温度下降斜率最低值
n=find(T_center==max(T_center));
curve_parameter(3,1)=(length(find(T_center(1:n)>150 & T_center(1:n)<190))+1)...
*0.01;%温度上升过程中在 150° C~190° C 的时间
curve_parameter(4,1)=(length(find(T_center>217))+1)...
*0.01;%温度大于 217° C 的时间
curve_parameter(5,1)=T_center(n);%峰值温度
if curve_parameter(1,1)<3 && curve_parameter(2,1)>-3 && ...
60<curve_parameter(3,1) && curve_parameter(3,1)<120 &&...
40<curve_parameter(4,1) && curve_parameter(4,1)<90 &&...
240<curve_parameter(5,1) && curve_parameter(5,1)<250
miss(p)=0;
s(p)=0;
r=find(T_center==max(T_center));%找出峰值温度的序数
x=find(T_217(1:r)>0);

```

```

q=x(1);%曲线中温度高于 217 度的左邻界点序数
y=find(T_217(r:k-1)<0);
v=y(1)+r-2;%曲线中温度高于 217 度的右邻界点序数
if r-q-(v-r)>0 %判断位于峰值温度两边的温度在 217 左右的点的横坐标到峰值温
度的横坐标之间的距离大小
    pace_total=v-r;
else if r-q-(v-r)<=0
    pace_total=r-q;
end
end
for i=1:pace_total
    miss(p)=miss(p)+(T_center(r-i)-T_center(r+i))^2;%到峰值左右距离相同的点对
应的温度的误差平方和
end
if miss(p)<w
    w=miss(p);
    parameter_fit(1,1)=T_range_1_5;
    parameter_fit(1,2)=T_range_6;
    parameter_fit(1,3)=T_range_7;
    parameter_fit(1,4)=T_range_8_9;
    parameter_fit(1,5)=v_transport;
    parameter_fit(1,6)=miss(p);
end
p=p+1;
end
end
end
end
end

```

第四题程序：(MATLAB)

对多目标优化模型求解最优的解：

夹逼法求得使目标函数最小的温区 7、温区 8 到 9 的最优温度以及传送带的最优速度，现对温区 7、温区 8 到 9 的温度以 0.1 度的步长进行遍历；对传送带速度以 0.1cm/min 的步长进行遍历：

```

%%夹逼法求得使目标函数最小的温区 7、温区 8 到 9 的最优温度以及传送带的最优速度
%对不同温区温度、传送带速度进行遍历,现对温区 7、温区 8 到 9 的温度以 0.1 度的步长进...
%...行遍历；对传送带速度以 0.1cm/min 的步长进行遍历
clearvars -EXCEPT best_parameter time_temperature_fact
p=1;
w=inf;

```

```

for T_range_1_5=175
    for T_range_6=195
        for T_range_7=225:0.1:226
            for T_range_8_9=264:0.1:265
                for v_transport=98/60:1/600:100/60
d_board_center=best_parameter(1,1);
a=best_parameter(1,2);
parameter_rise=best_parameter(2,1);
parameter_down=best_parameter(2,2);
k=1;
T_center(1)=25;
T_center_halfsecond(1,1)=0;
T_center_halfsecond(1,2)=25;
    for t=0:0.01:373
        d_transport(k)=v_transport*t-d_board_center;
%建立到炉前区域的距离与回焊炉温度的函数映射关系
if d_transport(k)<0
    T_oven(k)=25;
else if 0<=d_transport(k) && d_transport(k)<25
    T_oven(k)=(T_range_1_5-25)/25*d_transport(k)+25;
else if 25<=d_transport(k) && d_transport(k)<197.5
    T_oven(k)=T_range_1_5;
else if 197.5<=d_transport(k) && d_transport(k)<202.5
    T_oven(k)=(T_range_6-T_range_1_5)/5*(d_transport(k)-197.5)+T_range_1_5;
else if 202.5<=d_transport(k) && d_transport(k)<233
    T_oven(k)=T_range_6;
else if 233<=d_transport(k) && d_transport(k)<238
    T_oven(k)=(T_range_7-T_range_6)/5*(d_transport(k)-233)+T_range_6;
else if 238<=d_transport(k) && d_transport(k)<268.5
    T_oven(k)=T_range_7;
else if 268.5<=d_transport(k) && d_transport(k)<273.5
    T_oven(k)=(T_range_8_9-T_range_7)/5*(d_transport(k)-268.5)+T_range_7;
else if 273.5<=d_transport(k) && d_transport(k)<339.5
    T_oven(k)=T_range_8_9;
else if 339.5<=d_transport(k) && d_transport(k)<344.5
    T_oven(k)=T_range_8_9-(T_range_8_9-25)/5*(d_transport(k)-339.5);
else if 344.5<=d_transport(k)
T_oven(k)=25;
end
end
end
end

```

```

end
end
end
end
end
end
if T_oven(k)-T_center(k)>0
    gradient(k)=(T_oven(k)-T_center(k))*2*0.015*(a+parameter_rise*T_center(k));
else if T_oven(k)-T_center(k)<=0
    gradient(k)=(T_oven(k)-T_center(k))*2*0.015*(a+parameter_down*T_center(k));
else if d_transport(k)<0
    gradient(k)=0;
end
end
end
T_217(k)=T_center(k)-217;
T_center(k+1)=T_center(k)+gradient(k)*0.01;
time(k)=t;
k=k+1;
end
f=find(gradient==max(gradient));
curve_parameter(1,1)=gradient(f);%温度上升斜率最高值
g=find(gradient==min(gradient));
curve_parameter(2,1)=gradient(g);%温度下降斜率最低值
n=find(T_center==max(T_center));
curve_parameter(3,1)=(length(find(T_center(1:n)>150 & T_center(1:n)<190))+1)...
*0.01;%温度上升过程中在 150°C~190°C 的时间
curve_parameter(4,1)=(length(find(T_center>217))+1)...
*0.01;%温度大于 217°C 的时间
curve_parameter(5,1)=T_center(n);%峰值温度
if curve_parameter(1,1)<3 && curve_parameter(2,1)>-3 && ...
    60<curve_parameter(3,1) && curve_parameter(3,1)<120 &&...
    40<curve_parameter(4,1) && curve_parameter(4,1)<90 &&...
    240<curve_parameter(5,1) && curve_parameter(5,1)<250
miss(p)=0;
s(p)=0;
r=find(T_center==max(T_center));%找出峰值温度的序数
x=find(T_217(1:r)>0);
q=x(1);%曲线中温度高于 217 度的左邻界点序数
y=find(T_217(r:k-1)<0);
v=y(1)+r-2;%曲线中温度高于 217 度的右邻界点序数
if r-q-(v-r)>0 %判断位于峰值温度两边的温度在 217 左右的点的横坐标到峰值温度的横坐标之间的距离大小

```

```

pace_total=v-r;
else if r-q-(v-r)<=0
pace_total=r-q;
end
end
for i=1:pace_total
miss(p)=miss(p)+(T_center(r-i)-T_center(r+i))^2;%到峰值左右距离相同的点对应的温度的误差平方和
end
for i=q:1:r-1
s(p)=s(p)+(T_center(i)-217)*0.01*v_transport;%阴影部分的面积
end
if 2-540.4573/s(p)-49800/miss(p)<w
w=2-540.4573/s(p)-49800/miss(p);
parameter_fit(1,1)=T_range_1_5;
parameter_fit(1,2)=T_range_6;
parameter_fit(1,3)=T_range_7;
parameter_fit(1,4)=T_range_8_9;
parameter_fit(1,5)=v_transport;
parameter_fit(1,6)=s(p);
parameter_fit(1,7)=miss(p);
end
p=p+1;
end
end
end
end

```

第四题程序：(MATLAB)

固定之前求得的温区 7、温区 8 到 9 的最优温度以及传送带的最优速度，用夹逼法求得使差值平方和最小的温区 1 到 5、温区 6 的最优温度，对不同温区温度进行遍历，现对温区 1 到 5、温区 6 的温度以 0.1 度的步长进行遍历：

%%固定之前求得的温区 7、温区 8 到 9 的最优温度以及传送带的最优速度，用夹逼法求得使差值平方和最小的温区 1 到 5、温区 6 的最优温度，对不同温区温度进行遍历，现对温区 1 到 5、温区 6 的温度以 0.1 度的步长进行遍历

```

clearvars -EXCEPT best_parameter time_temperature_fact
p=1;
w=inf;
for T_range_1_5=174:0.1:176
for T_range_6=194:0.1:196
for T_range_7=225.4

```

```

for T_range_8_9=265
    for v_transport=99.2/60
d_board_center=best_parameter(1,1);
a=best_parameter(1,2);
parameter_rise=best_parameter(2,1);
parameter_down=best_parameter(2,2);
k=1;
T_center(1)=25;
T_center_halfsecond(1,1)=0;
T_center_halfsecond(1,2)=25;
    for t=0:0.01:373
        d_transport(k)=v_transport*t-d_board_center;
%建立到炉前区域的距离与回焊炉温度的函数映射关系
if d_transport(k)<0
    T_oven(k)=25;
else if 0<=d_transport(k) && d_transport(k)<25
    T_oven(k)=(T_range_1_5-25)/25*d_transport(k)+25;
else if 25<=d_transport(k) && d_transport(k)<197.5
    T_oven(k)=T_range_1_5;
else if 197.5<=d_transport(k) && d_transport(k)<202.5
    T_oven(k)=(T_range_6-T_range_1_5)/5*(d_transport(k)-197.5)+T_range_1_5;
else if 202.5<=d_transport(k) && d_transport(k)<233
    T_oven(k)=T_range_6;
else if 233<=d_transport(k) && d_transport(k)<238
    T_oven(k)=(T_range_7-T_range_6)/5*(d_transport(k)-233)+T_range_6;
else if 238<=d_transport(k) && d_transport(k)<268.5
    T_oven(k)=T_range_7;
else if 268.5<=d_transport(k) && d_transport(k)<273.5
    T_oven(k)=(T_range_8_9-T_range_7)/5*(d_transport(k)-268.5)+T_range_7;
else if 273.5<=d_transport(k) && d_transport(k)<339.5
    T_oven(k)=T_range_8_9;
else if 339.5<=d_transport(k) && d_transport(k)<344.5
    T_oven(k)=T_range_8_9-(T_range_8_9-25)/5*(d_transport(k)-339.5);
else if 344.5<=d_transport(k)
T_oven(k)=25;
end
end
end
end
end
end
end

```

```

end
end
end

if T_oven(k)-T_center(k)>0
    gradient(k)=(T_oven(k)-T_center(k))*2*0.015*(a+parameter_rise*T_center(k));
else if T_oven(k)-T_center(k)<=0
    gradient(k)=(T_oven(k)-T_center(k))*2*0.015*(a+parameter_down*T_center(k));
else if d_transport(k)<0
    gradient(k)=0;
end
end
end

T_217(k)=T_center(k)-217;
T_center(k+1)=T_center(k)+gradient(k)*0.01;
time(k)=t;
k=k+1;
end

f=find(gradient==max(gradient));
curve_parameter(1,1)=gradient(f);%温度上升斜率最高值
g=find(gradient==min(gradient));
curve_parameter(2,1)=gradient(g);%温度下降斜率最低值
n=find(T_center==max(T_center));
curve_parameter(3,1)=(length(find(T_center(1:n)>150 & T_center(1:n)<190))+1)...
*0.01;%温度上升过程中在 150°C~190°C 的时间
curve_parameter(4,1)=(length(find(T_center>217))+1)...
*0.01;%温度大于 217°C 的时间
curve_parameter(5,1)=T_center(n);%峰值温度

if curve_parameter(1,1)<3 && curve_parameter(2,1)>-3 && ...
60<curve_parameter(3,1) && curve_parameter(3,1)<120 &&...
40<curve_parameter(4,1) && curve_parameter(4,1)<90 &&...
240<curve_parameter(5,1) && curve_parameter(5,1)<250
miss(p)=0;
s(p)=0;
r=find(T_center==max(T_center));%找出峰值温度的序数
x=find(T_217(1:r)>0);
q=x(1);%曲线中温度高于 217 度的左邻界点序数
y=find(T_217(r:k-1)<0);
v=y(1)+r-2;%曲线中温度高于 217 度的右邻界点序数
if r-q-(v-r)>0 %判断位于峰值温度两边的温度在 217 左右的点的横坐标到峰值温度的横坐标之间的距离大小
    pace_total=v-r;
else if r-q-(v-r)<=0
    pace_total=r-q;
end

```

```

        end
    end
    for i=1:pace_total
        miss(p)=miss(p)+(T_center(r-i)-T_center(r+i))^2;%到峰值左右距离相同的点对应的温度的误差平方和
    end
    for i=q:1:r-1
        s(p)=s(p)+(T_center(i)-217)*0.01*v_transport;%阴影部分的面积
    end
    if 2-540.4573/s(p)-49800/miss(p)<w
        w=2-540.4573/s(p)-49800/miss(p);
        parameter_fit(1,1)=T_range_1_5;
        parameter_fit(1,2)=T_range_6;
        parameter_fit(1,3)=T_range_7;
        parameter_fit(1,4)=T_range_8_9;
        parameter_fit(1,5)=v_transport;
        parameter_fit(1,6)=s(p);
        parameter_fit(1,7)=miss(p);
    end
    p=p+1;
end
end
end
end
end

```

第四题程序：（MATLAB）

对于满足要求的最优的参数，画出该条件下的炉温曲线与计算出制程参数：

%对于满足要求的最优的参数，画出该条件下的炉温曲线

```
clearvars -EXCEPT best_parameter time_temperature_fact
```

```
T_range_1_5=174.8;%温区温度
```

```
T_range_6=195.2;
```

```
T_range_7=225.4;
```

```
T_range_8_9=265;
```

```
v_transport=99.2/60;%运输速度
```

%画出在最佳参数下的温度随时间的变化曲线(炉温曲线)

```
d_board_center=best_parameter(1,1);
```

```
a=best_parameter(1,2);
```

```
parameter_rise=best_parameter(2,1);
```

```
parameter_down=best_parameter(2,2);
```

```
k=1;
```

```

T_center(1)=25;
T_center_halfsecond(1,1)=0;
T_center_halfsecond(1,2)=25;
for t=0:0.01:373
    d_transport(k)=v_transport*t-d_board_center;
%建立到炉前区域的距离与回焊炉温度的函数映射关系
if d_transport(k)<0
    T_oven(k)=25;
else if 0<=d_transport(k) && d_transport(k)<25
    T_oven(k)=(T_range_1_5-25)/25*d_transport(k)+25;
else if 25<=d_transport(k) && d_transport(k)<197.5
    T_oven(k)=T_range_1_5;
else if 197.5<=d_transport(k) && d_transport(k)<202.5
    T_oven(k)=(T_range_6-T_range_1_5)/5*(d_transport(k)-197.5)+T_range_1_5;
else if 202.5<=d_transport(k) && d_transport(k)<233
    T_oven(k)=T_range_6;
else if 233<=d_transport(k) && d_transport(k)<238
    T_oven(k)=(T_range_7-T_range_6)/5*(d_transport(k)-233)+T_range_6;
else if 238<=d_transport(k) && d_transport(k)<268.5
    T_oven(k)=T_range_7;
else if 268.5<=d_transport(k) && d_transport(k)<273.5
    T_oven(k)=(T_range_8_9-T_range_7)/5*(d_transport(k)-268.5)+T_range_7;
else if 273.5<=d_transport(k) && d_transport(k)<339.5
    T_oven(k)=T_range_8_9;
else if 339.5<=d_transport(k) && d_transport(k)<344.5
    T_oven(k)=T_range_8_9-(T_range_8_9-25)/5*(d_transport(k)-339.5);
else if 344.5<=d_transport(k)
T_oven(k)=25;
end
if T_oven(k)-T_center(k)>0
    gradient(k)=(T_oven(k)-T_center(k))*2*0.015*(a+parameter_rise*T_center(k));
else if T_oven(k)-T_center(k)<=0
    gradient(k)=(T_oven(k)-T_center(k))*2*0.015*(a+parameter_down*T_center(k));

```

```

else if d_transport(k)<0
    gradient(k)=0;
end
end
end
T_center(k+1)=T_center(k)+gradient(k)*0.01;
time(k)=t;
k=k+1;
end

%制程参数
f=find(gradient==max(gradient));
curve_parameter(1,1)=gradient(f);%温度上升斜率最高值
g=find(gradient==min(gradient));
curve_parameter(2,1)=gradient(g);%温度下降斜率最低值
n=find(T_center==max(T_center));
curve_parameter(3,1)=(length(find(T_center(1:n)>150 & T_center(1:n)<190))+1)...
    *0.01;%温度上升过程中在 150° C~190° C 的时间
curve_parameter(4,1)=(length(find(T_center>217))+1)...
    *0.01;%温度大于 217° C 的时间
curve_parameter(5,1)=T_center(n);%峰值温度

t_top=0.01*(find(T_center==max(T_center))-1);
T_top=T_center(find(T_center==max(T_center)));


%画图
plot(time,T_center(1:k-1))
axis([0 400 0 300])
xlabel('时间')
ylabel('温度')
hold on
plot(0:1:400,T_top*ones(1,401),'LineStyle','--','LineWidth',1)
hold on
plot(0:1:400,217*ones(1,401),'LineStyle','--','LineWidth',1)
hold on
plot(t_top*ones(1,301),0:1:300,'LineStyle','--','LineWidth',1)
text(15,217+8 , '217°C')
text(15,217+32 , '240.0003°C')
text(t_top+15,T_top+15,'(212.07s,240.0003°C)')

```