

基于热风回流焊机热平衡机理模型的简化解耦控制

鲁五一，朱国军，谢志明，张小青

(长沙航空职业技术学院，湖南 长沙 410124)

摘 要：从热学机理出发建立了基于热平衡机理的热风回流焊机模型，针对该模型阶数极高，且具有强耦合性的特点，应用 Padé 逼近法把模型各通道的传递函数简化成经典的二阶系统，结合不变性原理对系统进行解耦补偿设计，从仿真效果来看，任一温区的温度控制基本不再受其它温区的温度变化影响，达到了更精确的控制要求。

关键词：热风回流焊机热平衡模型；Padé 逼近化简；解耦；仿真
中图分类号：TP15 **文献标志码：**A **文章编号：**1673-9833(2009)06-0038-04

Simplified Decoupling Control on the Reflow Soldering Machine Heat Balance Mechanism Model

Lu Wuyi , Zhu Guojun , Xie Zhiming , Zhang Xiaoqing

(Changsha Aeronautical Vocational and Technical College , Changsha Hunan 410124 , China)

Abstract :Sets up the reflow soldering machine dynamic model based on heat balance mechanism. According to the characteristics of high-order and strong couple, adopts the Padé interpolation technique to simplify all channels' transfer functions into second-order classic system. Designs the decoupling compensations for the system with the invariance principle, and the simulation results show that any zone temperature control is no longer influenced by other zones' temperature changes. It achieves a more precise control requirement.

Keywords : the reflow soldering machine heat balance mechanism model ; Padé interpolation sampling technique ; decouple ; simulation

多温区热风回流焊的自动化控制属于复杂工业过程控制。全热风回流焊是当今 SMT 行业中回流焊工艺的主流焊接方法之一^[1]。热风回流焊机系统是一种复杂的工业自动化多温区温控系统，其整体结构由加热系数、电路板传输系统、控制系统及其它辅助部分构成，共 16 个加温区，分成 8 组，每组分为上、下 2 个温区，具体分布如图 1 所示，每个温区都采用电加热管对流换热升温。由于各个温区不是绝对隔离的，实验中当某个温区因设定值改变或者受到干扰发生变化时，将立刻影响到其它温区，尤其是相邻温区的温度变化，多个温区控制系统同时投入运行，其耦合很严

重，这将无法满足生产过程对控制的要求。

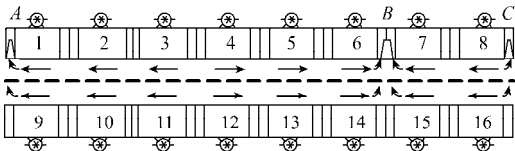


图 1 热风回流焊机 16 温区分布图
Fig. 1 Distribution of 16 temperature zone in reflow soldering machine

文献[2]从热学机理出发，推导出 3 种不同工况所对应的不同状态空间模型。该模型一定程度上方便了对该系统的控制算法研究，然而，该模型参数具较高

的阶数, 且 Bristol-Shinskey 相对增益分析表明该系统各温区间有强耦合性, 这些都对控制算法的研究不利。本文在该模型基础上, 先采用经典的 Padé 逼近法简化模型, 再结合不变性原理进行解耦补偿设计, 使得各温区的控制不再受其它温区温度变化的影响。

1 模型简化

应用最多的模型简化方法是频域拟合法, 该方法即在一定频率下, 在相同的控制器和控制参数(提供一样的系统增益和相角)作用下, 则认为拟合前后的模型一致。对于一些呈单调响应的调节系统, 其操作频率近似为 0, 此时在操作频率 $\omega_s \rightarrow 0$ 下进行拟合简化能满足工程设计要求, 达较高精度。热风回流焊的温度调节过程正好是一个单调响应的调节过程, 因此只需在 $\omega_s \rightarrow 0$ 下对各通道的传递函数进行简化即可。

Padé 逼近法是一种零频附近拟合工程应用较好的方法。Padé 逼近模型是个多项式, 低阶 Padé 近似模型在低频范围能很好地与高阶模型拟合。假定高阶原

$$G(s) = \frac{a_0 + a_1 s + a_2 s^2 + \dots + a_m s^m}{b_0 + b_1 s + b_2 s^2 + \dots + b_n s^n}.$$

$G(s)$ 在操作频率 $\omega_s \rightarrow 0$, 即 $s=0$ 附近展开成如下幂级数:

$$G(s) = c_0 + c_1 s + c_2 s^2 + \dots + c_n s^n + \dots \quad (1)$$

展开成幂级数有 2 种方法: 一种为长除法, 另一种为 M. Lat 与 Rimitrat 阵列计算法, 后者在计算机应用中较方便。

假设希望得到的简化模型为二阶典型模型, 即

$$G^*(s) = \frac{a_0^* + a_1^* s}{b_0^* + b_1^* s + b_2^* s^2}, \text{ 为便于计算, 可把它转化为:}$$

$$G^*(s) = \frac{\alpha_0 + \alpha_1 s}{1 + \beta_1 s + \beta_2 s^2}, \quad (2)$$

$$\text{式(2)中: } \alpha_0 = \frac{a_0^*}{b_0^*}, \alpha_1 = \frac{a_1^*}{b_0^*}, \beta_1 = \frac{b_1^*}{b_0^*}, \beta_2 = \frac{b_2^*}{b_0^*}.$$

$G^*(s)$ 在 $s=0$ 附近展开成幂级数为:

$$G^*(s) = c_0^* + c_1^* s + c_2^* s^2 + \dots + c_n^* s^n + \dots, \quad (3)$$

$$\text{式(3)中: } c_0^* = \alpha_0, c_1^* = (\alpha_1 - \alpha_0 \beta_1);$$

$$c_2^* = (\alpha_0 \beta_1^2 - \alpha_1 \beta_1 - \alpha_0 \beta_2);$$

$$c_3^* = (2\alpha_0 \beta_1 \beta_2 + \alpha_1 \beta_1^2 - \alpha_0 \beta_1^3 - \alpha_1 \beta_2).$$

根据经典逼近思想^[3], 要使 $G^*(s)$ 同原模型 $G(s)$ 逼近, 式(3)的展开式系数应与式(1)的系数相等, 即 $c_0 = c_0^*; c_1 = c_1^*; c_2 = c_2^*; c_3 = c_3^*; \dots$

式(2)有 $\alpha_0, \alpha_1, \beta_1, \beta_2$ 4 个待定系数, 故只需列 4 个等式方程就可求得简化后的模型参数。

从热风回流焊机热平衡机理状态空间模型较易得其传递函数矩阵模型。鉴于篇幅, 这里仅以 1 通道(输入温区 2—输出温区 1)的传递函数为例, 具体为:

$$G_{1,2}(s) = G_{9,10}(s) =$$

$$\frac{0.1257 s^6 + 0.6178 s^5 + 0.8349 s^4 + 0.1913 s^3 + s^8 + 9.484 s^7 + 34.12 s^6 + 56.14 s^5 + 38.52 s^4 + \dots}{0.01657 s^2 + 0.0005129 s + 5.153e-6} \rightarrow$$

$$\leftarrow \frac{5.817 s^3 + 0.3307 s^2 + 0.007369 s + 5.564e-5}{0.0926 + 3.0476 s + 150.9770 s^2 - 8126.3 s^3 + 4.4842 \times 10^5 s^4 - 2.4846 \times 10^7 s^5 + \dots},$$

该通道模型分子分母的阶数都相当高, 对其展开得:

$$G_{1,2}(s) = G_{9,10}(s) = 0.0926 - 3.0476 s + 150.9770 s^2 -$$

$$8126.3 s^3 + 4.4842 \times 10^5 s^4 - 2.4846 \times 10^7 s^5 + \dots,$$

最后简化成如下典型的二阶系统:

$$G_{1,2}^*(s) = G_{9,10}^*(s) = \frac{0.0926 + 2.7219 s}{1 + 62.3061 s + 420.1627 s^2}$$

用相同参数的 PID 控制器对简化前后的(输入) $u_2 \rightarrow y_1$ (输出) 通道对象进行 MATLAB 仿真比较, 所得单位阶跃响应曲线见图 2。从图 2 可看出, 简化前后 2 响应曲线基本重合在一起, 这表明在低频段, 化简前后对象逼近效果非常好。

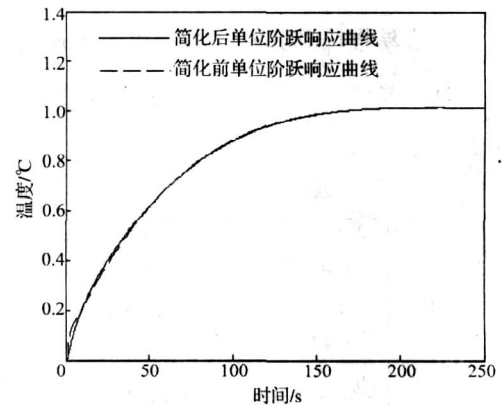


图 2 $u_2 \rightarrow y_1$ 通道模型简化前后单位阶跃响应比较
Fig. 2 Comparison of unit step response after and before $u_2 \rightarrow y_1$ channel model simplification

2 解耦设计

对角矩阵解耦法适合在工程且有模型的系统中应用, 对于该法研究较多的是其不变性原理。鉴于篇幅, 这里只给出工况 1 的研究。针对工况 1 的传递函数矩阵给出此时系统的内部信号流程图, 见图 3。

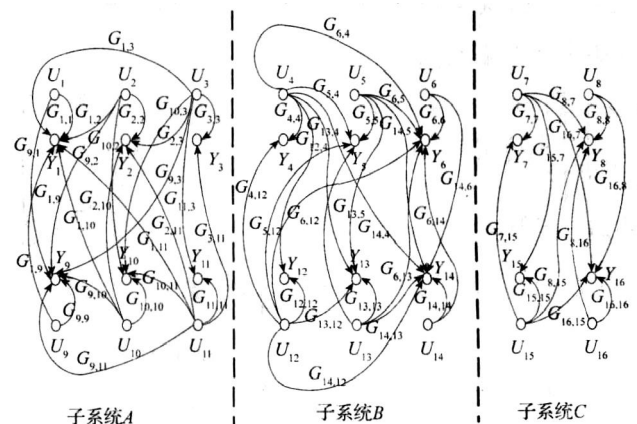


图 3 热风回流焊机系统内部信号流程图
Fig. 3 Internal signal flow of the reflow soldering machine

从图3的内部信号流可知,输入 U_3 ,通过 $G_{1,3}(s)$ 对 Y_1 产生影响,解耦的最终目的就是使这种影响得到较好的消除。根据不变性原理^[4],如果从外部引入1个解耦支路 $D_{1,3}(s)$ 至输入 U_1 端,信号流如图4所示。

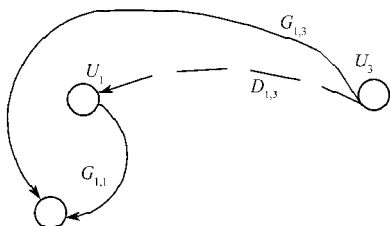


图4 不变性原理在解耦中的应用

Fig. 4 The application of invariance principle in decouple

如果 U_3 通过 $D_{1,3}(s)$ 至 U_1 ,再经 $G_{1,1}(s)$ 然后对 Y_1 产生的影响,能够抵消 U_3 通过 $G_{1,3}(s)$ 对 Y_1 产生的影响,则可以把 $G_{1,3}(s)$ 和 $D_{1,3}(s)$ 同时看作不存在,即只要满足

$$U_3(s)D_{1,3}(s)G_{1,1}(s)+U_3(s)G_{1,3}(s)=0 \text{ 或 } D_{1,3}(s)=-\frac{G_{1,3}(s)}{G_{1,1}(s)} \quad (4)$$

上述方法易推广到其它支路,得到普遍适用的解耦网络计算关系式,即 $D_{i,j}(s)=-\frac{G_{i,j}(s)}{G_{i,i}(s)}$,解耦结构框图见图5。

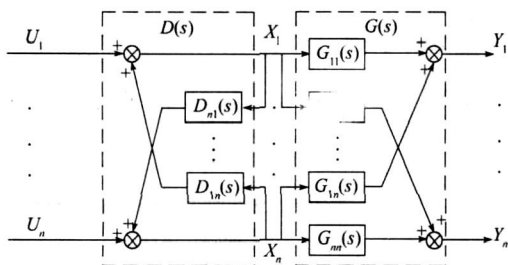


图5 基于不变性原理的解耦结构框图

Fig. 5 Decouple block diagram based on invariance principle

对于图5所示解耦结构,有

$$\begin{cases} U_1 + D_{12}(s)X_2 + D_{13}(s)X_3 + \cdots + D_{1n}(s)X_n = X_1, \\ U_2 + D_{21}(s)X_1 + D_{23}(s)X_3 + \cdots + D_{2n}(s)X_n = X_2, \\ \vdots \\ U_n + D_{n1}(s)X_1 + D_{n2}(s)X_2 + \cdots + D_{nn}(s)X_n = X_n, \end{cases} \quad (5)$$

用矩阵可表示为

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -D_{12}(s) & \cdots & -D_{1n}(s) \\ -D_{21}(s) & 1 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & -D_{(n-1)n}(s) \\ -D_{n1}(s) & \cdots & -D_{n(n-1)}(s) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_n \end{bmatrix}$$

若记 $U = [U_1 \ U_2 \ \cdots \ U_n]^T$, $X = [X_1 \ X_2 \ \cdots \ X_n]^T$;

$$\tilde{D} = \begin{bmatrix} 1 & -D_{12}(s) & \cdots & -D_{1n}(s) \\ -D_{21}(s) & 1 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & -D_{(n-1)n}(s) \\ -D_{n1}(s) & \cdots & -D_{n(n-1)}(s) & 1 \end{bmatrix},$$

则式(5)可记成 $U = \tilde{D}X$,可求得 $X = \tilde{D}^{-1}U$ 。

解耦后开环等价对象变为

$$\hat{G} = \tilde{D}^{-1}G = \begin{bmatrix} 1 & -D_{12}(s) & \cdots & -D_{1n}(s) \\ -D_{21}(s) & 1 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & -D_{(n-1)n}(s) \\ -D_{n1}(s) & \cdots & -D_{n(n-1)}(s) & 1 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) & \cdots & G_{1n}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & G_{(n-1)n}(s) \\ G_{n1}(s) & \cdots & G_{n(n-1)}(s) & G_{nn}(s) \end{bmatrix},$$

把式(4)中各对应的表达式代入上式中,得到

$$\hat{G}(s) = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & G_{22}(s) & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & G_{nn}(s) \end{bmatrix}.$$

从图3所示系统内部信号流图可看出,系统可分成子系统A、子系统B、子系统C 3部分。由于各子系统解耦设计类似,这里仅以子系统C为例。子系统C为 4×4 阶系统,被控量和操作量关系可描述如下:

$$Y_C(s) = G_C(s)U_C(s).$$

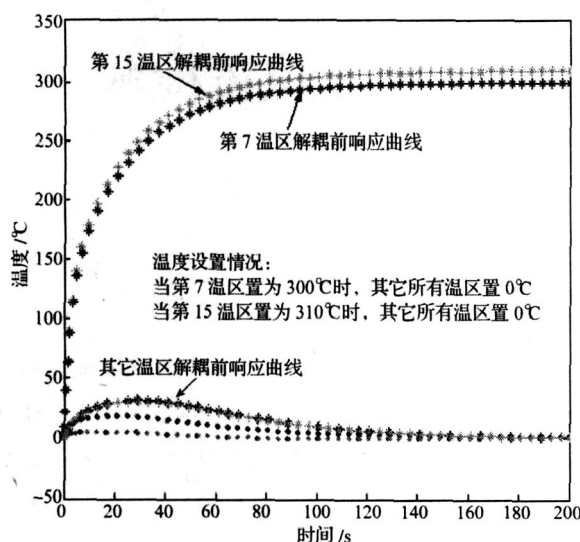
其中: $Y_C = [y_7 \ y_8 \ y_{15} \ y_{16}]^T$, $U_C = [u_7 \ u_8 \ u_{15} \ u_{16}]^T$,

$$G_C(s) = \begin{bmatrix} G_{7,7}^*(s) & 0 & G_{7,15}^*(s) & 0 \\ G_{8,7}^*(s) & G_{8,8}^*(s) & G_{8,15}^*(s) & G_{8,16}^*(s) \\ G_{15,7}^*(s) & 0 & G_{15,15}^*(s) & 0 \\ G_{16,7}^*(s) & G_{16,8}^*(s) & G_{16,15}^*(s) & G_{16,16}^*(s) \end{bmatrix}.$$

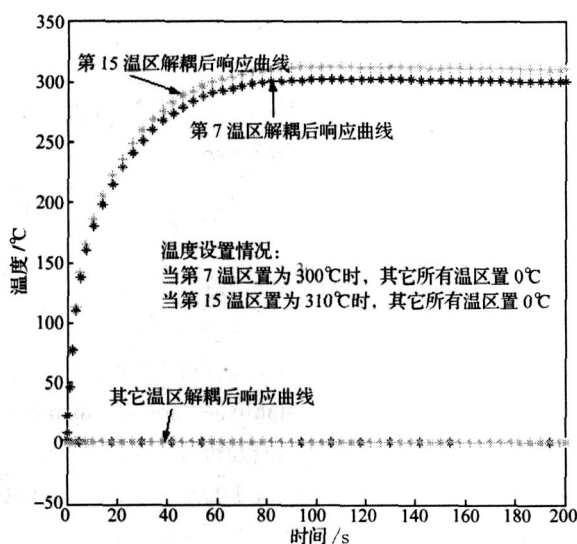
按照不变性原理对角矩阵解耦法,可求得解耦网络为:

$$D_C(s) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\frac{G_{7,15}^*(s)}{G_{7,7}^*(s)} & 0 \\ -\frac{G_{8,7}^*(s)}{G_{8,8}^*(s)} & 1 & -\frac{G_{8,15}^*(s)}{G_{8,8}^*(s)} & -\frac{G_{8,16}^*(s)}{G_{8,8}^*(s)} \\ -\frac{G_{15,7}^*(s)}{G_{15,15}^*(s)} & 0 & 1 & 0 \\ -\frac{G_{16,7}^*(s)}{G_{16,16}^*(s)} & -\frac{G_{16,8}^*(s)}{G_{16,16}^*(s)} & -\frac{G_{16,15}^*(s)}{G_{16,16}^*(s)} & 1 \end{bmatrix}.$$

对以上解耦系统进行MATLAB仿真,仿真时每个温度对象都加入PID控制器与系统一起形成闭环,解耦前后各相应的控制器采用相同的参数。7、8、15、16共4个温区的温度设置分别为300、245、310、255,解耦前后的仿真效果如图6、7所示。每图都由2次温度设置后分别仿真得到的2次结果叠加而成。比较各温区解耦前后的输出响应曲线,在解耦前,1个温区的输入变化明显地能影响其它温区输出的变化,而解耦后各自通道的输入对其它通道的输出影响几乎为0,解耦效果较好。



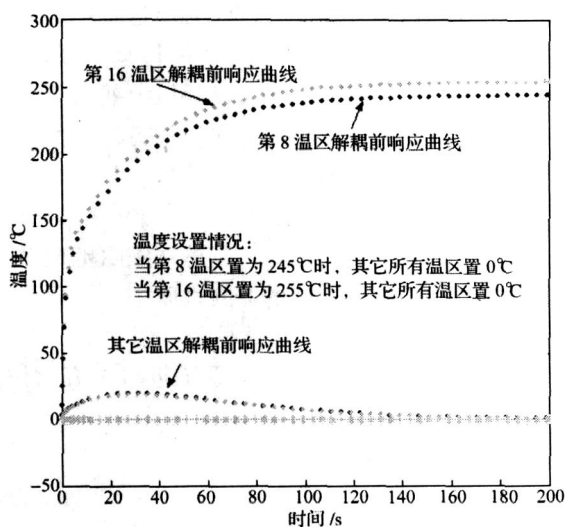
a) 解耦前仿真比较



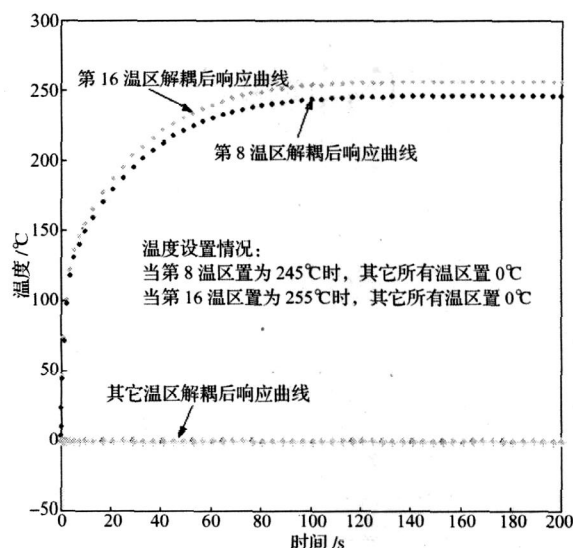
b) 解耦后仿真比较

图6 第7、15温区解耦前后仿真比较

Fig. 6 Comparison of simulation after and before decoupling in 7&15 temperature zone



a) 解耦前仿真比较



b) 解耦后仿真比较

图7 第8、16温区解耦前后仿真比较

Fig. 7 Comparison of simulation after and before decoupling in 8&16 temperature zone

3 结语

本文在简化热风回流焊温度控制机理模型的基础上,进行了解耦补偿设计,使得原复杂的 16×16 阶的耦合系统变成了16个一对一的独立温控系统,为进一步进行优化控制算法研究奠定了基础,更好地提高了系统的动态性和控制精度。

参考文献:

- [1] Motohiro Yamane, Nobuaki Orita, Koichi Miyazaki, et al. Development of New Model Reflow Oven for Lead-Free Soldering[J]. Furukawa Review, 2004, 26: 31-36.
- [2] 鲁五一, 汪学军, 向涛, 等. 基于热平衡机理的热风回流焊机多温区系统动态建模及仿真[J]. 热加工工艺, 2006, 35(19): 51-55.
- [3] 顾传青. 一种新型的矩阵Padé逼近方法[J]. 自然杂志, 2002, 24(1): 41-44.
- [4] 聂修军. 模拟锅炉温度的解耦控制[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2007.
- [5] 任玉清, 唐永哲, 郝涛. 自适应解耦控制方法的研究[J]. 火箭与制导学报, 2008, 28(6): 41-43.

(责任编辑: 廖友媛)