

# 综合智能温度控制策略在泡沫玻璃生产中的应用

余亚冰, 于波, 强明辉

(兰州理工大学 电气工程与信息工程学院, 甘肃 兰州 730050;  
甘肃省工业过程先进控制重点实验室, 甘肃 兰州 730050)

**摘要:** 通过对泡沫玻璃生产窑炉工作机理及温度控制系统的分析, 提出了一种综合智能控制方案: 首先利用人工神经网络对泡沫玻璃生产窑炉进行建模, 再利用遗传算法对神经网络的权值和阈值进行优化, 然后将此模型作为一个预估模型投入到控制系统中去. 在控制器的设计过程中, 不再使用单一的控制策略, 而是在生产过程中根据坯料温度的输出误差大小来随时改变控制器的结构, 从而达到对泡沫玻璃窑炉生产状态的最佳控制.

**关键词:** 泡沫玻璃; 智能控制; 算法

**中图分类号:** TP273      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1004-0366(2010)04-0137-05

## Application of Integrated Intelligent Control Strategy in the Foam Glass Production

YU Ya-bing, YU Bo, QIANG Ming-hui

(College of Electrical and Information Engineering, Lanzhou University of Science and Technology, Lanzhou 730050, China;  
Key Laboratory of Gansu Advanced Control for Industrial Processes, Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** An integrated intelligent control program is put forward with the analysis of the temperature control system and the working mechanism of the foam glass. First of all, the artificial neural network is applied to the model of the foam glass furnace. Then, we adopt optimized weights and threshold value of neural network with the aid of genetic algorithm. Finally, this model is used as a prediction model to go into the control system. In the designing process of the controller, no single control strategy is applied, but we try to achieve the best control of the foam glass furnace, by modifying the structure of the controller at any time in the production according to the temperature output error of the annealing workpiece.

**Key words:** foam glass; intelligent control; algorithm

泡沫玻璃(foam glass)是以碎玻璃、粉煤灰为主要生产原料<sup>[1,2]</sup>, 加入适当添加剂后经过研磨粉碎形成配合料, 再经过高温烧制而成的一种无机非金属材料. 是一种性能优越的隔热、保温、吸音、耐腐蚀(除 HF 外)、防潮、防火的轻质新型建筑材料<sup>[3~5]</sup>.

泡沫玻璃的生产过程是将废弃玻璃、粉煤灰等主要原料, 添加辅料、发泡剂、改性剂等材料经过粉碎、粉磨形成混合均匀的配合料, 之后将配合料装入模具, 在加热炉中将配合料进行烧制得到. 在加热到

750~900℃时, 配合料开始熔融, 形成一种具有粘弹性的物质, 变成了像气球一样的粘弹体. 此时混合在配合料粉末中的发泡剂发生反应生成气体, 刚好被具有粘弹性的玻璃熔融体所包裹, 形成封闭气泡. 经一定时间的保温后, 使其快速冷却, 让玻璃固化, 则气体被固态玻璃包裹, 形成了多孔玻璃<sup>[4]</sup>. 从泡沫玻璃的生产过程来看, 其烧制工艺可以分为以下 4 个阶段: 预热、发泡、定型、退火. 对于各阶段温度的精确控制是泡沫玻璃生产中的关键控制因素, 正确合

收稿日期: 2010-06-18

基金项目: 甘肃省省长基金资助项目(GS015-A52-012)

理地控制好各生产段的温度是泡沫玻璃生产中的关键技术,因此,选择合理的泡沫玻璃烧成温度控制策略是泡沫玻璃生产的重要环节。

PID 控制是最早发展起来的控制策略之一,对工业生产过程中的线性定常系统,它结构简单,可靠性强,容易实现,并且可以消除稳态误差,在大多数情况下能够满足性能要求,至今有 90% 左右的控制回路仍采用 PID 结构<sup>[9]</sup>。然而实际生产过程往往具有非线性、时变不确定性、滞后现象严重等特点,难以建立精确地数学模型,采用单一的 PID 控制策略已无法满足控制要求。泡沫玻璃的生产过程就是一个很难找到精确模型的典型的非线性、大时滞、大惯性、存在强交叉耦合、时变和复杂的控制对象。因此,需要设计出一种综合的智能控制策略来弥补单一控制策略的不足,从而解决复杂的控制问题。思路如下:首先通过基于遗传算法的多层前馈神经网络建立预估泡沫玻璃生产窑炉模型,以便估计出泡沫玻璃生产窑炉的工作状态。在控制过程中,根据模具坯料温度的输出误差情况,分别采用不同的控制器结构来保证模具坯料温度的稳定性,从而达到降低能耗、提高产品合格率的目的。

## 1 系统组成

在泡沫玻璃的生产中,为了使模具内的坯料受热均匀,分别在炉子的顶部、底部及侧部安装了电加热丝。在工作过程中,通过调节 3 组加热丝的输入电流来控制 3 组加热丝所在温区的温度,从而达到控制模具坯料生产温度的目的。系统组成的原理结构如图 1 所示。

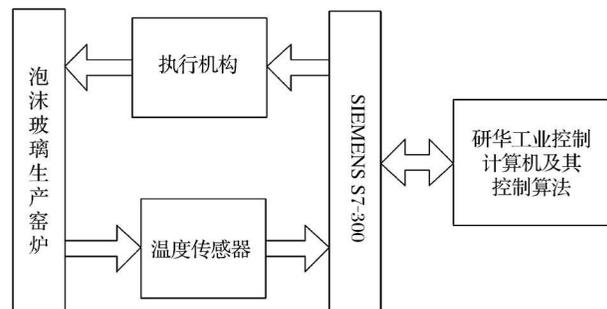


图 1 控制系统组成原理结构

整个系统由泡沫玻璃生产窑炉、温度采集设备、执行机构、下位机、上位机等组成,其中上位机选用研华工业控制计算机,下位机选用 Siemens 公司的 S7-300 系列 PLC。在工作过程中,温度传感器采集生产过程中各加热丝及模具坯料的实时温度,经温度变送器转换成 4~20mA 的电流,同时执行机构

加在各加热丝的电流值也经变送器转变为 4~20mA 的电流,这些模拟量信号再由 S7-300 的模拟量输入模块采集并送入上位工控机中,工控机根据这些参数计算出顶部、侧部、底部加热丝及模具坯料的温度值和输入各加热丝的电流值,工控机根据这些参量,通过相应的控制策略计算出控制执行机构的调节信号,该信号传给 S7-300 的模拟量输出模块并经放大输出给执行机构,来完成对窑炉各加热丝温度的控制,从而达到控制模具坯料温度的目的。

## 2 综合智能控制方案

控制系统采用了神经网络、自适应免疫遗传算法、专家系统等多种智能方法。首先利用人工神经网络对泡沫玻璃生产窑炉进行建模,并利用遗传算法对神经网络的权值和阈值进行优化;然后,将此模型作为一个预估模型投入到控制系统中去,在控制器的设计过程中,不再使用单一的控制策略,而是在生产过程中,根据模具坯料温度的输出误差大小来随时改变控制器的结构,从而达到对泡沫玻璃窑炉生产状态的最佳控制。

### 2.1 预估模型的建立

为了达到良好的控制目的,首先根据现场采集的大量生产数据,并在分析了泡沫玻璃生产窑炉工作机理的基础上,通过人工神经网络建立一个预估模型。这里采用前馈神经网络进行建模,神经网络的结构为 5 层,第 1 层作为输入层,第 3 层作为反映 3 组加热丝热状态的隐层,第 5 层为工件输出温度的输出层,第 2、第 4 层为隐层,其结构如图 2 所示。

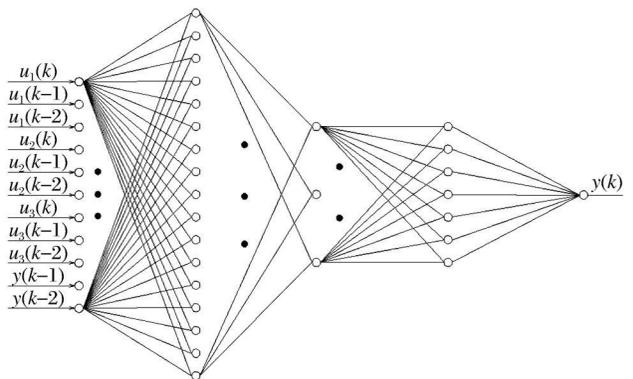


图 2 神经网络结构

$u_1$  为上加热器的输入;  $u_2$  为主加热器的输入;  
 $u_3$  为下加热器的输入;  $y$  为工件的输出温度

神经元的输入输出关系为

$$S_j = \sum_{i=1}^n \omega_{ji} x_i - \theta_j, \quad (1)$$

$$y_j = f(s_j), \quad (2)$$

其中  $x_i$  为输入;  $y_j$  为输出;  $\omega_{ji}$ 、 $\theta_j$  分别为权值和阈值;  $f(\cdot)$  为作用函数, 第 1、3、5 层为线性函数, 第 2、4 层分别为 S 型函数.

神经网络权值和阈值的调整通常使用 BP 算法<sup>[6]</sup>, 但 BP 算法本质上是基于导数的梯度算法, 容易出现局部最优问题, 很难得到全局最优解, 从而使所建模型达不到相应精度, 而遗传算法是模拟自然进化过程的一种随机性全局优化方法, 可以求得全局最优解, 因此, 采用遗传算法来优化神经网络的权值和阈值. 采用该算法, 不仅发挥了神经网络的非线性逼近能力, 而且也使神经网络具有较强的全局寻优能力.

### 2.2 控制系统的设计

针对泡沫玻璃生产窑炉这样很难找到精确模型的典型的非线性、大时滞、大惯性、存在强交叉耦合、时变和复杂的控制对象, 仅用单一的控制策略已经无法达到很好的控制要求, 为此, 我们针对泡沫玻璃生产窑炉的特点, 根据模具坯料温度输出误差  $e$  的不同分别采用不同的控制策略. 在控制一开始, 系统要求以较快的速度达到设定值, 这时我们采用时间最优控制, 即 Bang-Bang 控制规律: 当  $e > 0$  时, 控制器以最小的输出  $U_-$  来控制系统; 当  $e < 0$  时, 控制器

以最大的输出  $U_+$  来控制系统. 随着控制过程的进行, 当模具坯料温度输出误差小于某一范围时, 若仍用此控制律进行控制, 势必会使控制结果超调过大, 并使控制过程产生严重震荡, 必须采用其他控制律. 因此, 当模具坯料温度的输出误差  $|e| \leq 10^\circ\text{C}$  时, 输出误差较小, 需要一个较小的控制量进行精确的控制, 此时采用神经网络控制器进行控制; 当  $|e| > 10^\circ\text{C}$  时, 输出误差较大, 需要一个较大的控制量进行调节, 使输出误差迅速地回到较小的范围内, 此时再次采用时间最小控制规律. 控制器切换流程如图 3. 控制原理如图 4 所示.

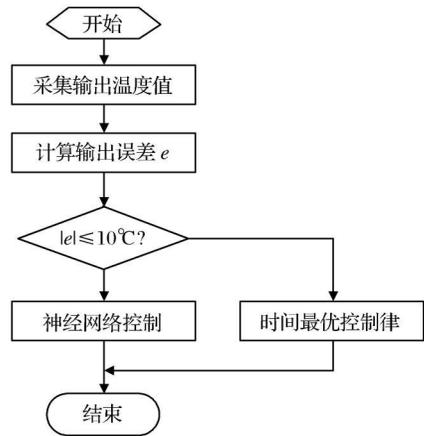


图 3 控制器切换流程

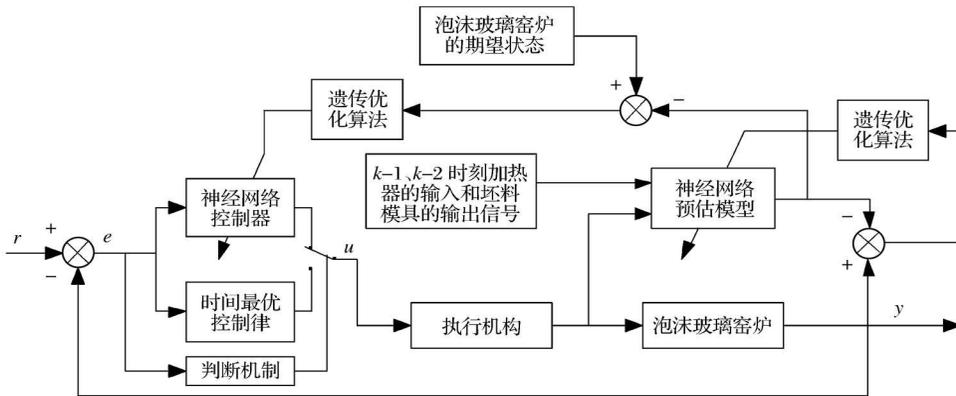


图 4 控制系统原理

时间最优控制律在此不再详细介绍, 只对神经网络控制器加以介绍. 神经网络控制器采用 3 层前馈结构, 第 1 层为输入层, 第 2 层为隐层, 第 3 层为输出层, 各层作用函数在此选为线性函数, 各层神经元个数经过实验研究分别定为 1、4、1, 其权值和阈值的调整仍采用遗传算法. 在控制过程中, 将 2.1 中建立的神经网络模型作为预估模型在线投入, 此模型根据执行机构送给泡沫玻璃生产窑炉各加热丝的工作电流及泡沫玻璃生产窑炉的运行状态, 估计出

下一时刻泡沫玻璃生产窑炉的工作状态. 工作过程中, 在执行机构给泡沫玻璃生产窑炉各加热器和神经网络模型输入信号的同时, 对神经网络加上  $k-1$  及  $k-2$  时刻的泡沫玻璃生产窑炉各加热丝的输入信号和  $k-1$  及  $k-2$  时刻的模具坯料温度的输出信号, 并将神经网络模型的输出和泡沫玻璃生产窑炉温度输出的差作为神经网络模型的学习指导信号, 通过遗传算法对神经网络模型的权值和阈值进行在线优化调整, 使预估模型更加逼近真实控制对象, 同时, 将神经

网络模型的输出信号作为下一时刻的估计输出,将下一时刻模型估计输出与下一时刻泡沫玻璃生产窑炉期望输出之差作为神经网络控制器的学习指导信号,通过遗传算法对神经网络控制器的权值和阈值进行在线优化调整,从而使神经网络控制器根据设定值和泡沫玻璃生产窑炉的工作状态计算出系统调节的控制量.整个控制策略的实现在上位工业控制计算机中通过C++语言编程实现.在控制过程中,根据采集的现场实际生产数据,在上位工业控制计算机中由控制算法程序将其转换为相应的控制信号送给下位机,再经下位机转换输出给执行机构.

### 2.3 基于遗传算法的神经网络权值、阈值优化

我们有2处用到了神经网络,一处是用神经网络进行建模;一处是用神经网络作为控制器.2处神经网络的权值和阈值的调整均采用了遗传算法,在此对遗传算法优化神经网络权值、阈值的过程作一简单介绍.

遗传算法是一种模拟自然进化过程的随机全局优化方法,主要包括编码、解码、选择、交叉、变异等几个过程<sup>[7,8]</sup>.基于遗传算法的神经网络权值、阈值优化过程主要如下(采用十进制编码方式,选择概率 $p_s = 0.7$ ,交叉概率 $p_c = 0.35$ ,变异概率 $p_m = 0.02$ ):

(1) 随机产生一组十进制数串,每个十进制数

串表示神经网络权值和阈值的一个集合;

(2) 运行神经网络,根据下式计算个体的适应度函数值,并将个体按适应度函数值从大到小进行排序.

$$f = \frac{1}{1 + \frac{1}{2}(y - \hat{y})^2}, \quad (3)$$

式中 $y$ 对于预估模型为泡沫玻璃生产窑炉实际输出,对于神经网络控制器为泡沫玻璃生产窑炉的期望输出; $\hat{y}$ 为预估模型网络输出;

(3) 以预先确定的选择概率、交叉概率、变异概率进行选择、交叉、变异操作,产生下一代网络权值和阈值.

重复步骤(2)、(3),直到神经网络达到预期性能为止.

## 3 运行结果

为了验证所建模型的准确性和算法的有效性,在现场对泡沫玻璃的生产过程进行多次实验,记录多组实验输入输出数据,根据实验数据将大仿真结果与实际结果进行比较,该方法可以较好地逼近实际生产过程.以其中一组实验数据为例来进行说明,所记录数据如表1所示.

表1 各组加热丝实验数据

实验时间/min	顶部电炉丝		侧部电炉丝		底部电炉丝		工件温度/℃
	输入电流/A	输出温度/℃	输入电流/A	输出温度/℃	输入电流/A	输出温度/℃	
0	0	0	0	0	0	0	0
15	350	19	350	21	700	35	15
30	380	152	410	165	800	128	130
45	380	321	410	335	800	275	296
60	380	401	420	414	780	366	380
75	380	508	420	523	780	505	495
90	380	508	420	523	780	505	495
105	400	572	420	581	780	580	562
120	400	602	400	617	780	623	595
135	440	630	380	642	800	654	623
150	420	635	380	649	780	659	631
165	420	641	150	654	780	664	635
180	400	640	200	655	760	670	637
195	400	639	50	653	780	667	635
210	400	640	50	655	780	669	637
225	400	639	50	655	780	671	636
240	400	640	50	655	780	670	636
255	400	639	50	655	780	673	636
270	400	636	50	651	780	671	633
285	400	639	50	654	780	672	634

对表 1 的数据通过用 MATLAB 语言编制控制算法程序对此进行仿真研究,得到的仿真结果与实际测量的比较曲线见图 5,模型仿真输出与实际输出误差见图 6.

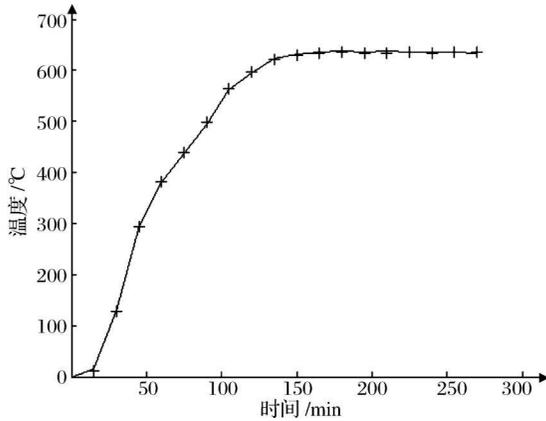


图 5 仿真结果与实际测量结果比较

— 实际输出 + 模型仿真输出

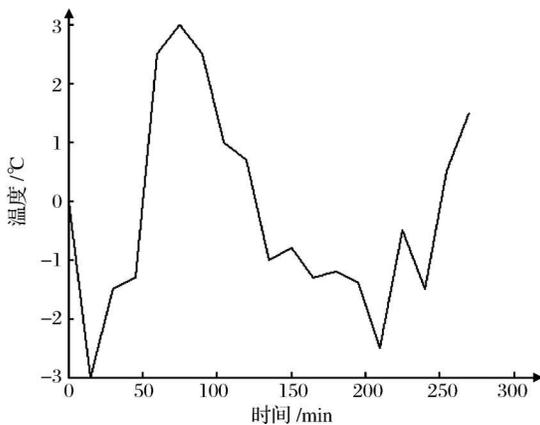


图 6 仿真结果与实际输出误差

从图 5 可以看出,仿真结果曲线和实际对象输出曲线拟和的较好,该方法可以较好地反映出控制对象的特性;从图 6 可以看出,模型仿真曲线与实际

输出曲线之间的误差保持在 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 之间,可以满足泡沫玻璃生产过程对温度控制精度的要求.

## 4 结语

将该控制系统投入实际运行,在生产过程中,根据模具坯料的工艺要求,在上位机中输入初始温度、目标温度、升温时间等参数,然后自动运行该系统.实际运行表明,整个系统运行稳定、可靠,能满足各种模具坯料生产的不同工艺要求.在实际生产过程中升温过程平稳,几乎不产生震荡,且与时间呈线性关系,各加热丝间温差保持在 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 之间,这与原有的单一控制策略相比降低了能耗、缩短了生产时间,降低了废品率、大幅提高了产品合格率,解决了原有单一调节回路生产过程控温精度差、温度波动大的问题,并且效果显著.

### 参考文献:

- [1] 李月明,李华,邹卓辰.利用废玻璃研制泡沫玻璃[J].中国陶瓷工业,2000,7(2):4-8.
- [2] 田英良.制造泡沫玻璃的方法与模具[J].玻璃与搪瓷,2002,30(1):33-35.
- [3] 郭宏伟,刘新年.梯温炉法确定泡沫玻璃发泡温度的研究[J].玻璃,2005,179(2):5-8.
- [4] 田英良,赵飞,邹玉林,等.泡沫玻璃生产的关键工艺及质量控制[J].玻璃与搪瓷,2000,28(6):52-56.
- [5] Spiridonov YA, Orlova LA. Problems of Foam Glass Production[J]. Glass and Ceramics, 2003, 60(9-10):313-314.
- [6] 王雄,于朝晖,徐用懋.连续退火炉在线优化控制系统[J].计算机仿真,1999,16(4):61-64.
- [7] 王仍容,施寅威,王文海,等.基于工件热状态的均热炉优化控制[J].控制理论与应用,2001,18(8):145-148.
- [8] 李晓斌,刘丁,郭军献,等.真空退火炉的建模与优化[J].控制与决策,2005,20(2):218-221.
- [9] 王凌.智能优化算法及其应用[M].北京:清华大学出版社,2001.

### 作者简介:

余亚冰(1976-)女,江西省波阳人,1997年毕业于天津大学自动化专业.现就职于兰州理工大学电信工程学院,研究方向为工业生产过程自动化、智能控制系统.