

蔗糖结晶过程的建模与控制^①

Modeling and Control of a Batch Sugar Boiling Process

樊春丽 朱名日 (桂林电子科技大学 计算机与控制学院 广西 桂林 541004)

摘要: 该文从设计煮糖结晶过程控制方案的角度出发,首先提出了采用 Elman 动态神经网络对煮糖结晶过程进行建模的新方法,以实验中采样到的煮糖结晶过程中过饱和度的输入输出数据训练网络,并采用动态反向传播学习算法根据误差不断调整网络参数直至达到要求精度;Elman 神经网络辨识可使辨识过程简化并提高了辨识精度。然后在此基础上设计了自适应模糊控制器。最后的仿真实验以 Elman 神经网络模型为参考模型,使用自适应模糊控制算法控制过饱和度,取得了较好的控制效果。结果显示所设计的控制系统适合于控制煮糖结晶过程这样一类复杂非线性系统。

关键词: 煮糖结晶过程 过饱和度 Elman 神经网络 模糊控制器 仿真

蔗糖的生产过程主要由甘蔗压榨、蔗汁清净、蒸发、煮炼等工序组成。其中煮糖工序的作用是使糖分从糖浆中结晶析出,目的其一是获得粒度均一的蔗糖晶体,其二是使糖浆中的糖分尽可能地充分析出。煮糖工序成为蔗糖生产过程中的决定性工序,这一工序工作结果的好坏直接决定着蔗糖的产量和质量,从而也决定着糖厂的经济效益。然而煮糖过程是一个复杂的化学和物理过程。由制糖工艺学可知^[1],煮糖工艺关键就是控制糖液的过饱和度,使其保持在适当的范围,使晶粒能均匀、整齐地生长。但在实际生产过程中,物料的纯度和浓度在不断地变化,生产工艺条件如真空或蒸汽压力经常波动,这些因素都直接地影响了糖液的过饱和度。由于煮糖控制本身受干扰的因素很多,其时变性和非线性等差异很大,因此要想建立一个反映进料量、进水量与过饱和度之间精确的数学模型非常困难,以至于用经典控制或现代控制的方法对这类复杂的控制对象都难以得实现。

本文针对煮糖过程的复杂性,提出了整个系统的智能控制方法,其中包括结晶过程的神经网络建模方法以及基于糖浆和热水阀门开度的模糊控制器的设计。故在本文中结合了当今最流行的神经网络、模糊控制两大智能控制方法。

1 煮糖结晶过程简介^[2]

甘蔗原料经过压榨,提出,清洗,蒸发与加热进入糖浆结晶过程工段,为了从糖浆中提取蔗糖晶体,必须将此糖浆继续浓缩到一定的过饱和度,析出微小的晶核,控制糖液的过饱和度系数在最佳的范围内,使晶体逐渐长大至所要求的粒度,煮成糖膏,然后卸入助晶装置中进行助晶处理,以充分提取蔗糖分。在进行煮糖结晶过程时,必须弄清煮糖的各个工段,这样有利于对煮糖结晶过程进行控制。在煮糖的各个工段中,煮炼工段是最为重要的一个工段,它又可分为如下几个阶段:

①底料浓缩阶段:在这个阶段,真空度应维持在最高位置,入汽压力也应控制较高,搅拌应放在高速档,这样会使水分蒸发加快,浓缩过程缩短。

②起晶阶段:在这个阶段,搅拌器与所采用的先进控制策略相结合,通过控制最佳的投粉点、起晶时间、固晶时间等实施过程控制。

③固晶阶段:在这个阶段,晶粒含量还比较低,蒸发速度不宜过高。用搅拌器与所采用的先进控制策略相结合,应使供汽阀门全部关闭或稍微打开。搅拌器在高速档,以维持良好的循环;通过自动装置稳定过饱和度和真空度,使晶体快速长大。

① 收稿时间:2008-09-03

④养晶阶段:在养晶阶段,应把蒸发水分降到次要位置,在操作时,首先需要降低入汽压力,减慢蒸发速度,同时应降低真空度,提高糖浆温度,从而达到提高结晶速度,减少能耗的目的。

糖浆煮炼即蔗糖的结晶与成糖过程。煮炼工段的工作好坏,对产品质量和糖分回收影响极大,直接决定了糖厂生产的经济效益。因此要求多快好省地进行生产,即以最短的时间、最简单的流程、最大限度地使糖浆中的糖分煮炼成产品糖,以达到优质、高产、低消耗的目的。

2 煮糖结晶过程模型的建模

传统的建模是非常透彻地了解工业动态的基础上,找出过程的输入-输出函数关系,但从上面的煮糖结晶过程可知,煮糖结晶过程是一非线性、慢时变、多变量控制过程,要建立其机理模型是非常困难的。为了克服传统建模的不准确性,本文提出了对煮糖结晶过程进行 Elman 神经网络建模。

2.1 神经网络模型建立

从制糖工艺学中可知,煮糖质量的好坏关键是控制糖液的过饱和度,并保持在适当的范围^[1]。本文综合考虑影响过饱和度的各种因素,其中包括温度(T)、真空度(P1)、液位(L)、汽鼓压力(P2)、糖浆阀门的开度(S)、热水阀门开度(H)。把各个影响因素作为网络的输入,过饱和度的值作为网络的输出,建立神经网络模型。

在本系统中选取 $X(t)=(T(t)、P_1(t)、L(t)、P_2(t)、S(t)、H(t)、OS(t-\Delta)、OS(t-2\Delta))$ 作为煮糖结晶神经网络模型的输入向量,将 $Y(t)=OS(t)$ 作为神经网络模型的输出向量,其中, t 为当前时刻; $t-\Delta$, $t-2\Delta$ 为前 1, 2 个时刻的采样时刻, Δ 为采样间隔。利用实时采集到的数据对网络进行训练,即可得到结晶过程的神经网络模型。

利用神经网络建模的基本的建模模型结构图如图 1 所示。

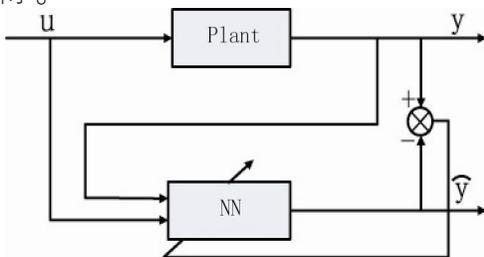


图 1 煮糖结晶神经网络模型的建立

其中模块 Plant 为实际系统,NN 为用神经网络建立的实际系统的等效模型; u 为输入, y 为输出, \hat{y} 为模型输出。模型中采用前馈神经网络,前向神经网络实现的是静态映射,没有延迟线的帮助,不能表示动态系统的映射关系。而具有时延连接的前向网络也具有静态网络没有的特性,使它可以学习非线性系统的动力学特性。鉴于带时延环节的神经网络的非线性逼近能力,本文引用 Elman 神经网络对实际系统建立一种自回归模型,其模型的差分方程可以表示为:

$$y(k) = f(y(k-1), \dots, y(k-m), u(k), \dots, u(k-n)) \quad (1)$$

其中, $y(k)$ 是输出向量, $u(k)$ 是输入向量, m, n 分别是输入和输出的时间时滞因子, f 是非线性函数。现已有资料证明大部分的非线性系统都可以用公式 (1) 表示; 利用实际系统输出 y 和神经网络模型输出 \hat{y} 之间的误差来调节神经网络的权值,最终期望用 \hat{y} 来反映 y 。

2.2 Elman 神经网络辨识及结果

本文选择了一种动态递归网络-Elman 网络来对煮糖过程进行建模。与采用静态多层前馈网络相比,采用动态递归网络即 Elman 网络进行系统辨识优点明显。

首先,静态多层前馈网络用于系统辨识必须考虑模型的阶次问题,一般采用试凑法不断搜索,直到取得较高的精度,十分麻烦。Elman 网络是动态递归网络,特有的结构层可将隐层输出延迟一步输出,具有动态记忆功能,本身具有模仿系统动力学特性的能力。同时在使用动态反向传播学习算法的情况下,只需采用一阶或二阶形式即可辨识高阶系统的动力学特性,大大减少了系统辨识所需数据量,也大大减轻了所需工作量^[3]。

其次,相对来说要达到同样的精度,Elman 网络辨识大大缩短了训练网络所用的时间。相比多层前馈网络,Elman 网络的结构大为简化,减少了神经元数目和网络层数。同时采用动态反向传播学习算法使得网络较快地收敛,从而可大大缩短训练时间。

再次,在仿真实验中,采用一阶 Elman 网络辨识模型在预测能力上虽然要比多层 BP 前馈网络好,但效果还达不到要求精度。为了提高 Elman 网络模型预测系统未来输出的能力,本文采用了二阶 Elman 模型,将系统实际输出值的变化趋势,即在 $\tau-1$ 时刻系统的一阶导数输入到网络的输入层。

本文建立的神经网络含有三层结构,输入层有 8 个神经元,输出层含有一个神经元,隐含层采用了 15 隐层神经元, 20 个结构神经元,经过 800 步训练网络即可达到要求的精度。Elman 网络辨识结果如图 2 所示,红线为采样数据曲线,蓝线即为网络输出,由图可知,该网络辨识结果很好。

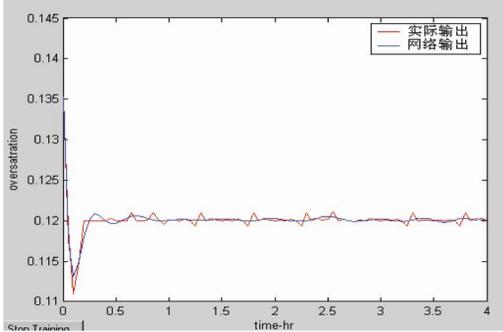


图 2 训练网络输出

3 煮糖结晶过程模糊控制算法的设计

3.1 模糊控制系统结构

在煮糖结晶过程中,过饱和度 OS 是蔗糖晶体生长的驱动力,过饱和度的值越高蔗糖晶体的生长速度就越快,但是当过饱和度的值超过某一临界值时,蔗糖溶液中就会有新的晶核生成。因此,糖厂生产过程中必须使母液保持尽可能大的过饱和度值,使蔗糖晶体尽可能较快的生长,缩短成糖时间。同时又不能使过饱和度的值超过起晶的临界值,以免生成伪晶,影响产品质量。从制糖工业学可知,过饱和度 OS 保持在 0.1-0.3 之间时结晶过程达到最优的状态。

在煮糖结晶过程中,糖浆和热水阀门的控制采用电机控制,各阀门的开度代表原料的流量,故糖浆和热水阀门开度的范围为:0-100%。

在实际的煮糖过程中,首先在煮糖罐中抽入一定量的种子,种子一定要整齐,否则将影响结晶的均匀度,这时加入糖浆进入养晶阶段,根据养晶期间糖罐内糖浆的过饱和度,不断的改变糖浆阀门的开度,是煮糖罐内的过饱和度始终保持在要求的范围之内,本文根据糖厂煮糖工人的工作经验建立了 49 条模糊控制规则。

上述煮糖结晶过程的模糊控制系统如图 3 所示。在仿真过程中,一次完整的控制过程如下:先将开关 3 打到 1,采用实际实验数据训练 Elman 神经网络预测模型,当训练结果达到要求的模型精度后将开关 3 打

到 2,使得 Elman 神经网络模型代替实际的煮糖罐。此后利用 Elman 神经网络模型预测出时滞系统在 $T(k + \tau)$ (τ 为煮糖罐的纯滞后时间)时刻的响应后,反馈到系统的输入,并与系统设定值相比较,从而得到系统 $T(k + \tau)$ 在时刻的误差(这个误差即为控制系统预测误差),将此误差和误差变化率输入到模糊控制器,求出系统当前时刻的控制量,并施加于实际动态系统上。

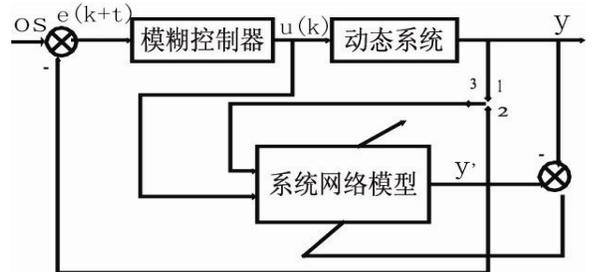


图 3 煮糖结晶过程模糊控制系统图

3.2 模糊控制器的设计

本文采用 Mamdani 型模糊控制器,采用双输入双输出的形式,即有两个输入变量和两个输出变量。两个输入变量分别为过饱和度的误差 e 和误差变化率 ec,即给定的过饱和度与检测来的过饱和度值进行比较得到误差 e 和它的微分 ec。两个输出变量为热水阀门开度,糖浆阀门开度。输入量经模糊化后转化为用模糊控制语言描述的模糊集合,激活控制规则,经 Mamdani 模糊推理,离线计算出控制表,最后经过反模糊化得出实际的控制量。模糊控制器的设计分为 4 个步骤执行[4]:

- (1)确定实时的 e 和 ec;
- (2)把 e 和 ec 的精确量模糊化后的状态 E 和 EC 作为控制器的输入;
- (3)由模糊规则分别计算控制量 U;
- (4)把模糊控制量 U 精确化,得到的精确量 u 传送到控制单元。

4 仿真研究

煮糖罐的初始条件为:

- | | |
|----------------|---------------|
| 结晶罐容量 10000 kg | 底料总质量 25000kg |
| 底料纯度 0.835 | 底料锤度 0.79 |
| 底料过饱和度 0.128 | 初始水阀门开度 0 |
| 入料糖浆纯度 0.87 | 初始入料阀门开度 60% |
| 过饱和度的设定值为 0.12 | |

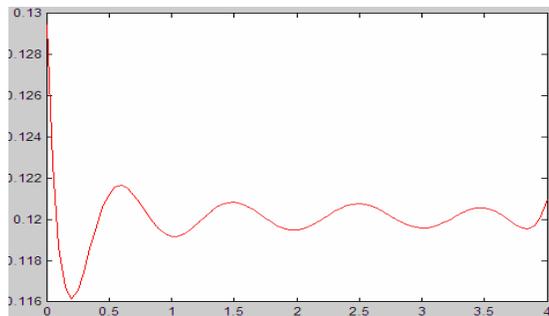


图 4 煮糖结晶过程控制运行仿真图

本实验利用上述初始条件,采用上述神经网络模型及模糊控制器进行实验,实验结果如图 4 所示。在初始阶段,罐内母液的过饱和度值较高,晶体生长速度相应较快,单位时间内从母液中结晶析出的蔗糖糖分大于随入料糖浆进入结晶罐的蔗糖糖分,致使母液的过饱和度不断下降。受过饱和度下降的影响,晶体的生长速度也不断降低,导致单位时间内从母液中结晶析出的蔗糖糖分不断减少,在某个时刻之后,母液中的糖分开始增加,过饱和度重新开始上升,直到维持在要求的范围内。

5 结束语

本文首先采用了 Elman 神经网络对煮糖结晶过饱和度进行建模,与传统的前馈神经网络辨识相比,简

化了辨识步骤,缩短了训练网络的时间,从而为在线控制煮糖结晶过程过饱和度打下了基础。然后设计了一种自适应模糊控制算法,相比传统模糊控制算法,该算法可自适应地调整模糊控制规则和输出权值参数。最后的仿真实验中,以 Elman 神经网络模型作为参考模型,该控制算法使得煮糖结晶过程中过饱和度快速、稳定地达到设定值,取得了较好的控制效果。总之,本文设计的控制系统适合用于煮糖结晶过程这样一类的复杂非线性系统。

参考文献

- 1 陈维均,许斯欣.甘蔗制糖原理与技术(第四分册).北京:中国轻工业出版社,2001.
- 2 Lauret P, Boyer H, Gatina JC. Hybrid modeling of a sugar boiling Process Control. Engineering Practice, 2000:299 - 310.
- 3 董长虹.MATLAB 神经网络与应用.北京:国防工业出版社,2007.
- 4 孔繁镍,李燕.蔗糖结晶过程的模糊自适应 PID 控制.广西民族学院学报(自然科学版),2006,12(3):89 - 91.
- 5 黄永安,马路,等. MATLAB7.0/Simulink6.0 建模仿真开发与高级工程应用.北京:清华大学出版社,2005.