

文章编号: 1001-0920(2005)06-0694-04

基于神经网络的实时专家控制系统及其PTA工业应用

杜文莉, 钱锋

(华东理工大学 自动化研究所, 上海 200237)

摘要: 以精对苯二甲酸结晶过程为研究对象, 提出一种基于神经网络模型的实时专家控制系统。该方法利用神经网络建模技术获取对象的机理知识, 通过对影响模型特性的多个变量进行分析, 自动得到常规专家控制系统难于获取的定性、定量知识, 并按分级递阶的启发式搜索机制, 实现了对工业过程对象的实时控制。实际应用表明: 该方法不但克服了以往专家系统知识获取的瓶颈, 而且有效实现了人机对话的功能, 便于现场操作和更改专家知识库, 为化工过程的多变量控制提供了新的思路。

关键词: 实时专家控制系统; 神经网络模型; 知识自动获取; 分级递阶搜索; 多变量控制

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Neural network based real-time expert control system and its applications to PTA industry

DU Wen-li, QIAN Feng

(Automation Institute, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China Correspondent: DU Wen-li, E-mail: duwenli_sd@263.net)

Abstract A kind of neural network model based real-time expert control system (MRECS) is proposed for PTA crystallization process. This system acquires mechanism knowledge of the object via artificial neural networks. The qualitative and quantitative knowledge can be easily achieved by analyzing the influences of the multiple input variables on PTA average particle size in the model. Hierarchical searching method is applied to the expert control system to implement real time control of PTA industrial crystallization process. Its successful application demonstrates the validity of the proposed MRECS. The proposed MRECS can not only overcome the bottleneck of knowledge acquisition, but also realize the online knowledge revising through man-machine function. It provides a new idea of multi-variable control scheme suitable for chemical process.

Key words: real-time expert control; neural network model; automatic knowledge acquisition; hierarchical search; multi-variable control

1 引言

在工业系统中, 高维、非线性、时变、大滞后以及不确定性等复杂特征为控制系统的设计带来了很大困难。20世纪90年代以来, 以专家控制、模糊逻辑控制及人工神经网络为典型的智能控制方法得到了迅速发展, 并在工业过程中得到了成功的应用^[1,2]。其中由Åström^[3]提出的专家控制(EC), 即基于知识的

控制方法, 其主要优点在于其层次结构、控制方法和知识表达上的灵活性; 但由于存在知识获取的“瓶颈”, 在一定程度上限制了其广泛应用。

知识获取是智能控制系统中极为重要的部分。Madsen曾经指出^[4]: 专家系统和神经网络是知识表达的两种互补方式, 专家系统侧重于逻辑、思考性机器推理, 而神经网络则在数形、联想、自组织方面

收稿日期: 2004-05-31; 修回日期: 2004-08-02

基金项目: 国家973计划项目(2002CB312200); 国家自然科学基金项目(60074027); 国家863计划项目(2003AA412010); 上海市优秀学科带头人计划项目。

作者简介: 杜文莉(1974—), 女, 山东淄博人, 助理研究员, 博士生, 从事化工生产过程建模、控制与优化等研究; 钱锋(1961—), 男, 江苏扬中人, 教授, 博士生导师, 从事智能控制技术及其在石化生产过程中的应用等研究。

更加优越 因为嵌入神经网络技术的专家控制系统能够加强其在不确定或未知环境中的学习能力, 自动修改或丰富专家系统的知识, 所以能够克服以往传统专家控制系统的缺陷, 如: 1) 对于专家经验的获取瓶颈; 2) 不能综合集成新的经验或知识; 3) 无法在需要情况下动态修改知识库 为此, 本文提出一种基于神经网络模型的专家控制系统 (MRECS), 即利用神经网络方法解决被控对象定性、定量知识的获取问题, 从而建立基于模型的知识库, 并利用专家系统的递阶式结构和启发式逻辑推理机制实现复杂工业对象的实时控制

2 PTA 结晶工艺介绍^[5]

精对苯二甲酸 (PTA) 的生产过程由氧化单元和精制单元两部分组成 精制单元将氧化单元生产的粗对苯二甲酸 (CTA), 在浆料罐中用循环溶剂配制成一定浓度的浆料, 经过预热器进行升温, 经蒸汽加热后浆料被溶解成为一透明溶液, 然后进入反应器进行有选择的催化加氢, 反应后的物料在 5 台串联的结晶器中依次降温降压析出 PTA 晶体, 浆料则送入产品回收单元

在 PTA 生产过程中, 连续结晶系统是由 5 台结晶器串联组成, 主要用来获得满足一定指标要求 (如晶粒大小、产品纯度等) 的产品 影响 PTA 粒径的因素很多, 主要有浆料浓度、结晶器温度分布、结晶器中停留时间、搅拌器结构形状和搅拌强度以及溶剂的 pH 值、杂质等 通常根据产品分析结果由人工调节各结晶器操作参数 一般分析频率间隔较大 (24 h 一次), 缺乏产品粒径的实时定量信息, 因此操作人员很难在较短时间内通过 5 台结晶器操作参数的定量调整来满足产品粒径要求

3 MRECS 在 PTA 生产中的应用

3.1 基于模型的专家控制系统的设计

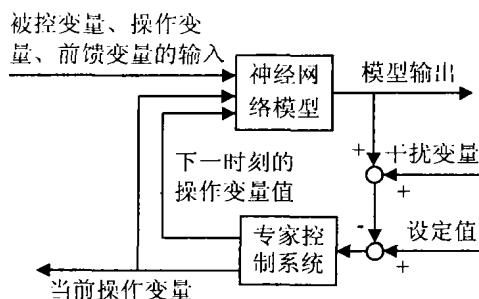


图1 MRECS 结构

本文提出的基于模型的专家控制系统 (MRECS) 如图 1 所示 专家控制系统的知识规则部分来源于神经网络模型, 部分来自嵌入规则库的以“if-then”表达的浅层先验知识; 专家控制系统则主

要根据模型提供的信息, 进行相应优化算法、推理机制的选择, 并给出调节变量的当前值和预测值; 同时神经网络模型接受未来调节变量的预测值, 计算当前状态下未来被控变量的影响 通常在没有干扰的条件下或设定值保持不变时, 经过优化方法计算得到的调节变量可以满足被控对象的要求; 但若出现不可预测干扰使得被控对象偏离设定值时, 则该控制系统继续计算, 优化各调节变量

在该系统中, 建立对象模型是关键, 模型特性直接影响到控制策略和优化方法的选择 为实现对 PTA 结晶过程的有效控制, 上述所有系统均应用 DCS 的高级控制语言 (HONEYWELL TDC-3000 的 CL 语言), 在 DCS 硬件平台上 (APM 和 AM 中) 进行研究和开发, 这不但使得该系统与 DCS 可以实现“无缝”连接, 而且还可充分利用 DCS 的数据采集、处理及通讯资源, 确保了系统的实时控制

3.2 结晶过程平均粒径模型

3.2.1 平均粒径的建模

PTA 精制装置中, 从加氢反应器洗出的对苯二甲酸水溶液中没有晶体的存在, 需要通过 5 台串联的结晶器来析出晶体, 确定粒度、粒度分布和产品的纯度 其中影响 PTA 精制产品粒度的因素很多, 如进料浓度、反应的负荷、浆料的流速、各级结晶温度和停留时间、搅拌强度以及干燥机的干燥速度等 为避免过多变量对模型及其计算性能的影响, 通过机理分析与相关性分析相结合进行自变量的筛选^[6], 最终选择 5 个变量作为模型输入, 即: 第 1 结晶器与

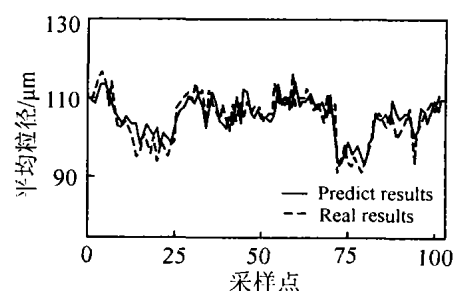


图2 平均粒径神经网络模型学习曲线

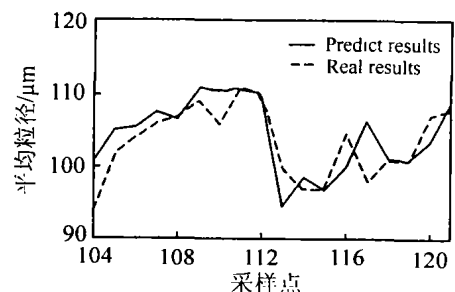


图3 平均粒径神经网络模型泛化性能曲线

反应器间的温差,第1、第2结晶器之间的温差,第1、第2结晶器的停留时间,以及前一时刻的平均粒径来预测当前时刻的平均粒径

这里,采用 $5 \times 7 \times 1$ 的前向神经网络结构形式实现对平均粒径(A PS)的建模.网络训练与拟合曲线如图2、图3所示.其中,图2的模型训练均方误差为0.06%,图3的模型预测均方误差为0.05%.

3.2.2 模型的外延性能测试

在A PS神经网络模型建立的基础上,可通过分别测试各输入变量在操作点附近对A PS的影响,来判断该模型的外延性能.其中,物料的停留时间可用反应器液位与进料的比值来间接表示.停留时间长,则晶核具有较充分的生长时间,使得PTA平均粒径呈增长趋势.图4中的(a)和(b)分别给出了模型中的停留时间(结晶器液位)外延性能测试曲线.

迈尔斯过饱和理论指出:溶液冷却速度与过饱和程度成正比.而过饱和度越大,晶核的生成量就越多,最终所得结晶的粒度就越小.其中晶核首先在第1结晶器中生成,然后在其他4台中成长为预期的晶体.所以当第1结晶器的温度控制较低时,晶核生成量多,晶体粒度就可能小;而提高第1结晶器的温度以控制溶液的过饱和度以及晶核的生长速度,则所得的晶体粒度较大.但当结晶器温度过高时,溶液的过饱和度过大,晶核的生成量虽然多,但没有足够生长的晶体,因此晶体粒度反而减小.即A PS的大小首先随温度升高而增大,在拐点后随着温度的升高而降低.图4中的(c)和(d)分别给出了模型中的结晶器温度的外延性能测试曲线.

从图4可以看出,随着停留时间的增加,晶核

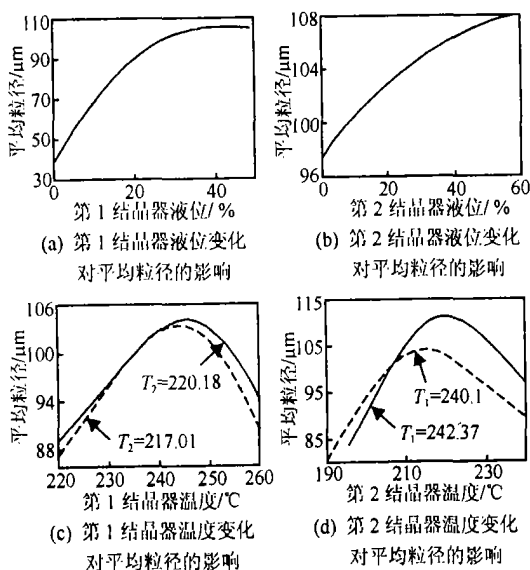


图4 APS模型外延性能测试曲线

的生长时间加长,使得平均粒径随之增大;同时,结晶器温度的变化对平均粒径的影响是先增大后减小,这些曲线都符合先验知识,证明了该模型建立的有效性,可以此为指导,实现PTA产品平均粒径的控制.

3.2.3 基于模型的知识在线获取

本文的MRECS系统的知识同时来源于神经网络与经验总结,分别提供数值型和逻辑型知识.其中,逻辑型知识以常规的“if-then”形式表达,针对不同控制要求设计,在推理过程中结构固定,参数则可通过人机界面修改.

神经网络模型是该MRECS知识在线获取的主要途径.首先,通过将该A PS神经网络模型嵌入DCS系统,同时选取训练得到的权值作为模型的初始参数.在该模型实时计算过程中,通过DCS系统对模型自变量(生产过程操作)数据的实时采集,可以获得A PS的实时预测值.此外,该模型中还引入了前时刻的A PS分析值作为模型的反馈输入,因此,该模型不但能较好地克服分析误差带来的扰动影响,而且可以及时反映系统变量动态特性变化带来的影响.

其次,由于化工生产过程的动态特性经常变化,在模型运行过程中,若出现较大的工况变化会发生模型失配现象,需要对模型进行修正以提供更为准确的预测信息.为保证控制系统的实时推理,对模型的在线校正采用增量式直接神经网络递推“滚动”校正方式,可由下式描述:

$$\hat{y}(t) = \hat{y}(t) + \alpha * (y^*(t-1) - \hat{y}(t-1)).$$

其中: $\hat{y}(t)$ 为当前时刻模型经过校正后的预测值; α 为校正系数,取值0~1之间; $y(t-1)$ 和 $\hat{y}(t)$ 分别为前时刻和当前时刻的模型预测值; $y^*(t-1)$ 为前时刻的模型真实值(分析值).

3.3 MRECS的实施

3.3.1 优化方法的选择

以PTA平均粒径(A PS)作为控制指标,操作变量为各结晶器的停留时间和温度分布.为满足在线实施要求,没有采用大规模优化问题的求解方法(如遗传算法),而是根据模型给出的对象特性,即工艺操作点附近与A PS成单调关系的特征对结晶过程的操作参数进行优化.此外,在实际调节过程中,各变量的调整按优先级逐次进行.该优先级的设置可根据操作人员的调控经验或对现场工况的判断.由于采用了各变量依次调整,调节范围依次放开的控制策略,可以利用一维搜索方法进行各个操作点的快速寻优,从而满足控制系统的实时性要求.

3.3.2 推理机制的确定

由于推理机制的类型与推理速度密切相关, 而推理类型的选择又与规则库中的知识结构有关, 在实时控制中, 要在有限的采样周期内将控制信号确定下来, 必须选取适当的推理方式^[7]。

实时搜索的任务是系统在一个(或多个)目标指导下, 搜索使目标成立的途径, 最后综合选择问题的最佳解。由于各变量的调节均能在不同程度上直接影响控制目标——APS 的大小, 为在最大程度上满足装置的平稳控制要求, 同时满足控制目标, 首先需要根据当前可调节变量的选择情况(可在仪表不良状况下, 放弃其中的一个或几个调节手段), 确定优先调整次序, 如可按照其对 APS 的影响因子或由人工设置来完成。

不同于常规专家控制系统的推理方式(即将专家知识分成一些知识层, 不同的知识层用于求解不同精度的解), 本文提出的 MRECS 系统可在神经网络模型预测信息的基础上, 利用内嵌的优化算法逐级递阶试探寻优来得到问题的最优解。

3.3.3 工业过程在线实施

MRECS 的实施步骤如下:

1) 首先通过模型计算当前的 APS 值, 并与当前设定值相比较, 如果偏差满足控制要求, 则保持当前操作条件; 否则, 转 2)。

2) 寻找优先级最高的调节变量及其操作范围, 并利用已建立的模型对当前操作点附近作线性化处理, 通过一维优化搜索算法(如黄金分割法、二分法等)进行操作点附近的参数寻优。在调节参数碰到该变量允许调节范围的上下限时, 说明该变量当前

控制范围内的手段用尽, 进行下一级别变量的调整; 如果已经满足控制要求, 则将调整后的变量参数下装到底层控制回路的设定值, 控制系统保持新的操作条件。

3) 若全部操作变量均已调节完毕, 仍未达到控制要求, 则放大各级变量控制范围, 返回 2), 重新进行变量参数寻优。

4) 若各变量调节范围均到达预先设定的允许最大范围, 但仍未达到控制要求, 则将模型输出与控制目标最近的各调节变量参数下装到底层控制回路, 同时给出边界约束的提示信息。

图 5 给出了基于 MRECS 的平均粒径控制曲线, 可以看出, MRECS 的实施极大程度上保证了 APS 的控制平稳, 降低了操作人员的劳动强度。

4 结 语

本文提出了一种基于神经网络模型的专家控制系统(MRECS), 由于神经网络不同于产生式系统, 只要系统的特征(参数)一定, 即使学习样本在数量上增加, 而无需增加新的内存空间和搜索时间, 这在一定程度上缓解了传统专家系统所面临的组合爆炸问题。该专家控制系统将模型与先验知识结合, 设计了多变量的实时控制策略, 所有技术的设计和 implementation 完全集成在 HONEYWELL TDC-3000 集散控制系统的操作环境中, 并在工业装置中得到成功应用, 极大程度上稳定了生产, 为化工生产过程的多变量控制策略提供了一种有效的解决途径。

参考文献(References)

- [1] 李永正. 专家控制技术和智能控制理论的发展[J]. *自动化仪表*, 1997, 18(7): 1-5.
(Li Y Z. Development of expert control technology and intelligent control theory [J]. *Process Automation Instrumentation*, 1997, 18(7): 1-5.)
- [2] Wu M, Shen D Y. Expert control based on neural networks and mathematical models for the coal blending process[J]. *Control Theory and Applications*, 2000, 17(6): 868-872.
- [3] Astrom K J, Anton J J, Arzen K-E. Expert Control [J]. *Automatica*, 1986, 22(3): 277-286.
- [4] Medsker L R. The synergism of expert system and neural network technologies [J]. *Expert Systems with Applications*, 1991, 2(1): 1-2.
- [5] 孙静珉. *聚酯工艺*[M]. 北京: 化学工业出版社, 1985.
- [6] 陈念贻, 钦佩, 陈瑞亮, 等. *模式识别方法在化学化工中的应用*[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [7] 王耀南. *智能控制系统*[M]. 长沙: 湖南大学出版社, 1996.

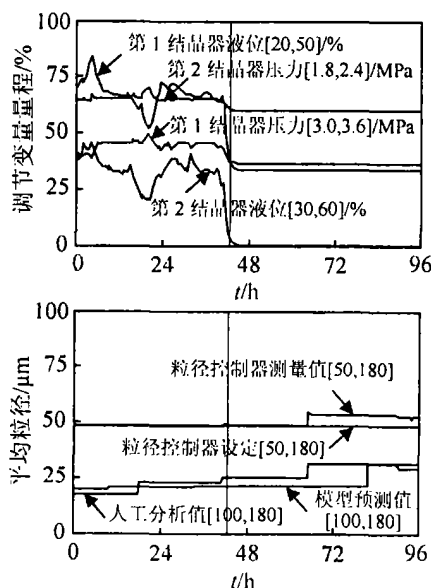


图 5 基于 MRECS 系统的 APS 控制曲线