

多变量系统的软测量建模研究*

仲 蔚 刘爱伦 俞金寿
(华东理工大学自动化研究所 上海 200237)

摘 要 研究加氢裂化分馏塔多个产品的质量指标同时预报的一类 M M O 软测量建模问题, 采用 RBF 网络和 Fuzzy ARTMAP 网络对该 M M O 系统进行建模, 并用 RBF 网络建立了每个输出的独立的 M I S O 软测量模型。应用实例表明, 所研究的软测量建模为多变量系统软测量的工业应用提供了一种有效实用的方法。

关键词 多变量系统, 软测量, Fuzzy ARTMAP, RBF 网络
分类号 TP 274

Studies on Building Soft- sensing Models of M ultivar iable System s

Zhong W ei, L iu A ilun, Yu J inshou
(East China U niversity of Science & Technology)

Abstract A kind of M M O soft sensing problem s is studied, which required predicting several indexes of product quality in the hydrocracking fractionator simultaneously. Fuzzy ARTMAP and RBFN were used to build the M M O product quality soft- sensing models. RBFN was also used to build the individual M I S O soft- sensing models for each product. The M M O fuzzy ARTMAP- based models are shown to be effective methods of soft- sensing modeling for practical applications.

Key words multivariable system s, soft sensor, fuzzy ARTMAP, RBF network

1 引 言

软测量技术是解决化工过程中普遍存在的一类难以在线测量变量估计问题的有效方法^[1]。它克服了人工分析及使用在线分析仪表的诸多不足, 是实现在线质量控制及先进控制、优化控制的前提和基础。目前, 软测量建模的研究大多是围绕着一个单一目标进行的, 通常处理的是 M I S O 情况。但对于许多化工过程来说, 例如精馏塔及各种装置中的分馏塔等, 它们通常同时有几种产品, 要对其进行在线质量控制就需同时得到几种产品的质量指标的估计值。目前, 处理这种情况一般是分别建立各个产品的质量估计软测量模型 (M I S O 模型), 有的是将几个独立的 M I S O 模型组合成一个 M M O 模型。这种处理多变量系统建模的方法, 对于系统中各输出间相

互独立的情况是有效的, 但对于上述化工过程中各侧线产品之间存在强烈耦合和关联的情况, 综合考虑整个过程, 统一建立一个 M M O 的软测量模型来同时预报各输出, 比单一的 M I S O 模型具有更好的效果^[2]。

神经网络作为非线性模拟的一种具有生命力的方法, 已广泛应用于软测量建模过程^[3]。由于化工过程中普遍存在的非线性、不确定性和复杂性, 目前有许多化工过程软测量建模采用基于神经网络的方法来实现, 常用的有 BP 网络和 RBF 网络。对于上述 M M O 软测量建模, 要求所用的网络除具有良好的非线性拟合能力外, 还应具有一定的分类功能。Fuzzy ARTMAP 和 RBF 网络都使用有监督学习和无监督学习相结合的学习算法, 且具有一定的分类特性。本文用这两种方法建立了加氢裂化主分馏塔

* 高等学校博士学科点专项科研项目 (97025109) 和工业控制技术国家重点实验室开放课题基金项目 (K97Z03)
1998- 10- 09 收稿, 1999- 03- 15 修回

轻石脑油、重石脑油和航煤干点的联合M MO 软测量模型,并用RBF网络建立了这几个产品独立的M ISO 模型。结果表明,基于Fuzzy ARTMAP的M MO 软测量模型,在模型预测精度、网络训练时间及模型结构的简单程度上,均优于基于RBF网络的M MO 模型和M ISO 模型,具有良好的在线应用潜力。

2 基本原理简介

2.1 RBF网络

RBF网络^[4]基本算法的思想是基于有监督学习和无监督学习的混合方法。由于它采用局部逼近的方法,因而比BP网络具有更好的适应特性。RBF网络能在一定程度上解决BP网络训练时间长和存在局部最小的问题,因而目前在建模工作中应用得很多^[5]。其基本算法可参见文献[4]。

2.2 Fuzzy ARTMAP

自适应共振理论(ART)^[6]是以认知和行为模式为基础的一种无教师、矢量聚类、竞争学习算法,它成功地解决了神经网络学习中的稳定性(固定某一分类集)与可塑性(调整网络固有参数的学习状态)之间的矛盾。它主要有3种形式:ART1、ART2、ART3。Fuzzy ART^[7]和Fuzzy ARTMAP^[8]是ART类模型的模糊化形式,其中Fuzzy ART能进行快速无监督学习的模式分类,而Fuzzy ARTMAP网络将渐进的有监督学习用于模式分类和多维映射,它适用于本文所研究的M MO 软测量建模问题。

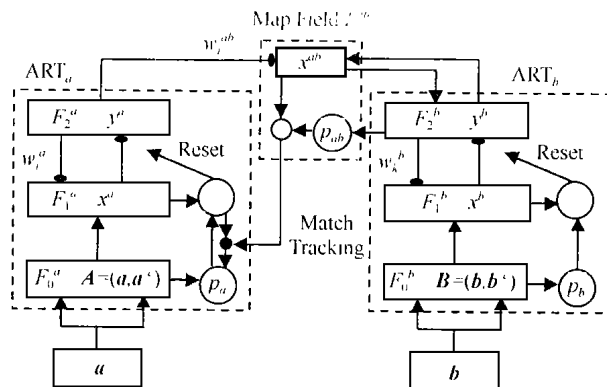


图1 Fuzzy ARTMAP的结构示意图

由图1可见,Fuzzy ARTMAP由两个Fuzzy ART模块(ART_a和ART_b)组成,这两个模块由一个称为映射区域(map field)的内部ART模块(F^{ab})连接起来。在进行学习时,所有的模拟输入值经模糊化的隶属函数值矢量代替送入网络,然后将F₀层中

的m_a维向量a转换为2m_a维向量,即A=(a,a^c)。此运算称为求补运行,目的是防止过大幅度的输入模式样本在分类层一直竞争获胜,而抑制其他节点的竞争。然后将A作为ART_a中F₁^a层的输入向量。同样,输入ART_b中F₁^b层的2m_b维输入向量为B=(b,b^c)。当ART_a的预测结果与ART_b的不一致时,映射区域将产生一个ART_a的警戒值p_a,这样就可降低网络的推广和信息压缩能力。同时启动一个ART_a的搜索过程,或产生一个能正确预报b和ART_a分类,或产生一个新的ART_a分类。此网络通过不断学习,直至网络按有导师信号能正确学习所给定的输入、输出映射关系为止。Fuzzy ARTMAP算法详见文献[8]。

3 应用实例

3.1 问题描述

某石化公司炼油厂的加氢裂化装置能生产出优质的航空煤油、柴油及各种轻重石脑油、液化气等。其中分馏塔(包括第一分馏塔和第二分馏塔)起着分离产品的关键作用,其控制水平的高低直接影响产品的分布及质量。加氢裂化第一分馏塔主要有3种产品,即轻石脑油、重石脑油和航空煤油。第一分馏塔的目的是将前段工序的进料分离成不同分子量的3种产品。在这一过程中,保证其质量的主要手段就是控制其干点。目前,通过影响干点的可测变量建立产品质量指标的软测量模型,进行干点的在线估计是工业中常用的方法。

经过全面工艺机理分析,确定分馏塔3个侧线产品的干点y₁(k),y₂(k),y₃(k)(轻石脑油、重石脑油和航空煤油)与各侧线的抽出点温度、流量等13个变量有关,可表示为如下的非线性关系

$$\begin{bmatrix} y_1(k) \\ y_2(k) \\ y_3(k) \end{bmatrix} = f(T_h(k), F_h(k), T_j(k), F_j(k), T_r(k), F_r(k), T_{top}(k), P_{top}(k), T_{in}(k), F_{in}(k), T_b(k), F_b(k), F_L(k)) \quad (1)$$

其中,T_h,F_h,T_j,F_j(,kg/h)分别为重石脑油和航煤的抽出点温度和抽出量;T_r,F_r为塔顶回流温度和回流量;T_{top}和P_{top}(MPa)为塔顶温度和压力;T_{in}和F_{in}为进料温度和流量;T_b,F_b为塔底温度和流量;F_L(kg/h)为轻石脑油流量;f(•)表示复杂的多变量非线性函数。我们的任务就是寻找各干点与13

个辅助变量之间的关系, 在线估计 3 种产品的干点值。

3.2 M MO 软测量模型的建立

过程建模数据主要来自过去几年的过程数据记录, 从中采集了约 250 组历史数据用于模型训练。又从 DCS 和实验室的分析测试记录中累积实时数据, 取得了该厂两个月正常工况的实时数据约 60 组, 用于软测量模型的泛化检验。所有采集的原始数据在用于建模之前, 都采用统计分析方法对其进行去除噪声的滤波、平滑、相关冗余信息的剔除及数据归一化处理等。

Fuzzy ARTMAP 是 ART 类算法的一种改进方法, 它是目前建立任意输入输出之间多维映射的一种快速有效的方法, 因此适合于本问题的建模工作。这里, 分别用 Fuzzy ARTMAP 和 RBF 网络来建立 3 种产品的 M MO 干点软测量模型, 同时还用 RBF 网络分别建立了 3 种产品的 M ISO 软测量模型用于比较和分析。图 2 是基于 Fuzzy ARTMAP 算法的 M MO 干点软测量模型的泛化结果, 图 3 是基于 RBF 网络的 M MO 干点测量模型的泛化结果(图中, “—”为测量值, “.....”为预报值)。表 1 列出了基于 Fuzzy ARTMAP 算法的 M MO 干点软测量

模型与基于 RBF 网络的 M ISO 干点软测量模型的泛化结果的 RM S 误差(RM SE)。

表 1 两种软测量模型泛化结果的 RM SE 比较

RM SE	Fuzzy ARTMAP	RBFN
	(M MO)	(M ISO)
轻石干点	1.154 7	1.791 2
重石干点	1.056 7	1.614 9
航煤干点	1.016 5	1.488 0

4 结果与讨论

图 2、图 3 和表 1 的泛化结果表明, 基于 Fuzzy ARTMAP 的 M MO 软测量模型, 其泛化精度优于基于 RBF 网络的 M MO 软测量模型和 M ISO 软测量模型。若定义训练时间为达到一定的误差容许值所需的训练迭代次数, 则达到 0.1 的误差容许值, Fuzzy ARTMAP 算法大约需训练 5 000 次, 而 RBF 网络则需训练 10 000 次。

针对各种实际过程的建模问题, 选用一种适合的神经网络结构是很重要的。在实际应用中发现, RBF 神经网络对于单纯的 M MO 分类问题, 即那些只需指出所属的类别, 而不需确切预测值的情况

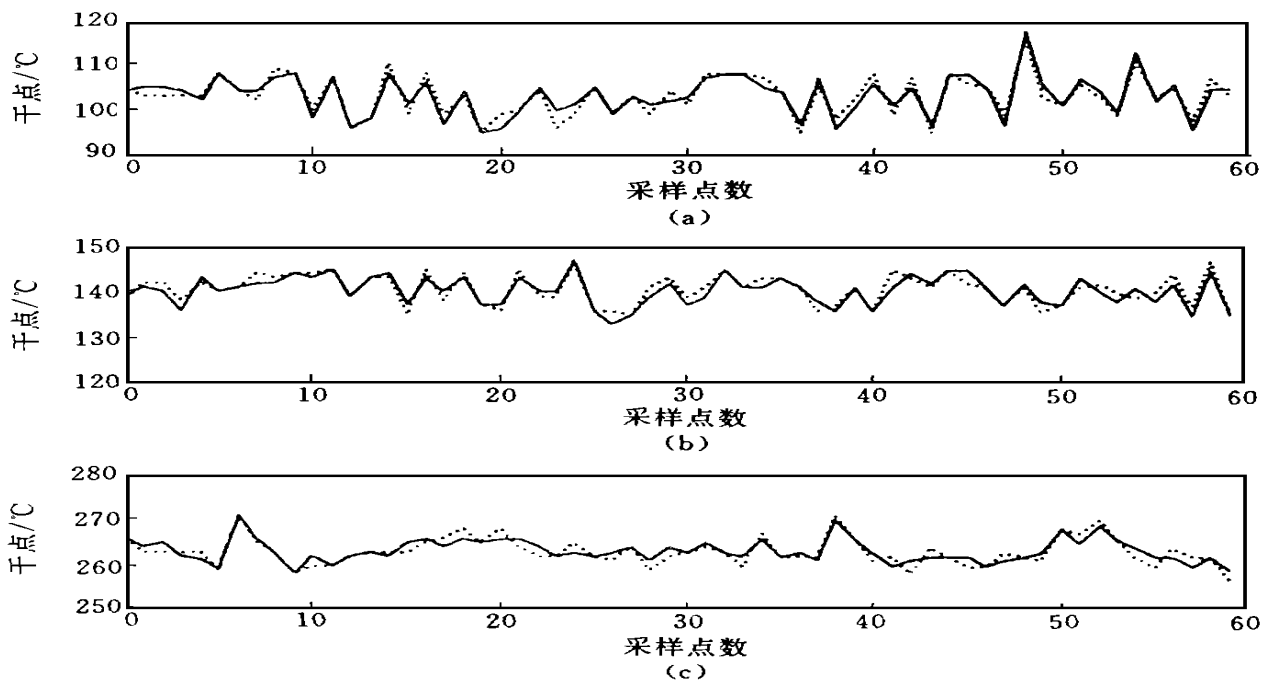


图 2 基于 Fuzzy ARTMAP 算法的 M MO 干点软测量模型的泛化结果

(a) 轻石脑油干点 (b) 重石脑油干点 (c) 航煤干点

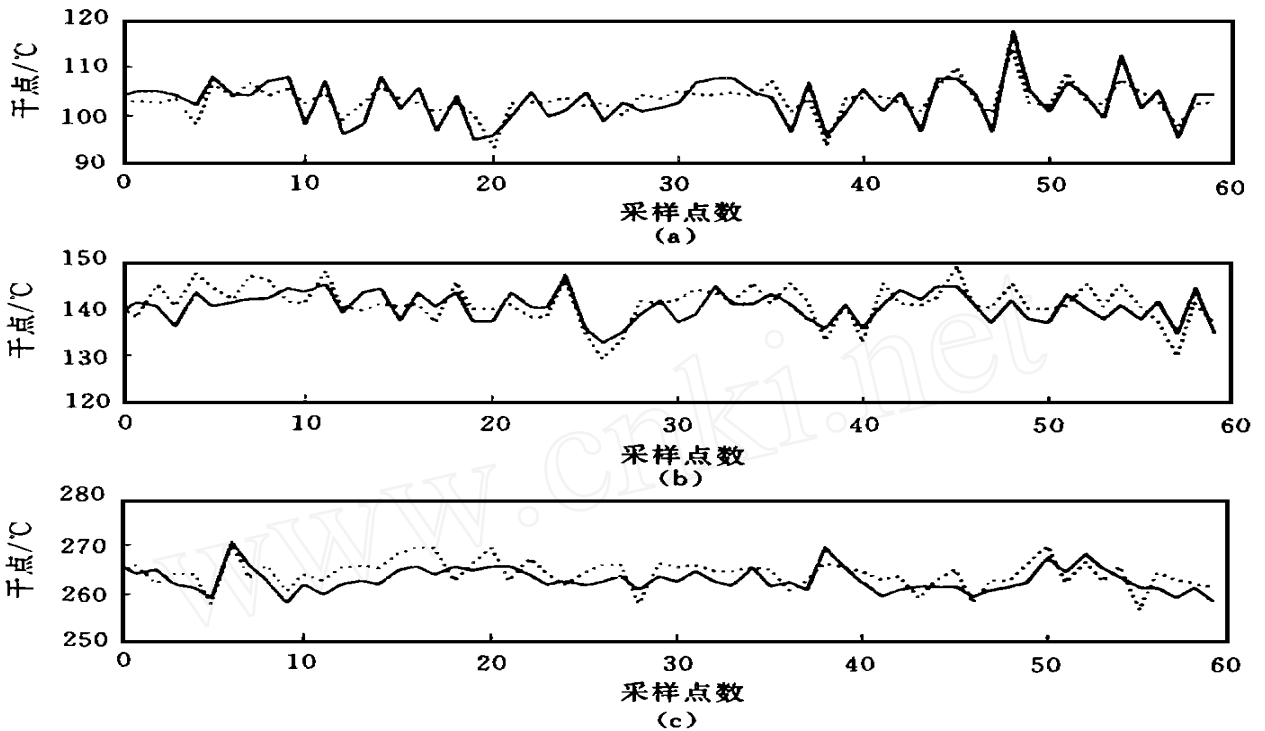


图3 基于RBF网络的MIMO干点软测量模型的泛化结果

(a) 轻石脑油干点 (b) 重石脑油干点 (c) 航煤干点

是比较快速有效的。但对于本文所研究的3种产品建立联合干点估计模型的问题,就需同时准确地给出各干点的估计值。在这种情况下, Fuzzy ARTMAP 算法在分类及多维映射方面比RBF网络更胜一筹。

本文讨论的软测量方法可应用于各种多变量系统的软测量建模问题,例如:产品组分估计,精馏塔板效率的估计,产品浓度估计等。结合有效的在线校正算法,软测量技术可在一定程度上替代现有的人工分析和使用在线分析仪测量某些规格分析指标,是生产过程进行先进控制和优化控制的前提和基础。

参考文献

- 1 Macvooy T J. Contemplative stance for chemical process Automatica, 1992, 28(2): 441- 442
- 2 Dayal B S, Mac Gregor J F. Multi- output process identification J Proc Cont, 1997, 7(4): 269- 282
- 3 Thompson M L, Kramer M A. Modeling chemical process using prior knowledge and neural networks A IChE J, 1994, 40(8): 1328- 1340
- 4 Moody J, Darken C. Fast learning in networks of locally - tuned processing units Neural Comput, 1989, 1: 281 - 294

- 5 王旭东, 邵惠鹤. 神经网络建模与软测量技术 化工自动化及仪表, 1996, 23(2): 28- 31
- 6 Lin C T, Lee C S G. Neural fuzzy systems— A neuro- fuzzy synergism to intelligent systems New Jersey: Prentice- Hall Int Inc, 1996
- 7 Carpenter G A, Grossberg S, Reynolds J H *et al.* Fuzzy ART: Fast stable learning and categorization of analog patterns by an adaptive resonance system. Neural Networks, 1991, 4(3): 759- 771
- 8 Carpenter G A, Grossberg S, Markuzon N *et al.* Fuzzy ARTMAP: A neural network architecture for incremental supervised learning of analog multidimensional maps IEEE Trans on Neural Networks, 1992, 3: 698- 712

作者简介

仲蔚女, 1971年生。1996年于青岛化工学院获硕士学位, 现为华东理工大学自动化系博士生。主要研究方向为复杂工业过程模型化与控制, 神经网络的理论与应用等。

刘爱伦男, 1955年生。1995年于华东理工大学获硕士学位, 现为华东理工大学自动化研究所副教授。主要研究方向为过程建模与新型控制及应用等。

俞金寿男, 1939年生。1963年毕业于华东化工学院, 现为华东理工大学教授, 博士生导师。主要研究方向为复杂工业过程模型化与控制, 先进控制系统, 控制理论与应用等。