

# 连续催化重整装置辛烷值软测量研究

孙自强, 顾幸生, 党晓恒, 俞金寿

(华东理工大学自动化研究所, 上海 200237)



**摘 要:** 研究连续催化重整生产过程中重整产品辛烷值软测量问题。首先结合工艺机理分析, 找出影响辛烷值的主要参数, 确定为辅助变量, 建立起基于 BP 神经网络的辛烷值软测量模型。其次再采用 PLS-BP 算法改进模型结构, 建立起基于 PLS-BP 神经网络的辛烷值软测量模型, 可以看出 PLS-BP 所建模型结构相对简单, 更适用于实际过程。最后对模型校正后在现场使用, 结果表明测量结果令人满意。

**关键词:** 辛烷值; 软测量; 神经网络; BP; PLS-BP; 建模

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

## Research on Soft-Sensing of Octane Number in the Process of Continuous Catalytic Reforming

SUN Zi-qiang, GU Xing-sheng, DANG Xiao-heng, YU Jin-shou

(Research Institute of Automation, East China University of science and technology, Shanghai 200237, China)

**Abstract:** In this paper, soft-sensing of research octane number (RON) about reforming production in the process of continuous catalytic reforming is researched. At first according to the analysis of technics principles several major parameters affecting RON are found out and used as assistant variables. Then a model of measuring RON is established by use of neural networks with BP algorithm. In order to modify the model structure, another model of measuring RON is established by use of neural networks with PLS-BP algorithm. It is obvious that the second model structure is simpler correspondingly and more suitable for practice. Finally the model is applied in practice after revised. The result of measurement is satisfactory.

**Keywords:** RON; soft-sensing; neural networks; BP; PLS-BP; modeling

### 1 引言

辛烷值 (RON) 是用于表征汽油抗爆性的指标。汽油的辛烷值越高, 抗爆性就越好, 就能用于压缩比高的发动机。汽油的辛烷值每提高一个单位就可以减少油耗 0.7% ~ 3.1%。汽油的不同辛烷值决定了其价格高低。以生产高辛烷值汽油为主要目的的连续重整生产过程中, 将低辛烷值石脑油 (RON 为 40 到 60) 为原料, 通过脱氢芳构化反应生产高辛烷值汽油 (RON 为 80 到 106 甚至更高)。由于缺乏在线分析仪表, 因此在生产中采用人工采样分析得到重整产品辛烷值。通常情况下每次从采样到最终结果出来要经过几个小时, 每隔 10 天左右分析 1 次。这显然不利于生产控制。为此有必要应用软测量技术, 根据当前现有的工艺参数估算出重整产品辛烷值, 以指导生产操作。

### 2 工艺概况

某炼油厂连续催化重整装置的工艺流程见图 1 所示<sup>[1]</sup>。重整装置的进料为石脑油, 一般含有  $C_6 \sim C_{11}$  烷烃、环烷烃、

芳香烃。重整进料与氢气混合, 经过换热器与反应物换热至 450 左右, 全部汽化后经加热至重整反应所需温度, 再进入重整第一反应器。物流经反应器内的扇形筒径向通过连续向下移动的重整催化剂, 床层在临氢条件下进行重整反应, 反应物流出, 再经加热升温进入第二重整反应器进行反应。然后反应产物以上述相同的过程依次在第三重整反应器和第四重整反应器进行反应, 最终产物流出后大部分进入重整进料换热器与进料换热, 小部分经反应器置换气换热器管程与进入反应器底部催化剂收集器前的置换气换热后, 与闭锁料斗气一起分别并入下游进入重整产物空冷器冷凝冷却后进入重整产物分离罐进行油气分离。

重整反应过程复杂, 主要反应包括环烷烃脱氢、直链

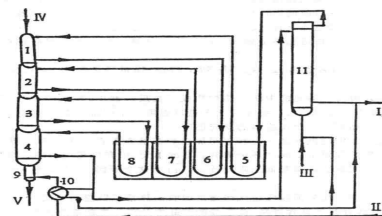


图 1 连续重整反应工艺流程图

1, 2, 3, 4—第一~四反应器 5, 6, 7, 8—加热炉  
9—催化剂收集器 10—加热器 11—换热器  
--重整产物 --循环氢 --重整进料  
--催化剂 --待生催化剂

收稿日期: 2000-05-09

基金项目: 受教育部高等学校骨干教师资助计划项目和上海市曙光计划项目资助

作者简介: 孙自强(1963-), 男, 上海市人, 博士, 研究方向为过程检测与控制方面的研究。

烷烃异构化、烷烃脱氢环化反应、五元环烷烃脱氢异构、加氢裂解反应以及氢解反应。其中前四个反应是吸热反应，是重整反应所希望的，而后两个反应是放热反应，对重整反应不利，但不可避免，必须加以控制。四个反应器中都包含上述反应，但反应强度不同，表现在反应器内部温度分布呈总体下降趋势。

影响重整产品辛烷值的因素较多，包括四个反应器的进口温度和加权平均床层温度、操作压力、空速、进料干点、芳烃潜含量、氢油比、催化剂类型以及进料添加剂等。

### 3 软测量模型的建立

利用重整装置记录齐全的 49 组样本数据，将其中的 35 组用以建立软测量模型，另外的 14 组用来检验所建模型的有效性。

#### 3.1 BP 神经网络建模

通过对工艺机理分析后得知：(1) 四个反应器的入口温度大致相同，而出口温度相差较大，主要是各反应器所处反应阶段吸热量不同所造成，可以用四个反应器的加权平均床层温度来反映过程的反应情况。(2) 适当降低操作压力可以提高辛烷值。(3) 空速是计算在单位时间内一定量的催化剂所通过的原料量。空速越高，产品的辛烷值就越低。一般可直接用进料流量的变化来反映空速的变化。(4) 进料组分中芳烃潜含量越高，辛烷值越高。(5) 进料干点越高，辛烷值越高。(6) 氢油比是装置循环氢气的摩尔数与进入装置的石脑油摩尔数之比。氢油比增加，有利于催化剂的稳定。(7) 虽然催化剂类型和进料添加剂对生产过程有影响，但实际生产中基本保持不变。

综合考虑后，选取七个工艺参数用作为重整产品辛烷值软测量建模的辅助变量，即：重整进料量、第一反应器入口温度、加权平均床层温度、操作压力、氢油比、进料的干点和进料的芳烃潜含量。BP 神经网络隐层的激励函数取为 Sigmoid 函数，输出层的激励函数取为线性函数。用试凑法来确定隐层节点数。最终确定重整产品辛烷值的软测量模型结构为 7-10-1。

将训练数据和检验数据分别代入网络计算，得到训练误差曲线和检验误差曲线如图 2 所示(其中 1~40 组对应训练样本，41~49 组对应检验样本)。

#### 3.2 PLS-BP 神经网络建模

在上面 BP 神经网络建模时选用了七个参数作为辅助变量，没有考虑这些参数之间的关联耦合问题，并且由于输入变量多，增加了网络结构的复杂性，延长了模型训练时间。因此采用 PLS-BP 算法改进模型结构。

所谓 PLS-BP 算法就是部分最小二乘(PLS, Partial Least Square)回归与 BP 算法的结合<sup>[2][3][4]</sup>。在部分最小二乘回归时，先进行主元分析，再同时考虑输入数据集  $X$  和输出数据

集  $Y$ ，对  $X$ 、 $Y$  同时进行正交分解，这样就可以从较少的主元变量中得到原来较多的相关变量中所包含的大部分信息。因此 PLS 算法具有能将由原始数据组成的高维空间信息，投影到由包含所有重要原始信息的特征向量组成的低维空间。如果将 PLS 的降维能力和 BP 神经网络的非线性拟合能力相结合，即先用 PLS 将高维数据集转换成低维数据集，再用神经网络来表征 PLS 的内部模型，则可大大降低神经网络的复杂度，又能处理任何非线性问题<sup>[5]</sup>。

针对前面用于建模的七个工艺参数，运用标准 PLS 算法确定出五个主元变量，再用 BP 网络建模。经试凑，确定网络的结构为 5-9-1。

网络训练误差曲线和检验误差曲线见图 3 所示(其中 1~40 组对应训练样本，41~49 组对应检验样本)。

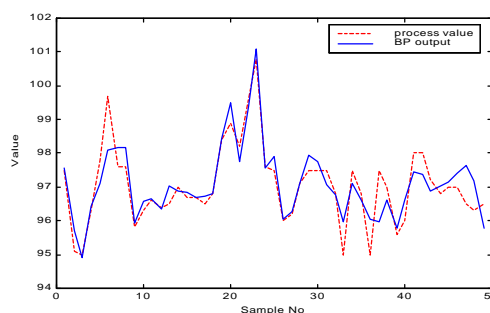


图 2 用 BP 算法建立的辛烷值模型训练曲线和检验曲线

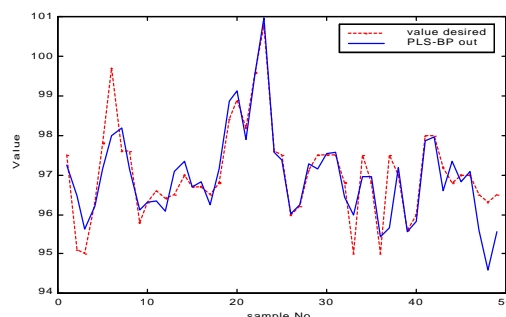


图 3 用 PLS-BP 算法建立的模型训练曲线和检验曲线

### 4 模型校正以及现场使用

由于建模的数据较少，并且工艺操作条件的变化有时会超出建模所用的输入样本，难免会影响到模型的准确性，因此必须对模型不断校正。此外，分析值必须与实际操作时间相对应。这里采用的模型校正方法是以实际人工分析测量结果为正确值，将软测量结果与实验分析结果相对照，逐步积累一定量的对照数据，拟合出一条修正曲线。每次软测量的结果经修正曲线修正后再输出。这样可以弥补由于工况的变化或进料性质的变化造成模型的泛化能力不足而影响测量结果准确性的缺陷。当然，在建模数据量较大、建模样本信息较为齐全时，也可重新进行 PLS-BP 学习，确定适应变化后情况的网络结构和连接权值，以使模型进一步完善。

(下转第 175 页)

$C_{\max}(T_i)=E(T_i)+C(T_i)$ , 且  $C(T_i)$  分别为 1.5、1.5、0.5、0.4

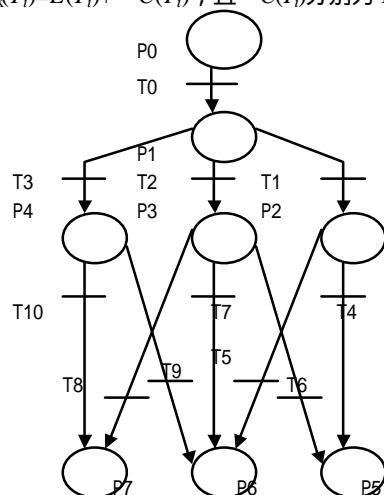


图 3 仿真模型

0.4、0.3、0.5、0.6、0.3, 对于四个过程库所  $P_1, P_2, P_3, P_4$ , 其分别的状态方程为:

$$P_1: y(k) = 0.137y(k-1) - 1.044y(k-2) + 1.87u(k) - 0.75u(k-1)$$

$$P_2: (k) = 2.112y(k-1) - 0.560y(k-2) + 1.49y(k-3) + 1.43u(k) + 0.09u(k-1) - 2.96u(k-2) + 1$$

$$P_3: y(k) = 0.535y(k-1) - 0.98y(k-2) - 2.42y(k-3) - 2.252u(k) + 1.121u(k-1) - 1.15u(k-2) + 2$$

$$P_4: y(k) = 0.613y(k-1) - 0.225y(k-2) + 3.13y(k-3) + 2.59u(k) + 2.001u(k-1) - 0.95u(k-2) + 3$$

其中,  $1, 2, 3$  为外界干扰,  $1, 2, 3 \sim N(0,1)$ , 当它们都为 0 时, 即有系统不受外界干扰。此时,  $P_1, P_2, P_3, P_4$  库所完成各自过程分别要用的时间为 0.5、2.5、2.8、3。同时, 假设  $P_1, P_2, P_3, P_4$  的容量都为 1, 且在初始时刻  $P_2, P_3, P_4$  中托肯数为 1。

仿真中, 在  $\text{time}=6.000$  时刻有外界对库所的过程  $P_4$  产生

(上接第 172 页)

图 4 是一段采用 PLS-BP 建立的辛烷值软测量现场应用曲线, 辛烷值测量值最大为 97.41, 最小为 97.36, 平均值为 97.38。而与此相对应的辛烷值实验分析结果是 97.0, 测量结果与分析结果相差最大值为 0.41, 平均值为 0.38。辛烷值软测量结果令人满意。

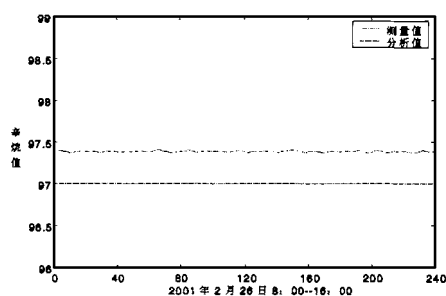


图 4 辛烷值软测量记录曲线

较大的干扰, 使其完成时刻由 3.0 变成 4.4, 图 4 中的(a)为干扰

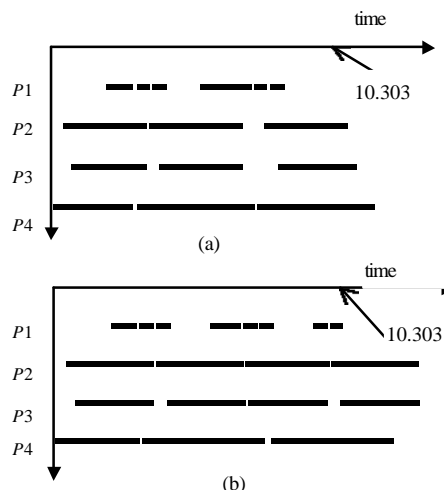


图 4 仿真结果

发生后未利用本文提出的算法进行调度的 Gant 图结果, (b)为干扰发生后利用了本文提出的算法进行调度的 Gant 图结果。从图(a)中可以看出, 在  $\text{time}=10.303$  之前,  $P_1$  库所共进行了 6 次反应; 图(b)中 则可以看出, 在  $\text{time}=10.303$  之前,  $P_1$  库所共进行了 8 次反应。这说明, 利用本算法, 在出现较大干扰后对调度策略进行调整比不进行调整提高了瓶颈库所的利用率, 从而也就促进了整个生产过程能更快地进行。

## 参考文献:

- [1] 杨根科, 吴智铭, 孙国基. 热轧流水线的轧制节奏优化与监控 [J]. 上海交通大学学报, 1999, 11: 1414-1417.
- [2] 吴亚丽, 曾建潮. 批处理过程的 CTCH 模型 [J]. 基础自动化, 1999, 4 (增刊).
- [3] 宋东平, 邢卫, 孙优贤. 有故障制造系统的服务率和预防维护率的最优控制 [J]. 系统工程理论与实践. 2000, 4: 19-26.

## 5 结论

神经网络是软测量技术中的一种有效方法, 其中 PLS-BP 网络更是适用于复杂的、非线性较严重的过程对象。重整产品辛烷值软测量模型的建立, 能使操作者及时知道辛烷值含量并根据当前的工艺参数调整操作, 为重整生产装置的优化控制奠定了基础。

## 参考文献:

- [1] CCR platforming™ process technology - general operating manual [Z]. UOP, 1996, 5.
- [2] 俞金寿, 刘爱伦, 张克进. 软测量技术及其在石油化工中的应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2000.
- [3] 王惠文. 偏最小二乘回归方法及其应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.
- [4] Geladi P, Kowalski BR. Partial least squares regression (PLS): a tutorial [J]. Analytica Chimica Acta, 1986, 185: 1-17.
- [5] 党晓恒. 软测量技术及其在石油化工过程中的应用 [D]. 上海: 华东理工大学, 2000.