

应用相关积分优化技术， 提高中国炼油企业竞争能力

北京优化佳控制技术有限公司

王建

一、前言

在当前的金融风暴中，由于需求下降，油品的卖方市场转变为买方市场。在这种情形下，市场的竞争激化，谁有更高的油品生厂效益，谁就占得市场的优先。因此，采用更新的技术，降低生产成本，提高生产效益，就能够提高企业在市场的竞争力。

本文介绍了一种在中国炼油企业中成功应用的新型实时优化技术——相关积分优化技术，并利用该技术，优化催化裂化装置反应器的主要操作条件。在长期统计的水平上，提高总液收 1%左右。

在生产过程中，在线调整过程的主要操作条件，使目标函数，如收率，经济效益达到最大，是实时优化的任务。传统的实时优化技术，是基于过程模型化的方法，通过模型的建立，获得对被优化过程的数学描述，进而用计算机在线算出当前情况下的最优操作点。

传统的过程模型基本上通过两种途径获得：

机理建模：利用化工中的反应机理、热力学平衡、质量平衡等基本方程，建立各单元的数学模型，根据过程的流程，通过集成各单元的模型得到整个装置的数学描述。

数据建模：利用日常操作的数据，或者安排一定的测试，获得装置的测试数据，然后用统计的方法建立经验模型。

显然，这种技术面临两个不可避免的问题，阻碍着其广泛的应用：

1) 建模的困难. 可能是由于以下的原因：

- 系统庞大复杂。
- 基本的机理不是很清楚。这在化学反应过程中比较常见。
- 建模的代价过高。
- 模型的精度不能满足生产优化的要求。一般装置的优化潜力大约在百分之几的数量级，这就要求模型的精度要在 1%以内才能用于优化，这有很高的难度。

2) 模型建立以后，需要经常的修改，维护。模型本身总是有一定的适用范围，当生产过程由于原料的变化，生产装置的改造等原因使得模型误差加大，甚至无法使用。这就需要对模型的参数，结构进行修改。这个现实问题，往往阻碍着在线优化的长期应用。

显然，如果有一种方法，能够克服以上的两个问题，将是在线优化技术的一个重要的进步。

相关积分优化方法，就是这样的一种技术。经过二十几年潜心的理论研究和应用研究，克服了大量的困难，最终实现了长周期的工业应用，得到了用户的肯定，取得了较大的经济效益。

二、相关积分优化技术

2.1 基本理论

相关积分在线优化技术的基础是相关积分理论。相关积分是一种与随机过程有关的运算，在相关积分法理论中，目标函数、干扰、优化变量被视为随机过程，而优化变量为均值可控，一般地可以表达为：

$$\tilde{J}(t) = f(\tilde{u}(t), \tilde{p}(t), t) \quad (1)$$

其中 $\tilde{u}(t)$ 为 m 维均值可控的调优变量， $\tilde{p}(t)$ 为干扰， f 为未知映射。最优目标函数定义为：

$$\tilde{J}^*(t) = \max_{E\{\tilde{u}(t)\}} E\{f[E\{\tilde{u}(t)\}, \tilde{p}(t), t]\} \quad (2)$$

这里, $E\{\tilde{u}(t)\}$ 为调优变量的均值, 它可以是基层控制器的设定值或阀位等。对于单变

量的优化问题, 可以证明, 在一定条件下目标函数均值对调优变量均值的梯度 $\frac{dEf}{dE\{\tilde{u}(t)\}}$ 满

足下式:

$$K_{uJ} = K_{uu} \frac{dEf}{dE\{\tilde{u}(t)\}} + \varepsilon(t) \quad (3)$$

式中, $\varepsilon(t)$ 是均值为零的噪声项, 而 K_{uJ} 是调优变量与目标函数间的互相关积分, K_{uu} 为

调优变量自相关积分, 如公式 (4) 和 (5) 所示:

$$K_{uJ}(T, M) = \int_{-M}^M \frac{1}{2T} \int_{-T}^T u(t-\tau) J(t) dt d\tau \quad (4)$$

$$K_{uu}(T, M) = \int_{-M}^M \frac{1}{2T} \int_{-T}^T u(t-\tau) u(t) dt d\tau \quad (5)$$

$T, M > 0$ 为常数

上述公式中, $u(t)$, $J(t)$ 分别为调优变量和目标函数的测量值。可见 K_{uJ}, K_{uu} 能够通过调优变量和目标函数的观测值计算得到, 于是根据公式

$$K_{uJ} = K_{uu} \frac{dEf}{dE\{\tilde{u}(t)\}} + \varepsilon(t) \quad (6)$$

可用最小二乘法估计目标函数的梯度 $\frac{dEf}{dE\{\tilde{u}(t)\}}$ 。

在算得目标函数的梯度后, 可以用直接迭代计算调优变量的新设定值 $u_s(l+1)$

$$u_s(l+1) = u_s(l) + a \frac{dEf}{dE\{\tilde{u}(l)\}} \quad (7)$$

式中, a 为一个常数。

这种迭代过程在线持续进行, 直至梯度为零, 参见图 1。

以上的方法可以推广到多个优化变量的情形。

归结起来, 整个算法由 4 个步骤组成:

- 1 采取优化变量和目标函数的脉动
- 2 计算这些脉动的动态相关积分
- 3 相关积分矩阵的分析得到优化变量和目标函数间的梯度
- 4 跟据梯度方向和大小，调节优化变量，再转 1。

以上 4 个步骤不断重复进行。如果梯度为零，则给定值一直不变。即：

$$u_s(l+1)=u_s(l)$$

如果由于某种原因系统特性发生变化，如原料变化了，则梯度就会发生变化而偏离零，按照（7）式进行优化操作点的重新调整，直至达到新优化点，见图 2。

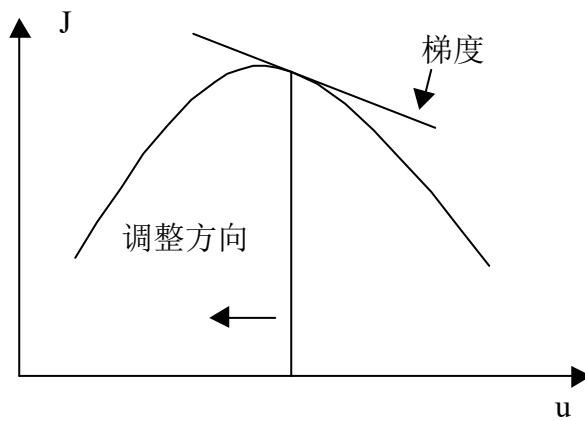


图 1：优化变量 u 的调整过程

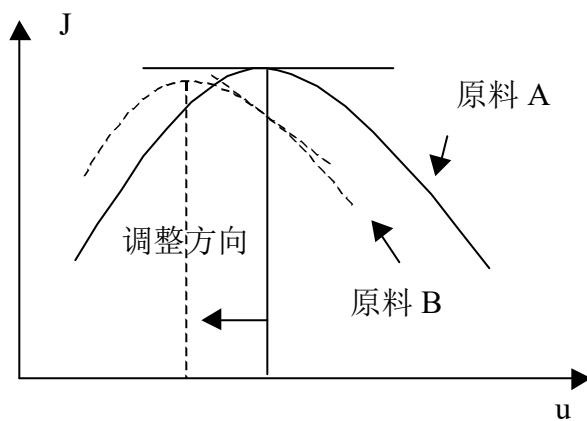


图 2：原料变化后优化变量 u 的调整过程

2. 2 相关积分优化方法的特点

相关积分优化方法有以下不同以往优化技术的特点：

1. 可以不需要事先建立过程的静态和动态模型。
2. 极强的自动适应能力，在工艺条件变化，原料变化，设备改造等情况下，能自动跟踪最优点。
3. 利用过程正常运行的自然波动进行工作，无需另对过程加入测试信号，因而对过程操作的干扰很小。
4. 该法具有很强的抗干扰特性，甚至在动态强干扰，即其它因素如原料性质引起目标函数的变化大于有用信号(由调优变量引起目标函数的变化)的恶劣条件下仍能正常工作。
5. 该法具有很强的鲁棒性，当过程的动态和静态特性发生漂移时仍能正常工作。
6. 无须维护。
7. 可以在保证生产过程安全的情况下将主要操作条件平稳调至最优。
8. 计算量较大，需要 DCS 的配合

2. 3. 应用相关积分优化器的条件

从原理上看，只要具备以下条件的过程，就可以应用相关积分优化方法：

1. 必须是连续生产过程。间歇生产过程是不能应用该法的。
2. 所优化的目标函数是在线可测量或在线可计算的。由于相关积分需要目标函数随时间变化的曲线，这就不能采用几小时一次的实验室的化验数据。

3. 过程由 DCS 控制。由于优化控制是 24 小时连续闭环工作，对计算机控制系统的可靠性要求很高。集散控制系统可以满足这方面的要求。

三、应用实例：FCCU 反应器实时操作优化

催化裂化装置反应器的实时优化，有着较高的难度。其挑战性在于如何在多变的原料性质，装置改造，催化剂更新等情况下自动追踪最佳操作点，而不需要人为的干预，如重新建模，参数修改等等。本文介绍的一个应用实例，采用了相关积分优化技术，实现了这种自适应的优化控制。

本例中的重油催化裂化装置，采用了中国石油化工科学研究院 MIP-CGP 技术，装置设计处理能力为 1.4Mt/a。

3.1 目标函数和优化变量

催化裂化装置的优化目标函数可以有多种。在本例的优化控制中，采用了多加工方案优化的方式，即优化目标函数可以根据需要进行切换。

根据目前油品销售的市场情况，催化裂化加工方案的多变性，整个优化系统能适应不同的加工原料和生产不同的主产品。本优化控制系统可以适应五种加工方案：

- 以液态烃为主产品的优化方案，液态烃的 8 小时累积收率为目标函数，并可控制柴油收率不小于某设定值。
- 以汽油为主产品的优化方案，汽油的 8 小时累积收率为目标函数，并可控制柴油收率不小于某设定值。
- 以柴油为主产品的优化方案，柴油的 8 小时累积收率为目标函数，并可控制液态烃收率不小于某设定值。
- 以总液收为目标的优化方案，以液态烃+汽油+柴油的 8 小时累积收率为目标函数。

- 以装置整体经济效益为目标的优化方案，根据当前原料、产品的价格，计算出 8 小时内加工每一吨原料获得的经济效益。

在选择优化变量时，主要考虑反应-再生部分工艺中的那些重要的，同时又易于控制的变量。在本催化裂化装置中，取以下几个变量作为在线优化变量：

- 第一反应器反应温度
- 第二反应器催化剂藏量
- 预提升蒸汽（蒸汽预提升工艺）
- 预提升干气（干气预提升工艺）
- 掺渣比
- 原料油换热温度
- 终止剂流量
- 回炼油比
- 油浆回炼比
- 新催化剂加入量

优化控制逻辑上采用两级控制方式，优化控制系统计算出优化变量的给定值，送往 DCS 的 PID 控制回路外给定上执行。优化系统的采样周期为 1 分钟，控制周期为 10 分钟。

3. 2 长期运行情况与讨论

系统投用后，由于其优越的性能和良好的效益，受到各个方面的广泛关注。自 2007 年 3 月底投用至今，除了装置因机械方面的原因，短时间切出外均保持投用状态。装置的运行环境大为改善，稳定性提高，效益增加。

笔者对比了运行前后各三个月的统计物料平衡，其结果见表 3.1：

表 3.1：投运优化前后各种产品收率变化统计情况

产品	优化前	优化后	变化量（后-前）
干气	3.71	3.89	0.17
液态烃	22.21	24.52	2.31
其中：丙烯	6.72	7.34	0.62
汽油	36.40	36.78	0.38
柴油	22.08	20.46	-1.62
油浆	6.67	5.52	-1.15
烧焦	8.50	8.45	-0.05
损失	0.43	0.38	0.05
总液收	80.69	81.76	1.07
转化率	71.25	74.02	2.77

从表 3.1 可以看出，相关积分优化投用后，反应生焦率明显降低，总液收显著提高。由于反应生焦率降低，再生器稀、密相温度控制更加平稳、合理。

催化剂加剂均衡、活性稳定，单耗降低。

预提升蒸汽流量随反应优化的需要由控制阀自动调节，使液态烃中的丙烯浓度升高。

由于反应生焦率降低，反应深度可以进一步加大，汽油和液化气收率提高明显，轻柴油收率明显下降，达到了催化裂化多产丙烯的目的。

经过长周期的、不断的优化和运行检验，其效果显著，装置的经济效益增加，经统计，优化后每年多生产约 1.4 万吨的高附加值产品（液态烃，汽柴油）。

四、结语

相关积分优化作为一种新型的在线实时优化技术，在国家科技部和北京市的多项资助下，获得了多项专利和相关证书，对推动该技术的发展起到了积极的作用。

与传统的实时优化不同，特别是无须建模、自动适应装置的原料变化、设备改造等方

面，相关积分优化技术具有许多诱人的特点，可以大大提高在线优化的长期投运率。由于该技术可以应用于大部分的炼油装置，有着广泛的应用前景，这对于增加中国炼油企业的经济效益，提高企业的竞争力有着积极的意义。