

常减压装置不可测被控变量的在线预测¹⁾

姜太文 何小荣 陈丙珍 卢宪茂 田澎

(清华大学化学工程系, 北京 100084)

摘要 本文建立了常减压装置侧线质量在线预测系统, 基于分馏过程物料和能量衡算, 进行不可测受控变量的实时计算. 该系统采用基于小波变换的多尺度数据处理技术, 保证过程数据的有效性; 将过程趋势分析和模糊专家系统技术应用于计算结果的在线修正策略, 保证质量预测的精度, 满足过程控制的要求.

关键词 侧线质量, 在线预测, 在线修正, 小波变换, 数据处理, 过程趋势分析

1 引言

常减压装置先进控制 (APC) 的被控变量中存在部分不可测被控变量, 必须建立合适的过程模型进行不可测参数的实时推断 (计算). 对常减压装置的先进控制来说, 需要进行实时计算的受控变量主要是一些侧线产品质量指标, 包括: 馏程数据 (如初馏点, 干点), 倾点 (或凝点), 冰点, 闪点, 粘度, 雷氏蒸汽压等.

目前常减压装置质量在线计算中存在的问题主要有: ①分馏过程模型的建立. 静态模型无法准确反应过程的动态特性; 严格动态模型求解复杂, 速度达不到在线要求. ②过程数据的处理. 过程数据误差较多, 严重影响过程计算的准确. ③涉及的组分复杂且不可确知, 影响因素众多, DCS 测点和物性数据不完全, 单纯依靠模型计算无法保证预测的精度, 需要有合理的在线修正策略. ④在线质量仪表的实测数据未被充分利用.

本文针对上述问题建立了满足 APC 要求的常减压装置质量在线预测系统 (towerCALC). 建立简化的动态机理模型, 采用了小波变换技术, 保证数据的有效性; 采用基于过程趋势分析的在线修正策略, 并充分利用了在线质量仪表数据, 提高计算精度. 该预测系统的组成结构如图 1 所示.

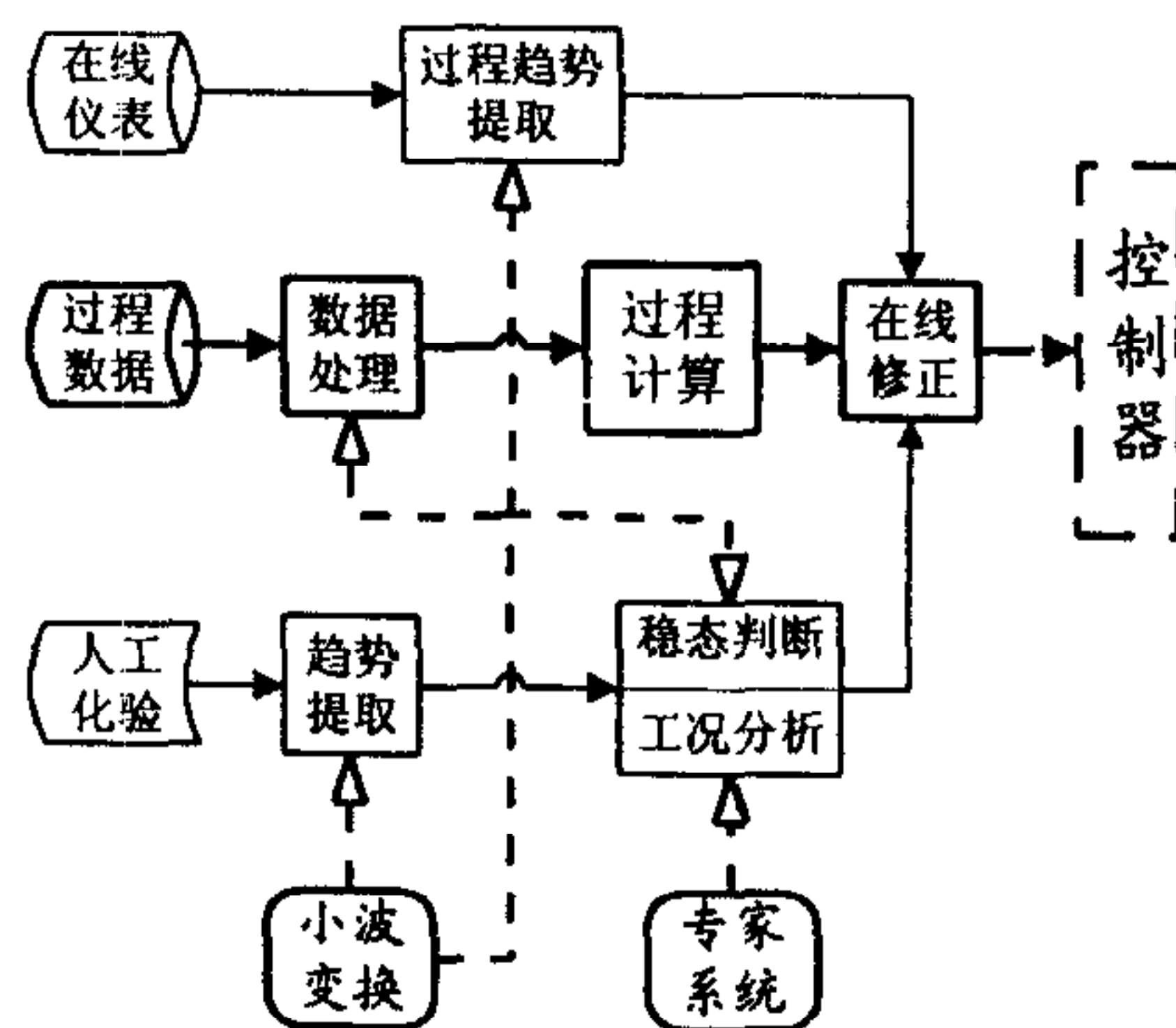


图 1 质量在线观测系统结构示意图

¹⁾ 国家自然科学基金资助项目 (NSF29910761863)

2 动态机理模型的建立

2.1 建模方法的确定

与普通精馏相比较,常减压分馏有自己的明显特点^[1].针对常减压分馏的特殊情况,采用机理与黑箱相结合的混合模型:建立分馏过程的机理模型,实时计算必要的中间参数如物性数据等;基于一定的机理分析,在中间参数与质量参数之间建立黑箱模型,实现质量指标的实时关联计算.黑箱模型包括回归关联式模型或人工神经网络模型等.部分质量指标可以直接利用 API 技术手册^[2]等提供的标准关联式建立模型.

石油馏分组分复杂,考虑到先进过程控制的实时性的要求,本文采用以侧线抽出产品为组分的处理方法,计算量大大减少,且满足控制的精度要求.

2.2 模型的动态处理

常减压分馏过程是动态的生产过程,为了描述过程的动态特性,应当建立过程的动态模型.由于下述原因,限制了严格动态模型的应用:1.模型求解复杂,速度无法满足控制的要求^[4];2.组分复杂,不可知的影响因素多,使严格动态模型的精度无法保证.

常减压分馏过程的严格动态机理模型是非线性微分和代数方程,需要进行线性化处理.在某些操作状态附近,非线性系统可以近似为线性系统^[5].选择操作稳态点作为建立分馏过程近似线性化模型的工作点.不失一般性,将分馏过程分解为多输入单输出过程的组合,进行线性化处理.分馏过程,可描述为一阶滞后系统.这样常减压塔非线性动态过程模型的求解转化为:每个输入变量经一阶滞后响应得到中间变量,各中间变量与系统输出变量间的满足状态方程,即可用常减压塔的稳态过程模型描述,如图 2 所示.

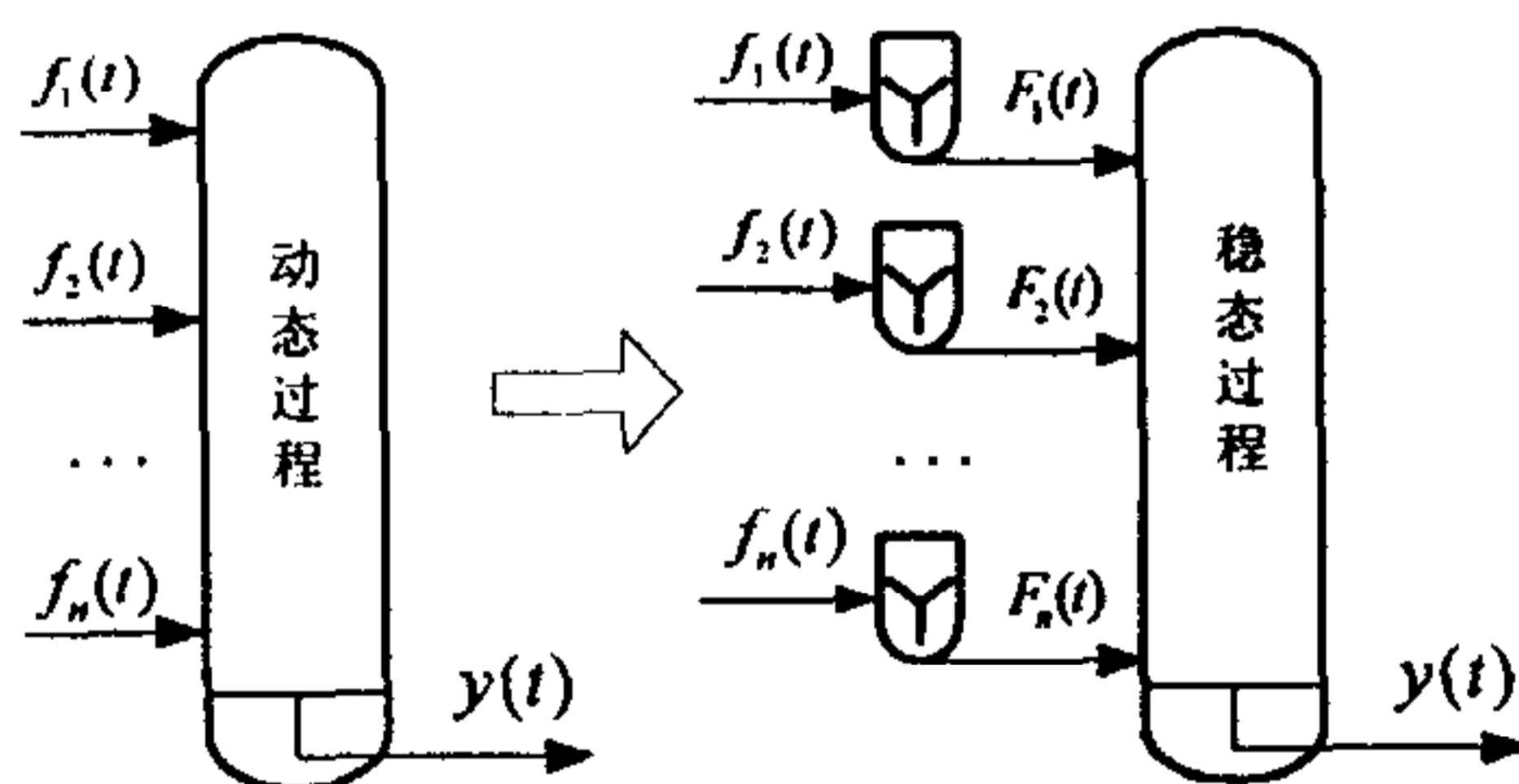


图 2 分馏塔动态过程分解示意图

2.3 过程计算原理

常减压装置侧线质量计算过程如下:

- ①对分馏塔进行隔离体划分,分别进行质量衡算和能量衡算,计算汽、液负荷^[1].
- ②根据抽出板上汽相组成,计算抽出板的侧线产品的油气分压.
- ③根据油气分压和操作温度计算不同汽化率下的蒸汽压,计算各蒸馏曲线.
- ④以平均沸点为基础实时计算产品的物性数据,包括分子量、比重、特性因数等.
- ⑤分别质量关联的黑箱模型,进行各质量指标的实时计算.

3 常减压装置过程数据实时处理

常减压分馏过程数据中存在各种时变特征如白噪声、异常突变等,影响模型的精

度. 通常过程数据处理采用滤波技术处理, 无法对数据的突变进行有效的分析处理. 本文采用基于小波分析的过程数据实时处理技术, 保证油品质量在线预测的精度.

3.1 基于小波变换过程数据多分辨率分析处理

小波变换是有效的时频分析工具, 对解决非平稳信号问题有突破性意义. 选择光滑函数 $\varphi(x)$ 的一阶导数为小波函数^[6], $\psi(x) = d\varphi(x)/dx$, 则 $f(x)$ 的小波变换为

$$W_a f(x) = a \cdot \frac{d}{dx} [f(x) * \varphi_a(x)] \quad (1)$$

其中 $\varphi_a(x) = a^{-1/2} \varphi(a^{-1}x)$. (1) 式表明 $W_a f(x)$ 相当于对 $f(x) * \varphi_a(x)$ 的微分. 随尺度 a 增大, 信号 $f(x)$ 中高频成分被依次分解到细节分量 $W_a f(x)$ 中.

过程变量数据可利用基于小波变换的多分辨率分析理论进行分析与处理^[7]. 过程数据中的噪声一般作为高斯白噪声处理. 噪声频率远高于过程信号本身的特征频率, 同时噪声在多尺度小波变换下体现出不同于过程信号的显著特征, 利用多分辨率分析和软限幅技术进行噪声的处理. 而过程数据中的异常突变等利用小波变换进行检测处理.

3.2 过程信号中异常突变的检测处理

常减压装置过程数据中存在大量突变, 其中异常突变对过程计算的危害较大.

实际过程数据的突变可以分为两类来处理: 阶跃和尖峰. (1) 式表明 $W_a f(x)$ 的极值点对应 $f(x) * \varphi_a(x)$ 的拐点, $|W_a f(x)|$ 的极大值点反映了 $f(x) * \varphi_a(x)$ 突变点的位置. 通过检测 $|W_a f(x)|$ 的极大值点可以确定信号 $f(x)$ 中突变点的位置.

如果 $|W_a f(x)|$ 在 x 有一极值存在, 则说明 $f(x)$ 在 x 存在阶跃突变; 如果 $|W_a f(x)|$ 在 x 附近存在一对反向极值, 则表明 $f(x)$ 在 x 存在尖峰突变. 过程数据的异常突变表现为尖峰特征, 且突变幅度远在正常范围之外. 因此若与尖峰突变相对应的一对反向极值幅度都大于某阈值, 则该尖峰突变为异常突变^[8]. 对过程数据的异常突变部分, 采用的对称周期延拓法则进行处理.

4 过程计算的在线修正

常减压装置的过程计算需要利用实测值作必要的在线修正, 修正方法分为两类.

4.1 基于人工化验分析数据的修正策略的改进

基于人工采样化验分析的修正方法是以采样时刻的计算值与实测值的偏差为基准, 对计算结果进行修正. 基本原理为:

$$q(t) = q_c(t) + \Delta, \quad \Delta = q_s - q_{sc} \quad (2)$$

式中 $q_c(t)$ 纯计算值; $q_s(t)$ 采样化验值; $q_{sc}(t)$ 采样时刻的计算值. 由于存在以下的问题, 影响了在线修正的效果: ①人工采样化验分析受人为因素或设备影响较大, 数据准确性无法保证; ②分析周期长, 而且实际生产中不能完全准确给出采样时刻, 如果

采样时刻前后操作工况波动大，采样时刻的偏差将会给在线修正带来较大偏差；③有的炼厂生产方案变动频繁，方案切换时操作状态有较大变化，在线修正需采取特殊措施。

对修正策略进行改进，主要体现在偏置值的计算方式上：

$$\Delta = (1-\alpha)\Delta_0 + \alpha\Delta_1 \tag{3}$$

α 是滤波系数，相当于采样分析值的置信度系数。考虑问题①，取 $\alpha = \alpha_0$ ， $0 < \alpha_0 < 1$ 。对于问题②，采用基于小波变换的过程稳态判断^[9]，检测采样时刻过程的稳定状态，根据稳态因子 $0 \leq \beta \leq 1$ 计算 α 。对于③所述情况，采用基于规则的模糊专家系统^[10]判断操作工况，如果生产方案处于波动中，需要完全根据最新的分析数据进行修正，即取 $\alpha = 1$ 。 α 的计算如下所示：IF 操作处于方案切换，THEN $\alpha = 1$ ；ELSE $\alpha = \alpha_0 \cdot \beta$ 。

4.2 基于质量在线分析仪表数据的修正

采用基于过程趋势提取^[7]的修正策略，对计算值在线修正。质量仪表的实测数据中含有噪声、异常突变等不可用信息。同时每个指标的质量仪表数据有不同的滞后时间 T_d 。针对这些问题，建立基于过程趋势提取的以质量仪表为基准的在线修正方法：

①滞后时间的离线计算。取 $q_c(t)$ 和仪表值

$q_1(t)$ 的历史数据，分别作多尺度趋势提取后进行小波变换，得到小波系数序列 $Wq_c(t)$ 和 $Wq_1(t)$ 。由于 $q_c(t)$ 和 $q_1(t)$ 具有相似的变化趋势，根据式(1)的意义，在 $Wq_c(t)$ 和 $Wq_1(t)$ 中有两类相对应的极值可以用来计算滞后时间 T_d ：(1) $|Wq_c(t)|$ 和 $|Wq_1(t)|$ 的极大值，相应的极值点为 $t_{ce,i}$ 和 $t_{1e,i}$ ， $i = 1, 2, \dots, N_e$ ，代表了数据信号的突变点；(2) $Wq_c(t)$ 和 $Wq_1(t)$ 的过零点，相应的极值点为 $t_{cz,i}$ 和 $t_{1z,i}$ ， $i = 1, 2, \dots, N_z$ ，代表了数据信号的尖峰点（图 3）。则滞后时间 T_d ：

$$T_d = \frac{1}{N_e + N_z} \left[\sum_{i=1}^{N_e} (t_{1e,i} - t_{ce,i}) + \sum_{i=1}^{N_z} (t_{1z,i} - t_{cz,i}) \right] \tag{4}$$

②在线修正。取当前时刻之前一段时间的仪表值 $q_{1,h}(t)$ 和相应的计算值 $q_{c,h}(t)$ ，分

别经多尺度处理和过程趋势提取^[7]后的数据为 $q_1^T(t)$ 和 $q_c^T(t)$ 。计算结果的修正：

$$q(t) = q_c(t) + \Delta_1(t), \quad \Delta_1(t) = q_1^T(t) - q_c^T(t - T_d) \tag{5}$$

这种策略能反映质量变化趋势，使得计算值能及时跟踪过程趋势的变化；同时避免了单点修正造成的趋势震荡或不连续。

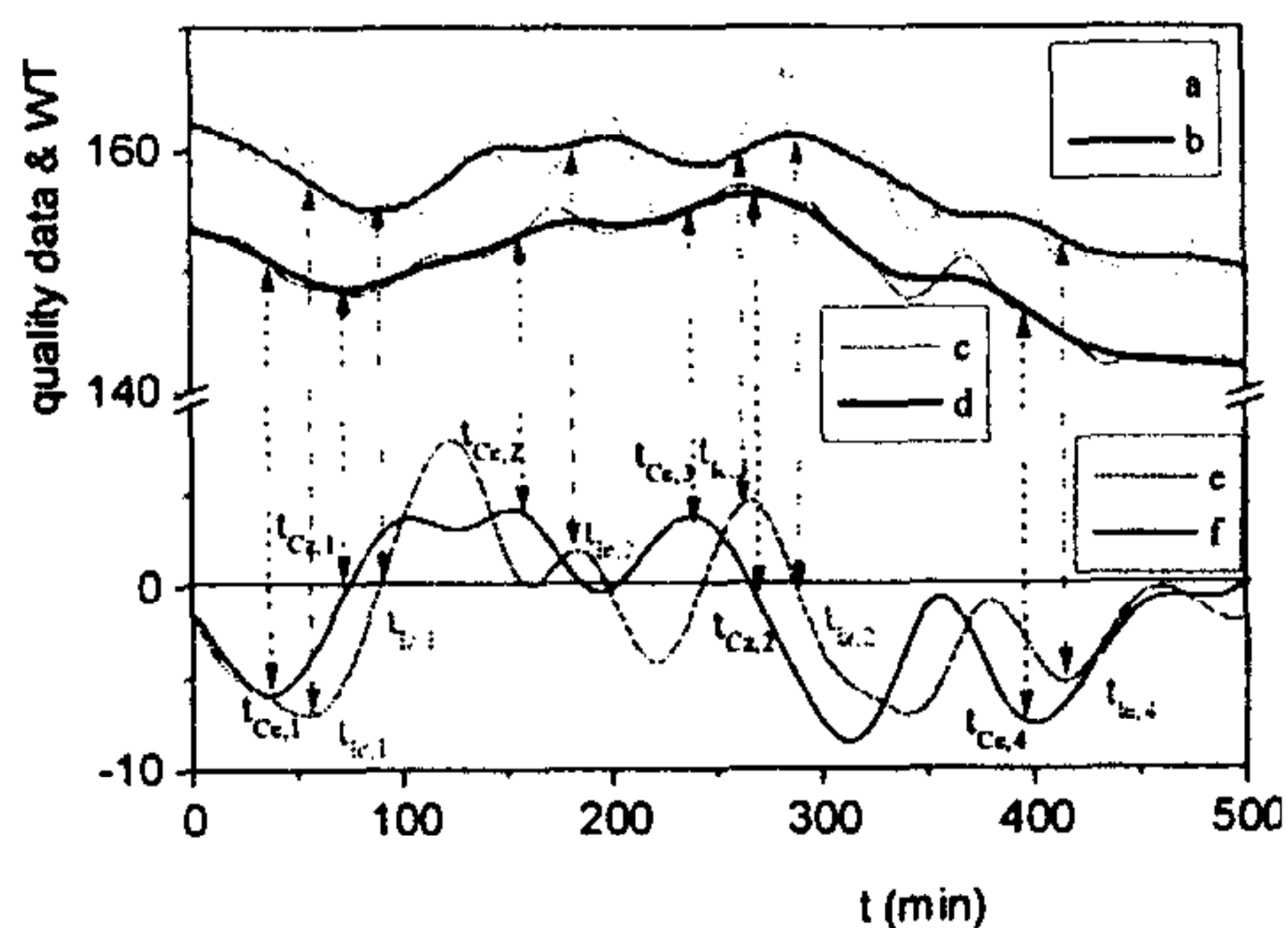


图 3 滞后时间计算示意图
a-仪表原始值；b-仪表提取值；c-计算原始值
d-计算提取值；e-仪表提取值的小波变换
f-计算提取值的小波变换

5 现场应用分析

该系统已在兰州炼化公司第二套常减压装置闭环运行,进行 18 个质量指标的计算.图 4~6 列出了部分质量指标的计算.图中可以看出,与 Honeywell 公司 Tool 计算结果与化验值或在线仪表分析值吻合较好,kit 软件包的计算结果相比,具有更高的精度.

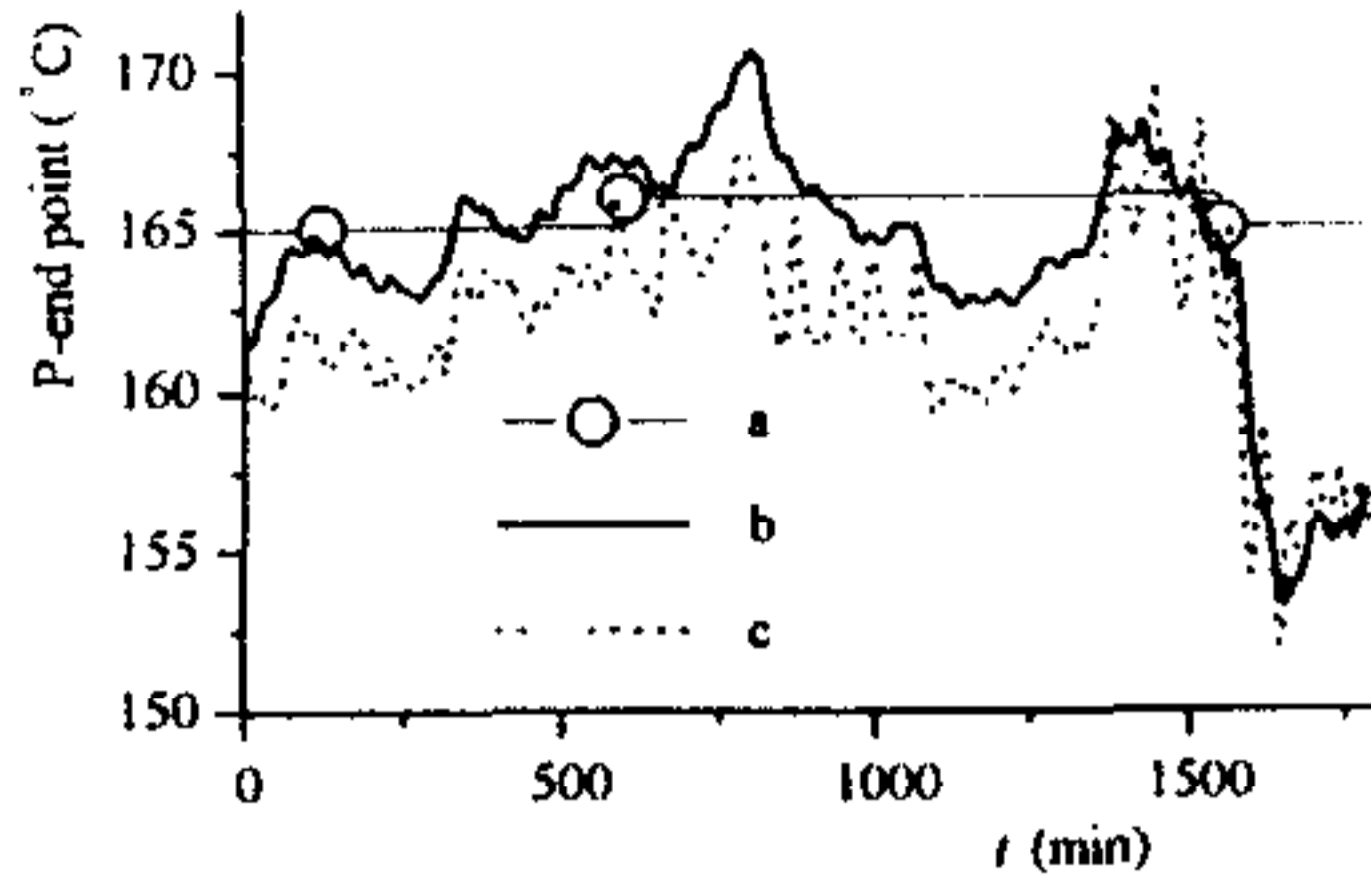


图 4 初馏塔顶干点
a—化验值; b—预测值;
c—toolkit 计算值

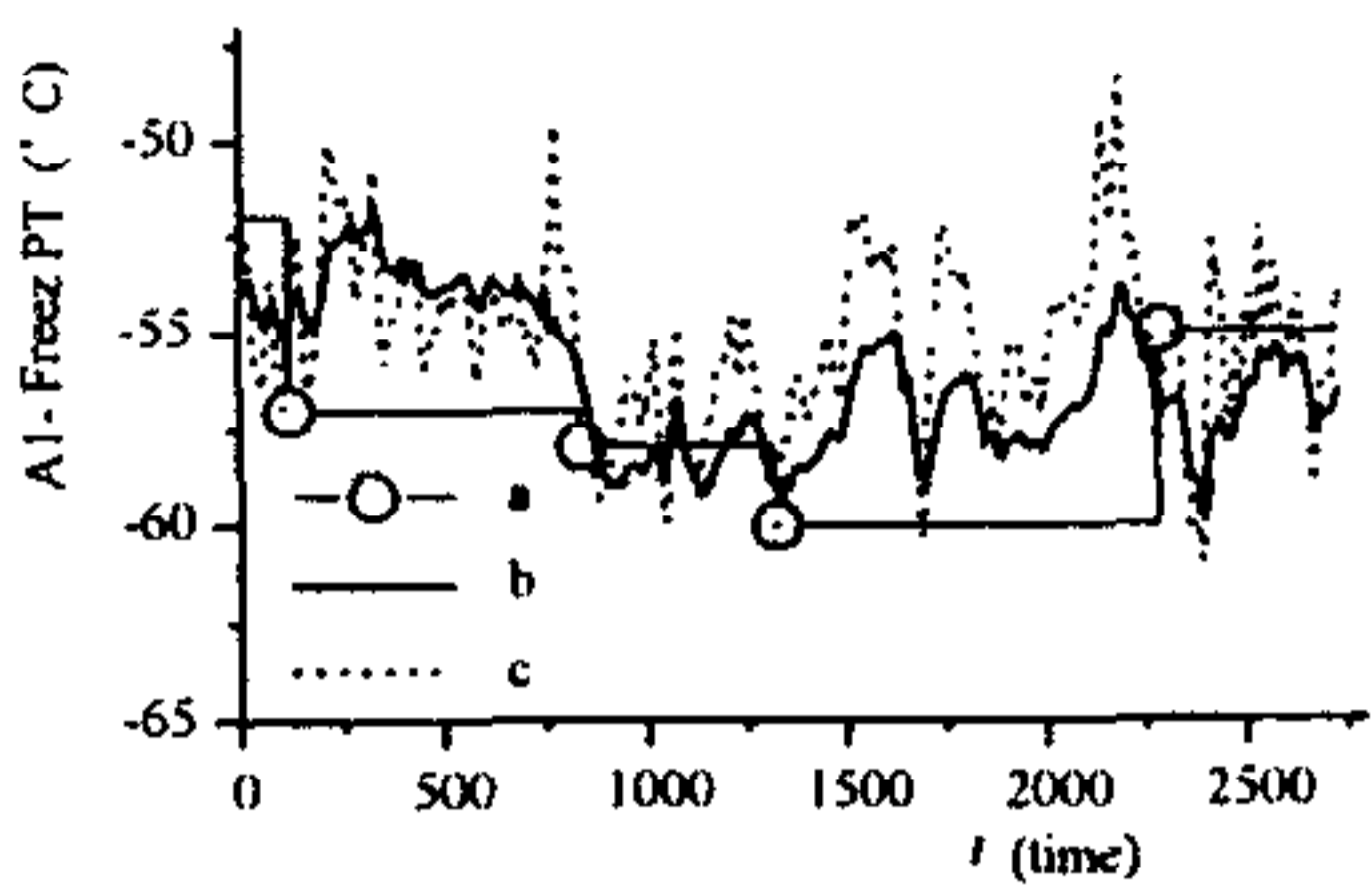


图 5 常一线冰点
a—化验值; b—预测值;
c—toolkit 计算值

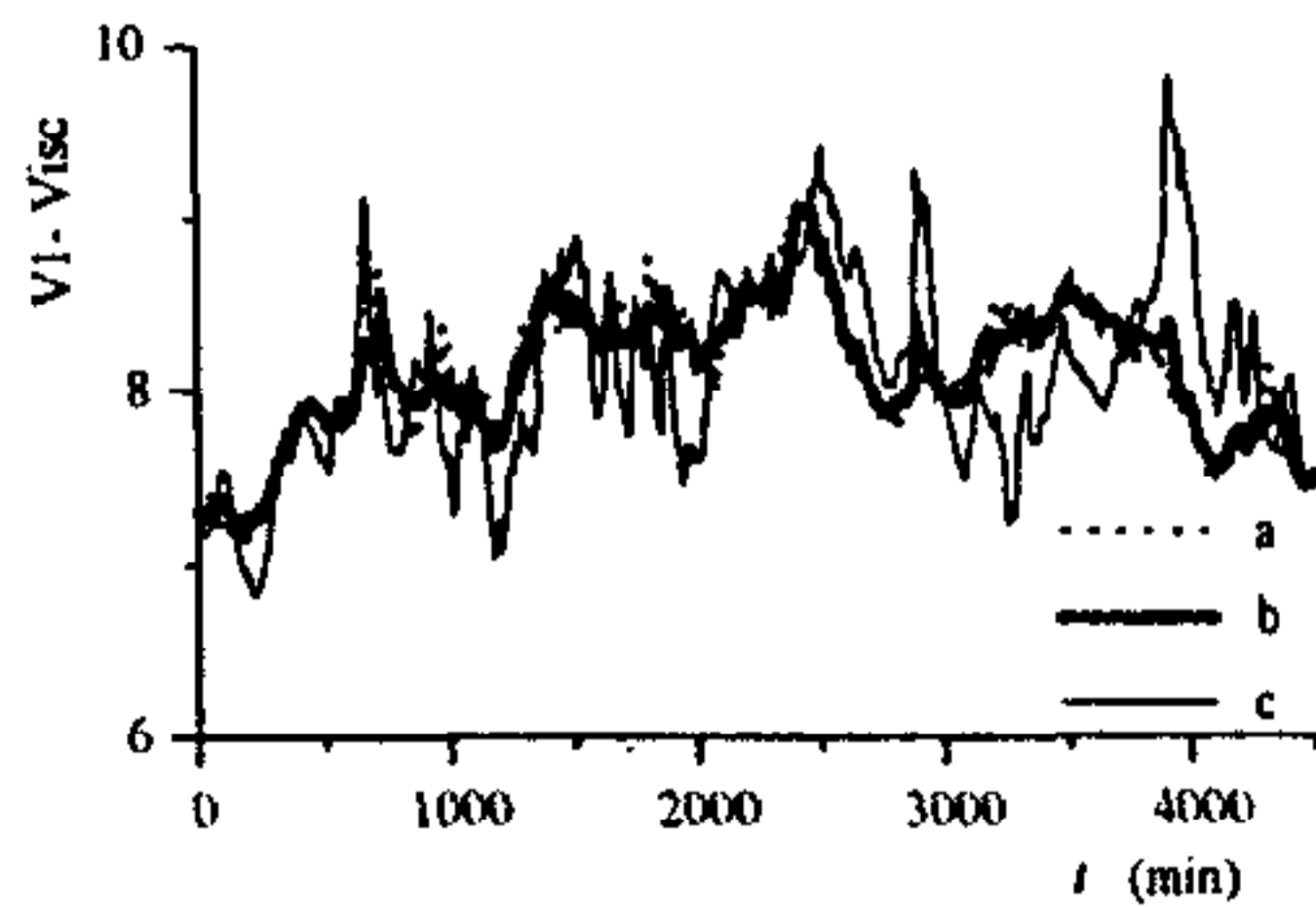


图 6 减一线粘度
a—在线仪表值; b—预测值;
c—toolkit 计算值

6 结论

本文建立了常减压装置不可测被控变量的在线预测系统,采用简化的动态机理模型,并结合经验关联,实现不可测被控变量的在线动态计算.针对生产过程数据的误差和异常,采用基于小波变换的多尺度数据处理技术,保证过程数据的有效性;采用过程趋势实时分析,建立合理的在线修正策略,保证计算精度,满足先进过程控制的要求.

参考文献

- 1 林世雄 石油炼制工程[M]. 北京 石油工业出版社, 1994
- 2 Refining Department of American Petroleum Institute. *Technical Data Book - Petroleum Refining*[M], American Petroleum Institute, Washington, 1992
- 3 徐孝民. 石油馏分的假组分处理方法[J]. 石油炼制与化工, 1995, 3(26): 39~44
- 4 熊强. 原油常压塔动态模拟的研究. [D]. 北京: 清华大学化工系, 1998
- 5 [美]G.史蒂芬拿不勒斯. 化工过程控制 — 理论与工程[M], 吴惕华译. 北京: 化学工业出版社, 1992
- 6 S. Mallat and W. L. Hwang. Singularity Detection and Processing with Wavelets. *IEEE Trans. on Information Theory*, 1992, 38(3): 617~643
- 7 姜太文, 陈丙珍, 何小荣. 基于子波分析的过程数据多分辨率分析处理[J]. 化工学报, 已接收