

针对趋势失控的基于 TAR 模型的 SPC-EPC 集成研究

张晓蕾, 何 桢, 聂 斌
天津大学 管理学院, 天津 300072

摘要:目前在 SPC-EPC 集成研究中使用线性时间序列模型, 该模型对复杂的非线性自相关关系的描述存在偏差并影响最终的控制效果。针对这一问题提出使用一类非线性时间序列模型(即门限自回归模型)描述系统的动态噪声, 据此建立基于门限自回归模型的最小均方误差控制器, 并进一步建立 SPC-EPC 集成控制体系。针对在连续生产过程中常见的以趋势形式存在的过程失控, 通过实例研究控制器在单独使用和集成控制方法下的控制效果, 并与线性控制器相应的结果进行对比, 通过模拟研究进一步验证和分析这一集成控制方法的控制效果。研究表明, 基于非线性时间序列的集成 SPC-EPC 控制方法, 对含趋势形式失控的、复杂的非线性自相关过程, 在单独使用控制器调整的基础上可以进一步减小过程变异, 模拟研究进一步验证此集成控制方法对不同幅度趋势变异的有效性, 并给出不同情况下的集成控制方案。

关键词:统计过程控制; 工程过程控制; 时间序列; 门限自回归模型; 自相关

中图分类号: TB114.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-0334(2012)02-0024-09

1 引言

统计过程控制 (statistical process control, SPC) 和工程过程控制 (engineering process control, EPC) 是从不同的领域发展起来的、目的在于提升产品质量的两种不同的技术。总的来说, 虽然两种方法达到各自目标的方式不同, 但是它们都以减少变异作为自己的目标。控制图是统计过程控制的主要工具, 通过控制图及时发现和消除导致过程失控的原因, 传统控制图假设过程的输出值围绕一个均值波动且彼此间相互独立^[1]。工程过程控制是从过程工业发展而来, 主要应用于化工等连续生产过程, 也称为自动过程控制 (automatic process control, APC)。EPC 方法主要是使用前馈控制和反馈控制等方法对过程加以调整, 通过对输入变量的调整减小输出变量对目标值的偏移, 从而使过程波动减小。EPC 方法假设过程的输出变量不稳定且彼此存在自相关关系, 借助自

相关关系预测过程的波动进而对过程进行调整^[2]。

从20世纪80年代末90年代初以来, 随着生产技术和混合型工业的兴起, 越来越多的产品在生产过程中存在着复杂的自相关现象, SPC 和 EPC 之间的障碍被逐渐打破, 它们的联合使用被认为是一种非常有效的控制和提升产品质量的方法。目前的 SPC-EPC 集成研究主要基于线性时间序列模型描述系统的动态自相关关系, 然而随着过程复杂程度的提高, 越来越多的过程出现了更加复杂的非线性关系, 此时使用线性模型会造成很大的误差, 需要使用更贴近真实过程的非线性模型对过程加以描述。

2 相关研究评述

国际上对 SPC-EPC 集成研究的关注始于20世纪80年代末90年代初, 最早期的思想由 MacGrigor^[3] 提出, 他指出在受到日本企业高质量产品的冲击下, 很

收稿日期: 2011-08-10 修返日期: 2012-01-11

基金项目: 国家自然科学基金(70931004)

作者简介: 张晓蕾(1984-), 男, 河北石家庄人, 天津大学管理学院博士研究生, 研究方向: 质量监测与控制等。

E-mail: pudan97@hotmail.com

多美国公司内部质量部门和控制部门使用不同的方法达到共同的目的,应该消除他们之间的鸿沟,并提出“在线质量控制”的概念,详细介绍了 SPC 和 EPC 的方法。从此引起学者们对 SPC-EPC 集成的关注。之后 Box 等^[4]提出整合统计过程控制和自动过程控制,介绍了统计监测和动态反馈控制的内容,给出两个领域的整体比较,认为 SPC 主要用来去除一些外在人为的干扰,而 EPC 则通过反馈控制,对一些无法避免的自然干扰进行补偿性修正。随着混合性过程工业的兴起,SPC 与 EPC 的界线逐渐变得模糊起来,并对某些批评和质疑整合 SPC-EPC 的观点进行解释,使反对 SPC-EPC 集成的观点开始逐渐减少,SPC-EPC 集成受到越来越多的关注。Montgomery 等^[5]提出整合 SPC-EPC 的框架,建议采用 EPC 方法消除过程数据所表现的高度自相关,并在使用 EPC 时加入 SPC,这样更能达到相互补充的控制效果,并通过分析说明二者结合使用要优于分别单独应用;Messina^[6]对 Montgomery 等^[5]的框架进行更深入的分析,对于不同形式的系统变异情况下使用不同控制器和不同控制图的情况进行详细分析,给出它们对过程总体变异、平均运行长度(average run length, ARL)以及虚发警报概率的影响,并且提出对控制变量进行监控。上述学者的研究成果为之后 SPC-EPC 集成的研究和应用奠定了坚实的基础,SPC-EPC 集成逐渐成为一个研究热点,许多学者针对不同的方面进行了深入的研究。在集成方法应用方面,Jiang 等^[7]详细介绍了 SPC 和 EPC 相关的技术和方法,给出一个 SPC-EPC 集成的框架,并通过一个实例说明这一框架的应用效果。在侧重于控制图的研究方面,Nembhard 等^[8]使用 Cuscore 控制图对一个广义最小方差(GMV)反馈控制的过程进行监控,假设过程是一阶动态并含有 ARMA 噪声,对不同形式的变异进行模拟分析,结果表明 Cuscore 控制图可以在很大的参数范围内发现过程变异。在多元 SPC-EPC 集成方面,Yang 等^[9]使用 MEWMA 控制器,并使用 MGWMA 控制图对过程进行监测,二者集成能够产生较好的控制效果;之后 Yang 等^[10]又进一步研究多元 SPC-EPC 集成的经济性设计问题,对集成控制图进行优选。在智能算法在 SPC-EPC 集成领域的应用方面,Jiang 等^[11]将人工神经网络、遗传算法等软计算技术应用于 SPC-EPC 集成控制系统,构建 MIMO 过程控制系统;Lu 等^[12]构建 SPC-EPC-ICA-NN 集成的过程控制模型。此外,Montgomery^[1]、Del Castillo^[2]和 Box 等^[13]也对 SPC-EPC 集成进行详细阐述。

在中国的研究中,最早期由张黎^[14]提出整合 SPC-EPC 的方法,他鉴于 SPC 和 EPC 的特点以及它们之间彼此互补的特性,针对现代制造环境小批量生产、过程的频繁调整、使用传感器采集数据等新特点,指出 SPC 与 EPC 整合具有许多无可比拟的优越性;又在探讨 SPC、EPC 和田口方法 3 种质量改进方法的基础上,对它们进行比较和评价,提出一个整合 SPC、EPC 和田口方法的概念框架^[15]。之后许多学者

从不同方面对 SPC-EPC 集成进行深入研究,在智能算法的应用方面,褚崑等^[16]采用 Shewhart-EWMA 联合控制图实施 SPC 监测过程输出,发现异常时启动基于模糊规则推理的模糊质量诊断模块进行诊断,同时启用基于贝叶斯理论的 MCMC 方法估计过程偏移的 EPC 调整模块;禹建丽等^[17]针对一个化工生产过程的干扰时间序列,建立基于 ARMA(p, q)过程的 Box-Jenkins 预测模型和基于径向基(radial basis function, RBF)神经网络的预测模型,并进行预测对比实验。在结合控制成本的研究方面,俞磊等^[18]在 SPC 与 EPC 的整合框架下分析一个 AR(1)过程的质量损失;孙秋霞等^[19]基于兼顾质量因素和成本因素的原则,针对由一阶动态过程与 ARIMA(0,1,1)噪声组成的系统给出一种带有质量特性约束的经济设计模型。在侧重 EPC 控制器的研究方面,崔敬巍等^[20]针对一阶动态过程和稳态 ARMA(1,1)干扰,当过程输入出现阶跃变化时过程出现的暂态阶段,设计了集成 SPC-EPC 控制方法;刘飞等^[21]将状态空间分析法引入 EPC 控制器的设计中,针对 ARMA 过程,通过极点配置方法分析 EPC 控制器的性能;史荣珍等^[22]针对较为复杂的二阶动态过程和稳态干扰 ARMA(1,1)组成的系统模拟制造过程,采用 SPC 与 EPC 整合的集成过程控制方法对全过程监控。

以上对于 SPC-EPC 集成的研究在描述系统的动态自相关关系上普遍使用经典的线性 ARIMA 时间序列模型,只是在模型阶数的选取上有所不同,这些研究都假设过程中存在的动态噪声为线性的自相关关系。虽然线性模型可以对一些简单过程的自相关关系进行近似,但是对于更加复杂的过程就会存在一定的偏差和局限性。针对目前缺乏对更加接近真实的复杂过程的深入研究的状况,本研究提出使用一种非线性时间序列模型,即门限自回归模型(threshold autoregressive model, TAR),对系统的动态噪声进行描述,并依此建立 SPC-EPC 集成控制方法。目前在化工等连续生产过程中,由于物料性质和条件参数等的变化,造成产品的质量特性发生连续的增大或减小,使特性值发生趋势形式的失控,传统的休哈特控制图是针对均值的偏移变化,对于趋势变化难以及时发出报警信号,而使用控制器进行调整又无法消除导致失控的原因,所以需联合使用 SPC 与 EPC 来达到最优的控制效果。本研究针对以趋势形式存在的过程失控,结合基于门限自回归模型的 SPC-EPC 集成控制方法进行研究。

3 门限自回归模型

3.1 门限自回归模型介绍

很长时间以来,由 Box 等^[23]提出的线性 ARIMA 时间序列模型在很多领域得到成功的应用,但是线性模型在对非线性自相关现象的描述上会出现一定的偏差,从而影响最终的应用效果。针对线性模型在对更为复杂的自相关过程的建模上的局限性,Tong 等^[24]提出门限自回归模型,它描述非线性自相关关

系是基于分段线性逼近,即把状态空间分成几个子空间,每个子空间上使用线性逼近,这种分割由门限变量 X_{t-d} 来指定^[25]。一个具有 $k(k \geq 2)$ 分段的门限自回归模型定义为

$$X_t = \sum_{i=1}^k \{b_{i,0} + b_{i,1}X_{t-1} + \dots + b_{i,p_i}X_{t-p_i} + \sigma_i \varepsilon_t\} I(X_{t-d} \in A_i) \quad (1)$$

其中, t 为时刻; X_t 为 t 时刻的时间序列值; k 为分段数; i 为分段, $i=1, \dots, k$; b_{ij} 为未知参数, j 为自回归的阶数; p_i 为一些未知的正整数,表示第 i 段的时间延迟,根据具体情况不同分段有不同的时间延迟; $\sigma_i \varepsilon_t$ 为误差项,且 $\varepsilon_t \sim iid(0,1)$, σ_i 为误差项标准差, $\sigma_i > 0$; I 为指示函数, X_{t-d} 为门限变量, d 为延迟参数, A_i 为集合,当门限变量 X_{t-d} 属于集合 A_i 时函数值为1,其他情况下函数值为0, A_i 构成 $(-\infty, +\infty)$ 的一个分割,表示第 i 个子空间,其含义是对所有 $i \neq j, A_i \cap A_j = \emptyset$ 且 $\cup A = (-\infty, +\infty)$, \emptyset 为空集。在模型中,在每一个 A_i 上拟合一个线性形式,最终的模型为不同分段上的形式乘以此分段上的指示函数并求和,分割由门限变量 X_{t-d} 指定,根据实际情况 d 选取不同的正整数值,通常的情形是 $A_i = (r_{i-1}, r_i]$, r_i 为门限,此模型为自激励门限自回归模型的一个特殊类型。目前门限自回归模型在经济、金融和物理等领域都有着广泛的应用,但是还未见在质量控制领域的应用。

3.2 门限自回归模型与线性时间序列模型对真实过程的拟合和比较

为了说明门限自回归模型在对真实数据拟合上相对于经典线性模型的优势,本研究通过不同模型对某真实化工生产过程的粘度数据的拟合进行比较来证明这一点,数据见图1^[23]。先对此过程使用S-Plus软件附加Finmetrics模块进行门限非线性检验,结果表明数据中存在门限非线性关系;再使用两个分段的门限自回归模型进行拟合,结果为

$$\begin{cases} X_t = 1.980 + 0.841X_{t-1} - 0.070X_{t-2} + \varepsilon_{t1} & \text{当 } X_{t-1} \leq 8.8 \\ X_t = 3.991 + 0.612X_{t-1} - 0.036X_{t-2} + \varepsilon_{t2} & \text{当 } X_{t-1} > 8.8 \end{cases} \quad (2)$$

在使用门限自回归模型对数据进行拟合的同时,再使用经典的ARIMA模型对数据进行拟合,并对几种不同模型的AIC和残差平方和进行比较,结果见表1。

从表1可知,通过比较,TAR模型对数据进行拟合的AIC和残差平方和都小于其他几个线性模型,所以相比于线性时间序列模型,非线性门限自回归模型可以更好地对实际数据进行描述,可以保留原过程的大部分信息,故使用非线性模型更适合对贴近真实情况的复杂过程进行拟合,对过程基于非线性模型的研究可以更好地贴近过程的实际情况。

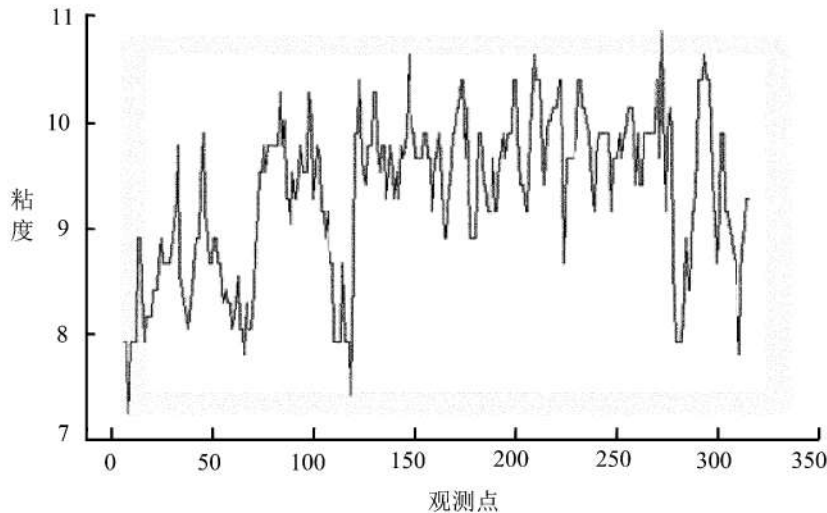


图1 某化工生产过程的粘度数据

Figure 1 Viscosity Data from a Chemical Engineering Process

表1 对粘度数据的不同时间序列拟合的AIC和残差平方和数值
Table 1 Akaike Information Criterion and Sum of Squared Residuals Values of Different Time Series Models in Fitting the Viscosity Data

模型	TAR	AR(2)	ARMA(1,1)	IMA(1,1)	ARIMA(1,1,1)
AIC	130.929	176.389	137.373	166.930	147.773
残差平方和	26.541	30.937	30.589	30.805	28.690

4 基于门限自回归模型的最小均方差控制器

通过上述研究可以看出,相比于线性模型,非线性门限自回归模型能够更加贴近真实的自相关过程,这就为基于门限自回归模型进行控制打下了良好的基础,所以在此基于门限自回归模型建立 EPC 控制器。目前常用的描述过程质量特性的动态变化和噪声效应的模型为 Van Der Wiel 等^[26]提出的模型,即

$$Y_t = T(B)X_{t-1} + N_t \quad (3)$$

其中, Y_t 为 t 时刻过程输出的质量特性,假设目标值为 0; X_t 为 t 时刻可控输入变量,假设系统时间延迟为 1; $T(B)$ 为传递函数,描述输入变量与输出变量的关系,其中 B 为后移算子; N_t 为 t 时刻过程的动态噪声,为一个自相关的过程,通常由一个时间序列模型来表示。

在此模型的基础上,建立基于门限自回归模型的最小均方差控制器,假设过程输入输出关系为 $Y_t = -X_{t-1}$, 即 $T(B) = -1$, N_t 是一个可由门限自回归模型表示的非线性自相关过程,并且假设该模型为两段,每段为二阶自回归形式,即

$$\begin{cases} N_t = C_1 + \varphi_{11}N_{t-1} + \varphi_{12}N_{t-2} + \varepsilon_{t1} & \text{当 } N_{t-d} \leq r \\ N_t = C_2 + \varphi_{21}N_{t-1} + \varphi_{22}N_{t-2} + \varepsilon_{t2} & \text{当 } N_{t-d} > r \end{cases} \quad (4)$$

其中, ε_{t1} 和 ε_{t2} 是均值为 0、标准差分别为 σ_1 和 σ_2 的白噪声过程, C 和 φ 为模型待估参数。在此研究中选取 d 的值为 1,

根据(3)式以及输入输出关系 $Y_t = -X_{t-1}$, 若要得到最小均方误差的输出,应使输入变量 X_{t-1} 等于动态噪声的最小均方误差预测值 \hat{N}_t , 即

$$X_{t-1} = \hat{N}_t \quad (5)$$

而基于门限自回归模型(4)式的 N_t 的最小均方误差预测为

$$\begin{cases} \hat{N}_t = C_1 + \varphi_{11}N_{t-1} + \varphi_{12}N_{t-2} & \text{当 } N_{t-d} \leq r \\ \hat{N}_t = C_2 + \varphi_{21}N_{t-1} + \varphi_{22}N_{t-2} & \text{当 } N_{t-d} > r \end{cases} \quad (6)$$

预测误差分别为 ε_{t1} (当 $N_{t-d} \leq r$) 和 ε_{t2} (当 $N_{t-d} > r$)。

综合(3)式~(6)式,可以推导出基于门限自回归模型的最小均方差控制器为

$$X_{t-1} = \begin{cases} C_1 + \varphi_{11}(X_{t-2} + Y_{t-1}) + \varphi_{12}(X_{t-3} + Y_{t-2}) & \text{当 } X_{t-2} + Y_{t-1} \leq r \\ C_2 + \varphi_{21}(X_{t-2} + Y_{t-1}) + \varphi_{22}(X_{t-3} + Y_{t-2}) & \text{当 } X_{t-2} + Y_{t-1} > r \end{cases} \quad (7)$$

(7)式的控制器是基于两段以及每一段为二阶自回归形式的门限自回归模型建立的,此控制器可以很容易的推广为过程的噪声模型多于两个分段或自回归的阶数大于 2 的情形。

5 基于门限自回归模型的 SPC-EPC 集成控制方法对于趋势失控的控制效果

建立控制器的目的就是要通过控制器对可控输

入变量的调整来减少输出对目标值的偏移,从而达到控制产品质量的目的。若过程稳定且没有发生失控,如果由一个类似(4)式的模型可以对过程的动态噪声进行很好的描述,则类似(7)式的控制器可以对过程进行很好的调整,此时过程的输出为 ε_t , 即最小均方误差输出。然而在大量的生产过程中,由于存在一些原因,导致过程发生失控,在原有稳定的自相关关系上又产生新的偏移,而考察在失控的条件下控制器以及联合控制的控制效果就显得十分必要。在一些以化工生产过程为代表的连续生产过程中,由于过程的内部或外部条件发生变化,或者某些物质的性质和参数发生变化,使过程失控,导致最终产品输出的质量特性发生持续的增大或减小,即输出存在一个以趋势形式存在的变化,而传统的休哈特控制图主要针对均值的偏移,对于趋势的变化难以及时发出出界报警信号,所以本研究通过模拟出的例子考察基于门限自回归模型的最小均方差控制器以及基于此控制器的集成 SPC-EPC 方法的控制效果。假设过程噪声为两分段的门限自回归过程,每段为二阶自回归的形式,由(8)式模拟生成 200 组数据,即

$$\begin{cases} N_t = 0.300N_{t-1} - 0.070N_{t-2} + \varepsilon_{t1} & \text{当 } N_{t-1} \leq 5 \\ N_t = 0.700N_{t-1} - 0.040N_{t-2} + \varepsilon_{t2} & \text{当 } N_{t-1} > 5 \end{cases} \quad (8)$$

假设 ε_{t1} 和 ε_{t2} 服从均值为零、标准差为 5 的正态分布,并假设在第 101 点过程存在以趋势形式存在的失控,每单位间隔有大小为 0.5 的增大,具体的失控过程见图 2。

为考察控制体系的控制效果,选用平均偏移平方来衡量控制器和集成控制方法的控制效果,此值越小,说明过程的整体变异越小,对目标值的偏移就越小,控制方法的效果越好,计算公式见(9)式。

$$PM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - T)^2 \quad (9)$$

其中, PM 为过程的平均偏移平方值, n 为数据个数; T 为目标值,在此例中设 $T = 0$ 。若不对过程做任何形式的监测和调整,此时图 2 所示失控过程的 $PM = 469.051$ 。

对于图 2 所示的模拟数据,同时使用线性时间序列模型对过程未发生失控的部分进行拟合,结果为一个 IMA(1,1) 过程,即

$$N_t - N_{t-1} = \varepsilon_t - 0.563\varepsilon_{t-1} \quad (10)$$

当输入输出关系为 $Y_t = -X_{t-1}$ 时,基于 IMA(1,1) 模型的最小均方差控制器为^[2]

$$X_t = -\frac{1-\theta}{1-B} Y_t \quad (11)$$

其中, θ 为 IMA 模型的参数。若采取(7)式的非线性控制器和(11)式的线性控制器分别对图 2 中发生趋势失控的门限自回归过程进行调整,结果见图 3,此时, TAR 控制器的 PM 为 88.562, IMA 控制器的 PM 为 28.114。

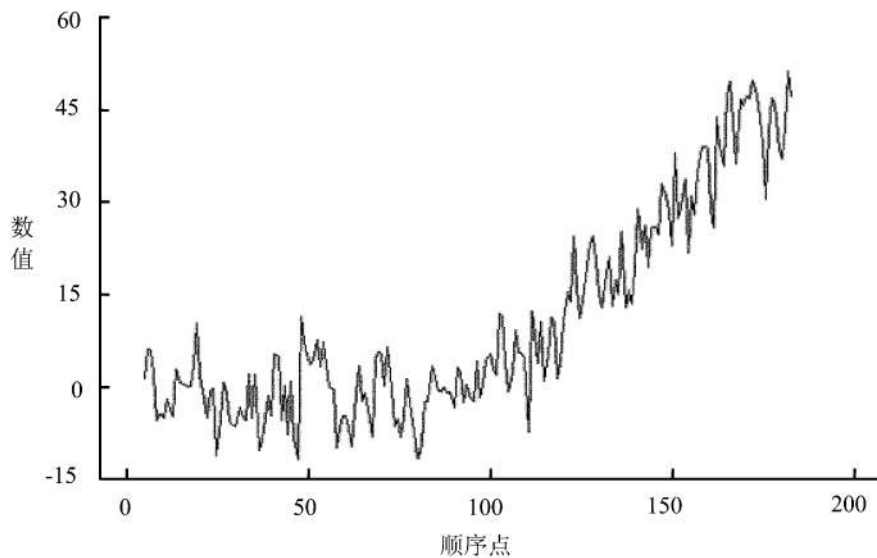
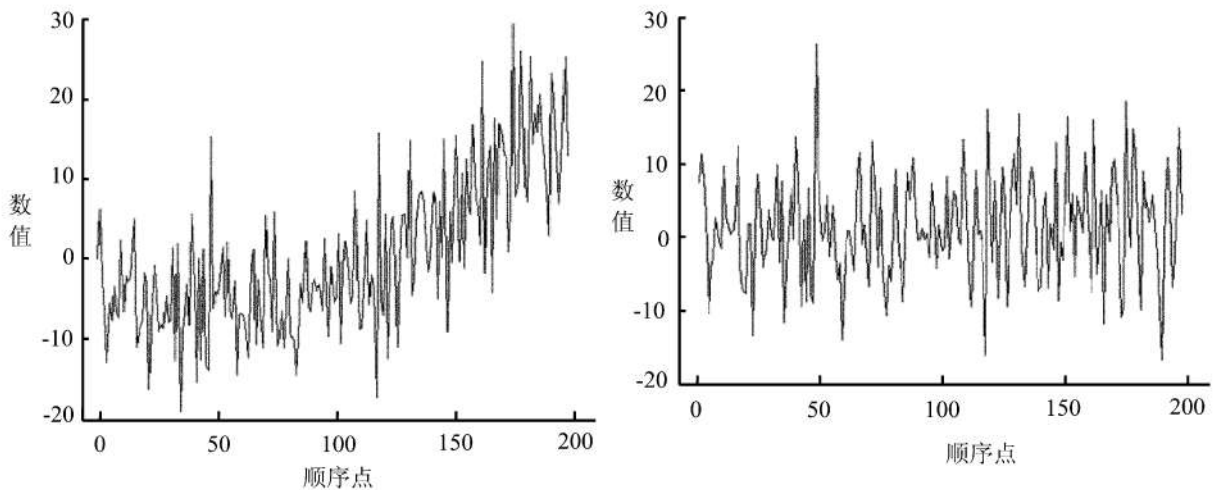


图2 含趋势形式失控的模拟 TAR 过程

Figure 2 A Simulated TAR Process with Assignable Causes Resulting in Trend



(a) 非线性控制器的调整结果

(b) 线性控制器的调整结果

图3 对趋势形式失控过程的调整结果

Figure 3 Adjustment Results of the Process with Assignable Causes Resulting in Trend

从图3可以看出,使用(7)式的控制器对过程进行调整可以在很大程度上减小过程的变异,从而证明此控制器对于趋势失控有一定的有效性。但是从图3中仍然可以看到趋势的存在,故此控制器无法对趋势形式的失控进行完全的补偿。而使用基于线性IMA时间序列的控制器消除了过程中存在的趋势变异,而且最终的变异要小于单独使用基于非线性模型的调整效果。究其原因是因为IMA模型为非平稳模型,非平稳模型可以对过程中出现的逐渐增大的趋势进行较为准确的预测,所以基于IMA模型的控制器可以很好地对过程中出现的非平稳的趋势变异进行补偿,从而减小由于过程失控导致的趋势带来的变异。而TAR模型为平稳模型,难以对由外部原因导致的趋势变异进行准确的预测,

导致预测值小于真实的趋势形式的变异,使控制器无法对变异进行完全的补偿,最终结果中仍有趋势存在。若对过程拟合的模型为平稳的ARMA过程,不是非平稳的IMA过程,使用基于ARMA模型的控制器对于趋势形式的变异则无法有效补偿,由于线性模型对非线性过程进行拟合会存在较大误差,可以预见到此时线性控制器的效果无法与非线性控制器相比。虽然使用线性控制器在应对趋势变异时效果要优于非线性控制器,但是比较未失控的前100点的调整可以看出,使用非线性控制器的 $PM = 20.967$,而使用线性控制器的 $PM = 24.143$,非线性控制器要优于线性控制器,这也是非线性模型可以更好地对复杂的非线性过程进行拟合的缘故。

从分析中可以看出,基于门限自回归模型的控

制器(7)式对于平稳的未发生失控的复杂自相关过程可以有很好的调整效果,但是对于发生失控的过程则无法完全有效地进行控制。单独使用控制器对失控的过程进行调整只是通过输入变量的变化对可以预测的输出的偏移进行补偿,而导致过程失控的原因依旧存在,所以若想进一步减小过程的变异,需要及时发现并消除导致失控的原因,这就需要使用控制图同时对过程进行监测。一个利用门限自回归控制器的优势以及可以消除导致过程失控的原因的方法就是使用集成 SPC-EPC 方法,在使用控制器的同时进一步使用 3σ 控制器的休哈特单值控制图对过程的输出变量和调整变量分别进行监控,假设在任意一个控制图发现失控信号后可以及时消除失控原因使过程恢复稳定。通过控制图分别结合非线性和线性两种控制器的控制结果见图4,此时 PM 分别为24.951和28.380。

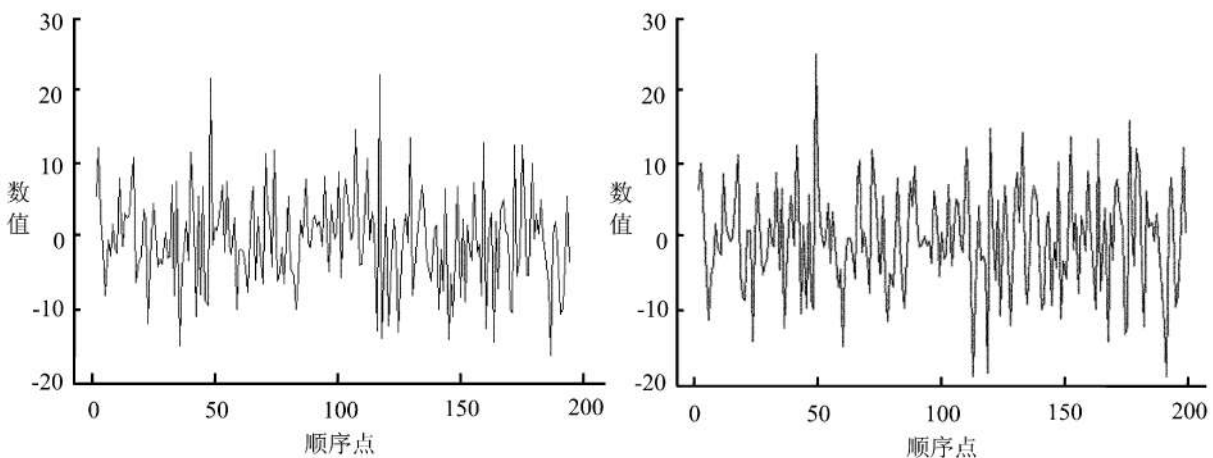
从图4可以看出,对于一个可以由门限自回归模型描述的复杂自相关过程,当其发生过程失控且失控为趋势形式时,使用(7)式的非线性控制器并同时使用控制图对控制器的输入、输出变量进行监测可以达到比单独使用控制器更好的效果,可以在控制器的基础上进一步减小过程变异。而线性控制器相应的结果并不比单独使用控制器的结果好,反而使变异略大于单独使用控制器调整的结果。造成这一结果的原因是由于线性模型对过程的拟合无法与非线性模型相比,对于偏移的预测误差较大,从而造成调整后过程的波动较大,即使消除了变异原因,此波动也无法消除,最终消除变异原因后非线性模型的结果优于线性模型的结果。而非线性模型可以在失控发生前和失控消除后准确的预测过程的偏移,进而通过控制器的调整消除过程的变异。通过对过程变异的对比可以看出,将非线性模型的控制器与控制图联合使用可以进一步减少过程变异,控制图

与控制器起到彼此互补的作用,控制器消除了由于系统内部自相关关系导致的可以预测的偏移,控制图消除了由于外部原因引起的不可预测的偏移,解决了由于单独使用控制器无法完全消除外在原因导致的趋势变异问题,而基于线性模型方法无法达到这一效果。从此例可以看出,若过程存在复杂的非线性自相关关系,基于非线性门限自回归模型的 SPC-EPC 集成控制方法在对趋势形式失控的控制上优于使用线性时间序列模型的方法,同时使用基于门限自回归模型的控制器和控制图可以达到最优的效果。

6 基于门限自回归模型的 SPC-EPC 集成对趋势形式失控的模拟仿真研究

为了更进一步研究基于门限自回归模型的 SPC-EPC 集成控制过程,在第5部分的基础上,通过大量模拟仿真更深入地分析此过程的性能。假设由(8)式表示的过程失控的形式为逐渐增大的趋势形式,每单位间隔增大的幅度分别为0.10、0.25、0.50、1.00、5.00、10.00,每种情况在第101点处开始发生失控,并且假设失控原因在被控制图发现后可被立即消除,对全过程使用(7)式的控制器进行调整。同时使用3种控制图对过程的输入、输出进行监测,分别为休哈特单值控制图、 λ 分别等于0.10和0.40的 EWMA 控制图。基于5000次模拟,分别考察以上几种不同情况下过程的平均误差平方和 ARL_1 ,固定 $ARL_0 = 370$ 。模拟结果见表2和表3。

从表2和表3可以看出,无论是使用哪种控制图进行监测,共同使用控制图和控制器的效果,且随着趋势幅度增大,这一效果越明显。从对输入和输出进行监测的结果可以看出,当过程的趋势不明显、单位时间的变化很小时,使用控制图对输入进行监测要略优于对输出进



(a)非线性控制器与控制图集成的结果

(b)线性控制器与控制图集成的结果

图4 消除趋势失控原因后的过程输出

Figure 4 Process Output after Removing the Assignable Causes Resulting in Trend

表2 不同大小的趋势形式失控下平均偏移平方模拟结果

Table 2 Simulation Results of Mean Squared Error in Different Degree of Assignable Causes Resulting in Trend

偏移量	0.10	0.25	0.50	1.00	5.00	10.00
无控制图	29.553	41.511	81.979	240.439	5 223.447	20 740.340
休哈特-输出	28.131	29.772	29.375	29.028	28.111	27.934
休哈特-输入	26.902	33.664	63.560	200.753	4 853.046	19 421.470
EWMA-输出($\lambda = 0.10$)	27.014	26.864	26.766	26.881	27.811	29.045
EWMA-输入($\lambda = 0.10$)	25.371	25.485	25.864	28.301	118.706	400.146
EWMA-输出($\lambda = 0.40$)	27.843	27.840	27.440	27.135	27.049	27.506
EWMA-输入($\lambda = 0.40$)	25.463	26.378	30.646	50.559	727.906	2 836.857

表3 不同大小的趋势形式失控下的 ARL 模拟结果

Table 3 Simulation Results of ARL in Different Degree of Assignable Causes Resulting in Trend

偏移量	0.10	0.25	0.50	1.00	5.00	10.00
休哈特-输出	77.739	52.168	32.866	19.749	5.169	2.525
休哈特-输入	55.962	73.706	85.950	92.883	97.496	97.773
EWMA-输出($\lambda = 0.10$)	62.906	34.515	22.107	14.323	5.143	3.288
EWMA-输入($\lambda = 0.10$)	5.568	7.444	12.627	19.524	24.224	24.429
EWMA-输出($\lambda = 0.40$)	72.629	41.474	25.399	15.012	4.195	2.380
EWMA-输入($\lambda = 0.40$)	16.695	27.253	39.457	46.353	50.041	50.194

行监测;但当单位时间的变化逐渐增大时,对输入进行监测的平均偏移平方要远远大于对输出的监测。3种控制图都遵循这一规律,且3种控制图对输入进行监测的 ARL 都随着变异幅度的增大而增大。从3种控制图的对比中可以看出,使用EWMA控制图的效果要略优于使用休哈特控制图的效果,而且变异幅度越小,EWMA控制图的优势越明显,在幅度最大的两种情况下,使用休哈特控制图的效果与使用EWMA控制图的效果基本类似。造成这一结果的原因是由于EWMA控制图对小的偏移比较敏感,而对于较大的偏移,从结果中可以看出二者的结果差别不大,这一点也可以从表3的 ARL 对比中看出。对于较小的偏移,EWMA控制图的 ARL 要小于休哈特控制图,而对于较大的偏移,二者大小接近。对比 λ 值不同的两种EWMA控制图的平均偏移平方以及平均运行链长的结果可以看出,较小的 λ 值适用于趋势变化较小的过程,而较大的 λ 值适用于趋势变化较大的过程。

综上所述,使用(7)式的控制器对一个可以由门限自回归模型描述的过程进行调整时,当过程失控

的形式为趋势形式时,若已知变异幅度较小,可以在使用控制器的同时使用 λ 值较小的EWMA控制图对输入变量进行监测;若已知变异幅度较大,可以使用休哈特控制图和 λ 值较大的EWMA控制图对过程的输出变量进行监测;若变异幅度大小未知,可以选择同时使用休哈特控制图和 λ 值较大的EWMA控制图对过程的输出变量进行监测。

7 结论

随着生产技术和产品复杂程度的提高,非线性自相关关系更多地出现在产品的生产过程中,原有的基于线性模型的SPC-EPC集成控制方法难以继续发挥有效作用,所以基于非线性模型的控制就显得十分必要,本研究基于门限自回归模型的SPC-EPC集成控制方法展开研究,得到如下结论。①门限自回归模型对于更加复杂的、更贴近真实生产过程的非线性自相关关系可以进行比较准确的描述,而且相比于线性时间序列模型,可以保留原有过程的大部分信息;②在此基础之上建立的基于门限自回归模型的最小均方误差控制器,针对以趋势形

式的过程失控可以消除大部分变异,虽然单独进行调整的效果要差于单独使用基于线性 IMA 模型的控制器,但是使用基于门限自回归模型的控制器结合控制图可以进一步发现并消除过程失控的原因,使过程的总体偏移更进一步的降低,且结果优于使用线性控制器结合控制图的效果,可以达到最优的控制效果;③基于大量模拟的研究表明,集成控制方法针对不同大小的趋势变异都可以进行有效的控制,可以针对已知的不同趋势幅度或者未知的趋势幅度选取适合的控制图和控制器。

SPC-EPC 集成是一种非常有效的过程控制手段,它吸收了二者的优势,起到彼此互补的作用。使用基于非线性时间序列模型的集成控制方法顺应了生产技术和产品质量发展的趋势,使用非线性时间序列模型描述过程中的动态自相关关系,并依此建立控制体系,可以对过程实行更为有效和准确的控制,有助于控制和提升产品的质量。目前存在着很多种类的非线性时间序列模型,如何选择适合的模型以及如何基于不同的模型和针对不同的过程建立有效的控制器进而建立有效的 SPC-EPC 集成控制体系,是一个值得继续深入研究和分析的问题。

参考文献:

- [1] Montgomery D C. Statistical quality control: A modern introduction [M]. 6th ed. New York: John Wiley & Sons, 2009:527-543.
- [2] Del Castillo E. Statistical process adjustment for quality control [M]. New York: John Wiley, 2002:1-38.
- [3] MacGrigor J F. On-line statistical process control [J]. Chemical Engineering Progress, 1988, 84(10):21-31.
- [4] Box G, Kramer T. Statistical process monitoring and feedback adjustment: A discussion [J]. Technometrics, 1992, 34(3):251-267.
- [5] Montgomery D C, Keats J B, Runger G C, Messina W S. Integrating statistical process control and engineering process control [J]. Journal of Quality Technology, 1994, 26(2):79-87.
- [6] Messina W S. Strategies for the integration of statistical and engineering process control [D]. Phoenix: Arizona State University, 1992:29-96.
- [7] Jiang W, Farr J V. Integrating SPC and EPC methods for quality improvement [J]. Quality Technology & Quantitative Management, 2007, 4(3):345-363.
- [8] Nembhard H B, Chen S. Cuscore control charts for generalized feedback-control systems [J]. Quality and Reliability Engineering International, 2007, 23(4):483-502.
- [9] Yang L, Sheu S H. Integrating multivariate engineering process control and multivariate statistical process control [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2006, 29(1/2):129-136.
- [10] Yang L, Sheu S H. Economic design of the integrated multivariate EPC and multivariate SPC charts [J]. Quality and Reliability Engineering International, 2007, 23(2):203-218.
- [11] Jiang J C, Hsiao F Y. Construct MIMO process control system by using soft computing methods [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2007, 33(5):511-520.
- [12] Lu C J, Wu C M, Keng C J, Chiu C C. Integrated application of SPC/EPC/ICA and neural networks [J]. International Journal of Production Research, 2008, 46(4):873-893.
- [13] Box G E, Luceño A. Statistical control: By monitoring and feedback adjustment [M]. New York: John Wiley, 1997:258-266.
- [14] 张黎. 统计过程监测与调整: 评述与展望 [J]. 控制与决策, 2005, 20(8):841-847.
Zhang Li. Statistical process monitoring and adjustment: A survey [J]. Control and Decision, 2005, 20(8):841-847. (in Chinese)
- [15] 张黎. SPC、EPC 与田口方法的比较及整合 [J]. 制造业自动化, 2005, 27(8):28-32.
Zhang Li. The comparison and integration among SPC, EPC and the Taguchi method [J]. Manufacturing Automation, 2005, 27(8):28-32. (in Chinese)
- [16] 褚巍, 孙树栋, 于晓义. SPC 与 EPC 的集成及相关关键技术研究 [J]. 计算机应用, 2007, 27(1):228-230.
Chu Wei, Sun Shudong, Yu Xiaoyi. Study on the integration of SPC/EPC and its key technologies [J]. Computer Applications, 2007, 27(1):228-230.
- [17] 禹建丽, 张宗伟. 整合 SPC/EPC 系统过程干扰的时间序列预测及应用 [J]. 中原工学院学报, 2009, 20(4):11-15.
Yu Jianli, Zhang Zongwei. Time series prediction and application for integrated SPC/EPC process disturbance [J]. Journal of Zhongyuan University of Technology, 2009, 20(4):11-15. (in Chinese)
- [18] 俞磊, 孙学静, 刘飞. 基于反馈调整的自相关过程质量损失分析 [J]. 控制工程, 2008, 15(3):273-274, 278.
Yu Lei, Sun Xuejing, Liu Fei. Quality loss analysis for autocorrelation process based on feedback adjustment [J]. Control Engineering of China, 2008, 15(3):273-274, 278. (in Chinese)
- [19] 孙秋霞, 高齐圣, 赵建立. 带有质量特性约束的 SPC 与 EPC 集成控制的经济设计 [J]. 工程设计学报, 2009, 16(6):411-414.
Sun Qiuxia, Gao Qisheng, Zhao Jianli. Economic design of integrating SPC with EPC based on quality feature constraints [J]. Journal of Engineering Design, 2009, 16(6):411-414. (in Chinese)

- [20] 崔敬巍, 谢里阳, 刘晓霞. 一种集成 SPC 与 EPC 的过程控制方法[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2007, 28(9): 1317-1320.
Cui Jingwei, Xie Liyang, Liu Xiaoxia. Study on a process control approach integrating SPC with EPC [J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2007, 28(9): 1317-1320. (in Chinese)
- [21] 刘飞, 史荣珍. 统计过程监测中低阶 EPC 控制器分析与设计[J]. 控制工程, 2010, 17(1): 24-27.
Liu Fei, Shi Rongzhen. Analysis and design of low order EPC Controller in statistical process monitoring [J]. Control Engineering of China, 2010, 17(1): 24-27. (in Chinese)
- [22] 史荣珍, 刘飞. 一种面向二阶动态过程的集成控制方法[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(2): 227-229.
Shi Rongzhen, Liu Fei. Integrated process control approach in 2nd-order dynamic processes [J]. Computer Engineering and Applications, 2010, 46(2): 227-229. (in Chinese)
- [23] Box G, Jenkins G M, Reinsel G C. 时间序列分析: 预测与控制[M]. 北京: 中国统计出版社, 1997: 615.
Box G, Jenkins G M, Reinsel G C. Time series analysis: Forecasting and control [M]. Beijing: China Statistical Press, 1997: 615. (in Chinese)
- [24] Tong H, Lim K S. Threshold autoregression, limit cycles and cyclical data [J]. Journal of the Royal Statistical Society. Series B: Methodological, 1980, 42(3): 245-292.
- [25] Fan J Q, Yao Q W. Nonlinear time series: Nonparametric and parametric methods [M]. New York: Springer, 2003: 125-131.
- [26] Van Der Wiel S A, Tucker W T, Faltin F W, Doganaksoy N. Algorithmic statistical process control: Concepts and an application [J]. Technometrics, 1992, 34(3): 286-297.

An Integrated SPC-EPC Study for Checking Assignable Causes Resulting in Trend Based on TAR Model

Zhang Xiaolei, He Zhen, Nie Bin

School of Management, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract: The linear time series models applied in traditional integrated SPC-EPC study sometimes cause error in modeling complex nonlinear autocorrelations and affect the final control result. This study presented a method using a kind of nonlinear time series model, that is the threshold autoregressive model (TAR) to describe the dynamic noise of the system, and built an minimum mean square error (MMSE) controller based on this model and further built an integrated SPC-EPC control system. Aimed at checking assignable causes resulting in trend which is common in continuous manufacturing processes, the control result of this controller and integrated control method was analyzed first by examples and also compared with the result of linear controller. Next the result of this integrated method was verified and analyzed further by simulations. The final results indicate that the integrated SPC-EPC method based on nonlinear time series model can reduce more variation in controlling complex nonlinear systems which have assignable causes resulting in trend than that using controller alone. Simulation study verifies that the integrated control method is effective in controlling different sizes of trend, and also gives the integrated control schemes in different situations.

Keywords: statistical process control; engineering process control; time series; threshold autoregressive model; autocorrelation

Received Date: August 10th, 2011 **Accepted Date:** January 11th, 2012

Funded Project: Supported by the National Natural Science Foundation of China(70931004)

Biography: Zhang Xiaolei, a Hebei Shijiazhuang native(1984 -), is a Ph. D. candidate in the School of Management at Tianjin University. His research interests include quality monitoring and control, etc. E-mail: pudan97@hotmail.com □