

文章编号: 1001-0920(2005)08-0841-07

## 统计过程监测与调整: 评述与展望

张 黎<sup>1,2</sup>

(1. 西北工业大学 管理学院, 西安 710072; 2 郑州航空工业管理学院 工业工程系, 郑州 450015)

**摘 要:** 统计过程控制(SPC)主要用于过程监测, 工程过程控制(EPC)主要用于过程调整. 整合 SPC 与 EPC 的理论和方法已成为近年来的一个研究热点. 为此首先介绍了过程监测和过程调整的基本方法, 然后对统计过程监测和调整的研究内容和方法进行总结和评述, 最后展望了未来的发展方向.

**关键词:** 过程调整; 过程监测; SPC 与 EPC 整合; 减少波动; 质量改进

**中图分类号:** TB114.2      **文献标识码:** A

## Statistical Process Monitoring and Adjustment: A Survey

ZHANG Li<sup>1,2</sup>

(1. School of Management, Northwest Polytechnic University, Xi'an 710072, China; 2 Department of Industrial Engineering, Zhengzhou Institute of Aeronautics Industry Management, Zhengzhou 450015, China E-mail: lizhang89@hotmail.com)

**Abstract:** Statistical process control (SPC) applies control charts to monitor process variations, and engineering process control (EPC) reduces the process variation through adjusting some manufacturing parameters. In recent years, the method to integrate SPC and EPC has roused increasing interests of the researchers and practitioners in order to improve process productivity and product quality. The methods of process monitoring and process adjustment are firstly summarized, followed by the survey of the contents and techniques of integrating theory. Finally, future research issues and relative recommendations are provided.

**Key words:** Process monitoring; Process adjustment; Integration of SPC and EPC; Reduce variation; Quality improvement

### 1 引 言

任何过程都存在波动, 剔除或减少波动是现代企业组织连续质量改进的重点. 近年来, 整合统计过程控制(SPC)与工程过程控制(EPC)两项技术来减少过程波动已成为研究的热点. SPC 起源于零件工业, 主要基于统计原理对过程实施监测, 休哈特(Shewhart)提出的控制图技术仍是当今工业界监测过程的主要工具, 其目的是通过探测和剔除过程的可指出原因, 减少意想不到的过程波动; EPC 起源于过程工业, 主要基于控制理论的反馈调整原理, 使其输出尽可能接近目标值, 减少可以预测的过程波动.

Box 等<sup>[1]</sup>提出了质量控制、预测和优化的内在

联系; MacGregor<sup>[2]</sup>也注意到了过程调整对于改进质量的作用, 但限于计算的复杂性, 并未得到发展. 随着混合(离散和连续交替)性工业过程(如电子工业)的大量涌现, 推动了 SPC 与 EPC 整合应用的需求. Box 等发起的 SPC 与 EPC 整合用于过程监测和调整的讨论<sup>[3]</sup>, 引起了学术界和工业界的广泛关注, 尤其在 SPC 领域. 随后, 有关整合 EPC 与 SPC 进行过程监测和调整的文献在质量控制的期刊中大量出现. 这是因为针对现代制造环境的新特点(小批量生产, 过程的频繁调整, 使用传感器采集数据等), 二者整合具有许多无可比拟的优越性: 1) 现代制造环境的特点导致过程输出数据高度自相关, 违背了传统控制图的两个基本假设: 过程独立和正态分布,

收稿日期: 2004-10-08; 修回日期: 2004-12-27.

基金项目: 国家自然科学基金项目(70125004, 70072029).

作者简介: 张黎(1963—), 女, 河南叶县人, 副教授, 博士生, 从事质量管理、质量工程等研究.

而 EPC 可以过滤数据的自相关性; 2) EPC 在一定程度上避免了过程中因一些无法消除但可预测的内部干扰引起的目标偏离, 减少了过程波动; 3) SPC 对过程进行监测, 以探测过程外在的干扰并加以消除, 从而改进了过程; 4) 二者整合可以降低质量改进的成本

经过十多年的发展, EPC 与 SPC 整合取得了一些理论和实践成果, 并逐渐成为过程监测和调整的一种重要方法和技术手段, 在质量控制理论体系中占据着举足轻重的地位

## 2 过程监测与过程调整

### 2.1 过程监测

SPC 的控制图技术是零件工业监测制造产品质量的主要工具, 构成生产过程的 5M1E 6 个要素是过程波动的主要来源。监测过程的目的就是找出引起过程波动的可指出原因并加以消除, 进而改进质量并保持过程稳态

#### 2.1.1 观测值独立的过程监测

假设过程输出数据相互独立, 在时间  $t$  的观测值  $Y_t$  可表示为

$$Y_t = \mu + \epsilon_t \quad (1)$$

其中:  $\mu$  为过程均值, 是一个常量; 随机变量  $\epsilon_t \sim N(0, \sigma_\epsilon^2)$ ,  $\epsilon_t$  称为白噪声序列, 则  $Y_t \sim N(\mu, \sigma_\epsilon^2)$ 。

控制图监测独立过程的实施方法为(以休哈特均值控制图为例): 随机抽取 20 个容量为  $n$  的样本  $Y_{it}$ , 样本均值  $\bar{Y}_t = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_{it}$ , 控制图统计量  $\bar{Y} = \frac{1}{20} \sum_{t=1}^{20} \bar{Y}_t$ , 则控制图的上、下控制限(UCL, LCL)和中心线(CL)为

$$\begin{aligned} \text{UCL} &= \bar{Y} + 3\sqrt{\frac{\sigma_\epsilon^2}{n}}, \text{CL} = \bar{Y} \\ \text{LCL} &= \bar{Y} - 3\sqrt{\frac{\sigma_\epsilon^2}{n}} \end{aligned} \quad (2)$$

按时间顺序把均值  $\bar{Y}_t$  画在控制图上, 若控制图上所有均值点在控制限之内, 则判断过程处于稳态; 若有一点落入控制限之外, 则判断过程失控。这些点是识别和剔除可指出原因的重要告警点

评价控制图性能的常用指标是平均运行长度(ARL), 即从监控过程开始, 直到第 1 个样本观测点落在控制限之外结束统计, 控制图上样本观测点的平均个数。如果过程受控, 则均值控制图的  $\text{ARL} = 370.4$ 。即当过程稳态时, 在控制图上连续观测 370 个左右的点才可能有一个点出界, 这是一个假警报。对于失控过程, 如当过程均值偏移 0.5 个标准差时, 均值控制图的  $\text{ARL} = 44$ , 平均需要连续观测 44 个点才能发出失控信号, 可见均值图对过程小偏移不够敏感。对于稳态过程, 控制图的 ARL 值越大, 性能

越好; 如果过程已经发生异常, 则拥有较短 ARL 的控制图对监测过程波动较为敏感

为克服休哈特控制图对小偏移不够灵敏的缺陷, Page 等分别开发了累积和(CUSUM)控制图<sup>[4]</sup>和指数加权移动平均(EWMA)控制图<sup>[5]</sup>。CUSUM 图是对过去一段时间的样本观测值求和, 作为控制图的统计量; EWMA 图是对当前观测值赋予较大的权数, 对过去观测值赋予累加值权数, 以当前值到过去值的权数呈指数递减的形式来构造统计量。这两种控制图是休哈特原理的扩展, 其统计量都能通过一定的累加形式, 将微小的偏移量或漂移聚集成一种大的异常信号, 在控制图上反映出来, 它对探测过程小漂移效果显著

对于独立过程, 一般常用的控制图技术有休哈特图、CUSUM 图和 EWMA 图以及三类控制图的联合; 此外, 还有对多变量开发的  $T^2$  控制图<sup>[6]</sup>。

#### 2.1.2 观测值自相关的过程监测

对于自相关过程, 式(1)的平均值不再是一个常量, 因此将式(1)修改为

$$Y_t = \mu_t + \epsilon_t, \quad (3)$$

其中  $\mu_t$  可用自回归和移动平均(ARMA)时间序列来描述。式(1)是式(3)的特殊情况

对于自相关过程, 若直接用传统控制图监测过程, 由于低估了过程波动, 将使控制界限比预期的狭窄, 导致过高的报警率, 因此必须修正或开发新的监测技术。在所有开发的用于自相关过程监测的控制图技术中, 广泛讨论的控制图有两种: 1) 调整控制图的控制限, 它是根据过程的相关性, 调整控制图的控制上下界限来达到监控过程的目的。这种方法简单易行, 但若调整不合适则易造成控制图的探测能力下降。2) 残差控制图, 即通过拟合自相关过程的时间序列模型计算过程变量的残差, 用残差构建控制图的统计量。这种方法对探测过程大的偏移效果显著, 但涉及到自相关的过滤技术(自相关过程参数可以精确估计)。

文献[7]把这两种控制图推广到更一般的情形, 提出一种新的控制图——自回归移动平均图(ARMA图), 用于监测自相关过程。这种控制图对于探测过程均值变化的效果较上述图为佳

### 2.2 过程调整

工程过程控制(EPC)的概念由 Box 和 Kramer<sup>[3]</sup>提出, 它是在连续生产线上利用反馈、前馈以及二者结合原理的调整过程, 因此命名为工程过程控制; 在自动控制领域也称为自动过程控制(APC)<sup>[8]</sup>。EPC 通常假设过程输入与输出具有函数关系, 利用定期调整操纵变量的方式, 对过程内部自

然的无法人为消除的干扰(温度、环境、材料变异等)所造成的输出偏移量进行补偿,使输出值回归目标值,以降低过程波动

调整过程可以简单说明如下:为使过程输出尽可能接近目标值,必须假定存在一个输入调整变量  $X_t$ ,使得在时间  $t$  点的变化  $x_t = X_t - X_{t-1}$  能够补偿输出值与目标值的偏差 于是式(3)应修改为

$$Y_t = X_{t-1} + \mu_t + \epsilon \tag{4}$$

其中:  $Y_t$  为在时间  $t$  经 EPC 补偿后的过程输出值;  $X_{t-1}$  是为补偿第  $t-1$  个观测值与目标值的误差  $e_{t-1} = Y_{t-1} - T$ ,在下一时间  $t$  对过程所采取的调整和控制,称为调整方程或控制器

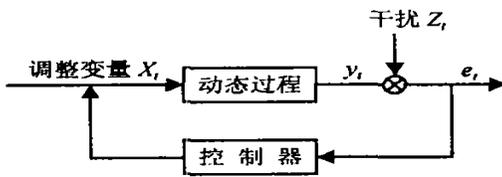


图 1 反馈控制原理

控制器的一个开发原则是使过程输出的均方误差达到最小 文献[1]开发了最小均方误差(MMSE)反馈控制方案,如图1所示 调整后的输出误差为  $e_t = y_t + Z_t$ ,其中

$$y_t = r(B)X_t = \frac{L_2(B)}{L_1(B)}B^{d+1}X_t \tag{5}$$

为动态转移函数模型;干扰  $Z_t$  为 ARMA 模型,即

$$Z_t = \frac{\theta(B)}{\phi(B)}a_t = \left(1 + \sum_{j=1}^p \psi_j B^j\right)a_t; \tag{6}$$

式中  $a_t$  为白噪声;MMSE 控制器为

$$X_t = -\frac{L_1(B)L_3(B)}{L_2(B)L_4(B)}e_t \tag{7}$$

式中:  $L_3 = \sum_{j=1}^d \psi_{d+j} B^{j-1}$ ,  $L_4 = 1 + \sum_{j=1}^d \psi_j B^j$ ,  $B$  为后移算子  $BX_t = X_{t-1}$ ,  $d$  为延迟时间

还有一类比例-积分-微分(PID)控制器,在过程工业反馈控制装置中普遍使用 其离散形式为

$$X_t = -k_p e_t - k_D(e_t - e_{t-1}) - k_I \sum_{i=1}^t e_i \tag{8}$$

其中  $k_p, k_I, k_D$  是适当的常数,通常仅用模型中的一项或两项来控制 若  $k_p = k_D = 0, k_I \neq 0$ ,则得到积分(I)控制器(也称为 EWMA 控制器);若  $k_p, k_I \neq 0, k_D = 0$ ,则得到比例-积分(PID)控制器 因此,所谓三项式反馈控制器的形式,即为过程输出误差  $e_t$  本身的比例项、积分项和微分项的线性组合,利用此线性组合作为反馈控制器来控制过程变异

EPC 最初是应用于连续过程工业的一种控制方法,它对自相关过程能提供更好的预测,并通过控

制变量  $X$  的调整保证过程输出尽可能接近目标值,因此被引入并广泛用于零件工业,以解决自相关过程的质量控制问题

### 3 过程监测和调整研究的进展

统计过程监测和调整理论来源于 SPC 与 EPC 的整合,而 SPC 和 EPC 则分属于两种不同的工业过程,由质量工程师和过程工程师分别独立开发,形成了各自较为完善的理论和方法 然而,由于质量人员缺乏过程动态和连续控制的知识,工程人员缺乏统计的知识,阻碍了二者之间的交流 传统的零件制造系统大部分时间处于稳定状态,SPC 假定过程输出数据相互独立且服从正态分布 质量人员始终遵循戴明的漏斗实验<sup>[9,10]</sup>:在过程稳态下作出调整会增加过程波动,因此应避免调整过程

在现代自动化制造环境下,样本间隔时间短,样本容量相对较小,过程输出数据表现为自相关,过程均值随时间变化,独立性假定被违背,由此大大降低了控制图的监测效率 针对戴明的漏斗实验,MacGregor<sup>[11]</sup>进一步提出:对于随时间波动的过程均值提供调整可以减少过程波动 然而究竟何时需要调整过程?调整到何种程度?对于质量人员来说就成为一种挑战

Box 和 Kramer<sup>[3]</sup>对此展开讨论,将此问题延伸至 SPC 与 EPC 整合的理论框架下 目前,其理论的发展大致分为整合概念模型的建立、比较和验证,基于不同过程干扰模型的调整方案,监测方法的构建、完善和扩展;其研究模式主要有应用案例分析、仿真验证、理论模型的设计和改进三种 前两种研究模式属于实证研究的范畴,后一种研究模式属于理论研究的范畴 代表性文献有 1992 年的系列讨论<sup>[3,12,13]</sup>,以及文献[8,11,14~19];近几年的主要文献有[20~27]

#### 3.1 EPC 与 SPC 整合的基本概念框架

许多文献对 SPC 和 EPC 的优缺点进行比较,然后构建整合的概念模型并讨论整合的优势,由此说明二者整合可为制造业提供更好的质量控制和过程改进的方法,如表 1 所示

Box 和 Kramer<sup>[3]</sup>给出了两个领域的整体比较 作者认为 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 文献[16,17]提出了算法 SPC(A-SPC),以减少可预测的波动,并使用前馈和反馈控制器,探测和消除可指出原因的干扰 Hoerl 等<sup>[12]</sup>从理论和实际应用两方面的比较,论述了今后在改进控制系统中,主要取决于如

表1 SPC与EPC的比较

方法	起源	原理	目的	过程	功能	工具	成本	优势	缺陷
SPC	零件工业-统计学家开发	假设检验	减少波动	独立	过程监测	控制图	高	探测可指出原因	不能消除所有可指出原因
EPC	过程工业-过程工程师开发	估计	最小化波动	自相关	过程调整	反馈/前馈调整	低	直接补偿	掩盖过程改进信息

何有效地整合 SPC 与 EPC. MacGregor<sup>[11, 13]</sup> 建议采用 EPC 方法来消除过程数据所表现的高度自相关, 并建议在使用 EPC 时加入 SPC, 这样更能达到相互补充的控制效果

事实上, 在许多实际工业过程中, 仅用 SPC 监测过程并不是充分有效的, 真实的过程大多会产生过程均值的漂移. 其原因主要是原材料来自不同的供应商、不同的操作者以及小批量过程等. A Iwan 和 Roberts 研究了 235 个应用控制图, 发现 85% 的控制限不正确, 其中有一半以上违背了独立性假定<sup>[28, 29]</sup>. 因此, 在当今现代制造环境下对过程的调整是必要的. 另一方面, 虽然合适的调整可以减少过程均值的偏移, 但过程仍会出现一些不可预料的波动而引起过程偏离目标. 因此, 探测和识别引起不可预料的波动的根本原因仍是重要的, 这有助于工程人员更好地理解过程波动, 并建立长期的过程改进目标. 可以说控制就是监测与调整的组合艺术.

Montgomery 提出了 SPC 与 EPC 整合的基本概念框架<sup>[13]</sup> (图 2). 设  $t$  时刻的过程输出为  $Y_t$ , 依此预测  $t+1$  时刻的输出  $Y_{t+1}$ , 开发调整方程  $X_t$ , 使输出  $Y_{t+1} = T$ . 利用 SPC 观察  $Y_t - T$  是否超出控制界限, 若未超出则继续; 若已超出则寻找并剔除可指出的原因, 重新修正调整方案.

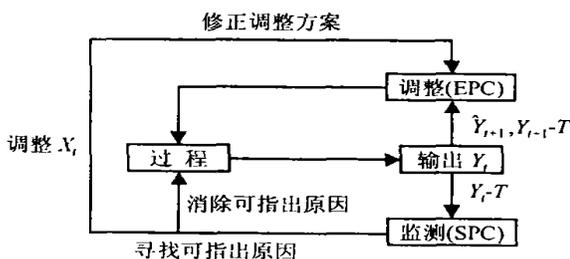


图2 SPC与EPC整合模型

SPC 主要用控制图发现并剔除可指出原因减少波动; EPC 主要用反馈控制对一些无法消除的可指出原因进行补偿, 使输出保持在目标值上. SPC 可以改进过程性能, 但却无法维持过程的稳定性, 尤其是过程存在工具磨损或趋势性干扰的情况; 相对而言, EPC 则能维持过程性能, 降低过程变异, 但却无法消除可指出原因. 若能将二者有效地整合, 则可达到互补的作用. 如何有效地整合这两种方法, 便引发了针对不同的制造环境构建理论模型, 并给出统计监

测和调整的具体算法

### 3.2 监测与调整方案的构建、完善和扩展

制造环境千变万化, 需要针对不同的过程模式和干扰类型, 不断探索过程监测和调整方案. 在 EPC 的调整下, 不同的过程和干扰模式会影响控制图的监测效果, 因此过程监测和调整方案一般分为两个研究方向: 一是设计推导更适合补偿的 EPC 调整控制器; 二是发展和完善更具监测效果的控制图.

许多学者讨论了 EPC 调整控制器的设计和检验, 文献[1, 2, 14, 16, 17] 相继开发了 MMSE 控制器. 这些 MMSE 控制器以及 I 和 PI 控制器又被其他研究者直接应用, 分析比较各种控制器的效果. 结果显示对于过程偏移, PI 控制器的效果更好; 对于过程趋势和漂移, I 控制器的效果更好<sup>[21]</sup>. 在实践中, 要获得完全的过程知识是非常困难的, 当过程模型被错误识别和估计时, 控制器的效应就变得特别重要. 对于过程的错误识别, PI 比 MMSE 更稳健<sup>[30]</sup>. 例如, 若将求和移动平均 MA(1, 1) 模型错误地识别为 ARMA(1, 1), MMSE 控制后常常导致非稳态的输出过程, 而 PI 控制器则可有效地减少过程偏移.

在 EPC 补偿控制器的调整下, 过程表现的自相关性不同于一般的自相关性, 而呈现出一些新的特点<sup>[16, 17]</sup>, 如增加了复杂性, 输入与输出相关等. 另外, 一旦过程存在的可指出原因消除, 由于输出对输入响应的延迟, EPC 的反馈补偿会影响控制图对失控的正确探测<sup>[31]</sup>, 容易产生由过量调整而出现假警报. 因此, 控制图的监测效果会受控制器参数的影响, SPC 控制图也由最初仅用于监测过程输出的质量特性, 进而发展为监测可控的调整变量, 并且同时监测两种状态: 一是证明调整规则是否适当; 二是识别过程的可指出原因<sup>[11, 32, 33]</sup>. 文献[32]提出了联合监测两种状态的策略, 结果发现在一些情况下监测控制变量更有效, 而另一些情况下却并非如此. 因此需要针对不同的情况选择监测对象.

在 EPC 补偿控制器的调整下, 监测过程的控制图除了休哈特图、CUSUM 图、EWMA 图及其组合以外, 还发展出累积分数和(CUSCORE)控制图等. 文献[20]使用 CUSCORE 控制图作为整合的监测方案, 以降低 EPC 控制对控制图监测效果的影响.

在控制图监测效果的评价方面,除了使用 ARL 外,文献[7, 21]还发展和使用信噪比来预测和评价控制图的性能。一些文献针对具体的制造环境设计有效的过程监测和调整方案,使其更贴近实际情况。例如,文献[34]研究了短期制造过程的监测和调整方法。近年来的文献主要针对多变量、多输入多输出等情况研究监测和调整方案,主要文献如表 2 所示。

表 2 统计过程监测与调整整合方案

文献	SPC	EPC
[21]	休哈特控制图	MMSE/PI 控制器
[20, 27]	CU SUM /CU SCORE 控制图	MMSE/PI 控制器
[32]	双变量控制图	PD 控制器
[26, 35]	T <sup>2</sup> 控制图	ARMA + PD / MMSE 控制器
[36]	PCA 控制图	PD 控制器

### 3.3 SPC 与 EPC 的整合应用及案例研究

SPC 与 EPC 整合在半导体工业得到普遍的应用。文献[19]将 SPC 与反馈控制相结合而发展出 R2R (run to run) 控制系统。它是指由于对每批产品质量要求不同,需要在批与批之间进行调整控制;在每一批内,通过反馈控制系统不断地更新信息,改善过程,以形成在线最优化 R2R 控制系统。一般以 EWMA 控制器为反馈控制器,对过程进行有效的控制,如双重 EWMA 控制器(dEWMA)<sup>[37]</sup>、自我调整控制器<sup>[38]</sup>、三重 EWMA 控制器(TriEWMA)<sup>[39]</sup>等。文献[18]从统计和过程控制的观点评述了 R2R 控制的两个主要步骤:过程模型的建立和在线调整控制器;监测方案的设计。以前的研究更多关注单输入单输出(SISO)过程,近年的研究则转向多输入多输出(MMO)以及动态的 EWMA 设计<sup>[38, 39]</sup>。

一些文献通过案例研究的模式增强了整合理论的实用性,同时也发展了 SPC 与 EPC 整合的理论。文献[15]应用休哈特图或 EWMA 图作为 SPC 的监测工具,比较了二者整合前后的监测效果,利用一个带有约束的积分控制器以避免过度的调整。文献[11]指出制造过程普遍存在着转换期,如过程的突变、原材料的等级变化等,并开发了调整 and 监测的仿真模型来解释过程转换问题。文献[20]针对制造过程的实际背景,建立了致力于质量改进的实验设计(DOE)和监测与调整集成的框架。许多文献利用仿真的研究模式,检验过程理论模型参数变化下整合的有效性。这两种研究模式提供了对理论模型研究的支持,进一步奠定了研究的基础。

### 4 统计过程监测与调整研究展望

EPC 与 SPC 整合的理论自提出之后,就针对各种过程干扰情况对整合理论不断地进行发展、完善

和修正,使之产生适应各种动态过程的监测和调整方案。仿真的研究模式验证了部分理论模型;案例分析模式不仅证明了方案的可行性,而且进一步促进了理论的发展。然而,整合理论的实际应用却一直未能得到很好的关注。虽然在半导体制造过程的应用取得了不少有效的实践成果,但离散反馈控制与 SPC 整合应用的潜在效益远远超出这些。许多研究者和实践者已经开始关注整合理论下一步的发展方向,如 G Ütekin 等<sup>[22]</sup>建议加强对二者整合的支持理论的研究。本文认为,整合理论的研究应重点关注以下几方面的问题。

#### 4.1 与其他理论的集成

20 世纪,统计过程监测和调整的理论和技術对工业的高速发展起到了重要作用;反过来,制造环境的变化和工业应用也为其理论和方法的研究提供了大量实例,例如变点探测、时间序列分析、试验设计等。Woodall<sup>[40]</sup>建议应关注波动在整个过程中的转换,因此今后统计过程监测和调整的范围需要加以扩展,把对整个制造过程波动的转换包括进来。这需要更复杂的过程模型以及和所研究过程的更多工程知识的结合,也需要将质量控制领域的质量改进方法集成在一个框架下。关于这方面文献参见[20, 24]。另外,类神经网络及其集成以预测过程干扰和探测过程可指出原因也是需要进一步研究的方向,这方面文献参见[27, 35]。

本文认为,为达到与其他理论集成的目的,未来的研究重点之一应开展对 SPC 与 EPC 整合后所衍生的问题及其关系的研究。例如,过程干扰类型的快速识别,可指出原因的寻找;面向问题设计各种理论的集成模型,理解和描述过程波动及其波动转换等。

#### 4.2 复杂过程的统计过程监测与调整

随着科技的高速发展,制造环境也在迅速变化,传统上分别独立考虑的情形,如多变量、MMO、动态过程、自相关以及频繁的过程转换等,现在要组合在一起设计 SPC 与 EPC 的整合方法,这需要利用许多输入变量或输出响应的信息。追求制造过程的快速、高效和柔性化,需要在更宽泛的范围设计整合 SPC 与 EPC 的智能模型。对于过程数据所表现的高度自相关性,传统的 ARMA 模式已无法精准地拟合这类数据,可考虑应用自回归异方差(ARCH)模式,面对多变化的动态过程设计新的监测技术。

监测的主要目的是识别波动的根本原因,以便更好地理解波动的性质。正确地探测、识别和分离波动的根本原因,将成为监测方法研究的重点。考虑到监测和调整成本,需要研究 SPC 和 EPC 监测和调整方案的经济设计,并且评价其经济特性,以发展出

更具效率的监控方案

### 4.3 统计过程监测与调整的应用

作为一种来自于现实过程控制的理论,其实际应用成为研究者和实践者关注的问题。然而,正如 Crowder 所言<sup>[40]</sup>:统计应用领域很少有比在 SPC 中看到的那样,理论方法的开发和实际应用之间存在着更宽的鸿沟。SPC 与 EPC 整合的理论和方法提出十多年来,人们更多关注的是理论模型本身的完善,而对应用案例效果报道却很少。

本文认为,解决该问题的最好方法就是理论工作者与实际工作者更好地进行合作研究,包括研究题目的选择,项目的实施和对实践者的技术培训。理论研究要根据实际问题的需要,与现实中不同背景的过程监控问题联系起来,充分挖掘二者整合理论在实际应用中的潜力,扩大理论的应用范围,并针对各领域的不同应用特点提出合适的改进方法。

上述问题的深入研究必将大大促进统计过程监测和调整理论及其应用的发展。

## 5 结 语

SPC 与 EPC 整合属于过程控制领域的前沿性研究,它把处于两种工业领域的边缘问题——过程控制和质量控制联系在一起。当前所面临的挑战是需要开发新的整合工具,以便作出正确的决策。本文对十多年来 SPC 与 EPC 整合理论和方法的发展作了简要回顾,在此基础上提出了需要进一步研究的问题,希望能对关注此领域研究的人们有所裨益。

我国一些学者对 SPC 理论和方法的研究比较深入,并在企业进行了大量的实践。值得注意的是,SPC 与 EPC 整合理论和方法的文献在国内期刊中寥寥无几,理论界对二者整合还缺乏广泛和深入的研究,企业界还没有充分认识到二者整合的重要作用和潜力。为进一步在国内推动二者整合的理论研究和实践,应大力介绍和引入国外二者整合的研究成果,并应用于我国企业的实践。

### 参考文献(References)

- [1] Box G E P, Jenkins G M, Reinsel G C. *Time Series Analysis, Forecasting and Control* [M]. 3rd ed. London: Prentice-Hall, 1994.
- [2] MacGregor J F. On-line Statistical Process Control [J]. *Chemical Engineering Progress*, 1988, 84(10): 21-31.
- [3] Box G E P, Kramer T. Statistical Process Monitoring and Feedback Adjustment — A Discussion [J]. *Technometrics*, 1992, 34(3): 251-267.
- [4] Page E S. Cumulative Sum Charts [J]. *Technometrics*, 1961, 3(1): 1-9.
- [5] Roberts S W. Control Chart Tests Based on Geometric Moving Averages [J]. *Technometrics*, 1959, 1(3): 239-250.
- [6] Lowry C A, Montgomery D C. A Review of Multivariate Control Charts [J]. *IIE Trans*, 1995, 27(10): 800-810.
- [7] Jiang W, Tsui K L, Woodall W H. A New SPC Monitoring Method: The ARMA Chart [J]. *Technometrics*, 2000, 42(4): 399-410.
- [8] Box G E, Alberto L. Discrete Proportional-integral Adjustment and Statistical Process Control [J]. *J of Quality Technology*, 1997, 29(3): 248-260.
- [9] Deming W E. *Out of the Crisis* [M]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1986.
- [10] Nemhard H B, Mastrangelo C M. Controlling Change: Process Monitoring and Adjustment during Transition Periods [J]. *Quality Engineering*, 2001, 14(2): 223-244.
- [11] MacGregor J F. A Different View of the Funnel Experiment [J]. *J of Quality Technology*, 1990, 22(4): 255-259.
- [12] Hoerl R W, Palm A C. Integrating SPC and APC [J]. *Technometrics*, 1992, 34(3): 268-272.
- [13] Macgregor J F. Discussion of Statistical Process Monitoring and Feedback Adjustment—discussion [J]. *Technometrics*, 1992, 34(3): 273-275.
- [14] Montgomery D C, Keats J B, Runger G, et al. Integrating Statistical Process Control and Engineering Process Control [J]. *J of Quality Technology*, 1994, 26(2): 79-87.
- [15] Janakiram M, Keats J B. Combining SPC and EPC in a Hybrid Industry [J]. *J of Quality Technology*, 1998, 30(3): 189-200.
- [16] Wiel S, Tucker W, Faltin F, et al. Algorithmic Statistical Process Control: Concepts and Application [J]. *Technometrics*, 1992, 34(3): 286-297.
- [17] Faltin F W, Tucker W T, Vander W S. Algorithmic Statistical Process Control: Some Practical Observations [J]. *Int Statistical Review*, 1993, 61(1): 67-80.
- [18] Del Castillo E, Hurwitz A. Run-to-Run Process Control: Literature Review and Extensions [J]. *J of Quality Technology*, 1997, 29(2): 184-196.
- [19] Ingolfsson A, Sachs E. Run by Run Process Control: Combining SPC and Feedback Control [J]. *IEEE Trans on Semiconductor Manufacturing*, 1995, 8(1): 26-43.
- [20] Nemhard H B, Rene V V. A Framework for Integrating Experiment Design and Statistical Control for Quality Improvement in Manufacturing [J]. *J of Quality Technology*, 2003, 35(4): 406-423.
- [21] Jiang W, Tsui K L. SPC Monitoring of MMSE- and PI-Controlled Processes [J]. *J of Quality Technology*, 2002, 34(4): 384-398.

- [22] G Ütekin M, Elsayed E A, English J R, et al Monitoring Automatically Controlled Processes Using Statistical Control Charts [J]. *Int J of Production Research*, 2002, 40(10): 2303-2320
- [23] Wei J. A Joint Monitoring Scheme for Automatically Controlled Processes [J]. *IIE Trans*, 2004, 36(12): 1201-1210
- [24] Duffuaa S O, Khursheed S N, Noman S M. Integrating Statistical Process Control, Engineering Process Control and Taguchi's Quality Engineering [J]. *Int J of Production Research*, 2004, 42(19): 4109-4118
- [25] Tsung Fugee, Tsui Kwok-leung. A Mean-shift Pattern Study on Integration of SPC and APC for Process Monitoring [J]. *IIE Trans*, 2003, 35(3): 231-242
- [26] Tsung Fugee, Apley Daniel W. The Dynamic  $T^2$  Chart for Monitoring Feedback-controlled Processes [J]. *IIE Trans*, 2002, 34(12): 1043-1053
- [27] Chiu C C, Shao Y J, Lee T S. Identification of Process Disturbance Using SPC/EPC and Neural Networks [J]. *J of Intelligent Manufacturing*, 2003, 14(3): 379-388
- [28] Awan L C, Roberts H V. The Problem of Misplaced Control Limits [J]. *J of the Royal Statistical Society, Series C*, 1995, 44(3): 269-306
- [29] Wieringa J E. *Statistical Process Control for Serially Correlated Data* [D]. 1999.
- [30] Tsung F, Wu H, Nair V N. On the Efficiency and Robustness of Discrete Proportional-integral Control Schemes [J]. *Technometrics*, 1998, 40(3): 214-222
- [31] Huang C H, Liu Y N. Decision Rule of Assignable Causes Removal under an SPC-EPC Integration System [J]. *Int J of Systems Science*, 2002, 33(10): 855-867.
- [32] Tsung F, Shi J, Wu C F. Joint Monitoring of PID-controller Processes [J]. *J of Quality Technology*, 1999, 31(3): 275-285
- [33] Del Castillo E. *Statistical Process Adjustment for Quality Control* [M]. New York: John Wiley and Sons Inc, 2002
- [34] Rong Pan. *Statistical Process Adjustment Methods for Quality Control in Short-run Manufacturing* [D]. 2002
- [35] Shi D, Tsung F. Modeling and Diagnosis of Feedback-controlled Processes Using Dynamic PCA and Neural Networks [J]. *Int J of Production Research*, 2003, 41(1): 365-380
- [36] Tsung F. Statistical Monitoring and Diagnosis of Automatic Controlled Processes Using Dynamic PCA [J]. *Int J of Production Research*, 2000, 38(3): 625-637.
- [37] Butler S W, Stepani J A. Supervisory Run-to-Run Control of Polysilicon Gate Etch Using in Situ Ellipsometry [J]. *IEEE Trans on Semiconductor Manufacturing*, 1994, 7(1): 193-201.
- [38] Jen C H, Jiang B C, Fan S K. General Run-to-Run (R2R) Control Framework Using Self-tuning Control for Multiple-input Multiple-output (MIMO) Processes [J]. *Int J of Production Research*, 2004, 42(20): 4249-4270
- [39] Fan S K, Bernard C J, Jen C H, et al. SISO Run-to-Run Feedback Controller Using Triple EWMA Smoothing for Semiconductor Manufacturing Processes [J]. *Int J of Production Research*, 2002, 40(13): 3093-3120
- [40] William H W. Controversies and Contradictions in Statistical Process Control [J]. *J of Quality Technology*, 2000, 32(4): 341-350

## 下 期 要 目

- 迭代学习控制综述 ..... 李仁俊, 韩正之
- 基于观测器的滑模控制非线性中立型时滞系统 ..... 吴立刚, 等
- 随机噪声框架下非伪频率响应的计算方法 ..... 朱 凌
- 不确定网络控制系统具有  $H_\infty$  性能界的鲁棒控制 ..... 黄 剑, 等
- 基于物元的流程报警系统重构算法及应用 ..... 顾祥柏, 朱群雄
- 双基阵纯方位目标的可观测性研究及跟踪性能改进 ..... 徐本连, 王执铨
- 基于遗传算法的混合降阶  $H_2/H_\infty$  控制器 ..... 潘 伟, 井元伟
- 参数不确定马尔可夫跳变系统的鲁棒适应控制 ..... 张利军, 李春文
- 基于危险理论的免疫识别新算法 ..... 于 瀛, 侯朝楨