

• 研究报告 •

指数加权移动平均控制图在实验室中的应用及与其他质控图比较

刘 浩

(中国人民大学环境学院, 北京 100872)

摘 要: 阐述了指数加权移动平均 (EWMA) 控制图在环境分析实验室中的应用, 并与休哈特控制图和 Westgard 多规则对于不同偏移量的 ARL 值作了比较。结果表明, EWMA 控制图在检验不准确度, 尤其在微小偏移上的优势值得推广。

关键词: 指数加权移动平均控制图; 休哈特控制图; Westgard 多规则; 比较

中图分类号: X830.5 文献标识码: A 文章编号: 1006-2009(2006)01-0012-04

Application of Exponentially Weighted Moving Average Chart in Environmental Analysis Laboratory and Comparison with Other Control Charts

LIU Hao

(School of Environment and Natural Resources of Renmin University of China, Beijing 100872 China)

Abstract The application of a quality control chart based on exponentially weighted moving average (EWMA) in environmental analytical laboratory is primarily studied. The ARL value computed from this method was compared with other methods as Shewhart- \bar{x} chart and Westgard algorithm. The EWMA was a good alternative to other charts for detecting inaccuracy, especially in small shifts.

Key words Exponentially weighted moving average (EWMA) chart; Shewhart chart; Westgard algorithm; Comparison

分析实验室质量控制直接影响测试结果的准确性和可靠性, 为了把分析误差控制在允许范围内, 通常用质量控制图技术保证实验室分析质量。

指数加权移动平均 (EWMA) 控制图由 Roberts^[1] 在 1959 年首次提出, 该图不同于休哈特 (Shewhart) 控制图只考虑当前数据的统计检验, EWMA 图将历史数据也考虑进来。

EWMA 控制图有两种表达方式, EWMA 统计量 Z_t ($t = 1, 2, \dots$) 为: $Z_t = \omega \bar{x}_t + (1 - \omega) Z_{t-1}$, 式中 ω 为权重因子, 且 $0 \leq \omega \leq 1$ 。因为使用的是均值: $\bar{x}_t = (x_{1t} + x_{2t} + \dots + x_{nt}) / n_t$, 所以这种控制图又叫 EWMA- \bar{x} 图; 另 1 种表达式为: $Z_t = \omega \sum_{i=0}^{t-1} (1 - \omega)^i \bar{x}_{t-i} + (1 - \omega)^t Z_0$ 其中的初始值 Z_0 通常设为历史测量的平均值。在此表达式中, 移动过程意味着历史数据对统计量的贡献, 是随时间推移或新测量值引入而呈指数形式递减的, 递减速度由权重因子决定。

EWMA 控制图的警告线和控制线与 Shewhart 控制图不同, 需要单独计算。EWMA 控制图与累积和 (Cusum) 控制图也有区别, EWMA 控制图引进了能够调节偏移 (shift) 灵敏性的权重因子。

指数移动技术是基于 Cambrowski 等^[2] 提出的监控趋势变化的 Trigg's 方法, 早在 1975 年就被用于临床医学, 在临床检验的质量控制中发挥了巨大作用。现在, 随着环境监测实验室质量控制与质量保证要求的不断提高, 以及计算机系统在环境监测实验室中的广泛应用, 指数移动技术也已得到重视。

1 EWMA 控制图

为简化 EWMA 控制图的使用, Crowder^[3] 于

收稿日期: 2005-04-18 修订日期: 2005-10-11

作者简介: 刘浩 (1979-), 男, 湖北武汉人, 硕士研究生, 从事分析过程质量控制研究。

1989 年通过计算机模拟, 提出了实施 EWMA 控制图的 4 个步骤:

(1) 根据现有控制图, 如 Shewhart 控制图选择稳态时可接受的平均链长 (ARL)。

(2) 确定所需的偏移灵敏度, 并根据偏移量 (d) 求出最优权重因子 (ω), 见图 1。

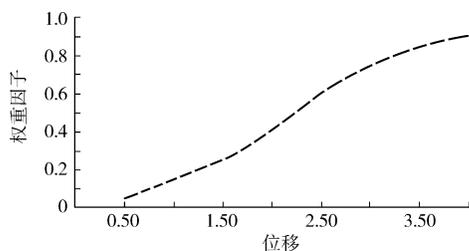


图 1 EWMA 控制图中不同偏移量所对应的最优权重因子

(3) 根据权重因子和稳态平均链长确定 EWMA 控制图的控制限参数 (q), 见图 2。

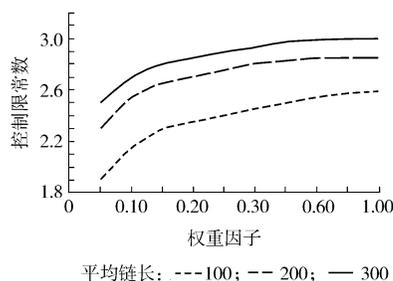


图 2 权重因子和稳态平均链长对应的 EWMA 控制限常数图

(4) 分析灵敏性以获得最优总效能, 此步骤需计算机模拟程序完成。

在步骤 2 中, 临界偏移量由实验室能力和允许总误差共同决定。Koch 等人^[4]的方法规定临界偏移量由以下公式求出:

$$d_c = [(e_{\text{total}} - b_{\text{method}}) / \text{SD}] - 1.65$$

式中: e_{total} ——总误差;

b_{method} ——方法误差。

所得到的临界误差值可直接用于从图 1 求权重因子。

EWMA 控制图与其他常规分析实验室质控方法的主要区别就是用链长 (RL) 代替误发警报概率 (α) 和漏发警报概率 (β), 为消除质控数据潜在的随机分布影响, EWMA 控制图采用 ARL 表示。对于

Shewhart 控制图, $ARL_{\text{Shewhart}} = 1/\alpha_{\text{Shewhart}}$ 。例如: 在正态分布的质控过程中, 控制限为 2 倍标准偏差 (SD) 的 ARL 是 22, 为 3SD 的 ARL 是 37。用 ARL 代替 α 和 β 能使控制限的设定变得简单。如果实验室 1 d 分析 30 个样品, 每 10 个样品加 1 个质控样, 则 1 d 就平均得到 3 个质控值, 此时若选择 2SD 控制限, 将每 7~8 d 发生 1 次错报, 若选择 3SD 控制限, 则每 4~5 个月发生 1 次错报。另外, 使用 ARL 不需要正态分布表, 且对于每张质控图, ARL 也是一个综合变量, 通过模拟很容易求得。在解释 ARL 的值时, 对于稳态过程, ARL 应适当的选高一些, 在准确度或精密度比较低的情况下, ARL 应尽可能的低。

2 实验

2.1 主要仪器和试剂

CP-3800 型气相色谱仪 (Varian 公司), 微池电子捕获检测器 (μECD), CP-8400 自动进样器, $\text{R}\&\text{W}$ DB5 柱 ($0.32 \text{ mm} \times 30 \text{ m}$, $0.25 \mu\text{m}$, Agilent 公司), Star chem station 工作站 (Ver 6.0 英文版); 正己烷 (J.T. Baker 公司, 农残级), PCB-198 单标 (C.L. 公司, 99%) 0.5 mg 7 种指示性 PCB 混标 (Wellington 公司, 每种 $10 \mu\text{g}/\text{mL}$) 1.2 mL 。将 0.5 mg 的 PCB-198 单标加正己烷溶解, 并定容至 100 mL 作为内标储备液, 然后取出 $600 \mu\text{L}$, 再从 PCB 混标中取出 $300 \mu\text{L}$, 用正己烷定容至 10 mL 作为质控储备液, 浓度与线性曲线的中点相近。

2.2 设计 EWMA 控制图

PCB-28 测量值的 Shewhart 控制图见图 3。

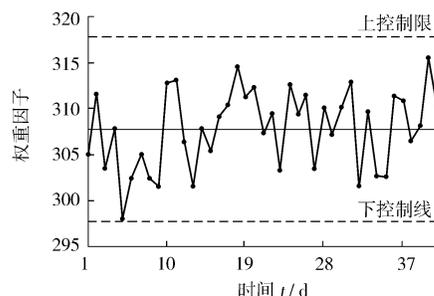


图 3 PCB-28 测量值的 Shewhart 控制图

(1) 图 3 为用质控样品 (以 PCB-28 为例) 的实验数据 (内标法求浓度) 作的 Shewhart 控制图, 控制限是 3SD, 且 $\text{SD} = 3.33$, $n = 1$, 均值为 $308 \mu\text{g}/\text{L}$, 为了与 Shewhart 控制图相比具有可比性, EWMA 控制图

的 ARL 设为 370 质控样品的 EWMA 控制图见图 4

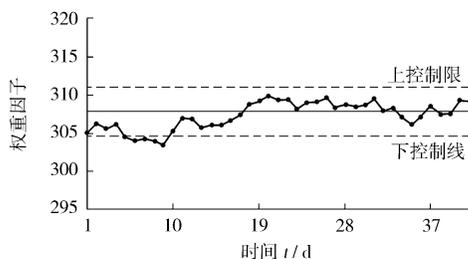


图 4 权重因子为 0.2 的 EWMA 控制图

(2) 允许总误差为 3SD, 方法误差为 0 临界偏移量为 1.35 从图 1 求得权重因子为 0.2

(3) 由 $\omega = 0.2$ 和 $ARL = 370$ 从图 2 求得控制限参数为 2.86。对于每批 1 个质控样品, 即 $n = 1$ 的过程, 上控制限 (UCL) 和下控制限 (LCL) 可通过以下公式求出:

$$UCL = \mu_0 + q\sigma_0 \sqrt{\omega / (2 - \omega)} n = \mu_0 + 0.95\sigma_0$$

$$LCL = \mu_0 - q\sigma_0 \sqrt{\omega / (2 - \omega)} n = \mu_0 - 0.95\sigma_0$$

式中 μ_0 为过程的预测平均值, σ_0 为稳态时的 SD。

(4) 灵敏性分析。

2.3 EWMA 控制图的方法趋势分析

为研究 EWMA 控制图方法趋势, 图 5 图 6 和图 7 给出了区别图 4 不同权重因子 (决定不同的趋势灵敏度) 的 EWMA 控制图, EWMA 控制图的控制限是由上述 4 个步骤推算出来的。

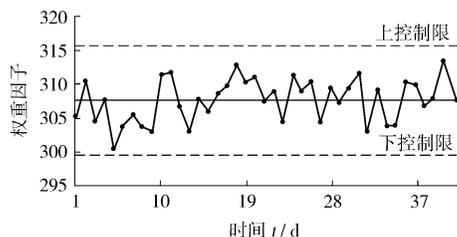


图 5 权重因子为 0.8 的 EWMA 质控图

在图 4~图 7 的 EWMA 控制图中, 显示的趋势特征在图 3 的 Shewhart 控制图上并不明显, ω 越接近 1, EWMA 控制图的趋势越接近 Shewhart 控制图。图 7 显示, 前 19 d 质控观测值很低, 主要受第 5~9 d 的数据影响, 在整个观测过程中, 质控观测值的表现是缓慢回升到所要求的间距内。值得注意的是, 在平滑过程中, 数据和控制限的间距随平滑程度的增

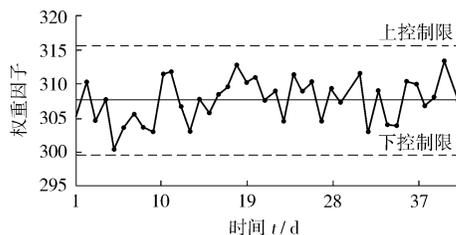


图 6 权重因子为 0.5 的 EWMA 质控图

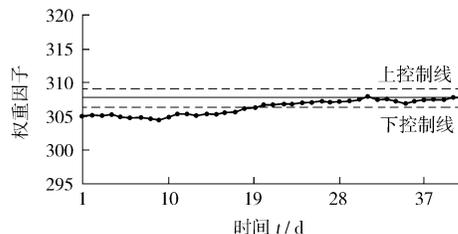


图 7 权重因子为 0.05 的 EWMA 质控图

加 (ω 减小) 而减小。

为揭示 EWMA 控制图的特点和局限性, 可用计算机模拟比较 Shewhart 控制图和 Westgard 多规则^[5], 通过蒙特卡罗法在 PC 机上用 C 语言编写模拟程序研究 EWMA。准确度和精密度的变化可通过加入固定偏移量 (d) 和随机倍数的标准偏差增益来模拟, 并假设所有模拟服从正态分布。对固定偏移量要作标准化处理, 变换为标准偏差的倍数, 不精密度增益也表示为原始标准偏差的倍数。

EWMA - \bar{x} 控制图是基于每个时刻 t 的均值, $\bar{x}_t = (x_{1t} + x_{2t} + \dots + x_{nt}) / n$, 而 EWMA - S 控制图是用每批质控样的标准偏差 S_t 代替均值 \bar{x}_t 。EWMA - S 控制图需要校正因子, 因为样品的 S_t 是过程 SD 的有偏估计, 由 Mittag 提出。

在解释效能研究结果时, 要注意 Shewhart - \bar{x} 控制图和 EWMA - \bar{x} 控制图只用于检验不准确度, 这一点和多规则检验不同。检验 EWMA 或 Shewhart 控制图的不精密度, 可用 S_t 代替 \bar{x}_t 作检验统计量。在使用标准偏差控制图检验不精密度时, 要求每个时刻需要一个以上的观测值, 但这一点在实际情况中往往很难满足, 所以 \bar{x} 图常常也被用来检验不精密度。

3 结果

3.1 不准确度

考虑每批超过 2 个质控样品的情况比较少见^[6], 所以仅研究了 $n = 1$ 和 $n = 2$ 的数据, 不同偏移

量的 EWMA 控制图的 ARL 值见表 1, Shewhart- \bar{x} 图和 Westgard 多规则对于不同偏移量的 ARL 值见表 2. 表 1 还给出了 EWMA 控制图典型的稳态 ARL 所对应的控制限参数.

表 1 EWMA- \bar{x} 控制图对于不同偏移量 (此处为 SD 的倍数) 的 ARL 值

d	w = 0.2					
	n = 1			n = 2		
	q = 1.65	q = 2.28	q = 2.86	q = 1.65	q = 2.28	q = 2.86
0.0	21.78	82.34	370.65	22.02	83.89	368.82
0.5	9.21	17.71	36.16	6.43	10.76	18.29
1.0	4.33	6.60	9.76	2.95	4.21	5.66
1.5	2.77	3.92	5.23	1.98	2.65	3.36
2.0	2.09	2.81	3.58	1.49	2.00	2.45
2.5	1.69	2.24	2.78	1.22	1.62	2.00
3.0	1.42	1.91	2.31	1.07	1.34	1.71

表 2 Shewhart- \bar{x} 控制图和 Westgard 多规则对于不同偏移量的 ARL 值

d	Shewhart- \bar{x}				Westgard (n = 2)
	n = 1		n = 2		
	1_{2s}	1_{3s}	1_{2s}	1_{3s}	
0.0	22.03	372.12	21.88	367.73	83.43
0.5	13.77	153.01	9.66	90.52	28.55
1.0	6.27	44.36	3.57	17.60	7.84
1.5	3.23	14.99	1.83	5.20	3.40
2.0	2.00	6.35	1.25	2.32	1.97
2.5	1.45	3.23	1.06	1.41	1.40
3.0	1.19	2.00	1.01	1.11	1.14

表 3 EWMA- \bar{x} 控制图和 EWMA-S 控制图对于不同不精密度增益的 ARL 值

ε	EWMA- \bar{x}						EWMA-S	
	w = 0.2						n = 2	
	n = 1			n = 2				
	q = 1.65	q = 2.28	q = 2.86	q = 1.65	q = 2.28	q = 2.86	q = 2.15	q = 2.26
1.0	22.06	83.16	372.32	21.75	82.88	367.25	83.5	98.99
1.5	7.76	16.98	36.91	7.69	16.88	36.49	9.03	9.76
2.0	4.58	8.28	14.59	4.54	8.2	14.41	4.62	4.74
2.5	3.26	5.36	8.44	3.26	5.43	8.54	3.17	3.31
3.0	2.62	3.97	5.95	2.62	4.01	5.78	2.58	2.63

两表可采用比较不准确度的方法作不精密度比较. Westgard 多规则对于不精密度控制显示了最佳效能, EWMA-S 控制图 (表 3 后 2 列) 更适合检验随机误差, 且达到了与 Westgard 多规则相同的效能. 应注意的是, EWMA 控制图的权重因子 $\omega = 0.2$ 是任意选择的, 也就是说与 Westgard 多规则相比并未

比较表 1 中的 EWMA 控制图和表 2 中的其他控制图时, 需要从每批样品数目相同的图中选择条件相同的稳态 ARL, 然后再从选定的两列中直接比较不同偏移量所对应的 ARL 值. 质控图的控制限可在第 1 行找到, 如 1_{3s} 指 3SD 的控制限, 同样, 表 2 中的第 1 个 Shewhart 控制图的控制限为 2SD, 表示每批一个质控样品 ($n = 1$), 稳态 $ARL = 22.03 (d = 0.0)$. 因此, 通过每个偏移量所对应的 ARL 值即可方便地比较两图. 在这个例子中 (表 1, 表 2 的第 1 例), $d = 1.0$ 时, EWMA 图 (表 1) 中的 $ARL = 4.33$, 而 Shewhart 控制图 (表 2) 中的 $ARL = 6.27$, 表明 EWMA 控制图与 Shewhart 控制图相比, 大约早两个样品发现 $d = 1.0$ 时的偏移.

比较表 1 中 EWMA 控制图和表 2 中其他质控图的 ARL 可知, 对于小偏移量, EWMA 控制图明显优于所有其他质控图. 例如, 当 $d = 0.5$ (表 2 中第 2 列), $n = 1$ 且控制限为 3SD 时, Shewhart 控制图的 ARL 为 153.01, 而相应的 EWMA- \bar{x} 图 (表 1 第 3 列) 的 ARL 为 36.16. 在 Shewhart 控制图中引入附加规则, 如 Westgard 多规则, 可以增加效能且接近 EWMA 控制图的结果, 但对于大偏移量 ($d > 2$), EWMA 控制图的链长略长于其他质控图.

3.2 不精密度

表 3 给出了 EWMA- \bar{x} 控制图和 EWMA-S 控制图的典型 ARL, 表 4 总结了其他常规质控图.

进行优化. 另外, 如果使用 Shewhart 控制图或 EWMA- \bar{x} 控制图, 要将质控组数从 1 增加到 2, 并且不能减少 ARL 值, 所以在检验不精密度方面, 一味的增加质控组数的数量是无意义的.

(下转第 22 页)

滚动、广播、交谈,某些路段有明显的轮轨摩擦声,红山段因有大弯道,有明显轮轨蠕滑声,大部分路段摩擦声范围为 80 dB(A)~85 dB(A),因摩擦声属于高频噪声,对车内环境影响也最大。

(3)中华门—三山街段轮轨摩擦声最高达 88.5 dB(A),超出正常范围;安德门—中华门段刹车声达 87.8 dB(A);两者都与车速控制有关。

(4)地铁车辆运行时车厢内噪声平均值为 70 dB(A)~80 dB(A),乘客感觉不适。

2.4 站台噪声监测结果分析

(1)地铁车辆进站时,隧道类站台噪声略高于高架类,声级稳定值为 80 dB(A)~90 dB(A),最大值波动大,最高达 96.6 dB(A);出站时,两类站台噪声值基本相同,声级稳定值为 78 dB(A)~

88 dB(A),最大值约 90.0 dB(A)。

(2)因为地铁车辆进站时噪声主要来自减速刹车时轮轨摩擦,所以噪声与进站时车速控制密切相关。红山站进站数据波动很大,主要原因就是进站车速的不同。在迈皋桥站第 1 次测量中,高频率高强度刹车声竟持续 5 s。

3 结语

南京地铁 1 号线已正式通车,其高架段噪声能达到 4 类区标准,但对高架两侧 100 m 范围内有敏感点的路段仍应全部设置隔声屏障。车厢内和站台上的噪声对乘客的影响不应忽视,地铁运营部门应提高地铁驾驶人员的技术和责任心。

本栏目责任编辑 李文峻

(上接第 15 页)

表 4 Shewhart- \bar{x} 控制图和 Westgard 多规则对于不同不精密度增益(ϵ)的 ARL 值

ϵ	Shewhart- \bar{x}				Westgard ($n=2$)
	$n=1$		$n=2$		
	I_{2s}	I_{3s}	I_{2s}	I_{3s}	
1.0	22.07	366.04	21.68	373.90	83.27
1.5	5.51	21.93	5.48	22.27	7.35
2.0	3.11	7.44	3.19	7.28	3.08
2.5	2.34	4.32	2.36	4.27	2.09
3.0	1.98	3.13	1.97	3.12	1.69

4 结论

EWMA 控制图在不准确度控制方面的作用与 Westgard 多规则控制图相当,甚至更好。EWMA 控制图的另一个优点就是所有的结果都被图形化,质控人员在应用 EWMA 控制图时可立即获得质控数据,而不用检验多个变量。在不精密度控制方面,EWMA- \bar{x} 控制图不及其他质控方法,但 Westgard 多规则是一种很好的替代方法,不过,使用 EWMA-S 控制图也可以克服这一缺点。

EWMA 控制图的优势是检验不准确度或不精密度中的微小变异,在实际应用中应充分利用这一特性。微小的偏移量可能会导致分析结果评估决策的改变,所以在实验室分析中,应严格设置控制限,因为 EWMA 控制图对微小变化的灵敏性都非常有用。另外,灵敏度较高的 EWMA 控制图还可

用于稳定自动化程度较高的分析过程。虽然 Westgard 多规则显示了较好的质控总效能,但 EWMA- \bar{x} 控制图能比 Shewhart- \bar{x} 控制图更早检出微小偏移,所以 EWMA- \bar{x} 控制图是 Westgard 多规则的有益补充。用 EWMA-S 控制图控制准确度,结合用 EWMA-S 控制图控制精密度是最佳的选择。

[参考文献]

- [1] ROBERTS S V. Control chart tests based on geometric moving averages[J]. *Technometrics*, 1959, 1: 239-250
- [2] CEMBROWSKI G, WESTGARD J O, EGGERT A A, et al. Trend detection in control data: optimization and interpretation of Trigg's technique for trend analysis[J]. *Clin Chem*, 1975, 21: 1396-1405.
- [3] CROWDER S V. Design of exponentially weighted moving averages[J]. *J Qual Technol*, 1989, 21: 155-162.
- [4] KOCH D D, ORYALL J J, QUAM E F, et al. Selection of medically useful quality-control procedures for individual tests done in a multitest analytical system[J]. *Clin Chem*, 1990, 36: 230-233.
- [5] WESTGARD J O, BARRY P L, HUNT M R. A multi-rule Shewhart chart for quality control in clinical chemistry[J]. *Clin Chem*, 1981, 27: 493-501.
- [6] WESTGARD J O, ORYALL J J, KOCH D D. Predicting effects of quality-control practices on the cost-effective operation of a stable, multitest analytical system[J]. *Clin Chem*, 1990, 36: 1760-1764.

本栏目责任编辑 张启萍