

案例 15

用 Bootstrap 控制图控制 PCB 的板面镀铜厚度

来源	国家自然科学基金 (70372062); 教育部新世纪优秀人才支持计 (NCET-04-0240)	类别	<input checked="" type="checkbox"/> 案例 <input type="checkbox"/> 方法
作者	王晶 何桢 李湧范	关键词	多品种小批量生产; 质量控制; Bootstrap 方法; Bootstrap 控制图
理论知识	Bootstrap 方法; Bootstrap 控制图	适用层次	<input checked="" type="checkbox"/> 本科生 <input checked="" type="checkbox"/> 研究生 <input type="checkbox"/> MBA

1. 案例背景

印制电路板(Printed circuit board, PCB)是组装电子零件用的基板。PCB 板的生产制造商作为电子、汽车等行业的 OEM, 完全按照客户的要求组织生产, 产量也依据客户的订货数量而定。其生产方式是一个典型的多品种小批量生产。在 PCB 板的生产加工过程中, 电镀过程中的板面镀铜厚度是影响 PCB 质量的重要因素。PCB 制造质量的好坏、使用可靠性的高低、制造过程中问题的发生与解决、制程能力及改进的评估, 往往都需要采用显微剖切(又称微切片)作为客观检查、研究和判断的依据。通过 PCB 板显微剖切技术制得的微切片可以测量到电镀过程中的板面镀铜厚度。但是微切片测试属于破坏性试验, 试验成本较高。

本案例将 Bootstrap 方法的原理应用到控制图理论中, 就可以得到适用于多品种小批量生产环境下的质量控制的 Bootstrap 控制图。具体步骤如下(见图 3):

1. 考虑来自一个完全不确定分布 P , 子组样本容量为 n (一般取 $n=2\sim 5$) 的样本, 令各子组的所有观测值作为原始样本 $S_0=\{x_{11}, \dots, x_{1n}, x_{21}, \dots, x_{2n}, \dots\}$ 。
2. 对原始样本进行反复重采样, 从原始样本 S_0 中抽取 B 个样本容量为 n 的 Bootstrap 样本, 用 S_i^* (下标 i 表示第 i 次重采样) 表示。通常取 $B=1000$ 。
3. 对于每一个子样本 S_i^* 计算其样本均值, 分别用 $\{\bar{X}_1^*, \bar{X}_2^*, \dots, \bar{X}_B^*\}$ 表示。
4. 将得到的 B 个 Bootstrap 样本均值 $\{\bar{X}_1^*, \bar{X}_2^*, \dots, \bar{X}_B^*\}$ 按照从小到大的顺序依次排列, 称之为 Bootstrap 经验分布。
5. 当控制图的控制限取 3σ 处, 则上控制限 UCL 等于 Bootstrap 经验分布中第 99.865% 百分位数, 下控制限 LCL 等于 Bootstrap 经验分布中第 0.135% 百分位数。
6. 利用 Bootstrap 控制图对生产过程进行质量控制, 判断过程是否受控。

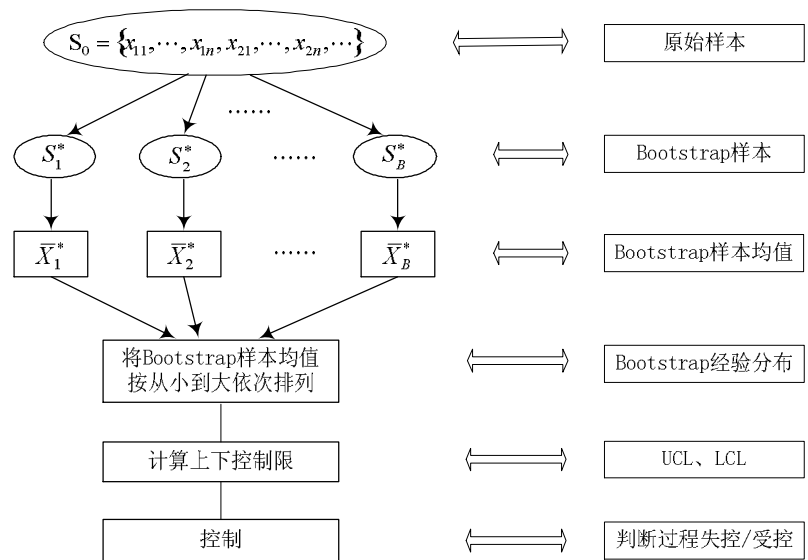


图 3 Bootstrap 控制图实施步骤

当生产过程发生异常变化时，我们说生产过程处于失控状态，应立即采取措施，消除发生异常变化的原因。生产过程的失控状态也可以通过控制图的判断来确定，只要控制图上的点出现以下两种情况之一，就可以判断生产过程处于失控状态：

- (1) 控制图上的点超出控制界限外，或恰好落在控制界限上；
- (2) 控制界限内的点排列非随机排列。

2. 案例描述

某客户要求电镀过程中的板面镀铜厚度不能低于 22 微米。由于产品批量小、破坏性试验成本较高等原因，对于同一个型号的 PCB 板无法获得充足的样本量。现从生产过程中每隔 1 小时抽取 2 块 PCB 板，共抽取 5 组样本进行微切片测试测量板面镀铜厚度，结果见表 1。

表 1 板面镀铜厚度检测值（单位：微米）

样本号	1	2	3	4	5
检测值	34.1468	27.7562	27.5906	30.5520	28.8831
	31.1080	25.3502	28.8831	31.9500	27.5216

下面利用 Bootstrap 控制图对表 1 中的数据计算控制限，控制图的控制限取 3σ 处，具体步骤如下：

第一，首先对表 1 中的数据进行反复重采样，取 $B=1000$ ，得到 1000 个 Bootstrap 样本，用 S_i^* 表示，见表 2。

表 2 板面镀铜厚度检测值的 Bootstrap 样本

	S_1^*	S_2^*	S_3^*	S_{1000}^*
	25.3502	31.1080	31.1080	28.8831
	34.1468	27.5216	28.8831	27.7562
均值 \bar{X}_i^*	29.7485	29.3148	29.9956	28.3197

第二，然后对每一个 Bootstrap 样本 S_i^* 计算其均值 $\bar{X}_1^*, \bar{X}_2^*, \dots, \bar{X}_{1000}^*$ ，见表 2。

第三，将得到的 1000 个 Bootstrap 样本均值 $\bar{X}_1^*, \bar{X}_2^*, \dots, \bar{X}_{1000}^*$ 按照从小到大的顺序依次排列，为 Bootstrap 样本均值的经验分布。

第四，当控制图的控制限取 3σ 处，则上控制限 UCL 等于 Bootstrap 经验分布中第 99.865% 百分位数，下控制限 LCL 等于 Bootstrap 经验分布中第 0.135% 百分位数。利用计算机模拟可得其 Bootstrap 控制图的上下控制限分别为 $UCL=34.15$ 、 $LCL=25.35$ ，见图 4。

第五，过程控制。描点绘图，当数据处于上下控制限之间，则表示过程受控；当有点超出上下控制限，则表示过程失控。

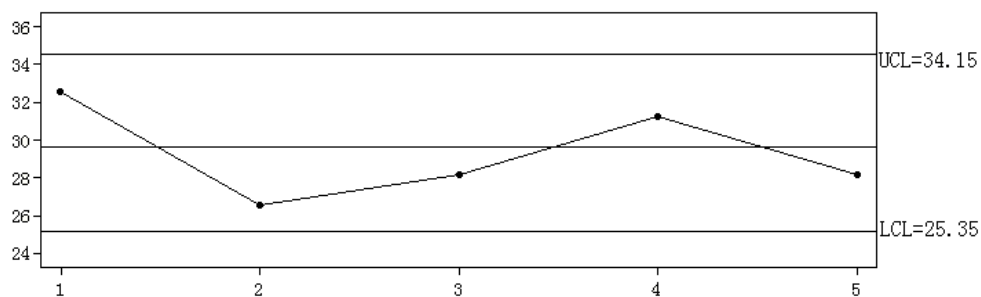


图 4 Bootstrap 控制图

3. 结论与展望

在多品种小批量生产环境下，或破坏性实验的情况下，无法获得大量的样本，用于有效估计过程分布参数和计算控制限的样本量较少，不能得到过程分布参数的真值，传统统计过程质量控制技术不能得到有效的应用。Bootstrap 方法对处理小样本数据，以及非正态数据或自相关数据方面有着得天独厚的优势。本案例将 Bootstrap 方法引入控制图理论中，在印制电路板生产过程中的电镀过程中的板面镀铜厚度的质量控制中得到较好的应用，通过实证分析验证了在多品种小批量生产环境下，当样本容量很少时，利用 Bootstrap 控制图可以方便的对过程进行质量控制。

4. 参考文献

- [1] 李韶华. 小批量 Q 控制图检出力及应用策略研究:[硕士学位论文]. 天津:天津大学, 2004
- [2] 杨旭. CIMS 环境下小批量统计过程质量理论和方法的研究[博士学位论文]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2001
- [3] F.S.Hillier. X and R chart control limits based on a small number of subgroups. Journal of Quality Technology, 1969(1):17-26
- [4] C.P.Quesenberry. SPC Q-Charts for Start-Up Processes and Short or Long Runs. Journal of Quality Technology. 1991,23(3):213-224
- [5] D.J.Wheeler. Short Run SPC. SPC Press,1991
- [6] 余忠华,吴昭同. 面向小批量制造过程的质量控制方法研究. 机械工程学报,2001(8):61-63
- [7] 胡兴才,叶文华. 小批量生产条件下的统计过程控制研究. 中国机械工程, 2006,17(14):1476-1479
- [8] 王丽颖,孙丽,王秀伦. 基于虚拟工序的小批量工序质量控制方法研究. 计算机集成

制造系统,2006(8):1263-1266

- [9] B.Efron. Bootstrap methods:another look at the Jackknife. The Annals of Statistics,1979,7(1):1-26
- [10] Efron B, Tibshirani R J. An Introduction to the Bootstrap. New York: Chapman&Hall, 1993
- [11] B.Efron. The Bootstrap and Modern Statistics. Journal of the American Statistical Association,2000(95):1293-1296
- [12] S.Balamurali, Bootstrap Confidence Limits for Short-Run Capability Indices. Quality Engineering. 2003,15(4):643-648
- [13] 王晶. 基于 Bootstrap 方法的多品种小批量生产的质量控制研究:[硕士学位论文]. 天津: 天津大学,2006.
- [14] 张群. 生产与运作管理. 北京:机械工业出版社,2003
- [15] Efron, R.J.Tibshirani. Bootstrap methods for standard errors, confidence interval, and other measures of statistical accuracy. Statistical Science,1986:54-77