

案例 14

应用稳健性设计改进真空镀膜过程质量

来源	国家自然科学基金 (70572044, 70711140356); 教育部新世纪优秀人才支持 计划资助 (NCET-04-0240)	类别	<input checked="" type="checkbox"/> 案例 <input type="checkbox"/> 方法
作者	施亮星 何 桢	关键词	稳健性参数设计; 实验设计; 质量改进
理论知识	稳健性参数设计	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

M 公司专门为手机生产商提供经过真空镀膜处理的手机外壳零部件。近日, 该公司接到客户关于其提供的型号为 L8 的手机外框的投诉, 称该型号的手机外壳在仓库放置几个月就会出现黑点或黑点群, 严重影响手机外观, 要求 M 公司停止 L8 的供货, 并立即改善此质量问题。

经老化试验, L8 的手机外框确实出现了黑点或黑斑, 由此导致的不良品率约为 37%, 改善真空镀膜的质量水平十分迫切。为了达到满足客户需求并切实减少过程波动的目的, 拟采用稳健性参数设计 (Robust Parameter Design) 改善该过程质量^[1]。

2. 案例描述

2.1 稳健性参数设计方案

2.1.1 输出响应的选择

经工程人员分析, 这些黑斑是由氧化引起的, 而为了防止氧化, 在作业中, 会在生产线上配置由上、下、中三支喷枪组成的喷枪组, 喷枪的作用是按照一定的角度和压力将一定量的漆喷到从流水线上经过的手机外框上, 从而在手机外框上形成防止氧化的保护膜。而保护膜的膜厚直接影响了氧化的程度, 从而影响黑斑的形成。显然, 该过程中, 膜厚真正反映了手机外框的氧化特性, 即为镀膜过程的关键质量特性指标。因此, 确定膜厚 (记为 Y) 为响应输出。而对于膜厚, 客户要求其目标值为 10μ , 并将公差控制在 $\pm 2\mu$ 内, 即本问题为望目 (Nominal the Best) 特性的问题^[2]。

2.1.2 影响因素的选择

对于影响膜厚的因素, 工程人员结合工程实践及初步分析, 确定布置于生产线上的喷漆设备的上、下、中三个喷漆的喷枪喷出量和它们各自的涂料压力等六个因素, 分别将这六个因素记为 L_1 、 L_2 、 L_3 和 P_1 、 P_2 以及 P_3 。这六个因子在生产过程中是可控的, 即它们均为可控因子 (Control Factor)。

同时, 需要注意的是对于同一手机外框而言, 由于其自身的结构特点, 四个面经过喷漆过程后的膜厚也可能存在较大差别, 而各面间的这种差别是难以控制 (Hard to Change) 的, 因为提高喷漆质量的一个目标就是使产品各面的膜厚趋于一致, 所以要减小各面间的差

异影响。因此，将该产品的表面视为噪声因子（Noise Factor），记为 Z 。显然， Z 有 4 个水平，为 1、2、3、4，分别代表该产品依顺时针方向的四个面。

2.1.3 试验设计方案

由于有 6 个可控因子及 1 个噪声因子，因此，可采用 2_{IV}^{6-1} 的部分因子设计作为控制表（Control Array）以及 1×4 的噪声表（Noise Array）组成的乘积表（Cross Array）。该乘积表如表 1 所示。为了在试验中对线性假定进行检验，同时为了取得模型的随机误差，控制表中安排了 3 次中心点试验。表中，-1 表示可控因子的低水平，+1 表示可控因子的高水平，而 0 则表示中心点；噪声因子 Z 的 4 个水平则分别用 1、2、3、4 来表示该产品顺顺时针方向的四个面。其中各可控因子的水平设定如表 2 所示，其中各可控因子的高水平、低水平及中心点分别用+1、-1 和 0 三个编码数据表示。

2.2 试验数据及模型拟合

按照选定的试验方案进行试验，并在试验过程中除试验涉及的各因子外，保持其他参数设定不变。试验结果数据如表 3 所示。由于试验的目的是最小化各面间膜厚的变异并且使其达到目标值，故可采用稳健性参数设计中典型的位置和散度建模（Location and Dispersion Modeling）方式^[3]。表中 \bar{y} 为各面响应的样本均值，而 $\ln s^2$ 则为各面响应样本方差的自然数对数，这里， \bar{y} 为位置的度量， $\ln s^2$ 则为散度的度量。

表 1 喷漆过程稳健性参数设计乘积表

序 号	试验 顺序	L1	L2	L3	P1	P2	P3	Z				序 号	试验 顺序	L1	L2	L3	P1	P2	P3	Z			
								1	2	3	4									1	2	3	4
1	21	-1	-1	-1	-1	-1	-1					19	15	-1	1	-1	-1	1	-1				
2	18	1	-1	-1	-1	-1	1					20	1	1	1	-1	-1	1	1				
3	14	-1	1	-1	-1	-1	1					21	17	-1	-1	1	-1	1	-1				
4	8	1	1	-1	-1	-1	-1					22	29	1	-1	1	-1	1	1				
5	31	-1	-1	1	-1	-1	1					23	24	-1	1	1	-1	1	1				
6	32	1	-1	1	-1	-1	-1					24	22	1	1	1	-1	1	-1				
7	16	-1	1	1	-1	-1	-1					25	19	-1	-1	-1	1	1	-1				
8	10	1	1	1	-1	-1	1					26	27	1	-1	-1	1	1	1				
9	11	-1	-1	-1	1	-1	1					27	13	-1	1	-1	1	1	1				
10	28	1	-1	-1	1	-1	-1					28	34	1	1	-1	1	1	-1				
11	23	-1	1	-1	1	-1	-1					29	25	-1	-1	1	1	1	1				
12	4	1	1	-1	1	-1	1					30	2	1	-1	1	1	1	-1				
13	3	-1	-1	1	1	-1	-1					31	20	-1	1	1	1	1	-1				
14	26	1	-1	1	1	-1	1					32	9	1	1	1	1	1	1				
15	7	-1	1	1	1	-1	1					33	12	0	0	0	0	0	0				
16	6	1	1	1	1	-1	-1					34	5	0	0	0	0	0	0				
17	35	-1	-1	-1	-1	1	1					35	30	0	0	0	0	0	0				
18	33	1	-1	-1	-1	1	-1																

表 2 可控因子及其水平设定

可控因子	高水平 (+1)	中心点 (0)	低水平 (-1)
上枪喷出量	36	33	30
下枪喷出量	36	33	30
中枪喷出量	36	33	30
上枪涂料压力	0.09	0.085	0.08
下枪涂料压力	0.09	0.085	0.08
中枪涂料压力	0.09	0.085	0.08

表 3 试验结果数据（单位： μ ）

Z				\bar{y}	$\ln(s^2)$
1	2	3	4		
6.89	7.8088	6.945	7.6625	7.326575	-1.48195
6.15	7.6163	6.3875	7.4588	6.90315	-0.59756
7.55	10.0638	7.6175	11.2063	9.1094	1.200503
6.98	10.4888	7.1525	9.9561	8.64435	1.215739
10.1375	11.9038	12.1975	12.2063	11.61128	-0.01501
9.47	10.0875	9.3125	10.5813	9.862825	-1.07504
10.32	10.3988	8.6825	10.4925	9.97345	-0.29348
11.65	13.2163	11.7725	13.8838	12.63065	0.185502
6.39	8.2575	6.3175	8.3163	7.320325	0.220854
6.59	8.1263	7.0475	8.4063	7.542525	-0.29247
6.975	9.1063	6.8675	9.4425	8.097825	0.624084
9.7325	10.5825	9.3575	10.4075	10.02	-1.11056
12.1575	11.8313	10.825	11.8813	11.67378	-1.07657
10.355	11.3338	9.9375	11.445	10.76783	-0.60467
11.3425	13.3688	11.885	13.4175	12.50345	0.099726
10.3625	13.06	10.945	13.5113	11.9697	0.875245
7.96	8.9525	7.8225	8.9863	8.430325	-0.93953
7.63	8.7038	7.8	8.9225	8.264075	-0.88004
6.5775	10.765	6.9825	10.2038	8.6322	1.537732
9.3175	12.3788	9.2825	12.3638	10.83565	1.145666
8.2725	9.73	8.4075	9.9938	9.10095	-0.23991
10.3525	11.5013	9.625	11.3538	10.70815	-0.24605
10.8975	13.3825	11.4925	13.495	12.31688	0.553455
10.6225	12.9938	10.09	13.2725	11.7447	0.967211
6.4725	7.9213	6.3775	8.0925	7.21595	-0.17373
7.2925	8.3875	7.4275	8.8125	7.98	-0.60573
7.9175	10.77	8.01	11.0113	9.4272	1.053166
8.3575	10.8875	8.69	11.0788	9.75345	0.713313
11.035	11.43	10.775	11.5675	11.20188	-2.02548
9.73	12.275	10.56	12.7725	11.33438	0.714037
10.2525	13.015	9.7775	12.88	11.48125	1.067177
10.86	13.9179	10.4925	13.6013	12.21793	1.16572
9.14	10.41	9.37	10.4988	9.8547	-0.71406
9.1775	11.345	9.0825	11.94	10.38625	0.772294
9.6725	10.5325	9.35	10.915	10.1175	-0.63154

首先对位置的度量 \bar{y} 进行初步的模型拟合，即模型中包括所有的因子。初步拟合的方差分析结果如表 4 所示，由方差分析结果可知，模型中的主效应显著，而三阶交互作用不显著和曲性也不显著，表明模型没有显著违背线性假定，但存在不显著项。

表 4 对于 \bar{y} 方差分析（已编码单位）

项	自由度	平方和	均方值	F_值	P(>F) (P_值)	显著性
主效应	6	86.6191	14.4365	154.15	0.001	**
2因子交互作用	15	9.6969	0.6465	6.9	0.069	
3因子交互作用	10	2.9313	0.2931	3.13	0.189	
残差误差	3	0.281	0.0937			
弯曲	1	0.1397	0.1397	1.98	0.295	
纯误差	2	0.1413	0.0706			
合计	34	99.5281				

为了进一步分析模型中的显著项以重新拟合模型，作散度效应的半正态图（如图 1），由半正态图可知，模型中主因子 L1、L2、L3 和 P3 的影响显著，二阶交互作用 L1×L2、L2×P3、L3×P1、L3×P2、P1×P3 影响显著，以及三阶交互作用 L1×L2×P2 影响显著，考

考虑到 $L3 \times P1$ 、 $L3 \times P2$ 、 $P1 \times P3$ 和 $L1 \times L2 \times P2$ 影响显著，因此，根据效应排序原则， $P1$ 和 $P2$ 两个主因子亦应认定为显著。同时，在认定显著因子时还要考虑到控制表中的混淆结构，由于本问题中采用的控制表为 2_{IV}^{6-1} 设计，容易看出，即便考虑该设计的混淆结构，上述所认定的显著因子是合理的。

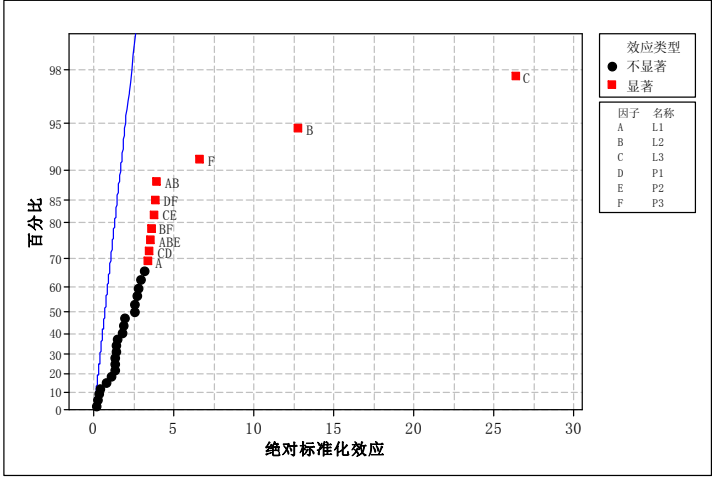


图 1 对于 \bar{y} 的半正态效应图

根据上述分析，将模型中的非显著项剔除并重新对位置的度量 \bar{y} 进行模型拟合，拟合结果的方差分析如表 5 所示。由方差分析结果可知，剔除非显著项后，模型中的主因子、二阶交互作用和三阶交互作用因子均显著，而失拟误差并不显著，表明剔除非显著因子正确，同样，曲性不显著则意味着模型没有违背线性假定。

表 5 对于 \bar{y} 方差分析（已编码单位）

项	自由度	平方和	均方值	F_值	P(>F) (P_值)	显著性
主效应	6	86.6191	14.4365	59.62	0	**
2因子交互作用	5	6.4268	1.2854	5.31	0.002	**
3因子交互作用	1	1.155	1.155	4.77	0.04	*
残差误差	22	5.3272	0.2421			
弯曲	1	0.1397	0.1397	0.57	0.46	
失拟	19	5.0463	0.2656	3.76	0.231	
纯误差	2	0.1413	0.0706			
合计	34	99.5281				

相应的位置模型为：

$$\begin{aligned} \hat{y} = & 9.9 + 0.18L_1 + 0.69L_2 + 1.42L_3 + 0.14P_1 + 0.15P_2 + 0.36P_3 \\ & + 0.21L_1 \times L_2 + 0.19L_2 \times P_3 + 0.19L_3 \times P_1 - 0.20L_3 \times P_2 - 0.21P_1 \times P_3 \\ & - 0.19L_1 \times L_2 \times P_2 \end{aligned} \quad (1)$$

同样，重复上述模型拟合及分析步骤，对散度的度量 $\ln s^2$ 进行模型拟合。分析发现，

对 $\ln s^2$ 有显著影响的因子只有 $L2$ ，而相应的拟合的散度效应模型为：

$$\ln s^2 = 0.032 + 0.63L_2 \quad (2)$$

2.3 优化及验证

通过上述试验及分析，得到了本问题的一个位置和散度模型如式（1）和式（2）所示。显然，L2 即为模型的散度因子，通过它可以调整产品各面间的膜厚的变异程度；而 L1、L3、P1、P2 和 P3 则为调节因子，通过调节它们以使位置达到目标值。

如前所述，本问题是属于望目特性的问题，通过试验希望使膜厚达到 $10 \pm 2\mu$ 的要求，同时要极小化产品各面间的膜厚变异。为此，首先调节散度因子使散度最小化，即取 L2=-1，从而使 $\ln s^2$ 最小。其次使调节因子取适当值，以使模型满足目标值。显然，当取 L1=1、L3=0.165、P1=-1、P2=1、P3=1 时， $\hat{y} = 10$ 。

根据上述优化结果，重新设定过程参数，即设定上、下、中三个喷漆的喷枪喷出量和它们各自的涂料压力依次分别为 36、30、34.3、0.08 Mpa、0.09 Mpa、0.09 Mpa，并进行了 30 次验证试验。图 2（a）是优化前该产品膜厚的情形，而图 2（b）则是验证试验结果的情形，可见，采用新参数后，产品质量有显著的改善。通过对产品的进一步老化试验，也证明了模型分析结果有效性。

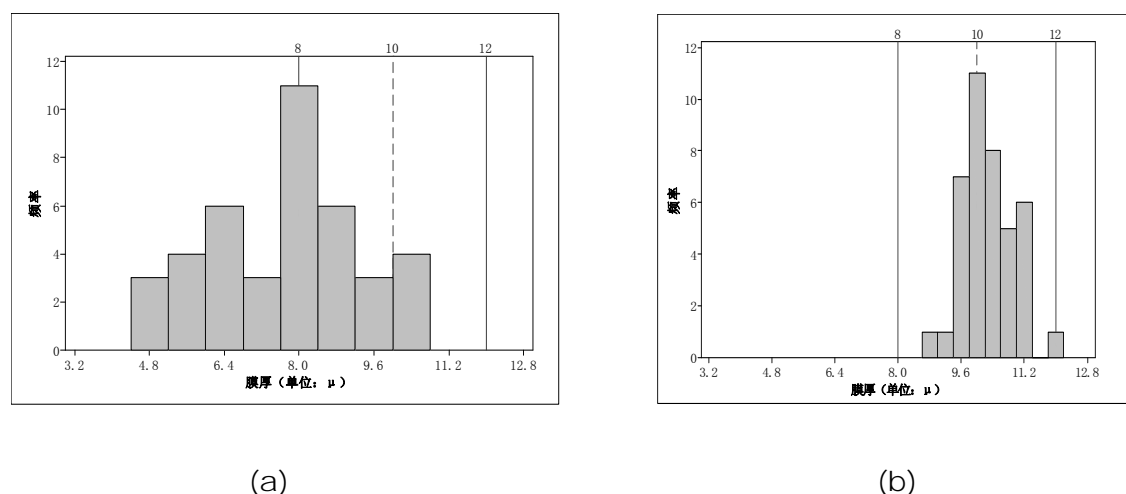


图 2 改善前后产品膜厚数据分布

3. 结论与展望

通过采用 2_{IV}^{6-1} 的部分因子设计作为控制表以及 1×4 的噪声表组成的乘积表进行试验，利用位置散度建模，找到了影响本问题中产品喷漆厚度的散度因子和调节因子，实现了稳健性参数设计，根据分析优化结果，重新设定过程参数，即设定上、下、中三个喷漆的喷枪喷出量和它们各自的涂料压力，从而成功改进了该喷漆过程。经验证，通过喷漆过程能力的提高改善该了型号手机出现黑斑的质量问题。

4. 参考文献

- [1] Wu & Hamada, Experiments: Planning, Analysis, and Parameter Design Optimization [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2000.
- [2] [Raymond H. Myers, Douglas C. Montgomery. Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments (2nd edition) [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2002.
- [3] Martin Arvidsson, Ida Gremyr. Principles of Robust Design Methodology [J]. Quality And Reliability Engineering International, 2008, 24; 23-35.