

案例 18

应用动态特性的田口稳健性参数设计理论优化电子束
表面硬化工艺

来源	国家自然科学基金资助项目（70372062）	类别	<input checked="" type="checkbox"/> 案例 <input type="checkbox"/> 方法
作者	车建国 何桢 崔庆安	关键词	田口稳健性设计 动态特性 多品种 小批量生产过程 过程改进
理论知识	田口稳健性设计	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

电子束表面硬化技术是一种工程材料表面处理工艺，它能够在精密材料表面产生物理硬化层，极大地改善材料表面特性，增强材料表面的抗磨损程度，具有极好的市场前景。经过表面处理的铸铁具有良好的抗磨损特性，广泛用作机轴、摇杆臂和凸轮轴等。目前由于这项技术难以掌握，产品性能仍难以满足顾客的要求。

传统 SPC 质量控制的关键在于产品的质量特性值，它仅把生产工序看成独立的过程，而对于多品种小批量生产工序本身的有效分析与改进，国内外均没有进行专门研究。本案例应用动态特性的田口稳健性设计理论试图对于电子束表面硬化工艺进行稳健性改进。

假设某一多品种小批量加工工序的输入与输出之间存在线性关系： $Y = \alpha + \beta \times M + e$ ，其中 M 代表工序的输入特性值，如机床的进刀量、镀膜的电流大小，焊料的用量、印染的染料量，拉力大小等。 M_i 代表工序上的生产的第 i 个品种的输入值， $i = 1, 2, \dots, k$ ， Y 表示工序的输出质量特性值，如切削量，镀膜厚度，焊接面积，染料着色度、杆的拉伸强度等。其中 y_{ij} 表示第 i 品种的第 j 件产品的质量特性值。一般的机械加工工序多为消耗性加工（如磨削，切削等）、增加性加工（如印染、镀膜等）以及复制性加工（如铸造，注塑等），这些工序的输入与输出之间多存在着线性关系。对于输入与输出之间存在非线性关系的工序，只要这种关系是一元的，通常可通过数学分析与变量转换等方法变换为线性关系。对于某些加工工序，一般会存在多个可控的影响因素，可以将其中某一个与质量特性值 Y 具有线性关系的因素作为输入因素。

B_i 代表品种 M_i 的生产批量大小，在多品种小批量生产模式下，由于每个品种生产的批量大小不同，所以 B_i 是一个随品种 M_i 变化的变量。为此，需要进行一定的数据处理，将它们变成具有相同生产批量的品种。

$$\overline{M} = \frac{1}{k} \times \sum_{i=1}^k M_i, \quad \overline{y_i} = \frac{1}{B_i} \times \sum_{j=1}^{B_i} y_{ij}, \quad \overline{y} = \frac{1}{k} \times \sum_{i=1}^k \overline{y_i}$$

$$r_0 = \max_i \{B_i\}, \quad i = 1, 2, \dots, k$$

SN 比计算步骤如下:

(1) 总平方和 S_T 及自由度

$$S_T = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{B_i} (y_{ij} - \bar{y})^2, \quad f_T = \sum_{i=1}^k B_i - 1$$

(2) 信号的线性效应引起的波动平方和及自由度

$$S_\beta = \frac{1}{r} \times \left[\sum_{i=1}^k (M_i - \bar{M}) \times T_i \right]^2, \quad \text{其中 } T_i = \frac{r_0}{B_i} \times \sum_{j=1}^{B_i} (y_{ij} - \bar{y}_i), \quad r = r_0 \times \sum_{i=1}^k (M_i - \bar{M})^2,$$

$$f_\beta = 1$$

(3) 误差的波动平方和及自由度

$$S_e = S_T - S_\beta, \quad f_e = f_T - f_\beta = \sum_{i=1}^k B_i - 2, \quad V_e = \frac{S_e}{f_e} = \frac{S_T - S_\beta}{\sum_{i=1}^k B_i - 2}$$

则信噪比 SN 为

$$\eta = 10 \lg \frac{\frac{1}{r} \times (S_\beta - V_e)}{V_e} \quad (\text{dB})$$

α 与 β 的估计为

$$\begin{cases} \hat{\beta} = \frac{1}{r} \times \sum_{i=1}^k [(M_i - \bar{M}) \times T_i] \\ \hat{\alpha} = \bar{y} - \hat{\beta} \times \bar{M} \end{cases}$$

y 估计值为

$$\hat{y} = \bar{y} + \hat{\beta} \times (M - \bar{M})$$

在实际试验中, 由于许多噪声因素往往无法或很难正确识别, 因此试验中一般把噪声因素综合为一个具有两个或三个水平 (复侧极端条件、中间条件和正侧极端条件) 误差因素, 这里我们可以取试验中的质量特性值的两个极值以及均值作为误差因素水平。

2. 案例描述

电子束表面硬化工艺的输入和输出之间存在以下的函数关系: $Y = a - ae^{-\beta M}$, Y 表示加工表面硬化厚度, M 表示输入值, a 表示实际硬化表面厚度相对于最大值 10mm 的饱和度,

令 $a=10$, β 为待定参数。由于输入输出之间为非线性关系, 令 $Y' = \ln\left(\frac{a}{a-Y}\right)$, 则

$Y' = \beta M$ ，其中， M_i 表示受激电子束能量值，由电子束焦距到实验件的距离比决定。根据经验，生产加工所需的表面硬化厚度一般不超过 10mm，其工艺输入值即受激电子束能量值一般在 0.5-1.2 之间，这里我们分别选取了 M1=0.58, 0.78, 0.99, 1.17 四个品种进行试验，来提高生产工艺质量的稳健性。

试验中电子束激发部件采用延展性好、高碳含量的铸铁（FCD45），基体材料分为两种类型：铁素体和珠光体。试验件被切割成 $10 \times 50 \times 100 \text{mm}^3$ 大小的长方体，在 150℃和 250℃两种温度下快速预热。电子束加工是用高速带电粒子流轰击试验件。电子束在磁场作用下很容易被控制、聚焦以及摆动，高能电子束能使加工表面快速加热融化，快速冷却，不用淬火处理。经过 QFD、因果图与头脑风暴法分析，找到影响加工表面硬化厚度的控制因素及其水平如表 1 所示。采用综合误差因素法将噪声因素划分为 N1 和 N2 两个水平，N1 水平使加工表面硬化厚度最小，N2 水平使加工表面硬化厚度最大。试验采用正交试验 $L_{18}(2^1 \times 3^7)$ ，试验的内外表设计以及试验数据如表 2 所示。

表 1 控制因素及水平表

因素	过程控制因素	水平 1	水平 2	水平 3
A	基体材料	铁素体	珠光体	—
B	电子穿行速度, mm s^{-1}	12	18	25
C	加速电压, kv	10	20	35
D	电流强度, mA	8	12	18
E	局部融化宽度, mm	6	12	20
F	工件表面粗糙度	低	中	高
G	快速预热温度, $^{\circ}\text{C}$	25	150	250
H	电子束摆动形状	线性	圆形	椭圆

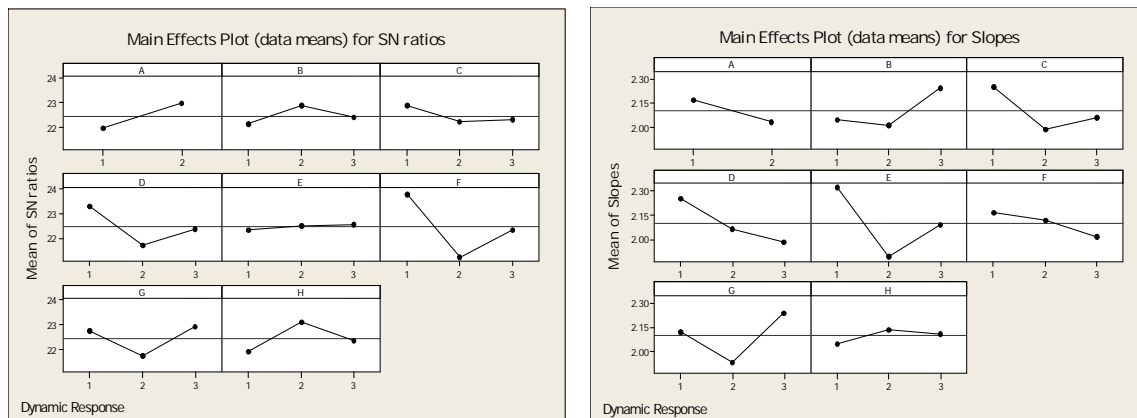
表 2 试验设计表及试验数据

实 验 号	过程控制因素								信号与噪声因素								SN 比 η (dB)	β (dB)
									M1=0.58		M2=0.78		M3=0.99		M4=1.17			
	A	B	C	D	E	F	G	H	N1	N2	N1	N2	N1	N2	N1	N2		
1	1	1	1	1	1	1	1	1	2.04	2.29	2.59	3.02	3.34	3.54	3.80	3.96	24.2344	2.86691
2	1	1	2	2	2	2	2	2	1.32	1.46	1.54	1.64	1.81	2.05	2.29	2.73	19.6813	1.83438
3	1	1	3	3	3	3	3	3	2.05	2.20	2.49	2.74	2.84	3.18	3.31	3.65	22.0939	2.20370
4	1	2	1	1	2	2	3	3	0.44	0.64	0.78	0.96	1.38	1.64	1.72	2.09	23.6275	2.36420
5	1	2	2	2	3	3	1	1	0.71	0.84	0.97	1.21	1.38	1.59	1.69	2.05	21.9559	1.82674
6	1	2	3	3	1	1	2	2	2.86	3.12	3.25	3.46	3.76	3.95	4.11	4.35	24.1026	2.09895
7	1	3	1	2	1	3	2	3	1.23	1.32	1.41	1.53	1.84	2.34	2.23	2.83	19.1506	2.19464
8	1	3	2	3	2	1	3	1	1.12	1.35	1.52	1.75	1.84	2.04	2.21	2.51	21.5710	1.81651
9	1	3	3	1	3	2	1	2	0.78	0.86	1.14	1.35	1.58	1.96	1.91	2.45	21.0849	2.28792
10	2	1	1	3	3	2	2	1	0.72	0.85	0.97	1.18	1.25	1.46	1.58	1.97	20.1977	1.60678
11	2	1	2	1	1	3	3	2	2.18	2.39	2.56	2.84	3.01	3.25	3.49	3.68	23.7419	2.14516
12	2	1	3	2	2	1	1	3	3.61	3.86	3.94	4.12	4.26	4.38	4.65	4.79	22.9199	1.60511
13	2	2	1	2	3	1	3	2	0.32	0.39	0.72	0.94	1.13	1.38	1.62	1.87	24.6555	2.27277
14	2	2	2	3	1	2	1	3	2.27	2.54	2.76	3.03	3.02	3.30	3.55	3.76	21.0158	1.97443
15	2	2	3	1	2	3	2	1	0.54	0.65	0.71	0.85	0.97	1.16	1.45	1.62	21.8488	1.53894
16	2	3	1	3	2	3	1	2	0.25	0.31	0.64	0.83	1.05	1.26	1.49	1.73	25.3430	2.18238

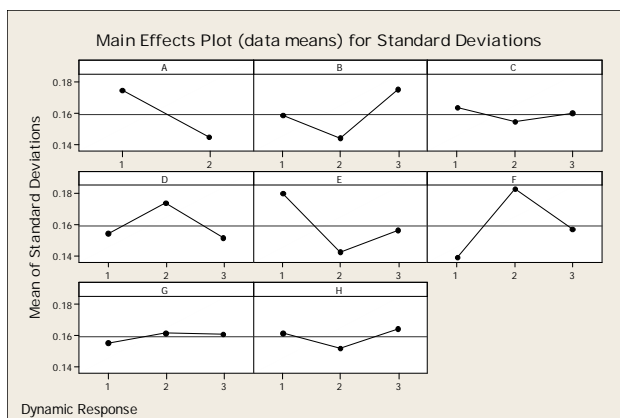
17	2	3	2	1	3	1	2	3	0.29	0.39	0.69	0.87	1.12	1.38	1.63	1.87	25.4087	2.32902
18	2	3	3	2	1	2	3	1	2.46	2.89	2.98	3.24	3.57	3.82	4.02	4.49	21.8264	2.64504

应用 Minitab 软件进行试验分析, 得到 SN 比、 β 值与硬化表面标准差的主效应图如图

1 所示, 响应表如表 3、表 4、表 5 所示。



(a) (b)



(c)

图 1 SN 比、 β 值与硬化表面标准差的主效应图

表 3 SN 比响应表(dB)

水平	A	B	C	D	E	F	G	H
1	21.94	22.14	22.87	23.32	22.35	23.82	22.76	21.94
2	23.00	22.87	22.23	21.70	22.50	21.24	21.73	23.10
3		22.40	22.31	22.39	22.57	22.36	22.92	22.37
重要性因子	1.05	0.72	0.64	1.63	0.22	2.58	1.19	1.16
排序	5	6	7	2	8	1	3	4

表4 β 响应表(dB)

水平	A	B	C	D	E	F	G	H
1	2.166	2.044	2.248	2.255	2.321	2.165	2.124	2.050
2	2.033	2.013	1.988	2.063	1.890	2.119	1.934	2.137
3		2.243	2.063	1.980	2.088	2.015	2.241	2.112
重要性因子	0.133	0.230	0.260	0.275	0.431	0.150	0.307	0.087
排序	7	5	4	3	1	6	2	8

表5 硬化表面厚度标准差响应表

水平	A	B	C	D	E	F	G	H
1	0.1742	0.1585	0.1636	0.1537	0.1797	0.1385	0.1554	0.1616
2	0.1446	0.1442	0.1546	0.1734	0.1424	0.1825	0.1616	0.1522
3		0.1755	0.1599	0.1511	0.1560	0.1571	0.1612	0.1644
重要性因子	0.0296	0.0312	0.0090	0.0223	0.0373	0.0440	0.0062	0.0121
排序	4	3	7	5	2	1	8	6

由响应表以及效应图可得：对于SN比、 β 值以及硬化表面厚度标准差而言，各自的最佳控制因素水平组合以及各自的控制因素重要性排序如表6所示，表6右边是对应最佳组合的SN比、 β 值、硬化表面厚度标准差、标准差的自然对数预测值。

表 6 控制因素最佳水平组合比较

最 佳 组 合	控制因素水平									最优组合因素 的重要性排序		对应组合的各项预测值			
	A	B	C	D	E	F	G	H	SN比(dB)			β (dB)	标准差	标准差自然对数	
	SN比	2	2	1	1	3	1	3	2	FDGH	ABCE	26.2816	2.46501	0.113366	-2.11829
	β 值	1	3	1	1	1	1	3	2	EGDC	BFAH	24.1562	2.86903	0.191283	-1.67488
	标准差	1	3	1	2	1	2	2	3	FEBA	DHCG	18.0338	2.29817	0.267374	-1.24544

综合表6中三个因素水平组合的SN比、 β 值、硬化表面厚度标准差预测值可知，最佳的可控因素组合为： $A_2B_2C_1D_1E_3F_1G_3H_2$ 。

由表6中的最优组合因素的重要性排序可知，调整因素确定为C，对SN比和硬化表面厚度标准差不显著，而对 β 显著，由主效应图以及响应表可知，C因素的第一水平比其他水平可以使 β 值更大，所以最优组合仍为 $A_2B_2C_1D_1E_3F_1G_3H_2$ ，即基体材料为珠光体、电子束穿行速度为 18mm s^{-1} ，加速电压为10kv，电流强度为8 mA，局部融化宽度为20mm，工件表面粗糙度为低水平，快速预热温度为 250°C ，电子束摆动形状为圆形。

最优组合的SN比和 β 值工程预测值为

$$\eta_{opt} = A_2 + B_2 + C_1 + D_1 + E_3 + F_1 + G_3 + H_2 - 7\bar{T}$$

$$= 23.00 + 22.87 + 22.87 + 23.32 + 22.57 + 23.82 + 22.92 + 23.10 - 7 \times 22.4700 = 27.18$$

dB

$$S_{opt} = A_2 + B_2 + C_1 + D_1 + E_3 + F_1 + G_3 + H_2 - 7\bar{T}$$

$$= 2.033 + 2.013 + 2.248 + 2.255 + 2.088 + 2.165 + 2.241 + 2.137 - 7 \times 2.09964 = 2.48252$$

dB

已知初始的可控因素组合为 $A_1B_1C_2D_2E_2F_2G_2H_2$ ，对应的工程平均预测值为

$$\eta_{initial} = A_1 + B_1 + C_2 + D_2 + E_2 + F_2 + G_2 + H_2 - 7\bar{T}$$

$$= 21.94 + 22.14 + 22.23 + 21.70 + 22.50 + 21.24 + 21.73 + 23.10 - 7 \times 22.4700 = 19.29$$

dB

$$S_{initial} = A_1 + B_1 + C_2 + D_2 + E_2 + F_2 + G_2 + H_2 - 7\bar{T}$$

$$= 2.166 + 2.044 + 1.988 + 2.063 + 1.890 + 2.119 + 1.934 + 2.137 - 7 \times 2.09964 = 1.64352$$

dB

$$\eta_{opt} - \eta_{initial} = 27.18 - 19.29 = 7.89 \text{ dB}$$

$$S_{opt} - S_{initial} = 2.48252 - 1.64352 = 0.839 \text{ dB}$$

可见，SN 比比初始组合有了大约 7.89dB 的改进， β 值有了 0.839dB 的改进。通过试验，

$$\text{变异减少了 } 1 - \left[\frac{1}{2} \right]^{\left(\frac{7.89}{6} \right)} = 1 - 0.402 = 59.8\%。$$

表 7 最优组合验证

		预测值		验证值	
		SN 比(dB)	β (dB)	SN 比(dB)	β (dB)
因素水平组合					
初始组合	$A_1B_1C_2D_2E_2F_2G_2H_2$	19.29	1.64352	19.6813	1.83438
最优组合	$A_2B_2C_1D_1E_3F_1G_3H_2$	27.18	2.48252	26.3950	2.54948
增加		7.89	0.839	6.7137	0.7151

由表 7 可知，预测值与验证值的 SN 比和 β 值都比较接近，它们具有很高的一致性，所以试验得到的结论具有较好的再现性。

3. 结论与展望

本文应用动态特性的田口稳健性参数设计理论，对电子束表面硬化工艺的输出质量响应值与输入特性值的建模分析，找出影响输出响应值的控制因素，通过田口试验设计与分析，找到了最佳可控因素水平组合，使输出响应值对于噪声因素变化不敏感，而对输入特性值变化很敏感，从而使得对于不同的生产品种，过程的输出响应值均达到稳健的目的，大大改进了工序质量。

4. 参考文献

- [1] MCCASKEY, S. D. and TSUI, K.L. Analysis of dynamic robust design experiments. International Journal of Production Research, 1997, 35(6): 1561-1574.

-
- [2] Tzeng, Y.F. and Chiu, N.H. Two-phase parameter design for the optimisation of the electrical-discharge machining process using a taguchi dynamic experiment. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2003, 21:1005–1014.
 - [3] Jean, M.D. Characteristic optimisation of dynamic process parameters in rapid solidified treatment. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2004, 9(3):221-228.
 - [4] 曾凤章.稳健性设计原理技术方法案例. 北京:兵器工业出版社,2004.
 - [5] Hillier,F.S. Small sample probability limits for range chart. *Journal of the American Statistical Association*,1967,62(320):1488-1493.
 - [6] Quesenberry,C.P. SPC Q-charts for start-up processes and short or long runs. *Journal of Quality Technology*,1991,23(3):213-224.
 - [7] Salti,M.M.,Statham,A. A review of the literature on the use of SPC in batch production. *Quality and Reliability Engineering International*,1994,10:49-61.
 - [8] 高清,马玉林,程子建,方淑芬.多品种小批量生产质量控制图的研究. *哈尔滨工业大学学报*,1997,29(1):53-55.
 - [9] 王建稳. 多品种小批量生产情形下的工序质量控制图. *数理统计与管理*,2002,21(4):34-37.
 - [10] [姚梅芳,张霞,金广林. 多品种多批次冲压工序质量控制的研究. *数理统计与管理*,1997,16(6):20-25.
 - [11] 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,2001,37(8):60-64.
 - [12] 卜祥民,孙静,张公绪. 基于 Bayes 分析小批量生产质量控制与诊断. *北京科技大学学报*, 1998,20(6):598-603.
 - [13] 朱慧明,韩玉启.小批量生产的贝叶斯质量控制模型. *运筹与管理*,2003,12(5):66-70.
 - [14] 张文生.小批量生产过程中产品质量控制的研究. *系统工程理论与实践*,2002,22(5):24-30.
 - [15] 毛宁,陈庆新.基于可制造性设计的小批量产品制造质量控制系统. *计算机集成制造系统*,1999,5(6):41-46,54.
 - [16] 陈庆新,毛宁,陈秋扬,刘霞.基于分层递阶模型的质量控制系统. *中国机械工程*,1999,10(3):279-282.