

文章编号: 1673- 9469(2010) 03- 0095- 05

基于正交试验设计的多指标优化方法研究

魏效玲, 薛冰军, 赵强
(河北工程大学 机电学院, 河北 邯郸 056038)

摘要: 为了解决多指标正交试验方法中存在的计算工作量大, 权重的确定不够合理等问题, 利用矩阵分析法对多指标正交试验设计进行优化。建立正交试验的三层结构模型和层结构矩阵, 将各层矩阵相乘得出试验指标值的权矩阵, 并计算得出影响试验结果的各因素各水平的权重; 根据权重的大小, 确定最优方案以及各个因素对正交试验的指标值影响的主次顺序。结果表明方法能够很好地解决多指标正交试验设计中最优方案的选择问题。

关键词: 柱塞组合件; 正交试验设计; 指标权重; 权矩阵

中图分类号: TH131

文献标识码: A

Optimization design of the stability for the plunger assembly of oil pumps based on multi- target orthogonal test design

WEI Xiaoling, XUE Bingjun, ZHAO Qiang
(School of Electro Mechanics, Hebei University of Engineering, Hebei Handan 056038, China)

Abstract: In order to solve the problem including huge calculated amount and confirming the weights unreasonably which exist in multi- target orthogonal test method, multi- target orthogonal test design was optimized by matrix analysis. Three- layer structure model and the layer structure matrix of orthogonal test were established firstly, then weight matrix of test index can be worked out by matrix of each layer multiplication and the weights of the factors and levels having influences on the tests' results can be calculated. Finally the optimal plan and the important order of the factors' influences on the tests' index values can be determined according to the weights. The results show that the problem of selecting the optimal plan in multi- target orthogonal test design can be solved very well.

Key words: plunger assembly, orthogonal test design, weight of index, weight matrix

在多指标正交试验设计的优化分析中, 各个指标权重的确定是非常重要的环节, 它关系到整个试验设计最终的优化结果是否真实可靠。实际生产试验中, 对于多指标正交试验问题的解决普遍采用的方法是取各指标权重的平均值采用平均赋权法, 利用试验结果将多指标试验问题转化为单指标试验问题, 然后用单指标分析方法(直观分析法、方差分析法和效应分析法)对方案进行综合选优, 这种方法忽略了各指标的差异和重要性, 分析结果难免有失偏颇。文献[1]虽然考虑了各指标的重要程度的差异性, 采用主客观赋权法确定各指标的重要程度, 分析结果明显具有优越性, 但

计算工作量很大, 而且指标权重的确定具有一定的人为因素。为了有效地解决多指标正交试验设计的方案优化问题, 本文利用矩阵法计算各试验因素对各指标的影响程度, 直接根据权重大小快速确定因素的主次顺序, 很好地解决了多指标正交试验设计中的最优方案的选择问题。应用该方法对某高压油泵厂生产的32MPa高压轴向柱塞泵的柱塞组合件收口强度稳定性进行试验分析, 寻找满足各试验指标的最优工艺条件, 达到提高油泵柱塞组合件收口强度稳定性的目的。

收稿日期: 2010- 07- 01

基金项目: 河北省自然科学基金资助项目(F2010001047)

特约专稿

作者简介: 魏效玲(1963-), 女, 山西省河津市人, 教授, 从事机械设计理论方面的教学与科研工作。

表1 正交试验的数据结构

Tab. 1 Data structural of multi- target orthogonal test

第一层	试验考察指标												
第二层	因素 A_1				因素 A_2				...	因素 A_l			
第三层	A_{11}	A_{12}	...	A_{1m}	A_{21}	A_{22}	...	A_{2m}	...	A_{l1}	A_{l2}	...	A_{lm}

1 正交试验矩阵分析模型

设计一个正交试验(先不考虑交互作用),根据它的数据结构建立一个三层结构模型,如表1所示,第一层为试验考察指标层,第二层为因素层,第三层为水平层,根据各个层次的数据,给出如下的矩阵定义。

定义1 试验考察指标层矩阵:若正交试验中有 l 个因素,每个因素有 m 个水平,因素 A_i 第 j 个水平上的试验指标的平均值为 k_{ij} ,如果试验结果的考察指标是越大越好,则令 $K_{ij} = k_{ij}$,如果试验结果的考察指标是越小越好,则令 $K_{ij} = 1/k_{ij}$,建立(1)式矩阵。

定义2 因素层矩阵:令 $T_i = 1/\sum_{j=1}^m K_{ij}$ 建立(2)式矩阵。

定义3 水平层矩阵:正交试验中因素 A_i 的极差为 s_i ,令 $S_i = s_i/\sum_{i=1}^l s_i$,建立((3)式矩阵。

$$M = \begin{bmatrix} K_{11} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ K_{12} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ K_{1m} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & K_{21} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & K_{22} & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & K_{2m} & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & K_{l1} \\ 0 & 0 & 0 & \dots & K_{l2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & K_{lm} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$T = \begin{bmatrix} T_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & T_2 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & T_l \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$S = \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ \dots \\ S_l \end{bmatrix} \quad (3)$$

定义4 影响试验指标值的权矩阵: $\omega = MTS$

$$\omega^T = [\omega_1 \quad \omega_2 \quad \dots \quad \omega_m] \quad (4)$$

以上矩阵中 $\omega_1 = K_{11} T_1 S_1$, $K_{11} T_1$ 为 $K_{11}/\sum_{j=1}^m K_{ij}$, 是因素 A_1 第一水平的指标值占因素 A_1 所有水平的指标值总合的比; S_1 为 $s_1/\sum_{i=1}^l s_i$, 是因素 A_1 的极差占所有因素的极差总和的比,二者乘积的数值不仅能够反映因素 A_1 第一水平对指标值的影响程度,而且也能反映因素 A_1 极差的大小,其它的因素和水平也是如此,通过计算,可得出各因素各水平对试验结果考察指标影响的权重,根据权重能够得出最优方案以及影响因素的主次顺序。

2 实例分析

某高压油泵厂生产的油泵柱塞组合件是经过机械加工、组合收口、去应力、加工柱塞头外径等工序制成的。由生产实践经验认定,柱塞头的外径 ΦD 、高度 L 、倒角 $k \times \beta$ 、收口压力 p 等四个因素对组合件的稳定性指标有影响^[2-4]。试验前由于这些结构参数配合得不好,经常发生异常发热现象,使产品的质量很不稳定。为了解决这些问题,通过试验分析寻找四个因素的最优组合,使柱塞组合件的稳定性能最好。试验中各影响因素的水平有三种,因素水平见表2。要求的质量指标是拉脱力 $F \geq 1000N$ (越大越好),轴向游隙 $\delta \leq 0.02mm$ (越小越好),转角 $\alpha \geq 20^\circ$ (越小越好)。该试验为四因素三水平试验^[3-5],故选取 $L_9(3^4)$ 正交表,表头设计见表3,试验方案及试验结果见表4。

由表4试验结果的直观分析可知,对于拉脱力来说,最优方案是 $A_3 B_2 C_1 D_3$; 对于轴向游隙来说,最优方案是 $A_1 B_1 C_1 D_3$; 对于转角来说,最优方

表 2 因素水平表

Tab. 2 The table of the factor's level

水平	A ΦD _{-0.05} /mm	B L _{-0.05} /mm	C k × β°	D p/MPa
1	15.1	11.6	1.0 × 50°	1.5
2	15.3	11.8	1.5 × 30°	1.7
3	14.8	11.7	1.0 × 30°	2.0

需要采用综合平衡法、综合评分法以及画图法求解, 如果采用矩阵分析法, 分别计算出影响试验结果的三个考察指标的权矩阵, 可以快速得出最优方案。

表 3 表头设计

Tab. 3 The design of the table head

因素	A	B	C	D
列号	1	2	3	4

案是 A₃B₂C₂D₁, 这三种方案选哪一种, 通常情况下

表 4 试验方案、试验结果及结论

Tab. 4 The test's scheme, result and conclusion

试验号 Test number	因素 Factor				指标值 Index value		
	A	B	C	D	拉脱力 Pulling-out force F/N \bar{F}	轴向游隙 Axial play/mm $\delta_i = 7\,000 \times (\delta_i - 0.01)$	转角 Turn angle $\alpha/^\circ$ $\bar{\alpha}_i$
1	1(15.1)	1(11.6)	1(1 × 50°)	1(1.5)	6 000/7	20	165.5/7
2	1	2(11.8)	2(1.5 × 30°)	2(1.7)	6 660/7	48	139/7
3	1	3(11.7)	3(1 × 30°)	3(2.0)	6 360/7	27	157.5/7
4	2(15.3)	1	2	3	6 145/7	6	161.5/7
5	2	2	3	1	6 810/7	128	130/7
6	2	3	1	2	6 290/7	25	166.5/7
7	3(14.8)	1	3	2	5 620/7	28	158.5/7
8	3	2	1	3	7 210/7	52	140.5/7
9	3	3	2	1	6 490/7	56	135.5/7
K ₁	905.71	845.95	928.57	919.05	拉脱力直观分析		
K ₂	916.43	984.76	918.81	884.29			
K ₃	920	911.43	894.76	938.81			
R	14.29	138.81	33.81	54.52			
优方案	A3	B2		C1	D3		
K ₁	31.66	18	32.30	68.00	轴向游隙直观分析		
K ₂	53.00	76	36.60	33.60			
K ₃	45.30	36	61.00	28.30			
R	21.34	58	28.70	39.70			
优方案	A1	B1	C1	D3	转角直观分析		
K ₁	22.00	23.12	22.50	20.52			
K ₂	21.81	19.50	20.76	22.10			
K ₃	20.69	21.88	21.24	21.88			
R	1.31	3.62	1.74	1.58			
优方案	A3	B2	C2	D1			

注: (1) $\bar{F}_i, \delta_i, \bar{\alpha}_i$ 为七次重复试验数据的平均值; (2) 表 4 中数据处理 δ_i 只是为了简化计算, 不影响 δ_i 的计算结果。

第一个考察指标为拉脱力,越大越好,采用矩阵分析法,其权矩阵 ω_1 的计算过程为

$$M_1 = \begin{bmatrix} 905.71 & 0 & 0 & 0 \\ 916.43 & 0 & 0 & 0 \\ 920 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 845.95 & 0 & 0 \\ 0 & 984.76 & 0 & 0 \\ 0 & 911.43 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 928.57 & 0 \\ 0 & 0 & 918.81 & 0 \\ 0 & 0 & 894.76 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 919.05 \\ 0 & 0 & 0 & 884.29 \\ 0 & 0 & 0 & 938.81 \end{bmatrix}$$

$$T_1 = \begin{bmatrix} \frac{1}{274.214} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{274.214} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{274.214} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{274.214} \end{bmatrix}$$

$$S_1 = \begin{bmatrix} \frac{14.29}{241.43} \\ \frac{138.81}{241.43} \\ \frac{33.81}{241.43} \\ \frac{54.52}{241.43} \end{bmatrix}$$

$$\omega_1 = M_1 T_1 S_1 =$$

$$\begin{bmatrix} 905.71 & 0 & 0 & 0 \\ 916.43 & 0 & 0 & 0 \\ 920 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 845.95 & 0 & 0 \\ 0 & 984.76 & 0 & 0 \\ 0 & 911.43 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 928.57 & 0 \\ 0 & 0 & 918.81 & 0 \\ 0 & 0 & 894.76 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 919.05 \\ 0 & 0 & 0 & 884.29 \\ 0 & 0 & 0 & 938.81 \end{bmatrix} \times$$

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{274.214} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{274.214} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{274.214} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{274.214} \end{bmatrix} \times$$

$$\begin{bmatrix} \frac{14.29}{241.43} \\ \frac{138.81}{241.43} \\ \frac{33.81}{241.43} \\ \frac{54.52}{241.43} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.01954 \\ 0.01978 \\ 0.01986 \\ 0.17737 \\ 0.20647 \\ 0.19110 \\ 0.04747 \\ 0.04692 \\ 0.04568 \\ 0.07568 \\ 0.07282 \\ 0.07731 \end{bmatrix}$$

第二个考察指标为轴向游隙(越小越好),第三个考察指标为转角(越小越好),采用矩阵分析法,其权矩阵 ω_2 、 ω_3 (略)的计算过程为

$$M_2 = \begin{bmatrix} \frac{1}{31.66} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{53} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{45.3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{18} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{76} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{36} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{32.3} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{36.6} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{61} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{68} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{33.6} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{28.3} \end{bmatrix}$$

$$T_2 = \begin{bmatrix} 13.7877 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 10.3638 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 13.3905 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 12.5313 \end{bmatrix}$$

$$S_2 = \begin{bmatrix} \frac{21.34}{147.74} \\ \frac{58}{147.74} \\ \frac{28.7}{147.74} \\ \frac{39.7}{147.74} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 0.04471 \\ 0.03650 \\ 0.03959 \\ 0.17958 \\ 0.14015 \\ 0.14904 \\ 0.06503 \\ 0.06358 \\ 0.05313 \\ 0.06400 \\ 0.07902 \\ 0.08632 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix}$$

$$\omega_2 = M_2 T_2 S_2 = \begin{bmatrix} 0.06290 \\ 0.03758 \\ 0.04396 \\ 0.22604 \\ 0.05354 \\ 0.11302 \\ 0.08053 \\ 0.07108 \\ 0.04264 \\ 0.04952 \\ 0.10021 \\ 0.11898 \end{bmatrix} \quad \omega_3 = \begin{bmatrix} 0.05169 \\ 0.05214 \\ 0.05496 \\ 0.13533 \\ 0.16045 \\ 0.14300 \\ 0.06710 \\ 0.07273 \\ 0.07108 \\ 0.06681 \\ 0.06204 \\ 0.06267 \end{bmatrix}$$

此正交试验考察指标的总权矩阵为三个指标值的权矩阵的平均值, 计算过程如下:

$$\omega = \frac{\omega_1 + \omega_2 + \omega_3}{3} = \frac{1}{3} \times \begin{bmatrix} 0.01954 \\ 0.01978 \\ 0.01986 \\ 0.17737 \\ 0.20647 \\ 0.19110 \\ 0.04747 \\ 0.04692 \\ 0.04568 \\ 0.07568 \\ 0.07282 \\ 0.07731 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.06290 \\ 0.03758 \\ 0.04396 \\ 0.22604 \\ 0.05354 \\ 0.11302 \\ 0.08053 \\ 0.07108 \\ 0.04264 \\ 0.04952 \\ 0.10021 \\ 0.11898 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.05169 \\ 0.05214 \\ 0.05496 \\ 0.13533 \\ 0.16045 \\ 0.14300 \\ 0.06710 \\ 0.07273 \\ 0.07108 \\ 0.06681 \\ 0.06204 \\ 0.06267 \end{bmatrix} =$$

由以上计算可得各个因素对正交试验的指标值影响的主次顺序(主[→]次)为 BDCA; 因素 A₁、B₁、C₁、D₃ 的权重最大, 正交试验的最优方案为 A₁B₁C₁D₃ (柱塞组合件最优工艺条件为 A₁B₁C₁D₃), 即: 柱塞头上口外径为 $\Phi_{D-0.05} = 15.1_{-0.05} \text{ mm}$; 柱塞头高度为 $L_{-0.05} = 11.6_{-0.05} \text{ mm}$; 柱塞头上口倒角为 $k \times \beta = 1.0 \times 50^\circ$; 收口压力为 $p = 2.0 \text{ MPa}$ 时, 油泵柱塞组合件收口强度的稳定性最好。通过调整柱塞组合件的结构参数, 柱塞组合件收口强度的稳定性得到了提高, 解决了生产中的实际问题, 成品的合格率由原来的 69% 提高到 90% 以上。

3 结论

柱塞头结构参数分析结果比原试验分析结果的稳定性提高了 17%。本文的矩阵分析法对于解决多指标正交试验设计的优化问题是一种新的尝试, 该方法计算简单, 分析过程严谨, 计算结果具有很强的说服力, 在现阶段不失为一种非常有效的方法。

参考文献:

- [1] 魏效玲, 张昌健, 薛会民, 等. 油泵柱塞组合件收口强度稳定性试验分析[J]. 机械强度, 2006, 28(5): 771-774.
- [2] 周玉珠. 正交试验设计的矩阵分析方法[J]. 数学的实践与认识, 2009, 39(2): 202-207.
- [3] 赵敏, 钟志华. 基于正交试验设计的微型轿车侧撞安全性研究[J]. 汽车工程, 2010, 32(5): 409-412.
- [4] 杜金萍, 王桂梅. XX-2 不锈钢切削参数模糊正交优化[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2007, 24(2): 65-69.
- [5] 李海红. 正交试验法优选对苯二甲酸回收条件[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2008, 25(2): 48-51.