

doi: 10.7690/bgzdh.2024.05.004

正交试验设计方法在工艺方案设计中的应用

伍鹏宇¹, 唐福农², 裴劲²

(1. 海军装备部, 成都 610100; 2. 国营第 167 厂, 成都 610100)

摘要: 为快速找出最优组合, 研究正交试验设计方法在工艺方案设计中的应用。通过试验实例说明正交试验设计的优点、简易正交试验设计的基本方法和极差分析法, 确定因子的主次和最优组合。结果表明, 该方法能迅速找到最佳工艺方案。

关键词: 工艺方案设计; 正交试验设计; 最优组合

中图分类号: TH162 **文献标志码:** A

Application of Orthogonal Experimental Design Method in Process Scheme Design

Wu Pengyu¹, Tang Funong², Pei Jin²

(1. Naval Equipment Department, Chengdu 610100, China; 2. No. 167 Factory, Chengdu 610100, China)

Abstract: In order to find out the optimal combination quickly, the application of orthogonal experimental design method in process scheme design was studied. The advantages of orthogonal experimental design, the basic method of simple orthogonal experimental design and the range analysis method are illustrated by experimental examples to determine the primary and secondary factors and the optimal combination. The results show that this method can quickly find the best process scheme.

Keywords: process scheme design; orthogonal experimental design; optimal combination

0 引言

现代工业产品的设计、工艺和制造等阶段紧密相连。在工艺过程的设计中, 通常包括工艺方案设计、工艺方法选择、工艺流程设计和工艺规程编制等主要阶段。在工艺方案设计中, 常常存在多种可行方案, 需要通过科学分析、试验验证以及客观论证和评价进行选择。为了研制新产品、改革生产工艺和寻找优良的生产条件, 生产和科研过程中需要进行多种因素的试验。在多因素影响的试验中, 如何用尽可能少的试验次数找出最优组合, 同时从试验数据中获取更多信息, 是试验设计需要解决的主要问题^[1]。解决科学研究、工程设计、生产管理等领域的实际问题时, 实现过程和目标的最优解已成为必要任务。正交试验设计是一种研究多因素多水平的设计方法, 其通过正交性原则选择部分有代表性的点进行试验, 大大减少了试验次数和试验周期, 从而节省了实验成本。正交试验设计的主要优点在于可以选择少数几个试验方案, 这些方案代表性较强。通过这些试验方案的结果分析, 可以得出最优方案的推断, 为提高产品质量和产业效益提供了有力支持。

1 正交试验设计和结果处理

1.1 正交试验设计

正交试验设计是一种优秀的试验方法, 其主要优点在于试验次数较少, 能够找出最优组合, 并且可以用数理统计的方法分清影响因子的主次和交互, 从而有效控制试验条件, 减小误差并指导下一步试验的方向^[2]。

正交表是正交试验设计的基本工具, 每一张等水平正交表都有自己的表号, 如 $L_4(2^3)$ 、 $L_8(2^7)$ 和 $L_9(3^4)$ 等。其中, L 是正交表的代号; n 是正交表的行数, 即需要实施试验的次数; m 是正交表同一列中出现的不同数字个数, 即影响因子的水平; k 表示正交表列数, 即正交表最多能安排的因子数。

例如, 在轴承圈退火工艺试验中, 试验的目的是寻求最佳的退火工艺, 以提高产品的硬度合格率。影响轴承圈硬度合格率的因子有许多, 如加热介质、加热方法、加热温度、加热速率、保温时间、出炉温度、冷却速度和试件加工质量等。为了减少试验次数, 本次试验只选取加热温度、保温时间和出炉温度这 3 个试验因子, 其他因子则作为试验条件处理。通过正交试验设计, 可以得到表 1 中的因子水

平表，以便更好地安排试验。

表 1 轴承圈退火试验因子水平

因子水平	A 加热温度/°C	B 保温时间/h	C 出炉温度/°C
1	800	6	400
2	820	8	500

选用适当的正交表，制定试验方案。对于上例而言，若选用全面实验法 $2^3=8$ 次，正交表 $L_4(2^3)$ 能安排下 3 个因素因子，试验次数为 4 次，则选用 $L_4(2^3)$ 进行试验设计，见表 2 所示。为简洁表格，各因子水平可用 1、2……代写。

表 2 轴承圈退火试验设计方案 $L_4(2^3)$

试验次数	因子水平		
	A	B	C
1	1	1	1
2	1	2	2
3	2	1	2
4	2	2	1

按上表试验认真准备。试验过程中，除因子外的影响因素严格控制，试验条件尽量保持一致，并对指标值做好记录。

1.2 试验结果处理

试验结果的处理旨在确定试验因子的主次、各试验因子的优水平项以及试验范围内的最优组合。

表 3 轴承圈退火试验方案与结果分析

试验号	A/°C	B/h	C/°C	硬度合格率/%
1	800	6	400	$y_1=95$
2	800	8	500	$y_2=85$
3	820	6	500	$y_3=45$
4	820	8	400	$y_4=65$
K_{1j} (1 水平数据和)	$K_{11}=y_1+y_2=180$	$K_{12}=y_1+y_3=140$	$K_{13}=y_1+y_4=160$	
K_{2j} (2 水平数据和)	$K_{21}=y_3+y_4=110$	$K_{22}=y_2+y_4=150$	$K_{23}=y_2+y_3=130$	
k_{1j} (1 水平均值) $=K_{1j}/2$	90	70	80	
k_{2j} (2 水平均值) $=K_{2j}/2$	55	75	65	
极差 $R_j=k_{ijmax}-k_{ijmin}$	35	5	15	
因子主次	A	C	B	
最优组合	A_1	C_1	B_2	

通过极差分析法，可以得出试验结果的各个要素，从而更好地指导试验的进行并确定最优组合，对于优化工艺、提高产品质量和降低成本具有重要意义。

由正交表的性质^[4]，各试验结果之间无单独可比性，所以需要进行综合可比性分析。如在上例中要比较 A_1 、 A_2 的优劣，仅用 1、3 号试验结果比较是不行的，因为这 2 次试验中 B、C 因子的水平不一致，难以分清这 2 次结果的差异是 A 因子水平变动还是 B、C 因子的水平不同造成的。而综合比较则能看出各因子不同水平的作用，如表 4 所示， A_1 所对应的 1、2 号试验结果， A_2 对应的 3、4 号试验结果分别相加除 2，可看出 A_1 优于 A_2 ，而在与 A_1

正交设计的基本方法是基于正交表的综合可比性，利用极差分析法对试验结果进行分析，来确定因子的主次和最优组合^[3]。如图 1 所示，极差分析法是一种非常直观和简便的方法，包括计算和判断 2 个步骤。

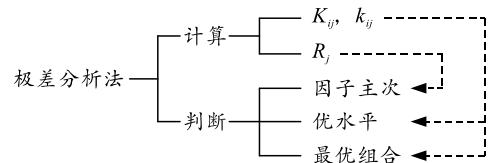


图 1 极差分析法

上图中， K_{ij} 表示第 j 个因子的第 i 个水平的数据和，即第 j 个因子的第 i 个水平所对应的试验指标值之和； k_{ij} 是 K_{ij} 的平均值，被称为 j 因子 i 水平的平均值。通过 k_{ij} 的大小，可以判断 j 因子的优水平和试验中的最优组合。 R_j 表示第 j 个因子的极差，即 j 因子最大水平均值 k_{ijmax} 与最小水平均值 k_{ijmin} 之差。 R_j 反映了第 j 个因子水平变动时，试验指标的变动幅度。当 R_j 越大时，说明该因子对试验指标的影响越大，因此可以推断该因子在试验中的主要影响因素。极差分析法的计算和判断可以直接在试验方案及结果分析表中进行，如表 3 所示。

所对应的 1、2 号试验中以及 A_2 对应的 3、4 号试验中，B、C 两因子各水平均出现，可见，综合可比性存在。用同样的方法可对 B、C 因子进行分析。

表 4 A 因子综合可比性分析

水平	试验号	A/°C	B/h	C/°C	硬度合格率/%
1	1	800	6	400	$K_{11}=y_1+y_2=180$
	2	800	8	500	$k_{11}=K_{11}/2=90$
2	3	820	6	500	$K_{21}=y_3+y_4=110$
	4	820	8	400	$k_{21}=K_{21}/2=55$

试验因子对指标的主次由极差 R_j 决定，计算 R_j 得到因子主次的影晌顺序：A、C、B，见表 3 中的 R_j 计算结果。

由水平均值确定各因子的优水平，从而确定试验因子的最优组合。在上例中，指标是硬度合格率，

即合格率越高越好，这样就确定出上例的最优组合为：A₁、C₁、B₂，见表 3 中的 k_{ij} 计算结果。

当然，最优组合 A₁、C₁、B₂ 是试验范围内的最优，为进一步试验标明了方向。如上例中硬度合格率随因子 A、C 的减少而增加，可以取 A、C 更小的试验水平，进一步试验找到更优的组合。对试验充分分析，可以通过工程平均估算出最优值：

$$U_{\text{优}} = \text{各因子优水平均值之和} - (\text{因子个数} - 1)u。$$

式中 $u = \sum_{i=1}^n y_i / n$ ，将表 3 中的数据导入上式得到最优值为：

$$U_{\text{优}} = (90 + 75 + 80) - (3 - 1) \times 290 / 4 = 100。$$

通过 $U_{\text{优}}$ 表明在理想状态下可获得 100% 合格率。

2 纸折飞机试验验证

设计一个纸折飞机正交试验。

试验目的：寻找纸折飞机最佳制作工艺；

试验指标：纸折飞机在空中的飞行时间，s。

本试验确定纸张长宽比、飞机类型、放飞角度为试验因子，分别用 A、B、C 表示，每个因子都取三水平，其余因子无论可控与否，均作为试验条件处理。列出试验的因子水平表 5，它是选用正交表^[2]的依据。

表 5 因子水平

因子	A 长宽比(定长 210 mm)	B 飞机类型	C 放飞角度/(°)
1	1/2	不翻折	30
2	2/3	翻折尖头	45
3	3/4	翻折秃头	60

对次例而言，由于为三水平试验，全面实验法需要 3³ 次，则选用 L₉(3⁴) 正交表进行试验设计。试验方案及结果分析见表 6 所示。

表 6 试验方案及结果分析 L₉(3⁴)

试验号	A 长宽比	B 飞机类型	空列	C 放飞角度/(°)	试验结果飞行时间/s
1	1/2	不翻折	1	30	1.7
2	1/2	翻折尖头	2	45	1.8
3	1/2	翻折秃头	3	60	2.1
4	2/3	不翻折	2	45	1.2
5	2/3	翻折尖头	3	60	2.9
6	2/3	翻折秃头	1	30	2.7
7	3/4	不翻折	3	60	1.5
8	3/4	翻折尖头	1	30	2.2
9	3/4	翻折秃头	2	45	2.3
k_{1j}	1.87	1.47	2.20	2.30	$K = \sum_{i=1}^9 y_i = 18.4$ $u = \frac{1}{9} \sum_{i=1}^9 y_i = 18.4 / 9$
k_{2j}	2.27	2.30	1.77	2.00	
k_{3j}	2.00	2.37	2.40	1.83	
极差 R	1.20	2.70	1.89	1.41	
因子主次	B	C		A	
最优组合	B ₃	C ₁		A ₂	

通过极差分析，计算得到因子主次的影响顺序：B、C、A；由水平均值 k_{ij} 确定各因子的优水平，从而确定最优组合：B₃、C₁、A₂。如表 6 所示。

对表 6 数据结构分析，会发现存在一空列，它没有排列任何因子。空列存在的意义在于考察 A、B 因子的交互作用，以及反映随机误差对试验的影响。空列极差的大小反映了试验误差的大小，可用作估计误差，就表 6 所示示例看，此次试验误差影响很大，超过了大部分试验因子水平的影响。

将表 6 中的数据导入最优值公式得到最优值为：

$$U_{\text{优}} = (2.27 + 2.37 + 2.3) - (3 - 1) \times 18.4 / 9 = 2.85。$$

通过计算得到的 $U_{\text{优}}$ 低于第 5 次试验的 2.9 s，而且第 5 次试验的试验因子与试验最优组合 B₃、C₁、A₂ 也不太相符，可推断第 5 次数据不正常，试验干

扰过大，试验条件处理不当，如：人为掐定秒表时间不准确。设计试验时应充分处理试验条件。

3 结束语

正交试验设计法是一种科学的试验设计方法，用于安排和分析多因子试验。该方法通过一套精心设计的表格进行试验设计，称为正交表。正交表具有正交性、均衡分散和整齐可比的特点，因此每个试验都有较强的代表性。只要按照正交表规定完成试验，就可以比较全面地反映试验情况。然后，对正交试验设计法的配方进行结果分析，可以采用直观分析法和方差分析法。

通过对试验结果数据的分析，可以确定以下内容：1) 对指标影响显著的因子和对指标影响不重要的因子；2) 对指标最有利的水平组合；3) 在最优水平组合下指标的大致变化范围；4) 进一步试验的

方向。正交试验设计法具有试验次数少、试验点代表性好的特点，既能用直观分析法又能用方差分析法对结果进行分析，得出因子的显著性和最佳水平组合。

正交试验设计的优点：1) 对因素的个数没有严格限制；2) 当因素具有或不具有交互作用时，都可以使用该设计；3) 可以通过正交表进行试验比较得出初步结论，也可以通过方差分析得出具体结论，并获得最佳试验条件；4) 根据正交表和试验结果，可以估计出任何一种水平组合下试验结果的理论值；5) 利用正交表和多种水平组合，可以挑选具有代表性的试验点进行试验，不仅以全面试验大大减少试验次数，而且通过试验分析可以找出好的试验点。

正交试验可以帮助工程师进行工艺设计，准确地分析试验结果，优化各因素的组合。科学的试验设计不仅减少试验次数，而且这些少量的试验都具有极强的代表性，能够获取丰富的试验数据信息。通过处理试验结果数据，可以获得更多的优化结果。

(上接第 3 页)

3) 实现了 2 座风洞试验的无缝衔接。同一模型在不同风洞交替进行试验，实现了通道配置导入导出，无障碍转场。

4) 增强了试验装备的保障效能。软硬件兼容的通用试验平台，实现了不同风洞同种功能的设备互为备件，测压试验装备的保障效能进一步提高。

4 结束语

线缆的规范建设使现场接线井然有序，有利于故障排查和提高工作效率。2.4 m 跨声速风洞驻室电源改造增强电源供电的可靠性，大大降低了接线板使用带来的隐患。信号转接盒的设计提高了试验准备的效率，减小了人为操作失误的可能性。软件的通用化改进吸收 2 座风洞原功能上的优点，形成统一的兼容 2 座风洞的操作软件。2 座风洞信号调理通道拓展建设项目已按照计划完成所有研制内容，达到了设计技术指标要求。系统在静态调试和风洞试验中，运行稳定可靠，软件功能完善，交互性好，表明系统研制取得成功，提升了 2.4 m 跨声

速风洞和 2 m 超声速风洞多天平衡力试验能力，为多天平衡力试验项目的完成提供了必要的保障。

正交试验可以涉及各种因素，例如工时和资源消耗等，可以找出最优成本方案。通过应用正交试验设计法在企业工艺允许的范围内进行控制，可以迅速找到最佳条件，提高产品质量或产量，并大幅度降低生产成本。对于科学研究和实际生产中探索新工艺，进行优化设计和试验验证等，采用正交试验设计法是一种有效的方法。

参考文献：

- [1] 茆诗松. 回归分析与试验设计[M]. 上海: 华东师范大学出版社, 1981: 26-38.
- [2] 方开泰. 均匀分析与均匀设计表[M]. 北京: 科学出版社, 1994: 10-14.
- [3] 杨子胥. 正交表的构造[M]. 济南: 山东人民出版社, 1978: 5-13.
- [4] 陈魁. 试验设计与分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996: 6-21.

速风洞和 2 m 超声速风洞多天平衡力试验能力，为多天平衡力试验项目的完成提供了必要的保障。

2 座风洞的规范化能够有效整合各个风洞的测压系统设备资源，提高试验效率与装备利用率。如何进一步完善和改进试验平台，对以后的试验有重要意义。面对未来不断发展变化的试验需求，笔者将在提高试验效率与精细化水平方面进行改进。

参考文献：

- [1] 李平, 芮伟, 秦建华, 等. 2 m×2 m 超声速风洞测量系统与运行管理系统研制[J]. 实验流体力学, 2012, 26(4): 96-100.
- [2] 唐亮, 李平, 秦建华, 等. 某跨声速风洞测量系统[J]. 兵工自动化, 2016, 35(9): 82-85.
- [3] 高川, 刘峰, 周波, 等. 某超声速风洞测控系统[J]. 兵工自动化, 2013, 32(2): 63-66.
- [4] 杜宁, 芮伟, 龙秀虹. HNC100 电液智能控制器在 2.4 m 跨声速风洞中的应用[J]. 兵工自动化, 2013, 32(3): 66-69.
- [5] 黄庆, 谢艳, 蒋鸿, 等. 数字压力控制器远程监控系统研制及应用[J]. 兵工自动化, 2014, 33(11): 50-52.