

文章编号:0253-9993(2009)02-0257-05

# 基于均匀试验和响应面法的矿用风动水泵稳健设计

魏效玲, 于治福, 王宏伟

(河北工程大学 机电工程学院, 河北 邯郸 056038)

**摘要:** 针对目前矿用风动水泵在煤矿井下辅助排水过程中效率低、噪声大的问题, 根据生产经验和现场使用情况分析影响风动水泵性能的相关因素, 建立响应量与影响因素之间的响应面模型进行稳健设计. 结合实例, 用正交试验设计确定影响水泵效率的主要因素, 通过最速上升法找到稳定区域, 最后用均匀试验设计的响应面法拟合稳定点附近的二阶响应面模型, 并分析优化得出水泵效率的稳健设计最优解. 通过对样机进行验证表明: 水泵效率较原来提高了12.63%, 且其波动减小, 质量得到改善, 达到了稳健设计的目的.

**关键词:** 均匀设计; 响应面法; 矿用风动水泵; 稳健设计

**中图分类号:** TD442.2      **文献标识码:** A

## The robust design of mine pneumatic pump based on response surface methodology and uniform design

WEI Xiao-ling, YU Zhi-fu, WANG Hong-wei

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

**Abstract:** Aimed at the low efficiency and big noise of mine pneumatic pump assistant drain, and based on the related factors influencing the pneumatic pump performance under production experience and field usage, made robust design through establishing the response surface model between response value and influencing factors. Then used the orthogonal experimental design to get the main factors of affecting the pump efficiency to make the stable area by steepest arising method. Finally, fitted the second-order response surface model around the stable point by using the response surface methodology of uniform experimental design to get the best solution of pump efficiency. The validate result makes that the pump efficiency raises 12.63% and the fluctuation reduces, the quality improves and reaches the robust design's aim.

**Key words:** uniform design; response surface methodology (RSM); mine pneumatic pump; robust design

效率是矿用风动水泵的重要性能参数之一, 风动水泵效率受风动叶轮及进风系统的影响, 其中风动系统叶轮的叶片弯度、数量、喷嘴的形状、角度及安装位置是主要的影响因素. 在以往的矿用风动水泵试验研究中, 往往采用正交试验设计的方差分析和信噪比值来决定各因素的最佳取值<sup>[1]</sup>, 但正交试验法有局限性, 它只能用于因素较多而水平较少的试验, 对于多水平的因素来讲不仅安排试验的难度提高, 而且试验的成本也会成比例的增加, 同时效率与这些影响因素并不完全存在显性的函数关系, 常规的优化设计受到局限. 即使采用神经网络等先进方法, 也存在着编程不便和通用性不强等问题, 计算操作烦琐, 效率

收稿日期: 2008-03-25      责任编辑: 许书阁

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60075013); 河北省自然科学基金资助项目(601312)

作者简介: 魏效玲(1963—), 女, 山西河津人, 硕士, 教授. E-mail: wxlcsn@163.com

低, 而使用响应面法可有效克服这一困难.

响应面法是以试验设计为基础用于处理多变量问题建模和分析的一套统计处理分析技术, 与稳健设计相融合, 是国内外近年来比较流行的一种有效的稳健设计方法. 它依靠目标函数本身的性质确定最优解, 运用回归分析方法拟合出复杂的、精度较高的响应关系, 具有良好的稳健性. 尽管稳健设计的应用很广泛, 但对于风动水泵的稳健设计的应用却很少, 本文将均匀设计的响应面法用于矿用风动水泵风动系统的稳健设计中, 避免了复杂系统常规设计方法计算量大、计算操作复杂的缺点<sup>[2-3]</sup>, 同时使试验数据均匀地分布在设计空间中, 能全面反应设计对象的内在性质, 为后续的回归分析提供了精度保证. 通过实例建立显著设计变量与目标函数的响应面模型, 寻找风动系统主要结构参数的最佳取值, 得到水泵效率的稳健设计解.

## 1 基于均匀设计的响应面法的稳健设计原理

### 1.1 基于响应面法的稳健设计

稳健设计是使所设计的产品(或系统)无论在制造或使用中当结构参数发生微小的变差、或是在规定的寿命内当结构材料发生老化和变质时, 都能保证产品质量稳定的一种工程设计方法<sup>[4]</sup>. 响应面法稳健设计就是把响应面法应用到稳健设计中来, 先用少数几次试验筛分出影响产品质量特性或者与噪声因素相互影响的主要设计参数, 从这些试验中拟合出线性模型, 通过模型分析查明在设计空间中参数的变动范围, 并弄清应按哪个方向去寻找最佳的设计参数值; 当设计参数的变动区域确定后, 进行最后的试验, 拟合出二阶的响应面模型, 通过模型分析, 找出问题的稳健设计最优解, 得到设计参数值的最佳组合<sup>[5]</sup>.

### 1.2 响应面法稳健设计中的试验设计

稳健设计中试验设计是基础, 是研究如何合理有效地获得质量特性信息的重要方法. 在响应面法稳健设计中试验设计尤为重要, 它涉及到试验结果(响应量)的选取, 响应变量及其水平值的选择、试验安排、信息数据获取和综合地进行科学的数理统计分析、最佳结果的确定等. 因此试验设计的好坏直接影响拟合模型的合理性与精度的高低, 影响设计参数值的最佳组合点的选取<sup>[5]</sup>. 在响应面模型法中常用的试验设计有中心组合设计、正交试验设计和拉丁方设计, 相比较来说各有其优缺点. 均匀设计在响应面模型法的应用中并不多, 但有很好的应用前景, 它的基本思想就是对试验方案作合理安排, 在较少试验次数的情况下, 使试验数据有合适的数学模型, 从而保证响应面的精度. 均匀设计的试验点密度可以更高, 在整个设计空间中分布得更均匀. 本案例中, 对一阶响应面设计采用正交试验设计方法, 对二阶响应面设计采用均匀试验设计方法, 这样将均匀设计和响应面法运用到复杂系统的稳健设计中, 通过数学处理找出复杂模型的响应面模型, 使响应面模型精度更高, 更能反映出系统的性能<sup>[3]</sup>.

## 2 KFB30-18 风动水泵风动叶轮稳健设计

### 2.1 设计变量的确定与试验的安排

影响风动水泵效率的主要因素为叶片弯度、叶片数量、喷嘴形状、喷嘴角度和喷嘴位置, 其中喷嘴位置对水泵效率的影响最小可以忽略不计<sup>[6]</sup>, 其余 4 个因素取三水平安排试验, 试验目的是找出整机效率最好的水泵. 叶片弯度、叶片数量、喷嘴形状、喷嘴角度 4 个设计变量的因素水平见表 1. 根据设计变量的个数和水平数选择  $L_9(3^4)$  正交表, 共进行 9 次试验, 试验系统如图 1 所示. 在试验过程中对不同参数组合的 9 台水泵进行试验测试, 通过调节水泵的流量, 每种条件下测试 8~10 个工况的风压、风量、水泵的扬程、流量和转速等参数, 分别计算风的输入功率和水的输出功率, 得到水泵的整机效率.

### 2.2 一阶响应面正交试验设计与分析

用叶片弯度  $x_1$ 、叶片数量  $x_2$ 、喷嘴形状  $x_3$  和喷嘴角度  $x_4$  四个变量拟合的一阶响应面模型为

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \cdots + \beta_n x_n + \varepsilon_y.$$

表1 响应面分析因素与水平

Table 1 Analytical factors and levels for RSM

试验因素	因素水平与编码		
	-1	0	+1
叶片弯度/mm	3	4	5
叶片数量/片	60	72	88
喷嘴形状	双孔 I	双孔 II	三孔
喷嘴角度/ (°)	65	70	75

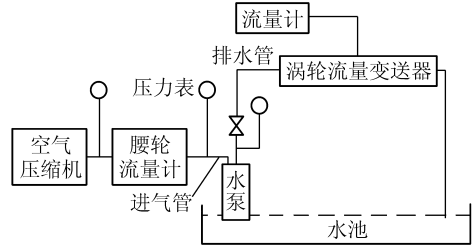


图1 矿用风动水泵试验系统

Fig. 1 The experiment system of mining wind-driven water pump

根据正交试验设计的9次试验结果，通过统计分析回归方程不显著，依次剔除变量  $x_2, x_3$  后，回归方程显著， $y = 477.3411 - 2.1267x_1 - 6.0523x_4$ ，回归模型方差分析见表2。

表2 一阶拟合模型方差分析

Table 2 The variance analysis of single fitting model

方差来源	偏差平方和 $s$	自由度 $f$	方差 $v$	统计量 $F$	$F_{0.05}(2,6)$
拟合偏差 $s_p$	5 521.747	2	2 760.874	8.239	5.143
残差偏差 $s_e$	2 010.615	6	335.101		
总偏差 $s_T$	7 532.362	8			

由于一阶响应面模型只能筛选出对响应量影响的显著因素，而不能确定最优点所在的区域，需根据因子试验的结果设计1个最速上升试验来寻找稳定区域（最优点所在的区域）。具体试验时，把试验因素  $x_2, x_3$  固定在原点 ( $x_2 = 72$  个,  $x_3 =$  双孔 II) 针对

表3 最速上升试验结果

Table 3 Experimental design of steepest ascent and corresponding responses

试验号	快速登高点的坐标		水泵效率 $y/\%$
	$x_1$	$x_4/ (^\circ)$	
1	3.8	70	22.68
2	3.6	68	23.89
3	3.4	66	23.44
4	3.2	64	19.37
5	3.0	62	10.42

$x_1, x_4$  设计最速上升路线，本次一阶响应面模型的梯度方向为  $(-2.1267, -6.0523)$ 。  $x_1, x_4$  设计变量的中心点为  $(4, 70)$ ，依此中心为基础沿梯度方向制定快速登高法的试验，见表3。

由表3的试验结果可以看出：当叶片弯度（弦高）为 3.6 mm，喷嘴角度为  $68^\circ$  时，水泵效率最高 23.89%，在点  $(3.6, 68^\circ)$  的试验结果最大，增加或减少设计变量试验结果的趋势都降低。因此，以此点为中心来进行二阶响应面模型拟合，二阶响应面模型的设计变量范围：叶片弯度  $x_1$  为 3.2 ~ 4.0 mm；喷嘴角度  $x_4$  为  $64 \sim 72^\circ$ 。

### 2.3 基于均匀设计的二阶响应面设计与分析

#### 2.3.1 均匀设计的响应面法的模型的建立

为了提高二阶响应面模型的精度，对叶片弯度和喷嘴角度2个设计变量分别取9个水平值，采用均匀设计表  $U_9^*(9^4)$  来安排试验，试验因素水平和试验结果见表4。

表4 因素水平和试验结果

Table 4 The factors level and experiment results

变 量	试验号	试验号								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
因素	$x_1$	3.2	3.3	3.4	3.5	3.6	3.7	3.8	3.9	4.0
水平	$x_4$	64	65	66	67	68	69	70	71	72
试验结果	叶片弯度 $x_1/\text{mm}$	3.2	3.3	3.4	3.5	3.6	3.7	3.8	3.9	4.0
	喷嘴角度 $x_4/ (^\circ)$	66	69	72	65	68	71	64	67	70
	效率/ $\%$	17.985	14.594	14.105	21.048	17.411	15.491	23.603	19.13	16.377

试验因素  $x_1$  和  $x_4$  的水平选择是等间距的, 根据均匀设计试验结果采用正交多项式拟合响应面模型为

$$\hat{y}(x) = \hat{\beta}_0 + \sum \hat{\beta}_{1i} \varphi_{1i}(x) + \sum \hat{\beta}_{2i} \varphi_{2i}(x).$$

利用试验结果和正交多项式的计算公式, 得响应面方程为

$$\hat{y}(x) = 984.85 + 24.15x_1 - 31.03x_4 - 4x_1^2 + 0.24x_4^2.$$

通过方差分析和  $F$  检验该模型在给定显著水平 0.05 下是显著的, 统计量  $F = 13.78 > F(2, 6, 0.05) = 5.143$ .

### 2.3.2 模型分析与优化

根据拟合的二阶模型可得矩阵  $b$  和  $B$  分别为

$$b = \beta = \begin{bmatrix} \hat{\beta}_1 \\ \hat{\beta}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 24.15 \\ -31.03 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} \hat{\beta}_{11} & \hat{\beta}_{12}/2 \\ \hat{\beta}_{12}/2 & \hat{\beta}_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -4 & 0 \\ 0 & 0.24 \end{bmatrix}.$$

求得稳定点  $x_0 = B^{-1}b/2 = (x_{10}, x_{20})^T = (3.0188, 64.6458)$ , 由此求得  $x_0$  处估计的响应值为  $\hat{y}_0 = 18.3213\%$ . 为求回归方程典型的规则形式, 先求出  $B$  的特征方程  $|B - \lambda I| = 0$  的解. 由于 2 个特征值分别为  $\lambda_1 = -4$ ,  $\lambda_2 = 0.24$ , 因此回归方程的典型规则形式为

$$\hat{y} = 18.3213 - 4\omega_1^2 + 0.24\omega_2^2,$$

其中, 2 个  $\lambda$  值符号不完全相同, 此稳定点为鞍点, 说明二次响应面为马鞍形, 故无极值存在, 为了求得方程模型的极值点, 需进一步进行岭脊分析.

### 2.3.3 岭脊分析

根据岭脊分析原理, 在以原始设计中心点为球心、 $r$  为半径的超球面与响应面的交点形成的轨迹范围内找出最佳响应值, 确定水泵风动叶轮的最佳结构参数组合, 岭脊分析结果见表 5.

以岭脊分析结果为基本依据, 结合生产实际, 以水泵效率为主要质量, 小批量试制新型样机进行水泵效率测试试验, 风动水泵最佳工艺参数的确定: 叶片弯度为 4.0 mm, 喷嘴角度为 66°; 其它影响因素分别为叶片数量 88 片, 喷嘴形状双孔 II; 喷嘴位置中位时, 水泵最高效率达 26.48%, 比原水泵效率的 13.85% 提高了 12.63%, 同时比文献 [1] 的试验结果 24.30% 和文献 [6] 的试验结果 24.36% 提高了 2% 以上. KFB30-18 型矿用风动水泵的质量得到改善, 所确定的试验条件更为理想, 说明该设计方法的合理性、先进性和有效性. 实践证明, 稳健设计方案不仅满足了风动水泵风动叶轮的设计目标, 而且将风动水泵性能对各噪声因素的敏感性降低到最小, 满足了稳健设计的要求.

表 5 岭脊分析

Table 5 Ridge analysis

编码 半径	响应 值/%	标准 误差	叶片弯 度/mm	喷嘴角 度/(°)
1.0	26.48	0.06	4.05	66.3

## 3 结 论

本次产品质量稳健设计是在 KFB30-18 型矿用风动水泵的基础上进行的, 老产品的叶片采用大弯度的异型断面, 制造比较困难, 材料消耗大, 效率也较低. 通过叶片弯度的改进, 采用圆弧骨线的中弯度叶片, 不但降低了材料消耗和制造成本, 而且水泵的效率大幅度增加<sup>[1]</sup>; 喷嘴角度的改进不仅大大降低了成本 (原产品喷嘴角度 75°, 现最佳角度 66°), 而且较小的喷嘴角度还降低了产品的空载最高转速, 提高了产品的使用安全性, 降低了噪声的影响, 改善了工作环境, 具有很好的社会效益.

响应面法的实质是用近似模型代替原有精确模型来进行优化计算, 以降低计算量, 提高计算效率<sup>[5]</sup>. 引入均匀设计的目的在于在较少试验次数的情况下, 保证响应面的精度. 本例中利用响应面法得到的结果精度是比较高的, 这正是由于采用了均匀设计的方法使得试验点“均匀”地分布在设计空间中, 从而试验数据能全面真实地反映设计对象性质的原因.

响应面模型法稳健设计是在设计目标与设计参数之间不存在显性函数关系时的一种稳健设计方法。本文尝试将响应面法应用于矿用风动水泵稳健设计中, 显示该方法在风动水泵领域的应用潜力和研究价值。

### 参考文献:

- [1] 王宏伟. 矿用风动水泵的三次设计方法研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2003: 15-30.  
Wang Hongwei. Study of the method three stage design of the mine pneumatic pump [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2003: 15-30.
- [2] 文泽军, 刘德顺, 杨书议, 等. 基于响应面模型的永磁直流微电机堵转力矩稳健设计 [J]. 机械设计与制造, 2007 (3): 16-18.  
Wen Zejun, Liu Deshun, Yang Shuyi, et al. Robust design for the locked torque of permanent magnetism DC micro-motor based on response surface method [J]. Machinery Design & Manufacture, 2007 (3): 16-18.
- [3] 李响, 李为吉, 鹏程远. 基于均匀试验设计的响应面法及其在无人机一体化设计中的应用 [J]. 机械科学技术, 2005, 24 (5): 575-577.  
Li Xiang, Li Weiji, Peng Chengyuan. Response surface methodology based on uniform design and its application to complex engineering system optimization [J]. Mechanical Science and Technology, 2005, 24 (5): 575-577.
- [4] 陈立周. 稳健设计 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2000: 120-180.  
Chen Lizhou. Robust design [M]. Beijing: China Machine Press, 2000: 120-180.
- [5] 刘英, 王凤岐. 产品稳健设计响应面模型法的试验设计 [J]. 机械设计与制造, 2005 (7): 34-36.  
Liu Ying, Wang Fengqi. The experiment design in robust design using response surface method [J]. Machinery Design & Manufacture, 2005 (7): 34-36.
- [6] 魏效玲, 于治福, 杨富贵. 矿用风动水泵结构参数的优化设计方法研究 [J]. 煤炭学报, 2006, 31 (2): 255-258.  
Wei Xiaoling, Yu Zhifu, Yang Fugui. The research of the parameter optimize design method of the mine pneumatic pump [J]. Journal of China Coal Society, 2006, 31 (2): 255-258.

---

## 内蒙古包头3处露天煤矿通过验收

内蒙包头土右旗大顺矿业、四道沟矿业、曼巧沟矿业3处整合技改露天煤矿建设项目主体工程顺利通过由自治区煤炭工业局组织的验收委员会验收。

据了解, 土右旗大顺矿业、四道沟矿业、曼巧沟矿业3处露天煤矿经过1 a 多的紧张施工建设, 克服了地质构造复杂、地势险峻、岩石坚硬、施工建设难度大等重重困难, 逐步通过了环境保护、水土保持、消防设施、火工品库等各单项验收。3处煤矿通过验收, 标志着土右旗煤矿工业生产迈上了一个新台阶, 为进一步规范该旗煤炭行业的安全合法运营奠定了基础。

摘自“中国煤炭网”