

文章编号: 1007-2861(2009)04-0358-06

基于仿真和正交试验的锯齿形流道结构优化

关炎芳, 张国贤, 金健

(上海大学 机电工程与自动化学院, 上海 200072)

摘要: 设计出用于无阀压电微泵的锯齿型流道结构. 采用正交设计方法, 以数值模拟得出的流量和压力数据为指标, 对不同流道宽度、深度、长度、锥角和扩张角组合进行极差和方差分析, 得出几种结构参数的最优水平组合以及各参数的显著性水平, 从而达到对流道结构的优化. 最后用仿真模拟方法验证了该最优组合的有效性.

关键词: 无阀微泵; 锯齿型流道; 正交设计; 结构优化

中图分类号: TH 18

文献标志码: A

Structure Optimization of Saw-Tooth Microvalve Based on Simulation and Orthogonal Test

GUAN Yan-fang, ZHANG Guo-xian, JIN Jian

(School of Mechatronics Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: The structure of saw-tooth microvalve used in valveless micropump with piezoelectric actuator is designed. The orthogonal design is adopted in optimizing the structure. Using the data of flow rate and pressure loss obtained in computational fluid dynamics (CFD) simulation, the range analysis and variance analysis of the different combination of width, depth, length, taper and diffuser angle are performed. The optimal level combination and significance level of several structural parameters are obtained. Availability of the optimal combination is testified in simulation.

Key words: valveless micropump; saw-tooth channel; orthogonal design; structural optimization

传统微泵结构主要包括驱动源部分、传动部分以及泵体, 而无阀压电微泵将此三者合为一体, 克服了由于运动部件可能导致的压力损失、磨损、疲劳破坏以及可能对某些敏感流体的性质所造成的不良影响. 微阀是无阀压电微泵的关键结构, 其性能制约着微泵性能. 在文献[1-3]中, 人们对无阀式微泵的研究集中在锥形扩散管/收缩管无阀式微泵的特性分析. 但是, 此种微泵在实际应用中输出能力和工作效

率均较低, 因此提高扩散管/收缩管整流效率是提高无阀压电微泵性能的关键.

文献[4]提出了一种新型锯齿型微流道结构, 通过仿真模拟以及相关试验证明, 在同等条件下可以提高微泵流量. 但是此锯齿型微流道的各结构参数(如流道宽度、长度、深度、齿型角等)是否达到最佳配比还有待研究. 本工作通过正交试验设计方法, 找出该新型锯齿型微流道的最佳结构参数组合, 为

收稿日期: 2008-03-20

基金项目: 教育部博士点基金资助项目(20050280015)

通信作者: 张国贤(1946~), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为高压线路巡检机器人和风力发电. E-mail: zgx@163.com

后续锯齿型微泵设计提供依据。

1 锯齿型流道结构模型

文献[4]通过对图1所示微流道进行了初步数值模拟。图中可见,影响微流道流量和压力的主要结构参数有流道宽度 d 、锥角 θ 、扩张角 α 、长度 L 以及深度 h 。将这几个参数作为正交设计的主要研究对象(因素),各因素水平数的确定如下:当 θ 在 $5^\circ \sim 13^\circ$ 之间时,微泵性能较好;当 θ 大于 13° 时,微泵各方面性能下降^[5,6]。因此我们选取 θ 为 $5^\circ, 7^\circ, 10^\circ, 13^\circ$ 。宽度参照文献[5-6]确定为 40, 80, 120, 160 μm 四个水平值;根据现有的加工条件,深度 h 选取 10, 20, 40, 60 μm 四个水平值;长度 L 我们考察 1 093.0 和 1 366.3 μm 两个水平值;扩张角则以不能引起负方向流动为依据选取 $10^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ 四个水平值。将各因素及对应水平归纳成一个表,如表1所示。

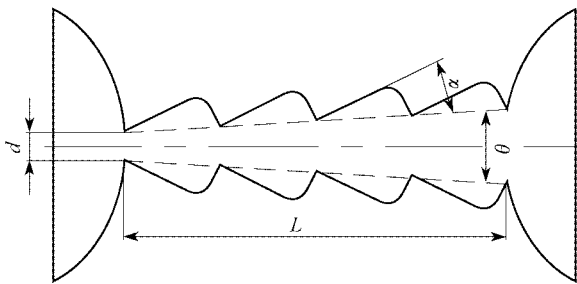


图1 锯齿型流道结构图

Fig.1 Structure of saw-tooth channel

表1 因素及水平

Table 1 Factors and level

水平	因素				
	A	B	C	D	E
	深度 $h / \mu\text{m}$	宽度 $d / \mu\text{m}$	锥角 $\theta / (^\circ)$	扩张角 $\alpha / (^\circ)$	长度 $L / \mu\text{m}$
1	60	80	7	45	1 093.0
2	40	40	5	10	1 366.3
3	20	120	10	30	1 366.3
4	10	160	13	60	1 366.3

2 锯齿型微流道结构优化^[7-11]

2.1 正交试验安排

对微泵性能评价主要以流量和压力为指标,这一评价指标同样也适用于微流道。为了找到使流量和压力成为最大的最佳结构组合,需要对微流道做

试验。在5个因素中,4个因素是四水平,1个因素是二水平,共 $4 \times 4 \times 4 \times 4 \times 2 = 512$ 种组合,如果对每种组合都做试验的话,则要做 512 组试验。实际上我们不可能制作出每种流道结构并进行试验,那将花费很大的代价。因此可以考虑取一小部分有代表性的组合,通过仿真模拟方法来代替试验,这将节省很多人力物力,也是现代设计经常采用的方法。根据正交设计(orthogonal design)方法^[12-13],可以选用 $L_{16}(4^4 \times 2^5)$ 正交表。因素及水平的安排如表2左侧所示,共有 16 种结构组合。

2.2 仿真模拟

我们采用 Fluent 软件进行流道仿真模拟。图2为流道三维流动模拟边界条件设置简图,采用速度进口、压力出口以及对称边界,进口流速分别设为 0.05, 0.40, 0.70, 1.00 和 1.30 m/s,出口相对压力设为 0。以水作为工作介质,并假设为不可压缩层流流动。

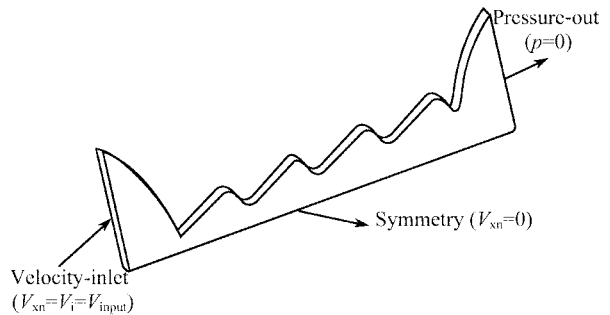


图2 微阀三维流动模拟边界条件设置

Fig.2 Boundary conditions of the 3D fluid simulations of microfluid conduits

2.3 结果分析

2.3.1 直观分析法结构优化

通过对 16 种流道结构扩张和收缩两个方向的三维稳态层流流动模拟,得出了一系列流量和压力数据。表2中右侧为流道的净流量及压差值。从流量数据可以看出,在第4种结构组合下,流道净流量出现负值,即正方向的流量值大于负方向,当将其作为微泵元件时,不能达到泵送目的,因此此种结构组合应剔除。

表3中列出了进口流速为 0.05 m/s 时,根据表2中右侧流量和压力数据,计算出的各因素的 k 值,即每种因素在不同水平下的试验值之和的平均值^[7]。由于5种进口流速下值数据较多,为了方便比较,把不同进口流速下每一因素在各水平下的 k 值

表2 正交试验设计及试验结果

Table 2 Orthogonal design and test results

试验号	因素					流量 $Q / (\mu\text{L} \cdot \text{min}^{-1})$					压力 P / kPa						
	A	B	C	D	E	空	空	0.05	0.40	0.70	1.00	1.30	0.05	0.40	0.70	1.00	1.30
									m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s
1	1(60)	1(80)	1(7°)	1(45°)	1(1 093)	1	1	0.39	8.25	16.57	24.99	33.55	0.003	2.860	9.779	21.629	38.087
2	1	2(40)	2(5°)	2(10°)	1	2	2	0.52	15.27	29.31	43.60	58.08	0.166	16.443	47.630	93.419	154.585
3	1	3(120)	3(10°)	3(30°)	2(1 366.3)	1	2	0.10	3.26	3.57	5.17	6.96	-0.005	1.262	4.526	8.999	14.667
4	1	4(160)	4(13°)	4(60°)	2	2	1	0.19	-0.94	-3.13	-7.63	-13.83	0.003	0.614	2.102	3.974	6.330
5	2(40)	1	2	3	2	2	1	0.10	1.82	2.87	3.92	5.06	0.004	1.714	4.737	11.035	21.082
6	2	2	1	4	2	1	2	0.96	14.77	27.66	40.54	53.73	0.022	8.226	32.876	78.848	146.640
7	2	3	4	1	1	2	2	0.14	1.56	1.99	3.63	4.09	-0.017	0.583	2.579	6.716	12.704
8	2	4	3	2	1	1	1	0.05	1.05	1.27	0.61	1.27	-0.019	0.309	1.026	2.478	4.388
9	3(20)	1	3	4	1	2	2	0.15	1.18	1.78	2.57	3.42	-0.020	-0.366	1.371	10.545	28.125
10	3	2	4	3	1	1	1	0.36	7.37	13.84	20.09	26.34	-0.036	2.773	9.964	27.691	52.446
11	3	3	1	2	2	2	1	0.00	0.27	0.97	1.51	2.15	-0.028	-0.146	-0.016	0.830	3.230
12	3	4	2	1	2	1	2	0.14	0.62	0.83	0.60	0.25	-0.016	-0.267	0.173	0.200	0.359
13	4(10)	1	4	2	2	1	2	0.11	0.78	2.02	2.67	3.36	-0.060	-1.116	-1.183	-0.018	2.998
14	4	2	3	1	2	2	1	0.80	6.07	10.85	15.52	20.10	-0.039	-3.126	-18.279	-39.792	-51.512
15	4	3	2	4	1	1	1	0.09	0.59	0.73	0.92	0.00	0.004	-0.591	-1.158	-2.472	-5.983
16	4	4	1	3	1	2	2	0.03	0.98	1.52	1.66	2.62	-0.051	-0.337	-0.707	-0.195	-1.433

表3 进口流速为0.05 m/s时流量和压力的k值表

Table 3 k value of the flow rate and pressure with the velocity of 0.05 m/s

k_{q1}	k_{q2}	k_{q3}	k_{q4}	k_{p1}	k_{p2}	k_{p3}	k_{p4}
0.30	0.31	0.17	0.26	0.04	0.00	-0.03	-0.04
0.19	0.66	0.08	0.10	-0.02	0.03	-0.01	-0.02
0.35	0.21	0.27	0.20	-0.01	0.04	-0.02	-0.03
0.37	0.17	0.15	0.35	-0.02	0.01	-0.02	0.00
0.22	0.30			0.00	-0.01		

进行比较,挑选最大k值所对应水平值并列于表4中.对表4进行分析可以发现,当以流量为评价指标时,5种因素的最佳水平均在一水平和二水平之间变化.并且在5种情况下,因素A(深度)和E(长度)的一水平出现4次,二水平出现1次,因此在整体情况下可选一水平为最佳水平;因素B(宽度)和C(锥角)在5种情况下最佳水平均为一水平和一水平,而因素D(扩张角)的一水平出现1次,二水平出现4次,因此可选二水平为最佳水平.综合分析,5种因素的最佳组合为A₁B₂C₁D₂E₁.按照同样方法对压力指标进行分析,则5种因素的最佳组合为A₁B₂C₂D₂E₁.

表4 因素最佳水平

Table 4 Optimal level of the factors

因素	流量					压力				
	0.05 m/s	0.40 m/s	0.70 m/s	1.00 m/s	1.30 m/s	0.05 m/s	0.40 m/s	0.70 m/s	1.00 m/s	1.30 m/s
A	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1
B	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
C	1	1	1	1	1	2	2	2	2	1
D	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
E	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1

上面分析只是针对各个因素选出最佳水平,而5个因素对流动性能的影响大小可以通过极差分析得出,极差越大的因素对指标的影响就越显著,其计算方法如下:

$$R_x = | \max k_{xi} - \min k_{xi} |, \quad (1)$$

式中, R_x 表示因素x的极差,x取A,B,C,D,E;i表示水平, $i=1,2,3,4$.

表5是在5种进口流速(以下角1~5表示)下,分别以流量(R_q)和压力(R_p)为指标计算出的极差值.以流量为指标,在进口流速为0.05 m/s时,5个因素极差值从大到小排序为B—D—A—C—E;在进口流速为0.40 m/s时,排序为B—A—C—E—D;在进口流速为0.70 m/s时,排序为B—C—A—D—

表5 流量与压力的极差值
Table 5 Flow rate and range

R_{q1}	R_{q2}	R_{q3}	R_{q4}	R_{q5}	R_{p1}	R_{p2}	R_{p3}	R_{p4}	R_{p5}
0.15	4.36	7.80	11.34	14.67	0.08	6.59	21.34	42.62	67.40
0.58	10.44	20.29	31.13	41.98	0.05	6.00	17.40	38.43	73.13
0.14	3.87	8.00	12.49	18.02	0.07	4.81	15.68	29.99	47.71
0.22	0.98	2.94	4.38	5.97	0.04	3.86	13.30	26.99	43.87
0.09	1.20	2.67	4.47	6.45	0.02	1.81	5.69	11.97	17.39

E; 剩余2种情况下为B—C—A—E—D. 因此各种情况下极差大小排序不一样, 我们不能确定各因素影响情况, 但是可以肯定因素B(宽度)对流量影响最大. 按照上面同样方法, 对以压力为指标极差大小做出排序. 在流速为0.05 m/s时, 极差从大到小排序为A—C—B—D—E; 在流速为0.40, 0.70, 1.00 m/s时, 排序为A—B—C—D—E; 在流速为1.30 m/s时, 排序为B—A—C—D—E. 由此, 以压力为指标时, 我们只能确定因素D(扩张角)对压力指标影响较小, 因素E(长度)次之.

通过直观分析及极差分析只能大概看出参数的最佳组合, 以及各参数的大概影响情况, 不够严谨和精确, 还不能具体确定各参数对结构的影响大小. 下面我们通过方差分析法来更进一步地分析各个因素及水平对流道结构的影响程度.

2.3.2 方差分析

因素的偏差平方和及其自由度的计算式如下:

$$T_c = \frac{T^2}{16} = \left(\sum_{i=1}^{16} Y_i \right)^2 / 16, \quad (2)$$

$$S_T = \sum_{i=1}^{16} Y_i^2 - T_c, \quad (3)$$

$$S_x = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 K_{xi}^2 - T_c = \frac{K_{x1}^2 + K_{x2}^2 + K_{x3}^2 + K_{x4}^2}{4} - T_c, \quad (4)$$

$$S_E = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 K_{Ei}^2 - T_c = \frac{K_{11}^2 + K_{12}^2}{8} - T_c, \quad (5)$$

$$S_e = S_T - (S_A + S_B + S_C + S_D + S_E), \quad (6)$$

$$f_T = \text{总试验次数} - 1 = 16 - 1 = 15, \quad (7)$$

$$f_{因} = \text{因素水平数} - 1, \quad (8)$$

$$f_A = f_B = f_C = f_D = 4 - 1 = 3,$$

$$f_E = 2 - 1 = 1,$$

$$f_e = f_T - (f_A + f_B + f_C + f_D) = 15 - 13 = 2, \quad (9)$$

式中, Y_i 表示第 i 次试验的结果; T 表示 16 次试验结

果总和, 即 $T = \sum_{i=1}^{16} Y_i$; T_c 为试验结果平均值; S_T 为总偏差平方和; S_x 为因素 A, B, C, D 偏差平方和; S_E 为因素 E 的偏差平方和; S_e 为误差的偏差平方和; f_T 为总偏差的自由度; f_A, \dots, f_D 为各因素的自由度; f_e 为误差的自由度.

$$V = \frac{S}{f}, \quad (10)$$

$$F_{因} = \frac{V_{因}}{V_{误}} = \frac{S_{因}/f_{因}}{S_e/f_e}. \quad (11)$$

根据式(2)~(9)分别计算出5种进口流速下(分别用下角1~5表示)5个因素流量和压力的偏差平方和及对应自由度, 列于表6中. 根据式(10)计算出各因素的均方差, 并对均方差进行分析, 当因素的均方差大于误差的均方差时, 可以用式(11)直接计算因素的 F 值; 反之, 当因素的均方差小于或接近误差的均方差时, 说明由因素的水平变化引起的偏差很小, 其偏差实际上主要是由于误差干扰造成的, 因此可将其一起归为误差的偏差平方和及误差的自由度, 列于表5中修正误差项. 根据式(11)计算各因素的 F 检验值, 并在给定的显著性水平 α 下从 F 分布查出临界值 F_α , 将 F 与 F_α 进行比较, 作出显著性判断^[14].

从表6中流量指标的显著性水平可以看出, 在5种情况下, 因素B(宽度)的影响最为显著, 因素A(深度)和C(锥角)有影响, 但影响不是很明显. 从压力的显著性水平可以看出, 因素A(深度)和B(宽度)对流道结构都有影响. 因此可以归纳出, 宽度、深度和锥角是流道的重要结构参数, 其变化对流道性能有着重要影响.

3 有效性验证

通过正交试验设计法得出了流道的最佳结构组合为 $A_1B_2C_1D_2E_1$ 和 $A_1B_2C_2D_2E_1$. 后一种在正交表里已出现, 通过观察可以发现, 在5种流速下, 其流

表6 流量和压力方差分析
Table 6 Analysis of variance of the flow rate and pressure loss

方差来源	偏差平方和(Q)	偏差平方和(P)	自由度	均方差(Q)	修正误差	F值(Q)	显著性	均方差(P)	修正误差	F值(P)	显著性
A ₁	0.053	0.014	3	0.018		6.633	(*)	0.005		8.062	(*)
B ₁	0.886	0.006	3	0.295		110.390	***	0.002		3.538	(*)
C ₁	0.053	0.011	3	0.018		6.581	(*)	0.004		6.344	(*)
D ₁	0.162	0.004	3	0.054		20.214	**	0.001		—	
E ₁	0.029	0.001	1	0.029		10.816	*	0.001	0.001	—	
e ₁	0.005	0.002	2	0.003		—		0.001		—	
S _{T1}	1.189	0.039	15	—		—		—		—	
A ₂	51.772	97.177	3	17.257		6.488	(*)	32.392		5.383	(*)
B ₂	270.222	98.571	3	90.074		33.862	**	32.857		5.461	(*)
C ₂	36.302	53.917	3	12.101		4.549	(*)	17.972		2.987	
D ₂	2.140	30.878	3	0.713		—		10.293		—	
E ₂	5.730	13.165	1	5.730	2.660	—		13.165	6.017	—	
e ₂	19.033	25.289	2	9.517		—		12.644		—	
S _{T2}	385.199	318.996	15	—		—		—		—	
A ₃	161.840	1 027.581	3	53.947		4.848	(*)	342.527		4.607	(*)
B ₃	1 022.299	798.354	3	340.766		30.622	**	266.118		3.580	(*)
C ₃	167.664	608.106	3	55.888		5.022	(*)	202.702		—	
D ₃	18.847	397.594	3	6.282		—		132.531	74.343	—	
E ₃	28.523	129.672	1	28.523	11.128	—		129.672		—	
e ₃	63.930	408.358	2	31.965		—		204.179		—	
S _{T3}	1 463.103	3 369.665	15	—		—		—		—	
A ₄	339.969	4 255.082	3	113.323		3.848	(*)	1 418.36		4.200	(*)
B ₄	2 306.274	3 806.699	3	768.758		26.107	**	1 268.90		3.757	(*)
C ₄	404.376	2 480.207	3	134.792		4.578	(*)	826.74		—	
D ₄	47.337	1 867.235	3	15.779		—		622.41	337.72	—	
E ₄	79.939	572.825	1	79.939	29.446	—		572.82		—	
e ₄	161.921	2 035.089	2	80.960		—		1 017.54		—	
S _{T4}	3 339.815	15 017.137	15	—		—		—		—	
A ₅	571.568	11 125.244	3	190.523		3.141		3 708.41		4.338	(*)
B ₅	4 159.976	13 657.786	3	1 386.660		22.859	**	4 552.60		5.326	(*)
C ₅	792.652	5 937.729	3	264.217		4.356	(*)	1 979.24		—	
D ₅	99.518	4 990.514	3	33.173		—		1 663.50	854.84	—	
E ₅	166.279	1 209.727	1	166.279	60.660	—		1 209.73		—	
e ₅	329.023	5 682.126	2	164.511		—		2 841.06		—	
S _{T5}	6 119.015	42 603.126	15	—		—		—		—	
F检验的	F0.01(3,2) = 99.2		F0.05(3,2) = 19.2		F0.1(3,2) = 9.16		F0.25(3,2) = 3.15				
临界值	F0.01(1,2) = 98.5		F0.05(1,2) = 18.5		F0.1(1,2) = 8.53		F0.25(1,2) = 2.57				

量和压力在16种组合里面均为最大.然而第1种组合并未在正交表里出现,因此,需要对此种结构进行有效性验证,看其是否为最佳组合.

表7是通过对A₁B₂C₁D₂E₁结构组合模拟得出的流量和压力数据.与表2中16种组合流量、压力相比,其流量仅次于第2种结构,而压力则大于第2

种结构,因此确定这两种结构均为最优组合.

表7 $A_1B_2C_1D_2E_1$ 结构组合试验结果

Table 7 Test result of the combination of $A_1B_2C_1D_2E_1$

流速 $u /$ ($m \cdot s^{-1}$)	0.05	0.40	0.70	1.00	1.30
流量 $Q /$ ($\mu L \cdot min^{-1}$)	1.059	14.592	27.763	41.334	54.976
压力 P / kPa	0.160	16.920	49.133	96.677	157.81

4 结束语

本工作设计出了锯齿形流道结构,并用正交设计与仿真模拟相结合的方法对流道结构的5个参数即深度、宽度、锥角、扩散角和长度进行优化.通过直观分析法,得出最佳参数组合数据分别为 $60 \mu m$, $40 \mu m$, 7° (5°), 10° 和 $1\ 093 \mu m$.用方差分析方法对各因素进行显著性检验,结果发现宽度对流道影响最显著,其次为深度和锥角,长度和扩张角对流道影响较小.最后用模拟方法对这一组合的有效性进行验证.上面得出的这些结论将为后续微泵结构设计提供重要依据.我们将通过具体试验来进一步验证这一优化结果.

参考文献:

- [1] OLSSON A, STEMME G, STEMME E. Micromachined diffuser-nozzle elements for valve-less pumps [C] // An Investigation of Micro Structures, Sensors, Actuators, Machines and Systems, The Ninth Annual International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems, IEEE. 1996:378-383.
- [2] SINGHAL V, GARIMELLA S V, MURTHY J Y. Low Reynolds number flow through nozzle-diffuser elements in valveless micropumps [J]. Sensors and Actuators A, 2004, 113:226-235.
- [3] OLSSON A, ENOKSSON P, STEMME G, et al. Macromachined flat-walled valveless diffuser pumps [J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 1999, 6 (27):161-166.
- [4] GUAN Y F, ZHANG G X, JIN J. Efficiency analysis and simulation studies of a piezoelectric micropump with novel microvalve [C] // Proceedings of the 3rd IEEE Int Conf on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems, Hong Kong. 2008:323-328.
- [5] 白兰,吴一辉.基于MEMS的无阀泵数值仿真与实验研究[D].长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,2004:30-34.
- [6] 王伟,刘世炳,陈涛,等.无阀微泵泵腔中流体流动的有限元模拟与分析[J].微纳电子技术,2005(9):415-419.
- [7] 陈魁.试验设计与分析[M].2版.北京:清华大学出版社,2005:108-121.
- [8] 洪伟.试验设计与分析原理、操作、案例[M].北京:中国林业出版社,2004:95-101.
- [9] HICKERNELL F S, KNUTH H D. The use of design of experiments for the optimization of deposited glass on saw filters [C] // 1999 Joint Meeting EFTF-IEEE IFCS. Arizona: IEEE, 1999:950-953.
- [10] 高允彦.正交及回归试验设计方法[M].北京:冶金工业出版社,1988:17-70;226.
- [11] 金华,戴金海,陈琪锋.基于回归正交试验设计的弹翼结构优化设计[J].计算机仿真,2007,24(10):42-44.
- [12] ZENG S Y, HE J, KANG L S, et al. A novel evolutionary algorithm based on an orthogonal design for dynamic optimization problems [C] // The 2005 IEEE Congress on Evolutionary Computation. 2005:1188-1195.
- [13] WANG S J, ZHANG H, GAO H L. Research on parameter optimization design method of electronic ballasts based on orthogonal design [C] // The 30th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronic Society, Korea. 2004:2-6.
- [14] 辛益军.方差分析与实验设计[M].北京:中国财政经济出版社,2001:284-299.

(编辑:刘志强)