

文章编号: 1000-582X(2012)07-032-05

溢流阀环形槽抗气穴性能分析及优化设计

刘顺安, 杨 嵩, 陈延礼, 胡卫国, 谢丹彤, 赵 伟

(吉林大学 机械科学与工程学院, 长春 130022)

摘要: 采用 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型数值模拟溢流阀环形槽口的气穴流动现象, 并分析环形槽各结构参数对阀腔内气穴流场的影响。结果表明, 结构参数 θ 越大, 参数 R_1 和 R_2 取值最优时, 抗气穴性能更明显。根据环形槽结构参数的数值模拟数据, 利用 kriging 模型方法得出代理函数, 即以阀腔内最大气体体积分数的目标函数, 以 Gauss 函数为相关函数, 采用常数回归模型的似然函数。利用改进 PSO 算法对代理函数进行优化计算, 经对比得出优化参数的抗气穴性能显著。

关键词: 流体传动与控制; 溢流阀; 气穴流场; PSO 算法; kriging 代理模型

中图分类号: O351.1

文献标志码: A

Analysis and optimization of resistive cavitation property of annular groove within relief valve

LIU Shun'an, YANG Song, CHEN Yanli, HU Weiguo, XIE Dantong, ZHAO Wei

(College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: RNG $k-\epsilon$ turbulence model is adopted to simulate the cavitating flow of annular groove within relief valve, and the influence of structural parameters of annular groove on cavitating flow field is analyzed. The analysis results show that performances of resistive cavitations increase with the rising of structural parameter θ when structural parameters R_1 and R_2 are the optimal values. According to numerical simulation data of annular groove's structural parameters, the surrogate models is obtained via the kriging calculated method, i. e. the objective function is the maximum gas volume fraction, the correlation function is the Gauss function and constant regression model is applied to the likelihood function of surrogate models. The surrogate function is optimized by the improved PSO algorithm, and resistive cavitation property of the optimized structural parameters has higher efficiency compared with other ones.

Key words: fluid transmission and control; relief valve; cavitating flow field; PSO algorithm; kriging surrogate model

液压元件特别是溢流阀阀腔内的气穴现象对其性能有着直接的影响, 为提高液压元件的工作性能, 延长其使用寿命, 国内外学者对溢流阀的结构优化及气穴现象进行了详细研究, 如 Paoluzzi 等^[1]对溢流阀的开启和关闭特性进行了研究; Martin 等^[2]对气穴与阀口开度及雷诺数之间的关系进行了研究; Rahmeyer 等^[3]研究了弯形阀道结构对腔

内气穴现象的影响; 浙江大学高红等^[4-5]对锥阀气穴强度与范围与入口流速和出口压力之间的关系进行了研究; 浙江大学弓永军等^[6]对多级节流加高压引流结构对纯水溢流阀的抗气穴特性的影响进行了深入研究。

以上研究主要是对溢流阀结构设计以及阀腔内气穴场进行分析, 而为提高溢流阀抗气穴性能对阀

收稿日期: 2012-02-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50475011)

作者简介: 刘顺安(1951-), 男, 吉林大学教授, 博士生导师, 主要从事流体传动与控制研究, (E-mail)lsa@jlu.edu.cn。

芯结构进行优化的研究文献较少。故此,笔者采用kriging代理模型建立环形槽结构参数与气穴场的函数关系,通过计算代理模型来评估不同结构参数下阀腔内部的气穴程度,利用改进 PSO 算法得出溢流阀环形槽的优化结构设计参数,并对分析优化结构参数的抗气穴性能。

1 溢流阀阀芯结构

溢流阀阀芯环形槽结构如图1所示,环形槽分为过渡段和扩充段,其形状由3个参数 θ 、 R_1 和 R_2 决定。

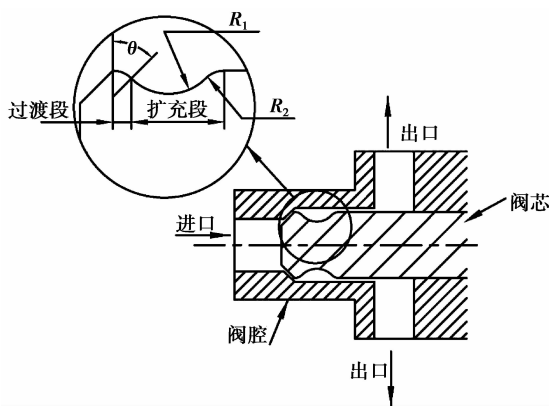


图1 溢流阀阀芯环形槽结构图

2 数学模型

2.1 kriging 模型

Kriging 模型是基于空间相关函数的元模型方法,其核心是根据样本空间位置与相关度的关系,赋予每个样本相应空间下不同权重,使得估计的方差值最小^[7-8]。

假设函数 $y(x)$ 由回归部分 $f(x)$ 和相关部分 $z(x)$ 组成,公式表示为

$$y(x) = f(x) + z(x). \quad (1)$$

以 Gauss 函数作为相关函数 R ,即

$$R(\theta, \omega, x) = \exp\left(-\sum_{k=1}^n \theta_k (\omega_k - x_k)^2\right), \quad (2)$$

kriging 模型在试验采样点的估计值为

$$\left. \begin{aligned} \hat{y} &= \hat{\beta} + r^T R^{-1} (y - \hat{\beta} f), \\ r^T &= [R(x, x^1), R(x, x^2), \dots, R(x, x^n)]^T, \end{aligned} \right\} (3)$$

式中: n 为采样点数; θ_k 为第 k 变量的正交相关函数; β 为回归常数; $\hat{\beta}$ 为 β 的估计值; r^T 为相关向量。

相关函数 R 的似然函数 L 定义为

$$L(y, \theta, \beta, \sigma^2) = \frac{(2\pi\sigma^2)^{-\frac{n}{2}}}{\sqrt{|\mathbf{R}|}} \times \exp\left[\frac{(y - \hat{\beta} f)^T \mathbf{R}^{-1} (y - \hat{\beta} f)}{-2\sigma^2}\right], \quad (4)$$

式中 β 和 σ 的最小二乘估计值为

$$\left. \begin{aligned} \hat{\beta} &= (f^T \mathbf{R}^{-1} f)^{-1} f^T \mathbf{R}^{-1} y, \\ \hat{\sigma}^2 &= \frac{[(y - \hat{\beta} f)^T \mathbf{R}^{-1} (y - \hat{\beta} f)]}{n}. \end{aligned} \right\} (5)$$

这样对于给定样本空间可确定 $\hat{\beta}$ 和 R ,采用最大化似然法 θ_k 可为

$$\theta_k = \max\left[-\frac{(n \ln(\hat{\sigma}^2) + \ln(|\mathbf{R}|))}{2}\right]. \quad (6)$$

2.2 改进粒子群优化 (PSO) 算法

PSO 算法是借鉴鸟类扑食过程形成的一种基于种群的随机全局优化算法,即随机产生一组初始种群,然后粒子跟随当前最优粒子在空间进行搜索,通过迭代计算适应度函数 $F_{\text{fitness}}(x)$ 值寻求最优解。粒子更新过程为

$$\left. \begin{aligned} v_i(t+1) &= \omega v_i(t) + c_1 r_1 [P_i - x_i(t)] + c_2 r_2 [G - x_i(t)], \\ x_i(t+1) &= x_i(t) + v_i(t+1). \end{aligned} \right\} (7)$$

式中: ω 为惯性系数; i 为粒子下标; t 为迭代次数; v_i 为第 i 个粒子速度; X_i 为第 i 个粒子位置; P_i 为第 i 个粒子最优位置; G 为整个粒子群最优位置; $c_{1,2}$ 为加速度常数; $r_{1,2}$ 为为 $[0,1]$ 间随机常数。

对于约束问题,适应度函数为目标函数与罚函数的组合,即

$$F_{\text{fitness}}(x) = f(x) + H(x). \quad (8)$$

应用 PSO 算法求解约束问题时,随着迭代运行, ω 逐渐减少, $|P_i - X_i(t)|$ 与 $|G - X_i(t)|$ 将接近 0,这样易使求解陷入局部最优。为此,采用改进的 PSO 算法,即通过引入种群多样性判断函数 $M_{\text{diversity}}$ 来提高全局搜索能力,即当 $M_{\text{diversity}}$ 大于阈值 d_{high} 时,种群多样性良好,可以进行全局搜索;当 $M_{\text{diversity}}$ 小于 d_{low} 时种群多样性差,应扩大搜索空间,使整个迭代过程都能进行全局搜索^[9-10]。

改进 PSO 算法方程为

$$v_i(t+1) = \omega v_i(t) + N_{\text{dir}} \times \{c_1 r_1 [P_i - x_i(t)] + c_2 r_2 [G - x_i(t)]\}, \quad (9)$$

式中:

$$N_{\text{dir}} = \begin{cases} -1, & M_{\text{diversity}} < d_{\text{low}}, \\ 1, & M_{\text{diversity}} > d_{\text{high}}. \end{cases}$$

3 环形槽结构参数影响分析

根据阀芯结构尺寸,结构参数的取值范围分别为 $R_1 \in [1, 6]$, $R_2 \in [6, 16]$, $\theta \in [10, 80]$ 。仿真参数分别为:进口压力为 1 MPa,出口为标准大气压;工作介质为水。由于气穴产生主要源于空气分离,当局部压力低于空气分离压时,液体中溶解的空气就会发生分离,形成大量气泡,故采用气体体积分数形式来表征气穴可视化流动;同时,Fluent 软件在计算中可得出阀腔内气体体积分数的梯度分布云图,为合理分析气穴性能故选用最大气体体积分数值作为评价该结构参数的标准。

3.1 结构参数 θ

阀芯结构参数 θ 与 R_1 、 R_2 计算取值,见表 1。

表 1 R_1 、 R_2 的取值

$\theta / (^\circ)$	R_1 / mm	R_2 / mm
	6.00	16.00
$10^\circ \sim 60^\circ$	4.00	12.00
	6.00	6.00

图 2 为阀腔内最大气体体积分数随 θ 的变化曲线。由此可知,阀腔内最大气体体积分数与结构参数 θ 、 R_1 和 R_2 相关。当 θ 小于 20° 时,阀腔内产生气穴现象的面积较大,因此该型结构环形槽的设计中应该使得 θ 大于 20° 。

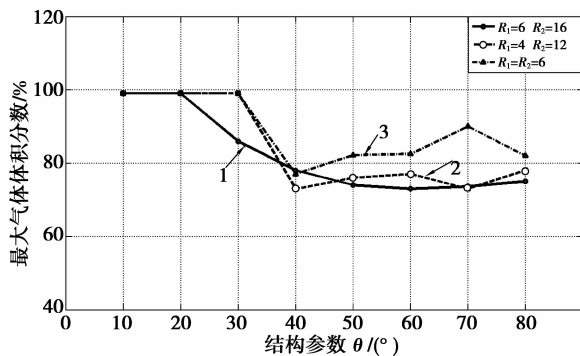


图 2 参数 θ 对最大气体体积分数的影响曲线

图 3 为结构参数 θ 取不同值时阀腔内气穴分布云图。由图 3(a)和(b)可知,阀口处气穴现象最严重。由伯努利方程可知,阀口处由于流速高,液体压力能大量转化为动能,使得阀口处的压力降低,容易造成气穴现象的发生;由图 3(c)和(d)可知,当溢流阀阀芯开设环形槽时,环形槽面积随着结构参数 θ 的增加而增大,从阀口处流出的液体可在环形槽作用下,将一部分动能转换成压力能,使得阀腔内压力升高,即当阀腔内部压力高于空气分离压力时,就可有效抑制气穴现象的发生。

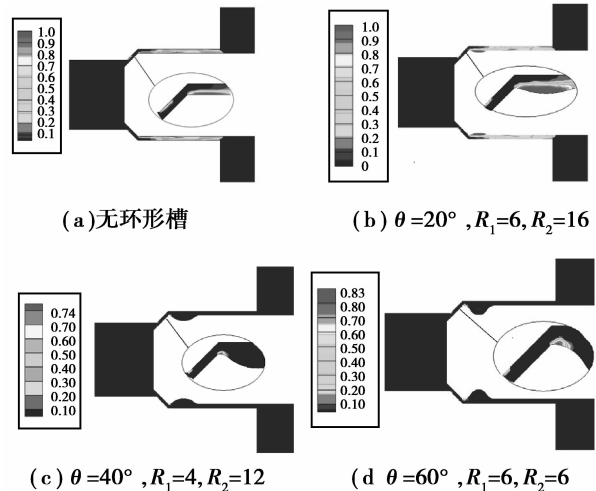


图 3 变 θ 时气穴分布云图

3.2 结构参数 R_1

结构参数 R_1 的计算取值,见表 2。

表 2 R_2 和 θ 的取值

R_1 / mm	R_2 / mm	$\theta / (^\circ)$
	16.00	60
$1 \sim 6$	12.00	40
	6.00	60

图 4 为阀腔内最大气体体积分数随 R_1 的变化曲线。由图可知,当环形槽扩充段作用明显时,减少过渡段长度可有效抑制气穴现象的发生。

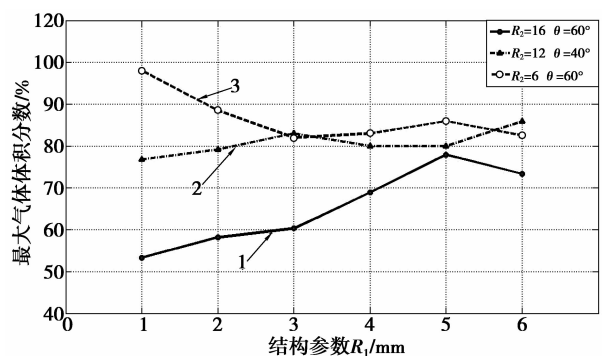


图 4 参数 R_1 对最大气体体积分数的影响曲线

图 5 为变 R_1 时气穴分布云图。由图 5(a)可知,气穴现象主要发生在阀口处。由图 5(b)、(c)、(d)可知,环形槽能有效提升阀腔内部的压力,减少气穴现象的发生,采用较小过渡段的环形槽抗气穴效果比采用较大过渡段的环形槽的抗气穴效果好。主要由于小尺寸过渡段可使阀口处流出的液体迅速到达环形槽扩充段,加快动能向压力能的转化速度,从而抑制气穴现象的发生。

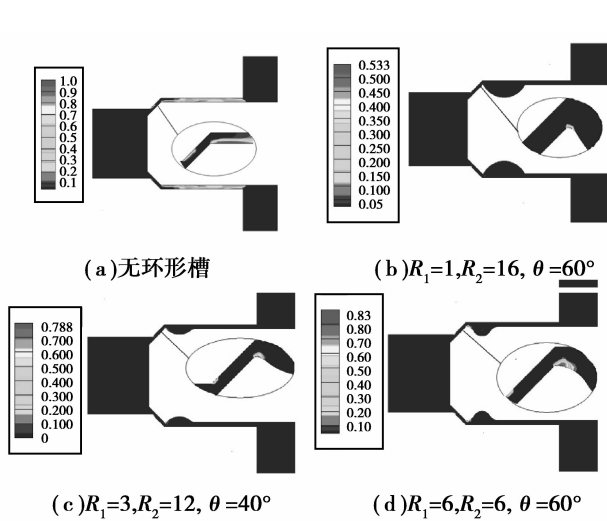


图 5 变 R_1 时气穴分布云图

3.3 结构参数 R_2

结构参数 R_2 的计算取值,见表 3。

表 3 R_1 和 θ 的取值

R_2/mm	R_1/mm	$\theta/(\text{^\circ})$
	6.00	60
6~16	3.00	40
	1.00	60

图 6 为阀腔内最大气体体积分数值随 R_2 的变化曲线。由图可知,环形槽的扩充段并不是越大越好,当环形槽扩充段尺寸达到最一定值后,才能有效提高阀腔的抗气穴性能。

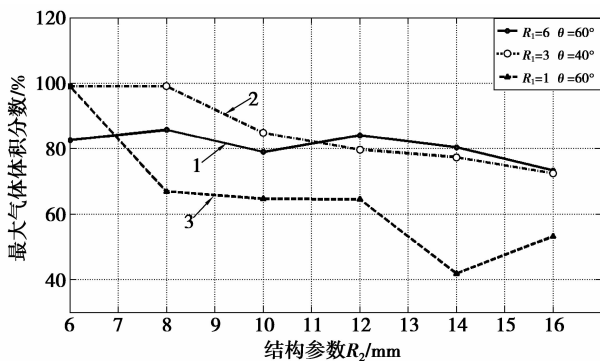


图 6 参数 R_2 对最大气体体积分数的影响曲线

图 7 为变 R_2 时气穴分布云图。由图可知,环形槽的扩充段尺寸直接影响环形槽的抗气穴能力。较大的扩充段可容纳更多的液体,可提升阀腔内的压力,从而抑制气穴现象的发生。

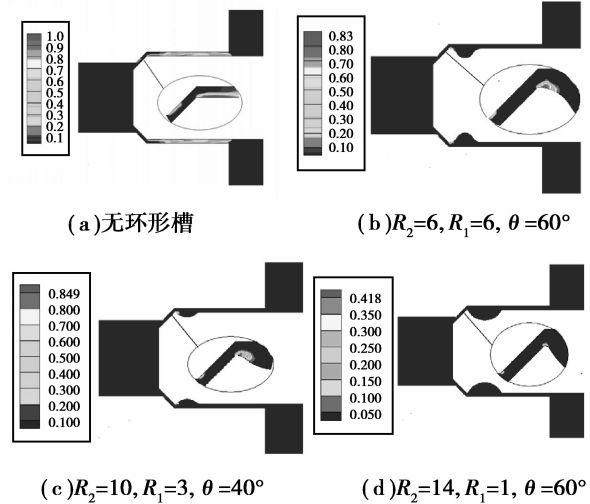


图 7 变 R_2 时气穴分布云图

4 环形槽结构参数优化

根据前文仿真数据,利用 kriging 法来构建关于 $\hat{\beta}$ 、 R 和 θ_k 等参数的代理模型函数,即建立阀腔内最大气体体积分数值与环形槽结构参数之间的函数关系,并通过改进 PSO 优化算法对该代理模型优化求解,得出该结构参数的最优值,从而实现环形槽抗气穴性能的最佳设计参数。

4.1 建立 kriging 模型

据前文仿真数据所得, R_1 、 R_2 和 θ 取值分别为 $R_1 \in [1, 3]$, $R_2 \in [8, 16]$, $\theta \in [30^\circ, 70^\circ]$ 。根据 kriging 方法,以阀腔内最大气体体积分数值为目标函数,以 Gauss 函数为相关函数,并采用常数回归模型。同时,根据试验设计原则分别对各结构参数安排五水平等分正交试验^[11],由此可得出 kriging 代理模型。为验证其精确度,与有限元仿真结果进行对比,其精度对比值如表 4 所示。由此可知,该代理模型最大误差均值为 2.96%,即该代理函数精确度较高,合理可用。

表 4 最大气体体积分精度验证

编号	$\theta/(\text{^\circ})$	R_1/mm	R_2/mm	有限元计算值	代理模型值	误差/%
1	60	2	16	0.581 7	0.559 0	3.7
2	40	2	12	0.791 8	0.801 7	-1.3
3	60	3	16	0.603 3	0.642 0	-6.4
4	40	3	16	0.773 7	0.797 6	-3.1
5	40	1	12	0.767 7	0.777 8	-0.3

4.2 PSO 优化后流场分析

改进 PSO 算法对代理函数进行优化训练,即设定初始种群数目为 50,迭代次数为 200 次,可得出 kriging 代理模型优化解为 $R_1 = 1.0001$, $R_2 = 15.627 6$, $\theta = 69.997 2$,该训练收敛曲线如图 8 所示。

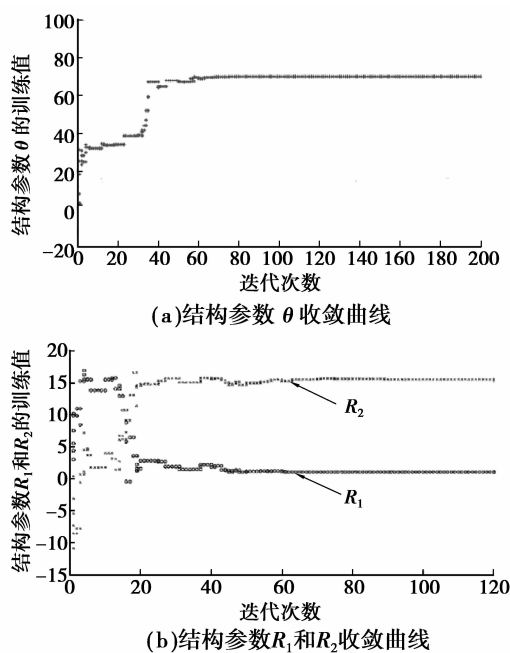


图 8 PSO 优化训练收敛曲线

图 9 为采用优化参数的溢流阀气穴流场分布云图。由此可知,优化后最大气体体积分数为 0.309,明显小于其他参数所得的计算值。

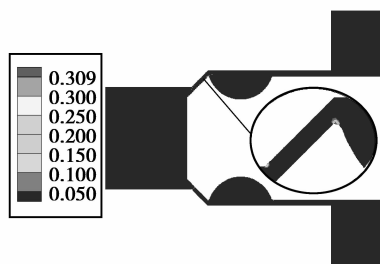


图 9 优化参数的气穴分布图

5 结束语

1) 阐述了溢流阀产生气穴机理,对减少气穴所设计的环形槽进行分析,证明该环形槽可以有效抑制气穴现象产生。

2) 分析了阀芯环形槽结构参数对其抗气穴性能的影响,得出 R_1 、 R_2 和 θ 不同取值时气体体积分分布云图及其数据。

3) 根据仿真数据,利用 kriging 代理模型方法建立了阀芯环形槽的代理函数,经验证代理函数与仿真数据误差很小,该代理函数合理可用。

4) 利用改进 PSO 优化算法优化代理函数,得出优化后溢流阀环形槽结构设计参数,并对其进行流场可视化研究,经对比得出优化参数抗气穴性能明显。

参考文献:

[1] Paoluzzi R, Milani M, Borghi M. Stationary and dynamic analysis of a water relief valve [C] //

Proceedings of the 4th JHPS International Symposium on Fluid Power, November 15-17, 1999, Tokyo, Japan. [S. l.]: JHPS, 1999: 561-566.

- [2] Martin C S, Medlarz H, Wiggert D C. Cavitation inception in spool valves [J]. Journal of Fluid Engineering, 1981, 103(4): 564-576.
- [3] Rahmeyer W J, Miller H L, Sherikar S V. Cavitation testing results for tortuous path control valve [C] // Proceedings of the ASME/JSME Fluid Engineering and Laser Anemometry Conference and Exhibition, August 13-18, 1995, Hilton Head, South Carolina, USA. Hilton Head: [s. n.], 1995: 63-67.
- [4] Gao H, Fu X, Yang H Y, et al. Numerical investigation of cavitating flow behind the cone of a poppet valve in water hydraulic system [J]. Journal of Zhejiang University Science A, 2002, 3(4): 395-400.
- [5] 高红, 傅新, 杨华勇, 等. 锥阀阀口气穴流场的数值模拟及实验研究[J]. 机械工程学报, 2002, 38(8): 27-30. GAO Hong, FU Xin, YANG Huayong, et al. Numerical and experimental investigation of cavitating flow within hydraulic poppet valve [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2002, 38(8): 27-30.
- [6] 弓永军, 周华, 杨华勇. 阀芯结构对纯水溢流阀抗气蚀特性的影响研究[J]. 农业机械学报, 2005, 36(8): 50-54. GONG Yongjun, ZHOU Hua, YANG Huayong. Study on cavitation resistive property of water hydraulic relief valve with different piston structure [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(8): 50-54.
- [7] 尹大伟, 李本威, 王永华, 等. 基于 kriging 方法的航空发动机压气机特性元建模 [J]. 航空学报, 2011, 32(1): 99-106. YIN Dawei, LI Benwei, WANG Yonghua, et al. Aeroengine compressor characteristics metamodeling using kriging method [J]. Acta Aeronautica & Astronautica Sinica, 2011, 32(1): 99-106.
- [8] Song X G, Wang L, Park Y C. Analysis and optimization of butterfly valve disc [J]. Journal of Process Mechanical Engineering, 2009, 223(2): 81-89.
- [9] 高显忠, 罗文彩, 侯中喜. 应用改进 PSO 算法求解待约束优化问题[J]. 计算机仿真, 2009, 26(10): 212-215. GAO Xianzhong, LUO Wencai, HOU Zhongxi. Application of improved PSO algorithm in solving constrained optimization problem [J]. Computer simulation, 2009, 26(10): 212-215.
- [10] Riget J, Vesterstrom J S, Universitet A, et al. A diversity-guide particle swarm optimizer-the ARPSO [J]. Computer and Information Science, 2002, 2: 2002.
- [11] 任露泉. 试验设计及其优化 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.

(编辑 张 革)