

doi:10.3969/j.issn.1674-8530.15.0203

模拟退火粒子群优化投影寻踪的  
渠道防渗模式评价董丽丽<sup>1</sup>, 于苗<sup>2</sup>, 徐淑琴<sup>3</sup>

(1. 哈尔滨市水利规划设计研究院有限公司, 黑龙江 哈尔滨 150030; 2. 山东绿景水土保持工程设计咨询有限公司, 山东 济南 250101; 3. 东北农业大学水利与建筑学院, 黑龙江 哈尔滨 150030)



董丽丽

**摘要:** 为了对渠道防渗工程的方案进行优选,采用模拟退火粒子群优化投影寻踪方法对渠道防渗模式进行优化评价.优化粒子群算法,使其在退火过程中接受优解,且还以一定的概率接受差解.同时利用模拟退火粒子群算法在搜索过程中具有概率突跳的能力,有效地避免搜索过程陷入局部极小解,提高了算法的收敛速度和精度.将该模拟退火粒子群算法与投影寻踪结合,建立了模拟退火粒子群优化投影寻踪模型,将该模型应用到灌区渠道防渗模式优化评价中,选取10个指标作为评判因子,提出适合该地区的干渠渠道防渗工程优化模式,其优劣排序依次为方案IV、方案II、方案III、方案V、方案I.研究表明模拟退火粒子群优化投影寻踪的评价模型对灌区渠道防渗模式进行综合评价是切实可行的,模拟退火粒子群优化投影寻踪的评价方法在解决实际问题中展示了其优越性,并取得了良好的应用效果.

**关键词:** 渠道防渗;模拟退火;粒子群;投影寻踪;优化模式

**中图分类号:** S277.9; TV93 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-8530(2016)07-0639-06

董丽丽,于苗,徐淑琴.模拟退火粒子群优化投影寻踪的渠道防渗模式评价[J].排灌机械工程学报,2016,34(7):639-644.

DONG Lili, YU Miao, XU Shuqin. Evaluation of canal seepage control plans by using simulated annealing particle swarm with projection pursuit[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering (JDIME), 2016,34(7):639-644. (in Chinese)

Evaluation of canal seepage control plans by using simulated annealing  
particle swarm with projection pursuitDONG Lili<sup>1</sup>, YU Miao<sup>2</sup>, XU Shuqin<sup>3</sup>

(1. Harbin Institute of Water Resources Co. Ltd., Harbin, Heilongjiang 150030, China; 2. Shandong Lyujing Soil and Water Conservation Engineering Design &amp; Consulting Co. Ltd., Jinan, Shandong 250101, China; 3. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin, Heilongjiang 150030, China)

**Abstract:** Particle swarm optimization is a new technique. After simulated annealing method is introduced into the particle swarm optimization, the particle swarm algorithm accept good solutions, and adopt worse solutions in a certain probability. As a result, the updated algorithm avoid local minimum solutions to improve the convergence and accuracy of optimization. Further, the simulated annealing particle swarm algorithm is combined with projection pursuit, then a simulated annealing particle swarm optimizing projection pursuit model is established. The model is applied to optimize irrigation canal seepage control plans based 10 indices. Finally, an optimization model is proposed to evaluate seepage control

收稿日期: 2015-09-14; 网络出版时间: 2016-07-01

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20160701.1331.018.html>

基金项目: 黑龙江省自然科学基金资助项目(E201054)

作者简介: 董丽丽(1981—),女,黑龙江安达人,工程师(feishi00@163.com),主要从事农业水资源优化利用研究。

于苗(1987—),女,山东禹城人,工程师(miaomiao2599@163.com),主要从事农业水资源优化利用与管理研究。

plans for a main canal in a specific irrigation district. The results show that the proposed model is feasible and the plan IV is the best, showing the proposed simulated annealing particle swarm algorithm with projection pursuit is effective and applicable.

**Key words:** canal seepage control; simulated annealing; particle swarm; projection pursuit; optimization model

中国是一个水资源相对短缺的国家,农业年用水量约占全国总用水量的70%,每年灌溉用水量约占农业用水量的90%,黑龙江省灌溉渠系水的利用系数很低,渠道渗漏损失掉的水量所占比例较大,严重制约了工程效益的发挥.目前,渠道防渗已成为中国应用最广泛的工程节水技术之一,常用土料、水泥土、石料、混凝土、沥青混凝土和膜料等材料作为渠道防渗层,达到防治渠道渗漏的目的<sup>[1]</sup>.美国、日本、印度等国均非常重视并积极开展渠道防渗工程建设,渠道衬砌的材料普遍有混凝土衬砌、膜料衬砌、土料衬砌等,其中以刚性混凝土衬砌居多<sup>[2-3]</sup>.

渠道防渗工程方案优选最常用的评价方法有模糊综合评价法、层次分析法.模糊综合评价法在权重确定等方面具有主观性.层次分析法依赖单个决策者的判断难免产生主观意识上的偏差.粒子群算法的提出引起了国内外许多专家的研究关注,SHI等<sup>[4]</sup>提出了模糊自适应粒子群优化算法;HIGASHI等<sup>[5]</sup>提出了具有高斯变异的粒子群优化算法.这些粒子群算法容易陷入局部极值点,收敛速度慢,精度较差.

文中将采用模拟退火粒子群优化投影寻踪方法对渠道防渗模式进行优化评价,选出最优的渠道防渗模式,对推动农业和农村经济可持续发展具有重要作用.

## 1 模拟退火粒子群优化投影寻踪模型

### 1.1 粒子群算法

粒子群算法(PSO)<sup>[6-7]</sup>是蚁群算法之后又一种新的群体智能算法,是进化算法的一个重要分支.粒子群优化算法简单、容易实现,同时有深刻的智能背景,既适合科学研究,又适合工程应用.因此,粒子群优化算法的提出,引起了广泛关注<sup>[8-12]</sup>. PSO随机初始化为一群粒子,其中粒子*i*在*s*维解空间中的位置为 $x_i$ .每次迭代,粒子通过动态跟踪个体极值 $p_i$ 和全局极值 $p'_g$ 来更新自身速度和位置,即

$$v_{i,j}(t+1) = \omega v_{i,j}(t) + c_1 r_1 [p_{i,j} - x_{i,j}(t)] + c_2 r_2 [p_{g,j} - x_{i,j}(t)], \quad (1)$$

$$x_{i,j}(t+1) = x_{i,j}(t) + v_{i,j}(t+1), j=1, 2, \dots, d, \quad (2)$$

式中: $\omega$ 为惯性权重因子; $r_1$ 和 $r_2$ 为 $[0, 1]$ 的随机数; $c_1, c_2$ 为学习因子; $p_{i,j}$ 为第*i*个体最优位置的第*j*维分量; $p_{g,j}$ 为群体最优位置的第*j*维分量.

### 1.2 模拟退火粒子群算法

模拟退火(SA-PSO)<sup>[13]</sup>是20世纪80年代初发展起来的一种随机性组合优化方法.它模拟高温金属降温的热力学过程,在某一初温下,伴随温度参数的不断下降,结合概率突跳性在解空间中随机寻找目标函数的全局最优解,即在局部优解能概率性地跳出并最终趋于全局最优.

模拟退火粒子群算法在退火过程中不但接受优解,而且还以一定概率接受差解,同时这种概率受到温度参数的控制,其大小随着温度的下降而减小,从而提高了收敛性能.模拟退火粒子群算法在搜索过程中具有概率突跳的能力,能够有效地避免搜索过程陷入局部极小解,提高了算法的收敛速度和精度.

### 1.3 投影寻踪

投影寻踪PPC是用来分析和处理非正态、非线性高维观测数据的一种新兴统计方法,其基本思想是将高维数据通过某种组合,投影到低维子空间上,通过投影指标函数来衡量投影暴露某种结构的可能性大小,寻找出使投影指标函数达到最优的投影值,然后根据投影值来分析高维数据的结构特征<sup>[14-16]</sup>.

### 1.4 优化投影寻踪模型算法求解步骤

1) 确定算法参数,包括粒子的个数*N*和维数*P*,每个粒子的位置和速度.

2) 投影指标归一化处理,生成关于投影方向*a*的初始粒子群体,为满足式(3)的等式约束条件,设投影方向为 $a_i = (a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{ij})$ ,在*P*维空间中随机选取*m*组 $[0, 1]$ 区间的随机数 $b_i = (b_{i1}, b_{i2}, \dots, b_{ij})$ ,令 $a_{ij} = b_{ij} (\sum_{j=1}^p b_{ij}^2)^{-0.5}$ ,则 $\|a\| = 1$ ,把每一组投影方向看成一个粒子,即生成了关于投影方向*a*的初始粒子群体,即

$$\text{s. t. } \sum_{j=1}^p a^2(j) = 1. \quad (3)$$

3) 根据式(4)计算每个微粒的适应值,将当前各微粒的位置和适应度存储在各微粒的  $p_i$  中,将所有 pbest 中适应值最优个体的位置和适应值存储于  $p_g$  中.

$$Q(a) = S_z D_z, \quad (4)$$

式中:  $S_z$  为投影值  $z_i$  的标准差;  $D_z$  为投影值  $z_i$  的局部密度.

$S_z, D_z$  的表达式为

$$S_z = \left[ \sum_{i=1}^n (z_i - \bar{z}_a)^2 / n \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (5)$$

$$D_z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (R - r_{ij}) \cdot f(R - r_{ij}), \quad (6)$$

式中:  $\bar{z}_a$  为序列  $z_i$  的平均值;  $R$  为局部密度的窗口半径;  $r_{ij} = |z_i - z_j|$ ;  $f(R - r_{ij})$  为单位阶跃函数.

4) 确定初始温度,根据式(7)确定当前温度下各  $p_i$  的适配值,即

$$TF(p_i) = \frac{e^{-[f(p_i) - f(p_g)]/t}}{\sum_{i=1}^N e^{-[f(p) - f(p_{gi})]/t}}. \quad (7)$$

5) 采用轮盘赌策略从所有  $p_i$  中确定全局最优的某个替代值  $p_g'$ ,然后根据式(8),(9)更新各微粒的速度和位置,计算各微粒新的目标值,更新各微粒的  $p_i$  值及群体的  $p_g$  值,即

$$v_{i,j}(t+1) = \varphi \{v_{i,j}(t) + c_1 r_1 [p_{i,j} - x_{i,j}(t)] +$$

$$c_2 r_2 [p'_{g,j} - x_{i,j}(t)]\}, \quad (8)$$

$$x_{i,j}(t+1) = x_{i,j}(t) + v_{i,j}(t+1), \quad (9)$$

式中:  $\varphi = 2/12 - C - \sqrt{C^2 - 4C}$ ,  $C = c_1 + c_2$ ; 公式中的学习因子参照文献[17]确定:通常取  $c_1 = c_2 = 2.05$ .

6) 进行退温操作,初始温度和退温方式对算法有一定的影响,一般采用如下的初温和退火方式,  $t_{k+1} = \lambda t_k$ ,  $t_0 = f(p_g) / \ln 5$ .

7) 若满足停止条件,搜索停止,输出结果,否则转步骤3).

8) 根据最佳投影  $a^*$ ,按照式(10),计算各样本的最佳投影值  $z_i^*$ ,若按  $z_i^*$  值从大到小排序,则可以将样本从优到劣进行排序,即

$$z(i) = \sum_{j=1}^p a(j)x(i,j), i = 1, 2, \dots, n. \quad (10)$$

## 2 案例应用

友谊灌区是黑龙江省双城市最大的自流灌区,位于拉林河下游右岸.友谊灌区由库前、库后、石人水库坝下灌区3部分组成.灌区内东干渠初建时渠道断面设计为土渠,土质为黑钙土、草甸土.现对其进行衬砌改造,减少渗漏损失,提高渠系水利用系数.其基本资料见表1,其中  $Q$  为流量,  $d$  为底宽,东干渠设计衬砌为 22.6 km,  $i$  为坡降,  $m$  为边坡.

表1 东干渠水力要素统计表  
Tab.1 Statistics of hydraulic factors of east main canal

桩号	$Q/(m^3 \cdot s^{-1})$			$d/m$	$i$	$m$
	$Q_{des}$	$Q_{max}$	$Q_{min}$			
0+000~0+030	13.30	15.30	7.21	7.5	1/3 500	2.0
0+030~1+800	11.12	12.79	6.03	6.0	1/3 500	2.0
1+800~4+850	11.12	12.79	6.03	6.0	1/3 000	2.0
4+850~7+920	8.81	10.57	4.78	5.5	1/4 000	2.0
7+920~12+220	6.90	8.28	3.74	1.5	1/1 500	2.0
12+220~16+280	3.69	4.61	2.00	1.0	1/1 600	1.5
16+280~20+440	2.10	2.63	1.14	0.5	1/1 900	1.5
20+440~22+600	0.68	0.88	0.37	0.5	1/1 500	1.5

### 2.1 渠道断面结构方案设计

根据灌区实际工程运行情况、自然条件、水源工程条件、节水标准等方面确定设计方案.渠道断面采用梯形断面,各设计方案如下.

方案 I:全断面采用复合土工膜,膜上铺 60 cm 厚的素土做保护层.根据《渠道防渗工程技术规范》(GB/T 50600—2010)规定,膜料上土料保护层厚度为 40~70 cm,因此膜上素土做保护层厚度选用 60 cm.

方案 II:边坡厚度为 30 cm 浆砌块石护坡防渗,渠底为 12 cm 厚现浇混凝土板.根据《渠道防渗技术规范》规定,浆砌块石的渠道防渗结构厚度为 20~30 cm,现浇混凝土板的防渗结构厚度为 6~12 cm,因此浆砌块石厚度选用 30 cm,现浇混凝土板厚度选用 12 cm.

方案 III:厚度为 10 cm,边长为 50 cm × 50 cm 等厚断面现浇沥青混凝土板防渗.根据《渠道防渗技术规范》规定,现浇沥青混凝土板的渠道防渗结构

厚度为5~10 cm,因此现浇沥青混凝土板厚度选用10 cm.

方案Ⅳ:全断面为8 cm,厚50 cm×50 cm 预制混凝土板,板下设复合土工膜,阴坡膜下铺保温板厚12 cm,阳坡5 cm厚保温板,渠底10 cm厚保温板.根据《渠道防渗技术规范》规定,预制混凝土板的渠道防渗结构厚度为4~10 cm,因此预制混凝土板厚度选用8 cm.根据《渠系工程抗冻胀设计规范》(SL 23—2006)来计算设计冻深,确定选用保温板厚度.

方案Ⅴ:渠底为12 cm厚现浇混凝土板保护层,护坡采用50 cm×50 cm×10 cm现浇混凝土板,板下铺一层复合土工膜,板膜之间铺10 cm砂垫层.根据《渠道防渗工程技术规范》规定,现浇混凝土板的防渗结构厚度为6~12 cm,因此渠底现浇混凝土板厚度选用12 cm,护坡现浇混凝土板厚度选用10 cm.

## 2.2 评价指标的确定

参照相关评价资料、结合灌区的实际运行情况,构建渠道防渗工程评价指标体系<sup>[18]</sup>,因此,干渠

选取工程总投资、维护费用、使用年限、材料来源难易程度、防渗效果、施工难易程度、维修难易程度、抗冻胀能力、财务内部收益率、经济效益费用比等10个指标进行综合评价.对于定性指标,聘请若干个专家对指标进行定量打分,使其值在[0,1]内.为了进行定量评价,根据专家评分,将选取的施工难易程度分为四级,定义“难”取值为1.0、“较一般”取值为0.8、“一般”取值为0.4、“易”取值为0.维修难易程度分为三级,定义“难”取值为1.0、“一般”取值为0.5、“易”取值为0.将抗冻胀能力分为三级,定义“易”取值为1.0、“一般”取值为0.5、“难”取值为0.根据项目所在地实际情况,将各方案的材料来源(运距)分为四级,定义“方便”取值为1.0、“较方便”取值为0.6、“一般”取值为0.4、“不方便”取值为0.干渠防渗模式综合评价指标见表2,其中A为工程投资,B为维护费用, $e_c, e_s, e_w$ 分别为材料来源,施工难易和维修难易程度,t为使用年限,w为防渗效果,h为抗冻胀能力,IRR为财务内部收益率, $\sigma$ 为经济效益费用比.

表2 干渠防渗工程综合评价指标  
Tab.2 Evaluation index in main canal seepage control plans

防渗	A/万元	B/万元	t/a	$e_c$	$w/(m^3 \cdot s \cdot km^{-1})$	$e_s$	$e_w$	h	IRR/%	$\sigma$
方案Ⅰ	695.772 0	5.698	20	0.4	0.035 90	0.4	0	0	13.08	1.16
方案Ⅱ	2 668.232 0	21.740	30	0.6	0.016 20	1.0	0.5	0.5	12.18	1.11
方案Ⅲ	7 132.310 8	58.056	20	0.4	0.008 98	0.8	1.0	0.5	10.08	1.00
方案Ⅳ	2 801.627 0	24.436	30	1.0	0.018 00	1.0	1.0	1.0	12.12	1.11
方案Ⅴ	1 527.776 0	12.531	35	0.4	0.013 50	0.4	0.5	0.5	12.70	1.14
备注	越小越好	越小越好	越大越好	越大越好	越小越好	越小越好	越小越好	越大越好	越大越好	越大越好

## 2.3 模拟退火粒子群优化投影寻踪模型求解

利用2.2中建立的渠道防渗综合评价指标,参考相关评价资料,结合灌区运行情况,运用模拟退火粒子群优化投影寻踪模型对其进行评价.算法的

$$x = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0.666 7 & 0.5 & 0.333 3 & 1 & 0.268 2 & 0.306 4 & 0.306 4 & 0.5 & 0.7 & 0.687 5 \\ 0 & 0.5 & 0 & 0.666 7 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0.666 7 & 1 & 1 & 1 & 0.335 1 & 0.327 2 & 0.357 9 & 1 & 0.68 & 0.687 5 \\ 1 & 0.5 & 0 & 0 & 0.167 9 & 0.129 3 & 0.130 5 & 0.5 & 0.873 3 & 0.875 0 \end{bmatrix}$$

采用模拟退火粒子群优化投影寻踪模型求解,得出的最大的投影指标值0.089 2,最佳的投影方向 $a^* = [0.194 8, 0.091 4, 0.398 8, 0.148 4, 0.520 0, 0.062 7, 0.425 1, 0.524 9, 0.015 5, 0.204 4]$ ,得到各种渠道防渗模式的投影值 $z_i^* = (0.625 8, 1.308 3, 1.047 0, 1.747 0, 0.929 3)$ ,如图1所示.将 $z_i^*$ 从大到小排列,可得各样本的优劣排序依次为方案Ⅳ、方案Ⅱ、方案Ⅲ、方案Ⅴ、方案Ⅰ.

初始化参数如下:粒子群数目 $N = 50$ ,学习因子 $c_1 = 2.05, c_2 = 2.05$ ,退火常数 $\lambda = 0.5$ ,最大迭代次数 $M = 1 000$ .

首先将数据归一化处理后得

而采用基于实数编码的加速遗传算法的PPC分类模型(RAGA-PPC)选定父代初始种群规模为 $n = 400$ ,交叉概率 $p_c = 0.8$ ,变异概率 $p_m = 0.8$ ,优秀个体数目选定为20个,加速次数为20次,综合评价的结果为各种渠道防渗模式的投影值 $z_i^* = (1.024 4, 1.259 0, 1.256 6, 1.794 1, 1.170 3)$ .将 $z_i^*$ 从大到小排列依次为方案Ⅳ、方案Ⅱ、方案Ⅲ、方案Ⅴ、方案Ⅰ.

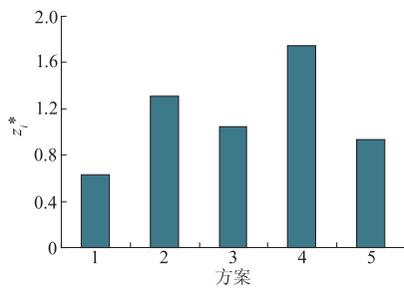


图1 评价方案投影值分布柱状图

Fig.1 Histogram of projection value of various plans

采用2种方法评价的渠道防渗模式优劣排序一致,与实数编码的加速遗传算法的投影寻踪模型相比,模拟退火粒子群优化投影寻踪模型容易实现,具有较强的跳出局部最优解的能力,避免了粒子群容易陷入局部极值点的缺点,提高了算法的收敛速度,该算法计算精度非常高.因此,东干渠渠道防渗模式依次为方案IV、方案II、方案III、方案V、方案I.

### 3 结论

1) 文中采用模拟退火粒子群优化投影寻踪模型对渠道防渗模式进行优选,提出适合该地区的干渠渠道防渗工程优化模式,其优劣排序依次为方案IV、方案II、方案III、方案V、方案I.

2) 利用模拟退火粒子群优化投影寻踪评价模型对灌区渠道防渗模式进行综合评价是切实可行的,可为规划设计人员提供参考.将模拟退火粒子群优化投影寻踪评价模型用于灌区渠道防渗工程模式综合评价,目前尚处于探索性阶段,还需要进一步研究和完善.

#### 参考文献 (References)

- [1] 何武全. 我国渠道防渗工程技术的发展现状与研究方向[J]. 防渗技术, 2002, 8(1): 32-34.  
HE Wuquan. Present conditions of development and study direction of engineering technique of canal seepage control in China [J]. Technique of seepage control, 2002, 8(1): 32-34. (in Chinese)
- [2] 李安国. 渠道防渗工程技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
- [3] 曹政权, 齐广平, 李涛, 等. 灌溉渠道防渗措施应用现状分析[J]. 甘肃农业大学学报, 2006, 41(4): 116-120.  
CAO Zhengquan, QI Guangping, LI Tao, et al. Application analysis of anti-seepage measure of irrigation canal [J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2006, 41(4): 116-120. (in Chinese)
- [4] SHI Y, EBERHART R C. Fuzzy adaptive particle swarm optimization [C]//Proceedings of the 2001 Congress on IEEE, 2001.
- [5] HIGASHI N, IBA H. Particle swarm optimization with Gaussian mutation [C]//Proceedings of the 2003 IEEE, 2003.
- [6] EBERHART R, KENNEDY J. A new optimizer using particle swarm theory [C]//Proceedings of the Sixth International Symposium on IEEE, 1995.
- [7] 徐卫亚, 徐飞, 刘大文. 位移时序预测的 APSO - WLSSVM 模型及应用研究 [J]. 岩土工程学报, 2009, 31(3): 313-318.  
XU Weiya, XU Fei, LIU Dawen. Study and application of displacement time series forecast based on APSO - WLSSVM [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2009, 31(3): 313-318. (in Chinese)
- [8] SOUSA T, SILVA A, NEVES A. Particle swarm based data mining algorithms for classification tasks [J]. Parallel computing, 2004, 30(5/6): 767-783.
- [9] 王尧, 李兴凯, 王建群. 基于模拟退火粒子群算法的河道洪水反流向演算 [J]. 水文, 2012, 32(6): 6-10.  
WANG Yao, LI Xingkai, WANG Jianqun. River flood inverse-routing based on simulated annealing particle swarm optimization [J]. Journal of China hydrology, 2012, 32(6): 6-10. (in Chinese)
- [10] 刘衍民. 粒子群算法的研究及应用 [D]. 济南: 山东师范大学, 2011.
- [11] 吴廷发. 基于粒子群优化算法的非线性系统参数估计 [D]. 汕头: 汕头大学, 2013.
- [12] 羌晓清, 景博, 邓森, 等. 基于模拟退火粒子群算法的不可靠测试点优化 [J]. 计算机应用, 2015, 35(4): 1071-1074.  
QIANG Xiaoqing, JING Bo, DENG Sen, et al. Test Point Optimization under unreliable test based on simulated annealing particle swarm optimization [J]. Journal of computer applications, 2015, 35(4): 1071-1074. (in Chinese)
- [13] 康立山. 非数值并行算法 [M]. 北京: 科学出版社, 1994.
- [14] 刘明冲, 刘瑞卿, 张路路, 等. 基于粒子群优化投影寻踪模型的土地整治综合效益评价研究 [J]. 土壤通报, 2013, 44(5): 1047-1052.  
LIU Mingchong, LIU Ruiqing, ZHANG Lulu, et al. Comprehensive benefit evaluation of land consolidation based on projection pursuit model optimized by particle swarm optimization [J]. Chinese journal of soil science, 2013, 44(5): 1047-1052. (in Chinese)
- [15] 李南, 方国华, 官云飞. 基于改进的投影寻踪水利现代化

- 评价模型[J]. 水利水电技术, 2014, 45(1): 118 - 121.
- LI Nan, FANG Guohua, GUAN Yunfei. Improved projection pursuit-based evaluation model of modernization of water resources development[J]. Water resources hydropower engineering, 2014, 45(1): 118 - 121. (in Chinese)
- [16] 费良军, 孙洁, 任长江, 等. 基于连续蚁群优化的投影寻踪灌区评价模型[J]. 排灌机械工程学报, 2014, 32(7): 631 - 636.
- FEI Liangjun, SUN Jie, REN Changjiang, et al. Evaluating projection pursuit model of irrigation district based on ant colony optimization algorithm for continuous domains [J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering, 2014, 32(7): 631 - 636. (in Chinese)
- nese)
- [17] 刘汉婕. 基于模拟退火的粒子群改进算法的研究与应用[D]. 北京: 华北电力大学, 2010.
- [18] 许士国, 石瑞花, 黄保国, 等. 平原河道生态护坡工程评价和方案决策方法[J]. 水利学报, 2008, 39(3): 325 - 331.
- XU Shiguo, SHI Ruihua, HUANG Baoguo, et al. Assessment and decision-making method for ecotype revegetation project in plain river[J]. Journal of hydraulic engineering, 2008, 39(3): 325 - 331. (in Chinese)

(责任编辑 谈国鹏)

(上接第 630 页)

闸阀启闭状态影响较大, 在设计时应提高该特征尺寸精度要求, 并在生产过程中进行重点质量控制。

3) 模拟实船系统搭建了试验台, 复现了该闸阀的卡滞现象, 对相应配合尺寸进行控制和修配, 试验表明修复后闸阀使用正常, 并获取了闸阀实际启闭特性曲线, 验证了闸阀计算分析的合理性和准确性, 为后续该类型闸阀的改进设计及卡滞现象的识别与分析提供了参考。

#### 参考文献 (References)

- [1] LIN Zhe, ZHU Linhang, CUI Baoling, et al. Effect of placements (horizontal with vertical) on gas - solid flow and particle impact erosion in gate valve[J]. Journal of thermal science, 2014, 23(6): 558 - 563.
- [2] ROBATI J, NAVID H, HASANZADEH I, et al. Electro - hydraulic control system for precision guidance of a row crop cultivator with position feedback via LVDT [J]. Journal of food agriculture & environment, 2011, 9(2): 556 - 560.
- [3] 沈雪松. 液动阀门系统控制研究与设计[D]. 成都: 四川大学, 2005.
- [4] 韩章. 船舶阀门遥控系统的选择[J]. 上海造船, 2009(2): 33 - 38.
- HAN Zhang. Selection of hydraulic-actuating valve remote control system [J]. Shanghai shipbuilding, 2009(2): 33 - 38. (in Chinese)
- [5] 张祚良, 刘文进, 祝捷. 船舶阀门遥控系统的选用与分析[J]. 阀门, 2012(3): 23 - 24.
- ZHANG Zuoliang, LIU Wenjin, ZHU Jie. Discussion on the ship valve remote control system [J]. Valve, 2012(3): 23 - 24. (in Chinese)
- [6] 汤跃, 汤玲迪, 刘二会. 闸阀调节过程的三维模拟及其动态模型[J]. 排灌机械工程学报, 2012, 30(2): 219 - 224.
- TANG Yue, TANG Lingdi, LIU Erhui. 3D simulation and transient model for regulating period of gate valve [J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering, 2012, 30(2): 219 - 224. (in Chinese)
- [7] 支平, 叶天, 王恺俊. 船用阀门遥控系统综述[J]. 船舶工程, 2013, 35(S1): 5 - 7.
- ZHI Ping, YE Tian, WANG Kaijun. System review of marine valve remote control system [J]. Ship engineering, 2013, 35(S1): 5 - 7. (in Chinese)
- [8] 刘玉坤. 船舶压载阀门遥控系统中阀门驱动型式探讨[J]. 造船技术, 2013(2): 40 - 42.
- LIU Yukun. Study of valve drive type in ship ballast valve remote control system [J]. Marine technology, 2013(2): 40 - 42. (in Chinese)
- [9] 邵云生. 电动闸阀故障原因分析及对策[J]. 冶金动力, 2009(6): 27 - 30.
- SHAO Yunsheng. Analysis of failure causes of electrical gate valve and countermeasures [J]. Metallurgical power, 2009(6): 27 - 30. (in Chinese)
- [10] JU Y P, CHUNG M K. Study on hydrodynamic torque of a butterfly valve [J]. Journal of community psychology, 2006, 128(1): 190 - 195.
- [11] 邱晓来, 雷磊, 曹小慧. 楔式弹性闸板闸阀启闭力及扭矩的理论计算和分析[J]. 阀门, 2007(5): 4 - 7.
- QIU Xiaolai, LEI Lei, CAO Xiaohui. Analysis and calculation of open and close force and torque in flexible wedge gate valves [J]. Valve, 2007(5): 4 - 7. (in Chinese)

(责任编辑 谈国鹏)