

北方灌区混凝土衬砌渠道断面优化及参数分析

刘 东^{1,2}, 胡宇祥^{1,3}, 付 强^{1,2}, 李天霄^{1,2}

(1. 东北农业大学水利与建筑学院, 哈尔滨 150030; 2. 东北农业大学农业部农业水资源高效利用重点实验室, 哈尔滨 150030; 3. 吉林农业科技学院水利与土木工程学院, 吉林市 130101)

摘 要: 人工明渠是中国北方灌区采用的主要输水方式。合理的渠道断面参数计算是水利计算中的重要环节。因此, 合理的模型与较高精度的计算方法是求解渠道断面的关键。然而传统灌区混凝土衬砌渠道断面优化设计仅从最优水力断面角度出发, 考虑单一水力要素, 而忽视了渠道冻胀安全以及工程造价的问题。该文建立了以最优水力断面、工程造价最小为目标, 满足混凝土衬砌渠道冻胀要求的数学模型。根据模型非线性特点, 利用自适应粒子群优化算法, 对混凝土衬砌渠道梯形断面结构进行优化, 选用自适应粒子群算法可以很好地克服算法陷入局部最优解的问题。建立的模型将混凝土衬砌量与工程占地最小作为目标函数优化。优化结果在最佳水力断面基础上, 满足边坡稳定与工程量最小。最后将模型应用于黑龙江依兰县倭肯河灌区学兴干渠, 分析了渠道边坡系数、渠底宽和渠道水深对目标函数的影响规律。优化结果表明, 模型计算所得渠道工程占地减小 1.5%, 混凝土衬砌量减小 1.8%。各个参数中, 边坡系数对目标函数影响较大。混凝土衬砌厚度由土壤性质、冻结力大小所决定。该研究成果为提高寒区混凝土防渗渠道优化设计水平及灌区运行效益提供了理论依据。

关键词: 渠道; 模型; 优化; 自适应粒子群算法; 衬砌渠道; 断面优化; 冻胀破坏; 数学模型

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.20.016

中图分类号: TV93

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2015)-20-0107-08

刘 东, 胡宇祥, 付 强, 李天霄. 北方灌区混凝土衬砌渠道断面优化及参数分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(20): 107—114. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.20.016 http://www.tcsae.org

Liu Dong, Hu Yuxiang, Fu Qiang, Li Tianxiao. Optimization and parameter analysis for channel cross section with concrete lining in northern irrigation district[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(20): 107—114. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.20.016 http://www.tcsae.org

0 引 言

灌区渠道断面优化是灌区设计一项重要环节, 近几年, 随着节水改造项目已在中国各地老旧灌区大面积推广, 渠道混凝土衬砌是最直接、有效的节水措施, 尤其在北方地区, 混凝土衬砌具有结构强度高、抗渗能力强等优点, 主要用于梯形断面渠道。

目前, 国内外学者已在灌溉渠道断面优化方面取得了一系列的研究成果, 如余长洪等^[1]用动态规划方法, 以工程投资为优化目标, 将弧形坡脚梯形、梯形、U 形断面应用到江苏省某大型灌区四支渠节水改造设计中; 钱坤等^[2]将人工蜂群算法应用在渠道断面优化设计中, 建立了包含水力要素与经济要素的多目标优化函数; 王俊发等^[3]以工程施工花费最小为目标函数, 建立了塑料薄膜防渗梯形衬砌渠道的优化数学模型; 郭凤台等^[4]利用免疫遗传算法对河北省怀来县洋河灌区二干渠作为典型渠道进

行了优化设计; Adarsh^[5]基于渗漏损失、工程费用最小建立了明渠断面优化模型, 并利用FROM-PGSL算法优化求解; Monadjemi^[6]基于明渠均匀流公式, 采用水利最佳断面计算渠道断面; Atmapoojya^[7]以渠道水量损失最小建立了渠道断面优化数学模型。然而, 上述研究多是针对非寒区的渠道, 而对于北方高寒区的灌溉渠道研究相对较少^[8-13]。在寒冷的东北地区, 如果忽略了混凝土衬砌渠道的冻胀安全, 必将造成混凝土渠道衬砌遭受严重冻胀破坏, 增加了渠道的渗漏量, 降低了灌区的用水效率与工程效益。

因此, 本文在考虑渠道混凝土衬砌冻胀的基础上, 兼顾渠道水力最佳断面, 建立工程造价低、工程占地最小的目标函数, 应用自适应粒子群算法 (adaptive particle swarm optimization, APSO) 求解, 最后以北方寒区灌区—黑龙江依兰县倭肯河灌区学兴干渠为实例, 计算出优化结果, 并且分析了渠道边坡系数、渠底宽和渠道水深对目标函数的影响规律, 为渠道混凝土衬砌断面优化设计提供一种新的途径。

1 混凝土渠道防冻胀衬砌厚度计算

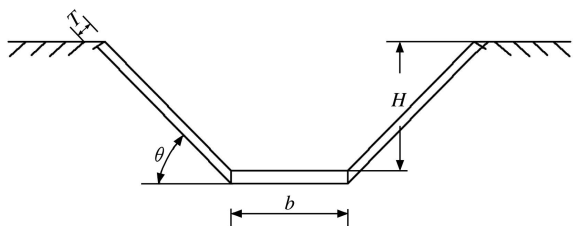
混凝土衬砌梯形渠道的断面图如图 1 所示, 由 1 个底板、1 个阳坡坡板和 1 个阴坡坡板组成。图 1 中 b 和 H

收稿日期: 2015-07-13 修订日期: 2015-09-25

基金项目: 国家自然科学基金 (41071053、51479032、51579044); 黑龙江省水利科技项目 (201319)

作者简介: 刘 东, 男, 黑龙江安达人, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事水土资源优化利用与管理方面研究。哈尔滨 东北农业大学水利与建筑学院, 150030。Email: liudong5511@sina.com

为渠道底宽、设计水深, m; θ 为边坡角度, rad; T 混凝土衬砌厚度, cm。



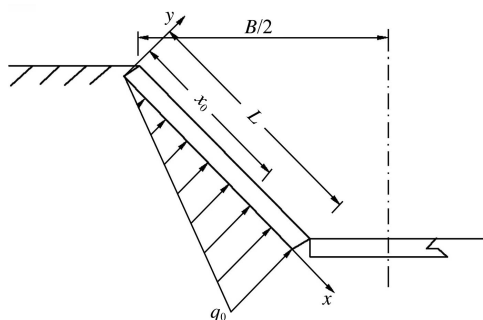
注: T 为渠道混凝土衬砌厚度, m; H 为渠道深度, m; b 为渠道底宽, m; θ 为边坡角度, rad。
Note: T is the value of thickness of channel concrete slab, m; H is the height of the channel, m; b is the width of channel bottom, m; θ is channel slope angle, rad.

图 1 混凝土衬砌梯形渠道断面示意图

Fig.1 Geometric dimensions for trapezoidal cross section

混凝土衬砌底板及边坡坡板都是在冻胀力、冻结力、重力及底板与坡板相互约束力作用下而发生破坏的, 多种力之间相互依赖, 其机理非常复杂。因此, 建立的力学模型进行了恰当的假设简化处理, 然后建立简单实用、基本准确合理的力学模型。

在实际工程当中, 阴坡坡板是冻胀破坏最严重的位置, 图 2 为阴坡坡板荷载计算简化图, 坡板与底板之间的填充材料可看作单铰性约束, 将坡板视为两端固定的简支梁, 以边坡顶点为原点建立坐标系, 坡板所受的冻胀力线性分布, 且坡脚处最大, 坡顶为零。从安全与施工角度出发, 将最小阴坡板厚度设为混凝土衬砌厚度 [14-17]。



注: L 为边坡坡板长度, m; B 为渠道上顶宽度, m; x_0 为最大弯矩截面位置, m。

Note: L is the length of side wall, m; B is the width of free surface, m; x_0 is the maximum bending moment section, m.

图 2 坡板受力分析

Fig.2 Mechanics analysis of side slope

阴坡坡板弯矩、剪力的表达式如式 (1)、(2) 所示:

$$M(x) = \frac{\tau_0}{4L} x^2 T + \frac{1}{6} q_0 L x - \frac{q_0 x^3}{6L} \quad (1)$$

$$N(x) = \frac{\tau_0}{2L} x^2 \quad (2)$$

式中: M 为阴坡坡板的弯矩, kN·m; N 为阴坡坡板的轴力, kN; T 为渠道混凝土衬砌厚度, m; L 为边坡坡板长度, m; x 为边坡坡板上任一点到坡顶的距离, m; 法向、切向冻结力由式 (3)、(4) 计算得出,

$$q_0 = \frac{\gamma \times T + \tau_0 \sin \theta}{1 + \frac{2}{3} \cos \theta} \quad (3)$$

$$\tau_0 = c + kt \quad (4)$$

式中: q_0 、 τ_0 为法向、切向冻结力, kPa; γ 为混凝土重度, kN/m³; t 为负温绝对值, °C; $c=0.3 \sim 0.6$, kPa; $k=0.4 \sim 1.5$, kPa/°C, c 、 k 为与土质有关系数, θ 为边坡角度, rad。此时, 最大弯矩截面位置为:

$$x_0 = \frac{\tau_0 T}{2q_0} + \sqrt{\left[\frac{\tau_0 T}{2q_0} \right]^2 + \frac{L^3}{3}} \quad (5)$$

则最危险截面的最大拉应力为:

$$\sigma_0 = \frac{6M(x_0)}{T^2} - \frac{N(x_0)}{T} \quad (6)$$

通过验算抗裂条件 $\frac{\sigma_0}{E_c} < \varepsilon_t$ 求解出满足抗冻要求的最小衬砌厚度 T 。式中 ε_t 是混凝土极限拉应变; E_c 为混凝土弹性模量, MPa。

2 数学模型的建立

2.1 设计变量

渠道为梯形断面, 采用曼宁公式计算明渠水力性能:

$$Q = \frac{\sqrt{i}(bH + m_0 H^2)^{5/3}}{n(b + 2H\sqrt{1 + m_0^2})^{2/3}} \quad (7)$$

式中: Q 为渠道流量, m³/s; n 为渠底糙率; m_0 为渠道边坡系数; i 为水力比降, 在明渠均匀流中与渠底比降相同, b 和 H 为渠道底宽、设计水深, m。算例中, 渠道的 Q 、 n 、 i 已知, m_0 、 b 和 H 是设计变量。

2.2 目标函数

渠道断面优化以断面衬砌工程量最小、工程占地最小和流量误差最小为目标函数:

$$\min f = \lambda(\chi + B_t) + \frac{|Q - Q_d|}{Q_d} \quad (8)$$

式中: χ 为渠道过水断面湿周, m; B 为渠道顶宽, m; Q_d 与 Q 分别为渠道的设计流量与计算流量, m³/s; λ 为权重系数。

2.3 约束条件

1) 流速约束

$$V_{淤积} < V_n < V_{冲刷}$$

各段流速满足不冲, 不淤要求。 v_{cs} 为不冲流速, v_{cd} 为不淤流速。

流速约束: $v_{cd} < V_n < v_{cs}$;

2) 渠道边坡系数

渠道边坡系数应不小于允许最小边坡系数, 应不大于允许最大边坡系数, $1 \leq m_0 \leq 2$ 。

3) 渠道宽深比

渠道宽深比应满足规范给定的要求, $0.8 < b/h < 3.5$ [18-19]。

3 自适应粒子群算法

3.1 基本粒子群优化算法

粒子群算法 (particle swarm optimization, PSO) 是由 Eberhart 和 Kennedy 在 1995 年共同提出的一种新型全局优化算法, 起源于对鸟类捕食行为的模拟。粒子群算法中, 每个优化解都是搜索空间中的一只鸟, 称为粒子。所有粒子都有一个由优化函数决定的适应度值, 每个粒子还有一个速度决定他们飞行的方向和距离。粒子群算法是粒子在解集内追随最优的粒子进行搜索。与其他算法相比, 粒子群算法收敛速度快、算法简单、容易实现、有记忆能力, 适用于复杂的全局优化问题^[20]。算法的数学描述如下:

$$Y_{id}^{k+1} = wY_{id}^k + c_1r_1(P_{best} - z_{id}^k) + c_2r_2(G_{best} - z_{id}^k) \quad (9)$$

$$z_{id}^{k+1} = z_{id}^k + Y_{id}^{k+1} \quad (10)$$

式中: z_i 为第 i 个粒子的位置矢量; Y_i 为第 i 个粒子的飞行速度, 即步进值; r_1 、 r_2 为介于 0 到 1 之间的随机数; P_{best} 为个体最优值; G_{best} 为全局最优值; k 为迭代次数; d 为粒子的维数; w 为惯性权重; c_1 、 c_2 为学习因子。式

(9) 由 3 部分组成, 第 1 部分表示惯性, 表示粒子跟踪前一时刻速度的能力, 由 w 调节, 当 w 值较大时, 算法的收敛速度快, 全局搜索能力较强, 但得到的解精确度不高; 当 w 值较小时, 算法的局部搜索能力强, 但很容易陷入局部最优。第 2 部分表示记忆, 表示粒子跟踪自身历史最优位置的能力, 由 c_1 调节。第 3 部分表示合作, 表示粒子跟踪整个粒子群历史最优位置的能力, 由 c_2 调节。

粒子群算法结构简单, 便于实现, 收敛速度快, 但易于丧失种群多样性而使算法出现早熟, 陷入局部最优。因此, 若惯性权重选择不恰当, 易降低寻优效率。

3.2 自适应粒子群优化算法

3.2.1 非线性权重的确定

粒子群算法的惯性权重 w 值相对较大时, 算法收敛快, 全局搜索能力强, 但是局部搜索能力较弱; 同理, 惯性权重 w 值相对较小时, 算法的局部搜索能力强, 可以得到较为精确的解, 但全局搜索能力较弱, 很容易陷入局部最优。因此, 在算法寻优过程中惯性权重 w 的大小对算法能否收敛具有重要作用。为此, 本文运用非线性的惯性权重策略, 对惯性权重进行调节, 其表达式为

$$w = \begin{cases} w_{\min.} - \frac{(w_{\max.} - w_{\min.})(f - f_{\min.})}{(f_{\text{avg.}} - f_{\min.})}, & f < f_{\text{avg.}} \\ w_{\max.}, & f > f_{\text{avg.}} \end{cases} \quad (11)$$

$$w_{\max.} = 0.9|\cos(k_{\max.})|\exp\left(\ln w_{\min.} \frac{1}{k_{\max.}}\right) + w_{\min.} \quad (12)$$

式中: f 为当前粒子适应值; $f_{\text{avg.}}$ 为当前所有粒子的平均适应值; $f_{\min.}$ 为当前所有粒子最小适应值; $k_{\max.}$ 为算法进化代数; $w_{\max.}$ 和 $w_{\min.}$ 分别为惯性的最大值和最小值, 而 $w_{\max.}$ 基于简谐波的方式周期性减小^[21-23]。

图 3 为惯性权重 w 的周期性衰减, 这样算法在初期

有较强的局部搜索能力, 后期也有适应全局搜索能力, 寻优全过程能够很好地平衡全局和局部搜索能力。

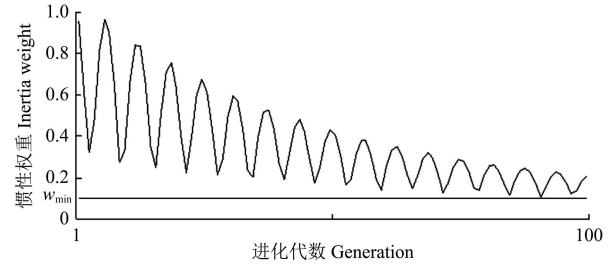


图 3 惯性权重 w 变化趋势

Fig.3 Change trend of inertia weight w

3.2.2 自适应的变异操作

σ^2 是粒子群的适应度方差, 如式 (13), 当群体适应度方差等于零时, 表示算法陷入了局部最优。为克服算法过早收敛问题, 通过判断粒子群的适应度方差的方式, 让算法在发生早熟收敛时, 能够跳出局部最优, 进入解集的其他区域继续进行搜索, 直到最后找到全局最优解, 而采用了变异操作^[24]。

$$\sigma^2 = \sum \left(\frac{f - f_{\text{avg}}}{f_{\max}} \right)^2 \quad (13)$$

式中: f 为当前粒子适应值; f_{avg} 为当前所有粒子的平均适应值; f_{\max} 为当前所有粒子最大适应值。群体适应度方差 σ^2 反映的是粒子群中所有粒子的收敛程度, σ^2 越小, 则各粒子越趋于收敛; 反之, 各粒子则处于随机搜索状态^[25]。

对于变异操作, 采用随机算子, 变异概率 p 的计算如下:

$$p = \begin{cases} k, & \sigma^2 < \sigma_d^2 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (14)$$

式中: σ_d^2 为 [0,1] 中间的数值, 根据实际情况选取; k 为变异概率。

4 APSO 算法在渠道断面优化中的应用

自适应粒子群 (APSO) 算法在渠道断面优化设计中的流程是, 首先对初始化参数, 然后计算每个粒子的目标函数, 把渠道底宽、设计水深看作变量, 计算目标函数, 最后运用该改进的粒子群算法, 即非线性惯性权重、自适应变异的粒子群优化 (APSO) 算法, 进行寻优。其具体寻优过程为:

Step1 初始化粒子群中粒子的位置与速度。

Step2 计算所有粒子的适应值, 寻找粒子的最优值。

Step3 判断算法收敛条件, 如果满足, 转向 Step7; 否则, 执行 Step4。

Step4 根据式 (9)、(10) 和式 (11) 更新粒子的位置与速度。

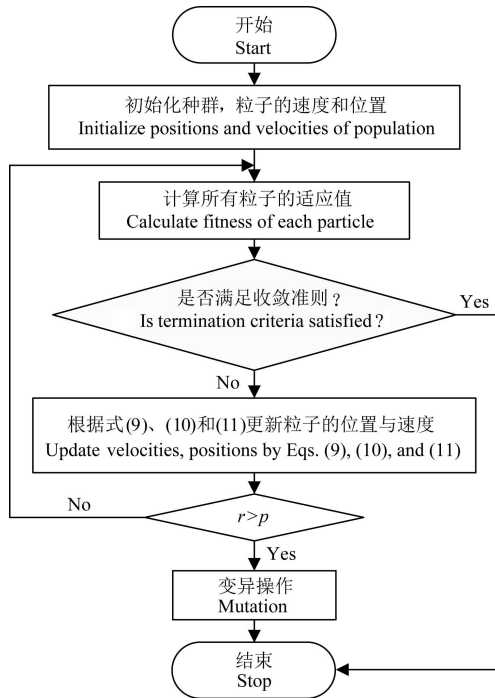
Step5 确定变异概率。

Step6 产生随机数 $r \in [0, 1]$, 如果 $r > p$, 执行变异操作; 否则, 转向 Step2。

Step7 求出最优解, 计算结束。

通过上述步骤, 将基本的 PSO 算法进行改进, 改

进后的 APSO 算法流程如图 4 所示。



注: r 为随机概率; p 为变异概率。

Note: r is the probability of random; p is the probability of mutation.

图 4 自适应粒子群算法流程图

Fig.4 Flow chart of self-adaptive particle swarm optimization algorithm

5 应用实例

黑龙江依兰县倭肯河灌区位于三江平原中西部松花江右岸一级支流倭肯河下游左岸河谷平原区, 地处东经 $130^{\circ}15'33'' \sim 129^{\circ}22'58''$, 北纬 $46^{\circ}06'29'' \sim 46^{\circ}23'03''$, 如

图 5 所示。灌区上起安兴水库, 下至幸福排干, 长约 57 km, 南邻依勃公路, 北靠倭肯河, 东侧与桦南县隔河相望^[26]。以黑龙江依兰县倭肯河灌区学兴干渠进行实例计算, 学兴干渠底比降 i 为 $1/15\ 000$, 土质为草炭土, 重度 $\gamma_s = 1.95\text{ g/cm}^3$, 内摩擦角 φ 为 14° , 黏聚力 $c=34.2\text{ kpa}$, 选用 C15 混凝土进行渠道衬砌, 渠床糙率系数 n 取值为 0.025, 渠道不冲流速 v_{cs} 为 2.6 m/s, 不淤流速 v_{cd} 为 0.4 m/s, 求解工程造价最少、占地最小的混凝土衬防渗渠道的最佳断面, 其中渠底宽 b 、水深 H 、衬砌厚度 T 、渠道边坡系数 m_0 的最优值。算法运行环境为 Inter Core (TM) i5 CPU@3.30GHz, 内存 4GB, 操作系统为 Windows 7, 开发工具为 Matlab 2012R, 对学兴干渠 12 个连续断面优化结果如表 1 所示。

由表 1 可见, APSO 经过 5~10 次搜索即可得到最优解, 流量误差控制在 $10^{-2}\text{ m}^3/\text{s}$ 以内。综合 12 个连续断面的优化结果可以发现, 各个断面参数都完全满足约束条件, 在最佳水力断面条件下, 随着设计流量逐渐减小, 渠道的衬砌厚度、工程造价也在减小。将优化后的衬砌厚度与原设计相比较, 原设计选用 8 cm 均一厚度的混凝土衬砌, 致使渠道 1~9 段, 由于衬砌厚度偏小, 无法满足抗冻胀要求; 渠道 10~12 段, 由于衬砌厚度偏大, 造价过高。

表 2 对比了 12 个连续断面优化前后的断面参数, 从顶宽和湿周两个参数对比优化前后渠道的工程占地与混凝土衬砌量, 第 1、5、6 三段渠道工程占地有所增加, 第 1、5 两段渠道混凝土衬砌量有所增加, 而 2、3、4、7、8、9、10、12 八段渠道的工程占地与混凝土衬砌量均有所减小。从渠道 12 个连续断面整体来看, 工程占地减小 1.5%, 混凝土衬砌量减小 1.8%, 优化效果明显。

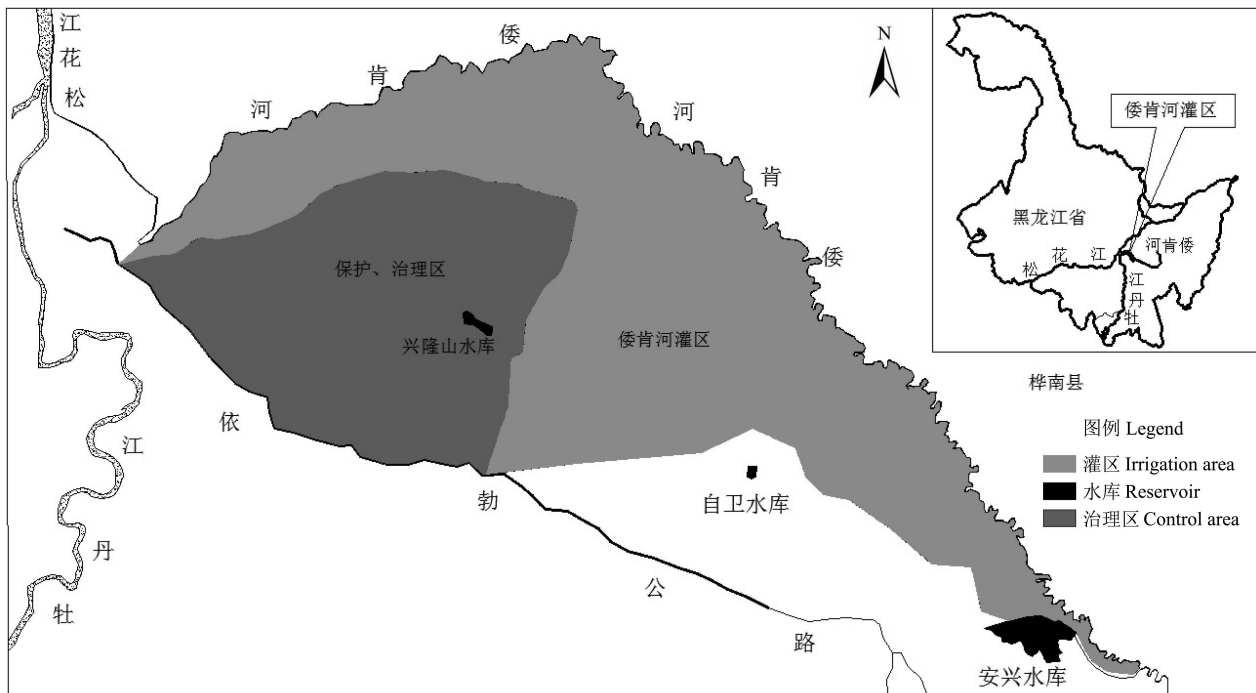


图 5 倭肯河灌区位置图

Fig.5 Location of Wokenhe irrigation

表 1 混凝土防渗渠道优化结果
Table 1 Simulation results of channel concrete lining

设计渠段 Designed channel	设计流量 Discharge $Q_d/(\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1})$	衬砌厚度 Values of thickness T/cm	边坡系数 Side slope m_0	底宽 Width of bottom b/m	水深 Height of channel H/m	工程造价 Cost/(元·m ⁻¹)
1	3.48	14.3	1.5	4.5	1.52	409
2	2.73	13.4	1.5	4	1.4	344
3	2.45	12.2	1.5	4	1.32	309
4	2.28	10.7	1.5	3.5	1.29	290
5	1.72	10.5	1.5	3	1.2	252
6	1.66	10.1	1.5	3	1.17	242
7	1.40	10.1	1.5	2.5	1.14	225
8	1.07	9.5	1.5	2.5	1	182
9	0.82	8.8	1.5	2	1	168
10	0.54	7.4	1.5	2	0.81	122
11	0.34	7.0	1.5	1	0.73	96
12	0.22	6.7	1.5	1	0.59	60

表 2 渠道断面参数的比较
Table 2 Comparison of channel cross section parameters

设计渠段 Designed channel	原设计 Original design				优化后 After optimization			
	底宽 Width of bottom b/m	水深 Height of channel H/m	上顶宽 Width of surface B/m	湿周 Wetted perimeter χ/m	底宽 Width of bottom b/m	水深 Height of channel H/m	上顶宽 Width of surface B/m	湿周 Wetted perimeter χ/m
1	4	1.6	9.40	9.77	4.5	1.52	9.66	9.98
2	4	1.41	8.83	9.08	4	1.40	8.80	9.05
3	4	1.33	8.59	8.80	4	1.32	8.56	8.76
4	3.5	1.33	8.09	8.30	3.5	1.29	7.97	8.15
5	2.5	1.33	7.09	7.30	3	1.20	7.20	7.33
6	2.5	1.31	7.03	7.22	3	1.17	7.11	7.22
7	2.5	1.20	6.70	6.83	2.5	1.14	6.52	6.61
8	2.5	1.04	6.22	6.25	2.5	1	6.10	6.11
9	2.5	0.91	5.83	5.78	2	1	5.60	5.61
10	2.5	0.91	5.83	5.78	2	0.81	5.03	4.92
11	1	0.73	3.79	3.63	1	0.73	3.79	3.63
12	1	0.60	3.40	3.16	1	0.59	3.37	3.13

6 渠道设计参数对优化目标的影响规律分析

以学兴干渠第一断面为例，分析 b 、 H 、 m_0 两两参数在满足最佳水力断面条件下对目标函数的影响规律。从图 7、图 8 中可以看到，在取值区间内，边坡 $m_0>1.5$ 时才有最佳水力断面，并且随着边坡系数的增大，目标函数逐渐增加。

6.1 渠底宽对目标函数的影响

从图 7 中可以看到，渠底宽 b 对目标函数的影响趋势是：当 $m_0\geq 1.5$ 时，目标函数随渠底宽 b 的增加而增大；当 $m_0<1.5$ 时，没有最佳水力断面。从图 6、图 7 中可以看到，当 $m_0=1.5$ 时，渠底宽的最优值为 $b=4.5\text{ m}$ ，与表 1 中的计算结果吻合。

6.2 渠道水深对目标函数的影响

从图 6、图 8 可以看到， $m_0>1.5$ 时，反映出目标函数随渠道水深 H 的增加而增大。渠道水深 $H=1.5\text{ m}$ ，

与计算结果一致。

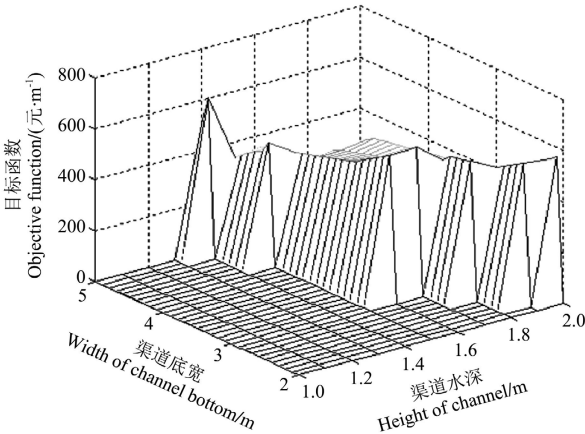


图 6 渠道水深和渠底宽对目标函数的影响
Fig.6 Effects of height of channel and width of channel bottom on objective

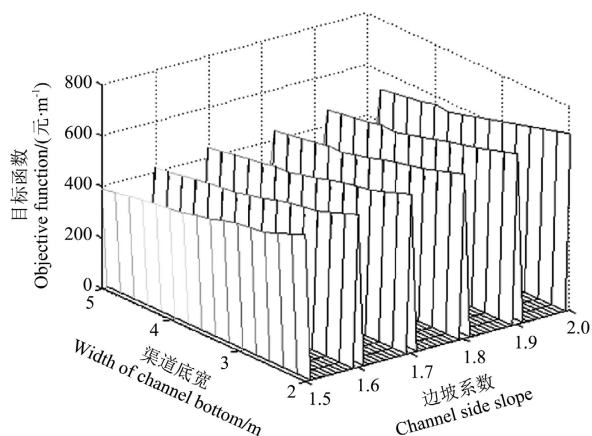


图7 边坡系数和渠底宽对目标函数的影响

Fig.7 Effects of channel side slope and width of channel bottom on the objective

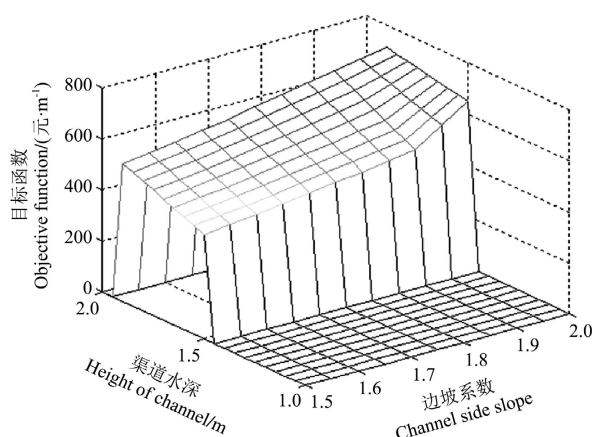


图8 边坡系数和渠道水深对目标函数的影响

Fig.8 Effects of channel side slope and height of channel on the objective

根据表1的计算结果,目标函数随覆土厚度 T 的增加而增加,厚度大小均为抗冻胀破坏的最小值,即给定取值区间的下限。这说明在确保渠道安全的前提下,衬砌厚度越薄越好,因此,在进行防渗渠道衬砌设计过程中,必须充分考虑当地的气候条件和土壤特性,以及温度条件,确保渠道运行安全。

7 结论

1) 基于渠道坡板抗冻胀破坏,构建了断面衬砌工程量最小、工程占地最小和流量误差最小的渠道断面优化模型,工程占地减小1.5%,混凝土衬砌量减小1.8%,优化效果明显。

2) 针对粒子群算法易陷入局部最优,以及全局寻优与局部寻优难以权衡的问题,提出一种改进的粒子群优化算法。对粒子群算法惯性权重进行非线性调整,平衡全局和局部搜索能力;通过判断粒子群的适应度方差方式,实现算法自适应变异。

3) 以黑龙江依兰县委肯河学兴干渠第一断面为例,分析了梯形渠道边坡系数、渠底宽、渠道水深设计参数对目标函数的影响规律,为渠道混凝土衬砌厚度的设计提供了参考依据,具有工程实际意义。

[参考文献]

- [1] 余长洪,周明耀,姜健俊,等.灌区节水改造中防渗渠道断面的优化设计[J].农业工程学报,2004,20(1):91-94.
Yu Changhong, Zhou Mingyao, Jiang Jianjun, et al. Optimal design of anti-seepage channel section for water-saving transformation in irrigation district[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2004, 20(1): 91-94. (in Chinese with English abstract)
- [2] 钱坤,苏国韶.人工蜂群算法在渠道断面优化设计中的应用[J].水利水电科技进展,2011,31(3):57-60.
Qian Kun, Su Guoshao. Application of artificial bee colony algorithm to optimization of channel section[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2011, 31(3): 57-60. (in Chinese with English abstract)
- [3] 王俊发,马旭,周海波.基于多目标模糊优化的土保护层塑膜铺衬防渗渠道设计[J].农业工程学报,2008,24(12):1-5.
Wang Junfa, Ma Xu, Zhou Haibo. Design of the seepage-proofing canal with soil protective layer geomembrane based on the multi-objective fuzzy optimization[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(12): 1-5. (in Chinese with English abstract)
- [4] 郭凤台,侯毅凯,杨丽,等.免疫遗传算法在洋河二灌区渠道优化设计中的应用[J].农业工程学报,2007,23(3):85-87.
Guo Fengtai, Hou Yikai, Yang Li, et al. Application of immune genetic algorithm to optimum design of second irrigation area of Yanghe River[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2007, 23(3): 85-87. (in Chinese with English abstract)
- [5] Adarsh S. Modeling parametric uncertainty in optimal open channel design using FORM-PGSL coupled approach[J]. Stoch Environ Res Risk Assess, 2012, 26(5): 709-720.
- [6] Monadjemi P. General Formulation of Best Hydraulic Channel Section[J]. American Society of Civil Engineers, 2014, 120(1): 27-35.
- [7] Atmapoojya S L, Ingle R N, Kacimov A R, et al. Design of Minimum Seepage Loss Canal Sections[J]. Journal of Irrigation & Drainage Engineering, 2001, 126(1): 28-32.
- [8] 张礼兵,程吉林,金菊良,等.免疫遗传算法在渠道优化设计中的应用[J].扬州大学学报:自然科学版,2005,8(3):50-53.
Zhang Libing, Cheng Jilin, Jin Juliang, et al. Application of immune genetic algorithm to optimum design of canal transect[J]. Journal of Yangzhou University Natural Science Edition, 2005, 8(3): 50-53. (in Chinese with English abstract)
- [9] 张礼兵,金菊良,程吉林.计算智能方法在灌排工程中的应用研究进展[J].农业工程学报,2007,23(8):274-280.

- Zhang Libing, Jin Juliang, Cheng Jilin. Research and application of computational intelligence method on irrigation and drainage engineering: a review[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2007, 23(8): 274—280. (in Chinese with English abstract)
- [10] Jain A, Bhattacharjya R K, Srinivasulu S. Optimal design of composite channels using genetic algorithm[J]. Journal of Irrigation & Drainage Engineering, 2004, 130(4): 286—295.
- [11] Das A. Cost and Flooding Probability minimization based design of HBPS channel[J]. Water Resources Management, 2010, 24(2): 193—238.
- [12] Froehlich D C. Optimal sizing of width- and depth-constrained trapezoidal channels[C]// North American Water and Environment Congress & Destructive Water ASCE, 2014: 4294—4299.
- [13] Dorigo M. The Ant System: Optimization by a colony of cooperating agents[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 1996, 26(1): 29—41.
- [14] 王正中. 梯形渠道砼衬砌冻胀破坏的力学模型研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(3): 24—29.
- Wang Zhengzhong. Establishment and application of mechanics models of frost heaving damage of concrete lining trapezoidal open canal[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2004, 20(3): 24—29. (in Chinese with English abstract)
- [15] 孙杲辰, 王正中, 王文杰, 等. 梯形渠道砼衬砌体冻胀破坏断裂力学模型及应用[J]. 农业工程学报, 2013, 29(8): 108—114.
- Sun Gaochen, Wang Zhengzhong, Wang Wenjie, et al. Frost heave fracture mechanical model for concrete lining trapezoidal canal and its application[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(8): 108—114. (in Chinese with English abstract)
- [16] 申向东, 张玉佩, 王丽萍. 混凝土预制板衬砌梯形断面渠道的冻胀破坏受力分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(16): 80—85.
- Shen Xiangdong, Zhang Yupei, Wang Liping. Stress analysis of frost heave for precast concrete panel lining trapezoidal cross-section channel[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(16): 80—85. (in Chinese with English abstract)
- [17] Li Zhou, Liu Shihong, Feng Youting, et al. Numerical study on the effect of frost heave prevention with different canal lining structures in seasonally frozen ground regions[J]. Cold Regions Science & Technology, 2013, 85: 242—249.
- [18] GB 50288-1999. 灌溉与排水工程设计规范[S].
- [19] SL18-2004. 渠道防渗工程技术规范[S].
- [20] Beni G, Wang J. Swarm intelligence in cellular robotic systems[J]. Nato Asi, 1992: 703—712.
- [21] 刘道华, 原思聪, 张锦华, 等. 粒子群参数自适应调整的优化设计[J]. 农业机械学报, 2008, 39(9): 134—137.
- Liu Daohua, Yuan Sicong, Zhang Jinhua, et al. Optimization design of particle swarm with self-adaptive parameter adjusting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(9): 134—137. (in Chinese with English abstract)
- [22] 王森, 武新宇, 程春田, 等. 自适应混合粒子群算法在梯级水电站群优化调度中的应用[J]. 水力发电学报, 2012, 31(1): 38—44.
- Wang Sen, Wu Xinyu, Cheng Chuntian, et al. Application of self-adaptive hybrid particle swarm optimization algorithm to optimal operation of cascade reservoirs[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012, 31(1): 38—44. (in Chinese with English abstract)
- [23] 罗志平. 自适应粒子群优化算法 (APSO) 在膜下滴灌优化灌溉中的应用[J]. 节水灌溉, 2011, 15(8): 51—54.
- Luo Zhiping. Application of adaptive particle swarm optimization algorithm in optimization of film mulched drip irrigation[J]. Water Saving Irrigation, 2011, 15(8): 51—54. (in Chinese with English abstract)
- [24] Beck T, Bieler A, Thomas N. Numerical thermal mathematical model correlation to thermal balance test using adaptive particle swarm optimization (APSO)[J]. Applied Thermal Engineering, 2012, 38(2): 168—174.
- [25] Wang Jianzhou, Lu Haiyan, Dong Yao, et al. The model of chaotic sequences based on adaptive particle swarm optimization arithmetic combined with seasonal term[J]. Applied Mathematical Modelling, 2012, 36(3): 1184—1196.
- [26] 白少华, 王惠连, 王淑丽. 倭肯河流域防洪治理措施的探讨[J]. 黑龙江水专学报, 2001, 28(3): 100—100.
- Bai Shaohua, Wang Huilian, Wang Shuli. Exploration on flood control and regulation measures in Wokenhe Valley[J]. Journal of Heilongjiang Hydraulic Engineering College, 2001, 28(3): 100—100. (in Chinese with English abstract)

Optimization and parameter analysis for channel cross section with concrete lining in northern irrigation district

Liu Dong^{1,2}, Hu Yuxiang^{1,3}, Fu Qiang^{1,2}, Li Tianxiao^{1,2}

(1. School of Water Conservancy & Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China;

2. Key Laboratory of High Efficient Utilization of Agricultural Water Resource of Ministry of Agriculture, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China;

3. School of Water Conservancy and Civil Engineering, Jilin Agriculture Science and Technology College, Jilin 130101, China)

Abstract: Artificial open channels are the major conveyance systems to deliver water. Computation of parameters of channel cross section is an important task in hydraulic design of open channels. From a hydraulic engineering perspective, it would be prefer to have an optimal method with reasonable mathematical model and high accuracy for designing the parameters of channel cross section. However, the optimization method of the channel cross section in northern Irrigation District with concrete lining only considers the reliability under single hydraulics conditions, while ignoring the safety of frost heaving and the economy. To optimize trapezoidal cross section structure with the concrete lining accurately, a mathematical model based on optimal hydraulic section, economy, and safety of frost heaving is solved by adaptive particle swarm optimization (APSO). The APSO is presented to overcome the problem of premature convergence and local optimal in conventional particle swarm optimization (PSO). With a reasonable assumption combined with the basic theory of mechanics, the constrained optimization model is propounded, which considers the thickness value of channel concrete slab simultaneously with the objective of cost minimization. The optimized channel section not only satisfies the optimal hydraulic cross section but guarantees the safety and stability of the side walls so that both the amount of the concrete lining and the land acquisition are optimized. Finally, the Xuexing main channel of Wokenhe Irrigation District in Heilongjiang Province is taken as an example to analyze the effects of design parameters, such as channel slope, width of channel bottom, height of channel on the objective function. The result shows that the parameters obtained by the APSO can minimize the lining cost and the land occupation under the condition of satisfying the optimum hydraulic section. Comparing the 12 continuous channel sections based on wetted perimeter, the reductions of the lining amount and the land occupation were 1.8% and 1.5% respectively with the low flow errors. For parameters, the optimum is less sensitive to the increase in bed width and more sensitive to the increase in side slope obviously. When the values of width and height of the channel increase, the objective function increases. The value of lining thickness is a comprehensive reflection of soil quality, negative temperature and status of moisture; thereby the objective function can be solved provided that freezing forces is determined according to the practical experience or experiment. The results obtained by APSO approach are satisfying and the method can be used reliably for the design of artificial open channels. The research can improve the level of concrete seepage channel optimization in cold region and provide a scientific basis for enhancing operation benefit in irrigation district.

Key words: canal; model; optimization; adaptive particle swarm optimization; lining canal; section optimization; frost-heaving damage; mathematical model