

doi:10.3969/j.issn.1674-8530.15.0164

基于猫群算法的渠道断面优化及
设计参数分析尚关蕾¹, 刘东^{1,2,3,4}, 胡宇祥¹

(1. 东北农业大学水利与建筑学院, 黑龙江 哈尔滨 150030; 2. 农业部农业水资源高效利用重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150030; 3. 黑龙江省粮食产能提升协同创新中心, 黑龙江 哈尔滨 150030; 4. 黑龙江省普通高等学校节水农业重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150030)



尚关蕾

摘要: 为替代工程设计优化问题求解过程中运用的低效经验试算法, 提出猫群算法以解决渠道断面优化设计问题. 采用猫群算法在全局空间下搜索边坡系数的变化对渠道断面优化的影响, 并且取得了良好的效果, 在满足其他的约束条件下, 选择适合的边坡系数 1.5 能够减少占地面积, 节约投资. 以黑龙江省江川灌区为例, 对灌溉渠道断面进行优化并且对断面设计参数进行分析, 算例表明, 猫群算法高效迅速, 精度高, 能有效地解决渠道断面设计中的优化问题, 具有相当高的应用价值. 优化结果显示, 模型计算所得渠道过水断面面积减小 4.2%, 工程占地随之减小. 各个参数中, 边坡系数取 1.5、渠道底宽取 2.000 0 m、水深取 1.500 0 m 时总体目标最佳, 并且分析这 3 个参数对目标函数的影响规律, 最佳目标随着边坡系数和水深的增大呈现出先增大后减小的趋势, 随着渠道底宽的增大呈现逐渐增大的趋势.

关键词: 灌溉渠道; 猫群算法; 断面; 优化设计; 设计参数

中图分类号: S277.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-8530(2016)02-0128-05

尚关蕾, 刘东, 胡宇祥. 基于猫群算法的渠道断面优化及设计参数分析[J]. 排灌机械工程学报, 2016, 34(2): 128-132.

SHANG Guanlei, LIU Dong, HU Yuxiang. Optimization of irrigation channel section based on cat swarm algorithm and analysis on design parameters[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering (JDIME), 2016, 34(2): 128-132. (in Chinese)

Optimization of irrigation channel section based on cat swarm algorithm and analysis on design parameters

SHANG Guanlei¹, LIU Dong^{1,2,3,4}, HU Yuxiang¹

(1. School of Water Conservancy & Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin, Heilongjiang 150030, China; 2. Key Laboratory of Efficient Use of Agricultural Water Resource, Ministry of Agriculture, Harbin, Heilongjiang 150030, China; 3. Collaborative Innovation Center for Improving Grain Production Capacity of Heilongjiang Province, Harbin, Heilongjiang 150030, China; 4. Key Laboratory of Water-Saving Agriculture of Universities in Heilongjiang Province, Harbin, Heilongjiang 150030, China)

Abstract: In order to replace some inefficient empirical test algorithms of engineering designs, cat swarm optimization (CSO) is presented to solve the problem of channel cross-section optimization. To meet with other constraints, choosing suitable slope can reduce land occupation and save investment. At the same time, the effect of the slope coefficient change on the channel cross-section optimization under the global space based on CSO were researched and has achieved good results. Taking Jiang-

收稿日期: 2015-07-20; 网络出版时间: 2016-01-25

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20160125.1055.012.html>

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2013BAD20B04-S3); 水利部公益性行业科研专项经费项目(201301096); 黑龙江省水利科技项目(201319)

作者简介: 尚关蕾(1990—), 女, 黑龙江齐齐哈尔人, 硕士研究生(1052743074qq.com), 主要从事灌溉排水及新技术研究.

刘东(1972—), 男, 黑龙江安达人, 教授, 博士生导师(通信作者, liudong@neau.edu.cn), 主要从事水土资源优化利用与管理研究.

chuan irrigation area in Heilongjiang Province as an example, irrigation channel section is optimized and the design parameters are analyzed. The examples show that this method has the advantages of high efficiency and high precision and it can solve the problem of channel cross-section optimization effectively. The results show that the area of channel sections reduced by 4.2% and the land occupation reduced together. For parameters, objective function is the best when the channel slope is 1.5, the width of channel bottom is 2.000 0 m and the height of channel is 1.500 0 m. The effects of these parameters on objective function are analyzed. The best goal showed a trend of first increasing and then decreasing along with the increase of channel slope and height of channel, and a trend of increasing along with the increase of width of channel bottom.

Key words: irrigation channel; cat swarm optimization; cross-section; optimal design; design parameter

灌溉渠道的建设费用在农田水利基础设施建设中占较大比例,因此灌溉渠道断面的优化设计显得尤为重要,设计是否科学直接影响着工程经济发挥效益及水资源利用率.常规的渠道断面设计中,通常采用计算量大、累积误差大、计算精度不佳的试算法.

近年来,随着计算机技术和人工智能技术的迅猛发展,一些学者开始将高维、非线性的算法引入到渠道优化设计中.如鲍卫锋等^[1]以遗传算法为手段,通过构造拉格朗日函数把各约束相联系的方法来解决设计中的优化问题;倪士超等^[2]根据扩展微分进化算法,以流量误差最小为目标函数,求解最优渠道断面;余长洪等^[3]用动态规划方法,以工程投资为优化目标,对江苏省某大型灌区进行了优化设计;钱坤等^[4]采用人工蜂群算法实现了在全局空间下搜索渠道断面的最优解;郭凤台等^[5]利用免疫遗传算法对河北省怀来县洋河灌区二干渠的渠道进行了优化设计;ATMAPOOJYA等^[6]以渠道用水量损失最小建立了灌区渠道断面数学模型,然后从设计、施工、投资等方面对灌溉渠道做了断面优化设计研究,具有质量可靠、施工方便、造价低廉和节水等优点.

猫群优化算法(cat swarm optimization, CSO)是在2006年由CHU等^[7]首次提出的一种在猫的行为基础上建立的新型全局优化智能算法.该算法是将猫的搜寻和跟踪2种行为结合起来,在初值敏感性、收敛性及计算速度等方面与其他优化算法相比较有明显优势,研究人员已经将猫群优化算法成功应用于多目标优化、图像分类和车间调度等方面^[8].2009—2015年,许多学者对猫群优化公式进行改进,提出了基于线性阵列合成问题的猫群算法,以及通过信息系统识别而提高猫群算法的收敛性^[9],在猫群算法的扩展基础上提出新的多目标算法^[10].

因此文中将CSO算法首次引入到渠道断面优化设计问题中进行研究,并验证该算法的有效性,以期为使渠道节水改造工程更合理及灌区获得更大经济效益做出贡献.

1 渠道断面优化的数学模型

以梯形断面为例进行研究,图1为该断面示意图.图中 m 为边坡系数, h 为设计水深, b 为渠道底宽.

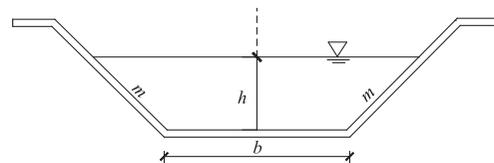


图1 渠道断面示意图

Fig. 1 Schematic diagram for cross-section

渠道梯形断面优化设计是根据明渠均匀流公式进行水力计算.

明渠均匀流基本公式为

$$Q_c = AC \sqrt{Ri}, \quad (1)$$

$$X = b + 2h \sqrt{1 + m^2}, \quad (2)$$

式中: A 为渠道断面过水断面面积, $A = (b + mh)h$; X 为湿周; R 为水力半径, $R = \frac{A}{X}$; C 为谢才系数, $C =$

$$\frac{1}{n} R^{1/6}.$$

由此可得,明渠均匀流梯形断面渠道流量计算公式为

$$Q_c = \frac{\sqrt{i} [(b + mh)h]^{5/3}}{n (b + 2h \sqrt{1 + m^2})^{2/3}}, \quad (3)$$

据此可得渠道断面优化模型为

$$\min f = \min \left| \frac{1}{n} \frac{[(b + mh)h]^{5/3}}{(b + 2h \sqrt{1 + m^2})^{2/3}} i^{1/2} - Q_d \right|, \quad (4)$$

式中: Q_d 表示渠道设计流量,常以灌区工程规划研究阶段设计渠道所承担的输水任务为依据来确定,然后通过渠道等级、沿线地形和采用的衬砌材料等因素来确定边坡系数 m 及糙率系数 n .渠道比降 i 是根据渠道沿线土质、渠水含沙量和渠道水位衔接要求等因素综合考虑后确定.因此,渠道断面优化设计是在 m, n, i 已知的条件下,让计算流量与设计流量无限接近,同时还必须满足所有约束条件,在这些条件下计算出渠道底宽 b 和设计水深 h 的最优解.

2 CSO 算法

猫群优化算法是根据猫平时的行为模式以及这种群体智能行为来模拟的一种新型智能优化算法,猫所处的位置信息就是所求优化问题的解.已有研究显示^[6],猫群的活动形式主要分为以下2种,一种是跟踪模式即猫群在跟踪目标时候的行为,另一种是搜寻模式即猫群在环视周围状态时候的行为.CSO算法中,让大多数猫处于搜寻模式,剩余的一小部分猫处于跟踪模式,其算法流程如图2所示^[7].

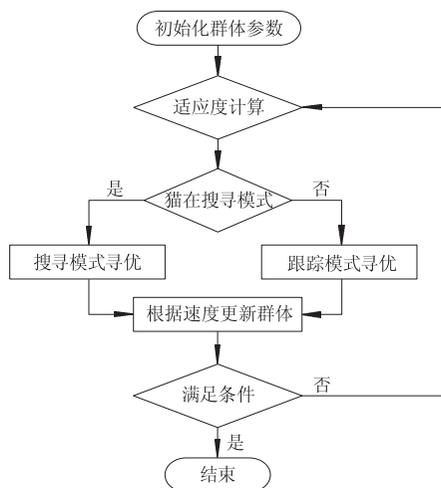


图2 猫群算法流程

Fig.2 Flow chart of cat swarm optimization algorithm

搜寻模式下,复制当前位置为副本放到记忆池中,然后对记忆池中的个体副本进行位置更新,最后计算记忆池中候选解的适应度值并且选择适应度值最高的点作为猫的最优位置.跟踪模式下,通过改变猫的速度来不断更新猫的位置,使得到的值不断地逼近最优解,以此进行迭代寻找到猫的全局最优解.

3 算例分析

选取江川灌区东一干作为典型渠道进行研究.江川灌区位于黑龙江省松花江下游南岸,桦川县境内,130°47'09"~131°06'00"E,46°54'48"~47°13'09"N.灌区北面紧挨松花江,南面和桦川县苏家店为邻,东面与新城镇中伏乡接壤,西面与悦来镇为邻,灌区东西长23.7 km,南北宽31.7 km.该灌区东一干渠道采用梯形断面,设计流量 $Q_d = 2.0 \text{ m}^3/\text{s}$,边坡系数 $m = 2.5$,渠道比降 $i = 0.0002$,渠床糙率系数 $n = 0.025$,渠道不冲流速 $v_{cs} = 0.8 \text{ m/s}$,不淤流速 $v_{cd} = 0.4 \text{ m/s}$ ^[11-13],求渠道底宽 b 和设计水深 h 的最优解.

3.1 目标函数

灌区渠道断面优化设计满足2个目标,即设计流量与计算流量之间的误差最小和渠道过水断面的面积最小,最终获得渠道开挖工程量最小的断面.目标函数为

$$\min f = \frac{|Q_c - Q_d|}{Q_d} + \lambda \left[\frac{(mb + h)h}{m} \right], \quad (5)$$

式中: λ 是平衡系数,用来平衡式(5)右边2项的数值与量纲,该目标函数中, $\lambda = 10^{-5} \text{ m}^{-2}$.

3.2 约束条件

渠道的平均流速应介于不淤流速 v_{cd} 与不冲流速 v_{cs} 之间;渠道纵坡降应不小于最小坡降,不大于允许最大坡降,故目标函数的约束条件设为

$$v_{cd} < v < v_{cs}, b, h > 0, \quad (6)$$

$$i_{\min} < i < i_{\max}. \quad (7)$$

3.3 计算结果

选用猫群算法对目标函数进行优化,算法中参数设置如下:迭代次数为50代,种群规模为50,配比 MR 应为一较小数,取0.03.为了验证CSO算法寻优的高效迅速及鲁棒性,对目标函数反复计算20次.以目标函数值即断面面积 A 作为纵坐标,目标函数值随迭代次数的变化曲线见图3.渠道断面优化结果与优化前的对比见表1.

图3表明,目标函数随着迭代次数的下降速度非常快,证明了CSO算法的迅速收敛性.在满足了断面的水力条件及算法中各约束条件下,通过表1优化结果对比可以看出,优化后比优化前的过水断面面积减少了 0.2027 m^2 ,说明了CSO算法在解决渠道断面优化设计问题中减少了工程占地率,具有一定的应用价值.

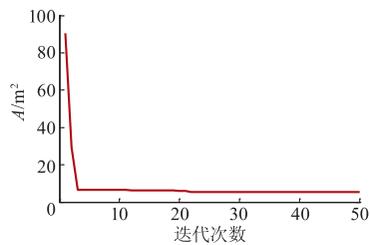


图 3 目标函数值随迭代次数的变化曲线

Fig. 3 Curve of objective function along with iterations change

表 1 渠道断面优化结果

Tab. 1 Simulation results of cross-section

项目	$Q_d / (\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	m	b/m	h/m	A/m^2
优化前	2.0	2.5	2.000 0	1.040 0	4.784 0
优化后	2.0	1.5	1.749 2	1.103 4	4.581 3

为了说明边坡系数 m 对渠道断面优化的影响,令优化变量 m 取离散值 $[1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0]$,利用罚函数形式将约束条件加入适应度函数,运用 CSO 算法进行搜索.对每个 m 变量对应的目标函数都进行 15 ~ 20 次搜索,每一轮搜索所得的最优方案见表 2.

表 2 不同边坡系数下渠道断面参数的优化结果

Tab. 2 Simulation results of parameters of cross-section under different slope coefficients

项目	最优方案				
	1	2	3	4	5
m	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
b/m	1.677 3	2.001 5	1.922 7	1.749 2	1.257 2
h/m	1.339 0	1.414 7	1.189 5	1.103 4	1.165 9
$Q_c / (\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	1.999 9	1.999 8	1.999 8	1.999 6	2.000 1
A/m^2	4.292 0	4.103 7	4.443 0	4.581 3	4.731 8

由表 2 可见,满足所有约束条件下,边坡系数 m 的不同对渠道断面优化有一定影响, m 取 1.5 时过水断面面积最小,比原设计中 m 为 2.5 时面积减少了 $0.680 3 \text{ m}^2$,在计算流量与设计流量相当接近的情况下可以减少工程的开挖量,节约投资,为江川灌区节水改造工程做出一定的贡献.同时,也能说明 CSO 算法在梯形渠道断面优化问题上效果很好,优化精度可达 10^{-4} m ,克服了传统优化设计中计算困难和计算效率低等缺点.

4 渠道设计参数对总体目标的影响

以总体目标水平的大小来反映渠道断面设计的优劣,分析参数 b, h, m 两两因素对总体目标水平的影响规律.图 4 为渠道高度和边坡系数的影响,图 5 为渠底宽和边坡系数的影响,图 6 为渠道高度和渠底宽的影响.

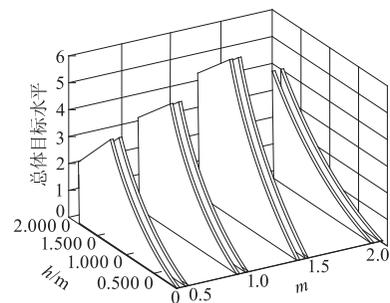


图 4 渠道高度和边坡系数的影响

Fig. 4 Effects of side slope and height of channel

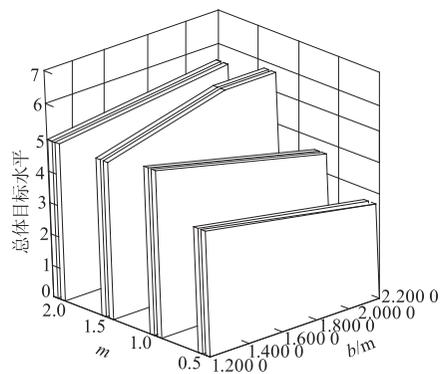


图 5 渠底宽和边坡系数的影响

Fig. 5 Effects of side slope and width of channel bottom

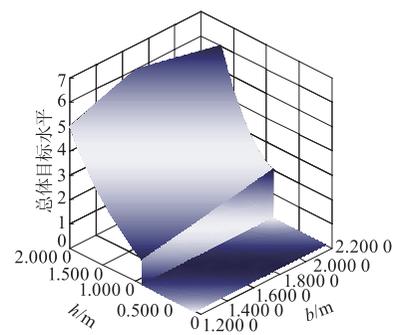


图 6 渠道高度和渠底宽的影响

Fig. 6 Effects of height of channel and width of channel bottom

4.1 渠底宽对总体目标影响

由图 5 可见,总体目标水平受渠底宽 b 的影响是:当 $m \geq 1.5$ 时,随着渠底宽 b 的增大总体目标水平增大;当 $m < 1.5$ 时,随着渠底宽 b 的增大总体目标水平减小.同时,图 4,5 可以显示出在边坡系数 m 固定在 1.5 时,渠底宽大于 $2.000 0 \text{ m}$ 时总体目标水平不再继续增大,表明渠底宽的最优值为 $2.000 0 \text{ m}$.

4.2 渠道高度对总体目标的影响

图 4,6 反映出随着渠道高度的增大,总体目标水平增大.但是当 $m \leq 1.5, h > 1.500 0 \text{ m}$ 时,总体目标水平随渠道高度的增大呈现减小趋势,因此灌区渠道高度 h 的最优值为 $1.500 0 \text{ m}$.

4.3 渠道边坡系数对目标函数的影响

由图4,5中可以看出,取值范围内,渠道边坡系数 m 受约束影响的波动很大.图4能反映出,当 $m \leq 1.5$ 时,边坡系数 m 越大总体目标水平越大;当 $m > 1.5$ 时,总体目标水平不再增大,所以边坡系数的最优值为1.5.

5 结 论

1) 应用猫群算法对黑龙江省江川灌区渠道断面进行了优化设计,设计表明猫群算法在解决该问题上全局性好、收敛速度快、鲁棒性强,并且得到了使人满意的结果.

2) 在满足其他约束条件下,边坡系数的大小对渠道断面优化有很大的影响,选择合适的边坡系数能够减少占地面积,节约投资,为江川灌区节水改造工程提供一定的参考价值.

3) 基于猫群算法算出多组不同渠底宽度、渠道高度及边坡系数的数值.分析了梯形渠道断面渠底宽、渠道高度和边坡系数等设计参数对总体目标水平的影响规律,进而得到适合该灌区各设计参数的最优值.对于边坡系数 m 的选择还应考虑不同材料渠道断面结构稳定性对于边坡系数的限制性要求,以及猫群算法的多目标优化功能.

参考文献 (References)

- [1] 鲍卫锋,黄介生,孔祥元,等.基于遗传算法的渠道断面最优设计[J].中国农村水利水电,2005(5):75-76.
BAO Weifeng, HUANG Jiesheng, KONG Xiangyuan, et al. Optimal design of canal sections based on genetic algorithms[J]. China rural water and hydropower, 2005 (5):75-76. (in Chinese)
- [2] 倪士超,迟道才.基于扩展微分进化算法的渠道断面优化设计[J].人民长江,2009,40(13):81-82.
NI Shichao, CHI Daocai. Channel section optimization design based on extended differential evolution algorithm [J]. Yangtze River, 2009, 40(13):81-82. (in Chinese)
- [3] 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 CSAE, 2004, 20(1):91-94. (in Chinese)
- [4] 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 & technology of water resources, 2011, 31(3):57-60. (in Chinese)
- [5] 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 CSAE, 2007, 23(3):85-87. (in Chinese)
- [6] 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.
- [7] CHU S C, TSAI P W, PAN J S. Cat swarm optimization [J]. Lecture notes in computer science, 2006(6):854-858.
- [8] YANG F, DING M, ZHANG X, et al. Non-rigid multimodal medical image registration by combining L-BFGS-B with cat swarm optimization[J]. Information sciences, 2015, 316:440-456.
- [9] PANDA G, PRADHAN P M, MAJHI B. IIR system identification using cat swarm optimization[J]. Expert systems with applications, 2011, 38(10):12671-12683.
- [10] PRADHAN P M, PANDA G. Solving multiobjective problems using cat swarm optimization[J]. Expert systems with applications, 2012, 39(3):2956-2964.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部.渠道防渗工程技术规范:GBT 50600—2010[S].北京:中国计划出版社,1997.
- [12] 中华人民共和国水利部.灌溉与排水工程设计规范:GB50288—99[S].北京:中国计划出版社,1999.
- [13] 中华人民共和国水利部.农田排水工程技术规范:SL4—2013[S].北京:中国水利水电出版社,2013.

(责任编辑 朱漪云)