

基于多目标模糊优化的土保护层塑膜铺衬防渗渠道设计

王俊发¹, 马旭², 周海波¹

(1. 佳木斯大学机械工程学院, 佳木斯 104007;

2. 华南农业大学南方农业机械与装备关键技术省部共建教育部重点实验室, 广州 510642)

摘要: 传统的土保护层塑膜防渗渠道设计仅从水利学的角度考虑单一水力条件下的可靠性, 而忽视了经济上的实用性。该文根据多目标模糊优化设计思想, 建立了以输水量大、经济性好为目标, 满足多种约束条件的模糊优化设计数学模型, 对土保护层塑膜铺衬防渗渠道的断面结构进行优化, 给出了不同淹没度条件下渠道设计参数的模糊优化结果, 仿真分析了渠道边坡角、渠底宽、覆土厚度和渠坡高度等设计参数对总体目标的影响规律。该研究结果为提高土保护层塑膜铺衬防渗渠道的综合设计水平提供了参考依据。

关键词: 渠道防渗, 塑膜铺衬, 模糊优化, 多目标

中图分类号: S275

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2008)-12-0001-05

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-objectives fuzzy optimization[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(12): 1-5. (in Chinese with English abstract)

0 引言

中国是一个水资源贫乏的农业大国, 每年农业用水浪费达到 1730 亿 m^3 , 主要损失在输水过程中, 解决渠道渗漏问题是缓解中国水资源短缺的重要途径之一^[1-3]。相对于混凝土等刚性材料衬砌的防渗渠道, 土保护层塑膜防渗渠道具有造价低、抗渗能力强等优点^[4-6], 适用于经济欠发达地区^[2,7], 但因其边坡稳定性较差, 主要用于梯形断面渠道^[8]。目前, 土保护层塑膜防渗渠道设计方法是在水利最佳断面的基础上选择接近水力最佳断面的实用断面^[8], 这种断面结构参数的确定比较单一, 没有考虑渠道的经济性, 而目前工程经济问题日益引人注目, 已成为衡量一项工程设计优劣的重要指标之一。因此, 既考虑水力条件又考虑经济因素对土保护层塑膜铺衬防渗渠道的设计施工具有重要意义。本文在渠道水利最佳断面设计和渠道造价分析的基础上, 应用模糊技术^[9,10], 以兼顾渠道输水量大和工程造价低为总体目标, 对土保护层塑膜铺衬防渗渠道进行多目标多约束的优化设计^[11,12], 以求提高土保护层塑膜铺衬防渗渠道综合设计水平, 更好地满足工程实际应用。

1 设计基础

以素土作为塑料薄膜保护层的防渗渠道, 其渠道断面结构主要分渠基层、塑料薄膜层、土保护层(图1), 结构尺寸可依据渠道(明渠)输水量的曼宁公式确定^[8]。考虑渠道单位长度的费用组成, 应包括土方工程费用、

膜料成本费用、土方回填压实费用及占用土地费用。渠道断面经济性好即为在渠道底坡 i 、渠道表面糙率系数 n 已知条件下, 满足渠道不冲、不淤流速要求和渠道在水位突然下降及降雨条件下的稳定要求^[2], 使渠道的单位长度造价低。

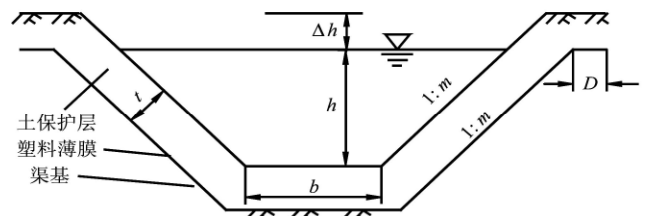


图1 土保护层塑膜防渗梯形渠道断面

Fig.1 Section of seepage-proofing trapezoid canal with soil protective layer geomembrane

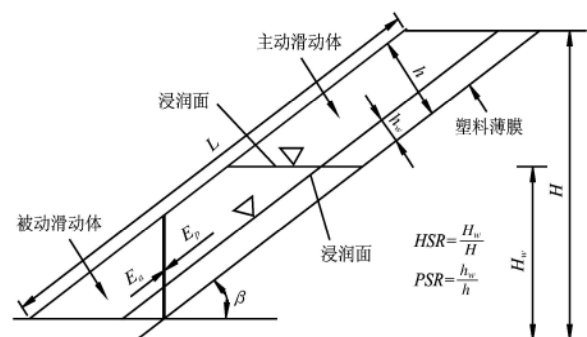


图2 土保护层塑膜防渗梯形渠道淹没度示意图

Fig.2 Submergence-degree of seepage-proofing trapezoid canal with soil protective layer geomembrane

对于土保护层塑膜防渗渠道, 保护层土体的淹没度是影响渠道边坡稳定的重要因素之一^[2]。保护层土体的垂直淹没度为: 在渠道水位突然回落的情况下, 渠坡液面

收稿日期: 2007-04-18 修订日期: 2008-03-16

基金项目: 黑龙江省自然科学基金资助(E2006-29)

作者简介: 王俊发(1958—), 男, 黑龙江佳木斯人, 教授, 工学博士, 主要从事农田水利机械的研究。佳木斯 佳木斯大学机械工程学院, 104007。
Email: wangjunf2934@sina.com

以上, 浸润面以下的土体高度 H_w 与液面以上的渠坡总高度 H 之比, 即 $HSR = H_w / H$; 保护层土体的水平淹没度为: 在雨水沿塑膜渗入情况下, 饱和土体的厚度 h_w 与保护层土体的总厚度 h 之比, 即 $PSR = h_w / h$, 见图 2。

土保护层塑膜铺衬渠道设计还要依据边坡稳定性因素。在渠道水位突然下降情况下, 土保护层塑膜铺衬防渗渠道边坡稳定安全系数表达式为

$$FS_1 = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (1)$$

其中,

$$A = W_A \sin \beta \cos \beta - U_h \cos^2 \beta + U_h$$

$$W_A = \left(\frac{\gamma_s \times h \times (2H_w \cos \beta - h)}{\sin 2\beta} \right) + \left(\frac{\gamma_d \times h \times (H - H_w)}{\sin \beta} \right)$$

$$U_h = \frac{\gamma_w h^2}{2}$$

式中 h ——主动滑动体土体的厚度, m; β ——渠道坡角, ($^\circ$); γ_s ——保护层土体的饱和容重, N/m^3 ; γ_d ——保护层土体的干容重, N/m^3 。

$$B = -W_A \sin^2 \beta \tan \phi + U_h \sin \beta \cos \beta \tan \phi - N_A \cos \beta \tan \phi - (W_p - U_v) \tan \phi$$

其中,

$$N_A = W_A \cos \beta + U_h \sin \beta - U_n$$

$$U_n = \frac{\gamma_w h \cos \beta}{\sin 2\beta} \times (2H_w \cos \beta - h)$$

$$U_v = U_h \tan \beta$$

$$W_p = \frac{\gamma_s h^2}{\sin 2\beta}$$

$$C = N_A \tan \phi \sin \beta \tan \phi$$

式中 δ ——保护层土体与塑料薄膜的摩擦角, ($^\circ$); γ_w ——水的容重, N/m^3 ; ϕ ——土体内摩擦角, ($^\circ$)。

对于土保护层塑膜防渗渠道, 降雨常常是诱发渠道滑坡的原因之一, 降雨情况下土保护层塑膜铺衬防渗渠道的安全系数表达式为

$$FS_2 = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (2)$$

与式 (1) 相类似, $a = A$; $b = B$; $c = C$ 。

其中,

$$W_A = \frac{\gamma_d(h - h_w)(2H \cos \beta - (h + h_w)) + \gamma_s \times h_w(2H \cos \beta - h_w)}{\sin 2\beta}$$

$$W_p = \frac{\gamma_d(h^2 - h_w^2) + \gamma_s h_w^2}{\sin 2\beta}$$

$$U_n = \frac{\gamma_w h_w \cos \beta (2H \cos \beta - h_w)}{\sin 2\beta}$$

$$U_h = \frac{\gamma_w h_w^2}{2}$$

式中符号意义同上。

2 多目标多约束模糊优化数学模型的建立

2.1 目标函数确定

1) 经济性函数

选取单位长度渠道的造价最低为经济性目标函数, 寻求造价最低的合理尺寸。设 W_1 为每米渠道的挖方量 (m^3), C_1 为挖方量单价 (元/ m^3); W_2 为每米渠道保护层的填方量 (m^3), C_2 为夯实填方量的单价 (元/ m^3); W_3 为每米渠道塑料薄膜用量 (m^2), C_3 为塑料薄膜单价 (元/ m^2); W_4 每米渠道的征地面积 (m^2), C_4 为征地面积单价 (元/ m^2)。则经济性目标函数 F 为

$$F = C_1 W_1 + C_2 W_2 + C_3 W_3 + C_4 W_4 \quad (3)$$

其中,

$$W_1 = \left[b + \frac{2t}{m + \sqrt{1 + m^2}} + m(h + \Delta h + t) \right] (h + \Delta h + t) + D \times \Delta h$$

$$W_2 = \left[b + \frac{2t}{m + \sqrt{1 + m^2}} \right] \times t + [2(h + \Delta h) + t] \times t \sqrt{1 + m^2} + D \times \Delta h$$

$$W_3 = b + 2 \left[\frac{t}{m + \sqrt{1 + m^2}} + (h + t) \sqrt{1 + m^2} + D \right]$$

$$W_4 = b + \frac{2t}{m + \sqrt{1 + m^2}} + 2m(h + \Delta h + t)$$

式中 b ——渠底宽, m; h ——水深, m; t ——土层厚度, m; m ——渠道边坡比, $\tan \beta = 1/m$; Δh ——渠道超高, m; D ——渠道上沿渠基底宽度, m。

2) 输水量函数

根据曼宁公式, 渠道 (明渠) 输水量目标函数 Q 为

$$Q = \frac{\sqrt{i}(bh + mh^2)^{5/3}}{n(b + 2h\sqrt{1 + m^2})^{2/3}} \quad (4)$$

式中 n ——糙率; i ——渠道底坡斜率。

2.2 经济性、输水量函数的约束最优解模型

1) 设计变量

$$X = (b, h, t, \beta)^T \quad (5)$$

2) 目标函数

$$\min D(X) = [F(X), -Q(X)]^T \quad (6)$$

3) 约束条件

在水位突然降落条件下, 安全性范围^[2]: $1.5 \leq FS_1 \leq 3$;

在降雨条件下, 安全性范围取^[2]: $1.5 \leq FS_2 \leq 3$;

渠道流速条件^[3]: $V \leq V_{\text{不冲}} = 0.7 \text{ m/s}$, $V \geq V_{\text{不淤}} = 0.2 \text{ m/s}$;

渠坡角范围: $25 \leq \beta \leq 45$;

土保护层厚度范围: $0.3 \leq t \leq 0.7$;

渠底宽范围: $1 \leq b \leq 2$;

渠内水深范围: $h \leq 1.5$ 。

2.3 目标函数的模糊化

设由式 (3) 求得经济性目标函数的最大值和最小值分别为 F_{\max} 和 F_{\min} , 则经济性目标的隶属函数为

$$\mu_F(X) = \left(\frac{F_{\max} - \min F(X)}{F_{\max} - F_{\min}} \right)^p \quad (7)$$

设由式 (4) 求得流量目标函数的最大值和最小值分

别为 Q_{\max} 和 Q_{\min} ，则流量目标函数的隶属函数为

$$\mu_{\tilde{Q}}(X) = \left(\frac{\max Q(X) - Q_{\min}}{Q_{\max} - Q_{\min}} \right)^p \quad (8)$$

$$\tilde{G} = \tilde{F} \cap \tilde{Q}$$

令模糊优越集为，为降低由相对误差所产生的累积误差，取 $p = 0.5$ 。

2.4 最优解确定

模糊优越集 \tilde{G} 的隶属函数计算公式为

$$\mu_{\tilde{G}}(X) = \mu_{\tilde{F}}(X) \wedge \mu_{\tilde{Q}}(X) \quad (9)$$

最优解方程为

$$\mu_{\tilde{G}}(X^*) = \max \mu_{\tilde{G}}(X) = \max [\mu_{\tilde{F}}(X) \wedge \mu_{\tilde{Q}}(X)] \quad (10)$$

求解模型如下

求 λ ， X

目标 $\max \lambda = \mu_{\tilde{G}}(X^*)$

约束为

$C_j(X) \subset H_j \quad j = 0, 1, \dots$ (上述各常规约束)

$\mu_{\tilde{F}}(X) \geq \lambda$ (经济性模糊目标约束)

$\mu_{\tilde{Q}}(X) \geq \lambda$ (流量模糊目标约束)

$0 \leq \lambda \leq 1$ (隶属度约束)

3 塑膜铺衬渠道多目标模糊优化设计算例

假定一个挖方渠道采用塑料薄膜防渗，土质为轻中壤土，土料饱和状态下的凝聚力 $C = 7840 \text{ N/m}^2$ ，内摩擦角 $\phi = 26.7^\circ$ ，渠膜摩擦角 $\delta = 25^\circ$ ，土保护层土体的浮容重 $\gamma = 9800 \text{ N/m}^3$ ，饱和容重 $\gamma_m = 19600 \text{ N/m}^3$ ，渠道超高 $\Delta h = 0.5 \text{ m}$ ， $C_1 = 3 \text{ 元/m}^3$ ， $C_2 = 1.6 \text{ 元/m}^3$ ， $C_3 = 0.8 \text{ 元/m}^2$ ， $C_4 = 2.0 \text{ 元/m}^2$ ，渠道底坡斜率 $i = 0.002$ ，渠道超高和渠道突然降落值为 $\Delta h = 0.5 \text{ m}$ ，糙率 $n = 0.0275$ ，渠道上沿渠基底宽度 $D = 0.1$ ，保护层土体的饱和容重 $\gamma_s = 21.0 \text{ N/m}^3$ ，保护层土体的干容重 $\gamma_d = 18.0 \text{ N/m}^3$ ，水的容重 $\gamma_w = 1.0 \text{ N/m}^3$ ，其他约束条件如前文所示。以输水量大、投资少为目标，求土保护层塑膜铺衬防渗渠道的工程经济断面尺寸，即渠底宽 b 、水深 h 、土层厚度 t 、渠道坡角 β 的最优值。

图 3 为多目标模糊优化设计过程，搜索步长为 0.01，表 1 给出了在不同淹没度 (HSR=PSR) 条件下的模糊优化结果。依据当地降雨情况及渠道水位落差，即可选取设计参数。

将以上优化结果与文献[13]比较，在保护层土壤特性相同，塑料薄膜单价、征地面积单价和人工费用不变的条件下，文献[13]的单目标优化结果为：当渠道流量 $Q = 10 \text{ m}^3/\text{s}$ 时，其工程造价为 156.48 元/m；而在多目标的优化的条件下，当渠道流量 $Q = 6.94 \text{ m}^3/\text{s}$ 时，其工程造价仅为 56.24 元/m (取淹没度等于 1.0)。因此，多目标的

优化可为渠道施工建设单位，根据实际情况，确定渠道规模，提供有价值的参考。

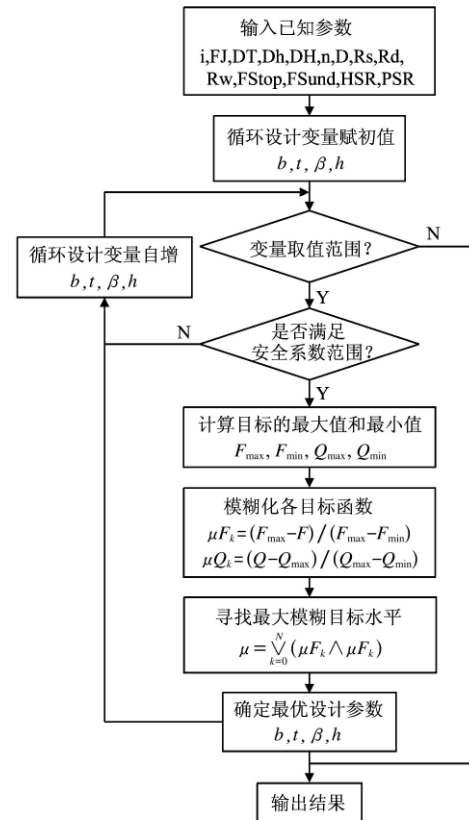


图 3 塑膜铺衬渠道多目标模糊优化设计流程图

Fig.3 Flowchart of multi-objective fuzzy optimization of the seepage-proofing canal with lining geomembrane

表 1 土保护层塑膜铺衬防渗渠道多目标模糊优化结果

Table 1 Optimal results of the multi-objective fuzzy optimization of the seepage-proofing canal with lining geomembrane

淹没度 (HSR=PSR)	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
渠底宽 b/m	1.00	1.02	1.26	1.46	1.50	1.48	1.49
保护层厚 t/m	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
边坡角 $\beta/^\circ$	39	39	39	39	39	39	39
渠高 H/m	3.48	2.86	2.48	2.13	1.85	1.66	1.49
安全系数 FS1	2.33	2.34	2.43	2.55	2.68	2.82	2.96
安全系数 FS2	2.33	2.34	2.43	2.55	2.68	2.82	2.96
流量 $Q/\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	4.83	5.19	6.32	6.87	6.87	6.91	6.94
单位渠长成本 $F/\text{元} \cdot \text{m}^{-1}$	48.34	49.71	53.91	55.94	56.03	56.14	56.24

4 塑膜铺衬渠道设计参数对总体目标的影响规律分析

现以淹没 $\text{HSR}=\text{PSR}=0.8$ 为例，分析设计参数 $X = (b, h, t, \beta)^T$ 两两因素对总体目标水平的影响规律 (图中将总体目标水平小于 0.3 的区域取为零值)。

4.1 边坡角对总体目标的影响

从图 4、图 7 和图 8 中可以看到，在取值区间内，边坡角 β 受约束的影响，波动较大，从图 4 中可以看出，

在 $\beta=45^\circ$ 时, 总体目标水平取得最大值, 约为 0.65, 但表 1 中计算的最优结果为 $\beta=39^\circ$, 即考虑了多种因素的影响之后, 渠道边坡角应取 $\beta=39^\circ$ 。同时, 根据文献[8], 对于梯形渠道, 水利学条件下的最佳边坡比为 $m=\sqrt{3}/3$,

即 $\tan \beta = \sqrt{3}/3$, $\beta = 30^\circ$ 。可见, 在提高土保护层塑膜铺衬防渗渠道的综合设计水平的情况下, 水利学上的最佳边坡角与工程实际上的最佳边坡角并不相同。

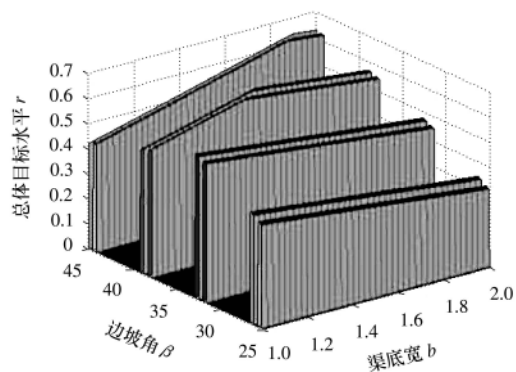


图 4 边坡角和渠底宽对总体目标水平的影响

Fig.4 Effects of canal slope angle and width of canal bottom on the whole objective level

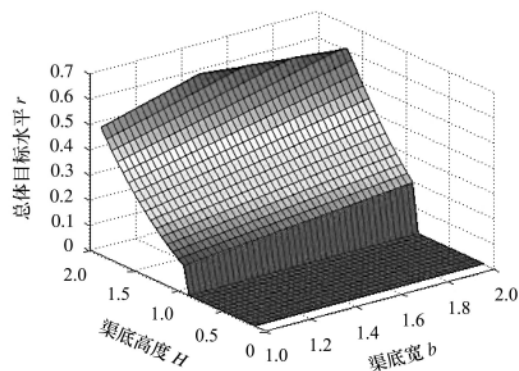


图 5 渠道高度和渠底宽对总体目标水平的影响

Fig.5 Effects of height of canal and width of canal bottom on the whole objective level

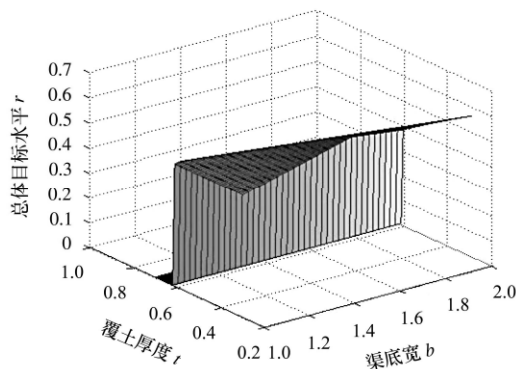


图 6 覆土厚度和渠底宽对总体目标水平的影响

Fig.6 Effects of thickness of soil layer and width of canal on the whole objective level

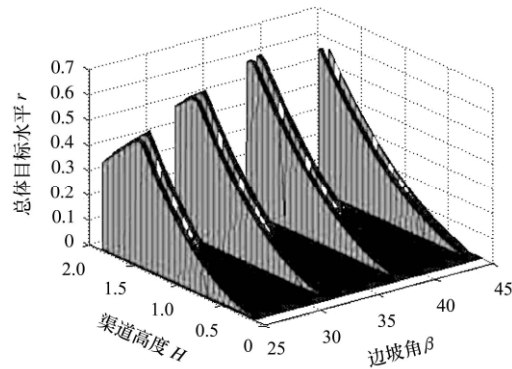


图 7 边坡角和渠道高度对总体目标水平的影响

Fig.7 Effects of canal slope angle and height of bottom canal on the whole objective level

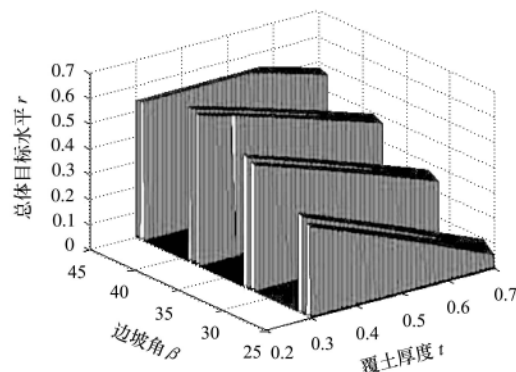


图 8 覆土厚度和边坡角对总体目标水平的影响

Fig.8 Effects of thickness of soil layer and canal slope angle on the whole objective level

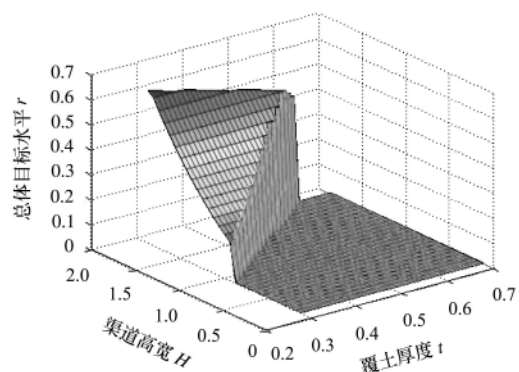


图 9 渠道高度和覆土厚度对总体目标水平的影响

Fig.9 Effects of height of canal and thickness of soil layer on the whole objective level

4.2 渠底宽对总体目标的影响

由图 4 可见, 渠底宽 b 对总体目标水平的影响趋势是: 当 $\beta \geq 39^\circ$ 时, 总体目标水平随渠底宽 b 的增加而增大; 当 $\beta < 39^\circ$ 时, 总体目标水平随渠底宽 b 的增加而减小。同时, 图 4、图 5、图 6 反映出在边坡角 $\beta=39^\circ$ 的前提下, 当 $b \geq 1.50\text{m}$ 时, 总体目标水平不再随渠底宽 b 的

增加而增大, 即渠底宽的最优值为 $b=1.50\text{m}$, 与表 1 中的计算结果吻合。

4.3 渠道高度对总体目标的影响

图 5、图 7 和图 9 反映出总体目标水平随渠道高度 H 的增加而增大。但当 $\beta < 39^\circ$ 、 $H > 1.50\text{m}$ 时, 总体目标水平随渠道高度 H 的增加而减小, 并且渠道高度 H 的取值

受到限制。渠道高度的最优值为 $H=1.85\text{ m}$, 与计算结果吻合(图 7)。

4.4 覆土厚度对总体目标的影响

从图 6、图 8 和图 9 可以看出: 总体目标水平随覆土厚度 t 的增加而呈线性规律降低, 无一例外, 而且, 根据表 1 的计算结果, 在所有淹没度条件下覆土厚度的最优值皆为 $t=0.30\text{ m}$, 即给定取值区间的下限。这说明在确保渠道安全的前提下, 土保护层厚度越薄越好, 因此, 在进行土保护层塑膜防渗渠道设计过程中确定土层厚度约束条件时, 必须充分考虑当时、当地的气候条件和土壤特性, 确保渠道运行安全。

5 结 论

1) 提出了多目标、多约束条件下土保护层塑膜铺衬防渗渠道的设计计算方法, 建立了以投资少、输水量大为总体目标的土保护层塑膜铺衬防渗渠道的多目标模糊优化设计的数学模型, 提高了土保护层塑膜铺衬防渗渠道的综合设计水平;

2) 编制了多目标、多约束的土保护层塑膜铺衬防渗渠道优化设计程序, 并给出了不同淹没度条件下梯形渠道设计参数的模糊优化结果。依据当地降雨情况及渠道水位落差, 即可选取设计参数, 为土保护层塑膜铺衬防渗渠道的设计提供了参考依据, 其方法对渠道塑膜防渗技术在中国经济欠发达地区的大面积推广, 具有工程实际意义;

3) 以淹没度 $HSR=PSR=0.8$ 为例, 分析了梯形渠道边坡角、渠底宽、渠道高度、覆土层厚度等设计参数对总体目标水平的影响规律。在提高土保护层塑膜铺衬防渗渠道的综合设计水平的情况下, 证明水力学上的最佳断面并不是工程上的渠道最佳实用断面。

[参 考 文 献]

- [1] 李安国. 我国渠道防渗工程技术综述[J]. 防渗技术, 2000, 6(1): 1—4.
- [2] 王俊发, 马 旭. 我国渠道防渗工程现状和塑膜铺衬机械化筑渠技术[J]. 吉林大学学报(工学版), 2004, 34(2): 320—323.
- [3] 王俊发. 渠道塑膜防渗理论与机械化铺膜的关键技术研究[D]. 中国博士论文全文数据库, 2006.
- [4] 何武权, 刑义川. 渠道防渗抗冻新材料与新技术[J]. 节水灌溉, 2003, (1): 4—6
- [5] Chung Moonkyung, Seo Min Woo, Kim Kang Suk, et al. Protective effect of overlying geosynthetic on geomembrane liner observed from landfill field tests and inclined board laboratory experiments[J]. Waste Management and Research, 2006, 24 (3): 250—259.
- [6] Needham A D, Smith J W N, Gallagher E M G. The service life of polyethylene geomembrane barriers[J]. Engineering Geology, 2006, 85(1/2): 82—90.
- [7] Wang Junfa, Ma Xu. The study of the machine to pave plastic lining for canal. CIGR International conference[J]. Beijing: 2004, 10: 45—45.
- [8] 中华人民共和国水利部. 渠道防渗工程技术规范[S]. SL18-91, 1991.
- [9] Chih-Sheng Lee, Shui-Ping Chang. Interactive fuzzy optimization for an economic and environmental balance in a river system[J]. Water Research, 2005, 39(1): 221—231.
- [10] 谢庆生, 罗延科. 机械工程模糊优化方法[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002: 111—112, 134—135.
- [11] 周 欣, 周海波, 王桂莲, 等. 基于多目标模糊优化的非 H 封闭式周转轮系参数化计算机辅助设计[J]. 机械工程学报, 2007, 43(7): 32—38.
- [12] Omer Kelesoglu, Mehmet Ulker. Multi-objective fuzzy optimization of space trusses by Ms-Excel[J]. Advances in Engineering Software, 2005, 36(8): 549—553.
- [13] 袁新明. 塑料薄膜防渗渠道断面的优化设计[J]. 防渗技术, 1992, (1): 1—5.

Design of the seepage-proofing canal with soil protective layer geomembrane based on the multi-objective fuzzy optimization

Wang Junfa¹, Ma Xu², Zhou Haibo¹

(1. College of Mechanical Engineering, Jiamusi University, Jiamusi 154007, China; 2. Key Laboratory of Key Technology on Agricultural Machine and Equipment, Ministry of Education, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: The traditional design method of the geomembrane seepage-proofing canal with soil protective layer only considers the reliability on single hydraulics conditions, and neglects the practicability on economy. Based on the multi-objective fuzzy optimization theory, the section of the geomembrane seepage-proofing canal with soil protective layer was optimized. A multi-objective fuzzy optimal mathematics model whose goals consist of economical efficiency and transportation ability and which satisfies the given conditions was established. The fuzzy optimal results of canal design parameters in different submergence-degree conditions were given by optimizing the section structure of seepage-proofing canal with soil protective layer geomembrane. Effects of design parameters, such as canal slope angle, width of canal bottom, height of canal, thickness of soil layer, on the whole goal level were analyzed by simulation analysis. The research results supply the reference to raise the whole design level of the geomembrane seepage-proofing canal with soil protective layer.

Key words: canal seepage-proofing, geomembrane lining, fuzzy optimization, multi-objectives