

灌区节水改造中防渗渠道断面的优化设计

余长洪¹, 周明耀¹, 姜健俊¹, 乔保雨²

(1. 扬州大学水利与建筑工程学院, 扬州 225009; 2 射阳县水利局, 盐城 224300)

摘 要: 渠道防渗工程是当前灌区节水改造的重要内容之一, 对原灌区骨干渠道系统的梯形土渠进行节水改造, 其断面形式选用弧形坡脚梯形断面, 其断面形式接近最佳水力断面、水流条件好、流速快、输沙能力强、防渗效果好、抗冻性能较高等优点。在此基础上, 建立渠道纵横断面设计的系统动态规划模型, 对灌区改造渠道进行纵横断面优化设计, 并通过实例比较证实, 该设计方法可以大幅度节省灌区节水改造项目的工程投资。

关键词: 灌区; 节水改造; 渠道断面; 优化设计

中图分类号: S27; TV 223.4

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2004)01-0091-04

0 引 言

目前, 许多灌区工程标准低, 施工质量差, 渠系不配套, 工程老化, 损坏严重, 灌溉面积达不到设计标准, 一般只有设计灌溉面积的 70% 左右, 续建配套扩大灌溉面积的潜力很大^[1]。在发展节水灌溉时, 优先考虑对老灌区进行技术改造, 是一条多快好省的途径^[2]。渠道防渗已成为目前灌区改造中应用最广泛的节水工程技术。渠道防渗后, 一方面可以提高水的利用率, 缓解农业用水供需矛盾, 节约的水可进一步扩大灌溉面积, 促进农业生产的发展; 另一方面可以降低地下水位, 防止和改良盐碱地和沼泽地, 有利于生态环境和农业现代化建设。选择最佳防渗断面、减轻冻胀破坏、寻求最优渠道纵横断面设计参数和如何解决灌区改造中普遍存在的行水与施工期的矛盾等, 已成为设计者考虑的重要问题。本文结合我国南方平原地区的大型灌区续建配套节水改造工程项目, 对上述有关理论及技术问题进行了初步探讨。

1 防渗渠道断面形式选择

1.1 改造渠道段断面形式

防渗渠道常用断面形式有矩形、梯形、弧形底梯形、弧形坡脚梯形、U 形和复合形。渠道断面形式的选择要综合考虑以下几个因素: 水力条件好, 抗冻胀性能高, 输沙能力强, 且投资小, 施工方便。对土渠改造可考虑 3 种断面形式: 改为弧形坡脚梯形断面; 改为梯形防渗断面; 改为 U 形断面。

考虑的三种断面形式优缺点见表 1。

从表 1 可以看出, 对大中型梯形土渠进行改造, 首选弧形坡脚梯形断面, 因为其断面形式水力条件好、输沙能力强、抗冻胀性能高且投资小、施工工期快, 有利于解决旧渠改建工程中普遍存在的行水与施工期相冲突

的矛盾。对于小型渠道易采用 U 形断面形式^[3]。

表 1 渠道断面比选表

Table 1 Comparison and selection of channel sections			
断面形式	优 点	缺 点	渠道等级
弧形坡脚梯形	水力条件好, 抗冻胀性能好, 输沙能力强, 土方工程量较小。	弧形坡脚施工较复杂	大型渠道
梯 形	施工方便, 技术成熟	水力条件差; 抗冻胀性能差; 输沙能力小, 易淤积	中型渠道
U 形	水力条件好, 抗冻胀性能好, 输沙能力强	技术复杂, 施工难度大, 大、中型渠道施工机械不完善	小型渠道

1.2 断面设计

1.2.1 水力计算基本公式

生产实际中求解均匀流渠道设计参数普遍应用曼宁公式^[4]。

流速 $v = c \sqrt{R i}$

流量 $Q = A v = A c \sqrt{R i} = A \frac{1}{n} R^{2/3} i^{1/2}$

谢才系数 $C = \frac{1}{n} R^{1/6}$

式中 v ——流速, m/s; Q ——渠道设计流量, m³/s; R ——水力半径, m; i ——渠道纵比降; A ——渠道过水断面面积, m²; n ——渠道糙率系数。

1.2.2 弧形坡脚梯形断面设计

关于弧形坡脚梯形断面设计, 目前有关设计规范、手册和资料上并没有完整的介绍, 由曼宁公式推导得主要水力参数之间关系如下

$$h = \left[\frac{nQ}{\sqrt{i}} \frac{\xi_2^{2/3}}{\xi_1^{5/3}} \right]^{3/8}; b = k_b \cdot h; m = \text{ctg} \theta$$
$$r = k_r \cdot h; A = \xi_1 \cdot h^2; X = \xi_2 \cdot h;$$
$$b_2 = r \cdot \text{tg} \frac{\theta}{2}; b = b_1 + 2b_2; v = \frac{Q}{\xi_1 h^2}$$

式中 h ——设计水深, m; X ——渠道湿周, m;
 m ——边坡系数。其中, ξ_1 、 ξ_2 为系数, 其值为

$$\xi_1 = (K_b + \text{ctg} \theta) - \left[2 \text{tg} \frac{\theta}{2} - \frac{\theta \pi}{180} \right] K^2$$

收稿日期: 2003-05-29 修订日期: 2003-11-16
基金项目: 江苏省水利科技重点项目基金资助(SK99008)
作者简介: 余长洪, 男, 工学硕士, 主要研究方向为灌溉排水理论与新技术。扬州 扬州大学水利与建筑工程学院 50008#, 225009

$$\xi_2 = (K_b + \csc \theta) - \left[4 \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} - \frac{\theta \pi}{90} \right] K_r$$

K_b 、 K_r 可以根据文献[5] 结合工程实际情况查得, 各符号参见图 1a。

1.2.3 梯形断面设计

主要水力参数之间关系如下

$$h = \frac{(\alpha + 2\sqrt{1+m^2})^{1/4}}{(\alpha + m)^{5/8}} \left\{ \frac{u \cdot Q}{\sqrt{i}} \right\}^{3/8}; \quad b = \alpha \cdot h;$$

$$A = \frac{(\alpha + 2\sqrt{1+m^2})^{1/4}}{(\alpha + m)^{1/4}} \left\{ \frac{u \cdot Q}{\sqrt{i}} \right\}^{3/4};$$

$$\chi = \frac{(\alpha + 2\sqrt{1+m^2})^{5/4}}{(\alpha + m)^{5/8}} \left\{ \frac{u \cdot Q}{\sqrt{i}} \right\}^{3/8};$$

$$v = \frac{Q(\alpha + m)^{1/4}}{(\alpha + 2\sqrt{1+m^2})^{1/2}} \left\{ \frac{u \cdot Q}{\sqrt{i}} \right\}^{-3/4}$$

式中 h ——设计水深, m; χ ——渠道湿周, m。

宽深比 α 、边坡系数 m 以及糙率 n 可由当地的具体情况结合文献[6] 查得, 各符号参见图 1b。

1.2.4 U 形断面设计

U 形渠的最佳水力断面计算如下^[4]

$$\text{过水断面面积} \quad A = K_A \cdot H^2$$

系数

$$K_A = \left(\frac{\theta}{2} + 2m - 2m \right) K_r^2 + 2(m - m) K_r + m$$

湿周

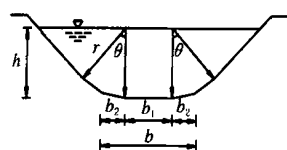
$$\chi = K_x \cdot H$$

系数

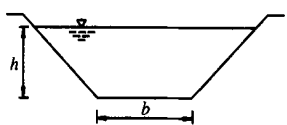
$$K_x = 2\left(m + \frac{\theta}{2}m\right) K_r + 2m$$

式中 H ——水深, m; θ ——圆心角, $^\circ$; m ——上部直线段的边坡系数; $m = \sqrt{1+m^2}$; $K_r = r/H$; r ——圆弧半径, m。其中, K_r 可以根据文献[5] 结合工程实际情况查得, 各符号参见图 1c。

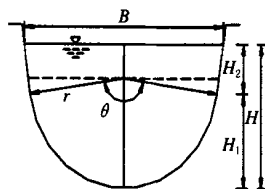
由上式推导出的最佳水力断面半径与水深之比 $K_r = 1$, 即水面线刚好通过圆心。



a. 弧形坡角梯形断面



b. 梯形断面



c. U形断面

图 1 防渗渠道的横断面形式

Fig 1 Cross-sectional form of anti-seepage channel

2 防渗渠道纵横断面优化

渠道纵横断面设计的常规方法是采用明渠均匀流公式, 设计时比降等重要参数均需事先给出, 且需要反复试算较核。近年来, 在设计方法的研究上取得了一定的进展^[7-9], 主要是用动态规划方法, 综合考虑纵横断面设计参数, 从而避免了计算时某些重要参数根据经验确定的主观任意性, 解决了一定条件下的渠道优化设计问题。但对工程施工方面的安全约束考虑不够。本文在现有研究的基础上, 对约束条件进行进一步的完善。

对于大中型渠道, 首先由上面的讨论定性地确定其横断面形式为弧形坡脚梯形断面。在确定了渠道的断面形式后, 渠道设计可由渠底纵坡等主要变量来描述。这样就转化为一个多阶段决策的优化问题, 可以运用动态规划的方法来解决。

2.1 动态规划模型

整条渠道长 l , 由流量、地形、沿渠土壤地质条件, 或渠道配套建筑物位置分为 N 段。对于续灌渠道, 已知各渠段的设计、加大、最小流量分别为 Q_k 、 Q_{\max} 、 Q_{\min} , 地面坡降 J_i , 渠末水位所需高程为 $H_{\text{末}}$, 各渠段渠末地面高程为 Δd_i , $i = 1, 2, \dots, N$ 。依此进行系统优化规划设计, 即确定各渠段最优纵横断面设计参数, 使投资最小。

2.1.1 阶段变量

将渠首和渠道的分水处视为节点, 予以编号, 将两节点间的正向渠段作为一个阶段, 以节点编号为阶段变量, 可表示为

$$n (n = 1, 2, \dots, N);$$

式中 n ——节点编号; N ——节点总数。

2.1.2 状态变量

以渠首水位高程为状态, 其状态变量可表示为

$$H_n (H_n = H_1, H_2, \dots, H_N)$$

式中 H_N ——第 N 阶段的状态。

2.1.3 决策变量

以渠底坡降为决策, 其决策变量可表示为

$$i_n (H_n) (i_n (H_n) = i_1 (H_1), i_2 (H_2), \dots, i_N (H_N))$$

2.1.4 目标函数

以投资最小为目标, 目标函数为

$$\begin{aligned} \min F &= \sum_{n=1}^N F(H_n, i_n) \\ &= \{F_{cn}(H_n, i_n) + F_m(H_n, i_n) + F_{wn}(H_n, i_n)\} \\ &= \{C_{cn}V_{cn}(H_n, i_n) + C_mV_m(H_n, i_n) \\ &\quad + C_{wn}V_{wn}(H_n, i_n)\} \end{aligned}$$

式中 $F_{cn}(H_n, i_n)$ 、 $F_m(H_n, i_n)$ 、 $F_{wn}(H_n, i_n)$ ——第 n 渠段衬砌工程费, 土方工程费和挖方工程费; $V_{cn}(H_n, i_n)$ 、 $V_m(H_n, i_n)$ 、 $V_{wn}(H_n, i_n)$ ——第 n 渠段衬砌工程量, 土方工程量和挖方工程量; C_{cn} 、 C_m 、 C_{wn} ——第 n 渠段衬砌工程单价, 土方工程单价和挖方工程单价。

对于弧形坡脚梯形渠道, 其工程量计算采用积分法。计算图形及各种符号均在图 2 中标出, 单位为长度

(m)、面积(m²)、体积(m³)。

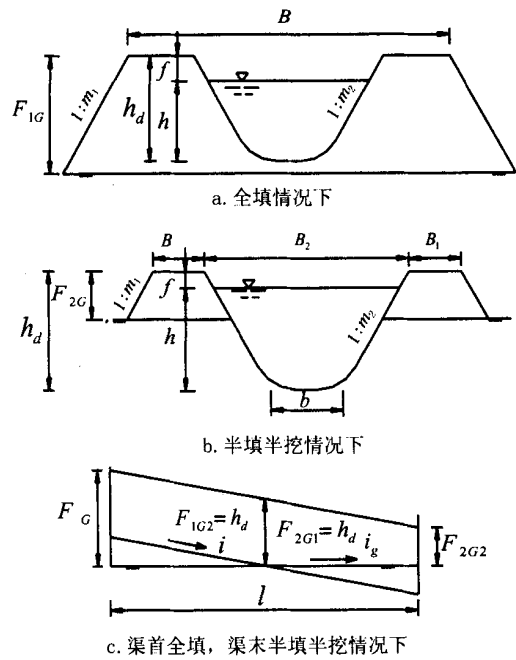


图 2 弧形坡脚梯形渠道体积计算图

Fig 2 Illustration for the cubature of the ladder-shaped channel of curved slope foot

1) 全填时, 判别式为 $F_{G1} \leq h_d, F_{G2} \leq h_d$, 有

$$F_{1G1} = F_{G1}, F_{1G2} = F_{G2}$$

挖方: $V_e = 0$

$i \leq i_g$ 时, 填方

$$V_f = V_{f1a} = \int_0^l A_f dl = \frac{1}{i_g - i} \int_{F_{1G1}}^{F_{1G2}} A_f dF_{1G}$$
$$= \frac{1}{i_g - i} \left[\frac{1}{2} B F_{1G}^2 + \frac{1}{3} m_1 F_{1G}^3 - A F_{1G} \right] \Big|_{F_{1G1}}^{F_{1G2}}$$
$$= \frac{1}{i_g - i} \left[\frac{1}{2} B (F_{1G2}^2 - F_{1G1}^2) + \frac{1}{3} m_1 (F_{1G2}^3 - F_{1G1}^3) - A (F_{1G2} - F_{1G1}) \right]$$

$i = i_g$ 时 $V_f = V_{f1b} = A_f l = [(B + m F_{1G}) F_{1G} - A] l$

各符号参见图 2a。

2) 半填半挖时, 判别式为 $0 < F_{G1} < h_d, 0 < F_{G2} < h_d$, 有

$$F_{2G1} = F_{G1}, F_{2G2} = F_{G2}$$
$$A_f = (2B_1 + m_1 F_{2G} + m_2 F_{2G}) F_{2G}$$
$$A_e = A - (B_2 - m_2 F_{2G}) F_{2G}$$

$i \leq i_g$ 时

$$V_f = V_{f2a}$$
$$= \frac{1}{i_g - i} [B_1 (F_{2G2}^2 - F_{2G1}^2) + \frac{1}{3} (m_1 + m_2) (F_{2G2}^3 - F_{2G1}^3)]$$

$V_e = V_{e2a}$

$$= \frac{1}{i_g - i} [A (F_{2G2} - F_{2G1}) - \frac{1}{2} B_2 (F_{2G2}^2 - F_{2G1}^2) + \frac{1}{3} m_2 (F_{2G2}^3 - F_{2G1}^3)]$$

$i = i_g$ 时, 有

$$F_{2G1} = F_{2G2} = F_{G1}$$

$V_f = V_{f2b} = A_f l = (2B_1 + m_1 F_{2G} + m_2 F_{2G}) F_{2G} l$

$$V_e = V_{e2b} = A_e l = [A - (B_2 - m_2 F_{2G}) F_{2G}] l$$

各符号参见图 2b。

3) 渠首全填, 渠末半填半挖时, 判别式为 $F_{G1} > h_d, 0 < F_{G2} < h_d$, 有 $F_{1G1} = F_{G1}, F_{1G2} = h_d, F_{2G1} = h_d, F_{2G2} = F_{G2}$

$$V_e = V_{e2a} (F_{2G1} = h_d, F_{2G2} = F_{G2})$$
$$V_f = V_{f1a} (F_{1G1} = F_{G1}, F_{1G2} = h_d) + V_{f2a} (F_{2G1} = h_d, F_{2G2} = F_{G2})$$

各符号参见图 2c。

2.1.5 约束条件

1) 水位衔接约束

上段渠道设计水位应高于下段渠道设计水位。即

$$H_n - H_{n+1} > 0$$

2) 渠首水位高程约束

渠首水位高程应等于渠末水位高程加上沿渠水头损失, 任一阶段的水位高程应小于渠首水位高程。可表示为

$$H_1 = H_N + \sum_{n=1}^{N-1} l_n i_n$$

3) 坡降约束

渠道纵坡降应不小于允许最小坡降, 应不大于允许最大坡降。

$i_{min} < i_n < i_{max}$

4) 流速约束

渠道流速应不小于不淤流速, 应不大于允许不冲流速。

$v_{min} < v_n < v_{max}$

5) 衬砌厚度约束

渠道衬砌厚度应不小于规范给定的最小衬砌厚度。

$\delta \geq \delta_{min}$

6) 渠首填方高度约束

考虑到对于土质比较轻的地区, 若渠道填筑高度太高, 运行时行水不利于安全, 所以渠首填方高度应小于一定的安全高度, 其值应视土质、断面形式、衬砌方式等而定。条件约束给定后, 就决定了目标函数的可行域。

2.1.6 状态转移方程

由水位衔接写出状态转移方程

$$H_{n+1} = T_n(H_n, i_n) = H_n - l_n i_n$$

2.1.7 逆推方程

由目标函数写出逆序递推方程

$$F_n^*(H_n) = \min \{F_n(H_n, i_n + F_{n+1}^*(H_{n+1}))\}$$

2.2 模型的求解

求解过程实质上是用递推方程逆序递推计算的过程。可用常规动态规划程序稍作修改求解^[10]。

3 实例分析

江苏省某大型灌区四支渠实施节水改造, 渠道总长 11.4 km。该四支渠共有分支渠 20 条, 呈双非布置(分支渠布置于支渠两侧, 每侧 10 条)。通过规划, 得到设计流量从渠首 0+000 处的 5.8 m³/s 到 11+400 处的

0.62 m³/s。渠末 11+ 400 处自流灌溉所需的设计水位为 2.86 m,其它主要资料见表 2, 以此进行渠道纵横断面的优化设计。

表 2 设计数据表
Table 2 Data for design

项 目	渠 段									
	第一段				第二段			第三段		
	(0+ 000~				(4+ 200~			(7+ 800~		
	4+ 200)				7+ 800)			11+ 400)		
渠长/km	0.6	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
设计流量 /m ³ ·s ⁻¹	5.8	5.2	4.6	0.4	2	3.6	3.1	2.5	2.0	1.35
加大流量 /m ³ ·s ⁻¹	7.0	6.2	2.5	5.0	5.0	4.3	3.7	3.0	2.4	1.6
最小流量 /m ³ ·s ⁻¹	2.3	2.1	1.85	1.7	1.45	1.25	1.0	0.8	0.54	0.25
沿渠土壤	砂壤土				k_b, k_r			$k_b = 1.1, k_r = 1$		
渠段断面形式 衬砌方式	弧形坡脚梯形断面, 混凝土衬砌				内外边坡系数 m_1, m_2			$m_1 = m_2 = 1.5$		
衬砌最小厚度 δ /cm	7				填方安全高度 /m			2		
糙率 n	0.014				地面高程 /m			1.9		
不冲流速 /m·s ⁻¹	2.5				渠末水位 /m			2.86		

3.1 渠道纵坡允许取值范围

由渠道设计流量与渠道纵坡的关系, 渠道不冲不淤流速以及渠首填方高度, 计算得各渠段的纵坡允许取值范围为 1/11000 i 1/30000。

3.2 渠道优化设计

根据当地具体情况, 结合文献[4, 5], 给定设计数据见表 2。将表 2 中数据输入计算机, 得最优方案为: 支渠第一段比 $i = 1/11000$ (桩号 0+ 000~ 4+ 200)、第二段比降 $i = 1/17500$ (桩号 4+ 200~ 7+ 800)、第三段比降 $i = 1/29000$ (桩号 7+ 800~ 11+ 400), 堤顶高程为 3.90 m, 总投资为 324.31 万元, 其中土方 18 万 m³, C15 混凝土 0.6 万 m³(其他结果略), 比原方案的投资减少了 8.9%。

4 结 语

1) 本文给出了灌区改造中大、中、小型渠道的推荐形式, 分别为弧形坡脚梯形断面、梯形断面、U 形断面。其中弧形坡脚梯形断面形式水力条件好、流速较快、输沙能力强、抗冻胀性能高且投资小, 是一种新型的渠道断面形式, 因而规范其设计和施工方法具有重要的现实意义, 可在灌区改造中大力推广应用。

2) 本文中介绍的动态规划模型和逆推方法, 通过实例分析, 计算成果表明了这种方法的可行性和优越性。采用这一方法, 不仅设计快速准确, 而且节省投资, 效益显著。对于解决灌区节水改造中的渠道优化问题具有一定的参考价值。

3) 优化时, 结合模型对方案进行粗选, 可以节省优化工作量。

[参 考 文 献]

[1] 钱正英, 张光斗. 中国可持续发展水资源战略研究综合报告及各专题报告[R]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001, 3: 104- 151.

[2] 水利部农村水利司, 中国灌溉排水技术开发培训中心. 水土资源评价与节水灌溉规划[M]. 北京: 中国水利电力出版社, 1998: 178.

[3] 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): 31- 33.

[4] 华东水利学院. 水力学[M]. 北京: 科学出版社, 1979.

[5] SL 18-91, 渠道防渗工程技术规范[S].

[6] SDJ 217-84, 灌溉排水渠系设计规范[S].

[7] 罗金耀, 魏永曜. 灌溉渠系优化设计方法的研究[J]. 水利学报, 1990(6): 32- 40.

[8] 罗金耀, 王长德, 等. 大型输水渠道系统优化设计研究[J]. 水利学报, 1996(6): 24- 27.

[9] 邵东国, 罗金耀, 等. 大型渠道工程整体优化设计[J]. 中国农村水利水电, 1997(增): 125- 127.

[10] 郭元裕, 李寿声. 灌排工程最优规划与管理[M]. 北京: 水利水电出版社, 1997.

Optimal design of anti-seepage channel section for water-saving transformation in irrigation district

Yu Changhong¹, Zhou Mingyao¹, Jiang Jianjun¹, Qiao Baoyu²

(1. College of Hydraulic & Civil Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China; 2. Sheyang Hydraulic Bureau, Yancheng 224300, China)

Abstract Channel anti-seepage project is one of the important contents for water-saving transformation in irrigation district. In the water-saving transformation to ladder-shaped earth canal of key channel system in original irrigation district, the ladder-shaped section of curved slope foot was selected as section of canal. Because it has a lot of virtues, such as close to optimal hydraulic cross section, fine water condition, high velocity of flow, ability to convey sand, effectual prevention from seepage, resist of frost-heave performance. Based on this, a system dynamic planning model was built up to carry on vertical-lateral section optimization design to transform irrigation district channel. Comparing and verifying its merits through one instance, the study showed that this design method could reduce the engineering investment in large scale for irrigation district water-saving transformation project.

Key words: irrigation district; water-saving transformation; channel section; optimal design