

引水渠道断面优化与输水效率提升设计

冯跃缺

河北省水利水电勘测设计研究院集团有限公司, 河北 石家庄 050000

[摘要] 引水渠道作为水利调水工程农田灌溉的重要输水载体, 其断面的形式以及设计参数, 对运行的稳定性、输水效率以及工程造价有着直接的影响。通过围绕引水渠道断面选型、水力最优断面计算、断面尺寸优化、配套防渗与减阻增效措施展开系统性设计研究, 明确梯形、U型两种常用渠道断面的优化思路, 并且探讨提高疏水效率的关键途径, 从而在确保渠道结构安全的前提下, 提高输水的能力以及水资源的利用效率, 以供参考。

[关键词] 引水渠道; 断面优化; 水力最优断面; 输水效率; 明渠均匀流; 防渗减阻

DOI: 10.33142/hst.v9i3.19346

中图分类号: TV74

文献标识码: A

Optimization of Water Diversion Channel Section and Design for Improving Water Transfer Efficiency

FENG Yueque

Hebei Water Resources and Hydropower Investigation, Design and Research Institute Group Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

Abstract: As an important water conveyance carrier for agricultural irrigation in water conservancy and water diversion projects, the cross-sectional form and design parameters of the diversion channel have a direct impact on the stability of operation, water conveyance efficiency, and project cost. By conducting systematic design research on the selection of water diversion channel cross-sections, hydraulic optimal cross-section calculation, cross-section size optimization, and supporting anti-seepage and drag reduction measures, the optimization ideas for trapezoidal and U-shaped commonly used channel cross-sections are clarified, and the key paths to improve drainage efficiency are explored. This aims to improve the water transport capacity and water resource utilization efficiency while ensuring the safety of the channel structure, for reference.

Keywords: water diversion channel; cross-section optimization; optimal hydraulic cross-section; water delivery efficiency; uniform flow in open channels; anti-seepage and drag reduction

引言

引水渠道覆盖范围广、用水需求大, 是水资源调配与供给的关键基础设施。在当前水资源供需矛盾日益突出的形势下, 提高渠道输水效率、降低输水损耗已成为工程运行管理的重要任务。传统渠道存在诸多短板, 普遍存在水利用系数偏低、水资源浪费严重、运行维护成本较高等问题。渠道断面形式与参数设计是影响输水效果的核心环节, 现有研究多集中于大型水利工程或复杂理论算法, 针对中小型渠道、简便易行且贴合基层实际的工程设计研究相对匮乏, 难以满足一线工程建设与管理的现实需要。基于此, 本文首先对引水渠道输水效率的核心影响因素进行了深入分析, 阐述相关理论知识, 围绕实际情况设计步骤与效率的提升策略, 并对不同工况下渠道断面的最优选型以及参数控制相关标准进行明确, 从而提高输水效率, 实现工

程经济性、安全性的协同平衡。

1 引水渠道输水效率核心影响因素与基础理论

1.1 输水效率核心定义

引水渠道输水效率通常指渠道实际输送水量与理论输水水量的比值, 渠系水利用系数越高、水头损失越小, 代表渠道输水效率越高。输水效率低下主要与沿程水量损失(渠道渗漏、水面蒸发)和水流能量损失(沿程阻力损失、局部阻力损失)存在相关。

1.2 核心影响因素分析

(1) 断面形式与尺寸: 断面形状决定湿周长度与水力半径, 对水流阻力大小有直接影响; 断面宽深比、边坡系数等参数对过水能力以及流速分布有着直接的影响。

(2) 渠床糙率: 渠壁表面粗糙程度越大, 水流沿程阻力越大, 水头损失越高, 输水速度与流量相应降低。土渠糙率

大,衬砌渠道糙率小,糙率是影响输水效率的关键可控因素。

(3) 渗漏损失:衬砌质量差、裂缝较多的渠道渗漏损失是水量损耗的主要原因。

(4) 渠道纵坡与水流流速:纵坡过小导致流速偏低,易淤积;纵坡过大导致流速偏高,易冲刷渠床,均会破坏水流稳定状态,增大水头损失,降低输水效率。

(5) 运行工况:渠道水位控制不当、局部建筑物阻水、渠道杂草滋生等,都会加剧水流紊乱,增大局部阻力,影响整体输水效果。

1.3 明渠均匀流基础理论

引水渠道正常运行多处于明渠均匀流状态,均匀流是指水流流速大小、方向沿程不变,水深与过水断面形状沿程不变的稳定流态,是渠道优化设计的核心理论依据。

1.3.1 核心计算公式

明渠均匀流流量公式(曼宁公式)为工程设计通用公式,表达式如下:

$$Q = A \cdot C \sqrt{Ri} = \frac{1}{n} AR^{\frac{2}{3}} i^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

式中:Q为渠道设计流量(m³/s);A为过水断面面积(m²);C为谢才系数;R为水力半径(m);i为渠道纵坡;n为渠床糙率系数。水力半径计算公式:

$$R = \frac{A}{X} \quad (2)$$

式中:X为湿周(m),即水流与渠壁接触的周界长度。

由公式可知,在流量、纵坡、糙率固定的前提下,水力半径越大,过水能力越强;湿周越小,水力半径越大,水流阻力越小,输水效率越高。水力最优断面即指在过水断面面积、纵坡、糙率一定时,湿周最小、输水能力最大的断面形式,是渠道断面优化的核心目标。

1.3.2 流速控制要求

渠道设计流速需控制在不冲不淤流速区间内,即大于泥沙淤积临界流速,小于渠床冲刷临界流速。一般中小型引水渠道不冲不淤流速范围为0.6~1.5m/s,具体根据渠床土质与衬砌材料确定,流速控制合理可避免淤积与冲刷,保障水流稳定,维持高效输水状态。

2 常用引水渠道断面形式对比分析

中小型引水渠道常用断面形式为梯形断面与U型断面,矩形断面多用于石质渠道或小型排水渠,应用范围较窄,分析梯形与U型断面的特性、水力参数及适用场景,为断面选型提供依据。

2.1 梯形断面渠道

梯形断面是传统引水渠道最常用形式,结构简单、施

工便捷、适应性强,适合各类土质与地形条件,尤其适合大流量、大断面的干渠设计。

2.1.1 几何参数与水力计算

梯形断面几何示意图见图1,核心参数包括:底宽b(m)、水深h(m)、边坡系数m(边坡水平宽度与垂直高度比值)。

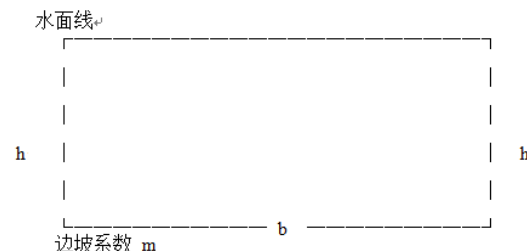


图1 梯形断面渠道示意图

过水断面面积: $A = (b + mh)h$

湿周: $X = b + 2h\sqrt{1 + m^2}$

梯形水力最优断面宽深比: $\frac{b}{h} = 2(\sqrt{1 + m^2} - m)$

边坡系数m根据渠床土质确定,黏性土m取1.0~1.5,砂性土m取1.5~2.0,衬砌渠道可适当减小。

2.1.2 优缺点分析

优点:施工技术门槛低,土方开挖便捷,边坡稳定性好,维修清理简单,适配大流量输水场景;缺点:湿周较长,水力半径偏小,水流阻力偏大,渗漏损失大,土渠输水效率偏低,占地面积较大。

2.2 U型断面渠道

U型断面底部为半圆形,上部为直线段边坡,整体接近圆形水力最优断面,是目前中小型灌溉渠道、支渠、农渠的优选断面形式。

2.2.1 几何参数与水力计算

U型断面几何示意图见图2,核心参数包括:圆弧半径r(m)、上部直线段高度h₁(m)、总水深h(m)、边坡倾角α。

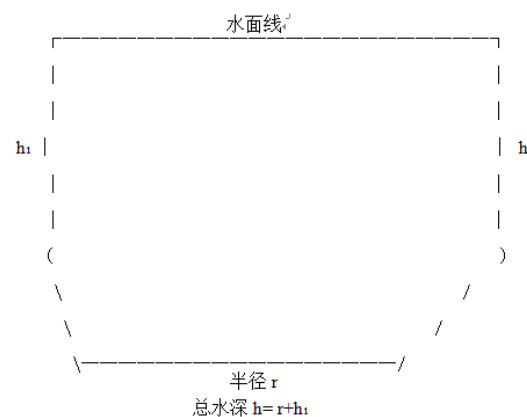


图2 U型断面渠道示意图

过水断面面积由半圆面积与上部梯形面积组成,湿周为圆弧长度与上部边坡长度之和,其水力半径远大于同面积梯形断面,水流阻力显著减小。

2.2.2 优缺点分析

优点:湿周短、水力半径大,输水能力比同面积梯形渠道高 15%~25%,输水效率大幅提升;占地面积小,衬砌材料用量少,抗冻胀性能好,渗漏损失小;缺点:施工工艺比梯形渠道稍复杂,适合中小型渠道,大流量渠道施工难度偏高。两种断面核心参数对比表见表 1。

表 1 梯形与 U 型引水渠道断面核心参数对比

对比指标	梯形断面	U 型断面
水力半径	偏小,水流阻力大	偏大,水流阻力小
输水效率	较低,土渠渠系利用系数 0.5~0.65	较高,衬砌后渠系利用系数 0.75~0.85
占地面积	较大	较小,比梯形省地 20%~30%
施工难度	低,简易开挖即可	中等,需定型模板施工
适用场景	大流量干渠、各类土质渠道	中小型支渠、农渠、灌溉渠道
渗漏损失	大,土渠渗漏严重	小,衬砌后渗漏量极低

2.3 断面形式选型原则

- (1) 大流量、地形开阔的干渠,优先选用梯形断面,施工便捷、稳定性强。
- (2) 中小流量、灌溉区支渠与农渠,优先选用 U 型断面,输水效率高、占地少、节水效果好。
- (3) 土质较差、易渗漏区域,无论哪种断面,均需配套衬砌措施。
- (4) 寒冷地区,优先选用 U 型断面,抗冻胀性能优于梯形断面。

3 引水渠道断面优化设计方法

3.1 断面优化设计核心目标

- (1) 满足设计流量与不冲不淤流速要求,保障输水能力;
- (2) 趋近水力最优断面,减小湿周、增大水力半径,降低沿程阻力;
- (3) 控制工程造价,减少土方与材料用量,提升经济性;
- (4) 降低渗漏损失与水头损失,最大化提升输水效率;
- (5) 保障渠道结构稳定,避免冲刷、淤积、坍塌问题。

3.2 梯形渠道断面优化设计

3.2.1 优化步骤

确定基础参数:设计流量 Q 、渠道纵坡 i 、渠床糙率

n 、边坡系数 m 、不冲不淤流速范围;

计算水力最优宽深比,按公式 $\frac{b}{h} = 2(\sqrt{1+m^2} - m)$

计算:

结合曼宁公式,联立求解最优底宽 b 与水深 h ;

校核流速与过水能力,确保流速在安全区间,流量满足设计要求;

结合地形与施工条件,微调尺寸,确定最终优化断面参数。

3.2.2 关键优化要点

- (1) 边坡系数 m 不宜过大,在保证边坡稳定的前提下,尽量减小边坡系数,缩短湿周;
- (2) 采用窄深式断面,趋近水力最优宽深比,避免宽浅式断面,减小湿周;
- (3) 土渠优化后需做简易衬砌,降低糙率与渗漏;
- (4) 合理设置超高,一般为水深的 1/10~1/8,防止水流漫溢。

3.3 U 型渠道断面优化设计

3.3.1 优化步骤

- (1) 确定基础参数:设计流量 Q 、纵坡 i 、衬砌糙率 n 、安全流速范围;
- (2) 选定圆弧半径 r ,中小型渠道 r 一般取 0.3~1.0m,根据流量大小调整;
- (3) 计算上部直线段高度,确定总水深,保证过水面积满足流量要求;
- (4) 校核水力半径、流速与水头损失,确保输水高效稳定;
- (5) 优化边坡倾角,一般取 $5^\circ \sim 15^\circ$,兼顾稳定性与水力性能。

3.3.2 关键优化要点

- (1) 圆弧半径与总水深比例适配,尽量使水流充满下半圆区域,充分利用水力最优特性;
- (2) 上部边坡倾角不宜过大,保证施工便捷与边坡稳定;
- (3) 采用混凝土预制或现浇衬砌,保证壁面光滑,降低糙率;
- (4) 小型 U 型渠道可采用定型构件,加快施工,保证断面规整度。

3.4 渠道纵坡协同优化

断面优化需与纵坡优化同步进行,纵坡直接影响流速与水头损失:

- (1) 平原地区中小型渠道,纵坡一般取 1/1000~1/3000,

保证流速适中，不易淤积；

(2) 丘陵地区渠道，纵坡可适当加大，取 1/500~1/1000，避免流速过低；

(3) 纵坡尽量平顺，避免频繁变坡，减少局部水头损失；

(4) 纵坡优化后，重新校核流速，确保与断面参数匹配。

3.5 断面优化效果对比

选取设计流量 0.8m³/s，纵坡 1/2000，糙率 0.015（衬砌渠道），对比优化前后梯形与 U 型断面参数，结果见表 2。

由表可知，U 型优化断面输水效率最优，梯形水力最优断面较传统宽浅式断面效率提升显著，断面优化是提升输水效率的核心手段。

4 输水效率提升配套措施

断面优化是输水效率提升的基础，配套防渗、减阻、运维管控措施可进一步减少损失，保障渠道长期高效运行，各项措施简单易行，适配中小型引水渠道。

4.1 防渗减渗措施

渗漏是输水水量损失的主要原因，防渗处理可减少 80% 以上的渗漏损失，核心措施：

混凝土衬砌：梯形与 U 型渠道均适用，现浇混凝土衬砌厚度 8~15cm，壁面光滑，糙率小（0.013~0.015），防渗效果极佳，同时防止渠床冲刷，使用寿命长；

浆砌石衬砌：适合石料丰富地区，防渗效果较好，糙率略大于混凝土，造价适中；

土工膜防渗：成本较低，施工便捷，铺设于渠床后覆盖保护层，适合小型渠道，提高防渗效果；

压实土渠：土渠采用机械压实，减小渠床孔隙度，降低渗漏损失，适合简易临时渠道。

4.2 减阻降损措施

控制渠床糙率：定期清理渠道杂草、淤泥与杂物，保持壁面光滑，避免糙率增大；衬砌渠道保证施工质量，避免表面凹凸不平；

优化渠道平面布局：减少弯道数量，弯道采用平滑曲

线，避免急转弯，降低局部水头损失；尽量减少渠道内局部建筑物，过水建筑物采用流线型设计，减小水流阻力；

合理调控运行水位：运行水位保持在设计水深，避免水位过低或过高，水位过低会减小过水面积、降低水力半径，水位过高会增大湿周、增加阻力，均会降低输水效率。

4.3 防冲防淤运维措施

(1) 定期监测渠道流速，确保处于不冲不淤区间，流速过高时适当放缓纵坡，流速过低时加大纵坡或优化断面尺寸；

(2) 定期清淤，避免泥沙淤积减小过水断面，保障输水能力；

(3) 寒冷地区做好冬季防冻胀措施，避免渠道冻裂破损，防止渗漏与阻力增大；

(4) 建立简易运维制度，及时修补渠道裂缝、破损部位，维持渠道完整结构。

5 水头损失计算与效率验证

5.1 沿程水头损失计算

渠道沿程水头损失是衡量输水效率的重要指标，计算公式：

$$h_f = iL \quad (3)$$

式中： h_f 为沿程水头损失（m）； i 为渠道纵坡； L 为渠道长度（m）。

断面优化后，水力半径增大，相同流量下纵坡可适当减小，沿程水头损失显著降低。以长度 1000m 渠道为例，优化前纵坡 1/1500，水头损失 0.67m；优化后纵坡 1/2000，水头损失 0.5m，水头损失降低 25%，输水效率相应提升。

5.2 输水效率综合验证

引水渠道整体输水效率可通过渠系水利用系数验证，经断面优化+混凝土衬砌后，水资源输送损耗大幅减少，提高输水效率。同时，优化后渠道流速稳定，无明显冲刷淤积，运行维护成本降低，实现高效、安全、经济输水。

表 2 同流量下渠道断面优化效果对比

断面类型	优化状态	过水面积 (m ²)	湿周 (m)	水力半径 (m)	流速 (m/s)	输水效率提升
梯形	未优化 (宽浅式)	0.72	3.86	0.19	1.11	基准值
梯形	优化 (水力最优)	0.68	3.12	0.22	1.18	提升 12% 左右
U 型	优化设计	0.65	2.45	0.27	1.23	提升 22% 左右

6 结论

(1)水力最优断面设计是提升输水效率的核心途径,大流量干渠选用梯形水力最优断面,中小型渠道优先选用U型断面。

(2)基于曼宁公式的断面优化设计可减小湿周,降低沿程水流阻力,同流量条件下,梯形断面优化后有助于提高输水效率,提升U型断面,进一步减少渗漏损失。

(3)断面优化与纵坡、流速协同设计,配合防渗、减阻、简易运维措施,可实现输水效率、工程安全性与经济性的协同提升。

[参考文献]

[1]刘恬恬,李子明,胡雅琪,等.灌溉渠系优化配水模型与算法研究进展[J].节水灌溉,2022(11):51-58.
[2]张帆,蔡宴朋,郭萍,等.灌区干支渠渗漏估算方法及其在水资源优化配置中的应用[J].农业工程学报,

2021,37(4):140-147.

[3]邓建伟.甘肃省高效节水灌溉分区发展对策[J].水利规划与设计,2023(7):1-4.

[4]董宇,任婷婷,景璐,等.农田水利工程灌溉规划设计存在问题及对策[J].水利技术监督,2025(3):73-75.

[5]陈彩霞.水库灌溉管理效率提升基本措施研究[J].农业灾害研究,2021,11(1):157-158.

[6]康绍忠.贯彻落实国家节水行动方案推动农业适水发展与绿色高效节水[J].中国水利,2019(13):1-6.

[7]贾钦.农田水利工程高效节水灌溉技术研究[J].现代工程科技,2024,3(10):45-48.

作者简介:冯跃缺(1988.6—),毕业院校:石家庄铁道大学,所学专业:道路与铁道工程,当前就职单位:河北省水利水电勘测设计研究院集团有限公司,职务:职员,职称级别:高级工程师。