

基于节水增效目标的灌区支渠断面水力参数优化设计

文 / 张 晨 海南省水利水电勘测设计研究院有限公司

摘要：水资源短缺成为制约农业发展的关键因素，灌区支渠断面水力参数优化设计是实现节水增效的核心环节。依托明渠均匀流原理，构建最佳水力断面法与实用经济断面法的对比分析框架，明确两种方法在断面尺寸计算中的适用性。通过界定不冲不淤流速区间，确定断面结构的约束条件，结合水位推算模型与纵断面衔接准则，形成完整的参数设计体系。基于挖填平衡原则，建立工程量与渠道比降、填方损失系数的非线性关联模型。

关键词：灌区支渠；水力参数；节水增效；断面设计；明渠流

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.22.075

引言

全球水资源供需矛盾加剧，农业用水占比超 70%，灌区输水损失率普遍高达 40%。支渠作为连接干渠与田间的关键节点，其断面参数直接影响水资源利用效率。现有设计方法存在断面选型与实际工况脱节、水力参数匹配度不足等问题，导致节水潜力未充分释放。通过优化支渠断面的宽深比、比降、流速等核心参数，可显著降低输水损耗，提升灌溉保证率。研究聚焦支渠水力参数与节水目标的耦合机制，旨在建立兼顾技术可行与经济合理的设计标准。

一、支渠断面设计的核心约束条件

支渠断面设计需综合水力稳定性、抗冻胀性能及工程实际条件。基于明渠均匀流原理，合理确定过水面积、水力半径与糙率，控制流速在不冲不淤范围内，确保输水效率与冲淤平衡。在季节性冻土区，须满足抗冻胀要求，通过增加渠底衬砌厚度、优化边坡坡比，增强结构稳定性，防止冻胀破坏。同时，设计需结合地质条件、材料供应与施工技术，协调水力、结构与经济性，实现安全、耐久、高效的输水功能。

二、水力参数优化的计算模型构建

水力参数优化需构建基于能量守恒的计算模型，量化断面参数与输水损失关系。沿程水头损失与比降相关，局部损失则取决于渠系建筑物类型及其水头损失系数，准确计算各类损失为优化提供依据。引入经济流速概念，使流速在单位造价与年运行费之和最小的区间内，降低工程成本。采用实用经济断面法，通过偏离系数调整宽深比，修正最佳水力断面，兼顾输水效率、施工机械化要求与经济性。水位推算采用逐级叠加法，结合农渠进水口高程、各级水头损失及安全超高，确定支渠取水口控制水位。该过程需协调比降、断面尺寸与水位衔接，通过反复迭代优化，实现水力性能、功能需求与建设效益的整体平衡。

三、断面参数与节水效益的耦合机制

（一）宽深比与渗漏损失的内在联系

断面宽深比对渗漏损失有着显著影响。宽深比的变化会改变渠道湿润周长与过水断面面积的比例关系，进而影响水分与土壤的接触面积和接触时间，导致渗漏量

发生变化。随着宽深比增大，渠道湿润周长相对减小，单位面积渗漏量降低，但同时土方开挖量会相应增加。在设计中需要权衡两者关系，找到既能减少渗漏损失，又不过度增加土方工程量的宽深比取值。

（二）比降对输水过程的多重影响

渠道比降的调整会对输水过程产生多方面的影响。具体来说，当比降减小时，水流的流速会相应降低，这将导致输水时间的延长。输水时间的延长会带来一些负面效应，比如增加输水过程中的能量消耗和管理成本。这是因为为了维持输水系统的正常运行，需要投入更多的能源和人力资源来确保水流的持续供应。从另一个角度来看，流速的降低也有其积极的一面，那就是可以减少沿途的蒸发损失。蒸发损失的减少有助于提高水资源的利用效率，从而在一定程度上弥补了输水时间延长带来的负面影响。渠道的比降还与渠道的纵坡设计、地形条件以及工程投资密切相关。纵坡设计需要根据地形条件进行合理规划，以确保水流顺畅且高效地到达目的地。

（三）糙率系数与输水效率的关联及优化

糙率系数主要通过衬砌材料进行控制。不同的衬砌材料具有不同的糙率，糙率的大小直接影响水流阻力和输水效率。采用混凝土等光滑衬砌材料替代土渠，能够有效降低糙率，减小水流阻力，提高输水效率。通过对糙率系数的优化，结合其他断面参数的调整，可以进一步提升渠道的节水能力，实现水资源的高效利用。

四、多目标优化的求解路径

（一）优化模型的构建与目标设定

在灌区支渠断面水力参数优化设计中，核心任务是构建科学合理的参数优化模型。为此，采用改进遗传算法作为建模工具。该模型将输水损失最小化与工程投资最小化设定为双重目标函数。输水损失直接影响水资源的有效利用效率，关乎节水增效目标的实现；工程投资则决定了项目的经济可行性与成本控制。这两个目标并非孤立存在，它们相互关联又彼此制约——降低输水损失往往需要增加工程设施投入，而控制工程投资可能导致输水效率下降。在优化过程中需要通过复杂的计算与分析，找到两者之间的动态平衡，以实现综合效益最大化。为确保设计方案在实际工程中具备可行性和安全

性，模型中设置了一系列严格的约束条件。其中，流速上下限的设定至关重要，流速过低会导致泥沙淤积，影响渠道输水能力；流速过高则可能冲刷渠床，威胁渠道结构安全。水位衔接差的限制保证了各段渠道水位的平稳过渡，避免因水位突变引发水流不稳定问题。边坡稳定性系数的约束则从结构力学角度出发，确保渠道边坡在长期水流作用及自然环境影响下保持稳定，防止坍塌事故发生。

(二) 算法改进与收敛优化

传统遗传算法在处理复杂优化问题时，存在收敛速度较慢、易陷入局部最优解等不足。为提升算法性能，对其进行针对性改进，引入自适应交叉算子。在算法运行过程中，种群内个体的适应度会随迭代发生变化。自适应交叉算子能够实时监测个体适应度情况，根据具体数据动态调整交叉概率。当种群中个体适应度差异较大时，适当提高交叉概率，促进个体间基因的充分交换，加快算法探索新解空间的速度；当个体适应度趋于集中，接近局部最优解时，降低交叉概率，减少不必要的基因重组，使算法聚焦于对当前优质解的深度挖掘。通过这种自适应调整机制，算法在面对复杂的参数优化问题时，能够快速在解空间中定位全局最优解的大致区域，并在后续迭代中精准逼近目标。相较于传统算法，改进后的算法在较少的迭代次数内即可获得令人满意的优化结果，大幅提高了优化效率。

(三) 参数动态调整与方案优化

在灌区支渠断面水力参数优化过程中，比降与断面尺寸等参数之间存在紧密且动态的匹配关系。比降作为影响水流速度的关键因素，其数值的改变会打破原有的水力平衡。为维持流速稳定，确保渠道输水能力不受影响，宽深比、断面面积等参数需根据比降变化进行相应调整。当比降增大时，水流速度加快，此时需要适当增大断面面积或调整宽深比，以避免流速超过安全上限；反之，当比降减小时，则需通过调整其他参数防止流速过低导致泥沙沉积。优化过程是一个不断分析、调整与验证的循环过程。设计人员基于水力计算原理，结合工程实际经验，对各参数间的关系进行深入剖析。通过模拟不同参数组合下的水流状态，评估方案的可行性与经济性，逐步优化设计方案。大量工程实践表明，采用这种多目标优化方法，能够有效整合节水与增效目标，显著缩短方案比选周期。以往需要反复试算、长时间论证的设计方案，通过该方法可快速获得科学合理的解决方案，同时提高了项目的投资回报率，为灌区工程建设提供了兼具技术先进性与经济合理性的设计依据。为清晰呈现多目标优化的实施逻辑，图1以流程图形式梳理了灌区支渠断面水力参数优化的核心路径，从模型构建、算法改进到参数调整的全流程一目了然，可直观对应前文所述的求解步骤与技术要点。

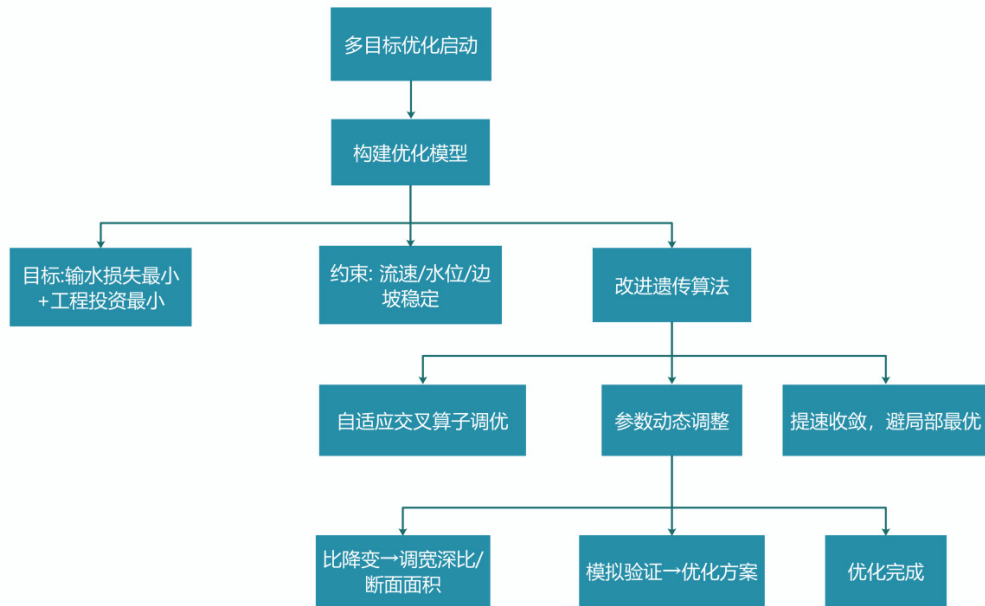


图 1: 多目标优化的求解路径流程图

五、设计方案的验证与调整准则

(一) 水力模拟验证与参数校准

优化方案的可靠性验证是确保灌区支渠设计符合实际运行需求的关键环节。借助 MIKE 11、HEC-RAS 等先进水力模拟软件，设计人员可构建虚拟渠道水流环境，将渠道几何尺寸、边界条件等参数输入系统，真实复现渠道内水流状态。模拟过程中，需重点关注流速这一核心

指标，通常要求支渠断面平均流速控制在 0.6-1.0m/s (壤土类渠床不冲流速上限 1.2m/s、不淤流速下限 0.4m/s)，并将模拟计算得出的流速值与设计阶段预设的目标值进行细致比对。以海南省某灌区支渠为例，初始模拟时，因糙率系数按经验取值 0.014 (混凝土衬砌渠道常规值)，导致模拟平均流速为 0.92m/s，与设计值偏差达 15%，超出 ±10% 的可接受范围，表明当前设计方案存在潜在问

题。此时,设计团队需重新审视影响水流运动的关键参数,其中糙率系数作为反映渠道壁面粗糙程度对水流阻力影响的重要指标,往往成为首要校准对象。结合该支渠现场勘查结果(混凝土衬砌表面存在轻微蜂窝麻面,局部有杂草根系嵌入),逐步将糙率系数调整为0.016、0.017,分别进行二次、三次模拟:二次模拟平均流速降至0.85m/s,偏差缩小至6.25%;三次模拟平均流速稳定在0.81m/s,偏差仅1.25%,满足精度要求。通过这种“模拟-比-校准-再模拟”的循环,可逐步缩小模拟结果与设计目标之间的差距。同时,水力模拟技术能以可视化方式呈现水流运动轨迹与流速分布,例如该支渠在桩号1+200

处(弯道段,转弯半径15m),初始模拟发现局部最大流速达1.35m/s(超出不冲流速),且存在明显水流漩涡;经调整弯道段边坡系数至1:1.7、增加弯道超高0.15m后,再次模拟显示该区域最大流速降至1.12m/s,漩涡现象消失,有效规避了水流紊乱、局部壅水等潜在风险,为优化方案调整提供明确方向,切实保障设计成果的准确性与工程可行性。为直观呈现海南省某灌区支渠水力模拟验证与参数校准的全过程,清晰对比不同糙率系数下流速指标与设计目标的偏差情况,表1汇总了三次模拟的关键数据,从糙率系数调整到流速偏差变化、局部流速控制效果均逐一列明,如下表所示:

表1 某灌区支渠水力模拟验证与参数校准关键指标对比表

模拟次数	糙率系数	模拟平均流速 (m/s)	与设计流速偏差 (%)	局部最大流速 (m/s)	是否满足要求 (偏差 $\leq \pm 10\%$ 且局部流速 $\leq 1.2\text{m/s}$)
1	0.014	0.92	+15.0	1.35	否
2	0.016	0.85	+6.25	1.23	否(局部流速超限)
3	0.017	0.81	+1.25	1.12	是
设计目标值	-	0.8	0	≤ 1.2	-

(二) 季节性工况下的参数动态调整

在季节性用水特征显著的灌区,渠道运行工况随时间呈现明显变化。为适应不同时段的水需求,提升水资源调配的精准度,需建立科学的流量调节体系。具体而言,将渠道运行流量划分为低、中、高三个调节区间,每个区间对应特定的用水场景与运行条件。针对不同流量区间,制定差异化的断面参数组合方案。在低流量工况下,渠道内水流速度较慢,容易引发泥沙淤积问题,此时需要适当调整断面形状与尺寸,优化水流流态,增强渠道的输沙能力;在高流量工况下,渠道面临较大的过流压力,为防止出现漫溢、冲刷等安全隐患,需通过调整边坡系数、底宽等参数,提升渠道的过流能力与稳定性。通过这种精细化的动态调整机制,确保渠道在灌溉高峰期能够足量输水,在非灌溉期维持合理的水流状态,实现水资源在时间与空间上的优化配置,显著提高渠道运行的适应性与水资源利用效率。

(三) 纵断面设计准则与反馈机制建立

渠道纵断面设计是保障输水系统高效运行的重要环节,需严格遵循一系列设计准则。在相邻渠段衔接处,必须将水位落差控制在合理范围之内,避免因水位骤变导致能量损失过大或水流衔接不畅;在渠道转弯部位,应确保转弯半径满足水流运动要求,减少因弯道水流离心力作用产生的局部水头损失,维持水流的平顺性。建立完善的参数反馈机制是实现渠道长期稳定运行的重要保障。在工程运行阶段,通过布设各类监测设备,实时收集渠道输水过程中的水位、流速、流量等关键数据。将实际监测数据与设计阶段的理论计算值进行系统对比分析,深入研究两者之间的差异及其产生原因。根据反

馈结果,及时对设计参数进行优化调整,例如修正纵坡坡度、调整渠底高程等,将实际输水效率与设计目标之间的偏差控制在最小限度。这种持续改进的反馈机制,能够有效应对工程运行过程中地质条件变化、用水需求波动等不确定因素,保障渠道长期稳定运行,充分发挥水利工程的经济效益与社会效益。

结语

支渠断面水力参数优化是一项系统工程,需实现水力特性、工程成本与节水效益的动态平衡。现有研究已建立参数设计的基本框架,但在非均匀流工况、复合土壤条件下的模型精度仍有提升空间。未来可结合物联网监测技术,构建实时反馈的参数调整系统,实现全生命周期的动态优化。通过引入BIM技术与数字孪生模型,可进一步提高设计方案的可视化程度与工程适用性,为智慧灌区建设提供技术支撑。

参考文献

[1] 高勤. 基于明渠均匀流公式的U形渠道水力最优断面率定及优化设计[J]. 水利科技与经济, 2022, 28(3): 68-72.
 [2] 倪士超. 扩展微分进化算法在渠道断面设计中的应用[J]. 水利规划与设计, 2021, (5): 114-117.
 [3] 刘耀芳. Hopfield神经网络在灌溉渠系密度优化中的应用[J]. 水利科技与经济, 2020, 26(4): 43-47.
 [4] 张礼兵. 试验遗传算法在灌溉排水工程设计中的应用[J]. 农业工程学报, 2023, 39(12): 102-108.
 [5] 王少丽. 农田灌溉渠道水力优化设计关键技术研究[J]. 水利学报, 2022, 53(8): 956-965.

作者简介: 张晨, 1993年06月, 男, 海南省临高县人, 汉, 本科, 中级, 研究方向: 水工建筑。