

低压管道输水系统出水口间距对灌水效率的影响与优化研究

厉佩瑶

河南和康工程技术有限公司 河南 三门峡 472000

【摘要】：低压管道输水系统因节能高效而广泛应用，但其出水口布置间距是影响灌水效率的关键因素。间距直接影响水流均匀性；过大导致末端水压衰减与流量不均，过小则引发出流干扰与流态紊乱。灌水效率由管道输水效率、田间配水效率与作物用水效率构成，其中水流均匀性是影响田间配水效率的核心。通过现场实验与理论分析表明，出水口间距与灌水效率呈抛物线关系；在壤土、0.05-0.08MPa 工况下，15m 左右间距可获得较优的水流均匀性与灌水效率。优化间距需综合考虑土壤类型、作物需水及管道水压，并结合管径选择与系统调控，以实现水资源的高效利用。

【关键词】：低压管道；出水口布置；灌水效率；间距优化；水流均匀性

DOI:10.12417/2705-0998.26.04.010

引言

低压管道输水系统因节能、经济、高效的优势，广泛应用于农业灌溉、园林绿化等领域，是推动节水型社会建设的重要载体。与高压系统相比，其更注重节能与水资源合理配置，但水流分配均匀性不足仍是制约灌水效率的核心瓶颈。出水口布置间距直接影响管道水力状态与系统效能，其优化设计是该领域的研究热点。现有研究多集中于管道材质、水压调控等方面，针对出水口间距的研究缺乏多工况下的关联机制探讨，且依赖理论模拟、缺乏实验支撑，对“灌水效率”这一指标界定不清。基于此，本文结合现场实验与理论分析，明确灌水效率构成，提出间距优化策略，弥补研究不足，为工程实践提供支撑。

1 低压管道输水系统的工作原理与挑战

低压管道输水系统是将水通过低压力输送至目标区域的系统，其核心工作原理在于维持管道内水流的稳态流动与压力均衡，通过管道系统的设计来确保水流能够均匀地传输至每个终端使用点^[1]。不同于高压管道系统，其更侧重于节能与资源的合理利用，因此其设计更注重管道的布置方式、出水口的分布等因素。

低压管道输水系统在实际应用中面临着诸多挑战。其中，水流分布不均为首要难题，在灌溉过程中会导致某些区域水分过多，而其他区域出现干旱现象，从而影响作物的生长与灌溉效果。低压系统运行时水流动能有限，沿程摩擦阻力造成的压力损失相对显著，在管道直径较小的情况下，管道中的水流阻力较大，水流速度较慢，会进一步加剧沿程能量耗散，造成水流分布不均的问题。

出水口的布置间距也直接影响水流的均匀性。布置间距过大，可能导致水流传输不充分，尤其在系统末端，水压可能会急剧下降，造成水分分配不均^[2]。而布置间距过小，则可能导致水流过于集中，增加了水资源的浪费。因此，合理设置出水口间距，使得水流能够在不同的压力和流速下均匀分布，是低压管道输水系统设计中必须解决的一个问题。在解决这些问题

时，低压管道输水系统还需要综合考虑管道材质、管道直径以及输水过程中可能出现的摩擦损失等因素。各项参数的协调设计，能够有效提升系统的整体工作效率和水资源的利用率^[3]。

2 出水口布置间距对水流均匀性的影响

在低压管道输水系统中，水流均匀性是衡量水力性能的核心指标，而出水口的布置间距作为关键设计参数，深刻影响着管道内部的流动状态与出流一致性^[4]。由于系统工作压力较低（通常为 0.05–0.20 MPa），水流动能有限，沿程摩擦损失对流量分配的干扰尤为显著。当多个出水口等距布设时，管道呈现典型的多点分流特征，水流在每一出流点处发生局部能量耗散，导致压力沿程呈非线性递减趋势。在此背景下，布置间距的大小直接决定了相邻出流点之间的水力耦合强度。若间距设置过大，单段管道长度增加，沿程水头损失累积效应加剧，末端节点所获得的有效压力显著低于起始端^[5]。根据能量守恒原理，压力梯度的扩大必然引发流量分布的不均衡——首端出水口因压力充足而出流量偏高，末端则因压力不足而流量衰减，形成明显的“前多后少”分配格局。这种流量偏差不仅破坏了系统运行的稳定性，也削弱了终端供水的一致性。

另一方面，当布置间距过小，单位长度内出流点密度过高，水流在短距离内频繁分流，造成局部流态紊乱。相邻出水口之间的水力干扰增强，可能诱发涡旋、回流或瞬时负压现象，进一步扰乱主流方向与速度分布^[6]。此外，密集布设会改变管道内雷诺数与流速剖面，使流动偏离理想层流或稳定湍流状态，增加局部阻力系数。这种非稳态流动不仅难以通过常规水力模型精确预测，还可能导致部分出水口出流不稳定，甚至出现间歇性断流。值得注意的是，水流均匀性并非仅由间距单一因素决定，而是与管道内径、壁面粗糙度、运行水压及地形坡度等共同作用的结果。例如，在相同间距下，大管径可降低流速从而减小沿程损失，提升均匀性；而在适宜水压范围内，适度提高工作压力可补偿末端压力衰减，缓解流量偏差^[7]。然而，在工程实践中，管径与水压往往受投资与水源条件限制，而布置间距则具有更高的可调性与灵活性。因此，合理确定出水口间

距,实质上是在抑制沿程压力衰减与避免局部水力干扰之间寻求最优平衡点,是实现各出流点流量一致、为后续田间配水提供稳定的水力基础。

3 灌水效率的构成及其与水流均匀性的关系

灌水效率作为评价灌溉系统综合性能的核心指标,不能简单地以“总供水量/作物需水量”进行笼统界定,而应基于水分从水源到作物根系的完整传输链条,构建层次清晰、逻辑严密的效率评价体系。结合低压管道输水系统的运行流程,灌水效率可划分为三个逐级递进的层次:管道输水效率、田间配水效率与作物用水效率^[8]。其中,管道输水效率反映水源至田间首部之间的水量输送有效性,主要受管道材质、接口密封性及沿程渗漏损失影响;作物用水效率则体现作物对已分配水分的实际吸收与利用程度,受土壤-植物-大气连续体(SPAC)调控;而居于二者之间的田间配水效率,则是连接工程输水与农业用水的关键枢纽,其核心内涵是灌溉水在田间空间上的分配均匀性与覆盖完整性^[9]。

田间配水效率的高低,直接取决于水流均匀性。所谓水流均匀性,并非指流量绝对相等,而是指各灌溉单元所获得的水量在满足作物需求的前提下保持相对一致,避免出现局部过湿或干旱。当水流均匀性高时,湿润锋面推进同步,土壤含水率空间变异小,水分有效利用率显著提升;反之,则易形成“斑块状”湿润格局,部分区域水分过剩导致深层渗漏或地表径流,另一些区域则因供水不足而限制作物生长。由此可见,水流均匀性虽源于管道水力特性(如出水口间距、管径、压力等),但其价值最终体现在对田间配水效率的支撑作用上。

更进一步,田间配水效率又反向影响其他两个层次:一方面,均匀配水可减少无效耗水,间接提升管道输水效率的实际产出;另一方面,均衡的水分供应更契合作物生理需水规律,有助于提高根系吸水效率,从而增强作物用水效率^[10]。因此,水流均匀性实为贯穿三层效率的“传导纽带”,其优化具有乘数效应。故出水口布置间距的优化,正是通过改善水流均匀性这一中介变量,撬动田间配水效率的提升,进而带动整个灌水效率体系的优化。

4 出水口布置间距优化策略与实验研究

出水口布置间距优化核心是实现“水流均匀性、工程经济性、现场适用性”协同统一,结合低压管道输水系统运行特征与灌水效率提升需求,明确三大原则:一是以提升水流均匀性、优化田间配水效率为核心,保障终端供水平衡;二是兼顾经济性,避免间距过小增加工程成本或间距过大造成水资源浪费;三是贴合现场工况,充分考虑土壤、作物、管道材质、运行水压等关键因素,确保方案可操作。基于上述原则,优化思路为:通过现场实验获取不同间距下水流参数与灌水效率,明确二者关联规律;结合流体力学理论构建优化模型,量化最优间距范

围;结合现场工况验证修正模型,提出针对性优化策略。

为支撑间距优化,选取某高标准农田壤土片区(小麦种植,灌溉面积500m²)开展现场对比实验,该片区低压管道为PE材质、内径110mm,设计运行水压0.05-0.08MPa,采用φ50型旋转式出水口。实验设备选用经校准的水压传感器、流量传感器、流速仪及数据采集仪等,保障数据准确。实验以出水口布置间距为唯一变量,设5m、10m、15m、20m、25m五组,每组3次平行实验,控制运行水压(0.06MPa)等无关变量一致。实施步骤简化为:前期清理调试设备与管道;分组布置出水口,稳定运行后每5min采集一次水流参数,每组重复3次取均值;实验中校准间距、记录气候条件;后期整理数据,用Excel、SPSS软件分析计算水流均匀度、灌水效率等指标。数据处理采用流量均匀系数Cu量化水流均匀性($Cu=1-(最大流量-最小流量)/(最大流量+最小流量)$),结合配水均匀度系数、综合灌水效率公式,确保处理科学。

出水口间距与水流均匀性及灌水效率呈“先升后降”的抛物线关系,在典型工况下以15m时效果最优(均匀系数Cu达0.89,灌水效率为78.6%);间距过小易引发出流干扰,过大则加剧水压衰减,均降低灌溉性能。不同土壤条件下最优间距存在差异,砂壤土透水性强,宜为16-18m,黏土透水性差,宜为12-14m,在作物需水高峰期可适当缩小间距。

综合实验结果,在壤土、PE管道及0.05-0.08MPa工作压力条件下,推荐以15m为基准间距,并结合土壤透水性及作物需水特征动态调整;配套110-125mm内径管道与0.06-0.07MPa水压可进一步提升系统效能;大面积应用时宜按土壤与作物分区差异化布置,实现全域高效灌溉。

5 提高灌水效率的综合优化方案

提高灌水效率的综合优化方案需要综合考虑多个关键因素,包括出水口布置间距、管道系统设计、水压调控、控制系统的优化以及环境条件的适配。

在低压管道输水系统中,优化灌水效率的首要任务是确保水流能够均匀分布,并在灌溉过程中充分满足作物水分需求^[12]。为实现这一目标,需要从多个维度出发,制定全方位的解决方案。出水口的合理布置是提高灌水效率的核心因素之一。根据水流均匀性分析,适当调整出水口布置间距,能够显著提高灌溉效果。间距过大会导致水流分布不均,系统末端水流量不足,进而影响灌溉效果;而间距过小则可能导致水流集中,局部区域水量过大,造成浪费。通过实验数据分析和流体力学模拟,能够找到最适合的布置间距,使水流分配更加均匀,从而提高整体灌溉效率^[13]。管道的内径和材质也是影响水流的关键因素,优化管道设计能够减少水流阻力,提升水流速度,从而减少水的损耗和提高输水效率。

水压的调控也是提高灌水效率的重要环节。在低压管道系

统中,水压过低会导致水流速度减慢,尤其是在末端区域,水流量可能无法满足灌溉需求。通过精确控制管道系统中的水压,可以确保水流在整个管道内保持稳定,避免出现水流不足的现象^[14]。水压的调节还能够根据不同区域的需求,动态调整水流分配,进一步提高水资源的使用效率。自动化控制系统在优化灌水效率方面发挥着重要作用。通过引入智能化控制技术,可以实时监测和调节管道系统的水流量、压力及出水口开关状态。根据不同的气候条件和土壤湿度,自动化系统能够根据实时数据调整灌溉量,确保每个灌溉区域都能够获得适量的水分。结合物联网技术,能够实现远程控制和实时数据采集,进一步提升灌溉系统的灵活性和响应速度。

环境条件的适配是提高灌水效率的另一个重要方面^[15]。灌溉制度应根据土壤质地、气候条件和作物生育阶段进行动态优化。在透水性较差的土壤中,需要通过增加灌溉次数或缩小出

水口间距来确保水流能够均匀渗透。在干旱或半干旱地区,合理调节水流量和灌溉频率是减少水分蒸发和提高水资源利用率的有效途径。针对不同季节和作物需求,调整灌溉策略,能够最大限度地提高水分利用效率,确保作物在不同生长阶段获得足够的水分。通过优化管道系统设计、合理布置出水口间距、精确调控水压、引入自动化控制技术以及适应环境条件,能够全面提升低压管道输水系统的灌水效率。

6 结语

本文证实,在低压管道输水系统中,优化出水口布置间距对提升水流均匀性和灌水效率具有重要作用。此外,管道设计、环境因素、智能调控与技术手段的多因素协同,可以实现灌溉系统的高效运行和水资源的最大化利用。合理的优化方案不仅有助于节约水资源,还能提高农业生产效益,推动可持续灌溉技术的发展。

参考文献:

- [1] 司昌亮,尚学灵,于海荣,等.基于水力计算的滴灌系统输水管网优化设计初步研究[J].农业与技术,2025,45(09):48-52.
- [2] 高婕.低压管道灌溉输水在灌区工程建设中的应用研究[J].农业科技与信息,2021(13):118-120
- [3] 邵长征.高标准农田建设中低压管道输水灌溉技术的应用[J].农业工程技术,2023,43(19):51-52
- [4] 杨慧,黄伟,王文杰,薛丽敏.中低压管道输水在智慧灌区智能节水灌溉中的应用[J].水利技术监督,2023(7):253-255
- [5] 李玉鹏.高效节水灌溉技术在农田水利灌溉中的应用与对策[J].南方农机,2024,55(13):47-50.
- [6] 于俊朋,任建华.水利工程输水系统与节水灌溉对接的关键技术[J].农业机械,2025,(10):117-119.
- [7] 刘国锋.水利工程输水系统与节水灌溉对接的关键技术及应用策略[J].农业机械,2025,(09):158-160.
- [8] 党胜利.灌区节水改造中低压管道输水技术应用[J].农村实用技术,2025,(7):97-98.
- [9] 付妍.低压管道输水灌溉技术节水性能研究[J].现代工程科技,2025,4(03):157-160.
- [10] 张锐.低压管道节水灌溉技术在农田建设中的应用[J].农村科学实验,2024,(10):91-93.
- [11] 李伟.低压管道输水灌溉在高标准农田应用的技术要点[J].河南水利与南水北调,2022,51(09):28-29.
- [12] 焦玉婷.不同区域下的管道输水节水灌溉工程技术改造研究[J].水利科技与经济,2025,31(09):135-139+144.
- [13] 刘晓云,周俊.轮作型灌溉区域的低压管道灌溉研究设计[J].水利技术监督,2023,(04):131-134+155.
- [14] 季光武.低压管道灌溉输水在灌区工程建设中的应用[J].科学技术创新,2020,(04):106-107.
- [15] 许春芳,高建东,张代桥,等.低压灌溉管道多出口流量分配的试验研究[J].灌溉排水学报,2020,39(S1):96-100.