

灌区管道输水压力损失及其节能设计方法

朱国明

新疆兵团勘测设计院集团股份有限公司云南分院

DOI:10.32629/hwr.v9i12.6681

[摘要] 灌区管道输水系统是实现农业水资源高效利用的重要载体,压力损失大小决定着系统能耗水平和运行经济性。通过对灌区管道输水过程中的沿程压力损失、局部压力损失形成机理分析,探讨了水流态、管材特性、流体性质以及管网布局等影响因素;同时从水力优化、材料选用、管网布局以及智能调控四个方面出发,建立了一个全面的灌区管道输水系统低能耗设计的方法体系。通过研究,得出了压力损失精准控制和节能设计开展有益于降低灌区输水能耗,提高水资源利用率的结论。

[关键词] 灌区管道; 输水系统; 压力损失; 节能设计; 水力优化

中图分类号: TV672+.2 文献标识码: A

Pressure loss and energy-saving design method for pipeline water transmission in irrigation areas

Guoming Zhu

Xinjiang Production and Construction Corps Survey and Design Institute Group Co., Ltd. Yunnan Branch

[Abstract] The pipeline water supply system in irrigation areas is an important carrier for achieving efficient utilization of agricultural water resources, and the magnitude of pressure loss determines the energy consumption level and operational economy of the system. By analyzing the formation mechanism of pressure loss along the pipeline and local pressure loss during the water supply process in the irrigation area, the influencing factors such as water flow state, pipe characteristics, fluid properties, and pipeline layout were explored; Starting from four aspects: hydraulic optimization, material selection, pipeline layout, and intelligent control, a comprehensive method system for low-energy design of irrigation pipeline water delivery system has been established. Through research, it has been concluded that precise control of pressure loss and energy-saving design are beneficial for reducing energy consumption in irrigation areas and improving water resource utilization.

[Key words] Irrigation district pipeline; Water supply system; Pressure loss; Energy saving design; Hydraulic optimization

引言

农业节水灌溉系统中利用管道输水是因为其节水、节地、高效的优点是灌区输水的主流形式。而在实际的输水过程中,流体本身的黏滞性、管道的粗糙以及管道本身具有的部分管网结构产生的扰动效应都会引起压力损失,该压力损失消耗了水泵提水时所耗能量,所以会造成输水系统的能耗增加。因此,在农业灌溉领域不断推进绿色发展的同时,如何降低输水能耗,实现节能高效的运行也是目前研究的重点之一。

压力损失作为灌区管道输水系统的核心水力参数,其形成机制复杂,受多种因素耦合影响。现有研究多侧重于压力损失的计算方法与单一节能措施的应用,缺乏对压力损失机理与节能设计方法的系统性整合。因此对灌区管道系统设计优化、降低能耗、提高水资源利用效率具有重要的理论价值和现实意义,

本文就灌区管线输水压力损失内在规律进行深入分析,并构建了科学完善的节能设计方法体系,具有十分重要的意义。本文从压力损失的生成机理与影响因素入手,系统阐述灌区管道输水的节能设计方法,为灌区管道输水系统的节能优化提供全面的理论指导。

1 灌区管道输水压力损失的生成机理

灌区管道输水过程中的压力损失本质上是流体机械能的耗散过程,按损失产生的原因和位置分为两大类:沿程的压力损失和局部的压力损失,两者共同构成管道输水系统的总压力损失。

1.1 沿程压力损失的生成机理

沿程压损是指流体分子间的粘性内摩擦和流体与管壁间的外摩擦作用,使流体在等直管段内流动时产生的机械能量损耗。

这种损失沿管道长度均匀分布,是长距离灌区管道输水的主要压力损失形式。

从流体力学的视角来看,实际流体是有粘性的。当流体在管道中流动时,靠近管壁的流体分子由于粘性作用被管壁吸附,导致其流速接近于零。远离管壁的流体分子受到的粘性影响较小,流速逐渐提高,从而形成了明显的流速梯度。流速梯度的存在使得流体内部各流层之间产生剪切应力,引发内摩擦作用,消耗流体的动能;同时,流体与管壁之间的直接摩擦也会造成动能损耗,这两部分损耗共同构成沿程压力损失^[1]。

沿程压力损失的大小与流体流动状态的大小有很大的关系,因此压力损失的大小与流体流动状态有很大的关系。流层之间平行流动,在流体处于层流状态下,没有明显的横向混杂,内摩擦损失主要由压强损失与流速呈线性关系的流体粘性所主导;当流体在湍流状态下时,大量的不规则涡旋在流体内部形成,而流层之间产生剧烈的横向混杂和动量交换,内摩擦损耗明显增加,压力损失与流速的平方成正比^[2]。在灌区管道输水系统中,由于流量需求较大,流体多处于湍流状态,沿程压力损失更为显著。

1.2 局部压力损失的生成机理

局部压力损失是指流体因流动方向改变、流速突变或流道截面变化,使流体在流经管道系统中的局部构件(如弯头、阀门、三通、变径管、进出口等)时产生剧烈的涡旋和动量重组,从而造成机械能量的损失。这种损失主要集中在局部构件附近,是短距离、复杂管网灌区的主要压力损失形式。

流体流动状态剧烈扰动是局部压力损失生成的核心。当流体流过弯头时,流动方向发生变化,外侧流体受挤压流速增大,内侧流体因回流而形成涡旋区,产生和消散涡旋的过程将消耗大量的动能;流体在流过变径管时,流道截面突然扩大或缩小,会导致流速急剧变化,在扩大段形成回流涡旋,在收缩段产生加速冲击,都会造成显著的压损;而阀门、三通等构件会破坏流体的均匀流动状态,形成局部流速紊乱和冲击,造成机械能量损耗^[3]。此外,在多分支管网的合流与分流处,不同支路的流体相互干扰、碰撞,会进一步加剧局部压力损失的产生。

2 灌区管道输水压力损失的影响因素

灌区管道输水压力损失的大小受流动状态、管道特性、流体性质及管网布局等多种因素的综合影响,明确各因素的作用规律是实现压力损失精准控制与节能设计的基础。

2.1 流动状态的影响

流动状态是以雷诺数作为判断依据,决定压力损失大小的关键因素。当雷诺数小于临界雷诺数时,流体处于层流状态,压力损失较小,雷诺数是表征流体惯性力与粘性力比值的无量纲数;流体处于湍流状态,当雷诺数大于临界雷诺数时,压力损失明显增大。在灌溉区的管道输水系统中,雷诺数主要受到管道内平均流速、管道直径和流体运动粘度的影响。当流速增加、管径减小或运动粘度降低时,雷诺数会相应增大,这使得流体更容易转变为湍流状态,压力损失也随之增加^[4]。

2.2 管道特性的影响

管材、管径大小、管长、管壁粗糙度等主要体现了管道特性对压力损失的影响。管道材质直接决定管壁的光滑程度,光滑管壁与流体之间的摩擦阻力较小,压力损失也较小;粗糙管壁则会加剧流体的湍流扰动,增大摩擦阻力,增加压力损失。管道的直径与压力损失呈现负相关关系:直径越大,流体的流动空间越宽敞,流速的变化率越小,内部摩擦损耗随之减少,从而导致压力损失降低;反之,直径越小,压力损失就越大。管路长度与沿程的压力损失呈正相关,管路越长,流体与管壁摩擦时间越长,其沿程的压力损失就越大。管壁粗糙度影响流体边界层的发展状态,其湍流强度越大、边界层内的湍流越强,摩擦阻力越大,压力损失也越大,从而影响压力损耗的大小。

2.3 流体性质的影响

流体性质对压力损失的影响主要通过流体的粘性和密度体现。流体的黏性越大,分子间的内摩擦力就越强,在流动过程中就会产生较大的能量损耗,从而造成较大的压力损失。流体的密度对压力损失的影响主要体现在湍流状态下,密度越大,流体的惯性力越大,湍流涡旋的动能越大,其消耗的机械能也越多,在涡旋消散过程中,其损耗的压力也就越大^[5]。在灌区管道输水过程中,流体多为农业灌溉水,含有少量泥沙,随着流体粘性、密度的增加,含沙量增加,压力损失随之增大;另外,水温的变化会使流体的黏性发生变化,在水温降低的情况下黏性变大,相应地也会使压力的损耗增大。

2.4 管网布局的影响

管网布局是影响局部压力损失的主要因素,复杂的管网布局会增加局部构件的数量,加剧流体流动的扰动,进而增大局部压力损失。管网布局的影响主要体现在局部构件的类型、数量和布置方式上:弯头角度越小且数量越多,流体流动方向改变的频率就越高,局部压力损失也会相应增加。变径管的截面变化越明显,流速的变化也会越剧烈,导致局部压力损失增加;而三通、阀门等组件数量的增加,会加剧流体流动的干扰,从而使压力损失进一步增大。此外,支管网末端流速小、压力损失相对集中在前段的管网布局形式(如支管网、环管网)也会对压力损失分布造成影响;环状管网流量分布较为均匀,压力损耗分布较为平衡。

3 灌区管道输水的节能设计方法

灌区管道输水节能设计意义重大,其核心目标聚焦于降低压力损失、减少泵站能耗。鉴于压力损失受多种因素影响,我们需要从多方面着手,构建一套系统的节能设计方法体系。具体涵盖水力优化以提升水流效率,合理材料选型降低摩擦阻力,科学管网布局减少局部损耗,以及智能调控实现按需精准供水,全方位达成节能目标。

3.1 水力参数优化设计

水力参数优化设计是降低灌区管道输水压力损失的基础,核心是通过优化管道内的流速和流量分配,控制流体流动状态,减少能量损耗。合理确定经济流速是水力参数优化的关键,经济

流速是指在满足灌溉流量需求的前提下,使管道建设成本与运行能耗成本之和最小的流速。通过合理选择经济流速,可避免因流速过高导致的湍流强度过大、压力损失激增,同时也可避免因流速过低导致的管道淤积。

针对多分支灌区管网,需根据各分支的灌溉需求,通过压力—流量耦合算法进行精准分配,使各支管路水流速度满足经济流速范围内的要求,实现分支流速的压力—流量优化。与此同时,可以通过建立水力计算模型的方法,将不同的流量和流速情况下的水头损失量化出来,作为优化水力参数的依据;该模型应考虑沿程水头损失与局部水头损失的共同作用,结合管道自身特性以及流体的特性,精确地计算出不同工况下管道的压力总损失,并以此优化组合水力参数值。

3.2 管道材料与管径优化选型

管道材料与管径的优化选型是减少压力损失的关键技术手段。在管道材料选型方面,应优先选择管壁光滑、粗糙度小、耐腐蚀、抗磨损的材料,以减少流体与管壁的摩擦阻力。常用的节能管材有:硬质 PVC 管路、PE 管路及玻璃钢夹砂管等,其特点是:管壁光滑,粗糙度低,沿程压力损失能有效降低;同时,在管道使用过程中,其耐腐蚀、耐磨损性能的降低,可以减少管壁粗糙度在管道使用过程中的增加,保证节能效果的长远运行。

针对管径优化选型问题,在进行水力计算的基础上,应结合灌溉流量、压力损失与经济性的要求,确定合理的管径尺寸;同时在选管过程中要避免“大马拉小车”和“小马拉大车”两种现象的发生,管径选择偏大虽然能够保证灌溉水流的压力需求,但是会造成较大的压力损失,增大了泵站的电耗;而如果管径选择偏小,则增加了管线的长度或者加大了管径,这将导致管材使用量的加大以及管线建设成本的提高,造成浪费。为了优化确定管径,需建立管径优化模型,目标函数是总费用(建设费+运行能耗费)最小,流量、压力损失、管强度为约束条件,对于长距离灌溉管网可采用变径的方法设计,分段选取满足不同管段流量要求的管径,以达到降低管道压损的目的。

3.3 管网布局优化设计

管网布局优化核心是减少局部压力损失,通过优化布置形式与局部构件降低流体扰动。选布置形式时,大且地形复杂的灌区优先环形管网,能双向分配流量,避免末端问题,降低局部构件负荷;小且平坦的灌区用树枝状管网降成本。局部构件布置上,尽量减少数量、简化结构,少用弯头,以大角度替代小角度,避免连续布置;用渐变变径管;合理布置阀门等;多分支管网

合流与分流处,优化腔室结构,确定好分支管间距和数量,减少流体干扰。

3.4 智能调控与节能运行技术

智能调控、节能运行有利于提高灌区管道输水节能的效果,利用智能监测在管网的关键点设置传感器,实时收集水力参数通过物联网传送至控制中心监控,并根据收集的数据及气象、作物需水等数据计算确定灌溉流量,随后实现调控和能耗采集与节能优化。动态调控通过变频调速技术来控制泵站,在运行过程中通过调整电机转速来达到调节泵站输出与实际所需能量相匹配的目的;建立智能调度模型来实现精准的配水;对于长期运行的管道,要建设定期检修和清理管道的保养制度,保证管道畅通,避免因管道堵塞导致压力损失增大。

4 结束语

灌区管道输水压力损失主要分为流态大小、管道特性、流体性质及管网布局等因素综合影响的流体粘性、管壁摩擦及管网结构扰动等多种因素共同作用的结果。通过水力参数优化、管材管径优化选型、管网布局优化和智能调控及节能运行技术的系统应用,有效降低压力损失,降低泵站能耗,提高灌区管道输水系统的经济性和高效性,是灌区管道输水节能设计的核心。

需要进一步开展压力损失的耦合影响机理研究,利用数值模拟手段研究不同工况下压力损失分布规律,加大智能节能技术研究和开发力度,加快灌区管道输水系统智能化建设步伐,为农业节水节能和绿色发展的现实需要提供更加有力的技术支撑。

[参考文献]

- [1]杨建国,把多铎,杨彦勤.输水管道装置增压泵的节能分析[J].西北农业大学学报,1998,54(7):856-864.
- [2]赵竞成,王彦军.井灌区管网优化计算模型的改进[J].水利学报,1999,41(5):102-109.
- [3]顾文东,王凯.浅论小水库灌区节水节能的改造及管理[J].价值工程,2010,55(3):78-85.
- [4]路书杰.丘陵地区灌区管道输水灌溉设计[J].云南水力发电,2025,51(9):135-143.
- [5]董鹏.输水管道设计在灌区节水改造中的应用[J].陕西水利,2022,33(4):210-216.

作者简介:

朱国明(1994--),男,汉族,甘肃省陇西县人,本科,工程师,研究方向:水利工程设计。