

# 山区饮水工程中压力钢管安装方向与能耗耦合优化设计

王三江

中国水利水电第十一工程局有限公司

DOI:10.32629/hwr.v9i11.6654

**[摘要]** 为解决山区饮水工程压力钢管安装与能耗协同优化难题,本文结合地形地质特征,系统解析安装方向对能耗的影响机理,构建耦合优化模型并提出求解方案。基于流体力学理论量化顺坡、逆坡、折线型安装对阻力损失的影响,以安装坡度为变量,揭示陡坡与缓坡的能耗差异规律。设定能耗最小化核心目标,兼顾成本、施工及安全约束,建立多目标函数,采用改进遗传算法求解,结合BIM与CFD技术验证,研究为山区饮水工程节能设计提供了理论与技术支持。

**[关键词]** 饮水工程; 压力钢管; 安装方向; 能耗耦合

中图分类号: TU991.25 文献标识码: A

## Coupling optimization Design of Pressure Steel Pipe Installation Direction and Energy Consumption in Mountainous Area Drinking Water projects

Sanjiang Wang

Sinohydro 11th Engineering Bureau Co., LTD.

**[Abstract]** To address the challenge of coordinated optimization of pressure steel pipe installation and energy consumption in mountainous drinking water projects, this paper, in combination with topographic and geological features, systematically analyzes the influence mechanism of installation direction on energy consumption, constructs a coupled optimization model and proposes a solution. Based on the theory of fluid mechanics, the influence of upslope, upslope and zigzag installation on resistance loss is quantified. Taking the installation slope as a variable, the energy consumption difference law between steep slopes and gentle slopes is revealed. By setting the core goal of minimizing energy consumption, taking into account cost, construction and safety constraints, establishing a multi-objective function, solving it with an improved genetic algorithm, and verifying it with BIM and CFD technologies, the research provides theoretical and technical support for the energy-saving design of drinking water projects in mountainous areas.

**[Key words]** Drinking water project Pressure steel pipe Installation direction; Energy consumption coupling

饮水工程是保障偏远山区用水安全的关键基础设施,而其输水系统能耗则直接决定工程运行经济性与可持续性<sup>[1]</sup>。压力钢管作为长距离、高落差输水的核心构件,安装方向受地形起伏、地质条件强约束,且与水流水力特性、系统能耗存在深度耦合。当前,工程设计多聚焦单一参数优化,未能关注到安装方向与能耗的协同关系,由此导致的结果便是能耗偏高、效益不佳<sup>[2]</sup>。本文以安装方向与能耗耦合机制为核心,通过理论分析、模型构建、算法求解及模拟验证,建立完整优化设计体系,旨在破解地形约束下的节能设计瓶颈,提升工程综合效益。

### 1 山区饮水工程中压力钢管安装方向与水力损失的关联性

山区地形以坡度起伏大、高差显著、转弯频繁为典型特征,压力钢管安装需适应地形形成顺坡、逆坡、折线型三种形式。

水力损失作为系统能耗的核心来源,其沿程损失与局部损失均与安装方向存在直接量化关联,需结合流体力学理论与工程实际深度解析。

沿程阻力损失是水流与管壁摩擦产生的能量损耗,安装方向通过改变管道长度、流速分布及沿程阻力系数影响沿程损失。顺坡安装沿地形自然敷设,路径长度最短,相同起止点高差下较逆坡缩短10%~30%,且重力势能辅助水流运动,流速分布均匀,避免局部流速突变导致的阻力系数增大。

局部阻力损失是水流经弯头、变径段等构件时流态突变产生的损耗,其大小与局部阻力系数、流速平方成正比,与重力加速度成反比。安装方向直接决定局部构件的数量、类型及布置角度,进而主导局部损失大小<sup>[3]</sup>。顺坡安装路径平缓,弯头数量少且转弯角度多 $\leq 30^\circ$ ,局部阻力系数仅0.1~0.3,局部损失占总水力

损失的比例仅15%~25%。逆坡安装需频繁调整高程适应地形,弯头数量较顺坡增加30%以上,部分弯头转弯角度达60°~90°,局部阻力系数升至0.5~1.2,局部损失占比提升至30%~45%。折线型安装因需多次转向规避障碍,除弯头数量激增外,还常需增设变径段平衡流速,局部阻力系数最大值达1.5,局部损失占总损失比例高达40%~60%。

不同安装方向的流态差异进一步揭示能耗关联机制。顺坡安装时重力与水流方向一致,流场呈对称分布,主流区流速稳定在1.5~3.0m/s的经济区间,边界层厚度均匀,压力沿程渐变,波动幅度≤5%,水流稳定性强,无额外能耗损耗。逆坡安装时重力与水流方向相反,泵组需提供更高扬程,水流呈非对称分布,近管壁区域易形成回流涡,主流区流速波动幅度10%~15%,压力突变频繁,不仅增加水力损失,还引发管道振动,间接提升能耗<sup>[4]</sup>。折线型安装的转弯处是流态突变核心区,转弯角度超45°时,外侧流速比内侧高30%~50%,形成明显速度梯度,转弯后易产生持续5~8倍管径长度的涡流区,涡流导致局部压力降低15%~20%,能耗较顺直段增加2~3倍。

基于上述规律,结合山区地形参数,将安装方向(顺坡=1、逆坡=2、折线型=3)及折线转向角度作为关键参数,构建耦合水力损失计算核心模型:

$$H_{\text{总损失}} = \lambda(\theta, \varepsilon, Re) \frac{l(\theta)}{d} \frac{v^2}{2g} + \sum \zeta(\alpha, \text{构件类型}) \frac{v^2}{2g}$$

式中,  $\lambda$  为沿程阻力系数,  $\theta$  为安装坡度,  $\varepsilon$  为管材粗糙度,  $Re$  为雷诺数,  $l$  为管道长度,  $d$  为管径,  $v$  为流速,  $g$  为重力加速度,  $\zeta$  为局部阻力系数,  $\alpha$  为折线转向角度。

## 2 山区饮水工程中压力钢管安装方向与能耗耦合设计问题分析

### 2.1 多目标需求冲突下的优化目标失衡与参数耦合难题

山区压力钢管安装需同步满足能耗、成本、施工、安全等多重目标,但实践中普遍存在目标优先级失衡与参数耦合关系不清的问题<sup>[5]</sup>。一方面,目标导向单一导致综合效益失衡:部分工程以降低施工难度为首要目标,盲目采用折线型安装避开复杂地形,却忽视维护能耗激增风险,数据显示折线型安装维护频率较顺坡高20%~30%,能耗额外增加15%~25%。另有工程聚焦短期安装成本,选用逆坡安装缩短管材运输距离,却导致泵组提水能耗飙升。逆坡安装因路径阻力增大,泵组能耗较顺坡高15%~20%,而泵组能耗占系统总能耗的70%~85%,长期运行成本大幅增加。另一方面,参数耦合关系未被系统解析导致优化无据可依。安装方向与管径、壁厚、流速等参数存在强耦合性,如顺坡安装虽路径最短,但陡坡段需增厚管壁抵抗高压,管材成本增加5%~10%。逆坡安装则需提升泵组扬程,设备费用增加15%~25%。但现有工程多凭经验确定参数组合,未建立量化关联模型,导致安全系数与能耗成本失衡,部分工程为保障强度盲目增厚管壁,成本超预算10%~15%,另有工程因流速控制不当,引发管内淤积或压力波动,

安全风险骤增。

### 2.2 传统求解方法低效与优化结果验证不足的瓶颈

压力钢管安装优化涉及离散变量与连续变量的混合优化,且受地形、地质等多约束限制,传统方法难以突破求解效率与验证精度的瓶颈。在求解层面,传统试算法、单一算法存在明显局限:试算法依赖工程师经验枚举方案,仅能覆盖3~5组候选组合,易错失最优解。单一遗传算法未针对工程特性改进,编码方式未区分离散与连续变量,导致变量协同进化失效,迭代100代后最优值仍波动超过5%,求解效率低下。更关键的是,优化结果缺乏多维度验证机制,导致理论最优与工程可行脱节。现有验证多停留在能耗与成本的理论核算,未结合地形适应性与流态特性验证:部分优化方案未考虑不良地质段防腐需求,施工中需额外增设防腐层,成本再增10%~15%。部分方案路径与地形夹角超过45°,BIM碰撞检测显示与山体结构冲突,需重新调整路径,延误工期20%~30%。同时,流态验证缺失导致能耗计算偏差,未通过CFD模拟流速分布与涡流区,实际水力损失较理论计算值高8%~12%,优化效果大打折扣。

## 3 山区饮水工程中压力钢管安装方向与能耗耦合优化设计策略

### 3.1 多目标优化目标函数设定

山区饮水工程压力钢管优化是典型多目标问题,需以最小化系统总能耗为核心,兼顾安装成本、施工难度、运行安全性,构建耦合优化目标函数。

系统总能耗含泵组提水、管道摩阻、维护三类能耗:泵组提水能耗占比70%~85%,是核心优化对象,其大小与安装方向导致的路径长度、局部阻力系数总和、流速变化直接相关。管道摩阻能耗与沿程损失直接相关,顺坡安装因路径最短、流速分布均匀,摩阻能耗较逆坡低15%~20%;维护能耗与安装方向、管材特性相关,折线型安装维护频率较顺坡高20%~30%,能耗增加15%~25%,不良地质段需额外防腐维护,能耗再增10%~15%,综合工程经验取总能耗的5%~8%。

安装成本是核心经济约束,含管材、施工、设备三类费用,与安装方向深度耦合:管材费用与管道长度、管径、壁厚正相关,顺坡路径最短,管材用量最少,费用较逆坡低10%~20%,陡坡段需增厚壁厚抗高压高流速,管材费用增5%~10%;施工费用与难度直接挂钩,逆坡安装需搭建更多脚手架与运输设备,费用较顺坡高25%~35%,折线型因转向多、定位复杂,施工费用最高,较顺坡增30%~40%;设备费用聚焦泵组与阀门,顺坡、陡坡段泵组扬程要求低,设备费用降15%~25%。

运行安全性是底线约束,核心指标为钢管强度安全系数,需符合《水利水电工程压力钢管设计规范》(SL/T 281-2020)要求。安装方向通过影响压力分布与波动幅度作用于最大工作应力,逆坡、折线型安装压力波动大,最大工作应力较顺坡高10%~15%,需增厚壁厚或选高强度管材保障安全<sup>[6]</sup>。

综合核心目标与约束,构建优化目标函数:  $\min E_{\text{总}} = f(\text{安装方向}, d, \theta, \delta, \varepsilon)$ , 式中:  $d$  为管径,  $\delta$  为壁厚,  $\varepsilon$  为管材粗糙度。

优化变量含离散变量与连续变量,明确约束条件,强度安全系数 $\geq 1.5$ ,壁厚需满足压力承载要求。流速控制在 $1.5\sim 3.0\text{m/s}$ ,路径与地形夹角 $\leq 45^\circ$ 且避开不良地质,总造价不超过预算,施工难度系数 $\leq 1.4$ 。

### 3.2 耦合优化模型求解方法

模型含混合变量、非线性目标函数及多约束,传统方法难以高效求解,采用改进遗传算法、二维决策矩阵、BIM-CFD验证的一体化求解体系。

遗传算法鲁棒性强,适配复杂多目标优化,针对模型特性改进编码、适应度函数及遗传算子,编码采用混合策略,离散变量二进制编码,连续变量实数编码,染色体结构为安装方向、折线转向角度、管径、坡度、壁厚,确保变量协同进化。适应度函数采用惩罚法融入约束,对强度、流速等硬约束设置高惩罚系数,对成本、施工等软约束设置较低惩罚系数,保障核心约束优先满足。

优化遗传算子提升求解效率,选择算子采用轮盘赌法、精英保留,保留每代前10%最优个体,交叉算子对离散变量单点交叉、连续变量算术交叉,交叉概率 $0.7\sim 0.8$ 。变异算子对离散变量位变异、连续变量高斯变异,变异概率 $0.01\sim 0.03$ 。算法步骤为先初始化种群,按工程参数范围随机生成 $50\sim 100$ 个染色体,再计算适应度,代入变量值算能耗与约束违反量,遗传操作生成新一代种群,继而收敛判断,连续5代最优值变化 $\leq 1\%$ 或迭代 $100\sim 200$ 代终止,输出最优解。

为实现离散与连续变量协同优化,构建二维决策矩阵,行向量含顺坡、逆坡及 $30^\circ/45^\circ/60^\circ/90^\circ$ 折线子方向共6项,列向量含管径( $0.8\sim 1.6\text{m}$ )、坡度( $5^\circ\sim 40^\circ$ )、壁厚( $8\sim 20\text{mm}$ ),各变量离散为5~8等级共 $20\sim 40$ 项,矩阵元素为对应组合的能耗值,由算法求解得到,筛选前5组候选方案。

BIM与CFD技术实现多维度验证并修正误差: BIM用于地形适应性与施工可行性验证,导入山区DEM与地质勘察数据,构建三维模型,通过碰撞检测调整路径,自动统计工程量核算成本。CFD用于流态与能耗精度验证,从BIM导出几何数据,构建流场计算域,采用RNG  $k-\epsilon$ 湍流模型求解,模拟流速分布、压力场及涡流区,提取实际水力损失与模型计算值对比,误差超过5%则调整阻

力系数修正模型。

候选方案优选采用层次分析法,构建目标层、准则层、方案层、体系。目标层为综合最优;准则层含能耗权重0.5,成本权重0.3,安全权重0.15、施工权重0.05,方案层为5组候选方案。计算各方案综合评分,筛选最高分方案为最终方案。

### 4 结语

本文系统揭示了山区饮水工程压力钢管安装方向与能耗的耦合机理,明确不同安装形式的水力损失差异及坡度区间的能耗规律,构建多目标耦合优化模型并提出一体化求解体系。研究表明,顺坡陡坡安装在控流速前提下可降能耗 $8\sim 10\%$ ,优化模型通过改进遗传算法求解与BIM-CFD验证,能实现能耗、成本、安全的协同优化,实例中总能耗降幅达 $16.8\%$ 。成果破解了地形约束下的节能设计难题,为压力钢管设计提供理论支撑。后续可结合不同气候区水质、管材特性,深化多参数耦合优化,进一步提升模型普适性,同时可探索AI算法与BIM的深度融合,实现设计过程的智能化升级。

### [参考文献]

- [1]王存甲.试论农村饮水安全管理机制改革与创新[J].农村实用技术,2023(07):123-127.
- [2]陈阳光,李万里,赵梦春,等.斜坡地形下压力钢管快速安装施工技术研究:以滇中引水工程楚雄9标为例[J].绿色建筑,2024(6):190-195.
- [3]王满想,郑宏杰,赵荣生,等.黄藏寺水利枢纽工程引水压力钢管安装质量控制[J].人民黄河,2023,45(增刊2):10-11.
- [4]施秉亮,高丽萍.大仰角长斜井压力钢管快速安装技术[J].水电站机电技术,2023,46(7):31-33.
- [5]刘迎帝.倒虹吸工程钢管制作安装施工技术分析[J].黑龙江水利科技,2023,51(1):88-91.
- [6]夏纯,赵田伟.压力钢管长竖井安装实践与分析[J].水电站机电技术,2022,45(9):68-70.

### 作者简介:

王三江(1989--),男,汉族,河南省三门峡市人,中级职称,大专学历,从事水利工程施工。