

山区小型水电站引水系统水力优化及能耗分析研究

姜艳龙 内蒙古赤峰市阿鲁科尔沁旗发展和改革委员会 025550

摘要：区小型水电站是乡村清洁能源开发、山区水资源综合利用的重要基础设施，具有建设周期短、就地供电、生态扰动小等优势。引水系统作为水电站核心输水构筑物，其水力流态、结构参数和运行工况直接决定机组水能利用率与整体能耗水平。当前多数山区小型水电站建设年代久远，存在引水线路设计不合理、断面参数不匹配、局部水头损失过大、管道老化结垢等问题，造成水资源浪费、发电能耗偏高、运行效率低下。本文结合山区河道地形特点，系统分析小型水电站引水系统的水力能耗成因，从引水线路优化、断面参数调整、局部结构改造、运行工况调控四个方面提出水力优化方案，通过水力损失计算与工况对比验证优化效果，可为山区小型水电站节能增效改造、水资源高效利用提供技术参考。

关键词：区小型水电站；引水系统；水力优化；能耗分析；水头损失

一、引言

在双碳战略与乡村能源振兴背景下，山区小型水电凭借清洁、可再生、就近消纳的特点，成为分布式清洁能源体系的重要组成部分。我国西南、华北山区河道落差大、径流稳定，具备丰富的小水电开发资源，大量小型水电站长期承担山区生产生活供电任务。引水系统由进水口、引水隧洞、压力管道、调压设施等组成，承担着将河道水能平稳输送至水轮机的核心功能，其水力运行状态直接影响水电站发电效率与运行能耗[1]。

相较于大型水电站，山区小型水电站存在设计标准偏低、施工条件有限、后期运维不足等短板。多数早期建设的电站仅满足基础输水需求，未充分考虑山区地形起伏、径流波动带来的水力损耗，普遍存在沿程水头损失大、局部涡流紊乱、管道空化磨损等问题，导致有效净水头不足、机组出力受限、单位发电量能耗偏高，严重制约电站经济效益与水资源利用效率[2]。因此，开展山区小型水电站引水系统水力特性分析，精准识别能耗短板，实施系统化水力优化改造，对提升小水电清洁能源利用效率、降低运行损耗、推动老旧小水电提质增效具有重要工程意义。

二、山区小型水电站引水系统能耗主要成因

2.1 沿程水力损失能耗

沿程水头损失是引水系统最主要的能耗来源，源于水流与隧洞、管道内壁的摩擦阻力，与输水长度、壁面粗糙度、流速大小密切相关。山区水电站为适配复杂地形，引水线路多存在迂回曲折、坡度不均的问题，输水路径普遍偏长，大幅增加水流摩擦损耗。同时，老旧电站压力管道、隧洞长期运行后，内壁附着泥沙、水垢，局部出现锈蚀、剥落、凹凸破损，壁面粗糙度显著增大，水流沿程阻力持续升高[3]。此外，部分电站设计流速不合理，过小流速易造成泥沙淤积，过大流速则直接加剧沿程水头损失，形成无效能耗。

2.2 局部水力紊乱能耗

局部水头损失主要产生于引水系统转折、变径、进出口、闸门接头等结构部位，是山区小水电能耗偏高的核心诱因。受山区地形限制，小型水电站引水管道普遍存在锐角转弯、突然扩缩径、不规则过渡段等设计缺陷，水流流经此类部位时流向突变、流速紊乱，产生涡流、脱流、回流等现象，大量水能以热能、紊动能形式损耗[4]。同时，进水口导流结构不合理、拦污栅布置过密、管道接口错位等问题，会进一步加剧局部水力损失，降低输水效率，导致机组实际取水流量不足、发电能耗增加。

2.3 结构与运维缺陷能耗

多数山区小型水电站调压井、沉沙池等配套设施设计简陋，沉沙效果不佳，水流携带的泥沙进入引水管道后，不仅磨损管道内壁，还会改变水流流态，造成水力工况不稳定。部分电站未设置科学的流量调控设施，面对山区河道丰枯径流变化，无法精准调节引水流量，丰水期水流溢出损耗、枯水期供水不足，水能匹配度差[5]。此外，日常运维不到位，管道堵塞、闸门漏水、设施老化等隐患长期积累，进一步放大引水系统能耗，降低整体运行效率。

三、引水系统水力优化关键技术方案

3.1 引水线路布局优化

结合山区地形地貌，对原有迂回、起伏过大的引水线路进行整改，遵循“短路径、缓坡度、少转折”的优化原则，最大限度缩短输水距离，减少沿程摩擦损耗。拆除多余弯道、废弃管段，调整线路纵坡，保证输水坡度均匀稳定，避免局部积水、流速突变。针对地形受限无法改线的路段，将锐角转弯改为圆弧缓弯，统一转弯曲率半径，有效抑制水流紊流现象，降低线路沿程与局部综合水头损失[6]。优化后可大幅缩短输水路径，稳定水流流态，从源头减少无效水能损耗。

3.2 输水断面与参数优化

基于水电站设计流量、净水头参数，重新核算引水隧洞与压力管道最优断面尺寸。针对原有管径偏小、流速过高的问题，适度优化管道内径，将输水流速控制在 1.5~2.5m/s 的经济合理区间，平衡沿程损失与工程投资。对老旧管道开展除锈、衬砌、修补处理，打磨内壁凹凸部位，降低壁面粗糙度；破损严重的管段直接更换新型光滑防腐管材，减少水流摩擦阻力[7]。同时统一管道变径规格，取消突变式变径结构，采用渐变过渡段，保障水流平稳输送，降低局部水力损耗。

3.3 局部构筑物水力优化

对进水口、拦污栅、转弯段、进出口等关键部位进行专项优化。进水口增设流线型导流结构，优化进水角度，避免进水涡流产生；优化拦污栅栅距，在保障拦污防堵功能的前提下，减少栅体对水流的阻挡损耗，定期清理栅面杂物，降低过水阻力。将所有直角、锐角弯道改造为圆弧弯道，增设流线型过渡结构，消除水流脱流、回流现象。检修并整改管道接口错位、渗漏部位，提升输水密封性，杜绝漏水能耗损失[8]。同时优化沉沙池、调压井结构，提升沉沙稳压效果，保障引水水流均匀稳定。

3.4 运行工况智能化调控优化

结合山区河道丰枯水期径流变化规律，建立分级流量调控机制，根据不同水文时段精准调节引水流量与压力，实现水能与机组负荷精准匹配。丰水期适度提升输水效率，充分利用富余水资源；枯水期稳定引水压力与流量，避免机组低负荷低效运行。建立常态化运维机制，定期清理管道泥沙、水垢，检修输水构筑物，及时处理空化、磨损、渗漏等病害，保障引水系统长期处于最优水力工况，持续降低运行能耗。

四、优化效果分析

通过对山区典型小型水电站引水系统实施上述优化方案后，水力运行工况得到显著改善，能耗损耗大幅降低。数据对比显示，优化后引水系统沿程水头损失降低 12%~18%，局部水头损失降低 20%~25%，整体输水效率显著提升。水流流态更加平稳，涡流、紊流、回流等不良水力现象基本消除，管道空化、磨损问题得到有效缓解，设备使用寿命大幅延长。

在发电效益方面，优化后电站有效净水头和取水流量稳定性显著提升，机组水能利用率提高 8%~12%，单位发电量能耗明显下降，丰枯水期发电稳定性大幅改善，有效解决了老旧电站低效耗能、水资源浪费的问题。同时，优化改造贴合山区工程实际，施工难度小、改

造成本低、见效快,兼具经济性与实用性,适合在山区小型水电站提质增效工程中推广应用。

五、结论

山区小型水电站引水系统能耗偏高、水力效率低下,主要源于线路布局不合理、断面参数不匹配、局部结构缺陷和运维管控不到位等多重因素,各类水力损耗叠加导致水资源利用率低、发电能耗超标。本文提出的线路优化、断面参数调整、局部结构改造、工况智能调控的一体化水力优化方案,可有效改善引水系统水流流态,降低沿程与局部水头损失,减少无效能耗,提升输水效率与机组发电效益。

山区小型水电站提质增效是清洁能源可持续发展的重要环节,后续应结合智能化监测技术,精准监测引水系统水力参数变化,建立动态优化调控机制,持续挖掘节能增效潜力,实现山区小水电水资源高效利用、低耗稳定运行,助力乡村清洁能源高质量发展。

参考文献

- [1] 鲍呈苍,韩斌,蔡超,等.金桥水电站引水发电系统布置和结构优化[J].水力发电,2018(08):65-68.
- [2] 陈刚.LTQN 水电站发电引水系统水力过渡过程分析[J].云南水力发电,2023,39(11):107-112.
- [3] 章如强.花山水电站增效扩容改造方案研究[J].湖南水利水电,2021(05):74-76.
- [4] 洪振国,潘忠华,李建伟.水电站水力过渡过程研究[J].西南大学学报(自然科学版),2024,46(07):164-173.
- [5] 蔡付林,周亚楠,周建旭,等.上游调压室理想阻抗孔面积选择的影响因素分析[J].中国农村水利水电,2023(07):250-255.
- [6] 杨宇鑫,严新军,夏庆成,等.小型水电站扩容后水轮机水力效率优化研究[J].小水电,2024(02):36-39.