

白云峡水电站增效扩容水能复核及技改方案研究

谭剑波^{1,2}, 何自立², 王立青²

(1. 杨凌职业技术学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: 为准确掌握白云峡水电站增效扩容潜力, 确保技改方案具有较高安全性和节能经济性, 采用参证站径流资料分析与发电量反算引用流量相互验证的设计思路, 对电站扩容潜力进行了水能复核。考虑“引红济石”调水流量和小水电技改技术要求, 合理确定了与工程实际相匹配的最佳装机容量、方案和机组型号。研究表明: 通过鹦鸽水文站径流资料及电站多年运行发电量统计数据的核算与反算, 可获得反映电站水能指标的准确数据。进行机型优化比选与合理技术改造, 可确保机组长期运行在高效工况区, 增加出力 and 防止空蚀, 在增效扩容的同时实现了节能降耗。

关键词: 农村小水电; 水能复核; 发电量; 年利用小时数; 装机容量; 机组选型

中图分类号: TV734

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2018)03-0164-05

Hydropower-checking and technical transformation scheme for efficiency-improving and capacity-expanding engineering of Baiyunxia Hydropower Station

TAN Jianbo^{1,2}, HE Zili², WANG Liqing²

(1. Yangling Vocational and Technical College, Yangling 712100, China; 2. College of Water Resources and Architecture Engineering, Northwest A & F University, Yangling 712100, China)

Abstract: In order to accurately master the efficiency-improving and capacity-expanding potential of Baiyunxia hydropower station, and ensure that the technical transformation scheme has high safety, reliability, and economics of energy saving, based on the design ideas of mutual verification between analyzing the runoff data of reference station and back-calculation of the power generation, the hydropower-checking of the power station for mining the potential expansion has been done. The optimal installed capacity, scheme and turbine type of Baiyunxia hydropower station have been confirmed after considering the water flow of "Hongyanhe-to-Shitouhe Water Transfer Project" and reformed technical requirement of small hydropower. The research results show that through the calculation and back-calculation of Yingge station runoff data in Shanchahe and statistical data of years of running power generation, the accurate data of water energy index which can reflect the operation characteristic of power station has been obtained. And the optimizing selection and reasonable technological reform of the hydro-turbine can ensure the generator unit long-term operating in high efficiency operating area. After feasible technical reform the design objective of increasing the output and preventing the cavitations has been achieved, the power station can realize the aims of energy conservation and consumption reduction at the same time of efficiency-improving and capacity-expanding.

Key words: rural small hydropower station; hydropower-checking; power generation; annual utilization hours; installed capacity; turbine generator type selection

收稿日期: 2018-01-04; 修回日期: 2018-01-22

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2012BAD10B02); 陕西省水利科技项目(SLKJ-2013-14)

作者简介: 谭剑波(1983-), 男, 四川江安人, 硕士, 讲师, 研究方向为水力机械调节建模仿真、农村小水电节能改造分析。

通讯作者: 何自立(1977-), 男, 陕西宝鸡人, 博士, 副教授, 研究方向为水力机械流动理论、新能源开发及应用。

1 研究背景

小水电是廉价而清洁的可再生能源,是帮助农村新兴经济体应对快速增长电力需求的重要能源载体。截止2016年底全国已建成农村中小型水电站 4.7×10^4 余座,总装机 $7\,791 \times 10^4$ kW,年发电量达 $2\,682 \times 10^8$ kW·h^[1]。分布在水资源丰富的山区小水电,对振兴地方经济,实现农村电气化和现代化,促进山区脱贫致富发挥了至关重要作用^[2]。然而,受当时建设规划理念、设计标准、施工技术、设备制造水平和运维管理意识等因素制约,加上缺乏合理养护,1995年乃至2000年以前建成的大部分小水电现已处于技术水平落后、设备老化严重、效率低下、综合利用功能逐年衰退和安全监控体系缺乏的状态,导致大量水能资源浪费,且存在较大安全隐患,直接影响到电站运行的经济效益和安全稳定性^[3]。

为提高水能资源利用效率,促进能源结构调整,改善河流生态,加速农村现代化发展和新农村建设,中央财政从可再生能源专项资金中安排资金对全国农村小水电进行增效扩容改造^[4],以促进农村小水电行业的转型升级,充分发挥其综合效益。邓欢等^[5]结合《小型水电站水文计算规范》(SL77-2013)探讨了农村小水电增效扩容改造中水文径流和水能复核计算的3种方法。叶永等^[6]对一库多级式电站增效扩容改造的关键技术进行了研究,在此案例中,以两级电站发电量最大作为水能复核和调节计算的技改原则。张梦如等^[7]采用模糊综合评价法对增效扩容拟定方案进行综合评价,确定了板桥水库坝后电站增效扩容最优方案。小水电增效扩容改造在对数学模型优化算法和评价体系进行研究基础上,大量学者及设计人员针对技改方案及实施过程中的关键技术展开了实践应用分析,包括:水能复核及发电量反算相互验证确定扩容潜力^[8]、二阶求导合理确定装机容量^[9-10]、机型优选^[11-12]、调节保证计算^[13]及经济效益评价^[14-16]等,指出了农村小水电增效扩容技改关键点和设计优化思路。

目前,白云峡水电站存在水能利用率低、发电效益差、效能衰减快、安全隐患多等问题,亟待基于全面水能复核计算基础上进行技术升级改造。

2 工程概况及增效扩容改造必要性分析

2.1 工程概况

白云峡水电站位于太白县鹦鸽镇的石头河鹦鸽

盆地的峡口处,属石头河中上游梯级开发的1座低坝引水式水电站,装机容量1 800 kW(2×500 kW + 2×400 kW)。引用水源预期由两部分组成,其一是原石头河流量,其二是“引红济石”调水量。引水枢纽设在石头河中上游的白云峡河与加川河交汇口以上1 km处,由浆砌石重力溢流坝、冲沙闸和进水闸组成,经1 727 m隧洞(1[#]隧洞552.24 m,2[#]隧洞1 174.76 m)输水至压力前池。引水枢纽上游河长37 km,控制流域面积244 km²。电站设计水头52 m,设计引用流量4.86 m³/s,年利用小时数5 300 h,多年平均发电量 936×10^4 kW·h。工程以发电为主,并担负下游马耳山水电站引水调节任务。

2.2 增效扩容改造必要性分析

白云峡水电站并网发电近20年,引水隧洞、压力前池、压力管道、尾水流道和电站厂房等水工建筑物结构运行性能良好。但电站机组、电气设备和辅助设备,从选型就存在一定的技术问题,加上多年在非额定工况运行且没有得到合理养护,致使机组效率逐年降低,能耗逐年增加,安全隐患日益凸显。近10年来电站实际年均发电量为 626×10^4 kW·h,较设计年均发电量 936×10^4 kW·h减少了33.12%。另外,电站现有的监控设备及系统,已不能满足水电厂“无人值班、少人值守”的现代信息自动化集控管理需求。因此,为提高电站水能综合利用效率及综合信息自动化管理水平,确保电站效益的高效稳定发挥,对其增效扩容技术升级改造亟待进行。

白云峡水电站增效扩容技术升级改造的设计思路是在《农村水电增效扩容改造有关要求》(2015年版)的基础上,立足于电站工程特性及实际运行情况,首先进行详细的水能复核计算以挖掘电站发电潜力,通过适当扩大电站容量增加发电效益;同时优选新型高效水轮发电机组,提高水能转换效率。其次在设备选型及监控自动化设计中,优选技术先进可靠,节能环保型电气设备、辅机设备及微机监控系统,降低电站运行能耗,提高电站的自动化水平和安全可靠性能。

3 增效扩容改造设计关键技术

白云峡水电站增效扩容改造设计受原输水系统、厂房结构、预埋件、机组安装高程、尾水渠高程(吸出高)等参数的制约,在满足增效扩容改造基本原则、要求和相关规范指标的条件下,重点考虑水能复核确定扩容幅度、机型选型和适应性分析等关键技术^[15],确保机组更新改造后具备良好的匹配性、

适应性和运行经济性。

3.1 水能复核及扩容幅度确定

3.1.1 水力发电要素关联性函数 在中小河流水力资源开发利用中,径流计算在水力效益综合利用和水工建筑物布置与结构优化方面,占有决定性地位。对于增效扩容小水电而言,即可按照《小型水电站水文计算规范》(SL77-2013)中推荐的频率分析法、水文比拟法或区域综合分析法进行径流计算^[5,17],也可根据电站多年发电量反推引用流量。小水电水能复核计算中,其关联性函数指标主要涉及到电站出力、年利用小时数和多年平均发电量,可由以下函数表达。

(1) 电站出力:在某一运行工况条件下电站发出的电能功率

$$N = 9.81 \eta_{\text{机}} \eta_{\text{电}} QH = 9.81 \eta QH = A QH \quad (1)$$

式中: η 为水轮发电机组总效率; A 为电站综合出力系数^[7]。

(2) 电站多年平均发电量:电站出力与发电时间两者的乘积

$$E_i = \sum_{i=1}^n (\bar{N}_i \Delta t_i) \quad (2)$$

式中: $\bar{N}_i$ 为第 i 时段的平均出力, kW; Δt_i 为第 i 时段的历时, h。

(3) 装机年利用小时数:根据时段的累积发电量与平均出力计算

$$T = E_i / \bar{N}_i \quad (3)$$

式中: E_i 为 i 时段流量对应的累积发电量, kW · h; $\bar{N}_i$ 为 i 时段流量对应的平均出力, kW。

为提高计算精度,确保水能复核成果与工程特性具有良好匹配性,设计采用电站同期发电量统计数据 and 年利用小时数,利用公式(1)~(3)反算获得发电引用流量,其函数表达为:

$$Q_i = \frac{\bar{N}_i}{A \cdot H} = \frac{E_i}{T \cdot A \cdot H} \quad (4)$$

3.1.2 水文分析及水能复核 鸚鵡水文站设立于 1974 年,在石头河水库坝址以上 13 km 处,控制流域面积 507 km²。测验项目有:水位、流量、泥沙、降水、蒸发,测验的水文要素均被整编刊布。径流资料来自水文年鉴,且为 1974 年之后的观测资料,资料连续完整,质量较好,可信度高。流域的气候条件相似,下垫面条件稳定,并无较大引用水工程,对流域年径流影响较小,年径流资料一致性好。

白云峡水电站选用鸚鵡站 1974-2014 年共 41 年径流资料进行水能复核,鸚鵡站年径流量过程线与趋势线如图 1 所示。

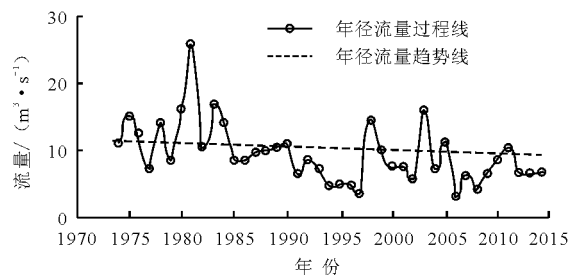


图 1 鸚鵡站年径流量过程线与趋势线

由图 1 可以看出,在 41 年径流资料系列中,丰水年年份有 1980、1981、2003 年;平水年年份有 1988、1999 年等;枯水年年份有 1997、2006 年。径流系列在 1974-1978 年间曲线变化趋势较为平缓,1979-1985 年间呈上升趋势,1986-2014 年间呈下降趋势,可见所选年径流量系列中包含了丰平枯各种量级的流量,年径流系列具有一定的代表性。鸚鵡站所选资料多年平均流量为 9.7 m³/s,多年平均径流总量为 306 × 10⁶ m³。采用水文比拟法并考虑面积修正计算得白云峡水电站不同频率年径流量成果,如表 1 所示。

表 1 白云峡水电站不同频率年径流量

年径流量	均值	C_v	C_s/C_v	频率/%				
				10	20	50	80	90
多年平均流量/(m ³ · s ⁻¹)	4.67	0.42	2.5	7.32	6.16	4.33	3.03	2.50
多年平均径流总量/10 ⁶ m ³	147	0.42	2.5	231	194	137	95.6	78.9

由表 1 可知,白云峡水电站多年平均流量为 4.67 m³/s,多年平均径流总量为 147 × 10⁶ m³,与电站原设计发电引水流量 4.86 m³/s 和发电引水总量 126 × 10⁶ m³ 相差不大,说明鸚鵡站实测水文系列资料的可靠性、一致性和代表性均较好。

为进一步掌握电站水能特性,根据太白县白云峡水力发电有限公司提供的 2005-2014 年近 10 年同期逐月发电量统计值 E 和机组运行工况记录,按照式公(4)进行引用流量反算,结果表明:①发电运行水头 H 在 50.85~51.35 m 之间,低于 52.00 m 设

计水头,机组长期运行在非高效工况区,效率较低;②机组综合出力系数为7.05~7.8,虽然满足原设计出力系数7.7的要求,但在现代制造水平基础上,水轮发电机组整体效率可以达到83%~88%,综合出力系数可以达到8.1~8.7甚至更高,原机组综合出力较低,更新增效效益可观;③2005~2014年电站年均发电量为 $626 \times 10^4 \text{ kW} \cdot \text{h}$,年利用小时数高达5 185 h。年利用小时数大,电站装机容量明显偏小,长期处于超发状态,不仅水能利用效率低且对电站设备安全运行不利,存在较大扩容潜力;④经引用流量反算,求得同期发电引水流量均小于电站上游来水量,说明发电量反算数据准确可靠。电站在丰水期弃水量高达 $0.8 \text{ m}^3/\text{s}$,存在大量弃水,扩容空间较大。另外,“引红济石”调水工程(“红”指的是秦岭南麓汉江水系褒河支流红岩河,“石”指的是秦岭北麓渭河支流石头河)计划于2018年底竣工投运,最大调水流量 $13.5 \text{ m}^3/\text{s}$ ^[18],有充足的机组扩容水力资源支撑。且原输水渠系在设计时充分考虑了“引红济石”的调水流量,输水能力能够得到有效保障。

3.1.3 装机容量选取 将白云峡水电站引水断面的自产径流的流量-频率关系与“引红济石”引水流量-频率关系进行频率组合,得到白云峡水电站发电流量的日平均流量历时关系。结合电站工程特性,计算来水逐月水能,获得电站装机容量-多年平均发电量和电站装机容量-年利用小时数间的关系曲线,如图2所示。

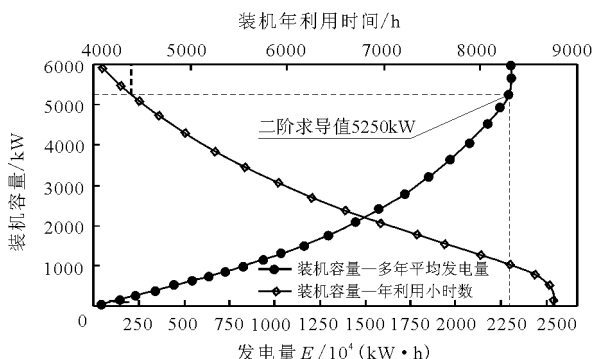


图2 白云峡水电站水能特性曲线

为获得最佳装机方案,必须寻找装机容量与发电量间的最佳组合。采用二阶求导求曲线反曲点(由正比关系变反比的拐点),从图2可知在装机容量为5 250 kW时装机与发电量关系曲线出现拐点,即单从装机容量和发电量来看,5 250 kW是白云峡水电站最优装机。白云峡水电站增效扩容改造考虑

了“引红济石”流量,扩容幅度较大。但《农村水电增效扩容改造有关要求》(2015年版)中明确要求增效扩容改造水工建筑物基本不动,故只能在原4台水轮发电机组机位上进行。根据水能计算结果,经对原设计引水隧洞、压力前池、压力钢管等建筑物过水能力复核,装机容量在2 500~2 800 kW间水能利用率较高。结合水轮发电机组功率序列,确定装机容量为2 760 kW($2 \times 630 \text{ kW} + 2 \times 750 \text{ kW}$),增容960 kW,容量增比52.8%,扩容量大。改造后年发电量由改造前的 $936 \times 10^4 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 增加到 $1 710 \times 10^4 \text{ kW} \cdot \text{h}$,年利用小时数为6 180 h,增效明显。

3.2 机型选择

根据水利部下发的《农村水电增效扩容改造有关要求》等相关文件,增效扩容改造机型选择基本原则为:台数应保持与原台数不变,机型及布置要匹配原厂房结构及机坑建筑物。在水能复核及装机容量确定的基础上,通过对水轮机机型进行比选,优选技术先进、节能环保型水轮发电机组,合理提高机组发电效率和电站水能综合利用率。

3.2.1 额定水头 考虑白云峡电站分组供水的特点及发电机组满发时从进水口到尾水出口间的沿程和局部水头损失,水头波动范围为51.1~52.8 m,设计水头确定为52.0 m,即维持原设计水头不变。

3.2.2 水轮机机型优选 对压力钢管、过流流道、尾水渠等进行复核基础上,确定安装容量为2 760 kW($2 \times 630 \text{ kW} + 2 \times 750 \text{ kW}$),单机容量由400、500 kW增至630、750 kW。经对多个模型转轮进行初步筛选,计算拟定转轮直径分别为50 cm(630 kW机组)和60 cm(750 kW机组),水轮机同步转速为系列转速 $n = 1\ 000 \text{ r/min}$ 。根据额定水头和单机容量,查水轮机型谱,初选水轮机型式为:630 kW机组推荐HLA678-WJ,备选HLA319-WJ;750 kW机组推荐HLA696-WJ,备选HLA253-WJ。通过水轮机出力、单位流量和运行区域等特性参数计算来合理确定转轮优选方案^[19]。

运用水轮机综合运转特性曲线,计算不同流量及水头工况条件下的运转特性数据,并进行对比分析。对于630 kW机组:(1)HLA678水轮机工作范围在高效区,其最高模型效率可达92%~93%,与备选机型HLA319相比,差异甚小。但HLA319其额定工况点超越了95%出力限制线,明显不符合条件;(2)在同样水头且额定出力工况下,HLA678机型工作效率高,且工作范围及运转特性范围均更接近于高效区;(3)抗空蚀性方面,两种机型几乎相

当。对于 750 kW 机组:(1)HLA696 水轮机工作范围在高效区,其最高模型效率可达 92%~93%,性能明显优于 HLA253;(2)在额定出力工况下,HLA696 机型运行区域在运转特性曲线高效区中心,更能适应不同运转工况;(3)抗空蚀性方面,HLA696 优于 HLA253,空蚀系数小。

3.2.3 机型适应性分析

(1)过流能力。电站设计引用流量 $6.47 \text{ m}^3/\text{s}$,经计算当水深取 2.71 m 时,引水隧洞可通过流量为 $7.81 \text{ m}^3/\text{s}$,增效扩容改造后隧洞引水能力满足要求。机组由 400、500 kW 扩容至 630、750 kW 后,由于转轮直径保持不变,则流量会发生增加引起压力管道内流速增大。经验算机组出力满发工况下压力管道内最大流速为 4.12 m/s ,小于 5 m/s ,处于明管经济流速 $4 \sim 6 \text{ m/s}$ 范围内。

(2)安装高程复核。安装高程是水电站的重要参数,其值与站址处的海拔高程、所选用水轮机的空蚀系数、电站装机数量及最小单机容量有关。空蚀是水轮机运行的顽疾,安装高程是否合理,直接关系到水轮机预防空蚀的性能与改建费用。改造电站从水轮机的运行要求考虑,预防和减轻空蚀的发生是必要条件,必须满足。相比而言改建费用是次要条件,可适当考虑。在条件允许情况下,水轮发电机组安装位置越低越有利于防止空蚀。白云峡水电站以 630 kW 机组(最小机组)单机额定出力运行工况下计算出的安装高程为 972.78 m,比原电站机组对应的安装高程 971.76 m 要高,故维持原安装高程进行新机组安装不但有利于防止空蚀发生,又可避免进、出水建筑物的拆建改造,改造方案经济性高。

(3)调节保证计算。机组转动惯量为 $1.39 \text{ t} \cdot \text{m}^2$ (630 kW 机组)和 $1.63 \text{ t} \cdot \text{m}^2$ (750 kW 机组),额定转速为 $1\,000 \text{ r/min}$ 。在额定水头和最大水头下 100% 丢弃负荷,经调保计算并结合《水力发电厂机电设计规范》(DL/T5186-2004)规定的 30% 和 60% 限值指标,为满足安全生产,630 kW 和 750 kW 机组均建议选取关闭时间为 8 s。

4 结 论

增效扩容改造是农村小水电合理利用水能资源、挖掘电站扩容潜力、节能降耗和促进区域经济发展的再创造过程。通过对白云峡水电站技改方案中的扩容潜力复核运算、机型优选和适应性分析,可得如下结论:

(1)基于水力发电关联性函数关系,结合电站

历史发电量反算发电引用流量,可相互验证确保水能复核数据具备较高准确性。

(2)根据水能复核结果及考虑“引红济石”调水流量,白云峡水电站可扩容空间非常大。但限于现状输水管道、厂房建筑物等制约,确定装机容量为 $2\,760 \text{ kW}$ ($2 \times 630 \text{ kW} + 2 \times 750 \text{ kW}$)。电站装机容量从 $1\,800 \text{ kW}$ 扩容到 $2\,760 \text{ kW}$,年发电量从 $936 \times 10^4 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 增加到 $1\,710 \times 10^4 \text{ kW} \cdot \text{h}$,增加了水能资源利用率和运营经济效益。

(3)优选的 HLA678-WJ 和 HLA696-WJ 转轮,具有较高效率,可提高发电运行的增效电量,且能满足电站不同工况条件下高效调节运行需求,匹配性好、适应性强。

(4)水能复核及机组选型是增效扩容计算分析的关键内容,也是工程改造后能否取得预期效益的设计重点。除此之外,在技改方案设计中还需考虑电气设备及辅助设备的优化设计,确保“水-机-电”三者具备良好匹配性能,使小水电发电效益得以充分发挥。

参考文献:

- [1] 中国电力报. 水利部:农村水电总装机达到 7791 万千瓦 [EB/OL]. [2017-07-17]. <http://www.ccec.org.cn/hangyeguangujiao/lvsenengyuan/170937.html>.
- [2] 田娅娟,王鑫,薛鹏,等. 中小型水电站水轮机增效扩容改造研究[J]. 水利水电技术,2014,45(2):40-42.
- [3] 原文林,管晓峰,黄河,等. 陆浑水库水电站机电设备增效扩容改造设计方案探讨[J]. 水电能源科学,2013,31(7):181-183.
- [4] 中华人民共和国财政部、中华人民共和国水利部. 农村水电增效扩容改造财政补助资金管理暂行办法[J]. 中国水能及电气化,2011,79(8):17-18.
- [5] 邓欢,吴亚杨,胡超鹏,等. 小水电站增效扩容的径流和水能计算方法及应用[J]. 水电能源科学,2014,32(5):160-164.
- [6] 叶永,周胜,牟玉池,等. 小型水电站增效扩容改造方案研究[J]. 人民长江,2017,48(7):88-91.
- [7] 张梦如,万芳,杨肖丽. 板桥水库电站增效扩容改造及方案评价[J]. 水资源与水工程学报,2017,28(5):174-179.
- [8] 王平. 以供水为主小水电径流调节方法的改进[J]. 中国农村水利水电,2013(8):146-150.
- [9] 齐锋. 基于联合优化调度计算的水电站改造机组容量确定[J]. 电力系统保护与控制,2015,43(10):149-154.
- [10] 徐刚,邵朋昊. 蚁群算法求解梯级电站短期优化调度改进研究[J]. 水利水电技术,2014,45(2):135-139.

(下转第 174 页)

- [4] 张惠锋. 城镇排水标准与区域除涝标准衔接的研究进展[J]. 净水技术, 2016, 35(3): 123 - 125.
- [5] 陈婕, 叶兴成, 王飞, 等. 城市不同排水除涝标准衔接方法的探讨[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(4): 40 - 44.
- [6] 黄国如, 王欣. 基于城市雨洪模型的市政排水与水利排涝标准衔接研究[J]. 水资源保护, 2017, 33(2): 1 - 5.
- [7] 严婉玲. 市政排水与水利排涝关系探索[J]. 人民珠江, 2017, 38(6): 43 - 48.
- [8] 李卫东, 徐向阳. 不同破坏率下管道排水与河道排涝标准衔接探讨[J]. 中国农村水利水电, 2015(11): 182 - 184.
- [9] 陈斌. 城市排涝与排水研究[J]. 给水排水, 1996(9): 17 - 20 + 2 - 3.
- [10] 范立柱, 刘晓鹏. 广州地区水利排涝标准与市政排水重现期的关系分析[J]. 广东水利水电, 2012(12): 17 - 18 + 25.
- [11] 王峰, 颜正惠, 黄伟乐, 等. 城市雨水内涝成因及对策[J]. 中国给水排水, 2012, 28(12): 15 - 17 + 20.
- [12] 姜容, 邵银霞, 李光焱. 外河对城市排水管网影响的数值模拟研究[J]. 水力发电, 2017, 43(10): 94 - 98.
- [13] 王慧亮, 吴泽宁, 胡彩虹. 基于 GIS 与 SWMM 耦合的城市暴雨洪水淹没分析[J]. 人民黄河, 2017, 39(8): 31 - 35 + 43.
- [14] 张晓波, 盛海峰. 城市市政排水与区域排涝水动力耦合模型研究[J]. 人民长江, 2015, 46(18): 15 - 19 + 47.
- [15] 芮孝芳, 蒋成煜, 陈清锦, 等. SWMM 模型模拟雨洪原理剖析及应用建议[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(4): 1 - 5.
- [16] 穆祥鹏. 复杂输水系统的水力仿真与控制研究[D]. 天津: 天津大学, 2008.
- [17] 梁小光, 王盼, 吕永鹏, 等. 内河水位对管网系统排水能力的影响模拟[J]. 城市道桥与防洪, 2014(11): 11 - 14 + 19.

(上接第 168 页)

- [11] 王世奎, 余波, 黄跃辉, 等. 峰源水电站增效扩容技术改造可行性分析[J]. 中国农村水利水电, 2012(10): 126 - 128.
- [12] 刘怡, 刘林涛. 小型水电站更新改造中的冲击式机组选择[J]. 中国农村水利水电, 2013(1): 144 - 145 + 148.
- [13] 李修树, 高瑜, 董笑波. 浅析水电站调节保证设计[J]. 水力发电, 2014, 40(4): 58 - 60.
- [14] 原文林, 万芳, 马跃先. 农村小型水电站增效扩容改造关键应用技术研究[J]. 中国农村水利水电, 2015(10): 190 - 193.
- [15] 曲鹏飞, 朱未. 三道沟河干流梯级开发形成的脱水段对生态环境的影响[J]. 水资源与水工程学报, 2013, 24(4): 160 - 164 + 169.
- [16] 王勤香, 朱政德. SUE 水电站工程设计方案评价及优化[J]. 水利与建筑工程学报, 2016, 14(5): 132 - 135.
- [17] 杨树正. 石门水电站增效扩容工程效果分析[J]. 中国水利, 2012(08): 53 - 55.
- [18] 赵波. 陕西省引红济石调水工程 1#支洞塌方原因分析及对策[J]. 水资源与水工程学报, 2006, 17(5): 58 - 60.
- [19] 马跃先, 王梁, 原文林, 等. 基于模糊层次分析的水轮机选型研究及应用[J]. 水力发电学报, 2013, 32(02): 261 - 264 + 276.