

中小水电站增效扩容改造的主要问题及解决方案

薛 鹏,王 鑫,田娅娟,陈 锐,彭忠年

(中国水利水电科学研究院北京中水科水电科技开发有限公司,北京 100038)

摘 要:我国早期建设的农村中小型水电站,很多存在着技术水平落后、设备设施老化严重、发电效能逐年降低等问题,不仅造成了水能资源的极大浪费,还存在着很多安全隐患。通过总结中国水科院近 20 a 来完成的水电站增效扩容改造项目,将中小型水电站的改造工作按照具体问题进行了分类研究,分析了不同改造类型中存在的问题并给出相应的解决方案。改造实例表明,通过对水轮机的合理技术改造,可以有效改进水轮机的运行,达到提高效率、增加出力、减少或消除空蚀、减轻泥沙磨损以及提高运行稳定性等目的,具有显著的经济效益和社会效益。

关键词:农村水电;中小型水电站;水轮机;增效扩容改造

中图分类号:TV742

文献标识码:A

Major Problems and Solutions to the Renovation of Rural Hydropower Stations

XUE Peng, WANG Xin, TIAN Ya-juan, CHEN Rui, PENG Zhong-nian

(Beijing IWHR Technology Co., Ltd, Chinese Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: There are many early constructed small and medium-sized rural hydropower stations in our country which are technically backward, whose facilities are aging and whose efficiency is turning lower and lower year after year. Those problems cause not only the great waste of hydropower resources but also security breaches. By summarizing the renovation projects completed by IWHR in recent 20 years, the renovation works are divided into different types based on the particular case. The analysis and the solution for each type of renovation are offered by case studies. It is shown in practice that the appropriate technical renovation of the hydro-turbine can give effective improvements for turbine running, increases the efficiency and the output decreases the cavitation damage and the sediment wearing, and improves operational stability. The renovation of the hydropower stations has remarkable economic and social benefits.

Key words: rural hydropower; small and medium-sized hydropower station; hydro-turbine; capacity expansion and efficiency renovation

农村中小型水电是我国农村经济社会建设发展中的重要基础设施,是山区生态建设和环境保护的重要手段。但由于承担防洪灌溉等公益性任务较多、上网电价偏低以及体制机制不顺等多方面原因,导致我国早期建设的农村中小型水电站普遍存在技术水平不高、设备设施老化、能效逐年衰减等问题^[1]。据统计,全国农村中小型水电站 1995 年前建成或达到报废条件的有 5 700 多座、近 800 万 kW,对这些老旧电站进行有针对性的增效扩容改造,不仅可以提高水能资源的利用效率,促进我国能源结构调整和节能减排,保护山区河流生态环境,还能消除公共安全隐患,同时不需移民并可让当地农民群众受

益^[2-4]。

本文通过总结中国水利水电科学研究院水力机电研究所近 20 a 所完成的装机容量总计超过 150 万 kW 的 100 余座水电站技术改造项目,将中小水电站按现存问题进行分类比较,并以典型技术改造实例予以分析说明。

1 中小型水电站存在的主要问题及解决方案

通过统计分析,国内的农村中小型水电站主要存在丰水期大量弃水、枯水期水量不足、电站实际参数与设计参数偏离、水轮机转轮受空蚀破坏严重、水流含沙量大造成转轮磨损严重等问题。

1.1 电站丰水期大量弃水,水资源浪费严重

由于部分电站无水库或者调节库容有限,当汛期入库流量超过发电机组所能通过的流量上限的时候,多出的流量就不能

收稿日期:2013-09-13

作者简介:薛 鹏(1983-),男,博士研究生,研究方向为水轮机优化设计。E-mail:pc21@iwhr.com。

用于发电,而通过其他通道直接下泄到下游,造成水能资源的较大浪费。

以湖南沙田水电站为例,该电站上游来水量丰富,但电站装机容量不足,水库调节能力不高,致使水库长期处于弃水状态,大量水资源被浪费。该电站还存在水轮机转轮机型参数落后以及由于机组大修造成的叶片变形等原因而进一步导致出力下降和机组振动的问题。

1.1.1 沙田电站的主要技术参数

沙田水电站位于湖南省汝城县境内,水库为周调节水库,引水式电站。电站于 20 世纪 70 年代投产运行,共装机 3 台,总装机容量为 3×1.8 万 kW。其中需要进行改造的 3 号机组水轮机型号原为 HL638-LJ-140,主要技术参数如表 1 所示。

表 1 沙田电站 3 号机组技术参数

Tab. 1 The technical parameters for No. 3 set of

Shatian hydroelectric power station

最高 水头/ m	额定 水头/ m	最低 水头/ m	额定流 量/(m^3 $\cdot \text{s}^{-1}$)	额定转 速/(r $\cdot \text{min}^{-1}$)	额定 出力/ 万 kW	吸出 高度/ m
149.30	137.20	130.00	15.43	600	1.8	-3.30~4.20

1.1.2 沙田电站技术改造目标

根据电站水库多年来水情况、引水系统的过流能力、机组的运行方式以及根据 1 号发电机温升试验结果等条件分析并最终确定 3 号水轮机转轮技改目标如下。

(1)保持机组额定转速不变;

(2)在额定水头 137.2 m 时,水轮机最优工况的机组出力达到 2 万 kW,水轮机最优效率达到 94% 以上;

(3)在额定水头 137.2 m 时,额定工况的机组出力达到 2.2 万 kW,水轮机额定效率达到 91.5% 以上,临界空化系数在 0.06 以下;

(4)在最高水头 149.3 m 时,水轮机的最大飞逸转速低于 1 074 r/min;

(5)技术改造后,机组水力稳定性与转轮抗空蚀破坏性能应满足国家有关标准的要求。

1.1.3 沙田电站技术改造措施

为达到以上技改目标,采取的技术措施如下。

(1)根据具体水力条件、几何控制尺寸与技改目标,完成 3 号水轮机技改新转轮 JF2253-LJ-140 的优化设计;

(2)更换调速轴摇臂,以增大导叶最大开度;

(3)对尾水锥管进口进行局部处理,使之满足新转轮的安装要求;

(4)在尾水锥管靠进口处增加 4 根补气短管。

1.1.4 沙田电站技术改造的效果

沙田水电站 3 号水轮机增效扩容技术改造工程于 1999 年 12 月完成,湖南省电力公司电力试验研究所对技改前后的 3 号水轮机进行了效率及稳定性试验,基本情况如下:

(1)机组最大出力显著增加。在电站毛水头为 148 m(净水头约 136.8 m)时,技改后的 3 号机组最大出力可达 22 500 kW 以上,比 3 号机组原额定出力增加 4 500 kW 以上,比原机组实际最大出力增加 7 000 kW 以上。按沙田电站年平均运行

4 153 h 计算,技改后的 3 号机组每年可增加发电量约 2 900 万 kWh,经济效益十分可观;

(2)技改后 3 号水轮机最优效率较技改前提高 9%;

(3)在主要运行工况区,机组运行稳定性明显改善;

(4)技改转轮运行两年后检查,转轮空蚀轻微,满足技改要求。

沙田水电站 3 号水轮机技术改造后,弃水现象得到了大大缓解,水资源得到充分利用,完满达到了预期目标。

1.2 电站枯水期来水量大幅减小,水轮机运行效率低且稳定性差

部分地区的中小型水电站汛期与枯水期来水量差别很大,又无调节能力,在枯水期水轮机长期只能带 20%~60% 额定负荷运行。导致水轮机远离最优工况区运行,存在运行效率低、稳定性差等问题。

这里以新疆红山嘴三级电站枯水期技术改造为例,该电站每年 11 月至次年 4 月进入枯水期,来水量较少,机组运行时有明显的振感,水力稳定性很差。

(1)红山嘴三级电站的主要技术参数。新疆红山嘴三级水电站为梯级引水式电站,实际正常运行的毛水头约为 69 m,净水头约为 65 m。电站原安装的机组为 3 台 HL220-LJ-140 型水轮机,额定水头 61 m,额定流量 $17.1 \text{ m}^3/\text{s}$,额定转速 428.6 r/min,机组额定出力 8 750 kW。而枯水期流量大幅降低,仅有 $8 \sim 10 \text{ m}^3/\text{s}$,导致机组出力低于 4 000 kW,水轮机的运行工况大大远离性能最优区,效率低于 75%。

(2)红山嘴三级电站枯水期技术改造方案。根据电站基本条件及比较分析,提出不改变现有的土建与机电设施,只增加 1 台枯水期专用转轮的技术改造方案。为适应枯水期的特殊水力条件,通过采用水力优化设计技术,专门设计 1 台适合电站枯水期水头和流量条件的水轮机转轮,并确保该转轮与原主轴、顶盖及底环的配合尺寸与原转轮保持一致。在丰水期结束、枯水期到来之前的过渡期,用枯水期转轮替换原转轮,并对导叶等过流部件进行必要的修复,而无需改变其他设施;在枯水期结束、汛期到来之前,再重新用原转轮替换枯水期转轮。因此本方案只需研制一台转轮以及每年增加一次机组拆装工作,可以极大地节省投资^[5]。

(3)红山嘴三级电站枯水期技术改造效果。红山嘴三级水电站 JF2525-LJ-140 型枯水期转轮于 2006 年初投入运行,在相同水头和相同流量条件下,安装原转轮的机组出力约 3 257 kW,而安装枯水期转轮的机组平均出力可达到 4 460 kW,同比增加约 37%。截至 2012 年,枯水期转轮机组已安全运行 7 年,日均增发电量 $3 \sim 4$ 万 kWh,累计增加发电量约 3 500 万 kWh,按当地上网电价 0.4 元/kWh 计算,已累计增加发电收入 1 400 万元。此外,由于冬季枯水期玛纳斯河含沙量小,转轮基本没有磨蚀,机组的运行稳定性优良。

本电站的技术改造实例表明,该方法非常适合在枯水期来水量小、长时间在 60% 额定负荷以下运行的卧式机组。配置的枯水期转轮在枯水期来临时换上,在丰水期来临时换下,并且卧式机组转轮拆装方便,每次更换工作只需数小时。在云南黑尔、南旦河、山草坪、他郎河、下山口水电站和福建灌阳等水电

站的改造中采用了这种方法,均取得了很好的效果。

1.3 电站实际水头远高于设计水头,水轮机低效运行

当电站实际参数与设计参数偏离时,水轮机将远离最优工况区运行。此时水流会以非平顺的状态绕流叶片,可能出现叶道涡、叶片头部正、背面脱流及尾水管涡带等影响水轮机效率与稳定性的水流状态,并造成水轮机运行效率低、出力不足、稳定性差、耗水量大、振动、噪声大及空蚀破坏严重、寿命降低等,有的机组甚至不能运行。

按照电站实际参数与设计参数的关系,一类电站是实际水头远高于设计水头,如广西峻山电站。

1.3.1 峻山电站的基本情况

峻山水库位于广西恭城县,是一座以灌溉为主、结合发电的综合性水利工程。电站共安装了两种型号的三台水轮发电机组,1号机单机容量为1 600 kW,大机2号、3号单机容量为3 200 kW,总装机容量为8 000 kW,是恭城县电网的骨干电站。电站水轮机的主要参数如表2所示。

表2 峻山电站机组技术参数

Tab. 2 The technical parameters for Junshan hydroelectric power station

编号	水轮机型号	最高水头/ m	额定水头/ m	最低水头/ m	额定流量/(m ³ ·s ⁻¹)	额定转速/(r·min ⁻¹)	额定出力/ kW
1号	HL300-LJ-120	32.0	24.0	18.0	8.6	300	1 704
2号、3号	HL240-LJ-140	43.0	30.5		12.8	300	3 380

由于上游来水量充沛,电站大部分时间运行水头在32 m以上。坝顶溢流时电站水头高于45 m,此时1号机无法运行,处于“死机状态”。并且受峻山电站引水系统调节保证方面的限制,无法对电站进行大规模的增容改造。经论证,业主于1994年在水库坝顶溢洪道上安装了自动翻板闸,水轮机平均运行水头提高到38 m,最高运行水头提高到51.9 m,已远远超出我国相关技术部门给出的HL300型与HL240型水轮机推荐使用范围,运行工况及水力稳定性很差,水轮机的刚、强度存在较大安全隐患。

1.3.2 峻山电站技术改造方案

根据电站具体情况,确定的水轮发电机组技术改造方案如下:①发电机不进行改造,保持其额定转速与额定功率不变;②水轮机只更换转轮,其他部件均保持不变;③技改转轮的强度按55 m水头设计;④分别优化设计大、小机组的转轮,其中水力参数按照最高水头51.9 m、额定水头38 m、最低水头27 m确定。

为了保证技改转轮在高水头区有较高效率,在额定水头有一定的超发能力(为以后发电机增容改造留有余地),在较低水头时有较大的机组出力,且考虑到电站机组一般均在满负荷运行的特点,对于1号水轮机,选择技改转轮最优工况点参数为:最优单位转速为60 r/min,最优单位流量为0.62 m³/s,对应的最优水头与水轮机出力分别为36 m和1 760 kW;对于2号、3号水轮机,选择的技改转轮最优工况点参数为:最优单位转速为68 r/min,最优单位流量为0.76 m³/s,对应的最优水头与水轮机出力分别为38.1 m和3 200 kW。

1.3.3 峻山电站技术改造效果

经分析计算,在峻山电站主要运行的高水头区典型工况点,各水轮机技改前、后的效率变化如表3所示。

表3 峻山电站技术改造前后水轮机效率对比

Tab. 3 The efficiency contrast before and after renovation for Junshan hydroelectric power station

净水头/ m	1号水轮机效率/%			2号、3号水轮机效率/%		
	改造前	改造后	提高值	改造前	改造后	提高值
51.9	66.0	85.0	19.0	69.0	86.0	17.0
45.0	70.0	87.5	17.5	78.0	88.0	10.0
38.0	74.0	90.0	16.0	87.4	92.0	4.6

1号机技改转轮于1995年初投入运行,2号、3号技改转轮于1996年投入运行。实际运行情况表明:1号机组运行稳定,各项参数正常,达到了“救活”机组的技改目标;2号、3号机组运行稳定,机组的明显振动区消失,与技改前相比耗水量大幅减少,水轮机效率显著提高。技术改造完全达到预期目标。

1.4 电站实际水头远低于设计水头,机组出力不足

电站实际参数与设计参数偏离的另一种典型情况就是电站实际水头低于设计水头,将导致机组出力受阻,这里以海南南丰电站为例进行说明。

1.4.1 南丰电站基本情况

南丰水电站位于海南省儋州市,从松涛水库引水发电。该电站装有两大一小共3台水轮发电机组,其中两台大机(1号、2号机)分别于1968年和1970年投入运行,主要技术参数如表4所示。

表4 南丰电站1号、2号机组技术参数

Tab. 4 The technical parameters for No. 1 and No. 2 set of Nanfeng hydroelectric power station

型号	最高水头/ m	额定水头/ m	最低水头/ m	额定流量/(m ³ ·s ⁻¹)	额定转速/(r·min ⁻¹)	额定出力/ kW	吸出高度/ m
HL263-LJ-235	45.3	35.5	25.5	35.5	187.5	10 550	+0.5

电站存在的主要问题是水头长期偏低,多年运行的电能加权平均水头为32 m,远低于1号、2号机的额定水头。导致机组出力从未达到过额定出力,绝大部分时间在8 500 kW以下运行,机组受阻容量大^[6]。此外,电站还存在水轮机机型落后,效率较低,设备老化等问题。

1.4.2 南丰电站技术改造方案

根据电站现状提出改造方案为保持机组额定转速不变,只更换水轮机转轮,其他过流部件形状与尺寸基本不变。为保证水轮机技改后能长时间在高效率区运行,选定技改新转轮的设计水头为32 m,与电能加权平均水头相同。由于松涛水库库容大、无弃水,并考虑到南丰水电站下游渠道的过流能力,最终确定技改2号机的额定流量为36 m³/s。根据选定的设计水头与额定流量,最终确定2号技改转轮优化设计的最优单位转速77 r/min,最优单位流量1.1 m³/s。

1.4.3 南丰电站技术改造效果

利用优化设计技术研制了2号机技改转轮JF3154-LJ-

235,其性能最优区与水轮机的实际运行区相吻合。1998年1月改造工作完成后,2号机与未改造的1号机进行了出力对比试验,试验结果(见表5)表明改造后的2号机组出力较未改造的机组有较大提高,并且尾水标尺显示尾水位无明显变化。

表5 南丰电站机组出力对比试验参数

Tab. 5 The output contrast between No. 1 and No. 2

set of Nanfeng hydroelectric power station

毛水头/ m	导叶开度/ %	未改造1号机组 出力/kW	改造后2号机组 出力/kW
37.0	100	9 980	11 700
34.4	100	8 700	10 270

南丰水电站2号水轮机技术改造达到预期目标,在1999年和2000年分别对1号大机和3号小机进行的技术改造也均圆满完成了技改目标。

1.5 电站水轮机转轮受空蚀破坏,严重影响机组正常运行

空蚀使水轮机叶片表面粗糙而引起水力损失增大,使水流紊乱导致效率下降,而且大量气泡的不断产生与溃灭也影响叶道中水流的连续性,并导致出力下降。国内很多电站水轮机转轮都受到空蚀的影响,这里以广西爽岛电站为例进行说明。

1.5.1 爽岛电站的基本情况

爽岛水库位于广西苍梧县境内,属年调节水库,丰水年和平水年降雨集中时,有一定的弃水量。水电站装机2台,容量为 $2 \times 6\,000$ kW,设计年发电量5 459万 kWh。电站于1991年投入运行,机组主要参数如表6所示。

表6 爽岛电站机组技术参数

Tab. 6 The technical parameters for Shuangdao hydroelectric power station

型号	最高 水头/ m	额定 水头/ m	最低 水头/ m	设计流 量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	额定转 速/($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	额定 出力/ kW	吸出 高度/ m
HLA244-LJ-150	49.5	40.0	26.0	17.72	375	6 270	+0.5

爽岛水电站机组投运以来主要存在的问题是水轮机转轮叶片背面受到空蚀破坏十分严重,空蚀部位主要是下环和叶片出水边构成的三角区,每个叶片的破坏部位较为相似,破坏严重的叶片甚至出现面积约 30 cm^2 的穿孔现象。机组小修周期一年,每次费时约15 d,补焊要消耗不锈钢焊条约20 kg;大修周期两年,人力与财力消耗相比小修成倍增加。此外由于多年多次补焊引起叶片变形,致使机组效率和出力不断下降,造成水力资源不能充分利用^[7]。

1.5.2 爽岛电站技术改造方案

针对爽岛水电站水轮机组存在的主要问题,我们提出的改造方案为保持发电机不变,利用水轮机优化设计技术研制新型转轮,将水轮机的性能最优区调整到电站实际运行区,以达到改善水轮机空化性能及提高水轮机效率与出力的目的。

1.5.3 爽岛电站技术改造效果

2000年2月,为爽岛水电站1号机重新优化设计的JF3159A-LJ-150技改转轮投入运行。新转轮累计运行7 892 h后停机检查,叶片表面光亮,没有出现空蚀现象。2000年和2001年,1号机累计增发电量分别分145.8和225.6万 kWh。

在不同水头下1号机技改后机组最大出力平均增加363 kW;并且除个别水头外,技改后的1号机在过流量增加(引水管路的水力损失增大)的情况下,单位千瓦的耗水率均低于2号机的耗水率。技术改造完全达到了预期目标。

影响水轮机空蚀的因素很多,转轮流道中流速和压力的变化是产生空蚀的最主要原因。通过水力优化技术设计合理的叶型,使叶片具有平滑的流线,尽可能地使压力较低的叶片背面压力分布均匀,并缩小低压区,是防止和减小水轮机空蚀的有效方法。

1.6 水流含沙量大,水轮机转轮磨损严重

当通过水轮机过流部件的水流中含有悬移泥沙时,坚硬的泥沙颗粒撞击磨削过流表面,使材料因机械破坏和疲劳而损坏。水轮机过流部件受泥沙磨损破坏,将导致机组出力、效率下降,检修周期缩短、耗费大、工期长,严重时需要更换转轮,甚至影响到电力系统的供电安全和可靠性^[8]。选择合理的工作参数以及做好转轮的优化设计,可以有效的改善和减轻水轮机泥沙磨损的危害性,这里以红山嘴三级电站汛期转轮技术改造为例进行说明。

1.6.1 红山嘴三级电站汛期运行的基本情况

红山嘴梯级水电站所在的玛纳斯河为多泥沙河流,是全国对水轮机过流部件造成最严重的磨蚀河流之一,每年5—10月为水流含沙期。玛纳斯河水年平均含沙量为 2.46 kg/m^3 ,最大含沙量为 402 kg/m^3 ,沙中主要成份为石英及长石,硬度大且均为角形尖锐物。红山嘴电厂早期兴建的二、三、四、五级水电站水轮机均存在程度不同的泥沙磨损问题,电厂运行维修工作任务十分艰巨。红山嘴三级水电站因水头最高,水轮机泥沙磨损情况也最严重,经常出现汛期被迫停机检修现象,电站的发电效益受到严重影响。

由于水轮机转轮在汛期磨损严重,为改善转轮的抗磨损性能,业主将原3台HL220-LJ-140型转轮陆续更换成其他型号的转轮,但实际运行情况表明,转轮抗磨损能力提高不明显。

1.6.2 红山嘴三级电站汛期技术改造方案

解决水轮机泥沙磨损问题需要从水电站建设、水轮机设计制造及运行等多方面进行综合治理,结合电站汛期转轮只在每年5—10月运行且主要在满负荷运行的特点,最终确定将净水头65.5 m、机组出力1.0万 kW作为汛期转轮的优化设计最优工况点。在转轮叶片设计时,优化叶片流道的流态,使水流以零冲角进入转轮叶道,并尽量降低叶片表面的相对流速。

1.6.3 红山嘴三级电站汛期技术改造效果

为红山嘴三级电站汛期改造设计的首台JF2529A-LJ-140型转轮于2008年投入运行,受上游进口前池形状和来水方向影响,该转轮的过机泥沙含量明显大于另外两台其他型号的水轮机。但经过一个汛期后检查发现,技改转轮的磨损情况明显优于另外两台转轮,其抗磨损能力获得了业主的好评。之后的红山嘴二、四、五级水电站机组的技术改造和红山嘴一级新建电站的水轮机优化设计中,均应用了这一抗磨损设计理念并取得了令人满意的抗泥沙磨损效果。

2 结 语

水电站的最大特点是“个性”很强,不同 (下转第141页)

年显著。

综合分析,无论考虑生态需水量与否,联合调度较现状调度的发电量均有很大程度的增加。对于水库决策者,在各代表年,可以兼顾下游河道的实际情况及对发电量的需求,采取合适的调度方案,以确保水库经济效益的最大化。基于表2与表3的相关结果分析,本文建议在丰水年采取适宜生态需水量进行生态—发电调度,平水年采取次小生态需水量调度,枯水年采取最小生态需水量调度。

4 结 语

(1)本文以牛路岭一库2站联合调度为例,建立了水库生态—发电优化调度模型,并开发了求解该模型的遗传算法程序,进而分析了生态需水量对水库发电效益的影响。同时将联合调度结果与牛路岭水库现状调度结果进行了比较分析,结果表明,在兼顾河道生态需水的基础上,一库2站联合调度可明显增加牛路岭水库的总发电量。对于牛路岭水库调度方案的选择,本文给出了相应地建议。

(2)计算实例表明,本文建立的水库生态—发电调度模型和求解方法切实可行,拟建电站的建设很有必要性,一库2站联合生态—发电优化调度模型具有实际意义,既为牛路岭水库的调度提供了依据和技术支撑,又可为类似水库生态—发电调度的研究提供借鉴,同时,也是对水库生态调度研究的一个补充。

(3)河流生态需水研究包括生态基流及生态洪水2方面内容,本文重点研究了基于生态基流的水库调度,而生态洪水与水库的调度细则有待进一步研究。

(4)本文建立的模型为确定性模型,而实际调度运用中则不仅要考虑水文数据的不确定性,还需考虑其他生态因子的调度,如何将此类模型与其他生态因子调度模型结合并运用到实际调度工作中,是今后需要深入研究的课题。□

参考文献:

- [1] 董哲仁. 河流生态恢复的目标[J]. 中国水利, 2004, 10(6):1.
- [2] Higgins J M, Brock W G. Overview of reservoir release improve-

ments at 20 TVA dams[J]. Journal of Energy Engineering, 1999,125(1):1-17.

- [3] Bednarek A T, Hart D D. Modifying dam operations to restore rivers: Ecological responses to Tennessee River dam mitigation[J]. Ecological Applications, 2005,15(3):997-1008.
- [4] 谭红武, 李国强, 朱 瑶, 等. 水利水电工程生态调度的实践, 问题与发展趋势[J]. 中国水能及电气化, 2009,(12):10.
- [5] 董哲仁, 孙东亚, 赵进勇. 水库多目标生态调度[J]. 水利水电技术, 2007,38(1):28-32.
- [6] 黄云燕. 水库生态调度方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.
- [7] 何俊仕, 郭 铭, 韩宇舟. 辽河干流多水库联合生态调度研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2009,42(6):731-733.
- [8] 张丽丽, 殷峻暹. 水库生态调度研究现状与发展趋势[J]. 人民黄河, 2009,31(11):14-15.
- [9] Harman C, Stewardson M. Optimizing dam release rules to meet environmental flow targets[J]. River Research and Applications, 2005,21(2-3):113-129.
- [10] 禹雪中, 杨志峰, 廖文根. 水利工程生态与环境调度初步研究[J]. 水利水电技术, 2005,36(11):20-22.
- [11] 钟华平, 刘 恒, 耿雷华, 等. 河道内生态需水估算方法及其评述[J]. 水科学进展, 2006,17(3):430-434.
- [12] 李 捷, 夏自强, 马广慧, 等. 河流生态径流计算的逐月频率计算法[J]. 生态学报, 2007, 27(7):2916-2921.
- [13] 郑志宏, 张泽中, 黄 强, 等. 生态需水量计算 Tennant 法的改进及应用[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2010,42(2):34-39.
- [14] Holland J H. Adaptation in natural and artificial systems: An introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence[M]. U Michigan Press, 1975.
- [15] 王小平, 曹立明. 遗传算法: 理论, 应用及软件实现[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002.
- [16] 万 星, 周建中. 自适应对称调和遗传算法在水库中长期发电调度中的应用[J]. 水科学进展, 2007,18(4):598-603.
- [17] 李 想, 魏加华, 傅旭东. 粗粒度并行遗传算法在水库调度问题中的应用[J]. 水力发电学报, 2012,31(4):28-33.

(上接第136页) 水电站的水头、流量和机组台数各不相同, 因此对水轮机的要求也千差万别。本文通过具体实例, 分析了中小型水电站水轮机改造中常见的几类问题及其解决方案。在农村中小型水电站增效扩容改造中, 由于现场条件不同, 影响因素较多, 因此在实施中要根据具体情况具体分析, 权衡利弊, “量体裁衣”选择优化设计方案, 才能达到技术先进、方案合理经济的技改目标。□

参考文献:

- [1] 陈 雷. 高度重视 精心组织 强化管理 扎实做好农村水电增效扩容改造工作[J]. 中国水利, 2011,686(20):1-3.
- [2] 田中兴. 总结分析试点经验和成效助推增效扩容改造全面实施[J]. 中国水能及电气化, 2013,95(Z1):13-16.

- [3] 穆建军. 农村水电站增效扩容改造关键技术问题的探讨[J]. 农村水电及电气化, 2012,67(5):6-8.
- [4] 陈锡芳. 水轮发电机组改造增容与优化运行[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010:1-4.
- [5] 彭忠年, 陈 锐, 田娅娟, 等. 红山嘴三级水电站枯水期运行问题的解决方案[C]// 中国水力发电工程学会. 水电设备的研究与实践—第十七次中国水电设备学术讨论会论文集. 北京: 中国水利水电出版社, 2009:507-510.
- [6] 彭忠年, 陈 锐, 蒋学运, 等. 南丰水电站 HL263-LJ-235 型水轮机提效增容技术改造[J]. 水利发电, 1999,25(12):51-53.
- [7] 彭忠年, 陈 锐, 黄英尔. 爽岛水电站水轮机技术改造[J]. 水利水电技术, 2002,30(10):17-18.
- [8] 常近时, 寿梅华, 于希哲. 水轮机运行[M]. 北京: 水利电力出版社, 1983:113-115.