

水电站运行调度绩效考核方法

张卫国,钟平安,陈璇,戴力,杨明明

(河海大学水文水资源学院,江苏 南京 210098)

摘要 :将现有的水电站效益考核指标归纳为主观型、客观单因素型、客观综合型 3 类,分别进行优缺点评述,认为水能利用提高率反映因素全面、数据易于获取,可作为首选的考核指标。比较了 3 种库容差电量计算方法的差异,建议以库容曲线的线性程度作为选择库容差电量计算方法的依据。实例应用结果表明,所提出的库容差电量计算方法选择依据是可行的,以水能利用提高率作为首选考核指标是合理的。

关键词 :水电站;考核方法;水能利用提高率;库容差电量

中图分类号 :TV737

文献标志码 :A

文章编号 :1006-7647(2012)01-0065-04

Evaluating methods for benefits generated from operation of hydropower stations//ZHANG Wei-guo, ZHONG Ping-an, CHEN Xuan, DAI Li, YANG Ming-ming College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract :The current evaluating indexes of benefits generated from operation of hydropower station operations were classified into three types :subjective type, objective single factor type and objective integrated type. Their advantages and disadvantages were analyzed. The increasing rate of hydropower utilization was regarded to be the primary index because of its comprehensive property and easy calculation. The differences among three kinds of methods for calculating storage capacity-based hydropower were compared. The linearity of storage capacity curve was suggested to be the basis for the selection of the method for storage capacity-based hydropower. The results of a case study show that the basis for the proposed method is scientific, and the increasing rate of hydropower utilization as the primary index is rational.

Key words :hydropower station; evaluating method; increasing rate of hydropower utilization; storage capacity-based hydropower

水电是目前开发程度最高、技术相对成熟的清洁能源^[1-2]。水电的运行效益不仅受到来水的随机性、水量与水头的利用方式、机组设备效率等多种因素的影响^[3-4],而且取决于调度管理人员的技术水平。因此,建立合理有效的水电站调度工作考核方法有利于调动电站调度人员的积极性,对进一步挖掘水电站发电潜力具有重要意义。

目前,关于水电站运行调度考核方法的研究已受到广泛关注。主要研究成果集中在评价指标体系的建立以及指标的定量计算上^[5-7],大多结合某个具体电站的特殊需求展开研究,造成现有的水电节能考核指标种类繁多,各指标对不同类型的水电站适用程度不同。

本文对现有的考核指标进行归纳、分类,并进行优缺点评述分析,提出推荐评价指标,并对该推荐指标涉及的库容差电量的计算方法进行比较。

1 现有考核指标分析评价

根据现有文献收集相关的考核指标,将国内常用的考核指标分成 3 种类型,即主观型、客观单因素型、客观综合型。所谓主观型指标是以上级主管部门制定的发电量任务为考核标准,其中发电量任务的制定主观性较强;所谓客观单因素型指标是以某个可定量的指标反映水电站在某单因素方面的运行调度水平;客观综合型指标,是以某个可定量的指标反映水电站的综合运行调度水平。目前常用考核指标的比较分析见表 1。

表 1 中主观型指标由于受来水不确定性影响,下达的计划发电量与实际发电量无可比性,是所有考核指标中最差的,应当尽量避免使用。

客观单因素型指标仅考虑了影响发电效益的某个因素,因而不具有广泛适用性。只有针对不同电

基金项目 :“十一五”国家科技支撑计划(2009BAC56B03)

作者简介 :张卫国(1987—),男,江苏南通人,硕士研究生,主要从事水资源规划与管理研究。E-mail :jill-zwg@163.com

通讯作者 :钟平安(1962—),男,安徽无为,人,教授,博士,主要从事水资源规划与管理研究。E-mail :zhongpa@jlonline.com

表 1 现有常用考核指标比较

类型	指标	指标含义	计算方法	考核标准	优点	缺点
主观型	$E_{计划}$	计划发电量,用于考核发电任务的完成情况	假定来水保证率选择来水,按调度图调节计算	实际发电量大于计划发电量则考核合格	计算便捷	主观性强,保证率选择依据不明确,典型年选择针对性不够
	η	水量利用率,用于考核水量利用情况	考核期内发电水量占总出库水量的比例	$\eta = W_{发电}/W_{总出库}$, η 越大越优	有利于减少弃水	受来水丰枯、水库调节能影响较大
客观单因素型	μ	发电耗水率,用于考核运行效率水平	考核期内发出单位电量所消耗的发电水量	$\mu = W_{发电}/E$, μ 越小越优	反映了水头及机组效率的利用	受水库水位季节性消长等因素影响
	$\eta_{相对}$	相对水量利用率,用于考核水量利用情况	考核期内实际水量利用率与计算水量利用率之比 ^[8]	$\eta_{相对} = \eta_{实际}/\eta_{计算}$, $\eta_{相对} \geq 1$ 则考核合格, $\eta_{相对}$ 越大越优	剔除了来水丰枯、水位季节性消长等因素的影响	指标数值接近 1,灵敏度不高
	$\mu_{相对}$	相对发电耗水率,用于考核运行效率水平	考核期内实际发电耗水率与计算发电耗水率之比 ^[5]	$\mu_{相对} = \mu_{实际}/\mu_{计算}$, $\mu_{相对} < 1$ 则考核合格, $\mu_{相对}$ 越小越优	用可用来水对应的计算电量作分母,排除无效来水的影响	不易准确计算
	φ	可用水能利用率,用于考核有效水量利用情况	考核期内实际发电量与可用来水对应的计算电量之比 ^[9]	$\varphi = E_{实际}/E_{可用}$, φ 越大越优	用可用来水对应的计算电量作分母,排除无效来水的影响	不易准确计算
客观综合型	ω	发电完成率,用于考核水量、水头及机组运行效率的综合水平	考核期内实际发电量与优化的理论最大发电量之比 ^[10]	$\omega = E_{实际}/E_{max}$, ω 越大越优	能体现优化的思想	优化计算复杂,有些水电站尚不具备优化运行的客观条件
	ξ	水能利用提高率,用于考核水量、水头及机组运行效率的综合水平	考核期内实际发电量超过考核电量的百分比 ^[10]	$\xi = (E_{实际} - E_{核})/E_{max}$, $\xi > 0$ 则考核合格, ξ 越大越优	能剔除不同来水情况、不同调节性能、不同工作位置的影响,同时反映水量与水头的利用	求解中涉及的库容差电量计算尚无统一的方法

注: $W_{发电}$ 为考核时段内的发电用水, $W_{总出库}$ 为考核时段内的总出库水量, E 为考核时段内的发电量, $\eta_{实际}$ 为实际水量利用率, $\eta_{计算}$ 为计算水量利用率, $\mu_{实际}$ 为实际发电耗水率, $\mu_{计算}$ 为计算发电耗水率, $E_{实际}$ 为考核期内实际发电量, $E_{可用}$ 为可用来水对应的计算电量, E_{max} 为通过优化手段计算得到的理论最大发电量, $E_{核}$ 为考核期内的考核电量。

站的特性分析选用不同的指标,才能客观评价调度水平,如水量利用率一般适用于调节性能较低的水电站。但单因素型指标对于剖析水电站增加发电量的潜力,改进运行调度措施还是有指导意义的。

客观综合型指标包含了水量、水头和机组效率三大主要因素,可以衡量水电站运行调度的综合水平。表 1 的 2 个综合型指标中,水能利用提高率反映了实际发电量偏离考核电量的程度,发电完成率反映了实际发电量接近理论最大发电量的程度,若将考核电量当成下限,将理论最大发电量作为上限,则这 2 个指标是互补的,评价结论应该是一致的,但从复杂程度看,水能利用提高率相对简单一些,本文推荐使用水能利用提高率作为首选评价指标。水能利用提高率计算中涉及库容差电量,下面就库容差电量的计算方法进行分析比较。

2 库容差电量的计算

水能利用提高率的计算中,实际发电量可通过实际运行资料统计得到,考核电量的计算是关键,一般 t 时段考核电量 $E_{考,t}$ 按式(1)计算:

$$E_{考,t} = E_{计,t} - E_{库,t} \tag{1}$$

式中: $E_{计,t}$ 为第 t 时段计算电量,可根据时段初水位按照水库调度图或调度规则,并考虑弃水期发电负荷率和弃水调峰等因素的影响计算; $E_{库,t}$ 为第 t 时段库容差电量。

阶段累积考核电量为

$$E_{考,T} = \sum_{t=1}^T E_{计,t} - \sum_{t=1}^T E_{库,t} \tag{2}$$

式中: T 为阶段的时段数。

$E_{库,t}$ 指时段内计算与实际所用库容差水量对应的电量。由于不考虑实际水位的校正,在考核过程中计算与实际的各时段初、末水位通常都不一致(图 1),两者利用的库容差水量的差值为

$$\Delta V_t = (V_{实际,t+1} - V_{实际,t}) - (V_{计算,t+1} - V_{计算,t}) \tag{3}$$

式中: ΔV_t 为第 t 时段实际与计算所利用的库容差水量; $V_{实际,t}$, $V_{实际,t+1}$ 分别为第 t 时段初、末的实际水库蓄水量; $V_{计算,t}$, $V_{计算,t+1}$ 分别为第 t 时段初、末的计算水库蓄水量。

如何较为合理地将 ΔV_t 转化为 $E_{库,t}$,目前尚无统一的计算方法,常用的主要有以下几种^[11-13]:

a. 方法 1:按当前时段的发电耗水率计算

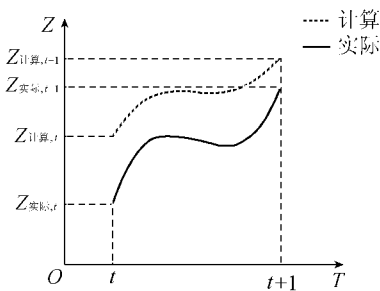


图1 时段库容差示意图

$E_{库,t}$ 。计算公式为

$$E_{库,t} = \frac{\Delta V_t}{\mu_t} \quad (4)$$

式中： μ_t 为当前时段发电耗水率。

b. 方法2 按当前时段的平均水头计算 $E_{库,t}$ 。计算公式为

$$E_{库,t} = K \Delta V_t H_t \quad (5)$$

式中： K 为综合出力系数； H_t 为当前时段平均毛水头。

c. 方法3：按水库的蓄能曲线计算 $E_{库,t}$ 。首先，建立水位与累计电能的关系曲线（蓄能曲线） $Z \sim E_{蓄}$ ，然后利用 $Z \sim E_{蓄}$ 求解，在实际计算中根据时段初、末的水位按式（6）计算 $E_{库,t}$ ：

$$E_{库,t} = [E_{蓄}(Z_{实际,t+1}) - E_{蓄}(Z_{实际,t})] - [E_{蓄}(Z_{计算,t+1}) - E_{蓄}(Z_{计算,t})] \quad (6)$$

由于 $\mu_t = \frac{W_{发电,t}}{E_t} = \frac{Q_t \Delta t}{N_t \Delta t} = \frac{Q_t}{K Q_t H_t} = \frac{1}{K H_t}$ （式中 Q_t 和 N_t 分别为当前时段的发电用水流量和功率），所以方法1与方法2是等价的。方法1与方法3比较，方法1中 μ_t 反映时段平均耗水率，如果时段初和时段末的水位相差不大、时段内蓄能曲线线性程度较高，则方法1与方法3的计算结果将是接近的，但当时段内蓄能曲线非线性程度较高时，方法3通过水位分级部分反映了蓄能与水位的非线性关系，所以选用方法3将能获得较高的精度。因为

$$\Delta E_{蓄} = K \Delta V H = K (Z_{坝} - Z_{尾}) \frac{\Delta V}{\Delta Z} \Delta Z \quad (7)$$

所以

$$\frac{\Delta E_{蓄}}{\Delta Z} = K (Z_{坝} - Z_{尾}) \frac{\Delta V}{\Delta Z} \quad (8)$$

式中： $Z_{坝}$ 为水库坝上水位； $Z_{尾}$ 为发电尾水位。

可见，当 $\Delta Z \rightarrow 0$ 且 $K, Z_{尾}$ 已知时，蓄能曲线在 $Z_{坝}$ 处的斜率可由相应水位下库容曲线的斜率刻画。所以，是否选用方法3可以用库容曲线的非线性程度判别。

在制作蓄能曲线时，水位分级步长不宜过大，为了提高计算精度，考虑下游尾水位对蓄能的影响，对

于下游水位变幅较大的水库，可以尾水位为参数建立蓄能曲线簇。

3 计算实例

3.1 不同方法库容差电量计算结果比较

某不完全年调节水电站，库容系数为8%，装机容量为11.5万kW·h，4—7月为所处流域的汛期，水库的库容曲线、蓄能曲线簇如图2、图3所示。图3中205.0m、207.5m、210.0m、212.5m、215.0m为发电尾水位。

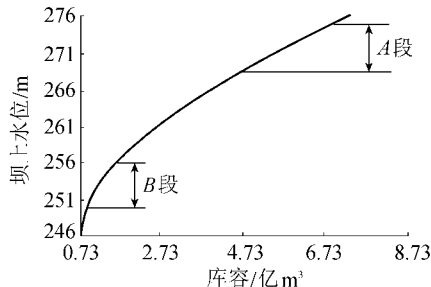


图2 水库库容曲线

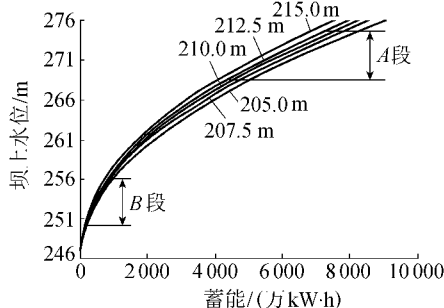


图3 水库蓄能曲线簇

在图2、图3中取线性程度较好的A段（水位区间268.5~274.5m）和线性程度较差的B段（水位区间250.0~256.0m）。在A段中取1个计算时段，在B段中取2个计算时段（时段2和时段3），分别采用方法1和方法3计算时段库容差电量，结果见表2。

表2 库容差电量计算对比

计算时段	水位/m		水位变幅/m	库容差电量/(万kW·h)		2种方法计算结果相对误差/%
	计算值	实际值		方法1	方法3	
时段1初	268.5	270.4	6.0	-1678.49	-1679.02	0.03
时段1末	274.5	272.9				
时段2初	250.0	251.9	6.0	-407.65	-412.65	1.21
时段2末	256.0	254.4				
时段3初	251.0	251.3	1.0	-45.66	-45.69	0.06
时段3末	252.0	251.8				

由表2可见：①当库容曲线线性程度较高时（图2中A段）利用方法1计算库容差电量与利用方法3计算的结果十分接近，时段1两者仅相差0.03%，时段3虽然位于库容曲线非线性程度较高的B段，但由于水位变幅较小，时段内水位变化的

线性程度仍然较高,2种方法计算结果也仅差0.06%。②当库容曲线在时段内非线性程度较高,且时段初末水位变幅较大时,两者的计算结果相差比较明显,如时段2,两者相差达1.21%。③由于方法1利用的是时段平均水头,其库容差电量计算结果总是比方法3的小。

所以,可以依据库容曲线的非线性程度、时段初末水位变幅作为库容差电量计算方法的选择依据:当库容曲线的非线性程度不高或时段初末水位变幅较小时,2种方法计算结果相差不大,选择方法1计算库容差电量相对比较容易;当库容曲线的非线性程度较高且时段初末水位变幅较大时,采用方法3计算库容差电量可以获得较高的精度。

3.2 评价指标优劣比较

在表1中选择考核指标,由于计划发电量指标主观性较强,不予考虑,计算可用水能利用率指标所需的可用来水对应的计算电量数据不易准确度量,本文亦不予考虑;水能利用提高率和发电完成率2个互补性指标只选择水能利用提高率指标,以最新核定的能量指标、水库调度图为依据,库容差电量采用方法3计算。计算结果见表3。

由表3可见:①相对水量利用率指标 $\eta_{\text{相对}}$ 比水量利用率指标 η 更能客观地反映水量利用水平。表中汛期(4—7月) η 与来水或弃水的多少成反比,由于一般情况下弃水时水库处于蓄满状态、出力为预想出力,所以 η 的大小取决于来水的多少,并不能客观反映汛期水量利用程度;而 $\eta_{\text{相对}}$ 反映了实际运行对计算条件的超越或背离, $\eta_{\text{相对}}$ 的大小与来水的多少没有必然联系,客观上能反映实际调度水平的高低。②相对发电耗水率指标 $\mu_{\text{相对}}$ 比发电耗水率指标 μ 更合理。由于水库的调蓄作用,汛期与供水

期初期水位较高,供水期后期水位较低,汛期还可能来水太丰产生弃水影响发电水头,水头高,发电耗水率就低,所以 μ 的大小不仅取决于调度水平的高低,还隐含水库水位消涨的自然因素;而 $\mu_{\text{相对}}$ 中计算与实际的发电耗水率中都包含有水位消涨和汛期弃水等因素,其比值可以在一定程度上消除这部分的影响,从而更能准确反映水库调度的水平高低。③客观综合型指标比客观单因素型指标适应性强。一般而论,对于年调节以下水库汛期水量利用(减少弃水)是主要矛盾,非汛期水头利用(维持高水头)是主要矛盾,表3中 ξ 考核结论在汛期与 $\eta_{\text{相对}}$ 的考核结论一致,在非汛期与 $\mu_{\text{相对}}$ 的结论一致, ξ 集合了 $\eta_{\text{相对}}$ 和 $\mu_{\text{相对}}$ 的优点。

4 结 语

对现有的水电站经济调度考核指标进行归纳、分类,并进行优缺点评述分析,提出推荐评价指标,并对库容差电量计算方法进行比较,主要结论如下:

①相对水量利用率和相对发电耗水率指标比其相应的绝对指标更能反映调度水平的高低。综合指标水能利用提高率具有相对水量利用率和相对发电耗水率的优点,反映因素全面、数据易于获取,可作为首选的考核指标。②水能利用提高率计算中涉及的库容差电量,当库容曲线的线性程度较高时,可以直接采用当前时段的发电耗水率计算;当库容曲线的非线性程度较高且时段初末水位变幅较大时,采用以尾水位为参数的水库蓄能曲线簇计算精度较高。

本文着重于发电效益的考核,而水库综合调度已经成为当前水库调度研究与实践的热点,如何统筹考核发电、防洪、生态等多目标调度效益的方法是值得进一步研究的问题。

表3 某水电站节能考核指标计算结果

月份	来水流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	弃水流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	客观单因素型指标评价						客观综合型 指标评价	
			水量利用评价			水头及机组效率评价			$\xi/\%$	结 论
			$\eta/\%$	$\eta_{\text{相对}}/\%$	结 论	$\mu/(\text{m}^3 \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1})$	$\mu_{\text{相对}}/\%$	结 论		
1	14.33	0	100.0	100.0	合 格	7.297	95.8	合 格	31.9	合 格
2	49.20	0	100.0	100.0	合 格	8.605	100.1	不合格	-2.6	不合格
3	202.93	0	100.0	100.0	合 格	7.648	97.4	合 格	7.7	合 格
4	323.70	57.58	72.3	93.8	不合格	6.703	95.3	合 格	-4.3	不合格
5	435.23	239.33	50.0	111.1	合 格	6.389	97.2	合 格	17.2	合 格
6	672.57	456.78	32.7	109.0	合 格	6.554	99.6	合 格	11.6	合 格
7	199.87	52.46	95.0	127.0	合 格	6.209	97.1	合 格	24.4	合 格
8	85.77	0	100.0	100.0	合 格	6.377	101.1	不合格	-0.5	不合格
9	74.33	0	100.0	100.0	合 格	6.525	103.4	不合格	-2.5	不合格
10	30.63	0	100.0	100.0	合 格	6.226	96.5	合 格	3.2	合 格
11	64.57	0	100.0	100.0	合 格	6.450	96.2	合 格	3.7	合 格
12	48.83	0	100.0	100.0	合 格	6.169	92.8	合 格	6.1	合 格
全年	183.50	67.18	66.0	105.2	合 格	6.627	97.2	合 格	9.2	合 格

(下转第90页)

度大于 $0.7g$ 时开始有减振效果,当台面振动频率提高至 80Hz 时,开始有减振效果的台面振动加速度减小到 $0.2g$ 。当振动台台面振动频率为 200Hz 时,各种不同大小的振动台台面输入加速度经土工袋和天然河砂作用后上部质量块的响应加速度均有较大程度的衰减,即在高频情况下土工袋和天然河砂均有较好的水平减振效果。

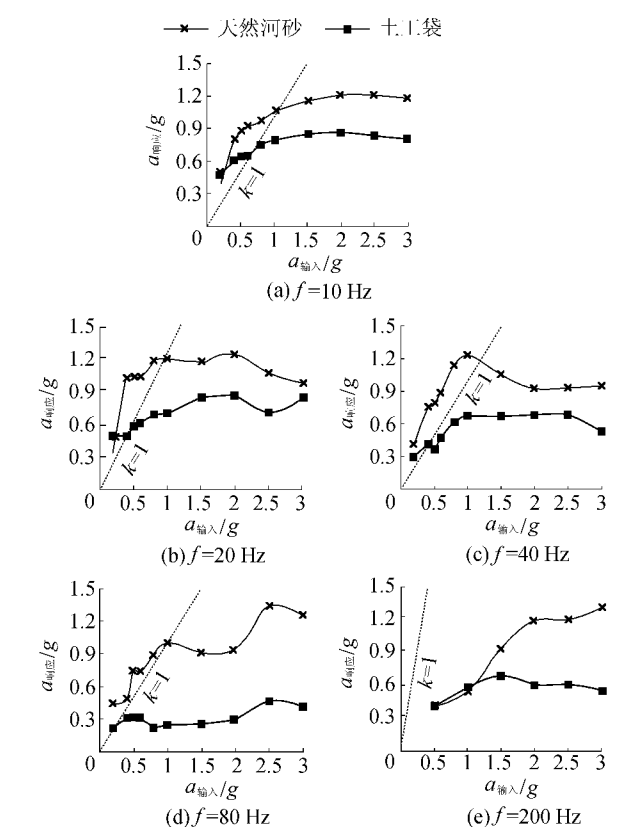


图7 上部质量块响应加速度与振动台台面输入加速度的关系曲线

4 结 论

- a. 土工袋具有与橡胶隔震材料相当的等效阻尼比,其值随着最大水平剪应变的增加而逐渐增大,随着上部竖向压力的增加而逐渐减小。
- b. 土工袋具有可变的水平刚度,变形较小时水平刚度较大,变形较大时水平刚度较小,满足一般隔震支座对水平刚度的要求。
- c. 土工袋的减振效果优于天然河砂的减振效果,且输入振动加速度越大,减振效果越好。

参考文献:

[1] 沈聚敏,周锡元,高小旺,等.抗震工程学[M].北京:中国建筑工业出版社,2000.

[2] 周福霖.工程结构减振控制[M].北京:地震出版社,1997.

[3] MATSUOKA H, LIU Si-hong. A new earth reinforcement method using soilbag[M]. Balkema: Taylor & Francis, 2006:

55-61.

[4] 刘斯宏,汪易森.土工袋加固地基原理及其工程应用[J].岩土工程技术,2007,21(5):221-225.

[5] CHEN R H, CHIU Y H. Model tests of geocell retaining structures[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2008, 26(1): 56-70.

[6] 刘斯宏,松冈元.土工袋加固地基新技术[J].岩土力学,2007,28(8):1665-1670.

[7] MATSUOKA H, LIU Si-hong, HASEBE T, et al. Deformation-strength properties and design methods of soilbag assembly[J]. Doboku Gakkai Ronbunshu, 2004, 67: 169-181.

[8] MATSUOKA H, MURAMATSU D, LIU Si-hong, et al. Reduction of environment ground vibration by soilbags[J]. Doboku Gakkai Ronbunshu, 2004, 67: 235-245.

[9] 刘斯宏,汪易森.土工袋技术及其应用前景[J].水利学报,2007,38(增刊1):644-648.

[10] 钱家欢,殷宗泽.土工原理与计算[M].北京:中国水利水电出版社,1996.

(收稿日期:2011-11-03 编辑:骆超)

(上接第68页)

参考文献:

[1] 左东启.水力发电与环境生态[J].水利水电科技进展,2005,25(2):1-7.

[2] 黄海田,闵毅梅.将低碳经济理念引入水利行业的探讨[J].水利水电科技进展,2011,31(3):43-46.

[3] 钟平安,唐林,张梦然.水电站长期发电优化调度方案风险分析研究[J].水力发电学报,2011,30(1):39-43.

[4] 牛丽霞,管仪庆,葛捍东,等.生态环境需水量对芹山水电站发电效益的影响[J].水资源保护,2011,27(2):29-33.

[5] 张军良,马光文,陆涛.流域梯级水电站节能调度效益评价指标体系研究[J].华东电力,2009,37(5):812-815.

[6] 张安标.飞来峡水电站考核电量及增加发电量的措施[J].水力发电,2007,33(1):80-82.

[7] 刘招,黄强,燕爱玲,等.公伯峡水电站节水增发考核方法研究[J].西安理工大学学报,2006,22(4):399-402.

[8] 周稚亚,黄益芬.关于水电站水库经济调度考核计算办法的探讨[J].水力发电,1981,7(11):43-47.

[9] 吴东平.水电站运行参数和考核指标的改进建议[J].水力发电,2001,27(2):46-47.

[10] 曹广晶,蔡治国.水电站经济运行考核评估理论方法及其改进的初步研究[J].中国三峡建设,2008(11):16-23.

[11] 彭丽霞,于国良.应用水能利用提高率对水电厂进行考核管理的分析[J].黑龙江电力,2005,27(3):220-222.

[12] 赵永生,赵遵廉.水电厂水能利用提高率考核问题探讨[J].武汉水利电力大学学报,2000,33(1):40-43.

[13] 白小勇,冉本银,李广辉.黄河上游梯级水电站群节水增发考核[J].水电自动化与大坝监测,2007,31(1):25-28.

(收稿日期:2011-06-22 编辑:骆超)