

网络出版时间:2014-11-04 13:04

DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2014.12.008

网络出版地址:http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13207/j.cnki.jnwafu.2014.12.008.html

梯级水库调度函数表征形式应用研究

张永永¹,姜 瑾^{2a},吴成国³,黄 强^{2b}

(1 黄河勘测规划设计有限公司,河南 郑州 450003;2 西安理工大学 a 高科学院,

b 水利水电学院,陕西 西安 710048;3 合肥工业大学,安徽 合肥 230009)

[摘 要] **【目的】**针对梯级水库联合调度函数研究的不足,提出一种有效的梯级水库调度函数表征形式,为梯级水库优化运行提供技术支撑。**【方法】**通过系统研究梯级水库联合调度函数的表征形式,分析调度函数决策变量以及相关因子的影响,应用逐步回归方法对调度函数的相关因子进行拟合及选择,并以乌江流域梯级水库联合调度为例进行了应用。**【结果】**利用所提出的梯级水库调度函数形式,以乌江流域梯级水库为例,形成以时段平均出库流量为决策变量的梯级水库调度函数,通过长系列资料验证,乌江流域梯级水库多年平均发电量较梯级设计发电量增加了 14.43 亿 kW·h,保证出力提高到 2 431.9 MW,有效提高了梯级水库的发电效益。**【结论】**梯级水库联合调度函数的表征形式能够反映决策变量属性与水库各要素间的联系,且基于逐步回归方法确定的调度函数相关因子可以满足调度需求,能够用于指导梯级水库运行。

[关键词] 梯级水库;联合调度;调度函数;逐步回归方法

[中图分类号] TV697.1⁺2

[文献标志码] A

[文章编号] 1671-9387(2014)12-0221-06

Application of characterization form of joint dispatching function for cascade reservoirs

ZHANG Yong-yong¹,JIANG Jin^{2a},WU Cheng-guo³,HUANG Qiang^{2b}

(1 Yellow River Engineering Consulting Co.,Ltd,Zhengzhou,Henan 450003,China;2 a Hi-Tech College,

b Institute of Water Resources and Hydro-electric Engineering,Xi'an University of Technology,Xi'an,Shaanxi 710048,China;

3 Hefei University of Technology,Hefei,Anhui 230009,China)

Abstract: **【Objective】**Aiming at the deficiency of joint dispatching functions for cascade reservoirs,an effective characterization form of joint dispatching function was proposed to improve the optimal operation of cascade reservoirs.**【Method】**By systematic researching on the characterization form of joint dispatching functions, the decision variables and influences of relevant factors were analyzed,and the stepwise regression method was applied to fit and choose the relevant factors. The proposed characterization form was then applied in Wujiang cascade reservoirs.**【Result】**Using the proposed characterization form for joint dispatching function of cascade reservoirs,the joint dispatching function of cascade reservoirs using average outflow within the prescribed time as the decision variable were obtained. Taking Wujiang cascade reservoirs as example,long series data validation showed that the average annual energy output increased by 1.443 billion kW·h and guaranteed output increased to 2 431.9 MW. The power generation efficiency of cascade reservoirs was effectively improved.**【Conclusion】**The relation between the decision variables and each element of reservoirs was effectively reflect by the proposed characterization form of joint dispatching functions,and the relevant factors of joint dispatching functions were decided by the stepwise regression meth-

[收稿日期] 2013-11-02

[基金项目] 国家“十二五”科技支撑计划项目(2013BAC10B02);国家自然科学基金项目(50709027)

[作者简介] 张永永(1982—),男,河南灵宝人,博士,主要从事水资源规划及配置研究。E-mail:yobrv@sina.com

od, which could satisfy the dispatching demand and guide the operation of cascade reservoirs.

Key words: cascade reservoirs; joint operation; dispatching function; stepwise regression

梯级水库联合调度规律作为指导梯级水库实际运行的重要工具,是水电系统日常运行和管理的基础,更是发挥梯级水库综合效益的重要保障。水库调度规律与入库径流过程密切相关,调度规律的制定主要是基于历史径流系列,随着水库优化调度技术的发展,众多学者对水库调度开展了大量的研究^[1-3],取得了丰富的研究成果。但到目前为止,对于梯级水库联合调度规律的认识还不完善,尤其对梯级水库联合调度规律的研究尚未形成一套完整有效的理论体系,大多数研究都是基于梯级水库优化调度成果分析模拟确定其调度规律。梯级水库联合调度规律的表征形式有调度图、调度规则和调度函数,水库调度图可以直观地指导梯级水库调度,调度规则可以清晰地给出梯级水库如何运行才能达到最优运行效果,调度函数则给出了水库出库或出力与其他水库运行要素间的直接关系,可以灵活地指导梯级水库优化运行。针对水库调度图及调度规则的研究成果^[4-6]已较为成熟,且有其独立的理论支撑,虽然对调度函数表征形式也有一定的研究^[7-9],但并未系统地给出调度函数的表征形式以及相关因子的选择方法,合理确定调度函数对于指导梯级水库科学合理调度、协调防洪和兴利的矛盾、最大限度地发挥梯级水库的综合效益具有重要作用。

结合以往研究成果^[10]可以发现,水库长系列来水按照梯级水库确定性优化调度模型得出的长期优化调度成果,隐藏着丰富的水库调度运行信息,通过挖掘决策属性(如水库出库或出力)与各运行要素属性(如入库流量、时段初水位等)间的隐含内在联系,可采用一定的数学方法来表征这种潜在关系。基于此,本研究拟通过数学函数形式系统探讨调度函数的有效表征形式,分析调度函数决策变量以及相关因子选择的方法,应用逐步回归方法拟合和选择调度函数的相关因子,并通过实例对所确定的调度函数的合理性和可行性进行验证,以期对梯级水库联合调度中调度函数的选择提供参考。

1 改进的调度函数表征形式

梯级水库确定性优化调度解决了水库来水已知前提下的优化调度问题,但往往梯级水库调度多关注未来来水条件下的调度问题,由于未来来水的不确定性以及当前水库中长期径流预报精度不高,水

库来水不能直接用于优化调度模型,将水库优化调度成果直接用于指导其实际运行,目前条件下仍存在一定难度。水库确定性优化调度是对来水已知条件下水库调度运行的模拟,调度结果体现了水库优化调度的运行策略,从调度结果中可以发现水库系统中每个时段的最优决策属性(水库出库或出力)与时段初状态(水库水位或水库蓄水量)、面临时段来水以及后期(余留期)来水等运行要素间存在一定关系,可由式(1)来表征:

$$u_t = f_t(V_{t-1}, X_t, X_{t+1}, \dots, X_T). \quad (1)$$

式中: u_t 为第 t 时段水库决策; V_{t-1} 为第 t 时段水库时段初状态(水库水位或水库蓄水量); X_t 为第 t 时段面临时段来水; $X_{t+1}, \dots, X_T$ 为第 t 时段水库后期(余留期)来水。如果当已知水库时段初状态、面临时段来水和后期来水过程时,就可以直接获得水库决策,而不必通过优化方法来确定水库决策。

由式(1)可以看出,函数 f_t 的获取最为关键,但式(1)中自变量过多,很难具体写出函数 f_t 。即使通过一定方法确定了函数 f_t ,但由于中长期径流预报精度不高^[11-12],由函数 f_t 确定的决策也不一定能真正反映水库运行策略。目前,在调度过程中对于面临时段来水的预估(或预报)已积累了一定的经验,可以直接用于水库调度运行,因此,可对式(1)进行简化处理,有:

$$u_t = f_t(V_{t-1}, X_t). \quad (2)$$

式(2)虽然准确表征了水库决策属性与水库初始状态、面临时段来水间的联系,但尚不清楚调度函数 f_t 应采取何种函数形式才能准确表述其中隐藏的规律。一般来说, f_t 是非线性的,但是非线性函数关系处理起来较为复杂,且非线性函数种类繁多,究竟属于哪一类的非线性函数以及用哪一类非线性函数来表征,也还难以确定。因此,众多学者针对调度函数及其表征形式开展了大量研究^[8,13-14],结果表明:在一定范围内,任一光滑的非线性函数,可用线性函数(切线或切面)来近似描述。因此,可将调度函数简化为易于处理的线性函数,目前普遍采用的调度函数表征形式为:

$$u_t = a_t X_t + b_t V_{t-1} + d_t. \quad (3)$$

式中: a_t, b_t, d_t 为第 t 时段待求参数, X_t 为第 t 时段面临时段来水, V_{t-1} 为第 t 时段水库时段初状态(水库水位或水库蓄水量)。

式(3)虽然较好地表征了水库的内在隐含关系,但其仅反映了面临时段来水及水库时段初状态 2 个运行要素属性。由于水库调度运行过程极其复杂,影响水库决策属性的其他属性因子众多,式(3)将难以反映水库的实际运行状态。因此,还必须提取影响水库面临时段决策属性的其他相关因子。由此式(3)可进一步改进为:

$$u_t = a_t X_t + b_t V_{t-1} + cR + d_t. \quad (4)$$

式中: R 为除面临时段来水 X_t 与水库时段初状态 V_{t-1} 外的其他相关因子, c 为其他相关因子的系数。

2 决策变量与相关因子的选择

2.1 决策变量选择

通过分析确定性梯级水库优化调度结果,结合调度运行人员在实际水库调度运行中的需求,可以采用时段平均出库流量(时段平均出库水量)或时段平均出力,也可以采用时段末水库蓄水量(时段末水位)作为决策变量。大量实践^[9,15]表明:从调度函数检验结果的有效性来看,决策变量取时段末水库蓄水量(水位)较好;从调度决策的直观、简单实用方面考虑,决策变量取时段平均出库流量(时段平均出库水量)或时段平均出力较好;当水库出库流量中包含综合用水量时,决策变量取时段平均出库流量(时段平均出库水量)较好。因此,调度函数决策变量应根据实际具体情况,综合考虑满足调度函数有效性等方面,确定决策变量 u_t 的合适表现形式。

综合大量实践结果^[9,15]可以看出:一般以时段平均出力作为决策变量,主要是因为以时段平均出力为决策变量进行拟合时,误差相对较小;同时,时段平均出力可以直接用于指导水库运行,便于操作。但在水库运行的某些时段,如供水期末或汛末,水库的时段末水位大多会处于死水位或正常蓄水位,此种情形下,则建议采用时段末水位为决策变量,而其他时段由于水位误差带来的实际运行误差远远超过出力,建议不采用时段末水位为决策变量。

因此,选取合适的决策变量可以直观地为调度人员提供决策信息,指导梯级水库调度运行。决策变量的选择务必能够显著反映水库运行要素与水库决策属性间的关系,需要结合决策属性与水库要素间的相关关系以及梯级水库实际调度来综合确定。

2.2 相关因子选择

相关因子一般有 2 种类型:时间因子和空间因子。时间因子是指水库自身所处的状态(如时段初水位和天然来水);空间因子是指与水库有联系的梯

级其他水库所处的状态。因此,从时间因子和空间因子两方面着手来确定的待选相关因子应能较好地反映水库实际状态。同时,有关水库调度的众多研究成果^[7-9,14]表明:水库的天然来水和时段初水位是影响水库决策的 2 个重要因子;其次,水库前一时段的运行要素对水库运行调度也有显著的影响。在综合分析水库调度研究成果的基础上,发现时段入库流量和时段初水位的乘积与决策变量关系密切,其对决策变量的影响也较大。因此,引入其乘积项作为相关因子。

相关因子是影响调度函数的重要因素,是表征调度函数的难点,必须分析决策变量与各个因素间的相关关系,结合水库实际调度来综合确定。经对水库调度成果的分析初步确定的相关因子有:面临时段水库入库流量、面临时段水库初水位、面临时段水库入库流量的平方、面临时段水库初水位的平方;前一时段水库入库流量、前一时段水库初水位、前一时段水库入库流量的平方、前一时段水库初水位的平方;面临时段水库入库流量与面临时段水库初水位的乘积、面临时段水库入库流量与前一时段水库初水位的乘积、前一时段水库入库流量与面临时段水库初水位的乘积、前一时段水库入库流量与面临时段水库初水位的乘积。

对于初步确定的相关因子与决策属性之间的相关程度,是否能够满足调度函数的需求,还需通过一定的拟合方法来确定。

3 调度函数的拟合方法

由前文确定的众多相关因子构成了调度函数的待选自变量系列,对于任何一个时段,并不是每一个待选相关因子与决策变量都存在显著的相关关系。因此,各时段调度函数选择何种相关因子将显得至关重要,它不仅关系到调度函数的拟合效果,还影响着调度函数的实际应用效果。

针对待选相关因子的选择问题,本研究采用逐步回归方法对选定的调度函数进行拟合。同时,对相关关系差的待选因子进行剔除,最终确定相关关系好的相关因子。

采用逐步回归方法对变量进行逐步筛选,筛选过程中有进有出,其基本思想是考虑所有相关变量对决策变量的相关程度大小,按从大到小的顺序,逐个引入回归方程,对已选入的相关变量进行检验,当已被引入的相关变量由于新相关变量的引入而失去重要性时,则需要从回归方程中剔除该相关变量。

其主要计算步骤如下:

Step 1: 确定 F 检验值, 引入第 1 个变量。应用逐步回归方法分析之前, 首先必须对每个变量进行 F 检验, 以作为引入或剔除变量的标准。

Step 2: 计算已引入的 l 个变量的偏回归平方和 $V_i (i=1, 2, \dots, l)$ 。将回归方程平方和与剔除该变量后的回归方程平方和之差称为某一变量的偏回归平方和 V_i , 可将其看作是該变量对回归方程的贡献。

Step 3: 对已引入的变量, 检查是否存在需要剔除的不显著变量。从已引入的自变量中选取 1 个具有最小偏回归平方和 V_i 的变量, 计算其 F 检验值, 若 $F_1 \leq F$, 表明该变量不显著, 需从回归方程中剔除, 则计算转至 Step 4。若 $F_1 > F_2$, 表明不需剔除该自变量, 应考虑从未引入的自变量中选取具有最大 F 检验值的 1 个, 若 $F > F_1$, 表明该变量显著, 需将其引入回归方程中, 则计算转至 Step 4; 若 $F \leq F_1$, 表明已无自变量可引入回归方程, 则计算结束。

Step 4: 剔除或引入一个变量后, 利用回归方程的相关系数矩阵进行消去变换。

Step 5: 引入新的变量, 重复过程 Step 2~Step 4, 直至所有变量都被引入并检验。

4 实例分析

通过构建梯级水库联合调度模型对乌江流域 1951-05—2007-04 共 56 年的长系列资料进行计算

$$\begin{aligned} Q_{\text{Out}}(m, t) = & a_0(t) + a_1(t)Z_{\text{Sta}}(m, t) + a_2(t)Z_{\text{Sta}}(m, t)^2 + a_3(t)Q_{\text{In}}(m, t) + a_4(t)Q_{\text{In}}(m, t)^2 + \\ & a_5(t)Z_{\text{Sta}}(m-1, t) + a_6(t)Z_{\text{Sta}}(m-1, t)^2 + a_7(t)Q_{\text{In}}(m, t-1) + \\ & a_8(t)Q_{\text{In}}(m, t-1)^2 + a_9(t)Z_{\text{Sta}}(m, t)Q_{\text{In}}(m, t-1) + a_{10}(t)Z_{\text{Sta}}(m, t)Q_{\text{In}}(m, t) + \\ & a_{11}(t)Z_{\text{Sta}}(m-1, t)Z_{\text{Sta}}(m, t) + a_{12}(t)Q_{\text{In}}(m, t)Q_{\text{In}}(m-1, t) + \\ & a_{13}(t)Z_{\text{Sta}}(m-1, t)Q_{\text{In}}(m, t-1) + a_{14}(t)Z_{\text{Sta}}(m-1, t)Q_{\text{In}}(m, t)。 \end{aligned} \quad (6)$$

式中: $Q_{\text{Out}}(m, t)$ 为第 m 个水库第 t 时段的出库流量; $Q_{\text{In}}(m, t)$ 为第 m 个水库第 t 时段的入库流量(面临时段); $Q_{\text{In}}(m, t-1)$ 为第 m 个水库第 $t-1$ 时段的入库流量(前一时刻); $Z_{\text{Sta}}(m, t)$ 为第 m 个水库第 t 时段的初水位(面临时段); $Z_{\text{Sta}}(m, t-1)$ 为第 m 个水库第 $t-1$ 时段的初水位(前一时刻); $a_0, a_1, \dots, a_{14}$ 为各相关因子的系数。

对以上乌江流域梯级水库的优化调度函数, 采用逐步回归方法来确定梯级调度函数形式的各个系数。由于流域水库较多且计算结果也较多, 表 1 仅给出洪家渡水库调度函数各月系数的计算结果。

4.3 调度结果与分析

为了分析所确定的梯级水库联合调度函数能否

并获取调度结果, 根据前文确定调度函数的方法选择调度函数的决策变量和相关因子, 最终获取梯级水库联合调度函数, 采用长系列资料对确定的调度函数进行验证, 为用于指导梯级水库运行提供依据。

4.1 梯级水库联合调度模型

乌江梯级水库是以发电为主的水库, 为了获取发电量最大条件下的梯级水库联合调度函数, 建立梯级水库发电量最大模型, 其目标函数为:

$$\max E = \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M K(m)Q(m, t)h(m, t)\Delta t。 \quad (5)$$

式中: E 为调度期内的发电量; t, T 为调度期内时段编号和总时段数; m, M 为水库编号和水库总个数; $K(m)$ 为水库 m 的综合出力系数; $Q(m, t)$ 为水库 m 在时段 t 的发电流量; $h(m, t)$ 为水库 m 在时段 t 的发电净水头; Δt 为计算时段长度, 计算采用时段为月。

4.2 调度函数

采用逐步回归方法对梯级水库发电量最大模型调度结果中的各运行要素进行相关分析, 结果表明, 若使用时段平均出力作为调度函数的决策变量, 其与各相关因子间的相关关系不明显, 而时段平均出库流量与各相关因子间相关关系显著, 结合调度人员的调度需求, 确定以时段平均出库流量作为调度函数的决策变量, 则最终确定采用式(6)表征乌江流域梯级水库的优化调度函数。

满足梯级水库联合调度的需求, 并最终用于指导梯级水库优化运行, 需对确定的梯级水库联合调度函数的合理性进行检验。应用 1951-05—2007-04 共 56 年的长系列资料对梯级水库联合调度函数进行模拟计算, 得到梯级水库调度函数检验结果的统计指标如表 2 所示。从表 2 验证结果统计指标来看, 采用本研究确定的梯级水库调度函数进行梯级水库调度运行时, 梯级水库多年平均发电量较设计值增加了 14.43 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$, 保证出力提高到 2 431.9 MW, 主要是因为通过梯级水库联合补偿调节, 充分发挥了多年调节水库“蓄丰补枯”的作用, 可以保证下游水库有较为均匀的入库水量, 大大降低了梯级系统出力在枯水期发生破坏的几率。

表 1 洪家渡水库调度函数的系数

Table 1 Operation function coefficients of Hongjiadu Reservoir

系数 Coefficient	月份 Month					
	1	2	3	4	5	6
a_0	−1 751 175	−1 292 473	−1 848 140	−358 007	124 247.9	146 990.1
a_1	1 826.151	2 366.365	3 275.14	635.970 4	−225.894	−264.163
a_2	−0.254	−1.081	−1.451	−0.282	0.103	0.119
a_3	−2.825	1.866	−5.108	1.843	−0.784	0.099
a_4	−0.061	−0.13	−0.081	−0.011	0	0
a_5	0	0	0	0	0	0
a_6	0	0	0	0	0	0
a_7	4.532	−1 213.83	166.412	68.389	36.223	−12.478
a_8	−0.097	−0.153 8	−0.206	0.044	−0.004	−0.003
a_9	−0.003	1.066 8	−0.138	−0.067	−0.031	−0.013
a_{10}	0	0	0	0	0	0
a_{11}	0	0	0	0	0	0
a_{12}	0.194	0.295	0.248	0.004	0	−0.002
a_{13}	0	0	0	0	0	0
a_{14}	0	0	0	0	0	0

系数 Coefficient	月份 Month					
	7	8	9	10	11	12
a_0	232 302.2	223 244	−1 658 746	−1 662 989	−2 7619.5	−58 870.13
a_1	−404.146	−413.756	2 902.045	2 910.026	19.115	72.511
a_2	0.176	0.191	−1.269	−1.273	0.004	−0.018
a_3	−0.974	1.111	0.063	0.934	0.999	0.996
a_4	0	0	0	−0.001	0	0
a_5	0	0	0	0	0	0
a_6	0	0	0	0	0	0
a_7	−109.581	−8.296	−27.304	−86.1	0.294	−1.51
a_8	0	0.001	0	0	0	0
a_9	0.096	0.006	0.024	0.076	0	0.001
a_{10}	0	0	0	0	0	0
a_{11}	0	0	0	0	0	0
a_{12}	−0.005	−0.001	0.001	0.001	0	0
a_{13}	0	0	0	0	0	0
a_{14}	0	0	0	0	0	0

注:表中某些月份系数为 0 的项表示该因子相关性弱,予以剔除。

Note:Zero means that the factors have week correlation and they are eliminated.

表 2 梯级水库调度函数检验结果的统计指标

Table 2 Results of inspection based on dispatching function of cascade reservoirs

指标 Index	项目 Projects	洪家渡 Hongjiadu	东风 Dongfeng	索风营 Suofengying	乌江渡 Wujiangdu	构皮滩 Goupitan	思林 Silin	沙沱 Shatuo	梯级 Cascade reservoirs
多年平均发电量/(亿 kW·h) Multi-year average energy production	设计值 Design	15.59	29.58	20.11	41.40	96.67	40.51	45.52	289.38
	计算值 Calculate	18.13	30.52	21.03	43.34	103.25	41.53	46.01	303.81
	增减 Fluctuate	2.54	0.94	0.92	1.94	6.58	1.02	0.49	14.43
保证出力/MW Guaranteed output	设计值 Design	159.1	100.0	166.9	254.0	746.4	345.1	322.9	2 094.4
	计算值 Calculate	157.3	243.0	160.1	315.0	853.0	342.3	361.2	2 431.9
	增减 Fluctuate	−1.8	143.0	−6.8	61.0	106.6	2.8	38.3	337.5

由表 2 还可看出,梯级“龙头水库”洪家渡的保证出力有所降低,这是因为在调度运行过程中,若遇到枯水年份,洪家渡水库首先补水以满足梯级水库出力要求,导致洪家渡水库保证出力减少,但却保证了梯级其他水库长期位于高水头运行,提高了东风、乌江渡和构皮滩的保证出力,增加了梯级水库多年平均发电量。

5 结 论

梯级水库联合调度函数是体现梯级水库调度规律的一种有效形式。本研究系统分析了梯级水库调度函数的表征形式,并对调度函数的决策变量及相关因子的选择进行了研究,结合乌江流域梯级水库调度需求,确定了梯级各水库的调度函数,应用逐步回归方法对调度函数进行拟合得到乌江流域梯级各水库优化调度函数,并采用长系列资料对梯级联合调度函数进行了验证。取得以下主要结论:

(1)梯级水库联合调度函数的表征形式能够准确反映水库各要素之间的联系,通过对调度函数决策变量与相关因子的选择分析,确立的梯级水库联合调度函数能够满足调度需求。

(2)结合乌江流域梯级水库调度需求及决策变量与相关因子的相关性分析,确定了乌江流域梯级水库调度函数的表征形式,形成以时段平均出库流量为决策变量的乌江流域梯级水库联合调度函数。

(3)利用长序列资料,对用逐步回归方法确定的乌江流域梯级水库联合调度函数进行了验证,表明利用所建立的调度函数进行梯级水库调度运行时,梯级水库多年平均发电量较梯级设计发电量增加 14.43 亿 kW·h,保证出力提高到 2 431.9 MW,说明梯级水库调度函数能够用于指导梯级水库优化运行,增加梯级水库的发电效益。

[参考文献]

- [1] Houck M H, Cohon J L, Reville C S. Linear decision rule in reservoir design and management; XI. Incorporation of economic-efficiency benefits and hydroelectric energy generation [J]. Water Resources Research, 1980, 16(1): 196-200.
- [2] 董子敖. 水库群调度与规划的优化理论和应用 [M]. 济南: 山东科学技术出版社, 1989.
Dong Z A. Application and theory for dispatching and planning of cascade reservoirs [M]. Ji'nan: Shandong Science and Technology Press, 1989. (in Chinese)
- [3] 冯尚友. 水资源系统工程 [M]. 武汉: 湖北科学技术出版社, 1991.
Feng S Y. Water resources system engineering [M]. Wuhan: Wuhan Science and Technology Press, 1991. (in Chinese)
- [4] Jay R L. Derived-power production and energy drawdown rules for reservoirs [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2000, 126(2): 108-114.
- [5] Haddad O B, Afshar A, Marino M A. Honey-bee mating optimization (HBMO) algorithm in deriving optimal operation rules for reservoirs [J]. Journal of Hydroinformatics, 2008, 10(3): 257-264.
- [6] 杨凤英. 梯级水电站群优化调度图研究及应用 [D]. 辽宁大连: 大连理工大学, 2009.
Yang F Y. The study and application for optimal operation chart of cascade reservoirs [D]. Dalian, Liaoning: Dalian University of Technology, 2009. (in Chinese)
- [7] 左吉昌. 水库优化调度函数研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
Zuo J C. Research on optimal operation function of reservoir [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007. (in Chinese)
- [8] 王东泉. 基于遗传算法的水库调度函数研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
Wang D Q. Research on the function of reservoir operation based on genetic algorithms [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007. (in Chinese)
- [9] 丁杰华. 水电站水库群长期运行规律研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2005.
Ding J H. Study on long-term operation rule of hydroelectric station system [D]. Wuhan: Wuhan University, 2005. (in Chinese)
- [10] 吴伯杰, 李承军, 查大伟. 基于改进 BP 神经网络的水库调度函数研究 [J]. 人民长江, 2010, 41(10): 59-62.
Wu B J, Li C J, Zha D W. Study on reservoir operation function based on improved BP neural network [J]. Yangtze River, 2010, 41(10): 59-62. (in Chinese)
- [11] 姚华明, 茅 铭, 钟 琦, 等. 水库群最优调度函数的研究 [J]. 水电能源科学, 1990, 8(1): 85-90.
Yao H M, Mao M, Zhong Q, et al. Reservoir group optimal dispatch function research [J]. Hydroelectric Energy, 1990, 8(1): 85-90. (in Chinese)
- [12] 裴杏莲, 汪同庆, 戴国瑞, 等. 调度函数与分区控制规则相结合的优化调度模式研究 [J]. 武汉水利电力大学学报, 1994, 27(4): 382-387.
Qiu X L, Wang T Q, Dai G R, et al. Study on an optimizing regulation model combined zonal control rule with regulation functions [J]. Journal of Wuhan University of Hydro and Electric Engineering, 1994, 27(4): 382-387. (in Chinese)
- [13] 权宪章, 李承军, 张士军, 等. 水电站线性调度规则研究 [J]. 华中理工大学学报, 1999, 27(12): 36-38.
Quan X Z, Li C J, Zhang S J, et al. A study on the optimal linear dispatching rules for hydropower station [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 1999, 27(12): 36-38. (in Chinese)
- [14] 李承军, 陈毕胜, 张高峰, 等. 水电站双线调度规则研究 [J]. 水力发电学报, 2005, 24(1): 11-15.
Li C J, Chen B S, Zhang G F, et al. Study on bilinear dispatching rule of hydropower station [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2005, 24(1): 11-15. (in Chinese)
- [15] 周 婷. 梯级水电站调度函数以及期货电量分解研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2008.
Zhou T. Dispatch function and future electricity decomposition research in cascade hydropower station [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2008. (in Chinese)