

文章编号: 1006-4710(2011)03-0275-05

均方根误差最小准则的水库群典型年选取

孙东永¹, 王义民¹, 黄强¹, 张莉¹, 肖燕²

(1. 西安理工大学 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 陕西 西安 710048;

2. 贵州乌江水电开发有限责任公司, 贵州 贵阳 550002)

摘要: 由于时空分布、气候、下垫面等水文特性的异同, 流域梯级各水库典型年不完全同步, 较难选取合理、统一且具有代表性的流域水文典型年。将均方根误差最小准则应用于流域典型年的选取, 以乌江流域7级梯级水库为例选择流域丰、平、枯典型年, 研究表明, 均方根误差最小准则能够统筹考虑各个电站的实际情况, 选取的各种频率下典型年与设计年径流量平均相对误差绝对值均小于5%, 是一种可靠的流域梯级水库典型年选择方法。

关键词: 乌江流域; 典型年; 均方根误差最小准则; 赤池准则

中图分类号: TV11 文献标志码: A

The Selection of Typical Years of Reservoir Group Based on the Smallest Criterion of Root-Mean-Square Error

SUN Dongyong¹, WANG Yimin¹, HUANG Qiang¹, ZHANG Li¹, XIAO Yan²

(1. Key Lab of Northwest Water Resources and Environment Ecology of MOE, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Wujiang Hydropower Development Co. Ltd. of Guizhou, Guiyang 550002, China)

Abstract: Because of the similarities and differences of hydrological characteristics in spatial-temporal distribution, climate and underlying surface etc among the cascade reservoirs in the watershed, the watershed hydrological typical year incomplete synchronization, so it's difficult to select the rational and typical and unified hydrological year in the watershed. Root mean square error smallest criterion is used in choosing the method of basin typical year, the 7 cascade reservoirs in the Wujing river valley are taken as the example to carry out the selection of typical years of water harvest, average and drought in the Wujing river valley. Research results indicate that the smallest criterion of Root-mean-square error can give overall consideration to the actual conditions of each hydropower station. The absolute value of average relative error of each runoff flow between the typical year and the designed year under the selected frequencies of various kinds is less than 5% so that this is the reliable method to select the cascade reservoir typical year in the watershed.

Key words: Wujiang river basin; typical years; root mean square error(RMS); akaike information criteria(AIC)

对于流域梯级水库群优化调度来说^[1], 寻找合适的流域典型年对于梯级效益最大化的影响非常重要, 由于流域内各水库的地理特性, 时空分布, 气象因素等变化较大, 造成各水库之间水文特性的不完

全同步, 很难找出符合流域水库群调度的流域典型年, 一般的做法是采取流域上游龙头控制站, 以其典型年来代替流域的典型年进行水库群的调度计算, 由于各站的不完全同步性, 选取的典型年不能很好

收稿日期: 2011-03-28

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目(2011CB403306); 教育部重点研究资助项目(209125); 陕西省教育厅科技资助项目(09JK664)。

作者简介: 孙东永(1981-), 男, 山西应县人, 博士生, 研究方向为水资源系统工程。E-mail: sun2002_ren@163.com。

黄强(1958-), 男, 四川梓潼人, 教授, 博导, 主要从事水资源系统工程研究。E-mail: wresh@mail.xaut.edu.cn。

地兼顾各个电站的特性,给水利水能计算带来较大的误差,无法合理有效地对梯级水库群进行优化调度,最大化发挥梯级效益。

单站典型年的选取较为成熟,通常采用频率法,近年来随着模糊水文学的发展,一批学者致力于模糊识别的方法进行典型年的选取,邵淑彩采用模式识别法来对系列水沙年进行分类,得出各种情况下典型水沙年选择的具体方法^[2];田峰巍等考虑年水量、年内径流分配、水库调节能力等因素之间的相关关系对年径流系列进行聚类分析,改进了典型年的选择^[3];文献[4]针对典型年选择中月分配计算受人为主观性影响较大,提出模糊相似优选比法来进行典型年的选择;文献[5]提出了一种基于模糊聚类迭代模型的典型水文年选取研究,指标权重通过迭代计算,参数不受人为影响,改进了典型年的选择。这些研究主要是针对单站来进行典型年的选取,对于多站的情况研究基本很少^[6]。本文将均方根误差 RMS(root mean square error)最小准则法引入到流域典型年的选取,通过乌江梯级电站为实例进行研究,并检查其合理性,以期对梯级水库群调度提供依据。

1 均方根误差最小准则选择水库群典型年基本原理

流域典型年选择基本思路为:首先进行各站径流分布函数的确定,依据选定的分布函数计算各站不同频率下 P 对应的设计年平均流量,再计算设计年平均流量与历年实际年平均流量差值,求出各站差值的均方根误差 e_{RMS} 值,历年最小 e_{RMS} 值即为流域典型年。

1.1 设计年平均流量的计算

水文计算中,一般采用皮尔逊 III(P-III)型分布频率曲线来计算不同设计频率 P (保证率)下设计年平均流量,为了更加准确的计算得出梯级水库群的典型年,本研究选择 P-III 分布、Gumbel 分布和对数正态分布进行分析比较,以期选出拟合更好的分布。

P-III 型分布下不同设计频率 P 对应的设计平均流量的计算公式如下:

$$f(x) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} (x - a_0)^{\alpha-1} e^{-\beta(x-a_0)} \quad (1)$$

式中, $\Gamma(\alpha)$ 为 α 的伽马函数, $\alpha = \frac{4}{C_s^2}$, $\beta = \frac{2}{\bar{x}C_v C_s}$,

$$a_0 = \bar{x} \left(1 - \frac{2C_v}{C_s}\right)。$$

耿贝尔(Gumbel)分布下不同设计频率 P 对应的设计平均流量的计算公式如下:

$$f(x) = ae^{-y-e^{-y}} \\ F(x) = e^{-e^{-y}} \quad (2)$$

式中, $y = a(x - b)$, a 为尺度参数: $a = 1.285/\sigma_x > 0$; b 是分布密度的众数: $b = \bar{x} - 0.4501\sigma_x$ 。

对数正态分布下不同设计频率 P 对应的设计平均流量的计算公式如下^[7]:

$$f(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y} e^{-\frac{(y-\bar{y})^2}{2\sigma_y^2}} \quad (3)$$

式中, $y = \ln x$; \bar{y}, σ_y 分别用 $\hat{y}, \hat{\sigma}_y$ 来估计: $\hat{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln x_i$, $\hat{\sigma}_y^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\ln x_i - \bar{y})^2$ 。

1.2 均方根误差 e_{RMS}

依据频率分布曲线计算出流域各站不同设计频率 P 对应的设计年径流量,求出每年各站的实际年径流量与设计年径流量的差值平方和,再将各站同年的差值平方和求和并计算均方根误差 e_{RMS} 值,最小的 e_{RMS} 所对应的年份即为该频率下流域初选的典型年,某一设计频率 P 下 e_{RMS} 计算公式如下:

$$e_{\text{RMS}i} = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{j=1}^k (Y_{ij} - X_j)^2} \quad (4)$$

式中, k 表示测站总数, i 为年份, j 表示测站, Y_{ij} 表示该设计频率 P 下 i 年 j 测站实际径流量, X_j 表示该设计频率 P 下 j 测站设计年径流量。

1.3 结果合理性检验

为检验所选流域典型年的合理性,采取绝对误差和相对误差的方法进行检验,以选出的各测站不同频率下的设计径流量和实际代表年的年径流量进行比较,绝对误差和相对误差公式如下:

$$\text{绝对误差} = \text{设计年径流量} - \text{实际年径流量} \quad (5)$$

$$\text{相对误差} = \frac{\text{设计年径流量} - \text{实际年径流量}}{\text{设计年径流量}} \times 100\% \quad (6)$$

当某一频率下设计年径流量和实际年径流量的绝对误差小于 5% 时,即认为方法可行。

2 实例分析

乌江是长江上游南岸最大的一条支流。干流由上到下规划洪家渡、东风、索风营、乌江渡、构皮滩、思林、沙沱共 7 座电站。为了实现流域水电站群最优经济运行,需进行梯级 7 个水电站联合发电优化调度工作,选取不同调度时段对多年长系列以及不同典型年入库过程进行调节计算,以期归纳总结不

同控制期梯级电站蓄放水次序以及中长期最优调度策略和规则。在进行梯级水库联合调度的过程中，常选择若干典型年作为长系列径流资料的代表，既减少了计算量又能取得较好的效果。

2.1 流域各站设计年平均流量的计算

分别对流域各站进行分布函数的确定。P-III型分布、Gumbel分布和对数正态分布参数估计见表1，曲线拟合结果见图1(仅给出洪家渡与构皮滩)。

表1 乌江流域各站径流分布参数估计

Tab.1 Distribution parameters estimation of the annual runoff in the Wujiang River

站点	P-III型分布			Gumbel分布		对数正态分布	
	$\bar{x}/(m^3/s)$	C_v	C_s	a	b	$\hat{\sigma}_y$	$\hat{\sigma}_y$
洪家渡	147	0.22	0.35	0.0384	132.29	4.97	0.057
东风	334	0.21	0.35	0.0189	300.19	5.78	0.047
索风营	388	0.22	0.32	0.0162	353.07	5.94	0.046
乌江渡	474	0.23	0.31	0.0128	430.23	6.14	0.050
构皮滩	703	0.20	0.33	0.0083	634.06	6.53	0.052
思林	831	0.22	0.40	0.0076	754.42	6.70	0.043
沙沱	944	0.21	0.48	0.0068	858.85	6.83	0.040

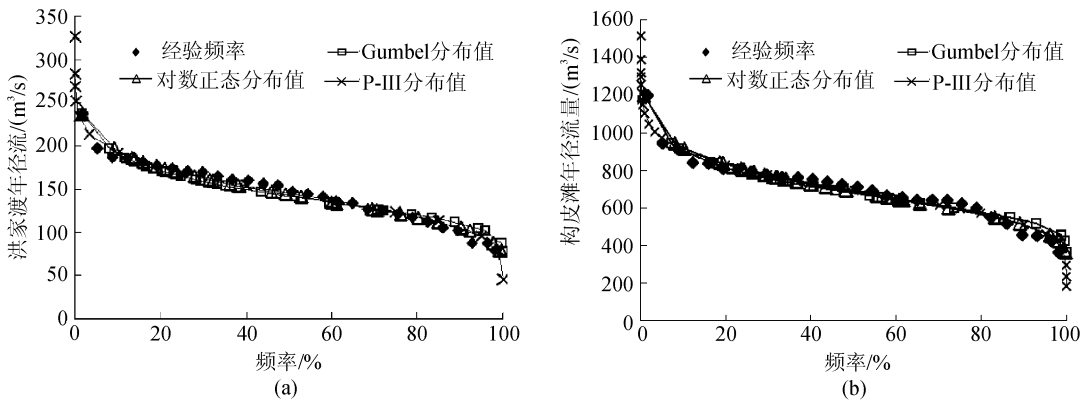


图1 乌江流域洪家渡站和构皮滩站年径流频率曲线拟合结果

Fig.1 Annual runoff frequency curve of Hongjiadu and Goupitan in Wujiang River

由图1中可以看出，各分布函数的拟合均较好。为选取各站的分布函数，引入曲线拟合优度概念^[8]，采用AIC最小准则进行评定优选。

赤池最小准则AIC(Akaike information criteria)指出当AIC值达到最小值时模型最优，公式如下：

$$AIC = n \lg(D^2) + m \quad (7)$$

式中， n 为样本容量， m 为独立参数个数， D 为各曲线理论与经验频率曲线拟合度，计算公式如下：

$$D = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P(i) - P_0(i))^2} \quad (8)$$

式中， P_0 为样本经验频率， P_0 计算公式为：

$$P_0 = \frac{m}{n + 1} \quad (9)$$

各站各种分布函数拟合结果见表2，从表中可以看出，洪家渡、东风、索风营、乌江渡，构皮滩采用P-III型分布最为合适，而思林、沙沱采用对数正态分

布较为合适。根据确定之后的分布函数，计算流域各站不同频率下的设计年平均流量，结果见表3。

表2 乌江流域各站分布函数拟合优度检验表

Tab.2 Fitting effect of frequency curve with different function of annual runoff in Wujiang River

站点	P-III型分布		Gumbel分布		对数正态分布	
	e_{RMS}	AIC	e_{RMS}	AIC	e_{RMS}	AIC
洪家渡	3.56	144.18	6.34	208.86	4.40	167.82
东风	6.42	210.27	9.07	248.92	6.86	217.73
索风营	5.81	199.11	8.74	244.81	6.53	212.09
乌江渡	3.10	128.55	7.74	231.16	5.76	198.07
构皮滩	3.84	152.72	6.32	208.49	5.02	182.75
思林	3.86	153.37	5.25	187.63	3.10	128.55
沙沱	3.27	134.61	4.69	174.98	2.93	122.58

表3 流域各站不同频率的设计年平均流量

Tab. 3 The design of different frequency the average flow for basin stations

站点	不同设计频率的年平均流量/(m ³ /s)										
	5%	10%	25%	30%	40%	50%	60%	70%	75%	90%	95%
洪家渡	208	194	169	164	154	146	136	127	122	104	94
东风	450	425	378	367	347	327	312	290	284	247	225
索风营	529	500	443	430	406	385	362	343	328	282	256
乌江渡	655	617	544	526	495	470	441	415	397	339	306
构皮滩	981	934	817	781	736	696	654	612	590	503	454
思林	1152	1071	948	918	867	818	775	728	702	605	549
沙沱	1295	1204	1107	1040	984	928	884	833	805	698	637

2.2 计算各频率下的典型年

根据计算得出的设计年径流量,分别计算设计年平均流量与历年(1951-05—2007-04)实际年平均流量差值,采用公式(4)求出七站差值的均方根误差值,其中历年最小 e_{RMS} 值即为流域典型年,见表4。

表4 各种频率下的水文代表年及 e_{RMS} 检验表Tab. 4 Hydrological representative years of various frequencies and e_{RMS} test

设计频率	水文代表年	e_{RMS} 最小值
5%	1976-05—1977-04	66.59
10%	1976-05—1977-04	44.98
25%	1982-05—1983-04	47.01
30%	1980-05—1981-04	52.49
40%	1955-05—1956-04	50.22
50%	1992-05—1993-04	53.96
60%	1959-05—1960-04	52.63
70%	1978-05—1979-04	50.98
75%	1972-05—1973-04	52.46
90%	1962-05—1963-04	35.26
95%	1989-05—1990-04	51.17

2.3 合理性分析

依据公式(6)、(7)计算各种频率下典型年与设计年径流量的绝对误差与相对误差,计算结果见表5。

从表5可以看出,选出的各种频率下典型年平均相对误差绝对值均小于5%,说明方法可行。最终得出乌江流域1951-05—2007-04典型水文年:丰水年1976-05—1977-04,平水年1998-05—1999-04,枯水年1989-05—1990-04,偏丰年1982-05—1983-04,偏枯年1972-05—1973-04。

表6给出了以上游洪家渡龙头水电站为标准以及下游构皮滩计算的流域典型年。

从表6可以看出,上下游丰、平、枯水文年存在不同步的现象,采用其中任何一个为标准来进行水能计算,将使结果产生较大的偏差,不利于梯级电站效益最大化的实行。

表5 流域各站各种频率典型年与设计年径流相对误差

Tab. 5 Various frequencies of relative error of typical annual flow and design annual flow for basin stations

频率	水文年	各种频率典型年与设计年径流相对误差/%						
		洪家渡	东风	索风营	乌江渡	构皮滩	思林	沙沱
5%	1976-05—1977-04	12.64	4.47	3.42	3.22	4.89	7.13	6.56
10%	1976-05—1977-04	6.20	-1.07	-2.11	-2.79	0.15	0.08	-0.53
25%	1982-05—1983-04	-0.90	-3.61	-1.32	-0.83	1.56	-2.04	0.61
30%	1980-05—1981-04	-0.78	1.68	2.92	0.97	3.48	2.34	1.88
40%	1955-05—1956-04	-10.63	0.99	1.36	-3.75	-1.68	0.92	2.12
50%	1998-05—1999-04	-9.48	-5.06	-3.41	-6.94	0.21	-2.35	-3.05
60%	1959-05—1960-04	2.16	-2.51	-5.67	-8.05	-0.44	0.24	1.01
70%	1978-05—1979-04	-6.64	2.85	1.12	-3.75	-4.99	-1.40	0.57
75%	1972-05—1973-04	8.38	11.03	3.79	0.83	-1.71	0.92	2.48
90%	1962-05—1963-04	-0.85	-0.53	-0.24	-0.09	1.37	0.58	1.37
95%	1989-05—1990-04	6.52	11.74	9.86	-0.44	-0.47	-1.74	-0.82
平均相对误差/%		0.60	1.82	0.88	-1.96	0.22	0.43	1.11

表6 洪家渡和构皮滩为标准计算的流域典型年
Tab.6 The river typical year based on Hongjiadu and Goupitan

测站	丰水年	平水年	枯水年
洪家渡	1983-05—1984-04	1984-05—1985-04	1990-05—1991-04
构皮滩	1996-05—1997-04	1998-05—1999-04	1981-05—1982-04

3 结 论

流域梯级电站联合调度是不仅能发挥水库群之间的库容补偿、水文补偿的作用,获得比单库优化调度更显著的经济效益^[9-10],在进行梯级调度时,合理的流域典型年的选取则显得非常重要。均方根误差 e_{RMS} 最小准则方法是一种简单而合理有效的方法,选出的典型年更具代表性与可靠性,可为流域梯级调度提供依据。但在流域典型的选择过程中,设计年径流量的选取采用的是频率计算的方法,存在着较大的人为主观经验性,故选出的设计年径流量具有一定的误差,故需进一步加大这一方面的研究,以期取得更好的效果。

参考文献:

[1] 万芳,黄强,原文林,等. 基于协同进化遗传算法的水库群供水优化调度研究[J]. 西安理工大学学报,2011,27(2):139-144.
Wan Fang, Huang Qiang, Yuan Wenlin, et al. Research on co-evolutionary genetic algorithm for reservoir optimization water supply dispatching[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2011, 27(2): 139-144.

[2] 邵淑彩. 用模式识别法选取典型水沙年初探[J]. 武汉水力电力学院学报. 1989,22(1):108-113.
Tai Shucui. Preliminary research of selecting typical water—sand year by pattern recognition method[J]. Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering, 1989, 22(1): 108-113.

[3] 田峰巍,颜竹丘. 年径流系列划分的聚类分析方法[J]. 水电能源科学. 1992,(3):162-168.
Tian Fengwei, Yan Zhuqiu. Dividing the typical annual flow series by the hierachical cluster analysis [J]. Water Resources and Power. 1992, (3): 162-168.

[4] 张跟广. 选择典型水沙年的一种新方法——模糊相似优先比法[J]. 陕西水力发电. 1994,(1):17-22.
Zhang Genguang. The method of fuzzy analogy priority rate

in selection of typical year with water sediment[J]. Journal of Shaanxi Water Power. 1994, (1):17-22.

[5] 夏莉敏,张玮. 基于模糊聚类迭代模型的典型水文年选取研究[J]. 武汉理工大学学报:交通科学与工程版, 2009,33(4):695-698.
Xia Limin, Zhang Wei. Study on selection of typical year with water-sediment based on fuzzy clustering iterative model[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2009, 33(4): 695-698.

[6] 唐德善. 黄河流域水文典型年和典型系列优选[J]. 河海大学学报. 1994,22(2):15-19.
Tang Deshan. Optimization of typical hydrologic years and typical series of the yellow river basin[J]. Journal of Hehai University. 1994, 22(2): 15-19.

[7] 马开玉,张耀存,陈星. 现代应用统计学[M]. 北京:气象出版社,2004.

[8] 周家斌,王允宽,杨桂英. 关于预测误差平方和最小准则的几点看法[J]. 数理统计与管理. 1996,15(3):43-46.
Zhou Jiabin, Wang Yunkuan, Yang Guiying. A note on the stepwise algorithm for selecting predictors on the basis of the criterion from prediction sum of squares[J]. Application of Statistics and Management, 1996, 15(3): 43-46.

[9] 原文林,吴泽宁,黄强. 电力市场环境下游级水库发电优化调度的协进化粒子群算法应用研究[J]. 水力发电学报,2011,30(3):65-70
Yuan Wenlin, Wu Zening, Huang Qiang. Application of co-evolutionary particle swarm optimization to the optimized power generation operation of cascade reservoirs based on power market[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2011, 30(3): 65-70

[10] 张双虎. 梯级水库群发电优化调度的理论与实践[D]. 西安:西安理工大学,2007.
Zhuang shuanghu. The Theory and Practise of Cascade Reservoirs Power Generation Optimized Operation [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2007.

(责任编辑 杨小丽)