

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2014.06.002

考虑上游梯级水库群调度的 小南海水电站坝址设计洪水分析

陈甜,董增川,贾本有,黄兴春,钟敦宇

(河海大学水文水资源学院,江苏南京 210098)

摘要:采用同频率地区组成法分析小南海水电站坝址处设计洪水的地区组成,运用BP人工神经网络对坝址河段洪水演进建模,分析不同典型年上游梯级水库群防洪调度对小南海水电站设计洪水的影响。分析结果表明:上游梯级水库群调度对小南海水电站设计洪水的影响明显,尤其对稀遇洪水的削减程度显著;以金沙江来水为主的洪水受梯级水库群防洪调度的影响较大,以岷江来水为主的洪水受梯级水库群防洪调度的影响较小。

关键词:小南海水电站;防洪标准;设计洪水;同频率地区组成法;人工神经网络

中图分类号:TV122⁺.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2014)06-0476-05

Analysis of design flood of dam site of Xiaonanhai Hydropower Station considering flood control operation of upstream cascade reservoir group

CHEN Tian, DONG Zengchuan, JIA Benyou, HUANG Xingchun, ZHONG Dunyu
(College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The same-frequency area composition method was used to analyze the area composition of a design flood of the dam site of the Xiaonanhai Hydropower Station. The flood routing in the river reach of the dam site was simulated with the artificial neural network model, and the influence of the flood control operation of the upstream cascade reservoir group on the design flood of the Xiaonanhai Hydropower Station in different typical years was analyzed. The results show that the flood control operation of the upstream cascade reservoir group has a significant influence on the design flood of the Xiaonanhai Hydropower Station, especially on the reduction of rare floods. The floods that mainly come from the Jinshajiang River are greatly influenced by the flood control operation, while the floods that mainly come from the Minjiang River are not significantly influenced by the flood control operation.

Key words: Xiaonanhai Hydropower Station; flood control standards; design flood; same-frequency area composition; artificial neural network

1 研究区概况

小南海水电站是国务院批准的《长江流域综合利用规划》中的梯级水电站,地处长江上游干流宜宾至重庆河段,为四川盆地温湿地区,雨量丰沛,多年平均降雨量达1 162.1 mm^[1]。电站坝址位于重庆市江津区珞璜镇下游1 km的大中坝,上距江津区约38.5 km,下距重庆市朝天门40 km左右,距上游朱沱水文站约100 km,控制流域面积70.5万km²,坝址以上洪水主要来源于金沙江、岷江和区间来水^[2-3]。研究区域主要水系和控制站点分布如图1所示。坝址上游主要有正在兴建的金沙江中下游的乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝梯级水库,以及岷江流域的瀑布沟、紫坪铺梯级水库。这些大型梯级水库群承担着流域的防洪任务,在

收稿日期:2013-12-16
基金项目:教育部科学技术研究重点项目(104197)
作者简介:陈甜(1989—),女,江苏镇江人,硕士研究生,主要从事水资源规划与管理研究。E-mail:chtian0214@163.com
通信作者:董增川,教授。E-mail:dongzengchuan@163.com

拦蓄洪水的同时,对小南海水电站坝址设计洪水起到一定的削减作用。本文分析了上游梯级水库群防洪调度后小南海水电站坝址的设计洪水,为小南海水电站工程建设和下游重庆市的防洪规划提供依据。

2 研究方法

考虑到小南海水电站上游向家坝梯级水库和瀑布沟梯级水库的位置及水力联系,以及实际的水文控制站点,拟定小南海水电站坝址设计洪水以朱沱站作为设计依据站,并依据梯级水库群末端控制站将小南海水电站坝址以上区域分为屏山区、高场区和屏山-高场-小南海水电站区间3个分区。依据规划的上游梯级水库群防洪调度方式,重新计算受上游梯级水库群调度影响后的小南海水电站坝址设计洪水,并对结果进行分析。研究思路见图2。

2.1 设计洪水地区组成分析

根据1951—2004年共54年各控制站同期实测资料和历史洪水调查资料,按照我国SL44—2006《水利水电工程设计洪水计算规范》,采用经验频率分析法^[4-6],用P-Ⅲ型分布曲线进行适线^[7],对朱沱站不同频率设计洪水进行计算;以“全面且不利组合”的原则,从朱沱站实测大洪水系列中选取1981年、1991年2个峰高量大的实测典型洪水过程进行放大,作为小南海水电站坝址不同典型年不同频率的设计洪水过程。

采用同频率地区组合法^[8-10]推求小南海水电站坝址设计洪水的地区组成,根据各典型年洪水的主要来源,确定各典型年的设计洪水地区组成方案,见表1。再分别以屏山区或高场区时段洪量与朱沱站时段洪量同频率,其余分区的相应洪量总数按水量平衡原则分配,并计算典型洪水其余各分区的洪量比例,按此比例将其余分区的相应洪量总数分配给各个分区。水量分配计算公式为

$$W_{高场} + W_{区间} = W_{朱沱,P} - W_{屏山,P}$$

$$W_{屏山} + W_{区间} = W_{朱沱,P} - W_{高场,P}$$

式中:W——时段洪量;下标P——设计洪水频率。

2.2 人工神经网络模型

2.2.1 模型建立

在设计洪水过程计算中,需要考虑河道洪水传播的影响。人工神经网络凭借模拟精度高的优势在水文模拟尤其在非线性河道洪水模拟中^[11-13]得到较为广泛的应用,本文研究区域上游河道分汉众多,小南海水电站坝址洪水输入复杂,非线性程度高,因此采用BP人工神经网络模拟坝址河段洪水演进过程。

BP人工神经网络是一种按误差反传播算法进行网络训练的多层前馈式人工神经网络,通过激活函数,直接建立模型输入、输出变量间的非线性关系,网络由输入层、隐含层和输出层组成,同层之间节点数据相互独立,前后层数据通过激活函数连接^[14]。利用样本对模型进行训练,将误差反传播以不断调整连接权值和阈值。误差反传播以误差函数 $E^{[15]}$ 控制:

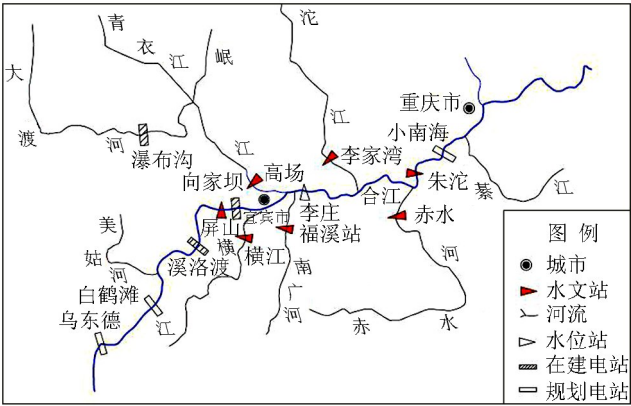


图1 研究区域主要水系和水文控制站点分布

Fig. 1 Distribution of main river systems and hydrological stations in study area

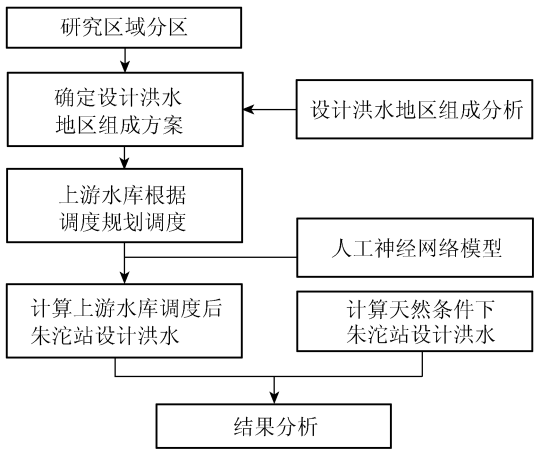


图2 研究思路框架

Fig. 2 Framework of research

表1 各典型年设计洪水地区组成方案

Table 1 Area composition schemes for design floods in typical years

方案	典型年	设计洪水地区组成方案	
		与朱沱站同频率分区	相应分区
1	1981	高场区	屏山区、高场-屏山-朱沱区间
2	1991	屏山区	高场区、高场-屏山-朱沱区间

$$E = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^M (T_{kj} - Y_{kj})^2 \tag{3}$$

式中: T_{kj} ——输出层第 k 个样本第 j 个节点的期望输出; Y_{kj} ——输出层第 k 个样本第 j 个节点的实测数据; N ——样本总数。

本文采用 3 层 BP 神经网络,以屏山站、高场站、横江站、福溪站、李家湾站、赤水站流量作为网络输入,以朱沱站流量作为网络输出。通过试算法确定隐含层节点数,建立模型结构:

$$Q_T = f(I_{1(T-23)}, I_{2(T-20)}, I_{3(T-21)}, I_{4(T-20)}, I_{5(T-16)}, I_{6(T-8)}) \tag{4}$$

式中: Q_T ——朱沱站某一时刻流量; $I_{1(T-23)}, \cdots, I_{6(T-8)}$ ——屏山站、高场站、横江站、福溪站、李家湾站、赤水站相应时刻流量。下标数字表示对应站到朱沱站间洪水传播的时间, h 。

2.2.2 模型评价指标

a. 确定性系数 D_C ,表示洪水模拟过程与实测过程之间的吻合程度^[16]:

$$D_C = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_{ci} - y_{oi})^2}{\sum_{i=1}^n (y_{oi} - \bar{y}_o)^2} \tag{5}$$

式中: y_c ——模拟计算洪水流量, m^3/s ; y_o ——实测洪水流量, m^3/s ; $\bar{y}_o$ ——实测洪水流量均值, m^3/s ; n ——实测资料系列长度。

b. 合格率 Q_R ,表示多次模拟总体的精度水平^[16]。一次模拟误差小于许可误差时为合格,合格模拟次数 m 与模拟总次数 n 之比为合格率

$$Q_R = \frac{m}{n} \times 100\% \tag{6}$$

以 1960—1969 年各控制站汛期逐时段流量资料作为网络训练样本,1970—1971 年各控制站汛期逐时段流量资料作为模型检验样本,模型检验精度评价结果见表 2,模型模拟效果见图 3。

表 2 模型精度评定
Table 2 Accuracy evaluation of model

年份	实测流量峰值/ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	模拟流量峰值/ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	相对误差/%	确定性系数	合格率/%
1970	37 400	37 700	0.80	0.99	75.60
1971	31 200	31 500	0.96	0.99	88.27

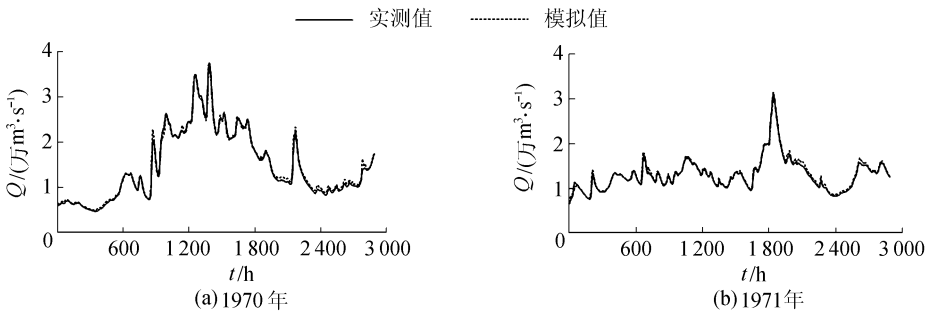


图 3 BP 人工神经网络模型模拟效果
Fig. 3 Simulation effect of BP neural network model

从图 3 可以看出,BP 人工神经网络模型总体精度达到甲级模拟精度,1970 年和 1971 年洪水过程洪量相对误差分别为 1.24%、1.98%,满足水量平衡要求,能有效模拟小南海水电站坝址洪水,应用精度较高。

3 计算结果及分析

3.1 模型计算结果

根据 1951—2004 年同期实测洪水资料和历史洪水调查资料,采用频率分析法对朱沱站不同频率设计洪

水进行计算,得到小南海水电站坝址天然条件下的设计洪水(表 3,表中 W_7 表示最大 7 天洪量, W_{15} 表示最大 15 天洪量)。

分析 1951—2004 年汛期洪水过程,峰量关系较好且峰型稳定,因此采用时段洪量控制同倍比放大计算。经计算, W_7 与 W_{15} 控制放大系数相差不大,故采用 W_7 控制对典型洪水进行同倍比放大计算,得到不同典型年不同频率的朱沱站天然设计洪水过程(调度前)。再根据确定的设计洪水地区组成方案,依据规划的向家坝梯级水库和瀑布沟梯级水库防洪调度方式^[17],即按李庄站流量分级控制,适当考虑朱沱站水情,对不同典型年的高场区和屏山区天然设计洪水进行调度,经 BP 人工神经网络模型演进至朱沱,与高场-屏山-朱沱区间洪水叠加得到新的朱沱站设计洪水(调度后),计算结果见表 4。

表 3 朱沱站设计洪水成果

Table 3 Design flood of Zhutuo Hydrological Station

$p/\%$	洪峰流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	W_7/m^3	W_{15}/m^3
0.2	70 000	326.7	562.5
1	62 800	278.9	517.5
2	58 900	259.2	447.3
5	54 100	232.9	430.0
20	42 600	188.4	353.2

表 4 上游水库调度后朱沱站设计洪水

Table 4 Design flood of Zhutuo Hydrological Station after flood control operation of upstream reservoir group

典型年	$p/\%$	洪峰流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	洪峰削减量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	洪峰 削减率/%	W_7 洪量/ 亿 m^3	W_7 削减量/ 亿 m^3	W_7 削减率/%	W_{15} 洪量/ 亿 m^3	W_{15} 削减量/ 亿 m^3	W_{15} 削减率/%
1981	0.2	59 200	10 100	14.6	309.4	17.3	5.3	524.4	23.0	4.2
	1	52 400	9 500	15.3	267.1	11.8	4.2	480.3	12.9	2.6
	2	49 200	8 300	14.4	250.5	8.7	3.4	451.4	6.9	1.5
	5	49 700	2 000	3.9	230.2	2.7	1.2	410.7	1.3	0.3
	20	41 800	0	0.0	188.4	0.0	0.0	333.0	0.0	0.0
1991	0.2	54 300	17 100	23.9	294.7	32.0	9.8	536.4	39.1	6.8
	1	46 700	16 500	26.1	257.6	21.3	7.6	509.6	26.2	4.9
	2	46 100	12 600	21.5	242.0	17.2	6.6	480.6	17.2	3.5
	5	43 200	9 600	18.2	222.3	10.6	4.6	440.1	7.1	1.6
	20	42 700	0	0.0	188.4	0.0	0.0	362.0	0.0	0.0

3.2 结果分析

- a. 设计洪水频率 1% 以内的设计洪水,设计洪水频率越小,上游梯级水库群防洪调度对小南海水电站坝址天然设计洪水的影响越大;设计洪水频率 0.2% 与 1% 的设计洪水相比,洪水洪峰削减率略有减小。洪峰削减量、洪量削减程度增大,对小南海水电站坝址天然设计洪水的影响增大,说明上游梯级水库群调度可以明显提高下游小南海水电站的防洪标准,原因是上游梯级水库按照分级控制的调度方式调洪,来水量越大,水库调蓄洪水的作用越强,对下游小南海水电站坝址洪水过程的影响越大。
- b. 不同典型年,洪水主要来源不同,上游梯级水库群防洪调度对小南海水电站坝址设计洪水的影响不同,主要表现为来自金沙江的设计洪水(1991 年),水库调度对洪峰、 W_7 、 W_{15} 的削减程度较大;而主要来自岷江的设计洪水(1981 年),水库调度对洪峰、 W_7 、 W_{15} 的削减程度较小。上游梯级水库群对小南海水电站坝址主要来源不同的洪水影响程度见表 5。

表 5 上游梯级水库对小南海水电站坝址主要来源不同的洪水影响程度

Table 5 Influence of flood control operation of upstream cascade reservoir group on floods from different sources at dam site of Xiaonanhai Hydropower Station

洪水主 要来源	洪峰削减率/%					W_7 削减率/%					W_{15} 削减率/%				
	$p=0.2\%$	$p=1\%$	$p=2\%$	$p=5\%$	$p=20\%$	$p=0.2\%$	$p=1\%$	$p=2\%$	$p=5\%$	$p=20\%$	$p=0.2\%$	$p=1\%$	$p=2\%$	$p=5\%$	$p=20\%$
岷江	14.6	15.3	14.4	3.9	0	5.3	4.2	3.4	1.2	0	4.2	2.6	1.5	0.3	0
金沙江	23.9	26.1	21.5	18.2	0	9.8	7.6	6.6	4.6	0	6.8	4.9	3.5	1.6	0

- c. 天然情况下小南海水电站坝址处 100 年一遇设计洪水洪峰流量经上游梯级水库群防洪调度后与天然情况下 20 年一遇洪水洪峰流量相当, W_7 经梯级水库群防洪调度后与天然情况下 50 年一遇洪水相当。梯级水库群防洪调度对 100 年一遇的天然情况设计洪峰的平均削减量为 $13\,000\text{ m}^3/\text{s}$,削减率为 20.8%, W_7 平均削减量为 16.6 亿 m^3 ,削减率为 5.9%。

4 结 语

采用同频率地区组成法和BP人工神经网络建模相结合,在考虑上游梯级水库群防洪调度因素的影响下,重新评估并计算了小南海水电站的设计洪水,结果表明:小南海水电站设计洪水受上游梯级水库群调度的影响明显,可以显著提高小南海水电站对稀遇洪水的防御标准。

参考文献:

- [1] 王晓丽. 小南海水利枢纽通航建筑物引航道口区水流条件数值模拟研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2011.
- [2] 赵元弘. 小南海水库地震堰塞坝体防渗处理[J]. 水利水电科技进展,2008,28(5):39-44. (ZHAO Yuanhong. Seepage control of the earthquake-induced barrier bar of Xiaonanhai Reservoir[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2008,28(5):39-44. (in Chinese))
- [3] 李霞,张绪进,杜宗伟,等. 长江小南海枢纽施工二期导流明渠通航条件研究[J]. 重庆交通大学学报:自然科学版,2013,32(2):306-309. (LI Xia,ZHANG Xujin,DU Zongwei,et al. Diversion channel navigation condition in construction phase II of Xiaonanhai water control project on Yangtze River[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University:Natural Science,2013,32(2):306-309. (in Chinese))
- [4] 金光炎. 水文频率分布模型的异同性与参数估计问题[J]. 水科学进展,2010,21(4):466-470. (JIN Guangyan. Similarities and differences of hydrologic frequency distribution models and their parameter estimation problems[J]. Advances of Water Science,2010,21(4):466-470. (in Chinese))
- [5] 杨涛,陈喜,杨红卫,等. 基于线性矩法的珠江三角洲区域洪水频率分析[J]. 河海大学学报:自然科学版,2009,37(6):615-619. (YANG Tao,CHEN Xi,YANG Hongwei,et al. Regional flood frequency analysis in Pearl River Delta region based on L-moments approach[J]. Journal of Hohai University:Natural Sciences,2009,37(6):615-619. (in Chinese))
- [6] JIN Guangyan. Problems in statistical treatment of flood series[J]. Journal of Hydrology,1987,96(1):173-184.
- [7] SL 44—2006 水利水电工程设计洪水计算规范[S].
- [8] 谢蕾. 同频率地区组成法在区间洪水计算中的应用[J]. 新疆农业大学学报:2010,33(5):442-447. (XIE Lei. Application of method of same frequency area composition in calculating interzone flood water[J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2010,33(5):442-447. (in Chinese))
- [9] LI Tianyuan, GUO Shenglian, LI Yanqing, et al. Review of design flood estimation methods for cascade reservoirs[J]. Journal of Water Resources Research,2012(1):14-20.
- [10] 梁忠民,钟平安,华家鹏. 水文水利计算[M]. 2版. 北京:中国水利水电出版社,2008:58-59.
- [11] 阚光远,李致家,刘志雨,等. 改进神经网络模型在水文模拟中的应用[J]. 河海大学学报:自然科学版,2013,41(4):294-299. (KAN Guangyuan, LI Zhijia, LIU Zhiyu, et al. An improved neural network model and its application to hydrological simulation [J]. Journal of Hohai University:Natural Sciences,2013,41(4):294-299. (in Chinese))
- [12] 黄国如,芮孝芳. 河道洪水演算的径向基函数神经网络模型[J]. 河海大学学报:自然科学版,2003,31(6):621-625. (HUANG Guoru, RUI Xiaofang. Radial basis function neural network model for channel flood routing[J]. Journal of Hohai University:Natural Sciences,2003,31(6):621-625. (in Chinese))
- [13] 王光生,苏佳林,沈必成,等. 神经网络理论在河道洪水预报中的应用[J]. 水文,2009,29(5):55-58. (WANG Guangsheng, SU Jialin, SHEN Bicheng, et al. Application of neural network in channel flow forecasting[J]. Journal of China Hydrology,2009,29(5):55-58. (in Chinese))
- [14] 李晓峰,刘光中. 人工神经网络BP算法的改进及其应用[J]. 四川大学学报:工程科学版,2000,32(2):105-109. (LI Xiaofeng, LIU Guangzhong. The improvement of BP algorithm and its application[J]. Journal of Sichuan University:Engineering Science Edition,2000,32(2):105-109. (in Chinese))
- [15] 郑重,马富裕,李江全,等. 基于BP神经网络的农田蒸散量预报模型[J]. 水利学报,2008,39(2):230-234. (ZHEN Zhong, MA Fuyu, LI Jiangquan, et al. Analysis on failure stress in concrete due to corrosion of rebar under bidirectional loading [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2008,39(2):230-234. (in Chinese))
- [16] 徐晨光,李春静,赵麦换. 串联水库洪水预报模型影响因素及精度分析[J]. 人民黄河,2008,30(7):34-35. (XU Chenguang, LI Chunjing, ZHAO Maihuan. Analysis of influencing factors and precision of flood forecasting model of connection reservoir [J]. Yellow River,2008,30(7):34-35. (in Chinese))
- [17] 长江流域综合规划报告[R]. 武汉:水利部长江水利委员会,2009.