

梯级水库防洪运用次序及时机研究

乔海山¹ 马莅茗^{2,3} 王战策¹ 张毅¹ 宋伟华^{2,3} 沈延青¹

1. 青海黄河上游水电开发有限责任公司 青海 西宁 810000

2. 黄河勘测规划设计研究院有限公司 河南 郑州 450003

3. 水利部黄河流域水治理与水安全重点实验室(筹) 河南 郑州 450003

摘要:在经济迅速发展的大背景下,如何合理安排梯级水库群参与防洪运用的泄、蓄次序及时机,使水库群在防洪的同时兼顾发电效益最大化显得尤为重要。为充分挖掘梯级水库群的防洪潜力,扩展调度空间、增加防洪主动性,本文选择龙羊峡至刘家峡区间梯级水库为研究对象,分析梯级水库参与防洪的泄、蓄次序。通过研究,龙刘区间梯级电站在预泄阶段按积公李拉自上而下的顺序、拦洪阶段按拉李公积四座自上而下的顺序运用,可将刘家峡水库十年一遇下泄流量控制在 $3200\text{m}^3/\text{s}$ 以内,不会增加电站自身防洪安全的风险,并且可以提高兼顾中小洪水安全的防御能力。

关键词:防洪运用次序及时机;龙刘区间;梯级水库;黄河流域

引言:梯级水库群中的不同水库,其库容差别很大,甚至相邻的水库工程之间可以相差百倍以上的库容,上下游之间水电站库容也同时存在着大小交替的不规律现象^[1]。在目前经济飞速发展的大环境下,梯级水库群流域如何充分发挥梯级水库群自身的调蓄和补偿的防洪供水能力,在保证各梯级水库承担的工程任务的基础上,发掘梯级水库群的发电效益是眼前迫切需要解决的重要问题^[2]。因此,如何合理安排梯级水库群参与防洪运用的泄、蓄次序及时机,使水库群在防洪的同时兼顾发电效益最大化的研究显得尤为重要。

1 研究对象及数据收集

1.1 研究对象

黄河流域上游龙羊峡~三盛公河段梯级水电站工程共有24座,工程位置示意图见图1。其中,龙羊峡~刘家峡区间共有梯级水库13座,重要水库包括黄河上游防洪骨干水库龙羊峡水库、刘家峡水库以及其他库容较大的拉西瓦、李家峡、公伯峡、积石峡水电站^[3]。

本次研究选择龙羊峡至刘家峡区间梯级水库为研究对象,分析梯级水库参与防洪的泄、蓄次序,可充分挖掘黄河上游梯级水库群的防洪潜力,扩展调度空间、增加防洪主动性。

1.2 数据收集

(1) 设计洪水

龙羊峡、刘家峡设计洪水采用审定的成果。龙羊峡设计洪水为1977年8月完成的龙羊峡水库初设补充设计成

果,洪水系列为1946年~1974年共29年,1904年历史洪水洪峰流量 $5720\text{m}^3/\text{s}$,重现期为160年。刘家峡水库的设计洪水采用39年的洪水系列(1934年~1972年)。兰州站设计洪水采用洪水系列为1934~1972年。



图1 黄河上游梯级水库工程示意图

(2) 区间洪水

龙羊峡~拉西瓦区间集水面积 760km^2 。由龙~拉区间洪水设计洪峰流量加龙羊峡各频率控制泄量作为拉西瓦受上游水库调蓄的洪峰流量设计值。

龙羊峡~李家峡区间面积 5327km^2 。2020年,李家峡发电分公司委托西北勘测设计院对龙~李区间设计洪水进行了复核,将水文资料延长至2019年,采用地区综合法、水文比拟法、暴雨等值线图法和经验公式法进行计

基金项目:青海黄河上游水电开发有限责任公司科技项目(KY-C-2023-SD9)

算。经综合分析，龙~李区间设计洪水成果最终采用地区综合法成果。

公伯峡坝址以上控制流域面积143619km²，公伯峡水库入库洪水由龙羊峡入库洪水经龙羊峡、刘家峡两库联合调洪计算推求的龙羊峡下泄流量与龙~公区间相应的洪水组合而成。根据洪水地区组成分析成果，1964年洪水典型年地区组成对公伯峡水库最为不利。

公伯峡~积石峡区间面积3130km²，由于李家峡、公伯峡两库的调洪作用，使龙~积区间最大洪峰有所削减。

2 梯级水库防洪运用次序及时机综述

目前，梯级水库群联合运用的蓄放次序方法有很多，主要有判别式法、纽约市规则、空间规则、余留期的库容规则、对冲调度规则以及库容效率法等。其中，国内外较多采用的方法是采用判别系数法，用来确定水库群中各个水库的蓄放顺序，并结合联合调度的方式，综合确定梯级水库群联合调度的蓄放过程^[4]。

判别系数法是各个梯级水库/水电站在供水或蓄水泄蓄的判别表达式，在同时也反映了单位电能下的能量损失。判别系数法可以应用于调节性能比较好的梯级水库群。在水库群联合调度计算过程中，遵循的原则是蓄水期以判别系数大的水库/水电站先蓄水，供水期时以判别系数小的水库/水电站先供水。对于发电为主的串联水库群，按判别系数K^[5]确定蓄放水次序时，K值大的水库先蓄后放，K值小的水库先放后蓄。对于梯级水库/水电站，下游或库容较小的水库K值一般较小。考虑防洪、灌溉、供水、生态、航运等综合运用目标时，梯级水库群泄蓄次序则更为复杂。

作为水库群调度规则的一部分，梯级电站的蓄放顺序理论上可以根据水库群优化调度^[6]、优化调度规则等研究方法确定。然而，虽然国内外学者在水库群优化调度方面取得了丰硕的研究成果，但如何根据目前的研究成果制定具体梯级水库群蓄泄水顺序和方案，还尚未有深入的研究。在夏传明等人的研究中，金沙江中游梯级水库联合消落控制优化中^[4]根据判别系数K和梯级水库群优化调度确定汛期前的泄放顺序和具体泄放方案，并比较分析了两种方式的适用性。通过综合分析，按优化调度计算结果分析得到的消落次序更为合理，即以金安桥为界分成两段，均表现为自下而上的消落趋势。

在陈炯宏等对于清江梯级和三峡梯级防洪库容投入时机方案研究中，通过对比主汛期三峡梯级水库群和清

江梯级水库群防洪库容的不同投入时时序、不同投入顺序的方案及补偿调度方式，并分析了荆江河段联合调度的防洪效果，得到了对于防洪库容的最优化方案。其中从清江梯级水库预留防洪库容的利用率方面分析，上游水库首蓄的方案优于下游水库的方案。

熊斯毅在深入分析几种常用蓄放水判别式的基础上，针对于并联水库群优化调度提出了偏离损失系数判别法，该方法可以把径流的随机性、时段间的相互影响和各电站动力特性的差异加入考虑因素进行优化。

谢如昌等在为解决应用判别系数法确定梯级水库群蓄供水次序时，可能造成水电系统运行不稳定的问题，引入蓄供水控制线约束对其予以改进和完善。

对于梯级水库或水电站群，首先应该在满足水库自身防洪安全及下游防洪任务的前提下，遵循蓄泄原则，即原则上优先上游的水库或水电站蓄水，下游水库尽快腾空库容。但这种原则也有限制条件，如当下游的水库或水电站限制泄流能力的情况，在这种情况下位于下游的水库可以蓄水提高水头，进而增加梯级水库或水电站群的泄至下游的出流容量。

本次研究对象所涉及的龙羊峡~刘家峡区间的拉西瓦、李家峡、公伯峡、积石峡四个水库，结合区间洪水预报及发电影响两个方面，综合考虑，本研究在预泄阶段按积公李拉自下而上的顺序、拦洪阶段按拉李公积四座自上而下的顺序运用。

3 黄河龙羊峡至刘家峡区间主要梯级水库洪水优化调度

结合黄河上游洪水调度的实际情况和防洪形势，龙羊峡、刘家峡水库按既有方案规则，拉西瓦、李家峡、公伯峡和积石峡水库参与防洪运用，考虑龙刘区间提及电站自下而上的顺序、拦洪阶段按自上而下的顺序运用。六库防洪方案设置及成果如下表。

当兼顾下游防洪安全需求刘家峡水库控制下泄流量不超3200m³/s时，10年一遇洪水需削减洪量10.38亿m³，调洪计算中，拉西瓦、李家峡、公伯峡、积石峡分别预泄水位至2450、2175、2002、1852m，可兼顾下游10年一遇防洪需求，10年一遇以上龙刘按照水库既有方案，各梯级水库按照设计防洪运用方式运用，发生1000年一遇洪水时龙刘水库水位不超设计值，水库能保证自身安全，即能完成防洪任务。

表1 六库防洪方案列表

参与防洪水库	防洪目标Q _{k10%} (m ³ /s)	拉西瓦预泄水位 (m)	李家峡预泄水位 (m)	公伯峡预泄水位 (m)	积石峡预泄水位 (m)
龙刘拉李公积防洪	3200	2450	2175	2002	1852

表2 龙刘拉李公积六库防洪成果表

刘库10年一遇一下控泄流量	水库	起调水位	项目	重现期(年)				
				10	100	1000	2000	PMF
				流量: m ³ /s; 水位: m				
3200	龙羊峡	2594	最大泄量	3188	3976	4000	6000	6000
			最高水位	2595.46	2597.85	2602.23	2603.15	2605.85
	刘家峡	1726	最大泄量	3200	4290	4594	7260	8635
			最高水位	1727.61	1730.22	1734.87	1734.76	1736.4
	拉西瓦	2452	最大泄量	3207	3988	4034	6015	6028
			最高水位	2452	2452	2452	2452	2452
	李家峡	2180	最大泄量	3323	4064	4100	6106	6195
			最高水位	2180	2180	2180.36	2181.32	2181.91
			最低水位	2180	2180	2180	2180	2180
			最大泄量	3176	4191	4465	6242	6502
	公伯峡	2005	最高水位	2005	2005	2005	2005	2005
			最低水位	2005	2005	2005	2005	2002
	积石峡	1854	最大泄量	3176	4229	4641	6278	6697
			最高水位	1854	1854	1854	1854	1854

结语

龙刘区间主要梯级水库参与防洪运用,不会增加电站自身防洪安全的风险,但预报误差风险会导致梯级水库防洪能力可能低于预期或低水位运用时间加长影响效益等情况。实际运用中,如具备预泄条件,预泄过程中尽量预泄至可接受的下限水位,为防洪运用留有一定余度。其中李家峡和公伯峡水库作为饮用水源地,为保证库区两岸居民生活用水安全,李家峡水库不宜长时间低于2176m运行,公伯峡水库不宜长时间低于2002m运行

参考文献

[1]刘家宏,周晋军,王浩.梯级水电枢纽群巨灾风险分析与防控研究综述[J].水利学报,2023,54(01):34-44.

[2]罗斌,钱凯霞,李安强.乌江梯级水库联合优化调度方案研究[J].人民长江,2010,41(22):8-11.

[3]宋伟华,沈延青,赵梦龙等.黄河龙羊峡至刘家峡区间主要梯级水库洪水调度研究[J].人民黄河2023,(02):1-6.

[4]夏传明,许银山.金沙江中游梯级水库联合消落优化控制[J].水电与新能源,2018,32(11):19-23.

[5]黄草,王忠静,鲁军,等.长江上游水库群多目标优化调度模型及应用研究(II):水库群调度规则及蓄放次序[J].水资源与水工程学报2018,(1):72-74.

[6]许银山,梅亚东,杨娜,等.大规模混联水库群长期优化调度[J].水电自动化与大坝监测,2010,34(4):58-63.