

Optimal Joint Early Refill Operation of Multi-Reservoir System in Upper Yangtze River

Shenglian Guo, Kebing Chen, Pan Liu, Shaokun He, Jiantin Zhang

State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Hubei Provincial Collaborative Innovation Center for Water Resources Security, Wuhan University, Wuhan Hubei
Email: slguo@whu.edu.cn

Received: Jul. 24th, 2017; accepted: Aug. 7th, 2017; published: Aug. 17th, 2017

Abstract

The advanced researches and related problems of early refill operation for multi-reservoir system were reviewed. The theory and method of dynamic refill operation was studied through analyzing the spatial aggregation and decomposition of complex cascade and parallel reservoirs. After selected the best multi-reservoirs refill chances under the change environment, a multi-objective joint refill operation model was proposed and then solved by optimization algorithms. The joint refill operation schemes of multi-reservoirs as well as the assessment index in the upper Yangtze River were suggested. The simulated refill operation results of the Xiluodu-Xiangjiaba-Three Gorges reservoirs show that the hydropower generation can increase 3.044 billion kW·h (or 4.89%) annually during refill period under the conditions of satisfying flood control safety and other constrains, and the refill storage rate and water resources utilization rate are also significantly increased.

Keywords

Reservoir System, Early Refill, Joint Operation, Flood Control Safety, Upper Yangtze River

长江上游水库群提前蓄水联合优化调度研究

郭生练, 陈柯兵, 刘攀, 何绍坤, 张剑亭

武汉大学, 水资源安全保障湖北省协同创新中心, 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉
Email: slguo@whu.edu.cn

收稿日期: 2017年7月24日; 录用日期: 2017年8月7日; 发布日期: 2017年8月17日

摘要

综述水库群汛末提前蓄水调度的研究进展和存在的问题。通过解析复杂串并联水库群的空间分区解耦原理, 研

*特邀论文。

作者简介: 郭生练, 二级教授。研究方向: 水文学及水资源利用和管理。

究分区控制的动态蓄水理论和方法。以变化环境下的水库群最优蓄水时机选择为切入点,建立水库群多目标联合蓄水调度模型并求解。制定基于分区控制的长江上游控制性水库蓄水方案及评价指标体系。溪洛渡、向家坝和三峡梯级水库的模拟调度结果表明,在确保防洪安全和满足其他约束条件的前提下,提前蓄水的年均发电量可增加30.44亿kW·h(增幅4.89%),并显著地提高了水库群的汛末蓄满率及水资源利用率。

关键词

水库群, 提前蓄水, 联合调度, 防洪安全, 长江上游

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 概述

21世纪以来,长江上游大批水库电站建成并投入运行,必然带来河道径流和流域水资源调控与利用的变化。尤其是在汛末蓄水期,各水库之间竞争性蓄水、长江上游水库群与中下游地区水资源利用矛盾等问题更加突出。水库提前蓄水,虽可提高水库蓄满率,增加发电量和汛后水资源供给量,但提前蓄水期间会占用一部分的防洪库容,可能会增加一定的防洪风险。因此,确保蓄水期间的防洪安全是水库汛末提前蓄水的前提条件,水库的起蓄时间及蓄水进程是影响效益最为关键的两个抓手,其中蓄水时间的选取需要考虑防洪、发电、航运以及生态等多方面的因素,是一个复杂的且亟待解决的科学问题。

水库调度管理决策者在制定面临年份的蓄水调度时,还需要根据短期、中期以及长期气象水文预报结果,在确保水库及上下游地区防洪安全的前提下,在分期控制蓄水位的约束下,尽可能减少弃水,抬高水库的蓄水位,以利于水库尽快蓄满,抬高发电水头,减少枯水期的蓄水量,更有利于改善下游地区的用水缺口,从而提高水库的综合利用效益。

针对三峡水库蓄水调度问题,刘攀等[1]根据三峡水库运行初期的调度规则建立了动态汛限水位和蓄水时机优化的实时调度模型,利用历史实测资料以防洪、发电和航运等指标进行多目标优化,运用模糊决策的方法对得到的非劣解集进行分析,得到了相对合理的动态汛限水位与蓄水时机方案。李义天等[2]在分析三峡水库洪水的基础上,提出了9月分旬控制蓄水的方案,并且还全面比较了三峡水库汛末推迟蓄水方案和提前蓄水方案对三峡工程防洪、发电及航运的影响,对各蓄水方案的综合效益进行初步评价,归纳了各蓄水方案的利弊。彭杨等[3]通过对三峡水库汛末分期设计洪水进行调洪演算,计算得到了不同提前蓄水方案下的防洪风险率及其相应的风险损失,并以此为基础,建立了三峡水库蓄水期的水沙联合调度模型,较好的解决了不同蓄水方式下,三峡水库的防洪、发电以及航运等多目标决策问题。刘心愿等[4]建立了考虑综合利用要求的三峡水库汛末提前蓄水模型,既确保防洪安全又能最大限度挖掘综合利用效益,为研究水库汛末蓄水调度问题提供了一种新的思路和方法。郭家力等[5]基于贝叶斯方法建立了水文防洪风险分析模型,采用多输入单输出系统模型把出库流量演进至防洪控制点。根据拟定的提前蓄水方案,选用实测的60年日径流资料分别计算了提前蓄水的风险率。研究发现,三峡水库提前蓄水并未增加长江中游荆江河段的防洪风险。李雨等[6]建立了三峡水库提前蓄水的防洪风险与效益分析模型,对多组分台阶蓄水方案,从防洪风险和蓄水效益两个方面进行了优选,并推荐三峡水库可从9月1日及以后开始蓄水。王俊等[7]总结了三峡水库汛末提前蓄水的关键技术与应用情况。自2010年以来,三峡水库年年蓄水到175 m正常水位,产生了巨大的经济和社会效益。

针对水库群蓄水调度问题,付湘等[8]针对三峡上游水库群汛末竞争性蓄水矛盾,根据水能价值原理,提出

上游水库群提前蓄水方案,确定了上游水库群蓄水时间及水库提前蓄水量。欧阳硕等[9]针对流域干支流梯级水库群汛末竞争性蓄水这一工程问题,在保证防洪安全的前提下,将流域水库群蓄水原则与K值判别式法相结合,提出了一种新的蓄放水策略来判定流域梯级水库各水库的蓄水时机和次序,但其仅仅是生成了梯级水库群联合蓄水调度非劣质解集,并没有提出能权衡好防洪、发电、航运等多目标的蓄水决策方案。丁毅等[10]根据各水库自身的蓄水调度原则和方式,采用常规调度方法,对长江中上游各水库的蓄水调度方案和调度模型进行了初步研究,为进一步探索梯级水库群汛末蓄水优化调度提出了相关建议。黄草[11][12]以长江上游15座大型水库群联合调度为背景,研究建立了包含发电、河道外供水和河道内生态用水等目标的非线性优化调度模型,提出了扩展型逐步优化算法以提高非线性模型的求解效率与效能。统计得出长系列调度和多年平均水文条件下的各水库联合调度规则图,并讨论了其适用条件。进一步分析了推荐方案下水库群联合调度的汛前放水和汛末蓄水次序。周研来等[13]以金沙江梯级水库和三峡梯级水库为研究对象,针对梯级水库汛末集中蓄水造成的水资源短缺问题,在保证防洪安全的前提下,根据梯级水库群蓄水调度的不同原则和优化方法,提出各水库的最佳蓄水策略。刘强等[14]以溪洛渡、向家坝、三峡、葛洲坝梯级四库系统为研究对象,采用不同来水年型、蓄水时间和起调水位构建蓄水情景集;以蓄水期间的发电量最大为目标,建立多目标联合优化调度模型,生成各种蓄水情景下的蓄水方案;基于蓄满率、梯级期望弃水量、梯级平均期望出力对各方案进行评价,推荐丰水年溪洛渡、向家坝9月11日起蓄、三峡9月10日起蓄,平水年溪洛渡、向家坝9月11日起蓄、三峡9月1日起蓄,枯水年溪洛渡、向家坝9月1日起蓄、三峡8月21日起蓄。

现行蓄水期调度方案多采用等水位蓄水方案,即从起蓄时间开始至蓄水期末这段时间内,水库水位等量上升,至蓄水期末到达正常蓄水位。这种蓄水方式常导致前期大量来水直接下泄,后期来水不足无法蓄满的现状。此外,目前长江上游水库群汛末蓄水期的调度方案均为单独设计的,很少考虑流域内其他已建或在建水库的相互作用,无法充分发挥整体效益;对于规模巨大的水库群,许多研究采用月(旬)流量系列资料,并简化水库区间流域的水力联系和库容补偿等关系,尚未有满足实际应用要求的调度形式,能够实现复杂串并联水库群的提前蓄水联合优化调度。

2. 研究内容及关键技术

围绕长江上游水库群优化蓄水策略制定所面临的重大科学问题和关键技术难题,以变化环境下的水库群最优蓄水时机选择为切入点,解析复杂串并联水库群的空间分区解耦原理,研究基于分区控制的水库群蓄水时机、次序和策略,建立多目标联合调度模型及其高效求解方法,制定长江上游控制性水库群汛末联合蓄水调度方案和评价指标体系,并针对金沙江下游与三峡梯级水库群形成典型示范。

2.1. 变化环境下的水库群蓄水时机选择

影响水库群蓄水进程的主要因素包括水库群各水库的蓄水时机、蓄水次序以及关键时间节点的蓄水控制水位。理论与实践均已证明,适当提前蓄水时间、改变蓄水次序能在保证防洪安全和其它约束的同时,提高水库群汛末蓄满率和水资源利用率[7]。

从保障流域汛末防洪安全的角度出发,需要开展汛期分期研究。常用的汛期分期方法有成因分析法、数理统计法、矢量统计法、模糊分析法、有序聚类法、变点分析法、圆形分布法、相对频率法等。通过识别后汛期的开始时间,推求分期设计洪水,确定最大可能提前蓄水的时间及分阶段蓄水位的上限。

随着全流域干流水库的陆续建成与投入运行,流域的水文情势及各部门需水情况势必发生了很大的改变,因此,基于多元统计理论,研究气候变化和人类活动等变化环境下长江流域洪水遭遇、枯水遭遇等组合规律;根据洪水空间分布及季节性特征,结合防洪需求和上下游水库的蓄放水关联性,提出水库群蓄水时机选择的判定条件。

对于长江上游干支流洪水、枯水遭遇分析,可采用多元统计理论中的 Copula 函数进行描述。对各分区控制站流量过程进行分析,首先将洪水发生时间的边缘分布转化为弧度,并采用混合 von Mises 分布进行描述;然后再估计其年最大洪水的 P-III 分布参数;最后采用 Copula 函数建立洪水发生时间与量级的联合分布。

根据得到的 Copula 联合分布,可以推测同一时间,防洪节点上的干支流遭遇洪水超过设计安全流量的概率,将其与原设计频率对比,可论证汛末蓄水调度优化的可行性。通过对遭遇时间的分析,可以判别现有的蓄水方案时间是否可以提前,并对各干支流子流域的蓄水时机进行调整。

2.2. 复杂串并联水库群的空间分区解耦原理

复杂串并联水库群覆盖范围广,流域不同行业部门及各水库业主均有自身的诉求。在对汛末蓄水进行优化的同时,应当结合各水库调度图和调度规程,充分考虑防洪、生态约束,来构建水库群蓄水时机、次序及策略。根据大系统解耦原理,对干支流梯级水库群进行聚合和库容分解。大系统解耦原理是一种递阶控制理论,其基本思想是将相对复杂的大系统分解为若干个相互独立且相互关联的子系统,以此作为第一级,称为下级系统;设置一个协调机构,即协调器,作为第二级,称为上级系统,用来处理各子系统之间的关联。协调的目的是使得大系统达到最优,在此过程中通过协调器来控制各子系统的变化。

2.2.1. 聚合水库模块

将梯级水库当成一个“聚合水库”,设 T_y 为“聚合水库”的有效预见期,按预蓄预泄法的思想,要求水库以 Z' 水位起调时,经过洪水有效预见期 T_y 的预泄,能使水库的水位降低至原汛限水位 Z ,水库能够提供不少于原调度方式的防洪库容,若预报流域将有洪水产生时,各水库在预泄期内腾空防洪库容,使原设计方案的防洪标准不降低。设 $Q_m(t)$ 为“聚合水库”的入库流量, $Q_{out}(t)$ 为可能出库流量,则水库的最高起调水位 $Z'(t)$ 对应的库容为

$$f(Z'(t)) = f(Z(t)) + \int^{T_y} Q_{out}(t) dt - \int^{T_y} Q_m(t) dt \quad (1)$$

则该“聚合水库”在 t 时段初所允许最大预蓄水量 $V_{yx}(t)$ 为

$$\max V_{yx}(t) = f(Z'(t)) - f(Z(t)) \quad (2)$$

式中: $f(*)$ 为水位~库容关系, $\int^{T_y} Q_m(t) dt$ 为预见期 T_y 内的入库水量, $\int^{T_y} Q_{out}(t) dt$ 为预见期 T_y 内的可能出库水量。

2.2.2. 库容分解模块

由于上下游水库之间存在水力联系,各水库允许最高起调水位均受其他水库当前库容状态的影响,因此各水库之间存在一种相互制约的关系,分解模块是根据水力联系推导出各水库之间的内在联系,并在满足各防洪控制点安全的前提下,计算各水库在时段初的允许最高起调水位,即当水库 B 在 t 时段初起调水位 $Z_B(t)$ 确定时,也可以推导出水库 A 在 t 时段初的最高起调水位 $Z'_A(t)$,当水库 B 的可能起调水位在可行域内取值时,可以推导出水库 A 在 t 时段初的一系列最高起调水位 $Z'_A(t)$,因此可确定一个动态控制域。反之亦然,即:

$$\max Z'_A(t) \text{ 或 } \max Z'_B(t) \quad (3)$$

对于梯级水库而言,要求上下游水库均满足不低于原设计汛限水位方案下的防洪标准,则 A、B 水库存在如下关系:

A 水库:

$$\int^{T_y} Q_{out,A}(t) dt - \int^{T_y} Q_A(t) dt = f_A(Z'_A(t)) - f_A(Z_A(t)) \quad (4)$$

B 水库:

$$\int^{T_y} Q_{out,B}(t)dt - \int^{T_y} Q_B(t)dt = f_B(Z'_B(t)) - f_B(Z_B(t)) \quad (5)$$

A、B 水库之间存在上下游水力联系，即：

$$Q_B(t) = C_0 Q_{out,A}(t) + C_1 Q_{out,A}(t-1) + C_2 Q_B(t-1) + Q_{qi}(t) \quad (6)$$

同时要求 A、B 水库的下泄流量均满足防洪要求，即

$$Q_{out,A}(t) \leq Q_{max,A} \quad (7)$$

$$Q_{out,B}(t) \leq Q_{max,B} \quad (8)$$

式中： $Z_A(t)$ ， $Z_B(t)$ 分别为 A、B 水库原设计汛限水位， $Q_A(t)$ ， $Q_B(t)$ 分别为 A、B 水库入库流量， $Q_{out,A}(t)$ ， $Q_{out,B}(t)$ 分别为 A、B 水库可能下泄流量， $V_A = f_A(Z_A)$ 和 $V_B = f_B(Z_B)$ 分别表示水库 A、水库 B 的水位~库容关系； C_0 ， C_1 ， C_2 为马斯京根系数； $Q_{qi}(t)$ 为区间入库流量。

可按自下而上的逆序方式求解上下游水库间的预蓄库容关系，先由最下游防洪控制点 F2 的安全流量约束和库容状态信息推求水库 B 的入库流量：

$$\int^{T_y} Q_{out,B}(t)dt - \int^{T_y} Q_B(t)dt = f_B(Z'_B) - f_B(Z_B) \leq \int^{T_y} Q_{max,B}dt - \int^{T_y} Q_B(t)dt = Q_{max,B}T_y - \int^{T_y} Q_B(t)dt \quad (9)$$

由于在第 t 时段初中间变量 $Q_{out,A}(t-1)$ ， $Q_B(t-1)$ ， $Q_{qi}(t)$ 均为已知，故 $Q_B(t)$ 与 $Q_{out,A}(t)$ 的关系可表达为：

$$Q_B(t) = C_0 Q_{out,A}(t) + K(t) \quad (10)$$

其中： $K(t) = C_1 Q_{out,A}(t-1) + C_2 Q_B(t-1) + Q_{qi}(t)$ ，式(10)可写成：

$$f_B(Z'_B) - f_B(Z_B) \leq Q_{max,B}T_y - \int^{T_y} (C_0 Q_{out,A}(t) + K(t))dt \quad (11)$$

再由求出的 $Q_{out,A}(t)$ 逆序递推至上游水库 A，通过上游水库的预报来水、当前库容状况和下泄能力在有效预报期内确定该水库的最高起调水位，即

$$\int^{T_y} Q_{out,A}(t)dt = \int^{T_y} Q_A(t)dt + f_A(Z'_A(t)) - f_A(Z_A(t)) \quad (12)$$

联立式(11)和式(12)可得

$$f_B(Z'_B) \leq f_B(Z_B) + Q_{max,B}T_y - C_0 \left(\int^{T_y} Q_A(t)dt + f_A(Z'_A) - f_A(Z_A) \right) - K(t)T_y \quad (13)$$

上式即描述了上下游 A、B 水库的水位上限 Z'_A ， Z'_B 之间的动态控制关系。由于其他变量均为已知，故当上游水库的起调水位确定时，由下游水库预报的来水、当前库容状况和防洪约束等信息，可在有效预报期内确定下游水库的最高起调水位，同理，当确定了下游水库的起调水位，则上游水库的最高起调水位也可随之确定，两水库预留的防洪库容之间存在一种相互协调，相互制约的关系[15]。

2.3. 梯级水库蓄水次序优化理论与策略

2.3.1. 时历补偿法

位于不同流域的几个水电站水库，其水文径流特征和水库调节性能往往存在差异，当他们联合工作时，常可通过相互之间的补偿作用，来提高水力资源的利用效率。梯级电站的补偿调节方式可分为两种：按水文径流特征的差别进行的补偿称为水文补偿；按水库调节性能差异所进行的补偿称为库容补偿。补偿调节就是利用调节性能好的水电站水库(称补偿电站)，来帮助调节性能差的水电站水库(称被补偿电站)，使后者的季节性电能尽

可能地转变为可靠出力来进行水库群的联合工作。

时历法的特点就在于逐个地把条件差的被补偿电站的出力过程，通过补偿电站的依次补偿，以达到提高和拉平总出力的目的，进而提高系统总的保证出力 and 使其年内甚至多年的变化过程尽量均匀。首先要对补偿电站和被补偿电站进行划分。水电站补偿能力的大小主要取决于其所具调节电能的多少，因此库容、径流量以及水头高低，是划分补偿电站与被补偿电站的主要标准。其次，各水库综合利用要求，以及对于梯级水电站而言，电站所处的上下游位置，对划分补偿电站与被补偿电站也有一定影响。一般来说，调节性能好的，比如库容系数、多年平均径流量和电站装机容量大的，可作为第一类补偿电站；库容、水量和水头较大的可作为第二类补偿电站；库容小、无调节或日调节以及一些小型的水电站可作为被补偿电站。此外，由于水电站群中个水库的调节性能不同，可以是年调节、多年调节、日调节和无调节四种情况，为了正确反映补偿调节后保证出力的可靠程度，需要选用统一的设计枯水段。一般可以选择出力较大的几个补偿电站所在河流的代表性枯水年组，作为全系统统一的设计枯水段。

2.3.2. 蓄放水次序判别式法

蓄放水次序的原理如下：凡是具有相当于年调节程度的蓄水式水电站，它用来生产电能的水量由两部分组成：一部分是经过水库调蓄的水量，它生产的电能为蓄水电能，这部分电能是由兴利库容决定；另一部分是经过水库的不蓄水量。它生产的电能为不蓄电能，这部分电能与水库调节过程中的水头变化有密切关系。如果同一系统中有两个这样的电站联合运行，由于水库特性不同，它们在同一供水或蓄水时段为生产同样数量电能所引起的水头变化是不同的，这样就使以后各时段中当同样数量的流量通过它们时，引起出力和发电量的不同。因此，研究蓄放水次序，就是使水电站的不蓄水量在尽可能大的水头下流放，以达到总发电量尽可能大的目的。

1) 串联水库的蓄放水次序。以梯级上两个不受综合利用限制的年调节水电站为例，研究它们不同的蓄放水次序对发电量的影响。设上游水库为 A，下游水库为 B。当某一供水时段电力系统需要水电站放水来补充出力不足时，如果由上游 A 水库供水发电来满足系统要求，其提供的电能为

$$\Delta E_{KA} = F_A \Delta H_A (H_A + H_B) \eta_A / 367.1 \quad (14)$$

如果由下游 B 水库供水发电满足系统要求，其提供的电能为

$$\Delta E_{KB} = F_B \Delta H_B H_B \eta_B / 367.1 \quad (15)$$

式中： F_A 、 F_B ， H_A 、 H_B ， ΔH_A 、 ΔH_B ， η_A 、 η_B 分别为某时段内 A、B 水库的存水面积，发电水头，供水消落的深度和水电站的发电效率。

上游 A 水库发电下放的流量在下游 B 水电站仍可用来发电，式(15)中的水头项是两水电站的水头之和。由于系统要求的不足出力是相同的一个值，并假设两电站的发电效率相等，那么

$$\Delta H_B = \frac{F_A (H_A + H_B)}{F_B H_B} \Delta H_A \quad (16)$$

由于水库发电供水使水库消落，从而影响了以后时段的发电水头，导致不蓄电能的损失。由于两水库特性不同，不蓄电能的损失是不同的。A 水库的不蓄电能损失值为

$$\Delta E_{bA} = W_{bA} \Delta H_A \eta_A / 367.1 \quad (17)$$

B 水库的不蓄电能损失值为

$$\Delta E_{bB} = (W_{bA} + V_A + W'_{bB}) \Delta H_B \eta_B / 367.1 \quad (18)$$

式中： ΔE_{bA} 、 ΔE_{bB} 分别为 A、B 水库不蓄电能损失值； W_{bA} 为 A 水库在面临时段以后至供水期末的不蓄水量； W'_{bB} 为面临时段以后的供水期内，两电站间的区间不蓄水量； V_A 为 A 水库蓄水量。

上级 A 电站的蓄水量及不蓄水量都将经过下游 B 电站发电, 因此式(18)括号内有三部分水量。

① 自计算时段至水库供水期末, 按不蓄电能损失总值最小原则求梯级水库放水次序。则上游水库 A 先供水的有利条件为

$$W_{bA}\Delta H_A < (W_{bA} + V_A + W'_{bB})\Delta H_B \quad (19)$$

将式(17)代入式(19)中得

$$\frac{W_{bA}}{F_A(H_A + H_B)} < \frac{W_{bA} + W'_{bB} + V_A}{F_B H_B} \quad (20)$$

令 $K_A = \frac{W_{bA}}{F_A(H_A + H_B)}$; $K_B = \frac{W_{bA} + W'_{bB} + V_A}{F_B H_B}$, 上游 A 电站水库先供水条件为 $K_A < K_B$; 下游 B 电站先供水条件为 $K_B < K_A$; 若 $K_A = K_B$; 则两库同时供水。

② 根据不蓄能量最大准则, 则可求出梯级水电站蓄水次序判别式。

上游 A 电站先蓄水的条件为

$$\frac{W_{bA}}{F_A(H_A + H_B)} > \frac{W_{bA} + W'_{bB} - V_A}{F_B H_B} \quad (21)$$

令 $K'_A = \frac{W_{bA}}{F_A(H_A + H_B)}$; $K'_B = \frac{W_{bA} + W'_{bB} - V_A}{F_B H_B}$, 即上游 A 电站水库先蓄水的条件为 $K'_A > K'_B$; 下游 B 电站水库先蓄水的条件为 $K'_A < K'_B$; 则两水库同时蓄水的条件为 $K'_A = K'_B$ 。

2) 并联水库的蓄放水次序。设 A、B 两水电站为电力系统中并联的年调节水电站, 当它的不蓄出力不能满足电力系统要求而需要水库供水时, 若由 A 电站水库供水时, 需下放流量 Q_A 为

$$Q_A = \frac{\Delta V_A}{\Delta t} = \frac{F_A \Delta H_A}{\Delta t} = \frac{N_K}{AH_A} \quad (22)$$

若系统缺少出力由 B 电站承担时, 需下放流量 Q_B 为

$$Q_B = \frac{F_B \Delta H_B}{\Delta t} = \frac{N_K}{AH_B} \quad (23)$$

式中: N_K 为水库供水补充出力; Δt 为供水时间; A 为出力系数; 其它符号含义同前。

由式(22)及式(23)得

$$\Delta H_B = \frac{F_A H_A}{F_B H_B} \Delta H_A \quad (24)$$

两水库的不蓄电能损失分别为

$$\Delta E_{bA} = W_{bA} \Delta H_A \eta_A / 367.1 \quad (25)$$

$$\Delta E_{bB} = W_{bB} \Delta H_B \eta_B / 367.1 \quad (26)$$

式中: W_{bB} 为 B 水库在面临时段以后至供水期末的不蓄水量。

为使电力系统获得电能最大, 应以不蓄电能损失最小为判别供水次序。若 $\eta_A = \eta_B$, $\Delta E_{bA} < \Delta E_{bB}$, 则

$$W_{bA} \Delta H_A < W_{bB} \Delta H_B \quad (27)$$

即 A 电站水库先放水有利; 否则应 B 电站先放水。将式(24)代入式(27)得

$$\frac{W_{bA}}{F_A H_A} < \frac{W_{bB}}{F_B H_B} \quad (28)$$

若令 $K_A = \frac{W_{bA}}{F_A H_A}$, $K_B = \frac{W_{bB}}{F_B H_B}$, 则 A 电站水库先供水条件为 $K_A < K_B$; B 电站水库先供水条件为 $K_B < K_A$; 若 $K_A = K_B$, 则两库同时供水。

综上所述, 并联水库的蓄放水次序判别式为

$$K' = \frac{W'_b}{FH} \tag{29}$$

式中: W'_b 表示自计算时段起至蓄水期末的天然来水量减去水库汛期待蓄库容。应用时为 K' 大的水库先蓄, 若两库 K' 值相等则同时蓄水。

不论是串联还是并联水库, 也不论是供水还是蓄水, 各时段水库的面积 F 及水头 H 都在不断变化, 所以 K 值也是在变化的, 应注意逐时地判别调整。

3) 判别式的应用。在运用时, 每一时刻或每一时刻初的水库水位是知道的。如果面临时段、甚至所余供水期的各库入流, 根据预报亦能知道, 就可计算各水电站的 K 值。由 K 大小即可判别该时段应由哪个水电站先供水为有利。当根据过去水文资料需作调度曲线时, 同样可自供水期初满库开始由式(29)确定每一时刻由哪个水库供水。因此两水电站的调度曲线就可由水能计算逐时段进行, 以下两点需要注意:

① 由于考虑到综合利用要求(如下游航运、灌溉、给水等)及其他限制条件(如水电站的装机容量和必需最小出力等), 同时为了避免某些水库可能期末来不及泄放, 发生无益弃水, 实际工作中并不绝对地按 K 值判别决定各水电站水库的蓄放次序; 较多情况下是同时供水, 仅以 K 值来判别决定水电站供水多少的问题。

② 在蓄水期, 由于判别式没有考虑汛末可能发生弃水的因素, 为了在判别蓄放水次序的同时顾及避免弃水, 各水库应根据汛期天然来水的情况, 按绘各库单独的防弃水调度线的方法, 从汛末开始以装机容量逆时序进行调节计算, 推得水库蓄水位过程线作为具体操作的上限控制线, 这样就可避免弃水。然后, 在避免弃水的条件下进行判别水库的蓄放水次序。另外, 在特别枯水年限制出力及丰水年利用多余水量的调度规则, 则各库应单独制定。

2.4. 水库群蓄水优化模型建立与高效求解

2.4.1. 水库群蓄水优化调度模型

对复杂梯级水库群而言, 考虑以下优化目标: 防洪目标, 发电目标, 蓄水目标, 航运目标, 生态目标。其中, 防洪目标以约束条件的形式实现, 其余各项目标函数如下:

1) 发电目标: 以计算时段梯级水库总发电量表示:

$$\min E = \sum_{t=1}^T \left(\sum_{i=1}^n N_i(t) \right) \cdot \Delta t, N_i(t) = K_i Q_i(t) H_i(t) \tag{30}$$

式中: T 为计算总时段数; n 为复杂梯级群的水库个数; $N_i(t)$ 为第 i 个水库在第 t 时段的出力, 是出力系数 K_i , 发电流量 $Q_i(t)$, 平均发电水头 $H_i(t)$ 的乘积; Δt 为计算时段长。

2) 蓄水目标: 以蓄满率最大和弃水量最小表示:

$$\max FR = \sum_{i=1}^n \alpha_i \frac{V_{\text{high}}(i) - V_{\text{min}}(i)}{V_{\text{max}}(i) - V_{\text{min}}(i)} \times 100\% = \frac{W'_b}{FH} \tag{31}$$

$$\min Q_w = \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T Q_{w,i}(t) \tag{32}$$

式中: $V_{\text{high}}(i)$ 为第 i 个水库蓄水期末蓄水位对应的库容; $V_{\text{max}}(i)$ 为第 i 个水库的正常蓄水位对应的库容; $V_{\text{min}}(i)$ 为第 i 个水库的死水位对应的库容; α_i 为第 i 个水库蓄满率所占的权重, 其值可根据该水库所占梯级水库群总兴利库容的比例确定; $Q_{w,i}(t)$ 表示第 i 个水库第 t 时段的弃水量。

3) 航运目标: 以通航率表示。

$$\min R_{nav} = \frac{1}{nT} \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T \#(Q_{out,i}(t) \geq Q_{ship,i}) \times 100\% \quad (33)$$

式中： $Q_{ship,i}$ 表示第 i 个水库的最小通航流量； $\#(\cdot)$ 为指示函数，满足括号内条件则为 1，否则为 0。

4) 生态目标：以生态流量保证率表示：

$$\min R_{eco} = \frac{1}{nT} \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T \#(Q_{out,i}(t) \geq Q_{eco,i}) \times 100\% \quad (34)$$

式中： $Q_{eco,i}$ 表示第 i 个水库的最小生态流量。

2.4.2. 模型约束条件

- 1) 水量平衡约束。
- 2) 水位约束：水库允许最高和最低水位。
- 3) 出力约束：水电站允许最大和最小出力。
- 4) 出库流量约束：下游防洪安全泄量。
- 5) 地质灾害约束：即水库泄洪量变化的允许值。
- 6) 河道演算约束：采用马斯京根法，见式(6)。
- 7) 非负约束：以上各项变量均大于等于零。

2.4.3. 模型优化方法

复杂串并联水库群的优化求解问题属于具有高维度、非线性、多目标等特性的复杂优化问题，无法采用常规优化算法如动态规划(DP)、单纯形法、解析法等进行求解[16]。目前在水库群优化调度问题有着较为广泛应用的方法有第二代非支配排序遗传算法(NSGA-II)，多目标粒子群算法(MPSO)，差分演化算法(DEMO)，Pareto 储存式动态维度搜寻(PA-DDS)等。对于多目标优化性能的评价则主要从收敛性和分布性这两个方面来考量，收敛性指的是求解的最优解与非劣最优解的趋近程度，分布性则是指所求解的空间分布范围大小及其在目标空间分布的均匀程度[17]。

2.5. 联合蓄水调度方案的评价指标体系

汛末蓄水期具有其自身的特点：既需要考虑防洪安全，又要保障水库蓄满率，并提高发电、航运、生态等效益。针对防洪、发电、供水以及生态等需求，考虑水库自身、上下游水库间蓄水的竞争协同关系，选取常规调度、确定性最优调度等作为比较基准，将单一水库汛末蓄满率指标扩充到梯级水库群，提出联合蓄水调度方案的评价方法；此外，还需充分考虑径流序列的非一致性，采用调度效益均值、方差等统计信息，全面评估调度方案的稳健性指标，形成联合蓄水调度方案的评价指标体系，为面临时段的决策提供参考。

如何协调水库群联合蓄水调度兴利与防洪风险之间的矛盾，合理制定联合蓄水调度方案是一个多目标评价决策问题。投影寻踪法是 20 世纪 70 年代发展起来的一类新兴的多元数据分析的数学方法，它是用来处理和分析高维数据，尤其是来自非正态总体分布的高维数据的一种探索性分析的有效方法。

3. 溪洛渡 - 向家坝 - 三峡梯级水库提前蓄水模拟调度

选择溪洛渡、向家坝和三峡梯级水库开展提前蓄水模拟调度。采用前述方法确定水库蓄水时机和防洪安全控制水位，给出两种蓄水方案如表 1 所示：设计蓄水方案，其中三峡水库采用优化方案；提前蓄水方案，即把溪洛渡和向家坝蓄水提前到 8 月 25 日，三峡水库蓄水提前至 9 月 1 日，汛限水位为始蓄水位。从 8.25 日起蓄水至 9 月 10 日，溪洛渡和向家坝水库分别蓄至 586 m 和 372 m，并维持在该水位至 9 月 15 日；此后均匀蓄水至 9 月 30 日，分别蓄至正常蓄水位 600 m 和 380 m。三峡水库提前至 9 月 1 日从 145.0 m 开始蓄水，9 月 30 日前水位不超过 165.0 m，10 月底可蓄至最高蓄水位 175.0 m [4]。

现采用 1950~2010 年每年 8 月 25 日~11 月 30 日的日径流资料，运用多目标模型进行模拟优化调度，表 2

Table 1. Design and early refill schemes of the Xiluodu-Xiangjiaba-Three Gorges reservoirs

表 1. 溪洛渡 - 向家坝 - 三峡水库设计和提前蓄水方案

蓄水方案	蓄水计划	溪洛渡	向家坝	三峡
设计蓄水方案	汛限水位	560 m	370 m	145 m
	起蓄时间	9月10日	9月10日	9月15日
	计划蓄满时间	9月30日	9月30日	10月31日
	9月30日水位	600 m 蓄满	380 m 蓄满	156 m
提前蓄水方案	起蓄时间	8月25日	8月25日	9月1日
	计划蓄满时间	9月30日	9月30日	10月31日
	9月30日水位	600 m 蓄满	380 m 蓄满	165 m

Table 2. Comparison of designed and early refill scheme results for the Xiluodu-Xiangjiaba-Three Gorges reservoirs

表 2. 溪洛渡 - 向家坝 - 三峡水库设计和提前蓄水方案结果比较

方案	溪洛渡			向家坝			三峡			梯级		
	发电量 (亿 kW·h)	弃水量 (亿 m ³)	蓄满率	发电量 (亿 kW·h)	弃水量 (亿 m ³)	蓄满率	发电量 (亿 kW·h)	弃水量 (亿 m ³)	蓄满率	发电量 (亿 kW·h)	弃水量 (亿 m ³)	蓄满率
设计	230.75	95.08	95.15	114.50	103.32	83.00	276.55	72.44	97.73	621.80	72.44	96.44
提前	240.39	87.71	97.73	116.77	97.98	93.40	295.08	52.53	98.80	652.24	52.53	98.29
Δ	9.64	-7.37	/	2.27	-5.34	/	18.53	-19.91	/	30.44	-19.91	/
%	4.18	-7.75	2.58	1.98	-5.17	10.4	6.70	-27.48	1.07	4.89	-27.48	1.91

注：表中 Δ 代表增减量，% 代表增减量百分率。

调度结果显示：提前蓄水方案与设计方案相比，在确保防洪安全和满足其他约束条件下，梯级水库蓄水期间的年均发电量增加了 30.44 亿 kW·h (或增加 4.89 %)；蓄满率为 96.44%，提高了 1.91%；经济社会效益十分显著。

4. 结语

长江上游水库群的修建和投入运行，改变了干支流的天然径流和水资源利用现状，在汛末蓄水期可能出现各水库之间竞争性蓄水，导致有些水库蓄满率不高和水资源利用矛盾等问题更加突出。这就要求我们从流域整体角度出发，充分认识汛末蓄水期长江流域不同区域水文变化规律和特点，结合各个水库的特性和调节能力，以及长江中下游用水需求过程，综合考虑协调，研究出科学合理的水库群联合蓄水调度方案，实现水库群的防洪、兴利、生态等综合利用目标最优化，保障长江流域的健康和可持续发展。

基金项目

十三五国家重点研发项目(2016YFC0402206)。

参考文献 (References)

- [1] 刘攀, 郭生练, 王才君, 周芬. 三峡水库动态汛限水位与蓄水时机选定的优化设计[J]. 水利学报, 2004, 35(7): 86-91.
LIU Pan, GUO Shenglian, WANG Caijun and ZHOU Fen. Optimization of limited water level in flood season and impounding scheme for reservoir in Three Gorges Project. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 35(7): 86-91. (in Chinese)
- [2] 李义天, 甘富万, 邓金运. 三峡水库 9 月分旬控制蓄水初步研究[J]. 水力发电学报, 2006, 24(1): 61-66.
LI Yitian, GAN Fuwan and DENG Jinyun. Preliminary study on impounding water of Three Gorges Project in September. Journal of Hydroelectric Engineering, 2006, 25(1): 61-66. (in Chinese)
- [3] 彭杨, 李义天, 张红武. 三峡水库汛末蓄水时间与目标决策研究[J]. 水科学进展, 2003, 14(6): 682-689.

- PENG Yang, LI Yitian, XIE Baoling, et al. Study on an ahead of schedule impounding scheme of the Three Gorges Project (TGP) in the flood recession period. *Advances in Water Science*, 2003, 14(6): 682-689. (in Chinese)
- [4] 刘心愿, 郭生练, 刘攀, 李响. 考虑综合利用要求的三峡水库提前蓄水方案研究[J]. *水科学进展*, 2009, 20(6): 851-856.
LIU Xinyuan, GUO Shenglian, LIU Pan and LI Xiang. Scheme of impounding in advance for the Three Gorges Reservoir by considering the comprehensive utilization benefits. *Advances in Water Science*, 2009, 20(6): 851-856. (in Chinese)
- [5] 郭家力, 郭生练, 李天元, 陈桂亚. 三峡水库提前蓄水防洪风险分析模型及其应用[J]. *水力发电学报*, 2012, 30(4): 16-21.
GUO Jiali, GUO Shenglian, LI Tianyuan and CHEN Guiya. Flood control risk analysis model for Three Gorges Reservoir early refill operation. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2012, 30(4): 16-21. (in Chinese)
- [6] 李雨, 郭生练, 郭海晋, 张洪刚, 丁胜祥. 三峡水库提前蓄水的防洪风险与效益分析[J]. *长江科学院院报*, 2013, 30(1): 8-14.
LI Yu, GUO Shenglian, GUO Haijin, ZHANG Honggan and DIN Shengxiang. Flood control risk and benefit of impounding water in advance for the Three Gorges Reservoir. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2013, 30(1): 8-14. (in Chinese)
- [7] 王俊, 郭生练, 丁胜祥. 三峡水库提前蓄水关键技术研究[M]. 武汉: 长江出版社, 2012.
WANG Jun, GUO Shenglian and DIN Shengxiang. Key technologies for early refill operation of Three Gorges Reservoir. Wuhan: Changjiang River Press, 2012.
- [8] 付湘, 李安强, 石萍. 不影响三峡水库蓄水的上游水库群蓄水方法研究[J]. *人民长江*, 2013, 44(4): 8-12.
FU Xiang, LI Anqiang and SHI Ping. Analysis on water storage plan of upstream reservoir group on the premise of ensuring impoundment of Three Gorges Reservoir, Yangtze River, 2013, 44(4): 8-12. (in Chinese)
- [9] 欧阳硕, 周建中, 周超, 等. 金沙江下游梯级与三峡梯级枢纽联合蓄放水调度研究[J]. *水利学报*, 2013, 44(4): 435-443.
OUYANG Shuo, ZHOU Jianzhong, ZHOU Chao, et al. Research on impounding dispatch for the lower cascade reservoir in Jinsha River and Three Gorges cascade. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2013, 44(4): 435-443. (in Chinese)
- [10] 丁毅, 傅巧萍. 长江上游梯级水库群蓄水方式初步研究[J]. *人民长江*, 2013, 44(10): 72-75.
DING Yi, FU Qiaoping. Preliminary research on water storage mode of cascade reservoirs in upper Yangtze River. *Yangtze River*, 2013, 44(10): 72-75. (in Chinese)
- [11] 黄草, 王忠静, 李书飞, 等. 长江上游水库群多目标优化调度模型及应用研究(I)模型原理及求解[J]. *水利学报*, 2014, 45(9): 1009-1018.
HUANG Cao, WANG Zhongjing, LI Shufei, et al. A multi-reservoir in the upper Yangtze operation optimization model and application River Basin (I) principle and solution of the model. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2014, 45(9): 1009-1018. (in Chinese)
- [12] 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]. *水利学报*, 2014, 45(10): 1175-1183.
HUANG Cao, WANG Zhongjing, LU Jun, et al. A multi-reservoir operation optimization model and application in the upper Yangtze River Basin (II) operation rules and water releasing/storing sequences. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2014, 45(10): 1175-1183. (in Chinese)
- [13] 周研来, 郭生练, 陈进. 溪洛渡 - 向家坝 - 三峡梯级水库联合蓄水方案与多目标决策研究[J]. *水利学报*, 2015, 46(10): 1135-1144.
ZHOU Yanlai, GUO Shenglian and CHEN Jin. Multi-objective decision and joint refill schemes of Xiluodu-Xiangjiaba-Three Gorges cascade reservoirs. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2015, 46(10): 1135-1144. (in Chinese)
- [14] 刘强, 钟平安, 徐斌, 郭乐, 陈宇婷. 三峡及金沙江下游梯级水库群蓄水期联合调度策略[J]. *南水北调与水利科技*, 2016, 14(5): 62-70.
LIU Qiang, Zhong Pingan, XU Bin, GUO Le and CHEN Yuting. Joint operation strategy of water impoundment period of Three Gorges Jinsha River lower reach cascade reservoirs. *South to North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2016, 14(5): 62-70. (in Chinese)
- [15] CHEN, J. H., GUO, S. L., LI, Y., LIU, P. and ZHOU, Y. L. Joint operation and dynamic control of flood limited water levels for cascade reservoirs. *Water Resources Management*, 2013, 27(3): 749-763.
- [16] 郭生练, 陈炯宏, 刘攀, 李雨. 水库群联合优化调度研究进展与展望[J]. *水科学进展*, 2010, 21(4): 496-503.
GUO Shenglian, CHEN Jionghong, LIU Pan, LI Yu. State-of-the-art review of joint operation for multi-reservoir systems. *Advances in Water Science*, 2010, 21(4): 496-503. (in Chinese)
- [17] 杨光, 郭生练, 刘攀, 李立平, 刘章君. PA-DDS 算法在水库多目标优化调度中的应用[J]. *水利学报*, 2016, 47(6): 789-797.
YANG Guang, GUO Shenglian, LIU Pan, LI Liping and LIU Zhangjun. PA-DDS algorithm for multi-objective reservoir operation. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2016, 47(6): 789-797. (in Chinese)