

文章编号:0559-9350(2013)04-0435-09

金沙江下游梯级与三峡梯级枢纽联合蓄放水调度研究

欧阳硕¹, 周建中¹, 周超², 王浩^{1,3}

(1. 华中科技大学 水电与数字化工程学院, 湖北 武汉 430074; 2. 华中科技大学 控制科学与工程系, 湖北 武汉 430074;
3. 中国水利水电科学研究院 水资源研究所, 北京 100038)

摘要: 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, 以金沙江四库和三峡梯级枢纽为研究对象, 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, 提出一种新的蓄放水策略来判定流域梯级各水库的蓄水时机及次序, 通过对典型年不同频率的来水进行调洪演算模拟, 得到各水库不同频率的蓄水控制线, 进而绘制蓄水调度图; 在此基础上, 建立基于蓄水调度图的蓄水优化调度模型, 并采用仿电磁学全局优化算法对模型进行求解。优化结果表明, 在不减少流域梯级水库群汛末蓄水效益的前提下, 与流域库群原规划方案相比, 运用本文方法制定出的梯级水库群蓄水优化调度方案在不增加流域防洪风险的同时, 可提高梯级水库群蓄水期蓄满度, 减少弃水量, 并增加发电等兴利效益。

关键词: 金沙江-三峡梯级; 防洪安全; 蓄水时机及次序; 供需水矛盾; 蓄水调度

中图分类号: TV697.1

文献标识码: A

1 研究背景

流域水库群统一蓄水调度, 合理设定各梯级水库蓄水方案, 直接影响到流域水库群的综合兴利效益。长江上游干支流水库已建和在建的水库群总库容在800亿 m^3 以上, 调节库容在400亿 m^3 以上, 其中调节库容大于5亿 m^3 的有近20个, 随着上游金沙江梯级等大型水库的建成, 三峡水库蓄水难度加大, 若来水较枯, 按原设计方案进行集中汛末蓄水则可能难以蓄至正常蓄水位, 影响梯级蓄满率和发电效益。因此, 亟需开展金沙江梯级四库和三峡梯级的联合蓄水调度研究, 建立统一、协调的蓄水方案, 在保障流域防洪安全的前提下提高梯级各水库的汛末蓄满率, 以缓解水资源供需矛盾, 最大限度地发挥水库群的综合效益。

目前, 针对单体水库及水库群联合蓄放水问题, 国内外许多学者从不同角度展开了研究, 取得了较为丰硕的研究成果。刘攀等^[1]建立用于动态汛限水位和蓄水时机优化的混合规划数学模型, 从系统优化的角度对三峡水库运行初期的蓄水方式和时机选择进行了研究, 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]和彭杨等^[3-4]通过研究发现: 三峡水库汛末提前蓄水、分阶段蓄水的水库综合效益最大; 刘心愿等^[5]综合考虑防洪、发电、通航和蓄满率等要求, 建立了多目标蓄水调度模型, 并构建了“优化-模拟-检验”的算法流程; 闵要武等^[6]提出基于保证率的三峡水库来水和下游需水计算方法, 得到了基于来水保证率的三峡水库分阶段蓄水调度图; 刘丹雅等^[7]和郑守仁等^[8]根据三峡工程3年实验性蓄水运行的实际经验, 探讨了三峡水库汛期防洪调度方式、汛末提前蓄水时机及分时段控制蓄水位等问题; 陈进^[9]认为, 只有通过流域综合协调和管理, 才能有效地解决竞争性蓄

收稿日期: 2012-03-02

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51239004); 高等学校博士学科点专项科研基金(20100142110012)

作者简介: 欧阳硕(1988-), 男, 湖北监利人, 博士生, 主要从事流域水库群蓄放水及防洪优化调度研究。

E-mail: Shuo_Ouyang@126.com

通讯作者: 周建中(1959-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事水电源及其复杂系统分析的先进理论与方法研究。

E-mail: jz.zhou@hust.edu.cn

水问题和减轻蓄水对中下游的影响；郭旭宁等^[10]构建了基于模拟-优化模式的混联供水水库群联合优化调度规则求解框架，解析了混联水库群间竞争关系。

已有研究工作在确定单库蓄水方式、时机及蓄水调度方式等方面取得较为丰富的成果，但多集中在蓄放水策略的探讨上，且研究尺度稍显单一，较少涉及流域水库群联合蓄水调度建模和模型高效求解技术等更具工程实用性的问题。为此，本文以金沙江四库和三峡梯级联合蓄水调度为实例，将流域水库群蓄水原则与K值判别式法相结合，提出一种新的蓄放水策略来判定流域各水库的蓄水时机和次序，同时通过对不同频率历史典型洪水进行调洪演算模拟，计算各频率的水库群蓄水控制线，进而绘制蓄水调度图；在此基础上，建立基于蓄水调度图的蓄水优化调度模型，并采用仿电磁学全局优化算法对模型进行求解，制定出可在满足流域防洪安全、缓解流域梯级蓄放水矛盾的同时提高梯级各水库蓄满率的梯级水库群蓄水优化调度方案，为研究和制定长江流域大型水库群统一的蓄水方案，建立科学的水库群蓄水管理体制和机制，提供一种新的思路和方法。

2 梯级水库群蓄水时机和蓄水次序

为实现流域梯级库群一体化调蓄，本文采用与流域水库群蓄水原则^[9]相结合的K值判别式法，确定梯级水库群各库起蓄时机、蓄水次序及蓄水时间。各水库蓄水判别式可表示为：

$$K = \frac{W + \sum V}{F \sum H} \quad (1)$$

式中： W 为某水库坝址处的入库总水量； $\sum H$ 为本水库及其下游水库的总水头； F 为水库水面面积； $\sum V$ 为上游梯级各水库可供发电的总蓄水量。

判别式反映了单位电能所引起的能量损失，K值大的水库应优先蓄水^[11]，当水库群完全按上述判别式控制蓄水次序时，可使水电站群尽可能保持在总水头最高的情况下运行，得到较高的联合保证出力。然而，该蓄水次序判别方法也存在明显的缺陷：首先，该方法未考虑各水库干支流地理位置关系、是否承担防洪任务及上下游库群间水力电力联系等因素，单纯从使时段末水库群蓄水电能最多的角度并不能缓解流域水库群竞争性蓄水，提高流域水库群汛末蓄满率；其次，该方法未考虑各水库蓄满后可能弃水的因素，容易导致判别系数较小的水库过早放空致使汛末可能蓄不满，降低了水库汛末蓄满率，而判别系数较大的水库蓄水过多致使汛期产生弃水。

针对上述问题，为合理控制梯级水库群进行适度蓄水，本文参考文献[9]中提出的流域水库群蓄水3条原则：(1)在同一流域中，单库服从梯级，梯级服从流域；(2)上游水库先蓄水，下游水库后蓄，支流水库先蓄，干流水库后蓄；(3)无防洪库容或任务的水库先蓄，防洪库容大的水库后蓄，错开蓄水时间，利于梯级水库群蓄水统一调配。将其与K值判别式法相结合，提出一种新的蓄放水策略来判定流域各水库的蓄水时机和次序。其具体实现过程如下：根据该蓄水调度原则，对水库群各个水库进行蓄水分级，其中不具有防洪任务或处于梯级上游的水库优先蓄水，为1级；其次，具有防洪任务但防洪任务较轻水库较先蓄水，为2级；最后，具有整体流域控制性功能、巨大防洪库容或重大防洪任务的水库最后蓄水，为3级；同时，在梯级库群未分级前，采用K值判别式法对梯级水库群进行计算，得出各水库的K值大小，结合蓄水原则分级及K值判别法计算结果，在不同级中以K值判别式法的结果对各水库蓄水次序进行排序，K值大的水库应优先蓄水。

以金沙江四库和三峡梯级联合蓄水调度为实例，以上述方法判别流域水库群各水库的蓄水时机和次序，梯级水库群分级及K值判别法结果如表1所示。其中，乌东德、白鹤滩为1级，溪洛渡为2级，向家坝、三峡为3级；在第1级中，乌东德K值大于白鹤滩，故乌东德在白鹤滩前蓄水；在第2级中，溪洛渡水库在第3级向家坝、三峡前优先蓄水；第3级中，向家坝K值大于三峡水库，故向家坝先蓄水，三峡后蓄水。

综合上述蓄水原则分级和K值判别法计算结果，并考虑金沙江—三峡梯级的工程实际，本文制

表1 梯级水库群分级及K值判别法结果

水库	乌东德	白鹤滩	溪洛渡	向家坝	三峡
等级	1	1	2	3	3
K值区间 $\times 10^5$	[306~7]	[240~18]	[581~181]	[993~684]	[486~131]

定的蓄放水策略如表2所示：金沙江下游四库梯级的乌东德、白鹤滩位于上游，乌东德不承担防洪任务且防洪库容较小，可考虑在8月开始蓄水，至9月中旬蓄满；而白鹤滩需配合三峡梯级承担部分防洪任务，可考虑在8月下旬开始蓄水，至9月底蓄满；考虑到位于乌东德、白鹤滩下游的溪洛渡水库需配合向家坝和三峡水库承担防洪任务，其蓄水时机及方式对下游水库蓄水影响较大，从水库群综合效益最优考虑，将这个水库的蓄水起始时间设定为9月初并采用分时段控制的方式确定关键时间节点的最高水位，至10月上旬蓄满；承担川江防洪任务的向家坝水库安排在9月中旬开始蓄水，至10月初蓄满；最后，承担长江中下游荆江防洪任务三峡梯级安排在9月中旬开始蓄水，至10月底蓄至正常蓄水位，以防备可能出现的洪水。综上所述，与流域梯级水库群原规划蓄水方案相比，本文设计的蓄放水策略能够在充分提高流域梯级水库群综合效益的同时，延长长江大型水库群的蓄水期，避免集中蓄水和竞争性蓄水，以减少上游水库蓄水对三峡水库蓄水和下游用水产生的不利影响。

表2 梯级水库群蓄水策略

		乌东德	白鹤滩	溪洛渡	向家坝	三峡
起蓄时间	优化方案	8月20日	8月30日	9月01日	9月10日	9月11日
	规划方案	8月10日	8月10日	9月10日	9月10日	10月1日
蓄满时间	优化方案	9月20日	9月30日	10月10日	9月30日	10月31日
	规划方案	10月10日	10月10日	9月30日	9月20日	10月31日

3 基于蓄水调度图的梯级水库群蓄水优化调度模型

3.1 蓄水期来水和下泄流量需求分析 梯级水库群蓄水受来水和蓄水期间下泄流量需求的制约，蓄水期间下泄流量约束主要考虑流域汛末防洪及长江中下游用水要求。因此，本文首先进行蓄水期来水和下泄流量情景设置，为协调好上游水库蓄水与下游用水的矛盾，结合蓄水任务分析下泄流量需求，在水库群蓄满的同时，保证下游供水。其中，三峡水库是上游水库群调蓄后的最后一级水库，下游用水需求以三峡为控制断面进行分析。

利用1882—2009年共128年的宜昌与武隆站径流资料，推求蓄水期的设计流量，其中蓄水期万年一遇设计流量为 $80\ 500\text{m}^3/\text{s}$ ，相当于年最大100年一遇设计洪峰流量^[5]。1988年汛期流域径流具有长江流域典型汛期洪水“连续多峰”的特点，能够体现长江流域汛末蓄水期支流汇流较多、河道径流组成复杂的情势，且汛期洪水水量“前多后少”，洪峰持续时间短，峰值较大的特点，在前期防洪风险较大，需要水库在汛期预留较大的防洪库容以保证后期的防洪安全，而汛末水量小，对流域汛末水库群蓄水不利，易引发竞争性蓄水。故本文选定1988年蓄水期流量过程作为典型年来水，整个蓄水期的流量过程进行同频率放大，假定20年一遇、100年一遇、1000年一遇和10000年一遇等4种洪水过程。

同时根据《三峡水库优化调度方案》^①、《溪洛渡水电站水库调度规程编制大纲(初稿)》^②和《向家坝水库调度规程(第一稿)》^③等规定设置边界条件。

(1)对于金沙江四库：①20年一遇以下洪水，控制金沙江梯级拦蓄流量不超过 $3\ 000\text{m}^3/\text{s}$ ；②50

①水利部长江水利委员会。三峡水库优化调度方案，2009。

②中国水电顾问集团成都勘测设计研究院。金沙江溪洛渡水电站水库调度规程编制大纲(初稿)，2011。

③中国水电顾问集团成都勘测设计研究院。金沙江向家坝水电站水库调度规程(第一稿)，2011。

年一遇以下洪水,控制金沙江梯级拦蓄流量不超过 $9\,500\text{ m}^3/\text{s}$; ③100年一遇以下洪水,控制金沙江梯级拦蓄流量不超过 $11\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 。

(2)对于三峡水库: ①100年一遇以下洪水,控制三峡梯级下泄流量不超过 $55\,000\text{ m}^3/\text{s}$; ②100年一遇上至1000年一遇洪水,控制三峡梯级下泄流量不超过 $78\,000\text{ m}^3/\text{s}$; ③洪水超过1000年一遇或水库水位已达 175 m ,以保证大坝安全为原则,水库按泄流能力下泄; ④考虑汛末下游航运、供水等需求,10月蓄水期间,三峡梯级上、中、下旬的最小下泄流量分别按不小于 $8\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $7\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $6\,500\text{ m}^3/\text{s}$ 控制。

3.2 蓄水优化调度模型

3.2.1 目标函数 在满足防洪、航运等约束条件下,若将库群起蓄时间提前,增加水库发电效益,则势必会减少水库变动回水区的航运效益和增加水库防洪风险;反之,若推迟水库汛末蓄水时间,增加水库变动回水区的航运效益,则势必会减小水库的发电效益和降低下游通航保证率。因此,本文以绘制的梯级水库群蓄水调度图为基础,考虑防洪、发电及航运等效益及下游供水需求,在保证防洪安全及汛末蓄满的前提下以蓄水期发电量最大为目标,建立梯级水库群蓄水优化调度模型。

(1)蓄水期蓄满度最大。以调度期内水库群蓄水总量 V^* 最大为目标,即

$$V^* = \max \sum_{i=1}^N V_i / \sum_{i=1}^N TV_i \quad i=1, 2, \dots, N \quad (2)$$

式中: N 为水库群规模; V_i 、 TV_i 分别为 i 水库蓄水期末水位与正常蓄水位对应的蓄水库容。本文中水库群蓄水期蓄满度最大在模型中通过蓄水期末水位体现。

(2)发电量最大。以调度期内发电量 E^* 来表示,即

$$E^* = \max \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N p_{i,t} \Delta t \quad t=1, 2, 3, \dots, T \quad (3)$$

式中: T 为调度期长度; Δt 为时段长度, s ; $p_{i,t}$ 分别为第 i 水电站蓄水期第 t 时段的总出力。

3.2.2 约束条件 本文将水库大坝自身安全、上游防洪任务及下游航运需求以约束的形式给出,约束条件如下:

(1)库容(水位)上下限约束

$$Z_{i,t}^{\min} \leq Z_t^i \leq Z_{i,t}^{\max} \quad t=1, 2, 3, \dots, T \quad (4)$$

式中: $Z_{i,t}^{\min}$ 、 $Z_{i,t}^{\max}$ 和 Z_t^i 分别为蓄水期第 i 个水库 t 时段允许的最低水位、最高水位及面临时段水位。

该约束包括水库本身具有的最小、最大水位库容限制以及调度期内包含水位日变幅约束、蓄水量约束、上游防洪任务约束等设定的调节库容水位约束,取交集。

(2)水库水量平衡约束

$$V_t^i = V_{t-1}^i + (I_t^i - Q_t^i) \Delta t \quad t=2, 3, \dots, T \quad (5)$$

式中: V_t^i 、 I_t^i 和 Q_t^i 分别为蓄水期第 i 个水库 t 时段的水库库容、入库流量和出库流量。

(3)水库下泄能力约束

$$Q_{\text{out},t}^i \leq Q_{\max}^i(Z_t^i) \quad t=1, 2, \dots, T \quad (6)$$

式中: $Q_{\text{out},t}^i$ 为蓄水期第 i 个水库 t 时段的下泄流量; $Q_{\max}^i(Z_t^i)$ 为对应水位下该水库的最大下泄能力。

(4)出库流量约束: 根据长江中下游航运、生态用水的需要,为实现蓄水前后系统出力和出库流量的平稳过渡,拟定9月中下旬出库流量不低于 $8\,000\text{ m}^3/\text{s}$,10月上、中、下旬分别不低于 $8\,000$ 、 $7\,000$ 和 $6\,500\text{ m}^3/\text{s}$,同时要兼顾三峡库尾和葛洲坝下游的航道畅通,要求三峡出库流量日变幅不大于 $10\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 。即

$$Q_{\text{out},t}^i \geq Q_{\min}^i \quad i=1, 2, 3, \dots, N \quad (7)$$

$$|Q_{\text{out},t}^i - Q_{\text{out},t-1}^i| \leq \Delta Q^i \quad t=2, 3, \dots, T \quad (8)$$

式中: Q_{\min}^i 为该水库的最小下泄能力, ΔQ^i 为对应水库日下泄流量最大变幅。

(5)出力约束

$$P_{\min, t}^i \leq P_t^i \leq P_{\max, t}^i \quad i=1, 2, 3, \dots, N \quad (9)$$

式中: P_t^i 、 $P_{\min, t}^i$ 和 $P_{\max, t}^i$ 为蓄水期第*i*个水库*t*时段的出力、出力下限和出力上限。

(6)满足梯级水库群各库防洪调度规程要求,同时满足各水库在蓄水末期能够蓄满,即在蓄水末期水位达到正常高水位。

(7)调度线形状约束是指各调度线不出现水位上下波动。

3.2.3 仿电磁学算法 对于流域水库群联合蓄水调度问题,多采用线性规划、动态规划、逐次优化以及遗传算法等方法进行求解,计算效率较低,易陷入局部最优,且存在“维数灾”的难题。本文采用一种高效智能仿电磁学算法(electromagnetism-like mechanism, EM)进行求解。该算法是美国北卡罗莱纳州立大学Birbil博士于2003年提出的一种新型的随机全局优化算法,具有原理简单、运行效率高的特点,通过和遗传算法比较,证明该算法在配电网故障定位的快速性和高容错性方面具有明显优势^[12]。

EM算法通过模仿电磁学理论中吸引和排斥机理,使用电荷模拟的方法描述每个种群个体与当前代最优个体之间的接近程度,同时采用记忆和反馈机制指导搜索过程,确保优化问题种群的多样性和搜索空间的完整性,并提高搜索效率,从而解决制约传统方法所遇到的维数灾以及求解速度慢的难题。文献[13-18]中详细描述了EM的实现细节,其具体方式为:通过计算种群个体 X^i 的总矢量力 F^i ,来确定种群移动的方向和程度,对种群个体 X^i 进行移动进化,其数学表达式为:

$$X^i = X^i + \lambda \frac{F^i}{\|F^i\|} \quad \lambda \in U(0, 1) \quad (10)$$

式中: $U(0, 1)$ 为 $[0, 1]$ 之间均匀随机数产生函数, λ 为一随机进化参数,控制种群个体移动距离。

式中 F^i 的计算公式为:

$$F^i = \sum_{j \neq i}^N \left\{ \begin{array}{ll} \frac{(X^j - X^i) \cdot q^i q^j}{\|X^j - X^i\|^2} & \text{if } f(X^j) < f(X^i) \\ \frac{(X^i - X^j) \cdot q^i q^j}{\|X^j - X^i\|^2} & \text{if } f(X^j) \geq f(X^i) \end{array} \right\}, \quad \forall i \quad (11)$$

式中: $f(X^j)$ 为个体 X^j 的目标函数值; q^i 为个体 X^i 的带电荷量。

其计算表达式如下:

$$q^i = \exp \left(-D \frac{f(X^i) - f(X^{\text{best}})}{\sum_{k=1}^N f(X^k) - f(X^{\text{best}})} \right), \quad \forall i \quad (12)$$

由上式可知,EM采用电荷模拟来描述个体 X^i 与当前代最优个体 X^{best} 之间的距离,其带电量 q^i 越大表明距离最优个体越近。

3.2.4 模型求解 本文模型求解主要分为蓄水调度图绘制和不利来水模拟蓄水调度2个步骤组成,如图1所示:(1)蓄水调度图绘制:水库发电调度图通过设置预想出力线、保证出力线、限制出力和降低出力线等划分为若干出力区,对于发电调度进行规划。同理,针对梯级水库群汛末蓄水调度,可以设置不同来水频率下的蓄水调度控制线,进而绘制蓄水调度图。调度图绘制主要根据典型年不同频率来水,以10月底各水库均至正常蓄水位为目标,考虑蓄水期关键控制点不同运行水位防洪风险检验^[19]所求得的最大蓄水控制水位等蓄水期约束条件,反推各时段蓄水位至蓄水起始时段8月中旬,并结合兴利优化模拟演算循环修正该蓄水调度控制线,最终拟合出典型年不同频率来水的蓄水调度控制线,并以此为基础绘制蓄水调度图(如4.1节中图2—图5所示)。其中,防洪风险校验主要通过

蓄水期万年一遇洪水过程对关键控制点水位进行调洪检验，校验在后续蓄水期内该水位能否在大洪水下保证水库及下游的防护安全，其可行解中的最高水位即为该控制点最高蓄水控制水位。蓄水期蓄水控制水位越高，水库对蓄水期洪水调蓄能力越强，综合效益越大^[5]。(2)蓄水优化调度模拟：不利来水模拟蓄水调度主要是采用典型年不利径流资料系列按照蓄水调度图调度方式进行模拟调度，并统计各关键指标数值。蓄水调度图调度方式是根据不同频率来水蓄水控制线每时段节点处的水位、流量数据，比较来水对应时段处的坝前水位及流量，确定模拟来水所处不同来水的频率等级，结合不同频率来水等级下各水库运行策略，选取一条合理的水库蓄水调度过程线，在当前时刻采用跟随靠近该蓄水调度控制线的方式，进行水库群蓄水调度。

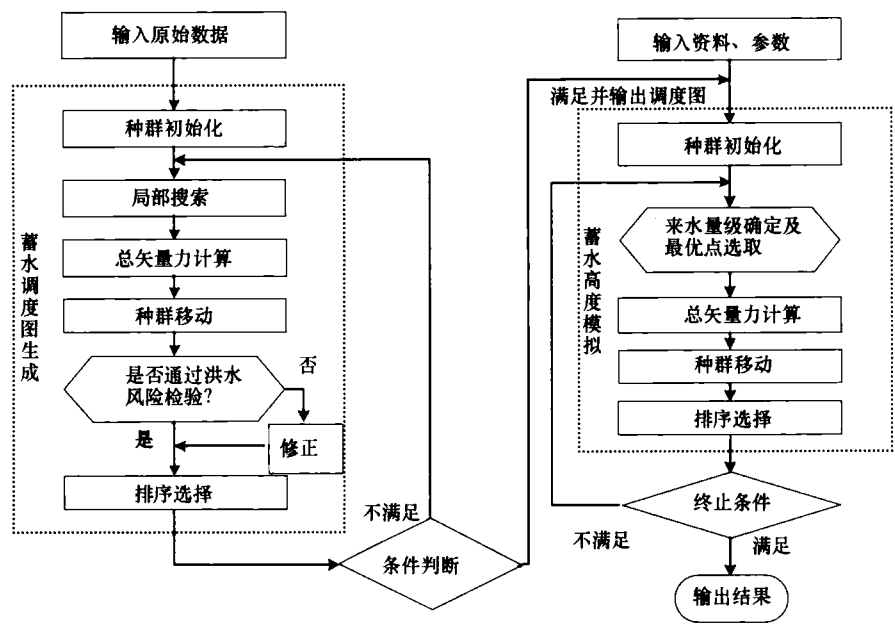


图1 模型求解流程

4 优化蓄水调度结果及分析

利用1882—2009年128年流域汛期日径流资料，采用与流域水库群蓄水原则相结合的K值判别式法，确定梯级水库群各库起蓄时机、蓄水次序及蓄水时间，根据典型年蓄水期(8月1日—10月31日)20年一遇、100年一遇、1000年一遇和10000年一遇洪水资料，计算基于不同频率来水的梯级水库群蓄水调度控制线，并据此绘制库群蓄水调度图，采用梯级水库群典型年蓄水期实测洪水模拟库群蓄水优化调度，在保证库群蓄水期蓄满度尽量大的前提下，以发电量最大为目标，得到蓄水优化调度线。

4.1 蓄水调度图分析 根据长江流域典型年蓄水期不同频率(20年一遇、100年一遇、1000年一遇和10000年一遇)洪水资料，计算不同典型频率来水下梯级水库群蓄水控制线，并据此与原规划方案调度线结合，绘制乌东德、白鹤滩、溪洛渡和三峡水库群蓄水优化调度图(图2—图5)。由图可见，针对不同频率来水，水库蓄水控制线增长速度不同，如10000年一遇洪水因入库流量最大，故开始蓄水时水库蓄水速率快，水位上升最快；此情景下要考虑流域防洪安全，蓄水控制线受到蓄水控制水位限制，故在到达控制水位后，不增加下游防洪风险的前提下，水位保持不变，以保证其后蓄水期水库防洪安全。在10月蓄水期，蓄水控制线水位抬升较快，以保证在10月下旬来水如20年一遇等较小洪水的条件下，满足流域防洪要求的同时，兼顾中下游供水需求，使控制线水位能均匀抬升到正常蓄水位，有利于水库汛末蓄满。相比于三峡原蓄水方案调度线，本文中基于不同频率库群来水的蓄水控制线均在原方案推荐蓄水线之上，当为丰水年时，蓄水控制线通过蓄水控制水位保证水库汛期

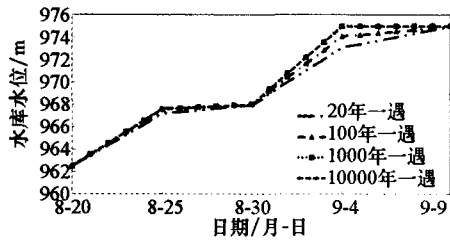


图2 乌东德水库蓄水调度

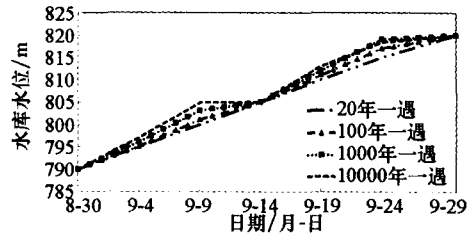


图3 白鹤滩水库蓄水调度

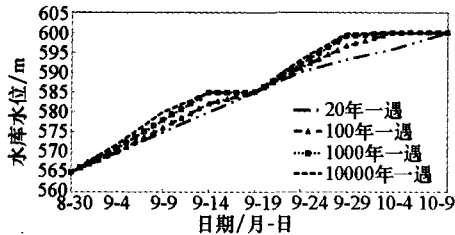


图4 溪洛渡水库蓄水调度

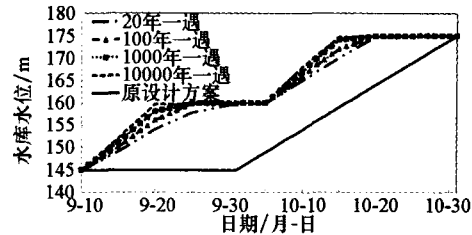


图5 三峡水库蓄水调度

防洪安全，且两种方案均能在蓄水期末蓄满；当为枯水年，且需要兼顾下游需水要求时，水库所需下泄流量增大、蓄水量减小，原蓄水方案无法保证水库蓄水期蓄水量，蓄不满的可能性很大。

4.2 优化调度方案结果及分析 根据梯级水库群蓄水调度图，采用典型年1998年两年一遇径流资料进行模拟调度。表3、图6分别为1998年典型年梯级水库群蓄水期不同蓄水方案结果对比表和三峡水库水位径流过程图，其中，为了比较优化与原规划蓄水方案间的优劣，乌东德、白鹤滩、向家坝蓄水期发电量按原规划方案起蓄时间开始统计至汛期末，溪洛渡、三峡水库蓄水期发电量按优化蓄水方案起蓄时间开始统计至汛期末。

表3 三峡水库蓄水期不同蓄水方案结果比较

水库名称	蓄水方案	起蓄时间	蓄水时间/d	蓄水期末水位/m	蓄满度/%	蓄水期发电量/(亿kW·h)	弃水量/亿m ³
乌东德	优化	8月20日	22	975.00	100	166.24	122.28
	原规划	8月10日	61	975.00	100	158.53	133.92
白鹤滩	优化	8月30日	31	820.00	100	241.79	111.53
	原规划	8月10日	61	820.00	100	231.91	103.42
溪洛渡	优化	9月01日	40	600.00	100	152.63	116.10
	原规划	9月10日	20	594.60	84.7	150.42	98.12
向家坝	优化	9月10日	20	380.00	100	59.30	83.34
	原规划	9月10日	10	378.67	89.77	62.36	25.54
三峡	优化	9月11日	50	175.00	100	172.97	14.30
	原规划	10月1日	31	173.36	94.9	156.03	119.39

由表1可知，对于金沙江下游梯级，乌东德和白鹤滩水库采用原规划方案和优化蓄水方案汛末均可蓄满，但优化蓄水方案兴利效益较两水库蓄水期发电量原设计方案分别提升了4.9%和4.3%；与原规划方案相比，梯级水库群优化蓄水方案中溪洛渡和向家坝水库汛末蓄满度分别提高了15.3%和10.2%，但是，由于优化方案提前了起蓄时间，并延长了蓄水期，使得向家坝水库原规划方案在后期运行水头均高于优化方案，致使其发电量减少了4.91%；而对于金沙江整体梯级，优化蓄水方案汛期蓄满度提高了7.39%，蓄水期发电量增加了33.7亿kW·h，即提高了5.58%；对于三峡水库，优化蓄水方案蓄水期发电量为172.97亿kW·h，弃水量为14.3亿m³，蓄满度为100%，相比于原规划方案，蓄满度增加5.1%，发电量增加10.8%，弃水量减少88.02%。其原因是三峡汛末蓄水时机过晚、起蓄水位偏低，且上游存在水库群同时段集中蓄水，导致入库水量减少，无法到达正常蓄满水位，同时

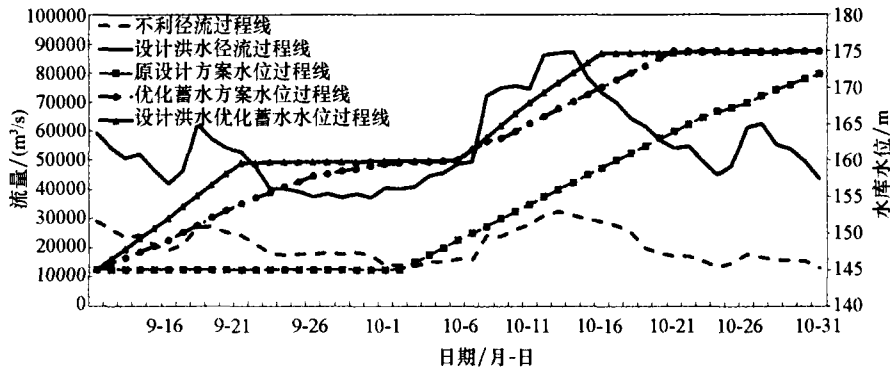


图6 三峡水库不同蓄水方案蓄水过程比较

蓄水前期汛限水位不变导致大量弃水并降低发电水头,使得发电量减少。由图6可知,三峡优化蓄水方案从9月11日开始蓄水,设置蓄水控制水位为160m,考虑蓄水期水库及中下游防洪安全和中下游航运及供水需求,至10月21日蓄满;设计方案从10月1日开始蓄水,严格按照设计汛限水位145m起蓄,不考虑蓄水期防洪风险及中下游航运及供水需求,至10月31日蓄至173.49m,未能达到正常蓄水位。因此,为保证金沙江四库梯级和三峡梯级蓄满度,优化蓄水调度方案将上游梯级水库错开三峡蓄水时间提前蓄满,同时三峡水库起蓄时间提前至9月11日,能够在实现汛末实测大洪水最高调洪水位不超过蓄水水位上限、10000年一遇设计流量最高调洪水位不超过175m及保证下游防洪安全的防洪目标的同时,提高流域水库群汛末蓄满度,优化梯级水库群蓄水期兴利效益,满足中下游主要控制断面供需水要求。

5 结论

针对金沙江四库和三峡梯级汛末竞争性蓄水问题,本文将流域水库群蓄水原则与K值判别式法相结合,提出一种新的蓄放水策略来判定流域梯级各水库的蓄水时机和次序,通过对典型年不同频率的来水进行调洪演算模拟,得到各水库不同频率的蓄水控制线,进而绘制蓄水调度图;在此基础上,建立基于蓄水调度图的蓄水优化调度模型,并采用EM算法对模型进行求解。应用本文模型算法进行了工程验证,结果表明:(1)金沙江四库及三峡汛末蓄水方式对三峡水库汛末蓄水影响较大,金沙江四库汛末集中蓄水导致梯级水库下泄流量减少,加剧流域水库群汛末竞争性蓄水,若遭遇枯水年,流域汛末来水较少,水库群蓄满度进一步降低,且无法满足下游汛末供水需求;(2)制定出的梯级水库群蓄水优化调度方案在不增加流域防洪风险的同时,提高梯级水库群蓄水期蓄满度,减少流域水库群汛末弃水,增大梯级发电量,缓解流域梯级蓄放水矛盾。

需要说明的是,本文模型主要考虑串联水库群的汛末蓄水情景,而对于串并联梯级水库群的蓄水调度则需进一步研究。

参 考 文 献:

- [1] 刘攀,郭生练,王才君,等.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(7): 86-91.
- [2] 李义天,甘富万,邓金运,等.三峡水库9月分旬控制蓄水初步研究[J].水力发电学报,2006,25(1): 61-66.
- [3] 彭杨,李义天,谢葆玲,等.三峡水库汛后提前蓄水方案研究[J].水力发电学报,2002,21(3): 12-20.
- [4] 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.
- [5] 刘心愿,郭生练,刘攀,等.考虑综合利用要求的三峡水库提前蓄水方案[J].水科学进展,2009,20(6): 851-856.

- [6] 闵要武, 张俊, 邹红梅, 等. 基于来水保证率的三峡水库蓄水调度图研究[J]. 水文, 2011, 31(3): 27-30.
- [7] 刘丹雅, 纪国强, 安有贵, 等. 三峡水库综合利用调度关键技术研究与实践[J]. 中国工程科学, 2011, 13(7): 66-69.
- [8] 郑守仁. 三峡工程设计水位 175m 试验性蓄水运行的相关问题思考[J]. 人民长江, 2011, 42(13): 1-7.
- [9] 陈进. 长江流域大型水库群统一蓄水问题探讨[J]. 中国水利, 2010(8): 10-13.
- [10] 郭旭宁, 胡铁松, 黄兵, 等. 基于模拟-优化模式的供水水库群联合调度规则研究[J]. 水利学报, 2011, 42(6): 705-712.
- [11] 罗斌, 钱凯霞, 李安强, 等. 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.
- [12] 郭壮志, 吴杰康. 配电网故障区间定位的仿电磁学算法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(13): 34-40.
- [13] Bırbil S I, Fang S H. An electromagnetism-like mechanism for global optimization[J]. Journal of Global Optimization, 2003, 25(3): 263-282.
- [14] Ching-Shih Tsou, Chin-Hsiung Hsu, Fong-Jung Yu. Using multi-objective electromagnetism-like optimization to analyze inventory tradeoffs under probabilistic demand[J]. Journal of Scientific & Industrial Research, 2008, 67(8): 569-573.
- [15] Tsou C S, Kao C H. Multi-objective inventory control using electromagnetism-like meta-heuristic[J]. International Journal of Production Research, 2008, 46(14): 3859-3874.
- [16] Guo Zhuangzhi. Radial Distribution Network Fault Location Based on Electromagnetism-like Mechanism[J]. Modern Electric Power, 2009, 26(5): 37-41.
- [17] Pei-Chann Chang, Shih-Hsin Chen, Chin-Yuan Fan. A hybrid electromagnetism-like algorithm for single machine scheduling problem[J]. Expert Systems with Applications, 2009, 36(2): 1259-1267.
- [18] Gol Alikhani M, Javadian N, Tavakkoli-Moghaddam R. A novel hybrid approach combining electromagnetism-like method with Solis and Wets local search for continuous optimization problems[J]. Journal of Global Optimization, 2009, 44(2): 227-234.
- [19] 吴泽宁, 胡彩虹, 王宝玉, 等. 黄河中下游水库汛限水位与防洪体系风险分析[J]. 水利学报, 2006, 37(6): 641-648.

Research on impounding dispatch for the lower cascade reservoir in Jinsha River and Three Gorges cascade

OUYANG Shuo¹, ZHOU Jian-zhong¹, ZHOU Chao², WANG hao^{1, 3}

(1. School of Hydropower & Information Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. Department of Control Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;
3. China Institute of Water Resource and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: To solve the competitive water storage problem of cascade reservoirs in the middle and up valley of the Yangtze River at the end of flood season, an impounding strategy of cascade reservoirs, which combines the impounding principle and the method of discriminant value of K , is proposed for judging the impounding time and the order of each reservoir in the premise for ensuring the safety of flood control. Impounding dispatch chart is drawn with impounding control lines of each reservoir which is got by simulating the flood regulating calculation for inflow at different frequencies in typical year. On this basis, a model of impounding dispatch based on the impounding dispatch chart in advance is developed. The proposed method can be obviously accelerated by using the electromagnetism-like mechanism globe optimization algorithm. Compared with the original design scheme, the result indicates that the optimal scheme can improve the fill storage degrees for the cascade reservoirs, reduce discard water and optimize the economical benefits of power generation and navigation without any increase in river flood risk.

Key words: Jinsha-Three Gorges cascade; flood safety; impounding time and order; impounding contradiction; impounding dispatch

(责任编辑: 王成丽)