

基于流量分级策略的水电站分期调度规则提取方法

梁志明¹, 万 彪¹, 陈森林¹, 艾学山¹, 毛忠华², 肖 瑶³

(1. 武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072; 2. 天生桥一级水电开发有限责任公司水力发电厂, 贵州 兴义 562400; 3. 华中师范大学 数学与统计学院, 武汉 430079)

摘 要: 在水电站优化调度中, 确定性优化所得到的最优决策受前后时段径流影响, 入库径流的不稳定会使部分时段的调度规则极为复杂, 提取存在较大的难度。针对这一问题, 提出了一种机理明确的水电站分期调度规则提取思路, 即根据各个时段调度规律的稳定性将调度期划分为稳定期与衔接期, 并对调度规律稳定期与衔接期分别采用不同的调度规则提取方法。同时, 通过分析衔接期径流特性, 引入了逐时段流量分级策略, 对衔接期最优决策呈现出的上下调度线进行了有效划分。以天生桥一级水电站为对象进行了实例研究, 结果证明了该方法的有效性与优越性。

关键词: 水电站; 发电调度; 调度规则; 流量分级策略

中图分类号: TV697.1

文献标志码: A

DOI: 10.11660/slfdbx.20160102

Derivation of staged operation rules for hydropower stations using inflow classification strategy

LIANG Zhiming¹, WAN Biao¹, CHEN Senlin¹, AI Xueshan¹, MAO Zhonghua², XIAO Yao³

(1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072; 2. Hydropower Plant of Tianshengqiao-I Hydropower Development Co. Ltd, Xingyi, Guizhou 562400; 3. College of Mathematics and Statistics, Central China Normal University, Wuhan 430079)

Abstract: In the optimal operation of hydropower stations, an optimal decision obtained by deterministic optimization for a certain period is influenced by the inflow in the adjacent periods. Due to the instability of inflow, the operation rules for some periods often become extremely complicated, resulting in a difficulty in rule derivation. To solve this problem, this paper presents a new idea of extracting staged operation rules using explicit mechanism and a practical method that divides the scheduling period into two parts, a stable period and a transition period, according to the rule patterns throughout the scheduling period, and then adopts different method of rule derivation for each period. For the transition period, we introduced a strategy of period-by-period inflow classification for an effective division of the upper and lower scheduling lines obtained by optimal decision, based on the inflow characteristics. To verify the robustness of this method, a case study was made for the Tianshengqiao-I hydropower station, and results show that the method is effective and advantageous in derivation of operation rules.

Key words: hydropower station; power generation scheduling; operation rules; inflow classification strategy

0 引言

水库优化调度是运用系统工程的理论和最优

化技术, 寻求最优运行策略及相应决策, 以获得尽可能大的运行效益, 使水资源得到充分合理的利用。确定性优化调度是现今常用的一种方法, 这种

收稿日期: 2015-04-02

接受日期: 2015-06-23

基金项目: 国家自然科学基金 (51479141); 国家高技术研究发展计划(“863”计划)项目(2013BAA02B01)

作者简介: 梁志明(1990—), 男, 硕士研究生. E-mail: liangzm@whu.edu.cn

通信作者: 万彪(1975—), 男, 博士, 讲师. E-mail: wanbiao@whu.edu.cn

方法是以过去的实测径流资料为基础的。但在水库实际运行中, 未来径流变化不可能重复以往的径流序列, 优化调度所得到的运行策略是无法直接运用的。因此, 为了在实际调度中利用确定性来水条件下的优化计算成果, 需要对优化调度成果进行综合分析, 探究内在规律, 提炼出可指导水库实际运行的调度规则^[1]。

近几年, 水库调度领域的专家学者在确定性优化调度方法研究上做了大量工作, 在已有的经典算法方面(如动态规划法等)做了许多卓有成效的改进, 同时消化吸收了基础学科的相关成果, 引进了多种新的智能算法^[2-7](如遗传算法、粒子群算法等), 并结合水库调度问题的特点进行了改进, 积累了丰硕的成果, 极大促进了该领域的发展^[8-13]。但在调度规则提取方面, 近期相关研究较少。常用的调度规则提取方法为制定调度函数, 即选取具有较好物理相关性的几组变量, 如计算时段初水位与出力, 时段初可用水量与末库容等, 通过相关分析方法, 拟合出对应时段(月或旬)的调度函数, 以此指导水库实际运行。相较于常规调度的保守性, 调度函数基于确定性优化调度所得到的最优运行策略的提取, 更好地继承了优化调度在发电量方面的效益^[14]。

调度函数多采用线性函数, 线性调度函数形式简单, 物理机理明确, 是最为成熟的调度函数制定方法^[15]。线性方法在来流稳定的时段拟合度较高, 但在部分时段, 来流变化过大, 致使拟合效果变差。针对线性调度函数存在的问题, 文献[16]提出了同时选用时段末水位与时段出力作为决策变量的双线性调度规则, 通过双线性调度函数相互印证和补充, 使调度决策更为稳定; 文献[17]通过对汛期不同运行水位组合下的优化调度结果的分析, 提炼出了实用性较强的调度函数; 基于调度规律中决策变量在不同区间呈现不同形式的情况, 文献[18]提出了一种水电站最优调度规则的门限回归模型, 划分了不同的门限区间, 取得了较好的调度效果。这些方法都是建立在对水库调度内在物理机理进行研究的基础上的, 提炼出的规则直观明确, 指导性强, 具有一定的实用价值, 但这些方式都是以某一特定类型的水库作为研究对象的, 相对于其他不同类型的水库来说, 在适用性方面, 有待加强。

由于水库发电调度过程本质上是一个非线性过程, 单纯的线性回归会降低拟合精度。机器学习

方法因其灵活的结构和强大的映射能力, 逐步被应用到调度规则提取工作中来。文献[19]提出了水电站最优调度规则的三层人工 BP 神经网络模型, 并取得了预期效果; 文献[20]提出了一种采用径向基函数网络的数据挖掘方法, 应用于水库调度规则提取, 模拟效果显示了数据挖掘方法的有效性; 文献[14]提出了一种基于粗糙集和支持向量机的水电站发电调度规则, 剔除了冗余属性, 提高了支持向量机的泛化性能。基于机器学习的这些方法, 具有极高的拟合度, 对确定性优化调度的最优决策过程还原度较高, 表现出了良好的性能^[21]。但存在“过拟合”现象, 泛化性能差, 提炼出的调度规则为隐性规则, 难以用明确的物理机理去解释阐述, 有待进一步研究与提高。

随着智能算法的出现与发展, 模拟-优化方法逐步被应用到调度规则制定中, 旨在提高调度函数的指导效果。这种方法以水库调度规则参数为决策变量, 直接对调度规则进行优化, 获取使模拟计算结果取得最优的参数。文献[22]提出了一种改进方案用以训练神经网络水库调度函数, 同时采用单纯形法对神经网络权重进行优化, 文献[23]针对调度函数的编制特点及其存在的优化空间, 将蚁群算法应用于水电站调度函数的优化模型, 文献[24]提出了一种用于解决多目标问题的基于惩罚性遗传算法的调度函数参数优化方法, 文献[25]建立了基于网格计算(Grid computing)方法的水库群模拟优化模型, 用以提高解决库群大系统调度问题的效率。模拟-优化方法不仅可以充分描述复杂水库系统调度过程, 而且有助于降低计算量和寻找最优解, 具有较大的优越性, 现已成为解决水库调度问题最重要的方法之一。然而, 智能算法难以证明所得到的解是理论最优的, 且其对最优解的寻求依赖于智能算法的优劣性与模拟计算方法的可靠性, 模拟-优化方法有待更深层次的分析研究。

鉴于线性调度函数在部分时段调度规则提取困难的问题, 作者在深入剖析水电站调度期各时段径流规律与调度规则对应关系的基础上, 提出了一种调度期分期方法; 在合理进行调度期分期的基础上, 针对各分期的不同特性, 采用了不同的调度函数形式, 改变了原有调度规则提取方法在整个调度期采用同一调度函数形式的处理方式; 同时, 对调度规律散乱、规则提取困难时期, 引入了流量分级策略, 对决策时段不同调度策略通过划定流量区间

进行区分,有效增强了调度函数处理复杂来水情况的能力,旨在更好地还原最优策略所蕴含的调度规则,提高调度函数的实际指导能力。

1 调度规则提取

1.1 优化调度模型

1.1.1 优化准则与目标函数

水电站水库中长期发电调度的基本课题是:在已知水电站水库入流过程等条件的基础之上,对于调度期 T (T 为总时段数,以月或旬为时段长),寻求使所采用的优化准则达到极值的水电站出力过程和相应的水库蓄泄状态变化过程。根据具体课题的不同,水电站水库中长期发电调度可采用不同的优化准则^[1]。常用准则包括:调度期 T 内的总发电效益 $\max\{E_{\text{eco}}(T)\}$ 最大、总发电量最大 $\max\{E(T)\}$ 、最小出力最大 $\max\{\min(P(t))\}$ 等。

采用调度期 T 内的总发电量最大准则,相应目标函数为:

$$\begin{aligned} E_{\text{eco}}^*(T) &= \max \left\{ \sum_{t=1}^T [P(t)\Delta T_h(t)] \right\} \\ &= \max \left\{ \sum_{t=1}^T [KQ_{\text{fd}}(t)H(t)\Delta T_h(t)] \right\} \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $P(t)$ 为 t 时段出力, $\Delta T_h(t)$ 为时段长度, K 为出力系数, $Q_{\text{fd}}(t)$ 为 t 时段发电流量, $H(t)$ 为 t 时段水头, $E_{\text{eco}}^*(T)$ 为最大总发电量。

1.1.2 约束条件

(1) 水量平衡约束:

$$V(t+1) = V(t) + (Q_{\text{rk}}(t) - Q_{\text{fd}}(t) - Q_{\text{qs}}(t)) \times \Delta T(t) \quad (2)$$

式中: $V(t+1)$ 与 $V(t)$ 分别为 t 时段初库容与时段末库容, $Q_{\text{rk}}(t)$ 、 $Q_{\text{fd}}(t)$ 、 $Q_{\text{qs}}(t)$ 分别为 t 时段的来水流量、发电流量与弃水流量。

(2) 库水位约束:

$$Z_{\text{sy}}^{\min}(t+1) \leq Z_{\text{sy}}(t+1) \leq Z_{\text{sy}}^{\max}(t+1) \quad (3)$$

式中: $Z_{\text{sy}}(t+1)$ 为 t 时段末水位, $Z_{\text{sy}}^{\min}(t+1)$ 一般为死水位,而 $Z_{\text{sy}}^{\max}(t+1)$ 一般在汛期为汛限水位、非汛期为正常蓄水位。

(3) 流量约束:

$$\begin{cases} Q_{\text{ck}}(t) = Q_{\text{fd}}(t) + Q_{\text{qs}}(t) \\ Q_{\text{ck}}^{\min}(t) \leq Q_{\text{ck}}(t) \leq Q_{\text{ck}}^{\max}(t) \end{cases} \quad (4)$$

式中: $Q_{\text{ck}}(t)$ 为 t 时段出库流量, $Q_{\text{ck}}^{\max}(t)$ 、 $Q_{\text{ck}}^{\min}(t)$

分别为 t 时段的上限值与下限值。

(4) 出力限制:

$$P^{\min}(t) \leq P(t) \leq P^{\max}(t) \quad (5)$$

式中: $P^{\max}(t)$ 与 $P^{\min}(t)$ 分别为水电站时段最大、最小出力限制。

(5) 保证率约束:

$$P(t) = \begin{cases} P(t) & P(t) \geq PN \\ P(t) + w \times (P(t) - PN) & P(t) < PN \end{cases} \quad (6)$$

式中: w 为惩罚系数; PN 为保证出力。

(6) 非负约束: 各种变量必须为非负值。

式(1)~(6)组成了确定性来水条件下的水电站水库中长期最优运行调度数学模型,采用优化调度方法,如DDDP(离散微分动态规划)法、POA(逐步优化算法)等,在确定性来水情况下,对上述模型进行求解,可得到最优运行策略。从最优运行策略中提炼出内蕴的调度规则,即可用来指导水库实际运行。

1.2 调度函数

制定调度函数是最为常用的调度规则提取方法。水库时段决策的主要影响因素为本时段初的蓄水量(库容或水位) S_t 及本时段的入库水量 I_t ,而决策变量 U_t (可为时段末库容、时段发电流量、时段出力等)为 S_t 与 I_t 的函数。本时段的入库径流量相较于本时段初库容具有相同的量纲,但在数值上要小很多,且一元线性函数相较于多元函数数值稳定性更好^[16],所以一般取 t 时段可用水量 $W_t = S_t + I_t$,则原函数可表述为 $U_t = f(W_t)$ 。

水库调度是一个复杂的非线性过程,从理论上讲,调度函数形式应该是非线性的。但是,非线性函数关系处理起来比较困难^[15],并且难以从水库调度内在机理层次上明确哪一种非线性函数形式最为合适。而线性调度函数比较简单,并且在一定的范围内,任一非线性函数都可用线性函数逼近,所以,一般可选择线性的调度函数形式,即:

$$U_t = b \times W_t + a \quad (7)$$

式中: b 、 a 为回归系数。

选定了调度函数形式后,将确定性优化调度结果按照月进行划分,然后分别对各月对应的 W_t - U_t 序列资料,进行回归计算,得出对应月份的回归系数值 b 、 a 。理论上来说,当径流资料系列长度 n 大于两年时,是不存在回归系数 b 、 a 使得 $U_t^j = b \times W_t^j + a$ ($j = 1, 2, \dots, n$)都成立。对一组回

归系数 b 、 a , 称 $U_t^j - (b \times W_t^j + a)$ 为残差。残差绝对值的大小直接反映了对资料序列拟合效果的好坏。通常希望残差越小越好, 即求得回归系数 b 、 a , 使得:

$$\min_{a,b} \sum_{j=1}^n [U_t^j - (b \times W_t^j + a)]^2 \quad (8)$$

1.3 调度函数效果检验

调度函数对确定性优化调度结果拟合效果的优劣可以通过相关系数 r 平方值 r^2 来判断, r^2 越趋近于 1, 说明拟合精度越高。而调度函数编制效果的检验, 则是通过长系列模拟计算来进行的。将拟合所得的逐时段调度函数, 运用历史径流资料, 进行长系列演算, 得出多年平均发电量、发电保证率等指标, 将这些指标与常规调度和优化调度所得到的相应指标进行比较, 即可衡量出调度函数编制效果的好坏。

2 基于分级策略的水库混合调度规则

2.1 水文年分期

确定性优化调度所得到的最优策略, 除与本时段可用水量息息相关外, 与前后几个时段来流也有一定的关系。现将一年调度期进行分期, 图 1 为按照水文年排列的调度期各时段最大流量过程线与最小流量过程线图, 其中, Ob 段对应的是枯水期, 而 bd 段对应的是汛期。

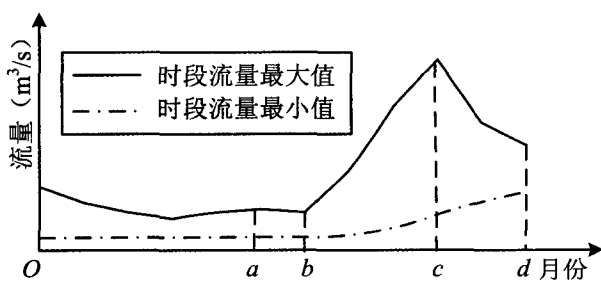


图 1 分期图

Fig. 1 Division of periods

(1) 在枯水期中的 Oa 段, 现记为枯水期前段。在这个时段里, 由于各月份来流都较为稳定且来流量小, 故前后月份来流对本时段决策影响小。所以枯水期前段内各月份对应时段决策与本月月初可用水量相关关系极为稳定, 规律性较好。

(2) 在枯水期中的 ab 段, 现记为枯水期末段。随着汛期来临, 来水流量加大, 汛期来流对枯

水期末段影响较大。此时 ab 段的内各月份决策, 不仅与本月月初可用水量相关, 还与汛期来水量有关, 故枯水期末段内各月份对应时段的调度规律受汛期部分时段来水稳定性的影响, 汛期来水稳定, 则枯水期末段规律性较好; 反之, 则枯水期末段规律紊乱。

(3) 在汛期中的 bc 段, 现记为汛期前段。汛期的时间划分虽然是固定的, 但在不同年份里, 汛期实际来临时间不定, 汛期相同月份来流量波动较大, 数量上存在较小的可能性, 同时同一年份里汛期不同月份来流波动同样较大。这使得汛期前段调度规律紊乱, 难以描述, 同时也使得受其影响的枯水期末段内对应月份的调度规律紊乱。

(4) 在汛期中的 cd 段, 现记为汛期末段。汛期末段内各月份来流虽然依旧不稳定, 但这些月份都在汛期实际来临时间之后, 来水量较丰; 且由于汛期前段的蓄水, 在汛期末段各月份内水库水位高, 水库基本按照预想出力发电。所以汛期末段内各月份对应时段调度规律较为稳定。

综上所述, 因为枯水期末段与汛期前段所包含的月份调度规律紊乱, 处于枯水期与汛期的衔接时段, 将这两段统称为衔接期, 而将其他调度规律稳定的时段记为稳定期。划定分期以后, 将分别针对稳定期与衔接期特征按照不同方式提取调度规则。

2.2 分期调度规则

现行的调度函数多为“可用水量-出力”形式, 在实际运用中, 将当月月初的可用水量值代入对应月份的调度函数中去, 即可得出本月的出力方案。在实际调度函数编制中, 稳定期“可用水量-出力”关系点据分布规律良好 (如图 2 所示), 而在衔接期, 常常会出现“可用水量-出力”关系点据极为离散的情况 (如图 3(a)所示)。当绘制其“可用水量-末库容”关系时, 发现关系点据自然聚合为两部分 (如图 3(b)所示), 其中一部分为时段出力方案对应由保证出力点据聚合组成, 即多蓄水方案点据; 另外一部分为对应加大出力方案点据聚合组成, 即多出力方案点据。这表明, 在月初可用水量相同的情况下, 因为后几个时段来水量不同, 当月的决策值会有两种方案, 即多蓄水方案与多出力方案。由于两种决策对应的点据呈现出两条清晰的调度线轮廓, 可分别进行线性拟合, 得到两条调度线, 初步提炼出相应规则。

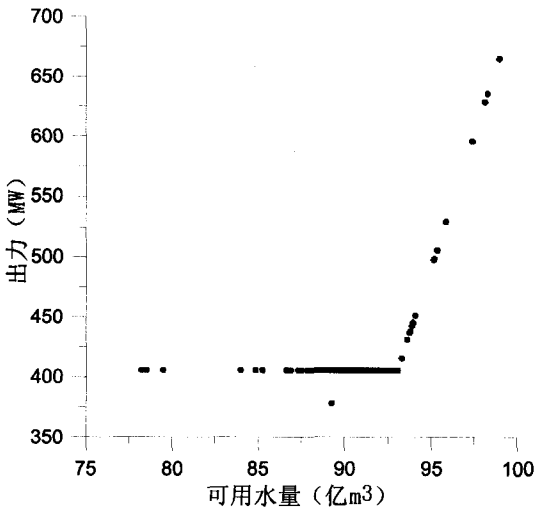
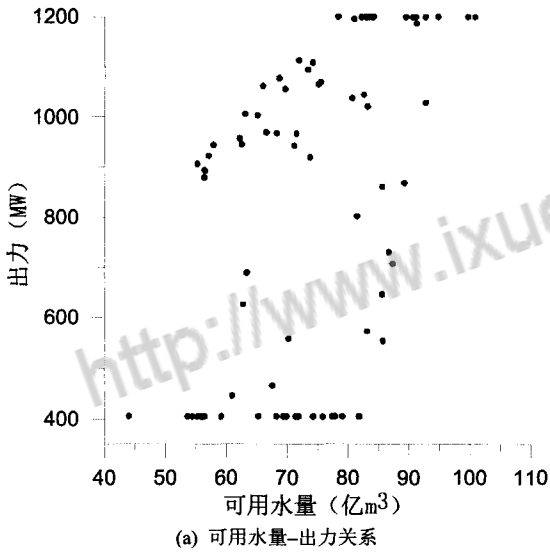
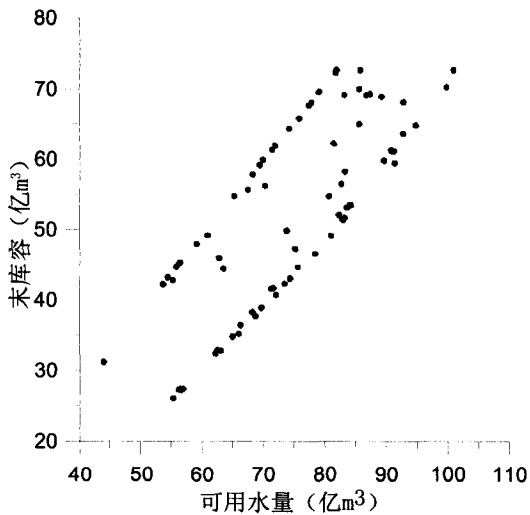


图2 稳定期关系图

Fig. 2 Relationship in stable periods



(a) 可用水量-出力关系



(b) 可用水量-末库容关系

图3 衔接期关系图

Fig. 3 Relationships in transition periods

鉴于在衔接期里,“可用水量-末库容”相关性比“可用水量-出力”的相关性更好,可采用一种混合调度规则:

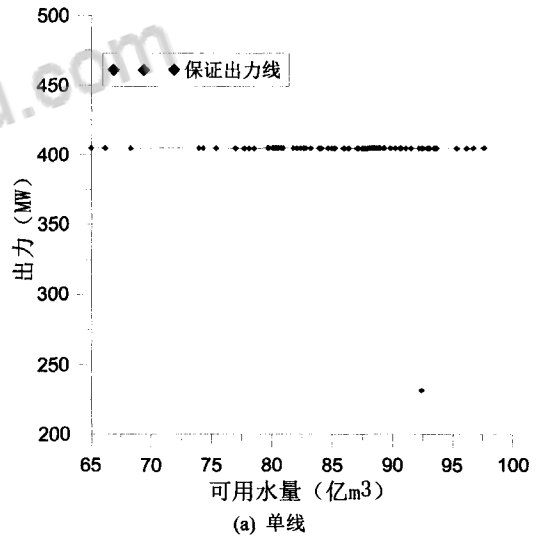
$$U_t = \begin{cases} N_t & t \in \{\text{稳定期}\} \\ V_t & t \in \{\text{衔接期}\} \end{cases} \quad (9)$$

式中: N_t 为 t 时段出力, V_t 为 t 时段末库容。

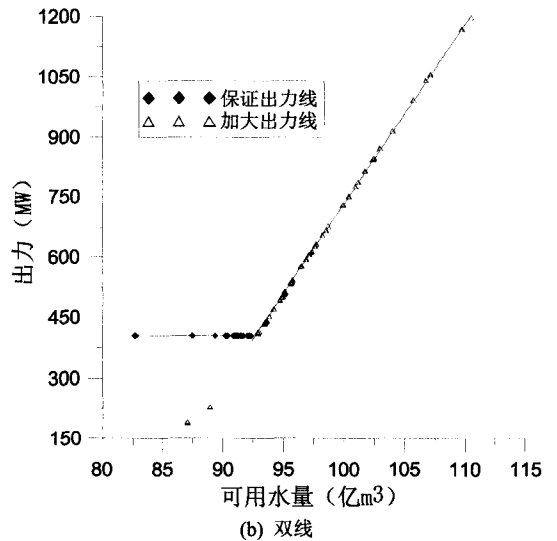
同时,针对衔接期在相同可用水量条件下,出现多个决策值的情况,拟采用流量分级策略,对衔接期各月份设置相应的分级流量,以达到更好的调度效果。

2.3 稳定期调度规律分析

稳定期“可用水量-出力”规律较为稳定,通过分析,可以发现,稳定期各月份按照“可用水量-出力”关系进行调度函数编制,所得到的调度线可分为三种线型(见图4)。



(a) 单线



(b) 双线

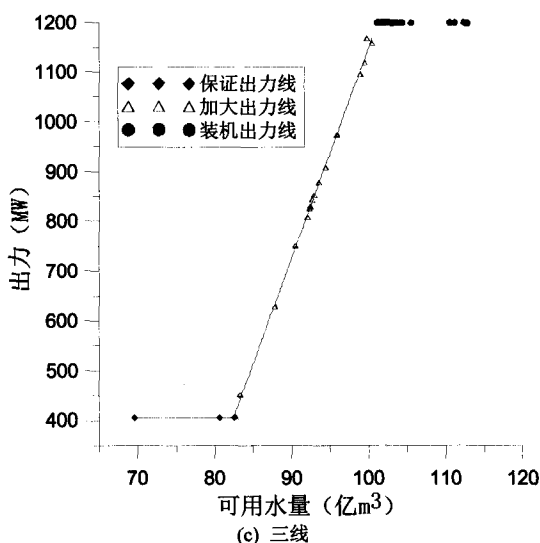


图4 稳定期调度线

Fig. 4 Scheduling lines in stable periods

(a) 单线型: 仅仅只有一条保证出力线, 即时段按照保证出力发电, 这种线型的出现, 是因为在对应月份里, 来水流量较为稳定且较小, 在水电站有保证率要求的情况下, 按保证出力发电。

(b) 双线型: 保证出力线与加大出力线的组合, 在单线的基础上, 部分时段由于来水较多, 需要按照加大出力发电。

(c) 三线型: 保证出力线、加大出力线及装机出力线的组合, 在双线型的基础上, 如果时段来水更多, 需要按照装机出力发电。

2.4 逐时段流量分级策略

针对衔接期几个月份“可用水量-末库容”关系点据分离成两条调度线的情况, 现将衔接期所包含的 M 个月的逐月“可用水量-末库容”点据进行划分, 并分别进行线性拟合, 可得到上下两根调度线。将同一可用水量情况下对应末库容较大的点据 (即多蓄水方案对应点据) 拟合得到的调度线称为上调度线, 而将对应末库容较小的点据 (即多出力方案对应点据) 拟合得到的调度线称为下调度线。针对在相同的可用水量情况下, 如何合理运用上下调度线, 以取得较好调度效果的问题, 现在分析衔接期各时段影响流量时段范围的基础上, 引进逐时段流量分级策略, 对衔接期各月上下调度线划定相应的流量区间。

2.4.1 流量分级时段确定

对于衔接期的 M 个月份, 由于每个月在调度期里面位置不同, 故影响该月的流量所在的时段范围也不一样。现针对衔接期各月, 通过分析来流

特性与水库特性, 以确定各月的分级流量时段。

(1) 衔接期起始月份。对于衔接期起始月, 因为衔接期前的月份来水流量较少, 调度规律稳定, 故可认为衔接期以前的月份来水对衔接期决策影响可以忽略, 所以将衔接期起始月份 (记为 t_i) 作为该月流量分级时段的起始点; 而分级时段的终点的选定, 取衔接期后稳定期调度规律稳定的第一个时段 (记为 t_{wd}), 因为此时段调度规则已经稳定, 与后期来水相关性较弱, 故后期时段对此时段及以前时段影响较小。由此, 可知, 衔接期起始月份流量分级时段的起始时段为衔接期起始月份, 而终止时段为衔接期后稳定期第一个月份。

(2) 衔接期其它月份。对于衔接期第 i ($i=2, 3, \dots, M$) 个月, 因为第 i 月的月初水位, 是前几个时段最优调度策略下得到的结果, 间接阐述了该月以前时段流量对本时段的影响, 所以衔接期第 i 月分级时段的起点为第 i 月, 记为 t_i , 而终止时段依旧为稳定期调度规律稳定的第一个月份。

综上所述, 将衔接期第 i 个时段所对应的流量分级时段范围为 $[t_i, t_{wd}]$ ($i=1, 2, \dots, M$)。

2.4.2 逐时段流量分级

确定衔接期各时段流量分级范围后, 按照下述步骤推求各时段对应的分级流量:

(1) 调度线拟合。分析优化调度所得到的各年衔接期优化调度结果, 并逐时段将“可用水量-末库容”关系点据根据其分布特性 (即上下调度线) 进行分类, 对同一时段各年份相同类型点据进行线性拟合, 得到各时段上下调度线及其对应的线性函数表达式。

(2) 年份归类。对于衔接期内每个时段, 将该时段组成上调度线的点据标记为“上”、组成下调度线的点据标记为“下”, 并根据“上”“下”标签将相应点据对应的年份进行归类, 得到各时段分别对应“上”“下”标签的年份组。

(3) 分级流量确定。对于衔接期第 i 个时段, 统计各年份里该时段对应的流量分级时段 $[t_i, t_{wd}]$ 内的平均流量 $\bar{Q}_{[t_i, t_{wd}]}$, 按 $\bar{Q}_{[t_i, t_{wd}]}$ 大小进行排序, 可以发现, 注有相同标签的年份按照 $\bar{Q}_{[t_i, t_{wd}]}$ 的大小鲜明地聚合在一起, 按照“上”“下”标签对应年份聚合的流量范围, 寻找出临界流量值, 衔接期逐时段进行上述步骤, 即可得出各时段对应的分级流量, 划分上下调度线方案。

(4) 区分度校验。由如上步骤即可得到相应的分级流量,但由于影响时段内径流分配的影响,无法做到完全区分,故需要对分级流量的划分效果进行评价,现提出有效区分度 $\eta_i=T_i/T$,表征衔接期第*i*个时段分级流量有效区分年份 T_i 与总年份 T 的比值, η_i 越接近于1,表明分级流量区分度高。

(5) 规则整理。将计算得到的分级流量进行整理,上下调度线方案与对应流量区间一一对应,即可得到基于分级策略的逐时段分期调度规则。

3 实例研究

天生桥一级水电站水库(以下简称天一水库)是红水河梯级电站的第一级,位于贵州安龙县与广西隆林县的界河南盘江干流上,坝址以上流域面积50 139 km²,多年平均径流量193 亿 m³,多年平均流量612 m³/s,总库容102.56 亿 m³,调节库容57.96 亿 m³,是一座以发电为主的不完全多年调节水库。汛期起始时间为5月20日,终止时间为9月10日。电站安装4台单机容量300 MW的机组,总装机容量1200 MW,设计年发电量52.26 亿 kW·h,保证出力40.52 万 kW,设计发电保证率为96.00%。

天一水库现采用水库调度图和水文预报相结合的方式实施水库调度。在汛期(即5月20日至9月10日),水位控制在汛限水位以下;从9月末到1月份,水位控制在正常蓄水位附近;从2月份开始,库水位逐步降低到汛限水位以下,迎接汛期的到来。

为了充分发挥天一水库的调节性能,合理地利用水量与水头,提高水库的水量利用率,尽可能多地增发电量,开展天一水库优化调度研究,建立了以发电量最大为目标函数的优化模型,模型采用经典高效的离散微分动态规划法(DDDP)求解。

采用天一水库1936—2012年共77年的逐月入库径流资料,进行确定性优化调度计算,将确定性优化调度结果作为制定调度函数的依据。利用优化调度结果,编制各月份“可用水量-出力”调度函数,分析后发现,4—7月份调度规律紊乱,而其它8个月份调度规律稳定。由各月份调度规律稳定性可知,天一水库调度衔接期为4—7月,即*M* = 4,在这4个月里面,最优出力规律散乱,调度规则难以提取;其它月份属于稳定期,调度规则稳定,易于提取。

对于稳定期月份,调度规则稳定,按照“可用

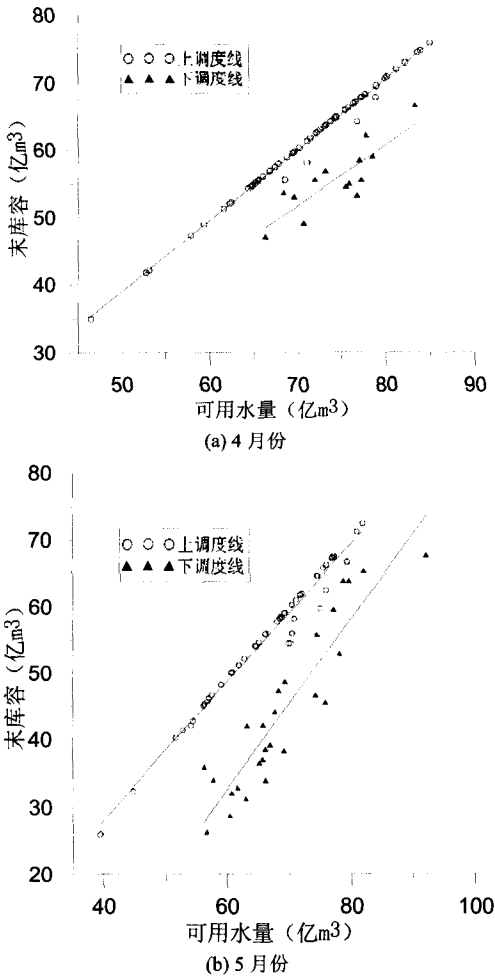
水量-出力”方案进行调度函数编制,这种方案编制的调度函数呈现为三种线型(见图4)。

对于衔接期月份,首先分析各月份对应的流量分级时段,因为衔接期月份为4—7月,衔接期后稳定期第一个月份为8月份,故*t*_{wd} = 8,即衔接期各月份流量分级时段的终止月份为8月份,而各月份流量分级时段的起始月份为各月份本身,故各月份流量分级时段如表1所示。

表1 衔接期各月流量分级时段表
Table 1 Periods of monthly inflow classification in transition period

流量分级时段	4月份	5月份	6月份	7月份
起始月份	4	5	6	7
终止月份	8	8	8	8

按照“可用水量-末库容”方案进行调度函数编制,将各月“可用水量-末库容”关系点据拟合为上下两条调度线(结果见图5),经过回归计算,得到相应的线性函数(相关参数见表2)。



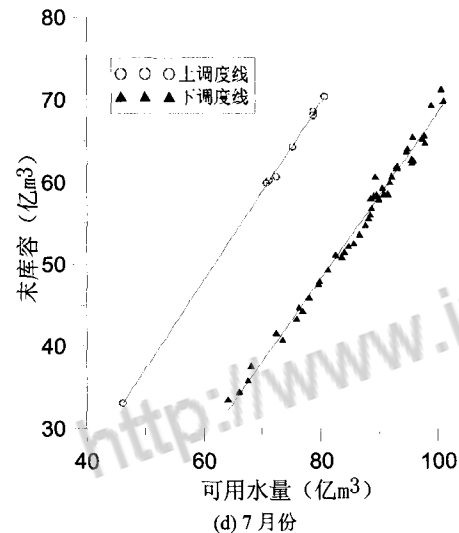
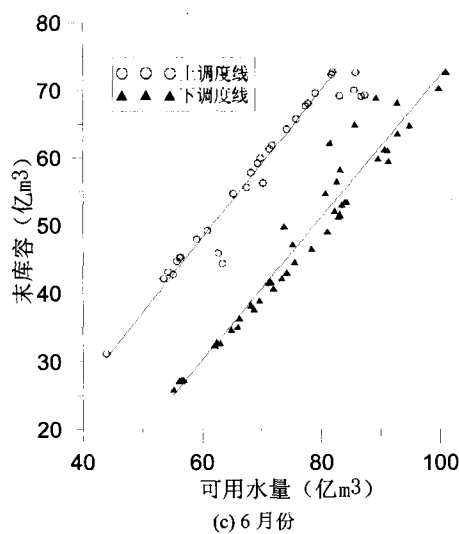


图 5 衔接期各月调度线
Fig. 5 Scheduling lines in transition periods

表 2 衔接期各月调度函数参数汇总表
Table 2 Parameters of monthly operation functions in transition periods

月份	调度线 类型	对应的调度函数参数		相关系数 r^2
		b	a	
4 月份	上调度线	1.0535	-13.71	0.9929
	下调度线	0.8047	-11.588	0.7099
5 月份	上调度线	1.0323	-13.255	0.9756
	下调度线	1.2714	-43.657	0.8416
6 月份	上调度线	0.9539	-8.6879	0.9332
	下调度线	0.9737	-26.607	0.9184
7 月份	上调度线	1.0818	-16.867	0.9993
	下调度线	1.0101	-32.549	0.9871

按照相应步骤, 逐时段推求各年里衔接期对应

的 $\bar{Q}_{[t_i, t_{wd}]}$, 并按照大小进行排序, 得出各时段的分级流量, 得出最后的逐时段分级策略 (见表 3)。

表 3 流量分级策略汇总表
Table 3 Inflow classification strategy (单位: m^3/s)

月份	4	5	6	7
上调度线	$\bar{Q}_{[4,8]} <$	$\bar{Q}_{[5,8]} <$	$\bar{Q}_{[6,8]} <$	$\bar{Q}_{[7,8]} <$
方案	1025.4	1077.25	1210	1131
下调度线	$\bar{Q}_{[4,8]} \geq$	$\bar{Q}_{[5,8]} \geq$	$\bar{Q}_{[6,8]} \geq$	$\bar{Q}_{[7,8]} \geq$
方案	1025.4	1077.25	1210	1131
有效区分度	0.961	0.909	0.87	0.948

将稳定期的“可用水量-出力”的调度函数与衔接期的分级策略调度函数组成的混合调度函数, 运用天一水库月径流资料, 进行长系列模拟计算, 并与常规调度结果及确定性优化调度结果进行比较 (结果见表 4)。

综合分析表 2 至表 4 可知:

(1) 在衔接期包含的四个月里, 基于“可用水量-末库容”形式的调度函数上下调度线拟合程度较高, 并且用于区分上下调度线的分级流量的有效区分度在 0.87 以上, 说明了在衔接期所采用的分级流量策略对确定性优化调度结果还原度高, 较为完整地继承了确定性优化调度结果。

(2) 确定性优化调度结果相较于不同形式的调度规则 (调度函数、常规调度图等) 具有较大的优越性, 水文工作者在径流预报领域的提高, 有助于实现确定性优化调度在实际生产中的运用, 提高实际调度水平与经济效益。

(3) 采用分级策略的分期调度规则, 多年平均发电量为 53.3679 亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$, 相较于常规调度增加了 2.1049 亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$, 增加幅度约为 4.1%; 而发电保证率为 95.02%, 相较于常规调度对应的设计发电保证率 96.00%, 下降幅度极小。

(4) 进一步分析可知, 分级策略相较于常规调度增加的电量为在衔接期增加的部分, 而在稳定期, 分级策略对应的多年平均发电量接近于优化调度对应的值, 可见, 基于逐时段分级策略的混合调度规则能够很好地反映天一水库的优化调度规律, 取得了较好的模拟调度效果。

表 4 分级策略与其他方案调度效果比较
Table 4 Comparison of profit indexes in different scenarios

调度方法	多年平均发电 水量/亿 m ³	多年平均弃 水量/亿 m ³	多年平均电量/亿 kW·h			多年平均 水位/m	发电保证率/%
			全年	衔接期	稳定期		
常规调度	171.7915	18.0082	51.2630	15.2111	36.0518	766.89	96.00
优化调度	186.8794	2.7190	55.9961	21.2072	34.7889	770.83	98.27
分级策略	182.2986	7.5012	53.3679	20.2284	33.1395	767.24	95.02

4 结论

本文提出了一种基于流量分级策略的分期调度规则提取方法,根据调度期内不同时段调度规律的稳定性,将整个调度期划分为稳定期与衔接期。进而针对不同分期的特性,对稳定期与衔接期采用不同的调度函数形式,同时在衔接期根据“可用水量-末库容”关系点据的分化特征,引入逐时段流量分级策略,为调度期各时段上下调度线方案划定了对应的流量区间。以天一水库为研究背景进行了实例研究,结果显示,逐时段流量分级策略能有效地区分上下调度线,通过长系列演算,分级策略得到的多年平均发电量较之常规调度的多年平均发电量增加明显,而发电保证率仅略有下降。本文所提出的基于分级流量策略的分期调度规则提取方法取得了很好的调度效果,具有较高的实用价值。

参考文献 (References)

[1] 陈森林. 水电站水库运行与调度[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
CHEN Senlin. Hydropower station operation and reservoir regulation [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2008. (in Chinese)

[2] Ostadrahimi L, Marino M A, Afshar A. Multi-reservoir operation rules multi-swarm PSO-based optimization approach [J]. Water Resources Management, 2012, 26(2): 407-427.

[3] Liu P, Cai X, Guo S. Deriving multiple near-optimal solutions to deterministic reservoir operation problems [J]. Water Resources Research, 2011, 47(8): 2168-2174.

[4] 王少波, 解建仓, 汪妮. 基于改进粒子群算法的水电站水库优化调度研究[J]. 水力发电学报, 2008, 27(3): 12-15.
WANG Shaobo, XIE Jiancang, WANG Ni. Modified particle swarm optimization algorithm and its

application in optimal operation of hydropower station reservoir [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2008, 27(3): 12-15. (in Chinese)

[5] Chang L C, Chang F J. Multi-objective evolutionary algorithm for operating parallel reservoir system [J]. Journal of Hydrology, 377(1-2): 12-20.

[6] 冯仲恺, 廖胜利, 程春田, 等. 库群长期优化调度的正交逐步优化算法[J]. 水利学报, 2014, 45(8): 903-911.
FENG Zhongkai, LIAO Shengli, CHENG Chuntian, et al. Orthogonal progressive optimality algorithm for long-term optimal operation of multi-reservoir system [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(8): 903-911. (in Chinese)

[7] 钟平安, 张卫国, 张玉兰, 等. 水电站发电优化调度的综合改进差分进化算法[J]. 水利学报, 2014, 46(10): 1147-1155.
ZHONG Pingan, ZHANG Weiguo, ZHANG Yulan, et al. Comprehensive modified differential evolution algorithm for optimal operation of the hydropower station [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 46(10): 1147-1155. (in Chinese)

[8] Chen L, Mcphee J, Yeh W G. A diversified multiobjective GA for optimizing reservoir rule curves [J]. Advances in Water Resources, 2007, 30(5): 1082-1093.

[9] 周建中, 李英海, 肖舸, 等. 基于混合粒子群算法的梯级水电站多目标优化调度[J]. 水利学报, 2010, 41(10): 1212-1219.
ZHOU Jianzhong, LI Yinghai, XIAO Ge, et al. Multi-objective optimal dispatch of cascade hydropower stations based on shuffled particle swarm operation algorithm [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(10): 1212-1219. (in Chinese)

[10] Rani D, Moreira M M. Simulation-optimization

- modeling: A survey and potential application in reservoir systems operation [J]. *Water Resources Management*, 2010, 24(6): 1107-1138.
- [11] 周佳, 马光文, 张志刚. 基于改进 POA 算法的雅砻江梯级水电站群中长期优化调度研究[J]. *水力发电学报*, 2010, 29(3): 18-22.
- ZHOU Jia, MA Guangwen, ZHANG Zhigang. Study on the mid-long term optimal dispatching of cascaded hydropower stations on Yalong river based on POA modified adaptive algorithm [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2010, 29(3): 18-22. (in Chinese)
- [12] Zhao T, Zhao J. Improved multiple-objective dynamic programming model for reservoir operation optimization [J]. *Journal of Hydroinformatics*, 2014, 16(5): 1142-1157.
- [13] Castelletti A, Pianosi F, Restelli M. A multiobjective reinforcement learning approach to water resources systems operation: Pareto frontier approximation in a single run [J]. *Water Resources Research*, 2013, 49(6): 3476-3486.
- [14] 纪昌明, 李继伟, 张新明, 等. 基于粗糙集和支持向量机的水电站发电调度规则研究[J]. *水力发电学报*, 2014, 33(1): 43-49.
- Ji Changming, LI Jiwei, ZHANG Xinming, et al. Study on hydropower station operation rules based on rough sets and support vector machine [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2014, 33(1): 43-49. (in Chinese)
- [15] 黄强, 王世定. 水库的线性和非线性调度规则的研究[J]. *水资源与水工程学报*, 1992, 3(3): 11-17.
- HUANG Qiang, WANG Shiding. Research on linear and non-linear rules for reservoirs operation [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 1992, 3(3): 11-17. (in Chinese)
- [16] 李承军, 陈毕胜, 张高峰. 水电站双线性调度规则研究[J]. *水力发电学报*, 2005, 24(1): 11-15.
- LI Chengjun, CHEN Bisheng, ZHANG Gaofeng. Study on bilinear dispatching rule of hydropower station [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2005, 24(1): 11-15. (in Chinese)
- [17] 许新发, 梅亚东, 陈启平. 万安水库发电调度规律分析[J]. *水力发电学报*, 2006, 25(4): 20-24.
- XU Xinfu, MEI Yadong, CHEN Qiping. Analysis of power dispatch law of Wan-an reservoir [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2006, 25(4): 20-24. (in Chinese)
- [18] 王金龙, 黄炜斌, 马光文, 等. 门限回归模型在梯级水电站群联合优化调度规则中的应用[J]. *水力发电学报*, 2014, 33(1): 50-57.
- WANG Jinlong, HUANG Weibin, MA Guangwen, et al. Application of threshold regressive model to formulating cascade hydropower stations operation rule [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2014, 33(1): 50-57. (in Chinese)
- [19] 舒卫民, 马光文, 黄炜斌, 等. 基于人工神经网络的梯级水电站群调度规则研究[J]. *水力发电学报*, 2011, 30(2): 11-14.
- SHU Weimin, MA Guangwen, HUANG Weibin, et al. Study on hydropower stations operation rule by an artificial neural network model [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2011, 30(2): 11-14. (in Chinese)
- [20] 尹正杰, 王小林, 胡铁松, 等. 基于数据挖掘的水库供水调度规则提取[J]. *系统工程理论与实践*, 2006, 26(8): 129-135.
- YIN Zhengjie, WANG Xiaolin, HU Tiesong, et al. Water supply reservoir operating rules extraction based on data mining [J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2006, 26(8): 129-135. (in Chinese)
- [21] 纪昌明, 周婷, 王丽萍, 等. 水库水电站中长期隐随机优化调度综述[J]. *电力系统自动化*, 2013, 37(16): 129-135.
- Ji Changming, ZHOU Ting, WANG Liping, et al. A review on implicit stochastic optimization for medium-long term operation of reservoirs and hydropower stations [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2013, 37(16): 129-135. (in Chinese)
- [22] 刘攀, 郭生练, 庞博, 等. 三峡水库运行初期蓄水调度函数的神经网络模型研究及改进[J]. *水力发电学报*, 2006, 25(2): 83-89.
- LIU Pan, GUO Shenglian, PANG Bo, et al. A modified approach for deriving storage operating rules of the Three Gorges reservoir with artificial neural network [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2006, 25(2): 83-89. (in Chinese)

- [23] 纪昌明, 喻杉, 周婷, 等. 蚁群算法在水电站调度函数优化中的应用[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(20): 103-107.
- JI Changming, YU Shan, ZHOU Ting, et al. Application of ant colony algorithm for hydropower dispatching function optimization [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(20): 103-107. (in Chinese)
- [24] Chang L C. Guiding rational reservoir flood operation using penalty-type genetic algorithm [J]. Journal of Hydrology, 2008, 354(1-4): 65-74.
- [25] Sulis A. GRID computing approach for multireservoir operating rules with uncertainty [J]. Environmental Modelling & Software, 2009, 24(7): 859-864.

(责任编辑: 尚松浩)



知网查重限时 7折 最高可优惠 120元

本科定稿，硕博定稿，查重结果与学校一致

立即检测

免费论文查重: <http://www.paperyy.com>

3亿免费文献下载: <http://www.ixueshu.com>

超值论文自动降重: http://www.paperyy.com/reduce_repetition

PPT免费模版下载: <http://ppt.ixueshu.com>
