

对于一个给定水坝系统，一系列水坝的选址和相应的库容、装机容量、当地降水量等限制都已经可以确定。然而，仍然有很多分析可以开展，其中最引人关注的是水坝系统间水资源的调度方案。调度方案能够保障安全性并且可应对紧急情况（洪水和最小水流量），并且能够尽可能的保护水资源和从中得到的收益。可以预料到，在不同的情况下（水周期中的不同时段，水库的不同蓄水情况等），调度方案将是不同的。为了合理的应对不同情况，需要建立一个生成水资源调度方案的模型。

V 水资源体积

V_D 最终整个水坝系统因为泄洪而损失的水体积

$V_{D,i}$ 从上游开始记的第 i 个水库在单位时间段内泄洪的水体积

ΔV_i 单位时间水库中水量的变化

$V_{n,i}$ 单位时间内水库 i 水量的自然增量，即单位时间内因为自然原因（降水，支流汇入等）汇入的水量减去时间段内的蒸发损失

$V_{e,i}$ 单位时间水库 i 发电使用的水量

$V_{u,i}$ 单位时间水库 i 用于其他用途的水量

n 水坝系统中的水坝数量，所以，系统中也有 n 座水库

- 1、水资源的利用分为多种，例如水利发电、农业灌溉等，为了简化水资源价值的评估，我们假设水资源的价值与水源的体积 V 成正比
- 2、水坝系统因为泄洪而损失的水量不能再利用
- 3、发电用水汇入下游水库，但其他用途用水不直接汇入水坝系统

根据我们的前两条假设，单位时间内，水坝系统损失的水资源价值正比于因为泄洪而损失的水量。而水只有从水坝系统的最后一个水坝被以泄洪的方式排出时，才是从整个水坝系统中损失了，所以有

$$V_D = V_{D,i} \quad (1)$$

那么，想要尽可能提高水坝系统的收益，就需要是 $V_{D,i}$ 尽可能的小，同时，不同情况下的限制性因素也必须在提出调度方案时被考虑到。于是，我们考虑使用优化模型来得到一定情况下的水坝系统的水资源调度方案。

根据我们上面的论述，优化的目标函数是非常简单的，即：

$$\min V_D = V_{D,i} \quad (2)$$

下面，我们将焦点放到寻找约束条件上：

首先，单位时间后水库中的水量等于原水量，水库自然增量，上游水库排水（包括发电用水和泄洪水量）之和减去其他用途用水，发电用水，泄洪水量之和，即：

$$V'_i = \begin{cases} V_i + V_{n,i} + V_{D,i-1} + V_{e,i-1} - V_{u,i} - V_{e,i} - V_{D,i} & i > 1 \\ V_i + V_{n,i} - V_{u,i} - V_{e,i} - V_{D,i} & i = 1 \end{cases} \quad (3)$$

其中， V'_i 为时间段末水库 i 中水量，记 $\Delta V = V' - V$ ，则有：

$$V_{n,i} = \begin{cases} \Delta V_i - V_{D,i-1} - V_{e,i-1} + V_{u,i} + V_{e,i} + V_{D,i} & i > 1 \\ \Delta V_i + V_{u,i} + V_{e,i} + V_{D,i} & i = 1 \end{cases} \quad (4)$$

这是变量间的等式约束关系

我们考虑对变量的更多约束: 大坝的发电能力是有限的, 相应的, 发电消耗的水量也是有限的; 并且, 发电的用水量显然不能是负值, 所以:

$$0 \leq V_{e,i} \leq V_{e,i}^{\max} \quad (5)$$

类似的, 对于 $V_{u,i}$ 有:

$$V_{u,i}^{\min} \leq V_{u,i} \leq V_{u,i}^{\max} \quad (6)$$

考虑到水库周边的农业用水等有刚性需求, 所以 $V_{u,i}$ 的下限不是0

对于 ΔV_i 的约束应取决于水库的现有水量, 对水库水量的未来计划以及未来水库水量的自然补充; 但直观上, 水库的水位不应有剧烈的波动; 并且我们的模型在具体使用时应允许相关领域的专业人士给出水库水位波动的限制, 所以我们将对 ΔV_i 的约束写作:

$$\alpha_i \leq \frac{\Delta V_i}{V_i^{\max}} \leq \beta_i \quad (7)$$

其中 V_i^{\max} 为水库的最大容积

除上述以外, 考虑到需要满足流域和其他区域的用电需求, 大坝系统的总发电量应有一个大于0的下限, 虽然由于存在电网的调节, 系统中的某一些大坝可以在某时段不发电, 所以有:

$$\sum_{i=1}^n V_{e,i} \geq E_{\min} \quad (8)$$

E_{\min} 是产生最小用电需求电能所需的水量

水资源调度的宏观方案: 我们根据我们在模型A中得到的水坝系统的特点和水坝管理的经验提出了下面的水资源调度的宏观方案, 该方案可以指导河流管理局的工作人员在水周期的不同阶段通过选择不同的 α_i, β_i 取值, 然后通过求解上述的优化模型得到一段时间内水资源的最优调度方案: 观察到在我们得到的水坝系统中, 容积大的水库落差较小, 而容积小的水库落差大; 即小水库相比大水库更具有发电的潜力, 所以希望小水库能尽可能在高水位上运行。而大水库有更大的蓄洪能力, 在多雨季节来临前应该减少库容来应对即将到来的水量。同时, 我们观察到, 在我们得到的水坝系统中, 大水库的下游仍然有一些落差较大的小水库。综合上述因素, 我们认为水坝系统的宏观调度方案应该包括如下的几条原则:

- 1、在缺水季节, 上游 (Lake Kariba上游) 的水库减少发电量以保障其他用水需求; 河流中游的大水库放水向下游的水库放水, 减少自身库容量, 为迎接多雨季节到来做准备; 下游的水库利用中游排出的水量发电
- 2、在多雨季节, 中游的大水库蓄水来接受上游水库的排水并且减少下游水库的泄洪压力; 上游和下游水库保持安全水位
- 3、对于中游的两座小水库, 与下游的小水库做同样的处理

将上述原则转化为对 α_i, β_i 的选取则为:

- 1、对于上游、中游和下游的小水库缺水, 在缺水季选择较大的 α_i , 在多雨季选择较小的 β_i
- 2、对于中游大水库, 在缺水季节选择较小的 β_i 上述方案使得小水库在缺水季也能保持较高的水位, 并且在多雨季可以存续暂时不能利用的水量供应未来使

用，提高了水资源的利用效率。

同时，上述的方案能够很好的处理紧急情况。对于持续少雨季节，方案有利于保持小水库的水量，这不仅有利于发电，而且能够保障水库附近的其他用水需求。对于洪水，方案能够帮助下游水坝减少泄洪压力（由于河流下游相比上游水流量更大而且地势更平坦，所以下游的泄洪压力更大）。

极端情况的特别指导: 1、最大水流量，在缺水季节预留足够的库容量, 对于每座水库都选择较小的 β_i ，模型将得到均衡的排水方案（不会有水库因为库容增幅过大而产生风险）

2、最小水流量，为小水库选择尽可能大的 α_i ，保障附近区域的用水需求

UTF8song