山丘区“长藤结瓜”型多水库系统水资源优化调度方法

吕雷 孙佳 郭君志

南京明瑞建设集团有限公司，江苏南京，211100；

摘要：提供一种山丘区“长藤结瓜”型多水库系统水资源优化调度方法，针对山丘区“长藤结瓜”型多水库系统，建立了相应的水资源优化调度数学模型，在分解聚合方法的基础上采用动态规划求解子系统模型和聚合模型，可获得一定供水期内受水区最小缺水量、对应的各水库最优供水量和弃水量过程，解决多水库系统季节性缺水，提高水资源的利用率。

关键词：山丘区“长藤结瓜”型；水库系统；水资源优化；调度方法

DOI：10.69979/3060-8767.26.01.037

引言

中国山丘区分布广泛，占国土面积的 70%以上，其耕地约占全国总耕地面积的 50%，因此发展山丘区农业对保障国家粮食安全意义重大。蓄引提相结合的“长藤结瓜”型多水库灌溉系统是中国古代山丘区劳动人民智慧的结晶，主要由首部骨干水库、输水渠道系统以及内部的小型水库、塘堰等组成。由于渠道系统似藤，蓄水工程似瓜，故此得名。该系统不仅可以有效适应地形特点，还可以发挥灌区内部的调蓄作用，充分利用山丘区的雨水资源，有效地保障了山丘区农业的发展。

本质上，“长藤结瓜”灌溉系统的运行调度属于多水库联合调度的范畴。千百年来，虽然山丘区劳动人民对于这类系统总结出了“联合运用，分片包干”、“闲时灌塘，忙时灌田”等经验性规律，但具体的调度过程却缺乏科学的方法论支持。随着气候、作物、水政策的变化，传统调度方法受到了严重的挑战。尤其是最严格的水权制度实施后，年内区域水权被严格限定。为了在有限的水权下满足农业灌溉要求，必须科学地、系统地优化“长藤结瓜”灌溉系统的调度方法，从而减少系统弃水，提高水资源利用率。

1 技术方案

一种山丘区“长藤结瓜”型多水库系统水资源优化调度方法，包括优化调度系统，优化调度系统由 1 座大中型骨干水库和 n 座小型水库及其输水渠道组成，n 座小型水库与大中型骨干水库经输水渠道贯通连接，各水库独立地向各自的灌区供水，小型水库水量不足时，可通过输水渠道从骨干水库引水补库，系统示意图见图 1。系统优化调度方法具体步骤如下：

1、通过实测或向灌区管理部门咨询，搜集计算所需的相关资料，具体包括：

①灌区水库调度通常划分的时段数 T，灌区包括大中型骨干水库供水的灌区和小型水库供水的灌区；

②代表年内所有水库各时段的来水量 LS i,t (i＝1,2,⋯,n+1，t＝1,2,⋯,T)，水库包括大中型骨干水库、小型水库；

③代表年内所有灌区各时段的需水量 YS i,t (i＝1,2,⋯,n+1，t＝1,2,⋯,T)；

④所有水库的特性资料：水库初始库容 V i,0 ，库容上限 和下限/> (i＝1,2,⋯,n+1，t＝1,2,⋯,T)；

2、系统分解，将多水库系统水资源优化调度模型分解为 n+1 个单水库子系统水资源优化调度模型。

目标函数：$$\min f_i = \sum_{t=1}^{T} (X_{i,t} - YS_{i,t})^2$$

式中：f i 为水库 i 年内各时段缺水量平方和；X i,t 为水库 i 第 t 时段的供水量；YS i,t 为灌区 i 第 t 时段的需水量。

约束条件：

$$\sum_{t=1}^{T} X_{i,t} \le W_i \qquad V_{i,t}^{m} \le V_{i,t} \le V_{i,t}^{M}$$

其中：

V 1,t ＝V 1,t-1 +LS 1,t -X 1,t -Z 1,t -PS 1,t -EF 1,i (4)

V i,t ＝V i,t-1 +LS i,t -X i,t +Y i,t -PS 2,i -EF 2,i (i＝

2,3,・・・,n+1)

式中：W i 为水库 i 的年可供水量；V i,t 分别为水库 i 在 t 时段末的蓄水量；LS i,t 为水库 i 在时段 t 的入库径流量；PS i,t ,为水库 i 在时段 t 的弃水量；EF i,t 为水库 i 在时段 t 的水量损失；Z 1,t 为骨干水库在时段 t 的外调水量；Y i,t 为小型水库 i 在时段 t 内的补水量，i ＝2,3,⋯,n+1； 为水库 i 在时段 t 的蓄水量下限；/> 为水库 i 在时段 t 的蓄水量上限。

3、子系统优化：

令水库 i 的年可供水量 W i 在 之间，按满足系统调度精度要求的步长 d 离散，采用动态规划对水库 i 子系统进行优化，获得水库 i 在不同 W i 下的年内各时段缺水量平方和 f i 及其对应的供水量过程 X i,t 、弃水量过程 PS i,t 、补水量过程 Y i,t 或调水量过程 Z 1,t 。

4、系统聚合：

根据子系统优化所获得的一系列 f i ～W i 的关系，构建大系统聚合模型。

目标函数：$$\min F=\sum_{i=1}^{n+1} f_i(W_i)$$

约束条件：$$\sum_{i=1}^{n+1} W_i \le \sum_{i=1}^{n+1}\sum_{t=1}^{T} LS_{i,t}$$

式中：F 为整个多水库系统年内各时段缺水量平方和。

以 W i 为决策变量，采用动态规划求解上述聚合模型，即可获得系统中各水库最佳的年可供水量[W 1 * ,W 2 * ,⋯,W n+1 *]。最后根据各水库最佳的年可供水量 W i * 反查子系统优化结果，确定各水库最佳的调度方案，包括最佳的供水量过程 X i,t * 、弃水量过程 PS i,t * 、补水量过程 Y i,t * 和调水量过程 Z 1,t * 。

作为优选，所述步骤(3)具体包括以下步骤：

①对于小型水库，即 i≠1 时，令水库 i 的年可供水量 W i 在 之间按步长 d 离散，

1)时段 t=1：$g_{i,1}(\lambda_{i,1})=\min\left(X_{i,1}-YS_{i,1}\right)^2$

式中，g i,1 表示小型水库 i 在前 1 个时段内的最小缺水量平方和；λ i,1 为状态变量，表示水库 i 前 1 个供水时段水库供水量，在可行域[0,W i]内以步长 d 离散；对每个离散的λ i,1 ，决策变量 X i,1 在对应可行域[0,λ i,1]内按步长 d 离散，分别确定对应于每个λ i,1 值，最优 X i,1 及其对应的该时段最小缺水量平方和 g i,1 (λ i,1)。

而后，第 1 时段末水库 i 蓄水量 V i,1 ＝V i,0 +LS i,1 -EF i,1 -X i,1 ，此时尚未考虑补水或弃水，应进行检验和修正：

a.若 则/> PS i,1 ＝0；

b.若 则 Y i,1 ＝0，/>

c.若 则 Y i,1 ＝PS i,1 ＝0；

d.修正后的水库蓄水量为 V i ' ,1 ＝V i,1 +Y i,1 -PS i,1 。

通过步骤 a～d，修正并确定第 1 时段末水库蓄水量，同时可获得对应的水库弃水量 PS i,1 、或补水量 Y i,1 。

(2)时段 t＝2，3，⋯T-1：$\mathbf{g}_{i,t}(\lambda_{i,t})=\min\left[\left(X_{i,t}-YS_{i,t}\right)^2+\mathbf{g}_{i,t-1}(\lambda_{i,t-1})\right]$

式中，g i,t 表示小型水库 i 在前 t 个时段内的最小缺水量平方和；状态变量λ i,t 为前 t 个时段的水库 i 供水总量，同样将其在可行域[0,W i]内按步长 d 分别进行离散；对每一个离散的λ i,t ，决策变量 X i,t 在对应可行域内[0,λ i,t]按步长 d 离散。

状态转移方程：

λ i,t-1 ＝λ i,t -X i,t (10)

式中：t=2，3，⋯，T-1

对每一个离散的λ i,t ，将各离散的 X i,t 值分别代入式(9)中的(X i,t -YS i,t) 2 ，由状态转移方程式(10)，对每一个离散的 X i,t ，查找前 t-1 时段最小 g i,t-1 (λ i,t-1)值，由此可获得(X i,t -YS i,t) 2 +g i,t-1 (λ i,t-1)，完成以上所有离散的 X i,t 寻优后，最终可获得满足 min[(X i,t -YS i,t) 2 +g i,t-1 (λ i,t-1)]要求的前 t 个时段系统最小缺水量平方和 g i,t (λ i,t)值及其对应的各时段水库最优供水量 X i,t 。

同样，还需确定第 t 时段末水库蓄水量 V i,t ，V i,t ＝V i,t-1 +LS i,t -EF i,t -X i,t ，而后进行检验和修正

a.若 则/> PS i,t ＝0；

b.若 则 Y i,t ＝0，/>

c.若 则 Y i,t ＝PS i,t ＝0；

d.修正后的水库蓄水量为 V i ' ,t ＝V i,t +Y i,t -PS i,t 。

通过步骤 a～d，修正并确定第 t 时段末水库蓄水量，同时可获得对应的水库弃水量过程 PS i,t 、和补水量过程 Y i,t 。

(3)时段 T：

$$g_{i,t}(\lambda_J) = \min\left[\left(X_{i,t} - YS_{i,J}\right)^2 + g_{i,t-1}(\lambda_{J-1})\right]$$

式中，g i,T 表示小型水库 i 在前 T 个时段内的最小缺水量平方和；状态变量λ i,T 为前 T 个时段的水库供水总量，同样将其在可行域[0,W i]内以步长 d 分别进行离散；对每一个离散的λ i,T ，决策变量 X i,T 在对应可行域内[0,λ i,T]按步长 d 离散。

状态转移方程：$\lambda_{i,t-1} = \lambda_{i,t} - X_{i,t}$

对每一个离散的λ i,T ，将各离散的 X i,T 值分别代入式(11)中的(X i,T -YS i,T) 2 ，由状态转移方程式(12)，对每一个离散的 X i,T ，查找前 T-1 时段最小 g i,T-1 (λ i,T-1)值，由此可获得(X i,T -YS i,T) 2 +g i,T-1 (λ i,T-1)，完成以上所有离散的 X i,T 寻优后，最终可获得满足 min[(X i,T -YS i,T) 2 +g i,T-1 (λ i,T-1)]要求的前 T 个时段系统最小缺水量平方和 g i,T (λ i,T)值，最终获得满足该λ i,T 要求的水库最优供水过程 X i,t ，t=1,2,⋯,T，对应的水库弃水量过程 PS i,t ，t=1,2,⋯,T，补水量过程 Y i,t ，t=1,2,⋯,T，以及水库 i 子系统目标函数最优值 f i =ming i,T (λ i,T)。

②对于骨干水库，即 i=1 时，令水年可供水量 W 1 在 之间按步长 d 离散，

1)时段 t=1：$g_{1,1}(\lambda_{1,1}) = \min\left(X_{1,1} - YS_{1,1}\right)^2$

式中，g 1,1 表示骨干水库在前 1 个时段内的最小缺水量平方和；λ 1,1 为状态变量，表示骨干水库前 1 个供水时段水库供水量，在可行域[0,W 1]内以步长 d 离散；对每个离散的λ 1,1 ，决策变量 X 1,1 在对应可行域[0,λ 1,1]内按步长 d 离散，分别确定对应于每个λ 1,1 值，最优 X 1,1 及其对应的该时段最小缺水量平方和 g 1,1 (λ 1,1)。

而后，根据各小型水库在第 1 时段的补水量，确定骨干水库的调水量为 则第 1 时段末骨干水库蓄水量 V 1,1 =V 1,0 +LS 1,1 -Z 1,1 -EF 1,1 -X 1,1 ，此时尚未考虑弃水，应进行检验和修正：

a.若 则/>

b.若 则 PS 1,1 =0；

c.修正后的水库蓄水量为 V 1 ',1 =V 1,1 -PS 1,1 。

通过步骤 a～c，修正并确定第 1 时段末骨干水库蓄水量，同时可获得对应的水库弃水量 PS 1,1 。

(2)时段 t=2，3，⋯T-1：$g_{1,t}(\lambda_{1,t}) = \min\left[(X_{1,t} - YS_{1,t})^2 + g_{1,t-1}(\lambda_{1,t-1})\right]$

式中，g 1,t 表示骨干水库在前 t 个时段内的最小缺水量平方和；状态变量λ 1,t 为前 t 个时段的骨干水库供水总量，同样将其在可行域[0,W 1]内按步长 d 分别进行离散；对每一个离散的λ 1,t ，决策变量 X 1,t 在对应可行域内[0,λ 1,t]按步长 d 离散。

状态转移方程：$\lambda_{1,t-1} = \lambda_{1,t} - X_{1,t}$

式中：t=2，3，⋯，T-1

对每一个离散的λ 1,t ，将各离散的 X 1,t 值分别代入式(14)中的(X 1,t -YS 1,t) 2 ，由状态转移方程式(15)，对每一个离散的 X 1,t ，查找前 t-1 时段最小 g 1,t-1 (λ 1,t-1)值，由此可获得(X 1,t -YS 1,t) 2 +g 1,t-1 (λ 1,t-1)，完成以上所有离散的 X 1,t 寻优后，最终可获得满足 min[(X 1,t -YS 1,t) 2 +g 1,t-1 (λ 1,t-1)]要求的前 t 个时段系统最小缺水量平方和 g 1,t (λ 1,t)值及其对应的各时段水库最优供水量 X 1,t 。

同样，根据各小型水库在第 t 时段的补水量，确定骨干水库的调水量为 则第 t 时段末骨干水库蓄水量 V 1,t =V 1,t-1 +LS 1,t -Z 1,t -EF 1,t -X 1,t ，此时尚未考虑弃水，应进行检验和修正：

a.若 则/>

b.若 则 PS 1,t =0；

c.修正后的水库蓄水量为 V 1 ',t =V 1,t -PS 1,t 。

通过步骤 a～c，修正并确定第 t 时段末骨干水库蓄水量，同时可获得对应的水库弃水量过程 PS 1,t 。

(3)时段 T：

$$g_{1,T}(\lambda_{1,T}) = \min\left[\left(X_{1,T} - YS_{1,T}\right)^2 + g_{1,T-1}(\lambda_{1,T-1}\right]$$

式中，g 1,T 表示骨干水库在前 T 个时段内的最小缺水量平方和；状态变量λ 1,T 为前 T 个时段的骨干水库供水总量，同样将其在可行域[0,W 1]内以步长 d 分别进行离散；对每一个离散的λ 1,T ，决策变量 X 1,T 在对应可行域内[0,λ 1,T]按步长 d 离散。

状态转移方程：$\lambda_{1,T-1} = \lambda_{1,T} - X_{1,T}$

对每一个离散的λ 1,T ，将各离散的 X 1,T 值分别

代入式(16)中的(X 1,T -YS 1,T) 2 ，由状态转移方程式(17)，对每一个离散的 X 1,T ，查找前 T-1 时段最小 g 1,T-1 (λ 1,T-1)值，由此可获得(X 1,T -YS 1,T) 2 +g 1,T-1 (λ 1,T-1)，完成以上所有离散的 X 1,T 寻优后，最终可获得满足 min[(X 1,T -YS 1,T) 2 +g 1,T-1 (λ 1,T-1)]要求的前 T 个时段系统最小缺水量平方和 g 1,T (λ 1,T)值，最终获得满足该λ 1,T 要求的骨干水库最优供水过程 X 1,t ，t＝1,2,⋯,T，对应的骨干水库弃水量过程 PS 1,t ，t＝1,2,⋯,T 以及骨干水库子系统目标函数最优值 f 1 ＝ming 1,T (λ 1,T)。

作为优选，所述步骤(4)具体包括以下步骤：

1)对于水库编号为 i＝n+1

$$\phi_{n+1}(\delta_{n+1}) = \min f_{n+1}(W_{n+1})$$

式中，φ n+1 表示编号为 n+1 的水库的最小年缺水量；δ n+1 为状态变量，表示编号为 n+1 的水库的年可供水量，在可行域 内以步长 d 离散；对每个离散的δ n+1 ，决策变量 W n+1 在对应可行域[0,δ n+1]内按步长 d 离散，分别确定对应于每个δ n+1 值，最优 W n+1 及其对应的子系统目标函数值 f n+1 (W n+1)。

2)对于编号为 i＝n,n-1,⋯,2 的水库

$$\phi_i(\delta_i) = \min [f_i(W_i) + \phi_{i+1}(\delta_{i+1})]$$

式中，φ i 表示编号 i～n+1 个水库的最小年缺水量平方和；状态变量δ i 为编号 i～n+1 个水库的年可供水总量，同样将其在可行域 内按步长 d 分别进行离散；对每一个离散的δ i ，决策变量 W i 在对应可行域内[0,δ i]按步长 d 离散。

状态转移方程：

$$\delta_{i+1} = \delta_i - W_i$$

式中：i＝n，n-1，⋯，2

对每一个离散的δ i ，将各离散的 W i 值分别代入式(19)中的 f i (W i)，由状态转移方程式(20)，对每一个离散的 W i ，查找最小的φ i+1 (δ i+1)值，由此可获得 f i (W i)+φ i+1 (δ i+1)，完成以上所有离散的 W i 寻优后，最终可获得满足 min[f i (W i)+φ i+1 (δ i+1)]要求的编号 i～n+1 个水库最小缺水量平方和φ i (δ i)值及其对应的各水库最优年可供水量 W i 。

3)对于骨干水库，即 i＝1

$$\phi_1(\delta_1) = \min [f_1(W_1) + \phi_2(\delta_2)]$$

式中，φ 1 表示编号 1～n+1 个水库的最小年缺水量平方和；状态变量δ 1 为编号 1～n+1 个水库的年可供水总量，同样将其在可行域 内以步长 d 分别进行离散；对每一个离散的δ 1 ，决策变量 W 1 在对应可行域内[0,δ 1]按步长 d 离散。

状态转移方程：

$$\delta_2 = \delta_1 - W_1$$

对每一个离散的δ 1 ，将各离散的 W 1 值分别代入式(21)中的 f 1 (W 1)，由状态转移方程式(22)，对每一个离散的 W 1 ，查找最小φ 2 (δ 2)值，由此可获得 f 1 (W 1)+φ 2 (δ 2)，完成以上所有离散的 W 1 寻优后，最终可获得满足 min[f 1 (W 1)+φ 2 (δ 2)]要求的编号 1～n+1 个水库的最小缺水量平方和φ 1 (δ 1)值，并获得满足该δ 1 要求的水库最佳年可供水量 W i ，i＝1,2,⋯,n+1，以及整个多水库系统的目标函数最优值 F ＝min φ 1 (δ 1)。

2 附图说明

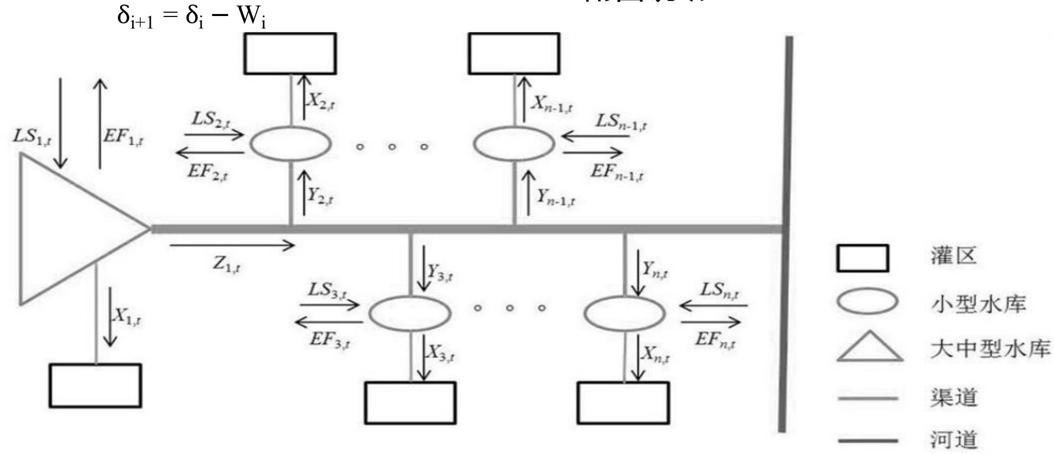

图 1 为山丘区“长藤结瓜”型多水库系统示意图

图 2 为南京市金牛山水库群平面图

3 有益效果

（1）本方法完全利用了水库灌区实测的水文数据以及实际的水库特性数值进行山丘区“长藤结瓜”型多水库系统的水资源优化调度，克服了常规调度方法的主观性和人为干预较强的缺点，能够精准便捷地确定最优的系统调度方案，解决季节性缺水，提高水资源利用率。

（2）将系统分解为若干个子系统求解后，采用动态规划对子系统进行聚合，不同于常规的分解协调方法，无需对子系统的多元回归方程的可导性和凹凸性提出要求。

参考文献

[1]程吉林,龚志浩,蒋晓红,等.一种山丘区"长藤结瓜"型多水库系统水资源优化调度方法:CN201910918556.1[P].CN110675281B[2025-11-10].

[2]冯英艳.六合山丘区水资源配置动态模拟模型研究[D].扬州大学,2008.DOI:10.7666/d.y1291561.

[3]刘肇祎,郭宗楼.长藤结瓜式灌溉系统优化规划的非线性模型[J].水利学报，1986，000(001):40-48.DOI:CNKI:SUN:SLXB.0.1986-01-004.

[4]杨永刚,惠伟伟,罗小玲.重庆山丘区作物种植结构变化特征及水利工程现状分析[J].数字化用户，2024(10).