# 梯级水电站群调度多目标网络分析模型

杨　侃　　陈　雷

(河海大学水文水资源及环境学院　南京　210098)

摘要　研究网络分析技术在水库群调度中的应用,把多目标分层排序网络分析模型拓展到多目标梯级水电站调度的网络分析中,提出梯级水电站群调度多目标网络分析模型。结合某流域梯级水电站群优化调度实例进行模型的应用研究,结果表明,用本文模型构造的时空网络图,结构清晰,直观形象,算法效率高。

关键词　梯级水电站　优化调度　网络分析　多目标

网络分析技术是一种计算速度较快而且所需贮存较少的优化技术,它属于图论的一个组成部分,许多线性系统都可以转化成网络模型。在网络分析中有三类典型问题:最短路问题、最大流问题和最小费用最大流问题。这三类典型问题对于解决生产实际中的许多优化问题是很有意义的。

在研究库群优化调度方面,国内外应用动态规划方法较为广泛,其原因在于动态规划法对目标函数和约束条件限制较少,可以求得全调度期内的最优解。但是,动态规划也有一个至今为止难以克服的缺点"维数灾",因此,该法仅能有效地应用于较少水库群组成的系统。对此,人们不断探索一些其它方法,其中应用网络分析法进行库群优化调度是一个很好的尝试。目前国内外在这方面已经取得了一些成果[1-5]。

网络分析法求解问题的基本原理是:先根据所研究问题的特点用网络图展示出来,然后根据这个网络图的性质,利用网络分析的不同解法寻求最优解。

本文主要研究网络分析技术理论在库群调度中的应用,提出了梯级水电站群调度多目标网络分析模型,该模型构造的时空网络图具有结构清晰和直观形象等特点,其算法效率较高。

## 1　多目标分层排序网络分析模型原理

如果一个水利系统中有 $M$ 个水库,计算时段为 $N$,诸水库除了发电和防洪以外还有灌溉和供水任务,水库蓄水不但用于发电,还可以用于养鱼、改善库内航运和发展旅游事业等等。这时,库群优化调度问题是多目标的。其目标函数为

$$\max \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} A_j X_i^j \tag{1}$$

$$\max \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} B_j Y_i^j \tag{2}$$

$$\max \sum_{j=1}^{m} C_j V_{n+1}^j \tag{3}$$

$$\max \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} D_j Z_i^j \tag{4}$$

$$\max \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} E_j V_i^j \tag{5}$$

第一作者简介:杨侃,男,博士,讲师.从事水利系统规划和管理研究.曾发表《水库调度增量动态规划方法收敛性应用研究》等论文。

$$\max \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} F_j G_i^j \qquad (6)$$

式中 $A_j$ 为第 $j$ 水库发电水量单价；$X_i^j$ 为第 $i$ 时段第 $j$ 水库发电水量；$B_j$ 为第 $j$ 水库泄洪水量损失单价；$Y_i^j$ 为第 $i$ 时段第 $j$ 水库泄洪水量；$C_j$ 为第 $j$ 水库蓄水量单价；$V_{n+1}^j$ 为第 $n$ 时段末第 $j$ 水库蓄水量；$D_j$ 为第 $j$ 水库灌溉用水单价；$Z_i^j$ 为第 $i$ 时段第 $j$ 水库灌溉用水量；$E_j$ 为第 $j$ 水库养鱼、库内航运、旅游等蓄水单价；$V_i^j$ 为第 $i$ 时段第 $j$ 水库养鱼、库内航运、旅游等蓄水量；$F_j$ 为第 $j$ 水库供水用水单价；$G_i^j$ 为第 $i$ 时段第 $j$ 水库供水用水量。

如果系统中有梯级水电站(对于混联水电站类似)，概况图如图 1 所示。

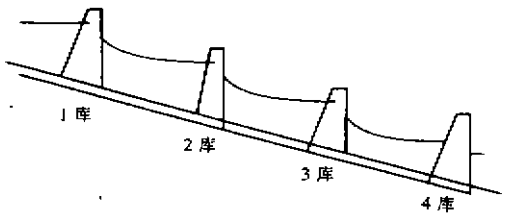


图 1 梯级串联水库示意

对于上述多目标梯级水电站调度问题，提出一种多目标分层排序网络分析模型进行求解。多目标分层排序方法把一个多目标问题逐步轮换成单目标问题，然后借助于单目标方法来求解。其基本思路是将诸目标函数按其重要程度排成一个次序，然后分别在求解前一个目标函数最优解的基础上，求解后一个目标函数的最优解，并把最后一个目标函数的最优解作为多目标问题的最优解。可将目标函数按其重要程度排序：

$$F_1(x), F_2(x), \cdots, F_p(x)$$

先求第一个目标函数 $F_1(x)$ 在可行域 $R$ 上的最优值，即

$$\min F_1(x) = f_1^* \qquad x \in R$$

记其最优解集为 $R_1^*$，则 $R_1^* = \{x \in R$ 且 $F_1(x) = f_1^*\}$，再在 $R_1^*$ 上求第二个目标函数 $F_2(x)$ 的最优值，即

$$\min F_2(x) = f_2^* \qquad x \in R_1^*$$

记其最优解集为 $R_2^*$，则 $R_2^* = \{X \in R_1^*$ 且 $F_2(X) = f_2^*\} = \{X \in R$ 且 $F_j(X) = f_j^*, j = 1,2\}$。

如此继续，在 $p-1$ 个目标函数的最优解集 $R_{p-1}^*$ 上求第 $p$ 个目标函数的最优值，即

$$\min F_p(x) = f_p^* \qquad x \in R_{p-1}^*$$

记其最优解集为 $R_p^*$，则

$$R_p^* = \{X \in R_{p-1}^* \text{ 且 } F_p(x) = f_p^*\} =$$

$$\{X \in R \text{ 且 } F_j(x) = f_j^*, j = 1,2,\cdots,p\}$$

因此把 $R_p^*$ 作为多目标问题在分层排序意义下的最优解。

**定义** 对于极小化多目标问题，设 $x^* \in R$，如果不存在 $x \in R$，使 $f(x) \leqslant f(x^*)$ 则称 $x^*$ 是多目标问题的有效解(又称 Pareto 最优解)。

**定理** 分层排序意义下的最优解必是多目标问题的有效解[5]。

多目标分层排序网络分析模型实质上是把多目标分层排序方法和网络模型结合起来，根据网络分析原理，由构造的网络图，采用网络分析法中的最小费用最大流算法。把诸目标按其重要程度排成一个序列，目标越重要，其单价越高，反之，就越低，然后分级寻优。对于各项目标单价，其数字的相对值具有意义，而其数字的绝对值无意义。

## 2 多目标分层排序网络分析模型算例

某流域为开发水电资源及其综合效益，规划兴建四座梯级水电站，流域的开发有发电、供水和灌溉等目标。因此在梯级水电站群调度中需研究四座水电站的联合调度运行。梯级水电站简况见表 1，分布情况如图 1 所示。

表 1 梯级水电站简况

| 水 库 | 正常蓄水位/m | 正常蓄水位库容/$m^3$ | 装机容量/万 kW | 保证出力/万 kW |
|---|---|---|---|---|
| 1 库 | 780 | 90 | 108 | 42 |
| 2 库 | 400 | 274 | 400 | 165.4 |
| 3 库 | 223 | 25 | 140 | 76.80 |
| 4 库 | 58 | 18 | 120 | 57.6 |

在研究库群调度时，假定诸水电站的正常蓄水位、死水位、装机容量、保证出力、每月的供水量和灌溉水量均为已知条件。为了说明计算方法，选用了一个典型年的资料。在计算开始时，各水电站初始蓄水位均为已知。根据规划的需要，流域梯级开发的目标，其重要程度的次序分别为供水、灌溉和发电。其目标函数分别为

$$\max \sum_{i=1}^{12} \sum_{j=1}^{4} F_j G_i^j \tag{7}$$

$$\max \sum_{i=1}^{12} \sum_{j=1}^{4} D_j Z_i^j \tag{8}$$

$$\max[\sum_{i=1}^{12} \sum_{j=1}^{4} A_j X_i^j + \sum_{j=1}^{4} C_j(V_{13}^j - V^j)] \tag{9}$$

式中 $V_{13}^j$为 $j$ 库年末蓄水量；$V^j$ 为 $j$ 库死库容。其余符号含意见式(1)～(6)说明。

该梯级水电站的多目标网络时空示意图如图 2 所示，有四个梯级水电站，时段共有 12 个月。图 2 中 $q$ 为相应水库的区间入流，$G$ 为相应水库的供水流量，$Z$ 为相应水库的灌溉用水流量，$X$ 为相应水库的发电流量，$Y$ 为相应水库的弃水流量。诸水库蓄水量的限制决定于各个水库正常蓄水位和死水位。个别水库在不同月份有其特殊的最高控制水位。发电流量的上、下限决定于装机容量和保证出力，1 库、2 库、3 库、4 库在 5 月初水库蓄量分别为 51 亿 $m^3$，101 亿 $m^3$，8 亿 $m^3$，8 亿 $m^3$，采用网络分析模型计算，用增广链法(或逆境法)进行计算，求得结果如表 2 所示。这时，四个水电站各月供水和灌溉用水均正常，各月的发电均大于保证出力，而且总弃水量减少。

## 3 结 语

在水利系统优化规划和调度中，动态规划法是一种常用的且有效的计算技术。但是动态规划法由于存在"维数灾"，所以其通用性受到限制，尤其是在水库数目增大时，在计算效率方面要付出昂贵的代价。

网络分析模型结构清晰、计算速度快，计算需要的内存小。应用网络分析模型进行水库群优化调度是一种新的途径。

尽管本文对梯级水电站群调度多目标网络分析方法作了一定的研究，但只是初步的，今后尚需对其作进一步完善，如考虑水电站

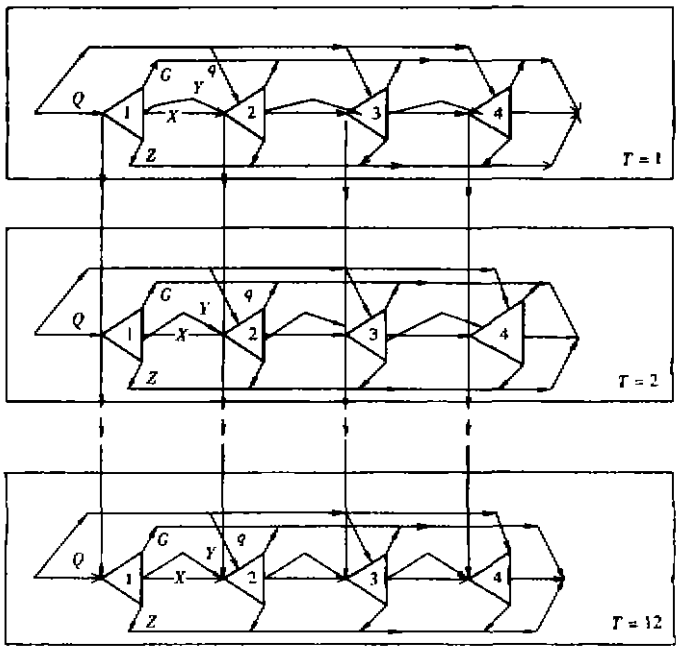


图 2 多目标网络模型示意

表 2　梯级水电站多目标网络分析结果　　亿 $m^3$

| 月份 | 1 库 | | | | | | 1—2 库 | 2 库 | | | | | 2—3 库 | 3 库 | | | | | 3—4 库 | 4 库 | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 入流 | 供水 | 灌溉 | 发电 | 弃水 | 月末蓄量 | 区间入流 | 供水 | 灌溉 | 发电 | 弃水 | 月末蓄量 | 区间入流 | 供水 | 灌溉 | 发电 | 弃水 | 月末蓄量 | 区间入流 | 供水 | 灌溉 | 发电 | 弃水 | 月末蓄量 |
| 5 | 19 | 5 | 0 | 27 | 0 | 38 | 35 | 8 | 0 | 67 | 0 | 88 | 9 | 1 | 0 | 69 | 0 | 14 | 90 | 2 | 0 | 157 | 0 | 8 |
| 6 | 25 | 5 | 0 | 27 | 0 | 31 | 79 | 8 | 0 | 34 | 0 | 152 | 10 | 1 | 0 | 44 | 0 | 13 | 135 | 2 | 0 | 157 | 15 | 13 |
| 7 | 71 | 5 | 6 | 27 | 0 | 64 | 114 | 8 | 7 | 34 | 0 | 244 | 24 | 1 | 1 | 44 | 0 | 25 | 259 | 2 | 1 | 157 | 143 | 13 |
| 8 | 52 | 5 | 7 | 27 | 0 | 77 | 54 | 8 | 8 | 62 | 0 | 247 | 10 | 1 | 1 | 70 | 0 | 25 | 66 | 2 | 1 | 133 | 0 | 13 |
| 9 | 42 | 5 | 6 | 27 | 0 | 81 | 53 | 8 | 7 | 75 | 0 | 237 | 7 | 1 | 1 | 80 | 0 | 25 | 36 | 2 | 1 | 108 | 0 | 18 |
| 10 | 29 | 5 | 6 | 27 | 0 | 72 | 53 | 8 | 7 | 76 | 0 | 226 | 6 | 1 | 1 | 80 | 0 | 25 | 37 | 2 | 1 | 114 | 0 | 18 |
| 11 | 18 | 5 | 0 | 12 | 0 | 73 | 32 | 8 | 7 | 76 | 0 | 186 | 5 | 1 | 0 | 80 | 0 | 25 | 50 | 2 | 0 | 122 | 0 | 24 |
| 12 | 13 | 5 | 0 | 27 | 0 | 54 | 19 | 8 | 7 | 39 | 0 | 185 | 3 | 1 | 0 | 45 | 0 | 21 | 19 | 2 | 0 | 78 | 0 | 8 |
| 1 | 11 | 5 | 0 | 22 | 0 | 38 | 16 | 8 | 0 | 48 | 0 | 167 | 2 | 1 | 0 | 62 | 0 | 8 | 16 | 2 | 0 | 76 | 0 | 8 |
| 2 | 12 | 5 | 0 | 11 | 0 | 34 | 16 | 8 | 0 | 61 | 0 | 125 | 2 | 1 | 0 | 62 | 0 | 8 | 16 | 2 | 0 | 76 | 0 | 8 |
| 3 | 10 | 5 | 0 | 11 | 0 | 28 | 13 | 8 | 0 | 63 | 0 | 78 | 2 | 1 | 0 | 64 | 0 | 8 | 14 | 2 | 0 | 76 | 0 | 8 |
| 4 | 11 | 5 | 0 | 11 | 0 | 23 | 20 | 8 | 0 | 50 | 0 | 51 | 2 | 1 | 0 | 51 | 0 | 8 | 27 | 2 | 0 | 76 | 0 | 8 |

电量、发电水量和水头三者之间的非线性问题;用更多的资料加以检验等等。

## 参考文献


1　王丽萍,冯尚友.长期发电水库的优化调度方法——网络模矢法.水电能源科学,1986,4(2):115～126

2　梅亚东,冯尚友.水电站水库系统死库容优选的非线性网络模型.水电能源科学,1989,7(2):168～175

3　鲁子林等.梯级水电站死水位选择网络模型.华东水利学院学报,1985,13(1):116～124

4　Rosenthel R. E. Nonlinear network flow alogorithm for maximization of benefits in hydroelectric power system. Operation Research,1981,29(4):763～786

5　林锉云,董加礼.多目标优化的方法和理论.长春:吉林教育出版社,1992



(收稿日期:1996－09－18　编辑:许宇鹏)



(上接第 34 页)


以新丰江水电厂为例,1995 年预报结果表明,新丰江电厂预报相对误差均全部超过气候预报精度。若按相对误差小于 0.2 $c_v$ 作为合格标准,新丰江水电厂的合格率为 58%;若按相对误差小于 30% 作为合格标准,合格率为 83%;两者平均为 70%。由此可见,本文系统预报模型具有较好的预报精度。

## 5　结　语

月径流预报首先从分析特定流域上空的动力、热力因子分布着手,分析它们与月径流的定性关系,从中挑选出关系最好的物理因子作为预报因子,最后通过回归分析和集成模型计算给出预报决策值。

由于系统中拥有 80 余万个水文气象数据,它们大体上反映了不同尺度和不同性质的前期影响因素,因此系统预报模型具有较好的预报精度,能满足生产单位的要求。气象资料主要来源于中央气象局公开发行的《气候监测公报》和《气象》刊物,所需资料费用低,使用方便。用户在实际应用中,需随时将有关的新资料"入库"。系统中的月径流预报模型尚有待于在更多的水库检验并进一步完善。

## 参考文献


1　薛世谨.华南气候.北京:气象出版社,1990

2　魏凤英,曹鸿兴等.长期预测的数学模型及其应用.北京:气象出版社,1995



(收稿日期:1997－10－28　编辑:许宇鹏)