

# 水利水电开发排序的多层次多准则模糊规划模型

陈 宁<sup>1</sup>, 谭浩瑜<sup>2</sup>, 张 健<sup>3</sup>

(1. 江苏沙河抽水蓄能发电有限公司, 江苏 溧阳 213333; 2. 黄河勘测规划设计有限公司, 河南 郑州 450003;  
3. 河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 针对跨流域调水工程, 分析了目前水利水电工程开发程序常规方案优选方法中存在的缺陷, 建立了多准则递阶层次结构模型, 论证了引入风险型评价指标的必要性、运用多准则多层次研究开发程序的合理性、建立多层次模糊综合评判的可能性; 同时, 根据所研究的问题需要考虑决策者准则偏好的特点, 提出悲观准则、乐观准则及折中准则, 并将偏好以系数的形式体现在模型中, 给出了相应模型的求解方法。工程案例表明, 该模型是可行的。

**关键词:** 风险指标; 多准则; 多层次; 模糊; 规划模型

**中图分类号:** TV511      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-198X(2007)05-0573-04

河流大型水利水电工程系统, 特别是跨流域调水工程, 可以解决我国降雨时空分布不均, 以及水资源短缺等问题, 具有很大的综合经济效益及社会效益。由于其规模投资大、梯级多、生效时间慢、工期长, 受经济与社会等条件制约, 无法一次建成, 须分期建设。目前水利水电工程开发优选程序常用的方法有综合评价法、数学规划法等<sup>[1-3]</sup>。这些方法多以经济目标为优选目标, 对其他因素仅作定性分析, 缺乏系统的定量分析; 对确定性指标研究较多, 对不确定性和风险研究很少, 已很难适应研究的需要。

针对水利水电工程开发优选程序研究问题的复杂性, 本文将多准则决策、模糊数学等理论和方法相结合, 提出新的优选模型并给出求解技术。(a) 由于研究涉及目标较多, 且许多目标之间相互制约与影响, 故需构造递阶层次结构模型, 并按层次分类研究。(b) 不同的目标往往具有不同的决策性质, 故采用多准则的决策方法。(c) 研究的目标、指标繁多, 既有定量指标, 又有定性指标, 且许多指标还具有模糊性, 为此, 运用模糊综合评判的决策思想, 并在确定性分析的基础上, 引入风险决策指标, 使决策更具可靠性。

## 1 递阶层次结构的建立

水利水电工程开发优选程序研究牵涉的指标较多, 既有经济的又有非经济的; 有可以直接定量的, 还有许多难以直接定量的<sup>[4]</sup>。实际上往往收益很大的项目, 失败风险亦很高。在方案选择时, 经济评价指标的期望值高而风险大的方案, 有时结果还不如期望值稍低但风险较小的方案。在经济风险分析的基础上选择的, 风险型评价指标<sup>[5]</sup>有: 期望效益现值、期望费用现值、风险率、风险损失、风险收益、风险度等。本文针对研究评价指标体系的复杂性, 构造递阶层次结构, 见图1。

## 2 多准则多层次模糊规划模型

以水利水电工程(跨流域调水)开发优选程序规划方案开始实施为起点, 规划方案全面建成的远景为终点, 形成的工程系统开发过渡期为方案优选分析期。根据这一时期流域国民经济发展和综合利用要求逐步增长的过程, 寻求最佳开发程序。同时引入包含经济风险的评价指标, 建立递阶层次结构, 引入权重法的多目标评价决策技术、多准则决策的乐观原理、多级模糊综合评价。在水利水电工程开发程序方案研究系统中, 为使决策者灵活地表述其对决策准则的偏好<sup>[6]</sup>, 在中性决策环境中实现决策的系统化, 采用根据乐观程度(以乐观系数 $\alpha$ 反映)决策的霍尔维茨准则。选定 $\alpha$ 后, 就可以分别计算其折中收益值, 然后在各折中收益值中取

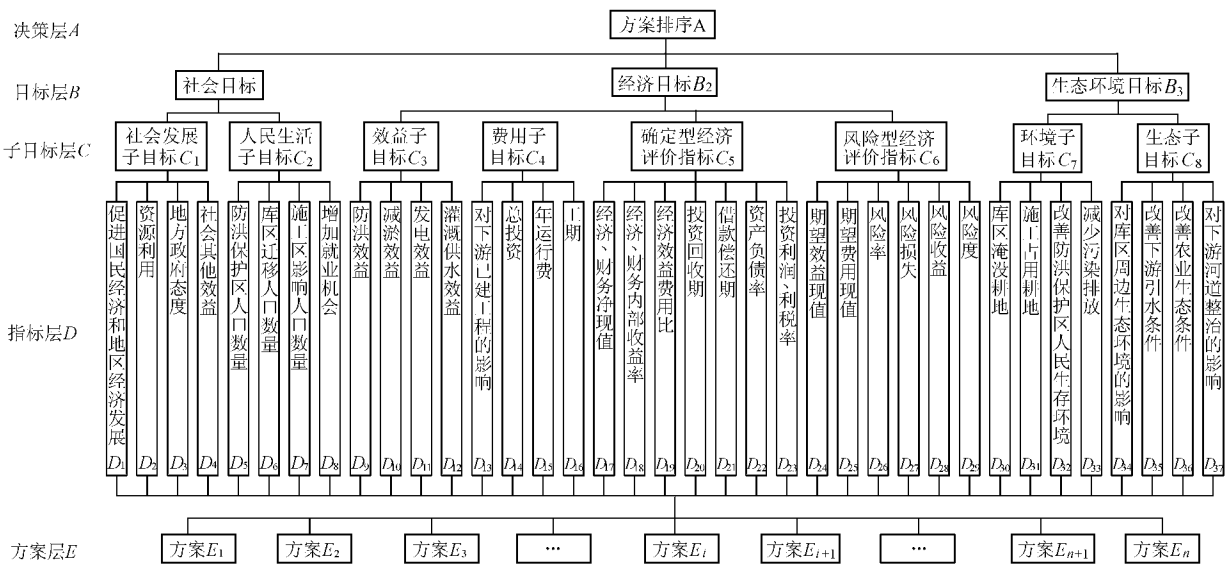


图1 水利水电工程开发次序的递阶层次结构

Fig.1 Hierarchical structure schema for the order of hydraulic and hydroelectric engineering development

最大值所代表的方案为最优方案.作为该准则的延伸,考察是偏重于乐观还是保守,可延伸出乐观决策准则或悲观决策准则.综合评判属决策论范畴,由于决策问题往往带有模糊性和经验性,故采用模糊集方法处理比较符合实际.多目标决策问题的目标间具有不可公度性,需对评价指标特征值进行无量纲化<sup>[7]</sup>.不同类型的指标根据定量指标是属于效益型或成本型可以采用线性化等方法,对于涉及社会、经济、生态环境等诸多方面很难定量的一些指标,对其进行模糊统计并确定其隶属度<sup>[8]</sup>.

设权重分配为  $\tilde{A}$ ,评判矩阵为  $\tilde{R}$ ,则综合评判结果为  $\tilde{B} = \tilde{A} * \tilde{R}$ ;“\*”表示  $\tilde{A}$  与  $\tilde{R}$  进行合成运算的算子.不同算子得到不同的模糊综合评判模型,常用的有<sup>[9]</sup>:主因素决定型、主因素突出型、加权平均型( $M(\cdot, \oplus)$ 和  $M(\cdot, +)$ )等,其中  $M(\cdot, +)$ 模型以权重兼顾所有指标,既考虑了各因素的影响,又保留了单因素评判的全部信息,适合于本文的研究.多层次系统的模糊综合评判是从低层向高层逐层进行的.第  $k$  层评判因素的评判指标向量即为第  $k-1$  层评判指标的隶属度,评判时先按因素等级进行单因素的一级评判,再作因素组的二级综合评判,依次进行,最后进行总综合评判.常规模糊综合评判方法一般很少考虑评价对象的特征值随时间变化的情况,而是把评价指标作为与时间无关的常量,或者只根据某一时间点的一组指标值进行评价,然后将评价结果推及整个时间段,这实质上割裂了先期开发方案与后续工程的关系,类似一组互斥方案的静态比较.开发优选程序研究要求在满足国民经济不断发展和增长过程要求的前提下,从若干待建离散工程中,选择最优工程投产顺序.这些方案是一个有机联系的整体,必须从系统、动态的观点研究开发程序,充分体现长远效益与近期效益、整体效益与个体效益的统筹兼顾,且长远和近期的偏重权衡程度应不同.

2.1 目标函数

以离散工程方案开发分期为阶段,参与排序工程方案(方案指标综合评价隶属度表示)为决策变量,以工程兴建与否的不同方案组合作为状态,以规划期内所有参与排序方案组合的综合评价指标最大作为目标.为了描述简便,以三级递阶层次结构(其他更高层次的依此类推)为例.

$$F = FOPT_{i,t} \left( \sum_{i=0}^n \sum_{t=0}^l b_t \cdot \left( \alpha_1 \cdot \tilde{B}_{iu}^{(1)} \cdot \left[ \begin{matrix} \tilde{B}_{1iu}^{(2)} \cdot \left[ \begin{matrix} \tilde{B}_{11iu}^{(3)} \cdot \tilde{R}_{11iu} \\ \tilde{B}_{1ni}^{(3)} \cdot \tilde{R}_{1ni} \end{matrix} \right] \right. \right. \right. \\ \left. \left. \tilde{B}_{mi}^{(2)} \cdot \left[ \begin{matrix} \tilde{B}_{m1iu}^{(3)} \cdot \tilde{R}_{m1iu} \\ \tilde{B}_{mni}^{(3)} \cdot \tilde{R}_{mni} \end{matrix} \right] \right] \right. \right. \\ \left. \left. \tilde{C}_{1u}^{(2)} \cdot \left[ \begin{matrix} \tilde{C}_{11u}^{(3)} \cdot \tilde{S}_{11u} \\ \tilde{C}_{1ni}^{(3)} \cdot \tilde{S}_{1ni} \end{matrix} \right] \right] \right. \right. \\ \left. \left. \tilde{C}_{mi}^{(2)} \cdot \left[ \begin{matrix} \tilde{C}_{m1u}^{(3)} \cdot \tilde{S}_{m1u} \\ \tilde{C}_{mni}^{(3)} \cdot \tilde{S}_{mni} \end{matrix} \right] \right] \right] \right) \right) \right) \quad (1)$$

式中： $F$ ——目标函数； $FOPT_{i,t}$ ——对多方案排序进行模糊多阶段多指标综合选优； $i,t$ ——参与排序开发方案的工程项目代号、方案开发期数（阶段）； $n$ ——参与排序开发方案的数目； $b_t$ ——第  $t$  期开发方案的权重， $\sum_{t=0}^l b_t = 1$ ； $\alpha_1, \alpha_2$ ——乐观系数、悲观系数，不同的取值反映了开发程序优选的多准则决策，若按效益型指标选优， $\alpha_1 = 1, \alpha_2 = 0$ ，若按成本型指标选优， $\alpha_1 = 0, \alpha_2 = -1$ ，若综合考虑效益型和成本型指标选优， $\alpha_1 = 1, \alpha_2 = -1$ ； $\tilde{B}_{jki}^{(3)}, \tilde{C}_{jki}^{(3)}$ —— $i$  方案在  $t$  期开发第  $j(j = 1, 2, \dots, m)$  个目标所属子目标  $k(k = 1, 2, \dots, n)$  的效益型、成本型的权向量，权向量中分量个数即为指标个数，权向量中分量即为指标权重，上角标 (3) 表示第 3 层次； $\tilde{R}_{jki}$ ， $\tilde{S}_{jki}$ —— $i$  方案在  $t$  期开发第  $j(j = 1, 2, \dots, m)$  个目标所属子目标  $k(k = 1, 2, \dots, n)$  的效益型、成本型的隶属度矩阵，隶属度矩阵的分量即为指标隶属度。

2.2 约束条件

模型的约束条件主要有：国民经济和社会发展对水利水电工程的综合利用要求、工程规模、投资、变量非负、工程最早和最晚投产时间等。

2.3 多准则多层次模糊规划模型求解

- a. 指标权重的推求. 对开发程序研究这类结构不良问题的多目(指)标权重确定, 将决定目标函数综合评价的精度. 层次分析法将复杂决策因素统一归纳形成递阶层次, 将诸因素两两相比、逻辑判断, 并对判断结果进行一致性检验<sup>[10]</sup>, 使思维决策更为有效, 故本文采用层次分析法确定权重。
- b. 根据建立的评价指标体系, 计算不同开发次序方案组合的各评价指标值, 并对指标值进行无量纲化处理, 再将各指标的权重值和无量纲化指标值代入目标函数, 将指标划分为成本型和效益型, 利用乐观准则、悲观准则及折中准则, 计算出各种不同开发次序方案组合的目标函数值, 再分别选出乐观准则、悲观准则及折中准则下的最优值, 最后得出结论。

3 案例研究

某大型跨流域调水工程, 方案优选有 TT, YY, DD 3 个调水方案. 根据实际情况, 采取连续施工分期受益的建设方式, 共有 6 种组合排序. 经过分析, 6 种方案的不同点主要表现在风险经济指标上, 对于社会、生态及其他经济指标, 6 种方案没有太大优劣之分. 因此, 本文只选择风险分析为研究指标, 见表 1. 表 1 包含了该工程的风险评价指标. 通过建立多准则多层次模糊规划模型计算得到的目标函数值见表 2. 表 2 中各指标的权重为 0.125. 由表 2 的评价结果可知, 评价决策准则不同, 优选的调水工程开发程序亦不相同, 乐观准则评价的排序方案为 DD→TT→YY, 而悲观准则评价的排序方案为 DD→YY→TT, 折中准则的优选方案与悲观准则评价结果相同。

表 1 不同开发次序方案组合经济风险分析研究指标

| Table 1 Indexes of economic risk assessment for schemes of different development orders |          |               |               |                 |                     |                   |                   |                 |              |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|----------|---------------|---------------|-----------------|---------------------|-------------------|-------------------|-----------------|--------------|
| 方案                                                                                      | 开发次序     | 期望效益<br>现值/亿元 | 期望费用<br>现值/亿元 | 风险率<br>$P^*/\%$ | 单位投资<br>期望净现值 $E^0$ | 风险损失<br>$L^*/$ 亿元 | 风险收益<br>$B^*/$ 亿元 | 风险益损<br>比 $R^*$ | 风险度<br>$F^d$ |
| 1                                                                                       | DD→TT→YY | 615.43        | 425.03        | 15              | 0.0723              | 353.53            | 2003.3            | 5.67            | 0.205        |
| 2                                                                                       | TT→DD→YY | 633.13        | 610.08        | 31              | 0.0092              | 776.68            | 1728.7            | 2.23            | 0.310        |
| 3                                                                                       | TT→YY→DD | 650.85        | 630.04        | 43              | 0.0081              | 1104.7            | 1464.4            | 1.33            | 0.335        |
| 4                                                                                       | YY→TT→DD | 572.68        | 484.84        | 14              | 0.0338              | 363.83            | 2234.9            | 6.14            | 0.198        |
| 5                                                                                       | YY→DD→TT | 534.14        | 375.88        | 18              | 0.0692              | 411.66            | 1875.3            | 4.56            | 0.162        |
| 6                                                                                       | DD→YY→TT | 528.44        | 311.84        | 11              | 0.0986              | 241.64            | 1955.1            | 8.09            | 0.153        |

表 2 多指标无量纲化及开发次序方案优选的计算

| Table 2 Nondimensionalization of multi-index and calculation for optimal selection of development orders |        |        |        |        |        |        |        |        |        |         |         |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|
| 方案                                                                                                       | 期望效益现值 | $E_0$  | $B^*$  | $R^*$  | 期望费用现值 | $P^*$  | $L^*$  | $F^d$  | 目标函数   |         |         |
|                                                                                                          |        |        |        |        |        |        |        |        | 乐观准则   | 悲观准则    | 折中准则    |
| 1                                                                                                        | 0.7106 | 0.8033 | 0.6993 | 0.6420 | 0.3557 | 0.1250 | 0.1296 | 0.2857 | 0.3569 | -0.1120 | 0.2449  |
| 2                                                                                                        | 0.8552 | 0.0122 | 0.3429 | 0.1331 | 0.9373 | 0.6250 | 0.6199 | 0.8626 | 0.1679 | -0.3806 | -0.2127 |
| 3                                                                                                        | 1.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 0.1250 | -0.5000 | -0.3750 |
| 4                                                                                                        | 0.3614 | 0.2840 | 1.0000 | 0.7115 | 0.5437 | 0.0938 | 0.1416 | 0.2473 | 0.2946 | -0.1283 | 0.1663  |
| 5                                                                                                        | 0.0466 | 0.6751 | 0.5331 | 0.4778 | 0.2013 | 0.2188 | 0.1970 | 0.0495 | 0.2166 | -0.0833 | 0.1333  |
| 6                                                                                                        | 0.0000 | 1.0000 | 0.6367 | 1.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.3296 | 0.0000  | 0.3296  |

表1中风险率是指以统计学上的概率来表述方案规划达不到期望目标的可能性,风险度是指在一组风险率值中,各风险率隶属于目标最大或最小风险率的隶属度。

## 4 结 语

传统工程方案优选方法应用于水利水电工程开发程序的研究,缺乏对系统整体过程进行系统、全面的考查,存在较大的局限性。本文在对开发程序研究问题特点分析的基础上,提出了水利水电开发程序研究的多层次多准则模糊规划模型,并对其进行了求解。案例研究表明,该方法不仅可行,而且可为决策和研究水利水电工程开发程序提供参考。

### 参考文献:

- [1] 韩振强.跨流域调水工程规划方案优选及排序的研究[J].吉林水利,1997(6):6-9.
- [2] 虞锦江.梯级水电站开发程序优化模型[J].水电能源科学,1984(1):22-26.
- [3] 张毅.水电能源系统最优容量扩展规划[J].武汉水利电力大学学报,1989(5):95-106.
- [4] 许树柏.层次分析法原理[M].天津:天津大学出版社,1988:79-140.
- [5] 郭仲伟.风险分析与决策[M].北京:机械工业出版社,1987:100-150.
- [6] 冯尚友.多目标决策理论方法与应用[M].武汉:华中理工大学出版社,1990:47-61.
- [7] 秦寿康.综合评价原理与应用[M].北京:电子工业出版社,2003:98-130.
- [8] 樊治平,姜艳平.模糊判断矩阵排序方法研究的综述[J].系统工程,2001(5):12-18.
- [9] 谢季坚.模糊数学方法及其应用[M].武汉:华中科技大学出版社,2004:32-46.
- [10] 陈欣.模糊层次分析法在方案优选方面的应用[J].计算机工程与设计,2004(10):1847-1849.

## Multi-level and multi-criterion fuzzy programming model for ordering of hydraulic and hydroelectric engineering development

CHEN Ning<sup>1</sup>, TAN Hao-yu<sup>2</sup>, ZHANG Jian<sup>3</sup>

(1. Shahe Pumped Storage Power Generating Co., Ltd., Liyang 213333, China;

2. Yellow River Reconnaissance, Planning & Design Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China;

3. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** In regard to the inter-basin water transfer projects, considering some defects in optimal selection of conventional schemes for hydraulic and hydroelectric engineering development, a multi-criterion hierarchical structure model was established. The necessity of introduction of risk evaluation indexes, the rationality of multi-criterion and multi-level study and development, and the possibility of multilevel fuzzy comprehensive evaluation were discussed. Then, the max-min criterion, the max-max criterion, and the trade-off criterion were put forward so that the decision-makers' preference for criteria could be reflected in the form of coefficients, and the solutions to the corresponding models were also given. The feasibility of the model and method were verified by practical engineering case.

**Key words:** risk index; multi-criterion; multi-level; fuzziness; programming model