

基于效用的施工导流方案多目标决策模型

范锡峨^{1,2}, 胡志根¹, 刘全¹

(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. 上海市金山区发展和改革委员会, 上海 200540)

[摘要] 根据水电工程导流方案的选择与导流建筑物的投资费用、工期、系统风险率及其风险损失之间的关系, 提出确定决策者效用函数的方法; 运用多目标决策理论建立基于效用的施工导流方案决策模型, 对考虑决策者的风险偏好拟定的导流方案集进行优选。实例分析表明, 基于效用的施工导流方案多目标决策模型能够反映决策者的风险偏好, 按照正隶属度极大原则优选导流方案, 使决策者获得最大的满意度。

[关键词] 施工导流方案; 效用损失; 多目标决策模型; 风险偏好

[中图分类号] TV551.2 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2008)07-0041-04

1 前言

施工导流方案的选择涉及到导流建筑物的投资费用、工期、系统风险率以及风险损失等多种因素, 必须进行施工导流方案的多目标决策。

20世纪70年代末80年代初 Saaty 提出的 AHP 法将多目标决策的定性目标量化, 对多准则问题的准则优先进行排序^[1]。国内多目标决策研究在20世纪70年代以来, 在施工导流标准与方案优选等应用方面做了大量工作^[2,3], 文献[4]对水电工程施工初期导流标准多目标风险决策进行了较为系统的研究, 在客观环境下建立了导流标准多目标决策模型, 没有考虑到决策者对风险损失的效用价值。文献[5]对决策者效用函数的确定方法进行了研究, 并对效用在导流方案制定中的影响进行了初步分析, 提出在整个施工导流阶段期望效用损失相对均衡的概念, 但没有对效用在施工导流方案决策中的应用进行分析研究。

笔者根据决策者的风险偏好及水电工程各导流时段效用相等原则确定决策者的效用函数, 建立导流标准效用损失计算模型, 采用多目标决策方法, 建

立基于效用的导流方案多目标决策模型, 研究分析效用在导流方案决策中的影响。

2 决策者效用函数的确定

施工导流方案多目标决策中决策者的效用指的是决策者面临不同的风险损失时所对应的主观价值尺度。风险损失是水电工程中基坑损失、主体工程损失以及发电损失等不确定性费用的期望值。在决策过程中, 决策者总是根据个人的风险偏好去度量风险损失事件发生后的主观价值, 因此, 效用函数是反映决策者的主观价值结构的数学表达式。

水电工程发生超标洪水失事后造成工程投资增加、工期延误, 因此在确定导流方案时, 决策者的风险偏好都是非常谨慎的, 是偏于风险厌恶的。在施工导流阶段, 随着大坝挡水的高程逐渐上升, 失事造成的主体工程损失、发电损失以及下游建筑物损失会越来越不可估算。因此, 在整个施工阶段决策者的风险偏好是由初期导流时段较弱的风险厌恶向中后期导流时段较强的风险厌恶转变^[5], 假定其效用函数为

[收稿日期] 2006-04-26

[基金项目] 国家自然科学基金委员会、二滩水电开发有限责任公司, 雅砻江水电开发联合研究基金项目(50539120); 国家自然科学基金资助项目(50579056)

[作者简介] 范锡峨(1981-), 男, 河南新乡市人, 武汉大学博士研究生, 研究方向为施工导流风险分析与围堰结构可靠性研究, E-mail: fxe98@163.com

$$u(x) = -ax^2 + bx + c \left[x < \frac{b}{2a} \right] \quad (1)$$

式中: x 为费用; $u(x)$ 为费用 x 的效用值; a , b , c 为效用函数的待定系数。

效用函数中含有 3 个待定系数, 使用 $n - m$ 效用点测定的结果联立求解, 方法如下。

设决策者采用确定当量法, 已经测定了集合 X 中 m 个点的效用, 即已经在集合 X 中构造了 m 个二元抽彩:

$$[y_i, p_i, z_i] \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

m 个二元抽彩通过无差异关系:

$$x_i \sim [y_i, p_i, z_i] \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (3)$$

对 m 个无差异点进行评定, 即对每个评定点有:

$$u(x_i) = (1 - p_i)u(y_i) + p_i u(z_i) \quad (4)$$

效用函数满足上面 m 次评定的定量约束, 对 m 个评定点有:

$$\begin{cases} u(x_1) = (1 - p_1)u(y_1, \lambda_1, \dots, \lambda_m) + p_1 u(z_1, \lambda_1, \dots, \lambda_m) \\ u(x_2) = (1 - p_2)u(y_2, \lambda_1, \dots, \lambda_m) + p_2 u(z_2, \lambda_1, \dots, \lambda_m) \\ \dots\dots\dots \\ u(x_m) = (1 - p_m)u(y_m, \lambda_1, \dots, \lambda_m) + p_m u(z_m, \lambda_1, \dots, \lambda_m) \end{cases} \quad (5)$$

由效用相等原则可知其理想状态边界条件:

$$u(x_i) = \lambda \quad i = 1, 2, 3, \dots, m \quad (6)$$

由此可以解出效用函数中的待定系数 a , b , c , 从而确定决策者的效用函数 $u(x)$ 。

3 基于决策者的风险偏好拟定施工导流方案集

施工导流风险是指在施工导流过程中发生超过上游围堰高程或坝体挡水高程的洪水的概率^[6]。因此, 在施工过程中分月堰前或坝前水位超过堰顶高程或坝体挡水高程的可能性为:

$$R_d = P(Z_m(t) > H_{uc}(t)) \quad (7)$$

式中 $Z_m(t)$ 为第 t 月上游围堰堰前水位或坝体坝前水位; $H_{uc}(t)$ 为第 t 月上游围堰堰顶高程或坝顶高程。

施工导流风险模型中主要有两个随机变量影响目标风险度, 一是洪水随机过程, 二是泄流能力的随机过程。根据我国河流特性, 洪水序列(洪量)的随机分布服从 P-III 型分布。泄流能力受到泄流建筑

物的糙率值影响, 其分布服从三角形分布。

在计算施工导流风险 R_d 和不确定性费用 C 的基础上, 根据决策者的效用函数, 得到不确定性费用的效用值, 则对应导流方案的期望效用损失:

$$E(C) = u(C) \times R_d \quad (8)$$

式中 C 为不确定性费用, $u(C)$ 为不确定性费用的效用值, R_d 为施工导流风险。

导流方案的多目标决策是协调系统风险、费用以及工期之间的关系。因此, 导流方案选择不仅仅在于其导流风险的大小, 更在于其相应的风险损失与投资费用之间的相互约束关系。导流标准的选择一方面影响导流系统的风险率, 另一方面影响各个导流时段的风险损失, 而期望效用损失是在一定导流时段内考虑决策者效用的情况下不确定性费用的期望平均值, 是考虑施工导流风险和决策者效用的综合性函数。理想的导流方案认为不同导流时段的期望效用损失在整个施工系统中保持一个相对均衡的状态, 随着决策者的风险偏好而变化。根据各个导流阶段效用均衡原则, 期望效用损失可以用来衡量导流系统风险合理配置的均衡关系。因此, 按照期望效用损失均衡原则制定的导流方案综合考虑风险率、费用和工期三个目标, 采用多目标决策模型得到的决策结果应该与之相符合。水电工程施工过程中决策者的风险偏好可以定义出三种类型: 风险厌恶、风险追求和风险中立, 这三种风险偏好并不是截然分开的, 同一主体对于同类问题在不同时期可能就有不同的风险偏好, 基于决策者的风险偏好拟定施工导流方案集进行多目标决策。

将初步拟定的导流方案作为备选方案 1, 根据期望效用损失均衡原则在备选方案 1 的基础上拟定备选方案 2。针对水电工程的特点和决策者的风险偏好为风险极度厌恶型或风险追求型, 考虑决策者对施工导流建筑物度汛风险的认可及其可能接受的上下限值, 如混凝土结构导流建筑物初期导流标准重现期为 30~10 年一遇, 坝体施工期临时度汛导流标准大于 50 年一遇, 导流泄水建筑物封堵后坝体度汛导流标准可能为 200~100 年一遇, 再拟定几个备选方案代表决策者可能采取的其他风险偏好。这个备选方案集涵盖了水电工程可能采用的各种类型导流方案, 对拟定的导流方案集进行基于效用的多目标决策, 研究效用对导流方案决策的影响作用。

4 施工导流方案的多目标决策模型

待决策的施工导流方案有 m 个, 每个可行方案

的决策指标有 n 个,第 i 个导流方案的第 j 个指标的特征值为 c_{ij} , 则对于所有可行的导流方案,其决策指标特征矩阵为

$$C = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ c_{m1} & c_{m2} & \cdots & c_{mn} \end{bmatrix} = (c_{ij})_{m \times n} \quad (9)$$

导流方案的择优是对备选方案集中元素之间的相对比较而言,为了便于计算将导流方案集的指标绝对量值转化为相对量。假设导流方案 i , 决策指标 j 的隶属度 r_{ij} 为:

$$\begin{cases} r_{ij} = C_{ij} / \sum_{i=1}^m C_{ij} & \text{对于目标越大越好} \\ r_{ij} = \frac{1}{m-1} (1 - C_{ij} / \sum_{i=1}^m C_{ij}) & \text{对于目标越小越好} \end{cases} \quad (10)$$

利用式(10),可以将特征矩阵(9)转化为对应的隶属度矩阵 R ,

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix} = (r_{ij})_{m \times n} \quad (11)$$

$\Phi = (\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n) = (\bigcup_{i=1}^m r_{i1}, \bigcup_{i=1}^m r_{i2}, \dots, \bigcup_{i=1}^m r_{in})$, 称 Φ 为正理想隶属度特征向量。

$\Psi = (\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_n) = (\bigcap_{i=1}^m r_{i1}, \bigcap_{i=1}^m r_{i2}, \dots, \bigcap_{i=1}^m r_{in})$, 称 Ψ 为负理想隶属度特征向量。

设导流方案决策指标的权重为 $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$, 对于导流方案 i , 设 $\mu_i(v_i)$ 为从属于正(负)理想隶属特征向量的隶属度, 则有导流方案 i 的正理想度 $D^{(1)}(R_i, \Phi)$ 和负理想度 $D^{(2)}(R_i, \Psi)$:

$$\begin{aligned} D^{(1)}(R_i, \Phi) &= \mu_i \sqrt{\sum_{j=1}^n \omega_j (\varphi_j - r_{ij})^2}; \\ D^{(2)}(R_i, \Psi) &= v_i \sqrt{\sum_{j=1}^n \omega_j (\psi_j - r_{ij})^2} \end{aligned} \quad (12)$$

为了求得最优解,按最小二乘法优选准则,对所有导流方案使 $D^{(1)}(R_i, \Phi), D^{(2)}(R_i, \Psi)$ 的广义距离平方和最小^[4,7]。根据这一优选准则,建立目标函数:

$$\min Z = \sum_{i=1}^m [(D^{(1)}(R_i, \Phi))^2 + (D^{(2)}(R_i, \Psi))^2] \quad (13)$$

令 $\frac{\partial Z}{\partial \mu_i} = 0, i = 1, 2, \dots, m$, 计算整理后有:

$$\mu_i = \frac{\sum_{j=1}^n \omega_j (\varphi_j - r_{ij})^2}{\sum_{j=1}^n \omega_j (\varphi_j - r_{ij})^2 + \sum_{j=1}^n \omega_j (\psi_j - r_{ij})^2} \quad (14)$$

对所有导流方案,按式(14)计算,以正隶属度极大原则择优导流方案,即

$$\mu_{opt} = \mu_i = \max_{1 \leq i \leq m} \{\mu_i\} \quad (15)$$

5 实例分析及其计算结果

5.1 设计洪水资料

某水电站装机 12 600 MW, 正常蓄水位 600.00 m, 坝顶高程 610.00 m, 双曲拱坝最大坝高 278.00 m, 正常蓄水位以下库容 $115.7 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。初步拟定导流方案为截流后第一年 30 年一遇、第二年 50 年一遇、第三年 50 年一遇、第四年 200 年一遇、第五年 200 年一遇,前三年为初期导流,后两年为中后期导流。

5.2 施工导流方案集的拟定

将初步拟定的导流方案作为备选方案 1, 基于期望效用损失均衡原则对备选方案 1 进行决策, 对导流方案进行合理调整后制定备选方案 2。

决策者效用函数的确定采用以下定解条件:

1) 一般费用为零的时候效用也为零。

2) 效用函数满足式(5), 式中 z_i 为各导流时段的不确定性费用, x_i 为各导流时段的均衡效用点的位置, 各导流时段导流标准的属性参数列于表 1。

表 1 备选方案 1 的效用损失、期望效用损失

Table 1 Utility loss and expected utility loss of choice scheme 1

施工工期	导流标准/%	风险率/%	C/亿元	效用损失	E(C)
第一年	3.3	3.18	-16.46	-30.27	-0.96
第二年	2.0	1.60	-30.32	-84.34	-1.35
第三年	2.0	1.62	-33.50	-101.19	-1.64
第四年	0.5	0.68	-36.68	-119.69	-0.82
第五年	0.5	0.69	-39.86	-139.85	-0.96

水电工程中各导流时段的理想状态边界条件 $\lambda = -1$, 联立式(5)和式(6), 由于效用均衡方程组中参数个数小于方程数, 采用绝对误差和最小方法求得的效用函数待定系数 a, b, c , 决策者的效用函数为:

$$u(C) = -0.0819 C^2 + 0.0695 C - 6.9323 \quad (16)$$

式中 C 为不确定性费用, $u(C)$ 为不确定性费

用的效用值。

基于期望效用损失均衡原则对表 1 进行分析: 初期导流的第一年度汛期期望效用损失为 -0.96, 比理论值 -1 要小(绝对值比较,下同),将此时段的导流标准由 33 年一遇适当降低到 20 年一遇,期望效用损失提高到 -1.23,可以适当降低围堰进度;初期导流的第二年度汛期期望效用损失为 -1.35,比理论值 -1 要大(绝对值比较,下同),将此时段的导流标准由 50 年一遇适当降低到 40 年一遇,期望效用损失降低到 -1.16,可以适当降低围堰进度;初期导流与中期导流进行衔接时,发现期望效用损失由 -1.64 突降至 -0.82,由初期导流风险偏大突降至中期导流风险偏小,这样的导流标准设计不利于坝体的施工进度安排,中期导流第一年时为了使坝体达到挡水标准要求就必须增加工程投资加快施工进度,与水电工程建设中要求风险逐渐降低以及期望效用损失均衡原则不相符,因此将中期导流的第一年度汛标准降低为 100 年一遇,期望效用损失由 -0.82 提高到 -1.1。调整后的备选方案 2 基本实现了各个导流时段的期望效用损失均衡,中后期准期望效用损失逐渐减少这一原则。

考虑到决策者的可能风险偏好,在备选方案 1 和 2 的基础上根据决策者对施工导流建筑物度汛风险的认可及其可能接受的上下限值再拟定两个备选导流方案 3 和 4,对备选导流方案集进行多目标决策,确定基于期望效用损失均衡原则制定的备选方案 2 是否最优,分析效用对导流方案决策的影响。

表 2 备选施工导流方案集

Table 2 Choice construction diversion schemes

施工工期	导流标准			
	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4
第一年	30 年一遇	20 年一遇	50 年一遇	20 年一遇
第二年	50 年一遇	40 年一遇	100 年一遇	30 年一遇
第三年	50 年一遇	50 年一遇	100 年一遇	50 年一遇
第四年	200 年一遇	100 年一遇	200 年一遇	100 年一遇
第五年	200 年一遇	200 年一遇	300 年一遇	100 年一遇

5.3 基于效用的导流方案多目标决策分析

将决策者的效用引入到决策模型中,将风险损失费用转化为效用损失,通过基于效用的多目标决策模型确定导流方案的优选排序,并对决策指标的权重进行敏感性分析,如表 3、表 4 所示。

5.4 计算成果分析

综合考虑水电工程的投资费用、风险和工期三个目标,按照正隶属度极大原则,基于效用的导流方案排序显示备选方案 2 优于其他备选方案,决策者具有最大的满意度,并且权重的敏感性分析也说明备选方案 2 具有良好的稳定性。

表 3 各导流方案条件下的决策分析结果

Table 3 Decision indexes of diversion schemes

绝对值	确定性费用/亿元	风险损失费用/亿元	效用损失	最大平均强度/($10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{月}^{-1}$)
备选方案 1	86.6	3.1	8.0	23.5
备选方案 2	82.6	3.3	8.1	23.0
备选方案 3	89.9	2.8	7.8	25.0
备选方案 4	80.6	4.6	9.0	22.5

表 4 备选导流方案集排序表

Table 4 Compositor of diversion schemes under different condition of weights

权重			隶属度			
确定性费用	效用损失	最大平均强度	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4
0.30	0.30	0.40	0.747	0.927	0.454	0.546
0.35	0.30	0.35	0.730	0.927	0.452	0.548
0.28	0.15	0.57	0.673	0.931	0.256	0.744

6 结语

施工导流方案的决策直接影响到水电工程能否顺利完工,而效用对导流方案多目标决策的影响是客观存在的,因为决策者不可能没有风险偏好,决策者的风险偏好就会对施工导流方案的选择产生影响,运用效用函数可以较好地考虑决策者的风险偏好及其对风险损失的承受能力。理想的导流方案认为不同导流时段的期望效用损失在整个施工系统中保持一个相对均衡的状态,随着决策者的风险偏好而变化,考虑水电工程初期、中后期导流时段之间的导流标准存在着内在联系,本文建立了决策者效用函数确定办法,根据决策者的风险偏好拟定导流方案集进行基于效用的导流方案多目标决策。通过实例研究效用对多目标决策的影响,说明基于效用的导流方案多目标决策模型选出的最优方案,能够反映决策者的风险偏好,并使决策者获得最大的满意度。

(下转 157 页)