

文章编号:0559-9350(2017)03-0261-09

梯级水电站负荷调整方案评价指标体系及决策模型

纪昌明¹, 李荣波¹, 刘 丹², 张 璞¹, 张验科¹, 周 婷³

(1. 华北电力大学 可再生能源学院, 北京 102206; 2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038;

3. 安徽农业大学 水利工程系, 安徽 合肥 230036)

摘要: 梯级水电站负荷调整方案的优选直接关系到发电部门可获取的效益及面临的风险, 鉴于现有风险-效益协同评价指标体系不完备, 尚无法对其进行全面、有效评价与决策的问题, 本文基于梯级水电站实际发电运行过程, 建立了负荷调整风险效益协同评价指标体系, 并给出了“发电风险率”、“负荷变动风险率”和“风险机会损失”等新指标的定义与计算方法; 同时, 针对传统灰靶决策模型忽略指标相关性的不足, 将相关系数矩阵引入该模型中以代替马氏距离中的协方差矩阵, 并定义相对靶心距来实现非劣方案的评价决策, 由此建立了一种改进灰靶决策模型; 将所建指标体系与改进模型应用于雅砻江流域锦官电源组梯级水电站负荷调整方案评价, 计算结果与传统灰靶决策模型和基于马氏距离的灰靶决策模型相比, 本文模型的评价结果更具合理性, 可为科学实施梯级水电站负荷调整提供重要的依据和技术支撑。

关键词: 梯级水电站; 负荷调整方案; 风险效益协同评价; 指标体系; 改进灰靶决策模型

中图分类号: TV697

文献标识码: A

doi: 10.13243/j.cnki.slxb.20160570

1 研究背景

日发电计划是梯级水电站生产运行的重要依据, 电调部门提前一日下达至水调部门。基于电网安全运行的需要, 通常情况下发电计划一经下达一般不允许变动; 但受来水不确定性等因素影响, 水电站水库存在因来水预报误差造成运行水位超出安全控制范围而需要调整发电计划的实际情况, 一般将这一过程称为“负荷调整”。负荷调整是水(能)资源开发利用过程中后期调度运行阶段亟待解决的问题之一, 其目的在于有效解决来水不确定性(偏小或偏大)导致的电站被迫降低出力运行或水库弃水问题, 保障电站水库安全运行的同时, 提高水(能)资源利用率。目前, 已有学者^[1-2]就负荷调整模型及其求解算法进行了研究, 取得一定进展。但调整时刻及幅度的不同, 约束域内可生成若干个可行的负荷调整方案(非劣解), 从中找出一种最为满意的决策方案是模型算法研究后的另一个课题。

由于改变了原有发电计划, 负荷调整可能会给辖区电网的有序、安全和稳定运行带来一定影响, 因此, 安全性是决策者考虑的首要问题, 与此同时, 经济性也备受关心。不同的负荷调整方案对应着不同的风险和效益, 方案优选实质上是一个多属性决策问题。在水库调度的理论研究与实践过程中, 风险效益评价决策一直是热点及难点问题之一。周研来等^[3]针对梯级水库联合蓄水调度过程中的防洪、发电、蓄水和航运等目标冲突问题, 从风险分析、兴利效益分析和评价决策三方面出发, 构建了一套梯级水库联合蓄水方案优选模型, 在溪洛渡-向家坝-三峡梯级水库的实例应用中验

收稿日期: 2016-05-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(51279062, 51509001); “十三五”国家重点研究计划课题(2016YFC0402208); 中央高校基本科研业务费专项资金(2016MS51, 2016XS58); 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室开放研究基金(IWHR-SKL-201420); 雅砻江流域水电开发有限公司(JKZX-201416-01)

作者简介: 纪昌明(1956-), 男, 湖北洪湖人, 教授, 博士生导师, 主要从事水文水资源研究。E-mail: cmji@ncepu.edu.cn

通讯作者: 李荣波(1989-), 男, 贵州遵义人, 博士生, 主要从事水文水资源研究。E-mail: rongbole@163.com

证了模型的合理性。纪昌明等^[4]针对传统水库调度模式缺乏协调优化调度过程中风险和效益的能力,建立了基于机会约束规划的随机多目标决策模型,应用不确定模拟技术、妥协算法及遗传算法的混合智能算法对三峡-葛洲坝梯级水电站联合调度多目标风险决策进行了求解。冯平等^[5]利用风险效益分析方法构建了汛限水位的综合评价指标体系,并利用模糊综合评价法对东武仕水库汛限水位非劣解集进行了评价决策,确定了水库调度过程中汛限水位动态控制的满意决策方案。

可以看出,在水库调度多属性决策的现有研究中,风险分析多侧重于电力供给侧,即水电站水库的运行调度风险,较少关注负荷需求侧,即电力系统的安全运行。然而,负荷调整的特殊性决定了其必须同时兼顾供给侧与需求侧的安全性。因此,本文以用水和电网安全运行为前提,提出负荷调整过程重点关注的风险指标和效益指标,构建风险效益协同评价指标体系;在灰靶理论基础上,引入基于相关系数矩阵的马氏距离以及相对靶心距概念,建立一种改进灰靶决策模型;最后以锦官电源组梯级水电站(锦西、锦东、官地)为实例进行计算,以期获取可协调风险与效益关系的最佳满意负荷调整决策方案。

2 风险效益协同评价指标体系

负荷调整风险效益协同评价指标体系如图1所示,分为风险指标和效益指标两大类,其中,风险指标包含风险率和风险机会损失,效益指标以实施负荷调整后,梯级水电站增发电量部分所产生的经济效益来衡量,即增加效益。

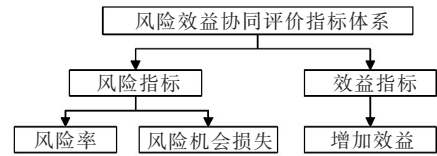


图1 风险效益协同评价指标体系

2.1 风险指标

2.1.1 风险率 梯级水电站负荷调整即是对电站的计划出力过程进行调整,其可能干扰辖区电网的运行状态。与此同时,执行过程中,水电站水库的运行工况依然受到来水不确定性等因素影响。因此,从这两方面提出重点关注的风险率指标。

(1)电网失稳风险。电网调度部门希望水调部门严格执行发电计划,否则,将会影响电网的运行状态。在此基础上,提出发电风险率和负荷变动风险率两个指标。

发电风险率(x_1):负荷调整方案中,出力过程 $N^*(t)$ 和计划出力过程 $N(t)$ 不一致的时间 T^* 与运行周期 T 的比值,即:

$$x_1 = T^*/T \quad (1)$$

x_1 值越小,表明负荷调整出力过程与发电计划出力过程一致性越高,运行可靠性越强,因此,其从时间尺度上衡量了负荷调整对电网安全运行的不利影响。

负荷变动风险率(x_2):调整后实际总发电量 E^* 与计划发电量 E 的差值,占计划发电量 E 的比重,即:

$$x_2 = \left| \frac{E^* - E}{E} \right| \quad (2)$$

x_2 值越小,表明负荷调整前后电量差别越小,对电网的干扰性越小,因此,其从空间尺度上衡量了负荷调整方案对电网安全运行的干扰程度。

(2)水位越限风险率(x_3)。由于来水过程和预报模型不确定性等因素的影响,致使实际运行中有可能出现水库最高(最低)水位超出运行水位控制范围的情况,其发生的概率即为水位越限风险率。水位越限实质上是水文预报不准等风险因子的综合作用结果,用坝前水位作为主要风险因子在很大程度上包含了水文其它因子的作用效果等。因此,该指标可直观反映负荷调整方案给水库运行带来的不利影响,其数学表达式为:

$$x_3 = P_r \left(\bigcup_{i=1}^n \bigcup_{j=1}^T (Z_{i,j} > Z_i^{\max} \cup Z_{i,j} < Z_i^{\min}) \right) \quad (3)$$

式中： $Z_{i,j}$ 为水库*i*在*j*时段的水位； $Z_i^{\max}$ 为水库*i*的运行水位上限，可选择汛限水位(汛期)或正常蓄水位(非汛期)； $Z_i^{\min}$ 为水库*i*的运行水位下限，一般为死水位；*n*为水库数目；*T*为总时段数； $P_r(\cdot)$ 为式(·)的概率。

(3)出力不足风险率(x_4)。水力发电机组的出力受阻指因水头、流量或机械等原因而不能发出预定的出力。若机组出现出力受阻，则会导致水电站的出力受阻。本文中，出力不足风险率指因调整后的负荷值过大导致水电站出力受阻的概率，其数学表达式为：

$$x_4 = P_r \left(\bigcup_{i=1}^n \bigcup_{j=1}^T (N'_{i,j} < N^*_{i,j}) \right) \quad (4)$$

式中： $N'_{i,j}$ 为电站*i*在*j*时段的实际出力； $N^*_{i,j}$ 为电站*i*在*j*时段的预定出力(负荷要求)。

此处采用马尔科夫链蒙特卡罗算法^[6]求解上述指标。

2.1.2 风险机会损失(x_5) 由于预报误差的存在，对于每一种负荷调整方案，若来水仍偏大，水库将发生弃水，说明本可以再多发电而没有生产，导致放弃这部分水能利用的机会，这是一种损失，称为“弃水机会损失”；若电站未能按负荷调整方案运行，说明制定调整方案时高估了实际来水，未能生产的电能对电站来说也是一种损失，称为“出力不足机会损失”。本文所定义的“风险机会损失”包含上述两方面(图2)。

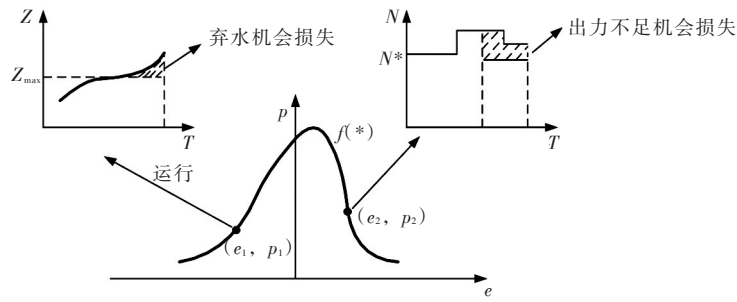


图2 风险机会损失

风险机会损失是个离散型随机变量(记为*L*)，与径流预报误差和负荷调整方案有关，直接求取比较困难，本文采用下述方法进行计算。

(1)步骤1。利用最大熵法^[7]确定预报误差概率密度函数 $f(\cdot)$ ，并计算误差为 e_g (*g*为状态变量)时其对应的概率值 p_g ：

$$p_g = f(e_g) \quad (5)$$

(2)步骤2。执行负荷调整方案*k*，计算*g*状态下的风险机会损失 l_{kg} 。如前分析，其包含下面两种情况。

①弃水机会损失 $l(1)_{kg}$ ：

$$l(1)_{kg} = C \cdot f_{ZV} \left(\int_{t_1}^{t_2} z(t) dt \right) / \rho \quad (6)$$

式中：*C*为上网电价； $f_{ZV}(\cdot)$ 为水位库容关系曲线； t_1 、 t_2 分别为水库水位越限的起、止时间； $z(t)$ 为水位过程变化曲线； ρ 为耗水率。

②出力不足机会损失 $l(2)_{kg}$ ：

$$l(2)_{kg} = C \cdot \int_{t'_1}^{t'_2} (N^*(t) - N'(t)) dt \quad (7)$$

式中： $N^*(t)$ 为负荷调整方案出力过程； $N'(t)$ 为实际出力过程； t'_1 、 t'_2 分别为出力不足的起、止时间。

由式(5)一式(7)可获取风险机会损失*L*的概率分布。

(3)步骤3。在所得机会损失概率分布基础上，求取方案*k*的风险机会损失，即损失期望值：

$$x_5 = EL_{1k} + EL_{2k} = \sum_g l(1)_{kg} p_{1g} + \sum_g l(2)_{kg} p_{2g} \quad (8)$$

式中： EL_{1k} 、 EL_{2k} 分别为方案 k 的弃水机会损失期望值和出力不足机会损失期望值； p_{1g} 、 p_{2g} 分别为其对应的概率。

2.2 效益指标 实施负荷调整带来的效益，体现为增发电量 ΔE 所产生的经济效益 x_6 ，数学表达式为：

$$x_6 = \Delta E \cdot C \quad (9)$$

3 改进灰靶决策模型

灰靶决策模型是一种多目标决策方法^[8]，核心思想为在没有标准模式的条件下设定一个灰靶，将理想最优值作为靶心，求解各方案到靶心的距离(靶心距)，最后比较靶心距来实现方案的优劣排序。因其思路简洁清晰、应用性强等优点，得到较为广泛的应用^[9-11]。文献[12]针对传统灰靶决策模型等权重不合理问题，利用组合赋权法(熵权法和层次分析法)进行了改进，并将其应用于四川省18个地级市水资源紧缺度评价；文献[13]考虑目标效果值中靶和脱靶两种情形，构造了一种智能加权灰靶决策模型，在煤矿安全生产评价中验证了改进模型的合理性；文献[14]将决策者的群体差异性和评价信息的不均匀性纳入评价过程，在此基础上提出了基于类别加权算子的环形灰靶决策模型，并将其应用于应急方案评价决策；文献[15]利用区间数来表征指标的不确定性，建立了一种基于区间数的灰靶决策模型，对智能变电站方案进行了优选，扩展了模型的应用范围；文献[16]在设计了一种“奖优罚劣”算子对指标进行标准化处理，同时利用优化方法确定指标权重值，由此构建了一种新的灰靶决策模型。

本文认为，传统灰靶决策模型除了指标权重赋值等环节有待改进外，还存在其他需要解决的问题。比如，传统模型采用欧氏距离求解靶心距，未能考虑指标间的相关性，但实际中指标间不可避免地存在一定程度的相关关系(如风险与效益)，文献[17]将马氏距离引入传统模型中，较好地解决了此问题。但是，马氏距离考虑指标间的协方差，其与方差性质一样，表征两个指标对各自平均值偏差的综合程度，这可能放大或缩小指标间的影响，未能精确衡量指标间的关联程度，进而引起计算结果不稳定。文献[18]利用最小二乘法，导出了相关系数 ρ_{XY} 与协方差 $COV(X, Y)$ 之间的关系，其中 $\rho_{XY} = COV(X, Y) / (DX \cdot DY)^{1/2}$ ， $COV(X, Y) = E(X - EX)(Y - EY)$ 。若 $|\rho_{XY}|$ 越小，则 X 与 Y 的关联度越低；反之，则 X 与 Y 的关联度越高。同理，若 $COV(X, Y)$ 越小，则 X 与 Y 的关联度越低；反之，则越高。由于随机变量 X 、 Y 的分布客观存在，其方差 DX 、 DY 可以确定，因此 ρ_{XY} 与 $COV(X, Y)$ 成正比关系，但从 ρ_{XY} 的公式中可以看出：其为一个无量纲的量，不受 X 与 Y 度量单位的影响，但 $COV(X, Y)$ 必须依赖其单位，因此较常使用相关系数来描述指标间的相关程度^[19]。

基于上述分析，本文采用层次分析法和离差最大化法相结合的赋权法来确定指标权重，并将马氏距离中的协方差矩阵用相关系数矩阵代替并引入到传统灰靶决策模型中，同时在一个靶心的基础上，将理想最优和最劣值分别定义为正靶心和负靶心，利用基于相关系数的马氏距离计算其对应的正、负靶心距，定义相对靶心距，并比较其大小对待评方案进行排序。改进灰靶决策模型求解步骤如下。

(1)步骤1。建立样本矩阵。设 p 个决策方案组成决策方案集 X ， $X = (x_1, x_2, \dots, x_p)$ ； q 个指标组成指标集 Y ， $Y = (y_1, y_2, \dots, y_q)$ ；方案 x_k 对指标 y_l 的样本值为 $a_{kl}(k=1, 2, \dots, p)(l=1, 2, \dots, q)$ 。则 X 对 Y 的样本矩阵为：

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1q} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2q} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{p1} & a_{p2} & \cdots & a_{pq} \end{bmatrix} \quad (10)$$

(2)步骤2。建立决策矩阵 R 。为解决不同量纲指标的“不可公度性”，本文采用Vague思想^[20]对指标集 A 进行标准化处理，即对指标进行 $[-1, 1]$ 区间上的线性变换。计算公式如下：

$$\bar{x}_l = \frac{1}{p} \sum_{k=1}^p x_{kl} \quad (11)$$

对于风险指标

$$r_{kl} = \frac{\bar{x}_l - x_{kl}}{\max\left(\max_k \{x_{kl}\} - \bar{x}_l, \bar{x}_l - \min_k \{x_{kl}\}\right)} \quad (12)$$

对于效益指标

$$r_{kl} = \frac{x_{kl} - \bar{x}_l}{\max\left(\max_k \{x_{kl}\} - \bar{x}_l, \bar{x}_l - \min_k \{x_{kl}\}\right)} \quad (13)$$

式(12)、式(13)即为线性变换算子，用于对样本矩阵 $\mathbf{X}$ 的转换，求得决策矩阵 $\mathbf{R}$ ：

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1q} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2q} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ r_{p1} & r_{p2} & \cdots & r_{pq} \end{bmatrix} \quad (14)$$

(3)步骤3。确定正、负靶心。

设 $r_l^+ = \max\{r_{kl} \mid 1 \leq k \leq p\}$ ($l = 1, 2, \dots, q$)，则：

$$\mathbf{r}^+ = (r_1^+, r_2^+, \dots, r_q^+) \quad (15)$$

为理想最优值，称为正靶心。

设 $r_l^- = \min\{r_{kl} \mid 1 \leq k \leq p\}$ ($l = 1, 2, \dots, q$)，则：

$$\mathbf{r}^- = (r_1^-, r_2^-, \dots, r_q^-) \quad (16)$$

为最劣值，称为负靶心。

(4)步骤4。确定指标权重向量。

$$\mathbf{W} = (w_1, w_2, \dots, w_l, \dots, w_q) \quad (17)$$

式中： w_l 为第 l 个指标的权重。

本文利用层次分析法(主观)和离差最大化法(客观)分别求取各指标权重值 w_{Al} 和 w_{Ml} ，进而确定组合权重 $w_l = \varphi \cdot w_{Al} + (1 - \varphi)w_{Ml}$ ，其中 φ 为经验因子(取值范围为 $[0, 1]$)，反映了决策者对主观经验和客观数据的偏好程度^[21]。

(5)步骤5。引入相关系数矩阵的正、负靶心距计算。

令

$$u_l = w_l r_{kl} - w_l r_l^+, \quad \mathbf{U} = (u_1, u_2, \dots, u_l, \dots, u_q)^T \quad (18)$$

$$v_l = w_l r_{kl} - w_l r_l^-, \quad \mathbf{V} = (v_1, v_2, \dots, v_l, \dots, v_q)^T \quad (19)$$

式中： $\mathbf{U}$ 、 $\mathbf{V}$ 分别为方案 k 到正、负靶心的加权差。

则基于相关系数矩阵的方案 k 到正靶心的距离(正靶心距)为

$$\varepsilon_k^+ = \left(\mathbf{U}^T \Sigma^{-1} \mathbf{U} \right)^{1/2} \quad (20)$$

到负靶心的距离(负靶心距)为

$$\varepsilon_k^- = \left(\mathbf{V}^T \Sigma^{-1} \mathbf{V} \right)^{1/2} \quad (21)$$

式中： Σ 为决策矩阵 $\mathbf{R}$ 的相关系数矩阵。

(6)步骤6。计算相对靶心距及排序。

$$\varepsilon_k^* = \frac{\varepsilon_k^-}{\varepsilon_k^+ + \varepsilon_k^-} \quad (22)$$

若 ε_k^* 越大，表明方案 k 越接近正靶心，同时又远离负靶心，其效果越佳。

4 实例应用

锦官电源组梯级水电站位于四川省境内,是雅砻江下游水能资源开发的重点工程,自上而下由锦西、锦东和官地水电站构成(图3),总装机容量1 080万kW,其主要通过锦屏换流站接入 ± 800 kV锦苏直流参与全国“西电东送”,对改善能源结构、保障能源安全意义重大。各水电站基本参数见表1。运行调度中,受来水不确定性等因素影响,梯级水电站存在负荷调整的实际需求。本文建立了一种基于来水不确定性的梯级水电站负荷调整耦合模型,以此获取负荷调整非劣解集^[22],应用所建指标体系和决策模型进行评价,评价样本如表2所示。

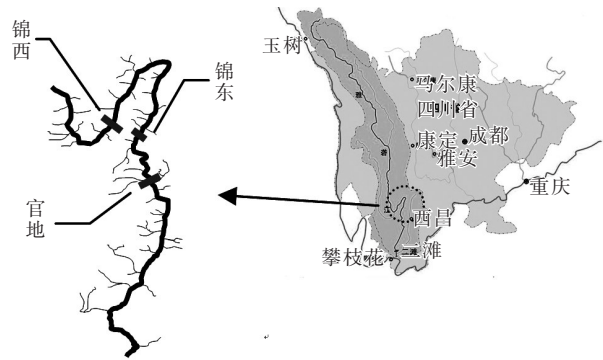


图3 锦官电源组梯级水电站

表1 雅砻江流域锦官电源组梯级水电站基本参数

水电站	正常蓄水位/m	死水位/m	调节库容/亿 m ³	装机容量/万 kW	保证出力/万 kW	调节性能
锦西	1880	1800	49.1	360	108.6	年
锦东	1646	1640	0.0496	480	144.3	日
官地	1330	1321	1.232	240	70.95	日

表2 锦官电源组梯级水电站负荷调整非劣解集

方案	负荷调整时刻		$x_1/\%$	$x_2/\%$	$x_3/\%$	$x_4/\%$	$x_5/\text{万元}$	$x_6/\text{万元}$
	起始	结束						
一	14:00	24:00	41.67	1.07	7.38	10.38	8.89	78
二	16:00	24:00	33.33	0.85	8.90	7.50	9.41	62
三	18:00	24:00	25.00	0.64	9.50	6.74	8.66	47
四	14:00	18:00	17.71	0.88	9.20	7.90	8.62	64
五	14:00	22:00	34.38	0.46	8.54	4.44	9.04	33
六	19:00	22:00	13.54	0.35	10.20	3.72	8.66	25

注:电价 C 取0.30元/(kW·h)

利用式(12)和式(13)分别对非劣解集中的风险指标和效益指标进行标准化处理,结果见表3。

表3 非劣解集标准化处理

方案	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6
一	-1.00	-1.00	1.00	-1.00	-0.02	1.00
二	-0.41	-0.39	0.03	-0.20	-1.00	0.40
三	0.19	0.19	-0.35	0.01	0.42	-0.17
四	0.70	-0.47	-0.16	-0.31	0.49	0.47
五	-0.48	0.69	0.26	0.65	-0.30	-0.70
六	1.00	0.99	-0.79	0.85	0.42	-1.00

由表3可得决策矩阵 $\mathbf{R}$,进而确定正、负靶心分别为: $r^+=(1.00, 0.99, 1.00, 0.85, 0.49, 1.00)$ 、 $r^-=(-1.00, -1.00, -0.79, -1.00, -1.00, -1.00)$ 。利用层次分析法和离差最大化法获取各指标主观、客观权重值: $W_A=(0.253, 0.253, 0.216, 0.036, 0.091, 0.151)$ 、 $W_M=(0.187, 0.185, 0.145, 0.163, 0.133, 0.186)$ 。取经验因子 φ 为0.5,进而得到组合权重为 $W=(0.220, 0.219, 0.181, 0.100, 0.112, 0.169)$ 。

进一步求取决策矩阵 $\mathbf{R}$ 的相关系数矩阵,如表4所示。由表4可知,负荷调整方案评价指标体系中,一些指标间存在较强的相关关系,如负荷变动风险率(x_2)与增加效益(x_6)的相关系数为-1.000,

表4 相关系数矩阵

指标	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6
x_1	1.000	0.527	-0.908	0.544	0.639	-0.526
x_2	0.527	1.000	-0.699	0.984	0.213	-1.000
x_3	-0.908	-0.699	1.000	-0.714	-0.389	0.694
x_4	0.544	0.984	-0.714	1.000	0.120	-0.985
x_5	0.639	0.213	-0.389	0.120	1.000	-0.213
x_6	-0.526	-1.000	0.694	-0.985	-0.213	1.000

表明二者存在完全负相关关系，即负荷变动幅度越大，所增加的经济效益越明显，但电网维持有序稳定运行状态的概率随之变小；与此同时，负荷变动风险率(x_2)与出力不足风险率(x_4)的相关系数为0.984，表明二者存在较大的正相关关系，即负荷变动风险率越大，调整方案偏离原有发电计划的程度越大，此时水电站出现出力不足的情形越易发生，其对应风险率越大；同理可以分析其他指标间的相关关系，这非常具有现实意义。因此，应用灰靶决策模型进行负荷调整方案评价过程中，有必要考虑指标间的相关性。

应用传统灰靶决策模型(模型一)所求结果为：

$$\varepsilon_1^*=0.4911, \varepsilon_2^*=0.4961, \varepsilon_3^*=0.5028, \varepsilon_4^*=0.4997, \varepsilon_5^*=0.4994, \varepsilon_6^*=0.4966。$$

方案排序为：方案三>方案四>方案五>方案六>方案二>方案一。

利用协方差矩阵^[17](模型二)即马氏距离计算所得结果为：

$$\varepsilon_1^*=0.4930, \varepsilon_2^*=0.4942, \varepsilon_3^*=0.4948, \varepsilon_4^*=0.5000, \varepsilon_5^*=0.4977, \varepsilon_6^*=0.4996。$$

方案排序为：方案四>方案六>方案五>方案三>方案二>方案一。

利用相关系数矩阵即本文模型计算得到的结果为：

$$\varepsilon_1^*=0.4911, \varepsilon_2^*=0.4966, \varepsilon_3^*=0.5029, \varepsilon_4^*=0.4961, \varepsilon_5^*=0.4994, \varepsilon_6^*=0.4997。$$

方案排序为：方案三>方案六>方案五>方案二>方案四>方案一。

总体来看，3种模型不同方案的排序体现了一致性与波动性相结合的特征。其中：各模型排序第3位和第6位均为方案五和方案一，表明三种模型对“中间”和“末端”位置的排序没有产生偏差，体现了排序结果一定程度上的一致性；对于“首端”及其他位置的排序则体现了较明显的波动性，如模型一中排在第4位的方案六在模型二和本文模型中排在第2位，主要原因在模型一采用欧氏距离计算，忽略了指间的相关性，某些信息被重复计算，进而对方案排序结果产生了影响，事实上，表4已显示负荷调整评价指标间存在较为明显的相关关系，特别是负荷变动风险率(x_2)与增加效益(x_6)、发电风险率(x_1)与水位越限风险率(x_3)以及负荷变动风险率(x_2)与出力不足风险率(x_4)，它们之间的相关系数分别为-1.000、-0.908、0.984，因而忽略这种关系所得结果的可信度有所降低。

进一步分析相关系数和协方差两种相关性处理方式对评价结果的影响。模型二与本文模型排序结果中，方案六、方案五和方案一排位一致，剩余3个方案排位出现波动，这主要是相关系数矩阵和协方差矩阵不同造成的。依托MATLAB求取决策矩阵R的协方差矩阵，如表5所示。

表5 协方差矩阵

指标	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6
x_1	0.585	0.305	-0.421	0.281	0.283	-0.306
x_2	0.305	0.573	-0.321	0.503	0.094	-0.576
x_3	-0.421	-0.321	0.368	-0.292	-0.137	0.321
x_4	0.281	0.503	-0.292	0.456	0.047	-0.506
x_5	0.283	0.094	-0.137	0.047	0.337	-0.094
x_6	-0.306	-0.576	0.321	-0.506	-0.094	0.580

比较表4和表5可以发现，相关系数是在协方差基础上“加工”而成，二者均可反映指标间相关性，但又有所差异。以负荷变动风险率(x_2)与增加效益(x_6)两指标为例进行说明，从协方差(-0.576)看，二者存在一定程度的负相关性；但从相关系数(-1.000)看，二者为完全负相关。造成这种差异的原因在于协方差未考虑标准差，若两个标准差都很小，即使协方差小一些，相关系数也能显示一

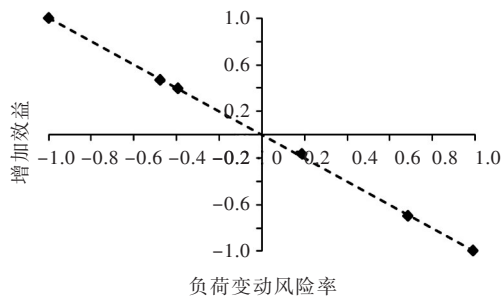


图4 负荷变动风险率与增加效益相关关系

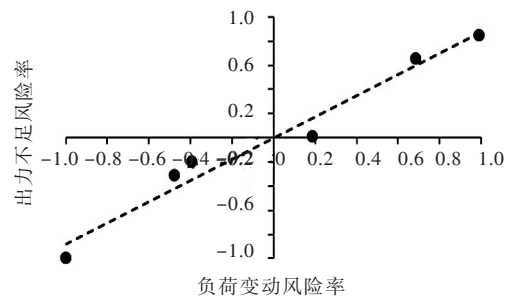


图5 负荷变动风险率与出力不足风险率相关关系

定程度的相关性。

图4为负荷变动风险率与增加效益相关关系图，从数据点来看，二者呈现完全负相关；同样，负荷变动风险率(x_2)与出力不足风险率(x_4)的协方差为0.503，但其相关系数为0.984，见图5。图5显示，二者的正相关性“显著”，而非“一定程度”。因此，采用相关系数衡量指标相关性所得结果比协方差更合理。对于本文模型推荐的方案三，其各项风险率指标在非劣解集中居于中间位置，此外，风险机会损失(8.66万元)较小，增加效益(47万元)较大，即风险在一定限度内，增加效益可观，满足决策者期望，具有可行性。

5 结论

实施负荷调整是保障梯级水电站运行安全和提高水(能)资源利用率的重要非工程措施之一。本文在负荷调整非劣解集基础上，重点研究了负荷调整方案评价指标体系和决策模型。一方面，从发电供给侧和负荷需求侧的运行安全出发，建立了负荷调整方案风险效益协同评价指标体系，可量化估计负荷调整方案对电力系统安全稳定运行造成的影响，特别是提出了“发电风险率”、“负荷变动风险率”以及“风险机会损失”3项新指标。另一方面，建立了一种改进灰靶决策模型，该模型合理考虑指标之间相关性，将马氏距离中的协方差矩阵用相关系数矩阵代替，并引入相对靶心距计算中。以雅砻江流域锦官电源组梯级水电站为例进行的负荷调整方案评价表明：所建指标体系符合负荷调整过程特点，相关系数的处理方式可更好地衡量指标间的相关性，所得结果更为合理，评价模型具有推广应用价值。当然，模型还存在一些不足：由于区间数相关系数计算的困难，本文模型目前仅适用于样本矩阵为实数的情形，扩展模型应用范围是值得进一步努力的方向。

参 考 文 献：

- [1] 周建中, 袁柳, 卢鹏, 等. 水情变化条件下梯级水电站实时负荷调整方法[J]. 水力发电学报, 2015, 34(9): 1-9.
- [2] 王嘉阳, 程春田, 廖胜利, 等. 复杂约束限制下的梯级水电站群实时优化调度方法及调整策略[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(17): 4326-4334.
- [3] 周研来, 郭生练, 陈进. 溪洛渡-向家坝-三峡梯级水库联合蓄水方案与多目标决策研究[J]. 水利学报, 2015, 46(10): 1135-1144.
- [4] 纪昌明, 李克飞, 张验科, 等. 基于机会约束的水库调度随机多目标决策模型[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(19): 36-40.
- [5] 冯平, 韩松, 李健. 水库调整汛限水位的风险效益综合分析[J]. 水利学报, 2006, 37(4): 451-456.
- [6] 朱嵩, 毛根海, 刘国华, 等. 改进的MCMC方法及其应用[J]. 水利学报, 2009, 40(8): 1019-1023.
- [7] 刁艳芳, 王本德, 刘冀. 基于最大熵原理方法的洪水预报误差分布研究[J]. 水利学报, 2007, 38(5): 591-595.
- [8] 邓聚龙. 灰色理论基础[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002.
- [9] LUO D, WANG X. The multi-attribute grey target decision method for attribute value within three-parameter interval grey number[J]. Applied Mathematical Modelling, 2012(36): 1957-1963.

- [10] ZHU J J, HIPEL K W . Multiple stages grey target decision making method with incomplete weight based on multi-granularity linguistic label[J] . Information Sciences, 2012(212): 15–32 .
- [11] FENG J Y, ZHANG H . Grey target model appraising firm's financial status based on Altman coefficients[J] . The Journal of Grey . System . , 2002(53): 274–276 .
- [12] 李红, 周波 . 基于改进后灰靶模型的四川省水资源紧缺度评价[J] . 四川大学学报: 工程科学版, 2012, 44(1): 43–49 .
- [13] 梁冰, 秦冰, 孙维吉, 等 . 智能加权灰靶决策模型在煤与瓦斯突出危险评价中的应用[J] . 煤炭学报, 2013, 38(9): 1611–1615 .
- [14] 郭三党, 刘思峰, 方志耕 . 基于类别加权算子的环形灰靶决策[J] . 控制与决策, 2016, 31(3): 493–497 .
- [15] 曾乐宏, 周晖, 张祥龙 . 基于区间数的多指标灰靶模型在智能变电站综合评价中的应用[J] . 水电能源科学, 2014, 32(12): 182–185 .
- [16] 宋捷, 党耀国, 王正新 . 基于强“奖优罚劣”算子的多指标灰靶决策模型[J] . 系统工程与电子技术, 2010, 32(6): 1229–1232 .
- [17] 王正新, 党耀国, 杨虎 . 改进的多目标灰靶决策方法[J] . 系统工程与电子技术, 2009, 31(11): 2634–2636 .
- [18] LU J C, ZHAO Z W . Improved TOPSIS based on rough set theory for selection of suppliers[C]//4th International Conference on Wireless Communications . Dalian . IEEE Press, 2008 .
- [19] 朱卫东, 杜承勇, 吴勇 . 一种基于相关系数矩阵的TOPSIS决策方法[J] . 数学的实践与认识, 2014, 44(4): 33–38 .
- [20] 高彩云, 崔希民 . 基于多因素加权灰靶决策模型的滑坡灾害危险性评价[J] . 中南大学学报: 自然科学版, 2016, 47(2): 524–530 .
- [21] 彭杨, 纪昌明, 刘方 . 梯级水库水沙联合优化调度多目标决策模型及应用[J] . 水利学报, 2013, 44(11): 1272–1277 .
- [22] 纪昌明, 李荣波, 田开华, 等 . 基于来水不确定性的梯级水电站负荷调整耦合模型——以锦官电源组梯级水电站为例[J] . 水利学报, 2017, 48(1): 1–12 .

Assessment index system and decision-making model for load adjustment schemes of cascade hydropower stations

JI Changming¹, LI Rongbo¹, LIU Dan², ZHANG Pu¹, ZHANG Yanke¹, ZHOU Ting³

(1. School of Renewable Energy, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;

3. Department of Water Resources Engineering, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China)

Abstract: The preference of cascade hydropower stations' load adjustment schemes directly impacts the benefits and risks of power generation sector. However, due to incompleteness of existing risk-benefit synergy assessment index system, it is unable to conduct a comprehensive and effective assessment on load adjustment schemes so far. This article aims to establish a systematic risk-benefit synergy assessment approach to improve the accuracy and effectiveness of load adjustment schemes assessment. In this article, authors proposed a comprehensive index system of risk-benefit synergy assessment based on the actual cascade hydropower stations operation process; defined generation risk rate, load fluctuation risk rate, and opportunity loss risk as new indexes then put forward their calculation formulas; besides, introduced the correlation coefficient matrix to replace the covariance matrix of Mahalanobis distance to address the deficiency of the traditional grey target decision-making model in terms of insensitivity of relative indexes; in addition, used the relative bull's-eye to calculate and sort the non-inferior sets. According to the case study of Jin-ping-guandi cascade hydropower stations of the Yalong River in which a comparison was performed between the traditional grey target model and the grey target model based on Mahalanobis distance, the methodology proposed by this article shows more reasonable results, which can be an important reference for future research on load adjustment of cascade hydropower stations.

Keywords: cascade hydropower stations; load adjustment schemes; risk-benefit synergy assessment; index system; an improved grey target decision-making model

(责任编辑: 王成丽)