

基于组合赋权 - 向量夹角余弦的绿色施工 节水措施综合效益评价

贾鼎元, 向茂, 赵运铎

(兰州交通大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 针对目前绿色施工节水措施效益评价的局限性, 提出基于组合赋权 - 向量夹角余弦模型的绿色施工节水措施综合效益的评价方法。首先, 鉴于绿色施工中节水措施宏观效益评价的不足, 选择从节水措施综合效益的角度出发, 即社会、经济、生态及技术效益 4 个方面, 建立健全节水措施综合效益评价指标体系。然后提出运用组合赋权 - 向量夹角余弦方法对节水措施综合效益进行评价, 该方法不仅能降低主客观因素对评价结果的影响, 还能根据样本加权特征值矩阵的分布偏差程度对节水措施作出直接地客观评价与决策, 大大提高了决策的效率。最后, 运用该方法对某文献实例中的 5 项节水措施综合效益进行评价, 并将评价结果与 TOPSIS - 熵权决策法的结果进行对比, 发现两者结果吻合性良好, 验证了其可靠性, 为指导决策者因地制宜地选择高效节水措施提供参考。

关键词: 节水措施; 综合效益; 组合赋权; 向量夹角余弦; 敏感性系数; 绿色施工

中图分类号: TV512; TV213.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2018)04-0182-06

Comprehensive benefit evaluation of green construction water saving measures based on combination weighting and vector inclusion cosine

JIA Dingyuan, XIANG Mao, ZHAO Yunduo

(Institute of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Aiming at solving the limitations of current green construction water saving measures, a comprehensive evaluation method for green construction water saving measures based on combined weight-vector angle cosine model is proposed. First, in view of the lack of macro-efficiency evaluation of water-saving measures in green construction, we chose to proceed from the perspective of the comprehensive benefits (i. e. social, economic, ecological, and technological benefits) of water-saving measures, and established a sound evaluation index system for comprehensive benefits of water-saving measures. Then, the comprehensive benefit of water-saving measures was evaluated using the combination weight-vector angle cosine method, which can not only reduce the influence of subjective and objective factors on the evaluation results, but also save water according to the distribution deviation degree of the sample weighted eigenvalue matrix. Measures to directly make objective evaluations and decisions have greatly improved the efficiency of decision-making. Finally, we evaluated the comprehensive benefits of five water-saving measures in a published literature, and the results of the evaluation were compared with that of the TOPSIS-entropy-weighted decision-making method, and we found that the two results are in good agreement with each other, This study proved the reliability of the new method and provided guidance for the decision-makers to choose efficient water-saving measures according to local conditions.

Key words: water saving measure; comprehensive benefits; combination weighting; vector inclusion cosine; sensitivity coefficient; green construction

1 研究背景

节水措施作为绿色施工的重要组成部分,对缓解当地水资源短缺、提高用水效率、促进社会经济发展起着相当重要的作用,因此,越来越受到建设部门的高度重视^[1]。然而,在复杂化和多变化的绿色施工环境中,如何实现快速准确地优选出与特定的施工环境条件相适应的高效节水措施,一直是备受关注的难题^[2]。

近年来,国内外学者就绿色施工节水措施的效益评价已经开展了不少研究与调研。尤其是随着国内建筑行业绿色施工的蓬勃发展,更是鼓励了国内一些学者围绕节水措施的节水效果、投入产出以及评价理论与方法进行了深入地研究。刘祝^[3](2008年)从建筑绿色施工原理及现场调研出发,提出选用最佳节水措施应综合考虑施工所在地自然条件、用水规划和既有节水措施供应等情况,同时还专门对中水回用、雨水利用等4项常用节水措施的适用特点进行了对比与分析。张裕洁^[4](2011年)从工程实践及经验出发,对施工过程中节水措施案例进行分析,具体包括用水管理、中水循环使用、雨水和再生水合理利用。通过分析之后,还定量地刻画出采用不同的节水措施给工程项目的经济效益所带来的贡献率差异。魏慧娇等^[5](2015年)在对已取得我国绿色认证的绿色建筑节水措施进行调研的基础上,总结出对于绿色建筑节水措施方案的设计,应充分考虑施工地区的降雨情况、技术的经济性及操作难易程度等问题,避免照本宣科地按照标准选择节水措施。李正焜等^[6](2017年)提出以层次分析法与模糊综合评分法理论为基础,分别对绿色建筑的几种常用节水措施建立节水规划的优化模型。以上这些研究都为决策者因地制宜地选择高效的节水措施提供了重要的参考。但不足的是它们只能分析节水措施对施工企业内部产出及节水效果的影响,不能就节水措施对全社会和整个国民经济的发展作出客观合理的评价,更无法反映出对生态环境的贡献程度。针对目前关于绿色施工中对各节水措施宏观效益评价的不足,提出了节水措施综合效益评价模型,该模型不仅会考虑节水措施给企业自身所带来的经济效益,而且还会重点关注它给社会、生态乃至整个国民经济发展所带来的效益。本文主要对当前已取得我国认证标识的绿色建筑中5种常用的绿色施工节水措施,即中水处理回用、雨水收集利用、节水型器具、绿化灌溉及节水管理进行研究。

由于节水措施综合效益评价是一项涉及多目标、多属性的复杂问题,所以在评价方法的选择上,提出基于组合赋权-向量夹角余弦模型的绿色施工节水措施综合效益的评价方法。该方法不仅能减少主客观因素对评价结果的影响,还能根据样本加权特征值矩阵的分布偏差程度对节水措施综合效益进行直接地评价与决策,大大地提高了决策的效率。同时,还与敏感性分析相结合,通过各节水措施的敏感性系数来反映该措施的最具有利影响因素。最后,以某文献中的大型建筑绿色施工项目为例,运用本文所提方法进行评价,并将评价结果与熵权-TOPSIS方法的评价结果进行对比,验证了该方法的可靠性,为施工企业在不同施工环境条件下择优选取高效的节水措施提供参考。

2 构建综合效益评价指标体系

针对绿色施工节水措施宏观效益评价的不足,本文从社会、经济、生态及技术效益4个方面出发,建立健全科学的节水措施综合效益评价指标体系,经过实地调研与参考有关文献[7-11],以及结合Delphi法对评价指标进行了严格的筛选,最终确定出社会效益、经济效益、生态效益以及技术效益4类因子作为准则层指标,相应地具体细分为19项评价因子作为方案层指标,如图1所示。这为全面反映绿色施工过程中实施节水措施给社会、经济、生态及技术带来的贡献率提供了科学依据,也有效地减少或避免了实施节水措施所产生的负效应,对促进建筑绿色施工的可持续发展具有重要意义。

3 建立组合赋权-向量夹角余弦模型

由图1可知,节水措施综合效益评价指标体系中大多数为定性指标,为了尽量弱化指标权重受主观因素的影响,故选用组合赋权法对指标权重进行优化,确定综合权值。然后,在此基础上提出向量夹角余弦法^[12-13],也称向量相似度法,利用样本加权标准化特征值矩阵对节水措施综合效益作出直接地评价,以确定出在特定施工环境下各既有节水措施综合效益与理想目标的接近程度,从而实现对节水措施综合效益的相对优劣评价与排序。

3.1 指标综合权值确定

针对节水措施综合效益评价的准则层指标,由于涉及指标数量不多,故采用主赋权法(G1法)与客观赋权法(熵权系数法)相结合,来确定指标综合权值。而方案层指标数量很多,采用主观赋权法可

能带来较大的偏差,故采用两种分析侧重点不同的客观赋权法进行集成,即熵权系数法(差异区分型)和变异系数法(主因素突出型)计算指标综合权值。

(1) G1法。该方法是一种先对评价因子进行

定性排序,然后再进行定量赋值(即在相邻指标间依次比较判断)的主观赋权方法,此过程无需构造判断矩阵及计算一致性检验,简便直观。由于文章篇幅有限,具体计算过程详见文献[14]。

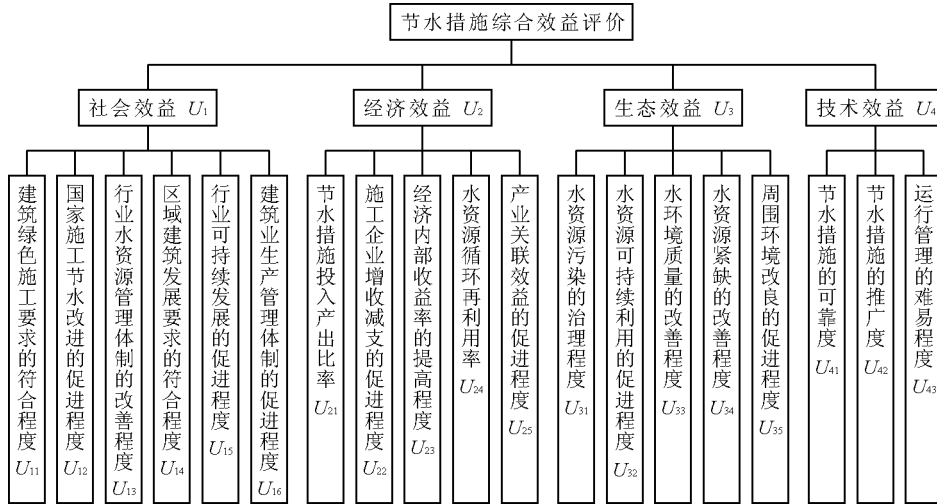


图1 节水措施综合效益评价指标体系

(2) 熵权系数法。熵^[11]作为不确定性的度量,反映了各个指标向决策者提供的有用信息量,即根据待评价方案各指标值之间的差异性来区分各指标的相对重要性,分配指标权重,计算过程如下:

①构建由 m 个待评价节水措施,即已取得我国绿色认证标识的 5 项常用节水措施, n 个评价指标,即评价指标体系准则层的 19 项指标构成特征值矩阵 $X = (x_{ij})$,其中 $i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$ 。

②对特征值 X 进行规一化处理,得到规一化矩阵 Y 。然后,再结合公式(1)计算第 j 个评价指标的熵值 e_j ;

$$\begin{cases} e_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n (p_{ij} \ln p_{ij}) \\ p_{ij} = \frac{1 + y_{ij}}{\sum_{i=1}^n (1 + y_{ij})} \end{cases} \quad (1)$$

③根据第 j 个评价指标的熵值,确定其熵权 w'_j :

$$w'_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^n (1 - e_j)} \quad (2)$$

(3) 变异系数法。变异系数法^[14]根据所有待评价对象特征值 X_{ij} 之间的差异,来反映各项评价指标对节水措施综合效益评价的影响程度。若指标的特征值差别较大,则说明该指标在综合效益评价中的作用越大;反之越小,从而确定出其指标权重。具体

计算过程如下:

①求第 j 项指标的均值 \bar{x}_j 和均方差 S_j :

$$\begin{cases} \bar{x}_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_{ij} \\ S_j = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (x_{ij} - \bar{x}_j)^2} \end{cases} \quad (3)$$

②计算变异系数 δ_j :

$$\delta_j = S_j / |\bar{x}_j| \quad (4)$$

③计算指标权重 w''_j :

$$w''_j = \delta_j / \sum_{j=1}^n \delta_j, \quad \sum_{j=1}^n w''_j = 1 \quad (5)$$

(4) 综合权值。综合权值的基本原理就是通过将两种单一赋权法所得到的指标权重进行集成,使之最终得到指标综合权值。

本文将采用乘法组合集成法计算第 j 指标的综合权值,结果记为 w_j ,则有:

$$w_j = \frac{w'_j w''_j}{\sum_{j=1}^n w'_j w''_j} \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

整理所有待评价节水措施经组合赋权后的指标属性标准化值,构建加权特征值矩阵,记为 U ,则有:

$$U = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & \dots & u_{1n} \\ u_{21} & u_{22} & \dots & u_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ u_{m1} & u_{m2} & \dots & u_{mn} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} w_1y_{11} & w_2y_{12} & \cdots & w_ny_{1n} \\ w_1y_{21} & w_2y_{22} & \cdots & w_ny_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_1y_{m1} & w_2y_{m2} & \cdots & w_ny_{mn} \end{bmatrix} \quad (7)$$

3.2 基于向量夹角余弦的评价模型

(1) 向量夹角余弦是用向量空间中两个向量夹角的余弦值作为衡量两个主体间差异大小的度量,可用于多属性决策分析中,它通过比较各方案与理想方案之间的夹角余弦的大小来判断各方案的优劣顺序。

假定待评价的指标体系为 $\{x_j | j = 1, 2, \dots, n\}$, 方案 i 的指标值标准化向量为 $U_i = (u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{in})$, $i = 1, 2, \dots, m$, 理想方案的指标向量为 $U_0 = (u_{01}, u_{02}, \dots, u_{0n})$, 则方案 i 与理想方案的夹角余弦 ρ_i 为:

$$\rho_i = \cos \langle U_i, U_0 \rangle = \frac{\sum_{j=1}^n (u_{ij}u_{0j})}{\sqrt{\sum_{j=1}^n u_{ij}^2} \sqrt{\sum_{j=1}^n u_{0j}^2}} \quad (8)$$

式中: ρ_i 越大, 方案越优, 当 $\rho_i = 1$, 表明该方案为最佳方案。

向量夹角余弦方法能够直接根据各待评价对象加权标准化特征值与理想目标之间的相似度, 快速地为多目标决策提供准确的判断。

(2) 单因素敏感性分析。针对节水措施综合效益的复杂问题, 可通过降维来定量化研究各节水措施对影响指标的有利程度, 为此将向量夹角余弦方法与单因素敏感性分析法相结合, 来判断最具有利的影响指标。

单因素敏感性分析^[15] 是在其他因素保持不变的情况下, 研究决策目标对各个指标因素的影响度, 利用敏感性系数来衡量, 结合向量夹角余弦方法, 得出基于向量夹角余弦的敏感性系数 α , 公式为:

$$\alpha = \frac{\rho_{i-v_j} - \rho_i}{\rho_i} \quad (9)$$

$(j = 1, 2, \dots, n; i = 1, 2, \dots, m)$

式中: i 为节水措施序号; V_j 为第 j 个评价指标; ρ_{i-v_j} 为去掉 V_j 后的向量夹角余弦值。其中 α 为正值表示节水措施对影响指标有利, 负值则相反。

评价过程具体步骤:

① 构建初始特征值矩阵。根据施工所在地自然条件、当地的降雨情况、技术经济性以及操作的难易程度等问题, 构建已有的各节水措施综合效益指标的初始特征值矩阵, 即 $X = \{x_{ij} | i = 1, 2, \dots, m; j =$

$1, 2, \dots, n\}$, x_{ij} 表示第 i 个节水措施的第 j 个评价指标值。

② 指标值标准化处理。将所构建的初始特征值矩阵按公式(10)中的成本型指标(越小越好)和效益型指标(越大越好)分别进行标准化处理, 得到新特征值矩阵为 $Y = \{y_{ij} | i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n\}$ 。

$$y_{ij} = \begin{cases} \frac{x_{ij} - x_j^{\min}}{x_j^{\max} - x_j^{\min}} & (\text{效益型指标}) \\ \frac{x_j^{\max} - x_{ij}}{x_j^{\max} - x_j^{\min}} & (\text{成本型指标}) \end{cases} \quad (10)$$

③ 确定指标综合权值。为提高决策的科学性, 就需要对各指标的重要性分别赋权, 本文采用组合赋权法对评价指标体系中的准则层、方案层指标进行赋权, 确定各级指标的综合权值。

④ 建立加权标准化特征值矩阵。根据上述步骤②~③的计算结果, 运用模糊综合乘法算子原理^[16] 将标准化特征值矩阵进行加权处理, 得到加权标准化特征值矩阵 U :

$$U = (u_{ij})_{m \times n} = (y_{ij})_{m \times n} \cdot w_j^T \quad (11)$$

⑤ 求取理想目标。为运用向量夹角余弦理论, 首先需要确定理想目标, 理想目标即是加权标准化特征值矩阵中各指标均为最优解, 即取值均为 1。

⑥ 计算各节水措施与理想目标的向量夹角余弦值, 按 ρ_i 越大越优原则, 对节水措施进行优劣排序。

⑦ 分析节水措施各评价指标因素的敏感性系数, 判断节水措施最具有利的影响指标。

4 组合赋权-向量夹角余弦模型的实例应用

本文以文献[11]中某大型建筑绿色施工项目中既有的 5 项常用的绿色施工节水措施作为研究对象, 运用本文所提方法进行分析。首先, 为简化分析过程, 分别用节水措施 A、B、C、D、E 表示此绿色建筑中 5 项常用的绿色施工节水措施, 即中水处理回用、雨水收集利用、节水型器具、绿化灌溉及节水管理; 然后, 再结合文献[11]中的所有受邀专家对此 5 项节水措施在该大型建筑绿色施工项目过程的综合效益的评价得分, 确定每项节水措施所对应的准则层、方案层评价指标得分的平均值。最后, 根据公式(10)依次对准则层、方案层评价指标的平均值进行标准化处理, 结果分别如表 1、2 所示。

(1) 指标综合权值确定。对于表 1 中的准则层

指标,首先根据 G1 法确定主观权重,即根据所统计与整理的受邀专家对准则层 4 个指标的相对重要性评价,将其按影响程度从小到大进行排序,则有: $I_3 > I_2 > I_1 > I_4$,即 $I_1^* > I_2^* > I_3^* > I_4^*$,且近似给出 $r_2 = 1.1, r_3 = 1.2, r_4 = 1.1$,而 $r_2 r_3 r_4 = 1.452, r_3 r_4 = 1.320, r_4 = 1.100$ 。

表 1 准则层指标的标准化值

指标	节水措施				
	A	B	C	D	E
U_1	0.145	0.241	0.169	0.157	0.289
U_2	0.138	0.241	0.190	0.276	0.155
U_3	0.269	0.168	0.235	0.134	0.193
U_4	0.194	0.273	0.165	0.231	0.137

表 2 方案层指标的标准化值

指标	节水措施				
	A	B	C	D	E
U_{11}	0.203	0.128	0.173	0.241	0.256
U_{12}	0.223	0.154	0.185	0.292	0.146
U_{13}	0.225	0.248	0.220	0.124	0.183
U_{14}	0.197	0.181	0.268	0.134	0.220
U_{15}	0.158	0.132	0.263	0.211	0.237
U_{16}	0.164	0.206	0.132	0.233	0.265
U_{21}	0.193	0.128	0.231	0.192	0.256
U_{22}	0.281	0.148	0.180	0.250	0.141
U_{23}	0.199	0.130	0.262	0.194	0.215
U_{24}	0.234	0.124	0.248	0.168	0.226
U_{25}	0.222	0.180	0.254	0.127	0.217
U_{31}	0.196	0.246	0.123	0.203	0.232
U_{32}	0.121	0.243	0.193	0.214	0.229
U_{33}	0.208	0.238	0.244	0.122	0.188
U_{34}	0.190	0.135	0.175	0.230	0.270
U_{35}	0.226	0.139	0.212	0.277	0.146
U_{41}	0.213	0.244	0.160	0.128	0.255
U_{42}	0.191	0.228	0.132	0.184	0.265
U_{43}	0.201	0.186	0.129	0.227	0.258

因此: $r_2 r_3 r_4 + r_3 r_4 + r_4 = 3.872$ 。

由此可得: $I_4^* = (1 + 3.872)^{-1} = 0.205$ 。

进而依次得出: $I_3^* = r_4 I_4^* = 0.226, I_2^* = r_3 I_3^* = 0.271,$

$I_1^* = r_2 I_2^* = 0.298$ 。

综上,准则层评价指标的主观权重为:

$I_1 = I_3^* = 0.226, I_2 = I_2^* = 0.271,$

$I_3 = I_1^* = 0.298, I_4 = I_4^* = 0.205$ 。

再根据公式(1)~(2)及表1,确定准则层指标 U_j 的熵权。

最后,采用乘法组合集成法对准则层指标 U_j 进行集成,确定出其综合权值,结果见表3。

表 3 准则层指标的综合权值

指标	G1 法	熵权法	综合权重
U_1	0.226	0.293	0.266
U_2	0.271	0.26	0.283
U_3	0.298	0.223	0.267
U_4	0.205	0.224	0.184

同理,根据公式(1)~(5)及表2,分别计算方案层各指标的熵权和对应的变异系数法权重,进而确定综合权值分别为:

$W_1 = (0.142, 0.191, 0.154, 0.117, 0.079, 0.317)$

$W_2 = (0.199, 0.206, 0.299, 0.158, 0.137)$

$W_3 = (0.158, 0.255, 0.239, 0.110, 0.238)$

$W_4 = (0.154, 0.646, 0.200)$

(2) 确定理想目标指标向量 U_0 。在运用向量夹角余弦理论之前,确定理想目标向量,即各指标取值均为1,则有:

$$U_0^T = (1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)$$

(3) 构建加权标准化特征值矩阵 U^T 。将准则层的指标综合权值和方案层的指标综合权值进行集成,计算方案层指标的加权综合权值,再结合表2中方案层各指标的标准化值,得到加权标准化特征值矩阵 U^T 。

$$U^T = \begin{pmatrix} 0.008 & 0.011 & 0.009 & 0.006 & 0.003 & 0.014 & 0.011 & 0.016 & 0.017 & 0.011 & 0.009 & 0.008 & 0.008 & 0.013 & 0.006 & 0.014 & 0.006 & 0.023 & 0.007 \\ 0.005 & 0.008 & 0.010 & 0.006 & 0.003 & 0.017 & 0.007 & 0.009 & 0.011 & 0.006 & 0.007 & 0.010 & 0.017 & 0.015 & 0.004 & 0.009 & 0.007 & 0.027 & 0.007 \\ 0.007 & 0.009 & 0.009 & 0.008 & 0.006 & 0.011 & 0.013 & 0.010 & 0.022 & 0.011 & 0.010 & 0.005 & 0.013 & 0.016 & 0.005 & 0.014 & 0.004 & 0.016 & 0.005 \\ 0.009 & 0.015 & 0.005 & 0.004 & 0.004 & 0.020 & 0.011 & 0.015 & 0.016 & 0.008 & 0.015 & 0.009 & 0.015 & 0.008 & 0.007 & 0.018 & 0.004 & 0.002 & 0.008 \\ 0.010 & 0.007 & 0.008 & 0.007 & 0.005 & 0.022 & 0.014 & 0.008 & 0.018 & 0.010 & 0.008 & 0.010 & 0.016 & 0.012 & 0.008 & 0.009 & 0.007 & 0.032 & 0.010 \end{pmatrix}$$

(4) 计算向量夹角余弦值。根据公式(8) 计算各节水措施综合效益与理想目标之间的向量夹角余弦值:

$$\rho_A = \cos\langle U_A, U_0 \rangle = 0.9156, \rho_B = \cos\langle U_B, U_0 \rangle = 0.8619, \rho_C = \cos\langle U_C, U_0 \rangle = 0.8716, \rho_D = \cos\langle U_D, U_0 \rangle = 0.8865, \rho_E = \cos\langle U_E, U_0 \rangle = 0.8793$$

根据上述结果得知: $\rho_A > \rho_D > \rho_E > \rho_C > \rho_B$,按 ρ_i 越大与理想目标的相似度越高的原则,最终确定这 5 项节水措施综合效益的相对优劣排序依次为节水措施 $A > D > E > C > B$ 。为了验证本文所提方法的评价结果的可靠性,故选择与文献[11] 中结果进行对比,见表 4。

表 4 两种方法的评价结果对比

节水措施	本文方法		文献[11]方法	
	向量夹角余弦值	排序	综合优越度	排序
A	0.9156	1	0.5712	1
B	0.8619	5	0.4098	5
C	0.8716	4	0.4529	4
D	0.8865	2	0.5282	3
E	0.8793	3	0.5615	2

根据表 4 可知,两种方法的评价结果吻合性良好,即节水措施 A(中水回用技术)、节水措施 D(绿化灌溉)、节水措施 E(节水管理)的综合效益排序前 3 位,应优先考虑选择作为该大型项目实际施工过程中的节水措施,也正好与当前施工现场实际节水措施选用情况相吻合;而节水措施 B(雨水回收利用)综合效益最差,故最不宜选用,这主要是由于受甘肃地区干旱少雨、水资源短缺的环境条件所限制。

(5) 与文献[11]方法相比较,本文方法还可进一步寻找各节水措施综合效益评价中最具有利的指标因素,判断不同节水措施各自最突出的优势,现以节水措施 A 为例,根据公式(9) 计算评价指标因素的敏感性系数,结果如表 5 所示。

为了便于对节水措施 A 综合效益结果中的最有利影响因素进行对比与分析,现将反映节水措施 A 的 19 项综合效益评价指标的敏感性系数绘制成如图 2 所示的柱状图。从图 2 可看出,节水措施 A 综合效益评价中最具有利的排序前 3 位的指标影响因素依次为 U_{33}, U_{12}, U_{16} ,说明节水措施 A 对水环境质量的改善程度、国家绿色施工节水措施的改进程度以及建筑业生产管理体制的促进程度具有较为突出的贡献。

表 5 节水措施 A 的评价指标敏感性系数

检验指标 U_j	ρ_{A-U_j}	敏感性系数	检验指标 U_j	ρ_{A-U_j}	敏感性系数
U_{11}	0.8910	-0.0269	U_{25}	0.8894	-0.0286
U_{12}	0.8867	-0.0316	U_{31}	0.8901	-0.0279
U_{13}	0.8886	-0.0295	U_{32}	0.8901	-0.0279
U_{14}	0.8944	-0.0232	U_{33}	0.8865	-0.0318
U_{15}	0.9025	-0.0143	U_{34}	0.8956	-0.0218
U_{16}	0.8867	-0.0316	U_{35}	0.8871	-0.0311
U_{21}	0.887	-0.0312	U_{41}	0.8947	-0.0228
U_{22}	0.8893	-0.0287	U_{42}	0.9103	-0.0058
U_{23}	0.8904	-0.0275	U_{43}	0.8915	-0.0263
U_{24}	0.8873	-0.0309			

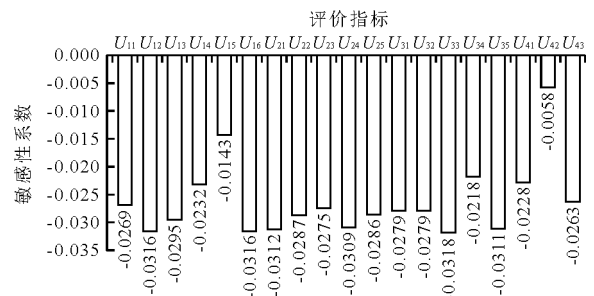


图 2 节水措施 A 综合效益评价指标敏感性系数分布

5 结 论

为因地制宜地择优选取高效节水措施,本文提出了组合赋权-向量夹角余弦的节水措施综合效益的评价方法,以此得到以下结论:

(1) 针对绿色施工节水措施宏观效益评价的不足,本文从社会、经济、生态及技术效益 4 个方面出发,重新健全节水措施综合效益评价指标体系。

(2) 绿色施工节水措施综合效益评价是一个涉及多因素的复杂问题,且大多数因素为定性指标。通过集成 G1 法、熵权决策法以及变异系数法各自的优点,建立组合赋权方法,以尽量弱化指标权重受主客观因素的影响,提高评价结果的准确性。

(3) 将向量夹角余弦理论运用到节水措施综合效益评价中,不仅能够直接根据样本的加权标准化特征值矩阵分布偏差程度,客观地判断各节水措施综合效益的优劣,而且还能与敏感性分析相结合,通过各节水措施的敏感性系数来分析该措施最具有利的影响因素,为决策者能快速地优选与特定施工条件相适应的高效节水措施提供参考。 (下转第 195 页)

参考文献:

- [1] 马震岳,董毓新. 水轮发电机组动力学[M]. 大连:大连理工大学出版社,2003:51-107.
- [2] 唐培甲. 岩滩水电站水轮机振动问题的研究[J]. 红水河,2000,19(3):59-62.
- [3] 尚银磊,李得玉,欧阳金惠,等. 大型水电站厂房振动问题研究综述[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2016,14(1):48-52.
- [4] 罗永要,王正伟,梁权伟. 混流式水轮机转轮动载荷作用下的应力特性[J]. 清华大学学报(自然科学版),2005,45(2):235-237+257.
- [5] 王正伟,喻疆,方源,等. 大型水轮发电机组转子动力学特性分析[J]. 水力发电学报,2005,24(4):62-66.
- [6] 蔡敢为,张永辉,马存志,等. 混流式水轮发电机组主轴系统振动特性分析[J]. 计算机辅助工程,2008,17(3):1-3+17.
- [7] YANG Jing, ZHANG Li Da, LU Lei. Research on francis turbine hydraulic vibration by CFD[J]. Advanced Materials Research, 2014,860-863:1565-1568.
- [8] 刘树红,邵奇,杨建明,等. 三峡水轮机的非定常湍流计算及整机压力脉动分析[J]. 水力发电学报,2004,23(5):97-101.
- [9] 刘小兵,曾永忠,黄虎. 基于大涡模型水轮机压力脉动的数值预测[J]. 西华大学学报(自然科学版),2005,24(1):1-6.
- [10] 王福军. CFD在水力机械湍流分析与性能预测中的应用[J]. 中国农业大学学报,2005,10(4):75-80.
- [11] 桂中华,唐澍,潘罗平. 混流式水轮机尾水管非定常流动模拟及不规则压力脉动预测[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2006,4(1):68-73.
- [12] MARUZEWSKI P, HAYASHI H, MUNCH C, et al. Turbulence modeling for Francis turbine water passages simulation[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2010,12(1):72-79.
- [13] KHARE R, PRASAD V. CFD approach for flow characteristics of hydraulic francis turbine[J]. International Journal of Engineering Science and Technology, 2010,2(8):3824-3831.
- [14] 尤建锋,程永光,付亮,等. 原型混流式水轮机压力脉动特性CFD模拟分析[J]. 武汉大学学报(工学版),2016,49(4):509-515+520.
- [15] 钱忠东,陆杰,郭志伟,等. 水泵水轮机在水轮机工况下压力脉动特性[J]. 排灌机械工程学报,2016,34(8):672-678.
- [16] 杨晓明. 水电站机组振动及其与厂房的耦联振动研究[D]. 大连:大连理工大学,2006.
- [17] 宋志强. 水电站机组及厂房结构耦合振动特性研究[D]. 大连:大连理工大学,2009.
- [18] 冯辅周,褚福磊,张正松,等. 大型抽水蓄能机组轴系的动特性研究[J]. 振动. 测试与诊断,1999,19(4):3-9+68.

(上接第187页)

(4)通过将组合赋权-向量夹角余弦的评价结果与TOPSIS-熵权决策法的结果作对比,验证了本文所提评价方法的科学性和可靠性。

参考文献:

- [1] 张希黔,林琳,王军. 绿色建筑与绿色施工现状及展望[J]. 施工技术,2011,40(339):1-7.
- [2] 叶琳芳. 广东地区ZF工程扬尘控制与节水绿色施工技术应用及效益分析[D]. 广州:华南理工大学,2016.
- [3] 刘祝. 绿色建筑节水措施的评价及应用优化研究[D]. 重庆:重庆大学,2008.
- [4] 张裕洁. 浅谈节水措施在绿色施工中的应用[J]. 建筑施工,2011,33(7):604-606.
- [5] 魏慧娇,李丛笑. 我国绿色建筑节水技术措施调研分析[J]. 建筑,2015(11):28-30.
- [6] 李正焜,叶飞,梁巧真. 基于价值工程的绿色施工节水措施研究[J]. 福建建设科技,2017(1):70-72.
- [7] LIU Haixing, LU Jing, MING Zhao, et al. Multi-objective optimisation design of water distribution systems: comparison of two evolutionary algorithms[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016,23(3):30-38.
- [8] HUBERMAN N, PEARLMUTTER D. A life-cycle energy analysis of building materials in the Negev desert[J]. Energy & Buildings, 2008,40(5):837-848.
- [9] 闫潇. 绿色建筑及绿色施工评价体系的研究与实践[D]. 邯郸:河北工程大学,2012.
- [10] 王善龙. 绿色施工节水节电指标及控制措施研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2016.
- [11] 柴乃杰,鲍学英,张天奇,等. TOPSIS-熵权决策法在绿色施工节水措施综合效益评价中的应用[J]. 水资源与水工程学报,2017,28(5):156-161.
- [12] 申海,解建仓,李建勋,等. 基于向量夹角余弦的水文组合预报方法[J]. 系统工程理论与实践,2012,32(7):1591-1597.
- [13] 赵金先,王苗苗,李堃. 基于C-OWA算子与向量夹角余弦的绿色施工项目评标模型[J]. 土木工程与管理学报,2017,34(5):39-45.
- [14] 祝志川. 基于变异系数-G1法的混合交叉赋权方法[J]. 统计与决策,2017(12):78-81.
- [15] 李天娥,孙晓颖,陆正争,等. 平流层软式飞艇的多参数敏感性分析[J]. 哈尔滨工业大学学报,2015,47(10):13-19.
- [16] 王翠红. 基于熵权模糊综合评价法的建设项目后评价研究[D]. 邯郸:河北工程大学,2013.