

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2015.02.007

基于正态分布区间数的综合能源系统效益评价研究

张璐, 张斌

(武汉大学 经济与管理学院, 武汉 430072)

摘要: 综合能源系统构成复杂, 且系统内部指标数据种类繁多, 使得在对其进行综合效益评价的时候, 由于指标信息的不完善, 可能导致最终的评价结果出现误差, 带来巨大的经济损失。根据综合能源系统的特点, 提出采用基于正态分布区间数的多属性决策方法来解决效益评价信息不完全的问题, 并利用期望-方差准则对方案进行排序并择优。最后, 通过案例计算验证该方法在综合能源系统效益评价研究中的适用性和有效性。

关键词: 综合能源系统; 不确定性指标; 综合评价; 正态分布区间数

中图分类号: TK01 + 1

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2015)02-0041-05

Evaluation of the Integrated Energy System Effectiveness Based on the Normal Distribution Interval Number Method

ZHANG Lu, ZHANG Bin

(College of Economic and Management, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Integrated energy system is a complex system, and index data of internal system are also complicated, which can make index information incomplete. So when evaluating the comprehensive benefits, due to the incomplete index information, the final evaluation results will appear errors, which bring huge economic losses. Based on the characteristics of integrated energy systems, we used the multiple-attribute decision-making method based on the normal distribution interval number to solve the problem of benefit evaluation of incomplete information, and sorted the plans by expectation variance criterion. Finally, we verify the applicability and effectiveness of the method in the evaluation of integrated energy system by calculating a case.

Key words: integrated energy systems; uncertainty evaluation index; comprehensive evaluation; normal distribution interval number

21 世纪以来, 我国经济以每年近 10% 的速度增长, 但同时也付出了巨大的资源环境代价, 经济发展与资源环境的矛盾日益突出。在经济高速发展的背后, 仍未完全摆脱高投入、高污染、低效率的传统工业化增长模式。与此同时, 国际社会对于环境污染问题也越来越关注, 并在相关的环境保护会议上纷纷订下各国的减排目标, 提升经济增长的质量。可以预见, 在未来 50 年内我国将会完成工业化和城市化, 能源需求总量和碳排放量增长的趋势将不可避免, 能源供应体系和可持续发展将会面临前所未有的挑战。缓解这一矛盾的关键所在就是改

变能源供应方式、提高能源使用效率、优化能源传输系统。在这种背景下, 综合能源系统被一些知名学者提出。

综合能源系统不同于传统的能源系统, 它是将新能源分布式发电、储能装置以及智能控制系统结合在一起, 为用户侧提供冷热电三联供服务, 并与外部大电网相链接, 实现电能利用的稳定性, 是符合环境保护的独立供电系统。一般常用于面积不大, 但能源非常丰富的区域, 例如广州大学城, 该系统能够使得能源利用率达到 70% 以上。但是由于综合能源系统内指标众多, 所以在评价效益的时候, 会有很多指标难以量化, 这时候一般采用“好”、“一般”、“差”, 对指标进行对比时, 往往采用“非常关键”、“比较关键”、“关键”、“一般”、“不关键”等语言形式。有些指标虽然可以进行量化, 但是量化后只能得到一个精确值, 这时候可以

收稿日期: 2014-12-01

作者简介: 张璐(1989), 女, 山东青岛人, 硕士研究生, 研究方向: 项目管理(e-mail) zhangluhappiness@163.com。

采用区间赋值的形式,比如用户满意率达到90%~95%。而这些不确定性指标往往关系到最终的综合能源系统的评价,所以不确定性指标的评价就显得尤为重要。

针对综合能源系统不确定性指标的特点,本文采用一种基于正态分布区间数的评价方法来解决不确定指标评价问题。目前,关于区间数评价方面的研究和运用都很多,本文对2009年之后关于利用区间数进行评价的文章进行研究分析发现,有关区间数评价的文章主要包括以下几种情况。一是权属信息完全未知的情况,即评价指标的信息很少,这种情况在多属性决策中最难以处理的一种,国内学者对此有较多的研究,比较有代表性的是李为相和张广明(2010),他们通过引入一种新的区间数距离测度,扩展了可直接处理特征空间为区间数的PROMETHEE II多属性决策方法,并在分析属性加权向量 ω 与最终综合优先序值之间关系的同时,提出了一种基于区间数的PROMETHEE II方法的属性权重 ω 确定原理^[1];徐改丽和吕跃进(2011)两人也针对这种情况做了一定的研究,提出了一种基于正态分布区间数的决策方法,并根据离差最大化原理给出了确定属性权重的一种新方法,并给出了一种区间数的多属性决策方法^[2]。二是权属信息不完全的情况,即评价指标信息不完全,只知道其中的一部分,在所调查的文献中,这个部分的研究很多,比较有代表性是王正新和汪新凡(2009)等人,王正新等人基于区间数的距离和灰熵分析,将灰色局势决策拓展到决策信息为区间数,给出了灰色局势决策目标权重的优化方法^[3],而汪新凡(2010)等则针对属性值为正态分布区间数而属性权重信息不完全的多属性群决策问题,定义了一些新的集成算子,进而提出一种基于正态分布区间数的信息不完全的多属性群决策方法,并论证了正态分布区间数方法的可行性和适用性^[4]。三是利用区间数评价的具体应用研究,这也是目前文献研究所涉及最多的方面,比如在水电、仓库管理等方面应用颇多。国内学者关于这方面的文献很多,大概占所分析文献的67%左右,比如有祝慧娜(2009)等人利用区间数表示水环境中污染物浓度的不确定性,构建了基于区间数的河流水环境健康风险评价模型^[5];郭子雪和齐美然(2010)等研究了基于区间数的应急物资储备库最小费用选址问题,给出了区间数的概念和

运算,构建了参数为区间数的应急物资储备库最小费用选址模型^[6];曾鸣和马凌云(2013)等针对目前我国智能电网发展现状,从发电环节、电网环节、用电环节和其他经济效益四方面对智能电网经济效益进行了识别,并进一步构建了其评价指标体系^[7]。

由于综合能源系统涉及到的指标非常繁杂,既有确定性指标,也有不确定性指标,而不确定性指标又能分为区间数性指标、不确定性语言变量指标等,从而使得综合能源系统的综合效益评价显得极为复杂。多属性评价(决策)方法对评价描述比较精确,研究方法发展时间长久,具有完备的理论体系,针对各种指标的不同,具有不同的研究方法,如模糊层次分析法^[8],基于区间数的评价方法等^[9]。目前,确定性指标的评价方法体系已经趋于成熟,所以本文只针对不确定性指标中的区间数指标进行研究分析,这是因为区间数指标在综合能源系统的综合效益评价中所占的比例在不确定性指标中是最大的。比如财务评价中的净现值以及供电可靠性等,这些指标都属于区间数型指标。本文根据综合能源系统区间数指标的特点,决定采用基于正态分布区间数的评价方法来解决不确定性指标的评价问题。

采用正态分布区间数的评价方法,具有评价准确,并且能够使得不确定型指标数据的规范更加符合综合能源系统的评价的优点。与此同时,还能够解决指标权重难以确定的难题。虽然基于区间数的不确定性指标评价应用很广,但是此评价在综合能源系统方面的应用目前还没有发现,所以本文还将证明此方法在该领域的适用性。

1 基于区间数的综合能源系统效益评价模型

1.1 综合能源系统效益评价的指标类型介绍

1) 确定性指标

确定性指标是指那些能够精确进行量化的指标,比如投资回收期、贷款偿还期等。

2) 不确定性指标

本文主要涉及不确定性指标,不确定性指标是指在指标测量时所得的指标值为不确定性数据的指标。不确定性数据包括:区间数、不确定性语言变量、模糊集、三角模糊数、粗糙集等。本文主要是

采用区间数进行效益评价,所以下面将具体介绍区间数。

设 R 为实数域,称闭区间 $[a^-, a^+]$ 为区间数,记作 A ,其中, $a^-, a^+ \in R, a^- \leq a^+$ 全体区间数的集合记为 I 。假设某个基于区间数的多属性群决策问题中,有 m 可行方案为 A_1, A_2, \dots, A_m , n 项指标(属性) G_1, G_2, \dots, G_n ,则基于区间数的多属性决策问题的判断矩阵可写为如式(1)所示。

$$A_m \begin{bmatrix} G_1 & G_2 & \dots & G_n \\ [a_{11}^-, a_{11}^+] & [a_{12}^-, a_{12}^+] & \dots & [a_{1n}^-, a_{1n}^+] \\ [a_{21}^-, a_{21}^+] & [a_{22}^-, a_{22}^+] & \dots & [a_{2n}^-, a_{2n}^+] \\ \vdots & \dots & \dots & \dots \\ [a_{m1}^-, a_{m1}^+] & [a_{m2}^-, a_{m2}^+] & \dots & [a_{mn}^-, a_{mn}^+] \end{bmatrix} \quad (1)$$

1.2 指标的规范方法

在进行综合能源系统效益评价的时候,最大的问题是各个指标之间量度的不统一性。不同的指标有各自的量纲和数量级,这种指标之间的差异会对最终的评价结果产生影响,所以首先要做的就是对数据进行规范化(标准化)处理。

在多属性群决策问题中,由于各个属性之间存在不可公度性和矛盾性,各属性的量纲和数量级是不相同的,为了消除这种差异对决策结果的影响,在求解多属性群决策问题时,需要对数据进行规范化(标准化)处理。

指标数据的规范化没有统一的方法,各种方法各有各的优缺点,目前常用的方法有向量规范化、极差变化法以及最大值变化法等^[10]。指标数据的规范化一方面可以解决量纲不统一的问题,另一方面可以避免指标之间数值相差悬殊的问题^[10]。本文在满足这两方面要求的前提下,将尽量选择较为简单的计算方法对指标进行相应的规范化。除了考虑本文涉及到的是不确定性指标,数据规范化方法应尽可能选择简单的计算方式为主,下面主要介绍以效益型和成本型为规范化方法的混合型指标的处理方法^[11]。

设第 i 方案的综合能源系统综合效益第 j 指标的区间数为 (a_{ij}^l, a_{ij}^h) , 设 a_{ij}^l 为第 i 区域第 j 指标区间数的下限值, a_{ij}^h 为第 i 区域第 j 指标区间数的上限值($i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n$), I_1, I_2 分别表示正向型和负向型的属性下标集。可用公式(1)和(2)对区间数作规范化处理,得到规范化矩阵为 \tilde{R}

$$= (\tilde{r}_{ij})_{m \times n}, \text{ 其中 } \tilde{r}_{ij} = [r_{ij}^l, r_{ij}^h].$$

1) 正向型指标规范化公式

$$\begin{aligned} r_{ij}^l &= (1/a_{ij}^l) / \sqrt{\sum_{j=1}^n (1/a_{ij}^h)^2} \\ r_{ij}^h &= (1/a_{ij}^h) / \sqrt{\sum_{j=1}^n (1/a_{ij}^l)^2} \\ i &\in I_1, j = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (2)$$

2) 负向型指标规范化公式

$$\begin{aligned} r_{ij}^l &= (1/a_{ij}^h) / \sqrt{\sum_{j=1}^n (1/a_{ij}^l)^2} \\ r_{ij}^h &= (1/a_{ij}^l) / \sqrt{\sum_{j=1}^n (1/a_{ij}^h)^2} \\ i &\in I_2, j = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (3)$$

1.3 模型方法介绍

基于以上分析,建立基于正态分布区间数的权重信息不完全的综合效益评价模型,可以解决目前综合评价中的问题。

1) 步骤1: 将区间数属性矩阵转化为正态分布区间数属性矩阵

由中心极限定理可知,各指标得到的属性值 r_{ij} 具有稳定性,属性值趋于某一点即最可能的属性值,由于 r_{ij} 是模糊随机变量,故认为 r_{ij} 服从以区间中点 μ_{ij} 为均值的正态分布 $N(\mu_{ij}, \sigma_{ij}^2)$ 是符合实际的。其中均值 $\mu_{ij} = (r_{ij}^l + r_{ij}^h) / 2$, 并由正态分布的 3σ 原则 $P(r_{ij} \in [r_{ij}^l, r_{ij}^h]) = 0.9974$, 可得方差 $\sigma = (r_{ij}^l - r_{ij}^h) / 6$ 。从而我们可以得到正态分布区间数属性矩阵 $R = (\beta_{ij})_{m \times n}$, 其中 $\beta_{ij} = \{\mu_{ij}, \sigma_{ij}\}$ 。

2) 步骤2: 最优属性权重确定

因为属性值是正态分布区间数,故求出的合理的属性权重 $w = (w_1, w_2, \dots, w_n)^T$, 应使得所有属性值的方差总和最小化,即极小化。

$$\begin{aligned} \min \sum_{i=1}^m (\sigma_i)^2 &= \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (\omega_j)^2 (\sigma_{ij})^2 \\ \text{s. t. } \sum_{j=1}^n \omega_j &= 1, \omega_j \geq 0, j = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (4)$$

构造 Lagrange 函数求解该模型:

$$L(\omega, \theta) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (\omega_j)^2 (\sigma_{ij})^2 - 2\theta \left(\sum_{j=1}^n \omega_j - 1 \right) \quad (5)$$

根据极值存在的必要条件,有

$$s_j = \sum_{i=1}^m (\sigma_{ij})^2 \frac{\partial L(\omega, \theta)}{\partial \omega_j} = 2\omega_j \sum_{i=1}^m (\sigma_{ij})^2 - 2\theta = 0$$

$$\frac{\partial L(\omega, \theta)}{\partial \theta} = -2 \left(\sum_{j=1}^n \omega_j - 1 \right) = 0 \quad (6)$$

令 $S_j = \sum_{i=1}^m (\sigma_{ij})^2, j=1, 2 \dots n$, 则两式联立,

可求得模型的唯一最优解。

$$\omega = \left[1 / \left(s_1 \sum_{j=1}^n \frac{1}{s_j} \right), 1 / \left(s_2 \sum_{j=1}^n \frac{1}{s_j} \right), \dots, 1 / \left(s_n \sum_{j=1}^n \frac{1}{s_j} \right) \right]^T \quad (7)$$

3) 步骤3: 根据最优属性权重处理属性矩阵

对属性矩阵 $R = (\beta_{ij})_{m \times n}$ 中第 i 行的属性值进行加权, 得到第 i 评价对象综合属性值 $\beta_i = \{\mu_i, \sigma_i\}$, 其中:

$$\mu_i = \sum_{j=1}^n \omega_j \mu_{ij}, \sigma_i = \sqrt{\sum_{j=1}^n \omega_j^2 (\sigma_{ij})^2} \quad i = 1, 2, \dots, m. \quad (8)$$

4) 步骤4: 根据步骤3 计算的结果进行方案的比选

用如下的期望一方差准则来定义正态分布区间数的一种比较与排序方法。设 $\beta_1 = \{\mu_1, \sigma_1\}$ 和 $\beta_2 = \{\mu_2, \sigma_2\}$ 是任意的2个正态分布区间数, 则:

- (1) 若 $\mu_1 < \mu_2$, 则 $\beta_1 < \beta_2$ 。
- (2) 若 $\mu_1 = \mu_2$, 则①若 $\sigma_1 = \sigma_2$, 则 $\beta_1 = \beta_2$;
- ②若 $\sigma_1 < \sigma_2$, 则 $\beta_1 > \beta_2$; ③若 $\sigma_1 > \sigma_2$, 则 $\beta_1 < \beta_2$ 。

根据上述步骤可对综合能源系统的综合效益进行评价。

2 实例应用

某电网公司想要对一个项目进行评价, 总共有四个方案 S_1, S_2, S_3, S_4 可供选择。每个方案含四个属性指标 Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 , 其中 Q_1, Q_2, Q_3 分别为供电可靠性指标(供电系统对用户持续提供充足电力的能力, 用来考核电力系统供电的稳定性)、线损率指标(电力网络中损耗的电能与向电力网络供应电能的百分数, 线损率用来考核电力系统运行的经济性)以及净现值指标(投资方案所产生的现金净流量以资金成本为贴现率折现之后与原始投资额现值的差额), 这三者为效益型指标; Q_4 代表贷款偿还期(以项目投产后可用于还款的资金, 偿还国内贷款本金和建设期利息所用的时间), 为成本型指标。将收集到数据整理归纳后, 见表1。

表1 带有区间数的决策矩阵 R

Table 1 Decision Matrix R with Interval Numbers

方案 S_i	指标 Q_1	指标 Q_2	指标 Q_3	指标 Q_4
S_1	[1.8, 2.2]	[1.2, 1.8]	[1.8, 2.2]	[5.4, 5.6]
S_2	[2.3, 2.7]	[2.4, 3.0]	[1.6, 2.0]	[6.4, 6.6]
S_3	[1.6, 2.0]	[1.7, 2.3]	[1.9, 2.3]	[4.4, 4.6]
S_4	[2.0, 2.4]	[1.5, 2.1]	[1.8, 2.2]	[4.9, 5.1]

根据公式(1)和(2)对表1 中的数据进行规范化处理, 数据见表2。

表2 规范化后的决策矩阵 \bar{R}

Table 2 Decision Matrix \bar{R} with Normalization

方案 S_i	指标 Q_1	指标 Q_2	指标 Q_3	指标 Q_4
S_1	[0.19, 0.29]	[0.13, 0.26]	[0.21, 0.31]	[0.23, 0.25]
S_2	[0.25, 0.35]	[0.26, 0.44]	[0.18, 0.28]	[0.19, 0.21]
S_3	[0.17, 0.26]	[0.18, 0.34]	[0.28, 0.32]	[0.28, 0.31]
S_4	[0.22, 0.31]	[0.16, 0.31]	[0.21, 0.31]	[0.25, 0.27]

根据步骤2)将决策矩阵 \bar{R} 中的数据进行处理, 将区间数属性矩阵转化为正态分布区间数属性矩阵, 见表3。

表3 区间型正态分布矩阵 \bar{R}

Table 3 Interval Normal Matrix \bar{R}

方案 S_i	指标 Q_1	指标 Q_2	指标 Q_3	指标 Q_4
S_1	[0.24, 0.02]	[0.20, 0.02]	[0.26, 0.02]	[0.24, 0.00]
S_2	[0.30, 0.02]	[0.35, 0.03]	[0.23, 0.02]	[0.20, 0.01]
S_3	[0.22, 0.02]	[0.26, 0.03]	[0.30, 0.01]	[0.29, 0.00]
S_4	[0.26, 0.02]	[0.24, 0.02]	[0.26, 0.02]	[0.26, 0.00]

根据公式(6)计算指标权重, 见表4。

表4 最优指标权重 w

Table 4 Optimized Index Weights w

方案 S_i	S_1	S_2	S_3	S_4
权重 w	0.146	0.053	0.165	0.633

根据公式(7)计算评价对象综合属性值, 见表5。

表5 评价对象综合属性值 b

Table 5 Comprehensive Property Values b of Evaluation Object

方案 S_i	S_1	S_2	S_3	S_4
综合属性 b_i	{0.241, 0.004}	{0.230, 0.010}	{0.237, 0.004}	{0.261, 0.004}

根据步(4)中方案排序原则, 得到 $b_2 < b_3 < b_1$

$< b_4$ 。所以在选择方案的时候应该倾向于选择方案4进行施工。

3 结论

目前,中国政府正在致力于减少碳排放,提高经济发展质量,此时发展绿色新能源,构建综合能源系统就显得尤为重要。综合能源系统成功与否的关键就是系统的效益评价,由于综合能源系统的效益评价涉及到的指标众多,确定性指标数据的评价工作简单,理论体系较为完善,不确定性指标的评价则是最难的。本文根据综合能源系统不确定性指标的特点,提出采用基于正态分布区间数的评价方法来解决不确定性指标评价难的问题。使用该方法进行不确定性指标评价,具有其独特的优势。首先,可以避免指标之间量纲不统一的难题;其次,可以在指标信息不完全的情况下使得评价结果更为合理;再次,计算过程较其他不确定指标评价方法简单;最后,可以在很大程度上消除专家评分法带来的主观性。文章最后用案例计算验证此方法在综合能源系统中不确定性指标效益评价方面的可用性,最终证明,此方法完全可以适用于综合能源的效益评价,并能够得到良好的效果。

但是此方法还存在不足之处。首先,此方法计算过程比较繁琐,在涉及到大数据的时候容易出现计算失误,从而导致最终的评价结果不够理想;此外,该方法特别依赖于指标区间数的上限和下限的范围,不同的取值可能会造成最后结果的不一致。

总体来说,利用基于正态分布区间的区间数评价方法对综合能源系统不确定性指标进行评价,能够取得较好的结论,符合实际情况,是一种在信息不完全的情况下较好的不确定性指标的评价方法。

参考文献:

[1] 李为相,张广明,李帮义. 基于区间数的 PROMETH EE II 方法中权重确定 [J]. 中国管理科学, 2010, 18(3): 101-105.
LI Weixiang, ZHANG Guangming, LI Bangyi. PROMETH EE II Method of Interval Number is Determined Based on the Weight [J]. Chinese Journal of Management Science, 2010, 18(3): 101-105.

[2] 徐改丽,吕跃进. 基于正态分布区间数的多属性决策方法 [J]. 系统工程, 2011, 29(9): 120-123.
XU Gaili, LÜ Yuejin. Multiple Attribute Decision Making

Based on Normal Interval Numbers [J]. System Engineering, 2011, 29(9): 120-123.

- [3] 王正新,党耀国,宋传平. 基于区间数的多目标灰色局势决策模型 [J]. 控制与决策, 2009, 24(3): 388-392.
WANG Zhengxin, DANG Yaoguo, SONG Chuanping. Gray Situation Decision Model Based on the Normal Distribution Interval Number Method [J]. Control and Decision, 2009, 24(3): 388-392.
- [4] 汪新凡,肖满生. 基于正态分布区间数的信息不完全的群决策方法 [J]. 控制与决策, 2010, 25(10): 1494-1506.
WANG Xinfan, XIAO Mansheng. Range Incomplete Information Group Decision Making Based on the Normal Distribution Interval Number Method [J]. Control and Decision, 2010, 25(10): 1494-1506.
- [5] 祝慧娜,袁兴中,曾光明,等. 基于区间数的河流水环境健康风险模糊综合评价模型 [J]. 环境科学学报, 2009, 29(7): 1527-1533.
ZHU Huina, YUAN Xingzhong, ZENG Guangming, et al. Fuzzy Comprehensive Evaluation Model Based on Interval Number of River Water Environmental Health Risks [J]. ACTA Science Circumstantiae, 2009, 29(7): 1527-1533.
- [6] 郭子雪,齐美然,张强. 基于区间数的应急物资储备库最小费用选址模型 [J]. 运筹与管理, 2010, 19(1): 15-20.
GUO Zixue, QI Meiran, ZHANG Qiang. Intervals of Emergency Material Storage Location Model Based on the Minimum Cost [J]. Operations Research and Management Science, 2010, 19(1): 15-20.
- [7] 曾鸣,马凌云,马明娟,等. 基于区间数的智能电网经济效益评价研究 [J]. 华东电力, 2013, 41(2): 249-253.
ZENG Ming, MA Lingyun, MA Mingjuan, et al. Smart Grid Economic Evaluation Based on Interval Number [J]. East China Electric Power, 2013, 41(2): 249-253.
- [8] Wang M J J. Fuzzy Set Evaluation of Inspection Performance [J]. International Journal of Man-Machine Studies, 1991, 35(4): 587-596.
- [9] 徐玖平,吴巍. 多属性决策的理论与方法 [M]. 北京:清华大学出版社, 2006.
XU Jiuping, WU Wei. Theory and Methods of Multiple Attribute Decision Making [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006: 12-41.
- [10] 陈珽. 决策分析 [M]. 北京:科学出版社, 1987.
CHEN Ting. Decision Analysis [M]. Beijing: Science Press, 1987.
- [11] LI D F, HUANG Z G, CHEN G H. A Systematic Approach to Heterogeneous Multiattribute Group Decision Making [J]. Computers & Industrial Engineering, 2010, 59(4): 561-572.