

# 考虑动态赋权的江水源热泵供能系统模糊综合评价方法研究

郭松<sup>1,2</sup>, 冯澎湃<sup>1,2</sup>, 胡文博<sup>1,2\*</sup>, 徐辰冠<sup>1,2</sup>, 肖晶<sup>3</sup>, 徐荆州<sup>3</sup>

(1. 南瑞集团有限公司/国网电力科学研究院有限公司, 江苏省 南京市 210000;

2. 国网电力科学研究院武汉能效测评公司, 湖北省 武汉市 430074;

3. 国网江苏省电力有限公司南京供电分公司, 江苏省 南京市 210019)

## Fuzzy Comprehensive Evaluation Method of River Source Heat Pump Energy Supply System Considering Dynamic Weighting

GUO Song<sup>1,2</sup>, FENG Pengpai<sup>1,2</sup>, HU Wenbo<sup>1,2\*</sup>, XU Chenguan<sup>1,2</sup>, XIAO Jing<sup>3</sup>, XU Jingzhou<sup>3</sup>

(1. NARI Group Corporation/State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 210000, Jiangsu Province, China;

2. State Grid Electric Power Research Institute Wuhan Efficiency Evaluation Company Limited, Wuhan 430074, Hubei Province, China;

3. Nanjing Power Supply Company in Jiangsu Provincial Electric Power Company, Nanjing 210019, Jiangsu Province, China)

**Abstract:** In this study, we focus at the problems of the single evaluation index system of the current river water source heat pump energy supply system, the dynamic changes in weighting and the inability to quantify qualitative indicators, the working principle, and operating characteristics of the river water source heat pump energy supply system from three aspects: technology, economy, and environmental protection. In this study, a comprehensive technical and economic evaluation index system for river water source heat pumps was constructed. The fuzzy evaluation method is used to quantify the qualitative indicators, and the combination weight of the evaluation index system is obtained using the AHP entropy weighting method. Considering the dynamic changes in the weights of the river water source heat pump energy supply system in different scenarios, we herein propose a dynamic weight correction method to realize the dynamic weighting of evaluation indicators. The application of our proposed evaluation method for a river water source heat pump energy supply system in the Yangtze River region verifies the effectiveness and practicability of this evaluation approach.

**Keywords:** river source heat pump energy supply system; fuzzy comprehensive evaluation; dynamic weighting; analytic

hierarchy process; entropy weight method; evaluation system

**摘要:** 针对当前江水源热泵供能系统评价指标体系单一、赋权忽略动态变化及定性指标无法量化等问题, 通过分析江水源热泵供能系统的工作原理及运行特点, 从技术、经济及环保三个方面构建了江水源热泵技术经济综合评价指标体系。文中采用模糊评价方法量化定性指标, 并通过层次分析法-熵值赋权法获得评价指标体系组合权重。考虑到江水源热泵供能系统在不同场景运行下的权值动态变化, 提出基于动态赋权的权值动态修正方法, 实现评价指标的动态赋权。针对长江沿岸地区某江水源热泵供能系统进行评价方法的应用, 验证了该评价方法与实际情况相符。

**关键词:** 江水源热泵供能系统; 模糊综合评价; 动态赋权; 层次分析法; 熵权法; 评价体系

## 0 引言

随着能源消耗的日益加剧, 发展可再生能源已成为促进碳中和发展理念的重要趋势<sup>[1]</sup>。江水源作为一种可再生低位热源, 其供能系统具有高效节能、绿色环保、运维可靠等优点<sup>[2]</sup>。相较于风能、太阳能等清洁能源, 江水源受季节、日照等影响更小, 在区域供能系统中有着广阔的应用前景<sup>[3-4]</sup>。江水流量、管网布置、水泵效率以及财务净现值等因素极大影响着江水源热泵供能系统的适用性与经济性。因此, 建立江水

基金项目: 国家电网有限公司科技项目(5400-202018204A-0-0-00); 国家重点研发计划(2018YFB1700500)。

Science and Technology Foundation of SGCC (5400-202018204A-0-0-00); National Key Research and Development Program of China (2018YFB1700500)。

源供能系统评价体系对指导实际工程的选型与规划具有重要意义<sup>[5]</sup>。

目前,对江水源热泵系统的评价主要从技术、经济两方面展开。文献[6]在对综合能源系统效益评价的过程中,采用基于优势度的综合评价方法消除指标间的关联度,并用实例验证。文献[7]采用熵权法,依据数据本身信息量确定指标客观权重,再通过咨询专家得到重要性指标权重。文献[8]从经济效益评价和环境效益两个方面进行评价,以实际案例得出地源热泵系统相较于传统系统具有更好节能环保效益和经济效益。

然而,现有评价方法仅从单一角度或某两个方面考察供能系统性能,缺乏综合视角对江水源热泵进行评价,忽略了关键数据的影响<sup>[9]</sup>。现有评价方法往往为指标分配固定权重,而在江水源热泵供能系统的运行过程中,需求侧负荷在不同时段呈现动态性、规律性的特点,设备需要投切转换以响应用户需求,系统载荷量与可再生能源利用量也随时间发生变化<sup>[10]</sup>。因此,固定权重的评价方法难以适应其评价要求,结果不准确且与客观实际不符,指标权重应随系统运行的实时场景而动态改变以提供更高的准确性。此外,在评价中,定性指标无法进行准确的量化比较,导致评价指标不够全面,评价结果不够准确客观。

本文针对上述问题,在分析江水源热泵供能系统工况特点的基础上,提出一种考虑动态赋权的江水源热泵供能系统模糊综合评价方法。文章从技术、经济及环保三个方面构建江水源热泵评价指标体系,采用模糊评价对定性指标进行处理,利用信息熵值判断各指标间差异程度,确定各指标客观权值,再结合专家评价由层次分析法确定主观权重,同时考虑系统不同场景运行下的动态权值变化,形成较为完善的江水源热泵供能系统评价方法。

## 1 综合评价模型理论基础

### 1.1 江水源热泵供能系统

本文研究对象为江水源热泵供能系统,该系统中水源热泵承担夏季的空调冷负荷、冬季热负荷和全年的生活热水负荷。当供能系统工作在供冷模式时,高温高压的气体从压缩机排出,进入冷凝器后向冷却水(江水)释放热量,形成高温高压液体。导热介质膨胀成为低温低压液体吸收制冷用水的热量,使制冷用水温度降低,达到制冷目的。当供能系统工作在供热模式时,高温高压气体从压缩机排出,进入冷凝器后

向热水释放热量,形成高温高压液体,使热水温度升高,达到制热目的。导热介质膨胀成为低温低压液体吸收热源水(江水)的热量。

为了提高江水源热泵供能系统的经济性和环保性,在系统中接入可再生能源和储能器件,由可再生能源对江水源热泵系统进行供能,如图1所示。

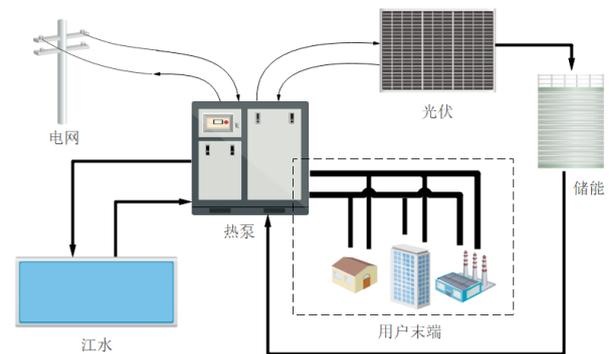


图1 江水源热泵供能系统工作示意图

Fig. 1 Working principle of river water source heat pump energy system

### 1.2 基于层次分析法-熵权法的指标权重确定方法

层次分析法(AHP)是一种将评价对象的属性指标进行分层,依靠专家知识和经验进而建立评判矩阵来确定各评价指标权重的主观赋权方法<sup>[11]</sup>。熵权法是一种根据数据本身的信息量确定指标权重的客观赋权方法<sup>[12]</sup>,具有精度高、客观性强的特点。但熵权法受极值影响较大,且不能反映主观意见,适合与多种评价方法结合使用。文中利用AHP法和熵权法的各自优劣,兼顾差异性及客观性,从主观意见与客观信息两个角度构建江水源热泵供能系统技术经济评价指标值确定方法。

### 1.3 动态赋权评价模型

在实际运行中,不同的运行方案会导致负荷需求、能源转化设备投切以及包括江水源热泵在内的清洁能源分布与消纳表现出一定的随机性和动态变化特性<sup>[13]</sup>。例如,下午时段光照条件充足、发电效率高,大量可再生能源接入系统,此时系统的环保指标贡献更为突出。而在夜晚时段,用户负荷大,系统需投切接入大量设备以响应用户需求,接近满负荷运行,此时系统的经济指标更为重要。

针对这个特点,考虑含有动态赋权的一级指标权值确定方法,结合实际场景及系统运行特性,动态调

整一次指标权重,以充分评判经济、技术及环保三个方面指标的内涵价值,使所提出的综合评价方法能够适用于不同时间段的复杂运行工况。

## 1.4 模糊综合评价模型

模糊综合评价是一种以模糊集合为基础的综合评价方法<sup>[14]</sup>。评价指标种类多样、属性复杂且影响因素兼具定性与定量的复杂特性,现有评价方法难以给出精准的评定等级结果。模糊综合评价法可以将指标的定性评价转化成为定量评价以解决上述问题。在评价中,对评价指标隶属度值进行评价,考虑指标特性,选取梯形分布函数作为模糊评价的隶属度函数。将定性问题定量化评价,评价结果更加准确直观且符合客观事实<sup>[15]</sup>。

## 2 江水源热泵系统技术经济评价指标体系

根据江水源热泵供能系统具体情况,从技术、经济及环保三个方面构建江水源热泵供能系统技术经济综合评价指标体系。该体系建立为4个层次:目标层(A)、一级指标(B)、二级指标(C)、三级指标(D)。其中,技术方面有3类二级指标:资源条件( $C_1$ )、工艺技术水平( $C_2$ )、效率指标( $C_3$ );经济方面有4类二级指标:建设投资( $C_4$ )、盈利能力( $C_5$ )、偿债能力( $C_6$ )、不确定性分析( $C_7$ );环保方面有减排能力( $C_8$ )、环境影响( $C_9$ )。这9类二级指标又分为24个三级指标。

### 2.1 指标体系的建立

#### 2.1.1 技术指标体系的建立

从江水源热泵系统的水源条件、工艺水平和效率进行技术指标的选取。根据系统换热原理,资源条件选择江水流速( $D_1$ )、江水水温( $D_2$ )、江水水质( $D_3$ );工艺技术水平选择给排水系统( $D_4$ )、供电系统( $D_5$ )、能源管理自控系统( $D_6$ )、能源输送管网布置( $D_7$ );效率指标选取水泵效率( $D_8$ )和可再生能源利用率( $D_9$ )。最后由以上三方面的指标建立技术指标体系。

#### 2.1.2 经济指标体系的建立

从建设投资、盈利能力、偿债能力以及不确定性4个方面对供能系统进行经济评价。建设投资包括建设工程费( $D_{10}$ )、设备购置费( $D_{11}$ )、设备安装费( $D_{12}$ )和工程建设其他费用( $D_{13}$ )。盈利能力包括

投资财务内部收益率( $D_{14}$ )、财务净现值( $D_{15}$ )、投资回收期( $D_{16}$ )等指标<sup>[3]</sup>。偿债能力以资产负债率( $D_{17}$ )和借款偿还期( $D_{18}$ )进行分析与衡量。不确定性分析用盈亏平衡( $D_{19}$ )和敏感性( $D_{20}$ )进行评定。因此,选择上述4方面的指标建立经济指标体系。

#### 2.1.3 环保指标体系的建立

江水源热泵供能系统环保指标主要从减排能力和环境影响两个方面进行考虑。减排能力通常指 $CO_2$ 年排放量( $D_{21}$ )、 $NO_x$ 年排放量( $D_{22}$ );环境影响选取江水温度变化( $D_{23}$ )和噪声进行分析( $D_{24}$ ),选择上述两方面指标建立环保指标体系。

实现江水源热泵供能系统的综合评价,由经济、技术、环保组成一级指标,江水源热泵供能系统技术经济评价综合指标体系构建如图2所示。

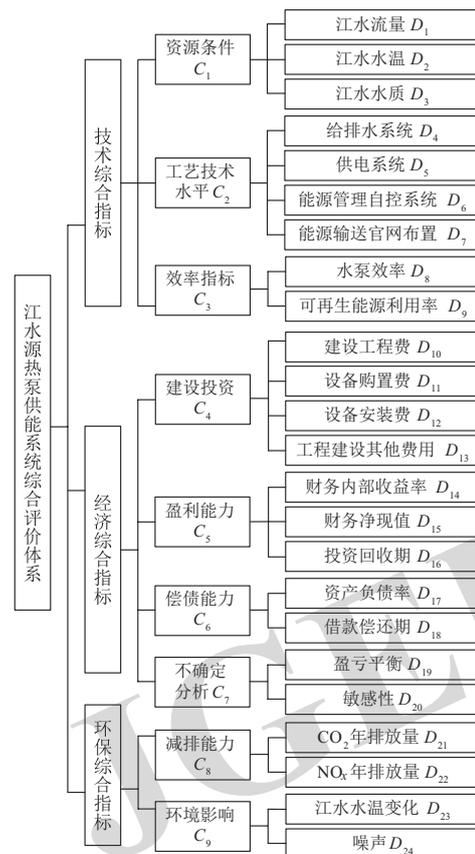


图2 江水源热泵供能系统技术经济评价综合指标体系

Fig. 2 Technical and economic evaluation system of river source heat pump energy supply system

## 2.2 指标定义

### 2.2.1 资源条件指标

江水资源条件指标属于实际指标,一般通过实际

场景或实验室试验等方式获得相应的状态值。江水资源的水温、水量、水质等自然条件品质影响江水源热泵技术的适用与应用性能, 其中, 江水源热泵供能系统机组适用温度为4.5~35℃, 水质要求满足含砂量低、酸碱度适中、硬度低等要求。

### 2.2.2 工艺技术水平指标

工艺技术水平指标反应了江水源热泵系统的基础设施条件和运营管理水平。工艺技术水平指标属于定性的经验指标, 无法或者很难通过实测和计算的方法获得准确取值, 通常采用由相关领域专家根据经验进行评分的方式进行量化处理。对工艺技术水平指标的评分采用百分制, 评分结果分为优(>90分)、良(70~90分)和差(<70分)三个等级。

### 2.2.3 效率指标

水泵效率( $D_8$ )是评价系统中水泵性能优劣的主要技术指标, 反映了水泵对能量的损耗程度。水泵效率越高, 说明损失的能量越小。水泵效率的计算公式为

$$D_8 = \frac{P_u}{P_a} \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $P_u$ 为水泵输出功率, 单位为kW;  $P_a$ 为水泵轴功率, 单位为kW。

目前能源消耗量巨大, 提高可再生能源利用率十分重要。江水源热泵供能系统的可再生能源利用率( $D_9$ )是指系统所消纳清洁能源总量与系统所消耗能源总量的比值, 其计算公式为

$$D_9 = \frac{Q_R}{Q_S} \quad (2)$$

### 2.2.4 建设投资指标

建设投资指标中, 建设工程费主要用于能源站、取水泵站土建工程以及市政和管网工程建设; 设备购置费用于能源站和取水泵站设备以及供配电等公用工程; 设备安装费按照设备价格的35%进行测算。建设投资指标属测算指标, 部分指标取值需根据项目的实际资源条件和依据所采取的方案通过数学模型或根据相关规范测算以获取。

### 2.2.5 盈利能力指标

财务内部收益率( $D_{14}$ )指使方案在整个计算期内各期净现金流量累计之和为0时的折现率, 表达式为

$$\sum_{t=0}^n (A_{CI} - A_{CO})_t (1 + I_{RR})^{-t} = 0 \quad (3)$$

式中:  $A_{CI}$ 为现金流入量;  $A_{CO}$ 为现金流出量;  $n$ 为计算活动期, 即建设周期和服务寿命;  $I_{RR}$ 为资金流入现值总额与资金流出现值总额相等且净现值等于零时的折

现率。

财务净现值( $D_{15}$ )指江水源热泵供能系统按基准收益将各年的净现金流量折现到起点的现值代数和, 其表达式为

$$D_{15} = \sum_{t=0}^n (A_{CI} - A_{CO})_t (1 + i_c)^{-t} \quad (4)$$

式中:  $i_c$ 为基准收益率, 本文中取 $i_c=8\%$ 。

投资回收期( $D_{16}$ )指从系统项目投建之日起, 用项目所得的净收益偿还原始投资所需要的年限。设 $P_t$ 为静态投资回收期, 计算公式为

$$\sum_{t=0}^{P_t} (A_{CI} - A_{CO})_t = 0 \quad (5)$$

设 $P'_t$ 为动态投资回收期, 计算公式为

$$\sum_{t=0}^{P'_t} (A_{CI} - A_{CO})_t (1 + i_c)^{-t} = 0 \quad (6)$$

式中:  $(A_{CI} - A_{CO})_t$ 为第 $t$ 年净现金流量, 当 $t=0$ 时,  $A_{CI}=0$ ,  $A_{CO}$ 即为多出的投资; 当 $t=1, 2, 3, \dots$ 时,  $A_{CI}$ 为第 $t$ 年节省的运行费及维修费,  $A_{CO}=0$ 。

### 2.2.6 偿债能力指标

偿债能力指标属测算指标, 以江水源热泵供能系统项目从计算期第4年起的固定资产年折旧、摊销和评价期第10年起的未分配利润偿还金融机构融资额, 并以最大还款能力进行测算。

### 2.2.7 不确定性分析指标

不确定性分析指标是对系统生产和经营过程中各种无法控制的外部因素影响进行合理评估, 以降低不确定性因素对经济效益的影响。其中, 盈亏平衡指标( $D_{19}$ )考虑投资、成本、项目周期等不确定因素, 通过分析盈亏平衡点得出项目成本与收益之间的平衡关系。同时, 对系统在建设期和生产期存在的主要不确定因素进行敏感性分析可知, 接入面积、使用费收费标准和经营成本对江水源热泵供能系统全部投资财务内部收益率影响较大, 电费对经营成本影响较大。

### 2.2.8 减排能力指标

江水源热泵供能系统需要高品位电能的输入,  $CO_2$ 的排放主要来源于燃煤、燃气发电等。当主要考虑燃煤排放和天然气排放时,  $CO_2$ 年排放量 $D_{21}$ 可表示为

$$D_{21} = Q_{gas} \gamma_{gas\_e} + E_{pur} \gamma_{pur\_e} \quad (7)$$

式中:  $Q_{gas}$ 为年消耗天然气热量(GJ);  $E_{pur}$ 为年购买电量(MWh);  $\gamma_{gas\_e}$ 为排放二氧化碳量与对应消耗天然气量之比;  $\gamma_{pur\_e}$ 为消耗单位天然气排放的二氧化碳量所占比重。

NO<sub>x</sub>排放主要来自于燃煤发电、天然气的使用、燃料电池与燃气设备的使用等。江水源热泵供能系统中各设备的NO<sub>x</sub>排放量如表1所示。

表1 不同设备的NO<sub>x</sub>排放量  
Table 1 NO<sub>x</sub> emissions of the equipment

设备	燃煤 电厂	燃料 电池	微燃机	燃气 锅炉	小型 燃气轮机
NO <sub>x</sub> 排放量 (kg·(MWh) <sup>-1</sup> )	2.680 0	0.005 0	0.200 0	0.255 6	0.320 0

### 2.2.9 环境影响指标

江水源热泵供能系统在运行过程中,可能会对区域江水造成热污染,造成水生生物酶系统失活、生态系统代谢机能紊乱,对生态多样性造成破坏。由此,有必要将江水温度变化纳入评价指标体系中。江水源热泵取排水在一定区域内的温度变化 $D_{23}$ 可表示为

$$D_{23} = \frac{|t_{\text{river\_pump}} - t_{\text{river\_normal}}|}{t_{\text{river\_normal}}} \quad (8)$$

式中:  $t_{\text{river\_pump}}$ 表示热泵运行时的区域水温;  $t_{\text{river\_normal}}$ 表示无热泵运行时正常的区域水温。

## 3 江水源热泵供能系统模糊动态综合评价方法

### 3.1 指标预处理

江水源热泵供能系统评价指标可分为定性指标和定量指标。对于定量指标,根据相应的隶属度函数确定指标评定值;对于定性指标,根据各指标的等级以及评语集对指标打分,以量化定性指标。同时,评价指标又可分为正类属性指标与负类属性指标,正类属性指标的属性值越大代表系统性能越优;负类属性指标的属性值越小则系统性能越优。正类与负类属性指标的分级隶属函数见表2。

表2 综合评价指标隶属函数  
Table 2 Membership function of the comprehensive evaluation index

正类属性指标	负类属性指标
$A(x) = \begin{cases} 0 & x \leq u_2 \\ \frac{x-u_2}{u_3-u_2} & u_2 < x < u_3 \\ 1 & x \geq u_3 \end{cases}$	$A(x) = \begin{cases} 1 & x \leq u_1 \\ \frac{u_2-x}{u_2-u_1} & u_1 < x < u_2 \\ 0 & x \geq u_2 \end{cases}$

此外,由于各指标量纲不同、数值差距较大,需

对其进行标准化处理。设江水源热泵供能系统运行方案数为 $m$ ,则方案集 $P$ 可表示为 $P=\{P_1, P_2, P_3, \dots, P_m\}$ 。设系统综合评价方法的指标数为 $n$ ,则方案集 $I$ 可表示为 $I=\{I_1, I_2, I_3, \dots, I_n\}$ 。设方案 $P_i$ 中的指标 $I_j$ 为 $a_{ij}$ ( $i=1,2,\dots, m, j=1,2,\dots, n$ ),产生一个 $m \times n$ 的评价指标矩阵 $A=[a_{ij}]$

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \dots & a_{2n} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & \dots & a_{3n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & a_{m2} & a_{m3} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix} \quad (9)$$

为保证各属性对系统性能评价的一致性,分别对正类与负类属性指标进行规范化处理,消除量纲影响。

正类属性指标规范化:

$$r_{ij} = \frac{a_{ij} - \min(a_{ij}^+)}{\max(a_{ij}^+) - \min(a_{ij}^+)}, \quad i, j = 1, \dots, m, a_{ij}^+ \geq 0 \quad (10)$$

负类属性指标规范化:

$$r_{ij} = \frac{\max(a_{ij}^-) - a_{ij}^-}{\max(a_{ij}^-) - \min(a_{ij}^-)}, \quad i, j = 1, \dots, m, a_{ij}^- \geq 0 \quad (11)$$

式中:  $a_{ij}$ 为第 $i$ 个方案的第 $j$ 个指标标准化之前的值;  $r_{ij}$ 为第 $i$ 个方案的第 $j$ 个指标同趋标准化之后的值;  $i=1,2,\dots, m; j=1,2,\dots, n$ 。评价指标矩阵 $A$ 经同趋标准化后可化为标准评价指标矩阵 $R$

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{m1} & r_{m2} & \dots & r_{mn} \end{bmatrix} \quad (12)$$

经标准化处理后的指标 $r_{ij}$ 均转化为正类属性指标,有利于指标间的比较。

### 3.2 评价体系权重设定

#### 3.2.1 AHP确定主观权重

1) 根据专家意见对各影响因素进行两两评判,得出两者的相对重要性 $d_{ij}$ ,建立相对重要性判断矩阵,逐层递进进行赋权。

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \dots & d_{1n} \\ d_{21} & d_{22} & \dots & d_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ d_{n1} & d_{n2} & \dots & d_{nn} \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中:  $d_{ij}$ 表示 $B_i$ 和 $B_j$ 的相对重要性。

2) 确定各因素权重。计算判断矩阵的最大特征

值  $\lambda_{\max}$  和对应的特征向量  $\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)$

$$\omega_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n d_{ij}}, i=1, 2, \dots, n \quad (14)$$

进行归一化处理, 即可得到相同层次各因素相对于上一层次中某一因素的权重。

### 3.2.2 熵权法确定客观权重

1) 对4个评价对象的24个评价指标分别用信息熵方法建立评价模型, 得到  $m$  个评价指标、 $n$  个样本的评价系统。

2) 计算第  $i$  个指标的熵值

$$e_i = -k \sum_{j=1}^n P_{ij} \ln P_{ij} \quad (15)$$

式中:  $k=1/\ln n$  为与样本数有关的常数;  $P_{ij}=r_{ij}/\sum r_{ij}$ , 表示计算第  $i$  个指标下第  $j$  个样本指标值所占的比重。

3) 计算第  $i$  个指标的差异系数

$$d_i = 1 - e_i \quad (16)$$

差异系数直接影响指标权重及信息效用值。

4) 计算第  $i$  个指标的熵权

$$U_i = \frac{d_i}{\sum_{i=1}^m (d_i)} \quad (i=1, 2, \dots, m) \quad (17)$$

现有方法往往采用单一赋权的方式, 本文考虑评价体系中各因素的差异性, 结合AHP法和熵权法, 从主观与客观两个角度进行组合赋权确定指标权重。将由AHP法得到的主观权重  $\omega_i$  与熵权法获取的客观权重  $U_i$  进行耦合, 得到组合权重  $\lambda_i$

$$\lambda_i = \frac{\omega_i U_i}{\sum_{j=1}^m \omega_j U_j} \quad (18)$$

现有固定赋权评价方法难以适应江水源热泵供能系统在不同运行场景下呈现的随机性和动态变化特性。本文提出的含有动态赋权的一级指标权重确定方法, 结合具体运行场景对权重进行动态修正, 实现各指标的动态赋权, 赋权更贴合实际工况。

## 3.3 一级指标动态赋权方法

### 3.3.1 经济指标动态赋权函数

江水源热泵供能系统运行在不同时间所带动的负荷量有所差异。在夜晚黄金时段, 用能需求较高, 已接入设备无法满足负荷需求, 需要进行投切转换以接入更多设备。当系统越接近于满负荷运行时, 其清洁能源消纳越高, 经济性越好, 经济指标对总体评价结果的贡献越大。因此, 构造经济指标动态赋权函

数  $\beta_1$  为

$$\beta_1 = \frac{P_L(t)}{P_{L\_max}} \quad (19)$$

式中:  $P_L(t)$  为某时刻系统负荷总量;  $P_{L\_max}$  为系统总负荷的最大值。

### 3.3.2 技术指标动态赋权函数

江水源热泵供能系统中的技术指标用于衡量能源的利用率与节能情况。在运行过程中, 需求侧用能负荷会随着时间动态改变, 供给侧则需要对设备进行动态投切转换以响应用户需求。为实现供给侧与需求侧的互动相应, 采取不同能源间的相互转化与互补, 以提高能源使用效率。系统投入运行设备越多, 能源利用率越高, 系统的技术性越好, 技术指标对总体评价结果的贡献越大。设技术指标动态赋权函数  $\beta_2$  为

$$\beta_2 = \ln \left( 1 + \sum_k \frac{P_{L\_k}(t)}{P_{L\_k\_max}} \right) \quad (20)$$

式中:  $P_{L\_k}(t)$  代表第  $k$  种能源在某时刻的负荷;  $P_{L\_k\_max}$  代表第  $k$  种能源的最大负荷。

### 3.3.3 环保指标动态赋权函数

环保指标在一定程度上反映出可再生能源的使用情况。在下午时段, 光照充足, 光伏效率较高, 大量可再生能源接入系统, 环保指标在总体评价中的贡献随之增加。系统对可再生能源的消纳越高, 环保指标数值越优。因此, 环保指标的权重随着系统中可再生能源的输入而动态改变。设环保指标动态赋权函数  $\beta_3$  为

$$\beta_3 = e^{\frac{P_{re}(t)}{P_{re\_max}} - 1} \quad (21)$$

式中:  $P_{re}(t)$  代表某时刻的可再生能源出力;  $P_{re\_max}$  代表系统的可再生能源装机总量。

现有评价结果往往呈现为等级划分的形式, 仅能表征单一方案的优劣, 存在一定的局限性, 无法准确反应各方案之间的差异水平。文章提出模糊综合评价方法, 可以更加直观清楚地比较不同方案间优劣。

设动态赋权后, 各评价指标权重为  $\mu_i = [a_1, a_2, \dots, a_n]$ , 将  $\lambda_i$  与  $R_i$  模糊运算后得到

$$B_i = \mu_i \cdot R_i \quad (22)$$

## 4 实例分析

以长江沿岸某江水源热泵供能系统示范工程为例, 采用文中方法对该系统进行综合评价。该项目供冷供热可服务建筑面积约1421万  $m^2$ , 实际服务面积约860万  $m^2$ 。室内采暖设计温度为20  $^{\circ}C$ , 室内供冷设

计温度为27 ℃，项目地址濒临长江，近年平均流量为28 400 m<sup>3</sup>/s。

在设计江水源热泵供能系统时，方案中动力设备的特点决定了系统的性能和运行方式。在江水源热泵系统中接入清洁能源，可有效提高系统的环保性和可持续发展性，符合“碳达峰”、“碳中和”的要求。因此，本文对江水源热泵系统（含新能源）、江水源热泵供能系统（不含新能源）、江水源热泵供能系统（低功率）和传统系统4种项目设计方案进行评价，如表3所示。

表3 项目设计方案概况  
Table 3 Overview of the project design schemes

编号	系统类型	组成
S1	江水源热泵供能系统（含新能源）	电网+江水源热泵+光伏+储能
S2	江水源热泵供能系统（不含新能源）	电网+江水源热泵+电空调
S3	江水源热泵供能系统（低功率）	电网+江水源热泵（低功率）+吸收式制冷
S4	传统系统	电网+电空调+燃气锅炉

根据各方案技术指标设置技术指标评判评语集，由领域内专家对各初选方案相应技术评价指标进行评判，利用模糊统计法得到各指标的隶属度值。以供电系统为例，根据优、良、中、差四个等级对文章中各江水源热泵供能系统方案中的供电系统指标设置的评语集为{0.9,0.7,0.5,0.3}。文章根据AHP法对指标主观赋权，邀请专家对每一层次指标进行两两评判，得出两者的相对重要性，每一层次经两两比较建立相对重要性判断矩阵，逐层递进进行赋权，最终得出每个指标的AHP权重。

按式（15）—式（17）对各指标数据进行标准化处理，依据信息熵计算公式得出各个指标的信息熵权重，从而得到各评价指标的客观权重，如表4所示。

表4 熵权法权重  
Table 4 The weight of entropy weight method

编号	S1	S2	S3	S4	熵权
D <sub>1</sub>	0.942 9	0.828 6	0.771 4	0.600 0	0.041 7
D <sub>2</sub>	0.726 7	0.812 3	0.935 8	0.600 0	0.041 4
D <sub>3</sub>	0.600 0	0.870 9	0.738 0	1.000 0	0.041 5
D <sub>4</sub>	1.000 0	0.600 0	0.705 3	0.783 2	0.041 5
D <sub>5</sub>	0.907 7	0.753 8	0.846 2	0.600 0	0.041 7

续表

编号	S1	S2	S3	S4	熵权
D <sub>6</sub>	0.600 0	0.609 0	0.622 9	1.000 0	0.041 1
D <sub>7</sub>	0.804 8	0.905 9	0.888 5	1.000 0	0.042 1
D <sub>8</sub>	0.917 5	0.678 8	0.979 6	0.600 0	0.041 4
D <sub>9</sub>	0.933 3	0.870 0	0.800 0	0.600 0	0.041 7
D <sub>10</sub>	0.946 3	0.600 0	0.802 7	0.685 7	0.041 6
D <sub>11</sub>	0.920 0	0.634 3	0.773 2	0.600 0	0.041 6
D <sub>12</sub>	1.000 0	0.619 4	0.619 4	0.600 0	0.041 2
D <sub>13</sub>	0.780 5	0.646 5	0.747	0.600 0	0.041 9
D <sub>14</sub>	0.891 1	0.888 3	0.899 5	0.600 0	0.041 7
D <sub>15</sub>	0.850 0	0.725 0	0.800 0	0.600 0	0.041 8
D <sub>16</sub>	0.966 1	0.600 0	0.933 0	0.867 0	0.041 6
D <sub>17</sub>	0.795 2	0.661 5	0.713 8	0.600 0	0.042
D <sub>18</sub>	0.974 3	0.600 0	0.886 9	0.607 5	0.041 2
D <sub>19</sub>	0.784 1	0.703 4	0.639 6	0.600 0	0.042
D <sub>20</sub>	0.936 4	0.615 3	0.600 0	0.661 8	0.041 5
D <sub>21</sub>	0.928 3	0.816 4	0.600 0	0.642 2	0.041 6
D <sub>22</sub>	0.937 5	0.835 2	0.724 2	0.817 3	0.042
D <sub>23</sub>	0.726 3	0.867 5	0.815 6	0.843 7	0.042 2
D <sub>24</sub>	0.965 2	0.916 3	0.776 4	0.824 4	0.042

综合权重的计算结果见表5。

表5 评价指标综合权重的计算  
Table 5 Calculation of comprehensive weight of evaluation index

一级指标	一级权重	二级指标	AHP权重	熵权	组合权重
C <sub>1</sub>	0.080 3	D <sub>1</sub>	0.008 0	0.041 7	0.008
		D <sub>2</sub>	0.051 3	0.041 4	0.051 1
		D <sub>3</sub>	0.020 8	0.041 5	0.020 8
C <sub>2</sub>	0.047 4	D <sub>4</sub>	0.011 8	0.041 5	0.011 8
		D <sub>5</sub>	0.004 7	0.041 7	0.004 7
		D <sub>6</sub>	0.026 0	0.041 1	0.025 7
		D <sub>7</sub>	0.004 7	0.042 1	0.004 8
C <sub>3</sub>	0.237 2	D <sub>8</sub>	0.177 9	0.041 4	0.176 8
		D <sub>9</sub>	0.059 3	0.041 7	0.059 4
C <sub>4</sub>	0.105 8	D <sub>10</sub>	0.052 9	0.041 6	0.052 8
		D <sub>11</sub>	0.030 6	0.041 6	0.030 6
		D <sub>12</sub>	0.014 8	0.041 2	0.014 7
		D <sub>13</sub>	0.007 4	0.042 0	0.007 5

续表

一级指标	一级权重	二级指标	AHP权重	熵权	组合权重
$C_5$	0.182 5	$D_{14}$	0.116 8	0.041 7	0.116 9
		$D_{15}$	0.018 2	0.041 8	0.018 3
		$D_{16}$	0.047 4	0.041 6	0.047 4
$C_6$	0.054 7	$D_{17}$	0.041 0	0.042 0	0.041 4
		$D_{18}$	0.013 6	0.041 2	0.013 5
$C_7$	0.021 9	$D_{19}$	0.018 1	0.042 0	0.018 3
		$D_{20}$	0.003 7	0.041 5	0.003 7
$C_8$	0.173 6	$D_{21}$	0.086 8	0.041 6	0.086 7
		$D_{22}$	0.086 8	0.042 0	0.087 5
$C_9$	0.096 4	$D_{23}$	0.072 3	0.042 1	0.073 2
		$D_{24}$	0.024 1	0.042 0	0.024 3

在不同时间段, 用户需求不同, 设备接入量也随之调整, 可再生能源的出力也在动态变化中。可再生能源在下午时出力较多, 晚上时所带负荷总量较大。结合式(19)一式(21), 依据各时段具体数据, 对江水源热泵供能系统中一级指标进行动态赋权如下表。

表6 一级指标动态赋权

Table 6 Dynamic weights of first-level indicators

指标权重	经济指标	技术指标	环保指标
上午时段	0.363 2	0.365 8	0.271 0
下午时段	0.345 4	0.334 3	0.320 3
夜晚时段	0.384 3	0.364 6	0.251 1
平均	0.364 3	0.354 9	0.280 8

由上述分析计算可得各初选方案的模糊综合评价结果为

$$B = \mu \cdot R = [0.171 5 \quad 0.164 1 \quad 0.146 7 \quad 0.158 4] \quad (23)$$

依据上述模糊综合评价结果分析得到, 方案S1(电网+江水源热泵+光伏+储能)是综合评价最优方案, 其次为方案S2(电网+江水源热泵+电空调), 再次为方案S4(电网+电空调+燃气锅炉), 评价最差为方案S3(电网+低功率江水源热泵+吸收式制冷)。

方案S1为含有新能源的江水源热泵供能系统, 取得较高评分, 主要是因为方案中接入清洁能源, 利用太阳能供能, 并结合储能装备, 一次能源消耗较少, 且一次能源利用率较其他方案高, 运行费用较其他方案低, 污染物较少, 对江水生态的破坏较弱, 环保效益较其他方案好, 因此得分最高。方案S2为不含有新

能源的江水源热泵供能系统, 其一次能源利用率与环保效益微劣于方案S1, 评分排序第二, 与实际相符。对于传统方案S4, 其在投资建设经济性方面优势较大, 但在其他方面较差, 故位列第三。方案S3不仅经济投入方面处于劣势, 且需额外能量进行吸收制冷, 因此得分最低。

## 5 结论

针对现有研究成果主要评价水源热泵供能系统某一方面特性的方法, 缺少对整个系统方案的综合评价的不足, 本文通过分析江水源热泵供能系统的运行状态及相关影响因素, 构建了包含技术、经济及环保三个方面的江水源热泵供能系统技术综合评价体系。把主观与客观方法相结合, 进行综合赋予权重, 建立层次分析法-熵权法确定指标综合权重; 针对现有研究忽略江水源热泵供能系统在不同运行场景下的动态权重变化问题, 文章提出了江水源热泵供能系统一级评价指标的动态赋权方法; 并通过模糊评价方法处理定性指标, 解决了多指标权重难以量化的问题, 建立了完善的江水源热泵供能系统动态模糊综合评价模型。本文所提方法应用于长江沿岸地区某江水源热泵供能系统进行评价校验, 实例分析结果表明评价结果直观且与实际相符, 为江水源热泵系统的多特性决策提供了新思路。

## 参考文献

- [1] 翁玉艳, 张希良, 何建坤. 全球碳市场链接对实现国家自主贡献减排目标的影响分析[J]. 全球能源互联网, 2020, 3(1): 27-33.  
WENG Yuyan, ZHANG Xiliang, HE Jiankun. Impacts of the linkage of global carbon markets on the achievement of emissions reduction targets in nationally determined contributions[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(1): 27-33(in Chinese).
- [2] 孟宪君, 穆云飞, 王明军, 等. 基于热循环蓄热特性的电-热综合能源系统风电消纳策略[J]. 全球能源互联网, 2019, 2(4): 318-324.  
MENG Xianjun, MU Yunfei, WANG Mingjun, et al. Wind power consumption strategy for electric heating integrated energy system based on thermal storage characteristics of heat cycle[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2019, 2(4): 318-324(in Chinese).
- [3] 苟星, 陈群, 孙勇, 等. 微能源系统中多能传输、存储与转换过程的影响机制[J]. 全球能源互联网, 2020, 3(3):

- 280-290.
- GOU Xing, CHEN Qun, SUN Yong, et al. Influence mechanism of multi-energy transport, storage, and conversion processes in micro-energy system[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(3): 280-290(in Chinese).
- [4] 李颜颐, 李玉幸, 刘芳, 等. 地源热泵系统在建筑中的应用与经济性分析[J]. 智能建筑电气技术, 2019, 13(3): 85-89.
- LI Yanyi, LI Yuxing, LIU Fang, et al. Application and economic analysis of ground source heat pumps system in construction[J]. Electrical Technology of Intelligent Buildings, 2019, 13(3): 85-89(in Chinese).
- [5] 姚燕枫. 地热井+水源热泵供暖系统在大型公共建筑中的应用[J]. 暖通空调, 2020, 50(10): 68-70.
- YAO Yanfeng. Application of geothermal well and water-source heat pump heating system to large-scale public buildings[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2020, 50(10): 68-70(in Chinese).
- [6] 董福贵, 张也, 尚美美. 分布式能源系统多指标综合评价研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(12): 3214-3223.
- DONG Fugui, ZHANG Ye, SHANG Meimei. Multi-criteria comprehensive evaluation of distributed energy system[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(12): 3214-3223(in Chinese).
- [7] 张涛, 朱彤, 高乃平, 等. 分布式冷热电能源系统优化设计及多指标综合评价方法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3706-3713.
- ZHANG Tao, ZHU Tong, GAO Naiping, et al. Optimization Design and Multi-criteria Comprehensive Evaluation Method of Combined Cooling Heating and Power System [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3706-3713(in Chinese).
- [8] 张国辉. 地源热泵系统技术经济性评价研究: 以武汉地区为例[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012.
- [9] 李娟, 宋孝春. 重庆江北城江水源热泵区域供冷供热系统设计[J]. 暖通空调, 2020, 50(4): 53-57.
- LI Juan, SONG Xiaochun. Design of district cooling and heating system with river- water-source heat pump for Jiangbeicheng area in Chongqing[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2020, 50(4): 53-57(in Chinese).
- [10] 苑绍迪, 刘芳, 马力, 等. 空气源-水环热泵联合系统性能分析[J]. 制冷与空调, 2020, 20(9): 35-38.
- YUAN Shaodi, LIU Fang, MA Li, et al. Performance analysis of air-source and water loop heat pump combined system[J]. Refrigeration and Air-Conditioning, 2020, 20(9): 35-38(in Chinese).
- [11] 刘飞, 汤亮亮, 邓鹤鸣, 等. 计及分布式电源的城市重要用户应急电源优化配置[J]. 全球能源互联网, 2018, 1(5): 581-588.
- LIU Fei, TANG Liangliang, DENG Heming, et al. Optimal allocation of emergency power supply of urban important loads considering distributed generation[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2018, 1(5): 581-588(in Chinese).
- [12] 付忠广, 齐敏芳. 基于最大熵投影寻踪耦合的燃煤机组节能减排评价方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(26): 4476-4482.
- FU Zhongguang, QI Minfang. Study on the evaluation method of energy-saving and emission reduction of coal-fired units based on projection pursuit method coupled with maximum entropy[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(26): 4476-4482(in Chinese).
- [13] 李中豪, 张沛超, 马军, 等. 采用动态赋权的风储协调多目标优化控制方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(12): 94-99.
- LI Zhonghao, ZHANG Peichao, MA Jun, et al. Dynamic weighted multi-objective optimization method for coordinated control of wind power and battery energy storage system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(12): 94-99(in Chinese).
- [14] 穆永铮, 鲁宗相, 乔颖, 等. 基于多算子层次分析模糊评价的电网安全与效益综合评价指标体系[J]. 电网技术, 2015, 39(1): 23-28.
- MU Yongzheng, LU Zongxiang, QIAO Ying, et al. A comprehensive evaluation index system of power grid security and benefit based on multi-operator fuzzy hierarchy evaluation method[J]. Power System Technology, 2015, 39(1): 23-28(in Chinese).
- [15] 刘军, 张彬彬, 赵婷. 基于模糊评价的风电场有功功率分配算法[J]. 电工技术学报, 2019, 34(4): 786-794.
- LIU Jun, ZHANG Binbin, ZHAO Ting. Research on wind farm active power dispatching algorithm based on fuzzy evaluation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(4): 786-794(in Chinese).

收稿日期: 2021-03-23; 修回日期: 2021-05-19。

作者简介:



郭松

郭松 (1991), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电力系统状态估计及能效评估。

冯澎湃 (1992), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为新能源电力工程及能效评估。

胡文博 (1995), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为新能源电力工程及能效评估。通信作者, E-mail: projectmagpie@126.com

(责任编辑 张鹏)