

水源热泵与蓄能结合系统的评价体系研究^{*}

重庆大学 白雪莲[☆]

四川省建筑设计院 张南桥

摘要 针对水源热泵和冰蓄冷的技术特点,确定了水源热泵与蓄能结合的系统的评价指标。对系统的经济性、节能性、安全性、环境效益、烟特性进行分析,提出该系统的综合评价体系。采用模糊综合评价方法,建立了评价模型,并得到相应的评价步骤。结合工程实例,分析了综合评价体系的应用结果,研究表明,综合评价体系可以全面反映该系统的特性,为方案决策和系统设计提供了量化依据。

关键词 水源热泵 冰蓄冷 综合评价 模糊方法

Evaluation methods of water-source heat pump systems combined with thermal storage

By Bai Xuelian[★] and Zhang Nanqiao

Abstract Aiming at the characteristics of water-source heat pump and ice storage, determines the evaluation indices for the system of water-source heat pump combined with thermal storage. Analysing economic effects, energy saving, safety, environment benefits and exergy characteristics, puts forward a comprehensive evaluation method for the system. Adopting fuzzy comprehensive evaluation method, sets up an evaluation model and presents corresponding steps. Taking an actual project as example, analyses the application results of the evaluation method. The results show that the evaluation method can reflect totally the characteristics of the system and provide quantitative reference for scheme decision and system design.

Keywords water-source heat pump, ice storage, comprehensive evaluation, fuzzy method

[★] Chongqing University, Chongqing, China

①

水源热泵利用了可再生能源;蓄能技术可以“削峰填谷”,平衡电网负荷,降低运行费用。将这两种技术进行集成应用,能充分发挥各自的优势,是对可再生资源的优化利用,从而最大限度实现系统的高效、经济和节能。因此,一些学者在工程应用中对这种复合式系统进行了有益的尝试,如合肥大剧院^[1]、上海世博中心^[2]等。然而相关研究尚处于起步和适应阶段。目前对于系统的效果往往以经济性和节能量作为评价指标,虽然简单,但忽略了系统的其他特点,影响了水源热泵与蓄能相结合的系统(以下简称复合式系统)的应用。因此,对于复合式系统有必要在评价其经济性和节能效益的同时,量化分析其环境效益,并综合考虑能源利用

的有效性,建立合理的评价体系,从而指导方案决策、系统设计和运行管理。

模糊综合评价是以模糊数学为理论基础,应用模糊关系合成原理,将一些边界不清、不易量化的因素量化,进行综合评价的一种方法^[3]。复合式系统是一个复杂的系统,评价系统时涉及到许多评价指标的相互作用,如经济性、节能性、能源利用的有效性和环境效益等。而且,各个评价指标中存在着大量的模糊现象和模糊概念。因此,在综合评价复合式系统时,采用模糊综合评价可以实现量化处理^[4]。

①[☆] 白雪莲,女,1973年10月生,博士,副教授
400045 重庆大学城市建设与环境工程学院
(023) 65120750
E-mail: xuelianbai@163.com
收稿日期:2010-09-10

^{*} 国家“十一五”科技支撑计划项目(编号:2007BAB21B02-3),中央高校基本科研业务费项目(编号:CDJZR10210007)

1 复合式系统的评价指标

1.1 水源热泵系统的评价

对水源热泵系统的评价一般采用表 1 所示的评价指标,主要体现在经济性、节能性、环境效益以及安全性方面。

表 1 水源热泵系统评价^[5]

一级评价指标	二级评价指标
经济性	夏季经济效益
	冬季经济效益
节能性	年转移峰电量
	电力移峰量
	年输入总电量
环境效益	制冷机组性能系数的降低率
	差额投资回收期
	地表水供冷(热)量
安全评价	空调期节电量
	供暖期节煤量
	夏季 CO ₂ 减排量
	冬季 CO ₂ 减排量
	评价危险性
	控制危险性

1.2 冰蓄冷系统的评价

一般情况下,蓄冷空调系统的评价分析往往将峰谷电价差节约的运行费与初投资的增加作比较,进而以投资回收年限作为蓄冷空调系统的可行性和运行效益分析的评判标准。这种评价方法非常直接,也易于接受,但是不乏片面,甚至影响蓄冷技术的应用,造成人们普遍认为蓄冷空调系统“节钱而不节能”。众所周知,蓄冷系统对于平衡电网负荷的作用是非常大的,特别是我国以火力发电为主,蓄冷系统将产生良好的减排效益。因此,在 GB 19412—2003《蓄冷空调系统的测试和评价方法》建议的经济性评价基础上,增加环境效益和能源利用有效性评价,提出蓄冷系统的评价指标,见表 2。

表 2 冰蓄冷系统评价^[6]

一级评价指标	二级评价指标
经济性	年转移峰电量
	电力移峰量
	年输入总电量
	制冷机组性能系数降低率
	差额投资回收期
环境效益	夏季 CO ₂ 减排量
	冬季 CO ₂ 减排量
烟	烟效率
安全评价	评价危险性
	控制危险性

2 复合式系统的综合评价体系

2.1 评价模型

本研究采用二级模糊综合评价来建立复合式系统的评价体系。综合表 1 和表 2 的评价指标确定的复合式系统的综合评价体系的指标见图 1。

2.2 模糊综合评价步骤



图 1 复合式系统综合评价指标

1) 确定评价对象的因素集合 $u = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}$;

2) 确定评语等级集合 $v = \{v_1, v_2, \dots, v_t\}$, 评语等级 t 应满足 $4 \leq t \leq 9$, 一般为 5 个等级, 分别为优、良、中、差、劣, 其取值见表 3。

表 3 评价定量分级标准

	劣	差	中	良	优
评价计算结果	小于 0.1	0.1~0.3	0.3~0.5	0.5~0.7	0.7~0.9

3) 建立模糊关系矩阵 R , 在构造了等级模糊子集以后, 要逐个对被评价对象从每个因素 $\{u_i\} (i = 1, 2, 3, \dots, m)$ 上进行量化, 确定从单因素看被评价对象对等级模糊子集的隶属度 $(R | u_i)$, 进而得到模糊关系矩阵:

$$R = \begin{bmatrix} R | u_1 \\ R | u_2 \\ \vdots \\ R | u_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1m} \\ \vdots & & \vdots \\ r_{t1} & \cdots & r_{tm} \end{bmatrix}$$

矩阵 R 中第 i 行第 j 列元素 r_{ij} 表示某个被评价对象从因素 u_i 来看对 v_j 等级模糊子集的隶属度^[7]。

4) 确定评价因素权向量 A , 权向量 $A = (a_1, a_2, \dots, a_n)$ 中的元素 a_i 本质上是因素 u_i 对模糊子

集的隶属度, 权向量满足 $\sum_{i=1}^n a_i = 1, a_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, n$ 。

5) 定义合成算子 Θ , 合成算子 Θ 就是确定在模糊评价中采用何种运算方法将被评对象与指标集的模糊关系方阵映射到评价集 B 。

$$B = A \circ R = (a_1, a_2, \cdots, a_t) \circ \begin{bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1m} \\ \vdots & & \vdots \\ r_{t1} & \cdots & r_{tm} \end{bmatrix} = (b_1, b_2, \cdots, b_m)$$

6) 根据定义,计算评价结果。

2.3 权重系数确定

权重系数的确定是综合评价的关键,层次分析法是一种行之有效的方法。其步骤如下:

1) 确定目标和评价因素 $u = \{u_1, u_2, \cdots, u_p\}$ 。

2) 构造判断矩阵 $S = (u_{ij})_{p \times p}$ 。判断矩阵元素的值反映了人们对各元素相对重要性的认识,一般采用1~5及其倒数的标度方法,判断矩阵取值见表4。

表4 判断矩阵取值^[8]

标度	含义
1	指标 u_i 与 u_j 具有同样的重要性
3	指标 u_i 比 u_j 稍微重要
5	指标 u_i 比 u_j 明显重要
2,4	表示两个判断等级的中值
倒数	表示 u_j 与 u_i 比较判断所得: $u_j = 1/u_i$

判断矩阵 $S = (u_{ij})_{p \times p}$ 如下:

$$S = \begin{bmatrix} 1 & \beta_{12} & \beta_{13} & \cdots & \beta_{1n} \\ \frac{1}{\beta_{12}} & 1 & \beta_{23} & \cdots & \beta_{2n} \\ \vdots & & & & \vdots \\ \frac{1}{\beta_{1n}} & \frac{1}{\beta_{2n}} & \frac{1}{\beta_{3n}} & \cdots & 1 \end{bmatrix}$$

3) 用 MATLAB 软件计算判断矩阵 S 的最大特征根 $\lambda_{\max}$ 及其对应的特征向量 A ,此特征向量就是权系数的分配向量。

4) 为判断矩阵的一致性,需计算一致性指标 $CI = (\lambda_{\max} - n)/(n - 1)$ (n 为矩阵阶数)、平均随机一致性指标 RI ,表5是正互反矩阵的平均随机一致性指标 RI 。当随机一致性比率 $CR = CI/RI < 0.10$ 时,认为层次分析排序的结果有满意的一致性,即权系数的分配是合理的;否则,要调整判断的元素取值,重新分配权系数的值。

表5 一致性指标 RI

	n							
	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

3 应用分析

3.1 工程概况

基于上述分析所建立的综合评价体系,对国内某工程进行应用研究。该水源热泵工程总建筑面

积为 57 821 m²,夏季空调最大冷负荷为 5 500 kW,冬季最大热负荷为 4 800 kW。

该工程利用紧邻建筑的天然湖水作为热源和热汇,采用板式换热器间接换热方式。制冷工况时,机组冷凝器进出水温为 32 ℃/37.3 ℃,蒸发器进出水温为 10.5 ℃/5.5 ℃。蓄冰系统中,融冰时,低温乙二醇溶液经板式换热器换热后进入末端设备;制冰时,热泵机组冷凝器进出水温为 32 ℃/35.6 ℃,蒸发器进出水温为-2.4 ℃/-5.6 ℃,融冰供冷与主机供冷共用板式换热器。

当地的电网峰谷电价见表6。

表6 当地电网峰谷分时电价

	时段	电价/(元/(kW·h))
高峰段	09:00—12:00,17:00—22:00	0.634
平时段	08:00—09:00,12:00—17:00,22:00—23:00	0.388
低谷段	23:00—次日 08:00	0.213

3.2 系统评价体系的应用

3.2.1 指标权重计算

一级评价指标5个,本研究采用层次分析法求取权重向量。判断矩阵通过问卷调查及专家打分获得。

$$S = (u_{ij})_{5 \times 5} = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 3 & 5 & 5 \\ \frac{1}{3} & 1 & 1 & 3 & 3 \\ \frac{1}{3} & 1 & 1 & 3 & 3 \\ \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & 1 & 1 \\ \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

由 MATLAB 计算出一级判断矩阵 S 的最大特征值 $\lambda_{\max} = 5.055\ 6$,计算一致性指标 $CI = (\lambda_{\max} - n)/(n - 1) = 0.013\ 9$,平均随机一致性指标 $RI = 1.12$,随机一致性比率 $CR = CI/RI = 0.013\ 9/1.12 = 0.012\ 4 < 0.1$,可以认为结果具有一定满意度。最大特征值对应的特征向量为[0.846 9, 0.352 0,0.352 0,0.132 2,0.132 2],对特征向量进行归一化为[0.466 6,0.193 9,0.193 9,0.072 8,0.072 8],此向量即为一级权重指标。

同理可求出系统二级权重指标:

1) 经济性二级权重,[0.248 3,0.248 3,

0.125 8,0.125 8,0.114 2,0.068 8,0.068 8];

- 2) 节能性二级权重,[0.2,0.4,0.4];
- 3) 环境效益二级权重,[0.5,0.5];
- 4) 烟二级权重,[1];
- 5) 安全性评价二级权重,[0.5,0.5]。

3.2.2 模糊关系矩阵及评价集的建立

本研究评价体系的一、二级模糊关系矩阵通过专家打分得到。二级模糊关系矩阵 $R = (r_{ij})$ ，即经济性二级模糊关系矩阵：

$$R_1 = (r_{ij})_{7 \times 5} = \begin{bmatrix} 0.7 & 0.2 & 0.1 & 0 & 0 \\ 0.2 & 0.3 & 0.3 & 0.2 & 0 \\ 0.6 & 0.4 & 0 & 0 & 0 \\ 0.6 & 0.4 & 0 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0.4 & 0.1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.5 & 0.2 & 0.3 \\ 0.7 & 0.3 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_1 = [0.248\ 3,0.248\ 3,0.125\ 8,0.125\ 8,0.114\ 1,0.068\ 8,0.068\ 8]。$$

$$= [0.248\ 3,0.248\ 3,0.248\ 3,0.2,0.068\ 8]$$

对经济性二级评价集 B_1 进行归一化处理,得 [0.245 0,0.245 0,0.245 0,0.197 2,0.067 8];同理可求出节能性二级评价集 B_2 : [0.307 7,0.230 8,0.307 7,0.076 9,0.076 9];环境效益二

$$B = [0.466\ 6,0.193\ 9,0.193\ 9,0.072\ 8,0.072\ 8]。$$

$$= [0.245\ 0\ 0.245\ 0\ 0.245\ 0\ 0.197\ 2\ 0.076\ 9]$$

对系统一级综合评价集 B 进行归一化处理,得 [0.242 8,0.242 8,0.242 8,0.195 4,0.076 2]。

3.3 评价结果分析

3.3.1 系统二级评级结果

通过上述分析可得系统经济性、节能性、环境效益、烟评价以及安全性二级评价结果，

节能性二级模糊关系矩阵：

$$R_2 = (r_{ij})_{3 \times 5} = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.3 & 0.2 & 0 & 0 \\ 0 & 0.3 & 0.5 & 0.1 & 0.1 \\ 0.6 & 0.2 & 0.2 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

环境效益二级模糊关系矩阵：

$$R_3 = (r_{ij})_{2 \times 5} = \begin{bmatrix} 0.1 & 0.7 & 0.1 & 0.1 & 0 \\ 0.5 & 0.3 & 0.1 & 0.1 & 0 \end{bmatrix}$$

烟评价二级模糊关系矩阵：

$$R_4 = (r_{ij})_{1 \times 5} = [0.7\ 0.3\ 0\ 0\ 0]$$

安全性评价二级模糊关系矩阵：

$$R_5 = (r_{ij})_{2 \times 5} = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0.5 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

通过二级权重系数以及二级模糊关系矩阵,可计算出二级评价集 B 。

经济性二级评价集 B_1 ：

$$\begin{bmatrix} 0.7 & 0.2 & 0.1 & 0 & 0 \\ 0.2 & 0.3 & 0.3 & 0.2 & 0 \\ 0.6 & 0.4 & 0 & 0 & 0 \\ 0.6 & 0.4 & 0 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0.4 & 0.1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.5 & 0.2 & 0.3 \\ 0.7 & 0.3 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

级评价集 B_3 : [0.166 7,0.500,0.166 7,0.166 6,0];烟评价二级评价集 B_4 : [0.7,0.3,0,0,0];安全性二级评价集 B_5 : [0.5,0.5,0,0,0]。

系统一级综合评价集 B ：

$$\begin{bmatrix} 0.245\ 0 & 0.245\ 0 & 0.245\ 0 & 0.197\ 2 & 0.067\ 8 \\ 0.307\ 7 & 0.230\ 8 & 0.307\ 7 & 0.076\ 9 & 0.076\ 9 \\ 0.166\ 7 & 0.500\ 0 & 0.166\ 7 & 0.166\ 6 & 0 \\ 0.7 & 0.3 & 0 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0.5 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

见表 7。

表 7 系统二级评价等级

	经济性	节能性	环境效益	烟评价	安全性
二级评价结果	0.580 4	0.623 1	0.633 4	0.840 0	0.800 0
二级评价等级	良	良	良	优	优

3.3.2 系统一级综合评价结果
一级综合评价结果：

$$0.242\ 8 \times 0.9 + 0.242\ 8 \times 0.7 + 0.242\ 8 \times 0.5 + 0.195\ 4 \times 0.3 + 0.076\ 2 \times 0.1 = 0.576$$

由系统一级综合评价结果可以看出,系统评价结果为0.576,属于良级别。

3.3.3 评价结果分析

首先分析系统的二级评价结果,系统节能性二级评价结果为0.623 1,可见,实现了水源热泵技术的节能效果,但未达到最佳。分析其原因有二:其一,系统在湖水取水设计中采用了板式换热器,降低了湖水与机组的传热温差,提高了机组冷凝温度,导致机组COP降低;其二,系统在制冷工况时,蒸发器出口设计温度较低,同样降低了机组COP。系统经济性评级结果为0.580 4,反映出系统未有效发挥冰蓄冷技术的优势,主要原因在于电网峰谷电价比值不高,仅为3:1;此外,系统的节能性也制约了其经济性。系统的环境效益既得益于冰蓄冷对电网的调节,也得益于系统的节能效果。因此,前述两项影响了环境效益二级评价等级,其值为0.633 4。系统焓特性二级评价结果为0.840 0,说明系统的能源利用有效性较好,这主要得益于系统较高的自控水平,系统全部采用电动调节阀,可以较敏捷、较准确地调节电动阀开启度,使系统各部件的损失达到最小。系统安全性二级评价结果为0.800 0,说明系统安全性较好,其表现为系统各部件运行正常,运行过程中,并未出现过任何异常现象。

系统的一级综合评价结果为0.576,属于良级别,其原因在于系统经济性、节能性、环境效益、焓和安全性五方面是相互联系、相互制约的,节能性直接影响到经济性和环境效益,安全性影响着节能性、焓效率的大小。所以系统综合评价更能全面指导系统方案决策、系统设计和运行管理,决策者可以根据所侧重的目标进行选择。

4 结论

4.1 采用模糊综合评价方法,综合分析了复合式系统的经济性、节能性、安全性、环境效益、焓特性,确定了两级模糊评价的多个指标,建立了复合式系统综合评价体系。解决了现有评价方法过于片面和部分指标难于量化的问题。

4.2 采用所建立的综合评价体系,对某工程进行应用研究。结果表明,系统经济性二级评价结果、节能性二级评价结果、环境效益二级评价结果分别为0.580 4,0.623 1,0.633 4,均属于良级别;焓二级评价结果、安全性二级评价结果分别为0.840 0,0.800 0,均属于优级别。系统一级综合评价结果为0.576,属于良级别。系统设计中的间接换热方式、当地的峰谷电价比以及系统自控水平等直接影响了评价结果。

4.3 复合式系统的评价体系包含了经济性、节能性、环境效益、焓特性和安全性的内容,其各项评价指标存在相互联系又相互制约的关系。虽然此类复合式系统具有较好的经济和环境效益,然而不同的系统设计和运行参数将使得两级评价结果存在差异。系统综合评价能全面指导系统方案决策、系统设计和运行管理,决策者可以根据所侧重的目标进行选择。

参考文献:

- [1] 和彩凤,祝健,徐东海. 水源热泵与冰蓄冷空调系统联合运行的优越性及应用[J]. 暖通空调,2009,39(10): 116-119
- [2] 张思柱. 上海世博园区区域供冷系统的最佳供冷半径研究[D]. 上海:同济大学,2007
- [3] 胡永宏,贺恩辉. 综合评价方法[M]. 北京:科学出版社,2000
- [4] 谢季坚,刘承平. 模糊数学方法及其应用[M]. 武汉:华中理工大学出版社,2000
- [5] 张承虎,吴荣华,钱剑峰,等. 地表水源热泵的技术经济与环保效益分析[J]. 节能技术,2007,25(3):199-200
- [6] 中国机械工业联合会. GB 19412—2003 蓄冷空调系统的测试和评价方法[S]. 北京:中国标准出版社,2004
- [7] 廖吉香. 几种供暖空调系统的热经济工程模糊分析[J]. 制冷空调与电力机械,2008,29(5):1-4
- [8] 包爱民. 昆明公安信息化建设绩效模糊评价研究[D]. 杭州:浙江大学,2007