氨气制冷系统能效状态评价方法

刘 冲 蔡茂林

(北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院, 北京 100191)

摘 要: 针对氨气制冷系统当前的系统能效评价研究现状,提出了一种二维能效评价矩阵模型,在此基础上,结合当前常用的层次-模糊评价和信息熵评价方法的优缺点,提出了组合权重的评价方法. 该方法运用最小二乘法确定联合使用层次分析和信息熵后的组合权重. 通过实例对比验证,该方法具有更高的准确性,与系统的实际能效比变化趋势更一致,线性度高. 该方法可实现系统的能效状态及时判断,通过调整参数可实现系统的运行更优化,减少无谓能耗.

关 键 词: 层次-模糊评价; 信息熵; 能效评价; 最小二乘法

中图分类号: TK 37; TP272

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2013)10-1331-06

Energy efficiency state evaluation method for ammonia refrigeration system

Liu Chong Cai Maolin

(School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: In order to evaluate the energy efficiency of the ammonia refrigeration system, a novel two-dimensional matrix model was proposed. Based on thorough analysis of the popular evaluation methods, analytic hierarchy process-fuzzy comprehensive evaluation and information entropy method, a new combination weight evaluation method was put forward with the least squire. What's more, for better performance comparison, necessary actual cases were conducted and it proved that the new method has better precision, higher linearity and greater consistence with actual energy efficiency. Also, the energy efficiency state can be assessed instantly with this method and by adjusting necessary parameters the system can operate more optimally with less energy consumption.

Key words: analytic hierarchy process-fuzzy comprehensive evaluation; information entropy; energy efficiency evaluation; least square method

氨气制冷系统广泛应用于化工、化肥、啤酒以及乳制品等行业,其制冷效果优异,且消耗臭氧潜能值和全球变暖潜能值均为零[1]. 当前实际应用中,氨气制冷系统大都可以实现安全运行,但存在着系统长期不在优质能效状态运行的问题,这造成了较大的能耗.

目前,国内外的诸多学者主要从以下两个方面开展了大量的研究工作:文献[2-3]通过对制冷系统进行新的建模和仿真来寻求制冷系统的各部件的优化,以实现系统运行能耗的降低;文献[4-5]开展了大量的制冷系统的故障诊断、检测和预测研究. 以上研究都力求从某一方面出发寻求系统能效提升的途径,但对于系统的整体实时运行能效判定却少有深入研究,尤其是系统无故障状态下的能效状态判定.

基于常见的评价思路,针对氨气制冷系统,本文将建立了一种新型能效评价矩阵模型,在分析常用评价方法优缺点的基础上,提出了一种综合能效评价方法,并通过实际案例来对比验证该方法的优异性.

收稿日期: 2013-03-14; **网络出版时间**: 2013-10-24 14:47

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20131024.1447.007.html

作者简介: 刘 冲(1981-),男,山东宁阳人,博士生,lcyj120206@163.com.

1 氨气制冷系统能效评价模型

根据氨气制冷系统的主要组成,构建实际测试系统如图 1 所示.

结合测试系统,依据各组成部分和对应的相关性能参数,构建二维能效评价矩阵模型,m 个评价状态和 n 个评价参数构建系统评价矩阵:

$$\boldsymbol{U}=(\boldsymbol{u}_{ij})_{mn}=\begin{bmatrix}u_{11} & u_{12} & \cdots & u_{1n}\\ u_{21} & u_{22} & \cdots & u_{2n}\\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots\\ u_{m1} & u_{m2} & \cdots & u_{mn}\end{bmatrix}_{mn} \tag{1}$$

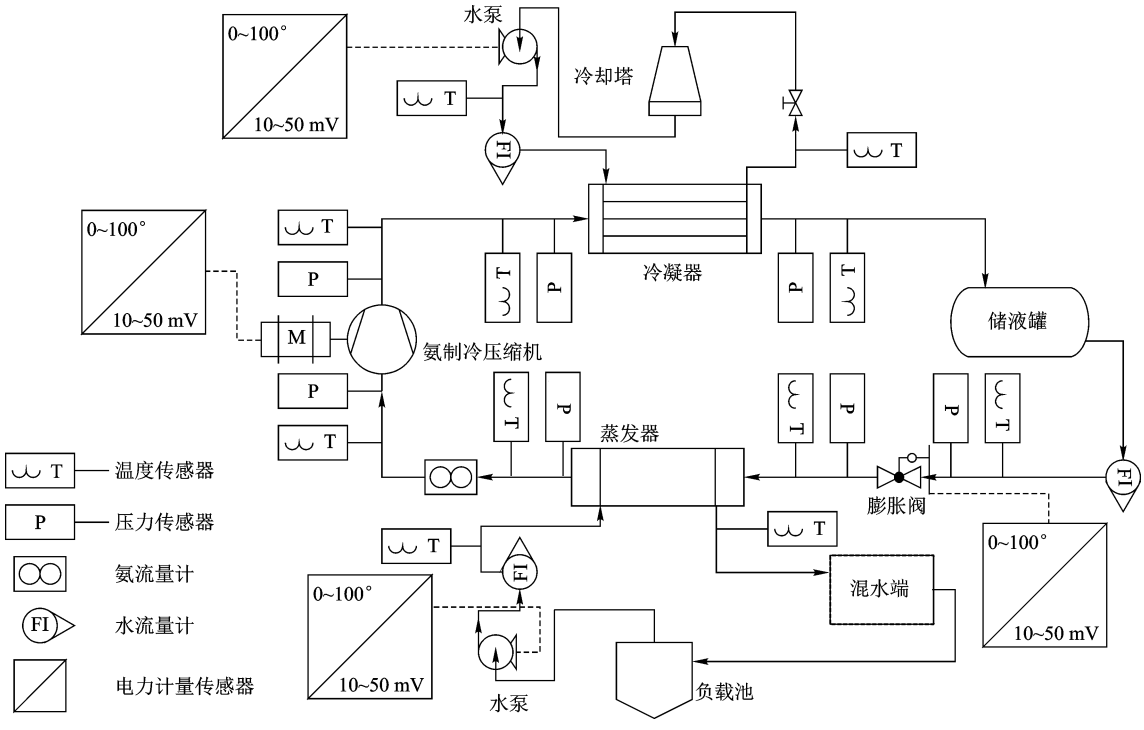


图 1 氨气制冷系统测试结构图

利用规范化方法,求得规范化矩阵为

$$\boldsymbol{R}=(\boldsymbol{r}_{ij})_{mn} \tag{2}$$

设评价权重为 $\boldsymbol{w}$,各系统状态的能效评价值为 W,第 i 个状态的评价值为 W_{zi}.

$$\boldsymbol{w}=[\boldsymbol{w}_1,\boldsymbol{w}_2,\cdots,\boldsymbol{w}_m]^{\mathrm{T}} \tag{3}$$

$$W=\boldsymbol{R}\cdot\boldsymbol{w}=[W_{z1},W_{z2},\cdots,W_{zm}]^{\mathrm{T}} \tag{4}$$

$$W_{zi}=\sum_{j=1}^{n}\boldsymbol{r}_{ij}\boldsymbol{w}_j$$

$$i=1,2,\cdots,m;j=1,2,\cdots,n \tag{5}$$

在充分考虑完备性、扩充性、精简性和可实现性的基础上,确定了 15 个影响系统能效的关键参数.

2 氨气制冷系统能效评价方法

2.1 层次-模糊评价法

文献[6]中指出,萨蒂教授在 20 世纪 70 年代,结合网络系统理论和多目标综合评价方法,提出了一种层次权重决策方法,即层次分析法. 该方法将各相关因素分解成目标、准则、方案等层次,然后进行定性和定量分析、决策. 它适合于分层交错评价指标的目标系统,且目标值又难于定量描述的决策问题.

模糊综合评价是应用模糊集理论进行综合评价的一种方法,其特点是评价结果不是绝对肯定或否定,而是以一个模糊集来表示. 两者相结合的方法有着比较广泛的用途.

对于氨气制冷系统,相关因素较多,且彼此具有层次关系,适合应用层次-模糊评价法. 但该方法参数评估会受到主观判断影响,存在随机性.

2.2 信息熵法

文献[7]指出,香农借鉴了热力学的概念,把信息中排除了冗余后的平均信息量称为信息熵. 可以采用信息熵根据指标值的差异程度确定指标体系的权重,以便进行多指标的综合评价.

信息熵法是一种基于信息论的方法,对于解决随机事件和信号所含信息量大小的评价非常有效,它减少了评估中专家的主观偏好和专业倾向的干扰,弥补了传统方法的不足[8]. 但该方法过于依赖计算,缺少对实际运行中过渡变化的体现.

2.3 基于最小二乘法的组合权重的评价方法

最小二乘法,又称最小平方法,它通过最小化误差的平方和寻找数据的最佳函数匹配. 利用最

小二乘法可以简便地求得未知的数据,并使得这些求得的数据与实际数据之间误差的平方和为最小. 结合最小二乘法,建立基于最小二乘法的层次分析和信息熵组合权重的评价方法[9].

设主客观优化组合权重为 $\boldsymbol{w}$,各系统状态的能效评价值为 W,第 i 个状态的评价值为 W_{zi},规范化矩阵 $\boldsymbol{R}$,如式(2)~式(5)所示.

应用层次分析法,其计算主观权重为

$$\boldsymbol{w}_{\mathrm{a}} = [\boldsymbol{w}_{\mathrm{a}1}, \boldsymbol{w}_{\mathrm{a}2}, \cdots, \boldsymbol{w}_{am}]^{\mathrm{T}} \tag{6}$$

应用信息熵理论,其计算客观权重为

$$\boldsymbol{w}_{\mathrm{b}} = [\boldsymbol{w}_{\mathrm{b}1}, \boldsymbol{w}_{\mathrm{b}2}, \cdots, \boldsymbol{w}_{\mathrm{b}m}]^{\mathrm{T}} \tag{7}$$

两种方法下评价值偏差越小越好,为此建立最小二乘法优化组合评价模型 $\boldsymbol{D}(\boldsymbol{w})$,设 x, y 为 $\boldsymbol{w}_{\mathrm{a}}, \boldsymbol{w}_{\mathrm{b}}$ 的系数[10],则

$$\min \boldsymbol{D}(\boldsymbol{w}) = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}\{[\boldsymbol{r}_{ij}(x\boldsymbol{w}_{aj} - \boldsymbol{w}_j)]^2 + [\boldsymbol{r}_{ij}(y\boldsymbol{w}_{\mathrm{b}j} - \boldsymbol{w}_j)]^2\} \tag{8}$$

其中

$$\sum_{j=1}^{n}\boldsymbol{w}_j = 1 \quad \boldsymbol{w}_j \geqslant 0$$
$$i = 1,2,\cdots,m; j = 1,2,\cdots,n \tag{9}$$

构建拉格朗日函数,得

$$\boldsymbol{F} = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}\{[\boldsymbol{r}_{ij} \times (x\boldsymbol{w}_{aj} - \boldsymbol{w}_j)]^2 + [\boldsymbol{r}_{ij} \times (y\boldsymbol{w}_{\mathrm{b}j} - \boldsymbol{w}_j)]^2\} + 4\boldsymbol{\lambda}\left(\sum_{j=1}^{m}\boldsymbol{w}_j - 1\right) \tag{10}$$

求偏导,得

$$\frac{\partial \boldsymbol{F}}{\partial \boldsymbol{w}_j} = -\sum_{i=1}^{n} 2\boldsymbol{r}_{ij}^2(x\boldsymbol{w}_{aj} + y\boldsymbol{w}_{\mathrm{b}j} - 2\boldsymbol{w}_j) + 4\boldsymbol{\lambda} = 0 \tag{11}$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{F}}{\partial \boldsymbol{\lambda}} = 4\left(\sum_{j=1}^{m}\boldsymbol{w}_j - 1\right) = 0 \tag{12}$$

应用矩阵表示为

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{A} & \boldsymbol{e} \\ \boldsymbol{e}^{\mathrm{T}} & 0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \boldsymbol{w} \\ \boldsymbol{\lambda} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{B} \\ 1 \end{bmatrix} \tag{13}$$

其中,$\boldsymbol{A}$ 为对角矩阵;$\boldsymbol{e}, \boldsymbol{w}$ 和 $\boldsymbol{B}$ 为向量.

$$\boldsymbol{A} = \mathrm{diag}\left[\sum_{i=1}^{n}\boldsymbol{r}_{i1}^2, \sum_{i=1}^{n}\boldsymbol{r}_{i2}^2, \cdots, \sum_{i=1}^{n}\boldsymbol{r}_{im}^2\right] \tag{14}$$

$$\boldsymbol{e} = [1,1,\cdots,1]^{\mathrm{T}} \tag{15}$$

$$\boldsymbol{B} = \left[\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{2}(x\boldsymbol{w}_{\mathrm{a}1} + y\boldsymbol{w}_{\mathrm{b}1}) \times \boldsymbol{r}_{i1}^2, \sum_{i=1}^{n}\frac{1}{2}(x\boldsymbol{w}_{\mathrm{a}2} + y\boldsymbol{w}_{\mathrm{b}2}) \times \boldsymbol{r}_{i2}^2, \cdots, \sum_{i=1}^{n}\frac{1}{2}(x\boldsymbol{w}_{am} + y\boldsymbol{w}_{\mathrm{b}m}) \times \boldsymbol{r}_{im}^2\right]^{\mathrm{T}} \tag{16}$$

求解式(13),得组合权重为

$$\boldsymbol{w} = \boldsymbol{A}^{-1}\left[\boldsymbol{B} + \frac{1 - \boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}^{-1}\boldsymbol{B}}{\boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}^{-1}\boldsymbol{e}}\boldsymbol{e}\right] \tag{17}$$

3　应用评价步骤及分析

以四川某树脂厂的氨气制冷系统为实验载体,选择系统 8 个不同的连续状态进行对比分析,见表 1.

3.1　层次-模糊评价法

该方法基本应用评价步骤在文献[11]中做了详细的完善和阐述.

评价对象集为

$$\boldsymbol{P} = \{\boldsymbol{p}_1, \boldsymbol{p}_2, \cdots, \boldsymbol{p}_8\}^{\mathrm{T}} = \{\text{状态 1}, \text{状态 2}, \cdots, \text{状态 8}\} \tag{18}$$

表 1　选取状态参数值

评价因素	评价对象							
	状态 1	状态 2	状态 3	状态 4	状态 5	状态 6	状态 7	状态 8
p_{suc}	0.24	0.28	0.20	0.20	0.22	0.20	0.26	0.28
p_{dis}	1.25	1.20	1.28	1.27	1.26	1.26	1.22	1.20
T_{suc}	4.7	4.4	6.0	5.8	5.5	6.0	5.0	4.0
T_{dis}	70.2	66.2	85.6	80.0	78.5	82.6	70.0	65.0
K_{c}	50	47	67	70	60	65	60	60
$T_{\mathrm{a,in}}$	24	24	24	24	23	23	23	22
$T_{\mathrm{a,out}}$	33	32	36	37	35	36	33	30
T_{cond}	34	33	40	38	36	38	34	32
$T_{\mathrm{w,in}}$	32	32	32	33	33	33	32	32
$T_{\mathrm{w,out}}$	4.2	3.6	4.8	4.8	5.0	5.0	4.0	3.2
T_{evap}	−6.0	−4.0	−7.0	−6.5	−6.0	−6.6	−5.0	−4.0
Δt_{sh}	10	8	13	12	11	13	10	8
$p_{\mathrm{e\text{-}v,in}}$	1.24	1.19	1.27	1.26	1.25	1.25	1.20	1.18
$p_{\mathrm{e\text{-}v,out}}$	0.26	0.30	0.21	0.22	0.24	0.23	0.27	0.30
$K_{\mathrm{e\text{-}e}}$	70	70	82	85	80	85	75	75

注:p_{suc}—吸气压力;p_{dis}—排气压力;T_{suc}—吸气温度;T_{dis}—排气温度;K_{c}—滑阀开度;$T_{\mathrm{a,in}}$—冷凝器进口水温;$T_{\mathrm{a,out}}$—冷凝器出口水温;T_{cond}—冷凝温度;$T_{\mathrm{w,in}}$—冷冻水入口温度;$T_{\mathrm{w,out}}$—冷冻水出口温度;T_{evap}—蒸发温度;Δt_{sh}—吸气过热度;$p_{\mathrm{e\text{-}v,in}}$—膨胀阀入口压力;$p_{\mathrm{e\text{-}v,out}}$—膨胀阀出口压力;$K_{\mathrm{e\text{-}e}}$—膨胀阀开度.

一级评价因素为压缩机、冷凝器、膨胀阀和蒸发器 4 个,二级评价因素为其所对应的 15 个参数.

在健康工作的范围内调整一级评价因素,其变化对系统运行 COP(Coefficient of Performance) 带来的影响率为:压缩机(97%)>冷凝器(60%)>蒸发器(57%)>膨胀阀(24%). 文献[11]中提到,美国运筹学教授 Saaty T L 给出表 2 的参数可对比一级评价因素之间的相对重要性,给出其 $f(x,y)$ 值,进而求得判定矩阵 $\boldsymbol{Q}$.

表 2 x 比 y 的重要性指标

$f(x,y)$	因素 x 与 y 相比较
1	x 与 y 同等重要
3	x 比 y 稍重要
5	x 比 y 明显重要
7	x 比 y 十分重要
9	x 比 y 极其重要
2,4,6,8	x 比 y 处于上述两相邻判断之间

$$\boldsymbol{Q}=\begin{bmatrix}1 & 9/7 & 9/7 & 9/5\\ 7/9 & 1 & 1 & 7/5\\ 7/9 & 1 & 1 & 7/5\\ 5/9 & 5/7 & 5/7 & 1\end{bmatrix} \tag{19}$$

利用其最大特征值,求出对应特征向量,再归一化处理,即得 4 个一级评价因素的权重向量:

$$\boldsymbol{w}=[\boldsymbol{w}_{\text{comp}},\boldsymbol{w}_{\text{cond}},\boldsymbol{w}_{\text{evap}},\boldsymbol{w}_{\text{e-v}}]=[0.32,0.25,0.25,0.18] \tag{20}$$

依此方法,可求得一级评价因素下对应的各二级评价因素的权重向量为

$$\boldsymbol{w}'_{\text{comp}}=[\boldsymbol{w}_1,\boldsymbol{w}_2,\boldsymbol{w}_3,\boldsymbol{w}_4,\boldsymbol{w}_5]=[0.257,0.250,0.200,0.200,0.086] \tag{21}$$

$$\boldsymbol{w}'_{\text{cond}}=[\boldsymbol{w}_1,\boldsymbol{w}_2,\boldsymbol{w}_3]=[0.263,0.263,0.474] \tag{22}$$

$$\boldsymbol{w}'_{\text{evap}}=[\boldsymbol{w}_1,\boldsymbol{w}_2,\boldsymbol{w}_3,\boldsymbol{w}_4]=[0.230,0.230,0.310,0.230] \tag{23}$$

$$\boldsymbol{w}'_{\text{e-v}}=[\boldsymbol{w}_1,\boldsymbol{w}_2,\boldsymbol{w}_3]=[0.294,0.294,0.412] \tag{24}$$

确定评价尺度集 $\boldsymbol{S}$:

$$\boldsymbol{S}=\{\boldsymbol{s}_1,\boldsymbol{s}_2,\boldsymbol{s}_3,\boldsymbol{s}_4\}^{\mathrm{T}} \tag{25}$$

对每个评价状态的每个相关参数进行量化,构建模糊关系矩阵 $\boldsymbol{R}$,将得到的权重向量 $\boldsymbol{w}$ 与 $\boldsymbol{R}$ 合成得到综合评价向量为

$$\boldsymbol{V}=\boldsymbol{w}\cdot\boldsymbol{R}=\boldsymbol{w}\cdot(\boldsymbol{v}_1,\boldsymbol{v}_2,\boldsymbol{v}_3,\boldsymbol{v}_4)^{\mathrm{T}} \tag{26}$$

各个状态的能效综合分值则为

$$W=\boldsymbol{V}\cdot\boldsymbol{S} \tag{27}$$

依次计算得出 8 个状态的能效综合分值:

$$W=[2.369,2.561,2.364,2.331,2.396,2.345,2.509,2.674] \tag{28}$$

3.2 信息熵法

信息熵法的基本应用步骤也在文献[11]中有了详细的完善和阐述.

为避免构建的矩阵过于庞大,效率低,特选择对能效影响最直接的 9 个二级评价因素,即

$$[p_{\text{suc}},p_{\text{dis}},T_{\text{suc}},T_{\text{dis}},K_{\text{c}},T_{\text{cond}},T_{\text{evap}},\Delta T_{\text{sh}},K_{\text{e-v}}]$$

评价对象集同上所述.

构建评价矩阵:

$$\boldsymbol{U}=\begin{bmatrix}u_{11} & u_{12} & \cdots & u_{19}\\ u_{21} & u_{22} & \cdots & u_{29}\\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots\\ u_{81} & u_{82} & \cdots & u_{89}\end{bmatrix}_{8\times 9} \tag{29}$$

具体参数值如表 1 所示. 由于各参数具有不同的单位,采用指标规范化处理方法将各值映射到区间[0,1]内的值,由于各个参数的运行均有健康的工作区间,故选用区间型的指标规范化处理方法,表达式为

$$r_i=\begin{cases}1-\dfrac{u_i}{c_1} & u_i\in[u_{\min},c_1)\\ 1 & u_i\in[c_1,c_2]\\ 1+\dfrac{c_2}{u_{\max}}-\dfrac{u_i}{u_{\max}} & u_i\in(c_2,u_{\max}]\end{cases}$$

可得规范化矩阵:

$$\boldsymbol{R}=\begin{bmatrix}1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0.83 & 0.62 & 1\\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0.77 & 1\\ 1 & 0.97 & 0.83 & 0.94 & 1 & 0.88 & 0.71 & 0.39 & 1\\ 1 & 0.98 & 0.87 & 1 & 1 & 0.93 & 0.77 & 0.46 & 1\\ 1 & 0.99 & 0.92 & 1 & 1 & 0.98 & 0.83 & 0.54 & 1\\ 1 & 0.99 & 0.83 & 0.97 & 1 & 0.93 & 0.76 & 0.39 & 1\\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0.62 & 1\\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0.77 & 1\end{bmatrix} \tag{30}$$

并对其归一化处理,得 $\dot{\boldsymbol{R}}$.

输出属性的信息熵为

$$\boldsymbol{E}=[\boldsymbol{E}_1,\boldsymbol{E}_2,\cdots,\boldsymbol{E}_9] \tag{31}$$

$$\boldsymbol{E}_j=-\frac{1}{\ln \boldsymbol{m}}\sum_{i=1}^{m}\dot{\boldsymbol{r}}_{ij}\ln\dot{\boldsymbol{r}}_{ij}\quad j=1,2,\cdots,n \tag{32}$$

求得

$$\boldsymbol{E}=[1.000,0.999,0.997,0.999,1.000,1.000,0.996,0.985,1.000] \tag{33}$$

即可求得属性权重:

$$\boldsymbol{w}=[\boldsymbol{w}_1,\boldsymbol{w}_2,\cdots,\boldsymbol{w}_9] \tag{34}$$

$$\boldsymbol{w}_j=\frac{1-\boldsymbol{E}_j}{\sum_{i=1}^{m}(1-\boldsymbol{E}_i)}\quad j\in n \tag{35}$$

$$\boldsymbol{w} = [0,0.042,0.125,0.042,0,0,0.167,0.625,0] \tag{36}$$

最终可求得状态的综合评价值:

$$W = \boldsymbol{R} \cdot \boldsymbol{w}^{\mathrm{T}} \tag{37}$$

$$\boldsymbol{W} = [0.735,0.864,0.532,0.608,0.675,0.557,0.763,0.864] \tag{38}$$

3.3　基于最小二乘法的组合权重的评价方法

选取信息熵法确定的 9 个评价参数,构建 8 个评价状态的标准化矩阵 $\boldsymbol{R}=(\boldsymbol{r}_{ij})_{8\times9}$.

由信息熵法得到的属性权重如式(36)所示.

结合遴选的 9 个评价参数,由层次分析法,求得判定矩阵,进而得到层次分析法的属性权重:

$$\boldsymbol{w}_b = [0.153,0.153,0.119,0.119,0.051,0.119,0.119,0.083,0.083]$$

利用上面 2.3 所述方法,由式(17)求得综合权重,即可由 $W=\boldsymbol{R}\cdot\boldsymbol{w}^{\mathrm{T}}$ 求得状态综合评价值. 两种方法的可信度依次按比例选取,具体对应情况如表 3 所示.

表 3　两种方法不同可信度对应评价值状况

可信度	W
$x/y=3/7$	[0.860,0.925,0.730,0.772,0.820,0.745,0.876,0.929]
$x/y=2/3$	[0.859,0.926,0.731,0.772,0.820,0.746,0.877,0.931]
$x/y=1$	[0.857,0.927,0.732,0.776,0.820,0.746,0.880,0.933]
$x/y=3/2$	[0.858,0.924,0.732,0.774,0.818,0.745,0.878,0.930]
$x/y=7/3$	[0.859,0.928,0.733,0.774,0.820,0.746,0.881,0.935]

由表 3 可知,该方法得到的结果相对稳定,结果判断一致,为方便计算,通常状态两种方法可信度选取 $x/y=1$.

3.4　结果分析

系统的能效评价通常是基于无故障状态下的系统运行优劣比较,主要分两个方面:系统能耗和设备运行状态. 由式(40),依据系统测得参数求得系统能效比值 S_{COP},

$$S_{\mathrm{COP}} = \frac{\boldsymbol{Q}_{\mathrm{e,w}}}{W_{\mathrm{comp}} + W_{\mathrm{others}}} = \frac{\boldsymbol{C}_{\mathrm{e,w}}\boldsymbol{m}\Delta\boldsymbol{t}}{W_{\mathrm{comp}} + W_{\mathrm{others}}} \tag{39}$$

其中,下标 e,w 为流经蒸发器的冷冻水;

计算得 8 个状态的 S_{COP} 值为

$$\{3.6,4,3.2,3.3,3.4,3.3,3.8,4.1\}$$

8 个状态的 3 种方法对应实际的 S_{COP} 变化情况如表 4 所示.

表 4　各种方法计算结果与实际 S_{COP} 变化对比

方法	计算结果
层次-模糊评价法	$W_{z8}>W_{z2}>W_{z7}>W_{z5}>W_{z1}>W_{z3}>W_{z6}>W_{z4}$, $W_{\max}=W_{z8}$, $W_{\min}=W_{z4}$
信息熵法	$W_{z8}=W_{z2}>W_{z7}>W_{z1}>W_{z5}>W_{z4}>W_{z6}>W_{z3}$, $W_{\max}=W_{z2}=W_{z8}$, $W_{\min}=W_{z3}$
基于最小二乘法的组合权重的方法	$W_{z8}>W_{z2}>W_{z7}>W_{z1}>W_{z5}>W_{z4}>W_{z6}>W_{z3}$, $W_{\max}=W_{z8}$, $W_{\min}=W_{z3}$
实际系统 S_{COP} 核算	$W_{z8}>W_{z2}>W_{z7}>W_{z1}>W_{z5}>W_{z4}>W_{z6}>W_{z3}$, $W_{\max}=W_{z8}$, $W_{\min}=W_{z3}$

时间以 min 为单位,选取 240 个状态进行对比,实际对应变化如图 2 ~ 图 5 所示.

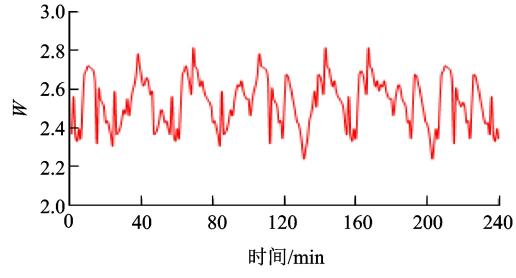


图 2　层次-模糊综合评价法

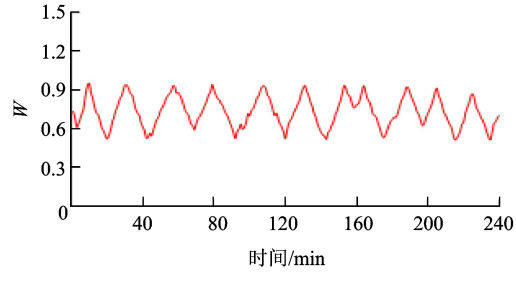


图 3　信息熵法

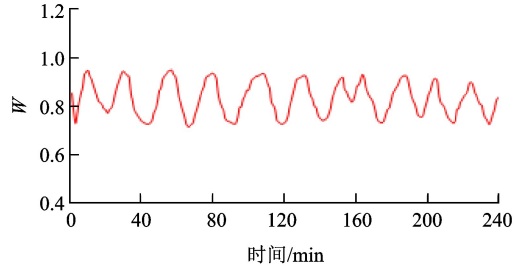


图 4　基于最小二乘法的组合权重的评价方法

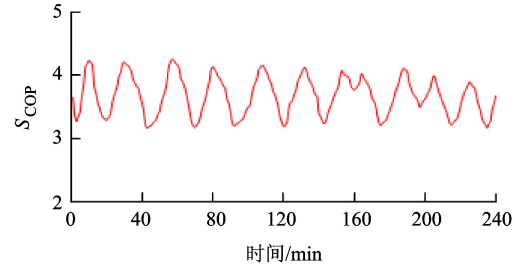


图 5　实际系统 S_{COP} 值的变化情况

实际对比说明:基于最小二乘法的层次分析和信息熵组合权重的评价方法具有较高的准确度,与系统实际能效变化更一致,线性化程度更高.

4 结束语

本文通过分析常用评价方法:层次-模糊评价法和信息熵法的优缺点,提出了基于最小二乘法的层次分析和信息熵组合权重的评价方法,并通过实际案例验证. 结果表明:该方法既避免了层次分析法主观评价值误差带来的评价值偏离,又避免了信息熵法对其过渡变化过于数值性的缺点;使得能效评价结果与实际系统能效比变化一致性高,结果更准确.

参考文献(References)

[1] Alverson K, Bradhey R, Briffa K, et al. Disappearing evidence: The need for a global climate observing system [J]. Global Change News Letter, 2001, 46: 2-6

[2] Ding Guoliang, Ma Xiaokui, Zhang Ping, et al. Practical methods for measuring refrigerant mass distribution inside refrigeration system [J]. International Journal of Refrigeration, 2009: 32(2): 327-334

[3] Kovačic Bojan J. Role of executive agencies for energy efficiency with a view on activities of Serbian energy efficiency agency [J]. Thermal Science, 2012, 16 (Supply 1): 23-33

[4] 王志毅. 热泵空调系统故障检测及诊断研究[D]. 上海:上海交通大学机械与动力工程学院,2004
Wang Zhiyi. Detection and diagnosis research of heat pump [D]. Shanghai: School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, 2004 (in Chinese)

[5] 姜益强. 空气源热泵冷水机组故障诊断[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学市政环境工程学院,2002
Jiang Yiqiang. Fault diagnosis of air source heat pump water chiller [D]. Harbin: School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, 2002 (in Chinese)

[6] 陈庆龙,王磊. SPA 和信息熵法在远程精确打击目标排序中的应用[J]. 四川兵工学报,2013,34(4):134-137
Chen Qinglong, Wang Lei. Application of SPA and entropy method of information in long-rang accurate attack targets sequencing [J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2013, 34(4): 134-137 (in Chinese)

[7] 胡方,黄建国,张群飞. 基于信息熵的水下航行器灰色评估方法研究[J]. 西北工业大学学报,2007,25(4):547-551
Hu Fang, Huang Jianguo, Zhang Qunfei. Improving effectiveness evaluation of underwater vehicle system using information entropy theory [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2007, 25(4): 547-551 (in Chinese)

[8] Mahdi I M, Alreshaid K. Decision support system for selecting the proper project delivery method using analytical hierarchy process (AHP) [J]. International Journal of Project Management, 2005, 23(7): 564-572

[9] 袁杰,史海波,刘昶. 基于最小二乘拟合的模糊隶属函数构建方法[J]. 控制与决策,2008,23(11):1263-1266
Yuan Jie, Shi Haibo, Liu Chang. Construction of fuzzy membership functions based on least squares fitting [J]. Control and Decision, 2008, 23(11): 1263-1266 (in Chinese)

[10] 张业明. 气动执行器和电动执行器的全生命周期综合评价研究[D]. 北京:北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院,2011
Zhang Yeming. Study on overall life cycle comprehensive assessment of pneumatic actuator and electric actuator [D]. Beijing: School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2011 (in Chinese)

[11] 熊德国,鲜学福. 模糊综合评价方法的改进[J]. 重庆大学学报,2003,26(6):93-95
Xiong Deguo, Xian Xuefu. Improvement of fuzzy comprehensive evaluation method [J]. Journal of Chongqing University, 2003, 26(6): 93-95 (in Chinese)

(编 辑:刘登敏)