

火电厂综合能效评价模型的探索

宋晨希 李明佳 何雅玲 陶文铨

(西安交通大学能源与动力工程学院, 热流科学与工程教育部重点实验室, 西安 710049)

摘要 本文对 17 个 1000 MW 的火电机组的能效水平进行了综合评价。基于三个子指标: 发电煤耗率、厂用电率和综合耗水率, 首先采用主观的层次分析法和客观的熵权法相结合确定了各子指标的权重; 其次分别采用可拓物元模型和逼近理想值的排序方法 (Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution, TOPSIS) 对待评价机组分别进行能效等级判断和能效水平排序。对典型机组, 两种模型的实施结果与基于数据的理论分析结果相一致。如果将两种模型配合使用, 可实现对火电机组能效水平的完整评价。

关键词 火电机组; 综合能效; 可拓物元; TOPSIS

中图分类号: TK123 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2015)02-0229-05

Research on Comprehensive Evaluation Model of Energy Efficiency for Fossil Power Plants

SONG Chen-Xi LI Ming-Jia HE Ya-Ling TAO Wen-Quan

(Key Laboratory of Thermo-Fluid Science and Engineering of MOE, School of Energy & Power Engineering, Xi'an 710049, China)

Abstract Integrated energy efficiency evaluation is conducted for 17 fossil power units with the capacity of 1000 MW. The integrated energy efficiency is calculated based on three sub-indicators, namely coal consumption per unit power generated, service power rate, and comprehensive water consumption rate. Firstly, weights for the three sub-indicators are assigned based on subjectively Analytic Hierarchy Process (AHP) and objectively Entropy-Weighting Method. Secondly, Extensive Matter-Element Model and Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution (TOPSIS) are employed to judge energy efficiency grades and rank energy efficiency for the power units. For representative power units, evaluation results of these two methods agree with theoretically analysis result. More comprehensive evaluation results can be obtained if we combined the Extensive Matter-Element Model and the TOPSIS.

Key words fossil power unit; integrated energy efficiency; extensive matter-element; TOPSIS

0 引言

能源与碳排放问题已成为影响人类社会发展和全球政治经济格局的重大战略问题, 是目前全世界共同关注的焦点。化石能源的开发和利用造成了严重的环境污染和生态破坏。提高能源利用效率是解决能源和碳排放问题的有效途径。

我国工业行业能源能耗占全国一次能源消费的 70%以上, 其中高耗能行业占工业能耗的 80%左右^[1]。为促进节能减排, 我国在工业领域开展了一系列能效项目如节能评审、能效对标、能效之星、万家企业节能低碳行动等来促进企业节能。电力行业属于高耗能行业, 我国的电力行业中火力发电的装机容量占发电总装机容量的 70%以上^[2]。煤炭属于

化石能源中燃烧效率较低的能源。提高火电行业的能效水平势在必行。能效评价是提高火电厂能效水平的前提, 也是在火电行业开展能效项目的前提。在各能效项目实施过程中, 决策者更关心的是企业的整体能效水平。本文即通过可拓物元和逼近理想值的排序方法 (Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution, TOPSIS) 两个综合模型来实现对火电厂能效水平的综合评价。

1 评价模型介绍

综合评价是待评价对象整体性能水平的全面度量。综合评价值的计算需要基于离散的性能指标,

收稿日期: 2014-02-26; 修订日期: 2015-01-16

基金项目: 国家节能中心资助项目 (No.20121112); 国家重点基础研究发展计划 (973 计划)(No.2013CB228304)

作者简介: 宋晨希 (1988-), 女, 博士研究生, 主要从事工业行业能效评价理论与方法研究。

其实施有两大步骤: 1) 权重的确定; 2) 综合评价模型的实施。

1.1 权重计算

权重是对描述待评价对象特性的各子指标重要程度的一种度量。本文采用主观的层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP) 法和客观的熵权法相结合的综合权重确定方法。

1.1.1 AHP 法 AHP 法是美国运筹学家萨蒂 (Saaty, T. L.) 于 20 世纪 70 年代提出的一种定性定量分析方法相结合的多目标决策分析方法^[3]。该方法主要通过两两比较某一子指标相对另一子指标的相对重要性, 将个人对指标的重要性判断用数量的形式表示出来, 最终得出指标的权重。AHP 法的实施步骤如下:

1) 构造相对重要性矩阵

通过咨询相关专家或个人主观判断所选取指标两两之间的重要程度, 形成相对重要性矩阵如式 (1) 所示:

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & \cdots & A_{1m} \\ A_{21} & A_{22} & \cdots & A_{2m} \\ \vdots & \vdots & A_{ij} & \vdots \\ A_{m1} & A_{m2} & \cdots & A_{mm} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, A_{ij} 表示指标 i 相对于指标 j 的重要程度, m 为指标个数。 A_{ij} 得分值参考表 1。

表 1 相对重要程度对应数值

Table 1 Values representing relative importance

相对重要性	A_{ij} 量化值	A_{ji} 量化值
同等重要	1	1
稍微重要	3	1/3
较为重要	5	1/5
非常重要	7	1/7
绝对重要	9	1/9
两相邻判断的中间值	2,4,6,8	1/2,1/4,1/6,1/8

2) 求特征值和特征向量

式 (1) 相对重要性矩阵的最大特征值对应的特征向量, 即为 AHP 法相应的权向量。记为 ω_j 。

3) 一致性检验

一致性检验用于判断由式 (1) 所描述的各指标间的关系设置是否一致。一致性是否通过检验系数来判断。一致性指标和检验系数的计算公式如式 (2)、(3) 所示:

$$CI = (\lambda_{\max} - m) / (m - 1) \quad (2)$$

$$CR = CI / RI \quad (3)$$

式中, CI 为一致性指标, λ_{\max} 为相对重要性矩阵的最大特征值, m 为子指标的个数。 RI 为随机平均一

致性指标。其取值可参考表 2。若 $CR < 0.1$, 则说明该判断矩阵可通过一次性检验。

表 2 随机平均一致性指标值

Table 2 Indicator value of stochastic averaging consistency

n	1	2	3	4	5	...
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	...

1.1.2 熵权法 熵由通信工程师香农引入通讯工程, 是对系统不确定度的一种度量。由于熵权法是基于待评价数据的, 因此属于客观的权重判断方法。熵权法的求解步骤如下:

1) 求各评价指标的熵值

在本算例中熵值 E_j 的计算公式为:

$$E_j = (1 / \ln n) \sum_{i=1}^n ((x_{ij} / x_j) \ln(x_{ij} / x_j)) \quad (4)$$

$$x_j = \sum_{i=1}^n x_{ij} \quad (5)$$

式中, x_{ij} 为待评价厂各指标值组成的无量纲化矩阵, i 和 j 分别为待评价机组编号和指标编号, n 为待评价机组个数。若某指标的熵值越大, 说明各机组本指标值的差异程度越小。

2) 归一化处理

归一化是将熵值转化为指标权重 θ_j 的方法。其计算公式如式 (6) 所示。

$$\theta_j = (1 - E_j) / \left(m - \sum_{j=1}^m E_j \right) \quad (6)$$

1.1.3 综合权重的确定 基于 AHP 法和熵权法得到综合权重公式为:

$$\lambda_j = \theta_j \omega_j / \sum_{j=1}^m \theta_j \omega_j \quad (7)$$

式中各变量所代表的值与以上各公式中描述相同。

1.2 综合评价模型

综合评价是实现在各子指标的基础上构造反映待评价对象综合性能水平的综合指标的方法。本文选用可拓物元模型和 TOPSIS 模型两种模型来对火电机组的能效水平进行评价。

1.2.1 可拓物元模型 物元分析理论由我国学者蔡文所创立, 该模型主要是实现判断待评价火电机组所处的能效等级^[4]。其实施步骤如下^[5]:

1) 确定待评价对象

由待评价对象及描述其特性的 m 个指标及各指标取值所组成的矩阵如 (8) 所示:

$$R_P = (P, (c_1, \dots, c_m)^T, (X_{P1}, \dots, X_{Pm})^T) \quad (8)$$

式中, $c_j (j = 1, 2, \dots, m)$ 为某待评价对象各指标值(无量纲化), $X_{Pj} (j = 1, 2, \dots, m)$ 为无量纲化指标取值范围。

2) 确定指标节域和经典域

节域是各指标值的取值范围, 经典域是每个评分等级所属的区间。本文实施过程中所有指标(无量纲化值)的节域为 $[0, 1]$ 和四个经典域分别为 $[0, 0.4]$, $(0.4, 0.6]$, $(0.6, 0.8]$, $(0.8, 1.0]$ 。

3) 计算节域距和经典域距

节域距和经典域距的计算公式如式 (9)、(10) 所示:

$$\rho(c_j, X_{Pj}) = |c_j - 0.5(x_{Pj(\max)} + x_{Pj(\min)})| - \quad (9)$$

$$0.5(x_{Pj(\max)} - x_{Pj(\min)})$$

$$\rho(c_j, X_{Ojk}) = |c_j - 0.5(x_{Ojk(\max)} + \quad (10)$$

$$x_{Ojk(\min)})| - 0.5(x_{Oj(\max)} - x_{Oj(\min)})$$

式中, k 为经典域区间的编号, $\rho(c_j, X_{Pj})$ 和 $\rho(c_j, X_{Ojk})$ 分别为指标 j 的节域距和经典域距, X_{Pj} 和 X_{Ojk} 分别为节域区间和第 k 个经典域区间, $x_{Pj(\max)}$ 和 $x_{Ojk(\max)}$ 分别为节域区间和第 k 个经典域区间的最大值, $x_{Pj(\min)}$ 和 $x_{Ojk(\min)}$ 分别为节域区间和第 k 个经典域区间的最小值。

3) 计算关联函数值和整体关联度

关联函数用于计算指标 j 与各经典域区间的关联程度。其计算公式如式 (11) 所示:

$$K_k(c_j) =$$

$$\begin{cases} -\rho(c_j, X_{Ojk})/|X_{Ojk}| & c_j \in X_{Ojk} \\ \rho(c_j, X_{Ojk})/[\rho(c_j, X_{Pj}) - \rho(c_j, X_{Ojk})] & \\ c_j \notin X_{Ojk} & \end{cases} \quad (11)$$

式中, $K_k(c_j)$ 为第 j 个指标值与第 k 个经典域区间的关联函数值, $|X_{Ojk}|$ 为第 j 个指标所对应的经典域 k 的区间长度。

整体关联度表示待评价对象基于各指标与各经典域的整体关联程度, 其计算公式如式 (12)、(13) 所示。

$$K_k = \sum_{j=1}^m (K_k(c_j) \times \lambda_j) \quad (12)$$

$$K_p = \max\{K_k\} \quad (k = 1, 2, \dots) \quad (13)$$

式中, K_k 为待评价对象与经典域 k 的整体关联度。若待评价单元与某经典域 p 的关联度值 (K_p) 最高, 则此待评价对象的能效水平为经典域 p 所对应的能效等级。

1.2.2 TOPSIS 模型 TOPSIS 模型的基本思想为通过计算待评价单元与正理想解的贴近程度来为各单元的能效水平进行排序。其实施步骤如下:

1) 计算规范化矩阵

若把待评价机组各指标值组成的原始数据记为矩阵 $Y = (y_{ij})_{n \times m}$, 对矩阵 Y 进行规范化得到的规范化矩阵记为 $D = (d_{ij})_{n \times m}$, 其中各元素计算公式为式 (14):

$$d_{ij} = y_{ij} / \sqrt{\sum_{i=1}^n y_{ij}^2} \quad (14)$$

式中, $i=1, 2, \dots, n$; $j=1, 2, \dots, m$ 。 n 为待评价机组个数, m 为指标个数。

2) 构造加权规范化矩阵 Z

将第 1.1.3 节算得的权重系数 λ_j 代入规范化矩阵中, 得到加权规范化矩阵 $Z = (z_{ij})_{n \times m}$ 。其中各元素计算公式为式 (15):

$$z_{ij} = d_{ij} \lambda_j \quad (15)$$

3) 计算 z_i 到理想解和负理想解的距离

到理想解和负理想解距离的计算公式分别为式 (16)、(17):

$$S_i^* = \left[\sum_{i=1}^m (z_{ij} - z_j^*)^2 \right]^{1/2} \quad (16)$$

$$S_i^- = \left[\sum_{i=1}^m (z_{ij} - z_j^-)^2 \right]^{1/2} \quad (17)$$

式中, S_i^* 为待评价机组 i 到理想解的距离, S_i^- 为待评价机组 i 到负理想解的距离。

4) 确定 z_i 到理想解的贴近程度

贴近程度的计算公式为式 (18)。

$$C_i^* = S_i^- / (S_i^* + S_i^-) \quad (18)$$

式中, $0 \leq C_i^* \leq 1$ 。 C_i^* 越大, 表示第 i 个待评价对象与理想解的贴近程度越大, 能效水平越高。

2 数据搜集和处理

本文所采用的数据来自中国电力企业联合会官方网站上发布的《2012 年度火电 500~1000 MW 机组竞赛得分统计表》。本文选取了其中 17 个 1000 MW 火力发电机组作为综合能效评价实施对象。选取的

三个子指标分别为：发电煤耗率、厂用电率、发电综合耗水率。各指标值如表 3 所示。首先按式 (19) 将各指标值进行无量纲化：

$$x_{ij} = (y_{j \max} - y_{ij}) / (y_{j \max} - y_{j \min}) \quad (19)$$

式中， x_{ij} 为无量纲化后机组 i 对应的指标 j 的取值， $y_{j \max}$ 和 $y_{j \min}$ 分别为数据库中所有 1000 MW 机组指标 j 的最大和最小取值。

表 3 1000 MW 火电机组原始数据

Table 3 Original data for fossil power units

机组编号	发电煤耗率/ (g/kWh)	厂用电率/ %	综合耗水率/ (kg/kWh)
A	265.37	3.8	0.3
B	265.94	3.8	0.3
C	273.66	4.71	0.23
D	270.72	4	0.1
E	278.15	2.6	0.26
F	277.44	2.84	0.27
G	277.85	4.15	0.32
H	272.15	3.95	0.16
I	276.09	4.17	0.28
J	275.28	3.94	0.21
K	273.20	4.11	0.4
L	277.61	4.42	0.39
M	279.29	3.61	1.87
N	273.35	3.78	1.65
O	283.83	4.67	0.19
P	280.57	4.01	0.19
Q	284.21	4.66	0.32

注：数据来源：<<http://kjfw.cec.org.cn/kejifuwu/2013-04-07/99877.html>>

3 模型实施及结果分析

3.1 模型实施

依据 1.1 节所描述的权重的实施步骤，算得发电煤耗率、厂用电率和综合耗水率三个子指标的综合权重的值为：0.654, 0.279 和 0.0674。

依据 1.2.1 节所描述综合模型的实施步骤，基于表 3 中数据的无量纲化值可得可拓物元模型的实施结果如表 4 所示。17 个电厂中大部分属于一般水平。TOPSIS 模型实施所得各火电机组的能效水平如图 1 所示，可以看出能效水平最高的火电机组为 A，能效水平最低的火电机组为 Q。

表 4 各机组基于可拓物元模型的等级评价结果

Table 4 Energy efficiency grades of power units based on extensive mater-element model

机组编号	优秀 (A, B, D, F)	良好 (C, H, K, N)	一般 (E, G, I, J, L, M, P)	差 (O, Q)
------	--------------------	--------------------	-----------------------------	-------------

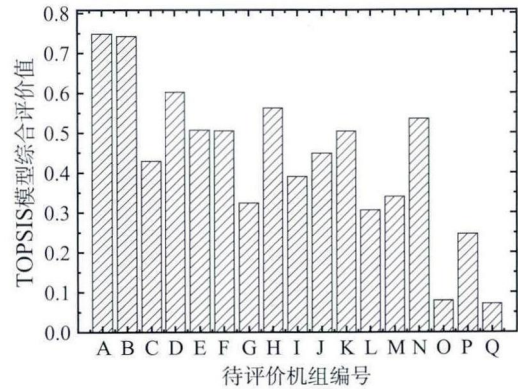


图 1 各机组基于 TOPSIS 模型的综合能效值

Fig. 1 Integrated energy efficiency values of power units based on TOPSIS

两种模型的能效评价结果对比如表 5 所示。表中机组编号按照 TOPSIS 评价价值由高到低排列。

表 5 两个综合评价模型实施结果对比

Table 5 Comparison of evaluation results based on two models

机组编号	TOPSIS	可拓物元	机组编号	TOPSIS	可拓物元
A	1	优秀	C	10	良好
B	2	优秀	I	11	一般
D	3	优秀	M	12	一般
H	4	良好	G	13	一般
N	5	良好	L	14	一般
E	6	一般	P	15	一般
F	7	优秀	O	16	差
K	8	良好	Q	17	差
J	9	一般	-	-	-

3.2 结果分析

从表 3 的原始数据可知机组 A 三个子指标的数据值都优于 B，并优于 Q。表 5 中 TOPSIS 评价结果表明机组 A 的能效水平高于机组 B，且高于 Q，可拓物元模型评价结果机组 A、B 属于优秀等级，机组 Q 属于较差等级。这说明可拓物元模型和 TOPSIS 模型的评价结果与基于数据的分析是一致的。但类似的一致性分析只能在子指标间相互关系一致的典型机组之间进行。可拓物元模型和 TOPSIS 模型可以分别解决三个子指标相互关系不一致的机组能效分级和能效排序问题。

从表 5 可以看出，两种模型的计算结果大体一致，但个别机组结果有差别。如机组 E 和机组 F。E 在 TOPSIS 模型中排在第 6 位，优于 F，但可拓物元模型中 E 为一般等级，而 F 属于优秀等级。其原因分析如下：1) 可拓物元模型与所处的数据组无关，而 TOPSIS 模型中计算规范化矩阵步骤导致其

评价结果严重依赖数据组, 当某两机组处于两组不完全相同的待评价机组集合时, 得到的评价结果相对大小就可能会有所不同。如基于 TOPSIS 仅评价机组 E 和机组 F 得到的评价结果是 F(0.454) 优于 E(0.516), 这与本文中机组 E 和 F 处于 17 个机组组成的数据组评价结果是不同的。2) 权重在两个模型中所起的作用不同。虽然两个模型选用同一组权重, 但应用的位置及计算公式不同会导致权重发挥的作用不同。可拓物元模型中权重被应用在最后一步求整体关联度, 计算方式是加权求和。而 TOPSIS 模型在第二步计算加权规范化矩阵, 其后模型实施中权重值也参与计算, 参与方式如式 (15)~(17) 所示。以上两个原因导致描述机组 F 的子指标厂用电率在可拓物元模型中所起的作用高于其在 TOPSIS 模型中所起的作用。

可拓物元模型可实现判断待评价火电机组的能效等级, TOPSIS 模型可实现对火电机组能效水平进行排序, 两者实现的功能不同。在实际使用中, 如果先依据可拓物元模型对待评价机组的能效划分能效等级, 再利用 TOPSIS 模型对同一能效等级中的机组能效水平进行排序, 则更能充分发挥各自优势, 实现对火电机组能效水平更全面的评价。

4 结 论

本文基于三个子指标: 发电煤耗率、厂用电率和综合耗水率, 对 17 个 1000 MW 的火电机组的能效水平进行了综合评价。采用了主观的 AHP 法和客观的熵权法相结合的综合权重确定方法, 并通过可拓物元模型实现了对各火电机组能效等级划分, 通过 TOPSIS 模型实现了对各火电机组能效水平的排序。得到了以下结论:

1) 可拓物元和 TOPSIS 两个模型在火电机组能效评价中具有一定的可靠性。本文所采用的两种评价模型可以解决子指标相互关系不明显的机组能效

评价问题。

2) 个别机组基于可拓物元和 TOPSIS 两个模型的评价结果有差异, 其原因为: TOPSIS 模型评价结果严重依赖待评价数据组, 而可拓物元模型的评价结果与数据组无关; 权重在两个模型中发挥的作用不同。

3) 可拓物元模型和 TOPSIS 模型配合使用, 既可实现对火电机组能效等级划分, 又可实现同一等级中机组能效水平排序, 是对火电机组的完整评价。

参 考 文 献

- [1] 中国科学院学部. 我国工业节能现状调研与对策 [J]. 院士与学部, 2010, 25(3): 207-208
The Chinese Academy of Sciences. Survey and Countermeasure for Industrial Energy Saving in China [J]. CAS Members & Academic Divisions, 2010, 25(3): 207-208
- [2] 毛健雄. 中国火电技术的发展和世界超超临界技术的最新发展——发展超超临界机组对于 CO₂ 减排的重大意义 [C]// 600/1000 MW 超超临界机组技术交流 2009 年会. 上海: 中国电力科技网, 2009
MAO Jianxiong. Development Direction of Thermal Power Technology in China and Recent Development of Ultra-supercritical Technology Around the World—The Significance of Developing Ultra-supercritical Thermal Unit for CO₂ Emission Reduction [C]// Annual Communication Meeting on Technology of 600/1000 MW Ultra-supercritical Thermal Unit. Shanghai, China: Website of China Electric Power Technology, 2009
- [3] Saaty T L. The Analytic Hierarchy Process [M]. New York: McGraw-Hill, 1980
- [4] 蔡文. 物元模型及其应用 [M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1994
CAI Wen. Matter-element Model and Its Application [M]. Beijing: Scientific and Technical Documentation Press, 1994
- [5] ZHOU Liang, LU Jianming, ZENG Ming, et al. Analysis of Matter-element Model on Evaluation of the Power Supply Service Quality [C]// 2009 Sixth International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery. Tianjin, China: IEEE Computer Society, 2009: 198-202