

基于模糊综合评判法的锅炉系统能效研究

霍睿敏, 卢 玫

(上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093)

摘要: 为了科学全面地评价电厂锅炉系统能效,采用模糊综合评判法,从工程实践的技术经济性角度出发,以锅炉系统能效为一级目标层,选取了关于燃料水平、设备水平和运行状况作为二级准则层,并将具体影响因素归类整理为三级指标层.分析各因素值变化对系统能效的指向性影响,确定隶属度函数,通过专家组评议求得权重向量,建立了一套完整的锅炉系统能效模糊综合评判体系.该体系可对锅炉系统能效进行定量分析,评价某层面的能效利用现状,为后续优化指明方向,也可用于机组间的竞赛对比.

关键词: 锅炉系统;能效;模糊综合评判法

中图分类号: TK 22 **文献标志码:** A

Energy Efficiency of Boiler Systems Based on Fuzzy Comprehensive Evaluation

HUO Ruimin, LU Mei

(School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: In order to evaluate the energy efficiency of boiler systems scientifically and comprehensively, a fuzzy comprehensive evaluation method was proposed. From the angle of technical economy in engineering practice, the energy efficiency of boiler systems was defined as the primary target layer. The fuel level, equipment level and operation condition were selected and adopted as the secondary criterion layer. The specific factors were classified and applied as the tertiary index layer. By analyzing the factors' directivity effect on system energy efficiency, membership functions were determined. And the weight vector was obtained by the expert group review. So, a complete fuzzy comprehensive evaluation system was established. It can be used to quantitatively analyze the efficiency of boiler systems, as well as to evaluate the current utilization situation of energy efficiency in certain layer. It can provide advices for the subsequent optimization and the working condition comparison among units.

Keywords: boiler system; energy efficiency; fuzzy comprehensive evaluation

收稿日期: 2016-10-31

第一作者: 霍睿敏(1991-),女,硕士研究生.研究方向:热力系统能效研究. E-mail: hrm11111@qq.com

通信作者: 卢玫(1958-),女,教授.研究方向:强化传热和能量有效利用. E-mail: rose_luu@usst.edu.cn

锅炉系统是电厂能量转化、交换的主要设备,为了进一步发掘其节能潜力,应该建立一套完整的锅炉系统能效评价体系.而传统能效分析方法主要有热量法和热焓法:热量法模型高度简化,越来越难以适应当今高参数、结构复杂的电厂系统;热焓法揭示能量转换利用中的内部损失,却只能诊断不可逆性的大小及部位,还需进一步研究.

张森^[1]对锅炉各环节进行了宏观与微观的熵分析;王雨丝、李永华等^[2-3]对电站锅炉系统进行热平衡和焓平衡分析,得出主要热损失为排烟损失和炉体散热损失,主要焓损失为传热焓损失和燃烧焓损失,并提出相应改进措施.但热量法与热焓法都只关注热力系统中能量在传递转换过程中的利用、损耗情况,对于工程实践问题,还应综合考虑其他各项因素,才能更全面合理地构建评价体系.

模糊综合评判法(FCE)可以处理多属性事物问题,优势在于结果清晰且可对比性强,既由层次性体现了影响因素及评价标准的模糊性,又可以借鉴实践经验,使评价结果更符合实际,能对复杂系统进行综合有效的评估,所以在工程管理中得到广泛应用.

当前对电厂系统建立综合评价的指标体系,多侧重管理需求角度,靳涛、满若岩等^[4-5]确定的评价体系有可靠性、经济性、技术监督指标及主要运行小指标4类.李勇等^[6]综合评价了经济、运行及运维指标,主要偏向于电网调度的要求.何成兵等^[7]针对燃煤锅炉,重点考虑环保因素,分析焓效率及环境影响、燃料管理指标的影响.刘京等^[8]考虑能源利用水平和燃料设备、运行操作对电站锅炉煤耗的影响,结合热焓法,给出了系统改进方向.

为了更科学合理地安排指标体系,本文在前人研究的基础上,采用模糊综合评判法,从电厂技术经济性角度出发,以锅炉系统能效为目标层,引入燃料水平、电厂设备、运行状况准则层及其所包含的指标层,构建电厂锅炉系统能效评价指标体系,评估电厂锅炉系统的能源利用现状,找出薄弱环节,为后续优化提供依据.

1 模糊综合评判法

模糊综合评判法以模糊数学为理论基础,根据其总体目标受多项因素影响程度,归纳划分隶属等级,用隶属度来描述模糊界限,把模糊关系合成,然后依层逐次综合进行整体判断.可以将定性评价转化为定量评价,其基本思想可作以下归纳^[9].

首先分析对评价对象造成影响的因素,并按种属关系合理分层分类,在每一层级中,都按照相同思想完成以下步骤:将同一上层因素下包含的所有因素,构成集合 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$;将评价结果按等级分层,对应评价集 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$;而因素集 X 与评价集 V 之间的模糊关系,可以用隶属度评价矩阵 R 来表示,式(1)中 r_{ij} 表示因素 $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 对评价结果 $v_j (j = 1, 2, \dots, m)$ 的隶属度.

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix} \quad (1)$$

然后根据各因素对上一层因素的重要性程度分配相应权重,建立权重向量 $W = (w_1 \ w_2 \ \cdots \ w_n)$.接着进行模糊综合运算,将权重向量 W 和各因素评价矩阵 R 合成,得到其所属上一层因素的评价结果向量 B .

$$B = WR = (w_1 \ w_2 \ \cdots \ w_n) \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix} = (b_1 \ b_2 \ \cdots \ b_n) \quad (2)$$

最后按照层级次序,由低层级向高层级的方向,将评价结果与权重逐步合成,可得目标层的最终评价结果,在不同机组间也可用来评判比较.

2 影响锅炉系统能效的因素分析

采用模糊评判法,首先需要确定影响锅炉能效的因素.由常用的热平衡与焓平衡分析可知,锅炉系统能效损耗主要由不完全燃烧损失、锅炉散热损失及排烟损失造成.而反映到具体的运行环节中,对锅炉系统能效有影响的主要因素可以归纳为所用燃料水平、设备自身情况及系统运行控制3个方面.

2.1 燃料水平

水分与灰分都是燃料中的主要杂质.燃烧过程中水分汽化吸热,降低了燃料发热量,燃料难于着火且会结渣,水蒸气随排烟带走大量热量,加剧腐蚀烟道.灰分增多会造成燃烧困难,燃烧后锅炉出灰量大,易在受热面积灰结渣,烟气流速高时灰粒会对烟道进行剧烈磨损.

燃料的低位发热量取决于可燃物含量,发热量越高,燃烧过程获得能量越多,炉内温度升高,更易于燃料的着火与燃烧.

2.2 设备水平

锅炉运行实际负荷较低,可能难以满足用汽需求,随燃料消耗量及产热的减少,燃料未完全燃烧热损失及散热损失增加。而锅炉超负荷运行会增大设备压力,炉膛温度升高,可能引发安全隐患。负荷变化很大时,会增加燃烧调整难度,影响运行稳定性。

漏风系数反映了设备结构的严密性与密封性,锅炉多为微负压燃烧,防止燃烧产物外漏。主要监测部位有炉膛、空气预热器及尾部烟道,漏风系数直接关系到外部空气的渗入,严重的漏风会使烟气温度降低,加大排烟损失,传热性能变差。

2.3 系统运行状况

过量空气系数 α 主要影响燃烧状况,如果 α 偏小,锅炉内不完全燃烧热损失增大;如果空气过量太多,会使炉膛温度降低,燃烧速度降低,导致排烟热损失增大。

送风入口风温度如果过低,会造成空气预热器入口段结露堵灰,运行经济性降低。在实际运行过程中,应利用自然条件或废热利用来升高送风入口风温度。

飞灰可燃物含量反映燃料在炉膛内未完全燃烧程度,含量越大,说明机械未完全燃烧损失越大,燃料利用率低,且会磨损设备,甚至引起燃烧火焰拉长等不良影响。

排烟温度可以体现锅炉燃烧时的通风量是否合

理,若通风量不合适,会使炉膛温度降低,烟温提高,造成燃料浪费。排烟温度低,会导致介质受热度减少,易发生结露、堵灰、腐蚀。

烟气氧含量主要来自于空气中在炉膛内未参与燃烧的氧量,及烟道行程设备的漏风氧量。烟气氧含量增多会导致烟气量增多,排烟热损失增加,引风机负荷增大。

主蒸汽温度与主蒸汽压力都是直接关系火电厂运行经济性的主要参数。温度、压力的升高会提升锅炉效率,减少供电煤耗,但如果过高也会引起后续汽轮机设备的调节级叶片过负荷,影响机械强度,导致设备损坏,不利于安全生产。

锅炉系统辅机主要包括给煤机、磨煤机、给水泵、疏水泵、引风机、一次风机、二次风机、电除尘等,其耗能情况直接影响到系统能效。

3 锅炉系统能效的模糊综合分析

3.1 影响锅炉系统能效水平的因素选取

根据上述分析,本文将锅炉系统能效定为一级目标层,设立燃料水平、设备水平及系统运行状况为3个并行的二级准则层,并在二级准则层下将对应的各影响因素设为三级指标层,由此构成锅炉系统能效综合评价的指标体系^[10-11],如图1所示。

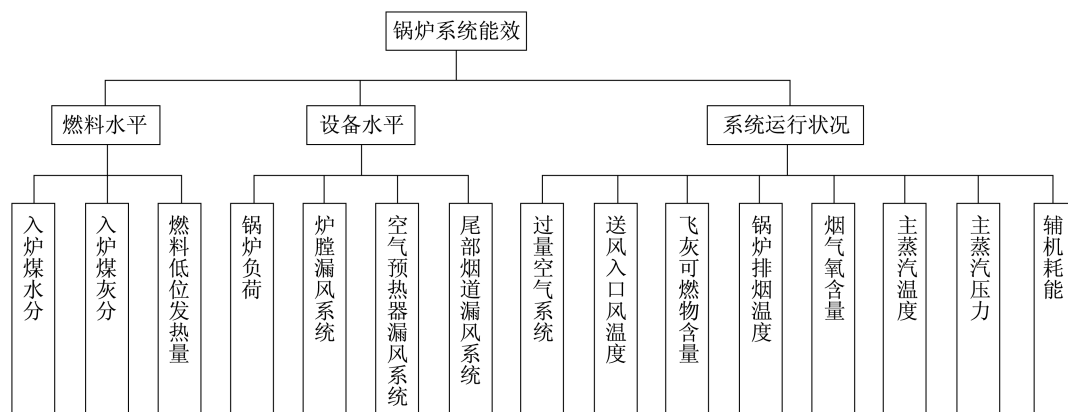


图1 锅炉系统能效综合评价指标体系

Fig.1 Comprehensive evaluation index system of the energy efficiency of boiler systems

3.2 评价集及隶属度函数确定

对于锅炉系统能效的评价,设立评价集 $V = \{\text{差,合格,良好,优秀}\}$,各项因素的评分取最佳状态为1,最差状态为0,具体评价集的等级划分见表1。

三级指标层的具体得分由隶属度函数确立。以实际值 x_{ij} 与设计值 x_{ij}^0 的数量关系之比为横坐标基准,根据每个因素的具体变化对锅炉系统能效的

表1 评价集等级划分

Tab.1 Grade classification of evaluation

评语	差	合格	良好	优秀
得分范围	0~0.60	0.60~0.75	0.75~0.90	0.90~1

指向性影响,确定评价得分的隶属度函数走向,主要分为正向型、负向型及区间型隶属函数,采取梯形和半梯形形式^[8]。规定各因素对系统能效影响最优时

隶属度得分为 1, 最差时隶属度得分为 0.

正向型隶属度得分函数表达式和图像如式(3)和图 2 所示; 负向型隶属度得分函数表达式和图像如式(4)和图 3 所示; 区间型隶属度得分函数表达式和图像如式(5)和图 4 所示. 图中, a, b, c, d 为各因素实际值与设计值的数量比, 用以分隔函数定义域的分段区间.

$$\mu(x_{ij}) = \begin{cases} 0, & x_{ij} \leq ax_{ij}^0 \\ \frac{ax_{ij}^0 - x_{ij}}{(a-b)x_{ij}^0}, & ax_{ij}^0 < x_{ij} < bx_{ij}^0 \\ 1, & x_{ij} > bx_{ij}^0 \end{cases} \quad (3)$$

$$\mu(x_{ij}) = \begin{cases} 1, & x_{ij} \leq ax_{ij}^0 \\ \frac{x_{ij} - bx_{ij}^0}{(a-b)x_{ij}^0}, & ax_{ij}^0 < x_{ij} < bx_{ij}^0 \\ 0, & x_{ij} > bx_{ij}^0 \end{cases} \quad (4)$$

$$\mu(x_{ij}) = \begin{cases} 0, & x_{ij} \leq ax_{ij}^0 \\ \frac{ax_{ij}^0 - x_{ij}}{(a-b)x_{ij}^0}, & ax_{ij}^0 < x_{ij} < bx_{ij}^0 \\ 1, & bx_{ij}^0 < x_{ij} < cx_{ij}^0 \\ \frac{x_{ij} - dx_{ij}^0}{(c-d)x_{ij}^0}, & cx_{ij}^0 < x_{ij} < dx_{ij}^0 \\ 0, & x_{ij} \geq dx_{ij}^0 \end{cases} \quad (5)$$

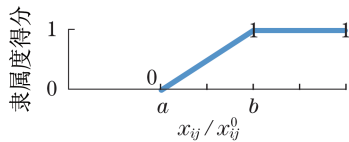


图 2 正向型隶属度得分函数图像

Fig.2 Positive type membership function image

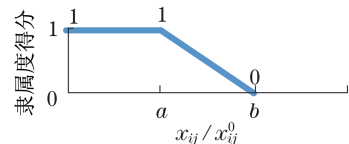


图 3 负向型隶属度得分函数图像

Fig.3 Negative type membership function image

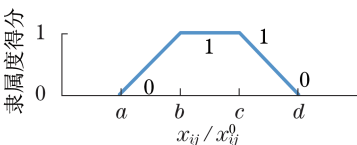


图 4 区间型隶属度得分函数图像

Fig.4 Interval type membership function image

在同一准则层下, 计算出各元素在不同状态下参数变化对应的隶属度得分, 排布为横行, 再将该准则层下所有元素的隶属度得分顺次按行排列, 构成

的矩阵即为此准则层下元素的隶属度集评价矩阵.

3.3 评价因素权重的确定

评价因素的权重是依照元素重要性程度进行定量分配的参数, 以上一层元素为基准, 将其下一层包含的元素两两比较, 用 1~9 级标度法^[12]表明元素集 X 的相对重要程度, 如表 2 所示.

表 2 1~9 级标度及其含义

Tab.2 1~9 scales and their implications

标度	含义
1	两因素同样重要
3	两因素中一个比另一个稍微重要
5	两因素中一个比另一个明显重要
7	两因素中一个比另一个非常重要
9	两因素中一个比另一个极端重要
2, 4, 6, 8	两因素相比, 重要关系介于上述两者间

评价因素权重通常是由富有经验的专家组打分确定. 本文邀请 10 位富有实践经验的工程师、教授打分, 并取其算术平均值, 得到二级准则层及一级目标层下各元素的重要性标度集.

燃料水平准则层: $M_1 = \{3, 2, 7\}$

设备水平准则层: $M_2 = \{5, 3, 2, 4\}$

系统运行状况准则层: $M_3 = \{3, 2, 2, 5, 3, 4, 3, 7\}$

锅炉系统能效目标层: $M_4 = \{4, 3, 7\}$

在每一准则层下, 有 n 个因素, 可以构造判断矩阵 A , 定义

$$A = (a_{ij})_{n \times n} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中, $a_{ij} = f(x_i, x_j)$ 由元素 x_i 与 x_j 的重要性标度系数 m_i, m_j 两两相比得出, 可知 a_{ij} 与 a_{ji} 互为倒数, 当 $i = j$ 时, $a_{ij} = 1$.

因判断矩阵受人的主观判断影响, 与客观重要程度存在一定误差, 为保证结果在合理精度范围内, 就需要进行一致性检验. 当一致性比率 $C_R < 0.10$ 时, 判断矩阵构建合理, 求出最大特征向量, 进行归一化处理, 利用几何平均法^[6]可得到权重向量 W , 计算如下:

$$W = \bar{w} / \sum_{j=1}^n \bar{w}_j \quad (7)$$

式中, $\bar{w}$ 为判断矩阵每行元素乘积的 n 次方根组成的 n 行 1 列矩阵, 即 $\bar{w}_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}}$.

由此在燃料水平、设备水平、系统运行状况3个准则层下,通过一致性检验后,可以得出各自的判断矩阵与权重向量分别为

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1 & \frac{3}{2} & \frac{3}{7} \\ \frac{2}{3} & 1 & \frac{2}{7} \\ \frac{7}{3} & \frac{7}{2} & 1 \end{bmatrix}$$

$$W_1 = (0.250 \quad 0.167 \quad 0.583)$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} 1 & \frac{5}{3} & \frac{5}{2} & \frac{5}{4} \\ \frac{3}{5} & 1 & \frac{3}{2} & \frac{3}{4} \\ \frac{2}{5} & \frac{2}{3} & 1 & \frac{1}{2} \\ \frac{4}{5} & \frac{4}{3} & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

$$W_2 = (0.357 \quad 0.214 \quad 0.143 \quad 0.286)$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} 1 & \frac{3}{2} & \frac{3}{2} & \frac{3}{5} & 1 & \frac{3}{4} & 1 & \frac{3}{7} \\ \frac{2}{3} & 1 & 1 & \frac{2}{5} & \frac{2}{3} & \frac{1}{2} & \frac{2}{3} & \frac{2}{7} \\ \frac{2}{3} & 1 & 1 & \frac{2}{5} & \frac{2}{3} & \frac{1}{2} & \frac{2}{3} & \frac{2}{7} \\ \frac{5}{3} & \frac{5}{2} & \frac{5}{2} & 1 & \frac{5}{3} & \frac{5}{4} & \frac{5}{3} & \frac{5}{7} \\ 1 & \frac{3}{2} & \frac{3}{2} & \frac{3}{5} & 1 & \frac{3}{4} & 1 & \frac{3}{7} \\ \frac{4}{3} & 2 & 2 & \frac{4}{5} & \frac{4}{3} & 1 & \frac{4}{3} & \frac{4}{7} \\ 1 & \frac{3}{2} & \frac{3}{2} & \frac{3}{5} & 1 & \frac{3}{4} & 1 & \frac{3}{7} \\ \frac{7}{3} & \frac{7}{2} & \frac{7}{2} & \frac{7}{5} & \frac{7}{3} & \frac{7}{4} & \frac{7}{3} & 1 \end{bmatrix}$$

$$W_3 = (0.112 \quad 0.069 \quad 0.069 \quad 0.171 \quad 0.112 \quad 0.115 \quad 0.112 \quad 0.240)$$

同样,在锅炉系统能效目标层下,求得3类准则层的权重向量 $W_4 = (0.286 \quad 0.214 \quad 0.5)$.

4 评判实例

某电厂采用 G-75/5.29-M12 次高温、次高压循环流化床锅炉系统,根据某段时间内监测运行参数,进行能源利用现状评价.

因锅炉系统长期使用同样煤种,设备情况差别不大,且保持相对稳定运行状态,所以取一段时期内的参数,经处理得算术均值为代表值,由隶属度函数对应计算得分,所得准则层下的隶属度集评价矩阵 $R = (r_{ij})_{n \times 1}$ 为单列矩阵.由指标层向准则层、再向目标层综合推进计算,评判结果如表3~5所示.

表3 燃料水平准则层下的模糊综合评判结果表

Tab.3 Fuzzy comprehensive evaluation results of the fuel level criterion layer

项目	入炉 煤水分/%	入炉 煤灰分/%	燃料低位 发量/(kJ·kg ⁻¹)
设计值	9.48	31.09	19 040
实际值	22.40	10.13	20 160
隶属度类型	负向	负向	正向
隶属得分 r_{1j}	0	1	1

表4 设备水平准则层下的模糊综合评判结果表

Tab.4 Fuzzy comprehensive evaluation results of the equipment level criterion layer

项目	锅炉负荷/ (t·h ⁻¹)	炉膛漏风 系数/%	空气预热器 漏风系数/%	尾部烟道 漏风系数/%
设计值	75	5.0	5.0	1.0
实际值	65	5.3	5.1	1.1
隶属度类型	区间	负向	负向	负向
隶属得分 r_{2j}	0.667	0.76	0.92	0.60

表5 系统运行状况准则层下的模糊综合评判结果表

Tab.5 Fuzzy comprehensive evaluation results of the system operation condition criterion layer

项目	过量空气 系数	送风入口 风温度/℃	飞灰可燃物 含量/%	锅炉排烟 温度/℃	烟气 氧含量/%	主蒸汽 温度/℃	主蒸汽 压力/MPa	辅机 耗能/kW
设计值	1.30	150	3.0	150.0	5	485	5.29	946
实际值	1.25	148	3.2	156.6	6	483	4.95	883
隶属度类型	区间	正向	负向	区间	负向	区间	区间	负向
隶属得分 r_{3j}	0.858	0.911	0.333	0.815	0.313	1	0.510	0.666

对于该电厂的锅炉系统,由上文得到的根据某段时间内电厂监测的运行参数,进行能源利用现状

评价,得分 $B = WR$,可得各准则层与目标层的模糊综合评判得分如下.

燃料水平准则层:

$$\mathbf{B}_1 = \mathbf{W}_1 \mathbf{R}_1 = (0.250 \ 0.167 \ 0.583) \cdot \\ (0 \ 1 \ 1)^T = 0.75$$

设备水平准则层:

$$\mathbf{B}_2 = \mathbf{W}_2 \mathbf{R}_2 = (0.357 \ 0.214 \ 0.143 \ 0.286) \cdot \\ (0.667 \ 0.76 \ 0.92 \ 0.6)^T = 0.704$$

系统运行状况准则层:

$$\mathbf{B}_3 = \mathbf{W}_3 \mathbf{R}_3 = (0.112 \ 0.069 \ 0.069 \ 0.171 \ 0.112 \\ 0.115 \ 0.112 \ 0.24)(0.858 \ 0.911 \ 0.333 \ 0.815 \\ 0.313 \ 1 \ 0.510 \ 0.666)^T = 0.688$$

锅炉系统能效目标层:

$$\mathbf{B}_4 = w_{41} \mathbf{B}_1 + w_{42} \mathbf{B}_2 + w_{43} \mathbf{B}_3 = 0.714$$

由上可得,该电厂锅炉系统在燃料水平、设备水平、系统运行状况3个准则层的得分分别为0.75, 0.704, 0.688,对应评语都为合格,整体系统能效得分为0.714,属于合格一类,仍然有很大的节能提升空间。

具体从表3~5内各准则层下元素的评判结果可以得出:燃料水平偏低,实际燃料的水分较大,煤质较差不利于燃烧,而后续飞灰可燃物含量偏高,说明燃烧状况不太理想。该段时间内锅炉负荷设置也不太合理,可以结合实际生产需要适当小幅加荷。因设备使用年限长,锅炉系统的漏风情况较严重,引起外部空气内渗,加大了排烟量,烟气氧含量偏高,且辅机耗能相对较大,需要注意控制并合理检修维护,以提高整个锅炉系统的能效状况。

5 结束语

模糊综合评判法可以将难以界定的模糊关系转换为定量分析,通过科学客观的整合评判,结合层次分析法,有效解决多属性、非确定性问题,以此为基础能够极大提升技术管理水平,在复杂工程系统问题研究方面有广阔的应用前景。本文基于该方法对电厂锅炉系统能效进行评判,根据工程运行实际,综

合考虑技术管理方面的影响因素,建立了三级评价指标体系,对能源利用现状进行综合分析。

通过此次分析,可以综合评价得分与权重比例,主要针对运行过程中能源利用率低的环节,进行电厂锅炉系统的技术改造,从而提升能效水平与经济效益。该模糊综合评价体系也可以推广至其他电厂的考核管理,其分析方法与评定结果都有一定的借鉴意义。

参考文献:

- [1] 张森.电厂锅炉的热力学分析[D].沈阳:东北大学,2008.
- [2] 王雨丝,夏家群,和浩浩,等.600 MW超临界火力发电机组锅炉效率分析[J].工业加热,2016,45(1): 5-8.
- [3] 李永华,孙刚,仇元刚,等.电站锅炉的烟效率分析[J].锅炉技术,2009,40(5):27-30.
- [4] 靳涛,付忠广,满若岩,等.火电厂综合评估的模糊评价法[J].热能动力工程,2010,25(5):473-477.
- [5] 满若岩,付忠广.基于模糊综合评判的火电厂状态评估[J].中国电机工程学报,2009,29(5):5-10.
- [6] 李勇,何蕾,庞传军,等.基于层次分析法的火电厂运行情况量化评价方法[J].电网技术,2015,39(2): 500-504.
- [7] 何成兵,刘京,顾煜炯.燃煤电站锅炉系统能效评价方法研究[J].煤炭学报,2015,40(4):951-958.
- [8] 刘京,宋磊,何成兵.评价电站锅炉能源效率的模糊综合评判方法研究[J].锅炉技术,2014,45(6):26-31.
- [9] 谢季坚,刘承平.模糊数学方法及其应用[M].4版.武汉:华中科技大学出版社,2013.
- [10] 蒋明昌.火电厂能耗指标分析手册[M].北京:中国电力出版社,2011.
- [11] 赵奕奕,张万路.提高工业锅炉和蒸汽系统效率培训教材[M].北京:中国计量出版社,2007.
- [12] 缪宛新,杨玉新,张旭峰.火电厂可持续发展的模糊综合评价模型[J].中国电力教育,2007(S2):154-155.

(编辑:丁红艺)