

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.01.017

电站锅炉模糊风险评价方法研究与应用*

陈彰桥¹, 龚凌诸^{1,2}, 陈世旺^{2,3}, 杨晓翔^{3*}

(1. 福州大学 石油化工学院, 福建 福州 350108; 2. 福建省特种设备检验研究院, 福建 福州 350001;
3. 福州大学 机械工程及自动化学院, 福建 福州 350108)

摘要:针对电站锅炉风险等级评价问题,将模糊综合评价技术应用到电站锅炉风险等级评价中。开展了电站锅炉失效影响因素及模糊评价因素的重要程度分析,建立了一套科学合理适于在线评价的电站锅炉风险评价体系,提出了模糊综合评价技术与改进的模糊层次分析法相结合的模糊风险评价方法,利用改进的模糊层次分析法计算了指标体系中各层指标权重。对某一台电站锅炉的实际运行工况影响子因素进行了模糊风险评价,采用模糊合成算子进行模糊综合运算得到电站锅炉运行工况影响子因素的评价向量。研究表明:电站锅炉的运行工况影响子因素的风险评价等级为第 6 级,失效可能性等级为小,该电站锅炉运行工况良好。

关键词:模糊综合评价;改进的模糊层次分析法;电站锅炉;风险评价;运行工况

中图分类号:TM621.2;TK227

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2015)01-0089-07

Fuzzy risk evaluation method research and application in power plant boiler

CHEN Zhang-qiao¹, GONG Ling-zhu^{1,2}, CHEN Shi-wang^{2,3}, YANG Xiao-xiang³

(1. School of Chemical Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;

2. Fujian Special Equipment Inspection Institute, Fuzhou 350001, China;

3. School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: Aiming at the problems of power station boiler level of risk evaluation, the fuzzy comprehensive evaluation was investigated. After the analysis of failure factors and the important degree of various influencing factors of power plant boiler, a more scientific evaluation index system of power station boiler suitable for on-line evaluating was established. A method was presented to combine the fuzzy comprehensive evaluation with improved fuzzy analytical hierarchy process. The weight of each factor of the index system was calculated by improved fuzzy analytical hierarchy process. The comprehensive evaluation method was applied to evaluate the influence factors of a certain power plant boiler's practical operation condition. The fuzzy composite operator was applied to calculate assessment result. The results indicate that the level of risk assessment of the influence factors is the sixth grade, which means its failure probability is small and the power plant boiler operation condition is good.

Key words: fuzzy comprehensive evaluation; improved fuzzy analytical hierarchy process; power plant boiler; risk assessment; operation condition

0 引言

近年来,我国火力发电机组装机容量大幅增加,火力发电量占我国总发电量的比重也越来越大。据中电联资料显示,截止 2012 年底,全国全口径发电装机容量为 11.3 亿千瓦,其中,水电 2.5 亿千瓦,火电 8.2 亿

千瓦,并网风电 6 083 万千瓦,火电占全部装机容量的 72.52%^[1]。2013 年 1~6 月份,全国规模以上电厂火电发电量 19 955 亿千瓦时,同比增长 2.6%^[2]。电站锅炉是火电机组的主设备,正在朝着大型化、高参数、环保型、长周期运行方向发展,电站锅炉的安全运行对电力供应、经济建设和人们生活有着重大影响。

收稿日期:2014-08-08

基金项目:福建省质量技术监督局科技计划资助项目(FJQ12012016)

作者简介:陈彰桥(1990-),男,福建龙岩人,主要从事电站锅炉风险评价方面的研究。E-mail:645705525@qq.com

通信联系人:杨晓翔,男,教授,博士生导师。E-mail:yangxx@fzu.edu.cn

因此,如何保障电站锅炉安全、经济运行,已经成为我国科研机构与相关高校研究的重点。

电站锅炉具有体积大、批量小、可恢复、系统复杂,需要长期连续运行,损坏后经济损失巨大且后果严重等特点^[3]。因而为确保电站锅炉安全运行,必须按照有关规程、规范要求对电站锅炉进行定期检修。然而由于生产等方面的原因,电站锅炉常常无法按期停炉检修,而且随着电力体制改革的日益深入,发电市场竞争日趋激烈,发电企业越来越意识到安全运行和经济检修的重要性。因此如何科学评定电站锅炉的风险评价等级,是值得研究的。

本研究采用模糊综合评价方法结合改进的模糊层次分析法,通过对影响电站锅炉安全运行的影响因素进行分析、整理,进而建立起电站锅炉风险评价体系,并对评价体系中运行工况子因素进行实例计算。

1 电站锅炉的模糊综合评价

电站锅炉的风险评价往往会涉及到许多影响因素,同时,每个因素又可以进一步划分成不同的层次及类别,而且导致锅炉失效的影响因素又难以用准确的数值进行量化,具有较大的不确定性以及模糊性。模糊综合评价从多层次、最大限度的客观角度进行描述和分析复杂对象。当对象较为复杂且其所包含的指标较多时,每个指标的权重值很小,因此,指标之间的重要程度的差异就不易体现出来。如果将复杂对象分为多层次,则每个层次内的指标较少,从而指标间的重要程度的差异较容易地确定。模糊综合评价法既可以对主观指标进行综合评价,又可以对客观指标进行综合评价。因此,对于复杂、影响因素多的电站锅炉体系,采用模糊综合评价方法,能够更为准确地确定风险评价等级且较为简单。

模糊综合评价法是以模糊数学为理论基础的综合评价方法。该综合评价法是运用模糊数学的隶属度理论将定性评价转变为定量评价,即利用模糊数学的理论对受到多种因素制约的事物或对象作出一个总体的评价。模糊综合评价方法主要包括 3 个基本要素:因素集、评价集和单因素评价。模糊综合评价方法是应用最为广泛的模糊风险评价的方法^[4-8]。

1.1 因素集的建立

因素集 U 是由影响评价对象的因素所组成的集合,其可以表示为 $U = (u_1, u_2, \dots, u_n)$, 其中,元素 u_i ($i = 1, 2, \dots, n$) 代表每个影响因素。

1.2 权重集的建立

在风险评价中,因素集 U 中每个影响因素的重要

程度是不相同的,因此,需要根据每个影响因素 u_i 的重要程度计算出相应的权重值 a_i ($i = 1, 2, \dots, n$)。由每个影响因素的权重值 a_i ($i = 1, 2, \dots, n$) 所组成的集合称之为权重集 A 。本研究用改进的模糊层次分析法来求解每个影响因素的权重值 a_i ($i = 1, 2, \dots, n$)。

1.3 评价集的建立

评价集是由评价者对评价对象做出的评价时得到的各种可能性的评价结果所组成的集合,其可以表示为: $V = (v_1, v_2, \dots, v_m)$ 。其中,元素 v_j ($j = 1, 2, \dots, m$) 是表示各种可能性的评价结果。本研究的电站锅炉的风险评价的评价集采用模糊语言进行描述,其评价集为: $V = (\text{很大}, \text{大}, \text{较大}, \text{中等}, \text{较小}, \text{小}, \text{很小})$ 。

1.4 单因素模糊评价

单因素的模糊评价是单独针对某个影响因素进行评价,用来确定评价对象对评价集中的元素的隶属程度。假设因素集中第 i 个因素 u_i 对评价集中第 j 个元素 v_j 的隶属程度为 r_{ij} , 则该影响因素 u_i 的评价结果可以表示为: $R = (r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{im})$ 。

式中: R —单因素的评价向量。

本研究采用模糊语言算法来确定隶属度,首先将评价集 $V = (\text{很大}, \text{大}, \text{较大}, \text{中等}, \text{较小}, \text{小}, \text{很小})$ 用一组数值来表示: $V = (7, 6, 5, 4, 3, 2, 1)$ 。根据文献[9],对模糊语言数值的定义可以得到:

$$[\text{大}] = \frac{1}{7} + \frac{1}{6} + \frac{0.8}{5} + \frac{0.6}{4} + \frac{0.4}{3} + \frac{0.2}{2} \quad (1)$$

$$[\text{小}] = \frac{0.2}{6} + \frac{0.4}{5} + \frac{0.6}{4} + \frac{0.8}{3} + \frac{1}{2} + \frac{1}{1} \quad (2)$$

根据模糊语言算子的定义和模糊语言数值的逻辑运算法则,并进行归一化处理后得到:

$$\left\{ \begin{aligned} [\text{很大}] &= (0.3125, 0.3125, 0.20, 0.1125, 0.05, \\ &\quad 0.0125, 0) \\ [\text{大}] &= (0.25, 0.25, 0.20, 0.15, 0.10, 0.05, 0) \\ [\text{较大}] &= (0.231, 0.231, 0.1954, 0.1574, 0.1162, \\ &\quad 0.069, 0) \\ [\text{中等}] &= (0, 0.3333, 0.0833, 0.1667, 0.0833, \\ &\quad 0.3334, 0) \\ [\text{较小}] &= (0, 0.069, 0.1162, 0.1574, 0.1954, \\ &\quad 0.231, 0.231) \\ [\text{小}] &= (0, 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.25) \\ [\text{很小}] &= (0, 0.0125, 0.05, 0.1125, 0.20, 0.3125, \\ &\quad 0.3125) \end{aligned} \right. \quad (3)$$

假设专家人数为 N 个,每位专家均对某一因素进行风险评价,便可以得到 N 个 7 维的行向量 r_i ($i = 1, 2, \dots, N$),并将其组合成一个矩阵,即为专家组与评价

语之间的 $N \times 7$ 的评价矩阵: $(r_1, r_2, \dots, r_N)^T$ 。每位专家根据其经验程度的不同,分别赋予不同的权重值 α_i 。本研究将经验程度划分为4个等级:丰富、较丰富、中等、一般,并将 $(1, 0.8, 0.5, 0.2)$ 分别赋值给相应的等级。 N 个专家根据其自身的经验程度的不同,得到一个关于专家经验等级的 N 维行向量 $(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N)$,并按照下列公式计算得到向量 $\bar{R}_{1 \times 7}$:

$$\bar{R}_{1 \times 7} = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N) (r_1, r_2, \dots, r_N)^T \quad (4)$$

最后将向量 $\bar{R}_{1 \times 7}$ 进行归一化处理得到评价向量 R_1 。

1.5 模糊综合评价

单因素模糊评价仅仅反映出某一个因素对评价对象的影响程度,然而,模糊综合评价需要综合考虑所有的影响因素对评价对象的影响程度。单因素的模糊评价是多因素模糊综合评价的基础,根据下列公式得到评价矩阵 R :

$$R = \begin{pmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_n \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix} \quad (5)$$

将因素权重集 A 和评价矩阵 R 进行模糊运算,可以得到模糊综合评价集 B ,即:

$$B = AR = (b_1, b_2, \dots, b_m) \quad (6)$$

式中: b_i —模糊综合评价指标, $b_i (i = 1, 2, \dots, m)$ 。

1.6 模糊综合评价指标的处理

笔者根据上文得到的模糊综合评价指标,并对其进行处理,最终得到相应的评价结果。本研究利用最大隶属度法^[10]对评价指标进行处理得到评价结果。

2 改进的模糊层次分析法

在风险评价中,各个因素权重的确定是一个非常重要环节。目前,对于各个因素权重的确定方法主要分为主观赋权法和客观赋权法。主观赋权法主要是根据专家的自身经验来确定各个因素的权重问题,具有较强的主观性,其主要的方法有:层次分析法、模糊层次分析法、Delphi法等;客观赋权法是根据各个因素在评价过程中的实际数据来确定的,不受个人主观判断影响。我国常用的计算权重的方法有:专家调查法、专家评议法、层次分析法、模糊层次分析法等。层次分析法^[11-13] (AHP)是由美国的匹兹堡大学教授 T. L. Saaty 在20世纪70年代所提出的多准则决策方法,该方法被广泛地应用到复杂系统的分析、决策中。层次分析法(AHP)往往会出现判断矩阵不能满足一致性条件,从而

需要进行若干次修正和检验过程才能保证判断矩阵满足一致性要求,且判断矩阵的一致性与人类的逻辑思维存在着显著的差异,而且该方法的计算结果精度不高。模糊层次分析法在层次分析法的基础上引进模糊一致判断矩阵,从而解决了判断矩阵的一致性问题。但是模糊层次分析法存在求解的精度较差等不足。改进的模糊层次分析法是在模糊层次分析法的基础上,利用三标度法来构造优先判断矩阵,然后利用转换公式将优先判断矩阵转换为模糊一致判断矩阵,通过和行归一法求解得到排序向量,然后使用转换公式,将互补型判断矩阵转换为互反型判断矩阵,最后通过特征向量法并进行迭代运算,从而求解得到较高精度的排序向量。

改进的模糊层次分析法的优点有:所采用三标度法是一种互补型的标度方法,符合人类的逻辑思维,而且形式较为简单;能够容易地构造出优先判断矩阵,并且通过转换公式可将优先判断矩阵转换为模糊一致判断矩阵,从而无需对其进行一致性检验;利用和行归一法所求解得到的排序权重 $W^{(0)} = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)^T$ 来作为迭代的初始值 $V_0 = (v_{01}, v_{02}, \dots, v_{0n})^T$,这样能够减少迭代的次数,从而提高其运算的收敛速度以及计算精度。

改进的模糊层次分析法不但解决了判断矩阵的一致性问题,而且解决了求解的精度问题以及收敛速度问题,因此可用于确定电站锅炉风险评价指标的权重值。

2.1 改进的模糊层次分析法的计算步骤

(1) 利用三标度法建立互补型模糊^[14-15]判断矩阵 $F = (f_{ij})_{n \times m}$ (称其为优先判断矩阵)

$$(f_{ij})_{n \times m} = \begin{cases} 0 & \text{如果第 } i \text{ 个因素重要程度小于第 } j \text{ 个因素} \\ 0.5 & \text{如果第 } i \text{ 个因素重要程度等于第 } j \text{ 个因素} \\ 1.0 & \text{如果第 } i \text{ 个因素重要程度大于第 } j \text{ 个因素} \end{cases} \quad (7)$$

(2) 将模糊判断矩阵 $F = (f_{ij})_{n \times m}$ 转变为模糊一致性判断矩阵 $R = (r_{ij})_{n \times m}$:

$$r_i = \sum_{j=1}^m f_{ij} \quad (8)$$

$$r_{ij} = \frac{r_i - r_j}{2n} + 0.5 \quad (9)$$

(3) 根据和行归一化方法求解得到排序向量 $W^{(0)}$:

$$W^{(0)} = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n) = \left[\frac{\sum_{j=1}^m r_{1j}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m r_{ij}}, \frac{\sum_{j=1}^m r_{2j}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m r_{ij}}, \dots, \frac{\sum_{j=1}^m r_{nj}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m r_{ij}} \right] \quad (10)$$

(4) 将互补型判断矩阵 $R = (r_{ij})_{n \times m}$ 转变成互反型矩阵 $E = (e_{ij})_{n \times m}$:

$$e_{ij} = \frac{r_{ij}}{r_{ji}} \tag{11}$$

(5)特征值法中,选取排序向量 $\mathbf{W}^{(0)}$ 作为迭代初始值 $\mathbf{V}_0$,从而求解得到较高精度的排序向量 $\mathbf{W}^{(k)}$,即:

- ①确定输入矩阵 $\mathbf{E}_{n \times m}$ 、误差 ε 以及最大迭代的次数 M ;
- ②求得特征向量的初值 $\mathbf{V}_0$ 的无穷范数 $\|\mathbf{V}_0\|_\infty$:
- $$\|\mathbf{V}_0\|_\infty = \max(v_{01}, v_{02}, \cdots, v_{0n}) \tag{12}$$

- ③求解得到特征向量 $\mathbf{V}_{k+1}$:

$$\begin{cases} y_k = \frac{\mathbf{V}_k}{\|\mathbf{V}_0\|_\infty} \\ \mathbf{V}_{k+1} = \mathbf{E}_{n \times m} y_k \end{cases} \tag{13}$$

④进行判断:若 $|\|\mathbf{V}_{k+1}\|_\infty - \|\mathbf{V}_k\|_\infty| < \varepsilon$,则 $\|\mathbf{V}_{k+1}\|_\infty$ 是最大的特征值,将 $\mathbf{V}_{k+1}$ 归一化处理, $\mathbf{V}_{k+1} = [v_{k+1,1}/\sum_{i=1}^n v_{k+1,i}, v_{k+1,2}/\sum_{i=1}^n v_{k+1,i}, \cdots, v_{k+1,n}/\sum_{i=1}^n v_{k+1,i}]^T$,所得到的向量 $\mathbf{W}^{(k)} = \mathbf{V}_{k+1}$ 就是目标的权重向量,迭代结束;否则,将 $\mathbf{V}_k = \mathbf{V}_{k+1}/\|\mathbf{V}_{k+1}\|_\infty = [v_{k+1,1}/\|\mathbf{V}_{k+1}\|_\infty, v_{k+1,2}/\|\mathbf{V}_{k+1}\|_\infty, \cdots, v_{k+1,n}/\|\mathbf{V}_{k+1}\|_\infty]^T$ 作为新的初始值,再次进行迭代,直至迭代次数为 M 时结束。

2.2 电站锅炉风险评价的各个因素权重的计算步骤

电站锅炉风险评价的各个因素权重的计算步骤如下:(1)绘制表格,邀请 N 个专家对影响因素进行重要程度排序;

(2)利用改进的模糊层次分析法计算得到第 i 个专家对 m 个影响因素的权重大小;

(3)由于各个专家自身经验程度的不同,根据专家的经验程度划分为丰富、较丰富、中等、一般这 4 个等级,并分别赋予其权重为(1,0.8,0.5,0.2);

(4)每个专家均对影响因素进行重要程度排序,可以得到 N 个 m 维的行向量,并将这些行向量组成矩阵,便得到一个关于专家与权重集之间的 $N \times m$ 的矩阵,再结合 N 个专家的权重,因此,可以计算出各个影响因素的权重大小,公式如下:

$$(\mathbf{W}_1, \mathbf{W}_2, \mathbf{W}_3, \cdots, \mathbf{W}_m) = (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \cdots, \alpha_N) \begin{bmatrix} \mathbf{W}_{11} & \mathbf{W}_{12} & \cdots & \mathbf{W}_{1m} \\ \mathbf{W}_{21} & \mathbf{W}_{22} & \cdots & \mathbf{W}_{2m} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \mathbf{W}_{N1} & \mathbf{W}_{N2} & \cdots & \mathbf{W}_{Nm} \end{bmatrix} \tag{14}$$

(5)将上式求得的权重向量 $(\mathbf{W}_1, \mathbf{W}_2, \mathbf{W}_3, \cdots, \mathbf{W}_m)$ 进行归一化处理。

3 应用实例

3.1 评价指标体系的确定

本研究在已有的《火力发电厂安全性评价》^[16] 和

DL647-2004《电站锅炉压力容器检验规程》等电力行业标准的基础上,根据系统性原则、科学性原则、评价因素的特殊性与普遍性原则、评价因素的可量化原则,参考在役电站锅炉安全状况等级评价体系^[17],建立电站锅炉模糊风险评价体系。现以福建省石狮市某热电厂一台循环流化床锅炉为例,进行电站锅炉风险评价,锅炉型号为 DG75/3.82-11。

3.2 因素权重集的建立

本研究针对电站锅炉风险评价体系中的运行工况 u_1 因素集(如表 1 所示),采用改进的模糊层次分析法计算其权重值。

表 1 运行工况 u_1 因素集

一级因素	二级因素	三级因素
运行 工况 u_1	省煤器 工况 u_{11}	省煤器出口水温 u_{111}
		省煤器出口烟温 u_{112}
		省煤器进口压力 u_{113}
		进口烟气流速 u_{114}
		出口烟气流速 u_{115}
		管内水流速度 u_{116}
	汽包 工况 u_{12}	汽包水位 u_{121}
		汽包壁温 u_{122}
		汽包壁温差 u_{123}
		汽包压力 u_{124}
	下降管 工况 u_{13}	下降管含汽率 u_{131}
		下降管工质流速 u_{132}
		下降管压差 u_{133}
		介质温度 u_{134}
运行 工况 u_1	水冷壁 工况 u_{14}	工作压力 u_{141}
		流速 u_{142}
		水冷壁管壁温 u_{143}
		水冷壁循环倍率 u_{144}
	过热器 工况 u_{15}	过热蒸汽流量 u_{151}
		过热蒸汽压力 u_{152}
		过热蒸汽温度 u_{153}
		过热器减温水温度 u_{154}
	再热器 工况 u_{16}	过热器减温水压力 u_{155}
		过热器管壁温 u_{156}
		再热蒸汽流量 u_{161}
		再热蒸汽进口压力 u_{162}
炉膛 工况 u_{17}	炉膛 工况 u_{17}	再热蒸汽出口压力 u_{163}
		再热蒸汽进口温度 u_{164}
		再热蒸汽出口温度 u_{165}
		再热器管壁温 u_{166}
炉膛 工况 u_{17}	炉膛 工况 u_{17}	燃料种类 u_{171}
		炉膛压力 u_{172}
		炉膛出口烟气温 u_{173}
		炉膛过量空气系数 u_{174}
炉膛 工况 u_{17}	炉膛 工况 u_{17}	炉膛容积热负荷 u_{175}
		炉膛截面积热负荷 u_{176}

(续表)

一级因素	二级因素	三级因素
	空气预热器 工况 u_{18}	空气预热器漏风率 u_{181}
		空气预热器出口一次风流量 u_{182}
		空气预热器出口二次风流量 u_{183}
		空气预热器出口烟温 u_{184}
		空气预热器出口空气温度 u_{185}
运行 工况 u_1	给水系统 工况 u_{19}	给水温度 u_{191}
		给水流量 u_{192}
		给水品质 u_{193}
	通风系统 工况 u_{110}	风机振动 u_{1101}
		风机转速 u_{1102}
		风机压力 u_{1103}
		送引风量调配比例 u_{1104}

笔者邀请 3 个专家对运行工况 u_1 的三级因素进行评价。

首先,由第 1 个专家对省煤器工况 u_{11} 的 6 个子因素重要程度排序,建立互补模糊判断矩阵 F_1 :

$$F_1 = (f_{ij})_{6 \times 6} = \begin{bmatrix} 0.5 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0.5 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0.5 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0.5 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0.5 \end{bmatrix} \quad (15)$$

得到行和分别为: $r_1=5.5, r_2=3.5, r_3=4.5, r_4=1.5, r_5=0.5, r_6=2.5$ 。将 F_1 改造得到模糊一致性判断矩阵 R_1 :

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0.500 & 0.667 & 0.583 & 0.833 & 0.917 & 0.750 \\ 0.333 & 0.500 & 0.417 & 0.667 & 0.750 & 0.583 \\ 0.417 & 0.583 & 0.500 & 0.750 & 0.833 & 0.667 \\ 0.167 & 0.333 & 0.250 & 0.500 & 0.583 & 0.417 \\ 0.083 & 0.250 & 0.167 & 0.417 & 0.500 & 0.333 \\ 0.250 & 0.417 & 0.333 & 0.583 & 0.667 & 0.500 \end{bmatrix} \quad (16)$$

利用和行归一法求得排序向量 $W_1^{(0)}$:

$$W_1^{(0)} = (0.236 \quad 0.181 \quad 0.208 \quad 0.125 \quad 0.097 \quad 0.153)^T \quad (17)$$

将判断矩阵 $R_1 = (r_{ij})_{n \times m}$ 变为互反型矩阵 $E_1 = (e_{ij})_{n \times m}$:

$$E_1 = \begin{bmatrix} 1.000 & 2.000 & 1.400 & 5.000 & 11.000 & 3.000 \\ 0.500 & 1.000 & 0.714 & 2.000 & 3.000 & 1.400 \\ 0.714 & 1.400 & 1.000 & 3.000 & 5.000 & 2.000 \\ 0.200 & 0.500 & 0.333 & 1.000 & 1.400 & 0.714 \\ 0.091 & 0.333 & 0.200 & 0.714 & 1.000 & 0.500 \\ 0.333 & 0.714 & 0.500 & 1.400 & 2.000 & 1.000 \end{bmatrix} \quad (18)$$

以向量 $W_1^{(0)}$ 作为特征值法的迭代初值 V_{01} ,迭代 6 次后,误差小于 0.001,得到省煤器工况 u_{11} 的权重向量 $W_1^{(6)}$:

$$W_1^{(6)} = (0.374 \quad 0.159 \quad 0.234 \quad 0.075 \quad 0.048 \quad 0.110)^T \quad (19)$$

同理得到另两个专家所确定的权重向量分别为:

$$W_2^{(6)} = (0.159 \quad 0.234 \quad 0.374 \quad 0.075 \quad 0.048 \quad 0.110)^T \quad (20)$$

$$W_3^{(6)} = (0.376 \quad 0.050 \quad 0.237 \quad 0.113 \quad 0.113 \quad 0.114)^T \quad (21)$$

再根据专家们的经验程度分别赋予其权重值为 $(1, 0.8, 0.8)$;

$$(W_1, W_2, W_3, W_4, W_5, W_6) = (1, 0.8, 0.8)$$

$$\begin{bmatrix} 0.374 & 0.159 & 0.234 & 0.075 & 0.048 & 0.110 \\ 0.159 & 0.234 & 0.374 & 0.075 & 0.048 & 0.110 \\ 0.376 & 0.050 & 0.237 & 0.113 & 0.113 & 0.113 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.801 & 0.386 & 0.722 & 0.225 & 0.177 & 0.289 \end{bmatrix} \quad (22)$$

进行归一化处理后得到省煤器工况 u_{11} 的权重向量 $A_{u_{11}}$:

$$A_{u_{11}} = (0.308 \quad 0.148 \quad 0.278 \quad 0.087 \quad 0.068 \quad 0.111) \quad (23)$$

同理可以求得汽包工况 u_{12} 、下降管工况 u_{13} 、水冷壁工况 u_{14} 、过热器工况 u_{15} 、再热器工况 u_{16} 、炉膛工况 u_{17} 、空气预热器工况 u_{18} 、给水系统工况 u_{19} 、通风系统工况 u_{110} 的权重向量:

$$\begin{cases} A_{u_{12}} = (0.342 & 0.249 & 0.154 & 0.255) \\ A_{u_{13}} = (0.249 & 0.342 & 0.255 & 0.154) \\ A_{u_{14}} = (0.249 & 0.342 & 0.255 & 0.154) \\ A_{u_{15}} = (0.063 & 0.334 & 0.201 & 0.140 & 0.074 & 0.188) \\ A_{u_{16}} = (0.087 & 0.177 & 0.302 & 0.134 & 0.228 & 0.072) \\ A_{u_{17}} = (0.096 & 0.351 & 0.217 & 0.101 & 0.124 & 0.111) \\ A_{u_{18}} = (0.162 & 0.161 & 0.161 & 0.224 & 0.292) \\ A_{u_{19}} = (0.376 & 0.330 & 0.294) \\ A_{u_{110}} = (0.285 & 0.285 & 0.295 & 0.135) \end{cases} \quad (24)$$

同理又可得到运行工况 u_1 的二级因素的权重向量:

$$A_{u_1} = (0.0715 \quad 0.1404 \quad 0.064 \quad 0.0798 \quad 0.2134 \quad 0.2134 \quad 0.1111 \quad 0.035 \quad 0.0452 \quad 0.0262) \quad (25)$$

3.3 运行工况因素集的模糊综合评价模型的建立

3.3.1 对三级因素的模糊评价

运行工况 u_1 可分为省煤器工况 u_{11} 等 10 个子

因素。其中,省煤器工况 u_{11} 又可分为省煤器出口水温 u_{111} 、省煤器出口烟温 u_{112} 、省煤器进口压力 u_{113} 、进口烟气流速 u_{114} 、出口烟气流速 u_{115} 和管内

水流速度 u_{116} 6 个三级子因素。通过让专家对以上第三级子因素进行评价,分别得到它们的评价向量,如下所示:

$$\begin{cases} \mathbf{r}_{u_{111}} = (0.000\ 0 & 0.035\ 4 & 0.078\ 3 & 0.132\ 6 & 0.198\ 9 & 0.277\ 4 & 0.277\ 4) \\ \mathbf{r}_{u_{112}} = (0.028\ 2 & 0.135\ 7 & 0.098\ 5 & 0.147\ 3 & 0.160\ 4 & 0.259\ 8 & 0.170\ 1) \\ \mathbf{r}_{u_{113}} = (0.028\ 2 & 0.135\ 7 & 0.098\ 5 & 0.147\ 3 & 0.160\ 4 & 0.259\ 8 & 0.170\ 1) \\ \mathbf{r}_{u_{114}} = (0.000\ 0 & 0.109\ 1 & 0.080\ 8 & 0.141\ 8 & 0.170\ 6 & 0.289\ 5 & 0.208\ 2) \\ \mathbf{r}_{u_{115}} = (0.000\ 0 & 0.074\ 5 & 0.082\ 4 & 0.139\ 2 & 0.184\ 7 & 0.279\ 9 & 0.239\ 3) \\ \mathbf{r}_{u_{116}} = (0.000\ 0 & 0.139\ 0 & 0.074\ 4 & 0.141\ 5 & 0.157\ 3 & 0.304\ 9 & 0.182\ 9) \end{cases} \quad (26)$$

将式(26)组成一个评价矩阵 $\mathbf{R}_{u_{11}}$:

$$\mathbf{R}_{u_{11}} = (\mathbf{r}_{u_{111}}, \mathbf{r}_{u_{112}}, \mathbf{r}_{u_{113}}, \mathbf{r}_{u_{114}}, \mathbf{r}_{u_{115}}, \mathbf{r}_{u_{116}})^T \quad (27)$$

采用 $M(\cdot, +)$ “加权平均型”算子对式(23,27)

进行模糊运算,得到 $\mathbf{B}_{u_{11}}$:

$$\mathbf{B}_{u_{11}} = \mathbf{A}_{u_{11}} \mathbf{R}_{u_{11}} =$$

$$\begin{aligned} & (a_{u_{111}}, a_{u_{112}}, a_{u_{113}}, a_{u_{114}}, a_{u_{115}}, a_{u_{116}}) \cdot (\mathbf{r}_{u_{111}}, \mathbf{r}_{u_{112}}, \mathbf{r}_{u_{113}}, \\ & \mathbf{r}_{u_{114}}, \mathbf{r}_{u_{115}}, \mathbf{r}_{u_{116}})^T = \\ & (0.012\ 0 \quad 0.098\ 8 \quad 0.086\ 8 \quad 0.141\ 1 \quad 0.174\ 5 \\ & 0.274\ 2 \quad 0.212\ 6) \end{aligned} \quad (28)$$

同理可以得到其余各个影响因素的评价向量:

$$\begin{cases} \mathbf{B}_{u_{12}} = (0.027\ 9 & 0.117\ 4 & 0.094\ 3 & 0.142\ 1 & 0.165\ 9 & 0.261\ 1 & 0.191\ 3) \\ \mathbf{B}_{u_{13}} = (0.004\ 3 & 0.096\ 0 & 0.081\ 1 & 0.139\ 5 & 0.175\ 2 & 0.284\ 7 & 0.219\ 2) \\ \mathbf{B}_{u_{14}} = (0.000\ 0 & 0.039\ 3 & 0.083\ 9 & 0.137\ 0 & 0.199\ 2 & 0.270\ 3 & 0.270\ 3) \\ \mathbf{B}_{u_{15}} = (0.000\ 0 & 0.051\ 5 & 0.082\ 5 & 0.137\ 4 & 0.193\ 9 & 0.275\ 0 & 0.259\ 7) \\ \mathbf{B}_{u_{16}} = (0.000\ 0 & 0.049\ 0 & 0.089\ 5 & 0.141\ 4 & 0.196\ 8 & 0.264\ 6 & 0.258\ 7) \\ \mathbf{B}_{u_{17}} = (0.000\ 0 & 0.047\ 3 & 0.084\ 0 & 0.137\ 8 & 0.196\ 0 & 0.271\ 9 & 0.263\ 0) \\ \mathbf{B}_{u_{18}} = (0.000\ 0 & 0.043\ 4 & 0.088\ 8 & 0.140\ 4 & 0.198\ 8 & 0.264\ 3 & 0.264\ 3) \\ \mathbf{B}_{u_{19}} = (0.000\ 0 & 0.037\ 8 & 0.082\ 1 & 0.135\ 7 & 0.199\ 2 & 0.272\ 6 & 0.272\ 6) \\ \mathbf{B}_{u_{110}} = (0.000\ 0 & 0.034\ 4 & 0.078\ 0 & 0.132\ 9 & 0.199\ 3 & 0.277\ 7 & 0.277\ 7) \end{cases} \quad (29)$$

3.3.2 对二级因素的模糊评价

根据省煤器工况 u_{11} 、汽包工况 u_{12} 、下降管工况 u_{13} 、水冷壁工况 u_{14} 、过热器工况 u_{15} 、再热器工况 u_{16} 、炉膛工况 u_{17} 、空气预热器工况 u_{18} 、给水系统工况 u_{19} 、通风系统工况 u_{110} 这 10 个子因素的权重以及评价结果,可求得运行工况 u_1 的评价向量:

$$\begin{aligned} \mathbf{B}_{u_1} &= \mathbf{A}_{u_1} \mathbf{R}_{u_1} = \\ & (a_{u_{11}}, a_{u_{12}}, \dots, a_{u_{110}}) \cdot (\mathbf{r}_{u_{11}}, \mathbf{r}_{u_{12}}, \dots, \mathbf{r}_{u_{110}})^T = \\ & (0.005\ 1 \quad 0.063\ 7 \quad 0.086\ 2 \quad 0.139\ 2 \quad 0.189\ 2 \\ & 0.270\ 3 \quad 0.246\ 3) \end{aligned} \quad (30)$$

根据最大隶属度的原则,若模糊综合评价向量为 $\mathbf{B} = (b_1, b_2, \dots, b_n)$, 假设 $b_r = \max\{B\}$, 则被评价对象的等级属于第 r 等级。因此,由式(30)可得,最大值为 0.270 3,说明运行工况的失效可能性小。

4 结束语

本研究采用模糊综合评价法,在相关标准、规范的

基础上,分析了影响电站锅炉失效的可能性因素,建立了在役电站锅炉模糊风险评价体系与风险评价模型,并具体介绍电站锅炉风险评价的计算步骤,利用改进的模糊层次分析法计算电站锅炉失效可能性因素的权重。改进的模糊层次分析法不但可以解决权重计算过程中判断矩阵的一致性问题,而且还提高了解的精度与收敛速度。

笔者以本研究建立的评价体系中运行工况子因素为例,介绍电站锅炉模糊风险评价具体计算步骤,根据某一台电站锅炉的实际状况,计算得到了电站锅炉的运行工况影响子因素的风险评价等级为第 6 级,失效可能性等级为小,说明该锅炉运行工况良好,该因素不影响锅炉安全运行。

参考文献 (References):

- [1] 中国电力企业联合会. 2012 年电力工业经济运行情况及 2013 年预测[J]. 中国经贸导刊, 2013(7): 24-26.

- [2] 中国电力企业联合会规划与统计信息部. 2013 年 1-6 月份电力工业运行简况[J]. 中国电力教育, 2013(21): 88-91.
- [3] 郭文靖, 丁国良, 周传平, 等. 电站锅炉可靠性研究[J]. 锅炉制造, 1999(2): 6.
- [4] 陈世旺, 杨晓翔, 龚凌诸. 基于模糊综合评价的电站锅炉风险评估[J]. 能源与环境, 2009(6): 14-15.
- [5] 龚凌诸, 陈世旺, 杨晓翔. 模糊综合评价在在役电站锅炉安全评估中的应用[J]. 能源与环境, 2010(3): 7-8.
- [6] 周友涛, 张元榕, 郭金泉, 等. RBI 技术在港口门座起重机风险评价中的应用[J]. 机电工程, 2013, 30(6): 645-648.
- [7] 刘 芸, 杨晓翔, 龚凌诸, 等. 基于模糊综合评价的锅炉汽包风险评估[J]. 石油化工设备, 2013, 42(3): 16-20.
- [8] 刘 英, 李 雅, 程儒松, 等. 基于模糊层次分析法的集控水电站群倒班运行质量综合评价研究[J]. 机械, 2012(6): 33-36, 43.
- [9] 杨纶标, 高英仪. 模糊数学原理及应用[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2002.
- [10] 王 静, 董肖丽. 模糊评价中最大隶属度原则的改进[J]. 河北水利, 2011(2): 27-28.
- [11] 张吉军. 模糊层次分析法(FAHP)[J]. 模糊系统与数学, 2000, 14(2): 80-88.
- [12] 王 鑫, 徐习东, 琚 军, 等. 基于层次分析法的继电保护消缺优化研究[J]. 机电工程, 2013, 30(12): 1540-1545.
- [13] CHATZIMOURATIDIS A I, PILAVACHI P A. Technological, economic and sustainability evaluation of power plants using the analytic hierarchy process[J]. **Energy Policy**, 2009, 37(3): 778-787.
- [14] 郭 凯, 李祥松, 冯 霏, 等. 改进的模糊层次分析法在综合设计法中的应用[J]. 机械与电子, 2009(5): 3-5.
- [15] 李 永, 胡向红, 乔 箭. 改进的模糊层次分析法[J]. 西北大学学报: 自然科学版, 2005, 35(1): 11-12.
- [16] 中国电机工程学会. 火力发电厂安全性评价[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [17] 吴中师. 电站锅炉安全性评价研究[D]. 北京: 华北电力大学电气与电子工程学院, 2011.

[编辑: 洪炜娜]

本文引用格式:

陈彰桥, 龚凌诸, 陈世旺, 等. 电站锅炉模糊风险评价方法研究与应用[J]. 机电工程, 2015, 32(1): 89-95.

CHEN Zhang-qiao, GONG Ling-zhu, CHEN Shi-wang, et al. Fuzzy risk evaluation method research and application in power plant boiler[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2015, 32(1): 89-95.
《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

(上接第 36 页)

- [2] CASTANIEA B, BOUVETA C, AMINAND Y, et al. Modeling of low-energy/low-velocity impact on Nomex honeycomb sandwich structures with metallic skins[J]. **International Journal of Impact Engineering**, 2008, 35(7): 620-634.
- [3] GOMET L, MARGUET S, MARCKMANN G. Modeling of Nomex[®] honeycomb cores, linear and nonlinear behaviors[J]. **Mechanics of advanced Materials and structures**, 2007, 14(8): 589-601.
- [4] CHOON C F, GIN B C, LEONG K S. Mechanical properties of Nomex material and Nomex honeycomb structure[J]. **Composite Structures**, 2007, 80(4): 588-594.
- [5] 许希武, 朱炜焱. 复合材料层合板低速冲击后压-压疲劳试验研究及寿命预报[J]. 工程力学, 2013(3): 410-423.
- [6] 崔 巍, 高 军. 超声切割技术在复合材料加工领域的应用[J]. 航空制造技术, 2008(4): 50-52.
- [7] 李 裕, 高 涛, 骆金威, 等. 基于超声波机床的蜂窝芯数控加工技术研究[J]. 机械制造, 2013(1): 41-43.
- [8] 李丽丽, 宋清华, 李 勇, 等. 预浸料厚坯超声切割工艺研究[J]. 航空学报, 2013(6): 1445-1451.
- [9] 胡建国, 马大为, 乐贵高, 等. 蜂窝材料率相关本构模型及其在月球探测器中的应用研究[J]. 振动与冲击, 2014(7): 114-119, 137.
- [10] 程改霞, 郑晓亚, 张 铎, 等. 蜂窝夹层结构等效板力学特性研究[J]. 弹箭与制导学报, 2004, 24(5): 568-573.
- [11] 富明慧, 尹久仁. 蜂窝芯层的等效弹性参数[J]. 力学学报, 1999, 31(1): 113-118.
- [12] 许文才. 裁剪刀刀片切割角分析[J]. 大连轻工业学院学报, 1995, 14(2): 24-27.

[编辑: 李 辉]