

DOI: 10.7667/PSPC180632

基于模糊综合评价的矿用提升机电气传动系统状态评估

王福忠¹, 李媛媛¹, 韩素敏¹, 史鹏飞²

(1. 河南理工大学电气工程与自动化学院, 河南 焦作 454000; 2. 河南能源焦煤公司宝雨山煤矿, 河南 洛阳 471000)

摘要: 为了准确评估矿用提升机电气传动系统的健康状态, 及时实施状态维修, 保障提升机系统能够安全可靠运行, 提出了基于模糊综合评价的矿用提升机电气传动系统状态评估方法。在该传动系统各组成部分故障分析的基础上, 构建了状态评估的指标体系, 采用层次分析法计算指标的权重, 并引入劣化度分析对指标标准化处理。最后对河南某矿型号为 JKMD-4×4(Z)的提升机电气传动系统进行多层次模糊综合评价。结果表明: 通过仿真分析验证, 所建立的状态评估模型能准确地判断矿用提升机电气传动系统的运行状态。

关键词: 状态评估; 模糊综合评价; 劣化度分析; 层次分析法; 矿用提升机电气传动系统

Status assessment of mine hoist electric drive system based on fuzzy synthetic evaluation

WANG Fuzhong¹, LI Yuanyuan¹, HAN Sumin¹, SHI Pengfei²

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;

2. Henan Energy Coking Coal Company Baoyushan Coal Mine, Luoyang 471000, China)

Abstract: In order to accurately evaluate the health status of mine hoist electric drive system, timely implement state maintenance, and ensure the safe and reliable operation of hoist system, a new method for status assessment of mine hoist electric drive system based on fuzzy synthetic evaluation is proposed. On the basis of the fault analysis of electric drive system components, an evaluation index system for operational status is constructed. The analytic hierarchy process method is applied to calculate the indicator weights and the degradation analysis is introduced in the standardization of the indicators. Finally, a multi-level fuzzy comprehensive evaluation of the hoist electric drive system of a mine model of JKMD-4×4(Z) in Henan province is carried out. The obtained results show that the applied system status assessment in this paper can precisely determine the operation state of the mine hoist electric drive system through simulation analysis.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFC0600906).

Key words: operational status evaluation; fuzzy synthetic evaluation; deterioration analysis; analytic hierarchy process; mine hoist electric drive system

0 引言

矿井提升机是矿山最重要的关键设备, 承担着煤炭、材料和工作人员的运输任务, 确保矿井提升的正常运行至关重要^[1-2]。提升机电气传动系统是提升机的重要组成部分, 提升机的安全运行与传动系统的主轴装置、电动机、变频器等设备的运行状态密切相关, 因此对提升机电气传动系统的运行状态评估, 预防设备事故发生, 及时发现设备的异常及潜在的故障并快速地进行检修维护具有重要意义。

目前, 针对设备的状态评估方法有神经网络法^[3-4]、贝叶斯网络法^[5]、D-S 证据理论^[6-7]、模糊

综合评价^[8]等, 并且这些评估方法已应用在大型的电力变压器^[9-11]、风电机组^[12-13]等设备中。文献[14]提出了利用贝叶斯网络建立卫星型号系统状态评估的模型, 利用贝叶斯网络处理不确定信息、不确定推理等方面的优势, 计算出卫星型号研制系统的状态。文献[15]构建了基于改进证据理论的导弹状态评价模型, 对所有特征参数的状态合成并决策, 确定了测试合格的导弹的状态退化等级。文献[16]建立了考虑高压断路器运行机理的递阶层次评估模型; 并引入点灰度描述模糊关系的不可信程度, 建立灰色模糊判别矩阵, 进而对高压断路器运行状态进行综合评估。以上这些评估方法还存在一些不足^[17], 如: 神经网络法需要大量的数据样本, 并很大程度上依赖于过去的经验。贝叶斯网络能处理不

基金项目: 国家重点研发计划专项资助(2016YFC0600906)

完备数据, 但是当关键属性缺失时正确率比较低。

当前对矿用提升机电气传动系统状态评估的研究并不多见。由于模糊综合评价方法不需要过多的依赖试验数据, 为此, 本文将该方法应用于矿用提升机电气传动系统的运行状态评估中。首先进行矿用提升机电气传动系统各组成部分的故障特征分析, 建立了评估指标体系, 然后建立了矿用提升机电气传动系统的运行状态评语集, 并且引入劣化度思想对各评估指标标准化处理, 采用层次分析法计算各评估指标的权重, 根据最大隶属度原则判断矿用提升机电气传动系统的运行状态。最终通过实例分析验证模糊综合评价结果的准确性。

1 提升机电气传动系统状态评估指标体系

1.1 提升机电气传动系统的故障分析

本文主要研究同步电动机驱动的矿用提升机的电气传动系统状态评估。该电气传动系统主要由同步电动机、变频器、主轴装置等设备组成, 根据该提升机电气传动系统的结构组成和工作机理, 通过分析该传动系统各设备的常见故障形式, 依据《煤矿安全工程》中对提升机运行安全相关规定, 得到矿用提升机电气传动系统主要设备故障及其特征如表 1 所示。

表 1 矿用提升机电气传动系统的故障分析

Table 1 Fault analysis of mine hoist electric drive system

故障部位	故障形式	故障特征	
同步电机	定子故障	定子匝间短路 产生负序电流, 电机产生异常噪声和振动, 并产生很大的短路电流引起绕组温度增大	
	转子故障	励磁绕组匝间短路	气隙磁场发生畸变, 励磁电流增大, 电机振动幅度增大
		两点接地故障	励磁电流减小, 励磁电压也随之减小
	失步	失磁故障	励磁电流减小, 励磁电压也随之减小
		轴承故障	轴承温度升高, 电机振动加剧
		断电失步	产生非周期性电流分量, 以较快的速度衰减
	变频器	带励失步	励磁电流和定子电流强烈脉动, 振动频率增大
		失磁失步	电磁转矩减小
		过流	直流母线电流过大, 主回路功率模块过热
		过压	直流母线过电压
欠压		变频器输出电流异常	
主轴装置	过热	环境温度过高	
	主电路故障	变频器的输出电压, 输出电流, 输出频率发生变化	
	冷却系统故障	变频器温度异常	
主轴装置	主轴承温度异常	主轴承温度升高	
	轴承振动异常	轴承振动速度增大	

1.2 运行状态评估指标体系的建立

根据表 1 所示的提升机电气传动系统主要设备故障及其特征, 选取能够确切反映故障特征的监测参数作为提升机电气传动系统运行状态的评估指标, 构建的状态评估指标体系如图 1 所示。该评估指标体系分为: 目标层为矿用提升机电气传动系统的运行状态; 设备层为同步电动机、变频器和主轴装置 $X=[X_1, X_2, X_3]$; 指标层为反映设备故障特征的检测参数:

$$X_1=[X_{11}, X_{12}, X_{13}, X_{14}, X_{15}], X_2=[X_{21}, X_{22}, X_{23}, X_{24}, X_{25}], X_3=[X_{31}, X_{32}]。$$

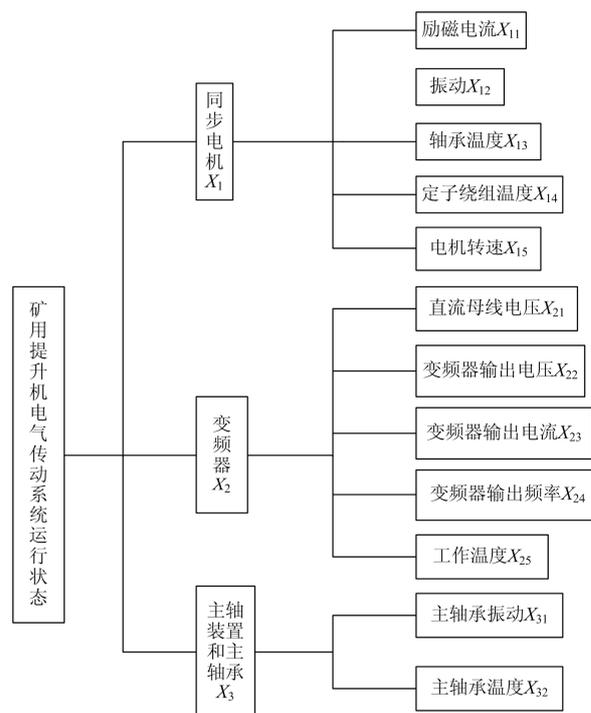


图 1 矿用提升机电气传动系统评估指标体系

Fig. 1 Mine hoist electric drive system evaluation index system

2 模糊综合评价算法

2.1 提升机电气传动系统的评语集

将提升机电气传动系统的评语集划分为 4 个等级, 即评语集为 $V_i=[v_1, v_2, v_3, v_4]$, $i=1, 2, 3, 4$ 。规定 $V_i=[\text{优秀}, \text{良好}, \text{一般}, \text{差}]$, 4 个运行状态等级的描述如表 2 所示。

2.2 评估指标的标准化处理

由于矿用提升机电气传动系统的评估指标体系中, 每个指标的量纲基本不一致, 不同量纲的指标不能进行对比分析, 因此, 为了消除指标间的量纲差异, 本文引入劣化度^[18-19]的概念对各指标进行标准化处理。指标的劣化度指当前设备的实际状态与故障状态时相比的劣化程度, 其取值范围为[0,1]。

表 2 运行状态等级的描述

Table 2 Description of operating status levels

运行状态	描述
优秀	系统运行状态优秀, 工作性能稳定, 无需采取维修措施
良好	系统工作性能基本稳定, 发生故障的可能性很低
一般	系统发生故障的可能性相比于前两个等级有所增加, 需要对其分析, 判断具体异常类型
差	系统出现严重异常, 需要立即检修

文中建立的评估指标体系中, 指标分为两类: 越小越优型(如轴承温度)、中间型(如励磁电流)。

(1) 对于越小越优型的指标, 劣化度按式(1)计算。

$$g(x) = \begin{cases} 0, & x < x_{\min} \\ \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}, & x_{\min} \leq x \leq x_{\max} \\ 1, & x > x_{\max} \end{cases} \quad (1)$$

式中, x_{\min} 、 x_{\max} 为评估指标参数的阈值。

(2) 对于中间型的指标, 劣化度按式(2)计算。

$$g(x) = \begin{cases} 1, & x < x_{\min} \\ \frac{\alpha - x}{\alpha - x_{\min}}, & x_{\min} \leq x < \alpha \\ 0, & \alpha \leq x \leq \beta \\ \frac{x - \beta}{x_{\max} - \beta}, & \beta < x \leq x_{\max} \\ 1, & x > x_{\max} \end{cases} \quad (2)$$

式中: x_{\min} 、 x_{\max} 为评估指标参数的阈值; α 、 β 分别为指标最佳范围的上限和下限。

2.3 确定各级评估指标权重

选用层次分析法^[20-22]计算各评估指标的权重值。层次分析法作为简便的求权重方法, 在状态评估中得到了广泛应用。设备层各设备的权重为: $W = [W_1, W_2, W_3]$, 第 i 个设备包含 j 个指标, 各指标的权重为: $W_i = [W_{i1}, W_{i2}, \dots, W_{ij}]$, 采用 AHP 确定权重的步骤如下。

(1) 建立判断矩阵
为了求各指标的权重向量, 采用 1~9 标度法^[23]构

造判断矩阵 $A = (a_{ij})_{n \times n}$, n 为判断矩阵的阶数, 如表 3 所示, $a_{ij}(i, j = 1, 2, 3, \dots, n)$ 表示第 i 个元素对第 j 个元素的相对重要程度, 其中 $a_{ij} > 0$, $a_{ji} = 1/a_{ij}$ 。

(2) 计算各指标的常权重

首先求判断矩阵 A 的最大特征根 λ_{\max} , 然后根据式(3)求出最大特征根 λ_{\max} 所对应的特征向量 W 。

$$AW = \lambda_{\max} W \quad (3)$$

对特征向量 W 进行归一化处理, 即为各指标的权重。

(3) 判断矩阵的一致性检验

判断矩阵的一致性检验公式为

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (4)$$

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (5)$$

式(4)中, RI 为平均随机一致性指标, 其取值如表 4 所示。

表 3 判断矩阵标度规则表

Table 3 Judgment matrix scale rule table

标度	含义
1	因素 i 与因素 j 同样重要
3	因素 i 比因素 j 稍微重要
5	因素 i 比因素 j 明显重要
7	因素 i 比因素 j 强烈重要
9	因素 i 比因素 j 极端重要
2,4,6,8	介于上述相邻判断矩阵之间的取值

表 4 平均随机一致性指标 RI 的取值

Table 4 Values of random coincidence indicators

阶数 n	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0	0	0.58	0.94	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

当 $CR < 0.1$ 时, 判断矩阵 A 满足一致性检验, 否则应对判断矩阵重新调整, 直至满足一致性检验标准为止^[24]。

应用上述层次分析法求得的评估指标的权重值如表 5 所示。

表 5 评估指标的权重值

Table 5 Weights of evaluation indicators

设备层	设备权重 W	指标层	指标权重 W_i
X_1	0.539 6	$\{X_{11}, X_{12}, X_{13}, X_{14}, X_{15}\}$	$\{0.3587, 0.1720, 0.0329, 0.0777, 0.3587\}$
X_2	0.297 0	$\{X_{21}, X_{22}, X_{23}, X_{24}, X_{25}\}$	$\{0.0656, 0.1231, 0.0524, 0.2793, 0.4796\}$
X_3	0.163 4	$\{X_{31}, X_{32}\}$	$\{0.75, 0.25\}$

2.4 隶属度函数的确定

常用的隶属函数可以选取不同的形状, 如三角

形、梯形、矩形等^[25-26]。因为三角形和半梯形结合的隶属函数的形状简单且计算相对容易, 与其他较

为复杂的隶属函数相比得到的结果差别较小, 因此本文选用三角形和半梯形结合的隶属函数计算各指标的隶属度, 其分布如图 2 所示。各状态等级下的隶属度函数为

$$\mu_1(x) = \begin{cases} 1, x < x_1 \\ \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1}, x_1 \leq x \leq x_2 \\ 0, x > x_2 \end{cases} \quad (6)$$

$$\mu_2(x) = \begin{cases} \frac{x - x_1}{x_2 - x_1}, x_1 \leq x < x_2 \\ \frac{x_3 - x}{x_3 - x_2}, x_2 \leq x \leq x_3 \\ 0, x < x_1 \text{ 或 } x > x_3 \end{cases} \quad (7)$$

$$\mu_3(x) = \begin{cases} \frac{x - x_2}{x_3 - x_2}, x_2 \leq x < x_3 \\ \frac{x_4 - x}{x_4 - x_3}, x_3 \leq x \leq x_4 \\ 0, x < x_2 \text{ 或 } x > x_4 \end{cases} \quad (8)$$

$$\mu_4(x) = \begin{cases} 0, x < x_3 \\ \frac{x - x_3}{x_4 - x_3}, x_3 \leq x \leq x_4 \\ 1, x > x_4 \end{cases} \quad (9)$$

式(6)一式(9)中: $\mu_i(x)$ 为指标的隶属度函数; x 为指标的相对劣化度; $x_i (i=1,2,3,4)$ 为模糊分界区间。

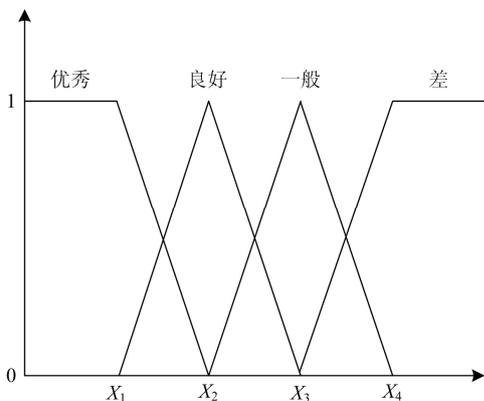


图 2 三角形和半梯形结合的隶属度函数

Fig. 2 Membership function of the combination of triangular and semi trapezoid

2.5 各级模糊关系矩阵

将各设备评价指标标准化的值分别代入选定的隶属度函数中, 从而求得各设备模糊关系矩阵为

$$R_i = \begin{pmatrix} r_{i1} & r_{i2} & r_{i3} & r_{i4} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & r_{n3} & r_{n4} \end{pmatrix} \quad (10)$$

2.6 模糊综合评价

选择对各因素加权平均运算进行计算, 依据最大隶属度原则, 采用分级评价方法对矿用提升机电气传动系统的运行状态进行综合评判^[27]。由式(11)进行一级模糊综合评价。

$$B_i = W_i R_i, \quad i=1,2,3 \quad (11)$$

根据一级模糊综合评价得到的各设备评估结果, 由式(12)进行二级模糊综合评价。

$$B = WR = (W_1, W_2, W_3) \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \end{bmatrix} \quad (12)$$

最后, 根据式(12)得到评价结果集合 $B_i (i=1,2,3)$ 后, 采用最大隶属度原则, 取与最大的评判指标 $\max(B_i)$ 项对应的评价元素 V_i 即为矿用提升机电气传动系统的评判结果, 即

$$V = \{v | v_i \rightarrow \max(B_i)\} \quad (13)$$

3 仿真分析

为了验证基于模糊综合评价的矿用提升机电气传动系统状态评价方法的有效性, 以河南某矿型号为 JKMD-4×4(Z)的提升机电气传动系统的监测数据为例进行模糊综合评价, 分析该提升机电气传动系统的运行状态。

JKMD-4×4(Z)型提升机电气传动系统主要由同步电动机、ACS6000 变频器和主轴装置等设备构成, 如图 3 所示。电动机主要由定子电枢绕组、转子励磁绕组、轴承和励磁系统等组成, 是矿井提升机的动力源, 通过主轴驱动滚筒带动罐笼提升和下

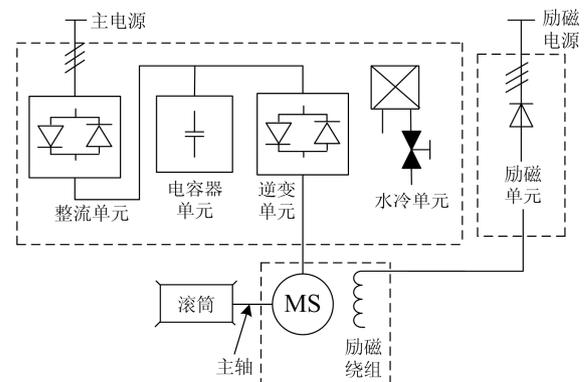


图 3 矿用提升机电气传动系统结构图

Fig. 3 Structure diagram of mine hoist electric drive system

放；变频器主要由整流单元、滤波电容单元、逆变单元和冷却系统等组成，实现电动机速度控制。主轴装置是传递动力的部件，常见的是轴承故障。该提升机电气传动系统的主要故障及其特征见表 1 所示。

3.1 评估指标的预处理

根据表(1)所示的主要故障及其特征和如图 1 所示的矿用提升机电气传动系统评估指标体系，依据各评估指标的性质，指标监测量偏离正常范围值的程度及其对设备运行状态的影响程度，将评估指标分为两类，即越小越优型和中间型，并利用式(1)和式(2)计算得到该传动系统的主要故障的劣化度和模糊分界区间参数，如表 6 所示。

表 6 各指标的劣化度及隶属度函数参数

Table 6 Deterioration degree and membership function parameters of each index

指标	类型	劣化度	模糊分界区间			
			x_1	x_2	x_3	x_4
励磁电流 X_{11}	中间型	0.71	0.3	0.55	0.85	0.9
振动 X_{12}	越小越优型	0.63	0.2	0.4	0.6	0.8
轴承温度 X_{13}	越小越优型	0.89	0.3	0.5	0.7	0.9
定子绕组温度 X_{14}	越小越优型	0.74	0.5	0.7	0.85	0.9
电机转速 X_{15}	中间型	0.70	0.25	0.45	0.75	0.85
直流母线电压 X_{21}	中间型	0.18	0.25	0.5	0.85	0.9
变频器输出电压 X_{22}	中间型	0.55	0.25	0.5	0.85	0.9
变频器输出电流 X_{23}	中间型	0.37	0.2	0.4	0.8	0.9
变频器输出频率 X_{24}	中间型	0.59	0.15	0.35	0.7	0.85
工作温度 X_{25}	越小越优型	0.46	0.3	0.5	0.65	0.9
主轴振动 X_{31}	越小越优型	0.51	0.2	0.4	0.6	0.8
轴承温度 X_{32}	越小越优型	0.72	0.3	0.5	0.7	0.9

3.2 一级模糊综合评价

根据 2.4 节所介绍的隶属度函数的确定方法，由式(10)计算各评估指标对应的 4 种状态下的模糊评价关系矩阵。分别得到同步电机的模糊评价关系矩阵 R_1 、变频器的模糊评价关系矩阵 R_2 、主轴装置的模糊评价关系矩阵 R_3 。

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0.47 & 0.53 & 0 \\ 0 & 0 & 0.85 & 0.15 \\ 0 & 0 & 0.05 & 0.95 \\ 0 & 0.73 & 0.27 & 0 \\ 0 & 0.17 & 0.83 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.80 & 0.20 & 0 \\ 0.52 & 0.48 & 0 & 0 \\ 0.64 & 0.36 & 0 & 0 \\ 0.16 & 0.84 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0.45 & 0.55 & 0 \\ 0 & 0 & 0.90 & 0.10 \end{bmatrix}$$

然后，代入式(11)分别得到同步电机、变频器和主轴装置的模糊综合评判集合为

同步电机：

$$B_1 = W_1 \times R_1 = [0, 0.2863, 0.6567, 0.0570]$$

变频器：

$$B_2 = [0.3483, 0.6721, 0.0246, 0]$$

主轴装置：

$$B_3 = [0, 0.3375, 0.6375, 0.0250]$$

3.3 二级模糊综合评价

由同步电动机、变频器和主轴装置的模糊综合评判集合 $[B_1, B_2, B_3]$ ，可得二级模糊综合评价关系矩阵为

$$R = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0.2863 & 0.6567 & 0.0570 \\ 0.3483 & 0.6721 & 0.0246 & 0 \\ 0 & 0.3375 & 0.6375 & 0.0250 \end{bmatrix}$$

由式(12)计算得到提升机电气传统系统的综合评价结果为

$$B = WR = [0.1034, 0.4092, 0.4658, 0.0348]$$

依据式(13)所表示的最大隶属度法，可得最大隶属度为 0.465 8。由此可知，该提升机传动系统的运行状态为“一般”。与实际指标监测情况对比，该结论准确反映了该电气传动系统的实际运行情况，导致其评估结果为“一般”的主要原因为电机轴承温度过高所致。因此需要对提升机传动系统及时检修，排除异常，使系统各指标都处于正常范围。

4 结论

1) 本文通过对矿用提升机电气传动系统各组成部分的故障分析，选取了各组成部分故障时具有代表性的指标，从而根据选取的指标建立了提升机传动系统的状态评估指标体系，为提升机传动系统的状态评估提供参考。

2) 对多种不同来源的评估指标按照指标的特征和性质进行分类，引入劣化度的思想对各指标进行标准化处理，有效计算各指标的模糊综合评价矩阵。

3) 提出将模糊综合评价算法应用到矿用提升机电气传动系统的运行状态评估中。根据最大隶属度原则，最终判断结果与实际相符，为开展状态维修提供依据。

参考文献

[1] 李娟莉, 杨兆建. 基于本体的矿井提升机故障诊断方

- 法[J]. 振动、测试与诊断, 2013, 33(6): 993-997.
- LI Juanli, YANG Zhaojian. Fault diagnosis method for mine hoist based on ontology[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2013, 33(6): 993-997.
- [2] 刘景艳, 王福忠, 李玉东. 基于粒子群网络的提升机制动系统故障诊断[J]. 控制工程, 2016, 23(2): 294-298.
- LIU Jingyan, WANG Fuzhong, LI Yudong. Fault diagnosis of hoist braking system based on neural network optimized by particle swarm[J]. Control Engineering, 2016, 23(2): 294-298.
- [3] 乐波, 谢恒堃. 基于模糊输出 BP 神经网络的电机主绝缘老化状态评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(2): 76-81.
- YUE Bo, XIE Hengkun. Evaluating the aging condition of main insulation in lager generator based BP artificial neural network with fuzzy output[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(2): 76-81.
- [4] YADAV A, DASH Y, ASHOK V. ANN based directional relaying scheme for protection of Korba-Bhilai transmission line of Chhattisgarh state[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 128-144. DOI: 10.1186/s41601-016-0029-6.
- [5] 徐廷学, 李志强, 顾钧元, 等. 基于多状态贝叶斯网络的导弹质量状态评估[J]. 兵工学报, 2018, 39(2): 391-398.
- XU Tingxue, LI Zhiqiang, GU Junyuan, et al. Missile condition assessment based on multi-state Bayesian network[J]. Acta Armamentarii, 2018, 39(2): 391-398.
- [6] 耿俊豹, 邱玮, 孔祥纯, 等. 基于粗糙集和 D-S 证据理论的设备技术状态评估[J]. 系统工程与电子技术, 2008, 30(1): 112-115.
- GENG Junbao, QIU Wei, KONG Xiangchun, et al. Technical condition evaluation for devices based on rough set theory and D-S evidence theory[J]. System Engineering and Electronics, 2008, 30(1): 112-115.
- [7] 李伟, 刘波峰, 林挺宇, 等. 基于 D-S 证据理论的超速离心机健康状态评估方法[J]. 仪表技术与传感器, 2011(4): 97-99.
- LI Wei, LIU Bofeng, LIN Tingyu, et al. Health assessment methods of ultracentrifuge based on Dempster Shafer evidence theory[J]. Instrument Technique and Sensor, 2011(4): 97-99.
- [8] 师元康, 姜振超, 安寸然. 智能变电站继电保护装置状态评估实用化研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(10): 119-125.
- SHI Yuankang, JIANG Zhenchao, AN Cunran. Research on practical state evaluation of protection device in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(10): 119-125.
- [9] 张珂斐, 郭江, 肖志怀. 模糊综合评价和改进证据理论相融合的变压器状态评价方法研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2016, 49(2): 279-284.
- ZHANG Kefei, GUO Jiang, XIAO Zhihui. Research on state evaluation method of transformer based on fusion of fuzzy comprehensive evaluation and improved D-S evidence theory[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2016, 49(2): 279-284.
- [10] 张晶晶, 许修乐, 丁明, 等. 基于模糊层次分析法的变压器状态评估[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(3): 75-81.
- ZHANG Jingjing, XU Xiule, DING Ming, et al. A condition assessment method of power transformers based on fuzzy analytic hierarchy process[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(3): 75-81.
- [11] 翟章良, 周力行. 基于状态量权重的变压器状态评价系统研制[J]. 智慧电力, 2018, 46(9): 88-94.
- ZHAI Zhangliang, ZHOU Lixing. Development of transformer state evaluation system based on state quantity weight[J]. Smart Power, 2018, 46(9): 88-94.
- [12] 黄必清, 何焱, 王婷艳. 基于模糊综合评价的海上直驱风电机组运行状态评估[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2015, 55(5): 543-549.
- HUANG Biqing, HE Yan, WANG Tingyan. Fuzzy synthetic evaluation of the operational status of offshore direct-drive wind turbines[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2015, 55(5): 543-549.
- [13] 李辉, 胡姚刚, 唐显虎, 等. 并网风电机组在线运行状态评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(33): 103-109.
- LI Hui, HU Yaogang, TANG Xianhu, et al. Method for on-line operating conditions assessment for a grid-connected wind turbines generator system[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(33): 103-109.
- [14] 安实, 龙江. 基于贝叶斯网络的卫星型号系统状态评估模型[J]. 北京理工大学学报, 2010, 30(5): 548-551.
- AN Shi, LONG Jiang. Model of satellite system state evaluation based on Bayers network[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2010, 30(5): 548-551.
- [15] 丛林虎, 徐廷学, 董琪, 等. 基于改进证据理论的导弹状态评估方法[J]. 系统工程与电子技术, 2016, 38(1): 70-76.
- CONG Linhu, XU Tingxue, DONG Qi, et al. Missile condition assessment method based on improved evidence theory[J]. Systems Engineering and Electronics, 2016, 38(1): 70-76.
- [16] 国连玉, 李可军, 梁永亮, 等. 基于灰色模糊综合评判

- 的高压断路器状态评估[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(11): 161-167.
- GUO Lianyu, LI Kejun, LIANG Yongliang, et al. HV circuit breaker state assessment based on gray-fuzzy comprehensive evaluation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(11): 161-167.
- [17] 邹仁华, 王毅超, 邓元婧, 等. 基于变权综合理论和模糊综合评价的多结果输出输电线路运行状态评价方法[J]. 高电压技术, 2017, 43(4): 1289-1295.
- ZOU Renhua, WANG Yichao, DENG Yuanjing, et al. Condition assessment method for transmission line with multiple outputs based on variable weight principle and fuzzy comprehensive evaluation[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(4): 1289-1295.
- [18] 马海英, 周林, 王亮. 基于劣化度的装备健康状态评估模型[J]. 火力与指挥控制, 2014, 39(10): 66-69.
- MA Haiying, ZHOU Lin, WANG Liang. Research on the model of equipment health state evaluation based on deterioration degree[J]. Fire Control & Command Control, 2014, 39(10): 66-69.
- [19] 陶杰, 章国宝, 黄永明, 等. 基于模糊综合评价的电梯安全运行状态评估[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2016, 35(6): 782-788.
- TAO Jie, ZHANG Guobao, HUANG Yongming, et al. Fuzzy comprehensive evaluation of the safety operational status of elevator[J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2016, 35(6): 782-788.
- [20] 王月月, 陈民铀, 姜振超, 等. 基于云理论的智能变电站二次设备状态评估[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(1): 71-77.
- WANG Yueyue, CHEN Minyou, JIANG Zhenchao, et al. A state assessment method for secondary equipment in intelligent substation based on cloud model[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(1): 71-77.
- [21] 冷华, 童莹, 李欣然, 等. 配电网运行状态综合评估方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(1): 53-59.
- LENG Hua, TONG Ying, LI Xinran, et al. Comprehensive evaluation method research of the operation state in distributed network[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(1): 53-59.
- [22] 李金, 陶文伟, 廖辰川, 等. 基于 LCC 理论的二次设备项目优选[J]. 智慧电力, 2017, 45(12): 55-61.
- LI Jin, TAO Wenwei, LIAO Chenchuan, et al. Projects selection of secondary equipments based on life cycle cost theory[J]. Smart Power, 2017, 45(12): 55-61.
- [23] 王德华. 基于层次分析法的生态体育产品综合测度与评价[J]. 信阳师范学院学报(自然科学版), 2017, 30(1): 155-159.
- WANG Dehua. Comprehensive measurement and evaluation of ecological sports products based on the analytic hierarchy process[J]. Journal of Xinyang Normal University (Natural Science Edition), 2017, 30(1): 155-159.
- [24] SAATY T L. Decision making with dependence and feedback: the analytic network process[M]. Pittsburgh: RWS Publications, 2001: 225-279.
- [25] 李军均, 戚进, 胡洁, 等. 一种基于隶属函数的相似度计算方法及其应用[J]. 计算机应用研究, 2010, 27(3): 891-893.
- LI Junjun, QI Jin, HU Jie, et al. Similarity measurement method based on membership function and its application[J]. Application Research of Computers, 2010, 27(3): 891-893.
- [26] 宋人杰, 陈禹名. 基于变权系数的继电保护状态模糊综合评价方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(3): 46-50.
- SONG Renjie, CHEN Yuming. Fuzzy synthetic evaluation of relay protection based on variable weight value[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(3): 46-50.
- [27] 金立兵, 丁苹聚, 张新丽. 基于全寿命理论的公路混凝土耐久性模糊评估[J]. 信阳师范学院学报(自然科学版), 2017, 30(3): 494-497.
- JIN Libing, DING Pingju, ZHANG Xinli. Fuzzy comprehensive evaluation of highway concrete durability based on life cycle theory[J]. Journal of Xinyang Normal University (Natural Science Edition), 2017, 30(3): 494-497.

收稿日期: 2018-05-26; 修回日期: 2018-12-04

作者简介:

王福忠(1961—), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为工业过程控制、智能电网、故障诊断等; E-mail: wangfzh@hpu.edu.cn

李媛媛(1993—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电气设备状态评估与维护; E-mail: 1591456477@qq.com

韩素敏(1979—), 女, 通信作者, 在读博士, 副教授, 研究方向为电力电子设备的电磁兼容、电气设备远程故障维护。E-mail: hansumin@hpu.edu.cn

(编辑 周金梅)