

基于多参数融合和组合赋权的风电机组健康状态评估*

郭煜涛¹, 谢丽蓉^{1†}, 包洪印², 孙代青¹

(1. 新疆大学 可再生能源发电与并网技术教育部工程研究中心, 新疆 乌鲁木齐 830017;
2. 中船重工海为(新疆)新能源有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830002)

摘要: 针对目前风电机组健康状态无法准确评估的问题, 提出一种基于多参数融合和组合赋权的风电机组健康状态评估方法. 根据故障频次与时长构建风电机组健康状态评估指标体系, 通过将灰色关联分析法的参数层指标客观权重与层次分析法的参数层主观权重对应结合, 再与上层指标权重综合, 归一化得到组合指标权重, 应用高斯函数确定指标对各状态等级的隶属度, 采用参数-部件-系统逐层对风电机组开展健康状态评估, 选取新疆某风电机组SCADA数据进行验证. 结果表明: 该方法可在故障发生前得出状态劣化的趋势, 对机组早期的故障发出报警, 从而达到整机状态预警的目的.

关键词: 组合赋权; 健康状态评估; 灰色关联分析; 高斯隶属度函数; 风电机组

DOI: 10.13568/j.cnki.651094.651316.2020.12.25.0001

中图分类号: TM614 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-7675(2022)01-0119-010

引文格式: 郭煜涛, 谢丽蓉, 包洪印, 孙代青. 基于多参数融合和组合赋权的风电机组健康状态评估[J]. 新疆大学学报(自然科学版)(中英文), 2022, 39(1): 119-128.

英文引文格式: GUO Yutao, XIE Lirong, BAO Hongyin, SUN Daiqing. Evaluation of health status of wind turbine based on multi-parameter fusion and combination weighting[J]. Journal of Xinjiang University(Natural Science Edition in Chinese and English), 2022, 39(1): 119-128.

Evaluation of Health Status of Wind Turbine Based on Multi-Parameter Fusion and Combination Weighting

GUO Yutao¹, XIE Lirong¹, BAO Hongyin², SUN Daiqing¹

(1. *Engineering Research Center for Renewable Energy Power Generation and Grid Technology of Ministry of Education, Xinjiang University, Urumqi Xinjiang 830017, China;* 2. *CSIC of HaiWei (Xinjiang) New Energy Co.,Ltd., Urumqi Xinjiang 830002, China*)

Abstract: In order to solve the problem that it is difficult to accurately evaluate the health status of wind turbine, a wind turbine health assessment method based on multi-parameter fusion and combination weighting is proposed. The health evaluation index system of wind turbine is constructed according to the fault frequency and time. After combining the objective weight of the bottom index of the grey relational analysis method with the subjective weight of the sub-layer of the analytic hierarchy process, and then synthesizing the weight of the upper index, the weight of the combined index is obtained by normalization, and the membership degree of the index to each state level is determined by using the Gaussian function. The parameter-component-system is used to evaluate the health status of wind turbine layer by layer, and the SCADA data of a wind turbine in Xinjiang are selected for verification. The results show that this method can get the trend of state deterioration before the fault occurs, and give an alarm to the early fault of the unit, so as to achieve the purpose of state early warning of the whole machine, and has guiding significance for operation and maintenance.

* 收稿日期: 2020-12-25

基金项目: 国家自然科学基金(51667021); 新疆维吾尔自治区区域协同创新专项(2018E02072); 新疆维吾尔自治区高校科研计划自然科学重点项目(XJDU2020I004).

作者简介: 郭煜涛(1994-), 男, 硕士生, 从事风电机组故障诊断研究, E-mail: 1102487246@qq.com.

† 通讯作者: 谢丽蓉(1969-), 女, 硕士, 教授, 从事新能源发电与智能运维研究, E-mail: wzywwwxr@163.com.

Key words: combination weighting; health status assessment; grey correlation analysis; Gauss membership functions; wind turbine

0 引言

随着风电机组单机容量的不断增加,随之出现的各种故障也在不断增加.而风电机组工作环境恶劣多变造成日常运行状态监测困难,运行维护成本较高^[1].因此研究风电机组健康状态的准确评估,对及时掌握风电机组运行状态,提前发现潜在故障征兆,减少故障停机时间具有较好的学术研究意义及工程应用价值^[2].

国内外在风电机组重要部件的运行状态研究较多,而对整个风电机组状态评估的研究较少.常用的风机状态评估方法有风功率评估和数据融合评估. Kusiak等^[3]基于霍特林统计分析风机有功功率的实时数据,来判断机组的健康状态.测定指标间权重的方法包括主观权重法、客观权重法和组合赋权法.肖运启^[4]、李辉等^[5]采用层次分析法对研究对象进行健康评估,一定程度上影响了结果的客观性.周淙等^[6]将集对分析法用于分析参量,将证据理论用于解决信息融合.黄必清等^[7]采用相关系数法确定评估指标间的客观权重,完全依赖于数据,无法充分体现指标间的相关性.董兴辉等^[8]通过乘法集成法对权重进行组合赋权,但可能出现倍增效应.曾江等^[9]采用线性加权法进行组合赋值,但确定加权系数的方法较为繁琐. LI J等^[10]采用标准云求取隶属度,通过模糊综合评判对风机运行状态进行评估.邹阳等^[11]基于双基点法计算待评估对象与标准状态理想点的贴适度,获取评估结果.杨萌等^[12]针对评价指标的模糊性和权重的不确定性,将熵权法与专家打分法进行了主观权重的结合.

本文将多参数融合与组合赋权法相结合,首先从SCADA(数据采集与监视控制)系统中提取与风电机组健康相关的监测参数,构建健康状态评估指标体系,其次通过组合赋权将灰色关联分析法客观权重与层次分析法主观权重对应结合,体现了各参数的相对重要性,然后应用高斯函数确定指标参数的隶属度,最终通过模糊综合评判模型对风电机组展开健康状态评价.

1 风电机组健康状态评估指标体系构建

1.1 健康状态评估指标体系

风电机组因其工作特性而需要在风资源丰富的环境中运行,这样的环境大多是复杂、恶劣的,且机组是由多部件协作的复杂控制系统.所以风电机组运行监测难度大,监测的参数类型繁多、数量庞大. SCADA系统是常用的风机运行监测系统,其监测数据可以作为风机运行状态的外在表征,包括温度、压力和振动等特征量,一定程度上体现了风机的健康程度^[13].

图1为新疆某风电场9号风机在2015—2018年间重要部件发生故障次数的统计.在图1中可以看到,齿轮箱和变桨系统故障发生次数逐年上升,发电机虽然故障发生次数较少,但发生故障将导致风机损失较多的发电量.

为系统、客观地反映风电机组运行状态,通过对风电机组故障模式(如齿轮箱是风电机组中重要且故障率较高的部件之一^[14])、故障次数、造成损失及监测数据等进行归纳和分析,构建了基于运行状态强相关参数的风电机组健康状态评估指标体系,如表1所示.

该指标体系由系统层、部件层和参数层3个层次构成.将风电机组的健康状态作为系统层分解成部件层中的5个评判因素,记为 $Y = \{Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5\} = \{\text{齿轮箱系统}, \text{发电机系统}, \text{变桨系统}, \text{电网环境}, \text{机舱系统}\}$.

1.2 风电机组健康状态等级划分

风电机组的运行状态是一个时变的过程,难以用数字量化.本文采用人为设定健康等级的方式对运行状态进行描述.根据风电机组运行守则和现场人员的经验,将健康状态设定为“良好”“合格”“注意”“严重”4个等级,如表2所示.

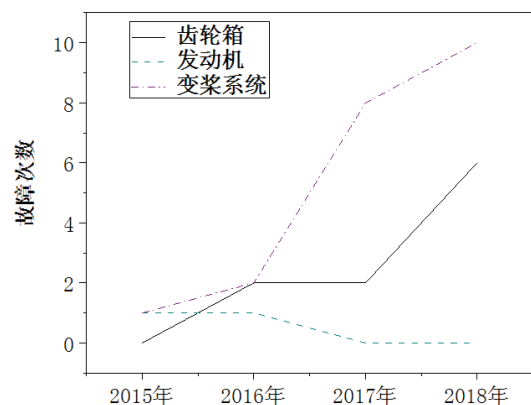


图 1 2015年—2018年风机重要部件故障次数

表 1 风电机组健康状态评估指标

系统层	部件层	参数层
风电机组运行状态	齿轮箱系统	油池温度
		高速轴前端温度
		高速轴后端温度
		进口油温
		进口压力
		油泵出口压力
		前轴承温度
		后轴承温度
		A相定子温度
		B相定子温度
	发电机系统	C相定子温度
		变桨角度
		变桨速度
		叶片电机温度
	变桨系统	控制器温度
		有功功率
	电网环境	无功功率
		电网频率
		机舱温度
	机舱系统	机舱X方向振动
机舱Y方向振动		

表 2 风电机组健康状态等级

健康等级	状态描述
良好(L1)	各项指标均正常且靠近最佳值
合格(L2)	各项指标合格, 无劣化趋势
注意(L3)	指标与阈值接近, 有劣化趋势
严重(L4)	指标不合格, 运行异常

1.3 风电机组健康状态评估过程

首先分析监测数据参量和风电机组故障分布, 建立从参数到部件到系统的评估指标体系, 根据运行规定划分健康状态等级. 其次运用层次分析法和灰色关联分析法进行组合赋权, 确定了各指标参数和部件的综合权重. 然后以劣化度的形式将参数归一化处理, 由隶属函数确定各指标的健康状态. 最后, 根据评判向量和隶属度评估原则对评价结果进行判别. 状态评估过程如图2所示.

2 组合赋权确定评估指标权重

目前, 评价指标权重的确定方法有主观赋权、客观赋权和组合赋权三种. 主观赋权依据领域内专家或者深耕于行业的从业者对评价指标的权重进行判断, 不可避免地会具有主观误差. 客观赋权是通过数学理论方法将系统运行的各项信息之间的关联转换为各特征指标的权重, 但会出现与实际差别很大的情况. 而

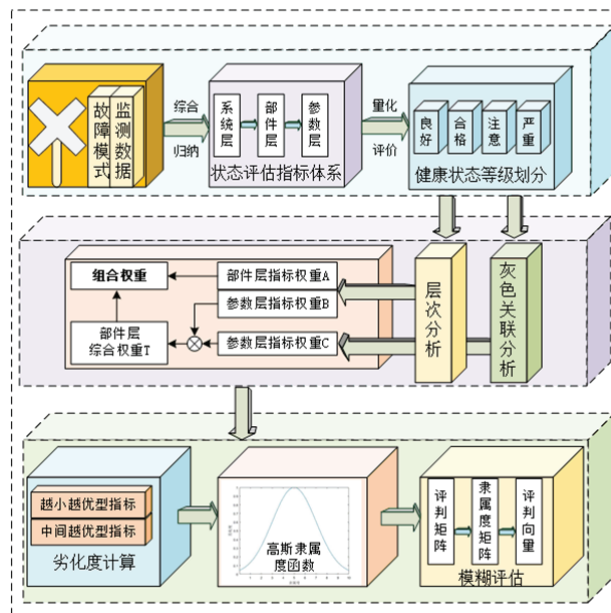


图 2 风电机组健康状态评估过程

组合赋权法是将上述两类方法进行结合,同时体现了专家经验与对象内部的客观关联.因此,本文选择将客观数据内在联系和主观经验相结合,进行组合赋权.针对灰色关联分析法和层次分析法进行组合赋权,通过将灰色关联分析法的参数层指标权重与层次分析法的参数层指标权重对应结合,再与部件层指标权重综合,归一化后得到最终的指标权重.

2.1 基于层次分析法的主观权重计算

层次分析法通常会利用分解、比较、评估和组合对系统进行分析,通过专家学者的经验知识对目标进行整体的分析,分层来构造每个层级的指标并进行两两比较,同层各指标相对于上一级指标的权重.然后通过检验一致性来调整比例,最终确定方案.在此,应用层次分析法确立风电机组特征指标的主观权重.

层次分析法求取指标权重的过程如下:

- (1)通过对同层次的指标进行两两比较,从而构造层次判别矩阵;
- (2)根据求得的判别矩阵,确定同层元素与上层元素的重要性排序;
- (3)在计算各层元素相对上层元素的权重后,由顶层到底层逐层求出相应的评价权重.

2.2 基于灰色关联分析法的客观权重计算

风电机组是一个运行指标较多的复杂系统,采集的数据间存在一定的耦合关系^[15].灰色关联分析法通常用于分析内部信息不够清楚的灰色系统,风电机组就是这样一个灰色系统,因此适用于分析风机运行数据间的权重.灰色关联分析方法不需要对数据进行较为精确的描述,具有结果精确、数据应用较为方便的特点^[16].

(1)设有 n 个对象,每个对象有 m 个指标,本文以 $Y = \{1, 1, \dots, 1\}$ 作为反映系统整体特征的理想参考数列.影响系统运行的比较数列可表示为:

$$X_i = X_{ik} \quad (1)$$

式中: $i = 1, 2, \dots, n, k = 1, 2, \dots, m$.

(2)通过初值化对数据进行归一化处理:

$$X_{ik} = \frac{X_{ik}}{X_{i1}} \quad (2)$$

(3)计算得到关联系数:

$$\xi_{ik} = \frac{\min_i \max_k |X_{0k} - X_{ik}| + \rho \min_k \max_i |X_{0k} - X_{ik}|}{|X_{0k} - X_{ik}| + \rho \min_i \max_k |X_{0k} - X_{ik}|} \quad (3)$$

式中: ρ 为分辨系数,一般取0.5^[17].因此第 i 个评价指标与参考指标的关联度为:

$$\xi_i = \sum_{k=1}^m W_k \xi_{ik} \quad (4)$$

由关联度 ξ_i 可知其权重为:

$$U_i = \frac{\xi_{ik}}{\sum_{i=1}^n \xi_{ik}} \quad (5)$$

通过灰色关联分析法计算得到风电机组健康状态指标体系参数层的客观权重,如表3所示.

表 3 客观指标权重

系统层	部件层	U_i	U_{ik}
Y	Y_1	0.280 6	{0.194 3, 0.193 1, 0.199 6, 0.190 8, 0.113 5, 0.108 8}
	Y_2	0.229 4	{0.180 3, 0.196 1, 0.221 9, 0.224 8, 0.176 1}
	Y_3	0.247 9	{0.273 2, 0.178 0, 0.274 1, 0.274 7}
	Y_4	0.123 2	{0.321 9, 0.257 8, 0.420 3}
	Y_5	0.118 9	{0.369 1, 0.379 7, 0.251 2}

2.3 组合权重计算

目前常见的组合赋权方法有线性加权法和乘法集成法,其计算方法较简单,都是将底层指标的主客观权重通过简单的加减乘除相结合,没有涉及到上层指标的结合,且可能出现求出的某指标权重值与实际相差较大,导致系统层权重失调.

线性加权法如式(6):

$$U_k = \theta\mu_k + (1-\theta)\rho_k \quad (6)$$

乘法集成法如式(7):

$$U_i = \frac{\mu_k \rho_k}{\sum_{i=1}^n \mu_k \rho_k} \quad (7)$$

式中: μ_k 为主观权重, ρ_k 为客观权重, θ 为主观权重的系数.

除此之外,层次分析法作为主观赋权法的典型方法,其思想是建立递进的结构,从而自上而下的建立分析对象的指标体系.虽然上层指标与风机系统的相对重要程度更容易被人们评价,但由于不同专家故障经验存在差异^[18]以及风电机组型的不同导致该指标下参数对于部件的重要性排序无法轻易被量化,因此评价可能出现偏差.为尽量避免以上两种误差的出现,本文对综合权重的求解方法进行改进,使各指标权重更为准确.具体步骤如下:

(1)设有 m 个部件层指标, n 个参数层指标,每个部件层指标分别包含 n_1, n_2, \dots, n_m 个子指标,并且 $n_1 + n_2 + \dots + n_m = n$,通过层次分析法得到部件层的指标权值 $A = \{A_1, A_2, \dots, A_m\}$,各参数指标的权重 $B = \{B_1, B_2, \dots, B_n\}$;

(2)通过灰色关联分析法求得各参数指标的权重 $C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$;

(3)将各指标权重 B 与权重 C 综合,求得参数指标综合权重 $T = \{T_1, T_2, \dots, T_n\}$, $T_n = B_n C_n / (\sum_{i=1}^n B_n C_n)$;

(4)按层次重新表示参数指标综合权重 $T = \{T_{11}, T_{12}, \dots, T_{2n_1}, T_{21} T_{22}, \dots, T_{2n_1}, T_{m1} T_{m2}, \dots, T_{mn_m}\}$,并分别对各部件层指标下子指标的综合权重归一化得:

$$\Omega'' = \{\omega''_{11}, \omega''_{12}, \dots, \omega''_{1n_1}, \omega''_{21}, \omega''_{22}, \dots, \omega''_{2n_2}, \dots, \omega''_{m1}, \omega''_{m2}, \dots, \omega''_{mn_m}\} \quad (8)$$

其中: $\omega''_{ij} = T_{ij} / \sum_{i=1}^n T_{ij}$, $K = n_1, n_2, \dots, n_m, i = 1, 2, \dots, m$;

(5)将部件层指标权重 A 与 Ω'' 对应相乘,得组合权重:

$$\Omega' = \{\omega'_{11}, \omega'_{12}, \dots, \omega'_{1n_1}, \omega'_{21}, \omega'_{22}, \dots, \omega'_{2n_2}, \dots, \omega'_{m1}, \omega'_{m2}, \dots, \omega'_{mn_m}\} \quad (9)$$

其中: $\omega'_{ij} = A_m \omega''_{ij}$, $i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, k, k \in \{n_1, n_2, \dots, n_m\}$;

(6)将权重 Ω' 重新表示为 $\Omega' = \{\omega'_1, \omega'_2, \omega'_3, \dots, \omega'_n\}$,对 Ω' 归一化得 $\{\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_n\}$. 可表示为:

$$\omega_i = \frac{\omega'_j}{\sum_{i=1}^n \omega'_j} \quad (10)$$

其中: $j = 1, 2, \dots, n$.

该组合权重法将客观数据内在联系和主观经验相结合,既保证了部件层的重要性,也避免了参数在评价体系中重要性无法被及时体现的问题.

3 基于高斯函数的风电机组健康状态评估模型

3.1 评估指标的量化

由于SCADA监测数据数量大且各自物理单位和数值特性不同,需要进行归一化处理来消除量纲的影响.本文采取劣化度来表示风电机组运行状态与健康状态相比较得到的程度值.所搭建的指标体系主要包括以下三种指标劣化度计算.

(1)越小越优型指标,如温度参数,劣化度计算公式可表示为:

$$g(x) = \begin{cases} 0 & x < x_{\min} \\ \frac{x-x_{\min}}{x_{\max}-x_{\min}} & x_{\min} \leq x \leq x_{\max} \\ 1 & x \geq x_{\max} \end{cases} \quad (11)$$

(2)中间越优型指标,如发电机转速,劣化度计算公式可表示为:

$$g(x) = \begin{cases} 1 & x < x_{\min} \\ \frac{x-x_{\min}}{\gamma_1-x_{\min}} & x_{\min} \leq x < \gamma_1 \\ 0 & \gamma_1 \leq x \leq \gamma_2 \\ \frac{x_{\max}-x}{x_{\max}-\gamma_2} & \gamma_2 < x \leq x_{\max} \\ 1 & x > x_{\max} \end{cases} \quad (12)$$

式中: $g(x)$ 为劣化度, $x_{\min} < \gamma_1 < \gamma_2 < x_{\max}$ (γ_1 和 γ_2 为最佳值).

(3)越大越优型指标,如有功率,劣化度计算公式可表示为:

$$g(x) = \begin{cases} 1 & x < x_{\min} \\ \frac{x_{\max}-x}{x_{\max}-x_{\min}} & x_{\min} \leq x \leq x_{\max} \\ 0 & x \geq x_{\max} \end{cases} \quad (13)$$

式中: x 为参数实测值, $[x_{\min}, x_{\max}]$ 为参数运行区间.

首先根据各指标的参数性质,确定参数层指标的单一劣化度,然后根据参数层指标的单一劣化度通过组合赋权的方式得到部件层的混合劣化度,最后通过各部件层的混合劣化度权重分配,最终得到整台风电机组的综合劣化度.

3.2 基于高斯函数的隶属度分析

由于各参数已通过劣化度计算公式得到了相应的劣化度,因此需要选取包括各指标参数劣化度取值区间的隶属度函数.基于高斯函数计算简便,可以较好地将隶属度描述出来的特性^[19],本文选取高斯函数作为隶属度函数.高斯函数主要由参数 ρ 和参数 θ 确定,如式(14)所示.参数 ρ 表示隶属度函数的均值,一般取正.参数 σ 表示隶属度函数的方差,用于确定曲线的中心.

$$F(x, \rho, \sigma) = e^{-\frac{(x-\rho)^2}{2\sigma^2}} \quad (14)$$

在此采用该函数建立相对劣化度对应健康状态等级的隶属函数.隶属度函数需要有一定的交叉区域,且区域应保持在0.2~0.6^[18].根据隶属度随着劣化度的变化规则,得到隶属度函数如下:

$$F_{L1}(x) = \begin{cases} 1 & 0.15 > x \\ e^{-\frac{(x-0.15)^2}{0.18^2}} & 0.15 \leq x < 0.35 \end{cases} \quad (15)$$

$$F_{L2}(x) = e^{-\frac{(x-0.35)^2}{0.18^2}} \quad 0 \leq x < 0.65 \quad (16)$$

$$F_{L3}(x) = e^{-\frac{(x-0.65)^2}{0.18^2}} \quad 0.35 \leq x < 0.85 \quad (17)$$

$$F_{L4}(x) = \begin{cases} e^{-\frac{(x-0.85)^2}{0.18^2}} & 0.6 \leq x < 0.85 \\ 1 & 0.85 \leq x \end{cases} \quad (18)$$

其中: $F_L(x)$ 是指第 x 个指标对应的评价等级 L 的隶属度. $L=1,2,3,4$,对应良好、合格、注意、严重.各状态评级的高斯隶属函数如图3所示.

隶属函数计算方法:按照劣化度计算结果,确定图3中高斯型的分布函数的劣化度,对于不同状态等级的模糊分界区间,将状态等级与劣化度相对应的隶属函数建立起来.

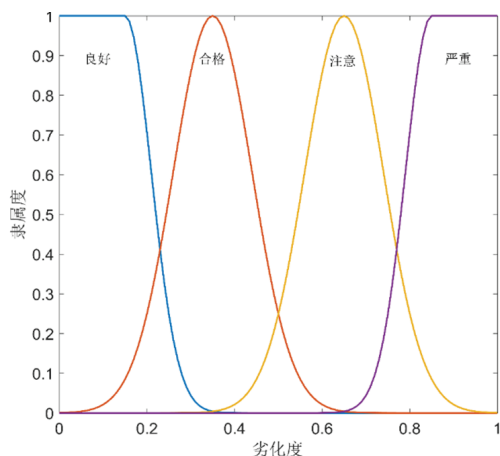


图3 高斯隶属函数分布图

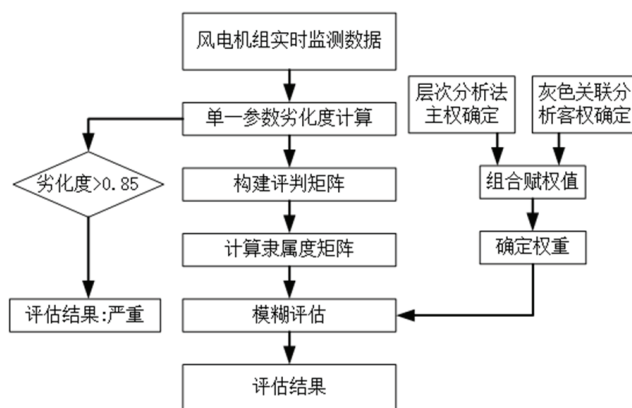


图4 模糊综合评估流程

3.3 风电机组健康状态模糊综合评判

本文评估指标较多, 因此选用多层次的模糊综合评价法. 首先建立多层次指标集, 然后从参数层开始, 从下到上地对各层级对应的指标分别进行综合评价, 最后得到系统的评判向量. 模糊综合评估流程如图4所示.

实时监测数据经过劣化度计算公式得到参数劣化度, 参数劣化度经过高斯隶属度函数的计算, 得到了系统中第*i*个部件的*m*个指标参数的劣化度隶属于状态 V_n 的隶属度矩阵 R_i :

$$R_i = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & \cdots & R_{1n} \\ R_{21} & R_{22} & \cdots & R_{2n} \\ R_{31} & R_{32} & \cdots & \cdots \\ R_{41} & R_{42} & \cdots & R_{mn} \end{bmatrix} \quad (19)$$

在模糊评判表达式中, 合理的评判算子对结果而言很重要. 本文对常用的模糊评判算子进行评估, 最终发现加权平均型模糊算子可以按照相应值的比重, 将各评估指标都应用到评估工作中, 从而在最终评估结果中体现出所有因素的影响, 使评估结果更加全面合理. 因此本文选择加权平均型模糊算子. 同时, 根据组合赋权方法将风电机组健康评估体系的权重关系建立起来, 得到各部件权重 U_i . 评估过程如下:

(1) 部件层健康状态的评估

根据第*i*个部件下属的第*m*个参数的劣化度的隶属矩阵 R_i 和同部件下其他参数的权重向量 U_i , 可得到该部件健康状态的评判向量 B_i 为:

$$B_i = U_i \cdot R_i = [b_1 \quad b_2 \quad \cdots \quad b_n] \quad (20)$$

式中: $b_n = \sum_{m=1}^m u_i r_{mn}, n=1, 2, 3, 4$.

(2) 系统层健康状态的评估

根据系统层面健康状态的隶属度矩阵 R 和权重向量 U , 计算风电机组的最终评判向量 B :

$$B = U \cdot R = [b_1 \quad b_2 \quad b_3 \quad b_4] \quad (21)$$

式中: b_1 、 b_2 、 b_3 、 b_4 分别对应良好、合格、注意、严重4个等级的隶属度数值.

4 实例分析

以新疆某风电场SCADA系统监测数据为例进行验证, 利用大样本数据采用灰色关联分析法和层次分析法进行组合权重计算得到各级各个指标的权重. 然后选取该风电场1.5 MW并网9号风电机组在2018年4月14日20:10的在线监测数据, 通过劣化度函数计算得到各参数劣化度, 齿轮箱、发电机、变桨系统、电网环境及机舱系统如表4所示.

表 4 原始数据及劣化度值

指标	原始数据	劣化度
齿轮箱油池温度	59.50	0.614 3
齿轮箱高速轴前端温度	84.99	0.694 4
齿轮箱高速轴后端温度	78.60	0.308 9
齿轮箱进口油温	57.99	0.300 4
齿轮箱油泵进口压力	0.94	0.245 4
齿轮箱油泵出口压力	5.34	0.639 9
发电机前轴承温度	37.80	0.283 7
发电机后轴承温度	26.48	0.324 4
发电机A相定子温度	89.33	0.387 5
发电机B相定子温度	89.99	0.297 8
发电机C相定子温度	90.10	0.332 9
风机变桨角度	89.10	0.214 3
风机变桨速度	0.00	0.000 0
叶片电机温度	28.8	0.178 5
变桨控制器温度	31.10	0.610 1
有功功率	2 131.00	0.012 9
无功功率	9.00	0.024 9
电网频率	50.03	0.000 0
机舱温度	15.60	0.567 3
机舱X方向振动	-0.01	0.000 0
机舱Y方向振动	-0.01	0.000 0

根据高斯隶属度函数可以计算得到各层指标的隶属度矩阵 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 和 R_5 分别为:

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0.050 7 & 0.065 9 & 0.883 4 \\ 0.003 1 & 0.031 6 & 0.012 3 & 0.953 \\ 0 & 0.003 5 & 0.353 5 & 0.643 0 \\ 0.006 7 & 0.472 2 & 0.120 8 & 0.400 3 \\ 0.002 3 & 0.413 4 & 0.306 7 & 0.277 6 \\ 0.163 2 & 0.410 2 & 0.223 & 0.224 3 \end{bmatrix}$$

$$R_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0.242 4 & 0.310 2 & 0.347 4 \\ 0.215 & 0.316 2 & 0.361 3 & 0.107 5 \\ 0 & 0.237 9 & 0.302 2 & 0.469 9 \\ 0.026 7 & 0.351 0 & 0.261 1 & 0.221 2 \\ 0.083 9 & 0.203 1 & 0.3 & 0.413 \end{bmatrix}$$

$$R_3 = \begin{bmatrix} 0.004 5 & 0.129 8 & 0.209 6 & 0.656 1 \\ 0 & 0.300 6 & 0.329 4 & 0.390 0 \\ 0.001 0 & 0.230 6 & 0.320 1 & 0.448 3 \\ 0.000 7 & 0.211 0 & 0.337 3 & 0.351 \end{bmatrix}$$

$$R_4 = \begin{bmatrix} 0.623 3 & 0.182 7 & 0.194 3 & 0 \\ 0.576 0 & 0.159 4 & 0.186 & 0.078 6 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R_5 = \begin{bmatrix} 0.522\ 6 & 0.193\ 2 & 0.284\ 2 & 0 \\ 0.422\ 3 & 0.293\ 6 & 0.283\ 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

由组合权重法计算可得部件层和参数层的各指标权重, 如表5所示.

表 5 部件层、参数层权重

指标层	权重
U	{0.410 6, 0.229 4, 0.197 9, 0.083 2, 0.078 9}
U_1	{0.369 5, 0.340 9, 0.143 5, 0.053 9, 0.050 3, 0.041 8}
U_2	{0.185 9, 0.253 4, 0.214 1, 0.150 9, 0.195 7}
U_3	{0.187 0, 0.137 7, 0.422 6, 0.252 8}
U_4	{0.298 8, 0.191 7, 0.509 5}
U_5	{0.539 2, 0.277 3, 0.183 5}

对齿轮箱系统健康状态进行评估:

$$B_1 = U_1 \cdot R_1 = \begin{bmatrix} 0.008\ 4 & 0.093\ 4 & 0.110\ 5 & 0.788\ 5 \end{bmatrix} \quad (22)$$

同样可得其他部件的健康状态评判向量, 经过整理得到机组的健康状态隶属度矩阵 R :

$$R = \begin{bmatrix} 0.008\ 4 & 0.093\ 4 & 0.110\ 5 & 0.788\ 5 \\ 0.074\ 9 & 0.268\ 8 & 0.312\ 0 & 0.325\ 2 \\ 0.001\ 4 & 0.216\ 5 & 0.305\ 1 & 0.477\ 9 \\ 0.806\ 2 & 0.085\ 1 & 0.093\ 7 & 0.015\ 1 \\ 0.582\ 7 & 0.185\ 6 & 0.231\ 7 & 0 \end{bmatrix} \quad (23)$$

结合组合权重得到风电机组的健康状态评判向量为:

$$B = U \cdot R = \begin{bmatrix} 0.134\ 0 & 0.164\ 6 & 0.203\ 4 & 0.498\ 0 \end{bmatrix} \quad (24)$$

由于模糊评估是一种步步推进, 自下而上的方法, 因此可能出现部件的某些参数已经出现了极大的劣化趋势, 但在最终的系统层评估结果中无法体现, 这是个必须考虑的问题. 评判原则仅采用“最大隶属度原则”无法消除这种影响. 因此本文采取模糊评估模型的评判原则:

- (1)当单一参数劣化度大于0.85时, 直接将健康状态评价为“严重”;
- (2)当最大等级隶属度与其他等级隶属度相差较大, 采用“最大隶属度原则”进行评价;
- (3)当最大等级隶属度与其他等级隶属度相差不大于0.3时, 但权重占比最大的部件隶属度占比相似, 则按权重最大的等级项评价状态;
- (4)当等级项隶属度相差均不大时, 需要进一步分析其权重, 并对权重较大的这些等级项采取“取隶属度大于零的最低等级项”的原则^[7].

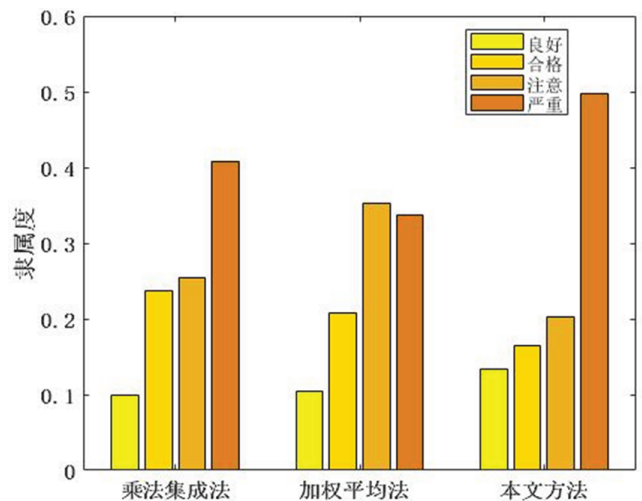


图 5 评估结果对比

本文实例评估结果应使用评判原则(3)进行评估,风电机组健康状态的评估为“严重”。从风电机组的实际监测数据看,评价结果为“严重”的主要原因是当日运行数据中齿轮箱高速轴前端和油池温度偏高,有极大的劣化趋势,而该风电机组齿轮箱在2018年4月14日20:20出现了齿轮箱高速轴超温故障的报警,评价结果与实际运行数据吻合。

采用乘法集成法和线性加权法对监测数据进行验证,与本文方法的比较结果见图5。根据对比,三种不同策略得到的结果基本一致,但本文的结果中“严重”状态的隶属度要明显大于其它两种结果。根据评估结果可知该风电机组齿轮箱系统需要进行预维护,可将齿轮箱的预维护等级放在所有部件的最高级,将维护时段与限电时段相结合,减少弃风电量。综上所述,所创建的评估模型能够实现对风电机组健康状态进行综合评估,通过评估结果可以及时掌握风机故障趋势,合理安排维修策略。

5 结论

本文主要研究了基于多参数融合和组合赋权法的风电机组健康评估方法,得出如下结论:

(1)提出了基于多参数融合与组合赋权的风电机组健康状态评估新方法,并以新疆某风电场1.5 MW风电机组为实例,证实了此方法的可靠性。

(2)采用组合赋权法,将灰色关联分析法的参数层指标权重与层次分析法的部件层权重对应结合,从而将主观权重求取过程有机结合起来,避免了简单组合底层权重导致的综合权重严重失真情况。

(3)在系统层的评价中采用递进的评价原则,避免了模糊综合评价中风电机组劣化趋势被掩盖的问题。

参考文献:

- [1] 曾军,陈艳峰,杨苹,等.大型风力发电机组故障诊断综述[J].电网技术,2018,42(3):849-860.
- [2] TAKOUTSING P, WAMKEUE R, OUHROUCHE M, et al. Wind turbine condition monitoring: state-of-the-art review, new trends, and future challenges[J]. Energies, 2014, 7(4): 2595-2630.
- [3] KUSIAK A, VERMA A. Monitoring wind farms with performance curves[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4(1): 192-199.
- [4] 肖运启,王昆朋,贺贯举,等.基于趋势预测的大型风电机组运行状态模糊综合评价[J].中国电机工程学报,2014,34(11):2132-2139.
- [5] 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.
- [6] 周淙,徐清鹏,李剑,等.融合集对分析和证据理论的风电机组运行状态评估[J].电力自动化设备,2017,37(7):38-45.
- [7] 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.
- [8] 董兴辉,张鑫森,郑凯,等.基于组合赋权和云模型的风电机组健康状态评估[J].太阳能学报,2018,39(8):2139-2146.
- [9] 曾江,蔡东阳.基于组合权重的蒙特卡洛电压暂降评估方法[J].电网技术,2016,40(5):1469-1475.
- [10] LI J, LI Q, ZHU J. Health condition assessment of wind turbine generators based on supervisory control and data acquisition data[J]. IET Renewable Power Generation, 2019, 13(8): 1343-1350.
- [11] 邹阳,何倩玲,蔡金锭.基于组合赋权-双基点法的变压器油纸绝缘状态综合评估[J].电工技术学报,2019,34(20):4400-4408.
- [12] 杨萌,袁逸萍,李明,等.基于熵权模糊法的新疆区域两化融合发展水平评价研究[J].新疆大学学报(自然科学版),2017,34(4):488-492.
- [13] 李宏坤,何德鲁,张志新,等.基于状态空间模型的可靠性评估方法[J].振动与冲击,2016,35(1):118-124.
- [14] 王桂兰,赵洪山,郭双伟.基于结构分析的风机齿轮箱传感器配置研究[J].振动与冲击,2018,37(24):181-188.
- [15] 朱双,周建中,孟长青,等.基于灰色关联分析的模糊支持向量机方法在径流预报中的应用研究[J].水力发电学报,2015,34(6):1-6.
- [16] 罗毅,周创立,刘向杰.多层次灰色关联分析法在火电机组运行评价中的应用[J].中国电机工程学报,2012,32(17):97-103+150.
- [17] 侯英杰,张立杰.我国棉花生产风险预警研究[J].新疆大学学报(自然科学版),2019,36(2):208-220.
- [18] 郭金维,蒲绪强,高祥,等.一种改进的多目标决策指标权重计算方法[J].西安电子科技大学学报,2014,41(6):118-125.
- [19] 邱小平,孙若晓,于丹,等.基于模糊聚类的车辆跟驰隶属度函数确定方法[J].计算机应用研究,2016,33(7):1952-1956.