

# 基于熵值法的大型风电机组运行状态综合评价

李大中, 许炳坤, 常城

(华北电力大学 自动化系, 河北 保定 071000)

**摘要:**为实现大型风电机组安全经济运行, 需要对其运行状态进行全面准确的评价。提出一种基于熵值法的大型风电机组综合评价方法。通过层次分析法归纳影响风电机组运行状态相关参数, 在传统熵值法正负向指标基础上引入中间型指标, 计算各子系统参数的信息熵值和权重, 依据现场数据对机组运行状态进行综合评价。根据现场数据计算出的各指标权重客观真实, 避免了由主观性和模糊性导致的偏差。验证结果表明: 该方法可以较好地跟踪评价机组运行状态, 及时发现隐患, 为大型风电机组的安全经济运行提供参考。

**关键词:**大型风电机组; 熵值法; 运行状态; 综合评价

中图分类号: TM614 文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlge.2016.04.001

## 引言

风力发电在减少对煤炭等化石燃料消耗的同时, 可有效降低污染物排放, 对于保护环境减轻温室效应具有重要的意义。大型风电机组大多位于全年风力较大, 环境较为恶劣地区, 导致机组故障率较高, 维修与更换设备极为不便且成本高昂, 因此全面准确的机组运行状态评价对于保障机组经济运行, 避免生产事故具有重要意义。目前国内外机组运行状态评价研究主要集中在主观定权评价方法和用于不同对象之间综合状态比较的熵值法。文献[1]在模糊综合评价方法基础上提出了对状态参数的模糊预测, 体现机组运行趋势; 文献[2, 7]介绍了基于熵值法的系统综合比较排名方法; 文献[5]提出了基于状态参数劣化度的变权评价方法; 文献[6]介绍了一种结合物元分析和基于劣化度变权分析的综合评价方法。

本研究采用熵值法, 通过风电机组状态参数运

行数据, 计算子系统各运行状态参数的权重, 进而得到各子系统运行状态评价结果, 给出机组运行状态的评价指标。

## 1 风电机组综合评价指标分析

为保证机组运行状态评价的准确性, 需要分析影响机组运行状态的各类因素。本研究以1 MW恒速风力发电机组运行状态作为评价对象, 采用层次分析法分析机组运行主要影响因素。首先将机组分为4个子系统, 分别为齿轮箱系统P1、机舱系统P2、发电机系统P3和控制系统P4, 各子系统选取其主要运行状态参数作为评价指标, 综合评价体系如图1所示。

## 2 风电机组熵值综合评价方法

熵值法是一种客观定权方法, 它通过各指标实际数据信息量的大小来确定各指标权重, 即指标数值相对波动范围越大, 该指标包含的信息量就越大, 对系统的贡献性也更大。相对于专家评分法和层次分析法等, 熵值法更加客观可信, 但是它需要完整的样本数据, 因此应用范围受到限制。如果样本数据能全面完整地体现系统各状态特性, 熵值综合评价方法将更加科学合理。

文献[2~3, 7]介绍了熵值法在系统综合评价方面的应用, 同时体现出传统熵值法更适合不同系统之间进行比较。本研究对传统熵值法进行了改进, 并基于此实现了大型风电机组运行状态综合评价。在确定指标权重和获得综合评价结果过程中,

收稿日期: 2015-04-13; 修订日期: 2015-04-29

作者简介: 李大中(1961-), 男, 内蒙古包头人, 华北电力大学教授, 博士。

通讯作者: 许炳坤(1991-), 男, 华北电力大学硕士研究生。

熵值法需要全面完整的样本数据,本研究选取该机组 6 段包含不同故障的运行数据和 6 段正常运行的

运行数据作为该方法数据样本,保证评价结果客观准确。

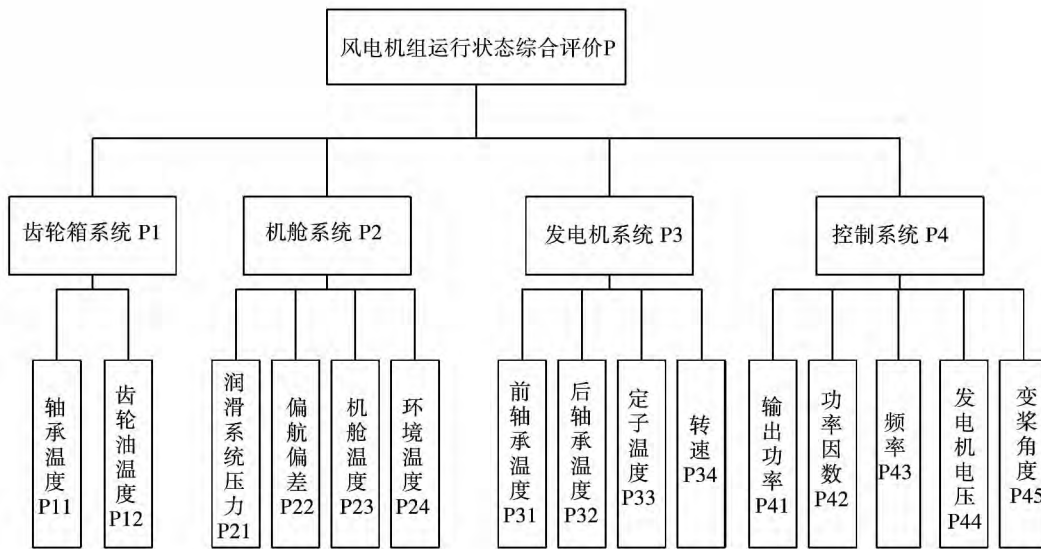


图 1 风电机组运行状态综合评价体系

Fig. 1 Comprehensive evaluation system of wind turbine operating status

2.1 评价指标归一化和标准化

2.1.1 数据归一化

传统熵值法包括正向指标和负向指标。假定有  $m$  个评价指标,  $n$  个对象。评价指标  $j$  的理想值为  $x_j^*$ , 对于正向指标,  $x_j^*$  越大越好, 记最大值为  $x_{jmax}^*$ ; 对于负向指标,  $x_j^*$  越小越好, 记最小值为  $x_{jmin}^*$ 。  $\max\{x_j\}$  和  $\min\{x_j\}$  分别表示指标  $j$  实际数据最大值和最小值。定义  $x'_{ij}$  为  $x_{ij}$  相对于  $x_j^*$  的接近程度<sup>[3]</sup>。

对于正向指标,

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij} - \min\{x_j\}}{\max\{x_j\} - \min\{x_j\}} \quad (1)$$

对于负向指标,

$$x'_{ij} = \frac{\max\{x_j\} - x_{ij}}{\max\{x_j\} - \min\{x_j\}} \quad (2)$$

在实际运行中, 风电机组的运行参数如转速、偏航偏差和发电机电压等应维持在一定范围内, 不符合传统熵值法中的正向或负向指标。基于文献 [1] 引入的劣化度, 本研究提出一种中间型指标改进方法对上述指标进行归一化。对于中间型指标:

$$x'_{ij} = \begin{cases} 0 & x \leq \min\{x_j\} \\ \frac{x_{ij} - \min\{x_j\}}{x_a - \min\{x_j\}} & \min\{x_j\} < x < x_a \\ 1 & x_a \leq x \leq x_b \\ \frac{\max\{x_j\} - x_{ij}}{\max\{x_j\} - x_b} & x_b < x < \max\{x_j\} \\ 0 & \max\{x_j\} \leq x \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $x_a$  和  $x_b$  一该参数最佳运行范围的下限和上限。

本研究以发电机转速为例, 介绍中间型指标及其归一化过程。该发电机为四磁极发电机, 额定转速 1 500 r/min。发电机转速运行数据如图 2 所示, 图中采样点为每 5 min 机组运行数据。

根据中间型指标归一化方法, 设 1 495 ~ 1 505 r/min 为最佳运行范围, 取转速变化范围: 1 550 ~ 1 000 r/min。改进与传统归一化结果如图 3 所示。

2.1.2 数据标准化

对归一化得到的  $x'_{ij}$  进行标准化<sup>[3]</sup>。

$$y_{ij} = \frac{x'_{ij}}{\sum_{i=1}^m x'_{ij}} \quad (0 \leq y_{ij} \leq 1) \quad (4)$$

由此可得标准化矩阵:  $Y = \{y_{ij}\}_{m \times n}$ 。

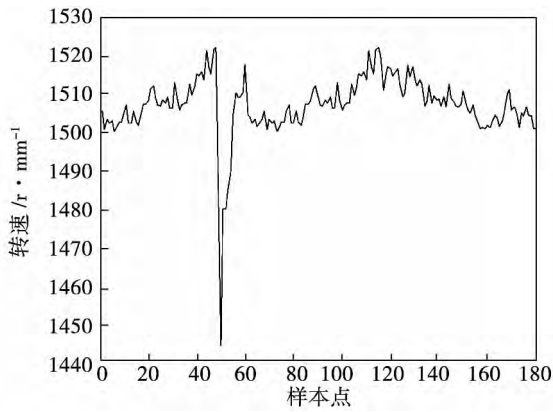


图 2 发电机转速运行数据

Fig. 2 Operating data of generator speed

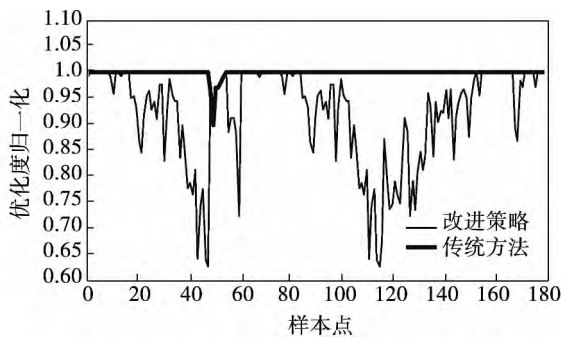


图 3 发电机转速不同策略归一化结果比较

Fig. 3 Comparison between improved and conventional normalizations of generator speed

### 2.2 计算各指标信息熵值和权重

对于第  $j$  项指标, 指标值  $x_{ij}$  之间的差异越大, 对该机组综合评价的作用越大, 熵值  $e_j$  也越小。

$$e_j = -\frac{1}{\ln(n)} \sum_{i=1}^n y_{ij} \ln(y_{ij}) \quad (5)$$

为便于计算, 规定  $0 \ln 0 = 0$ 。

设第  $j$  项指标信息效用值和权重分别为  $g_j$  和  $w_j$ <sup>[3]</sup>。

$$g_j = 1 - e_j \quad (6)$$

$$w_j = \frac{g_j}{\sum_{j=1}^m g_j} \quad (7)$$

风电机组由于风场波动频繁且幅度较大, 机组输出功率和功率因素随之波动变化, 不利于对风电机组安全性的综合评价。本研究对此进行调整, 规定当输出功率和功率因素都大于零时, 认为机组处于正常运行状态, 即参数 P41 和 P42 都为 ‘1’。经

计算和调整, 各子系统主要运行状态参数权重如表 1 所示。

表 1 综合评价体系各子系统主要运行状态参数权重

Tab. 1 Weighting factors of subsystem parameters in comprehensive evaluation system

子系统	主要运行状态参数	权重
P1	[P11 P12]	[0.420 3 $\beta$ . 579 7]
P2	[P21 P22 P23 P24]	[0.826 $\beta$ . 197 2 $\beta$ . 000 1 $\beta$ . 000 1]
P3	[P31 P32 P33 P34]	[0.015 5 $\beta$ . 029 7 $\beta$ . 256 3 $\beta$ . 698 5]
P4	[P41 P42 P43 P44 P45]	[0.436 3 $\beta$ . 316 4 $\beta$ . 000 1 $\beta$ . 015 6 $\beta$ . 233 3]

### 2.3 熵值法综合评价结果

根据运行状态参数计算得到该机组第  $p$  个子系统运行状态评价结果  $c_p$ 。

$$c_p = \sum_{j=1}^q x'_{ij} \cdot w_j \quad (0 \leq c_p \leq 1) \quad (8)$$

式中:  $q$  — 该子系统包含的参数个数。

大型风力发电机组是一个涉及力学、机械、电气、控制等的复杂系统, 任何运行参数异常都可能导致机组运行状况不良, 触发停机保护甚至发生故障。为获得更准确全面评价, 避免个别运行状态参数已经出现异常状态, 但由于权重限制不能在评价结果中及时体现, 根据文献 [1] 中“取隶属度大于零的最低等级项”原则和文献 [4] 中短板效应, 本研究认为机组运行综合评价结果  $s$  应取各子系统评价结果  $c_p$  的最小值。

$$s = \min\{c_p\}, 1 \leq x \leq 4 \quad (9)$$

为更直观体现评价结果, 通过数据统计方法, 根据故障数据和正常数据通过熵值计算评价结果将初步评价结果  $s$  划分为 3 个评价等级, 即  $ss = [$  ‘故障’, ‘注意’, ‘良好’ ] 对应关系如下:

$$ss = \begin{cases} \text{‘故障’} & 0 \leq s \leq 0.2 \\ \text{‘注意’} & 0.2 < s < 0.8 \\ \text{‘良好’} & 0.8 \leq s \leq 1 \end{cases} \quad (10)$$

### 3 实例分析

本研究选取 1 MW 恒速风力发电机组部分运行数据如表 2 所示, 其中 t1 至 t10 为每 5 min 采样点, p11 至 p45 为机组各子系统状态参数。在该段时间机组主轴轴承发生损坏, 导致齿轮箱轴承温度和齿轮油温度异常升高, 并触发停机保护。

表 2 1 MW 风电机组运行数据  
Tab.2 1 MW wind turbine operating data

参数	t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7	t8	t9	t10
p11/°C	55.15	59.55	67.77	68.01	71.39	74.97	76.88	83.23	84.2	84.02
p12/°C	51.63	50.47	61.82	61.89	64.39	68.85	70.05	77.24	78.33	78.33
p21/MPa	0.15	0.15	0.15	0.15	0.14	0.13	0.13	0.11	0.11	0.11
p22/(°)	33.32	7.93	21.18	-13.34	-17.46	8.52	3.82	3.73	5.12	-2.73
p23/°C	36.19	36.45	36.82	36.85	37.12	38	38.61	37.58	37.43	37.37
p24/°C	34.79	34.3	34.1	34.07	33.44	34.61	36.01	29.64	30.3	30.02
p31/°C	36.28	36.81	37.26	37.44	38.15	39.47	39.85	41.34	40.85	40.82
p32/°C	29.7	30.04	30.37	30.46	30.88	31.52	31.58	31.19	30.42	30.33
p33/°C	36.54	38.16	39.49	39.8	40.9	41.92	42.68	43.14	40.42	40.33
p34/r · min <sup>-1</sup>	1 502.56	1 502.63	1 501.63	1 505.05	1 505.93	1 509.22	1 509.05	1 504.51	613.79	15.34
p41/kW	72.48	187.31	214.48	358.04	460.91	415.42	490.78	291.77	-0.04	0
p42/%	-0.79	-0.96	-0.97	-0.99	-1	-0.99	-1	-0.99	0	0
p43/Hz	50.12	50.1	50.09	50.05	50.09	50.11	50.09	50.09	50.1	50.1
p44/V	705	703	698	694	700	725.78	730.82	705	696.75	696.31
p45/(°)	-19.31	-19.03	-19.01	-17.42	-17.27	-17.35	-17.29	-17.64	-17.29	-17.28

3.1 熵值综合评价方法

将表 2 数据根据式(1)~式(8)进行计算,根据式(9)取各子系统评价结果最小值作为机组运行评价结果,根据式(10)对其进行等级评价。其中采样点 t1、t5 和 t10 对应的机组运行评价结果分别为 0.802 1、0.484 7 和 0.018 2,对应的评价等级分别为良好、注意和故障。

3.2 模糊综合评价方法

根据图 1,选取各子系统运行状态参数作为各子系统因素并选取式(9)作为评语集。根据式(1)~式(3)对第 i 个采样点参数归一化,得到 x'ij。选取岭形分布隶属度函数,各参数模糊关系如下<sup>[1]</sup>:

$$r_{ss1}(x'_{ij}) = \begin{cases} 0 & 0.8 \leq x'_{ij} \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{0.6}(x'_{ij} - 0.5) & 0.2 < x'_{ij} < 0.8 \\ 1 & x'_{ij} \leq 0.2 \end{cases} \quad (11)$$

$$r_{ss2}(x'_{ij}) = \begin{cases} 0 & 0.8 \leq x'_{ij} \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{0.3}(x'_{ij} - 0.35) & 0.2 < x'_{ij} < 0.5 \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{0.6}(x'_{ij} - 0.65) & 0.5 < x'_{ij} < 0.8 \\ 0 & x'_{ij} \leq 0.2 \end{cases} \quad (12)$$

$$r_{ss3}(x'_{ij}) = \begin{cases} 1 & 0.8 \leq x'_{ij} \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{0.6}(x'_{ij} - 0.5) & 0.2 < x'_{ij} < 0.8 \\ 0 & x'_{ij} \leq 0.2 \end{cases} \quad (13)$$

经计算,得到第 p 个子系统运行状态参数归一化后隶属于评语集 ss 隶属度关系矩阵 Rp。

$$R_p = \begin{bmatrix} r_{ss1}(x'_{i1}) & r_{ss2}(x'_{i1}) & r_{ss3}(x'_{i1}) \\ r_{ss1}(x'_{i2}) & r_{ss2}(x'_{i2}) & r_{ss3}(x'_{i2}) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{ss1}(x'_{iq}) & r_{ss2}(x'_{iq}) & r_{ss3}(x'_{iq}) \end{bmatrix} \quad (14)$$

选取表 1 中通过熵值法计算得到的第 p 个子系统参数权重 [w<sub>p1</sub> w<sub>p2</sub> …w<sub>pq</sub>] 作为权值向量 wp。通过关系矩阵 Rp 和权值向量 wp 计算该子系统综合评价隶属度矩阵 Bp = wp · Rp。进而得到各子系统综合评价隶属度矩阵 B = [B1 B2 B3 B4]<sup>T</sup>。

对于子系统权值向量 W = [W1 W2 W3 W4], 基于对各子系统重要性的考虑和对事故频率的统计,对其赋值为 W = [0.27 0.22 0.23 0.28]。结合子系统综合评价隶属度矩阵 B,该机组运行状态综合评价隶属度矩阵 C 为

$$C = W \cdot B = [c_1 c_2 c_3] \quad (15)$$

式中: c1、c2、c3 一对应良好、注意、故障 3 个等级的隶属度数值。

根据上述步骤计算可以得到各采样点对应的机组综合评价隶属度矩阵,其中  $t_1$ 、 $t_5$  和  $t_{10}$  对应的隶属度矩阵分别为  $[0.012\ 7\ 0.025\ 4\ 0.987\ 3]$ 、 $[0.167\ 0\ 0.307\ 5\ 0.833\ 0]$  和  $[0.813\ 9\ 0.127\ 0\ 0.186\ 1]$ , 对应的评价等级分别为良好、良好和故障。

### 3.3 评价结果比较

依据表2数据,熵值综合评价法和模糊评价法计算结果如表3所示。

表3 熵值综合评价法和模糊评价法计算结果

Tab.3 Calculation results by entropy and fuzzy comprehensive evaluation methods

采样点	熵值综合评价		模糊综合评价	
	评价结果	评价等级	评价结果	评价等级
$t_1$	0.802 0	良好	$[0.012\ 7\ 0.025\ 4\ 0.987\ 3]$	良好
$t_2$	0.804 9	良好	$[0.018\ 9\ 0.037\ 8\ 0.987\ 3]$	良好
$t_3$	0.560 2	注意	$[0.120\ 9\ 0.241\ 8\ 0.879\ 1]$	良好
$t_4$	0.556 5	注意	$[0.122\ 4\ 0.244\ 9\ 0.877\ 6]$	良好
$t_5$	0.484 7	注意	$[0.167\ 0\ 0.307\ 5\ 0.833\ 0]$	良好
$t_6$	0.384 5	注意	$[0.240\ 3\ 0.266\ 8\ 0.759\ 7]$	良好
$t_7$	0.346 7	注意	$[0.264\ 7\ 0.218\ 4\ 0.759\ 7]$	良好
$t_8$	0.178 6	故障	$[0.333\ 5\ 0.127\ 0\ 0.666\ 5]$	良好
$t_9$	0.098 1	故障	$[0.723\ 4\ 0.288\ 0\ 0.266\ 6]$	故障
$t_{10}$	0.013 7	故障	$[0.813\ 9\ 0.127\ 0\ 0.186\ 1]$	故障

由表3结果可知,在评价时间段内,该机组实际状态是由正常运行变为故障停机。然而模糊评价结果一直处于“良好”范围内,仅在停机之后给出“故障”,未能真实准确跟踪评价机组实际运行状态。

## 4 结 论

为更好跟踪评价大型风力发电机组运行状态,本研究提出一种基于改进熵值法的风电机组综合评价方法。首先根据层次分析法对风电机组运行状态建立综合评价体系,然后在传统熵值法正、负向指标基础上引入中间型指标,采用“机组运行综合评价结果应依据各子系统评价结果最小值”的策略。通过实例分析,本文提出的熵值综合评价方法能够更好地体现风电机组运行劣化趋势,及时发现运行隐患,避免安全事故。

### 参考文献:

[1] 肖运启,王昆朋,贺贵举,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(13):2132-2139.

XIAO Yun-qi, Wang Kun-peng, He Guan-ju. Fuzzy comprehensive evaluation for operating condition of large-scale wind turbines based on trend predication[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(13): 2132-2139.

[2] 齐敏芳,付忠广,景源,等.基于信息熵与主成分分析的火电机组综合评价方法[J].中国电机工程学报,2013,33(02):58-64+12.

QI Min-fang, FU Zhong-guang, JING Yuan, et al. A Comprehensive evaluation method of power plant units based on information entropy and principal component analysis[J]. Proceeding of the CSEE, 2013, 33(02): 58-64+12.

[3] 郑锋,王巧芝,高学辉,等. Matlab与熵值法在综合评价中的应用[A]. 中国通信学会青年工作委员会. Proceedings of 2010 National Vocational Education of Communications and Information Technology Conference (2010 NVCIC) [C]. 中国通信学会青年工作委员会, 2010: 5.

ZHENG Feng, WANG Qiao-zhi, GAO Xue-hui, et al. Application of matlab and entropy in comprehensive evaluation [C]. Proceedings of 2010 National Vocational Education of Communications and Information Technology Conference (2010 NVCIC) 2010: 5.

[4] 陶顺,肖湘宁.基于短板效应的电能质量综合等级评价[J]. 电工电能新技术, 2008, 27(02): 16-20.

TAO Shun, XIAO Xiang-ning. Synthetic grading evaluation of power quality based on incentive mechanism [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2008, 27(02): 16-20.

[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.

LI Hui, HU Yao-gang, TANG Xian-hu, et al. Method for on-line operating conditions assessment for a grid-connected wind turbine generator system [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(33): 103-109.

[6] 李辉,胡姚刚,杨超,等.并网风电机组运行状态的物元评估方法[J].电力系统自动化,2011,35(06):81-85.

LI Hui, HU Yao-gang, YANG Chao, et al. A matter element assessment method of a grid-connected wind turbine driven generator system under on-line operating conditions [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(06): 81-85.

[7] 唐文彬,韩之俊.基于熵值法的财务综合评价方法[J].南京理工大学学报(自然科学版),2001,25(06):650-653.

TANG Wen-bin, HAN Zhi-jun. A comprehensive evaluation method of financial position based on information entropy [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2001, 25(06): 650-653.

[8] 张登峰,郝伟,郝旺身,等.模糊理论在风力发电设备状态评价中的应用[J].机械设计与制造,2011,11:75-77.

ZHANG Deng-feng, HAO Wei, HAO Wang-shen, et al. Application of fuzzy theory in status evaluation of wind power generation equipment [J]. Machinery Design & Manufacture, 2011, 11: 75-77.

[9] 安学利,蒋东翔.风力发电机组运行状态的混沌特性识别及其趋势预测[J].电力自动化设备,2010,30(03):15-19+24.

AN Xue-li, JIANG Dong-xiang. Chaotic characteristics identification and trend prediction of running state for wind turbine [J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(03): 15-19+24.

(姜雪梅 编辑)

基于熵值法的风电机组运行状态综合评价 = **Entropy-based Comprehensive Evaluation for the Operating Conditions of Large-Scale Wind Turbine** [刊, 汉] LI Da-zhong, XU Bing-kun, CHANG Cheng (North China Electric Power University, Baoding, Hebei, China, Post Code: 071000) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016, 31(4). -1~5

In order to achieve the operation safety and economy of large-scale wind turbines, a comprehensive and accurate evaluation of the turbine operation is desired. In this paper, such an evaluation method was proposed based on entropy. By summarizing the status parameters that affect wind turbines through analytic hierarchy process (AHP) and introducing the intermediate indexes on the basis of positive and negative indexes of the traditional entropy method to calculate the entropy and the weighting factor for each subsystem, the unit operating status can be comprehensively evaluated based on the field data. Verification results show that the presented method can better track and evaluate the unit operating status, and can detect the potential problems timely, providing a reference for the operation safety and economy of large-scale wind turbines. **Key words:** large-scale wind turbines, entropy, operating status, comprehensive evaluation

换能器半径对超声波除垢性能的影响 = **Influence of Transducer Radius on Ultrasonic Descaling Performance** [刊, 汉] FU Jun-ping, SHI Pei, ZENG Zhao-bin, HE Ye-cong (College of Energy and Power Engineering under Changsha University of Science and Technology, Changsha, China, Post Code: 410114) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016, 31(4). -6~11

To study the influences of ultrasound transducer radius on descaling scope and descaling efficiency, the sound field distribution function and sound intensity expression of non-point source applicable for ultrasonic transducer were derived, and both the experimental analysis and MATLAB simulation were conducted in this paper. The results show that the sound field distribution impacts descaling scope and the sound intensity determines descaling efficiency. In the vertical direction of ultrasound transducer center, the sound intensity is the strongest and descaling efficiency is the highest. With the angle diverging to both sides, the sound intensity weakens and the descaling efficiency decrea-