

赵延明,方紫微,敬明洋,等.基于数据挖掘的风电变桨后备电源健康状态评价方法[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2022,37(3):77-86. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2022.03.011

ZHAO Y M, FANG Z W, JING M Y, et al. Evaluation Method of SoH for Backup Power in Wind Turbine Pitch System Based on Data Mining [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2022, 37(3):77-86. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2022.03.011

# 基于数据挖掘的风电变桨 后备电源健康状态评价方法

赵延明<sup>1, 2\*</sup>, 方紫微<sup>1</sup>, 敬明洋<sup>1</sup>, 吴劲豪<sup>1</sup>

(1. 湖南科技大学 信息与电气工程学院, 湖南 湘潭 411201;

2. 风电机组运行数据挖掘与利用技术湖南省工程研究中心, 湖南 湘潭 411201)

**摘要:** 风力发电机变桨系统广泛采用超级电容作为后备电源, 其性能退化将直接影响到紧急安全顺桨. 针对超级电容等效电路建模的合理精确性直接影响其健康状态评价的不足, 利用风电变桨超级电容后备电源充放电过程中外特性参数数据, 采用数据聚类挖掘手段, 提出一种基于混合加权欧氏距离的超级电容 SoH 评价方法, 快速有效地评价后备电源 SoH 的优劣. 通过“充电—静置—放电—静置”全过程参数特性分析, 验证了该方法的正确性.

**关键词:** 风电变桨系统; 后备电源; 超级电容; 健康状态; 混合加权欧氏距离; CRITIC 法

**中图分类号:** TM53      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1672-9102(2022)03-0077-10

## Evaluation Method of SoH for Backup Power in Wind Turbine Pitch System Based on Data Mining

ZHAO Yanming<sup>1,2</sup>, FANG Ziwei<sup>1</sup>, JING Mingyang<sup>1</sup>, WU Jinhao<sup>1</sup>

(1. School of Information and Electrical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. School of Engineering Research Center of Hunan Province for the Mining and Utilization of Wind Turbines Operation Data, Xiangtan 411201, China)

**Abstract:** Supercapacitors are widely used as backup power in wind turbine pitch system, and their performance degradation will directly affect the safety of emergency pitch. Aiming at the deficiency that the reasonable accuracy of equivalent circuit modeling for ultracapacitor directly affects its State of Health (SoH), based on the external characteristic parameter data of supercapacitor backup power for wind turbine pitch system during charge-discharge process, a new SoH evaluation method of supercapacitor is proposed in the paper by using the mixed weighted Euclidean distance in data clustering mining method, which can quickly and effectively evaluate the advantages and disadvantages of the backup power. The correctness of the method is verified by analyzing the parametric characteristic during the whole process of “charge-standing-discharge-standing”.

**Keywords:** wind turbine pitch system; backup power; supercapacitor; SoH; mixed weighted Euclidean distance; Criteria Importance Though Intercriteria Correlation (CRITIC) method

收稿日期: 2021-12-17

基金项目: 湖南省自然科学基金面上资助项目(2021JJ30271); 湖南省教育厅科研重点项目资助(19A183); 国家重点研发计划项目资助(2016YFF0203400)

\* 通信作者, E-mail: ymzhao@hnust.edu.cn

风力发电已成为可再生能源发展的重要方向<sup>[1-2]</sup>.风电机组变桨系统在突发电网电压跌落、极端恶劣天气掉电情况下,通常启用后备电源进行紧急顺桨来确保风电机组安全运行.而超级电容具有众多优点<sup>[3-5]</sup>,广泛应用于风电变桨备用电源.后备电源通常由多个超级电容单体串并联组成,单体性能退化甚至严重损坏会影响备用电源正常工作,致使无法紧急安全顺桨<sup>[6]</sup>.

目前,国内外学者针对超级电容 SoH 评价开展了大量研究.Eddahech. A<sup>[7]</sup>基于超级电容 RLC 等效电路模型,在线估计超级电容等效内阻来判断 SoH;Torregrossa D 等<sup>[8]</sup>基于指数退化规律,预测超级电容容值退化来评价 SoH;Chaoui H 等<sup>[9-10]</sup>在线辨识电容等效电阻、容值来预测寿命;石建等<sup>[11]</sup>在线估计风电机组变桨超级电容模组剩余电量(SoC)差值,实时判断模组 SoH;Oukaour. A 等<sup>[12]</sup>基于电学模型和日历老化试验,判断容值、SoC 变化进行在线诊断;陈琳<sup>[13]</sup>基于一阶 RC 等效电路模型,离线构建电池退化状态模型,新陈代谢 ELM 在线估计 SOH;冯海林等<sup>[14]</sup>提取电流差和电压差为健康因子,线性回归电池估计容量,然后运用 PSO-BP 算法进行 SoH 估计与 RUL 预测.

上述文献是以超级电容等效电阻、容值或 SoC 为健康指数,基于超级电容等效电路,采用相应的估计方法估算出健康指数来评价其 SoH,等效电路建模的合理性直接影响着估算精度,进而影响着其评价结果.对于不同应用背景很难建立起统一的超级电容等效电路,故这些方法存在着一定的局限性.因此,利用充放电过程的电流、电压、温度、电量等外特性参数,采用数据聚类挖掘手段,提出一种基于混合加权欧氏距离的超级电容后备电源 SoH 评价方法,快速有效地评价超级电容后备电源 SoH.

## 1 混合加权欧氏距离计算方法

### 1.1 权重计算

CRITIC 法是由 Diakoulaki 提出的一种客观权重赋权法,利用数据波动性和数据相关性得出权重.数据波动性大小以标准差的形式来衡量,波动越大,属性权重越高;数据相关性大小用相关系数来度量,相关性越小,属性权重会越低<sup>[15-16]</sup>.根据 CRITIC 法计算各属性的客观权重的步骤如下.

Step 1:属性数据归一化

1 个具有  $m$  个属性,且每一个属性包含  $n$  个数据的数据集,其属性矩阵表示为

$$X = [P_1, P_2, \dots, P_j, \dots, P_m] = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & x_{ij} & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nm} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

式中:  $P_j$  为第  $j$  个属性,  $P_j = (x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{nj})^T$ ;  $x_{ij}$  为第  $j$  个属性的第  $i$  个数据值,  $i=1, 2, \dots, n, j=1, 2, \dots, m$ .

为了避免属性量纲不同影响计算结果,对于效益型属性、成本型属性,分别按式(2)和式(3)进行归一化处理.

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

$$x'_{ij} = \frac{x_j^{\max} - x_{ij}}{x_j^{\max} - x_j^{\min}}. \quad (3)$$

式中:  $x_j^{\max} = \max\{x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{nj}\}$ ;  $x_j^{\min} = \min\{x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{nj}\}$ .

无量纲归一化属性矩阵可表示为

$$X'_i = [P'_1, P'_2, \dots, P'_m] = (x'_{ij})_{n \times m}. \quad (4)$$

Step2:属性标准差计算

属性波动性采用标准差来衡量,属性  $P'_j$  标准差为

$$S_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left( x'_{ij} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x'_{ij} \right)^2}{n}}. \quad (5)$$

Step3:属性相关系数计算

属性的相关性采用相关系数来衡量,属性  $P'_j$  和  $P'_k$  之间的相关系数为

$$R_j = \sum_{k=1}^m \left( 1 - \frac{\text{Cov}(P'_k, P'_j)}{\sqrt{|\text{Var}|P'_k|} \sqrt{|\text{Var}|P'_j|}} \right). \quad (6)$$

Step 4:属性数据信息量计算

设  $C_j$  表示属性  $P_j$  所包含的信息量,  $C_j$  越大,属性  $P_j$  在整个评价体系中作用越大,权重更大,  $C_j$  表示为  $C_j = S_j R_j$ .

(7)

Step 5:属性客观权重计算

属性  $P_j$  的客观权重为

$$\omega_j = \frac{C_j}{\sum_{j=1}^m C_j}. \quad (8)$$

由此,可以得出权重向量  $\omega = [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m]$ , 且  $\sum_{j=1}^m \omega_j = 1$ .

## 1.2 混合加权欧氏距离计算

同一评价对象不同属性的贡献程度有所不同,并且不同评价对象同一属性也存在着差异性,通常采取加权欧氏距离来克服不同属性对结果的贡献度,并采用被评价对象的混合属性矩阵来计算权重,有效体现不同评价对象同一属性的差异性,进而提高评价结果的准确性.对于评价对象  $A, B$ ,其属性矩阵分别为  $A, B \subset X$ ,混合属性矩阵为  $Y = \begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix}$ ,  $A, B$  的归一化属性矩阵  $A' = (a_{ij})_{n \times m}$ ,  $B' = (b_{ij})_{n \times m}$ ,属性矩阵  $A, B$  间的

混合加权欧氏距离表达为<sup>[17]</sup>

$$D[A, B, \omega] = \sqrt{\sum_{j=1}^m \omega_j \left( \sum_{i=1}^n (a_{ij} - b_{ij})^2 \right)}. \quad (9)$$

式中:权重向量  $\omega = [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m]$  由混合属性矩阵  $Y$  按式(2)~式(8)计算得到.

## 2 基于混合加权欧氏距离的超级电容健康状态评价方法

超级电容后备电源通常由  $n$  个超级电容单体串并联组成超级电容模组,超级电容后备电源服役过程中,其性能也会随之发生变化,主要表现在充电速度变慢、放电速度变快、充放电时温度升高等,这些性能的变化也表现于超级电容的充放电过程中的电流、电压、温度以及剩余电量等外特性参数变化,超级电容模组中某个超级电容单体老化或失效,就会致使整个模组性能退化,甚至加速模组老化或失效,因此,采用超级电容单体充放电过程中的电压、电流、温度、电量作为属性特征参数.选取新出厂性能优的超级电容作为标定电容,选取  $N$  个达到失效标准的超级电容为训练电容,通过实验获取超级电容充放电电压、电流、温度、电量数据,构建标定电容、训练电容、待评价电容的归一化属性矩阵,然后确定健康状态评价阈值,再计算待评价电容与标定电容的属性矩阵之间的混合加权欧氏距离,最后计算待评超级电容的健康状态指数,进而得出健康状态评价结果,具体流程如图1所示,具体步骤如下:

Step 1:数据获取与属性矩阵建立

通过实验获取 1 个标定电容、 $N$  个训练电容、待评价电容的充放电电流、电压、温度、电量等数据,构建起每一个超级电容单体评价对象的属性矩阵,第  $k$  个超级电容单体评价对象的属性矩阵为

$$S_k = \begin{bmatrix} I_{k1} & U_{k1} & T_{k1} & Q_{k1} \\ I_{k2} & U_{k2} & T_{k2} & Q_{k2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ I_{ki} & U_{ki} & T_{ki} & Q_{ki} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ I_{kn} & U_{kn} & T_{kn} & Q_{kn} \end{bmatrix}. \quad (10)$$

式中:  $I_{ki}$  为第  $k$  个超级电容单体在第  $i$  个采样点的电流;  $U_{ki}$  为第  $k$  个超级单体在第  $i$  个采样点的电压;  $T_{ki}$  为第  $k$  个超级电容单体在第  $i$  个采样点的温度;  $Q_{ki}$  为第  $k$  个超级电容单体在第  $i$  个采样点的充放电电量;  $n$  为总采样周期数.

### Step 2: 评价阈值确定

根据所获的标定电容属性矩阵  $A$  与第  $i$  个训练电容属性矩阵  $T_i$  构建混合属性矩阵  $Y_i$ , 利用式(2)~式(8)计算出属性权重向量  $\omega$ , 并运用标定电容属性矩阵与该训练电容属性矩阵, 分别代入式(2)、式(3)、式(9)计算出第  $i$  个训练电容与标定电容的混合加权欧氏距离  $D_i$ , 重复上述过程求出  $N$  个训练电容的混合加权欧式距离, 并求其平均值作为评价阈值  $D_{ths}$ .

### Step3: 健康状态评价

将标定电容属性矩阵  $A$  与待评价电容属性矩阵  $S$  构建混合属性矩阵  $Y$ , 利用式(2)~式(8)计算出属性权重向量  $\omega$ , 并运用标定电容属性矩阵与该待评价电容属性矩阵, 分别代入式(2)、式(3)、式(9)计算出待评价电容与标定电容的混合加权欧氏距离  $D_s$ .

运用混合加权欧氏距离定义超级电容健康状态综合评价指数为

$$\xi_{SoH} = \left(1 - \frac{D_s}{D_{ths}}\right) \times 100\%. \quad (11)$$

超级电容的健康状态优劣分级如表 1 所示. 当  $\xi_{SoH}$  的值为 80%~100% 时, 表征超级电容的健康状况为优秀; 当  $\xi_{SoH}$  的值为 60%~80% 时, 表征超级电容的健康状态为良好; 当  $\xi_{SoH}$  的值为 40%~60% 时, 表征超级电容的健康状态为一般; 当  $\xi_{SoH}$  的值为 20%~40% 时, 表征超级电容的健康状态较差, 容量已大幅度降低, 需要重点关注; 当  $\xi_{SoH}$  的值 0%~20% 时, 表征超级电容已失效, 需要及时更换电容.

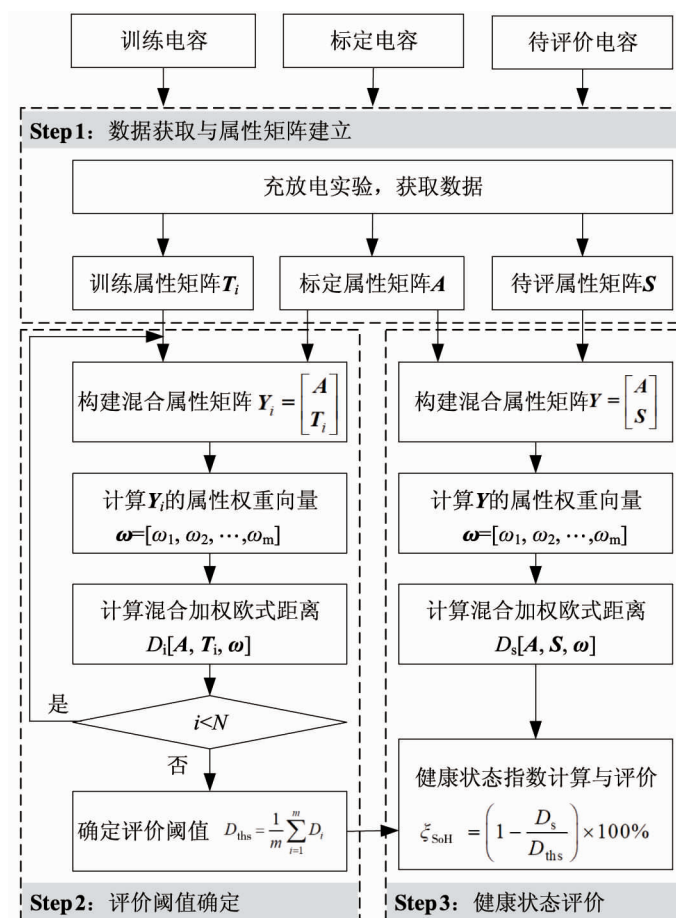


图 1 基于混合加权欧氏距离健康状态评价

表1 超级电容的健康状态优劣分级

评价等级	评价指数/%	健康状况
A	(80,100]	优秀
B	(60,80]	良好
C	(40,60]	一般
D	(20,40]	差
F	(0,20]	失效

### 3 实验平台搭建与数据获取

选取研究对象是8个不同老化阶段的超级电容单体.单体选择的是由Maxwell公司生产的BCAP0350 E270 T11 350 F,额定电压为2.7 V.为了测取健康评价所需的实验数据,搭建实验测试平台,采用EBC-A10H测试仪,对超级电容单体进行充放电测试,采集充放电电流、电压和充放电电量,同时利用采集超级电容单体表面温度,为消除测试过程中测量误差,测量点统一布置在超级电容表面中心位置,用特氟龙高温胶带固定.

测试前,先将每个超级电容单体放电至0.1 V,然后进行实验测试,包括“充电—静置—放电—静置”4个阶段:第1阶段是充电阶段,充电方式为恒流—恒压充电,先以5 A恒定电流充电到额定电压,然后在额定电压下继续充电,当电流逐渐减小到0.1 A,认为电池电量充满,充电阶段结束;第2阶段为静置阶段,静置时间为15 min;第3阶段为放电阶段,以5 A恒定电流放电到0.1 V;第4阶段为静置阶段,静置时间为15 min.在整个过程中运用实验测试平台进行数据采集,数据包括采样时间、充放电电流、电压、表面温度、充放电电量.测试保持恒温18 ℃,采样周期为2 s.

### 4 健康状态评价与分析

#### 4.1 健康状态评价实例

以新出厂性能优秀的超级电容为标定电容,多个老化严重的超级电容作为训练电容. $C_1 \sim C_8$ 为待评价电容,通过所提出的基于混合加权欧氏距离的超级电容后备电源健康状态评价步骤进行评价,得出具体结果如表2所示.从表2可知:超级电容健康状态由坏至好为 $C_4 < C_8 < C_6 < C_5 < C_3 < C_7 < C_2 < C_1$ , $C_4$ 老化最严重已失效, $C_8$ 老化严重健康状态差, $C_6$ 健康状态一般, $C_5$ 健康状态良好, $C_3, C_7, C_2, C_1$ 健康状态优秀.

表2 超级电容的健康状态评价结果

序号	权重				欧氏距离	评价指数/%	健康状况
	$I_k$	$U_k$	$T_k$	$Q_k$			
$C_1$	0.282 6	0.341 7	0.162 3	0.213 1	0	100	优秀
$C_2$	0.282 7	0.349 0	0.163 9	0.204 2	1.367 8	90.66	优秀
$C_3$	0.287 1	0.348 7	0.160 4	0.203 6	2.485 8	83.02	优秀
$C_4$	0.247 2	0.333 0	0.201 6	0.218 0	14.642 2	0.00	失效
$C_5$	0.278 1	0.353 8	0.165 6	0.202 3	4.565 8	68.82	良好
$C_6$	0.260 5	0.360 2	0.158 9	0.220 0	8.150 1	44.34	一般
$C_7$	0.278 4	0.363 5	0.156 8	0.201 1	1.960 1	86.61	优秀
$C_8$	0.238 7	0.361 6	0.160 0	0.239 5	9.192 7	37.22	差

#### 4.2 参数特性分析与评价结果验证

通过对8个不同老化程度的待评价超级电容 $C_1 \sim C_8$ 进行实验测试,获取每个超级电容的充放电电压、电流、电量以及温度等参数实验数据,并对“充电—静置—放电—静置”全过程特性进行分析,验证本文提出的超级电容健康状态评价方法的正确性.

##### 4.2.1 电压特性

待评价超级电容 $C_1 \sim C_8$ 在全过程中的电压随时间变化曲线如图2所示,曲线特性参数如表3所示,

$K_1$  为恒流充电电压曲线斜率,  $t_1$  为恒流充电完毕时间,  $t_2$  为恒压充电完毕时间,  $\Delta U_1$  为充电结束后静置的压降,  $K_2$  为恒流放电电压曲线斜率,  $\Delta U_2$  为放电结束后静置的压升. 从图 2 和表 3 中可以看出: 在恒流充电过程中,  $C_4, C_8, C_6, C_5$  偏离其他超级电容曲线, 且斜率较大, 依次为 1.875, 1.180, 0.976, 0.950,  $C_1, C_2, C_3, C_7$  较前面 4 个超级电容的斜率小, 且相差不大, 均为 0.830 左右, 曲线基本重合. 恒流充电过程的曲线斜率大小反映其充电过程电压变化快慢, 斜率越大表示电压变化越快, 结合欧姆定律  $R=U/I$  可得斜率越大, 超级电容等效内阻越大, 由于超级电容在不断老化过程中, 其等效内阻会增加, 当达到超级电容标准内阻的 2 倍, 表示该超级电容失效, 反之斜率越小, 其健康状态越好. 因此, 可以看出  $C_4$  的等效内阻最大、老化最严重;  $C_8$  次之;  $C_6, C_5$  居中;  $C_1, C_2, C_3, C_7$  性能较优.

在恒压充电过程中,  $C_4, C_8, C_6, C_5$  的充电完毕时间分别为 490, 170, 122, 34 s, 超级电容充电时间在 10 s 左右, 充电电压恒定, 接近失效电容的电解液和电极材料、隔膜有大量的氧化副反应, 需消耗大量充电电荷, 致使充电时间变长. 因此, 恒压充电时间长短也反映了超级电容性能的好坏, 恒压充电时间越长, 超级电容老化越严重, 反之亦然. 由此可知  $C_4$  的恒压充电时间最长、老化最严重;  $C_8, C_6$  次之;  $C_5$  居中;  $C_1, C_2, C_3, C_7$  性能较优.

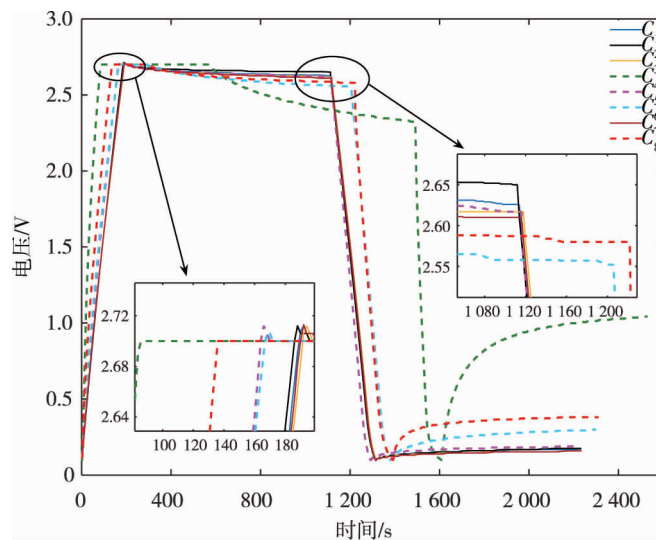


图 2 待评价超级电容电压随时间变化曲线

表 3 待评价超级电容电压曲线特性

序号	$K_1$	$t_1/s$	$t_2/s$	$\Delta U_1/V$	$K_2$	$\Delta U_2/V$
$C_1$	0.830	186	8	0.075	0.750	0.007
$C_2$	0.840	184	8	0.050	0.750	0.075
$C_3$	0.821	188	10	0.083	0.755	0.059
$C_4$	1.875	78	490	0.376	2.224	0.943
$C_5$	0.950	162	34	0.083	0.860	0.090
$C_6$	0.976	164	122	0.148	0.836	0.200
$C_7$	0.830	186	10	0.090	0.761	0.059
$C_8$	1.180	130	170	0.120	0.855	0.281

在充电结束后静置阶段,  $C_4, C_6, C_8$  的压降较大, 分别为 0.376, 0.148, 0.120 V,  $C_1, C_2, C_3, C_5, C_7$  的压降均小于 0.100 V, 且  $C_4$  的压降是非线性下降, 其他的是线性下降. 充电结束后静置阶段的压降, 反映静置过程中超级电容等效串联电阻产生的反相压降, 由  $U_1 = IR_{ESR}$  可知: 压降  $\Delta U_1$  越大, 则等效串联电阻  $R_{ESR}$  越大, 超级电容老化越严重, 由此可知  $C_4$  压降最大、老化最严重;  $C_6, C_8$  次之; 其他电容较好.

在恒流放电过程中,  $C_4$  的电压曲线斜率最大, 为 2.224;  $C_6, C_8, C_5$  次之, 均为 0.850 左右; 其他电容的斜率均为 0.755 左右. 放电阶段电压曲线斜率大小反映放电过程中电压变化快慢, 斜率越大表示放电速度

越快,结合超级电容瞬时电压与瞬时电流关系  $C = \frac{I(t)}{dU/dt}$ , 可以得出:在恒流放电过程中,电压曲线斜率越大,超级电容的等效容值就越小,由于超级电容在不断老化过程中,其超级电容容量会下降,当容量较标准容量下降了 20%,则表示该超级电容失效<sup>[18-19]</sup>,反之斜率越小,其健康状态越好.因此,可以看出  $C_4$  的等效容量最小、老化最严重; $C_6, C_8, C_5$  次之; $C_1, C_2, C_3, C_7$  性能较优.

在放电结束后静置阶段, $C_4, C_8, C_6$  的压升较大,分别为 0.943, 0.281, 0.200 V,  $C_1, C_3, C_7, C_2, C_5$  的压升均小于 0.09 V. 放电结束后静置阶段的压升大小反映出超级电容的电极极化程度,电极极化会引起放电结束后开路电压回升,电压回升越高,其电极极化程度越严重,反之亦然.由此可知: $C_4$  的压升最大、电极极化最严重; $C_8, C_6$  次之; $C_5$  居中; $C_1, C_2, C_3, C_7$  性能较优.

综合上述电压特性分析,超级电容  $C_4$  老化最严重、健康状态最差; $C_8, C_6$  次之; $C_5$  居中; $C_1, C_2, C_3, C_7$  健康状态较优.

#### 4.2.2 电流特性

待评价超级电容  $C_1 \sim C_8$  在实验全过程中的充放电电流随时间变化曲线如图 3 所示.在恒流充电过程中,各超级电容在充电瞬时迅速达到 5 A,但充电到达额定电压的时间不同(见表 3), $C_4$  的恒流充电时间最短为 78 s,  $C_8$  次之为 130 s,  $C_5, C_6$  居中为 162, 64 s, 其他电容的恒流充电时间为 185 s 左右,这主要是由于超级电容在服役过程中,不断老化,其等效电容容值不断减少,所能存储的电量也随之减少,由此可知: $C_4$  容值最小、健康状态最差; $C_8$  次之; $C_5, C_6$  居中;其他超级电容较好.在恒压充电过程中, $C_4, C_8, C_6, C_5$  的充电电流成非线性下降,主要是由于超级电容的等效电阻越大,其充电电流越小,由此可知: $C_4$  的等效电阻最大、老化最严重; $C_8, C_6$  次之; $C_5$  居中; $C_1, C_2, C_3, C_7$  性能较好.在恒流放电过程中, $C_4, C_8$  的放电电流均成非线性下降,其他超级电容基本成垂直下降,可以反映出  $C_4, C_8$  的等效容值较小,老化较严重,健康状态较差.

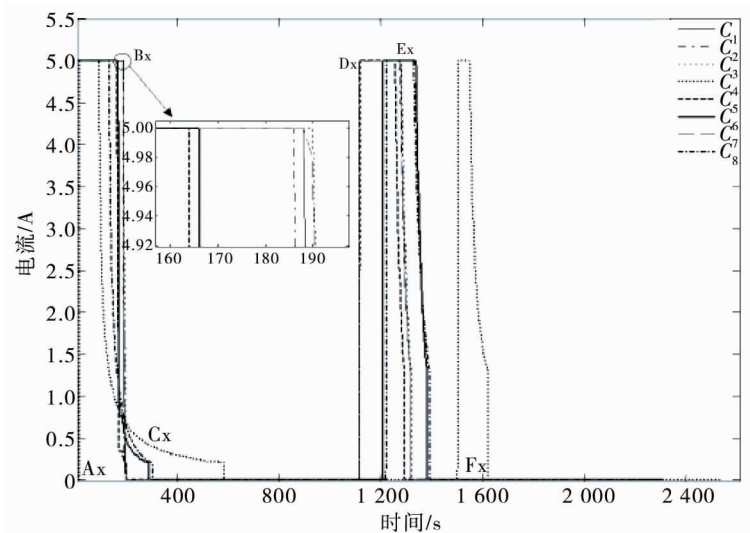


图3 待评价超级电容电流随时间变化曲线

综合上述充放电电量特性分析,超级电容  $C_4$  老化越严重、健康状态最差; $C_8, C_6$  次之; $C_5$  居中; $C_1, C_2, C_3, C_7$  健康状态较优.

#### 4.2.3 温度特性

待评价超级电容  $C_1 \sim C_8$  在全过程中温度随时间变化曲线如图 4 所示、温度变化如表 4 所示,  $\Delta T_1$  为充电过程中的温度变化量,  $\Delta T_2$  为放电过程中的温度变化量,  $\Delta T_3$  为实验全过程中的温度变化量.从图 5 可看出: $C_4, C_8, C_6$  的温度变化曲线明显偏离其他超级电容温度变化曲线,位于上方,反映出在整个实验过程中温度变化比其他超级电容大.在充电、放电过程中, $C_6, C_8, C_4$  的温度变化曲线的斜率依次增大,明显大于其他超级电容的斜率.充放电过程中温度变化斜率大小反映出温升快慢,斜率越大表示温度变化越



快.由  $Q = \int I(t)^2 R_{\text{ESR}} dt$ , 可得热量变化率(温度变化率)为  $\frac{dQ}{dt} = I(t)^2 R_{\text{ESR}}$ , 因此,在恒流充发电过程中,温度变化越快,其等效电阻  $R_{\text{ESR}}$  也就越大,老化越严重.由表 4 可知:在充电过程中, $C_4, C_8, C_6$  的温升依次为  $3.4, 3.0, 2.6$   $^{\circ}\text{C}$ ,其他超级电容的温升较低, $C_2, C_7$  温升为  $1.7$   $^{\circ}\text{C}$ , $C_1, C_3, C_5$  温升为  $1.5$   $^{\circ}\text{C}$ ;在放电过程中, $C_4, C_8, C_6$  的温升依次为  $1.6, 1.0, 0.3$   $^{\circ}\text{C}$ ,其他超级电容的温升较低, $C_1, C_7$  温升为  $0.2$   $^{\circ}\text{C}$ , $C_2, C_3, C_5$  温升为  $0.1$   $^{\circ}\text{C}$ ;在全过程中, $C_4, C_8, C_6$  的温升依次为  $1.5, 1.2, 0.8$   $^{\circ}\text{C}$ ,其他超级电容的温升较低, $C_5, C_7$  温升为  $0.3$   $^{\circ}\text{C}$ , $C_1, C_2$  温升为  $0.2$   $^{\circ}\text{C}$ , $C_3$  温升为  $0.1$   $^{\circ}\text{C}$ .

综合上述温度特性分析,超级电容  $C_4$  老化越严重、健康状态最差; $C_8, C_6$  次之; $C_5, C_7$  居中; $C_1, C_2, C_3$  健康状态较优.

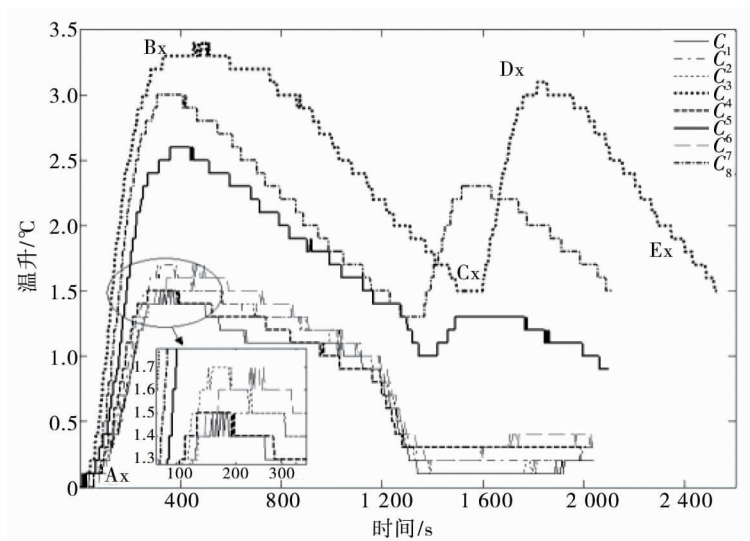


图 4 待评价超级电容温升随时间变化曲线

表 4 待评价超级电容温升曲线特性表

序号	$\Delta T_1/^{\circ}\text{C}$	$\Delta T_2/^{\circ}\text{C}$	$\Delta T_3/^{\circ}\text{C}$
$C_1$	1.5	0.2	0.2
$C_2$	1.7	0.1	0.2
$C_3$	1.5	0.1	0.1
$C_4$	3.4	1.6	1.5
$C_5$	1.5	0.1	0.3
$C_6$	2.6	0.3	0.8
$C_7$	1.7	0.2	0.3
$C_8$	3.0	1.0	1.2

#### 4.2.4 充放电电量特性

待评价超级电容  $C_1 \sim C_8$  在全过程中的充放电电量随时间变化曲线如图 5 所示,充放电电量如表 5 所示, $\Delta Q_1$  为充电过程中的总充电电量, $\Delta Q_2$  为充电完毕后静置过程的自放电电量, $\Delta Q_3$  为放电过程中的放电电量, $t_3$  为恒流放电时间, $V_1$  为充电速度, $V_2$  为恒流放电速度.”+”表示充电,”-”表示放电.

从图 5 和表 5 中可以看出:在恒流充电过程中,超级电容  $C_1 \sim C_8$  的充电电量变化斜率基本一致,线性上升,但在恒压充电过程中, $C_4, C_8, C_6, C_5$  呈现非线性变化,其中, $C_4, C_8, C_6$  非线性最为明显,且充电时间较其他电容长,总充电电量分别为  $+0.183$ ,  $+0.221$ ,  $+0.230$ ,  $+0.244$  Ah,其他电容的充电电量均在  $+0.260$  Ah 左右, $C_4$  充电速度最慢,为  $0.0004 \text{ Ah} \cdot \text{s}^{-1}$ , $C_8$  充电速度次之,为  $0.0013 \text{ Ah} \cdot \text{s}^{-1}$ , $C_5$  充电速度最快,为  $0.0068 \text{ Ah} \cdot \text{s}^{-1}$ ,超级电容充电速度由慢至快依次为  $C_4, C_8, C_6, C_7, C_3, C_2, C_1, C_5$ .超级电容在服役过程中不断老化,其等效电阻逐渐增大,恒压充电时,充电电流减小,充电时间增长,充电速度减慢,由此可知



$C_4$  老化最严重、健康状态最差;  $C_8, C_6$  次之, 居中;  $C_7, C_3, C_2, C_1, C_5$  健康状态较优。

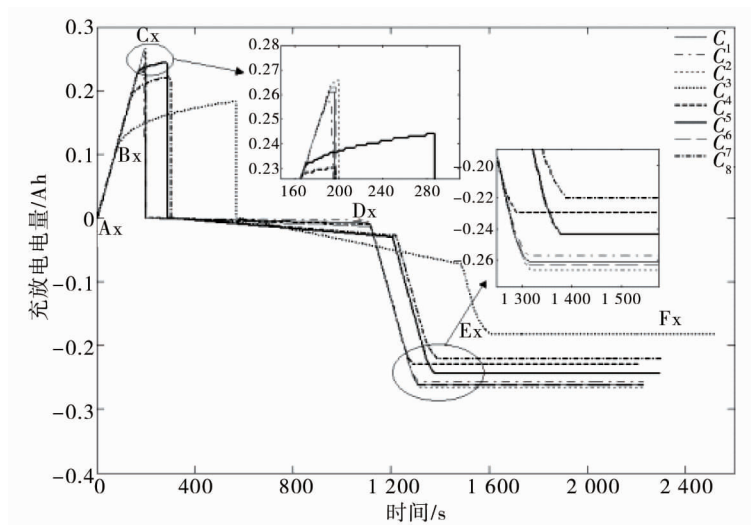


图5 待评价超级电容充放电电量随时间变化曲线

表5 待评价超级电容充放电电量曲线特性

序号	$\Delta Q_1/\text{Ah}$	$V_1/(\text{Ah} \cdot \text{s}^{-1})$	$\Delta Q_2/\text{Ah}$	$\Delta Q_3/\text{Ah}$	$T_3/\text{s}$	$V_2/(\text{Ah} \cdot \text{s}^{-1})$
$C_1$	+0.261	0.032 6	-0.008	-0.253	202	-0.001 25
$C_2$	+0.257	0.032 1	-0.004	-0.253	204	-0.001 24
$C_3$	+0.266	0.026 6	-0.013	-0.253	202	-0.001 25
$C_4$	+0.183	0.000 4	-0.072	-0.110	120	-0.000 92
$C_5$	+0.230	0.006 8	-0.010	-0.220	178	-0.001 24
$C_6$	+0.244	0.002 0	-0.018	-0.226	176	-0.001 28
$C_7$	+0.263	0.026 3	-0.013	-0.250	200	-0.001 25
$C_8$	+0.221	0.001 3	-0.028	-0.193	172	-0.001 12

在充电完毕后静置阶段,  $C_4, C_8, C_6$  的自放电电量分别为-0.072, 0.028, -0.018 Ah,  $C_2$  自放电电量最小, 为-0.004 Ah, 其他超级电容自放电电量为-0.010 Ah 左右. 自放电是衡量超级电容性能好坏指标之一, 在相同时间内自放电电量越多, 表示其性能越差, 由此可知  $C_4$  老化最严重、健康状态最差;  $C_8, C_6$  次之, 居中;  $C_2, C_1, C_5, C_7, C_3$  健康状态较优。

在恒流放电过程中,  $C_4, C_8, C_6$  放电电量曲线明显偏离其他超级电容曲线,  $C_4$  偏离越远,  $C_8, C_6$  次之.  $C_4$  的放电速度最慢, 为-0.000 92  $\text{Ah} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $C_8$  次之, 为-0.001 12  $\text{Ah} \cdot \text{s}^{-1}$ , 其他超级电容的放电速度均为-0.001 25  $\text{Ah} \cdot \text{s}^{-1}$  左右. 超级电容在服役过程中不断老化, 其等效容值逐渐减少、等效电阻增大, 放电速度减慢, 由此可知:  $C_4$  老化最严重、健康状态最差;  $C_8$  次之, 居中;  $C_2, C_5, C_3, C_1, C_7, C_6$  的健康状态较优。

综合上述充放电电量特性分析, 超级电容  $C_4$  老化最严重、健康状态最差;  $C_8, C_6$  次之;  $C_2, C_1, C_5, C_7, C_3$  健康状态较优。

因此, 通过采集待评价超级电容在“充电—静置—放电—静置”全过程中充放电电压、电流、温度、电量等参数数据, 并进行特性分析得出  $C_4$  老化最为严重且已失效, 健康状态最差;  $C_8$  老化严重, 健康状态差;  $C_6$  也有一定程度老化, 健康状态一般;  $C_2, C_1, C_5, C_7, C_3$  健康状态优良, 与采用本文提出的评价方法得出的结论一致, 从而验证了本文提出的评价方法的正确性。

## 5 结论

1) 从超级电容充放电过程中外特性参数数据出发, 采用数据聚类挖掘手段, 提出了基于混合加权欧氏距离的超级电容健康状态评价方法, 通过计算待评价电容与标定电容的混合加权欧氏距离, 得出综合评价指数进行超级电容 SoH 评价。

2)通过健康状态评价实例,对比分析“充电—静置—放电—静置”全过程参数特性,验证了该方法评价结果的有效性和合理性。

3)该方法相比传统评价方法,无须根据复杂超级电容原理建立合理精确的等效电路模型,能快速有效地评价超级电容 SoH 的优劣,具有广泛的应用前景。

### 参考文献:

- [1] 崔炜,艾斯卡尔.国内外风电技术现状与发展趋势[J].电器与能效管理技术,2019(13):1-5.
- [2] 魏书荣,何之倬,符杨,等.海上风电机组故障容错运行研究现状分析[J].电力系统保护与控制,2016,44(9):145-154.
- [3] Zhou Y, Wang Y, Wang K, et al. Hybrid genetic algorithm method for efficient and robust evaluation of remaining useful life of supercapacitors[J]. Applied Energy, 2020, 260: 114169.
- [4] Muzaffar A, Ahamed M, Deshmukh K, et al. A review on recent advances in hybrid supercapacitors: Design, fabrication and applications[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, 101: 123-145.
- [5] Afir A, Rahman S M H, Azad A T, et al. Advanced materials and technologies for hybrid supercapacitors for energy storage-A review[J]. Journal of Energy Storage, 2019, 25: 100852.1-100852.24.
- [6] 唐玉霜.风力发电机组变桨系统状态监测与故障诊断研究[D].秦皇岛:燕山大学,2019.
- [7] Eddahch A, Ayadi M, Briat O, et al. Online Parameter Identification for Real-Time Supercapacitor Performance Estimation in Automotive Applications[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2013, 51(10): 162-167.
- [8] Torregrossa D, Paolone M. Modelling of current and temperature effects on supercapacitors aging. Part II: State-of-Health assessment[J]. Journal of Energy Storage, 2016, 5: 95-101.
- [9] Chaoui H, Gualous H. Online Lifetime Estimation of Supercapacitors[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(9): 7199-7206.
- [10] Chaoui H, Mejdoubi A E, Oukaour A, et al. Online System Identification for Lifetime Diagnostic of Supercapacitors With Guaranteed Stability[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology: A publication of the IEEE Control Systems Society, 2016, 24(6): 2094-2102.
- [11] 石建,周腊吾,葛召炎,等.大风电机组变桨用超级电容模组健康状态在线监测方法研究[J].电力系统保护与控制,2016,44(12):108-113.
- [12] Oukaour A, Tala B, Alsakka M, et al. Calendar aging and health diagnosis of supercapacitor[J]. Electric Power Systems Research, 2013, 95(2): 330-338.
- [13] 陈琳,王惠民,李熠婧,等.用新陈代谢极限学习机实现电池健康状态估算[J].汽车工程,2021,43(1):10-18.
- [14] 冯海林,张翮.基于新健康因子的锂电池健康状态估计和剩余寿命预测[J].南京大学学报(自然科学),2021,57(4):660-670.
- [15] 杨光盛,崔幼,宣玉华,等.基于 CRITIC 和理想点法的计量设备运行质量评估[J].电力系统保护与控制,2018,46(24):62-69.
- [16] 张立军,张潇.基于改进 CRITIC 法的加权聚类方法[J].统计与决策,2015,22(18):65-68.
- [17] 朱偲治.一种加权欧氏距离聚类算法的改进[J].计算机与数字工程,2016,44(3):421-424.
- [18] Oukaour A, Pouliquen M, Tala-Ighil B, et al. Supercapacitors aging diagnosis using least square algorithm[J]. Microelectronics Reliability, 2013, 53(9/11): 1638-1642.
- [19] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.超级电容器第1部分:总则:GB/T 34870.1—2017[S].2017.