

随机矩阵理论在配电网早期故障检测中的应用研究

针对配电网结构复杂,运行状态受到多种因素相互作用影响,提出了一种基于随机矩阵理论的配电网早期故障检测方法。首先提出采用配电网馈线及其支线下所有配电变压器在线监测负荷数据并构造时空数据矩阵,然后利用移动窗口法和随机矩阵理论,连续分析统计数据矩阵中元素的特性,采用线性特征值统计量作为统计指标,用以表征数据的行为。工程实例测试结果表明,该方法能有效实现配电网早期故障事件检测,对于配电网线路巡检具有一定的指导意义。

郑贤舜/国网浙江电力有限公司温州供电公司 韩 翊 卓 一/浙江华云信息科技有限公司 石 鑫 贺 兴/上海交通大学大数据工程技术研究中心

随着我国配电网规模的不断扩大,配电网线路分支增多,网络结构日趋复杂,其运行状态受到越来越多因素的影响,这使得早期故障检测和定位变得十分困难,传统的故障检测和定位方法作用十分局限。另一方面,配电网运行状态在线监测系统的建设和投入使用使得集中、及时采集配电网运行参数变得可能,这些数据呈现典型的“4V”特征,蕴藏着大量和配电网运行状态相关的有价值信息。

目前,基于在线监测数据的配电网状态检测方法的研究已经成为国内外研究热点。文献[3]中基于同步相量测量装置采集到的配电网运行状态数据,提出将实时故障检测与故障线路识别功能融为一体,可以有效满足配电网检测实时性及故障线路识别准确率的要求。文献[4]中提出将小波奇异熵理论与模糊逻辑结合,可以快速检测配电网中的“孤岛”。文献[5]中通过对同步相量数据分析和降维,提出了一种早期故障检测算法,并用仿真和真实的同步相量测量数据对算法进行了验证。文献[6]中分析总结了小波分析、人工神经网络和支持向量机等方法利用在线监测数据进行配电网故障检测的原理及特点。相比于传统的故障检测方法,基于数据驱动的方法能够检测出各种类型故障引起的异常,避免了不同类型故障需设计不同检测模型的烦琐及由于模型设计不准确而造成的系统误差,具有较高的实时性和准确性。

0 引言

配电网是电力系统的重要组成部分,作为连接发电系统、输电系统与终端用户的桥梁,确保其正常稳定运行至关重要。相比于输电线路,配电网故障有其自身的特点,表现为单相接地故障比例高、发生频繁以及易发生二次故障等。配电网线路发生故障时,轻则引起大面积停电,重则影响整个系统的可靠运行,危害程度极大。以单相接地故障为例,由于我国6~35 kV配电网线路一般采用小电流接地方式,发生单相接地故障后可带故障继续运行一段时间,若不能及时检测出故障点并排除,那么线路绝缘系统极易受到损伤,导致事故扩大,影响系统的安全可靠运行。因此,在配电网线路发生故障早期能够及时检测到并实现故障准确定位具有重要意义^[1-2]。



郑贤舜/高级工程师

关键词/Keywords

配电网·
随机矩阵·
故障检测·
线性特征值统计量·

鉴于此,本文基于配电网在线监测数据,以随机矩阵理论(RMT)为基础,提出一种基于数据驱动的配电网早期故障检测方法。首先通过选取一段时间内主馈线及其支线上所有配电变压器的实时运行参数(如电压、电流)形成时空源数据矩阵;然后采用移动窗口法和RMT对数据矩阵进行实时分析处理,计算数据的高维统计指标(如线性特征值统计量),并将其与随机矩阵理论的理论计算值(如M-P定律)进行比较,分析故障早期发生时刻;最后利用浙江电网配电网历史负荷数据对本文所提方法进行测试,并对测试结果进行分析评估。

1 相关理论介绍

随机矩阵(Random Matrix, RM)是一种以随机变量为元素的数据矩阵,当矩阵的行数和列数趋于无穷且其比值保持恒定时,随机矩阵便会具备一些特殊的性质,如其经验谱分布(Empirical Spectrum Distribution, ESD)服从M-P定律,投影到复平面后满足Single Ring定律等。RMT是一种针对高维数据的统计分析方法,它并不对源数据的分布、特征等作要求,其渐近收敛性理论上要求矩阵的维度趋于无穷,但对于维度适中(几十到几百)的矩阵通常也能观察到较好的收敛结果^[7],这也是RMT适用于众多工程应用的重要原因。

1.1 Marchenko-Pastur定律

假设复数矩阵, $\mathbf{Z} = \{z_{ij}\} \in \mathbb{C}^{p \times n}$, $z_1, z_1, \dots, z_n, \in \mathbb{C}^p$ 为独立同分布(Independent Identically Distributed, IID)变量,并且满足

$$\mu(z_i) = 0, \sigma^2(z_i) = v (i=1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

式中, v 为常数, $z_i = (z_{i1}, z_{i2}, \dots, z_{in})$ 。

则

$$\mathbf{Z}\mathbf{Z}^H = \sum_{i=1}^n z_i z_i^H \quad (2)$$

式中, $z_i z_i^H \in \mathbb{C}^{p \times p}$ 为秩为1的矩阵; $\mathbf{Z}$ 的协方差矩阵 $\mathbf{S}$ 定义如下

$$\mathbf{S} = \frac{1}{m} \mathbf{Z}\mathbf{Z}^H \quad (3)$$

当 $p, n \rightarrow \infty$, 并且 $C = (p/n) \in (0, 1)$ 时, 按照M-P定律, $\mathbf{S}$ 的ESD收敛于如下概率密度函数(Probability Density Function, PDF)^[8]

$$f_{MP}(\lambda_s) = \begin{cases} \frac{1}{2\pi cv\lambda_s} \sqrt{(b-\lambda_s)(\lambda_s-a)} & a \leq \lambda_s \leq b \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

式中, $a = v(1-\sqrt{C})^2$; $b = v(1+\sqrt{C})^2$ 。

图1为正常情况下ESD与理论值对比情况, 蓝条为 $\mathbf{S}$ 的ESD直方图, 红线为M-P定律理论计算曲线。由图1中可以看出, 其ESD收敛于M-P定律曲线。图2为异常情况下ESD与理论值对比结果, 由图2可以看出, 右侧有异常部分出现, 其ESD不服从M-P定律分布。

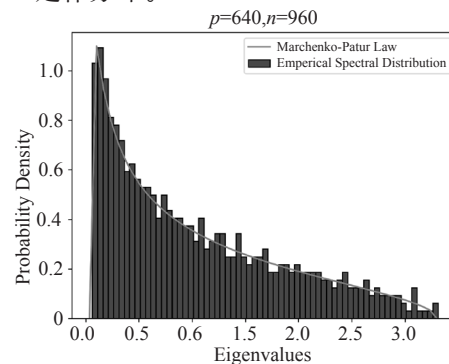


图1 正常情况下ESD与M-P定律对比

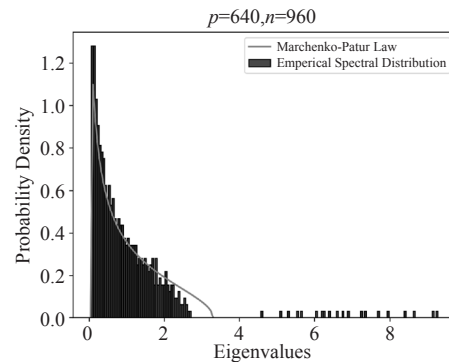


图2 异常情况下ESD与M-P定律对比图

1.2 线性特征值统计量

从前文分析中可以看出, 系统处于不同状态时ESD不同, M-P定律和单环定律从理论上证明了这一点, 因而设计了一种关于ESD的统计量表征系统的状态。线性特征值统计量(Linear Eigenvalue Statistics, LES)是对随机矩阵 $\mathbf{Z}$ 的本征值的一种统计指标, 某种程度上能够反映矩阵

的一些统计规律，其定义如下

$$N_n(\varphi) = \sum_{i=1}^m \varphi(\lambda_i) \quad (5)$$

式中， $\lambda_i (i=1, 2, \dots, m)$ 为 $\mathbf{Z}$ 的特征值； $\varphi(\cdot)$ 为测试函数，常用的形式有切比雪夫多项式、Shannon-Entropy 和 Wasserstein Distance 等。

2 RMT与配电网早期故障检测

这里所说的早期并不是指故障未发生之前，而是指故障已发生但尚未对配电网系统造成影响。以单相接地故障为例，由于我国 6~35 kV 配电网线路一般采用小电流接地方式，发生单相接地故障后可带故障继续运行一段时间，因此将这段带故障运行时间前期称之为故障早期。

2.1 时空源数据矩阵构造及标准化

以某条待分析的主馈线为例，选取一段时间内该馈线及其支线上所有配电变压器低压侧三相电压和三相电流作为分析参数，数据可以通过监测控制与数据采集 (Supervisory Control And Data Acquisition, SCADA) 系统实时获取，所形成的时空源数据矩阵 $\mathbf{X}$ 如下表所示。

表 时空源数据矩阵

参数 \ 时间	时刻1	时刻2	...	时刻n
配电变压器1_ I_a	0.34	0.29		0.31
配电变压器1_ I_b	0.26	0.32		0.25
配电变压器1_ I_c	0.47	0.48	...	0.41
配电变压器1_ U_a	243	243		244
配电变压器1_ U_b	243	243		243
配电变压器1_ U_c	243	244		244
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$
配电变压器k_ I_a	0.11	0.12		0.24
配电变压器k_ I_b	0.07	0.06		0.07
配电变压器k_ I_c	0.11	0.02	...	0.1
配电变压器k_ U_a	243	243		243
配电变压器k_ U_b	242	244		244
配电变压器k_ U_c	244	238		237

从表中可以看出，时空源数据矩阵为一个 $6k$ 行 n 列的实数矩阵，设 $p=6k$ ，则 $\mathbf{X} \in \mathbf{R}^{p \times n}$ 。对于源数据矩阵，首先按照式 (1) 逐行对数据进行标准化处理

$$\hat{x}_{ij} = \frac{x_{ij} - \hat{x}_i}{\sigma_i} \quad (6)$$

式中， x_{ij} 为源数据矩阵中第 i 行 j 列的元素数值； $\hat{x}_i$ 、 σ_i 分别为矩阵中第 i 行元素的均值和标准差； $\hat{x}_{ij}$ 为对应元素标准化后的值。

标准化处理后的数据矩阵用 $\hat{\mathbf{X}}$ 表示，为了尽可能消除矩阵行与行之间的相关性（假设存在一定的弱相关性），以更好满足 RMT 分析条件，减小分析误差，通常适度添加高斯白噪声，即

$$\tilde{\mathbf{X}} = \hat{\mathbf{X}} + \frac{1}{\text{SNR}} \mathbf{W} \quad (7)$$

式中，SNR 为信噪比，通常取较大值； $\mathbf{W} \in \mathbf{R}^{p \times n}$ ； $\tilde{\mathbf{X}}$ 为添加噪声后的数据矩阵，对其作进一步标准化处理后便会得到分析的数据矩阵。

2.2 移动窗口法与LES分析

移动窗口法是分析时间序列数据时常用的一种方法，通过选取相比于数据矩阵较小的窗口，按一定步长移动，依次计算移动窗口数据统计指标，以此揭示数据的行为（正常或异常）。在进行配电网主馈线早期故障识别时，由于馈线运行状态受未知一个或多个配电变压器影响，所以选取窗口时其宽度与数据矩阵的维度保持一致，长度需大于宽度，以满足 RMT 应用条件。

馈线故障检测的过程即是窗口移动的过程，通过依次计算每个窗口的 LES，对比一段时间内 LES 的变化情况，进而判断是否有故障情况发生。由于各馈线下配电变压器数目不同，因此所构造的数据矩阵维度也不同，为便于分析，在用 LES 对每根馈线对应数据协方差矩阵特征值进行统计时，先对特征值进行归一化处理，即将特征值大小标准化为 (0,1) 之间，计算如下

$$\hat{\lambda}(i) = \frac{\lambda(i)}{\sum_{i=1}^p \lambda(i)} \quad (8)$$

式中, $\lambda(i)$ 为实际计算值; p 为数据矩阵维度; $\hat{\lambda}(i)$ 为归一化后的值。

对归一化后的值进行统计, 测试函数选用 Shannon Entropy, LES 计算如下

$$\text{LES}(t_j) = -\sum_{i=1}^p \hat{\lambda}_i \log(\hat{\lambda}_i) \quad (9)$$

式中, $\text{LES}(t_j)$ 为在 t_j 时刻计算的 LES 值。

因此, 一段时间内, 通过依次计算各个时刻的 LES 值可得到 LES- t 曲线。

2.3 基于 RMT 的配网早期故障检测步骤

基于以上分析, RMT 在配电网早期故障检测中的应用步骤设计如下:

1) 分析一段时间 t 内配电网监测终端所采集的配电网运行数据, 选取三相电流和三相电压作为分析指标, 形成时空源数据矩阵 D 。

2) 采样时刻 t_j , 从 D 中获取窗口数据形成数据矩阵 $X(t_j)$ 。

3) 对 $X(t_j)$ 中元素按照式 (6) 进行标准化处

理, 形成 $X(t_j)$ 。

4) 为了消除 $\hat{X}(t_j)$ 中行与行之间的相关性, 引入小量随机白噪声, 形成矩阵 $\tilde{X}(t_j)$ 。

5) 计算协方差矩阵 $S(t_j) = \frac{1}{n} \tilde{X} \tilde{X}^T$ 。

6) 计算特征值, 比较其 ESD 与理论计算值。

7) 定义并计算 $\text{LES}(t_j)$ 值。

8) 绘制 LES- t 曲线, 对异常进行检测。

3 工程实例分析

(1) 案例一

选取国网浙江省电力公司余杭区某馈线 L_1 从 2017/3/1 ~ 2017/3/12 时间段内负荷数据进行分析, 数据采样间隔为 15 min, 每日共采样 96 个点, 该馈线下共有 20 台配电变压器, 选取三相电流和三相电压作为分析参数, 构造成 120×1125 的时空源数据矩阵。采用移动窗口法对数据进行分析, 移动步长为 1, 窗口大小为 120×192 , 信噪比 SNR 大小设置为 500, 测试函数选取 Shannon Entropy, 对数据进行标准化和去相关处理后分析结果如图 5 所示。

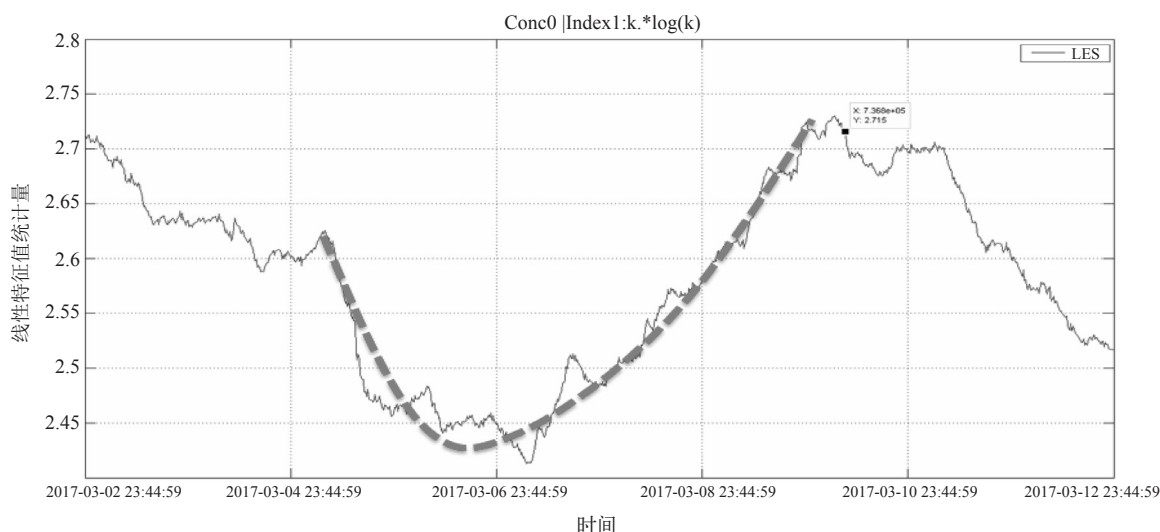


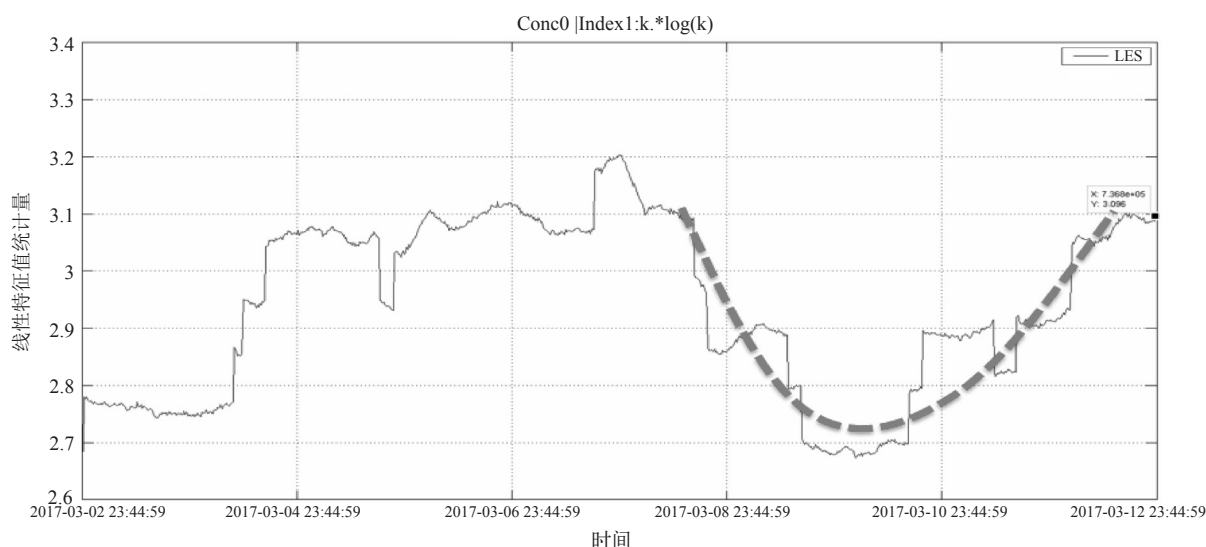
图5 馈线 L_1 的 LES- t 曲线

(2) 案例二

与案例一相同条件下选取某馈线 L_2 作为分析对象, 该馈线下共有 23 台配电变压器, 构造形成 138×1125 的数据矩阵。采用移动窗口法对数据进

行分析, 结果如图 6 所示。

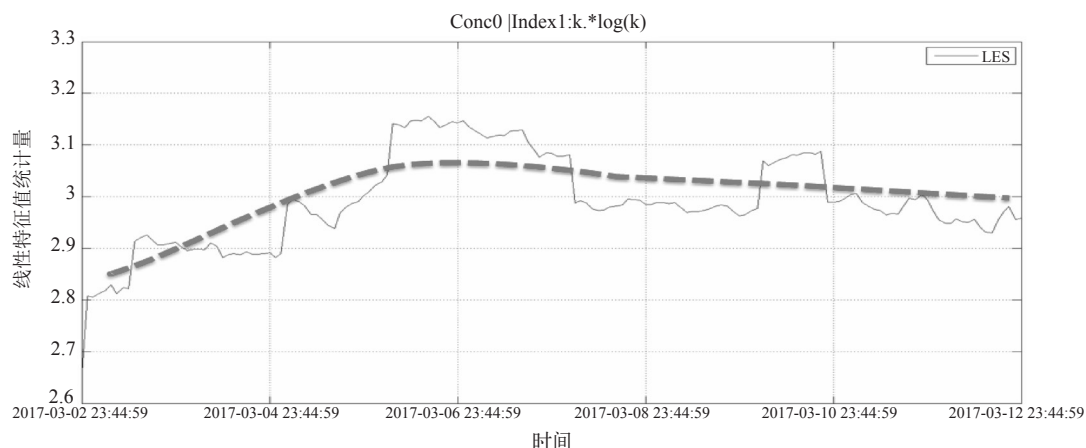
图 6 中黑点处为故障记录时刻 2017/3/12 23:44:59, 可以观察到, 故障发生前 LES 值变化迅速, 指标曲线呈现类 U 形。

图6 馈线L₂的LES-t曲线

(3) 案例三

采用与案例一中相同的方式选取某馈线某L₃同样时间段内的负荷数据进行分析,该馈线下共有18台配电变压器,构造成 108×1125 的时空源数据矩阵。数据分析结果如图7所示。该馈线在分析时间段内无故障记录,从图7中可以看出,该段时间内LES值变化平缓。

上述三个工程实例分析结果表明,故障发生前,监测数据矩阵某些行之间的相关性通常发生变化,而本文所提出的基于LES的检测方法能够准确检测到这种变化,故而能够在故障发生初期检测到异常;在正常情况下,这种相关性通常维持不变,故LES变化平缓。

图7 馈线L₃的LES-t曲线

4 结束语

针对配电网网络结构复杂、运行状态受到多种因素影响,提出了一种基于RMT的配电网早期故障检测方法。通过选取配电网主馈线及其支线上所有配电变压器低压侧负荷实时监测数据,构造了时空源数据矩阵,并利用移动窗口法

和RMT分析数据统计特性设立了LES作为统计指标。该方法完全由数据驱动,能够有效利用配电网终端采集到的系统实时运行数据对系统运行状态进行分析,克服了模型检测方法局限性、准确性低等固有缺点,具有较好的鲁棒性。最后,工程实例测试结果证明该方法能够有效实现配电网

馈线早期故障检测,进而辅助配电网线路巡检工作有针对性开展,具有一定的工程价值和研究意义。

参考文献

- [1] 谈丽娜,沈健. 配电网调度操作新模式探索[J]. 电气应用, 2015(增刊1): 9-12.
- [2] 王伟,于建成,姚程,等. 非侵入式低压配电网短路事故检测及定位方法[J]. 中国电力, 2017, 50(5): 78-83.
- [3] Pignati M, Zanni L, Romano P, et al. Fault detection and faulted line identification in active distribution networks using synchrophasors-based real-time state estimation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(1): 381-392.
- [4] Dehghani M, Khooban M H, Niknam T. Fast fault detection and classification based on a combination of wavelet singular entropy theory and fuzzy logic in distribution lines in the presence of distributed generations[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2016, 78: 455-462.
- [5] Xie L, Chen Y, Kumar P R. Dimensionality reduction of synchrophasor data for early event detection: linearized analysis[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(6): 2784-2794.
- [6] 马军,余英. 配电网在线故障检测技术的研究[J]. 电力与能源, 2016(6): 695-698.
- [7] Qiu R C, Antonik P. Smart grid and big data: theory and practice[M]. Wiley Publishing, 2017.
- [8] Marchenko V A, Pastur L A. Distribution of eigenvalues for some sets of random matrices[J]. Mathematics of the USSR-Sbornik, 2007, 1(1): 507-536.
- [9] Guionnet, Krishnapur, Manjunath, et al. The single ring theorem[J]. Annals of Mathematics, 2011, 174(2): 1189-1217.

(收稿日期: 2018-02-07) **EA**

(上接第57页)

- [3] 刘凤莲,薛志航,邓元实,等. 绝缘管型母线运行特性及状态评估方法研究[C]. 中国电机工程学会高电压专业委员会2015年学术年会, 2015.
- [4] 张健能,何宇琪,胡晓萌. 绝缘管型母线绝缘缺陷红外检测技术的研究与应用[J]. 电线电缆, 2015(6): 17-20.
- [5] 张星海,刘凤莲,邓元实,等. 35 kV绝缘管型母线运行异常分析及结构探讨[J]. 高压电器, 2016(1): 190-197.
- [6] 谢韬,孙启林,林康立,等. 220 kV支持式管型母线结构抗震性能[J]. 电力建设, 2013, 34(3): 98-103.
- [7] 韩国栋,吴章勤,万书亭,等. 管母线损耗发热状况多物理场分析计算[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(28): 214-219.
- [8] 邱太洪,王俊波,李国伟,等. 脉冲电流极性鉴别法在10 kV管型母线局放检测中的应用[J]. 绝缘材料, 2014(5): 72-75.
- [9] 阮羚,李成磊,杨帆,等. 绝缘管型母线的发展现状及研究动向[J]. 高压电器, 2018, 54(4): 43-53.
- [10] 张黎明,刘创华,方琼,等. 热老化对管型母线绝缘材料PET薄膜性能的影响研究[J]. 绝缘材料, 2016, 49(8): 44-48.
- [11] 张黎明,朱晓辉,王永宁,等. 含缺陷PTFE绝缘管型母线模型的局部放电信号特征分析[J]. 电气应用, 2017(3): 18-22.

(收稿日期: 2018-06-15) **EA**