

Weibull 分布在 GIS 局部放电识别中的应用

步科伟¹, 汤景鸿², 米楚明³, 黎大健⁴

(1. 青海海东供电公司电能计量检测中心, 青海 海东 810600; 2. 西北西宁输变电运行公司, 青海 西宁 810008;
3. 西安科技大学能源学院, 陕西 西安 710054; 4. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 为了研究 Weibull 分布函数在 GIS 局部放电类型定性分析中的应用, 在实验室以一段 220 kV 电压等级的 GIS 母线腔体为试验对象, 以 3 种典型的人工缺陷局部放电模型为例, 对不同放电源的 PDHD 进行了比较, 用 Weibull 概率分布函数进行分析并估算其参数。研究表明, 此概率函数与局部放电幅值分布吻合, 用 Weibull 分布的形状参数 β 值可以较好地识别不同局部放电类型, 在两种放电源混合时可以使用混合 Weibull 函数分离其放电信号。研究结果为今后对 GIS 局部放电模式识别提供了试验和数据依据。

关键词: Weibull 分布; 气体绝缘金属封闭开关设备; 局部放电; 局部放电脉冲幅值分布

中图分类号: TM835

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2009)03-0081-04

Application of the Weibull Distribution to Recognition of GIS PD Phenomena

BU Ke-wei¹, TANG Jing-hong², MI Chu-ming³, LI Da-jian⁴

(1. Measurement Center of Haidong Supply Power Company, Haidong 810600, China; 2. Xining Power Transmission and Transformation Operation Company, Xining 810008, China; 3. School of Energy, Xi'an University of Science & Technology, Xi'an 710054, China; 4. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Taking a 220 kV GIS bus bar cavity as a test object, three typical defect-induced PD models of GIS are designed and simulated. The partial discharge height distributions of different PD sources are compared, and the Weibull distribution is adopted to estimate the parameters. The results show that the probability function perfectly fits the partial discharge height, different discharge sources can be recognized according to the shape parameter of Weibull distribution, and the mixed signal of combined two PD sources can be separated with the mixed Weibull function. This study may lay the foundation of data and experiment for PD pattern recognition of GIS.

Key words: Weibull distribution; GIS; partial discharge; partial discharge height distributions(PDHD)

0 引言

GIS 以其突出的特点在电力系统能量传输中得到了越来越广的应用, 对 GIS 进行局部放电检测对保证 GIS 正常运行具有重要的意义。因为局部放电会因放电类型的不同而呈现出不同的属性, 所以可以通过分析这些属性对放电源进行定性分析。

由于局部放电现象可以看作是一个随机过程, 测得的实验数据有很大的随机性, 所以绝缘系统中的局部放电现象可以通过统计学来进行研究, 寻求一种概率方法作为诊断工具, 用以评估绝缘系统的

可靠性、对绝缘老化进行诊断以及描述局部放电发生的过程。局部放电机理和局部放电模式识别都能从适当的随机模型推导出来, 包括局部放电幅值分布和相位分布^[1]。文[2-5]表明, 单个放电源的局部放电脉冲幅值分布 (PDHD) 的累积概率符合二参数 Weibull 分布函数, 并且从不同类型的局部放电的 Weibull 分布函数提取出来的形状参数 β 差别明显, 可以作为样本形成局部放电源的特征库, 用于识别其放电类型。

基于以上思想, 笔者对 GIS 中电晕放电、悬浮电位放电以及盆式绝缘子表面污秽等几种典型局部放电进行分析, 并得到不同的脉冲幅值分布, 研究了 Weibull 分布函数在识别局部放电源中的应用。

收稿日期: 2008-11-09; 修回日期: 2009-03-12

作者简介: 步科伟(1983), 男, 助理工程师, 主要从事电能计量工作。

1 Weibull 分布函数

由于局部放电量是个随机量,它在分布上是不均匀的,所以排除了其他一些常用的分布函数,同一放电源的 PDHD 可以使用二参数 Weibull 函数来描述,其失效概率函数和密度函数如下

$$F(q_i) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{q_i}{\alpha}\right)^\beta\right] \quad (1)$$

$$f(q_i) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{q_i}{\alpha}\right)^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{q_i}{\alpha}\right)^\beta\right] \quad (2)$$

式(1)、(2)中, α 和 β 分别为尺度参数和形状参数, $q_i = q_m - q_s$ 为所测放电信号幅值与测量仪器灵敏度之差。Weibull 函数中的参数可以通过以下变换求得,令 $y = \ln[-\ln(1-F(q_i))]$, $x = \ln(q_i)$, $K = -\beta \ln(\alpha)$, 则式(1)变为

$$y = \beta x + K \quad (3)$$

Weibull 概率纸(WPP)就是以 $\ln(q_i)$ 作为横坐标, $\ln[-\ln(1-F(q_i))]$ 为纵坐标,在其上面画出函数 $y = y(x)$ 所得的图形是直线,并通过最小二乘法估算其斜率 β 和在 X 轴上的截距 k , 最终可求得 α 。

拟合结果与二参数 Weibull 函数的吻合程度可以用克莱姆法则(CVM)来衡量

$$W^2 = \frac{2}{12N_i} + \sum_{i=1}^N [F(q_i, \alpha, \beta) - F'(q_i)]^2 \quad (4)$$

$$F'(q_i) = \frac{\sum_{j=1}^{i-1} n_j - 0.5}{N_i} \quad (5)$$

式(5)中, N_i 为所测到放电信号总数, N 为多通道分析器的量化级或通道数^[3]。

对于两种或两种以上放电类型叠加,多个简单分布进行加权组合而成的混合两参数 Weibull 分布函数可以分离这些放电现象

$$F(q) = \sum_{i=1}^n p_i F_i(q) \quad \sum_{i=1}^n p_i = 1 \quad (6)$$

式(6)中, n 是简单分布函数的个数, p_i 是各个函数的加权值。混合 Weibull 函数的函数估计方法有图形法、矩法以及极大似然法^[6]。

2 局部放电模型

2.1 局部放电测量电路

测量系统接线见图 1。试样为一段 220 kV GIS 单相母线腔体(内导体外直径/外壳内直径尺寸为 106 mm/320 mm),见图 2。试验中采用脉冲电流法测量局部放电信号,所以在电路中添加耦合电容 C_k 和检测阻抗 R 。为了避免 GIS 击穿后损坏 R 以及测量系统,线路上还串联了保护电阻 Z 。同时还保证了测量系统良好接地。

2.2 缺陷模型

笔者选取 GIS 中常见的缺陷金属突起物缺陷、金属悬浮缺陷、绝缘子表面污秽缺陷作为 Weibull

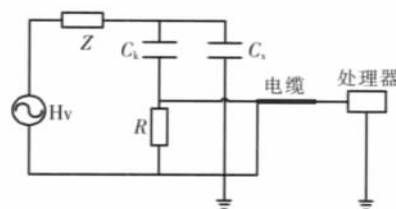


图 1 测量系统示意图



图 2 试验中使用的 GIS 实物图

分布函数的研究对象。考虑缺陷的材料、结构等对研究结果的影响,对同类缺陷类型在不同材料、尺寸或结构下进行了试验研究。金属突起通常是由于不良加工、机械破坏或组装时擦刮而出现的,尖头突出形成绝缘气体中的高场强区,导致局部放电的产生。实验中在高压导杆表面径向安装一根银针来模拟这种放电类型,见图 3(a),这种模型有利于电晕放电的产生,选用尖端等效直径为 100 μm 和 200 μm 两种模型作为研究对象。第 2 种模型见图 3(b),用与高压导杆不接触的铝片模拟导杆上的悬浮电位放电,每次当铝片与高压导杆之间的电压差超过他们之间气隙所能承受的电压时就会产生局部放电,悬浮气隙距离可调,选用 1.5 mm 和 2.5 mm 作为研究对象。第 3 种缺陷模型采用在绝缘子表面抹一层薄导电物质模拟绝缘子表面污秽,在 GIS 装配中如果将导电材料不慎掉落在绝缘子上,且长期固定在其表面上,就会形成绝缘子表面污染缺陷,导致绝缘子表面的绝缘能力将降低,缺陷模型见图 3(c)。笔者使用硫化银(GIS 中含硫物质挥发与银触头反应会生成硫化银并附着在绝缘子上)和导电膏两种污秽物进行试验研究。

3 试验及分析结果

针对 3 类独立放电模型,由图 1 进行局部放电测量试验,用 Weibull 概率函数模拟脉冲幅值分布,用最小二乘法进行参数估计,用克莱姆法则对估计的结果进行检验,分析了每种放电源的幅值分布。试验研究表明,同一种类不同形式的缺陷虽然在放电信号幅值、放电密度上有分散性,但具有相似的统计特征,所以笔者只选取较为典型的信号进行分析比较。

3.1 试验结果

图 4 为尖端等效直径为 100 μm 的尖刺在 50 kV 时电晕放电的负极性放电信号幅值分布图,其中(a)图为放电密度图,(b)图为其对应的 WPP 图。如图 4

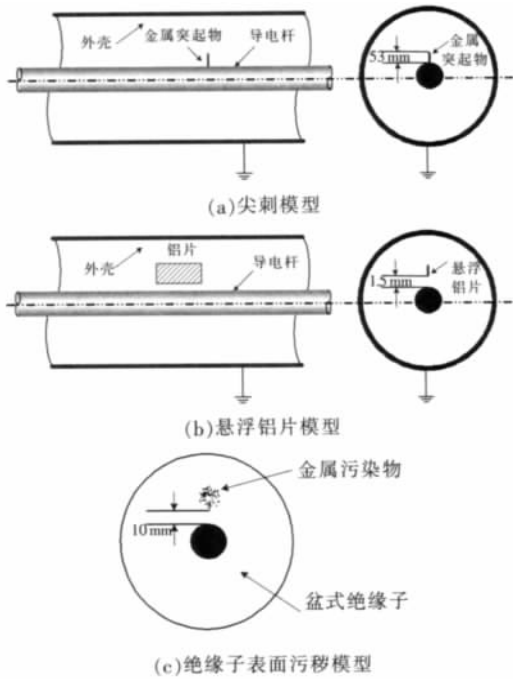
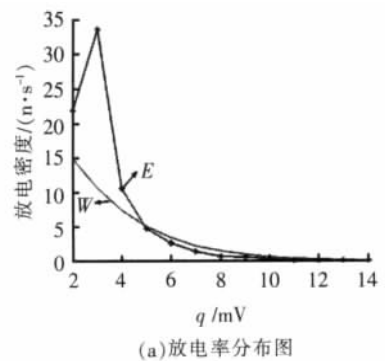


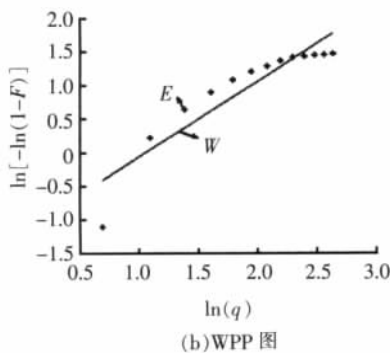
图3 GIS缺陷模型示意图

所示,正如 CVM 验证结果一样,放电信号幅值分布与二参数 Weibull 函数吻合比较好;由图 4(a)可看到,放电比较集中在小信号附近,且其放电密度随放电量的增大而迅速减少。由于极性效应,尖端在负极性下比正极性下容易起晕,所以在起始放电电压下放电主要集中在负半周峰值处,随着电压升高,正极性峰值处也出现放电信号,但其放电率较负半周的小,其放电信号幅值分布与负极性放电相似,见图 5。

与尖刺产生的电晕放电不同,悬浮铝片与导杆



(a)放电率分布图



(b)WPP图

注:图中 E 为试验点,W 为二参数 Weibull 分布函数拟合结果,下同,CVM=0.07,β=1.2,α=22 mV。

图4 50 kV 时的电晕放电的负极性放电信号

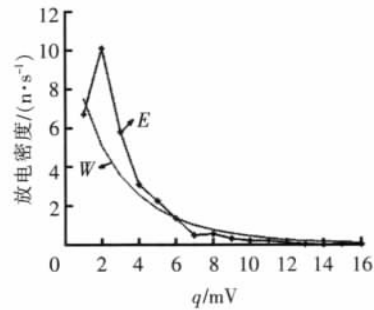
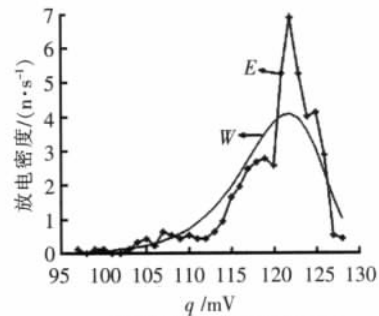
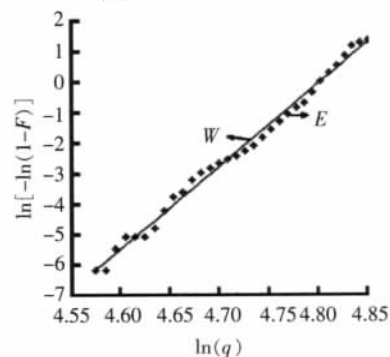


图5 60 kV 时尖端电晕放电正极性放电信号密度分布图

耦合出一个电容,属于容性放电。当发生局部放电时,在工频信号正负半周均能检测到放电信号,图 6(a)为悬浮气隙为 1.5 mm 时其正极性下放电信号幅值密度分布图,从图中可以看到其放电密度分布规律与电晕放电有很大的不同,较高幅值放电信号具有较高的发生率。图 6(b)为对应的 WPP 图。从图 6(a)、(b)两图可以看到,悬浮电位放电幅值分布与二参数 Weibull 函数吻合也比较好,其参数为: CVM=0.06,β=26,α=1.56 V,其负极性下放电幅值分布的 WPP 图见图 7,CVM=0.1,β=16,α=1.69 V,其 β 值与正极性下差别较大。



(a)放电信号放电密度分布图



(b)WPP图

图6 50 kV 时的悬浮电位放电的正极性

绝缘子表面的局部放电很不稳定也很复杂,但绝缘子表面局部放电却有一定规律,观察其 PRPD 谱图可以发现,放电主要集中在正负半周的上升阶段,且正半周的放电密度比负极性下大,这可能是由于两个放电电极形状不对称造成的^[7],见图 8。绝缘子污秽的放电信号也出现在两个极性上,与悬浮电位不同的是正负极性的 WPP 图的 β 值差别不大,见图 9。从图 9(a)可以看到,绝缘子表面放电的放电幅

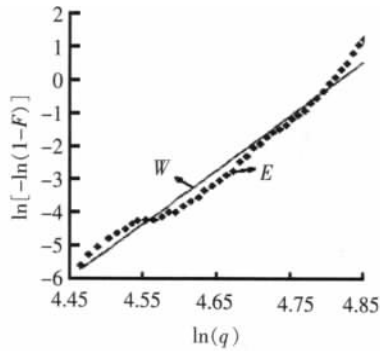


图7 50 kV时的悬浮电位放电的负极性放电信号幅值分布的WPP图
 值分布与电晕放电和悬浮电位放电都有很大的区别。WPP图的参数为:CVM=0.06,β=5.8,α=23 mV。

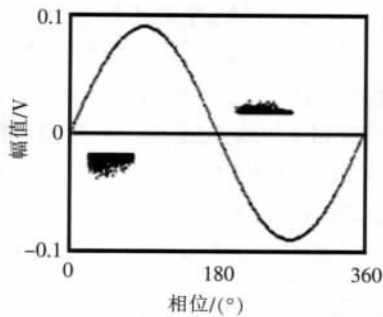
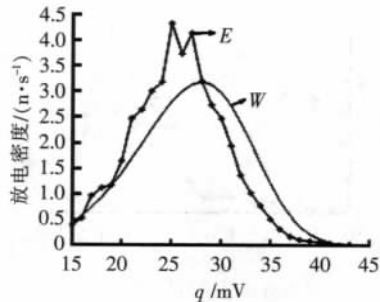


图8 60 kV 绝缘子表面污秽放电 PRPD 图



(a)放电信号放电密度分布图

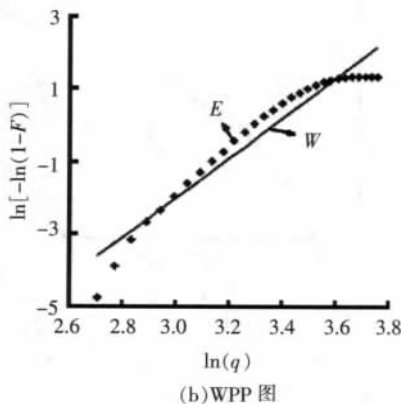


图9 60 kV时绝缘子表面污秽放电

3.2 局部放电类型识别

由于 Weibull 参数反映的是脉冲幅值分布的形状差异,各种放电类型的脉冲幅值分布不同,其对应的 Weibull 参数值也不同,因此 Weibull 参数能表征局部放电类型。

随着实验电压的增加,各类模型的局部放电现

象加剧对应的 α 参数值随放电量的变化而变化,见图 10(a),图中以电晕放电和绝缘子表面污秽放电为例,其基本趋势是随电压的升高而变大,并且两种放电的 α 参数分布区间有重叠,所以单从 α 值很难识别放电类型;而形状参数 β 值似乎更可以用来表征局部放电类型,见图 10(b)。β 值分布在 1~30 之间,电晕放电、悬浮电位放电以及绝缘子表面污秽放电 3 种放电的 β 值分布区间没有重叠,且每种放电的 β 值随着实验电压的增加变化不大,所以通过 β 值可以识别局部放电源类型。

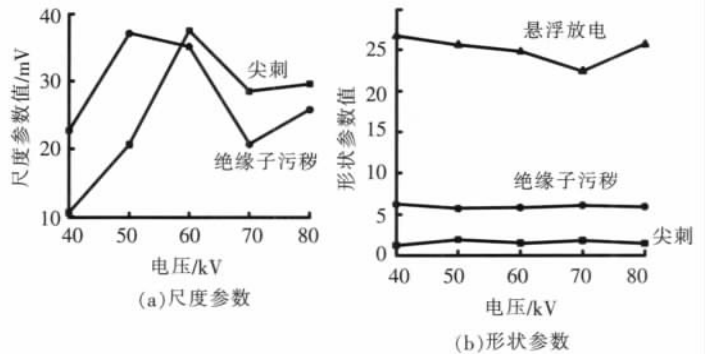
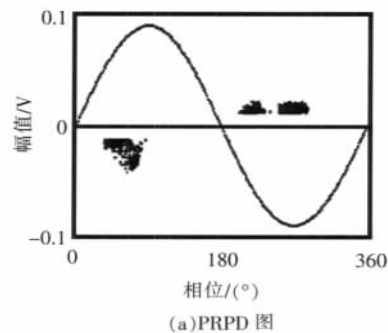


图10 尺度参数和形状参数随实验电压变化分布图

当两种局部放电源混合一起,如果其 PRPD 图未完全重叠,其 WPP 图会出现一个明显的拐点,使用两重 Weibull 分布函数也能将两种放电类型从图中区分开来,每种放电类型都可以用其统计参数来表征,特别是形状参数 β 值。图 11 是电晕放电与绝缘子表面污秽的混合放电的 PRPD 图及其负极性放电信号 WPP 图,如使用二参数 Weibull 函数线性拟合法效果不理想 (CVM>0.2),而通过二重混合 Weibull 函数将放电信号较好地拟合 (CVM 为 0.05),从而得出其中两种放电信号的统计参数,且其中的 β 值与前面单独放电情形大致相同,再次证明了形状参数 β 值能很好地表征局部放电类型。

以上试验结果及分析表明,使用形状参数 β 值能很好地区分 GIS 中典型的局部放电源,这为 GIS 内局部放电类型识别提供了重要的试验和数据依据,而对于更为复杂的局部放电类型,可以将 Weibull 函数参数作为算子与其他统计算子结合用



(a)PRPD 图

(下转第 88 页)

基本上可以忽略不计。构筑物对底部电流的影响很大,雷击不同高度构筑物时,构筑物越高,底部电流幅值越大,电流波头时间越长,这与实际测量结果一致。当构筑物高度在几十米时,构筑物对电流幅值的影响就不是很明显了。构筑物底部电流的幅值和波头时间随着构筑物高度的不同变化很大,顶部电流受到构筑物的影响很小。因此,在高大构筑物上进行雷电流监测时,雷电流测量装置应当尽可能安装在构筑物的顶部,这样测量到的结果才比较准确。

4 结语

(1)雷击构筑物时,构筑物不同位置处电流差别很大,电流幅值由顶部到底部逐渐变大,电流上升时间由顶部到底部逐渐变短。

(2)构筑物的高度对顶部电流的影响比较小,基本上可以忽略不计,构筑物的高度对于底部电流的影响很大,构筑物高度越高,底部电流幅值越大,波头时间越长。

(3)构筑物顶部电流受到的影响很小,底部电流受到的影响非常大,所以雷电流测量设备应当安装在构筑物顶部,这样测量到的雷电流参数比较准确。

参考文献:

[1] GORIN B N, SHKILEV A V. Measurements of Lightning

Currents at the Ostankino Tower[J]. Elektrich., 1984(8): 64-65.

[2] HUSSEINA A M, JANISCHEWSKYJB W, MILEWSKIA M, et al. Current Waveform Parameters of CN Tower Lightning Return Strokes[J]. Journal of Electrostatics, 2004, 60(2): 149-162.

[3] PINTO O, PINTO I R C A, SABA M M F, et al. Return Stroke Peak Current Observations of Negative Natural and Triggered Lightning in Brazil [J]. Atmospheric Research, 2005 (34): 493-502.

[4] RAKOV V A. Transient Response of a Tall Object to Lightning[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2001, 43(4): 654-661.

[5] GUERRIERI S, NUCCI C A, RACHIDI F, et al. On the Influence of Elevated Strike Objects on Directly Measured and Indirectly Estimated Lightning Currents [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1998, 13(4): 1543-1555.

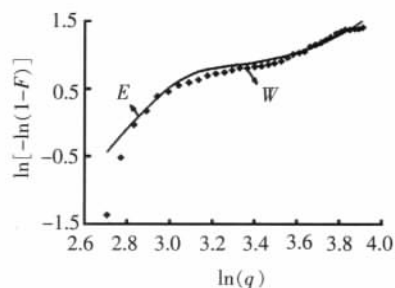
[6] SHIGIHARA M, PIANTINI A. Sensitivity Analysis of Lightning Return Stroke Currents in Case of Direct Hits to Elevated Objects [C]// VIII International Symposium on Lightning Protection, São Paulo, Brazil, 2005: 455-460.

[7] ISHII M. Multistory Transmission Tower Model for Lightning Surge Analysis[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1991, 18 (3): 1372-1335.

[8] AMETANI A, KAWAMURA T. Method of a Lightning Surge Analysis Recommended in Japan Using EMTTP[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2005, 20(2): 867-875.

[9] 高延庆. 土壤冲击击穿机理及接地系统暂态特性研究 [D]. 北京: 清华大学电机工程与应用电子技术系, 2003.

(上接第 84 页)



(b)WPP 图

$$p_1=0.9, p_2=0.1, \beta_1=5, \beta_2=1.4$$

图 11 电晕放电及绝缘子表面污秽放电混合的 PRPD 图及其负极性放电信号 WPP 图

于人工智能局部放电模式识别系统中。

4 结论

(1)试验证明局部放电脉冲幅值分布(PDHD)的累积概率函数与 Weibull 分布大致吻合。

(2)Weibull 分布的参数值与发生的局放现象有内在联系。不同放电源的放电信号幅值的概率分布有很大的不同,从不同类型放电的脉冲幅值分布提取出的形状参数 β 值差别很大,可以作为样本形成特征库,以识别各种局部放电类型。

(3)在两种放电源混合的情况下,通过混合

Weibull 模型可以较好地提取其中局部放电信号的统计参数,并且 β 值与单独局部放电源的情形基本相同,形状参数 β 值能很好地表征局部放电类型。

参考文献:

[1] 唐 炬, 王 静. Weibull 分布在识别变压器局部放电中的应用[J]. 重庆大学学报, 2005, 25(4): 87-90.

[2] CONTIN A, MONTANARI G C, FERRARO C. PD Source Recognition by Weibull Processing of Pulse Height Distribution[J]. IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation, 2000, 7(1): 48-58.

[3] CACCIARI M, CONTIN A, MONTANARI G C. Use of a Mixed-weibull Distribution for the Identification of PD Phenomena [J]. IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation, 1995, 2(4): 614-627.

[4] CONTIN A, RABACH G. PD Analysis of Rotating AC Machines[J]. IEEE Transaction on Electrical Insulation, 1993, 28(6): 1033-10421.

[5] SCHIFANI R, CANDELA R. A New Algorithm for Mixed Weibull Analysis of Partial Discharge Amplitude Distributions [J]. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, 1999, 6(2): 242-249.

[6] 蒋仁言. 威布尔模型族特性、参数估计和应用[M]. 北京: 科学出版社, 1998.

[7] 葛景滂, 邱昌容, 谢恒堃. 局部放电测量 [M]. 北京: 北京机械工业出版社, 1984.