

高压绝缘子污闪过程特征量的分类和判别

贺 博, 林 辉

(西北工业大学自动化学院, 陕西 西安 710072)

Clustering and Discriminating of Typical Characteristics of High Voltage Contaminated Insulator During Flashover

HE Bo, LIN Hui

(School of automation, Northwest Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

摘要: 随着电网电压等级的提高和各类污染的加剧, 绝缘子污闪事故日益严重, 通过有关特征量提取来实现绝缘子表面状态的监测是预防污闪、提高电网可靠性的关键。笔者结合统计学分类和判别的思想, 提出了绝缘子特征量的分类方法, 并在试验数据抽样训练的基础上, 得到了类别的判断方程。交互分析结果表明, Fisher 分类法正确性高于 Bayes 分类法, 适合于绝缘子特征量的类别判断。这对绝缘子特征量提取、状态判别及污闪风险预测有重要意义。

关键词: 污秽试验; 泄漏电流; 判别分析; 交互验证

中图分类号: TM852

文献标识码: A

Abstract: With the increase of voltage grade in power transmission system and the aggravation of industrial pollution, flashover of contaminated insulators in HV and UHV system is more and more serious, threatening the security of power transmission severely. The key of improving the security of system is exploring the methods of monitoring states of insulator's surface by some character values. In this paper, a method based on clustering and discriminating of statistics is introduced for distinguishing the flashover stages by leakage current and humidity. Through training with the experiment data, a judge equation is established, and the cross-validated results show that Fisher method is more accurate than Bayes in discriminating the flashover stage, which is important for deciding the insulator's state and forecasting the risk of flashover.

Key words: artificial contaminated test; leakage current; discrimination; cross-validated

1 前言

随着电网电压等级的提高, 绝缘子污秽闪络已经成为对电网最具威胁的因素之一。污闪一旦发生, 常会导致大面积的跳闸停电, 并且系统短期内不能

重投, 造成的危害极大^[1]。因此, 监测绝缘子的运行状态, 具有重要的现实意义。

试验结果表明, 额定电压下绝缘子污闪的发生, 有两个必需因素, 一是表面积污(用 ESDD 来表征), 二是环境湿度^[1-2]。污闪的发展过程可以分为 7 个阶段, 前 6 个阶段对应了污闪的发展, 第 7 个阶段对应了污闪的稳定建立。和闪络发展对应, 绝缘子泄漏电流总体呈增加趋势^[3]。对现场绝缘子而言, 污秽程度主要受大雨、沙尘暴等的影响, 而气候状况对环境湿度的影响显著^[4]。冬季是我国北方地区污闪频繁发生的季节, 大雾、毛毛雨等天气相对常见, 导致了环境湿度的反复变化, 所以有必要研究在固定 ESDD 下, 湿度反复发生变化时, 泄漏电流的总体变化特征。笔者以此为出发点, 探讨了污闪发展不同阶段的划分标准和判别标准, 并对如何根据测量数据进行污闪阶段的识别, 进而建立污闪预测机制提供了依据。

2 原理

2.1 聚类分析

聚类分析是首先将一定数量的样本或指标各自看成一类, 并根据其亲疏程度, 将亲疏程度最高的两类进行合并; 然后考虑合并后的类与其他类之间的亲疏程度, 再进行合并。不断重复该过程, 直到所有的样本或指标进入类。该法计算量比较大, 由于是按照数学指标强行归类, 缺乏必要的先验知识, 分类准确度不高^[5]。

为了在分类过程中加入先验控制, 提高分类的准确性, 笔者采用如下方法: 首先认为整个试验过程中的数据可以按 5 种模式分解, 分别对应污闪发展的 5 个阶段(因为第 1 个阶段属湿润阶段, 工程意义

收稿日期: 2005-11-22; 修回日期: 2005-12-27

基金项目: 航空基金项目(04F53036)。

作者简介: 贺博(1976-), 男, 博士研究生, 研究方向为污闪检测及识别。

小, 所以选取污闪开始发展到稳定建立前共计 5 个阶段), 确定每个阶段所对应的电流和湿度值作为该类初始中心。计算各个实测数值和初始分类的距离, 将距离初始值最近的数据点归入该类, 一旦有新的数据加入, 则利用该类当前所有的数据信息来完成该类的更新。归类的过程实际上是利用实测数据对先验分类不断修正的过程。

$$d_{ij} = \min(d_{il}) \Rightarrow x_{ij} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

式(1)为判别标准, 为第 j 个类空间, 文中共有 5 个分类。n 为按比例从试验数据中抽取的用于训练的样本总数, d_{ij} 为第 i 个向量和第 j 类之间的距离, 可由式(2)计算得到。

$$d_{ij} = \sqrt{\sum_{t=1}^p (x_{it} - \bar{x}_{jt})^2} \quad (i, j, \dots, n) \quad (2)$$

式(2)中: x_{it} 为第 j 个分类均值向量的第 t 个分量, 文中所有样本均为向量数据, 第 1 个分量为泄漏电流, 第 2 个向量为湿度, 所以 $t=0, 1, 2$ 。 \bar{x}_{jt} 可由式(3)得出:

$$\bar{x}_{jt} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m x_{kt} \quad (3)$$

式中: x_{kt} 为第 j 类中的第 k 个样本的第 t 个分量值。整个判别过程计算流程及每一步所对应的计算公式见图 1。

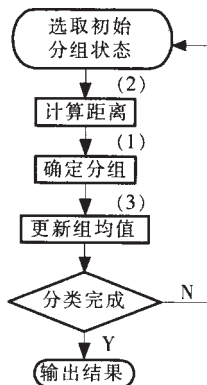


图 1 分类流程图

2.2 判别分析

判别分析是利用原有的分类信息, 得到体现这种分类的函数关系式(判别函数), 然后用该函数判断未知变量属于哪一类, 是一个学习和预测的过程。

$$D^2(X, G) = (X - \mu)^T \Sigma^{-1} (X - \mu) \quad (4)$$

式(4)为样本 X 到总体 G 的马氏距离; μ 为总体的均值; Σ 为总体的协方差阵, 在计算中用其估计值代替, 估计表达式见式(5), 式(6):

$$\hat{\mu} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n X_i \quad (5)$$

$$\hat{\Sigma} = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (X_k - \bar{X})(X_k - \bar{X})^T \quad (6)$$

式(7)为距离判别函数:

$$D(X, G_i) < D(X, G_j) \Rightarrow X \in G_i \quad (i, j=1, 2, \dots, k) \quad (7)$$

式(8)为贝叶斯(Bayes)判别函数:

$$W_{ij}(X) > \ln\left(\frac{q_i}{q_j}\right) \Rightarrow X \in G_i \quad (i, j=1, 2, \dots, k) \quad (8)$$

式中: $W_{ij}(X)$ 为 X 距离 G_i 和 G_j 的马氏距离之差, 如式(9)所示, q_i 和 q_j 为 G_i 和 G_j 的先验概率。

$$W_{ij}(X) = (X - \mu_i)^T \Sigma_i^{-1} (X - \mu_i) - (X - \mu_j)^T \Sigma_j^{-1} (X - \mu_j) \quad (9)$$

式(10)为菲歇尔(Fisher)判别函数^[6]:

$$\sum_{r=1}^p (r^T X - r^T \mu)^2 < \min(r^T X - r^T \mu)^2 \Rightarrow X \in G_i \quad (i=1, 2, \dots, k) \quad (10)$$

式中: μ 为 G_i 组的期望值, 可由式(5)估计, r 为矩阵 M 的第 r 个主特征向量(将特征向量按照由大到小排列, 取前 p 个对应的特征向量, r 为第 r 个), 式(11)为 M 的表达式:

$$M = \left(\sum_{i=1}^k \sum_j N_j^{-1} N_j^T (I - \frac{1}{k} J) N_j \right) \quad (11)$$

式中: $N = (N_1, \dots, N_k)^T$; I 为 k 阶单位阵; J 为 k 阶方阵。

Fisher 判别, 其实是坐标变换的过程, 而 p 值则表示变换后数据的维数, 为了式(10)能包含原数据尽可能多的有用信息, 有必要按一定的准则来确定 p 值。

p 值的确定, 主要考虑某因素进入模型前后 wilk's 值的改变是否明显, wilk's 值变化导致 F 统计量变化最大的先进入模型, 直到 F 改变量不再显著, 此时因素个数对应了 p 值^[7]。

F 值变化如式(12)所示:

$$F = \left(\frac{n-g-p}{g-1} \right) \left(\frac{1 - \frac{p_{t+1}/p}{p_{t+1}/p}}{p_{t+1}/p} \right) \quad (12)$$

式中: n 为样本数; g 为类别数; p 为变量数; p_t 为变量加入前的 wilk's 值; p_{t+1} 为变量加入后的 wilk's 值。

先对试验数据进行分组, 然后随机抽取试验数据作为训练样本得到判别函数, 再利用判别函数对剩余试验数据作交互分析以验证分类函数的正确性和分类效果, 流程见图 2。在训练过程中, 通过样本变化不断更新组均值和协方差阵估计值, 最终输出判别函数。Bayes 法还要考虑不断更新组先验概率。当被更新值变化量小于控制阈值时, 学习结束, 利用剩余数据检验该判别函数下分类效果完成交互验证。

3 试验数据处理结果

3.1 试验方法

图 3 为试验接线图, 其中 T 为移圈式调压器, 规格: 10 kV/0.3 ~ 3 kV, 500 kVA; B 为变压器, 规格: 3.3 kV/44 kV, 250 kVA, 两台串联; PT 为电压互感器, 规

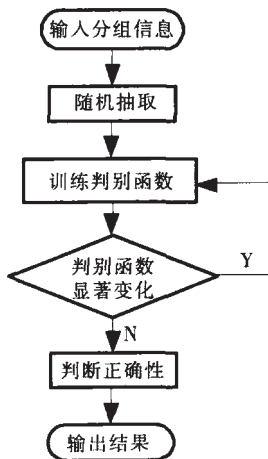


图 2 判别流程图

格: 150kV/100V。试品为 XP-70 绝缘子; 雾室尺寸: 5.7m×8.7m×4.0m。污秽度灰密值均取 110 mg/cm²; 盐密值取 0.05 mg/cm²。试验时使用慢受潮法使试品受潮, 放入试品, 接好线, 升压至额定运行电压, 然后开始加湿, 整个试验过程中始终控制雾室的湿度和温度。试品为每组 7 片, 模拟 110 kV 输电线路绝缘子数目的最低配置。所加电压为 63.5 kV, 等于 110 kV 线路运行电压。

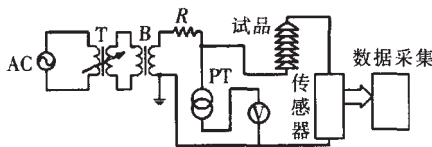


图 3 人工污秽试验接线图

在绝缘子人工污秽试验中, 泄漏电流传感器一直处于非常恶劣的工作环境中, 高压试验电源对信号的检测带来很强的干扰, 使得测量精度降低。同时伴随着绝缘子沿面放电, 高频干扰成分进入了泄漏电流^[10]。另一方面, 为了尽量模拟绝缘子现场工作环境, 湿度的上升不能太快, 这就使得整个的试验过程需要很长的时间。如果直接高速采集泄漏电流信号, 要记录一次试验过程数据, 采集系统要面临非常庞大的数据储存和传输任务。由于对泄漏电流而言, 通常更关心的是其包络线, 所以有必要对采集和传输方案进行改进如下:

按照 5k 的速率采样泄漏电流, 每采集 10 个点即求取其平均值并保存, 每 0.02 s 求得所保存的 10 个历史平均值中的最大值作为有用数据。这样, 每秒可以得到 50 个数据点, 均反映了泄漏电流最大值的变化, 所得到的实际上是泄漏电流的包络线。由于在数据处理过程中有求均值的过程, 使得噪声得到了抑制, 同时需保存、传输的数据量也大大减少, 降低了系统对硬件的要求。

3.2 泄漏电流的特征

为了验证是否可以用湿度和泄漏电流来表征污

闪发展过程, 即湿度和泄漏电流在识别污闪状态上是否充分, 进行了泄漏电流 (DATA11) 和湿度 (SD) 关系的拟合, 结果见图 4。其中实线为试验曲线, 虚线为用复合模型、三次模型、二次模型拟合所得的关系曲线, 纵轴为 100 倍实测电流, 横轴为相对湿度。拟合优度和模型见表 1。

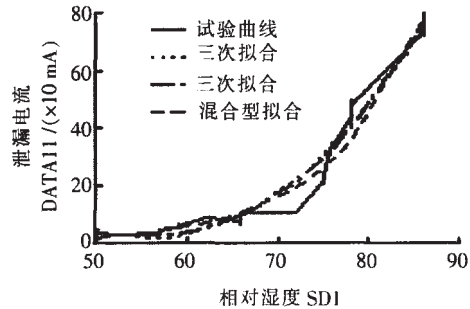


图 4 实验数据拟合结果

表 1 拟合结果

	拟合优度	模型	显著性检验
复合型拟合	0.969 73	DATA11=0.015 97 ×1.103 806SD1	通过
三次拟合	0.970 31	DATA11=60.5- 0.56718 ×SD2+ 0.000 68 ×SD3	通过
二次拟合	0.963 72	DATA11=253.119 7- 8.976 ×SD+ 0.080 17 ×SD2	通过

由表 1 可知, 三次拟合所得的拟合优度最高, 同时也说明了 SD 可以解释电流的绝大部分变差, 利用湿度和电流来刻画绝缘子放电状态是合理的^[6-7]。

3.3 结果及讨论

按照试验过程中绝缘子表面状态划分 5 个放电阶段, 作为初始分类, 见表 2。表 3 为分类结束后各类的重心, DATA11 为泄漏电流, 单位为 10 倍 mA, SD1 为环境湿度。

表 2 初始分类重心			表 3 最终分类重心		
编号	DATA11	SD1	编号	DATA11	SD1
1	2.00	50	1	3.85	54
2	50.00	78	2	39.98	77
3	8.00	66	3	9.59	66
4	24.00	75	4	22.55	75
5	80.00	86	5	76.20	86

距离判别法利用式 (7) 求取判断点坐标距离表 3 各类重心点的马氏距离, 距离最近的类判断为该点归属类。

表 4, 表 5 为 Fisher 判别方程训练过程中变量的筛选情况和变量对方程的贡献。由表 4 可知, DATA11 的贡献最大, 首先进入模型, SD 贡献比较小, 后进入模型; 由表 5 可知, 在训量中共提取出了两个维度的典型判别函数, 第 1 个函数解释了 95.6% 的变化, 余下的 4.4% 的可全部由第 2 个函数解释。

表 6 为 Fisher 准则下得到的两判断判别方程, 分别为:

表 4 变量筛选情况

步骤	容限	Sg. of F to Remove	Wilk's 值
1 DATA11	1.000	0.000	
2 DATA11	0.747	0.000	0.069
SD1	0.747	0.000	0.014

注: Sg. of F to Remove 为 F 变化的显著性检验(则表明在分位数上该变量的引入带来了 F 的显著变化) Wilk's Lambda 为 F 值。

表 5 分类贡献统计

方程	特征值	方差比/%	累积方差比 %	共线性相关度
1	70.204	95.6	95.6	0.993
2	3.261	4.4	100.0	0.875

表 6 Fisher 判别函数系数

编号	判别方程		
	DATA11 系数	SD1 系数	常数项
1	0.409	-0.049	-4.336
2	-0.174	0.391	-22.201

$$y_1 = -4.336 + 0.409 \times \text{DATA11} - 0.049 \times \text{SD1} \quad (13)$$

$$y_2 = -22.201 - 0.174 \times \text{DATA11} + 0.391 \times \text{SD1} \quad (14)$$

y_1, y_2 其实质是执行坐标变换后新坐标系下试验数据的坐标。表 7 为新坐标系下各类别的中心点坐标。于是,在 Fisher 判据下,要判断某点归属,只要将该点的 DATA11 和 SD1 带入式(13),式(14),计算出 y_1 和 y_2 ,然后计算 (y_1, y_2) 距离表 7 中各组重心的距离,距离最小的即为该点归属。

表 7 各组重心坐标

类别	方程 1	方程 2
1	-5.417	-1.632
2	8.253	.944
3	-3.629	1.832
4	1.221	3.194
5	22.628	-1.861

表 8 为 Bayes 判别函数稀疏表,由表 8 可得到 5 个判别方程,对应了 5 种分类或污闪的 5 种状态,要判断某点归属,只要将该点的 DATA11 和 SD1 分别带入 5 个判别方程,值最大的判别方程所对应的类即为该点的归类。

表 8 Bayes 判别函数系数表

编号	DATA11 系数	SD1 系数	常数项
1	-4.030	8.097	-213.745
2	1.113	8.435	-348.695
3	-3.902	9.363	-290.649
4	-2.156	9.659	-339.508
5	7.483	6.635	-572.007

表 9 为利用 Fisher 判断函数对试验数据进行交互判断的结果统计,先对试验数据抽样,利用抽样数据训练得到判别函数,然后用该判别函数对其余试

验数据作分类判断,统计结果表明,分类正确率 100%,无误判或错判。

表 9 Fisher 准则交互判别结果

样本类属	预测类属 /%					共计
	1	2	3	4	5	
1	100.0	0	0	0	0	100.0
2	0	100.0	0	0	0	100.0
3	0	0	100.0	0	0	100.0
4	0	0	0	100.0	0	100.0
5	0	0	0	0	100.0	100.0

表 10 为利用 Bayes 判别函数所得到的交互判断结果。可见 Bayes 判别的准确性比 Fisher 要低,这是因为 Bayes 判据要求数据服从正态分布和方差齐性,但对于污闪泄漏电流来说,并不能很好地满足分析要求,所以导致误判率比较高。

表 10 Bayes 准则交互判别结果

样本类属	预测类属 /%					共计
	1	2	3	4	5	
1	75.3	22.5	2.2	0	0	100.0
2	19.1	72.6	8.3	0	0	100.0
3	2.1	12.8	72.0	9.1	4.0	100.0
4	0	5.3	11.7	65.7	17.3	100.0
5	0	1.0	4.6	20.4	74.0	100.0

4 结语

(1) 泄漏电流及湿度和固定 ESDD 下绝缘子人工污秽试验闪络发展的各阶段密切对应,监测这两个量对于判断污闪的状态是充分的。

(2) 该采集方案下的泄漏电流可以有效表征试验过程和绝缘子状态,具有数值量小,传输容易,对硬件要求不高的优点,而且容易分组,这对绝缘子监测方案的选取有意义。

(3) 详细讨论了分类方法,得到了判别函数。检验结果表明, Fisher 判别函数识别正确率优于 Bayes 判别函数,可以有效用于绝缘子人工污秽试验中数据归类处理以及绝缘子状态的区分。

(4) 实现绝缘子表面状态的正确判断对于结合天气预报进一步预测污闪发生的几率,建立科学、合理、高效的污闪预测机制有重要意义。

参考文献:

- [1] 杨保初. 高电压技术[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2002.
- [2] Gorur R S. Sudden Flashover of Insulators in Artificial Contamination Tests [J], IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, 1997, 4(1): 79-87.
- [3] 李治, 王永江, 王黎明, 等. 绝缘子泄漏电流和放电现象初步研究[J]. 高电压技术, (下转第 178 页)

减小, 这是由屏蔽环的位置决定的; 第 85 伞裙电压分布百分比随 h_2 的增大而减小, 在组合 10 时出现最小值 0.0066, h_2 再增大, 电压分布百分比增大。

由电压分布计算部分讨论知, 高压端屏蔽环对低压端伞裙, 低压端屏蔽环对高压端伞裙电压分布几乎无影响, 所以高、低压端屏蔽环位置可以独立确定。 h_1 取 120 mm, h_2 取 130 mm 是较好的位置组合。给出此组合下带屏蔽环和不带屏蔽环电压分布百分比曲线, 见图 3。

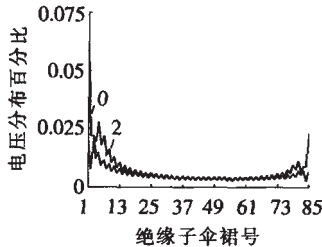


图 3 不带屏蔽环和带两个位置最优组合屏蔽环电压分布曲线

观察图 3 曲线, 两个屏蔽环改善第 1 和 85 伞裙电压分布效果非常好, 但屏蔽环附近伞裙上承受电压有所上升。给出典型伞裙电压分布百分比, 见表 5。

表 5 数据表明, 高压端屏蔽环可有效降低 1, 2, 3 伞裙上的电压分布, 最大可达 72.52%; 低压端屏蔽环也可以有效降低 83, 84, 85 伞裙上电压分布, 最大可达 71.30%。经计算, 前 2 个伞裙和芯棒不带屏蔽环和屏蔽环在最优位置时分别承担 20.28%和 5.99%的电压, 前 4 个伞裙和芯棒上分别承担 26.61%和 12.59%的电压, 最后 2 个伞裙和芯棒上分别承担 5.66%和 1.68%电压, 可见屏蔽环有效改善了绝缘子串首端和末端的电压分布。高压端附近绝缘子电位分布见图 4。

表 5 电压分布百分比对比

伞号	0	2	减少率 /%	伞号	0	2	减少率 /%
1	0.0615	0.0169	72.52	83	0.0089	0.0066	25.84
2	0.0221	0.0077	65.16	84	0.0086	0.0028	67.44
3	0.0219	0.0195	10.96	85	0.0230	0.0066	71.30

需要说明的是合成绝缘子串屏蔽环除可改善电压分布外还有引弧保护伞裙、防止金具电晕、降低芯棒端部场强等作用。应根据屏蔽环应用的侧重点合

理确定其类型、结构尺寸和位置, 同时应注意保证干弧放电距离^[3-4]。

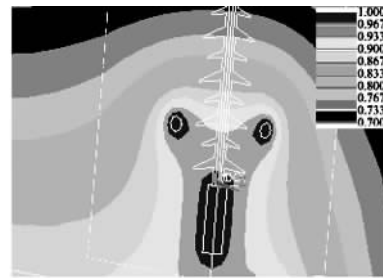


图 4 屏蔽环附近绝缘子周围等位线分布

5 结语

该文通过对 500 kV 线路合成绝缘子串电压分布的计算和屏蔽环位置优化可得到以下结论:

- (1) 有限元方法在合理选定外边界长度以后可以准确计算合成绝缘子串上每个伞裙的电压分布, 可以对屏蔽环位置进行优化选择。
- (2) 屏蔽环对离其较远处合成绝缘子伞裙电压分布几乎无影响。
- (3) 合成绝缘子串屏蔽环从改善电压分布角度考虑具有一个最优位置, 但位置的选择应根据其应用的目的具体分析。

参考文献:

- [1] 张畅生, 王晓刚, 黄立虹. 500 kV 惠汕线合成绝缘子芯棒脆断事故分析[J]. 电网技术, 2002, 26(6): 71-72, 76.
- [2] 张鸣, 陈勉. 500 kV 罗北甲线合成绝缘子芯棒脆断原因分析[J]. 电网技术, 2003, 27(12): 51-53.
- [3] 钱之银, 叶自强, 张宇. 北兰线 500 kV 合成绝缘子断串原因试验分析[J]. 高电压技术, 2004, 30(6): 24-26.
- [4] 杨杰, 吉晓波, 周国华, 等. 均压装置对复合绝缘子电气性能的影响[J]. 高电压技术, 2004, 30(2): 24-25, 50.
- [5] 陈树挺, 李日隆. 复合绝缘子均压环应用研究 [J]. 电磁避雷器, 2004(3): 8-10.
- [6] 陶元忠, 包建强. 输电线路绝缘子运行技术手册 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
- [7] 江汛, 王仲奕. 330 kV 带均压环的棒形悬式复合绝缘子电场有限元分析[J]. 高压电器, 2004, 40(3): 215-217.
- [8] 沈鼎申, 张孝军, 万启发, 等. 750 kV 线路绝缘子串电压分布的有限元计算[J]. 电网技术, 2003, 27(12): 54-57.

(上接第 175 页)

- 2002, 28(12): 1-3.
- [4] De La A, Gorur R S. Flashover of Contaminated Nonceramic Outdoor Insulators in a Wet Atmosphere [J]. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Dec 1998, 5(6): 814-823.
- [5] 张文彤. SPSS11 统计分析教程高级篇[M]. 北京: 北京希望电子出版社, 2002.
- [6] 苏明金. 统计软件 SPSS 12.0 for windows 应用及开发指南 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.
- [7] 秦超英, 赵选民, 师义民, 等. 数理统计 [M]. 西安: 西北工

- 业大学出版社, 1999.
- [8] 李顺元. 交流电压下污染绝缘表面闪络机理的研究[D]. 北京: 清华大学电机工程系, 1988: 4-16.
- [9] 陈国义. 关于污闪和湿闪的原因分析[J]. 华中电力, 2002, 2(15): 21-24.
- [10] 张永瑞, 刘振起. 电子测量技术基础 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004.
- [11] CHENG T C. DC Interfacial Breakdown on Contaminated Electrolyte Surfaces [J]. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, 1984, 19(6): 536-542.