ICS 29.240.01
F 24

DL

中华人民共和国电力行业标准

DL/T 417—2019
代替 DL/T 417—2006

电力设备局部放电现场测量导则

Guide for field measurement of partial discharge of power equipment

2019-11-04发布　　2020-05-01实施

国家能源局　发布

目　次

前言 …… II
1　范围 …… 1
2　规范性引用文件 …… 1
3　术语和定义 …… 1
4　测量回路和测量仪器 …… 2
4.1　测量回路 …… 2
4.2　测量仪器 …… 3
5　视在放电量校准 …… 3
5.1　校准基本要求 …… 3
5.2　校准方波的要求 …… 4
5.3　试验回路校准 …… 4
6　电力设备的局部放电试验 …… 5
6.1　电力设备局部放电试验开展的条件 …… 5
6.2　变压器局部放电试验 …… 5
6.3　互感器的局部放电试验 …… 7
6.4　套管 …… 10
6.5　耦合电容器（或电容式电压互感器） …… 10
7　局部放电测量时干扰的抑制 …… 10
7.1　干扰来源 …… 10
7.2　根据干扰来源与途径采取的抑制措施 …… 10
7.3　利用仪器功能和接线方式抑制干扰的措施 …… 12
7.4　高压端部电晕放电的抑制措施 …… 14
7.5　接地干扰的抑制 …… 15
8　有关电力设备局部放电图谱识别及放电量的允许水平 …… 15
附录 A（资料性附录）　电力变压器局部放电定位方法 …… 17
附录 B（资料性附录）　局部放电的波形和识别图谱 …… 20
附录 C（资料性附录）　数字式局部放电仪的放电图谱识别方法 …… 28

前　言

本标准按照 GB/T 1.1—2009《标准化工作导则　第 1 部分：标准的结构和编写》给出的规则起草。

本标准是对 DL/T 417—2006《电力设备局部放电现场测量导则》的修订，修订后与原版本比较主要有以下变化：

——进一步明确了标准的适用范围，给出了局部放电的测量方法与测量仪器；

——细化了变压器局部放电试验的试验时间；

——增加了中间变压器（试验变压器）相关内容；

——增加了局部放电定位方法；

——增加了数字式局部放电仪的放电图谱识别方法。

本标准实施后代替 DL/T 417—2006。

本标准由中国电力企业联合会提出。

本标准由电力行业高压试验技术标准化技术委员会（DL/TC 14）归口。

本标准主要起草单位：国网四川省电力公司电力科学研究院。

本标准参与起草单位：中国电力科学研究院有限公司、南网深圳供电局有限公司、重庆大学、国网广安供电公司、国网浙江省电力公司电力科学研究院、成都恒锐智科数字技术有限公司。

本标准主要起草人：李建明、胡灿、丁玉剑、张榆、党晓婧、陈凌、谢施君、刘睿、黄荣辉、甘德刚、何惧熊、廖瑞金、王惠波、李晏、张洛、陈鑫、王大兴、李荷薇、罗东辉、王涵宇。

本标准于 1991 年 12 月首次发布；2006 年第一次修订；本次为第二次修订。

本标准在执行过程中的意见和建议反馈至中国电力企业联合会标准化管理中心（北京市白广路二条一号，100761）。

电力设备局部放电现场测量导则

1 范围

本标准规定了局部放电试验的测量方法、测量仪器、校准方法、干扰及抑制和电力设备局部放电量的允许水平。

本标准适用于现场或实验室条件下，变压器、互感器、套管、耦合电容器等电容型绝缘结构设备的局部放电。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 1094.3 电力变压器 第3部分：绝缘水平、绝缘试验和外绝缘空气间隙

GB/T 4109 交流电压高于1000 V的绝缘套管

GB/T 19749.1 耦合电容器及电容分压器 第1部分：总则

GB/T 22071.1 互感器试验导则 第1部分：电流互感器

GB/T 22071.2 互感器试验导则 第2部分：电磁式电压互感器

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

局部放电 partial discharge；PD

引起设备导体之间绝缘系统中场强高处的绝缘部分被击穿且只发生局部桥接的一种电气放电，这种放电可以发生在导体（电极）附近，也可发生在其他位置。

3.2

视在放电量 quantity of apparent discharge

q

在试品两端注入一定电荷量，使试品端电压发生变化的量和局部放电时端电压变化量相同。此时注入的电荷量即称为局部放电的视在放电量，单位为皮库（pC）。

3.3

局部放电起始电压 partial discharge inception voltage

U_i

试验电压从不产生局部放电的较低电压逐渐增加时，在试验中局部放电量超过某一规定值时的最低电压值。

3.4

局部放电熄灭电压 partial discharge extinction voltage

U_e

试验电压从超过局部放电起始电压的较高值逐渐下降时，在试验中局部放电量小于某一规定值时的最高电压值。

3.5

测量回路直接校准 direct calibration of measurement circuit

将标定电荷量通过标准方波发生器注入试品两端，直接求得指示系统和以视在放电量表征的试品

内部放电量之间的定量关系的校准方式。

3.6

试验回路间接校准　indirect calibration of measurement circuit

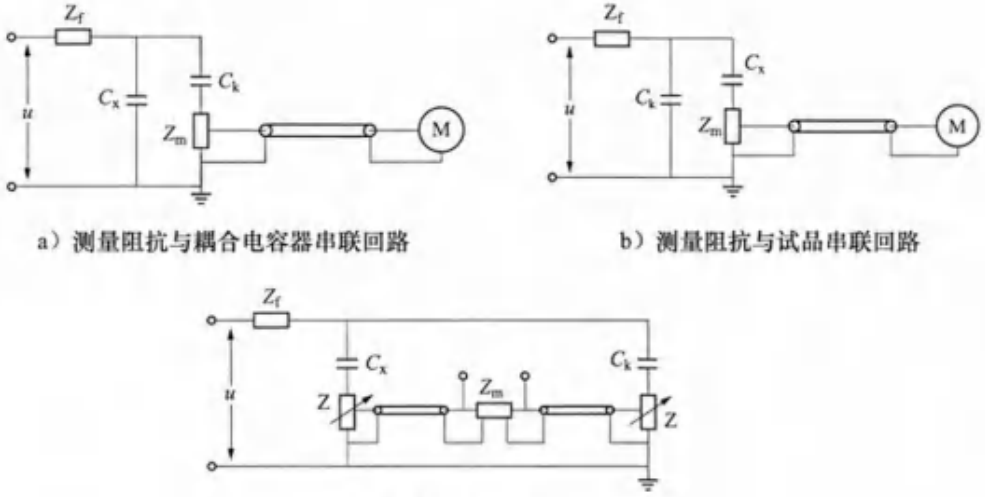
将相同电荷量通过标准方波发生器分别注入测量阻抗和试品两端，通过两种情况下的响应比值获得回路衰减系数，并由校准脉冲相比较而直接读出放电量值得校准方式。

4　测量回路和测量仪器

4.1　测量回路

4.1.1　测量回路示意图

测量局部放电的基本回路有三种，如图 1 所示。



a）测量阻抗与耦合电容器串联回路　　b）测量阻抗与试品串联回路

c）平衡测量回路

说明：

Z_f ——高压滤波器；

C_x ——试品等效电容；

C_k ——耦合电容；

Z_m ——测量阻抗；

Z ——调平衡元件；

M ——局部放电测量仪。

图 1　局部放电测量的基本回路

4.1.2　测量回路主要元件

测量回路中的主要元件及基本要求如下：

a）耦合电容 C_k，在试验电压下不应有明显的局部放电；

b）测量阻抗 Z_m 的频率特性应与耦合电容 C_k 相匹配；

c）低通滤波器 Z_f，是根据试验时干扰情况接入回路以消除或降低来自电源的干扰；

d）测量仪器 M，应能有效测量局部放电。

4.1.3 测量回路选择原则

在不同试验条件下，试验回路的选取原则如下：

a） 试验电压下，试品的电容电流超出测量阻抗 Z_m 的允许值或试品的接地部位固定接地时，可采用图 1 a）所示的试验回路。

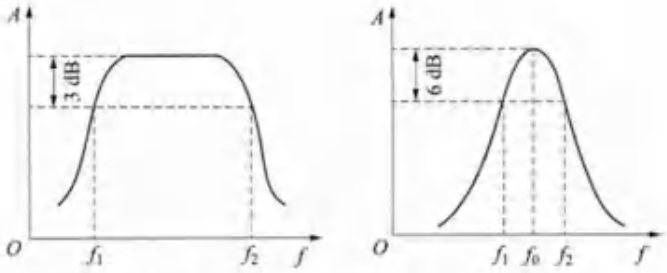
b） 试验电压下，试品的电容电流符合测量阻抗 Z_m 允许值且试品接地部位可解开，可采用图 1 b）所示的试验回路。

c） 试验电压下，图 1 a）、图 1 b）所示的试验回路有过高的干扰信号时，可采用图 1 c）所示的试验回路。

4.2 测量仪器

4.2.1 测量仪器的频带

常用测量仪器的频带可分为宽频带和窄频带两种，如图 2 所示。



a）宽频带　　b）窄频带

说明：

f_1、f_2 ——分别为下限频率和上限频率；

f_0 ——谐振频率。

图 2 测量仪器的频带

宽频带与窄频带由以下参数决定：

a） 下限频率 f_1 和上限频率 f_2：对一恒定的正弦输入电压的响应值，宽频带仪器（窄频带）分别自一恒定值（峰值）下降 3 dB（6 dB）时的一对（上、下限）频率；

b） 频带宽度 Δf 指上限频率与下限频率之差，宽频带仪器的 Δf 与 f_2 有同一数量级，窄频带仪器 Δf 的数量级小于 f_2 的数量级。

4.2.2 现场测量时仪器的选择

现场进行局部放电试验时，可根据环境干扰水平选择相应的仪器，原则如下：

a） 干扰较强时，宜选用窄频带测量仪器，例如 f_0=（30～200）kHz，Δf=（5～15）kHz；

b） 干扰较弱时，宜选用宽频带测量仪器，例如 f_1=（10～50）kHz，f_2=（70～400）kHz。

5 视在放电量校准

5.1 校准基本要求

现场试验时，试验回路每改变一次应进行一次校准。

5.2 校准方波的要求

方波校准器应满足以下要求：

a） 方波发生器应 1 年校核一次；

b） 方波校准器输出电压脉冲的上升时间 t_r 应小于 100 ns，对于上限频率高于 500 kHz 的宽带测量系统，应满足 $t_r \leqslant 0.03/f_2$ 的要求；

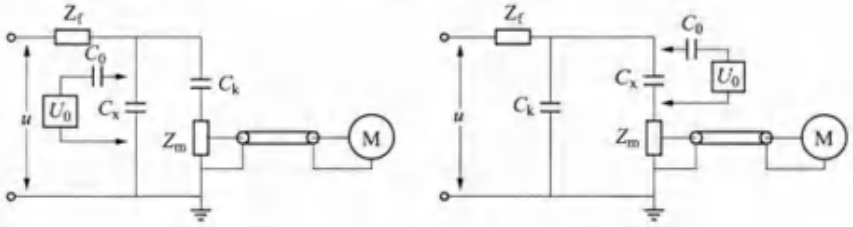
c） 方波校准器内方波发生器输出电压和串联电容值的误差应小于 3%；

d） 校准时方波校准器的电量应充足。

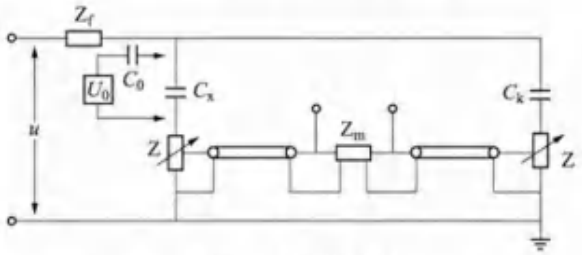
5.3 试验回路校准

5.3.1 直接校准

用方波发生器将已知电量直接注入试品两端，如图 3 所示。



a）直接测量法的直接校准



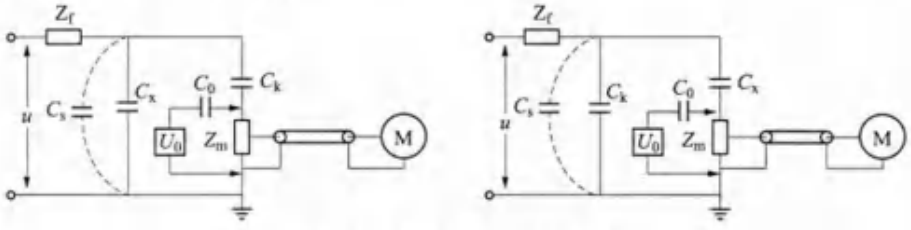
b）平衡法直接校准

注：U_0 和 C_0 的组合为方波发生器的电压和电容。

图 3 直接校准接线示意图

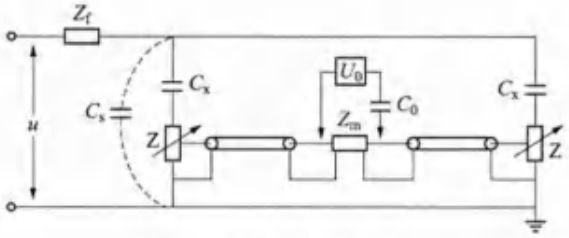
5.3.2 间接校准

将相同电荷量通过标准方波发生器分别注入测量阻抗和试品两端，通过两种情况下的响应比值获得回路衰减系数，试验中将方波发生器接于阻抗两端，通过方波发生器的电荷量与衰减系数的乘积获得试品放电量。校准接线如图 4 所示。



a）直接测量法间接校准接线

图 4 间接校准接线示意图



b）平衡测量法间接校准接线

图 4　间接校准接线示意图（续）

6　电力设备的局部放电试验

6.1　电力设备局部放电试验开展的条件

电力设备开展局部放电试验应满足以下条件：

a）所有高压绝缘试验合格之后进行，必要时可在耐压试验前后各进行一次；

b）试品的表面应清洁干燥，试品在试验前不应受机械、热的作用；

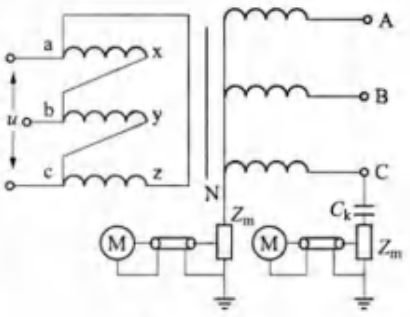
c）油浸绝缘的试品经长途运输颠簸或注油工序之后通常应静置规定的时间后，再进行试验；

d）除去个别能分辨是干扰信号并且不影响测量读数的脉冲外，背景噪声水平应低于试品允许放电量的 50%，当试品允许放电量低于 20 pC 时，背景噪声水平可以允许到允许放电量的 100%。

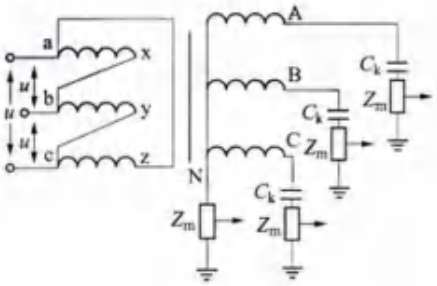
6.2　变压器局部放电试验

6.2.1　试验基本接线

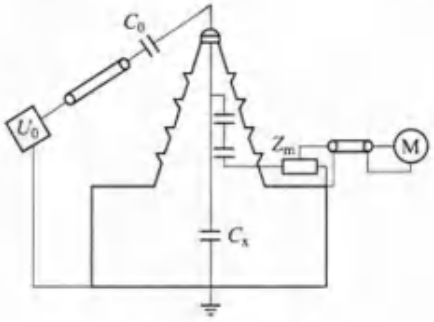
变压器局部放电试验的基本原理接线，如图 5 所示。



a）单相励磁接线



b）三相励磁接线



c）在套管抽头测量和校准接线

图 5　变压器局部放电测量接线图

6.2.2 试验电源

试验电源一般采用倍频电动机－发电机组或变频电源装置。

6.2.3 中间变压器（试验变压器）

中间变压器应满足如下要求：

a） 中间变压器的容量应满足试验容量的要求；

b） 最高输出电压不宜低于所需最高试验电压（被试变压器低压侧最高试验电压）的 1.2 倍；

c） 中间变压器的高压或低压侧宜设置分接头。

6.2.4 局部放电试验的无功补偿

无功补偿应满足如下要求：

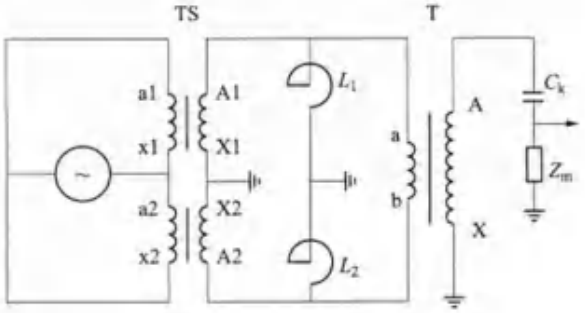
a） 现场试验中，宜采用中间变高压侧补偿的方式；

b） 采用的电源装置为电动机－发电机组时，补偿采取过补偿的方式，即流过发电机的电流为感性电流。

6.2.5 提高试验电压的方法

对于试验电压等级高，在低压侧需要加较高的电压，且被试变压器低压尾端绝缘满足要求时可采取两台相同的最高输出电压较低的中间变进行对称加压，如图 6 所示。

具体方法是：从发电机组或变频电源出来的电源同时接至中间变压器低压侧的“a—x”和“x—a”；两台中间变压器的高压侧分别至被试变压器低压侧的首端和尾端。



说明：

TS ——中间变压器；

T ——被试变压器；

L_1、L_2 ——补偿电抗。

图 6 对称加压方式接线

6.2.6 试验加压程序

变压器局部放电试验的加压程序如下（图 7）：

a） 在小于 $U_2/3$ 的电压下接通电源，试验电压升到 U_3 后进行测量，保持 5 min。

b） 试验电压升到 U_2，保持 5 min。

c） 试验电压升到 U_1，当试验频率小于或等于额定频率的 2 倍时，试验时间为 60 s，当试验频率

大于额定频率的 2 倍时，试验时间为（120×工频频率/试验频率）s，但不少于 15 s。当在感应耐压试验同时进行局部放电时，U_1 值即为感应耐压试验值，当仅作为局部放电试验时，U_1 则为预加电压。

d） 电压降到 U_2 再进行测量。当 $U_m \geqslant 300$ kV 时，保持时间大于 60 min；当 $U_m < 300$ kV 时，保持时间大于 30 min。

e） 电压降到 U_3 再进行测量，保持 5 min。

f） 电压降到 $U_2/3$ 以下后断开电源。

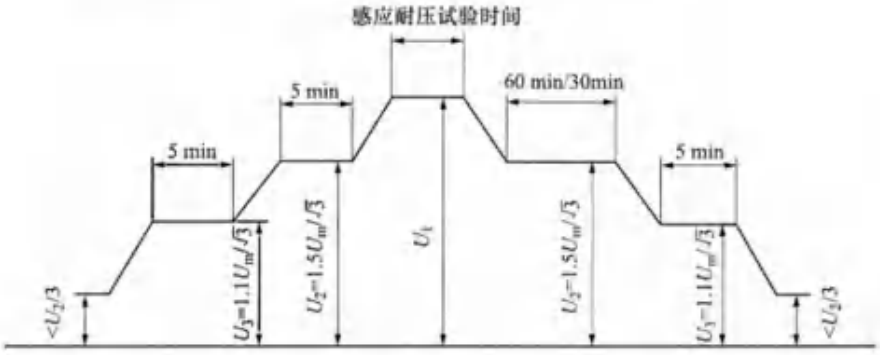


图 7　变压器局部放电试验的加压时间及步骤

6.2.7　试验数据读取及合格判定规则

变压器局部放电试验数据读取及合格的判定规则如下：

a） 在整个试验时间内连续观察放电波形，并按一定的时间间隔记录放电量 Q。放电量的读取，以相对稳定的最高重复脉冲为准，偶尔发生的较高的脉冲可忽略，但应做好记录备查。

b） 整个试验期间试品不发生击穿，在 U_2 的第二阶段的时间内，所有测量端子测得的放电量 Q，连续地维持在允许的限值内，并无明显地、不断地向允许的限值内增长的趋势，则试验合格。

c） 如果放电量曾超出允许限值，但之后又下降并低于允许的限值，则试验应继续进行，直到此后 30 min/60 min 的期间内局部放电量不超过允许的限值，试品合格。

6.2.8　局部放电定位方法

电力变压器局部放电超标，需要对放电源进行定位时，可采用“多端测量—多端校准”、电位变化、超声定位等方法，参见附录 A。

6.2.9　现场试验

在以下三种情况时，需要进行局部放电试验：

a） 新安装投运时；

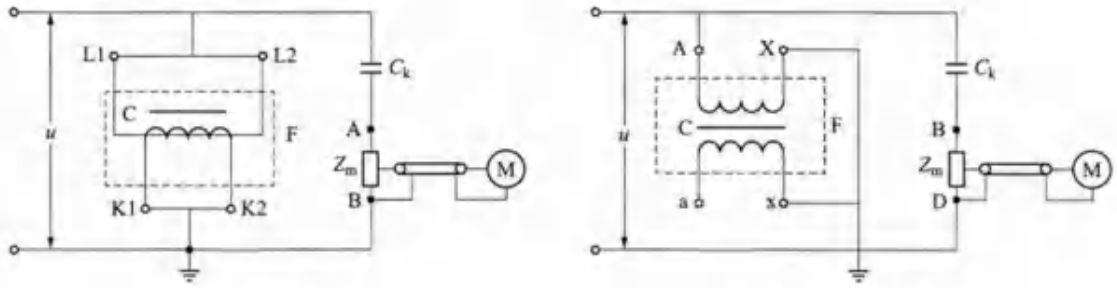
b） 返厂修理或现场大修后；

c） 运行中必要时。

6.3　互感器的局部放电试验

6.3.1　试验接线

互感器局部放电试验原理接线，如图 8 所示。



a）电流互感器　　b）电磁式电压互感器

说明：

C_k　——耦合电容；

C　——铁芯；

Z_m　——测量阻抗；

F　——外壳；

L1、L2 ——电流互感器一次绕组端子；

K1、K2——电流互感器二次绕组端子；

A、X　——电磁式电压互感器一次绕组端子；

a、x　——电磁式电压互感器二次绕组端子。

图 8　互感器局部放电试验的原理接线

除上述两种接线方式外，还可按 4.1 推荐的方式。电压互感器试验时，D 或 B 点可任一点接地，当采用 B 点接地时，C、F 宜优先考虑接 D 点，不能接 D 点则可接 B 点（接地）。

6.3.2　试验方法

互感器试验方法如下：

a）为防止励磁电流过大，电压互感器试验的预加电压，可采用 150 Hz 或其他合适的频率作为试验电源。

b）试验应在不大于 1/3 测量电压下接通电源，然后按表 2 规定进行测量，最后降到 1/3 测量电压下，方能切除电源。

c）对于不接地电压互感器，应进行两次试验，即对图 8 b）中端子 A 和 X 轮流加高电压，另一端接地。

6.3.3　试验数据读取及合格判定规则

a）放电量的读取，以相对稳定的最高重复脉冲为准，偶尔发生的较高脉冲可以忽略，但应做好记录备查。

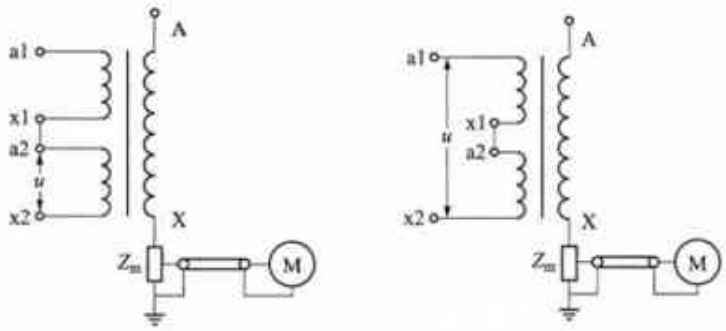
b）试验期间试品不击穿，测得视在放电量不超过允许的限值，则认为试验合格。

6.3.4　现场试验

现场试验原则上应按上述标准与规定进行，但若受变电所现场客观条件的限制，认为必须要对运行中的互感器进行局部放电时，又无适当的电源设备，则推荐按以下方法进行：

a）电磁式电压互感器。以 150 Hz 的频率作为试验电源，试验电压可用电压互感器二次绕组自励磁产生，其试验接线如图 9 所示。在低压侧读取试验电压时，必须考虑试品的容升电压。

当干扰影响测量时，可采用邻近相的互感器连接成平衡回路的接线，如图 10 所示，被试互感器励磁，非被试互感器不励磁，以降低干扰。



a）低压单线圈加压　　b）低压双线圈串联加压

图 9　电磁式电压互感器局部放电试验接线

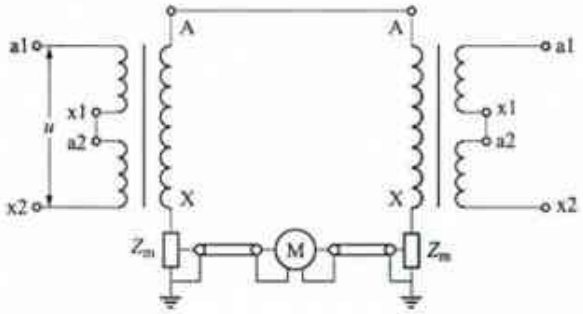


图 10　抑制干扰的对称接法

当需要减小试验的励磁电流时，可采用两组二次绕组串联励磁，如图 11 所示。

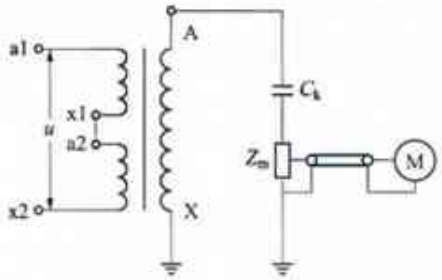


图 11　接有耦合电容 C_k 的接线方式

b）电流互感器。电流互感器局部放电试验，试验电压由外施电源产生，其接线如图 12 所示。互感器若有铁芯 C 端子引出，应并接在 B 处。电容式互感器的末屏端子也应并接在 B 处。外壳宜接 A，也可直接接地。试验变压器宜选用单级变压器串接（例如单级电压为 60 kV 的 3 台变压器串接），其内部放电量应小于规定的允许水平。

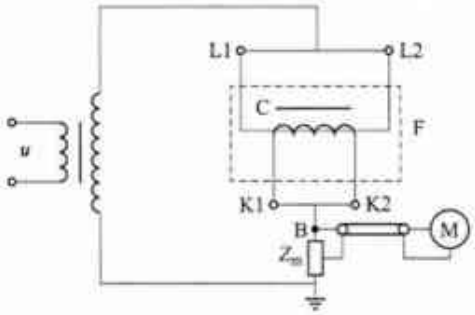


图 12　电流互感器试验接线图

当干扰影响现场测量时，可利用邻近相的互感器连接成平衡回路。

6.4 套管

套管局部放电的试验电压，由试验变压器外施产生，可选用电流互感器试验时的试验变压器。试验标准按表 2 执行。

变压器或电抗器套管局部放电试验时，其下部应浸入合适的油筒内，注入筒内的油应符合油质试验的有关标准，并静止 48 h 后才能进行试验。变压器或电抗器套管试验接线如图 13 所示，具有相同类型套管时，宜用平衡接线法测量。

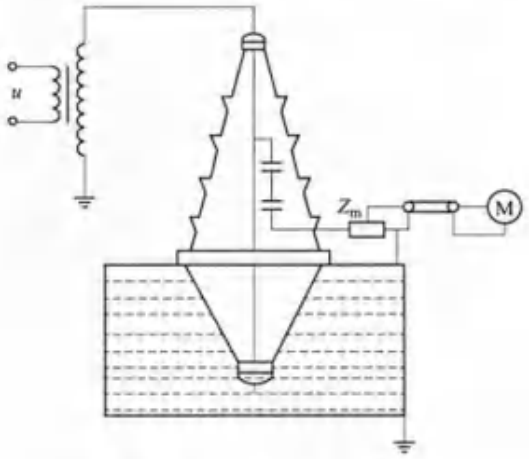


图 13 变压器套管试验接线

穿墙或其他形式的套管的试验不需放入油筒，试验标准按表 2 执行。

6.5 耦合电容器（或电容式电压互感器）

耦合电容器的试验接线与套管相同，有电容末屏端子的，可利用该端子与下法兰之间，串接测量阻抗 Z_m，下法兰直接接地。若无电容末屏端子引出的，则需将试品对地绝缘，然后在下法兰对地之间串接测量阻抗 Z_m。试验标准按表 2 规定执行。

7 局部放电测量时干扰的抑制

7.1 干扰来源

实际试验时只要将干扰抑制在某一水平以下，能有效测量试品内部的局部放电即可。局部放电测量时的干扰主要有以下几种形式：

a） 电源网络的干扰；
b） 各类电磁场辐射的干扰；
c） 试验回路接触不良、各部位电晕及试验设备的内部放电；
d） 接地系统的干扰；
e） 金属物体悬浮电位的放电。

7.2 根据干扰来源与途径采取的抑制措施

7.2.1 电源滤波器

在高压试验变压器的一次侧设置低通滤波器，抑制试验电源的干扰。低通滤波器的截止频率应尽

可能低，并设计成能抑制来之相线、中线（220 V 电源时）两线路中的干扰。滤波器宜设计成 Π 型滤波器，如图 14 所示。图 14 中 L1 用 E17 特氧体磁芯，用ϕ2.0 漆包线绕 60 匝，C 用耐压 2000 V、1 μF 的无放电电容，该回路的抑制效果大于 40 dB。

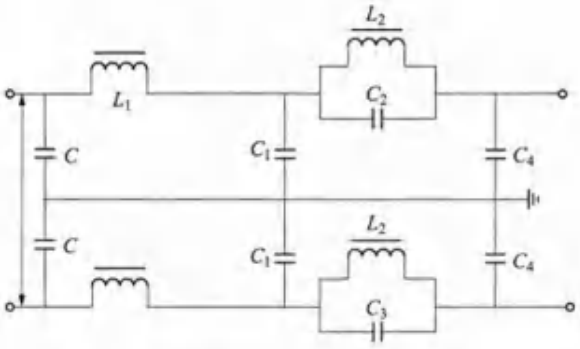


图 14　双 Π 型滤波网络接线图

7.2.2　屏蔽式隔离变压器

试验电源和仪器用电源设置屏蔽式隔离变压器，抑制电源供电网络中的干扰，屏蔽式结构的隔离变压器如图 15 所示。

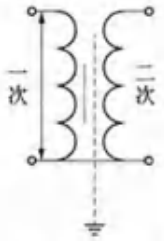


图 15　屏蔽式隔离变压器

7.2.3　高压滤波器

在试验变压器的高压设置高压低通滤波器，抑制电源供电网络中的干扰。高压滤波器宜设计成 T 型或 Π 型，如图 16 所示。它的阻塞频率应与局部放电检测仪的频带检测仪相匹配。

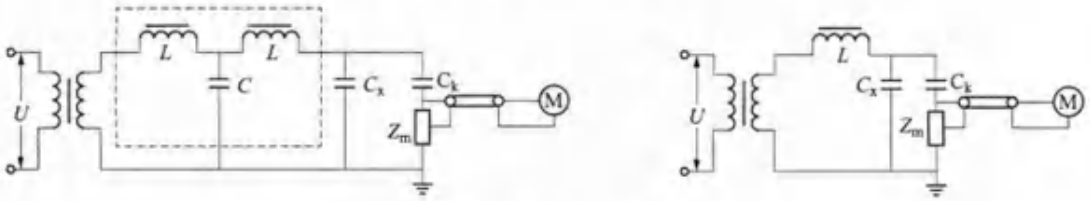


图 16　高压滤波器的接线图

7.2.4　励磁电源隔离

当在现场做变压器等自励磁加压试验时，尤其是干式变压器等局部放电较小、灵敏度较高的设备，现场又无适当的滤波器时，可用 2 台 10 kV/400 V（30 kVA～200 kVA）的三相变压器作为隔离变压器，见图 17 所示。配合双 Π 型的滤波器，抑制效果可达 40 dB，测量背景噪声水平可控制在 1 pC 以下。

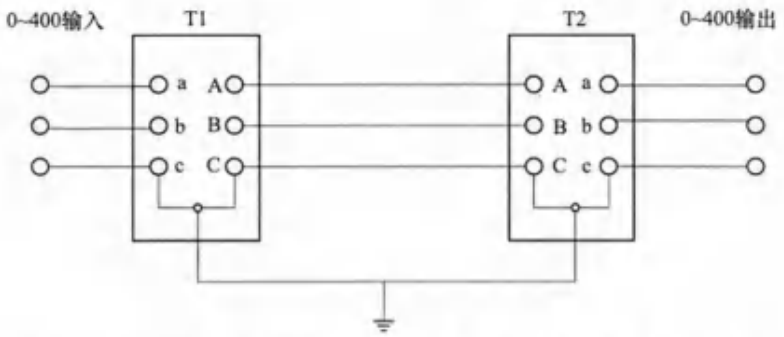
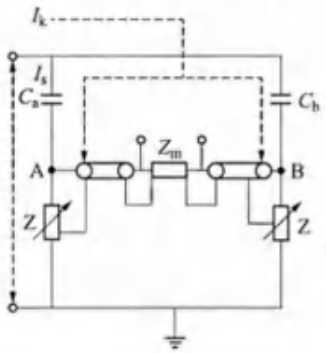


图 17　用 2 台 10 kV/400 V（30 kVA～200 kVA）的三相变压器作为隔离变压器示意

7.3　利用仪器功能和接线方式抑制干扰的措施

7.3.1　平衡接线法

平衡接线法（图 18）能抑制辐射干扰 I_k 及电源干扰 I_s。当电桥平衡时，干扰信号 I_k、I_s 耦合到回路，电桥 A、B 两点输出等于零，达到抑制干扰的目的。平衡接线法宜选择同类设备做对称法测试。



说明：

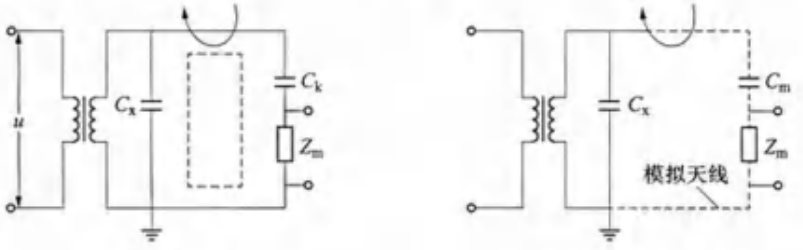
I_k ——辐射干扰；

I_s ——电源干扰。

图 18　平衡法接线图

7.3.2　模拟天线平衡法

利用电磁波辐射干扰具有方向性的特点，整个试验回路可视作一种环形天线，变化该环形天线（即变化辐射干扰波与环形天线的入射角）的方向，可有效抑制辐射干扰，其原理示意见图 19。



a）原理示意图　　b）干扰方向判别示意图

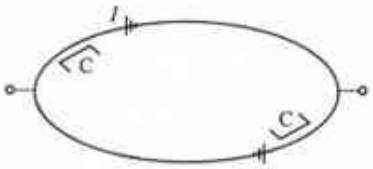
图 19　天线平衡法抑制干扰原理图

实际操作方法是：用一根金属导线连接电容 C_m（与 C_k 的电容量相等），串接测量阻抗 Z_m，并接在

C_x 两端，成为一模拟天线，接通测量仪；不断变化模拟天线的方向，使测量仪显示系统的干扰信号指示最小水平，最后即以此位置连接高压导线与耦合电容 C_k；模拟天线尺寸与实际测量时几何尺寸应尽量相同。

7.3.3 仪器带有选通（窗口）元件系统

对于相位固定、幅值较高的干扰，利用带有选通元件的仪器，可有效分隔这种干扰，如图 20 所示。



说明：

C ——选通区；

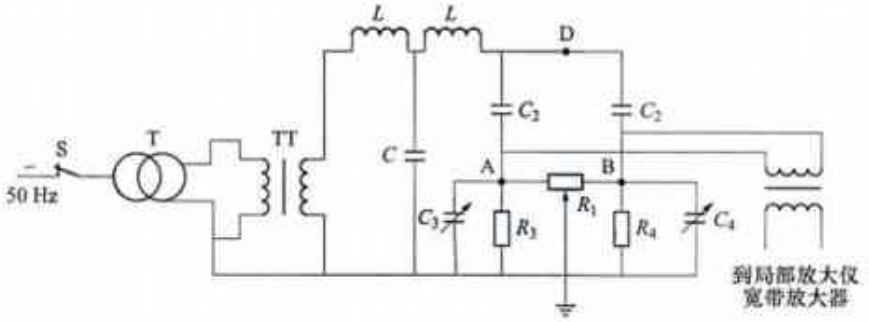
I ——干扰信号。

图 20 选通区抑制干扰信号示意图

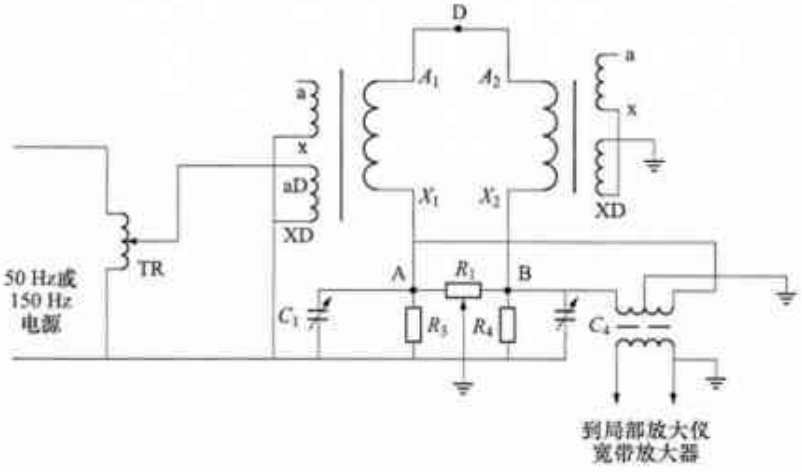
7.3.4 平衡法抑制干扰测试

7.3.4.1 平衡调试及方法校正

平衡调试可利用方波发生器，按图 21 接线，在回路高压及地端（即 D-0 点）注入模拟放电脉冲，



a）电容式试品接线图



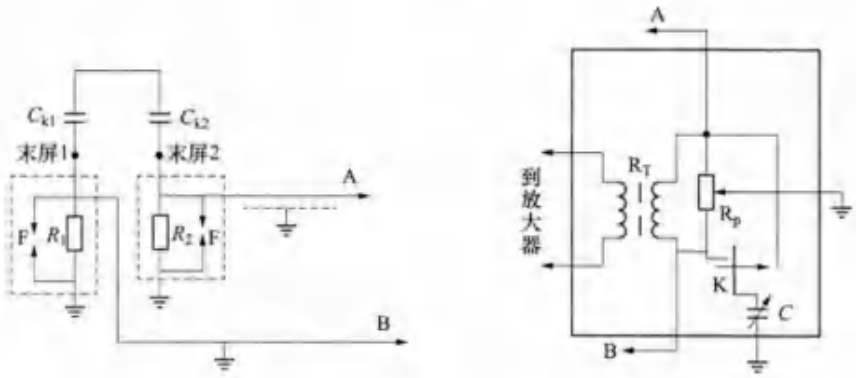
b）电压互感器试验接线图

图 21 互感器局部放电试验接线图

然后调节低压臂电阻及电容，使回路平衡，也即调节使仪器上读到的信号最小。也可在高压端部人为制造一电晕信号，并此时调节低压臂元件参数，使在显示屏上观察到的电晕脉冲信号最小，这时平衡调节完成。然后降压进行方波校正，并固定其各元件参数不动。

7.3.4.2 低压臂阻抗参数的选择

图 22 a）中，C_{k1} 和 C_{k2} 为局部放电回路耦合电容，R_1、R_2 用金属膜电阻，可用 4 只 1.6 kΩ/2 W 的电阻并联，则实际阻值为 400 Ω、8 W；F 为保护间隙；AB 引线用 10 m～15 m 长的 75 Ω 高频同轴电缆。图 22 b）中，R_p 选用 2.2 kΩ、5 W 线绕电位器，可调电容 C 用电容箱外接，高频变压器 R_T 用 E17 铁氧体磁芯绕制，一次侧用ϕ0.3 mm 高强度漆色线绕制，二次侧用ϕ0.2 mm～ϕ0.3 mm 线绕制。



a）串联电阻低压臂接线图　　b）平衡阻抗结构原理图

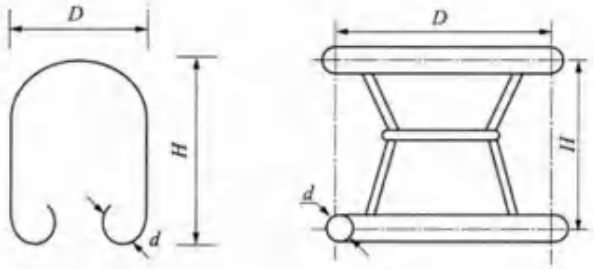
图 22　低压臂阻抗连接图

7.4 高压端部电晕放电的抑制措施

高压端部电晕放电的抑制，主要是选用合适的无晕环（球）及无晕导线作为高压连线。不同电压等级设备无晕环（球）的尺寸举例，见表 1 及图 23。高压无晕导线宜采用金属圆管或其他结构的无晕高压连线；110 kV 及以下设备，可采用单环屏蔽，其圆管和高压无晕金属圆管的直径均为 50 mm 及以下。

表 1　不同电压等级无晕环（球）的尺寸举例

电压等级	双环球形			半球形	圆管形直径
	d mm	H mm	D mm	D mm	D mm
110 kV	100	600	500	500	100
220 kV	150	800	700	750	250
330 kV	150	1000	850	900	250
500 kV	200	1100	1500	1500	300
750 kV	500	1600	1500	2000	600
1000 kV	900	2600	2000	—	—



a）半球形防晕罩　　b）双环形防晕罩

图 23　无晕环（球）结构

7.5　接地干扰的抑制

抑制试验回路接地系统的干扰是在整个试验回路选择一点接地。

8　有关电力设备局部放电图谱识别及放电量的允许水平

有关电力设备局部放电的波形和识别图谱参见附录 B。

有关数字式局部放电仪的放电图谱识别方法参见附录 C。

有关电力设备局部放电量的允许水平，见表 2。

表 2　有关电力设备局部放电量的允许水平

设备名称		高压施加方式	预加电压		试验电压		允许放电量 pC		标准的来源	备注
			电压 kV	时间 s	电压 kV	时间 min	交接	运行中		
110 kV 及以上变压器		自激	见 6.2.6	见 6.2.6	a）相对地 $1.5U_m/\sqrt{3}$；b）相对地 $1.1U_m/\sqrt{3}$	60	a）500；b）100	—	GB/T 1094.3	预加电压 U_1 的要求是：在 $1.3U_m/\sqrt{3}$ 电压下，5 min 升压至 U_m，5 s
干式变压器	10 kV	自激	见 6.2.6	见 6.2.6	a）$1.1U_m/\sqrt{3}$；b）$1.1U_m$	60	30	30		a）预加电压要求是：中性点直接接地的设备，在 $1.5U_m/\sqrt{3}$ 电压下，30 s； b）中性点不直接接地的设备，在 $1.5U_m$ 电压下，30 s
	35 kV						50	50		
110 kV 及以上油浸纸电流互感器		外施	$0.8\times 1.3U_m$	>1	$1.2U_m/\sqrt{3}$	0.5	5	20	GB/T 22071.1；GB/T 22071.2	a）背景噪声允许水平为 10 pC（现场测量）； b）中性点有效接地系统； c）中性点非有效接地系统
110 kV 及以上油浸纸电压互感器		外施、自激	$0.8\times 1.3U_m$	>1	$1.2U_m/\sqrt{3}$	0.5	5	20		a）背景噪声允许水平为 10 pC（现场测量）； b）中性点有效接地系统； c）中性点非有效接地系统

表 2（续）

设备名称		高压施加方式	预加电压		试验电压		允许放电量 pC		标准的来源	备注
			电压 kV	时间 s	电压 kV	时间 min	交接	运行中		
套管	油浸纸绝缘	外施	—	—	a）U_m； b）$1.5U_m/\sqrt{3}$	—	10	20	GB/T 4109	a）背景噪声允许水平为 10 pC（现场测量）； b）U_m 的试验电压仅适应于变压器、电抗器套管
	气体绝缘	外施	—	—	$1.5U_m/\sqrt{3}$	—	10	20		
耦合电容器		外施	$0.8\times1.3U_m$	>1	U_m	0.5	10	30	GB/T 19749.1	
固体绝缘互感器		外施、自激	$0.8\times1.3U_m$	>1	$1.2U_m/\sqrt{3}$	0.5	20	100	GB/T 22071.1； GB/T 22071.2	a）中性点有效接地系统； b）中性点非有效接地系统
注 1：运行中的变压器，若无倍频或中频加压设备，在工频励磁时，测量电压应根据条件尽可能高，允许放电量与持续时间不作规定。 注 2：国家标准一般指出厂试验，交接试验一般也按该标准执行。运行中的标准按 DL/T 596 执行。										

附 录 A
（资料性附录）
电力变压器局部放电定位方法

A.1 “多端测量—多端校准”定位法

任何一个局部放电源，均会向变压器的所有外部接线的测量端子传输信号，而这些信号形成一种独特的“组合A”。如果将校准方波分别地注入各绕组的端子，则这些方波同样会向变压器外部接线的测量端子传输信号，而形成一种校准信号的独特“组合B”。

如果在“组合A”（变压器内部放电时各测量端子的响应值）中，某些数据与“组合B”（校准方波注入时各测量端子的响应值）相应数据存在明显相关时，则可认为实际局部放电源与该对校准端子密切有关（见表A.1），这就意味着，通过校准能粗略的定出局部放电的位置。

具体方法如下：

当校准方波发生器接到一对规定的校准端子上时，应观察所有成对的测量端子上的响应，然后对其他成对的校准端子重复做此试验。其校准部位应在线圈的各端子与地之间进行校准，但也可以在高压套管的带电端子与它们的电容抽头之间进行校准（对套管介质中的局部放电进行校准），也可以在高压端端子与中性点端子，以及在高压绕组和低压绕组各端子间进行校准。

成对的校准和测量端子的所有组合，形成一个“组合B”，即“校准矩阵”，从而作为对实际试验读数进行判断的依据。

图A.1表示一台带有第三绕组的超高压单相自耦变压器的局部放电定位关系图，校准和试验都是在表A.1所列的端子上进行的。将$1.5U_m$这一行的试验结果与各种校准结果进行对比，显然可见，它和“2.1—地”这一行的校准响应值相关。这可以认为在2.1端子出现了约1500 pC这一数值的局部放电，并且还可以认为局部放电部位约是带电体（2.1端子）对地之间。其结构位置或许在串联线圈与公共线圈之间的连线上某一位置，也可能在邻近线圈的端部。

表A.1 局部放电源与相应校准端子的关系

多端校准		通道			
		1.1	2.1	2.2	3.1
		任意单位			
校准	1.1—地 2000 pC	50	20	5	10
	2.1—地 2000 pC	5	50	30	7
	2.2—地 2000 pC	2	10	350	4
	3.1—地 2000 pC	3	2	35	25
试验	U=0	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
	$U=U_m/\sqrt{3}$	<0.5	<0.5	0.5	0.5
	$U=1.5U_m/\sqrt{3}$	6	40	25	7

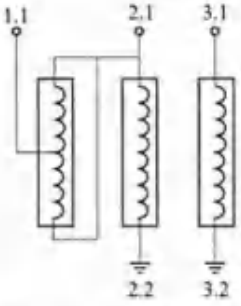


图 A.1　三绕组单相自耦变压器局部放电定位关系图

A.2　电位变化法定位

A.2.1　定义

电位变化法是指在局部放电试验中通过改变绕组分接位置、改变接线方式（如非被试相支撑、尾端加压）等方法，来改变被试绕组匝间、绕组间、绕组对地间等的电位梯度，观察在不同电位梯度下局部放电的放电量、起始电压、熄灭电压的变化，从而判断局部放电的部位。

A.2.2　非被试相支撑法

在进行局部放电测试时，为了同时考核纵绝缘强度，标准接线方式为中性点接地，被试相加压的接线方式，使感应倍数达到纵绝缘考核的要求。当测试中局部放电量超标，通过“多端测量－多端校准”的方法可以确定放电发生在某一相的某侧绕组上，但无法确定该放电发生在主绝缘或纵绝缘上，此时，可以采用非被试相支撑被试相的方法进行判断。

非被试相支撑法具体如下：

例如进行 A 相试验，低压 c、a 加压，高压 B、C 短接接地，中性点悬空。接线原理图见图 A.2。

中性点接地的加压方式下，被试绕组电压为试验电压。非被试相支撑加压方式下，被试绕组上电压为试验电压的 2/3，中性点对地电压为试验电压的 1/3，此时，试验电压的感应倍数为中性点接地方式的 2/3。

试验时，记录支撑和不支撑试验方法的放电起始电压，通过放电起始电压进行判断，当两种试验方法在相同的首端对地电压下放电起始，放电发生在主绝缘上，且放电位于首端；当两种试验方法在相同的感应倍数下放电起始，放电发生在纵绝缘上。当放电发生在纵绝缘且起始电压较高，使用非被试相支撑法试验时其匝间电压可能达不到放电起始电压。

应注意，试验时中性点电压不能超过中性点绝缘水平。

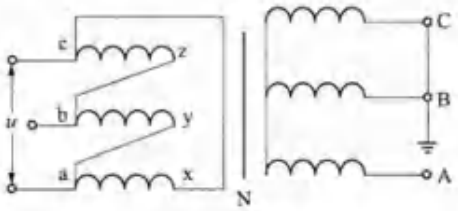


图 A.2　非被试相支撑法接线

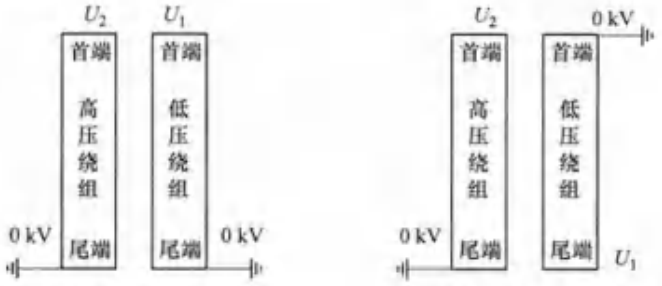
A.2.3　挡位变化法

挡位变化法与非被试相支撑法原理类似，利用改变挡位来达到改变绕组匝间电动势的目的，通过观察起始、熄灭电压来判断放电位于匝间或主绝缘，位于绕组端部或中部。具体判断时应结合调压绕

组的具体接入方式（是首端调压还是中性点调压）。

A.2.4 尾端加压法

通过励磁绕组首、尾端加压方式下局部放电起始电压的比较，可以判断局部放电是否位于高低压绕组之间的主绝缘。在首、尾端加压情况下高低压绕组上的电位分布如图 A.3 所示，当首端加压时高低压绕组首端间的电位差为 U_2–U_1，当尾端加压时高低压绕组首端间的电位差为 U_2，很明显尾端加压时高低压绕组间的电位梯度更大。如果放电位于高低压绕组之间，尾端加压时的起始电压将低于首端加压时的起始电压。



a）首端加压时绕组上的电位情况　　b）尾端加压时绕组上的电位

图 A.3 首端和尾端加压方式下高低压绕组电位分布

A.3 超声定位

超声波定位是用外置在变压器外壳的信号声波传感器获取局部放电的超声信号，利用同一放电的超声信号到达不同传感器的时间差，在建立的变压器三维模型中计算获得放电点的位置。

具体方法如下：

通过不断改变传感器在变压器上的位置搜索局部放电超声信号，每个测量点应连续监测不小于 10 min。在超声信号的搜索中需排除干扰信号的影响，如油箱振动、电磁干扰等。在收到超声信号的油箱壁区域可加密布置传感器进行检测，反复调整传感器位置，以便各传感器收到沿直接路径传播的超声信号。

当多个传感器收到沿直接路径传播的超声信号后，以检测到超声信号的区域附近明显的结构点（如外箱沿、加强筋等）为参考原点建立箱体的三维直角坐标系，并确定各传感器的坐标，采用“电—声”或“声—声”法进行放电定位。

附 录 B
（资料性附录）
局部放电的波形和识别图谱

B.1 概述

局部放电电气检测的基本原理是在一定的电压下测定试品绝缘结构中局部放电所产生的高频电流脉冲。在实际试验时，应区分并剔除由外界干扰引起的高频脉冲信号，否则，这种假信号将导致检测灵敏度下降和最小可测水平的增加，甚至造成误判断的严重后果。

在某一既定的试验环境下，如何区别干扰信号，采取若干必要的措施，以保证测试的正确性，就成为一个较重要的问题。目前行之有效的办法是提高试验人员识别干扰波形的能力，正确掌握试品放电的特征与施加电压及时间的规律。经验表明：判断正确与否在很大程度上取决于测试者的经验。掌握的波形图谱越多，则识别和解决的方法也越快越正确。目前，有用计算机进行频谱分析帮助识别，但应用计算机的先决条件同样需要预知各种干扰波和试品放电波形的特征。现根据我国多年来的实际经验和国外曾经发表过的一些图谱，汇编成文，供参考。应该指出，所介绍的放电波形，多属处理成典型化的图形，不可能包含全部可能发生的内容。

B.2 局部放电的干扰、抑制及识别的方法

B.2.1 干扰类型和途径

B.2.1.1 概述

干扰将会降低局部放电试验的检测灵敏度，试验时，应使干扰水平抑制到最低水平。干扰类型通常有：电源干扰、接地系统干扰、电磁辐射干扰、试验设备各元件的放电干扰及各类接触干扰。这些干扰及其进入试验回路的途径见图 B.1。

B.2.1.2 电源干扰

检测仪及试验变压器所用的电源是与低压配电网相连的，配电网内的各种高频信号均能直接产生干扰。因此，通常采用屏蔽式电源隔离变压器及低通滤波器抑制，效果甚好。

B.2.1.3 接地干扰

试验回路接地方式不当，例如两点及以上接地的接地网系统中，各种高频信号会经接地线耦合到试验回路产生干扰。这种干扰一般与试验电压高低无关。试验回路采用一点接地，可降低这种干扰。

B.2.1.4 电磁辐射干扰

邻近高压带电设备或高压输电线路，无线电发射器及其他诸如晶闸管、电刷等试验回路以外的高频信号，均会以电磁感应、电磁辐射的形式经杂散电容或杂散电感耦合到试验回路，它的波形往往与试品内部放电不易区分，对现场测量影响较大。其特点是与试验电压无关。消除这种干扰的根本对策是将试品置于屏蔽良好的试验室。采用平衡法、对称法和模拟天线法的测试回路，也能抑制辐射干扰。

B.2.1.5 悬浮电位放电干扰

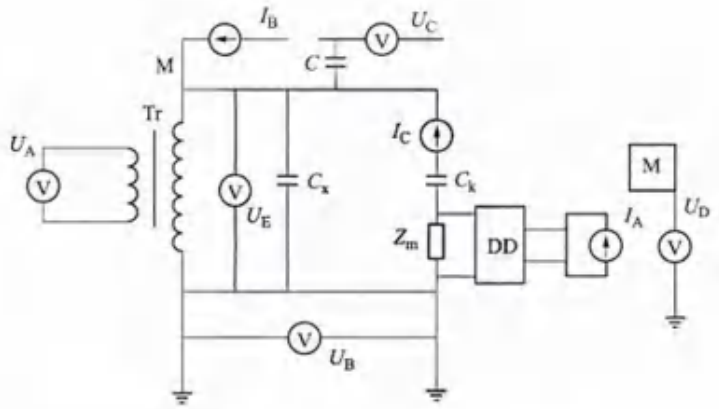
邻近试验回路的不接地金属物产生的感应悬浮电位放电，也是常见的一种干扰。其特点是随试验电压升高而增大，但其波形一般较易识别。消除的对策一是搬离，二是接地。

B.2.1.6 电晕放电和各连接处接触放电的干扰

电晕放电产生于试验回路处于高电位的导电部分，例如试品的法兰、金属盖帽、试验变压器、耦合电容器端部及高压引线等尖端部分。试验回路中由于各连接处接触不良也会产生接触放电干扰。这两种干扰的特性是随试验电压的升高而增大。消除这种干扰是在高压端部采用防晕措施（如防晕环等），高压引线采用无晕的导电圆管，以及保证各连接部位的良好接触等。

B.2.1.7 试验变压器和耦合电容器内部放电干扰

这种放电容易和试品内部放电相混淆。因此，使用的试验变压器和耦合电容器的局部放电水平应控制在一定的允许量以下。



说明：

Tr ——试验变压器；

C_x ——被试品电容；

C_k ——耦合电容；

Z_m ——测量阻抗；

DD ——检测仪；

M ——邻近试验回路的金属物件；

U_A ——电源干扰；

U_B ——接地干扰；

U_C ——经试验回路杂散电容耦合产生的干扰；

U_D ——悬浮电位放电产生的干扰；

U_E ——高压各端部电晕放电的干扰；

I_A ——试验变压器的放电干扰；

I_B ——经试验回路杂散电感 M 耦合产生的辐射干扰；

I_C ——耦合电容器放电的干扰。

图 B.1 干扰及其进入试验回路的途径

B.2.2 识别干扰的基本依据

B.2.2.1 概述

局部放电试验的干扰是随机而杂乱无章的，因此难以建立全面的识别方法，但掌握各类放电时的时间、位置、扫描方向以及电压与时间关系曲线等特性，有助于提高识别能力。

B.2.2.2 局部放电的电压效应和时间效应

局部放电脉冲波形与各种干扰信号随电压高低、加压时间的变化具有某种固有的特性，有些放电源（干扰源）随电压高低（或时间的延长）突变、缓变，而有些放电源却是不变的，观察和分析这类固有特性是识别干扰的主要依据。

B.2.2.3 试验电压的零位

试品内部局部放电的典型波形，通常是对称的位于正弦波的正向上升段，对称地叠加于椭圆基线上，而有些干扰（如高电位、地电位的尖端电晕放电）信号是处于正弦波的峰值，认定椭圆基线上试验电压的零位。也有助于波形识别。但须指出，试验电压的零位是指施加于试品两端电压的零位，而不是指低压励磁侧电压的零位。目前所采用的检测仪中，零位指示是根据高压电阻分压器的低压输出来定的，电阻分压器的电压等级一般最高为 50 kV。根据高电位、地电位尖端电晕放电发生在电压峰值的特性，也可推算到试验电压的零位，只要人为在高压端设置一个尖端电晕放电即可认定。高压端尖端电晕放电的脉冲都严格地叠加于正弦波的负峰值。

B.2.2.4 椭圆基线扫描方向

放电脉冲与各种干扰信号均在时基上占有相应的位置（即反映正弦波的电角度），如前所述，试品内部放电脉冲总是叠加于正向（或反向）的上升段，根据椭圆基线的扫描方向，可确定放电脉冲和干扰信号的位置。方法是注入一脉冲（可用机内方波），观察椭圆基线上显示的脉冲振荡方向（必要时可用 x 轴扩展）即为椭圆基线的扫描方向，从而就能确定椭圆基线的相应电角度，如图 B.2 所示。

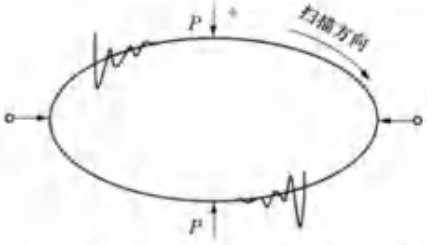


图 B.2 椭圆基线扫描方向识别

B.2.2.5 整个椭圆波形

局部放电测试，特别是现场测试，将各种干扰抑制到很低的水平通常较困难。经验表明，在示波屏上所显示的波形，即使有各种干扰信号，只要不影响识别与判断，就不必花很大的精力将干扰信号全部抑制。

B.3 局部放电的基本图谱

局部放电的基本图谱见表 B.1，干扰的基本图谱见表 B.2。

表 B.1　局部放电的基本图谱

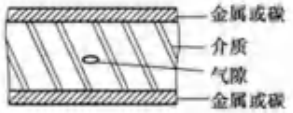
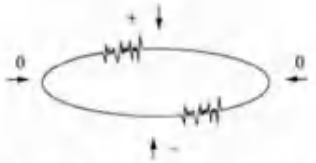
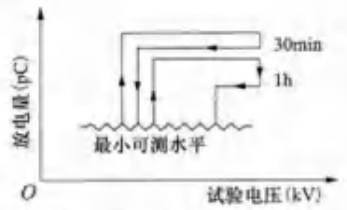
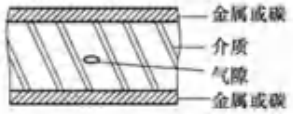
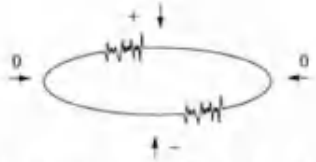
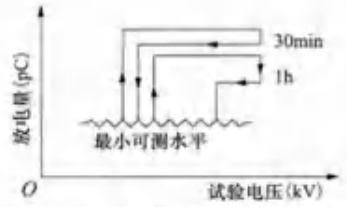
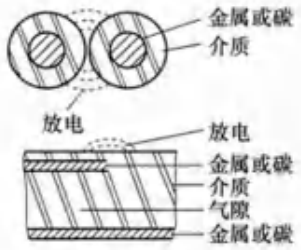
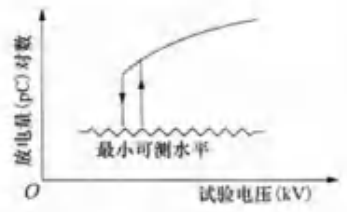
局部放电类型	局部放电图谱	局部放电特性
 绝缘结构中仅有一个与电场方向垂直的间隙	 放电脉冲叠加于正负峰之前的位置，对称的两边脉冲幅值及频率基本相等，但有时上下幅值的不对称度 3:1 仍属正常	 起始放电后，放电量增至某一水平时，随试验电压上升放电量保持不变。熄灭电压基本相等或者略低于起始电压
 绝缘结构中仅有一个与电场方向垂直的间隙	 放电脉冲叠加于正负峰之前的位置，对称的两边脉冲幅值及频率基本相等，但有时上下幅值的不对称度 3:1 仍属正常	 起始放电后，放电量增至某一水平时，熄灭电压基本相等或略低于起始电压，若试验电压上升至某一值并维持较长时间（30 min），熄灭电压将会高于起始电压，且放电量会下降；若试验电压维持达到 1 h，熄灭电压会更大于起始电压，并且高于第一次的值，放电量也进一步下降
 1）两绝缘体之间的气隙放电。 2）表面放电	 放电脉冲叠加于正负峰之前的位置，对称的两边脉冲幅值及频率基本相等，但有时上下幅值的不对称度 3:1 仍属正常。放电刚开始时，放电脉冲尚能分辨，随后电压上升，某些脉冲向试验电压的零位方向移动，同时会出现幅值较大的脉冲，脉冲分辨率逐渐下降，直至不能分辨	 起始放电后，放电量随电压上升而稳定增长；熄灭电压基本相等或者低于起始电压

表 B.1（续）

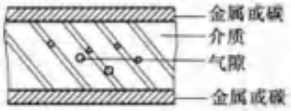
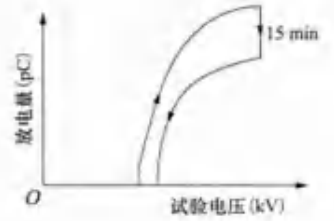
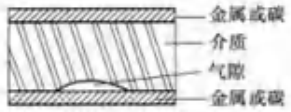
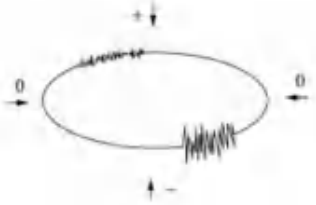
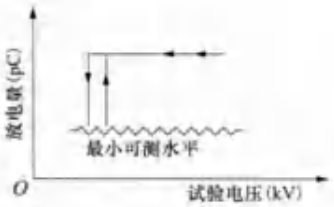
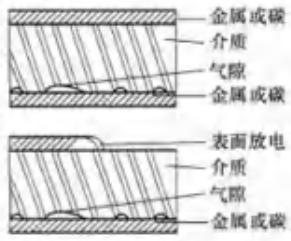
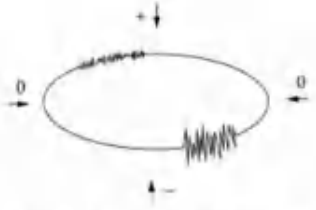
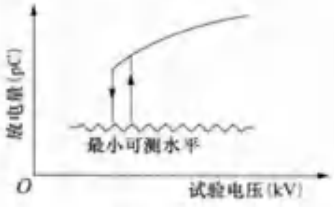
局部放电类型	局部放电图谱	局部放电特性
 绝缘结构内含有各种不同尺寸的气隙（多属浇注绝缘结构）	 放电脉冲叠加于正负峰之前的位置，对称的两边脉冲幅值及频率基本相等，但有时上下幅值的不对称度3:1仍属正常。放电刚开始时，放电脉冲尚能分辨，随后电压上升，某些脉冲向试验电压的零位方向移动，同时会出现幅值较大的脉冲，脉冲分辨率逐渐下降，直至不能分辨	 若试验电压上升或下降速率较快，起始放电后，放电量随试验电压上升而稳定增长，熄灭电压基本相等或略低于起始放电电压，如在某高电压下维持一定时间（15 min），放电量会逐渐下降，熄灭电压会略高于起始电压（因浇注绝缘局部放电会导致气隙内壁四周产生导电物质）
 绝缘结构仅含有一个气隙，位于电极的表面与介质内部气隙的放电响应不同	 放电脉冲叠加于正负峰之前的位置，两边幅值不尽对称，幅值大的频率低，幅值小的频率高。幅值比通常大于3:1，有的高达10:1。总的放电响应能分辨出	 放电一旦开始，放电量基本不变，与电压上升无关。熄灭电压等于或略低于起始电压
 1）一簇不同尺寸的气隙，位于电极的表面，但属封闭型。 2）电极与绝缘介质的表面放电，气隙是不封闭的	 放电脉冲叠加于电压的正及负峰值之前，幅值比通常为3:1，有的高达10:1；随电压上升，部分脉冲向零位方向移动，放电起始后，脉冲分辨尚可，继续升压，分辨率下降，直至不能分辨	 放电一旦开始，放电量随电压上升逐渐增大，熄灭电压等于或略低于起始电压。如电压持续时间在10 min以上，放电响应会有些变化

表 B.2　干扰基本图谱说明

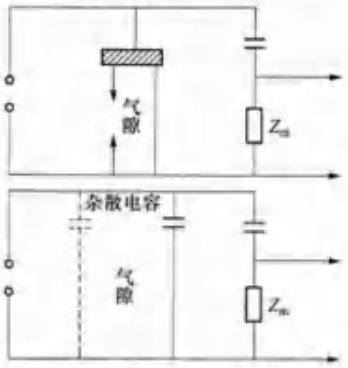
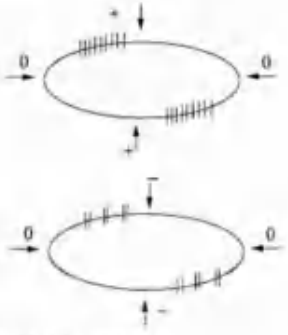
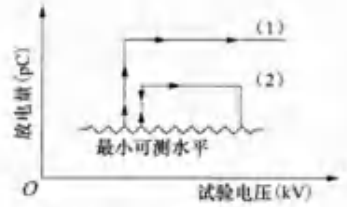
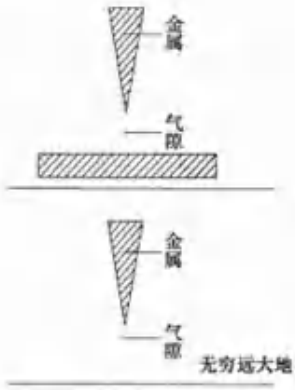
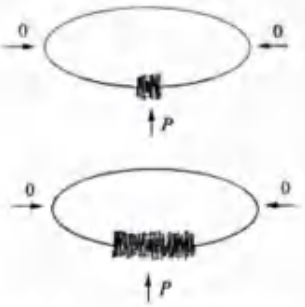
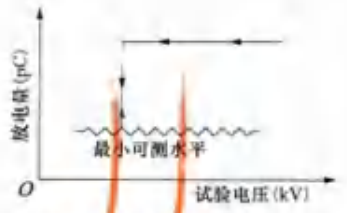
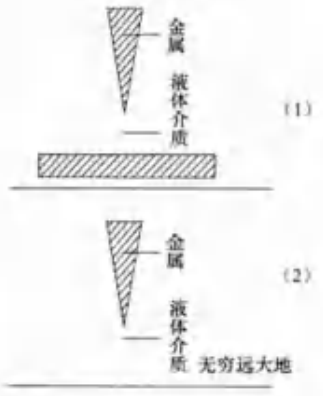
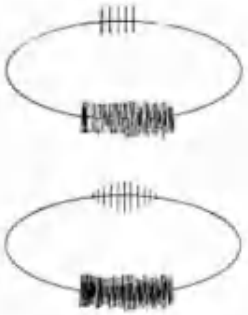
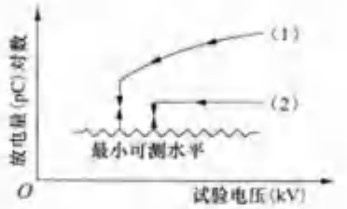
干扰类型	干扰图谱	干扰特性
 悬浮电位放电： 在电场中两悬浮金属物体间，或金属物与大地间产生放电	 波形有两种情况： 1）正负两边脉冲等幅、等间隔及频率相同。 2）两边脉冲或成对出现，对于对间隔相同，有时会在基线往复移动	 起始放电后有三种类型： 1）放电量保持不变，与电压有关，熄灭电压与起始电压完全相等。 2）电压继续上升，在某一电压下放电突然消失，电压继续上升后再下降，会在前一消失电压下再次出现放电。 3）随电压上升，放电量逐渐减小，放电脉冲随之增加
 针尖对平板或大地的气体介质	 较低电压下产生电晕放电，放电脉冲总叠加于电压峰值的位置，如位于负峰值处，放电源处于高电位；如位于正峰处，放电源处于地电位。这可帮助判断电压的零位	 起始放电后电压上升，放电量保持不变，唯脉冲密度向两边扩散、放电频率增加，但尚能分辨；电压再升高，放电脉冲频率增至逐渐不可分辨
 针尖对平板或大地的液体介质	 较低电压下产生电晕放电，放电脉冲总叠加于电压峰值的位置，如位于负峰值处，放电源处于高电位；如位于正峰处，放电源处于地电位。这可帮助判断电压的零位。 一对脉冲对称出现在电压正或负峰处，每一簇的放电脉冲时间间隔均各自相等。但两簇的幅值及时间间隔不等，幅值较小的一簇幅值相等、较密	 一簇较大的脉冲起始电压较低，放电量随电压上升增加；一簇较小的脉冲起始电压较高，放电量与电压无关，保持不变；电压上升，脉冲频率密度增加，但尚能分辨；电压再次升高，逐渐变得不可分辨

表 B.2（续）

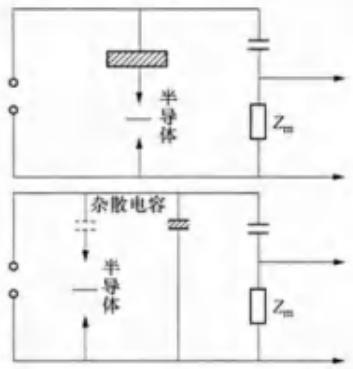
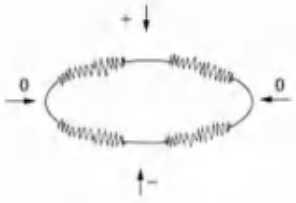
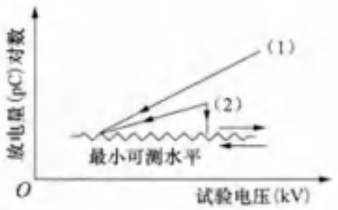
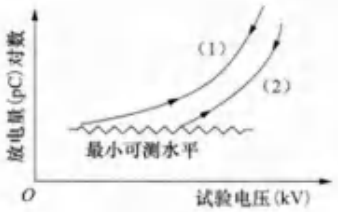
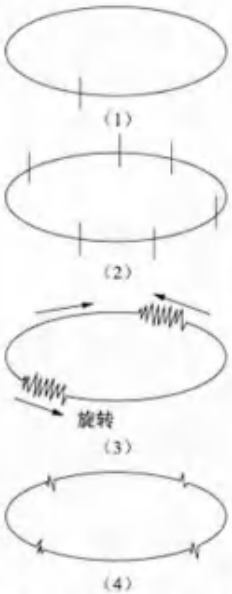
干扰类型	干扰图谱	干扰特性
 试品内部、实验回路中导电部分的接触不良	 两簇脉冲位于实验电源零位的不规则的干扰脉冲，基本等幅，与电压成比例	 放电量与电压成比例，有时接触处完全导通时会使干扰自动消除
回路中设备的铁芯磁饱和和产生的干扰。其原因是：磁密过高，与回路的电容发生谐振，检测仪频带在低限下频率的不稳定性	 带有低频振荡的脉冲出现于时间基线上，振荡周期大于检测仪的分辨率	 干扰脉冲幅值随电压上升，电压回零，脉冲即消失，与电压持续时间无关
随机干扰： 1）单个晶闸管干扰脉冲。 2）6 极水银整流器干扰。 3）旋转电机干扰。 4）荧光灯产生的干扰	 波形的位置上可以完全不规则或者间断，一个电压周波可出现 1、2、3、4、6、12 个彼此间隔相等的单独脉冲	试验电压与仪器电源的周波不是很同步，干扰脉冲会在椭圆基线作定向等速移动，放电量与电压无关，电压降为零时，脉冲依然存在。受电源切断、短路、叠加负荷影响，具有严格的时间对应关系，但不规则

表 B.2（续）

干扰类型	干扰图谱	干扰特性
调制或非调制干扰： 1）与无线电波的调制。 2）调幅高频。 3）与检测频段相近的超声波干扰	 通常来源于高频设备，如感应加热器、超声波发生器等	放电量与电压无关，电压降为零时，脉冲依然存在。受电源切断、短路、叠加负荷影响，具有严格的时间对应关系，但不规则

附 录 C
（资料性附录）
数字式局部放电仪的放电图谱识别方法

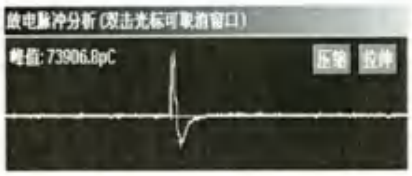
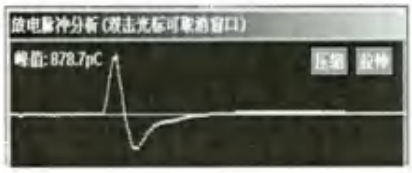
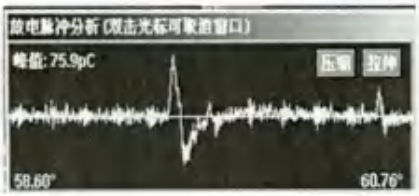
C.1 基于单脉冲特征参数的局部放电类型识别

C.1.1 不同缺陷的典型放电波形及频谱

典型缺陷激发的局部放电脉冲电流的时域波形及频谱分布见表 C.1。

表 C.1 中可见不同的典型缺陷，激发局部放电脉冲电流波形的上升沿和持续时间有很大差异，相应的其频谱分布也有明显区别，因此可基于局部放电单脉冲的时域波形特征和频谱分布特征提出局部放电识别方法。

表 C.1 不同缺陷的典型放电波形及频谱

典型缺陷	时域波形	频谱分布
绝缘气隙		
金属尖端		
悬浮放电		
沿面放电		

C.1.2 基于单放电脉冲时宽与频宽的识别方法

假设单放电脉冲时域信号为 $x(t)$，则其为能量信号，能量 E 为：

$$E = \|x(t)\|^2 = \int |x(t)|^2 \, \mathrm{d}t = \frac{1}{2\pi}\int |X(\mathrm{j}\Omega)|^2 \, \mathrm{d}\Omega \quad \cdots\cdots (C.1)$$

时间均值 t_0 和频谱中心 Ω_0 分别为：

$$t_0 = \frac{1}{E}\int_{-\infty}^{\infty} t|x(t)|^2 \mathrm{d}t$$

$$\Omega_0 = \frac{1}{E}\Omega|x(\Omega)|^2 \mathrm{d}\Omega \quad \text{（C.2）}$$

时宽 T 与频宽 B 分别为：

$$\Delta_t^2 = \frac{4\pi}{E}\int_{-\infty}^{\infty}(t-t_0)|x(t)|^2 \mathrm{d}t$$

$$\Delta_\Omega^2 = \frac{4\pi}{E}\int_{-\infty}^{\infty}(\Omega-\Omega_0)|x(\Omega)|^2 \mathrm{d}\Omega \quad \text{（C.3）}$$

$$T = 2\Delta_t$$

$$B = 2\Delta_\Omega$$

单放电脉冲的时宽和频宽可作为局部放电脉冲识别的两特征参数。图 C.1 为 5 种不同的局部放电通过 *T-B* 方法的识别结果。

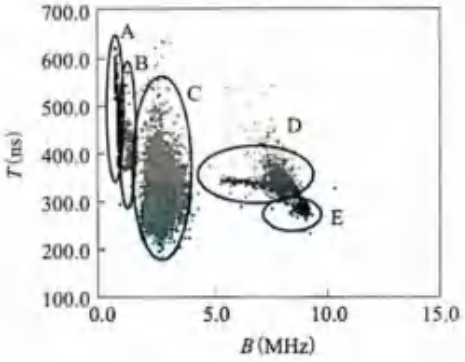


图 C.1　电脉冲时宽与频宽的局部放电识别

C.1.3　基于单放电脉冲时域小波熵的识别方法

由于不同缺陷的局部放电时域波形上升沿和持续时间差异明显，可采用时域信号时频处理的方法进行局部放电类型识别。

根据单放电脉冲的时域波形，进行多尺度的小波分解。以小波分解的结果，求取各种典型局部放电在各频段的能量熵，以此来描述各种典型局部放电的频谱分布特征。以单放电脉冲时域小波熵分布向量作为局部放电识别特征参数，对各种典型缺陷进行模式识别。

C.2　基于多脉冲统计特征参数的局部放电类型识别

C.2.1　典型缺陷的局部放电单周波形，二维图谱以及三维图谱

典型缺陷的局部放电单周波形，二维图谱以及三维图谱见表 C.2。

表 C.2　二维图谱以及三维图谱

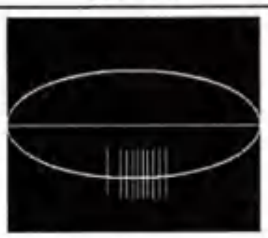
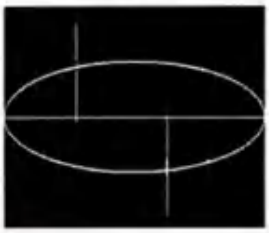
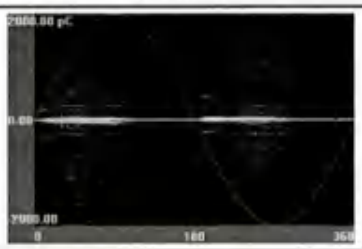
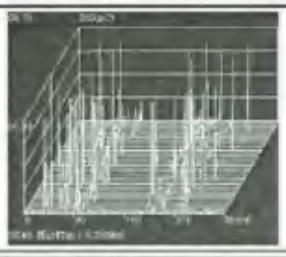
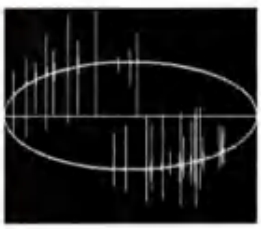
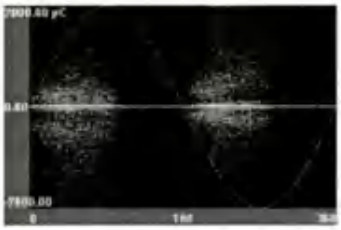
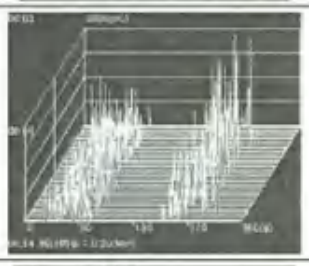
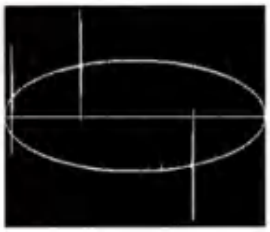
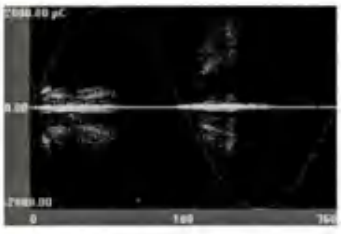
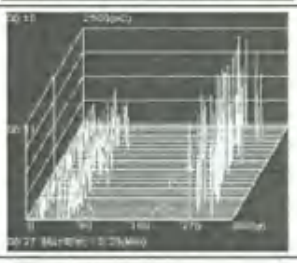
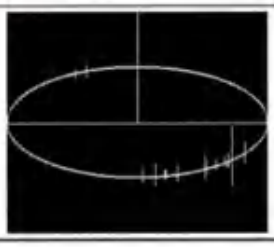
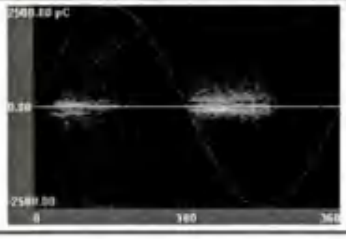
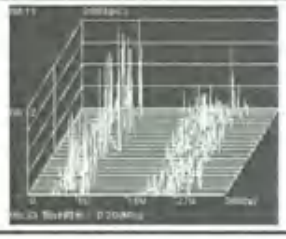
放电类型	波形图谱	指纹图谱	*q-φ-t* 图
电晕放电			

表 C.2（续）

放电类型	波形图谱	指纹图谱	q-φ-t 图
板→尖			
悬浮放电			
板→板			
尖→板			

C.2.2 局部放电常用图谱分析方法

C.2.2.1 概述

局部放电的基本参数具有较强的统计分散性，放电脉冲相位分析是将多周期检测所得局部放电参数折算到一个周期内，以突出它们的统计规律性。常用的分析方法有二维谱图、φ-q-n 谱图、φ-q 灰度图、φ-q 散点图。

C.2.2.2 二维谱图

其中应用比较广泛的是φ–q 谱图（反映平均放电量随相位的分布）和φ–n 谱图（反映放电重复率随相位的分布）。将一个工频周期（360°）等分为若干个相窗，则相窗φ_j内的平均放电量为

$$q_j = \sum_{s=1}^{M}\sum_{i=1}^{n_{js}} q_{jsi} \Big/ \sum_{s=1}^{M} n_{js} \qquad \text{（C.4）}$$

相窗φ_j内的放电重复率为

$$n_j = \sum_{s=1}^{M} n_{js} \cdot \frac{50}{M} \qquad \text{（C.5）}$$

公式（C.4）和公式（C.5）中 M 为检测的周期总数，n_{js} 为第 s 个周期在相窗φ_j 内的放电次数，q_{jsi}

为第 s 个周期在相窗 φ_j 内第 i 次放电的视在放电量。将 n、q 视为 φ 的函数，可以作出 φ–q、φ–n 谱图。

可以直接利用谱图作为特征向量，也可从中提取各种参数。如根据 ASTM D1868 规定提取的参数有：最小放电量 Q_{min}、最大放电量 Q_{max}、平均每工频周期的放电次数、平均每工频周期的放电量、平均每个脉冲的放电量。还可以将谱图看作概率密度分布图形，以 φ 代表随机变量，而 q 或 n 则对应于概率密度，再应用正态分布统计特征量的计算方法，求出两类特征量：一类描述子谱图的轮廓形状特征，包括偏斜度、陡峭度、局部峰点数；另一类描述 φ–q 谱图正负半周子谱图的差异，包括互相关系数、放电量因数、修正的互相关系数。

C.2.2.3 φ–q–n 谱图

放电的 φ–q–n 谱图可以看成是 φ–q 谱图和 φ–n 谱图的合成，它反映了单位时间内，发生在一定相窗内具有一定放电量的放电脉冲的数目。它比较全面地反映了局部放电脉冲的统计特性，是最常见的放电模式描述方式。放电重复率可视为放电量和发生相位的函数，将 φ–q 平面划分为 $N\varphi \times Nq$ 个小格，某个小格的中心为（φ_i，q_j），统计在该小格中的单位实际的脉冲个数即得出放电重复率。

$$n(\varphi_i,q_j)=\frac{\sum_{k=1}^{M}n_k(\varphi_i,q_j)}{M}\times 50 \qquad \text{（C.6）}$$

公式（C.6）中 $n(\varphi_i, q_j)$ 是在以 (φ_i, q_j) 为中心的小格中的放电重复率，简记为 n_{ij}；M 为对局部放电信号进行检测的工频周期数；$n_k(\varphi_i, q_j)$ 是第 k 个周期内在小格内的放电脉冲个数，k=1，2，…，M。

C.2.2.4 φ–q 灰度图

它是把 φ–q–n 谱图向 φ–q 平面投影，并将 n 值的大小转化为灰度值（n 值越大，灰度越深）而得到的，是 φ–q–n 谱图的平面化描述。可用分形压缩算法处理 φ–q 灰度图像，同时完成图像压缩和特征提取，将压缩参数作为神经网络的输入，获得了满意的局部放电模式分类。

C.2.2.5 φ–q 散点图

将由局部放电检测装置获得的基本参数序列 (φ_i, q_i) 画在二维 φ–q 坐标系内，就得到了二维散点图，如图 C.2 所示。散点图不能用简单的函数关系表示。由于散点图中的数据未经过任何统计处理，故能充分反映放电的分散性。图 C.2 中各点的分布看似杂乱无章，故很少用它来描述放电模式，但由于其隐含的一定的规律性，适合从中提取分形特征。

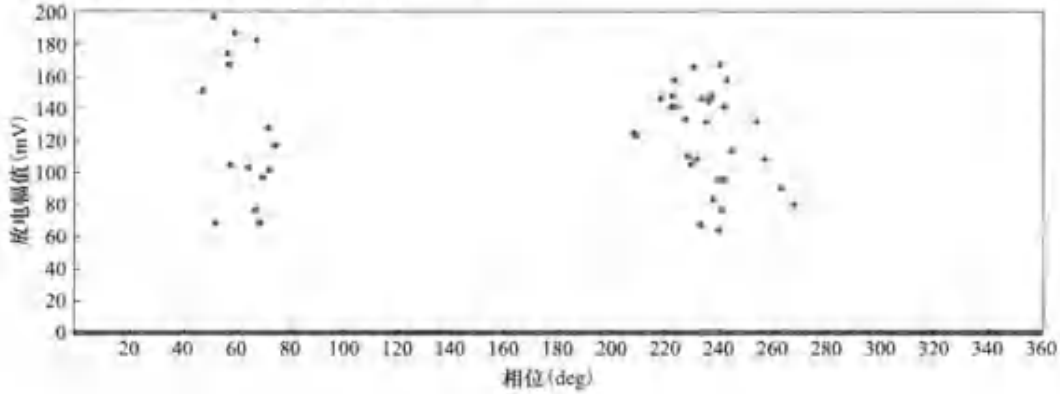
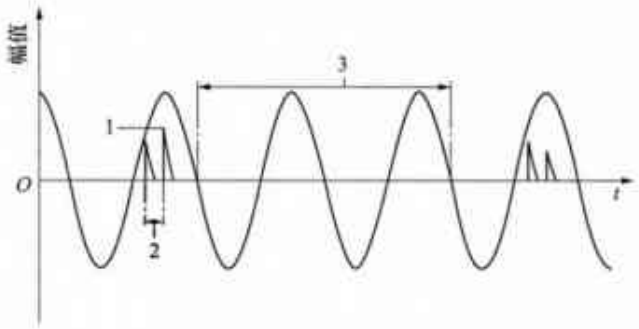


图 C.2 φ–q 散点图

C.2.3 基于多脉冲特征统计参数的局部放电识别方法

通过局部放电的幅值，时间间隔（Δt）和放电间歇（ΔT）提取有关的特征参数，如图 C.3 所示。图中放电间歇（ΔT）为 2 工频周期。为了分析每个半波的放电特征，在数据处理之前将整个周期划分

为 2 个半周期，即前周期和后周期（$q_{f,j}$，$q_{b,j}$，$j=1$，2，…，25 000）。先后周期的放电幅值构成放电复制序列 $p'_{f,k}$ 和 $p'_{b,k}$，并根据公式（C.7）进行归一化处理。时间间隔构成序列 $\Delta t_{f,j}$ 和 $\Delta t_{b,j}$，样本中的所有放电间歇 ΔT 构成序列 ΔT_w。将工频周期平均划分为 20 个区间，如果该区间内出现过 3 次以上放电，则将该区间视为放电区间。



标引序号说明：

1 ——放电脉冲幅值；

2 ——两连续放电间的时间间隔；

3 ——放电间隙。

图 C.3　基本参数示意图

$$p_k=\frac{1000(p'_k-p'_{\min})}{p'_{\max}-p'_{\min}}(0\leqslant p_k\leqslant 1000) \quad \cdots\cdots (C.7)$$

首先计算基本参数，放电总数：$N_{f,\mathrm{mag}}$、$N_{b,\mathrm{mag}}$，时间间隔总数：$N_{f,\mathrm{int}}$、$N_{b,\mathrm{int}}$，放电区间总数：$N_{f,\mathrm{reg}}$、$N_{b,\mathrm{reg}}$。

两半波的幅值均值：

$$E_{f,\mathrm{mag}}=\frac{\sum_k p_{f,k}}{N_{f,\mathrm{mag}}}$$
$$E_{b,\mathrm{mag}}=\frac{\sum_k p_{b,k}}{N_{b,\mathrm{mag}}} \quad \cdots\cdots (C.8)$$

两半波的幅值标准差：

$$S_{f,\mathrm{mag}}=\sqrt{\frac{\sum_k\left(\frac{p_{f,k}}{E_{f,\mathrm{mag}}}-1\right)^2}{N_{f,\mathrm{mag}}}}$$
$$S_{b,\mathrm{mag}}=\sqrt{\frac{\sum_k\left(\frac{p_{b,k}}{E_{b,\mathrm{mag}}}-1\right)^2}{N_{b,\mathrm{mag}}}} \quad \cdots\cdots (C.9)$$

两半波的时间间隔均值：

$$E_{f,\mathrm{int}}=\frac{\sum_j \Delta t_{f,j}}{N_{f,\mathrm{int}}}$$
$$E_{b,\mathrm{int}}=\frac{\sum_j \Delta t_{b,j}}{N_{b,\mathrm{int}}} \quad \cdots\cdots (C.10)$$

两半波的时间间隔标准差：

$$S_{\mathrm{f,int}}=\sqrt{\frac{\sum_{l}\sqrt{\left(\frac{\Delta t_{\mathrm{f},l}}{E_{\mathrm{f,int}}}-1\right)}}{N_{\mathrm{f,int}}}} \quad \cdots\cdots (C.11)$$

$$S_{\mathrm{b,int}}=\sqrt{\frac{\sum_{l}\sqrt{\left(\frac{\Delta t_{\mathrm{b},l}}{E_{\mathrm{b,int}}}-1\right)}}{N_{\mathrm{b,int}}}}$$

接着，从这些基础参数中按下列等式计算得到其他几个参数。

$$E_{\mathrm{mag}}=\max(E_{\mathrm{f,mag}},E_{\mathrm{b,mag}}) \quad \cdots\cdots (C.12)$$

$$N_{\mathrm{mag}}=N_{\mathrm{f,mag}}+N_{\mathrm{b,mag}} \quad \cdots\cdots (C.13)$$

$$S_{\mathrm{mag}}=\max(S_{\mathrm{f,mag}},S_{\mathrm{b,mag}}) \quad \cdots\cdots (C.14)$$

$$E_{\mathrm{int}}=\max(E_{\mathrm{f,int}},E_{\mathrm{b,int}}) \quad \cdots\cdots (C.15)$$

$$N_{\mathrm{int}}=N_{\mathrm{f,int}}+N_{\mathrm{b,int}} \quad \cdots\cdots (C.16)$$

$$S_{\mathrm{int}}=\max(S_{\mathrm{f,int}},S_{\mathrm{b,int}}) \quad \cdots\cdots (C.17)$$

$$N_{\mathrm{reg}}=N_{\mathrm{f,reg}}+N_{\mathrm{b,reg}} \quad \cdots\cdots (C.18)$$

$$\Delta T_{\mathrm{mean}}=\frac{\sum_{w}\Delta T_{w}}{N_{\Delta T_{w}}} \quad \cdots\cdots (C.19)$$

$$P=\frac{\min(N_{\mathrm{f,mag}},N_{\mathrm{b,mag}})}{\max(N_{\mathrm{f,mag}},N_{\mathrm{b,mag}})} \quad \cdots\cdots (C.20)$$

参数 E_{mag}、S_{mag} 和 N_{mag} 描述局部放电的幅值特征，E_{int}、S_{int} 和 N_{int} 描述局部放电的时间间隔特征。ΔT_{mean} 描述放电的间歇特征，P 表示放电的极性特征，N_{reg} 表示放电的分布区域。通过处理局部放电数据得到这 9 个参数，并用来区分这 5 种缺陷类型。

根据以上分析提取的特征统计参数，采用用 K 值聚类法处理局部放电数据得到的 4 种缺陷类型的聚类结果图 C.4 所示。

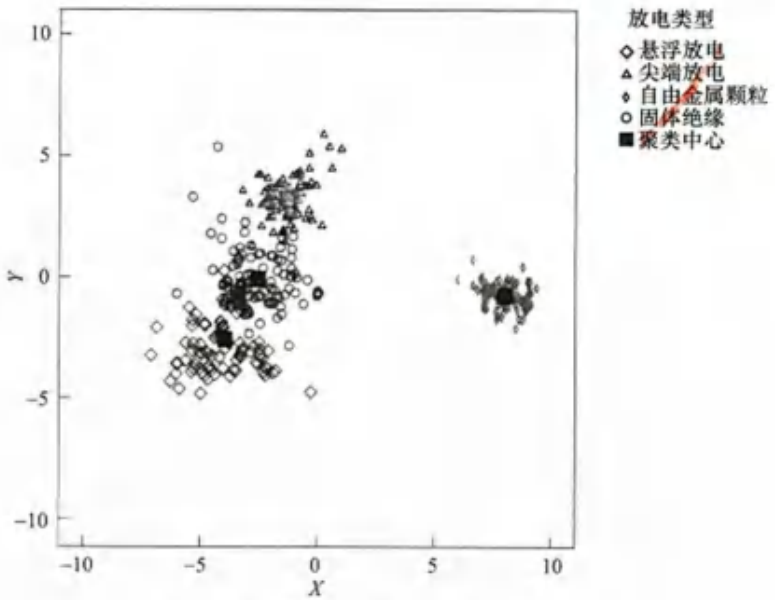
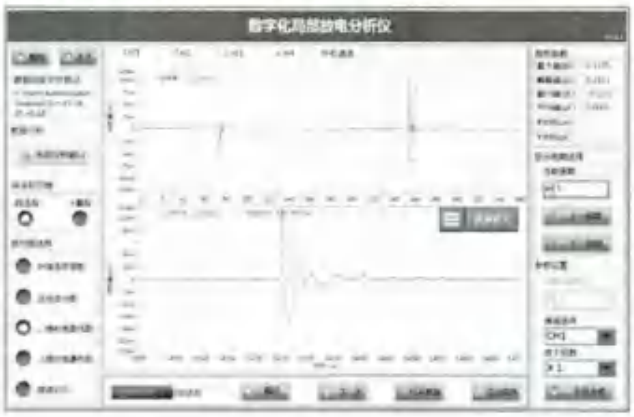


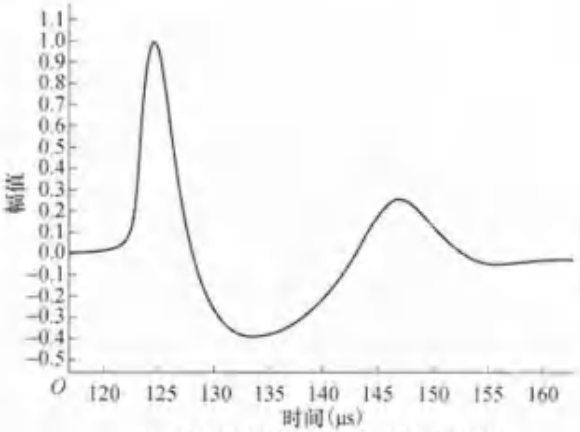
图 C.4　9 个参数聚类结果的分布图

C.3 数字式局部放电仪的放电图谱识别实例

通过数字信号实时测量，就可获得高压设备绝缘中放电信号的实际波形，从而能如实地观察到设备内部放电波形的细微差别及分析其各自的幅频特性，并能通过相应单脉冲局部放电波形的上升沿、持续时间和主要能量成分波段等关系，可靠地判断高压设备是否存在局部放电及其放电属性。数字式局部放电仪测取的波形见图 C.5～图 C.8。



a）惰性气体氖气放电的实测典型波形

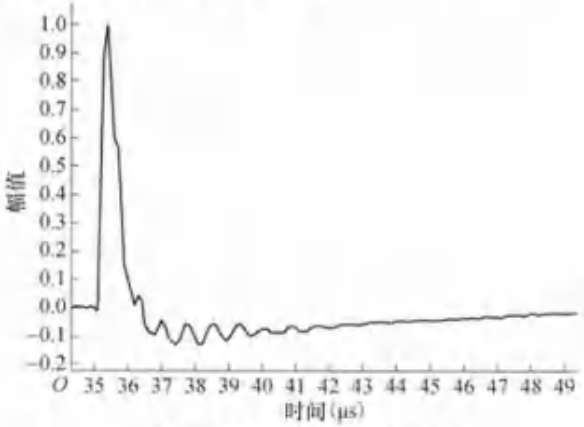


b）惰性气体氖气放电单脉冲波形

图 C.5 惰性气体氖气放电实测典型波形与单脉冲波形

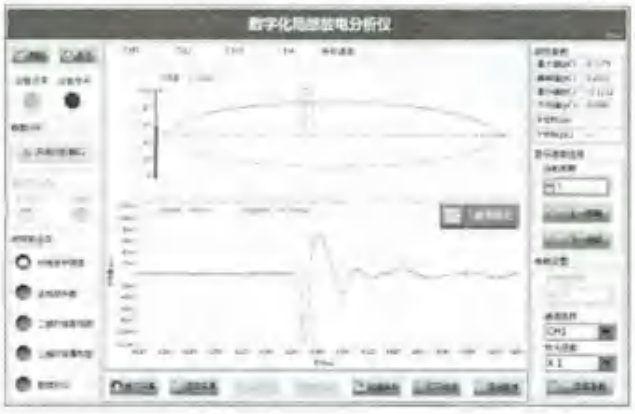


a）环氧介质放电的实测典型波形

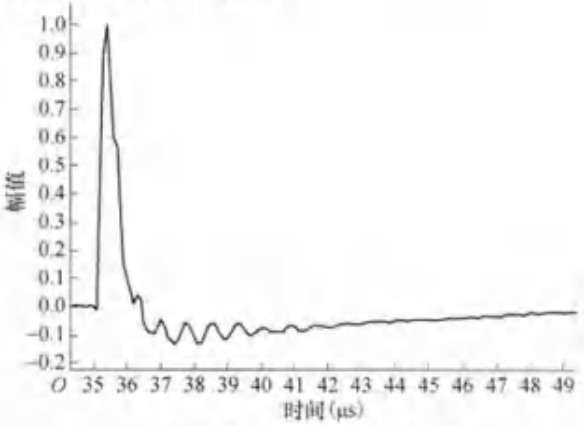


b）环氧介质放电单脉冲波形

图 C.6 环氧介质放电实测典型波形与单脉冲波形

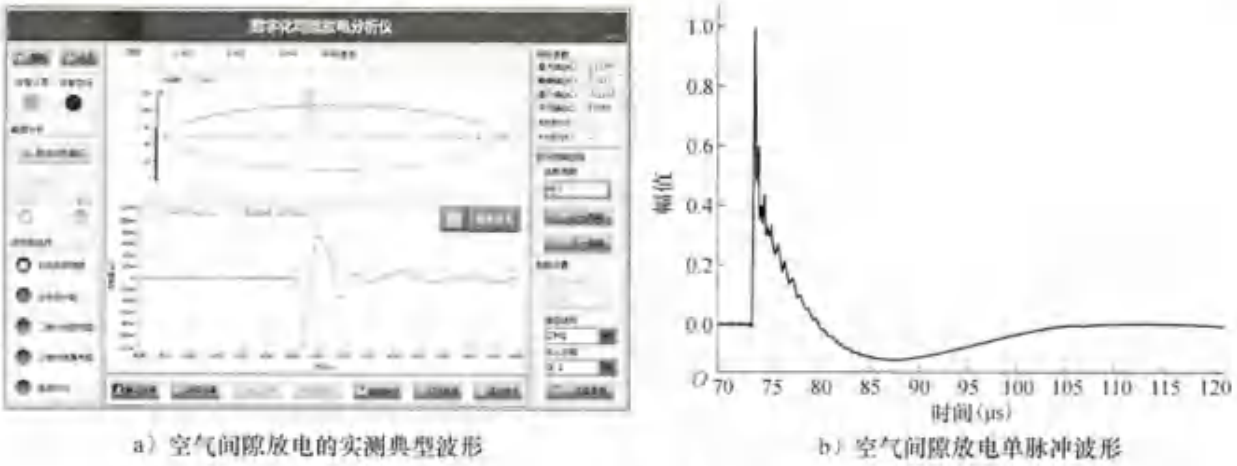


a）绝缘油隙放电的实测典型波形



b）绝缘油隙放电单脉冲波形

图 C.7 绝缘油隙放电实测典型波形与单脉冲波形



a）空气间隙放电的实测典型波形　　b）空气间隙放电单脉冲波形

图 C.8　空气间隙放电实测典型波形与单脉冲波形

从图 C.5～图 C.8 中可以获得用于模式识别的时域特征，如上升沿、持续时间等，就图中显示来说，各种放电波形其各个时域特点有：惰性气体局部放电单脉冲波形上升沿时间范围在 2 μs～3 μs，其持续时间在 34 μs，放电过程伴有振荡，其振荡时间较长，一个工频周期内，正、负极性主脉冲各出现一次；环氧介质局部放电单脉冲波形上升沿时间集中在 170 ns～260 ns 区间段，其持续时间在 19 μs～23 μs 范围内，环氧介质局部放电波形波尾伴有振荡过程；油隙局部放电上升沿时间属于纳秒级，集中在 1.9 ns～2.9 ns 区间段，持续时间在 40 μs～48 μs 范围内，在整个工频周期内，放电次数较多；空气间隙局部放电单脉冲波形上升沿时间属于纳秒级，集中在 0.11 μs～0.17 μs 区间段，持续时间在 20 μs～30 μs 范围内，单脉冲波尾具有明显的拖尾特征。图 C.9～图 C.12 所示为波形频域分析图，其中，图 C.9 为惰性气体氖气放电的频域分析，图 C.10 为环氧介质放电的频域分析，图 C.11 为绝缘油隙放电的频域分析，图 C.12 为空气间隙放电的频域分析。通过波形频域分析可以得到用于模式识别的频域特征，如主要能量成分波段等。就图中显示来说，各种放电波形其各个频域特点有：惰性气体放电主要能量成分频率为 1667 Hz 左右，放电具有极性，有较大直流分量成分；环氧介质放电主要能量成分频率约为 250 000 Hz，放电具有极性，有较大直流分量成分；绝缘油隙放电主要能量成分频率约为 1.67×10^{8} Hz，放电极性不严重，基本没有直流分量成分；空气间隙放电主要能量成分频率约为 390 000 Hz，放电具有极性，有较大直流分量成分。

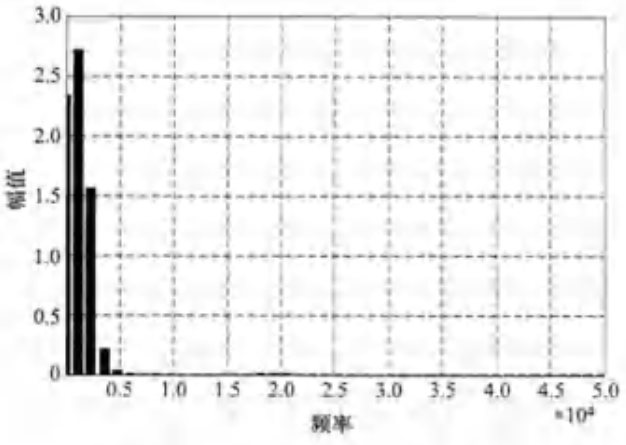


图 C.9　惰性气体氖气放电的频域分析

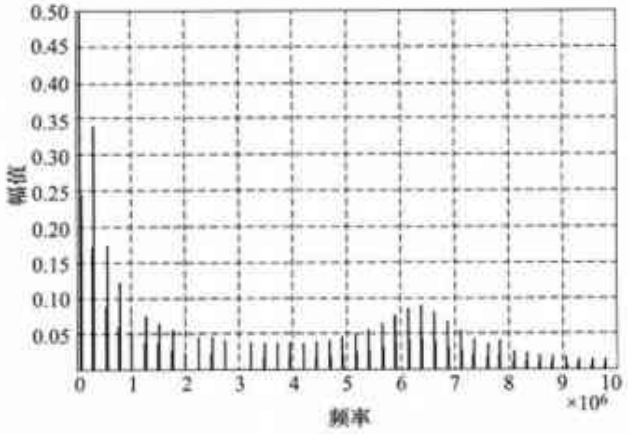


图 C.10　环氧介质放电的频域分析

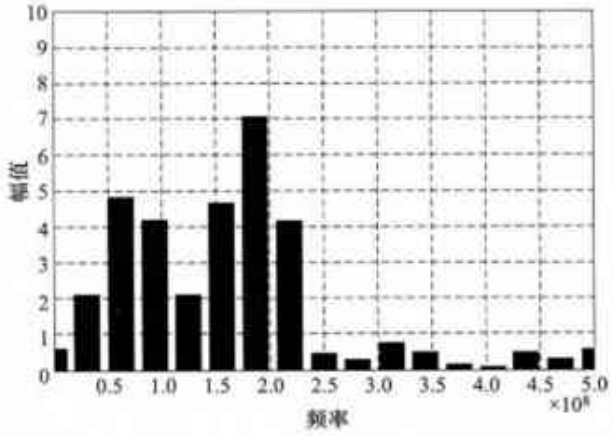


图 C.11　绝缘油隙放电的频域分析

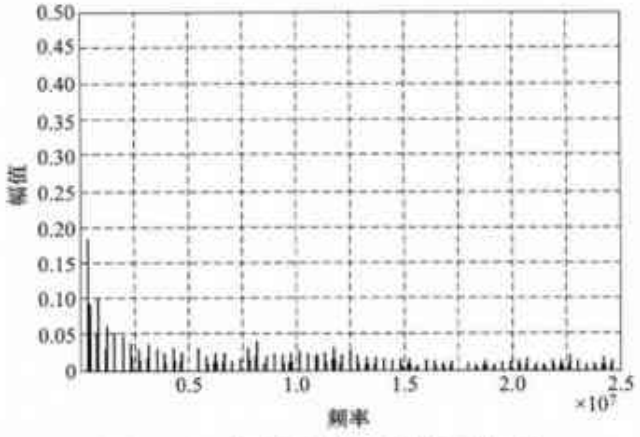


图 C.12　空气间隙放电的频域分析

DL/T 417—2019

代替 DL/T 417—2006

中 华 人 民 共 和 国

电 力 行 业 标 准

电力设备局部放电现场测量导则

DL/T 417—2019

代替 DL/T 417—2006

•

中国电力出版社出版、印刷、发行

（北京市东城区北京站西街 19 号　100005　http://www.cepp.sgcc.com.cn）

•

2021 年 11 月第一版　　2021 年 11 月北京第一次印刷

880 毫米×1230 毫米　16 开本　2.5 印张　78 千字

•

统一书号 155198・3147　定价 **38.00** 元

版 权 专 有　侵 权 必 究

本书如有印装质量问题，我社营销中心负责退换

155198.3147