

ZL5111 小型高压一体机

使 用 手 册

武汉智能星电气有限公司

敬告用户：

欢迎您使用本公司生产的一体化高压信号发生器。

本产品属高电压设备，在详读使用说明书之前，请勿使用本仪器，以免发生人身危险。

接通电源前，请认真检查放电棒是否接好备用。

换线或拆线前请关断电源并使用放电棒使电缆充分放电。

本公司不断对其产品进行改进完善，提供的仪器个别地方可能与本手册的说明有所不同，尚乞敬谅。



目 录

一、概述	4
二、技术参数:	4
三、高压面板功能:	5
四、测试主机面板功能:	6
五、测试主机液晶屏菜单功能:	7
六、高压使用说明	9
七、测试主机使用说明	10
八、仪器使用注意事项	13
九、实测波形	14
十、电缆故障的性质与分类	16
十一、电缆故障的测试程序	17
十二、低压脉冲测量法	18
十三、高压闪络测量法	20
十四、各种标准波形	24

ZL5111 小型高压一体机

一、概述

一体化高压信号发生器主要用于 35KV 及以下等级的电力电缆高阻和闪络性高阻故障的测试，配合自带电缆故障测试仪可方便的进行闪络测试。配合定点仪可准确的测定故障点位置。

本仪器自动化程度高，具有过流自动保护的功能，使用大屏幕彩色液晶，显示直观明了。设备功能齐全、使用安全、接线简单、操作简便。

二、技术参数：

1、高压设备参数

电压输出	0-32KV 连续可调
内置电容	2 μ F/35KV
额定容量	3 KVA
最大冲击能量	1024J
工作模式	高压直流
连续脉冲周期	3S-7S
显示器	4.3 寸彩色液晶
输入电压	220V $\pm$ 10% 50Hz

2、主机设备参数

测试方法	低压脉冲、高压闪络、速度测量
冲击高压	低于 35KV 电力电缆。
数据采集速率	80MHz、40 MHz、20MHz、10 MHz。
测试距离	>30Km。
读数分辨率	1m。
系统测试精度	小于 50cm。
测试脉宽	“0.05”、“0.1”、“0.2”、“0.5”、“1”、“2”、“8” 微秒。
显示器	8 寸触摸彩色液晶
内置电源	充满电后仪器可连续工作 3 小时以上

3、整机参数

工作条件	温度-10℃ $\sim$ +45℃，相对湿度 90%。
------	------------------------------

体积	500 mm×340 mm×340 mm
重量	20kg

三、高压面板功能：

- 1、工作电源插座：标准的三芯插座。
- 2、空开：用于接通和断开仪器工作电源，同时过流保护。
- 3、降压/升压旋钮：

升压方式：旋转电压调节旋钮使压位，电压预置栏中的电压值将进逐渐增大。松开电压调节旋钮电源进入升压工作状态，对外接升压到预置值。

降压方式：旋转电压调节旋钮使压位，电压预置栏中的电压值将进减小。松开电压调节旋钮使其进入降压工作状态，如果内置电压预置值高。使用放电棒对电容预置值。



其一直在升以 0.5KV 步使其归位，电容充电并

其一直在降以 0.5KV 步归位，电源容电压比电容放电到电压

图一 高压面板图

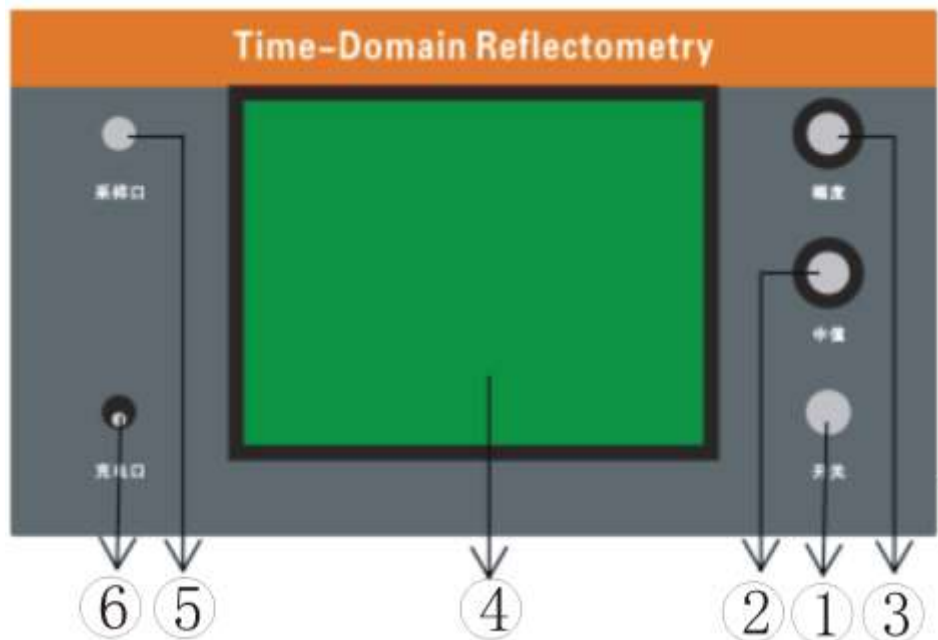
- 4、停止/启动键：

启动：旋转启停控制钮至“启动”位，此时液晶屏工作状态栏中的电压预置值呈高亮色，电源进入预备工作状态；

停止：旋转启停控制钮至“停止”位，此时液晶屏工作状态栏中的电压预置值呈灰色，电源不能进行升压或降压。液晶屏上的电压表仍能正常显示内部电容电压值。

- 5、闪络采样口：专供闪络采样时用，通过采样线将电缆故障测试仪和本机连接。
- 6、液晶：能够显示当前设定的参考电压、充电电压、低压侧充电电流、放电指示。
- 7、工作接地：此接地是高压的工作地，高压放电棒接入此工作地，此工作地要求直接接到可靠的接地极上。通常相-地(铠)故障时，应将电缆外铠接到此接地极上；相-相故障时，将其中一个故障相接到此接地极上。可使用组合接地线多点接地、重复接地以保证可靠。
- 8、高压输出：此输出口是直接输出负直流高压，用于外接球间隙放电、直流试验和高阻故障烧穿。

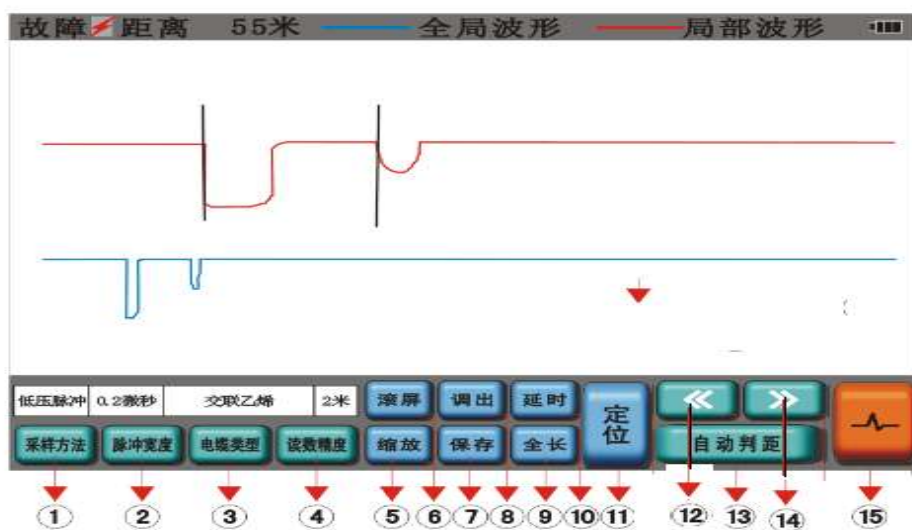
四、测试主机面板功能：



图二 测试主机面板图

- 1、测试主机开关。
- 2、中值调节电位器：采样时调节此旋钮，可以改变测试波形在屏幕上的垂直位置（此项功能只对重新采样后的波形起作用）。
- 3、幅度调节电位器：采样时调节此旋钮，可以改变测试波形在屏幕上的幅度（此项功能只对重新采样后的波形起作用）。
- 4、液晶显示区域。
- 5、主机采样接口。
- 6、主机充电接口。

五、测试主机液晶屏菜单功能：



图三 液晶屏菜单显示示意图

◇ 采样方法①

按采样方法键，弹出子菜单。子菜单中包括 3 个选项为低压脉冲/闪络方法/速度测量，仪器默认选中低压脉冲，根据测量需要，可选择相应的采样方法。再按“采样方法键”退出此项功能。

◇ 脉冲宽度②

此菜单在高压闪络测试法中无效。按脉冲宽度键，弹出脉冲宽度选择子菜单。可根据测试距离选择合适的脉冲宽度按对应的子菜单键，可以对脉冲宽度进行选择。脉冲宽度大小为 50 纳秒、100 纳秒、200 纳秒、1 微秒、2 微秒、5 微妙、8 微秒共 7 个档位。当选中 50 纳秒脉宽时，电脑自动锁定读数精度为 1 米；当选中 8 微秒时，电脑自动锁定读数精度为 8 米；选择其他脉宽时，可以按读数精度键任意调节，仪器初始值为 200 纳秒。再按“脉冲宽度键”退出此项功能。

◇ 电缆类型③

不同介质的电缆中电波传播速度不同，因此在测试故障之前必须选定介质类型，以确定电波传播速度。按电缆类型键，屏幕出现电缆类型选择对话框，有油浸纸型、不滴油型、交联乙烯、聚氯乙烯和未知类型 5 个选项，仪器初始值为油浸纸型，可根据需要按对应的电缆类型键。若被测电缆不属于四种已知类型，则应按“未知类型键”，弹出对话框，调整波速数值，达到选定值后按“OK”键。再按“电缆类型键”退出此项功能。波形速度最大 300m/us

◇ 读数精度④

根据测量需要选取合适的档位。共分为 8 米/4 米/2 米/1 米的测量精度，仪器初始值为 2 米。再按“读数精度”退出此项功能。

◇ 波形缩放⑤

由于波形数据量很大，每次采样后屏幕上显示的是局部的波形。为了观察波形细节，必须将波形缩放。按“波形缩放键”进入缩放功能，仪器提供 3 种压缩比例，分别为 1、1/2、1/3，通过“左键《 或 右键 》”可对波形进行 3 种比例的循环压缩。通过屏幕右下角可以观察到压缩比例。再按“波形缩放键”，退出此功能。

✧ 滚屏显示⑥

波形扩展后需要分成多段显示，仪器自动显示第一段。若需要观测后续各段波形，应执行“滚屏”功能。按“滚屏显示键”，通过“左键《 或 右键 》”可对波形进行左右移动。再按“滚屏显示键”，退出此功能。

✧ 保存波形⑦

将屏幕上的显示内容存储于仪器中，可以存储 20 幅波形。

✧ 调出波形⑧

在屏幕上重现存储的波形。

✧ 电缆全长⑨

在“采样方法”子菜单中若执行“速度测量”，则菜单中的电缆类型变为电缆全长。按“全长键”，屏幕上弹出“电缆长度”输入对话框，初始值为“0”米。输入电缆长度值后，按“OK 键”。

✧ 延时⑩

设置触发时间，此功能一般不用。

✧ 定位⑪

用于确定测量的起点。执行“定位”键后，游标当前所处的位置即被确定为测试起点。通过“左键《 或 右键 》”可对游标进行左右移动。

✧ 自动判距⑬

按“自动判距键”，游标进行自动定位，显示屏左上方自动显示故障距离。

✧ 左键/右键(加/减)⑫ ⑭

移动游标定位用时，每按“左键《 或 右键 》”一次，定位游标尺左/右移一个单位点（像素）；当连续按游标左/右键时，游标移动的速度加快，一次移动八个单位点。

波形缩放、滚屏显示、波形移位进行选择时，按左键《 或 右键 》(加/减)。

✧ 采样键⑮

当仪器处于低压脉冲法测量时，按下采样键后，屏幕的波形显示区能马上显示出发射脉冲和回波脉冲。红色波形为局部波形，蓝色波形为全局波形。

当仪器处于高压闪络法测量时，按下采样键后，当有外部触发后，屏幕将显示高压闪络波，红色波形为局部波形，蓝色波形为全局波形。

六、高压使用说明

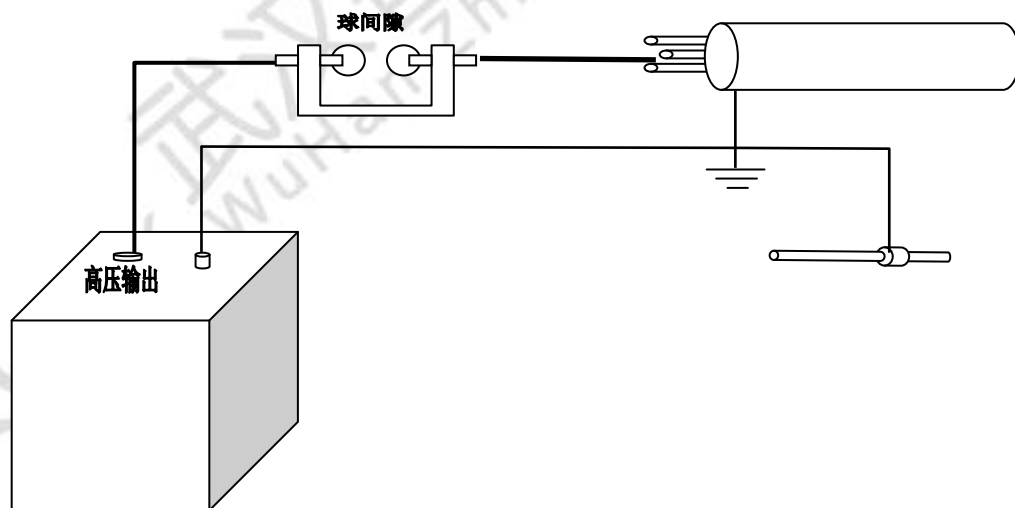
高压输出：

此模式是由直流口输出负直流高压，0-32KV 连续可调。为直流试验和外接球间隙时使用，具体使用方法如下：

外接球间隙：

如需外部观测高压放电的情况，或人工控制放电的周期，本仪器的直流输出口可外接球间隙使用，其接线、操作、停机。参见图四。

- ① 接线：高压连线一头插入直流输出口，另一头鳄鱼夹夹在球间隙一端，用双端鳄鱼夹分别夹在球间隙另外一端和故障上。接好本机的工作接地，接通 220V 50HZ 市电。。
- ② 操作：合上空开，停止/启动键旋转位置“启动”键后预设电压值点亮，顺时针旋转降压/升压旋钮以此来升高设定电压值，停止旋转后，仪器自动升压，液晶表头显示当前电容电压，待电容存储电压可以击穿故障点后，球间隙放电而且伴随火花。
- ③ 停机：停止/启动键旋转位置“停止”键后，预设电压值变灰，此时可以停机，停机后请注意：
 - 1、利用放电棒将对高压输出端剩余电量放电；
 - 2、为避免残余电击人，拆线前用放电棒对电缆放电，才可以拆线。



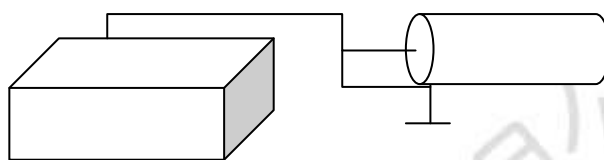
图四 外接球间隙接线图

七、测试主机使用说明

由于本仪器主要在高压环境中工作，在现场使用此仪器检测电缆故障前，应详细阅读本使用说明书中的有关仪器测试原理、接线方式和使用注意事项。以免发生人身事故和损坏仪器设备。

1. 用低压脉冲法测试电缆的低阻接地、短路、断路故障

A. 直接在电缆故障测试仪的输入输出接口接出一根夹子线。将夹子线的红夹子夹在电缆故障相芯线上，黑夹子夹在电缆的线上。



出接口
在故障
外皮地

B. 启动仪器电源开关，屏幕工作以右下角显示“请触摸屏幕进入测试状态”。触摸屏幕任意地方进入测试界面。此时

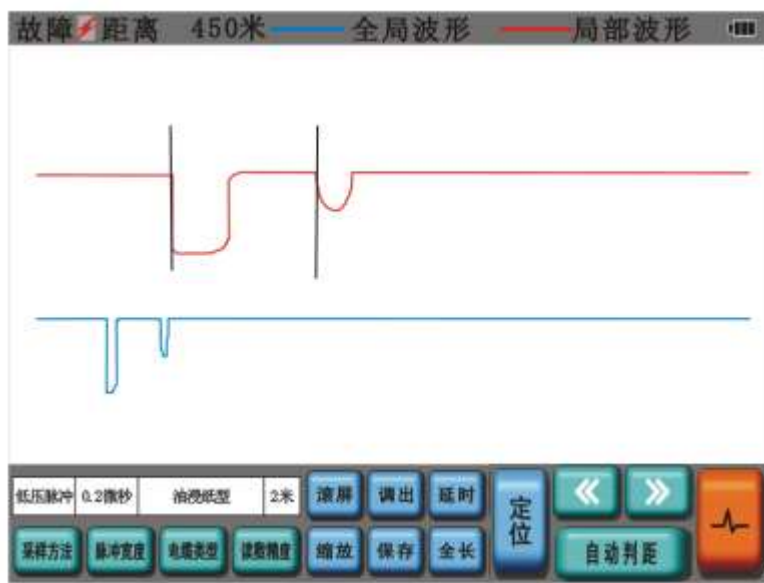
图五 低压脉冲连线图

后，屏幕
态。。。"
仪器默

认的状态是“低压脉冲法”，脉冲宽度为“0.2uS”，电缆类型“交联乙烯”（传播速度为170m/uS，），读书精度为“2m”。此时应根据现场被测电缆种类、长度和初步判断的故障性质选择使用方法。设置在“低压脉冲法”时，在此界面还可以进行打开历史文件查阅以前的测试结果。

C. 完成设备参数设置后，点击“采样”键，仪器自动发出测试脉冲。此界面将显示电缆的开路（全长）波形或低阻接地（短路）故障波形。若波形不好操作者应调节“中值”（注：垂直方向）和“幅度”（注：幅度大小，也可以理解为信号的增大与衰减），并观察采到的回波，直到操作者认为回波的幅度和位置适合分析定位为止。

D. 波形定位读距离。低压脉冲判距比较容易，只要将游标分别定位到发射波及反射波的起点即可。（第九项为实测波形，有开路和短路波形）



图六 低压脉冲法测试的开路全长波形界面

E. “保存”

很多时候，需要将测试结果保留或留作对比用，就要利用仪器中的“保存”功能，将此次测得的波形保存在仪器的数据库中。

如果测试人员认为有必要保存此次测试结果，可点击“保存”键，根据子菜单提示操作即

可。

2. 用冲击高压闪络法测试电缆的高阻泄漏故障（包括高阻闪络性故障）

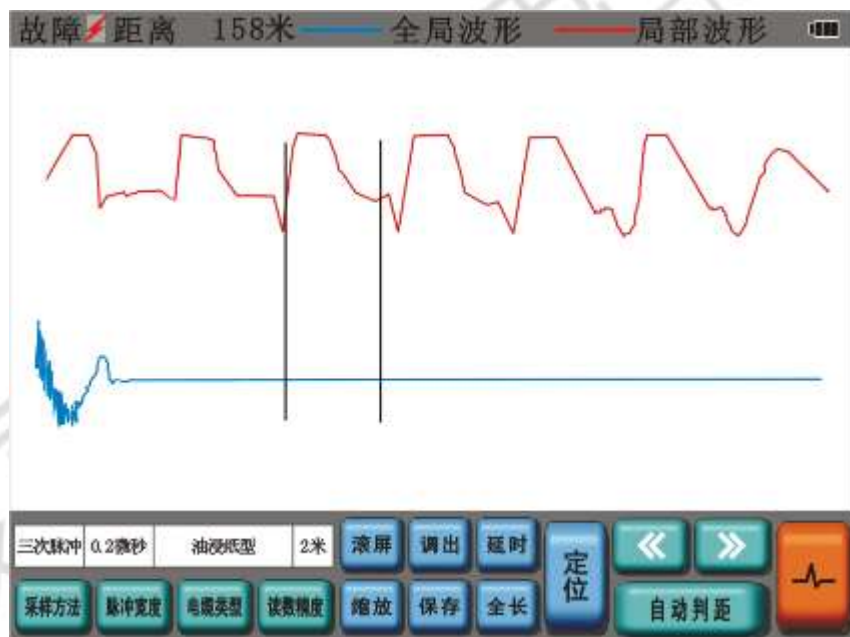
本仪器可用冲击高压闪络法测试电缆的高阻泄漏故障。冲击高压闪络法测试电缆的高阻泄漏故障是目前在国内流行的传统检测方法。很多用户都习惯使用此方法。是三次脉冲法测试电缆故障的一种补充方法。外接线路较为简单，但是波形分析的难度较大，只有在大量测试的基础上，有一定经验后才能熟练掌握，远没有三次脉冲法简单，但还是一种行之有效的测试方法。

A. 测试前的准备工作：

按照前文**六输出模式**接线，将双向航空插头测试线分别插入测试主机的采样口和高压信号发生器的闪络采样口。

B、高压闪络采样波形

1) 启动测试主机电源，选择“闪络方法”采样方式。根据现场被测电缆种类、长度和初步判断的故障距离选电缆速度和读数精度等用户参数（与低压脉冲法测试法相同）。被击穿，电缆中就会产生电波反射。电流取样器将地线上的电流信号通过磁耦合取得的感应反射电波传电缆故障预定位测试主机，经过 A/D 采样和数据处理，并将采得的波形显示在屏幕上进行故障距离分析。



图七 高压闪络法测试波形

电缆类型和采样频率确定以后就可以点击“采样”键 ，进行采样等待。一旦高压发生器进行冲击高压闪络，仪器就自动进行数据采集和波形显示。

屏幕上方红色波形是经过局部放大后的波形，下方蓝色波形为测试波形全貌。

当采集到较为理想的波形后，便可操作“波形缩放”和位移、移动游标来标定故障距离。操作方法与低压脉冲法一致。

4. 波速测量

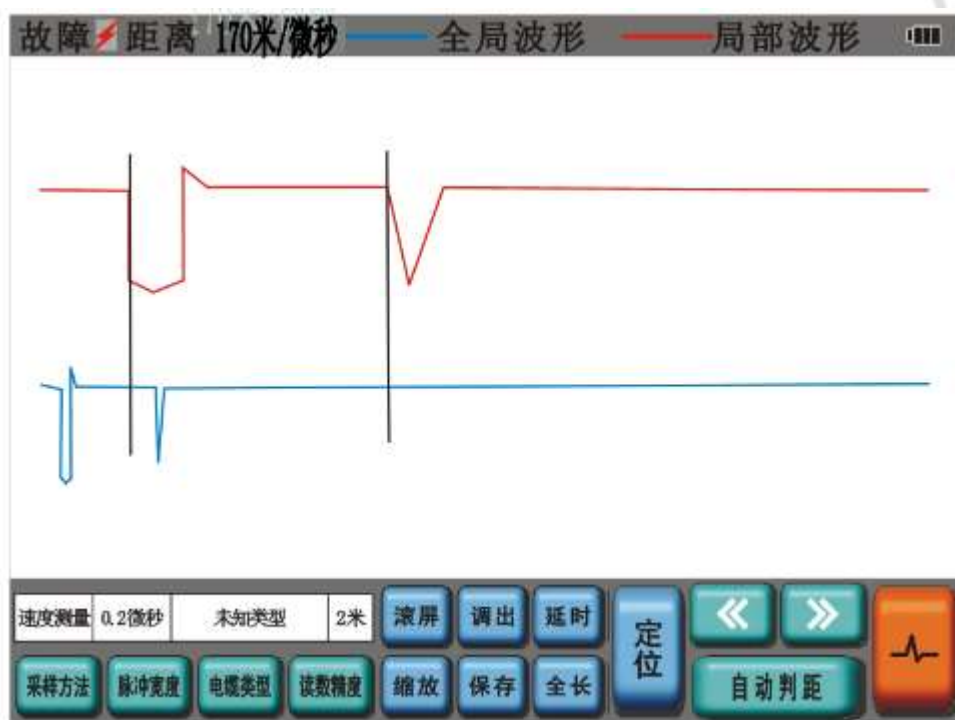
不同厂家生产的电缆，尽管型号相同，因为工艺和介质配方的差异，会导致电波传播速度的差异。如果直接使用仪器给出的平均电波传播速度，会造成一定的测试误差。为了更加精确

地测试故障距离，往往需要重新核对（测试）该电缆的电波传播速度。

电波测速的方法如下：

A. 首先选一段已知长度被测电缆。如果此次被测电缆的长度为已知，也可以用此电缆进行测试。

B. 仪器进入设置界面后，按“采样方法”后选择“速度测量键”。选取适当的采样频率和脉冲宽度。仪器的测量夹子线接在被测电缆的芯线和外皮上。按“电缆长度”键，弹出对话框，填写电缆长度值，按“OK”键。点击“采样”键，仪器屏幕将显示脉冲开路测试波形，通过游标定位仪器将自动显示所选的电缆的测试速度。



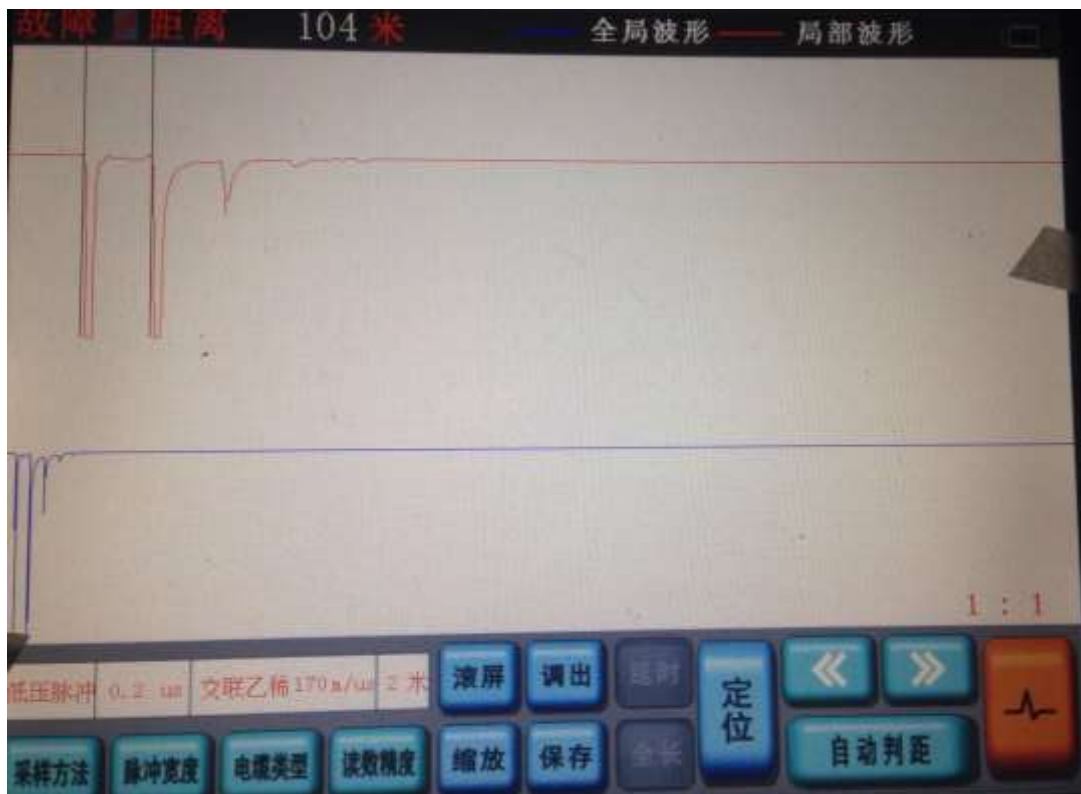
图八 测速时的画面图

八. 仪器使用注意事项

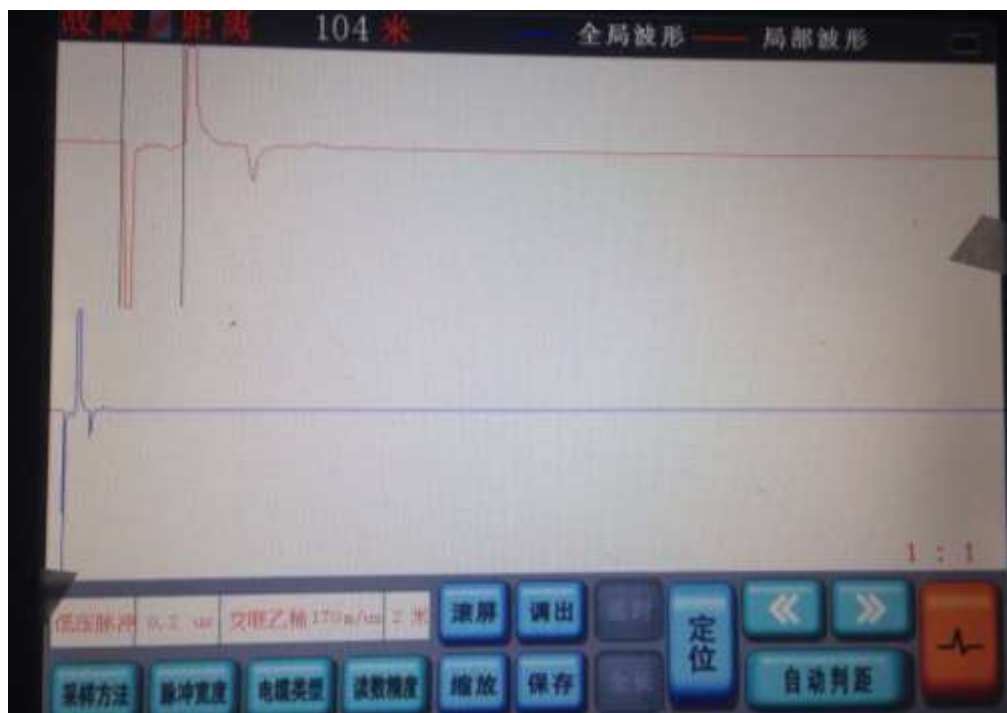
- 1、本仪器为电缆故障专用测试设备，在测试、修复电缆过程中可临时使用做直流耐压试验，但不可用它频繁做直流耐压试验。并且输出功率降低 1KVA 使用。
- 2、本仪器属高电压设备，出现故障时，请速与我公司联系。用户不可擅自拆卸修理，以免对仪器造成进一步破坏，甚至威胁使用者的人身安全。

九、实测波形

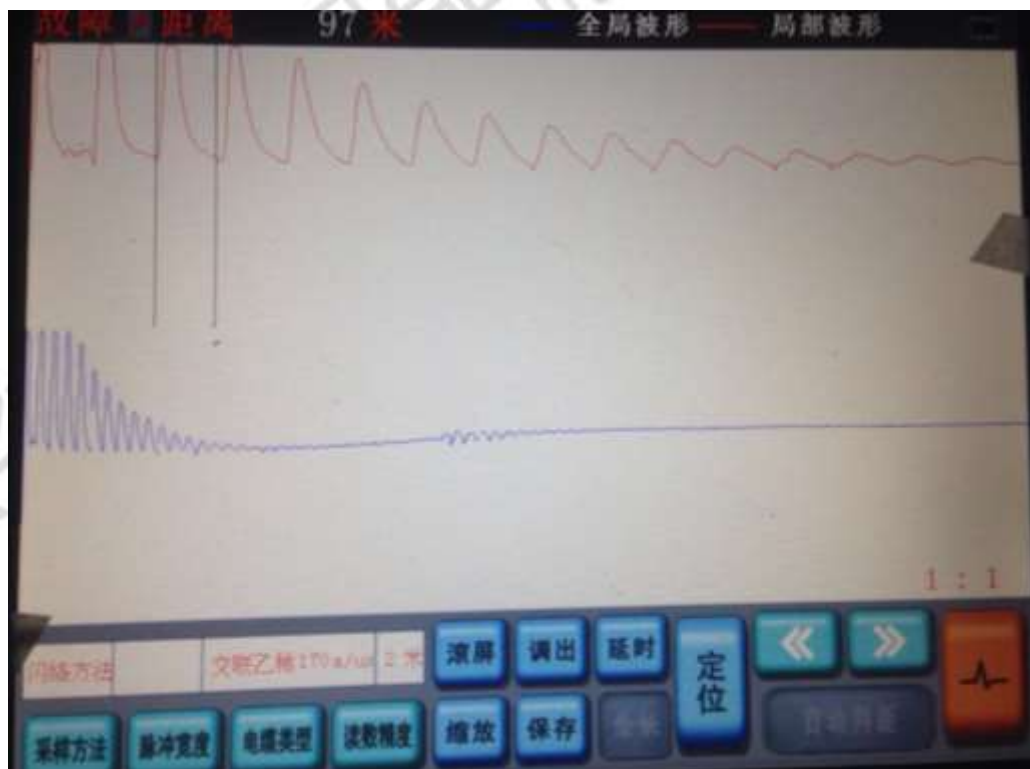
1、低压脉冲开路波形



2、低压脉冲短路波形



3、高压闪络波形



十、电缆故障的性质与分类

电力电缆故障的分类方法比较多，通常有以下几种方法：

（一） 据电缆故障点的绝缘电阻分类

1、开路（断路）故障：

凡是电缆绝缘电阻无穷大或虽与正常电阻的绝缘电阻值相同，但电压不能馈至用户端的故障。（低压脉冲测试时故障有反射，且反射波与发射波同相）

2、低阻（短路）故障：

凡是电缆故障点的绝缘电阻小于该电缆的特性阻抗，甚至直流电阻为零的故障均称为低阻故障或短路故障（低压脉冲测试时故障有反射，且反射波与发射波反相）。

3、阻故障：

电缆故障点的直流电阻大于该电缆的特性阻抗的故障均称为高阻故障（低压脉冲测试时故障无反射）。

高阻故障可分为两种故障形式：

- 高阻泄漏性故障：在做电缆高压绝缘试验时，泄漏电流随试验电压的升高而增加，试验电压升高到额定值时（有时还远远达不到额定值），而泄漏电流超过了允许值。
- 高阻闪络性故障：试验电压升至某值时，泄漏电流突然升高，监视泄漏电流的表针闪络性摆动，电压稍下降时，此现象消失，但电缆绝缘仍有极高的阻值。

（二） 据电缆故障发生的方式分类

1、击穿故障

电缆在做预防性试验时，由于较高直流电压的作用，使电缆隐患处被击穿。这种故障多为相对地的闪络性高阻故障。

2、行击穿故障

这种故障是电缆运行在工作电压时所发生的故障，一般多为相间或相对地的高阻或低阻故障。

（三） 根据故障发生的部位分类

1、本体故障

由于各种原因，诸如人为因素，如过负荷运行，外力破坏等，还有物理化学性腐蚀，自然老化等造成的各种性质的故障。

2、接头故障

电缆始末端头，中间接头等部位发生的故障。一般多见于泄漏性高阻故障

十一、电缆故障的测试程序

追踪仪查找埋地电力电缆故障一般要经过以下步骤：

➤ **分析电缆故障性质，了解故障电缆的类型；**

不同性质的电缆故障要用不同的方法测试，而不同介质的电缆则有不同的测试速度。不同耐压等级的电缆则有不同的耐压要求。而被测试电缆的接头位置及最近是否在电缆上方施过工。这些在测试前都必须做到心中有数。

➤ **用电缆仪主机的低压脉冲法测试电缆长度、校对电缆的电波传输速度；**

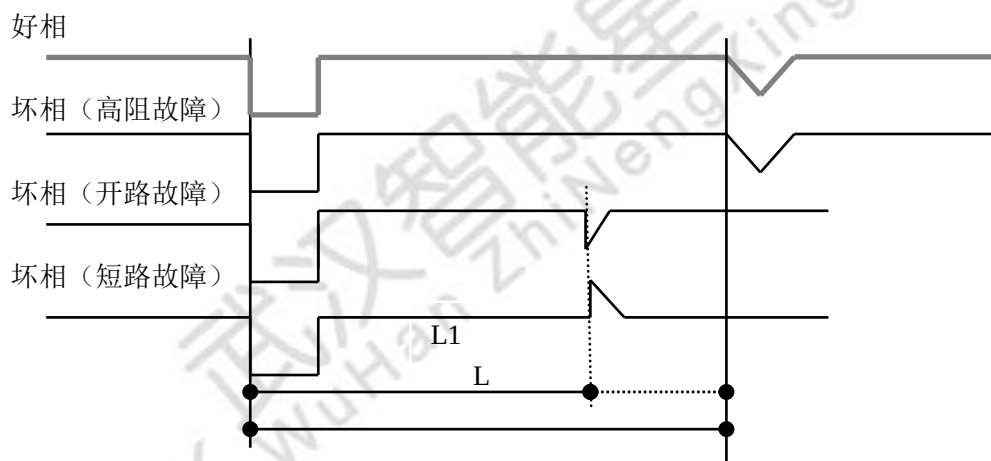
测试电缆全长可以让我们更加了解故障电缆的具体情况，可以判断是高阻还是低阻故障，可以判断固有的电波速度是否准确（准确的电波传输速度是提高测试精度的保证。当速度不准确时，可反算速度。）。这些都可以用低压脉冲测试法来解决。

如下图，当用低压脉冲分别测试电缆的故障相与好相并比较时：

当 $L > L1$ 时：表示故障点有反射。故障可由低压脉冲测试， $L1$ 即为故障反射距离。

当 $L = L1$ 时：表示故障相的故障为高阻故障，低压脉冲测试时无法观察到故障反射。只能观察到全长的反射。

L ：好相测量的电缆全长。 $L1$ ：故障相测量的反射长度



➤ **选择合适的测试方法，用电缆仪主机进行电缆故障粗测；**

对不同电缆故障要用不同的方法，低阻故障（开路、短路等）要用低压脉冲法测试；而高阻故障（泄漏、闪络等）则要用闪络法方法测试。选定方法后测出电缆故障的大致位置。选择合适的测试方法，用追踪仪主机对电缆进行故障距离粗测。

低阻故障用低压脉冲法测量，高阻故障用高压闪络法测量。

故障性质	绝缘电阻	故障的击穿情况
开路	∞	● 在直流或高压脉冲作用下击穿
低阻	小于 $10Z_0$	● 绝缘电阻不是太低时，可用高压脉冲击穿
高阻	大于 $10Z_0$	● 高压脉冲击穿

闪络	∞	● 直流或高压脉冲作用下击穿
----	----------	----------------

注：表中 Z_0 为电缆的波阻抗值，电力电缆波阻抗一般为 10—40 Ω 之间。

低压脉冲法测试比较简单，在此不多赘言。而高压闪络法测量则需要注意接线及所加直流电压的高低。接线时请严格按照接线图 3 或图 6 来接线，特别是地线的连接（高压设备的地线必须接被测电缆的铅包接地处，追踪仪的主机绝对不能接到 PT 和电容器的地线上，它必须单独接到电缆铅包接地处，以防仪器损坏。）。在测试前应先断开主机电源，试升压冲击放电数次，无异常时方可接入仪器。所加电压的高低主要取决于电缆的耐压等级及绝缘介质。如 10KV 油浸纸电缆和交联聚乙烯电缆的最高耐压分别为 50KV 和 35KV，一般不得超过电缆的最高耐压。

➤ **用路径仪探测埋地电缆的走向；**

定点前首先必须知道电缆的路径，若已知路径可省去此步骤。

➤ **用定点仪对故障点精确定位；**

按定点放电方式接好高压设备，根据电缆的性质及电缆的耐压等级来决定升压程度。对电缆故障点进行精测。

如果故障点在距测试端很近时，特别是在电缆的测试端头时，因球隙放电声音比故障点放电声音还大，很难区分真假声音，在这种情况下可将高压设备移至另一端的方法来定位。

➤ **对电缆故障测试结果进行误差分析，做好测试完的记录。**

此步工作对以后的电缆维护及管理是非常重要和必须的。

十二、低压脉冲测量法

● 应用范围

用低压脉冲法可以直观地看到低阻、短路故障及断路故障。据统计这类故障约占电缆故障的 10%。对于判断结构较为复杂的电缆线路往往具有相当重要的参考价值（如线路上有 T 接头，或中间有环型接头等）。

● 工作原理

测试时，在电缆故障相上加上低压脉冲，该脉冲沿电缆传播直到阻抗失配的地方，如中间接头、T 型接头、短路点、断路点和终端头等等，在这些点上都会引起电波的反射，反射脉冲回到电缆测试端时被追踪仪接收。追踪仪可以适时显示这一变化过程。

根据电缆的测试波形我们可以判断故障的性质，当发射脉冲与反射脉冲同相时，表示是断路故障或终端头开路。当发射脉冲与反射脉冲反相时，则是短路接地或低阻故障。

凡是电缆故障点绝缘电阻下降到该电缆的特性阻抗，甚至电流电阻为零的故障均称为低阻故障或短路故障（注：这个概念是从采用低压脉冲反射法的角度，考虑到阻抗不同对反射脉冲的极性变化的影响而定义的）。

下面给出一个电缆特性阻抗的参考值：铝芯 240 平方毫米截面积的电力电缆的特性阻抗约为 10 Ω ；铝芯 35 平方毫米截面积的电力电缆的特性阻抗约为 40 Ω 。其余截面的铝芯电力电缆的特性阻抗可据此估算。

凡是电缆绝缘电阻无穷大或虽与正常电缆的绝缘电阻值相同，但电压却不能馈至用户端的故障均称为开路（断路）故障。

故障距离是由发射脉冲与反射脉冲之间的时间差得来的，这就涉及到电波在电缆中的传播速度问题，从有关的理论和实验中得知，电波在电缆中的传播速度只与介质有关，而与其横截

面积大小无关。因此只要知道电缆的介质传播速度和追踪仪接受到的发射脉冲到反射脉冲的时间差，就可利用下式计算出故障距离。

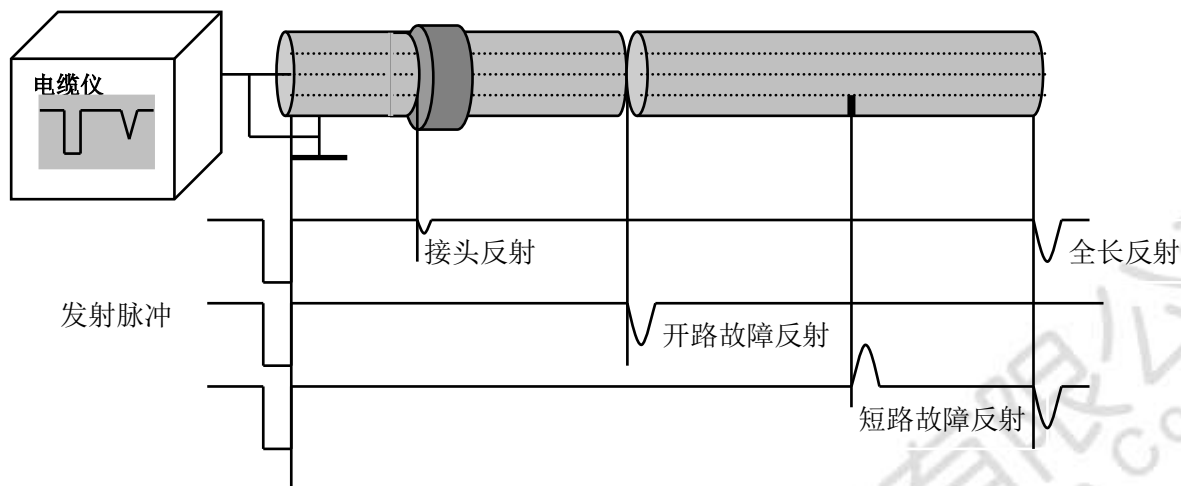


图 19 低压脉中测量时的具有代表性的波形

注：当接头做的比较好时接头无反射；当断路故障时全长无反射；对于高阻故障时，故障点无反射。

$$S = V \cdot \Delta t / 2$$

● 发射脉冲的选择

电缆故障测量仪器使用的低压脉冲一般有矩形、指数、钟形（升余弦）等。由于矩形脉冲形成比较容易，故应用比较多，我们也是采用此方式。

脉冲总有一定的时间宽度，假定为 τ ，则在 τ 时刻以内到来的反射脉冲与发射脉冲相重叠，无法区分开来，因此不能测出故障点的距离来，出现了盲区。假设发射脉冲宽度为 $0.2\mu\text{s}$ ，电缆电波速度是 $170\text{m}/\mu\text{s}$ ，其测量盲区就是 17M ，仪器发射脉冲越宽，测试盲区越大。从减小盲区的角度看，发射脉冲的宽度窄一些好，但脉宽越窄，它所包含的高频成分越丰富，而线路高频损耗

大，使反射脉冲幅度过小，畸变严重，远距离的测试效果不佳。为了解决这个问题，脉冲反射仪器将脉冲宽度分为 8 中脉冲宽度（0.05 μ S、0.1 μ S、0.2 μ S、0.5 μ S、1 μ S、2 μ S、8 μ S）。开机默认脉宽 0.2 μ s、幅度 110V；当测试故障距离比较大时，应选择更大的脉冲宽度。反之选择更小的脉冲宽度。

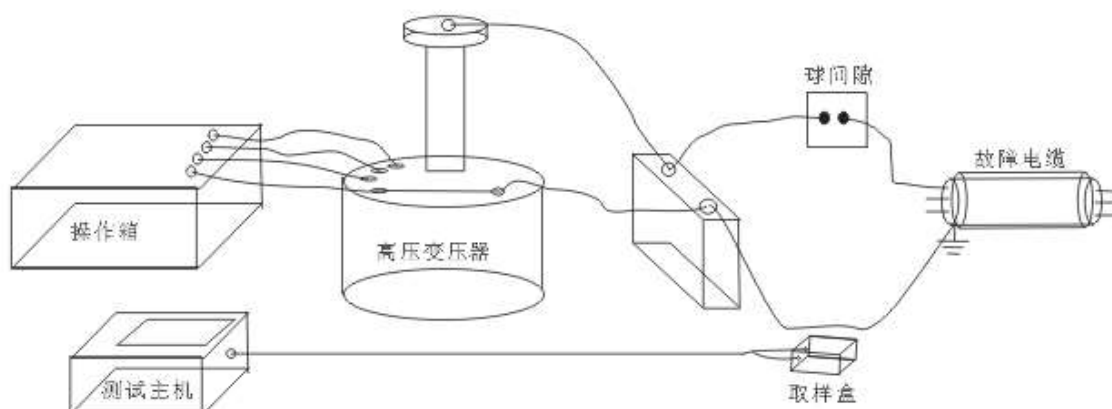
十三、高压闪络测量法

● 应用范围

电力电缆的高阻故障（高阻故障：故障点的直流电阻大于该电缆的特性阻抗的故障为高阻故障）几乎占全部故障率的 90%以上。在未经“烧穿”处理之前，绝大部分故障都不适合直接采用低压脉冲法或电桥法测试，这往往给现场电气工程技术人员在故障处理方面带来很多困难。虽然有一部分高阻故障利用交流或直流“烧穿”设备可以使故障点因电流通过而发热碳化使电阻值变低，以适合低压脉冲或电桥法测量。然而大量的实践证明，并不是所有的高阻故障都能用“烧穿”法烧成低阻故障的。有的接头故障长期烧而不穿，有的阻值甚至越烧越高。为了解决这样的问题就必须采用高压闪络测量法。

● 工作原理

就大部分故障本质来说，基本都属于绝缘体的损坏。高阻故障是由于绝缘介质的抗电强度下降所致。因为故障点的阻值高，测量电流小，所以即使用足够灵敏的仪表也难以测量。对于脉冲法，由于故障点等效阻抗几乎等于电缆特性阻抗，所以反射系数几乎等于零，因得不到反射脉冲而无法测量。但从介质的电击穿现象出发，只要对电缆加足够高的电压（当然低于最高试验电压），故障点就会发生击穿现象。在击穿的瞬间，故障点被放电电弧短路，所以在故障点放电前后，就产生电压的跃变。由于介质击穿，其电离过程需要一定的时间，而弧光放电一般要持续数百微秒到几个毫秒，因此跃变电压在放电期间就以波的形式在故障点和电缆端头之间来回反射。如果在电缆的端头（始端或终端），把瞬间跃变电压及来回反射的波形记录下来，便可测量出电波来回反射的时间；再根据电波在电缆中的传播速度，就可以算出故障点到端头的距离。基于这个物理机理产生了闪络测试法。



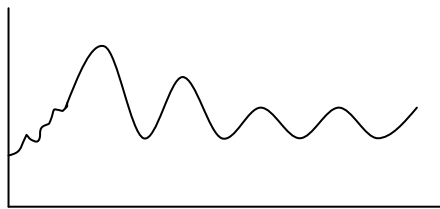
按图电源接上后，实验高压变压器对电容器充电。当电压高到一定数值时，球间隙被击穿，电容器上的电压通过球间隙直接加到电缆的测量端。这个冲击电波沿电缆向故障点传播。只要电

压的峰值足够大，故障点就会因电离而放电（注：因为欲使故障点闪络放电，不但需要足够高的电压，还需要一定的电压持续时间）。故障点放电所产生的短路电弧使沿电缆送去的电压波反射回去。因此，电压波就在电缆端头和故障点之间来回反射。有了它，就可以借助于追踪仪主机观察到来回反射的电压波形。

下面是几个个实测波形。从波形中可以看出在电缆里衰减的余弦振荡及叠加在余弦振荡上的快变化脉冲。

对波形中的慢变化的衰减余弦振荡可以这样解释：故障点放电所形成的短路电弧使电缆相当于一根短路线，球间隙击穿瞬时就是充电电容器 C 对短路线放电的过程。由于短路线可等效

成一个电感，因而它们相当于电感—电容充放电振荡回路。考虑到回路的损耗，得到的就是一个衰减的余弦振荡，如下图所示。



闪络测量法的波形

上图观察到的波形为闪络全过程，。实际上，我们用来测量故障点距离的不是这个衰减振荡的慢过程，而是叠加在这个慢过程上的一些快速尖脉冲。把余弦振荡的前面一段加以扩展，

$$S = V \cdot \Delta t / 2 \text{ (m)}$$

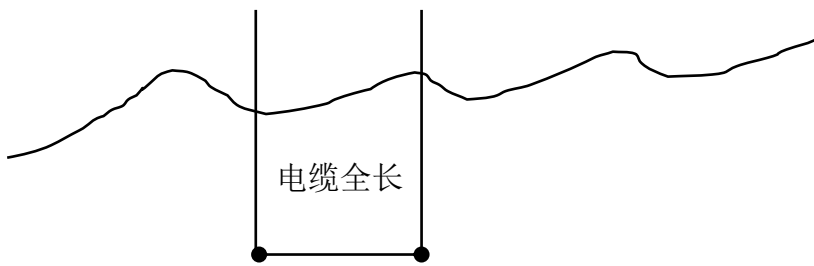
算出测试端到故障点的距离。

闪络测量法的巨大优点在于几乎能适应任何类型的故障。大量实践证明，闪络测量法是对付那些被人们用别的方法测不出来而被称之为最顽固的故障的最强有力手段。所以目前我国凡是具有电力电缆故障闪络测试仪的单位均无一例外地把闪络法作为最主要的测试方法。

● 故障点击穿的判别

在冲击高压闪络法测试中的一个关键的问题是判断故障点是否击穿放电。很多人由于缺乏实践经验，往往以为球间隙放电就可以从屏面上看到正确波形了。其实这种想法是片面的。球间隙的击穿与否只与两球间的距离及所加电压幅度有关，距离越大，击穿所需的电压就越高，通过球间隙加到电缆上的电压就越高。而电缆故障点能否被击穿仅取决于电缆上得到的冲击电压的高低。球间隙太小，击穿时加到电缆上的电压可能低到无法电离击穿故障点，这种情况下，球间隙看来是被击穿了，但是电缆故障点并没有被击穿，因此就无阶跃电压反射回来。在屏幕上仅能看到负高压在传到电缆终端被反射的终端反射波，无法测出故障距离。故障点未被击穿的典型波形下图所示。

从下图中可以看出，电缆故障点未被击穿时，波形上的向下波动仅是终端反射波的作用，并且可以看出从波形起点（下突跳点）到第一反射波之间的时间间隔正好代表了电缆全长。



电缆故障点未放电波形

如果电缆没有故障或冲击电压过低或储能电容 C 过小，电缆就不会出现闪络现象。这时电缆相当于开路线，即可等效为电容，球间隙击穿瞬间，一方面储能电容 C 对电缆的等效电容充电，另一方面这个等效电容与储能电容 C 并联，并通过取样盒采集信号电。其过程呈指数衰减波形，如上图所示，仅能看到电缆终端反射波形。

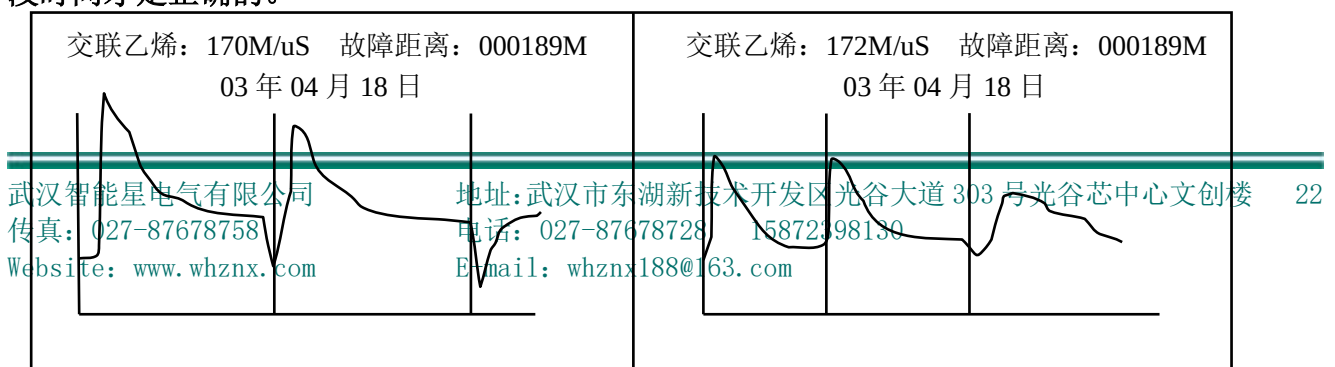
一旦在屏上出现上图的波形时，则表示电缆故障点未被击穿，所加冲击电压太低，需加大球间隙距离，增加冲击电压幅度，直至有大余弦振荡信号出现，便可扩展波形仔细分析，读出距离来。

1、从波形上可以准确地判定电缆故障点击穿与否。2、另外，还可以从球间隙放电的声音来判断，当球间隙放电声嘶哑、不清脆，而且火花较弱，放电时间较长，电缆故障点一般未被击穿。3、另外，从操作箱的电流表可以判断故障点是否击穿，一般电流表摆动在 $<10A$ 范围时，表明电缆故障点未被击穿。如果电流表指针在 $15A \sim 30A$ 范围内摆动，且球间隙放电声清脆响亮，一般可说明故障点被击穿（有时故障点电阻值较低，冲闪电流表指针摆动范围也大，球间隙放电声也大，但故障点却不一定被击穿，不过此种情况不多见）。此时可按测试步骤测试故障距离。

● 故障点靠近测试终端的波形

在用冲击电压闪络法测试时，在显示屏面上，对于故障点在电缆终端或接近终端头的情况，显示的波形往往与基本波形有所不同，下图是实测波形。

从下图中的波形可以看出，第一个正脉冲前还有一个负尖峰，后面的波形也有相应的变化。这给缺乏实测经验的人往往造成判读上的困难，不知道从何处读起。前面已经说过，电缆在加冲击负高压时，故障点处负高压上升有一个过程，故障点的电离放电也有一段迟延时间，所以在故障点放电之前，冲击电压波已经在终端头被反射，并越过故障点传向测试端。在此之后故障点才被电离击穿，形成正向阶跃电压向测试端传输。因此在第一回波的正脉冲前出现了负尖峰。这一波形在故障点与测试端间来回反射，使以后的第二、第三、……回波也相应变化，增加了波形的复杂性。如果两个回波的时间差从第一回波正脉冲前的负尖峰下降拐点算起的话，将会造成相当大的测量误差。只能从第一回波的正突跳拐点算起直到第二回波的负突跳拐点这段时间才是正确的。

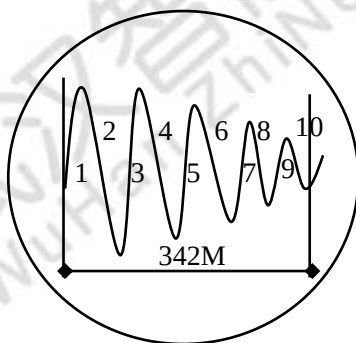


故障点在终端或接近终端的测试波形

● 故障点靠近测试始端的波形

故障点就在测试端的电缆头或接近测试端（10~30m）时，要精确读数往往是很困难的，一般用平均值来估读故障点的距离。

对于冲击高压闪络法来说，除记录速度的限制外，还因为前面一个回波会影响后面一个回波的波形，使整个波形比较混乱。故障点越靠近测量端，波形中的快速振荡过程就越密集，如果故障点就在电缆端头上，波形中就再不会有快速尖脉冲存在，而几乎是一典型的光滑的大余弦振荡波形（由于引线的杂散电感分布，在大余弦振荡的前一部分也可能有十分模糊、无法辨清的毛刺），如下图所示。



故障点在始端的波形

对于近距离故障，波形读数的精确与否是有技巧的。为了更精确些，可以读 2~5μs 时间内小振荡的周期数或反射波的次数，再简单换算一下便可以得到故障距离了。

例上图所示的闪络故障波形，闪络产生的振荡在一定时间内振荡了 5 周，即波形在电缆中来回反射了 10 次，而这段时间内对应的距离为 342M，故实际故障点距离点距测试端的距离为

$$l_x = 342 / 10 = 34 \text{ (M)}$$

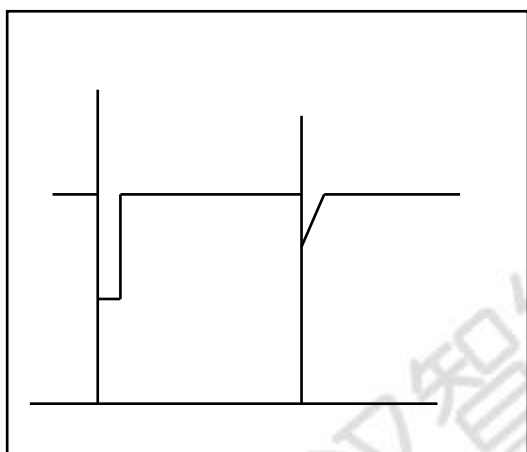
近距离测试时估出的相对误差可能会大一些，但由于故障点距离很近，绝对误差不大，不会给定点带来很大困难。只是在定点时，由于球间隙离定点位置较近，地震波的声音往往由于球间隙放电打火声而被淹没，无法判断地震波。此时可将球间隙（高压部件）移至故障电缆终端，

高压设备仍留在始端，让高压经过一无故障相送至球间隙一端，再让球间隙的另一端与故障相连接。这样，当高压击穿球间隙产生冲击高压送至故障相时，测试端避免了球间隙打火声引起的干扰，便于判断故障点的地震波。

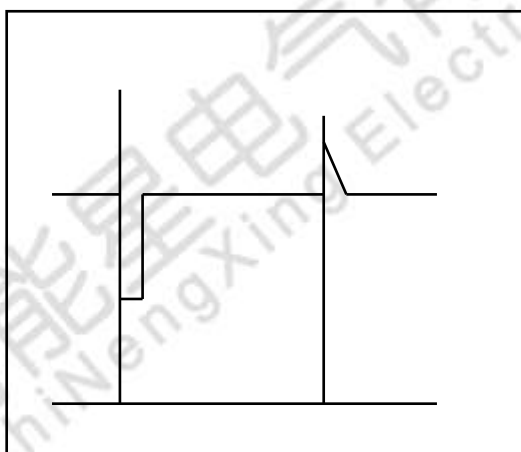
十四、各种标准波形

在实际测试中我们将遇到各种各样的波形，如何分析波形是很关键的，波形变化有一定的规律，只要我们多看多比较就会很快掌握，下面是我们由实际波形的变化得出的一组标准波形。

➤ 低压脉冲测试波形



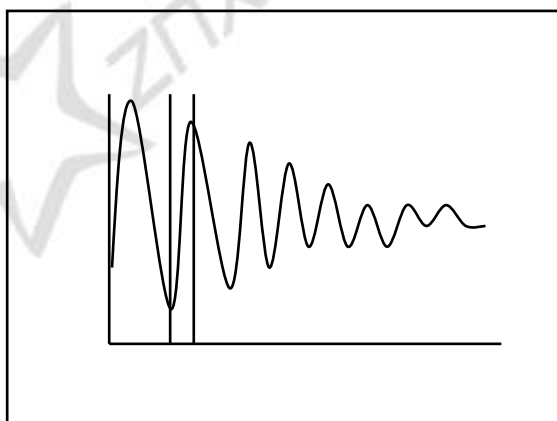
(a) 开路反射波形



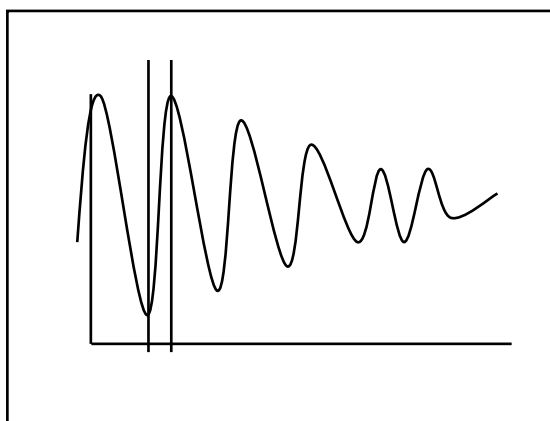
(b) 短路及低阻反射波形

➤ 高压闪络测试波形

● 故障在测试始端的波形

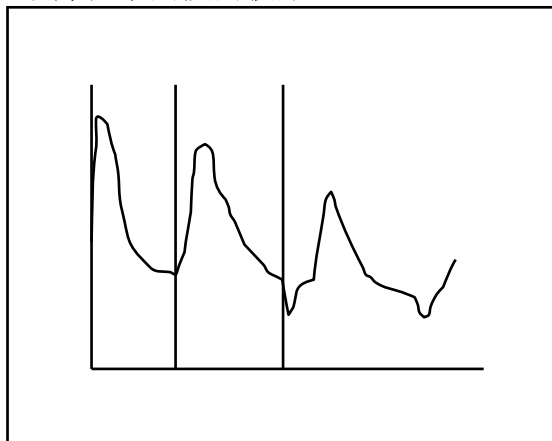


(a) 距离很近

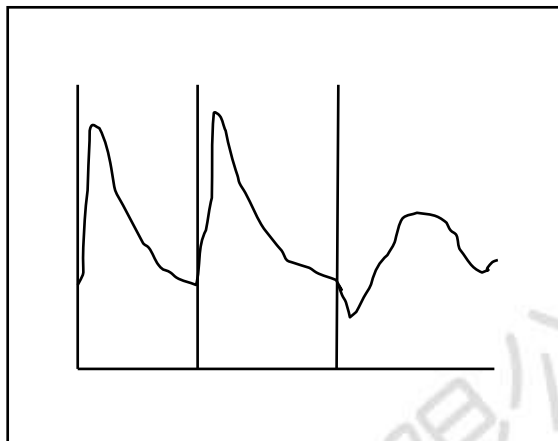


(b) 距离较近

● 故障在中间段的波形

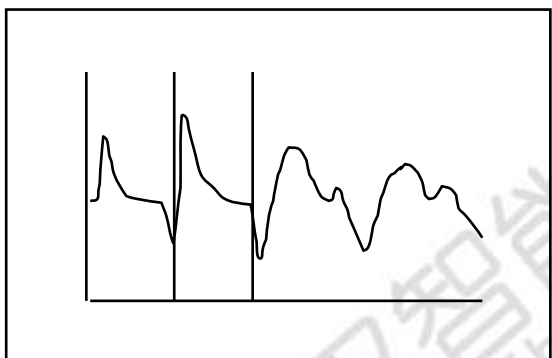


(a) 距离较近

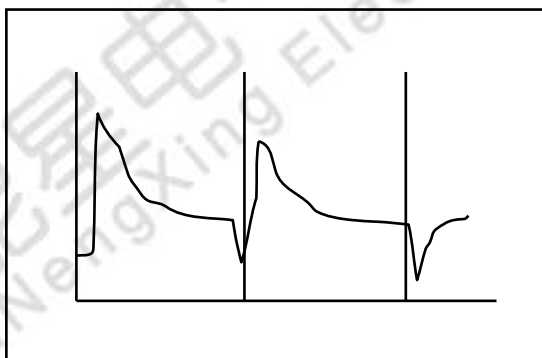


(b) 距离较远

● 故障在测试终端的波形

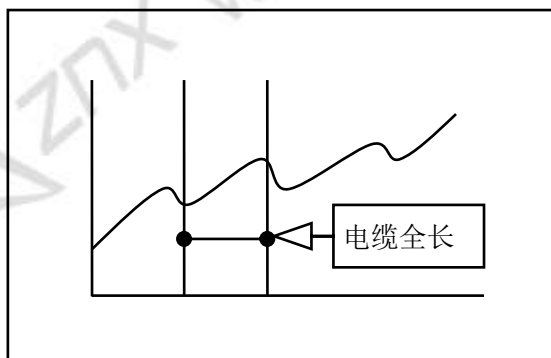


(a) 电缆较短时



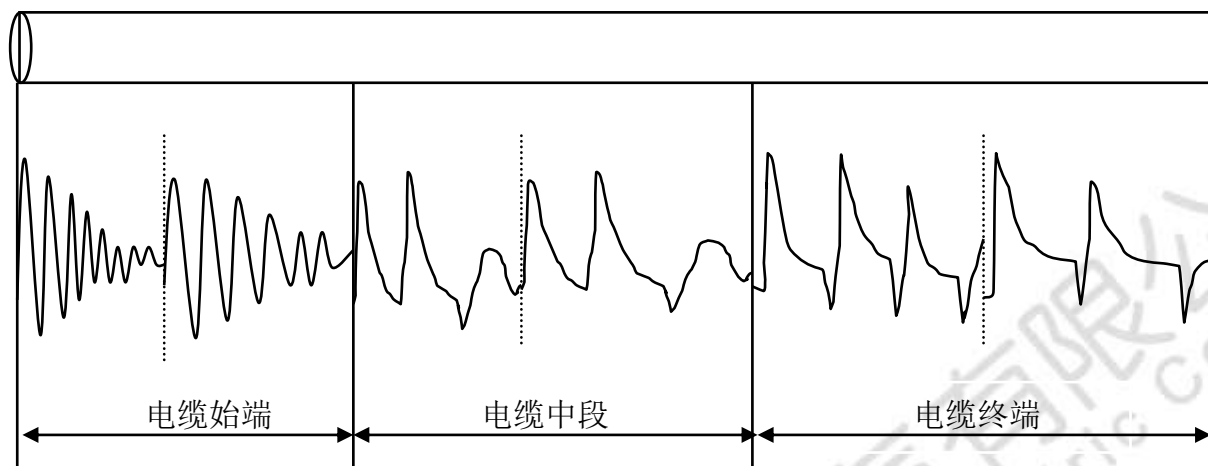
(b) 电缆较长时

● 故障未放电时波形

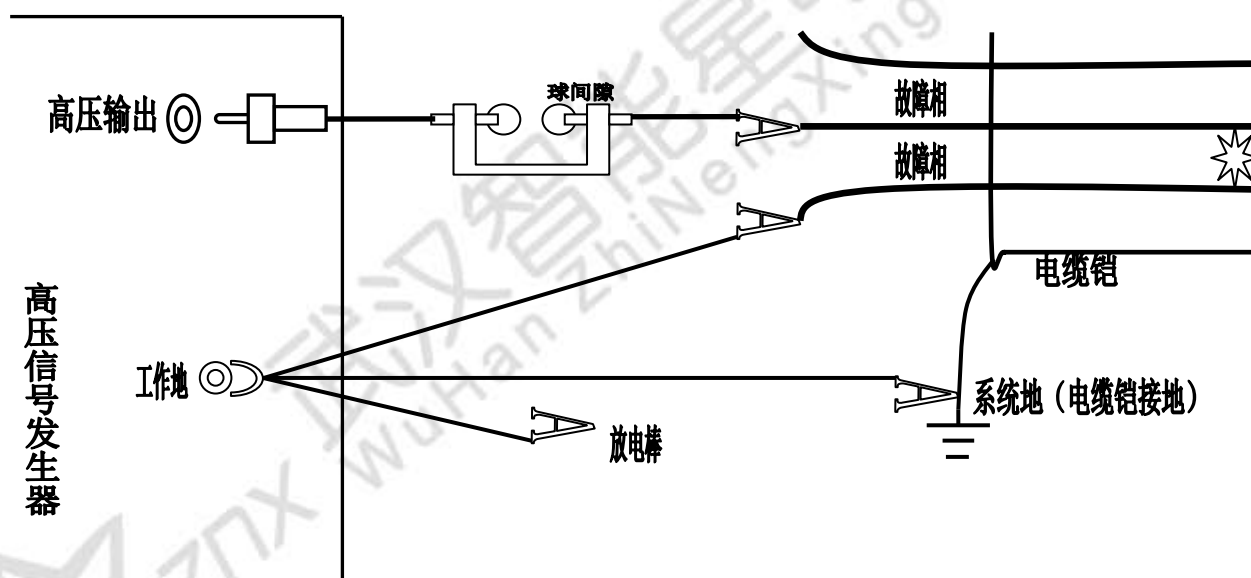


● 闪络法测试波形的变化规律图

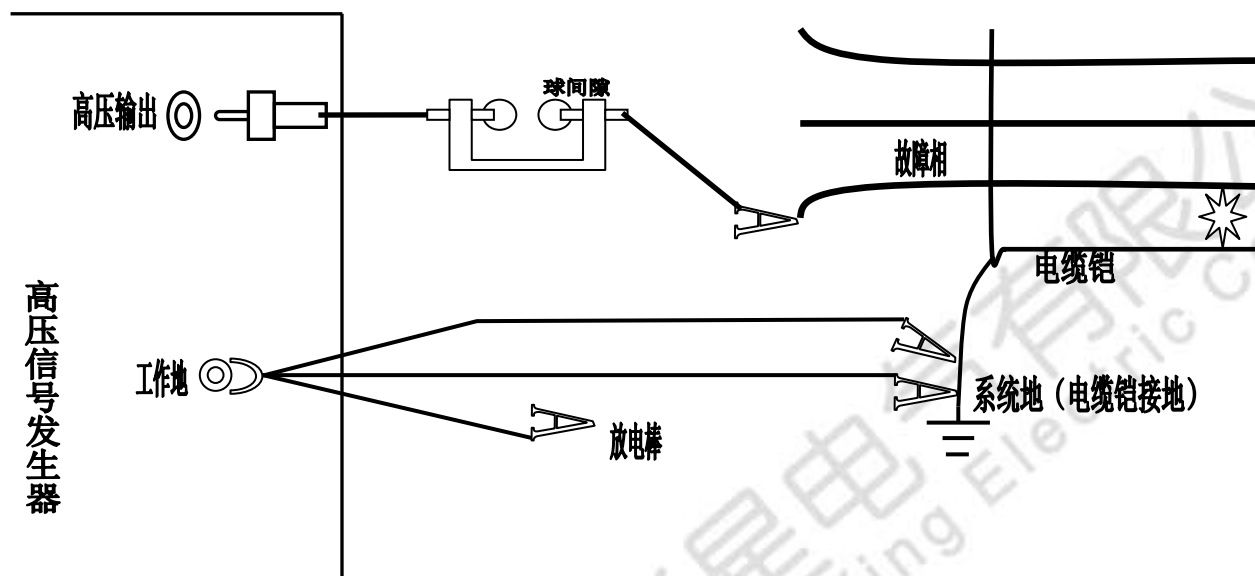
下图是我们根据闪络测试法的波形而绘制的变化规律图，只要仔细观查分析就可看出它们中的变化规律。希望使用者一定要掌握标准波形以及它们在不同区间的变化规律。



附图



相与相之间故障接线图



相与地之间故障接线图