

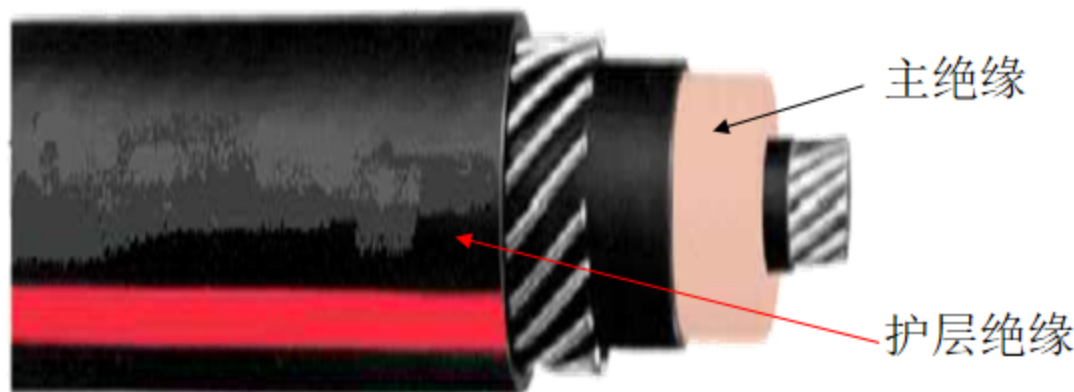
高压电缆线路智能化运检 技术交流

高压电力电缆绝缘在线监测

- 1 110kV~500kV高压电力电缆护层绝缘、局部放电在线监测
- 2 6kV ~35kV高压电力电缆绝缘在线监测
- 3 电力电缆绝缘在线监测的产品进行介绍。

高压电力电缆绝缘在线监测

- 110kV及以上高压电缆的绝缘在线监测，包括了对主绝缘的在线监测和对护层绝缘的在线监测。



- 对于电缆主绝缘，主要是在线监测本体主绝缘及接头主绝缘的局部放电，容性电流或泄漏电流异常增大。对于电缆护层绝缘，主要是在线监测金属护套接地电流异常增大、感应电压异常升高。

高压电力电缆绝缘在线监测

- 另外，对电缆接头的温度异常升高的在线监测可以发现接触电阻增大，接头内的放电故障。在电缆的局部放电（**Partial Discharge**）在线监测中，对**PD**脉冲的识别与定位是技术关键。下面分别对国内外**110kV~500kV**和**6kV ~35kV**高压电力电缆的研究概况，以及电力电缆绝缘在线监测的产品进行介绍。

1 国内外110kV ~500kV高压电力电缆绝缘在线监测研究概况

- 国内外现有高压电力电缆绝缘在线监测方法主要有(1)直流叠加法(2)直流成分法(3) $\text{tg}\delta$ 法(4)电桥法(5)交流叠加法(6)低频重叠法(7)谐波分量法(8)接地线电流法与环流法(9)局部放电法(10)温度法及上述各种方法的复合诊断法。其中的一些传统的监测方法，如直流叠加法、直流成分法、 $\text{tg}\delta$ 法、电桥法、交流叠加法、低频重叠法较适合在6~35kV高压电力电缆中应用，而不适合在更高电压等级的电缆中应用。

1 国内外110kV ~500kV高压电力电缆绝缘在线监测研究概况

这是因为：

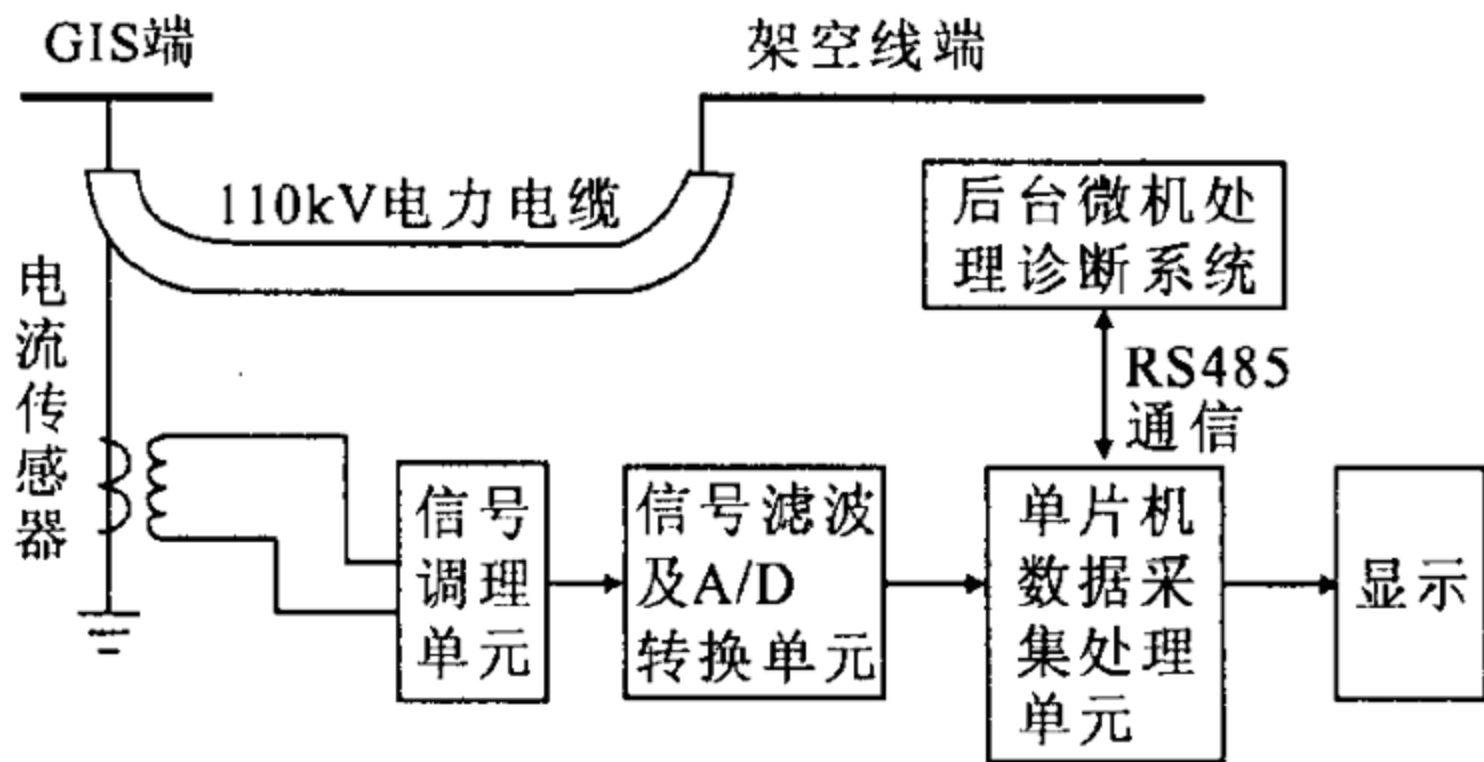
- (a).现代交联技术的进步使湿交联工艺已基本被淘汰，因此，由交联聚乙烯电缆水树枝而导致的电缆绝缘故障已不多见。另外，电缆主绝缘电阻远大于1000 M Ω ，直流分量信号微弱，一般在纳安级，测试极不方便，同时也很容易被其他信号所淹没，这样，基于水树枝的整流效应的直流成分法就难于应用。
- (b).直流叠加法、交流叠加法和低频重叠法也难于在110~500kV电缆中应用，这是由于在110~500 kV 高压线路中，三相中性点一般采用直接接地方式，无法在电缆的芯线上叠加直流或交流电压。

1 国内外110kV ~500kV高压电力电缆绝缘在线监测研究概况

(c). 对于tg δ 测量法和电桥法，由于交联聚乙烯(XLPE)电缆绝缘的tg δ 值一般都很小，特别对于110~500kV高电压等级的XLPE电缆，绝缘电阻与等值电容都相当大，tg δ 的值会更小，要测量精确并以其作为判断根据往往是不可靠的。

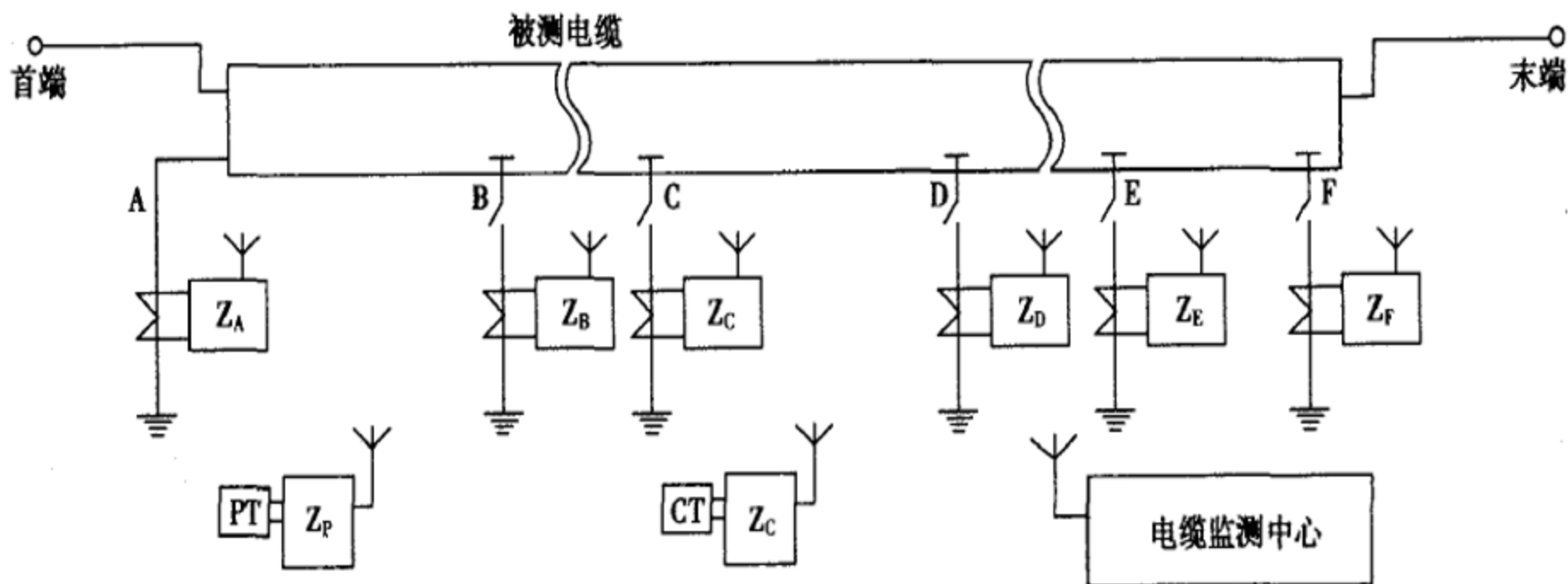
国内外现有的110~500kV高压电力电缆绝缘在线监测方法主要有接地线电流法与环流法，局部放电法和温度法。下面分别介绍这些方法：

1.1 接地线电流法与环流法



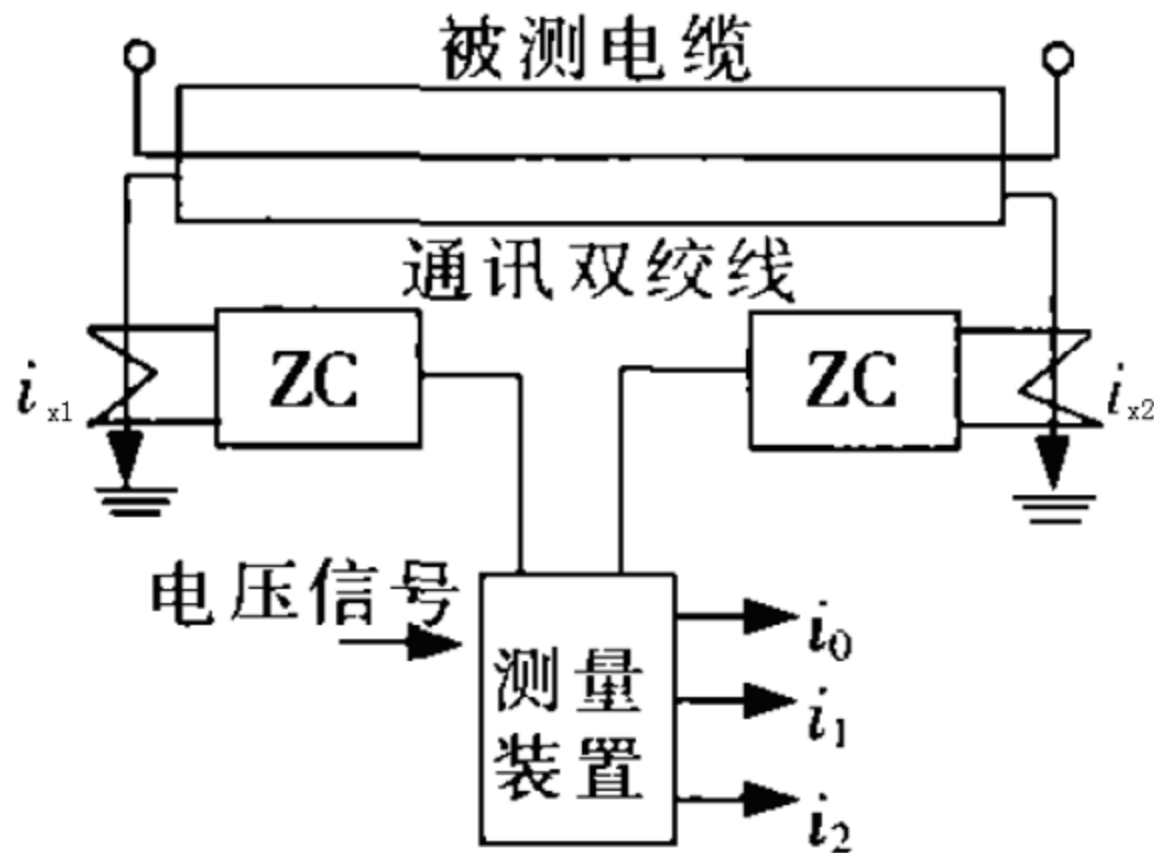
图a1单点接地电缆，接地线电流法原理图

1.1 接地线电流法与环流法



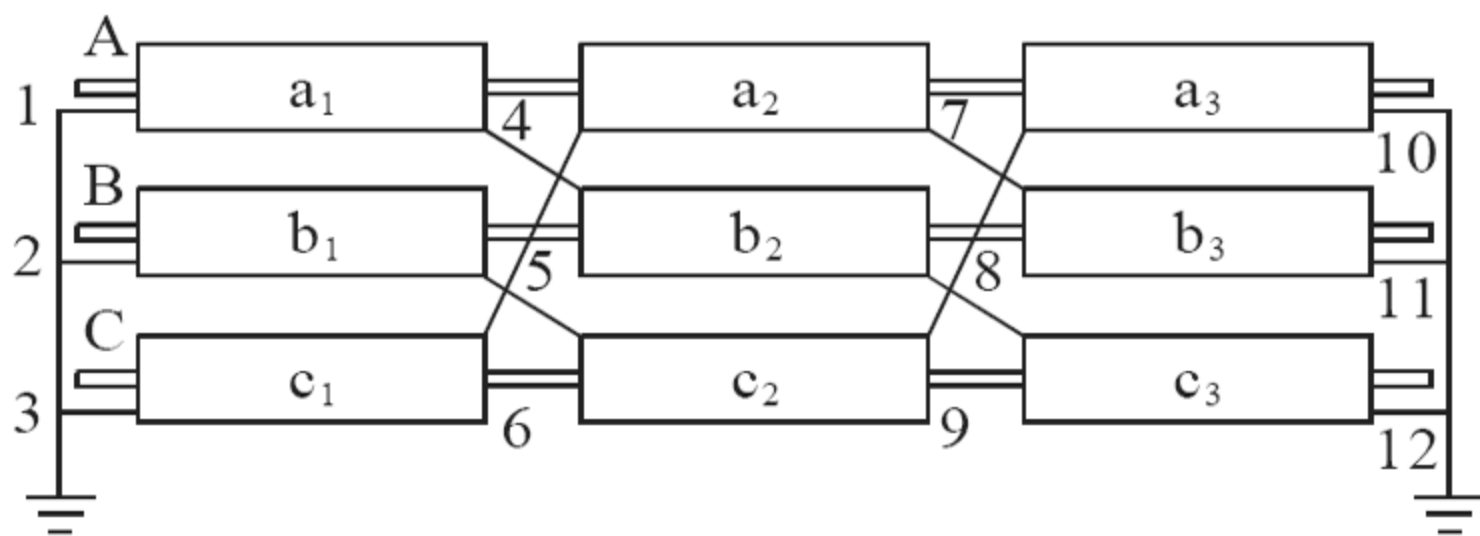
图a2单点接地长线电力电缆，分布式在线监测系统组成

1.1 接地线电流法与环流法



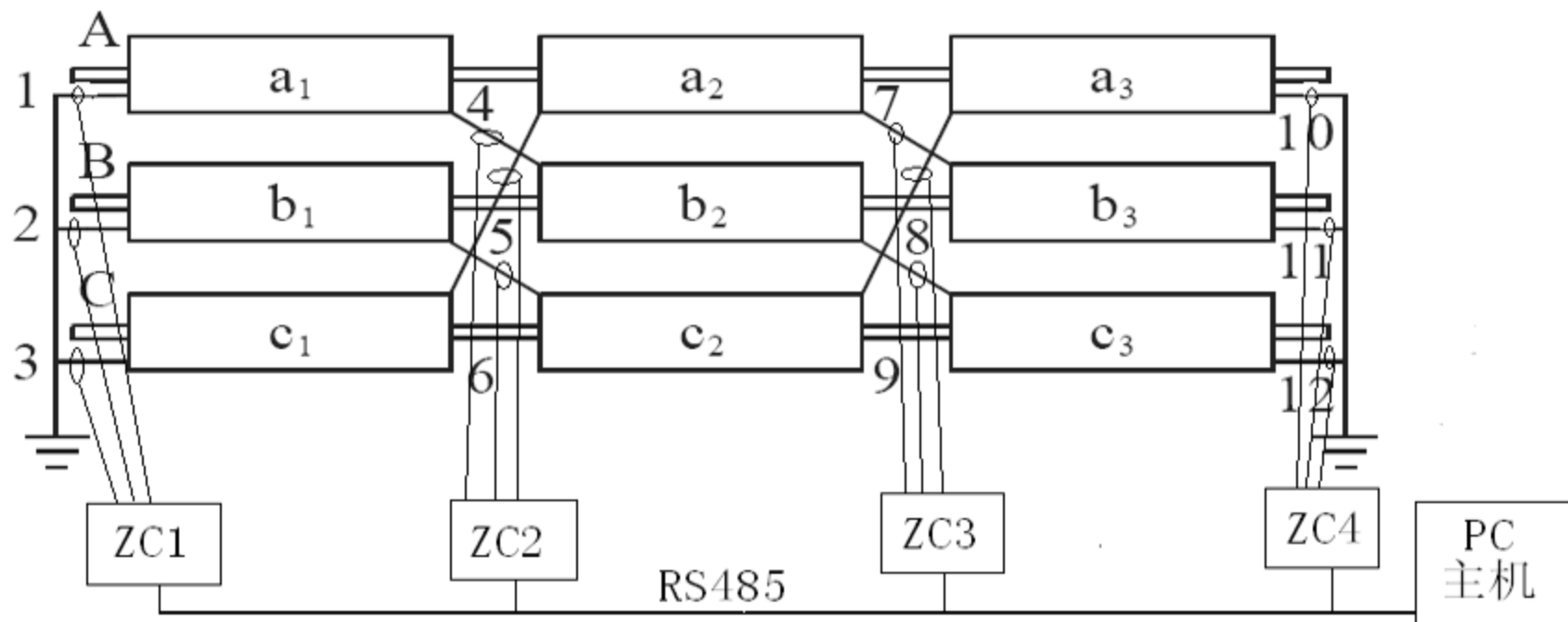
图a3双端接地单相电力电缆，金属屏蔽层接地电流在线监测接线示意图

1.1 接地线电流法与环流法



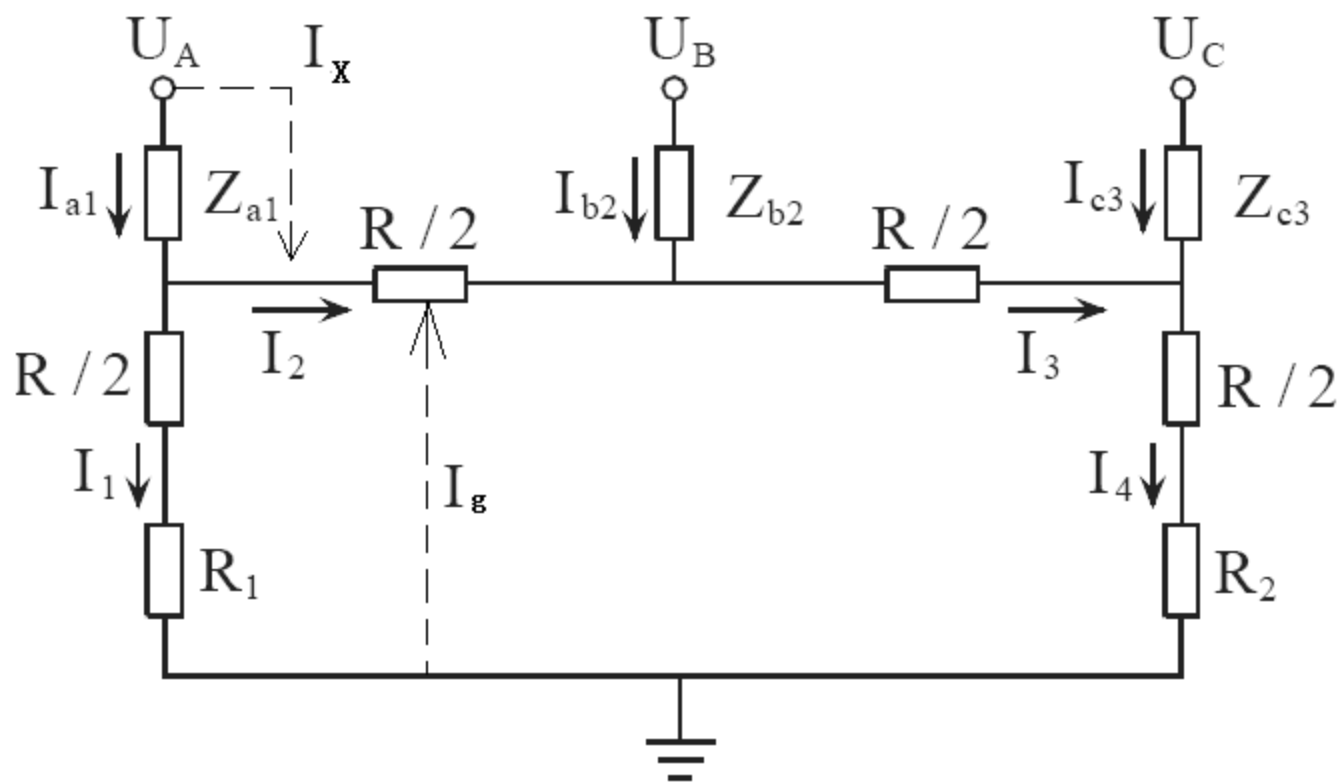
图a4 交叉互联XLPE 电缆的一个标准单元的接线示意图

1.1 接地线电流法与环流法



图h1 电缆护套交叉换位电缆接地电流与环流在线监测系统

1.1 接地线电流法与环流法



图h2 交叉互联电缆标准单元接线中a1 - b2 - c3 的等值电路图

1.1 接地线电流法与环流法

- 通过绝缘的三相电流相量 I_{a1} 、 I_{b2} 、 I_{c3} :
- $I_{a1} = I_1 + I_2$, $I_{b2} = I_3 - I_2$, $I_{c3} = I_4 - I_3$
- 主绝缘正常, 护层绝缘良好时, I_{a1} 、 I_{b2} 、 I_{c3} 可以看作对称恒流源, 故
- $I_{a1} + I_{b2} + I_{c3} = I_1 + I_4 = 0$
- 正常环流 $I_l = -I_1 = I_4$, 正常容性电流 $I_{a1} = I_2 - I_l$, $I_{c3} = I_l - I_3$, $I_{b2} = I_3 - I_2$ 。通常, 正常环流为几个安培, 正常的容性电流为几十毫安。
- 但是, 当主绝缘单相或两相故障时, 正常的三相容性电流相互抵消, 余下的为故障容性电流 I_x , 这时 $I_x = I_1 + I_4 \neq 0$,
- 而当护层绝缘发生多点接地故障时, 故障环流为 I_g , 这时也有 $I_g = I_1 + I_4 \neq 0$ 。

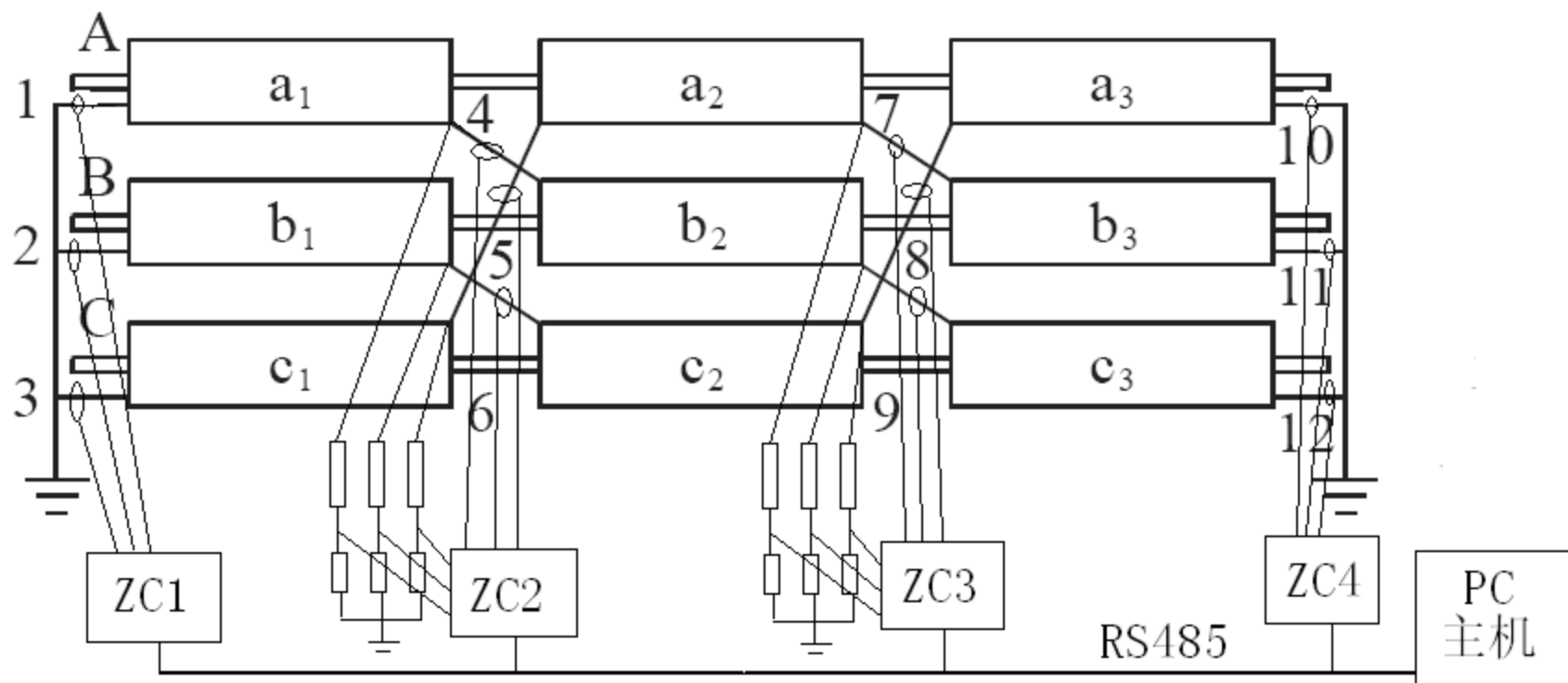
1.1 接地线电流法与环流法

电缆护套在交叉换位后，若电缆为正三角排列，且三小段的长度相等，可以保证护套内的磁感应环流为零。若电缆为水平排列，且三小段的长度相等，护套内只有较小的正常磁感应环流，但护套若发生多点接地故障，护套内将包含较大的故障磁感应环流。当电缆主绝缘故障时也将引起容性电流或泄漏电流增大。故若监测到护套内电流值发生异常，且 $I_1 + I_4 \neq 0$ ，可认为是电缆护套的多点接地引起的故障环流，或是电缆主绝缘引起的故障容性电流或泄漏电流增大，但却无法区分开这两种故障情况。

1.1 接地线电流法与环流法

如图h3所示，本文提出了一种除了监测护套电流外，再通过分压器监测护套感应电压，由感应电压与芯线电流的比值来判断电缆护套多点接地故障的新方法。可以通过计算机软件包的计算获知护套感应电压/芯线电流的理论值，当监测到 $I_1 + I_4 \neq 0$ ，同时感应电压实测值/芯线电流实测值变小时，说明护套有多点接地故障发生；当监测到 $I_1 + I_4 \neq 0$ ，但感应电压实测值/芯线电流实测值正常时，说明电缆的主绝缘发生了受潮或老化故障。

1.1 接地线电流法与环流法



图h3 金属护套感应电压在线监测接线示意图

1.1 接地线电流法与环流法

- 上面的计算公式 $I_1 + I_4$ 中的电流 I_1 、 I_4 是向量，其他计算公式的各个的电流也是向量值，向量值包括模值和相位角，要进行计算向量计算，就必须对传感器信号进行同步采样，只有在同一时刻求解相量值才有意义。利用脉冲同步技术或RS485通信同步技术，使用单片机数据采集仪ZC1~ZC4可以实现上述数据的同步采样。

1.2 局部放电法

- 局部放电测量是高压电缆的常规接受试验项目，该试验常常在制造厂完成，以发现制造过程出现的绝缘缺陷。但电缆接头一般在现场制作，因此，在现场进行电缆的局部放电试验是非常必要的。现场试验的加压方式有0.1Hz法、串联谐振法、振荡波法、工频试验变压器法、运行电压法。电缆投入运行后，为了及时发现异常现象，掌握电缆绝缘的老化状态，对电缆进行局部放电在线监测和定位具有非常重要的意义。

1.2 局部放电法

- 电缆局部放电在线监测方法可根据信号采集方式，分为电磁耦合法和电容耦合法；根据采集信号频带，分为高频HF法（频带在3M~30MHz）甚高频VHF法（频带在30M~300MHz）和超高频UHF法（频带在300M~3000MHz）；根据采集信号的传输方式，分为电光法（电光变换与光纤通信）和非电光法（同轴电缆传输方式）。传感器还有差动式（或桥式）和非差动式，侵入式和非侵入式之分，显而易见，差动式传感器抗外来干扰的能力强，非侵入式传感器容易安装，现场应用时将更受欢迎。

1.2 局部放电法

- 常规交联聚乙烯(XLPE)电缆局部放电测量多采用IEC60270法，但是该法的测量频带较低，通常在几十到几百kHz范围内，易受背景干扰的影响，抗干扰能力差。理论研究表明，XLPE电力电缆局部放电脉冲包含的频谱很宽，最高可达到GHz数量级。因此，选择在信噪比高的频段测量能避免干扰的影响。

1.2 局部放电法

- 目前国内外已把电缆局部放电测量的焦点转移到甚高频和超高频测量上。另外，由于电缆中间接头绝缘结构复杂，影响其绝缘性能的原因多，因而发生事故的概率远远大于电缆本体。同时在电缆中间接头处获取信号的灵敏度比从电缆本体获取信号的灵敏度要高且容易实现，因此通常电缆局部放电在线检测方法亦多侧重于电缆附件故障的检测。

1.2 局部放电法

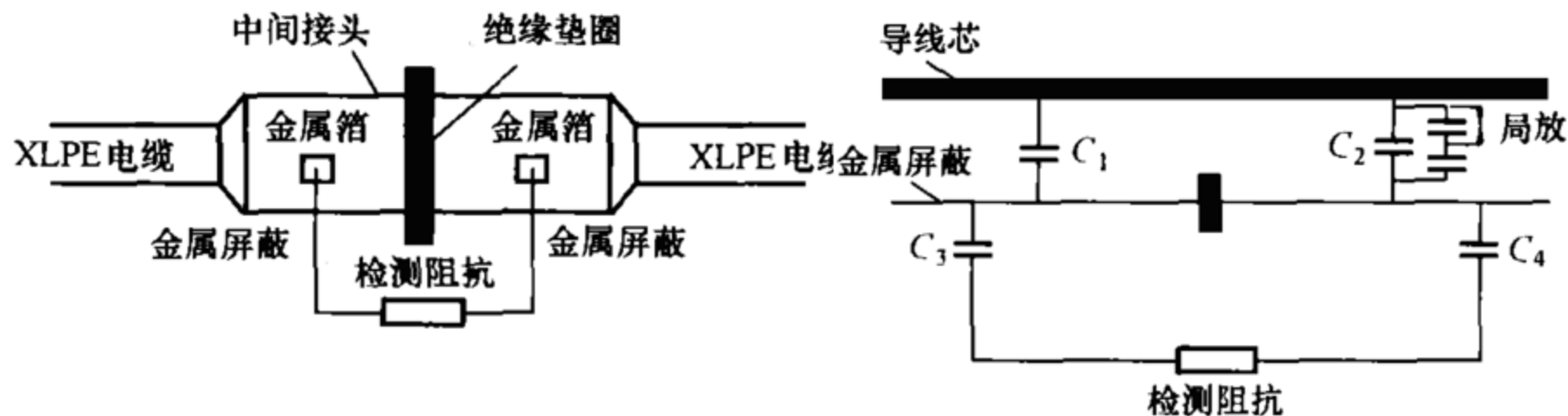
■ 1.2.1 主要检测方法简介



- 迄今为止，国内外用于电缆局部放电检测的方法有很多。主要的检测方法有（1）差分法；（2）方向耦合法；（3）超高频电感耦合法；（4）超高频电容耦合法；（5）REDI法；（6）电磁波法；（7）电磁耦合法。

1.2 局部放电法

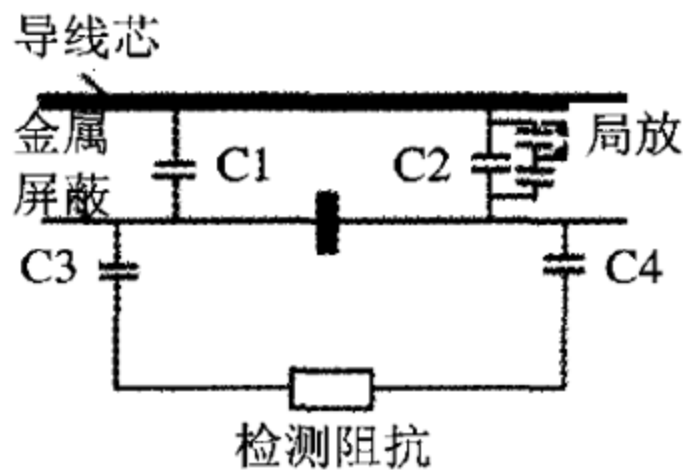
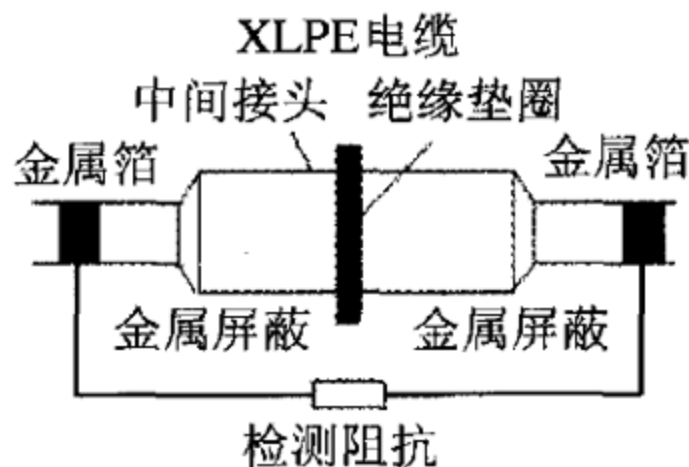
- (1) 差分法是日本东京电力公司和日立电缆公司共同开发的一种检测方法



- 图b1-1 差分法检测结构示意图和原理图

1.2 局部放电法

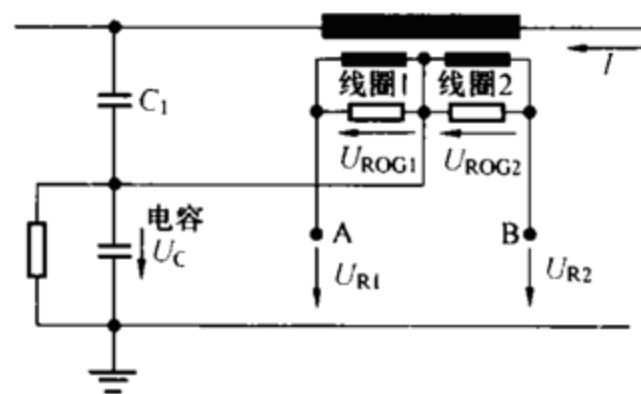
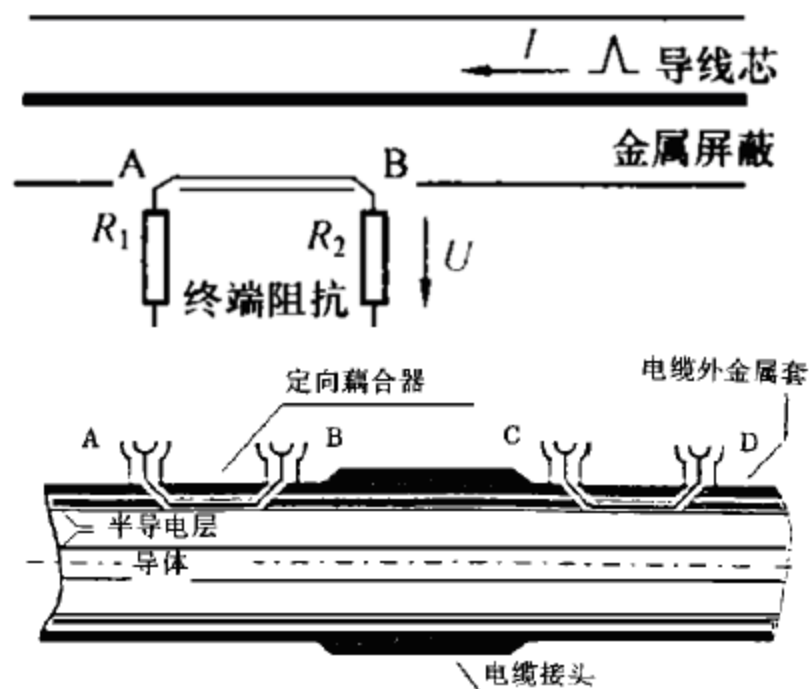
■ 差分法的另一种用法



■ 图b1-2 差分法检测结构示意图和原理图

1.2 局部放电法

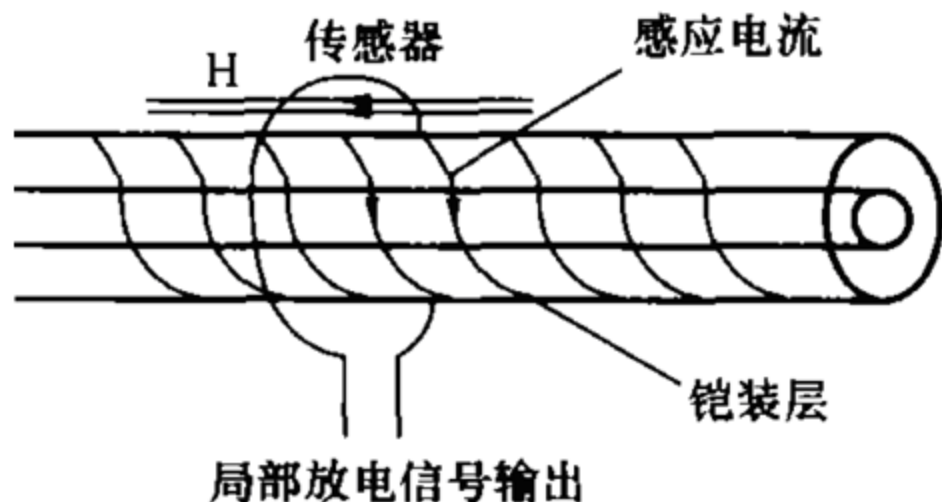
■ (2) 德国柏林400kV XLPE电缆局部放电在线监测系统是应用方向耦合法的监测系统



■ 图b3、b4、b5为方向耦合器结构图，方向耦合器接线图及两个方向耦合器

1.2 局部放电法

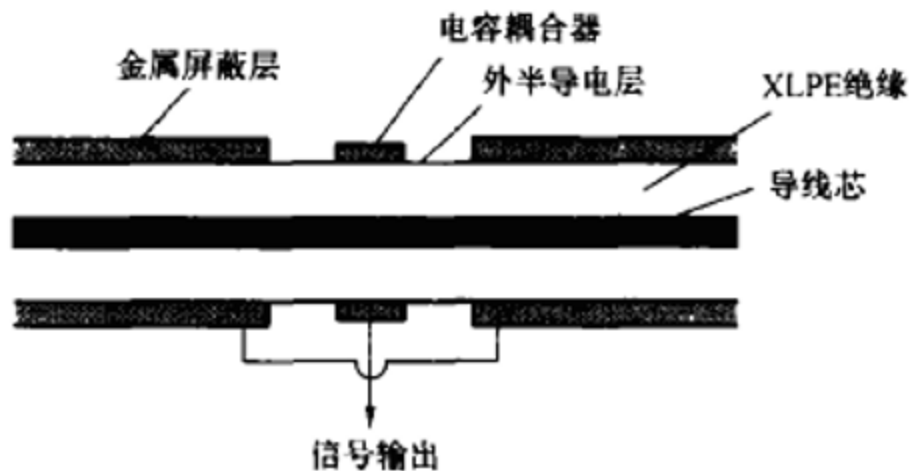
- (3) 超高频电感耦合法是荷兰提出的一种利用线圈作为传感器的对螺旋状金属屏蔽电缆进行局部放电在线检测的方法



- 图b6 超高频电感耦合器的示意图

1.2 局部放电法

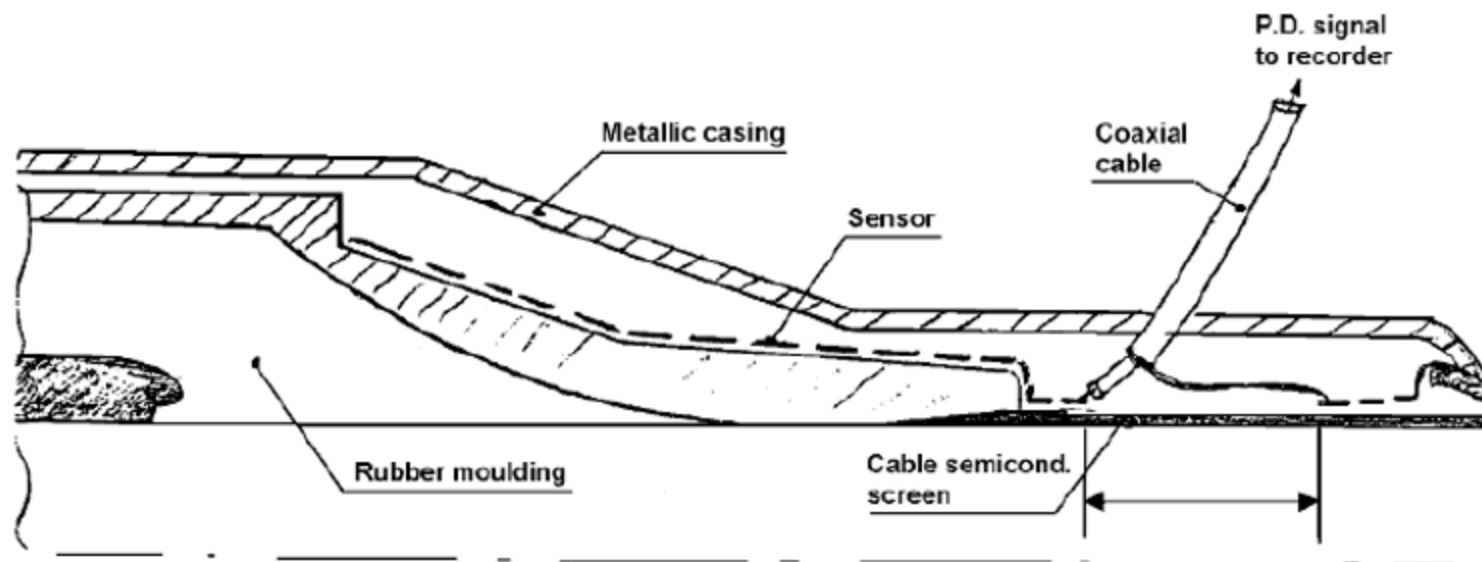
- (4) 超高频电容耦合法是由英国南安普敦大学、英国电网公司和西安交通大学共同研究的一种XLPE电缆局部放电在线检测方法



- 图b7 超高频电容耦合器示意图

1.2 局部放电法

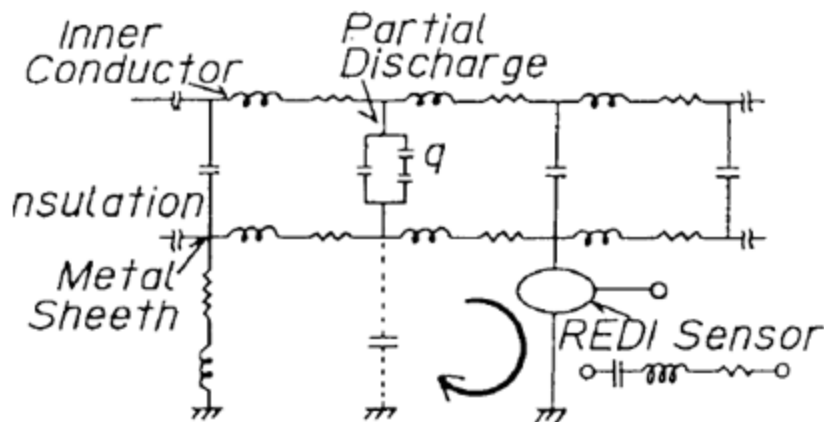
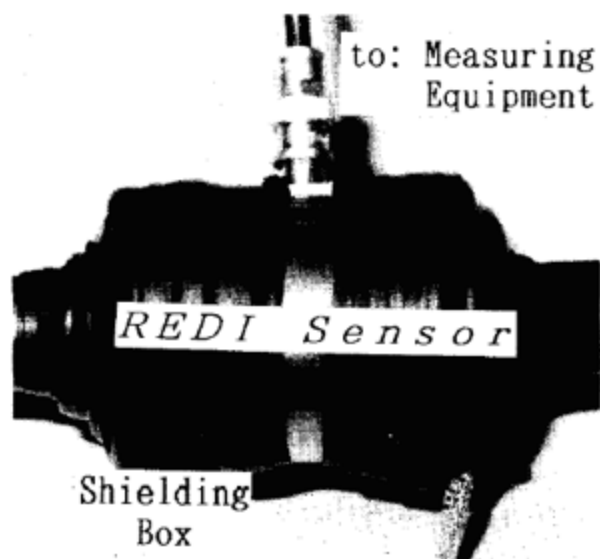
对于中间接头，可以在其内部的半导体层上贴金属薄膜作为电容耦合探头。



图b7.1 在中间接头内部的半导体层上贴金属薄膜作为电容耦合探头

1.2 局部放电法

- (5) REDI(resonance-type partial discharge)法是日本提出的一种检测电缆接头局放电方法



- 图b8、b9 REDI探头结构和等效电路图

1.2 局部放电法

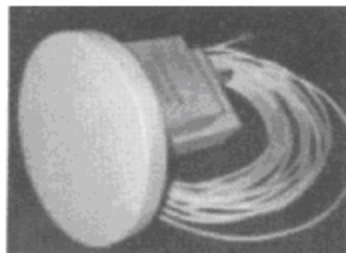
■ (6)电磁波法



- 电磁波法是目前局部放电检测的一种新方法，该方法通过天线传感器接收局部放电过程辐射的电磁波，实现局部放电的检测。当电磁波法的频率达到超高频范围，即**300M~3GHz**时，可简称**UHF**法。**UHF**法在**GIS**、变压器、电缆和发电设备的局部放电检测中获得了应用。

1.2 局部放电法

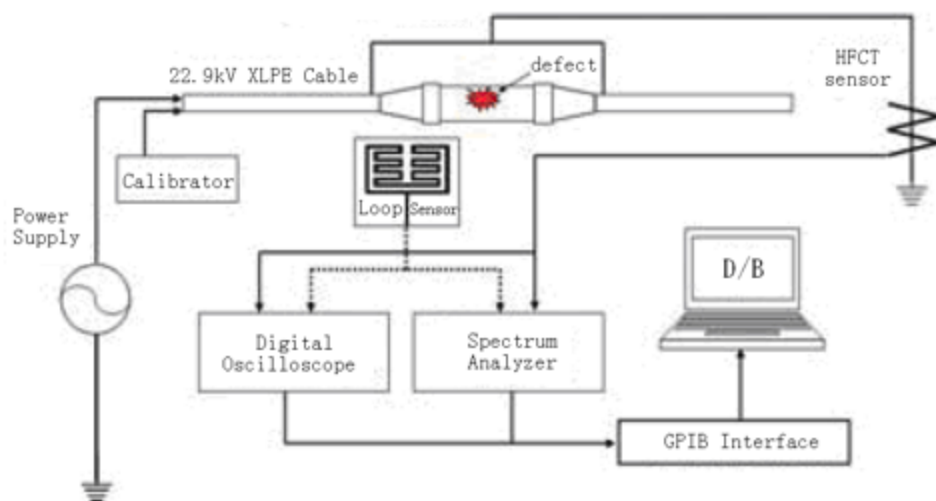
- 华北电力大学研制的用于电缆接头局部放电测量的UHF传感器见图b11。



- 图b11 UHF 传感器
- 该UHF传感器为一带宽500~1500 MHz 的阿基米德螺旋天线, 天线前置放大器带宽根据天线的频带宽度设计, 增益为50 dB , 放大器具有超高频和检波两个输出通道, 检测时主要用检波(即检测到的UHF信号的幅值包络线) 通道进行测量, 如此可降低对采样率的要求。UHF适合对运行中的XLPE电缆绝缘接头进行局部放电在线监测。

1.2 局部放电法

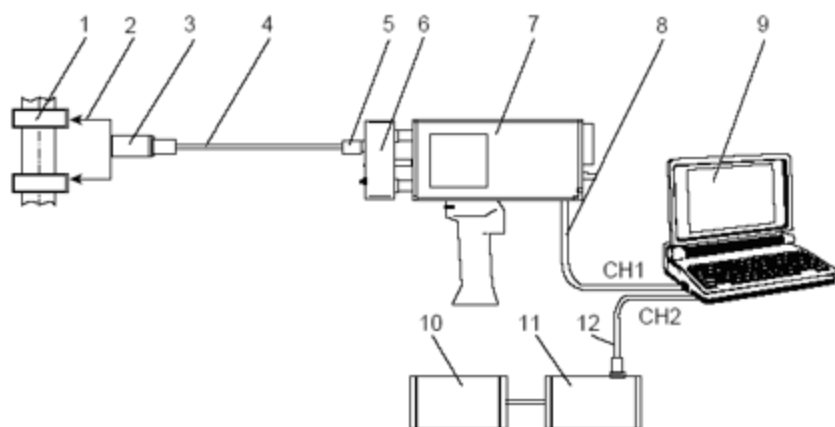
- 韩国的电磁波法是在印刷电路板上制作平面回路天线（Planer Loop antenna），如图b12所示



- 图b12 使用回路天线和高频Rogowski线圈测量电缆的局部放电

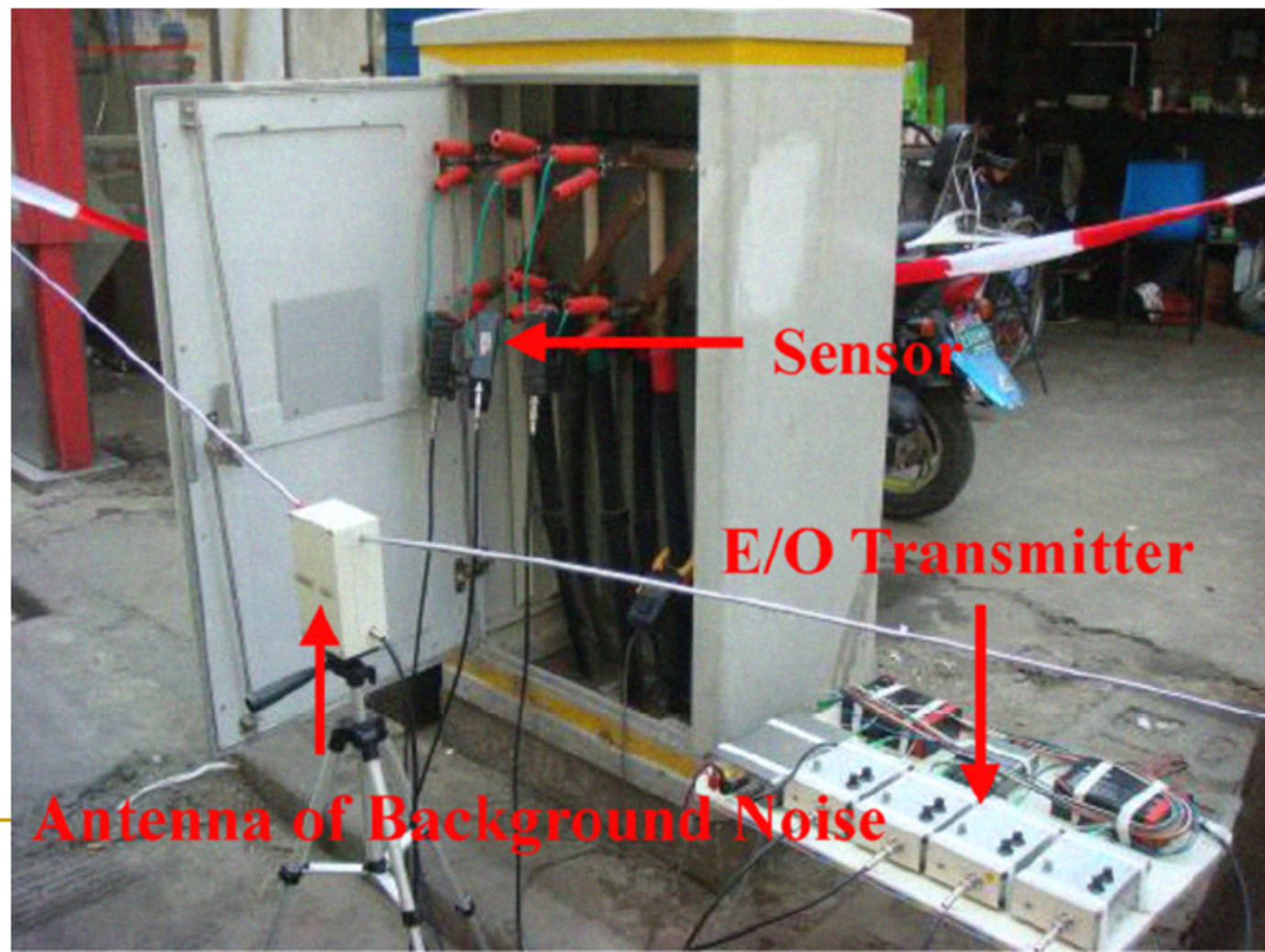
1.2 局部放电法

- 德国使用300MHz~800MHz超高频测量GIS电缆端头的局部放电，其UHF探头的安装及测量系统组成下面的两幅图



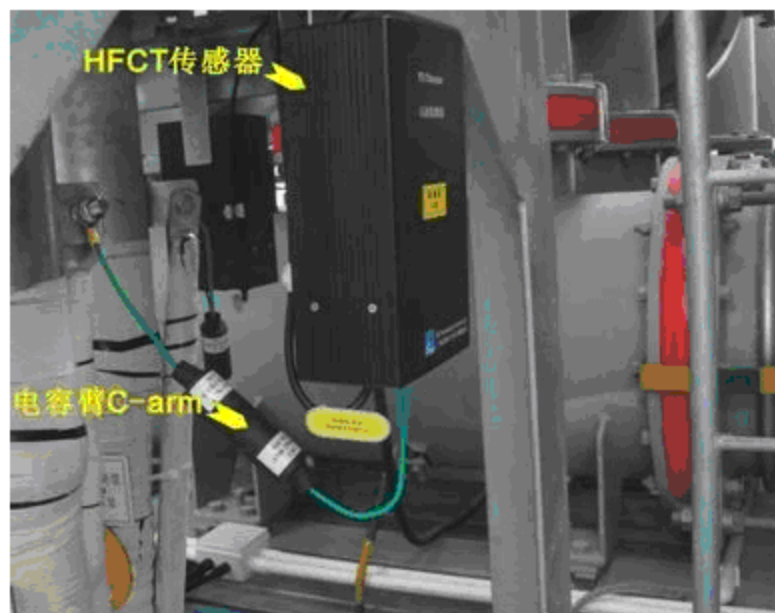
1.2 局部放电法

- 上海电力局电缆输配电公司使用便携式电力电缆局部放电在线监测仪器，开展 PD 信号的辨认和分析研究工作。

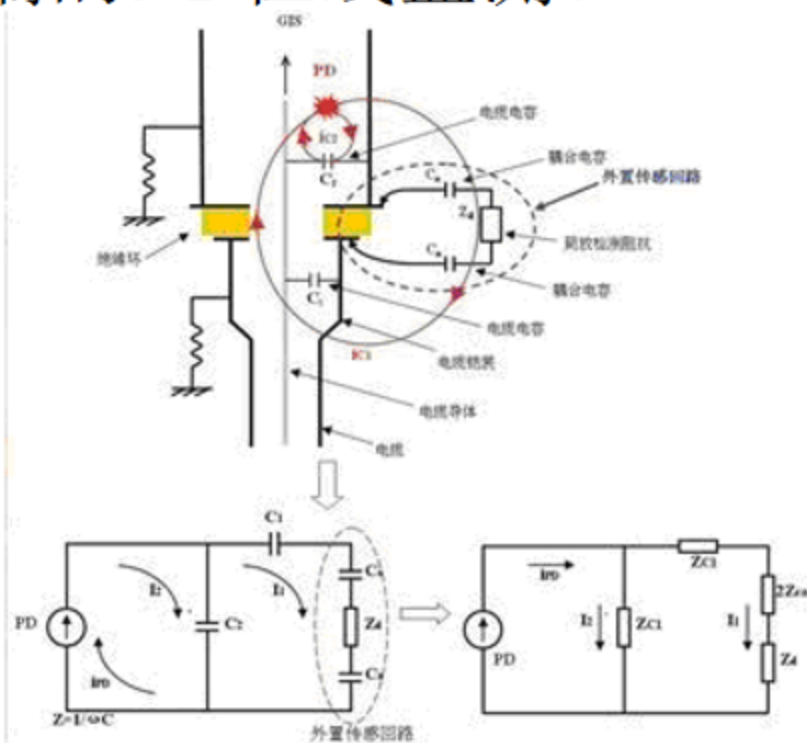


1.2 局部放电法

- 还可以使用便携式电力电缆局部放电在线监测仪器，开展 GIS 电缆终端的PD在线监测。



传感器安装在GIS电缆进线终端



GIS电缆终端示意图及回路分析图

1.2 局部放电法

■ (7) 电磁耦合法

- 电磁耦合法是一种测量电气设备局部放电的有效方法。这种方法较早应用于发电机、变压器的绝缘监测，而将电磁耦合法应用于**XLPE**电缆的局部放电检测是近几年才开始的。电磁耦合法通常采用带铁氧体磁芯的宽频带罗戈夫斯基线圈型电流传感器，主要测量位置在电缆终端金属屏蔽层接地引线处。此外测量位置还可在中间接头金属屏蔽连接线、电缆本体上和三芯电缆的单相电缆上等位置。

1.2 局部放电法

■ 英国高压电缆PD在线监测

On-line measurements

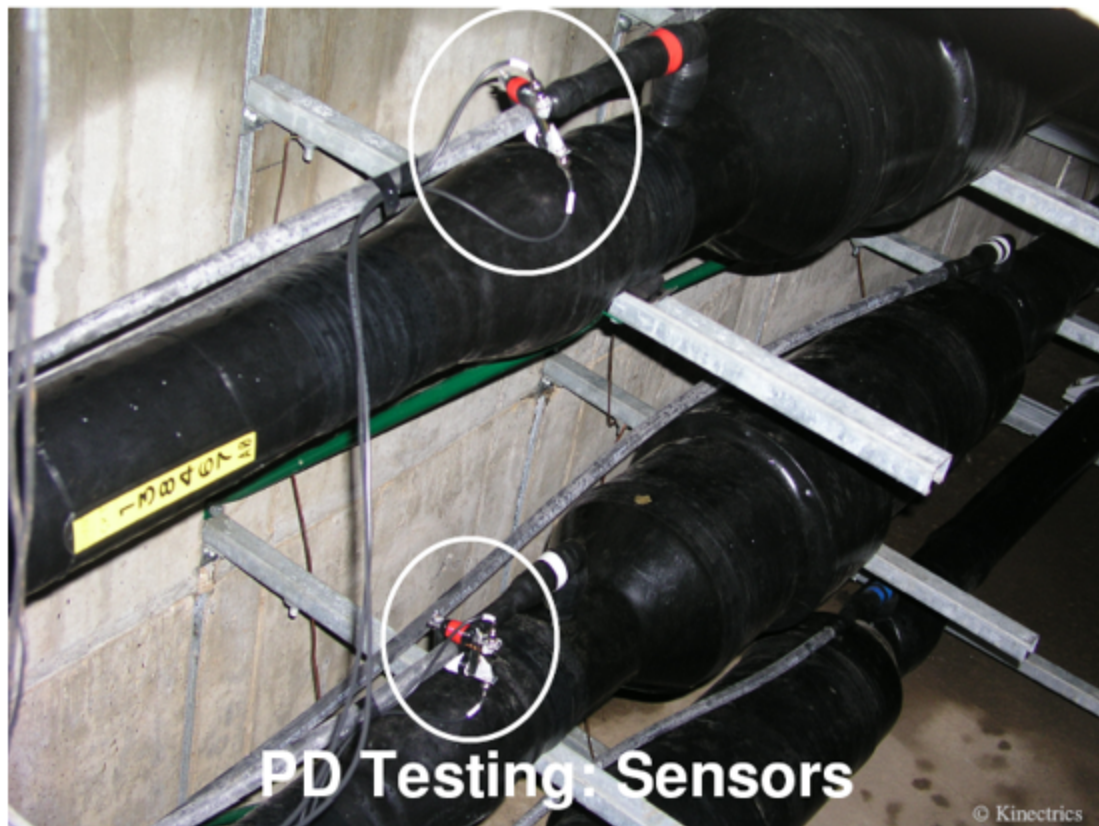


- Inductive sensors connected externally to terminations

□ 图b16-1 电磁耦合的电流传感器安放位置图

1.2 局部放电法

■ 加拿大的EHV电缆PD在线监测



□ 图b16-2 电磁耦合法的电流传感器安放位置图

1.2 局部放电法

■ 加拿大、德国电缆PD在线监测



□ 图b16-3 电磁耦合法的电流传感器安放位置图

1.2 局部放电法

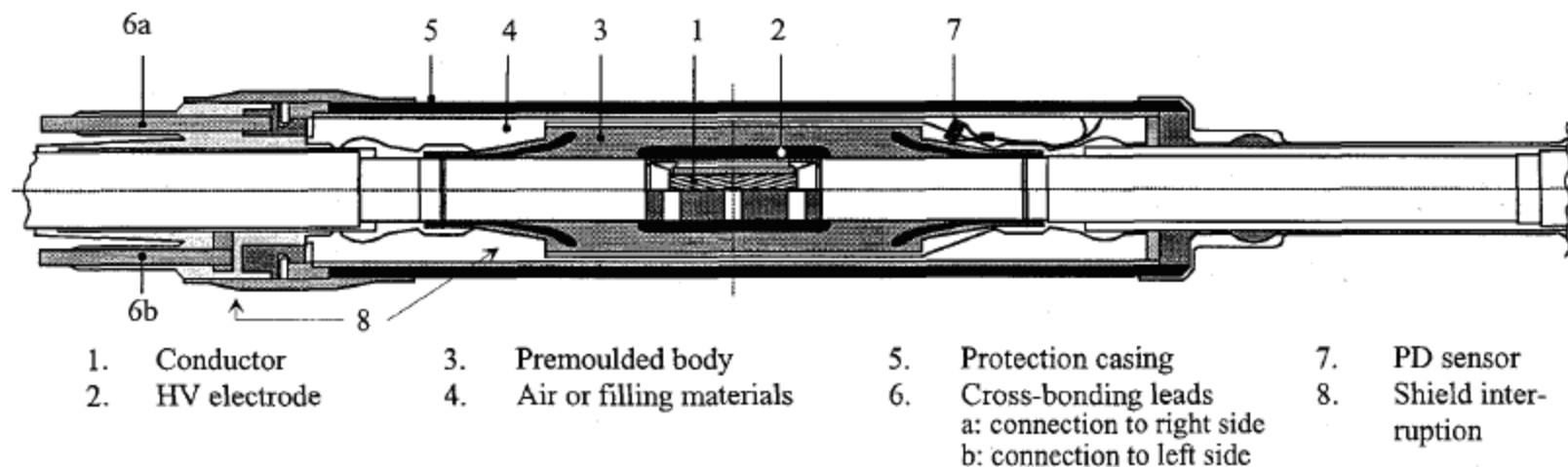
- 使用接地箱内的HFCT对电缆PD进行在线监测



□ 图b16-4 电磁耦合法的电流传感器安放位置图

1.2 局部放电法

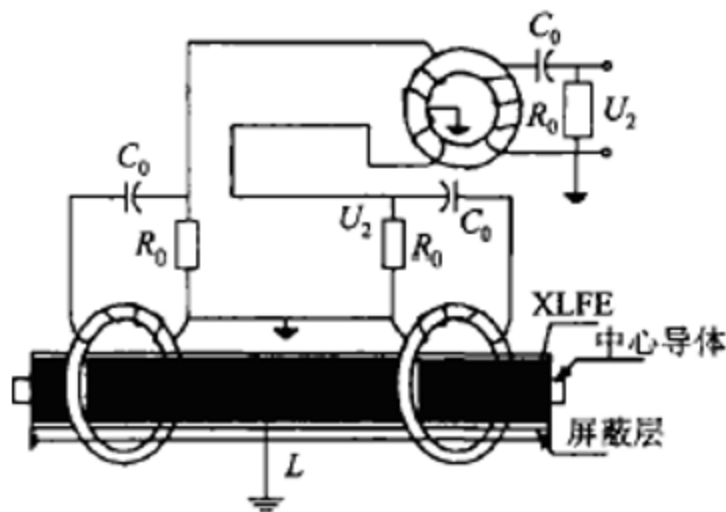
- 电磁耦合法用于XLPE电缆局部放电在线监测比较成功的例子是1998年瑞士研制的170 kV XLPE电缆局部放电在线监测系统



- 图b16-5 电磁耦合法的电流传感器安放位置图

1.2 局部放电法

- 改进型Rogowski线圈结构的宽频电流传感器可提取差动信号，抗干扰能力好,见下图



- 图b17改进型传感器连接线路图

1.2 局部放电法

- 电磁耦合式传感器的优点是体积小、便于携带、适合现场操作。例如,新西兰的研究人员用钳式传感器和手提式数字示波器到现场进行局放检测。若要长期在线检测,可将传感器永久地安装在电缆线路的若干个接线盒处,操作人员只需带上带有数据采集卡的手提式电脑,定期到现场进行数据的采集和分析即可;还可以将若干个位置处的检测信号转换为数字或光信号,用通信的方式传输至总控室进行实时监视与分析,以便及时发现问题。

1.2 局部放电法

- 电磁耦合式传感器通常为宽频带HF或VHF罗戈夫斯基Rogowski线圈电流传感器，它可以监测到局放产生的高频电流信号。由于其便于安装的特点，近年来在国内外获得了广泛应用。例如：美国研制了10k~200MHz的宽频带Rogowski钳形传感器。另外，商业化的电流传感器频带在100k~100MHz，见图b19 Commercially Available sensor，前50MHz是比较平坦的，研制的U型电流传感器（开窗尺寸1.5-6 inch）频带在100k-300MHz，见图b19 DTE PD sensor，其中的100k-50MHz使用电感耦合，更高的频带使用电容耦合。

1.2 局部放电法

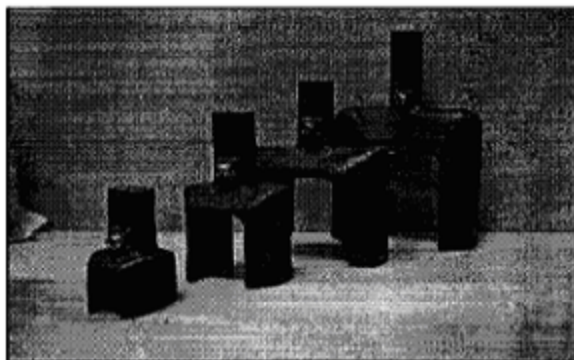
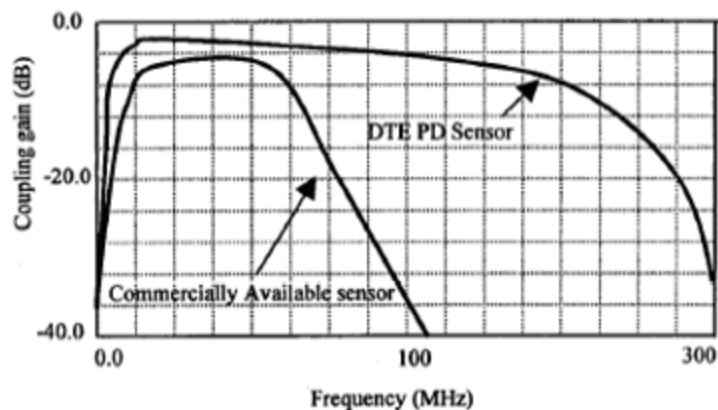


Figure 1 DTE PD sensor.



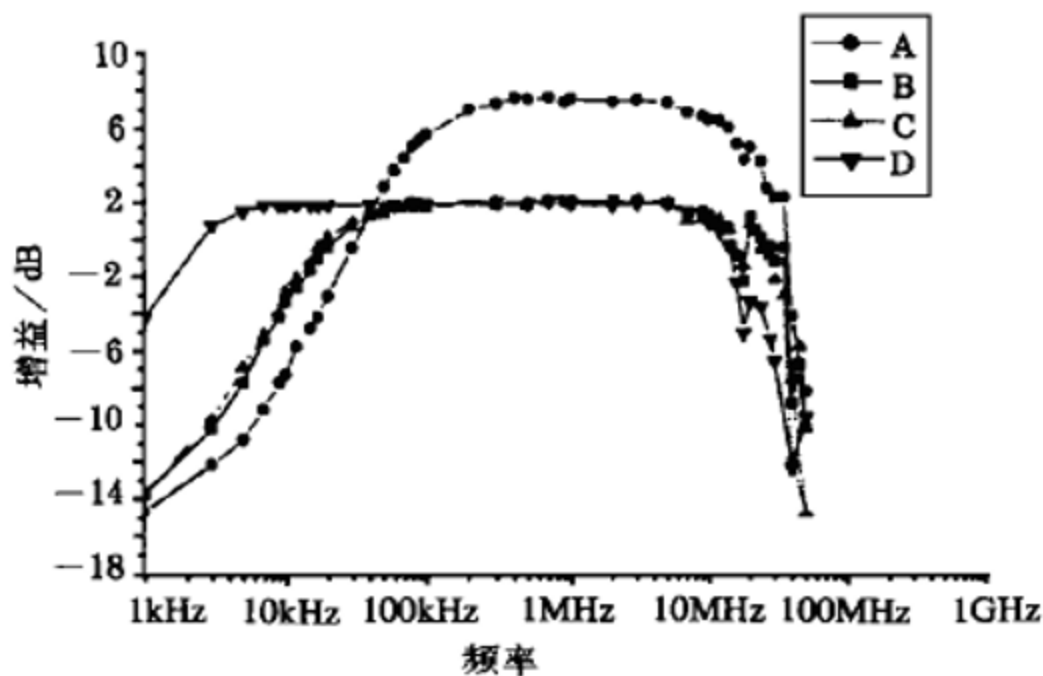
- 图b19 U型电流传感器及其频谱特性

1.2 局部放电法

- 澳大利亚分别使用了100k~200MHz和40MHz宽频带Rogowski传感器，而荷兰分别使用了带宽为100MHz和20MHz的Rogowski传感器。
- 国内西安交通大学、华北电力大学、浙江大学、广东佛山南海供电局、上海市东供电公司、广州蓄能水电厂上海交通大学等单位对宽频带的Rogowski线圈电流传感器进行了研究

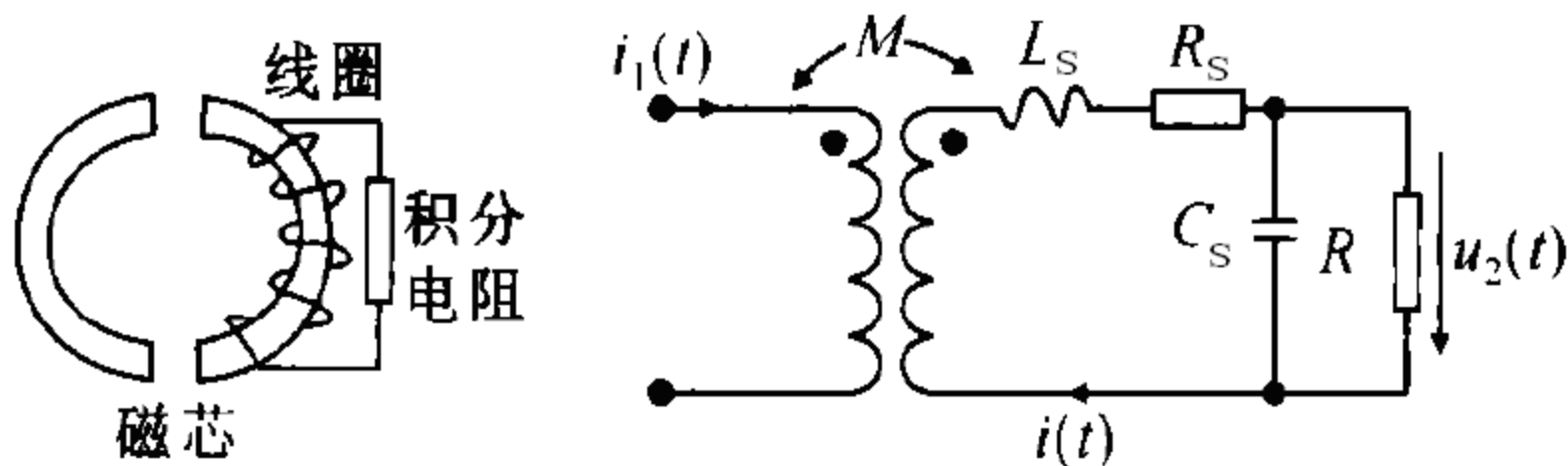
1.2 局部放电法

- 1.2.2 国内电磁耦合传感器综述
- 西安交通大学、浙江大学设计的3个镍锌磁芯材料(NiZn-200)的电流传感器和 1个锰锌铁氧体材料的电流传感器(传感器磁芯为环形,截面为矩形)幅频特性, 如下图所示



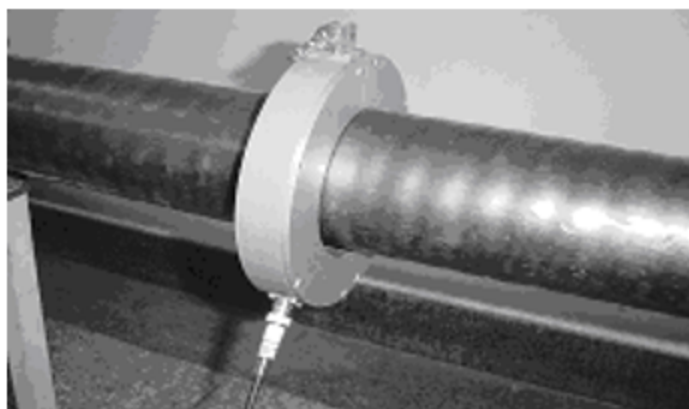
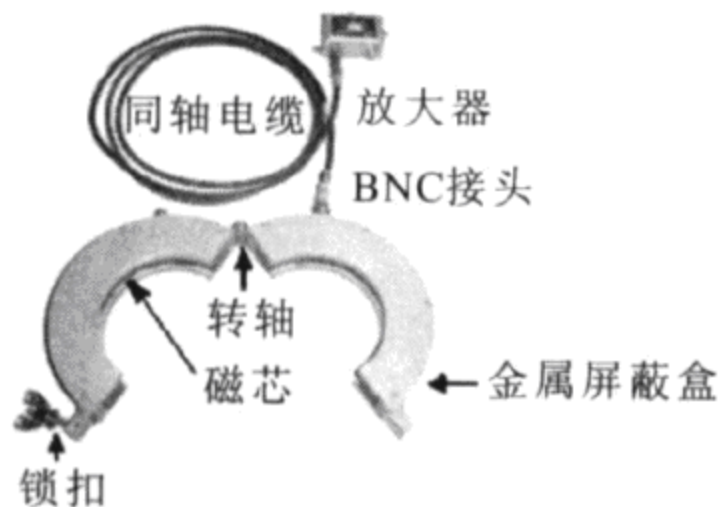
1.2 局部放电法

- 基于电磁耦合检测原理,华北电力大学研制了一个用于110 kV XL PE 电缆局放在线检测的VHF 宽频带钳型电流传感器,其等效电路原理见下图。



1.2 局部放电法

- 该电流传感器主要由磁芯、线圈、金属屏蔽盒等组成，两半环屏蔽盒两端各用一转轴和一锁扣连接,使屏蔽盒能任意开合,方便传感器(工作频率3~60 MHz) 套在110kV XLPE 电力电缆上，其实际结构见下图



1.2 局部放电法

- 1.2.3 PD信号波形分析、模式识别与放电源定位
- 应用UHF频段的电磁波可以对GIS中的PD进行定位。在GIS中的PD会产生电磁波，该电磁波沿着母线传播而形成同芯轴向波，由于GIS的母线筒直径较大，传播的电磁波会形成TEM波及其高次模波，因此，在GIS中的PD定位要使用UHF电磁波 (400M to 1000 MHz)。架空线相当于一个天线，但它接收到的UHF电磁波很难进入GIS，这是因为UHF电磁波在连接GIS与架空线的套管上衰减严重，这使得我们容易区分GIS内的PD信号和外部的电磁噪声。在挤塑和油纸电缆中，PD频率分量为200k~GHz，当PD脉冲沿着电缆传播时，其高频分量衰减严重，使用电流传感器只能检测到<100MHz（VHF）的PD分量。

1.2 局部放电法

- 对于靠近变电站的电缆端头和电缆本体，其**PD**测量会受到变电站及架空线的电晕放电等各种电磁干扰，但对于距变电站较远的隧道电缆受到的干扰较小。传统的**PD**相位相关技术和频谱分析技术很难排除这些干扰，目前，采用脉冲定位技术，结合匹配滤波与波形识别技术，是电缆**PD**在线监测中排除电晕等干扰比较理想的方法，荷兰在这一方面做了大量研究工作，在中压纸绝缘铅护套电缆**PILC**上取得了一些成果。

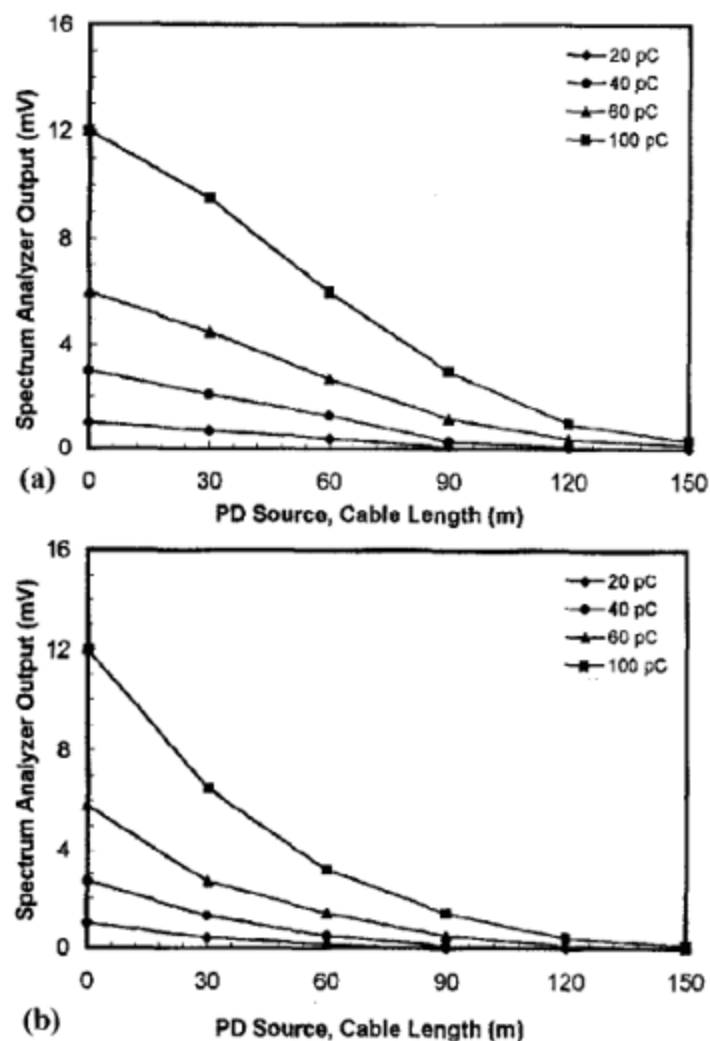
1.2 局部放电法

- 对采集到的电缆局部放电信号还需要传输到数据处理单元进行数字信号处理，以提取有效的局部放电信息。若传感器到数据处理单元的距离较长，可以使用电光晶体和光纤系统传输该信号，虽然电光晶体和光纤系统的抗干扰能力强但成本较高，日本、香港和英国在该技术上处于国际领先地位，例如：港日合资智友公司研制的**PDM**电缆局部放电在线检测装置在北京电力工程公司、湛江电力有限公司、上海电缆输配电公司等数家单位获得应用。

1.2 局部放电法

- 如前所述，宽频带Rogowski 线圈电流传感器是一种无侵入式传感器，在现场便于安装和使用，但是由于各种电磁干扰都会通过宽频带Rogowski 线圈电流传感器耦合到信号中来，往往使局放信号被淹没在强大的背景噪声中，故需要用复杂的数字信号抗干扰算法提取与识别微弱的局放信号，同时，通过分析局部放电波形和时延特性，还可以实现局部放电源的定位。

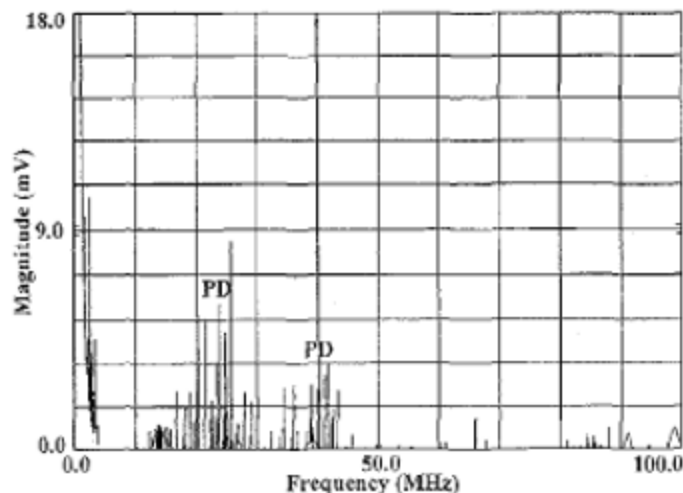
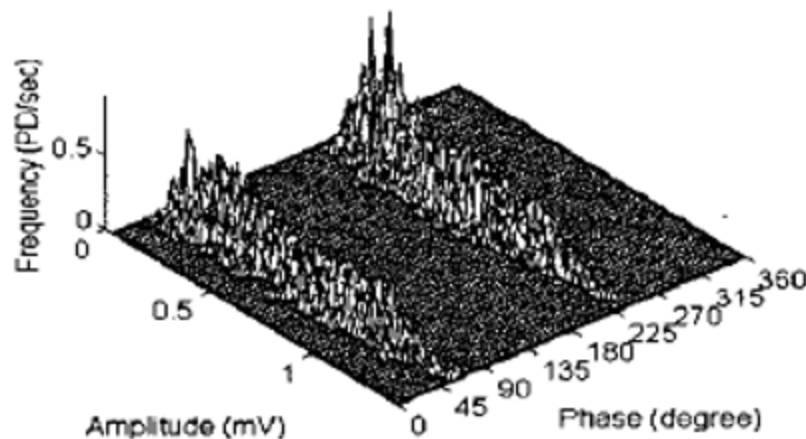
- (1)PD信号波形分析
- 在不同电荷量下,
- 50MHz和100MHz
- PD脉冲信号的衰减量
- 与电缆长度的关系



图d1 PD脉冲在13.2 kV EPR电缆中的衰减特性 (a) 50 MHz PD,(b) 100 MHz PD

1.2 局部放电法

- (2) 电缆局部放电信号识别
- 两个传统的PD识别技术，相位分析和频谱分析技术



1.2 局部放电法

■ (3)局部放电源定位

- 在检测到电缆局放时，如果能对局部放电源进行定位，那么局部放电活动测量的实效性就会大大提高，故局部放电源定位技术成为近年来国内外的研究热点。对于交叉互联电缆接头的局部放电定位，如前所述，可以采用UHF探头检测电磁波的方法，还可以采用其他的方法，例如：英国通过实验发现，通过靠近电缆接头的一个超高频电容式探头，来检测PD信号的能量，可以找出产生局部放电的电缆接头。北京电力公司也进行了实验研究，发现采用多个HFCT探头，通过分析8 MHz、16 MHz、24 MHz、32MHz PD信号在护套交叉互联的电缆接头的传输规律，也可以找出局部放电源的电缆接头

1.2 局部放电法

- 对于电缆本体的局部放电定位，通常采用的方法为时域反射（**Time-Domain Reflectometry, TDR**）法，当局部放电发生时，局放脉冲从放电点向电缆两侧传播（平均速度约**150-160m/μs**）。首先到达测量端的脉冲是直接向该方向传播的脉冲（直达波），而完成局部放电定位，还要测知向相反方向传播后被反射回来的脉冲（反射波），理想状态下，如果直达波和反射波都能被识别，就可很容易地确定局部放电位置。即计算两个脉冲的时间差**Difference in Time-Of-Arrival (DTOA)**，就可确定局部放电位置。

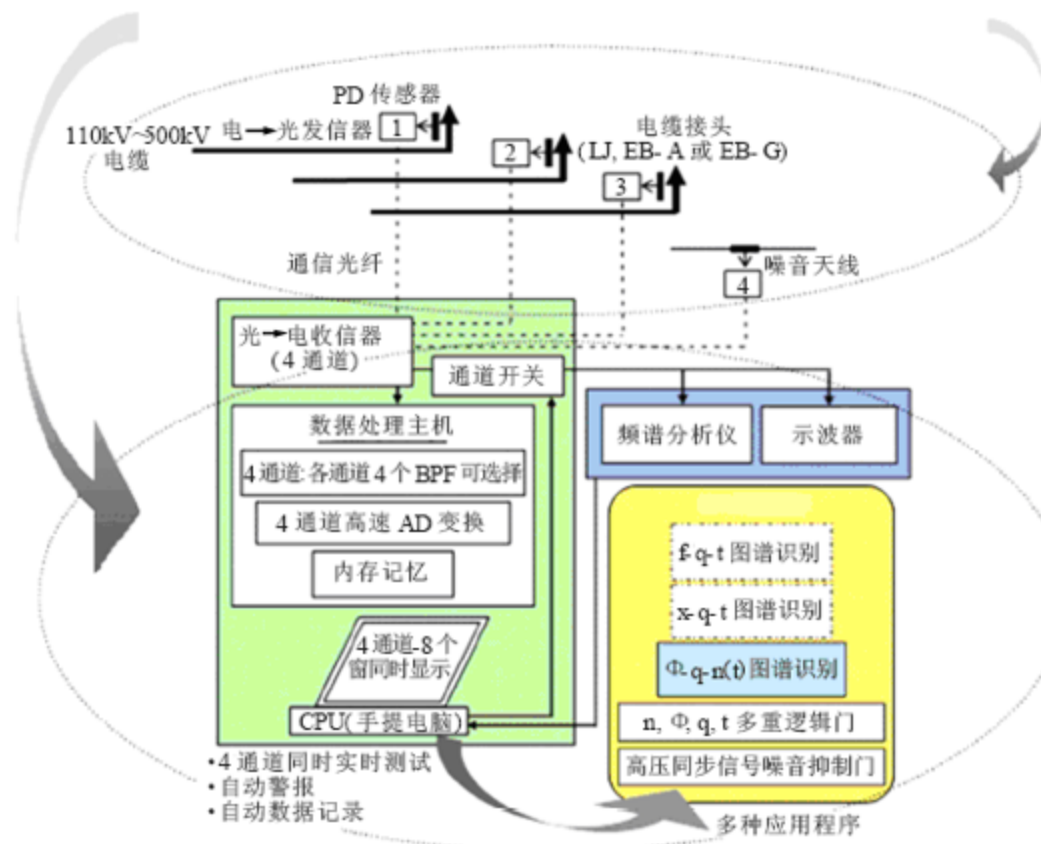
1.2 局部放电法

- 国内外对离线电缆（电缆两端处于隔离状态）局部放电定位多采用这种简单的波反射技术。这样，直达波和反射波两路PD信号可以在电缆一端获取，使得两路数据采集和时差D_{TOA}计算容易完成。但电缆局放在线监测和定位中，电缆两端相距几百米，对电缆两端传感器拾取的PD信号的数据采集，需要同时触发，或有一个共同的时间基准才能进行时差D_{TOA}的计算。要实现电缆两端传感器的同步数据采集是很困难的。

1.2 局部放电法

- 解决这一难题的办法目前有五个，即：电光传输方式；同步收发仪；同步脉冲技术；GPS技术；原子时钟同步技术。
- ①电光传输方式
- 将电缆两端安装的外置传感器的电气模拟信号先经过选频放大，放大后的信号经调制后由光纤传到测试仪，再在测试仪解调还原成电信号，最后将电信号经A / D转换送到内存，由于信号在光缆的传输时延一样，所以在计算时差 ΔT 时可以不考虑光缆时延。如图d11所示，香港智友公司传感器即采用这种电光传输方式

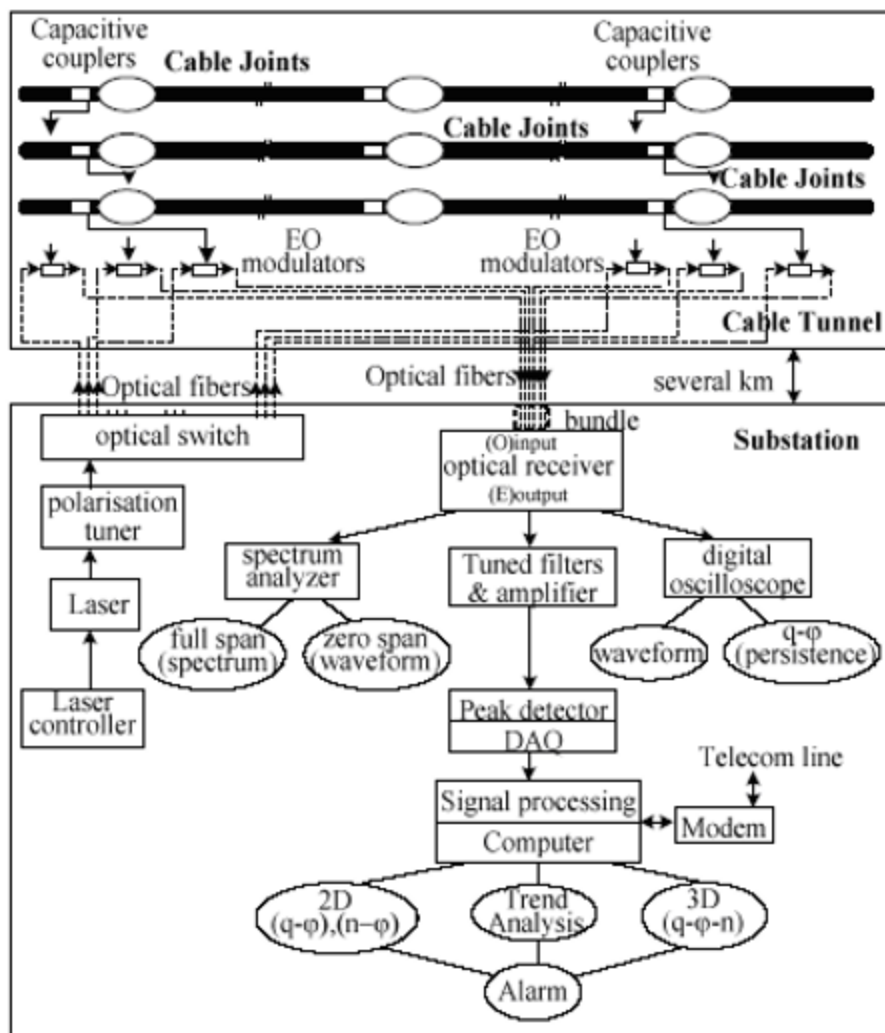
1.2 局部放电法



■ 图d11香港智友公司携带式局放测试系统

1.2 局部放电法

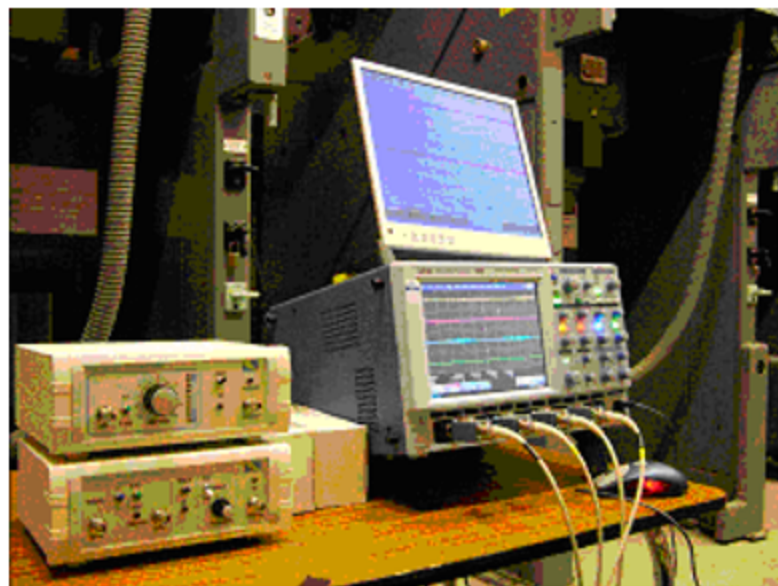
- 英国南安普顿大学和美国开发的PD在线监测系统为：将高频电容耦合的电气模拟信号通过电光晶体（铌酸锂 LiNbO_3 ）转化为光学模拟信号，再将光学模拟信号通过光纤传输到同一地点后进行同步A/D数据采集。使用铌酸锂（ LiNbO_3 ）进行电光变换并使用光纤通信技术时，探头无需供电，如右图所示



1.2 局部放电法

- ②同步收发仪
- 使用单端测量时，由于反射的脉冲太弱，或存在其它反射脉冲、噪音以及波形失真带来的干扰，简单的波反射技术很难实现局放点的定位，因此，若能人工增大反射脉冲强度，定位就会容易得多。图d13所示为英国IPEC公司OSM-Longshot 电缆局部放电在线检测系统，图d14所示为用于33kV XLPE电缆检测的电流传感器。

1.2 局部放电法



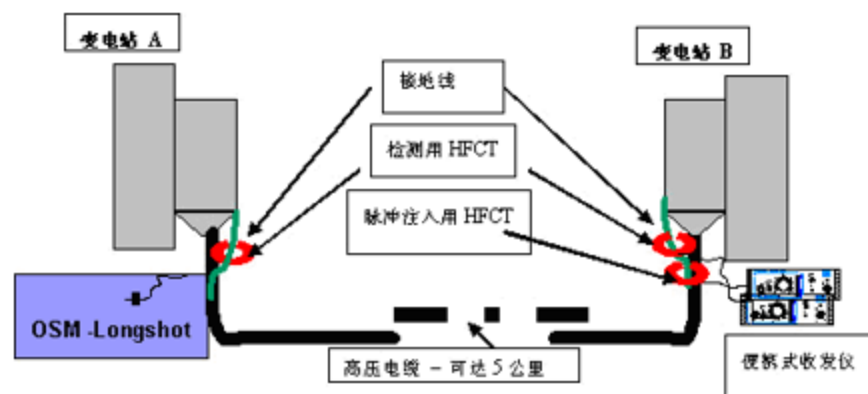
图d13 英国IPEC公司OSM-Longshot 电缆局部放电在线检测系统。



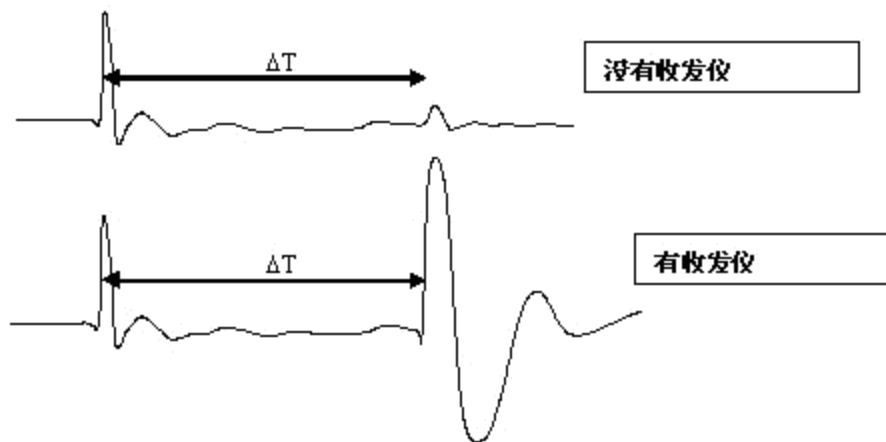
图d14 用于33kV XLPE电缆检测的电流传感器

1.2 局部放电法

- 图d15所示为使用同步收发仪进行电缆局部放电定位的示意图。
- 图d16所示分别为使用和不使用同步收发仪两种情况下进行电缆局部放电定位的结果。



图d15



图d16

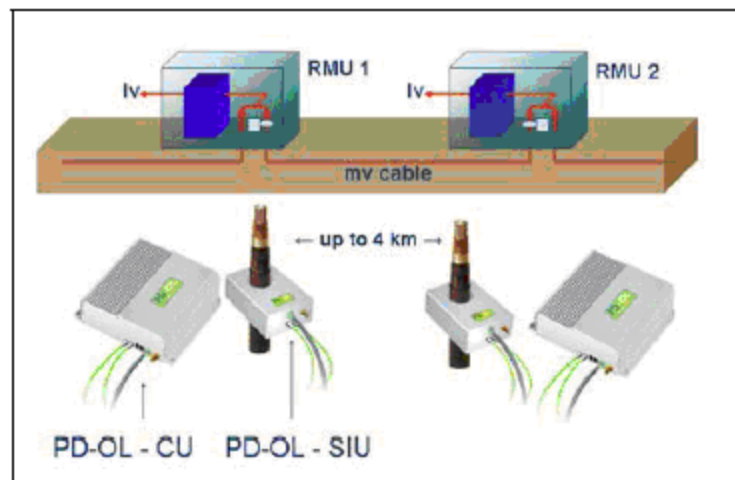
1.2 局部放电法

■ ③同步脉冲技术



- 如图d17所示，荷兰介绍的局部放电在线定位系统Partial Discharge On-line with Location (PD-OL)使用了同步脉冲技术。在电缆的两端各有一个控制单元(PD-OL –CU)和传感器/注入单元(PD-OL – SIU)，PD-OL –CU的作用是进行信号处理，数据采集与网络通信，PD-OL – SIU的作用是进行脉冲测量与注入。

1.2 局部放电法



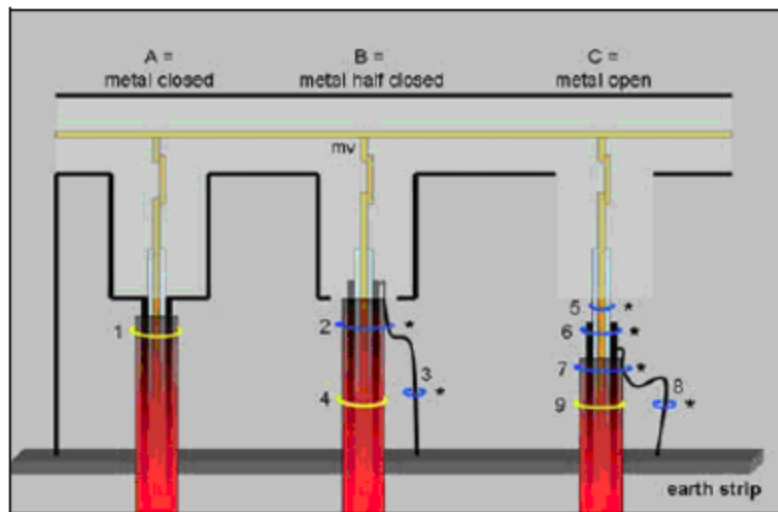
图d17 PD-OL 系统



图d18 安装在电缆上的商业化的电流传感器

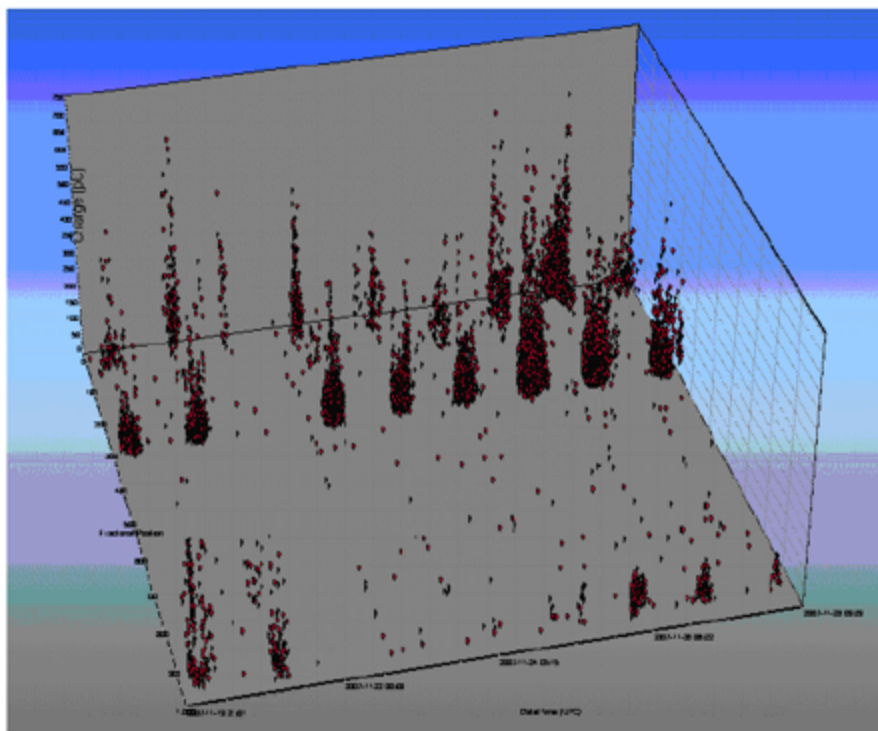
1.2 局部放电法

- 图d19所示为电缆头与开关的三种连接方式，A-金属全封闭，B-金属半封闭，C-无金属封闭，根据电流传感器位置的不同，它可以只测量导体的PD脉冲（传感器位置2，5，6，7），或只测量接地屏蔽内的PD脉冲（传感器位置3，8）。传感器位置3，5，8比较有效，2，6，7也是可以的。在2，3，5，6，7，8中，最好的是2，5，6，7，因为其共模干扰较小。



图d19 电流传感器安装位置

1.2 局部放电法

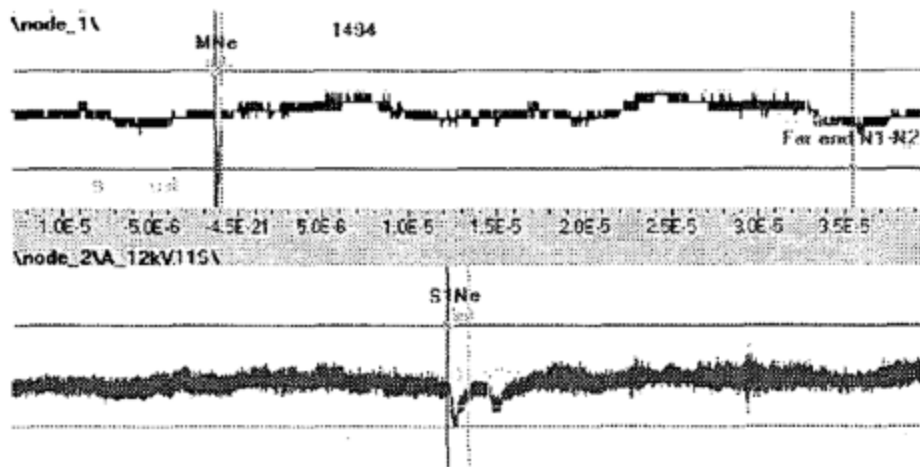


- 图d21 8天时间的 PD-OL 3D图，纵轴是放电量（pC），横轴是电缆长或DTOA（difference in time-of-arrival），水平轴是时间（天）

1.2 局部放电法

■ ④GPS同步技术

- 在电缆两端安装1M~10MHz带宽传感器，传感器之间的时间同步可由GPS系统来完成，定位准确度可以达到电缆总长（8km）的1%。

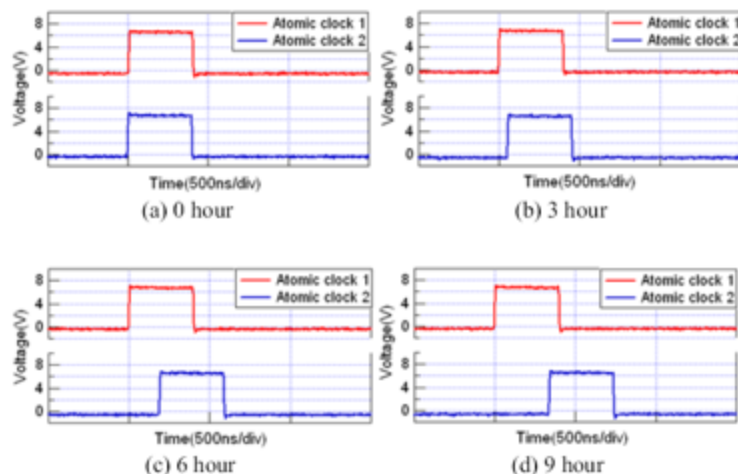


- 图d25 电缆两端接收到的某一个PD源的脉冲

1.2 局部放电法

■ ⑤原子时钟同步技术

- 可采用原子时钟来同步电缆两端的PD测量仪器



- 图d26 电缆两端接收到的某一个PD源的脉冲

1.3 电缆温度在线监测

- 实践证明电缆接头温度是反映接头质量的主要参数，当接头接触电阻增加时，其接头温度也必然升高。而长时间较高的温度，又会导致接头处绝缘老化。对接头温度进行连续监测，可及时分析和掌握接头质量的变化，发现可能的故障隐患。
- 电缆接头温度测量探头可以使用集成温度传感器，如**AD590**，或热电阻等。

1.3 电缆温度在线监测

- 通过监测电缆的温度异常，可以发现绝缘故障，例如：华中科技大学、华北电力大学、黑龙江双鸭山第一发电有限责任公司、山东大学，西安交通大学、上海电力等单位开展了电缆本体和接头温度在线监测方面的研究。
- 可以使用分布式光纤电缆温度在线监测系统。这种可测量电缆纵向温度的分布式温度传感器，使用单根光纤就可同时测量电缆多点故障时的温度。光纤本身可作为传感器，即使被加入电缆也不受分布电流的影响，而且还不需要维护。传感器的测温原理是电缆线路温度随着由激光脉冲送入光纤产生的喇曼散射光的亮度而变化。

光纤电缆温度在线监测系统

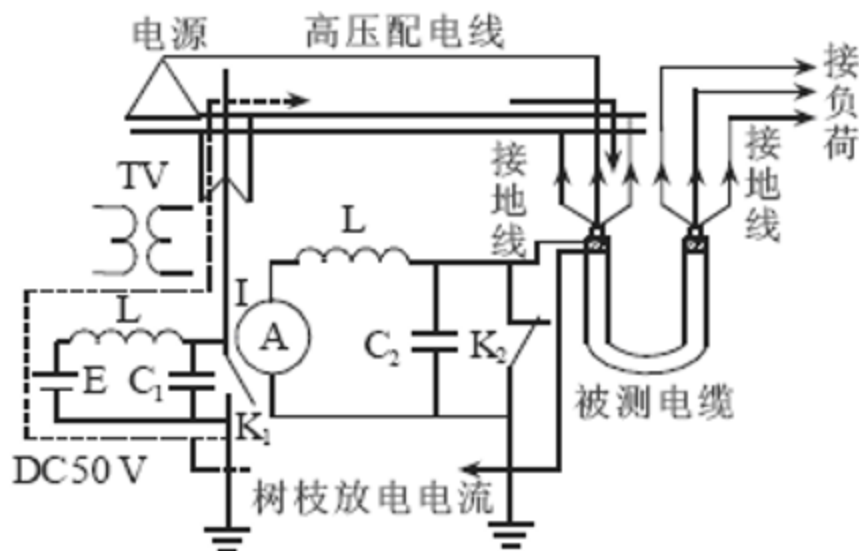


2 国内外6kV~35kV高压电力电缆绝缘在线监测研究概况

- 现有的6kV~35kV高压电力电缆绝缘在线监测方法有直流叠加法、直流成分法、 $\text{tg}\delta$ 法、电桥法、交流叠加法、局部放电法、谐波分量法及上述各种方法的复合诊断法，其中局部放电法在上节已作介绍，下面对其余的监测方法给予简述。

2.1 直流叠加法

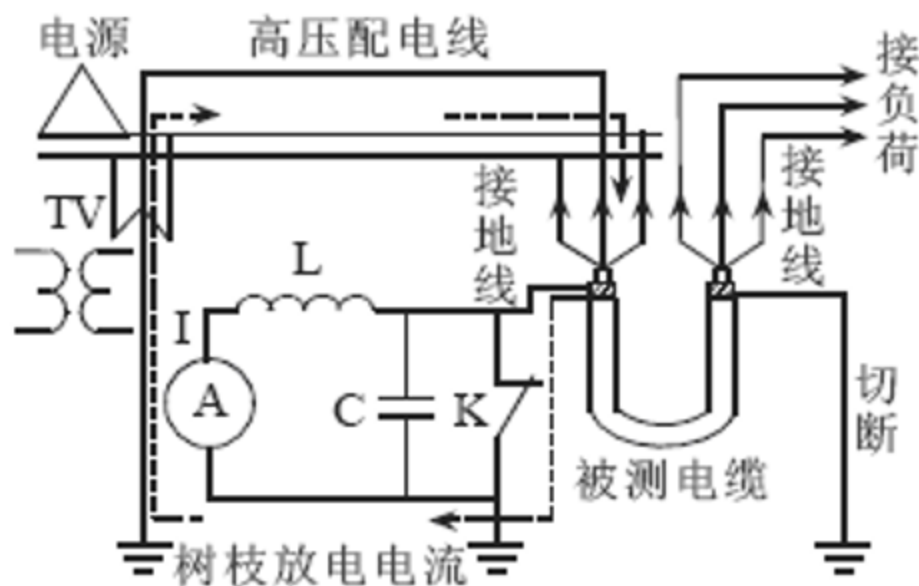
- 如图f1所示，直流叠加法是在接地的电压互感器的中性点处加上低压直流电压(通常为50V)，此直流电压与电缆主绝缘上原有的交流相电压叠加，通过测量流过电缆主绝缘层的微弱直流电流或其绝缘电阻，以便在线监测电缆的主绝缘状况



图f1 直流电压叠加法测量原理

2.2 直流成分法

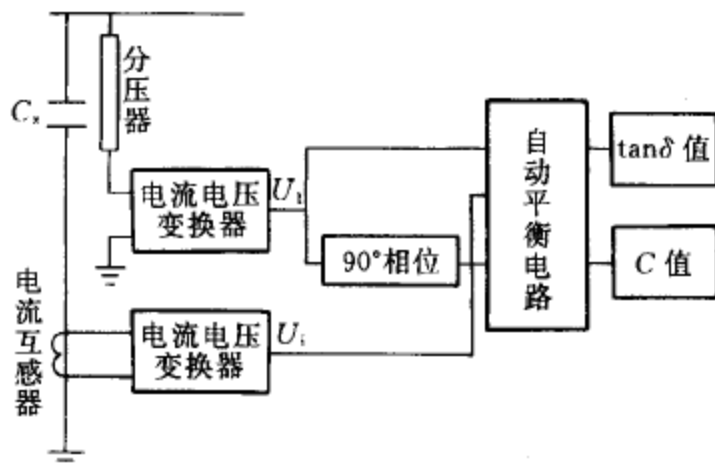
- 如图f2所示，直流成分法是通过检测缆芯与屏蔽层间电流中微小的直流分量来判断电缆中水树枝的发展，从而估计XLPE电缆的老化程度。



图f2 直流成分法测量原理。

2.3 $\text{tg}\delta$ 法

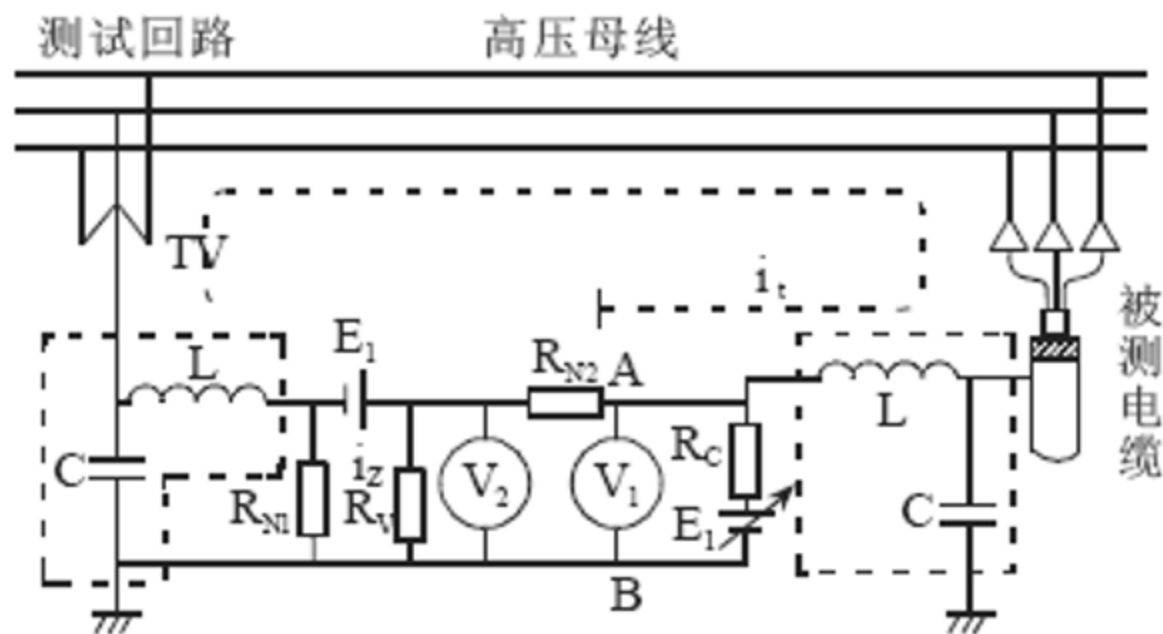
- 研究表明,介质损耗的大小随水树枝老化的程度而增加,在0.1-50Hz之间的损耗因数与水树枝老化程度有很好的相关性。典型的 $\text{tg}\delta$ 值在线检测法是检测两个正弦波过零点的时间差,由频率和时间差来计算相位差的方法。



图f4 $\text{tg}\delta$ 在线检测法原理

2.4 电桥法

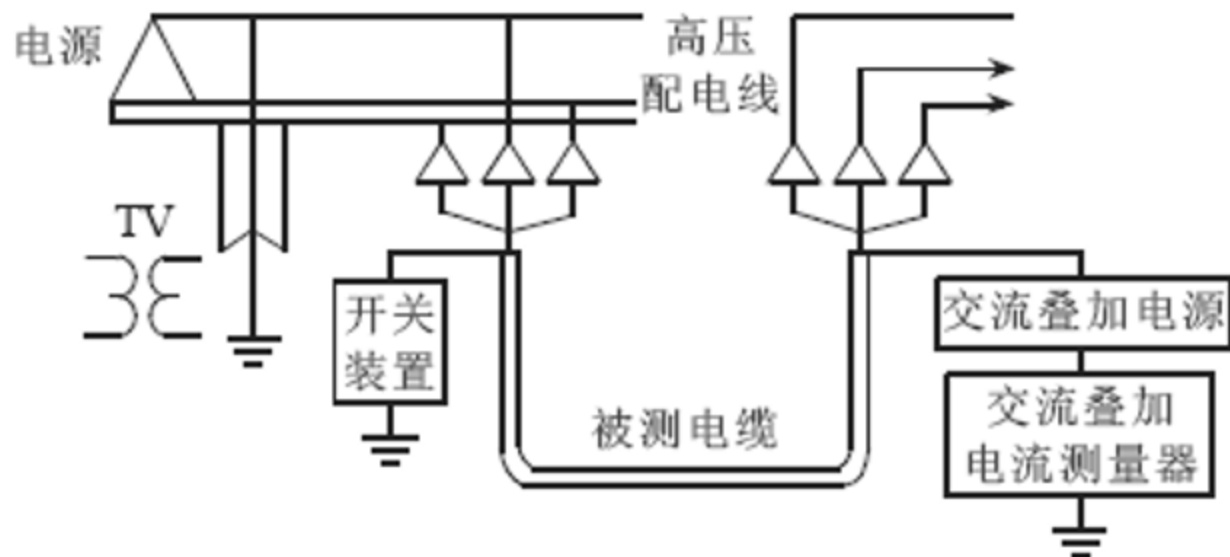
- 电桥法是通过电压互感器TV中性点将直流电压 E_1 施加于高压母线，靠TV中性点和被测电缆金属护层间形成的电桥电路，完成电缆绝缘电阻的在线测量并判断电缆的劣化程度。电桥法测量电路如图f5所示。



图f5 电桥测量电路

2.5 交流叠加法

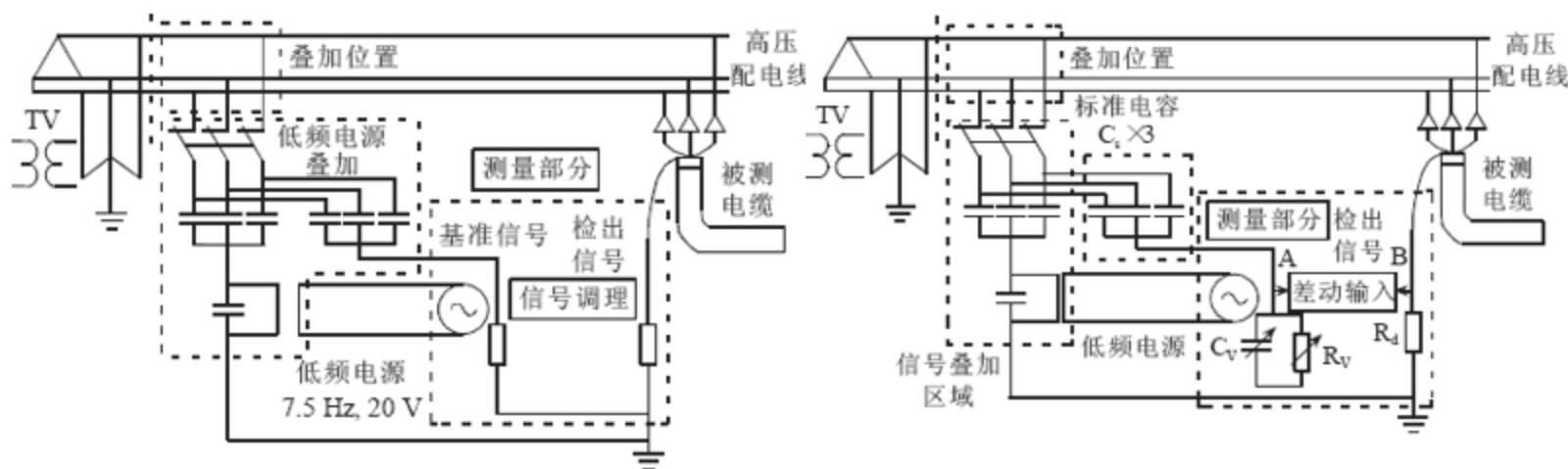
- 如图f6所示,交流叠加法是在电缆屏蔽层上叠加一个交流电压(频率=工频 $\times 2+1$ Hz), 检测出1Hz的特征电流信号, 从而判断电缆的老化程度。



图f6 交流叠加法基本测量电路

2.6 低频叠加法

- 低频叠加法是在电缆的芯线与金属护层之间施加低频电压, 检测出电流中损耗电流分量, 然后算出绝缘电阻, 对电缆劣化程度进行判断。



- (a) 去除电容电流方式
- (b) 电桥方式
- 日本九州电力公司综合研究所研制了采用低频叠加法的XLPE 电力电缆绝缘在线监测装置。测量电路有2种, 一种是去除电容电流方式, 另一种是电桥方式。

2.7 谐波分量法

- 又称损耗电流测量法,给电力电缆施加交流电压时产生的电流,分为电容电流分量和损耗电流分量。近年来,开发了从流过电介质的电流中去除容性电流而只取出损耗电流的方法。由于电荷载流子和所加电压的非线性关系,使得交流损耗电流中含有高次谐波分量。各单位对以水树的 $I = F(U)$ 非线性特性为起因的损耗电流高次谐波进行了测量,并用交流损耗电流及其高次谐波进行电缆的劣化诊断。

2.8 复合诊断法

- 经过几年的实验室模拟试验和现场试验,西安交通大学研制成功**XLPE**电缆绝缘老化自动检测系统,可实现的功能包括直流成分法、直流叠加法、在线测量护套绝缘电阻的补偿电势法等。上海交通大学实现了直流分量法、谐波电流法和局部放电法在绝缘检测中的应用,并且对现场的数据进行了采集,通过系统软件对数据库中所得到的数据进行处理和分析,对所检测的电缆的绝缘状况进行分析和判断。

3 国内外高压电力电缆绝缘在线监测产品综述

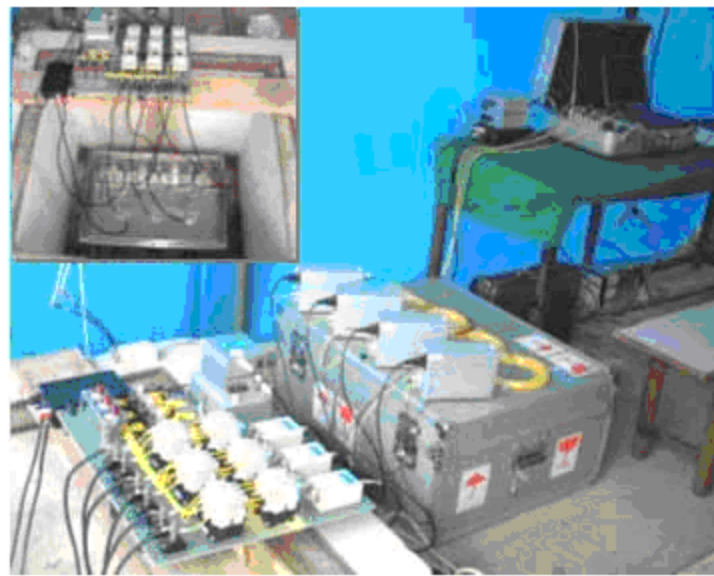
- (1) 保定天威新域科技发展有限公司，高压电缆局部放电在线（带电）巡回检测装置
- 该装置是为带电检测高压电缆及端头故障开发的新产品。该装置采用我公司最新发明的声电一体化智能传感器，能够在与被测电缆不接触的状态下快速、准确确定放电的三维空间位置。适用于各类电缆端头、电缆分接箱及高压开关柜的局部放电在线（带电）巡回检测及定位。现场**200**多例潜在性故障检测结果证明，准确率达到**100%**。该装置适用于各类电缆端头、电缆分接箱及高压开关柜的在线（带电）巡回检测及定位。同样适用于干式变压器、开关、断路器等各种高压电气设备的在线（带电）巡回检测及定位。

3 国内外高压电力电缆绝缘在线监测产品综述

- (2) 攜帶式局部放電在線PD測試系統
-
- 智友光電技術發展有限公司(SET)，是以香港為研發基地的一家港日合資公司。本公司除沿用由日本住友電工研發，現由日本J-Power Systems Corp. (JPS)接管的先進電力技術以外，正注力研究開發最新的傳感測試裝置和系統，以滿足21世紀超高壓絕緣測試技術的新的要求。尤其在數據處理和數據傳送技術方面，我們力求將最新的光電技術導用于自己的研發系統。

3 国内外高压电力电缆绝缘在线监测产品综述

- 智友光电技术发展有限公司(SET)的局部放电测试系统(PDM)如下面图片所示:



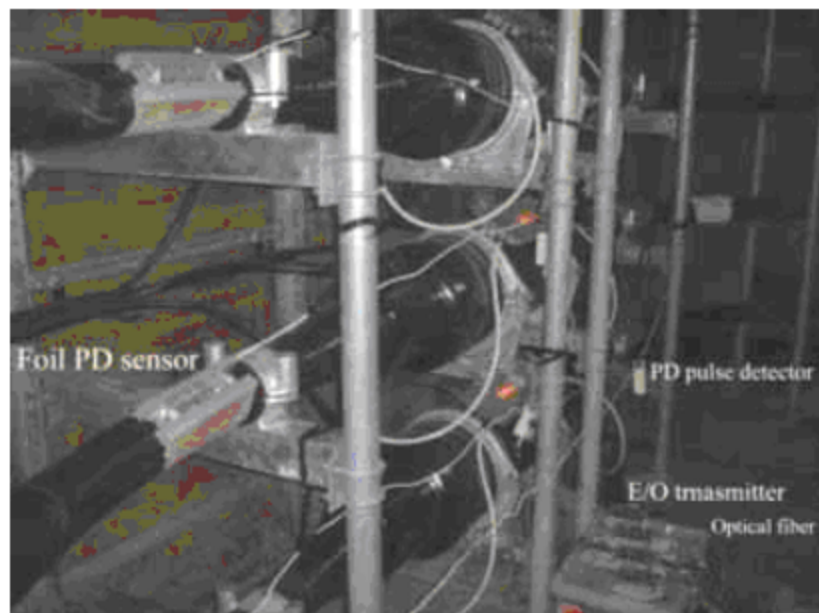
- 應用高頻CT耦合

- 應用電容器耦合

3 国内外高压电力电缆绝缘在线监测产品综述



■ 從終端接頭上測試PD

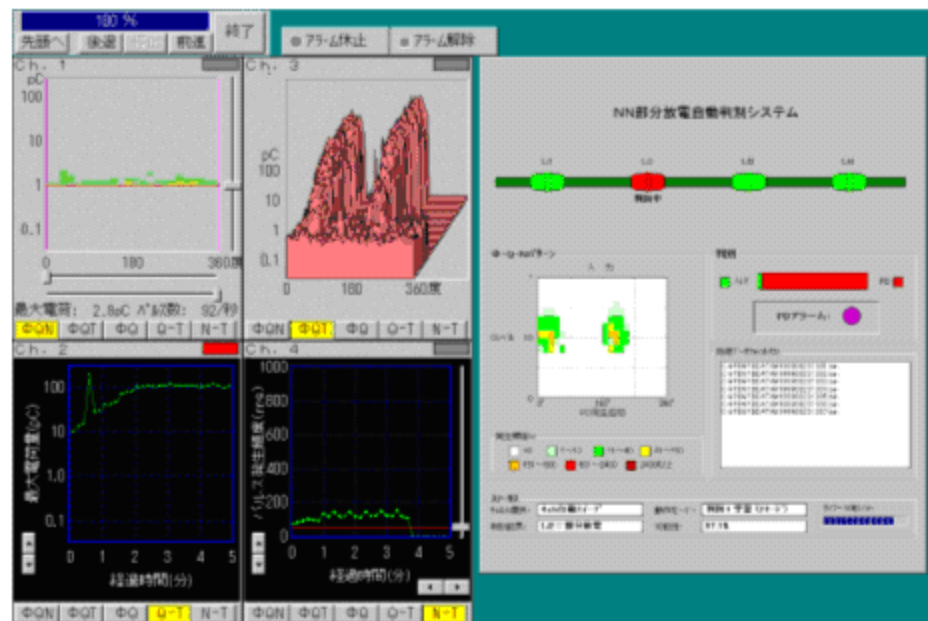


直接從電纜頭裝上測試PD

3 国内外高压电力电缆绝缘在线监测产品综述



裝置輕便可車載移動



測試數據處理及圖樣表示

3 国内外高压电力电缆绝缘在线监测产品综述

- 如图d13-15所示，英國IPEC（Independent Power Engineering Consultnat）公司的OSM-Longshot 电缆局部放电在线监测系统是能精確偵測大範圍局部放電，並精確定位的技術，是國內唯一使用能在整組相連的高壓設備中，偵測到遠端設備傳遞來的局部放電，並確認位置。

3 国内外高压电力电缆绝缘在线监测产品综述

**Partial Discharge
Monitoring in
substation**



HV Equipment



Sensors

8 Sensors per multiplexer

Monitor

Based in substation



Multiplexers

Up to 16 Multiplexers

3 国内外高压电力电缆绝缘在线监测产品综述



- 100MSamples/s data acquisition
- 12 bit resolution
- Wavelet analysis
- Smaller and easier to install
- Available Q1 2006

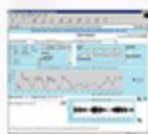
PD Monitoring Service

PD Solution Finding

Working with customer to solve detection problems
Noise reduction - Software/Hardware

PD Analysis

Web Site interface



Monthly Report

Periodic summary report
Alarm monitoring

Conducted PD - HFCT



Detection of PD signals
induced in the equipment earth
50kHz - 20MHz
Split ferrite core
Determine phase of source
Locate through timing

3 国内外高压电力电缆绝缘在线监测产品综述

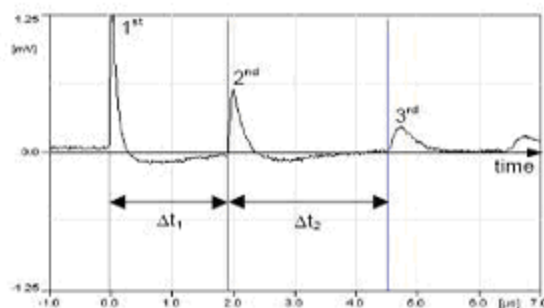
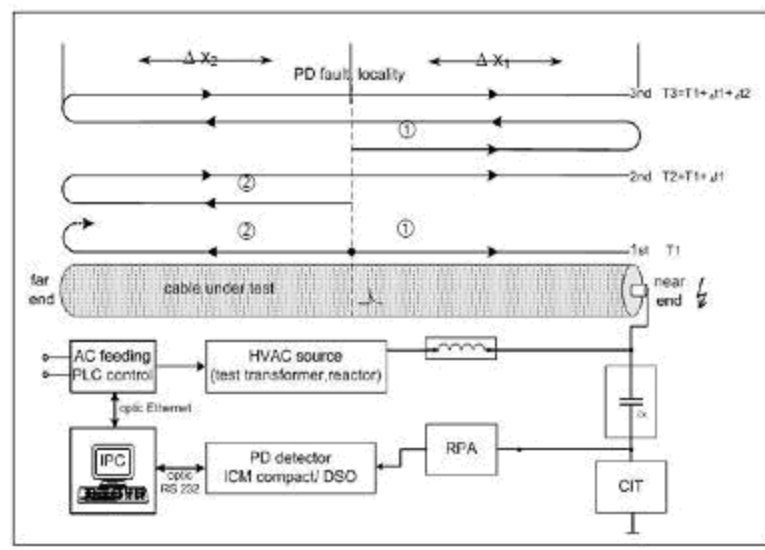
- (4) 电缆及接头局部放电现场检测系统
- 西安交大科技园博源电气有限责任公司开发了电缆及接头局部放电现场检测系统，该系统可检测放电量，放电相位，放电次数等基本局部放电参数，并可按照客户要求，提供有关统计参数量。最小测量放电量：10pC（实验室）/50pC（现场在线）；测量频率：500kHz~20MHz；放电脉冲分辨率：10 μ s；相位分辨率：0.18°。显示工频周期放电图、二维（q- φ ，N- φ ，N-q）及三维（N-q- φ ）放电谱图。利用SQL Server构建的数据库，可记录测量相序、放电量、放电相位、测量时间等相关参数，可提供放电趋势图并具有预警和报警功能，可对数据库进行查询、删除、备份以及打印报表等。

3 国内外高压电力电缆绝缘在线监测产品综述

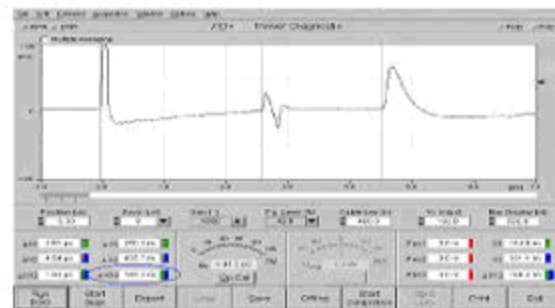
■ (5) PD30/PD60电缆局放故障定位系统（瑞士H.V.公司）

- 局放定位是时域反射法（TDR）的一种应用。长高压电缆可以看作是一个光波导体。因此，局放脉冲会传至电缆两端。如果遇到不具电缆典型阻抗特性的地方（开口处），局放脉冲会被反射回反方向的一端。图g1给出了带有一处局放故障的电缆。其上部表示的是两个脉冲以及它们反射的传播路线。局放测量系统在时间T1，T2，T3对局放脉冲定位。局放故障（脉冲源）到电缆末端的距离通过测量两个脉冲到达靠近末端（耦合装置）的时间差计算得出。

3 国内外高压电力电缆绝缘在线监测产品综述



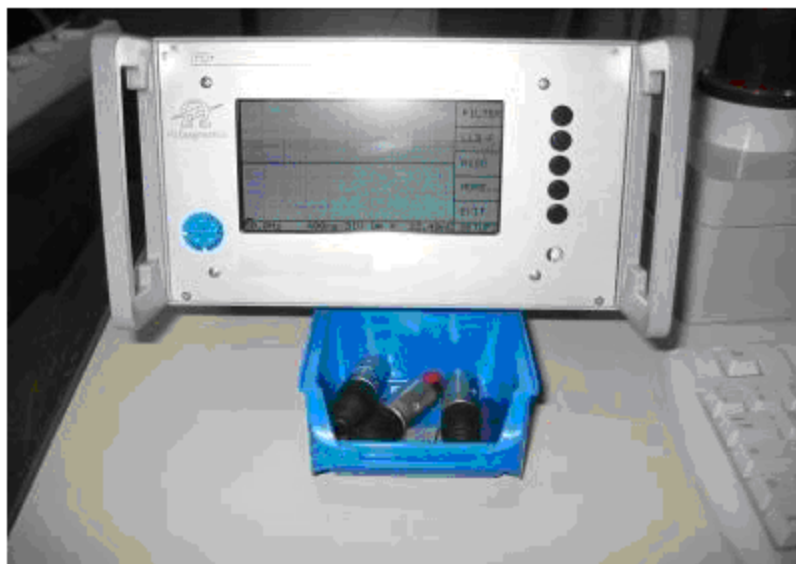
时间域内测量显示



TDR 测量显示

■ 图g1 PD30/PD60电缆局放故障定位系统测量原理

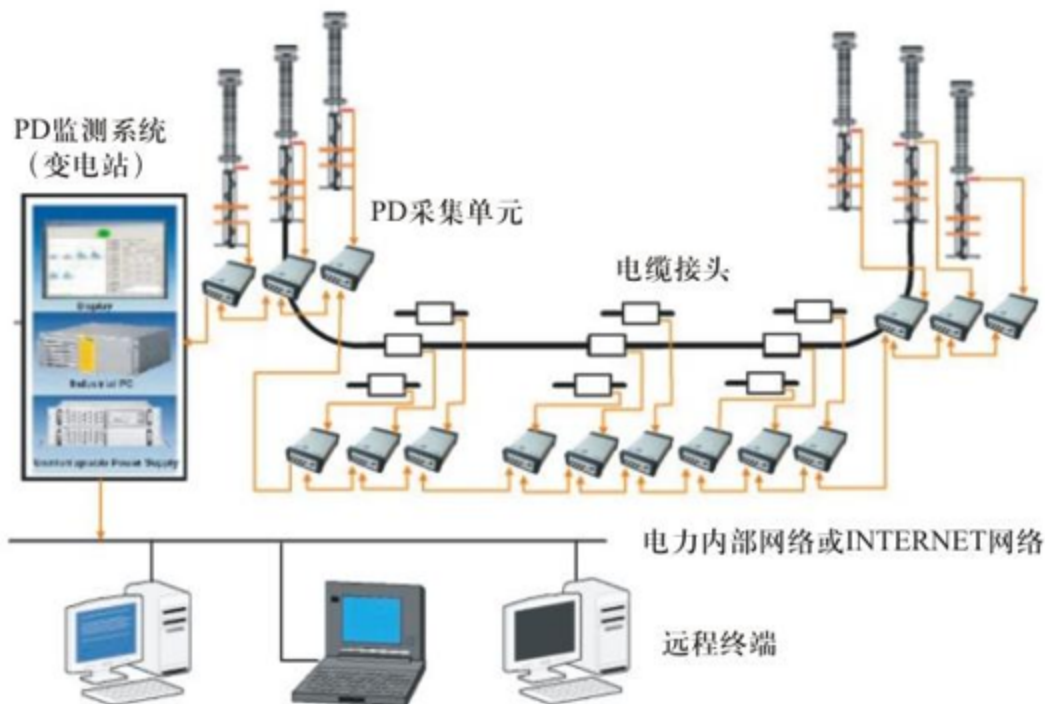
3 国内外高压电力电缆绝缘在线监测产品综述



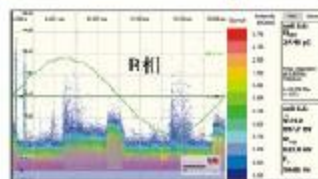
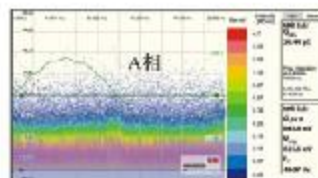
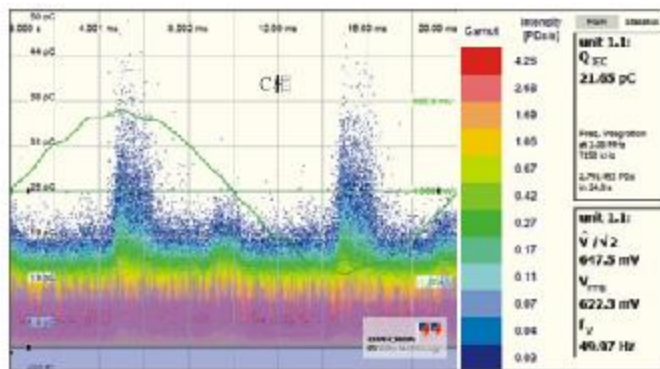
图g2 PD30/PD60电缆局放故障定位系统实物图片

3 国内外高压电力电缆绝缘在线监测产品综述

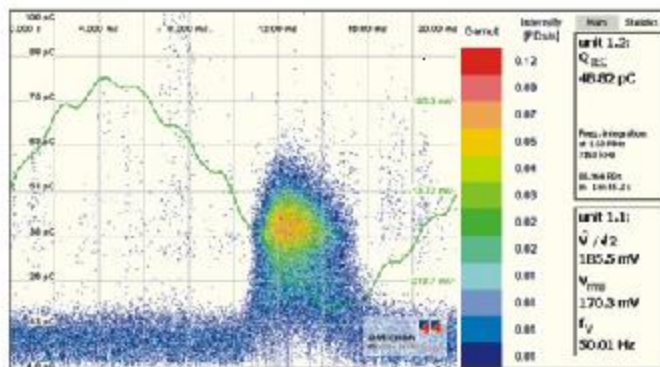
■ (6) 北京兴迪分布式电缆局部放电监测系统 型号:CPDM-200



3 国内外高压电力电缆绝缘在线监测产品综述



在广州现场监测到的局部放电图



3 国内外高压电力电缆绝缘在线监测产品综述

- 可进行电缆及接头局部放电现场检测系统还有
- 瑞典保加玛电气测试仪——上海保加玛电气设备有限公司的局部放电测试系统-**PD5U**，德国LDIC公司的**PD-Guard/UHF**，北京圣泰实时电气技术有限公司**PDM2000G**局部放电在线检测仪，综合采用了特高频（**UHF**）及超声波（**AE**）检测技术。德国赛宝凯特检测设备有限公司**OWTS**等。



谢谢！