

基于局部放电信号分离技术的电力设备绝缘检测

一、综述

中国电力系统在飞速发展，用户对系统可靠性要求也日益增强，而电力设备数量的大幅增加、原有设备的日益老化，却使系统故障可能性大大上升。由于系统扩容，单个故障波及系统所产生的设备损失、停电损失、用户纠纷、及社会效应也成为高悬在电力系统管理者头上的“达摩克利斯之剑”。对发电厂、输变电系统及重点电力用户（如奥运场馆、医院、安保系统、金融单位、造纸化工、采矿冶炼等重型工业、集成电路制造、铁路航空航运等）而言，如何正确评估其在役设备的运行可靠性；对电力设备提供商而言，如何确保其设备在出厂及安装后的质量；对电力设备检测机构而言，如何准确标度被检设备的“健康状况”……这都对设备检测手段和方法提出了新的挑战。

以当前北京电网公司奥运场馆供电保障系统为例，由于不能确保单一线路供电可靠性，不得不采用多回路环网供电体系，将在一年左右时间内投入 200 亿进行线路改造（约合每天 0.5 亿）。供电保障系统市场之大可见一斑。就电力设备而言，电力变压器的造价可高达数千万元，一旦出现故障，不但设备本身损失巨大，还可能连带其它设备发生故障。大型发电机、变压器少售电一天损失就是几百万元，同时对用户也造成不可估量的停电损失。大型机场瞬间掉电就可导致数据丢失，空中飞机无法降落。近期南方某省由于一个电厂发电机出现故障，全省出现“电荒”达数十天。湖北一铝厂由于电力设备故障导致电源供应中断，不得不抢购竹子焚烧以维持电解炉温度在 600 度以上。芯片制造厂即使采用多回路热备用供电，从停电到备用回路投入间产生的瞬间电压波形畸变也可使流水线上动辄几百万的产品全部报废。因此，确保设备的安全可靠运行，具有极高的经济价值和社会价值。

此外，建立新的供电回路，新的变电站，新的发电机组也不等于是有了护身符，电力运行单位仍然不能掉以轻心。新投入的设备本身出问题的可能性更大。众所周知，设备的故障存在一个“浴盆曲线”，即在设备投入运行的最初期（磨合期）和最后期（报废期）出故障的可能性是最大的。新设备性能不稳定，不一定能很好的适应其工作环境，有时候反而成了故障隐患，甚至引发其它设备故障。因此，即使是新的线路、设备，对其在投入运行前、后进行测试，在其运行间进行监控，也都是很有必要的。

统计数据表明，电力设备 50%以上的故障来自于绝缘故障；对于静止型设备，如变压器、电压、电流互感器、电缆、电容等，这一比例要高得多。传统的设备**定期检修**是在对设备状况不知情的情况下进行的，一方面费时费力，造成用户停电损失，甚至把好的设备给“修”坏了；另一方面对于两次检修间的绝缘快速恶化（如交联聚乙烯电缆中的电树枝从形成到击穿可在几天内完成）却无能为力。定期检修费力而不讨好。

通常设备检修后投入使用前都要经过打耐压试验，即加数倍于正常值的电压，看设备能否耐受一定时间而不发生绝缘故障。但绝缘材料承受电压，就象大坝承受水压一样。对于设计承受 10 米水压的大坝，用 20 米的水压去压它，如果它 30 分钟不崩溃，就认为大坝是好的，这种结论是否太粗糙了？如果 20 米的水头把大坝压出裂缝，开始漏水，30 分钟当然是不会崩溃的，但运行不了多久，裂缝就会扩大，最终溃堤。以现有的设备制造水平，产品连打耐压都过不了的，一般都是设计或施工时出现缺陷，这种比例并不高。更多情况下是设备安全通过耐压试验，运行一段时间后就出故障了。这种例子在国内外都不少见。因此，如何在故障早期发现危情，及早处理，至关重要。

应该说，定期检修是在过去检测手段不甚发达的情况下制订的策略，在当时对提高供电可靠性是有积极意义的。正如人体健康一样，定期检查当然比完全不查，生病再治的效果要好得多，费用也低得多。随着科技的发展，医学上对重点病号（如高血压、糖尿病人等）已经实现了随时监控，能够在病情稍有变化时便对症下药，及时防治，从而实现安全最大化和费用最小化。这一理念也被成功地运用于电力设备的监测与诊断中，并取得了良好的经济效益和社会效益。与人体不同，电力设备是可修复，可更换的，如果能够在设备绝缘恶化的早期就能甄别病情，防微杜渐，便可防患于未然，提高系统可靠性与稳定性。这一技术，就是**基于局部放电信号分离的设备诊断技术**。

电力设备的状态监测与故障诊断技术，很早就被国家列入发展纲要。近几年来，随着传感技术的提高，软硬件能力的加强，及现场经验的积累，已经由研发走向大规模推广。运用这一技术提高设备运行效率，降低电力企业运营风险，提高经营管理水平，有着极大的经济效益和社会效益。

二、TechImp 的局部放电信号分离与设备诊断技术

绝缘事故通常都是由于绝缘部件体内或体表产生贯穿性放电引起高低压间短路而导致设备烧损、爆炸及系统短路、跳闸。除雷击等偶发性因素外，贯穿性放电通道一般都是从微小的**局部的放电**（称为局放）发展而来的。这种局部放电会产生一些电流脉冲、电磁场波动、机械振动等一些从设备外部可以测量的信号。有效地检测局放信号，就可以在故障发展的初期发现潜在的危险，采取相应的修复、更换措施，从而把事故扼杀在襁褓之中。

但是，局放信号是在强场环境下微弱的瞬态信号。以交联聚乙烯电缆中的微气隙放电为例：气隙沿电场方向的长度一般在微米量级，500 kV 电缆的气隙放电电压也不过几伏到几百伏，其放电量通常也不过几皮库（ 10^{-12} 库仑）到几十皮库，产生的放电电流脉冲也是微乎其微，远低于电力系统中的杂散脉冲（如整流脉冲）信号。各种放电信号及干扰通过不同的途径到达传感器，传播过程中所产生的各种畸变及衰减也大不相同。因此，测量局放信号时如果不能把放电信号与环境中存在的各种杂散信号分离开来，测量是无效的。

另一方面，线路的电晕放电，套管沿面放电（污闪）、旋转电机碳刷的火花放电都属于局放，都具有放电的特征，但对设备的危害性却低于绝缘内部的放电。即使同是设备内部放电，变压器油中放电产生的有害物质（碳化颗粒）被油循环分散到各处，其危害大大降低；而油纸绝缘中的放电却可能使纸碳化，直接导致击穿。变压器套管污闪放电即使达到几千上万皮库，也可以继续使用，而油纸绝缘中的放电即使仅几十皮库，也必须进一步调查原因。有机绝缘电缆内部的局放通常都会发展成电树枝并最终击穿，对其容忍度几乎为零。因此要运用局放信号来诊断设备状态，**必须要能够在强噪环境下检测到局放信号，必须要能够把局放信号同噪声区分开来，必须要能够把不同的局放种类分别开来，否则，给出的诊断结论是片面的。**

传统的基于放电电流脉冲的局放检测手段是基于 IEC60270 标准，频带局限于 10~200 kHz，测量的是局放总量，最后绘出其 -Q-N（放电相位-放电量-放电次数）谱图，以此进行放电种类识别。其信号采集和处理的方法不足以获取足够信息以区分局放与噪声及不同种类的局放，抗噪能力较弱。目前时髦的超高频采样法能有效地避开特定噪声，但由于信号低频部分尽失，也无法有效区分不同的局放源。而且局放信号高频部分衰减极快，设备

出口端信号主要频段已处于超高频天线测量范围以下，其测量效果大打折扣。超声波法精度不高，无法区分放电种类，主要用于放电定位。

而 TechImp 公司的基于局部放电电流脉冲波形的局放检测却与上述手段完全不同。该公司在国际上第一次提出并实现了放电脉冲的分离识别诊断技术：通过对放电的电流脉冲信号进行高速（100MS/s）宽带采样获取信号完整的时域波形；并针对不同放电及噪声间的差异提取多种信号特征，从而将不同的放电分离开来；在此基础上对每一类放电进行甄别，进而诊断设备绝缘状态。这样，也只有这样，才能实现真正意义上的局放诊断。

基于脉冲波形的局放诊断技术是在几十年的工作基础上逐步完善的。数十年来，TechImp 公司的产品和技术被广泛应用于世界各地，各种电力设备上的不同缺陷在不同的现场环境下所产生的局部放电信号也被收集起来。在对大量的局放数据进行分析比较总结的基础上，TechImp 公司构造了庞大的局放波形特征数据库，组建了强大的专家诊断系统。这样，对每一个新采集的放电脉冲波形，TechImp 公司的分析软件都可以按相应的步骤提取几十种放电特征，再将其放电特征与专家库中的放电“指纹”相比较，运用模糊逻辑的方法，判断被测放电类型与已知放电类型的相似性，从而得出相应判断结论，再由现场的专家根据设备电气连接与机械构造情况，总结设备的绝缘状况，并给出相应维护建议。

正是基于以上的先进技术及专家诊断系统，TechImp 公司的产品与服务在全世界得到了广泛的认可。在欧洲，意大利全国 200 多个 400 kV 的枢纽电站全部已采用或即将采用我们的设备和技术；欧洲最大的电缆制造商之一 Prysmian Cables & Systems 所有电缆的出厂试验与安装试验都由我们完成；在美洲，GE（通用电器）公司在其发电机上只装我们公司的局放检测设备；在亚洲，新加坡国家电网几乎所有电缆局放检测试验都由我们来完成，他们对我们的服务给予了高度的评价；在中国，我们的产品也在湖北、江苏、山西、陕西、广州、云南等地的变电站、电力设备制造厂、电力科研单位、国家重点实验室得到了应用。

总的来说，TechImp 公司基于局部放电电流脉冲波形的电力设备绝缘诊断技术具有以下特点：

1. 采用**宽通带传感器**与**高速宽带采样单元**，以取得足够多的放电信息，提供有效的诊断依据；

2. 通过对比不同放电脉冲信号之间及放电与干扰之间波形特征的差异，能够有效地**分离聚类**不同的放电脉冲，区别不同的放电类型；
3. 由于具有很强的干涉处理能力，可以在不停电的状态下对设备进行测量；
4. 在多年的现场实践基础上，收集了大量电力设备实际中故障放电脉冲波形指纹特征，建立了强大的**专家库系统**和模糊逻辑诊断方法，能够分别对以上分离出来的每一类放电进行识别。

以下，我们将具体介绍 TechImp 的局部放电诊断技术的实现方式。

三、TechImp 的局部放电诊断技术的实现方式

TechImp 的局部放电测量系统如下图 1 所示。从传感器中取得的局放信号与低频同步信号都通过同轴电缆传入主机（PDCheck）内。主机对数据进行初步处理，提取波形特征，并通过光纤、光电转换器与便携式电脑的 RS232 串口或 USB 口通讯，将特征传到电脑，再用专门的软件进行分类、分离及放电模式的识别。其诊断技术包括如下几个方面：信号采集与传输、信号特征提取、专家系统识别、及故障诊断与设备状态估计。

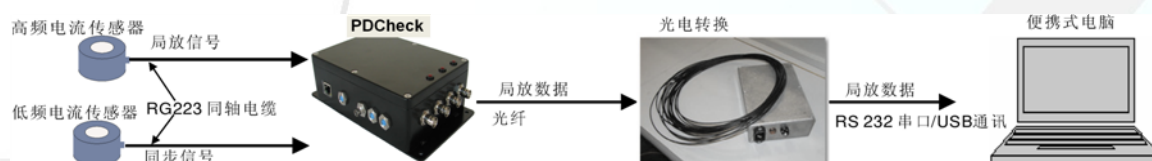


图 1. TechImp 的局部放电测量系统示意图。

使用 TechImp 仪器测量电力设备的局放信号可采用**离线测量**、**带电（在线）便携式测量**、或**在线监测**的方式。**离线测量**是在设备出厂时，或安装、维修后并网前，用谐振升压系统加压进行测量，通常在设备耐压试验之后进行。这种方式是比较传统的方式，也是目前在电力系统使用最广的方式，缺点是必需停电作业，而且需要额外的谐振升压系统。**带电在线测量**则是在设备正常运行的条件下，使用便携式测量仪直接通过外置传感器取信号进行分析，其特点是方便易行，可随时根据设备状态及运行需要增加测量频率，投入设备成本较小。**在线监测**则是在系统中预先安装传感器，信号直接送到主控室，在微机屏幕上可 24 小时监视设备运行状态，其特点是工作人员操作较少，直观性强，而且可以一次性监控所有设备，综合投入产出比高。

测量单元与电脑之间都采用**光纤连接**，形成高压设备及测量装置与低压侧电脑及操作人员的物理分隔，确保操作人员的安全。此外，光纤传输信号的距离也比电缆远得多，可以适应测量点较远或从设备向主机房通讯的需要。

对放电波形提取的特征必需具有**敏感性和特异性**，即如果是 A 类放电，就必然有 A 类特征（敏感性），同时如果有 A 类特征，就必然是 A 类放电（特异性）。依据这些特征，才可以有效地分离不同种类的局放信号。此外，对于每一类放电故障相应局放特征的收集、整理、分析是一个漫长的过程，实验室里的模拟模型往往不能如实反映现场实测的结果。从单独的一根变压器绕组线圈上取的信号，当然跟从变压器端口取出的，经过在整个绕组

上无数次来回折反射的信号不一样。正是在几十年来对大量现场实测数据的收集、整理的基础上，TechImp 公司才得以形成自己独特而有效的设备诊断专家系统，才能得到广大用户的信赖，才能在现场使用中不断创造佳绩，并在广泛使用中不断完善。

TechImp 公司的局放信号测量、分离及诊断过程如下：我们先用宽带高速采样系统来采集局放及现场噪声信号（如一次采集数万个放电电流脉冲波形，其中存在各种现场干扰与放电），再根据其放电脉冲波形的特征来将其分离为不同的组（从分离谱图中可以很容易地看出，无须任何专家知识），然后将每一组很“纯”的信号的特征输入我们的专家识别系统软件，就可以实现现场对设备缺陷的测量与诊断。整个流程如下图（图 2~5）所示。值得一提的是我们所用的专家识别系统是在大量收集全世界各地的实测数据的基础上形成的，而这种典型的设备局放数据在数百次现场实测中才可能收集到一个。没有几十年的数据积累，是不可能构建一个实用有效的专家识别系统的（图 6）。

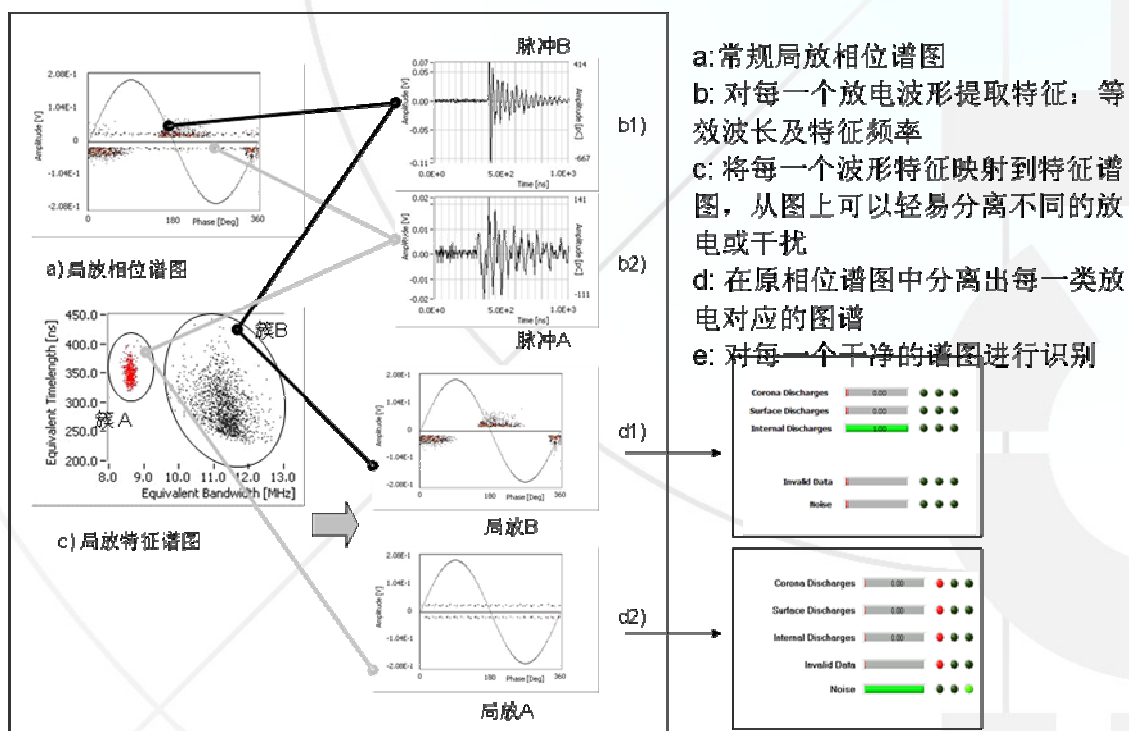


图 2：局放分类识别流程。常规的数字局放仪只能得出局放的相位谱图 **a**，其中每一个点对应一次放电的相位（横坐标）及幅值（纵坐标），但其中的各类放电是混合在一起的，不可能找出每一类放电，更不可能准确识别放电类型或缺陷类型。但借助于高频宽带采样获取的放电脉冲电流波形（图 **b**），可以将每一个放电脉冲按其波形特征映射到特征谱图中。由于同种放电特征比较一致，不同放电间的特征差异性较大，从特征谱图上可以比较容易地区别出不同的放电（图 **c**）。此时再在原相位谱图中单独显示每一类放电信号，便可实现放电或干扰的分离分类功能。对于每一类很“纯”的放电信号，可以较容易地通过专家识别系统找出放电类型和缺陷类型。

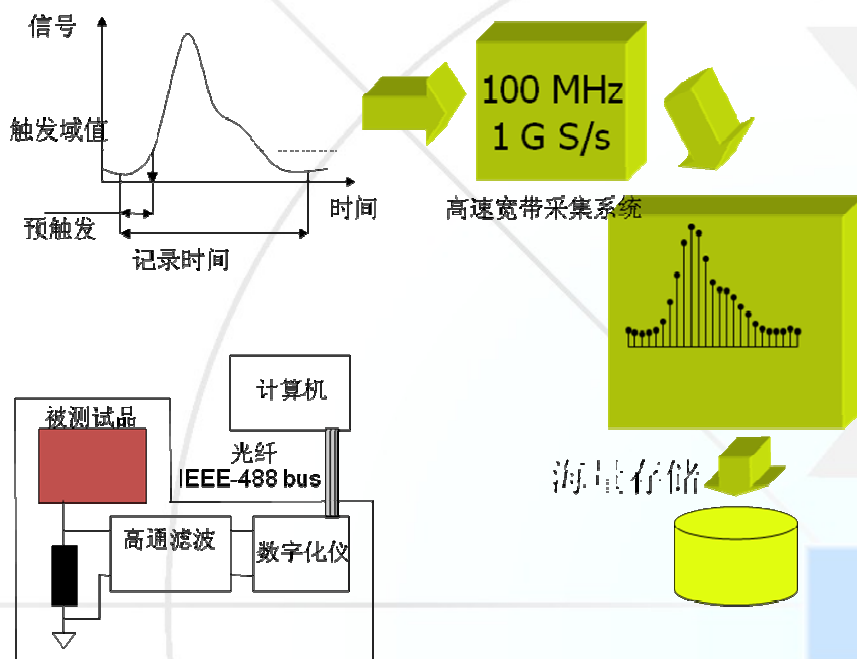


图 3：局放检测系统示意图。左下角为外部接线，传感器从设备处取得信号，输入主机，再通过光纤传入笔记本电脑。其余部分为采样过程，通过高速宽带采样系统记录放电电流脉冲波形。其数据处理如下图所示。

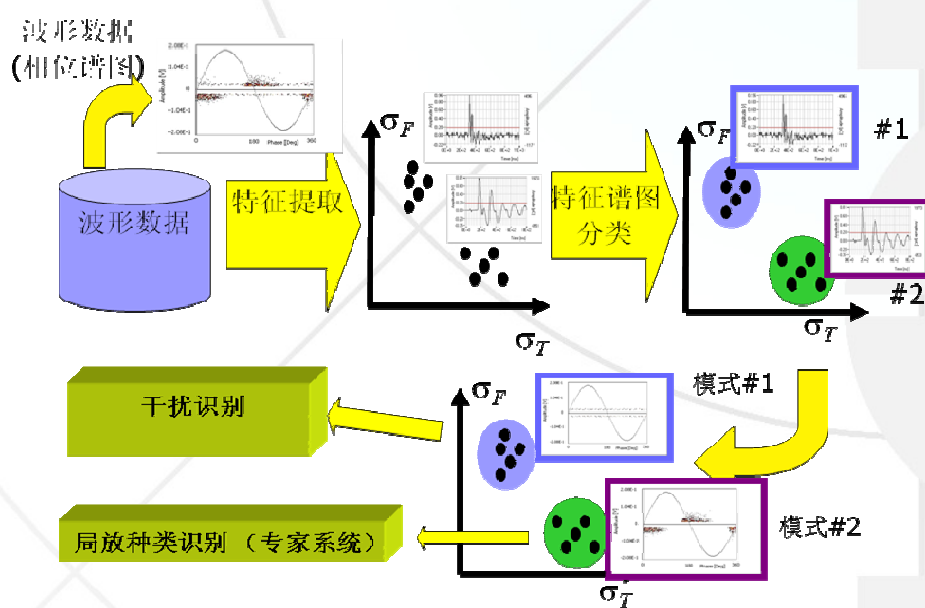


图 4：局放数据分离分类与识别过程。上图中采集的波形被输入常规的相位谱图，此时由于有两种信号迭加，识别困难较大。但我们对每一个放电电流脉冲波形提取相应特征，以此将相位谱图中每一个点（对应一个脉冲电流）映射到特征谱图中。由于同一类放电特征比较接近，而不同放电电差距较大，可以较容易地区别出不同的放电种类，然后再将每一类放电的相位谱图单独提出，此时信号较纯，识别效率大大提高。

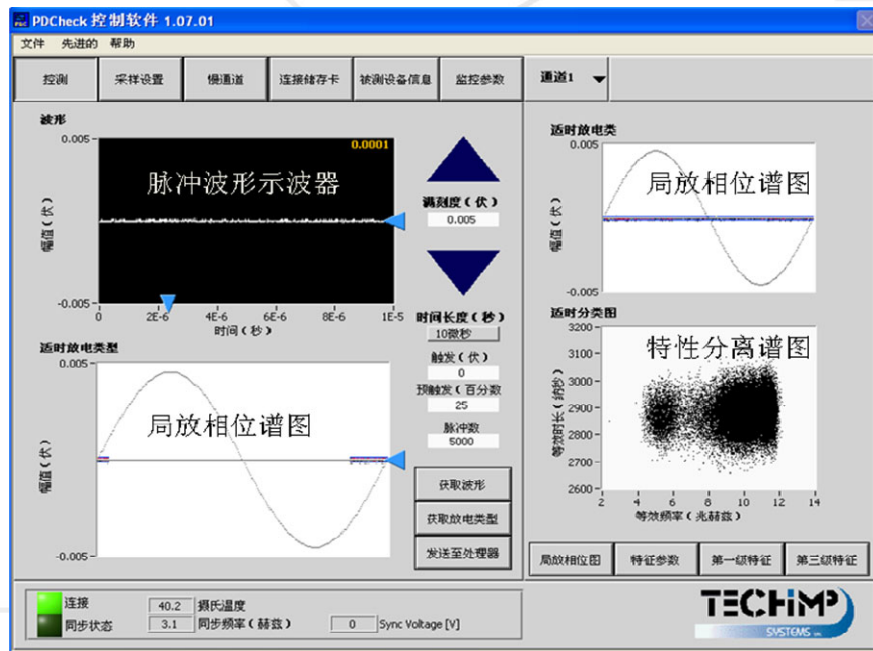


图 5：局放检测软件系统示意图。左上角为脉冲波形示波器，可以看到每一个放电脉冲波形。左下角为对应的局放相位谱图，其中每一个点代表一次放电的相位与幅值。所测数据可以实时进行处理。图右下角为特征谱图，每一个点代表一次放电的时域和频域特征，其中聚集在一簇的点属于同一类放电（此时尚不知放电种类）。当选中某一类放电时，右上角的相位谱图中可以仅显示此类放电的谱图。



图 6：局放识别专家系统。图中显示了电机及变压器中不同的放电类型。

四、TechImp 局放诊断系统应用实例

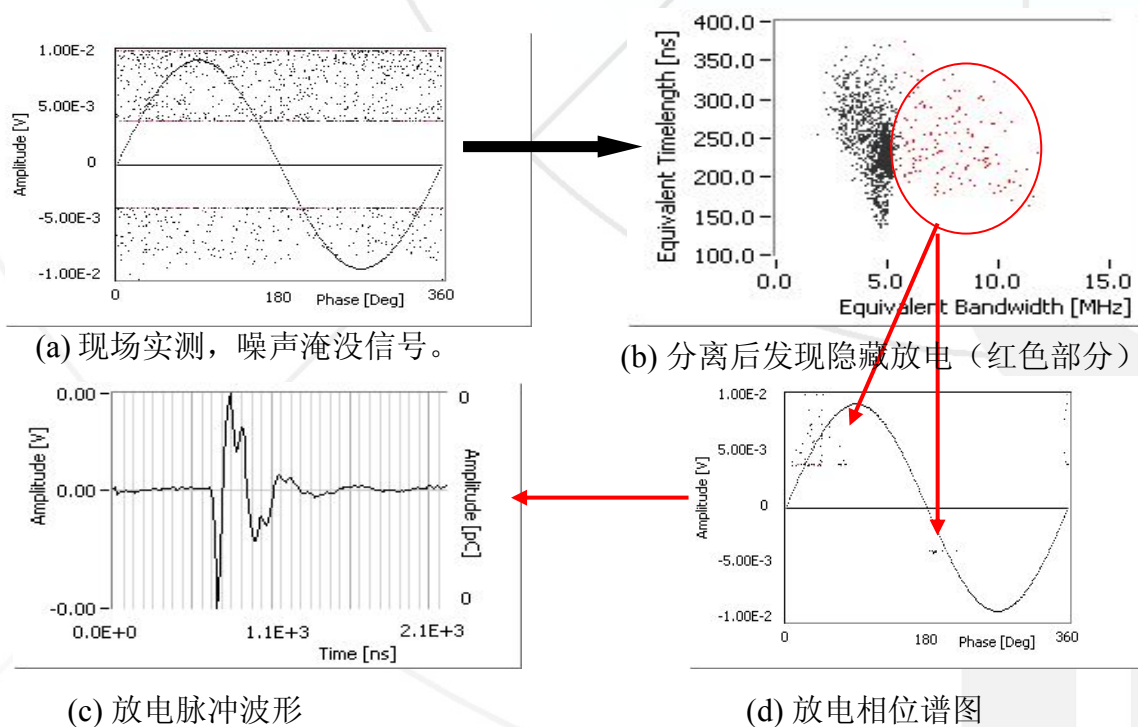
自成立以来，TechImp 公司的产品在世界范围内得到了广泛的应用。以下将从电力电缆、发电机、电力变压器及传感器、发电厂、电力线路这几个方面分别介绍其应用实例。

1. 电力电缆应用实例

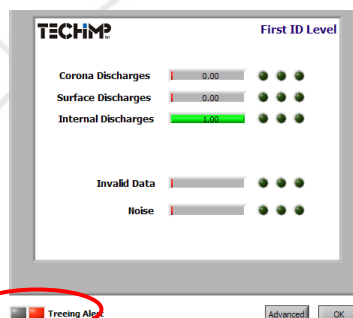
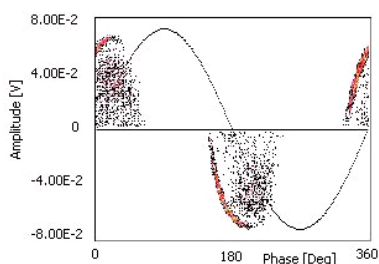
实例 1. 在某 400 kV 12 公里 XLPE 电缆交接试验中发现电树枝

该电缆在现场安装完毕，已通过交流耐压试验无任何异常，现场局放测试时发现噪声淹没局放信号，但我公司信号分离结果显示某一接头内有微弱放电信号，取回实验室加压发现有内部放电，而且有电树枝警报。用户决定打开接头检查，结果发现接头处有明显放电碳化痕迹，估计为安装时划伤后被高压耐压试验所伤。如不作局放试验，并网后可在几天内产生击穿故障，对厂家和电网都产生极大的影响。

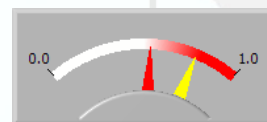
结论：电缆耐压试验不能取代局放试验。我公司的局放检测设备在现场环境可有效工作并取得好的成绩。



现场在强噪声下实测结果，发现隐藏电缆内部放电



电树枝警报



电缆检查



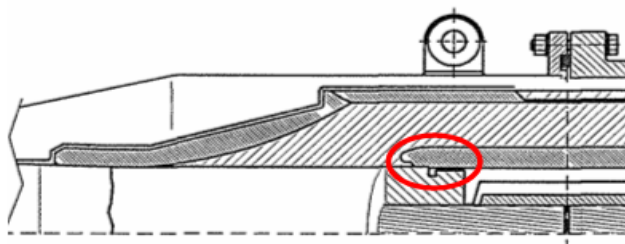
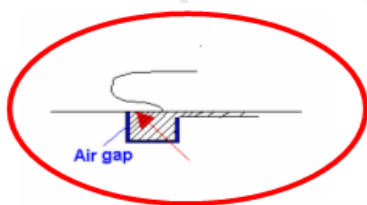
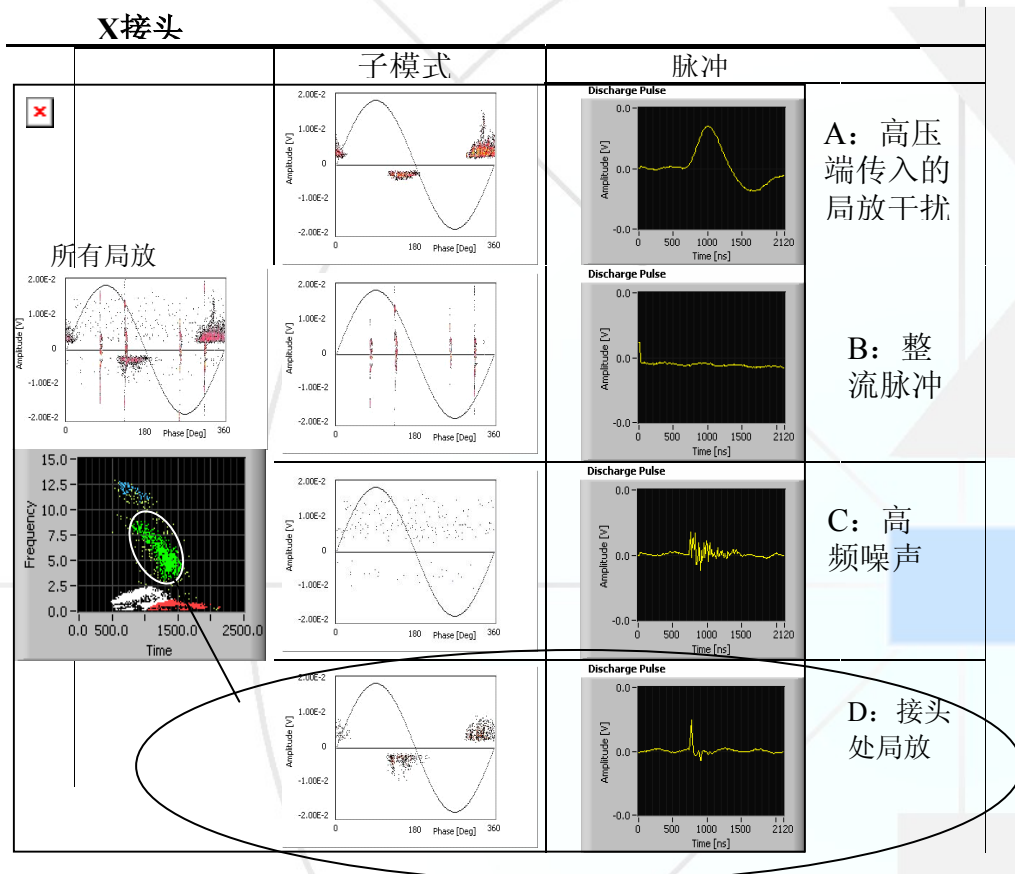
实验室加压测试证实其内部放电，解剖后发现划伤及放电痕迹。

实例 2. 在某 220 kV 5 公里 XLPE 电缆现场试验中发现接头不良

在对该电缆的现场局放试验中发现在很强的干扰脉冲及噪声下有微弱的局放信号，如测量系统不具备信号分离能力，不可能识别其放电类型，只能误判断为最大的放电信号（高压端传入的局放干扰），从而误认为电缆是完全的。我公司局放设备认定现场有四种信号，分别是：从高压端传入的局放干扰（线路电晕、套管沿面放电）、整流脉冲、高频噪声、及电缆接头内部放电。从下图中可以看到，其现场噪声远大于局放信号，如不能分离则无法判断放电强弱及种类。我公司专家认定接头内部放电已经有一定程度，必须更换接头。厂家决定打开接头验证，结果发现接头处覆盖半导体均压层时接触不良，存在气隙产生放电。

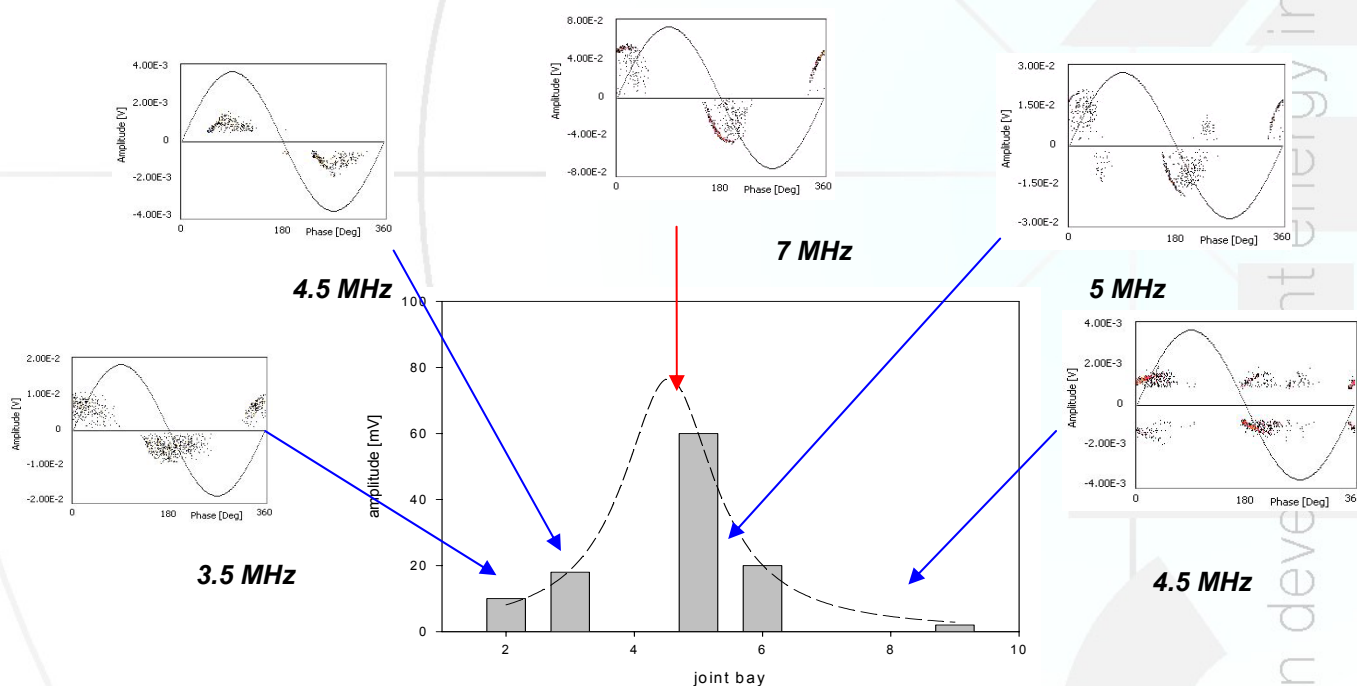
结论：

我公司产品可在现场强噪声环境下测量并准确判断放电种类。此情况下如果不具备信号分离技术，不可能准确测出强干扰（而且是很类似的干扰）下的电缆缺陷。



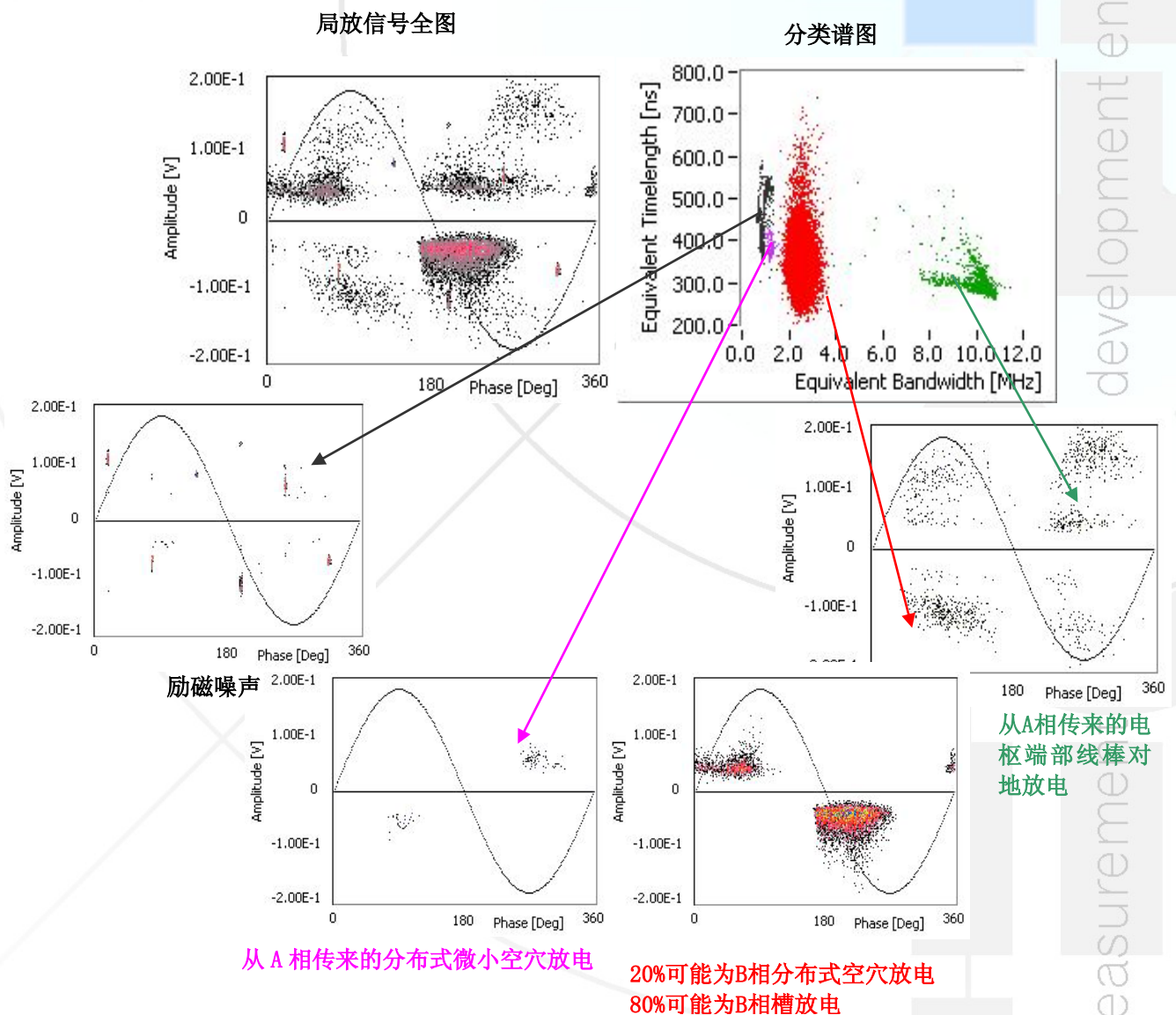
实例 3. 电缆定位实测

我公司产品可用三种方法实现局放定位。即回波定位法，差分定位法，和幅频特征定位法。以幅频定位法为例，由于局放是高频信号，其特征频段及幅值会随信号在电缆中的传播而衰减。通过测量各接头点的同一种类局放信号，可以知道其放电产生位置，如下图所示。这种方法，测量简便，定位准确。

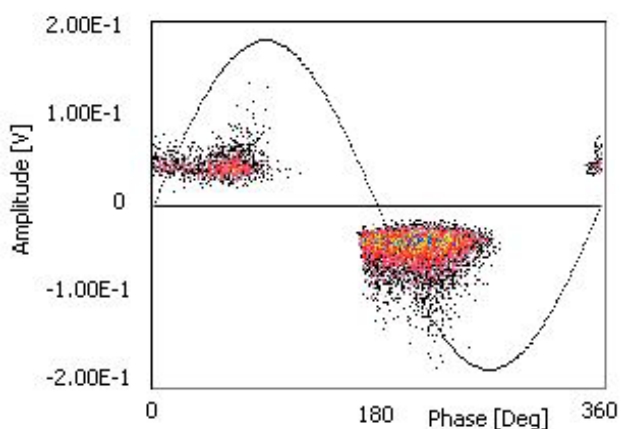


2. 旋转电机应用实例

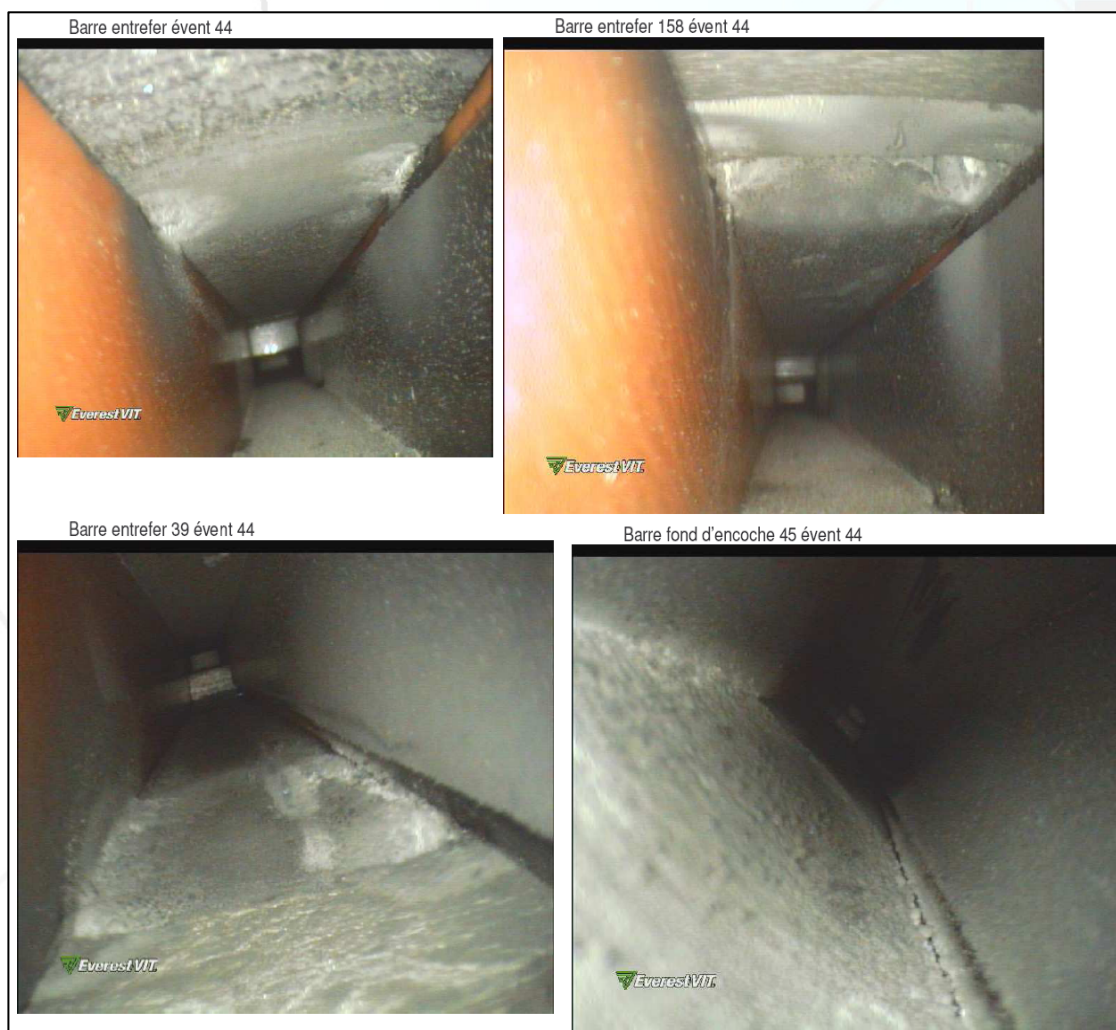
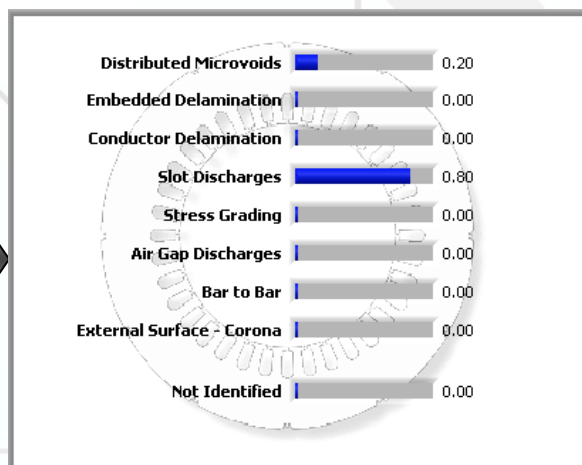
旋转发电机中局放诊断也是我公司技术的强项，近年来，美国 GE（通用电器）公司所有发电机上只装我公司的局放诊断设备。以对某发电机 A、B、C 三相测量的结果为例，其 B 相实测局放信号如下。图中可清楚看到各类放电信号及干扰都比较强。通过分类，我们发现其大部分脉冲信号为从 A 相耦合过来的空穴放电或线棒对地放电，其幅值远高于其它放电，部分为励磁噪声，而剩下的则是 B 相本身的内部放电，有 20%可能性为分布式空穴放电，80%可能性是槽放电。后经厂家用内窥镜检查，的确发现槽内放电痕迹，并及时进行了修理。



子模式



电机放电模式识别



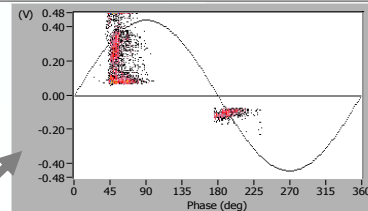
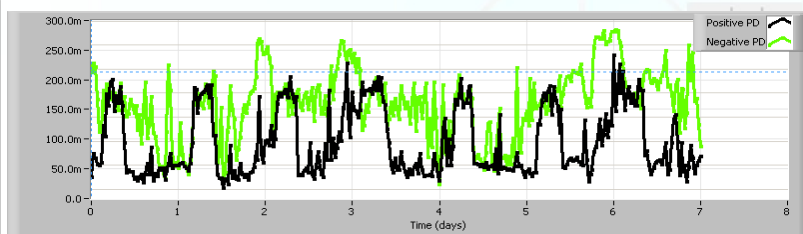
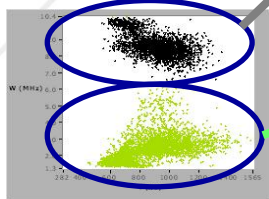
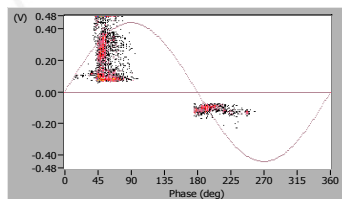
上图内窥镜检查中发现大量电机线棒槽中放电

3. 电力变压器在线监测实例

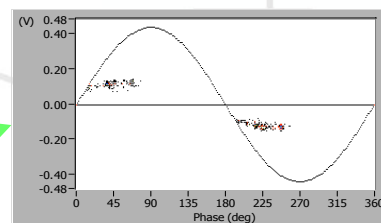
下图为某电力变压器在线监测实例。从所测全部信号来看，可以发现存在大量的局部放电，一般的局放测试设备可能就会认为是变压器本体放电量很大，比较有经验的局放测试人员，可能能分析得准一些，进一步从放电模式中分析出这是套管表面的污闪放电。但是通过我们的分析，发现在很大的套管表面污闪放电下还存在微小的纸绝缘中的气泡放电。这一点，不具备放电脉冲分离技术，不具备局放模式识别技术，是不可能得出此结论的。进一步的在线监测证实了我们的诊断。从放电量每天随时间的变化趋势来看，气泡放电与油温，机械振动，负荷大小等都有关系，规律性不明显（右上图中绿线）。而表面污闪则主要与天气相关，明显清晨有雾有露时放电较强，日出后放电较弱（右上图中黑线）。



全部信号



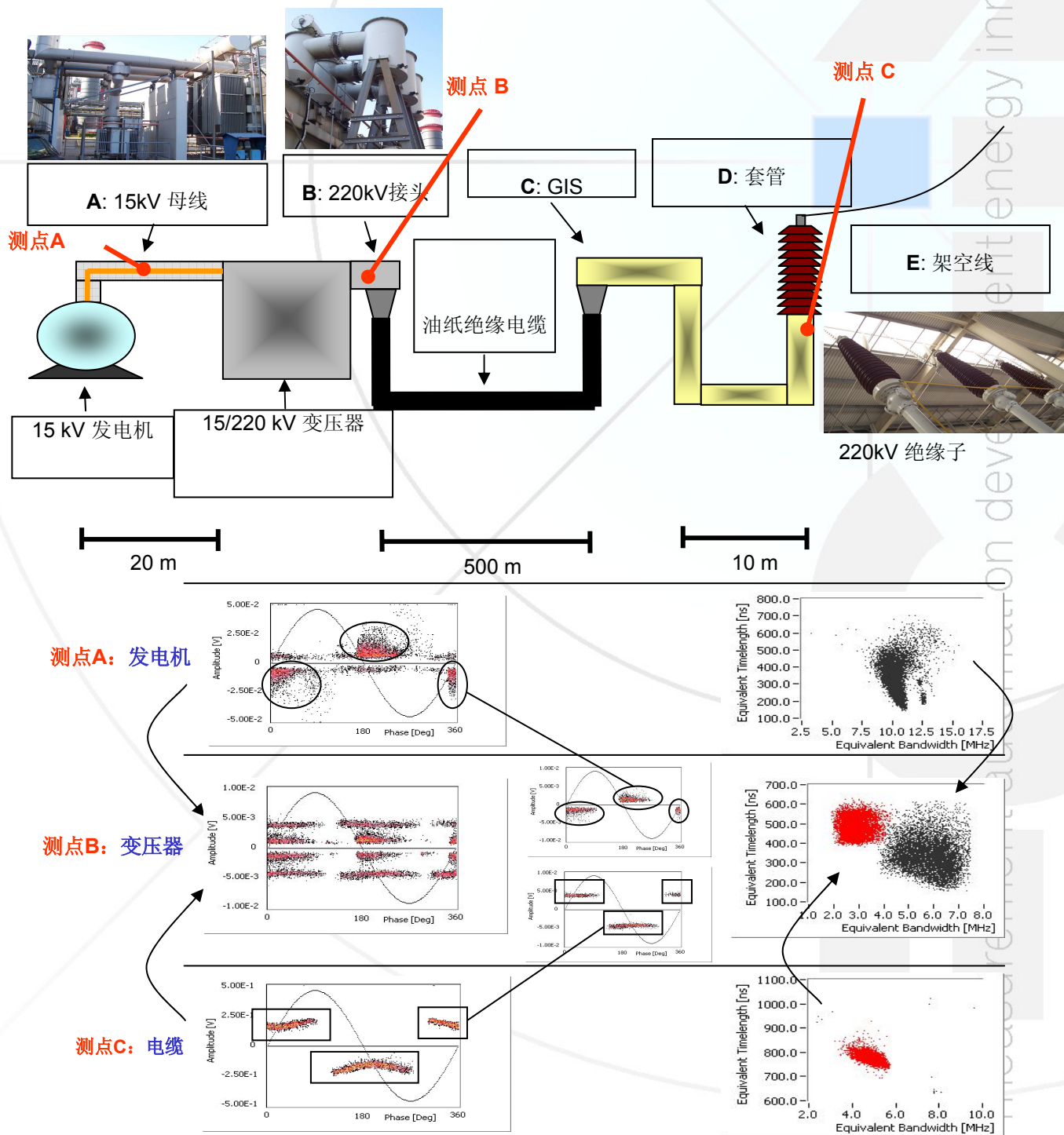
套管表面放电



纸绝缘中气泡放电

4. 发电厂在线监测实例

某发电厂的电气连接如下图所示：15 kV 发电机->15/220 kV 变压器->油纸绝缘电缆->GIS->套管->架空线。我们选择了三个测量点，分别为电机出口，变压器出口，及套管底部电缆出口。图中可以看到在变压器中有很强放电信号。由于变压器中允许的放电量很小，如果不能分析出信号来源，就得退出运行检查。但用我们的设备进一步分析发现实际上变



压器上信号实际都为来自于电机侧的火花放电及架空线侧外部电晕放电干扰，即变压器本身没有问题。其依据如下：

1. 变压器内测出的放电波形只有两类，且分别与电机及电缆中测出的波形很相似。
2. 对于电机中的放电波形，在电机处测得的中心频率为 10MHz 左右，而在变压器处测得的为 6MHz 左右，以此判断波形是从电机传到变压器的。
3. 对于电缆中的放电波形，在电缆处测得的中心频率为 5MHz 左右，而在变压器处测得的为 3MHz 左右，以此判断波形是从电缆传到变压器的。

从以上分析可以看到，如果设备采样频率不够高或没有信号分离能力是不可能作此结论的。因此，作为一个合格的局放测试设备，应该不但能够检测出设备中有放电，还应该能够在现场干扰很强的情况下检测出设备中没有放电。

5. 电力线路在线监测实例

野外电力线路的在线监测有两大难处：一是所处地点只有高压电线，没有仪器使用的低压电源，二是没有通讯线路，控制信号无法传入，局放信号无法传出。图示为对某处电力绝缘子串污秽放电进行的在线监测。由于污秽放电与所在地的天气地理环境有，只能在安装所在地现场进行测试。在该系统中，我们采用了太阳能供电，手机天线发射信号等技术，从而使野外监测成为可能。

本系统已在电网中在线监测相当长时间，下图所示为其监测结果。图中 A、B 两类绝缘子为同类绝缘子，A 类上涂有硅油，而 B 类上没有。在初期两者放电都很少，但一段时间后，B 类没涂硅油的绝缘子上污秽放电明显加强。

此类监测可用于：（1）由一个杆塔来监测一段地区内的污秽情况；（2）监测该地区的积污期。并由此决定最佳清洁时机。

通过在现场中的长期运用，我们的在线监测系统被证明是稳定可靠的。

