

电力电缆试验技术

广东电网公司电力科学研究院

王红斌

电力电缆与架空导线

电力电缆与架空导线都是用于传输与分配电能的线路，在电能的发、输、配各个环节都有应用，电力电缆与架空导线相比特点如下：

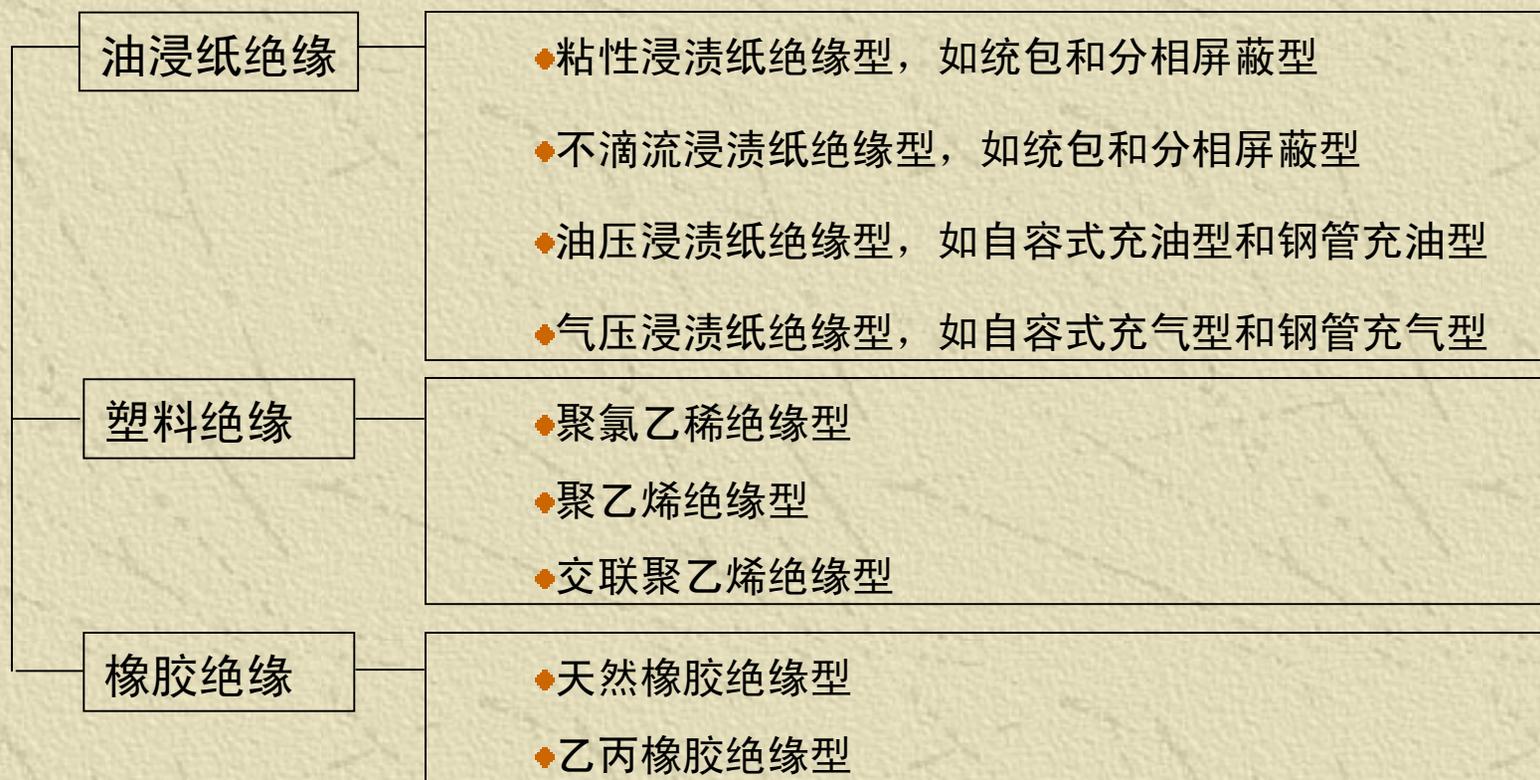
优点	缺点
<ul style="list-style-type: none">✦ 绝缘距离小，占地少✦ 受气候条件与周围环境影响小，可靠性高✦ 对人身较安全✦ 运行简单，维护工作量小✦ 电容大，有利于提高功率因数✦ 有利于向超高压、大容量发展	<ul style="list-style-type: none">✦ 结构、生产复杂✦ 成本高✦ 缺陷处理困难（我国尤其突出）

电力电缆应用范围

-
- ✦ 城市地下电网，为减少占地或环境美观。
 - ✦ 发电厂、工厂、工矿企业等厂房设备拥挤，引出线多的地方。
 - ✦ 严重污染地区，用以提高供电可靠性。
 - ✦ 跨越江河、海峡的输电线路，解决大跨度问题。
 - ✦ 国防需要，为避免暴露目标。
 - ✦ 总之，电力电缆已成为近代电力系统不可缺少的组成部分。例如，瑞士苏黎世整个城市供电的14个170kV变电站，全部为电缆出线，没有一条架空线路，组成了全电缆环网。

电力电缆的分类

电力电缆可按绝缘材料、结构特征、敷设环境、电压等级等进行分类，按绝缘材料分类如下：



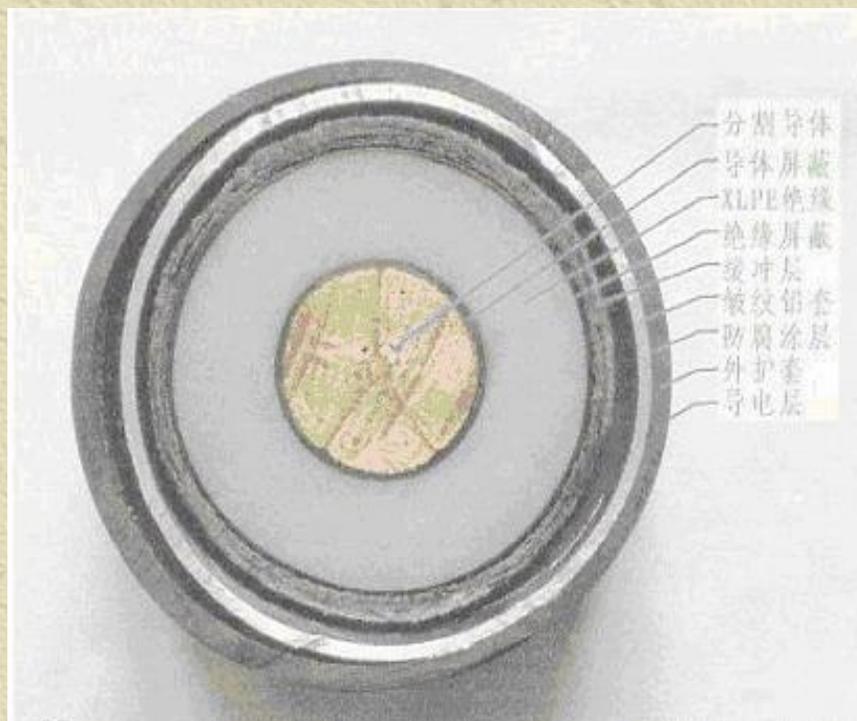
橡塑绝缘电力电缆的结构—

单芯电缆

✦ 单芯电缆典型结构由内向外依次为：电缆线芯、线芯屏蔽、绝缘层、绝缘屏蔽、内衬层(缓冲阻水层)、金属护层、外护层等。

✦ $1 \times 1600\text{mm}^2$ 220kV 电缆

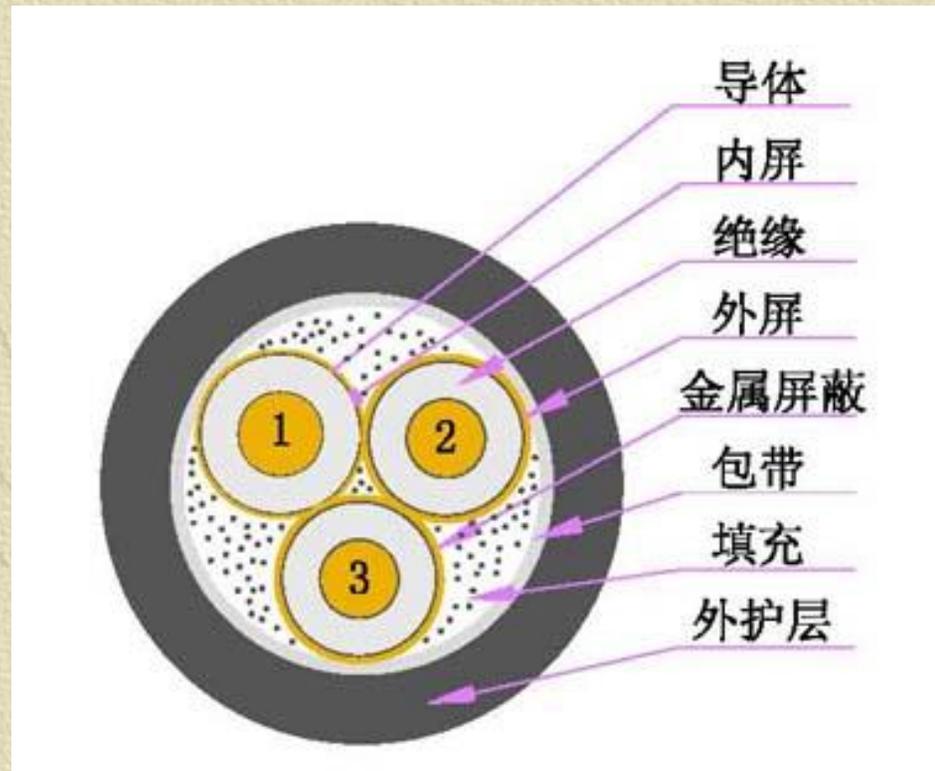
$1 \times 2500\text{mm}^2$ 220kV 电缆



橡塑绝缘电力电缆的结构—

三芯电缆

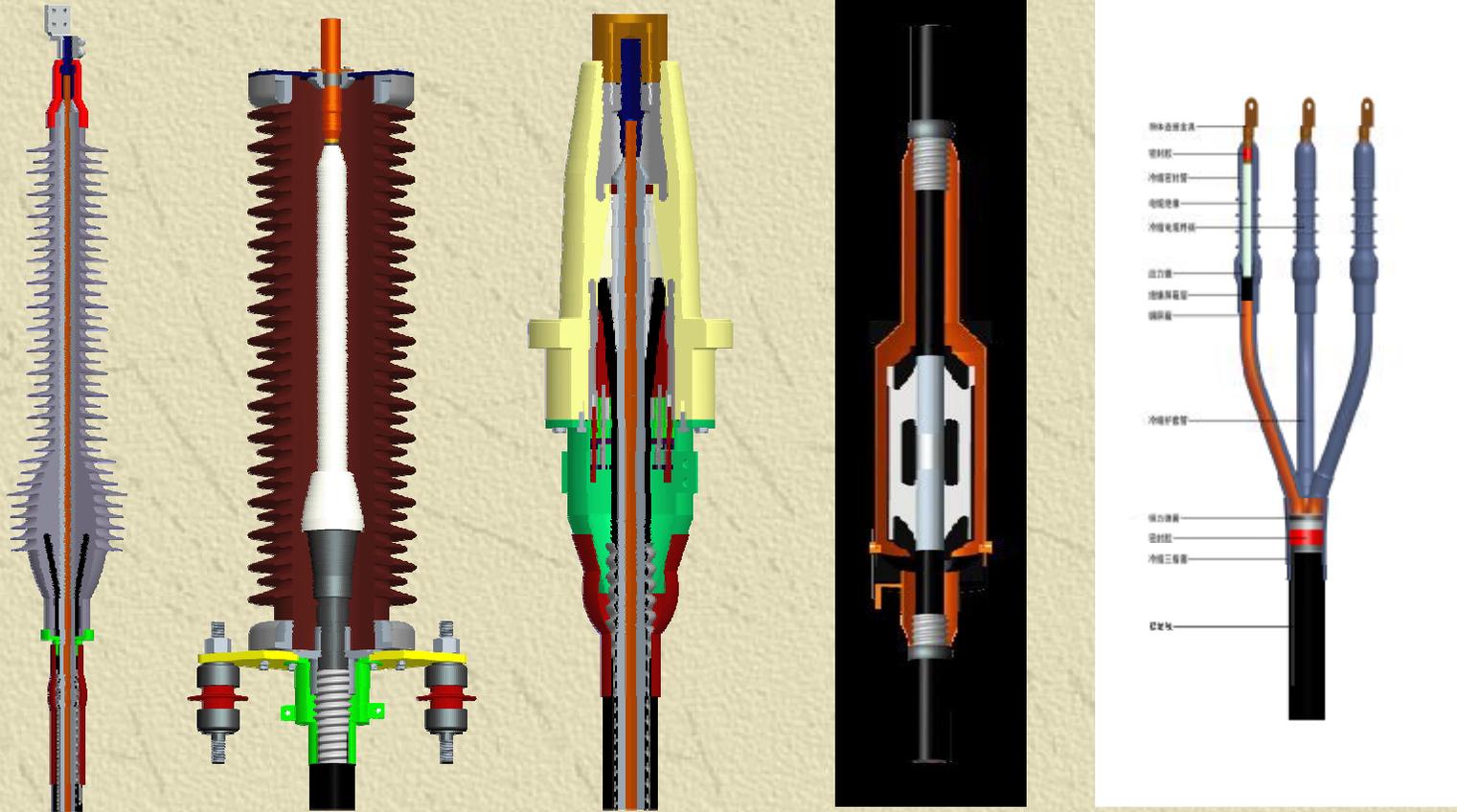
三芯电缆典型结构由内向外依次为：电缆线芯（导体）、线芯屏蔽、绝缘层、绝缘屏蔽、内衬层(填充层)、金属铠装、外护层等。



橡塑绝缘电力电缆附件—

户外终端、GIS终端、中间接头

橡塑绝缘电力电缆附件包括：户外终端、GIS终端、中间接头，现在一般应用的为预制式结构。



橡塑绝缘电力电缆试验项目

- ✦ 电缆主绝缘的绝缘电阻测量
- ✦ 电缆主绝缘耐压试验
- ✦ 电缆外护套绝缘电阻测量
- ✦ 电缆外护套直流耐压试验
- ✦ 测量金属屏蔽层电阻和导体电阻比
- ✦ 检查电缆线路两端的相位
- ✦ 交叉互联系统试验
- ✦ 电缆线路参数测量

（直流电阻、正序阻抗、零序阻抗测量、 电容测量）

电力电缆的额定电压

- ✦ 电力电缆的额定电压是电缆及其附件设计和电气性能试验用的基准电压，用 U_0/U 表示。
- ✦ U_0 为电缆及其附件设计导体和金属屏蔽（地）之间的额定工频电压有效值，单位kV。
- ✦ U 为电缆及其附件设计的各相导体之间的额定工频电压有效值，单位kV。
- ✦ 同样额定电压的电力系统，中性点接地方式不同， U 相同的电缆，其 U_0 值是不相同的。所以有类似6/10kV、8.7/10kV；21/35kV、26/35kV这样相同 U ，不同 U_0 电压的电缆。

主绝缘绝缘电阻测量

✦ 试验目的:

- ◆ 初步判断主绝缘是否受潮、老化，检查耐压试验后电缆主绝缘是否存在缺陷。
- ◆ 绝缘电阻下降表示绝缘受潮或发生老化、劣化，可能导致电缆击穿和烧毁。
- ◆ 只能有效地检测出整体受潮和贯穿性缺陷，对局部缺陷不敏感。

✦ 测量方法:

- ◆ 分别在每一相测量，非被试相及金属屏蔽（金属护套）、铠装层一起接地。
- ◆ 采用兆欧表，推荐大容量数字兆欧表（如：短路电流 $>3\text{mA}$ ）。
- ◆ 0.6/1kV电缆测量电压1000V
- ◆ 0.6/1kV以上电缆测量电压2500V
- ◆ 6/6kV以上电缆也可用5000V

主绝缘绝缘电阻测量

✦ 试验周期:

- ◆ 交接试验
- ◆ 新作终端或接头后

✦ 注意问题:

- ◆ 兆欧表“L”端引线和“E”端引线应具有可靠的绝缘。
- ◆ 测量前后均应对电缆充分放电，时间约2—3分钟。
- ◆ 若用手摇式兆欧表，未断开高压引线前，不得停止摇动手柄。
- ◆ 电缆不接试验设备的另一端应派人看守，不准人靠近与接触。
- ◆ 如果电缆接头表面泄漏电流较大，可采用屏蔽措施，屏蔽线接于兆欧表“G”端。

影响主绝缘绝缘电阻值的因素

- ✦ 首先决定于绝缘的尺寸和材料，不同型号的电缆，绝缘材料与结构差异较大。
- ✦ 受电缆头污秽状况、大气湿度等因素的影响很大，不同的绝缘材料在相同的受潮条件下，电气击穿强度的降低也不大相同。
- ✦ GB50150-2006交接试验标准对电缆主绝缘的绝缘电阻值未作具体规定。
- ✦ Q/CSG 1 0007-2004预防性试验规程要求大于1000MΩ。
- ✦ 比较全面的判断参考值参见下表。测量数值应换算到每km值，便于比较。

主绝缘绝缘电阻值要求

电缆主绝缘绝缘电阻值参考标准

序号	电压等级(kV)	电缆种类	绝缘电阻(MΩ)
1	0.5	聚氯乙烯绝缘	≥30
2	1	聚氯乙烯绝缘	≥40
3	3	聚氯乙烯绝缘	≥50
4	6	聚氯乙烯绝缘	≥60
5	6~10	交联聚乙烯绝缘	≥1000
6	≥35	交联聚乙烯绝缘	≥2500

注：表中所列数值均为换算到长度为1km时的绝缘电阻值。

换算公式 $R_{\text{换算}} = R_{\text{测量}}/L$ ，L为被测电缆长度。

当电缆长度不足1km时，不需换算。

外护套绝缘电阻测量

✦ 试验目的：

- 检测电缆在敷设后或运行中外护套是否损伤或受潮。
- 外护套破损的原因有：敷设过程中受拉力过大或弯曲过度；敷设或运行中由于施工和交通运输等直接外力作用；终端/中接头受内部应力、自然拉力、电动力作用；白蚁吞噬、化学物质腐蚀等。

✦ 测量方法：

- 三芯电缆三相共用外护套，只进行一次测量；单芯电缆分别在每一相测量，非被试相及金属线芯（导体）接地。
- 采用500V兆欧表，推荐大容量数字兆欧表（如：短路电流 $>3\text{mA}$ ）。
- GB50150-2006、Q/CSG 1 0007-2004要求外护套绝缘电阻值不低于 $0.5\text{M}\Omega/\text{km}$ 。

外护套绝缘电阻测量

✦ 试验周期：

- ◆ 交接试验
- ◆ 3年（对外护套有引出线者进行）

✦ 注意问题：

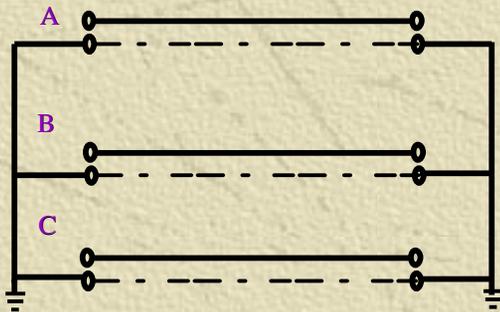
- ◆ 兆欧表“L”端引线和“E”端引线应具有可靠的绝缘。
- ◆ 测量前后均应对电缆金属护层充分放电，时间约2—3分钟。
- ◆ 若用手摇式兆欧表，未断开高压引线前，不得停止摇动手柄。
- ◆ 电缆不接试验设备的另一端应派人看守，不准人靠近与接触。

金属护套接地方式

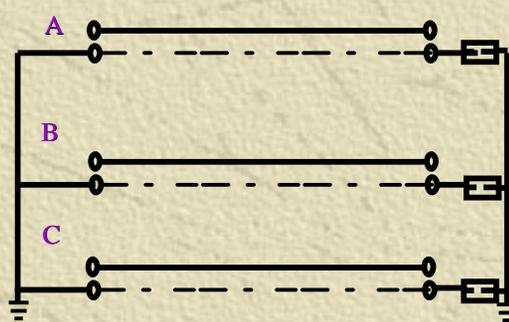
单芯电缆组成的三相输电系统中，金属护层接地方式：

- a、两端接地
- b、单端接地
- c、交叉互联接地

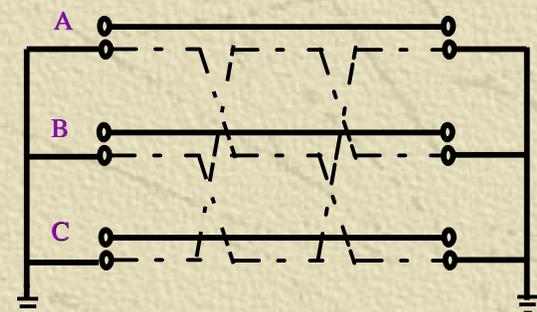
a、两端接地



b、单端接地



c、交叉互联接地



外护套直流耐压试验

✦ 试验目的:

- ◆ 检测电缆在敷设后或运行中外护套是否损伤或受潮。

✦ 试验电压:

- ◆ 交接试验——直流10kV, 持续时间1min
- ◆ 预防性试验——直流5kV, 持续时间1min

✦ 试验周期:

- ◆ 交接试验
- ◆ 3年

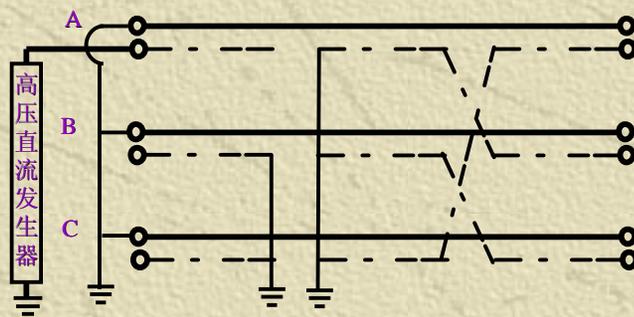
✦ 试验判据:

- ◆ 不发生击穿。

外护套直流耐压试验

✦ 检测部位:

- ◆ 非金属护套与接头外护层（对外护层厚度2mm以上，表面涂有导电层者，基本上即对110kV及以上电压等级电缆进行）。
- ◆ 对于交叉互联系统，直流耐压试验在交叉互联系统的每一段上进行，试验时将电缆金属护层的交叉互联连接断开，被试段金属护层接直流试验电压，互联箱中另一侧的非被试段电缆金属护层接地，绝缘接头外护套、互联箱段间绝缘夹板、引线同轴电缆连同电缆外护层一起试验。



交叉互联接地方式A相第一段外护层直流耐压试验原理接线图

外护套直流耐压试验典型缺陷

序号	缺陷现象	缺陷原因	处理措施
①	外护层直流耐压 10kV 未通过	施工工具扎伤外护套	查找故障点，包扎处理
②	中间绝缘接头两侧护套间绝缘电阻低（约 100Ω）	绝缘接头安装错误	拆开接头防水外壳，重新处理两端绝缘
③	外护层绝缘电阻低（约 50MΩ），直流耐压 10kV 未通过	转弯位置外护层磕碰损伤	查找故障点，包扎处理
④	外护层绝缘电阻低（约 20MΩ）	终端接头石墨导电层未处理干净	石墨层刮离处理后，重新包扎
⑤	外护层直流耐压 10kV 通过，运行时接头发生故障	绝缘中间接头安装工艺不合理，试验时互联箱中另一侧非被试段金属护层未接地，导致缺陷未及时被发现	改进绝缘中间接头安装工艺，重做接头

外护套直流耐压试验典型缺陷

✦ 缺陷分析:

- 序号①缺陷属典型施工问题，故障点定位后，施工方即说明该处电缆曾经被铁锹扎伤过，经处理后试验即通过，这一缺陷暴露了施工管理存在的问题。
- 序号②同类绝缘接头安装错误在两回电缆中发现了4处，反映出附件安装人员水平较低，外护套试验检测出缺陷避免了类似序号⑤运行故障的发生。
- 序号③缺陷原因也在于施工管理不严格，序号④缺陷原因在于附件安装质量差。
- 序号⑤为某单位一起110kV电缆故障实例，同时暴露出附件安装与交接试验两方面都存在问题。

外护套直流耐压试验典型缺陷

✦ 缺陷分析:

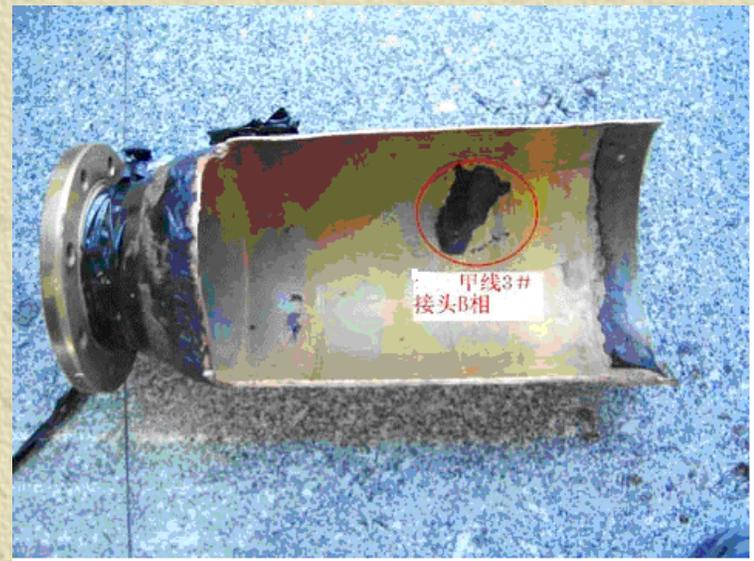
- ◆ 首先，厂家工艺要求不合理，电缆预制件的铜编织带外层只要求一层半搭绝缘带，而且预制件在铜壳内严重偏心，导致绝缘裕度不够。
- ◆ 其次，在电缆外护层直流10kV/1min耐压试验时，试验电压把仅有的一层绝缘带击穿，但试验时互联箱中另一侧非被试段金属护层未接地，导致缺陷未及时被发现。
- ◆ 带电运行后，绝缘接头内部导通，造成电缆护套交叉互联系统失效，护套产生约几十安培感应电流。感应电流流过接头的铜编织与铜壳接触处，产生的热量将中接头预制件烧融，烧融区域破坏了橡胶预制件的应力锥的绝缘性能，场强严重畸变，接头被瞬间击穿，导体对铜壳放电，导致线路跳闸。

外护套直流耐压试验典型缺陷

序号⑤：一起110kV电缆故障实例照片



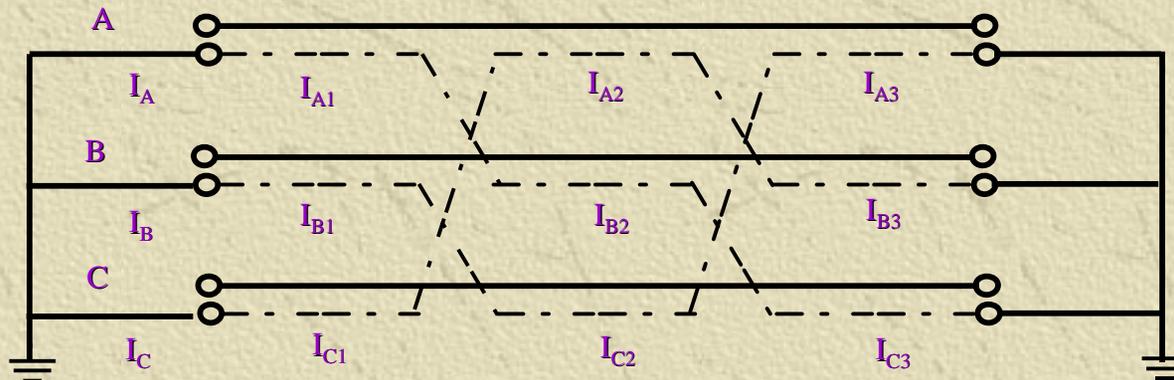
中间接头故障后图片



同类型中间接头解体图片

交叉互联系统试验

✦ 交叉互联系统示意图：



✦ 金属护层电流：

$I_{A1} = I_{B1} = I_{C1}$	$I_{A1} + I_{B1} + I_{C1} = 0$	$I_A = I_{A1} + I_{B2} + I_{C3} = 0$
$I_{A2} = I_{B2} = I_{C2}$	$I_{A2} + I_{B2} + I_{C2} = 0$	$I_B = I_{B1} + I_{C2} + I_{A3} = 0$
$I_{A3} = I_{B3} = I_{C3}$	$I_{A3} + I_{B3} + I_{C3} = 0$	$I_C = I_{C1} + I_{A2} + I_{B3} = 0$

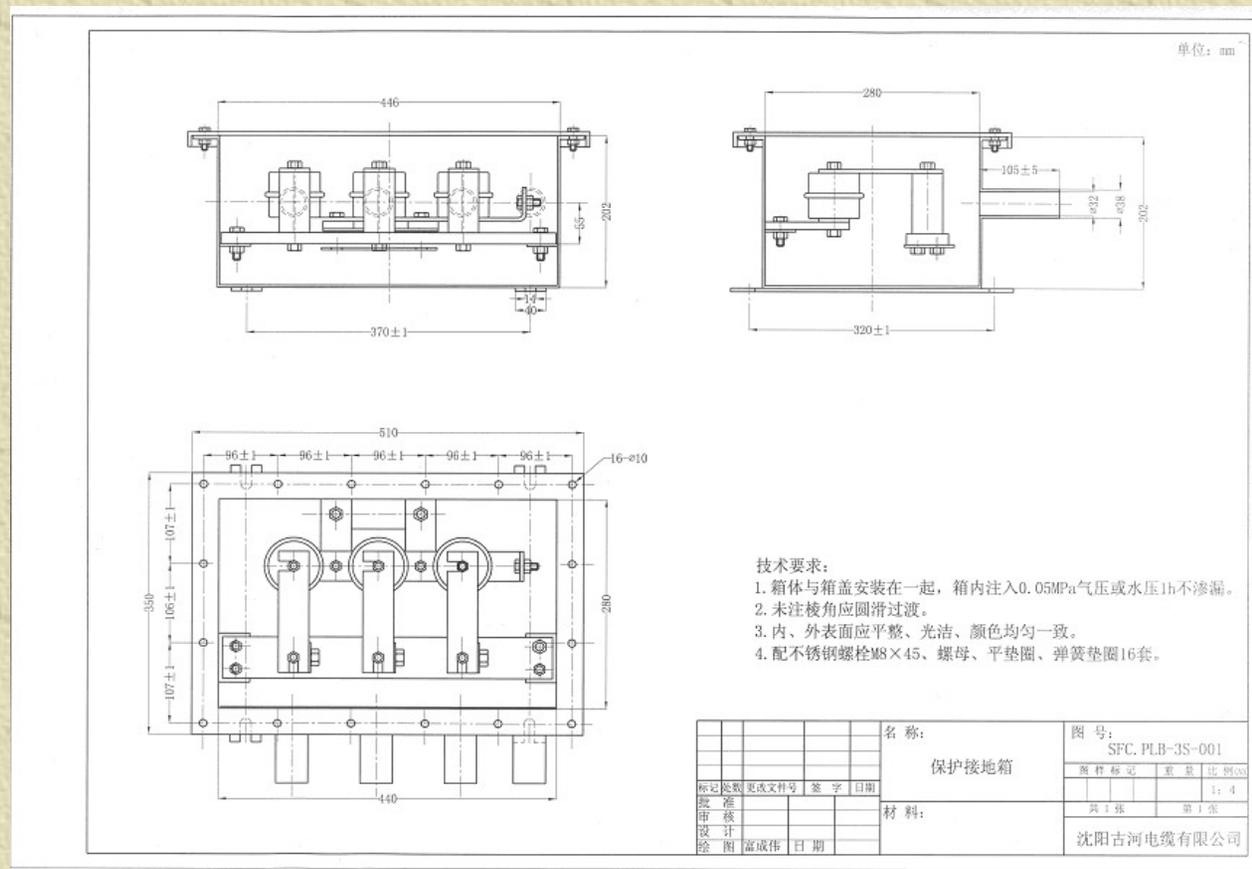
交叉互联系统试验

✦ 交叉互联效果及构成：

- ◆ 相比不交叉互联，金属护层流过的电流大大降低。
- ◆ 非接地端金属护层上最高感应电压为最长长度那一段电缆金属护层上感应的电压。
- ◆ 交叉互联必须断开金属护层，断口间与对地均需绝缘良好，一般采用互联箱进行电缆金属护层的交叉互联。
- ◆ 接地端金属护层通过同轴电缆引入直接接地箱接地；非接地端金属护层通过同轴电缆引入交叉互联接地箱，箱内装有护层过电压保护器限制可能出现的过电压。

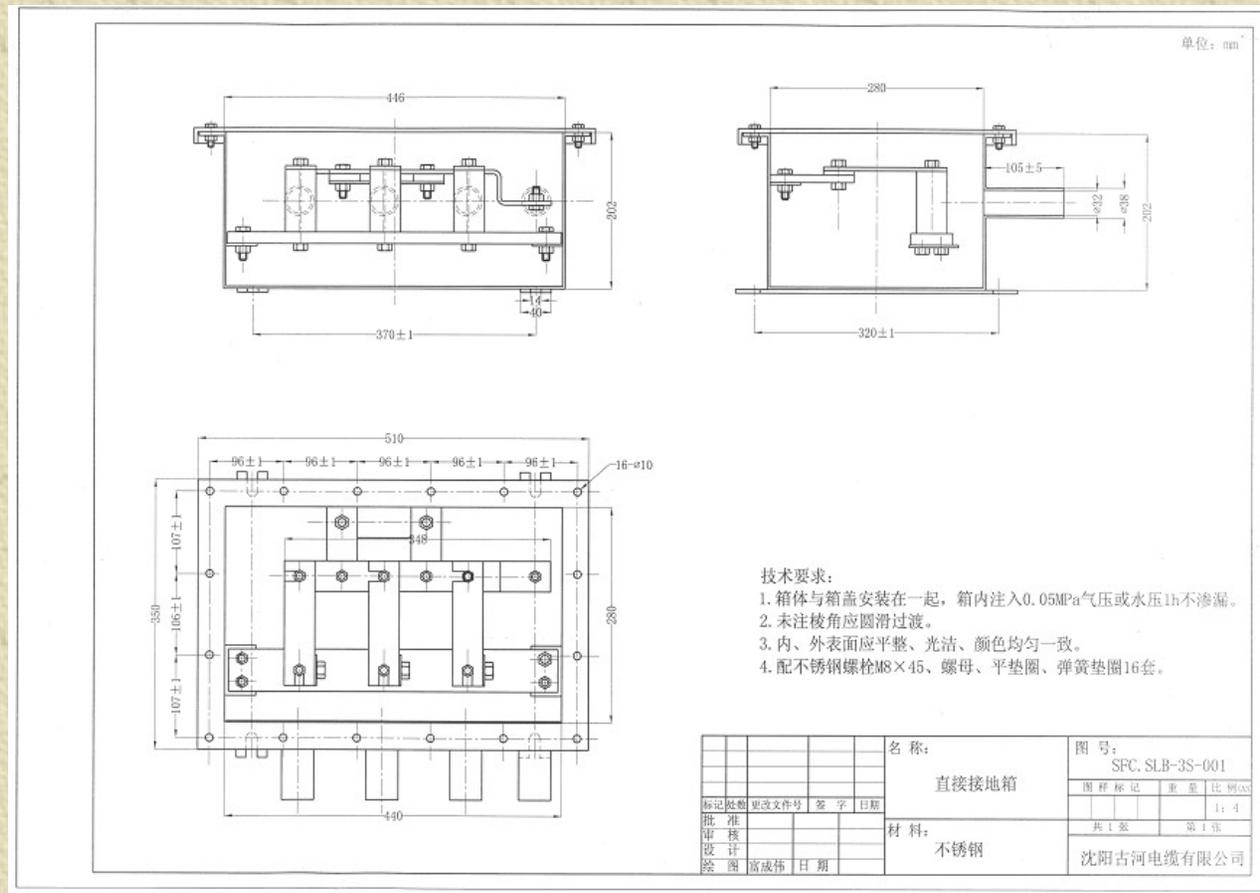
交叉互联系统试验

✦ 交叉互联箱——保护接地箱：



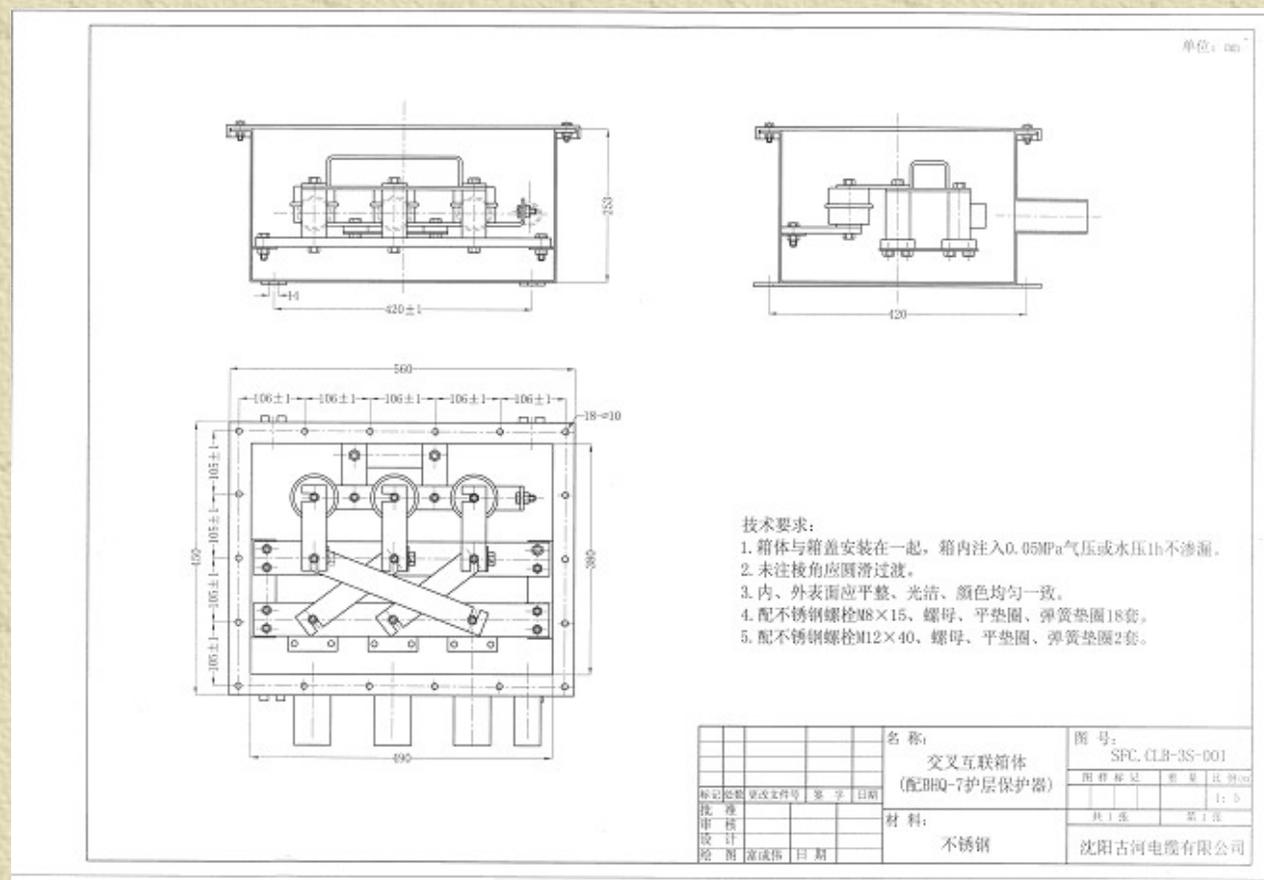
交叉互联系统试验

✦ 交叉互联箱——直接接地箱：



交叉互联系统试验

✦ 交叉互联箱——交叉互联箱：



交叉互联系统试验

✦ 电缆外护套、绝缘接头外护套与绝缘夹板的直流耐压试验

- 试验时必须将护层过电压保护器断开，在互联箱中将另一侧的三段电缆金属套都接地，使绝缘接头的绝缘环也能结合在一起进行试验。

✦ 非线性电阻型护层过电压保护器试验

- 以下两项均为交接试验项目，预防性试验选做其中一个。
- 伏安特性或参考电压，应符合制造厂的规定。
- 非线性电阻片及其引线的对地绝缘电阻，用1000V兆欧表测量引线与外壳之间的绝缘电阻，其值不应小于 $10\text{M}\Omega$ 。

✦ 互联箱闸刀(或连接片)接触电阻和连接位置的检查

- 连接位置应正确无误。
- 在正常工作位置进行测量，接触电阻不应大于 $20\mu\Omega$ 。

交叉互联系统试验

✦ 交叉互联性能检验

- 交接试验推荐采用的方式，应作为特殊试验项目。
- 使所有互联箱连接片处于正常工作位置，在每相电缆导体中通以大约100A的三相平衡试验电流。在保持试验电流不变的情况下，测量最靠近交叉互联箱处的金属套电流和对地电压。测量完后将试验电流降至零，切断电源。然后将最靠近的交叉互联箱内的连接片重新连接成模拟错误连接的情况，再次将试验电流升至100A，并再测量该交叉互联箱处的金属套电流和对地电压。测量完后将试验电量降至零，切断电源，将该交叉互联箱中的连接片复原至正确的连接位置。最后再将试验电流升至100A，测量电缆线路上所有其它交叉互联箱处的金属套电流和对地电压。

交叉互联系统试验

✦ 交叉互联性能检验

- 试验结果符合下述要求则认为交叉互联系统的性能是满意的：
 - 1) 在连接片作错误连接时，试验能表明存在异乎寻常大的金属套电流；
 - 2) 在连接片正确连接时，将测得的任何一个金属套电流乘以一个系数（它等于电缆的额定电流除以上述的试验电流）后所得的电流值不会使电缆额定电流的降低量超过3%；
 - 3) 将测得的金属套对地电压乘以上述2)项中的系数后不超过电缆在负载额定电流时规定的感应电压的最大值。

测量金属屏蔽层电阻和导体电阻比

✦ 试验目的:

- ◆ 测量金属屏蔽层电阻和导体电阻可以监视其受腐蚀变化情况，测量电阻比可以消除温度对直流电阻测量的影响。

✦ 试验周期:

- ◆ 交接试验

✦ 试验方法:

- ◆ 用双臂电桥测量在相同温度下的金属屏蔽层和导体的直流电阻。

✦ 试验判据:

- ◆ 与投运前的测量数据相比较不应有较大的变化。当前者与后者之比与投运前相比增加时，表明屏蔽层的直流电阻增大，铜屏蔽层有可能被腐蚀；当该比值与投运前相比减少时，表明附件中的导体连接点的接触电阻有增大的可能。

检查电缆线路两端的相位

✦ 试验目的：

- ◆ 新建线路投入运行前和运行中的线路连接方式变动后，核对其两端的相位和相序，防止相位错误造成事故。

✦ 试验周期：

- ◆ 交接试验

✦ 试验方法：

- ◆ 兆欧表法
- ◆ 指示灯法

电缆线路参数测量

✦ 试验目的:

- 电缆线路直流电阻、正序阻抗、零序阻抗测量、电容测量作为新建线路投入运行前和运行中的线路连接方式变动后，有关计算（如系统短路电流、继电保护整定值等）的实际依据。

✦ 试验周期:

- 交接试验

✦ 试验方法:

- 同架空线路测量。

✦ 补充说明:

- 因为电缆的正序电容和零序电容相同，故通常只用导体与金属屏蔽间的电容表示。

橡塑绝缘电力电缆主绝缘耐压试验

✦ GB50150-2006交接试验标准的说明：

✦ IEC标准的安装后试验要求中，均提出“推荐进行外护套试验和（或）进行主绝缘交流试验。对仅进行了外护套试验的新电缆线路，经采购方与承包方同意，在附件安装期间的质量保证程序可以代替主绝缘试验”的观点和规定，指出了附件安装期间的质量保证程序是决定安装质量的实质因素，试验只是辅助手段。但前提是能够提供经过验证的可信的“附件安装期间的质量保证程序”。目前我国安装质量保证程序还需要验证，安装经验还需要积累，一般情况下还不能省去主绝缘试验。但应该按这一方向去努力。

橡塑绝缘电力电缆主绝缘耐压试验

- ❖ 电缆线路的电容很大，常规的工频耐压设备无法满足其容量要求。
- ❖ 例如10km长的110 kV交联聚乙烯(XLPE)绝缘电缆，按其截面积的不同，电容可达2~3 μF 。如果在系统的频率(50 Hz)下用交流电压进行现场试验，就需要很大的无功功率。如上所述的电缆，在160 kV(2.5 U_0)下进行交流电压试验，则可能需要高达20MVA的试验功率。
- ❖ 常规的交流电压试验设备(运行频率50 Hz)的缺点在于其单位试验功率的重量较大，达100~200N/kVA，试验设备的运输很不经济，而且需要在现场提供相当大的电源。

橡塑绝缘电力电缆主绝缘耐压试验

- ✦ 传统的方法是对电缆线路进行直流耐压。实践证明这种方法对油纸绝缘的电缆是合适的，但对高电压等级的橡塑绝缘电缆是低效而且有害的。
- ✦ 随着技术的发展，大家都在不断地开发和寻求合理可行的技术手段解决这个问题，付诸于实践，逐步积累经验，并提供给 IEC 和 CIGRE(国际大电网会议)等权威的国际机构，不断地修订和发展相关的标准。
- ✦ 目前已有的对电缆线路竣工试验的手段主要有直流耐压、 0.1Hz 耐压、振荡波试验、工频谐振以及变频谐振耐压等几种方法。

直流耐压试验的局限性

- ❖ 直流耐压所需的设备容量很小，因此传统上电缆线路的现场耐压试验均采用直流耐压，直流耐压在油纸绝缘电缆上的应用是成功的。试验时可以同时测量泄漏电流，由泄漏电流的变化或者泄漏电流与试验电压的关系，可用以判断绝缘状况。数十年对油浸纸绝缘电力电缆采用直流耐压试验的实践，已证明其作为现场定期预防性试验项目能得出满意的试验结果，这也就是充油和压气电缆用直流电压进行现场试验的理由。
- ❖ 直流电场下场强的分布按介质的电阻系数成正比分布，直流试验时油纸电缆纸绝缘相较于油承受较高的试验电压，容易检测出纸绝缘中存在的局部空隙缺陷。

直流耐压试验的局限性

交流电场下场强按介电常数成反比分布，橡塑绝缘是整体型的绝缘，交联聚乙烯绝缘介电常数为2.1—2.3，且一般不受温度变化的影响，因此交流电压下电场分布比较稳定。橡塑绝缘电缆绝缘电阻系数分布不均匀，且受温度和场强的影响较大，直流电场的分布取决于绝缘本身及所含杂质的多少、分布的不均匀性以及附加的其它介质，电场分布不同于理想圆柱体绝缘结构。由于在绝缘层中交、直流电压的电场分布不同，导致击穿不一致性，即：电缆的某些部位，如电缆接头在交流情况下存在的某些缺陷，在直流耐压时却不会击穿，造成交流电压下会导致击穿的缺陷直流耐压下发现不了，而某些在交流电压下不会导致击穿的地方，在直流高压试验时却会击穿。即一方面缺陷检出率低，另一方面容易造成不应出现的击穿。

直流耐压试验的局限性

- ✱ XLPE自身的固有场强高，要用很高的直流试验电压甚至严重损伤电缆才能检出。例如，20kV XLPE电缆绝缘的50%处有金属尖端，结果却在 $10U_0$ 的直流电压下才能使其击穿。再者，在接头内有金属尖端或密封电缆头周围有严重的缺陷，即使用 $12U_0 \sim 16U_0$ 直流电压试验也不可能检出。
- ✱ 由于XLPE的高绝缘电阻和相应的空间电荷效应，尚不能排除在直流电压下会造成XLPE电缆绝缘非故意的预先损伤。直流耐压试验时形成的空间电荷，可造成电缆在投入交流工作电压运行时击穿，或附件界面因积聚电荷而沿界面滑闪。
- ✱ GIGRE早在九十年代初就成立WG21.09 工作组对橡塑绝缘电缆的现场耐压试验方法进行研究和调查，一些调查的结果如下：

CI GRE关于现场直流耐压的研究和调查

- ✦ 意大利对500公里电缆、1500个附件做直流耐压竣工试验,有3个含有XLPE包带模塑接头顺利通过试验,但投运3天后发生击穿。对110—132kV的XLPE电缆做 $4U_0$ 直流耐压,有18个接头击穿,但只有11个有明显缺陷;另外有9个接头顺利通过直流耐压试验,但在投运4天后击穿。
- ✦ 瑞典对132kV XLPE 绝缘电缆进行 $4U_0$ 直流耐压试验,600个模塑接头中有12个击穿,但未发现明显缺陷。
- ✦ 日本的研究报告指出,对于有明显缺陷的132kV的XLPE模塑接头进行试验,15min直流耐压远超过 $4U_0$,而交流耐压则低于 $2.5U_0$ 。
- ✦ 国际大电网会议第21研究委员会CI GRE SC21 WG21-09工作组报告和IEC SC20A的新工作项目提案文件不推荐采用直流耐压试验作为橡塑绝缘电力电缆的竣工试验。

空载运行方法的有效性研究

- ✦ 用系统电源进行试验具有一定的冒险性，有可能造成系统短路事故（国内及我省供电局采用该方法都曾多次引起110kV系统短路）。
- ✦ 有效性不够，无奈之举。
- ✦ CIGRE SC21 WG21-09工作组在其工作报告中指出：采用 U_0 经24小时或更长时间试验是否足以彻底检出所有有害的缺陷尚有怀疑，但对于有些电力工程单位当采用 U_0 电压作为竣工试验是唯一实际可行的试验手段时，才采用此试验方法。
- ✦ 西北电研院曾经开展了“交联聚乙烯高压电缆现场试验方法的研究”科研项目，采用平行比对的方法，通过对存在人为制造绝缘缺陷的110KV XLPE电力电缆试品，分别施加 $1.7U_0$ 工频电压；空载24小时后带负载；直流耐压等平行比对试验，以确定其发现故障的有效性。

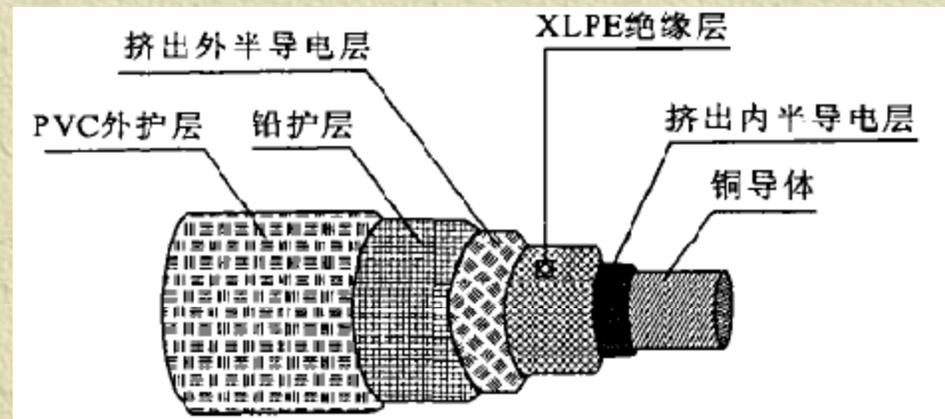
试验室模拟故障试验

❖ 试品:

❖ XLPE—64 / 110 kV—400mm²的铜芯电缆
澳大利亚OLEX公司 1995年8月生产。
电缆结构如下图所示。

❖ 参数:

- ❖ 电缆外径83.44 mm;
- ❖ PVC外护套厚4.2 mm;
- ❖ 铅护厚2.76 mm;
- ❖ 试品长度21.3 m;
- ❖ 绝缘厚19.66~20.00 mm;
- ❖ 铜导体芯径24mm;
- ❖ 内、外半导体层分别厚1.0、1.6 mm;
- ❖ 电缆正常运行时缆芯允许温度90℃。



试验室模拟故障试验

-
- ✦ 在电缆两端制作终端头，在距终端约0.4 m处的电缆上人为制造钉尖或孔洞缺陷，按不同标准对电缆终端施加工频电压，每击穿一次，从击穿点锯断再做终端头和制造缺陷。
 - ✦ 根据现场实际试验程序进行模拟空载24h后带负载试验，首先按IEC标准对电缆终端头施加工频电压 U_0 (64 kV)持续24 h，然后在电缆上套入穿心变流器并将两终端头压接后升流，用钳型电流表和点温计测量流过缆心的电流及温度，同时在两终端头连接处施加工频电压 U_0 (64 kV)。
 - ✦ 试验结果：

试验室模拟故障试验

编号	故障形式	标准值	试验电压/kV	加压时间	结果	环境温度/°C
1	钉尖进入主绝缘 2.3mm	$1.7U_0$	110	5 min	未击穿	24
2	钉尖进入主绝缘 2.3mm	$1.7U_0$	110	1 h	未击穿	24
3	钉尖进入主绝缘 3.5mm	$1.7U_0$	110	5 min	未击穿	26
4	钉尖进入主绝缘 3.5mm	$1.7U_0$	110	1 h	未击穿	26
5	钉尖进入主绝缘 3.8mm	$1.7U_0$	110	5 min	未击穿	25
6	钉尖进入主绝缘 3.8mm	$1.7U_0$	110	1 h	未击穿	25
7	钉尖进入主绝缘 4.7mm	$1.7U_0$	110	10 s	击穿	26
8	钉尖进入主绝缘 4.7mm	U_0	64	24 h	未击穿	22~28
9	基于 8 电缆施加 50% I 5 h, 缆芯 58 °C	U_0	64	1 h	未击穿	25
10	基于 9 电缆施加 90% I 5 h, 缆芯 75 °C	U_0	64	10 min	击穿	24
11	直流试验, 钉尖进入主绝缘 4.7mm	$3U_0$	192	15 min	未击穿	26

试验室模拟故障试验

✦ 试验结论:

- ✦ 按照IEC的有关标准对人为制造缺陷的110kV交联电缆进行了 $1.7U_0$ 电压下、持续时间5min和1h及 U_0 电压下24h工频耐压试验，试验结果表明： $1.7U_0$ 电压下、持续时间5min交流耐压试验能够有效地发现电缆缺陷， U_0 电压下、持续24h的方法不能有效地发现电缆缺陷。
- ✦ 对有缺陷的电缆， U_0 电压下持续24h通过后，带一定负载时，有可能造成电缆缺陷处热击穿。因为当电缆线路带一定负荷时，负荷电流使得电缆导体芯发热并传导给绝缘层，导致绝缘层耐电强度下降，可能在运行电压下击穿。
- ✦ 直流耐压试验不能有效发现电缆存在的缺陷，且对电缆有害，国内许多地区及国际大电网工作组对交联电缆不再推荐直流耐压试验。

橡塑绝缘电力电缆主绝缘交流耐压试验——

串联谐振耐压试验回路原理

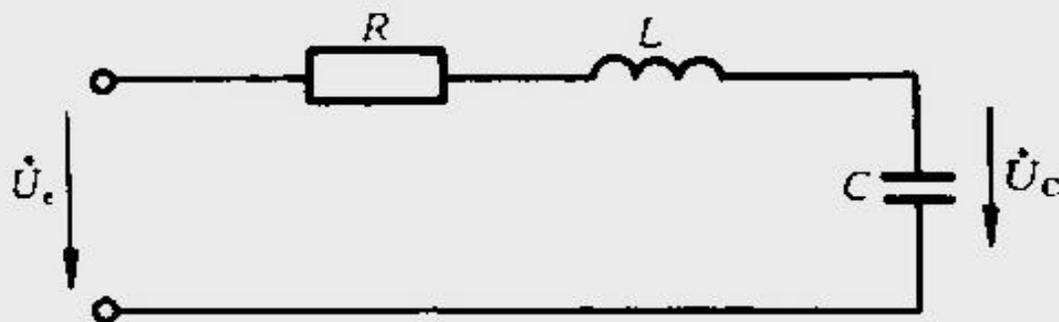


图 15-3 串联谐振试验回路的原理图

C—被试品电容；L—高压电抗器的电感；

R—回路中等值电阻； \dot{U}_e —电源电压；

\dot{U}_c —试品上电压

$$\dot{U}_c = -\frac{jX_c \dot{U}_e}{R + j(X_L - X_C)}$$

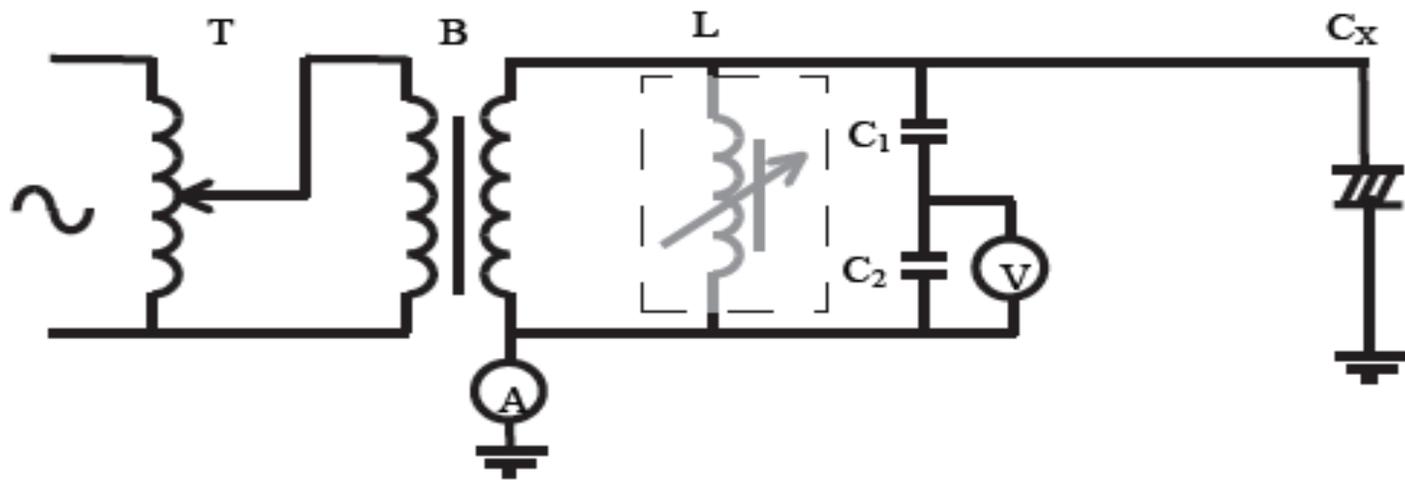
$$X_L = X_C$$

$$\dot{U}_c = -j \frac{X_c \dot{U}_e}{R} = -jQ \dot{U}_e$$

$$Q = \frac{X_c}{R} = \frac{X_L}{R}$$

交流耐压试验设备——

常规试验变压器交流耐压试验装置



T——调压器

B——试验变压器

L——并联补偿电抗器（可选件）

C₁、C₂——电容分压器

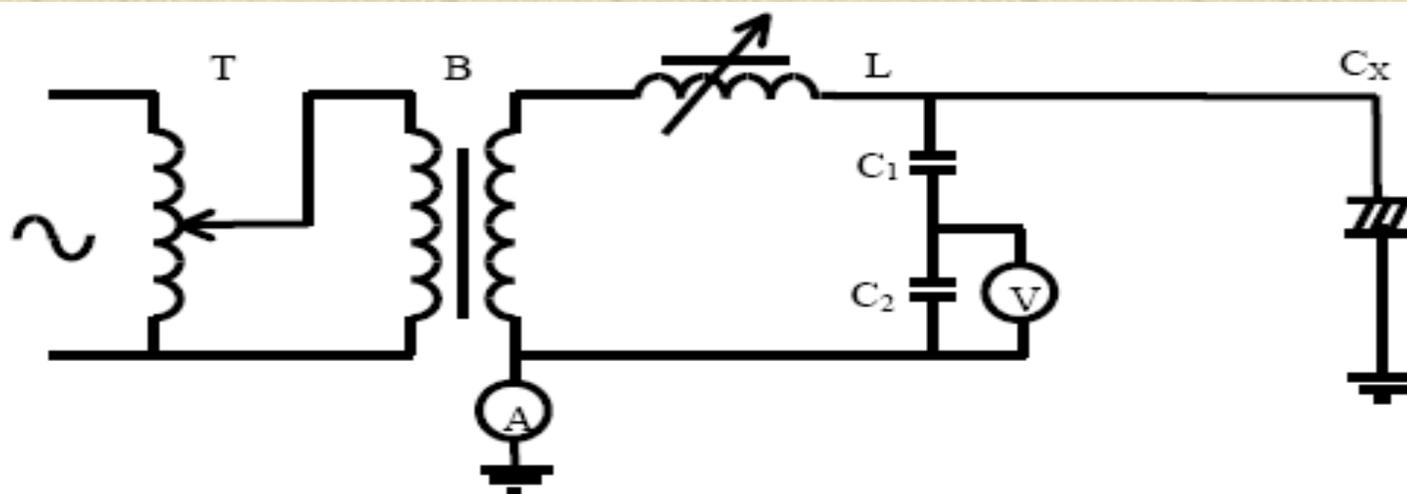
V——电压表

A——电流表

C_X——被试品

交流耐压试验设备——

调感式串联谐振耐压试验装置



T——调压器

L——串联谐振电抗器

V——电压表

C_x——被试品

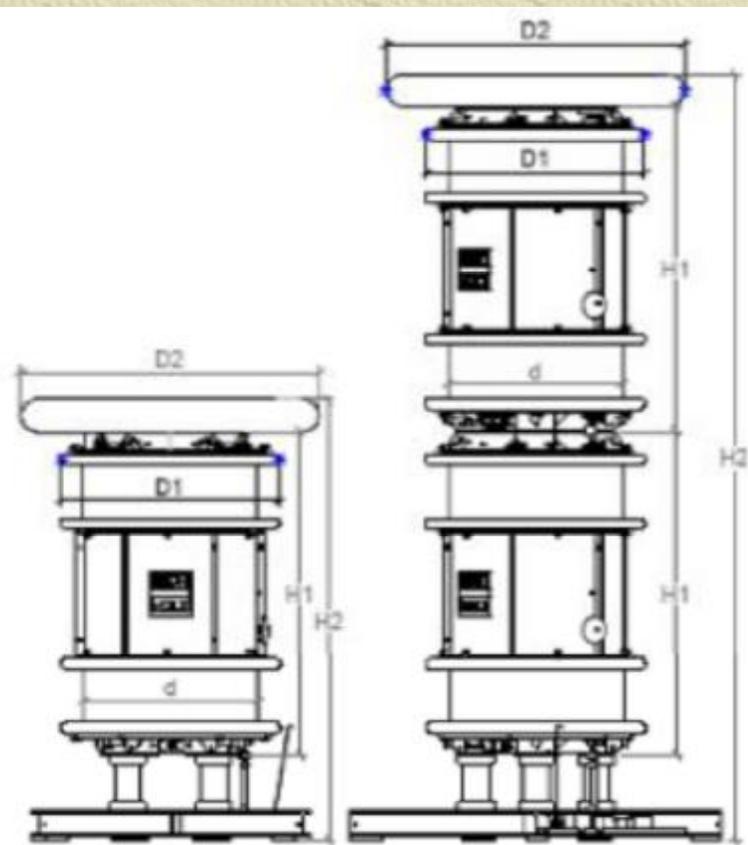
B——试验变压器

C₁、C₂——电容分压器

A——电流表

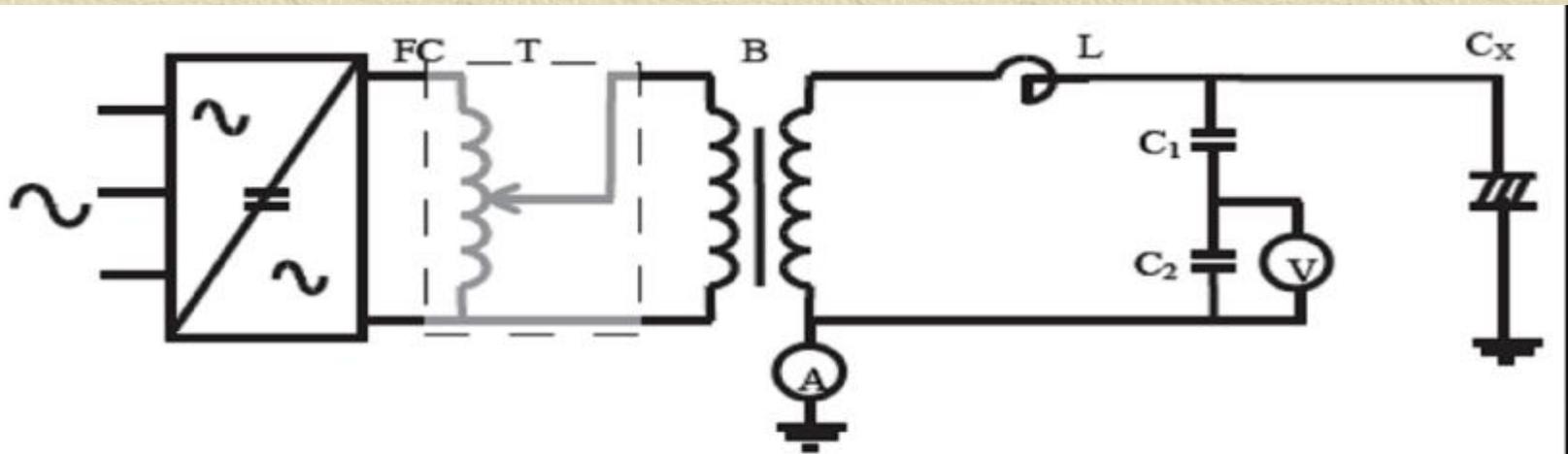
交流耐压试验设备——

调感式串联谐振耐压试验装置



交流耐压试验设备——

调频式串联谐振耐压试验装置



FC——变频电源

B——试验变压器

C₁、C₂——电容分压器

A——电流表

T——调压器（可选件）

L——串联谐振电抗器

V——电压表

C_x——被试品

$$f = \frac{1}{2p \sqrt{LC}}$$

交流耐压试验设备——

调频式串联谐振耐压试验装置



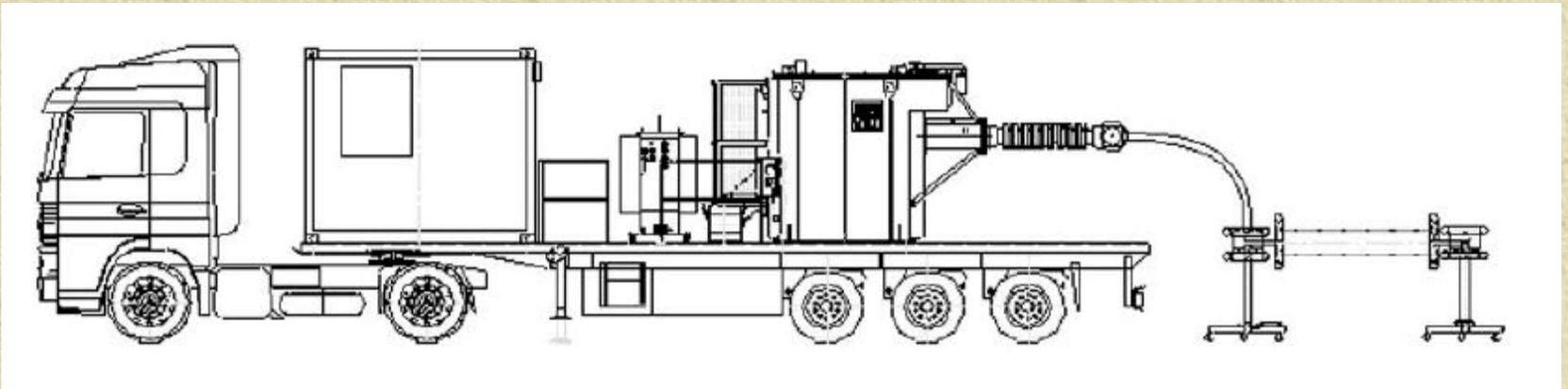
交流耐压试验设备——

调频式串联谐振耐压试验装置



交流耐压试验设备——

调频式串联谐振耐压试验装置



交流耐压试验参数估算实例

电缆参数如下：

电缆型号：YJLW₀₃ 规格：1×1200mm² 额定电压：127/220kV

单位电容：0.178μF/km 电缆长度：5023m/相 每相电容：0.894 μF

估算试验参数：

高压电抗器电感值：L=40/3=13.33H 试验电压频率：f=46.12Hz

试验电压U₁ =180kV 高压试验电流：I₁=46.62A

估计品质因数Q=100 激励电压U₂ =1800V

励磁变压器低压电流：I₂=220A

变频器输入电流：I₃ = I₂/1.732 =128A

考虑一定预度电源电流要求：I₄ = 1.2 I₃ =150A

试验发生击穿可能出现的现象

- ✦ 电压异常波动： du/dt 超过一定范围，一般系统都据此设置设备保护。
- ✦ 失去电压：系统失谐，一般不会发生过流现象。
- ✦ 可能有放电声、放电火花：试品电缆放电发生反击，在电抗器上产生过电压。
- ✦ 耐压后绝缘电阻降低：大部分显著降低，个别也可能变化不明显。

变频谐振方法的有效性分析

中间接头击穿后解剖图片



主绝缘交流耐压试验典型缺陷

序号	试品类型	击穿电压	击穿时间	缺陷情况及处理措施
①	110kV 电缆	126 kV	3'50''	中间接头击穿，重做接头
②	110kV 电缆	110 kV	1'10''	终端接头击穿，应力锥损坏，重做接头
③	35kV 电缆	20 kV	升压过程中	电缆本体被外力破坏，截断电缆，新加做一个中间接头
④	110kV 电缆	90 kV	升压过程中	中间接头击穿，附件安装环境恶劣，安装工艺差，重做接头
⑤	110kV 电缆	128 kV	15''	中间接头击穿，附件安装环境恶劣，安装工艺差，重做接头
⑥	110kV 电缆	128 kV	60''	中间接头击穿，附件安装环境恶劣，安装工艺差，重做接头
⑦	110kV 电缆	87 kV	29'	运行电缆事故后新做的中间接头试验时击穿，附件材料存在缺陷，重做接头

主绝缘交流耐压试验典型缺陷

✦ 缺陷分析:

- ◆ 序号①中电缆安装完后，曾经进行直流耐压试验通过，但运行后即发生中间接头击穿故障，修理后进行交流耐压试验再次出现接头击穿情况，经修复重做接头后第二次交流耐压试验通过，投入运行后正常，该实例也反映出直流耐压试验有效性较差。
- ◆ 序号②缺陷原因在于附件安装质量差。
- ◆ 序号③中电缆在升压过程中，未达到试验电压就发生击穿，经检查发现电缆本体被外力破坏，截断电缆，新加做一个中间接头后试验通过，反映出电缆运行管理不规范。
- ◆ 序号④、⑤、⑥中缺陷事例为同一电缆工程施工中不同相别电缆在相邻工井出现的问题，检查发现击穿接头所在工井靠近公路，附件安装环境恶劣，加之附件安装工艺差，导致一回电缆出现多次中间接头击穿事例。

主绝缘交流耐压试验典型缺陷

✦ 缺陷分析：

- ◆ 序号⑦为运行电缆事故后新做的中间接头试验时击穿，怀疑附件材料可能存在缺陷，重做接头后试验通过，投入运行后正常。
- ◆ 从试验检测到的缺陷情况看，交接试验采用工频交流电压或接近工频交流电压试验作为挤包绝缘电缆线路的竣工试验是合适的。除一例原因是由于电缆本体受外力破坏发生击穿外，其它缺陷类型均为电缆终端接头或中间接头击穿，与CIGRE研究结果相符合，电缆竣工试验主要目的是检出电缆与附件预制件间界面的缺陷，更多的反应了现场安装过程施工质量造成的缺陷。
- ◆ 另外，对于几个试验缺陷事例的分析也证实现场附件施工质量不高，主要有以下几个方面的问题：施工赶工期或质量控制措施不到位，现场条件比较差，温度、湿度、灰尘都未很好得到控制；电缆接头施工工艺水平不高，有些队伍只经过几天培训就开始施工，有些地方存在盲目施工问题；安装时没有严格按照工艺施工或工艺规定不合理，没有考虑到可能出现的问题。

试验标准的历史发展

- ✦ 1980年以前，国外电力部门就发现了直流耐压试验对橡塑绝缘是无效的且具有危害性。
- ✦ 1983~1989年 加拿大、德国、瑞典等国部分电力公司试验改做交流耐压试验。
- ✦ 1988年起德国部分电力公司试用0.1Hz超低频交流耐压试验。
- ✦ 1989~1990年美国陆续发表关于直流耐压试验存在的问题和原因分析方面的文章。
- ✦ 1994年广东省和华东电试院协同研究中压电缆交流耐压试验电压标准问题。

试验标准的历史发展

-
- ✦ 1995年 德国制定VDE DIN 0276 Part1001 (May 1995) 中压橡塑电缆交接试验工频交流耐压和0.1Hz耐压试验电压标准。
 - ✦ 1996年 美国电力研究所 (EPRI) 发布《中压电力电缆0.1Hz现场试验试行导则》(EPRI RP3392—of / CEA 200—D—780A)。
 - ✦ 1997年 国际大电网会议 (CIGRE) 第21.09工作组发表《高压挤包绝缘竣工验收试验导则》(30~300Hz及试验电压标准)。
 - ✦ 1999年 广东制定中、高压橡塑电缆交流试验电压标准暂行规定。
 - ✦ 2000年左右 北京及其它地区对110kV、220kV XLPE电缆进行交流耐压试验。

试验标准的历史发展

-
- ✦ 2002年2月 江苏颁发《电力设备交接和预防性试验规程》。
 - ✦ 2002年2月 华北地区颁发《电力设备交接和预防性试验规程》。
 - ✦ 2003年3月 山东颁发《电力设备交接和预防性试验规程》。
 - ✦ 2003年6月 安徽、浙江、吉林起草《橡塑电缆交接和预防性试验规程》。
 - ✦ 2004年 Q/CSG 1 0007—2004中国南方电网有限责任公司企业标准《电力设备预防性试验规程》颁发。
 - ✦ 2006年 GB50150-2006 《电气装置安装工程 电气设备交接试验标准》颁发。

现行的有关试验标准—— CIGRE推荐试验导则

额定相间电压 (U)	推荐的现场试验电压	时 间
60~115kV	2U0	60min
130~150kV	1.7U0	60min
220~230kV	1.4U0	60min
275~345kV	1.3U0	60min
380~400kV	1.2U0	60min
500kV	1.1U0	60min

注：推荐试验电压频率为 30-300Hz。

现行的有关试验标准—— IEC有关试验标准

标准名称	电压等级	试验电压	时间
IEC60502-1 (1998) 额定电压 1kV ($U_m=1.2kV$) 到 30kV ($U_m=36kV$) 挤包绝缘电力电缆及附件 第1部分: 额定电压 1kV ($U_m=1.2kV$) 和 3kV ($U_m=3.6kV$) 电缆	1~30kV	U (1.73U ₀)	5min
IEC60502 - 2 (1998) 额定电压 6kV ($U_m=1.2kV$) 到 30kV ($U_m=40.5kV$) 挤包绝缘电力电缆及附件 第2部分: 额定电压 6kV ($U_m=12kV$) 到 30kV ($U_m=36kV$) 电缆			
IEC60840 (2004) 《额定电压30以上至150kV挤出绝缘电力电缆及其附件 试验方法和要求》	30~110kV	2U ₀	60min
IEC62067 (2001) 《额定电压150以上至500kV挤出绝缘电力电缆及其附件 试验方法和要求》	220kV	180kV 或 216kV	60min
	330kV	250kV 或 323kV	60min
	500kV	320kV 或 493kV	60min

注: 以上试验也可采用施加正常系统相对地电压 24 小时进行。

现行的有关试验标准——挤包 绝缘电力电缆国家标准

标准名称	电压等级	试验电压	时间
GB/T 12706.1—2002 额定电压 1kV($U_m=1.2kV$) 到 35kV($U_m=40.5kV$) 挤包绝缘电力电缆及附件 第1部分: 额定电压 1kV($U_m=1.2kV$) 和 3kV ($U_m=3.6kV$) 电缆	35kV 及以下	U (1.73U ₀)	5min
GB/T 12706.2—2002 额定电压 1kV($U_m=1.2kV$) 到 35kV($U_m=40.5kV$) 挤包绝缘电力电缆及附件 第2部分: 额定电压 6kV($U_m=12kV$) 到 30kV ($U_m=36kV$) 电缆			
GB/T 12706.3—2002 额定电压 1kV($U_m=1.2kV$) 到 35kV($U_m=40.5kV$) 挤包绝缘电力电缆及附件 第3部分: 额定电压 35kV ($U_m=40.5kV$) 电缆			
GB/T 11017.1—2002 《额定电压 110 kV 交联聚乙烯绝缘电力电缆及其附件 第1部分: 试验方法和要求》	110kV	U (1.73U ₀)	5min
GB/Z18890.1~18890.3-2002 《额定电压220kV ($U_s=252kV$) 交联聚乙烯绝缘电力电缆及其附件》	220kV	180kV 或 216kV	60min

注: 以上试验也可采用施加正常系统相对地电压 24 h 进行。

现行的有关试验标准——**新** 电气设备交接试验标准

GB50150-2006 《电气装置安装工程 电气设备交接试验标准》

1 橡塑电缆优先采用20-300Hz交流耐压试验。20-300Hz交流耐压试验电压和时间见表18.0.5。

表18.0.5 橡塑电缆20-300Hz交流耐压试验电压和时间

额定电压 U_0/U (kV)	试验电压	时 间(min)
18/30及以下	$2.5U_0$ (或 $2U_0$)	5 (或60)
21/35-64/110	$2U_0$	60
127/220	$1.7U_0$ (或 $1.4U_0$)	60
190/330	$1.7U_0$ (或 $1.3U_0$)	60
290/500	$1.7U_0$ (或 $1.1U_0$)	60

2 不具备上述试验条件或有特殊规定时,可采用施加正常系统相对地电压24h方法代替交流耐压。

现行的有关试验标准——电 力设备预防性试验规程

Q/CSG 1 0007—2004中国南方电网有限责任公司企业标准

表10.2 橡塑绝缘电力电缆的试验项目、周期和要求

序号	项 目	周 期	要 求			说 明
5	主绝缘交流耐压试验	1)大修新作终端或接头后 2)必要时	推荐使用频率 20Hz~300Hz 谐振耐压试验			1)不具备试验条件时可用施加正常系统相对地电压 24 小时方法替代。 2)必要时,如:怀疑电缆有故障时
			电压等级	试验电压	时间	
			35kV 及以下	1. 6U ₀	60min	
			110kV	1. 36U ₀	60min	
			220kV 及以上	1. 12U ₀	60min	

关于标准的结论

-
- ✦ 现行各类橡塑电缆现场耐压试验标准基本是以CIGRE推荐的试验方法和标准为依据。
 - ✦ IEC62067及IEC60840最新版试验部分内容已完全按照CIGRE推荐的试验方法和标准制订。
 - ✦ 我国电缆国标更新较慢，国标的未来修订方向应该还是参照有关IEC标准进行。
 - ✦ 新颁布的电气装置安装工程电气设备交接试验标准引用了CIGRE及IEC标准的有关条目，具有很强的实用性。
 - ✦ Q/CSG 1 0007 2004中国南方电网有限责任公司企业标准《电力设备预防性试验规程》规定了大修新做终端或接头后的试验要求。

高压电缆现场局放测量

- ✦ 耐压试验法是判断绝缘性最直接方式，它实质归属于破坏性试验。迄今，鉴于工程实践中对高压XLPE电缆绝缘老化检测有效性方法极为有限，因而可能仍需依赖耐压试验做出判断。耐压试验不仅有较高准确性，还需顾及在施加电压下对绝缘性能危害的评估。
- ✦ 2004年，在北京地区曾发生过唯一一起做完变频交流耐压试验投运后不到24小时就发生击穿的事故。
- ✦ 电缆及附件中存在的生产、安装中的质量问题有大有小，有些严重有些轻微，在外施高电压下缺陷发展的程度和时间也不相同，如果某些缺陷在外电压的激发下不能发生击穿，势必会将缺陷留在运行中，若在运行中击穿，将造成很大的损失。

高压电缆现场局放测量

-
- ✦ 采用附带局部放电测量的交流耐压试验是一种可能有效检测电缆及附件内部故障与发展的手段。
 - ✦ CIGRE SC21 WG21-09工作组指出：采用工频交流电压或接近工频（30~300Hz）交流电压试验作为竣工试验，证实比其他试验方法有效。采用局部放电试验，结合交流电压试验可能更为有效，但试验方法尚在研究与开发中。
 - ✦ 1996年8月，在巴黎召开的CIGRE SC21第36届会议，对挤包绝缘电缆共提出6篇报告，其中与会专家一致认为，对高压和超高压电缆附件进行局部放电检测是一种有前景的方法。

电缆现场局放测量难点

- ✦ 在良好屏蔽的试验室并配合非常“干净”电源供电的情况下，电力电缆局部放电检测试验的灵敏度可以达到 0.1pC ，一般在国内外大型高电压试验室都可进行此项试验。但现场局放试验难点在于：
- ✦ 外界强电磁场干扰源较多；
- ✦ 采集的信号量微弱、幅值很小，易被背景噪声淹没；
- ✦ 宽带滤波器和高倍数放大器使得采集信号的原始波形畸变，容易误导造成误判；
- ✦ 缺乏电缆绝缘局部放电信号识别技术；
- ✦ 缺少XLPE电力电缆绝缘劣化的评价基础和运行状态判据等实际运行经验的积累。

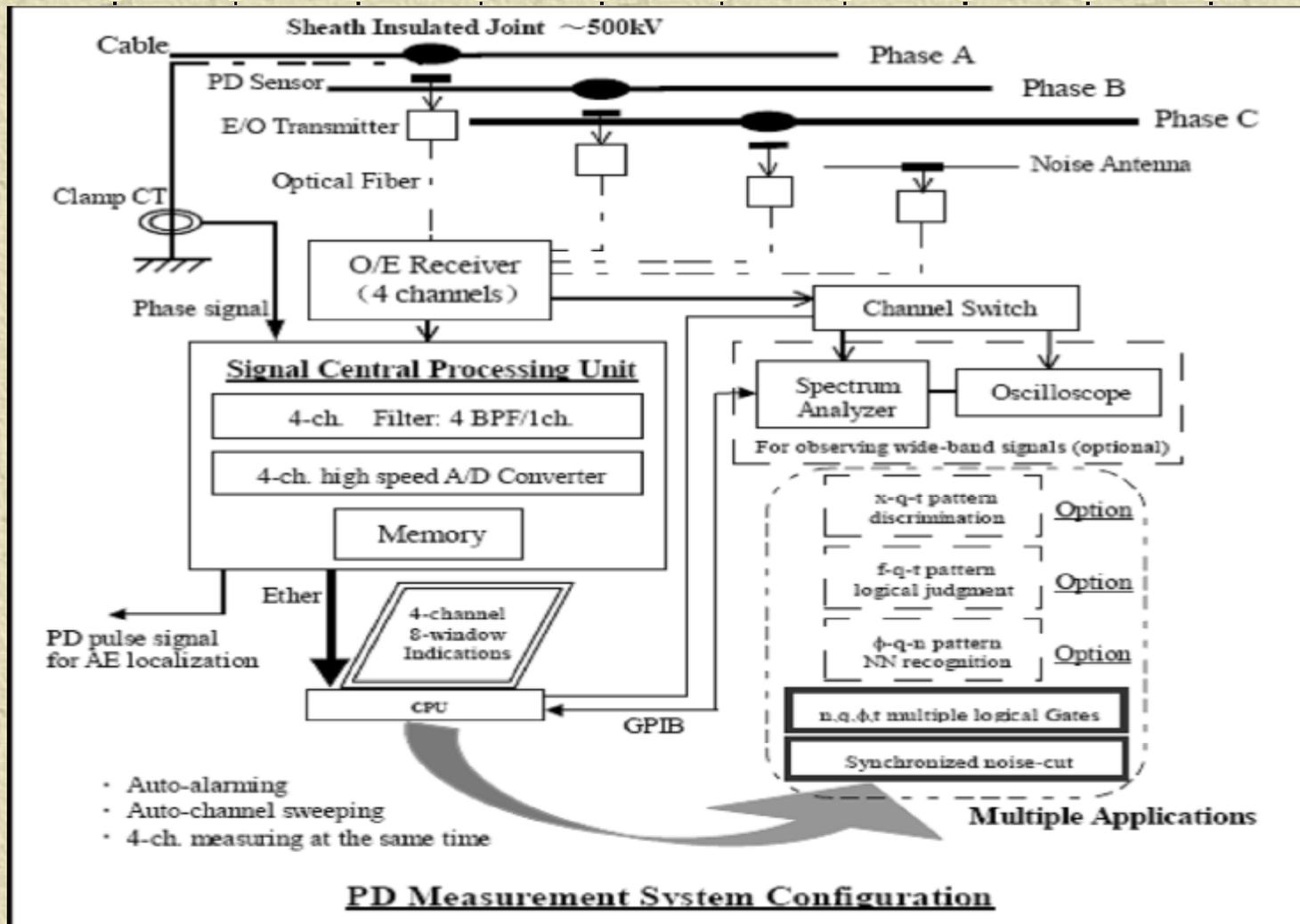
电缆现场局放测量研究

- ✦ 采用UHF频域与多个高频频带检测相结合的测量技术，首先利用UHF检测系统初步巡检，然后根据现场情况分别采用金属薄膜电极传感器、电容臂传感器、高频电流互感器传感器三种信号检取方式从被试电缆中间绝缘接头、终端接头处取样测量信号进行深入测量。
- ✦ 金属薄膜电极传感器法需要在电缆中间接头两侧包裹金属膜电极，电容臂传感器法、高频电流互感器从被试电缆终端接头金属护套接地引下线处取样测量信号。但三种取样方法都不须改动电缆一次连接线、中间接头结构及电缆终端连接方式，因而不需改变电缆运行状况。

电缆现场局放测量系统特点

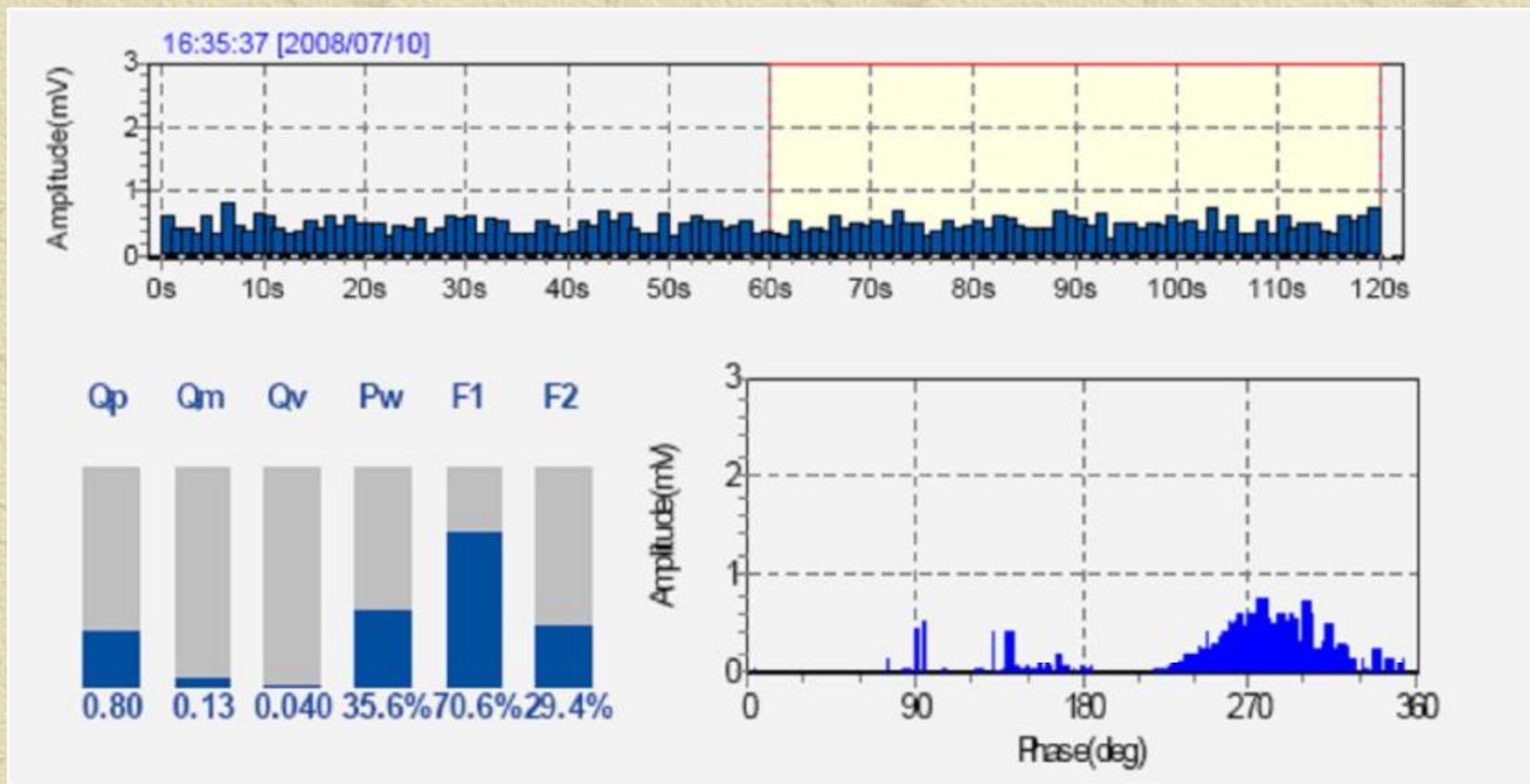
- ✦ 检测传感器模块与测量单元间采用光纤传输信号，保证测试人员、设备安全。
- ✦ 系统应用提高测试频率的测量方法，可选择在多个频带范围内进行测量，便于局部放电信号的识别、定位、分析，提高了测量的信噪比。
- ✦ 系统可实现四通道实时测量，可同时测量三相电缆的局部放电量与环境干扰，有利于抑制外部干扰。
- ✦ 系统可测量局部放电信号的幅值大小、相位特征、重复频率、图谱特性及信号波形的微观特性等。

电缆现场局放测量系统构成



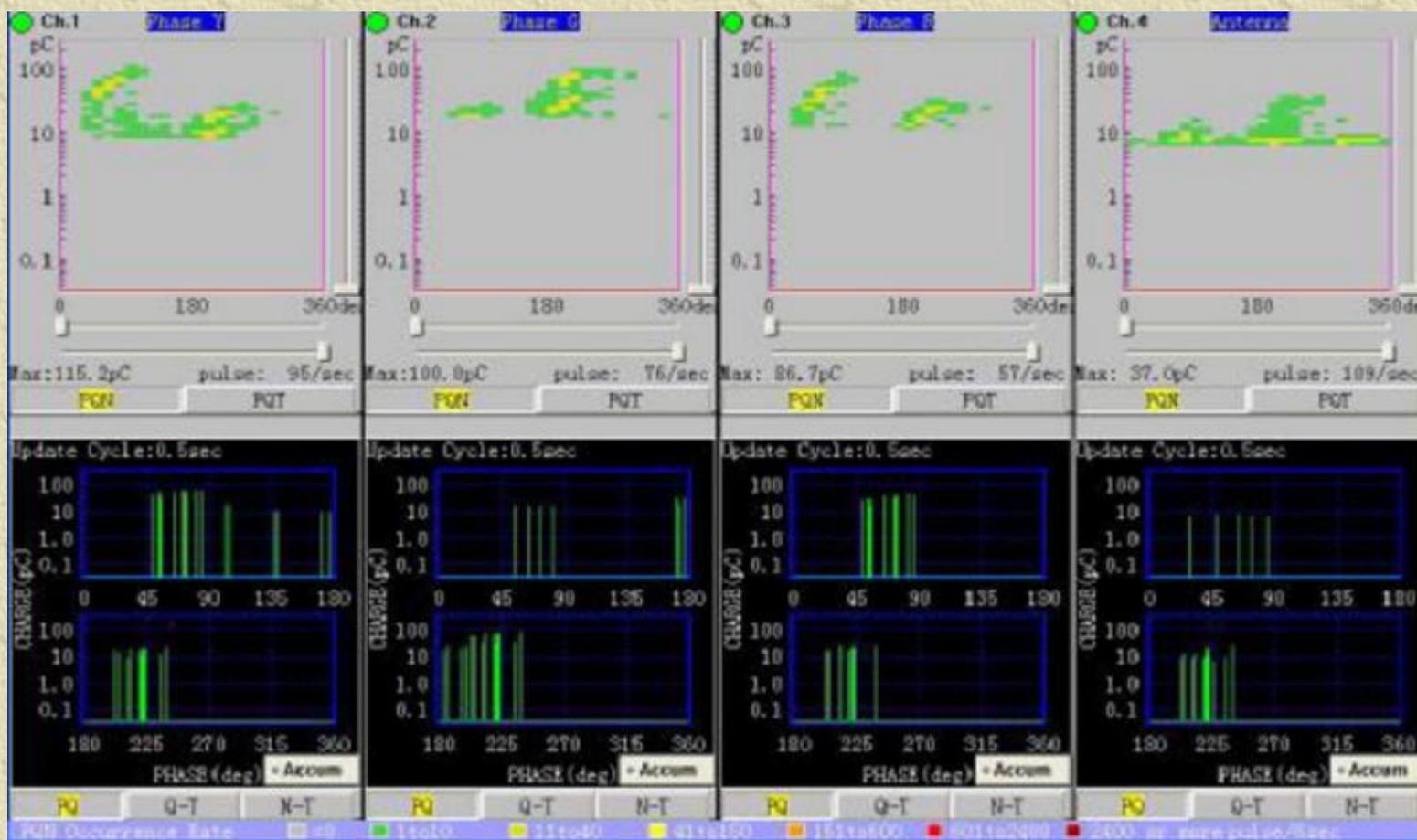
电缆现场局放测量结果

UHF测量谱图



电缆现场局放测量结果

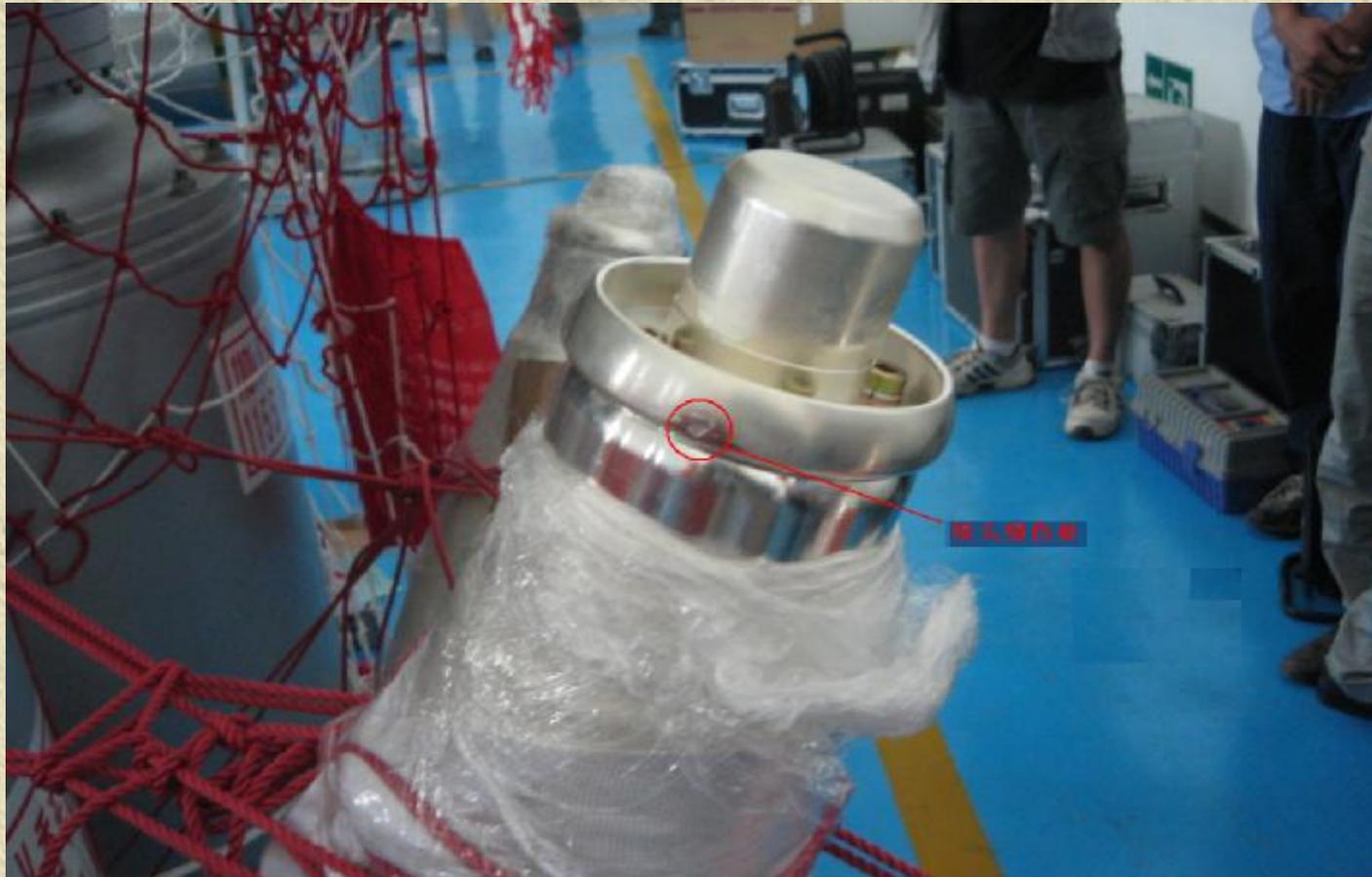
14MHz测量谱图



电缆现场局放测量结论

- ✦ (1) 多个频带的测试结果均发现电缆GIS终端接头处存在局部放电信号。
- ✦ (2) 多个频带的测试结果均表明A相局放量较B、C相大，考虑到三相都存在局放的可能性很小，可以认为B、C相测到的信号应该是A相通过空间耦合过来的。
- ✦ (3) 多个频带的测量谱图均发现，测量到的局放信号具有单峰特性，据此分析绝缘材料内部放电可能性不大，电缆接头出线套管屏蔽等处存在尖端放电的可能性较大。
- ✦ (4) 由于现场条件限制，无法对测试系统进行专门校准，谱图中局放量幅值不具有绝对意义，但是，测试结果均发现脉冲发生率并不高（<150次/秒），表明放电发生频率并不很高，短时间应该不会对系统绝缘造成严重影响。

电缆现场局放测量结论解体验证



A相电缆GIS接头套管金属接插件屏蔽损伤处照片

电缆现场局放测量结论解体验证



A相电缆GIS接头套管金属接插件屏蔽损伤处照片

关于电缆耐压试验的结论

- ✦ 直流耐压试验不能有效发现橡塑绝缘电缆存在的缺陷，且对电缆有害。
- ✦ 空载运行24小时的试验方法不能有效检查电缆可能存在的缺陷。
- ✦ 电缆竣工试验主要目的是检出电缆与附件预制件间界面的缺陷，更多的反应了现场安装过程施工质量造成的缺陷（如应力锥安装位置错误或移位、电缆绝缘表面处理不良或是应力锥对电缆绝缘表面压力不够等）。
- ✦ 采用附带局部放电测量的交流耐压试验是一种更有前景，可能有效检测电缆及附件内部潜伏性故障与发展的手段。

谢谢各位，欢迎指正！

