

ICS 17.220.20

A 55

备案号: 21248-2007

**DL**

# 中华人民共和国电力行业标准

DL/T 1041 — 2007

---

## 电力系统电磁暂态现场试验导则

Guide for performing the field tests of electromagnetic  
transients on electric power systems

2007-07-20 发布

2007-12-01 实施

---

中华人民共和国国家发展和改革委员会 发布

## 目 次

前言	· II
1 范围	· 1
2 现场试验目的	· 1
3 操作试验项目及其特性	· 2
4 试验准备	· 3
5 测量系统	· 4
6 有关技术问题和注意事项	· 11
7 试验报告编写要求	· 12
附录 A (资料性附录) 关于接地干扰问题的说明	· 15
附录 B (资料性附录) 测量信号光纤传输系统主要技术特性	· 17
附录 C (资料性附录) 数字式记录仪器参数选用和使用特点	· 18

## 前 言

本标准是根据《国家发展改革委办公厅关于下达 2003 年行业标准项目补充计划的通知》（发改办工业〔2003〕873 号）的安排制定的。

本标准的附录 A、附录 B、附录 C 均为资料性附录。

本标准由中国电力企业联合会提出。

本标准由电力行业高电压试验技术标准化技术委员会归口并解释。

本标准起草单位：云南省电力试验研究院（集团）有限公司电力研究院。

本标准主要起草人：郑增泰、李明。

本标准在执行过程中的建议或意见及时反馈至中国电力企业联合会标准化中心（北京市白广路二条 1 号，100761）。

# 电力系统电磁暂态现场试验导则

## 1 范围

本标准提出了组织进行电力系统设备（含线路）操作时电磁暂态现场试验的方法和步骤、试验方案的编制、试验技术条件的制定、测量系统接线和有关测量设备和元件的选用、安全注意事项、试验技术细节和试验报告编写要求等。对现场试验中关于接地问题和防止电磁干扰等作了重点阐述。

本标准适用于在变电所、发电厂，用交流高压开关设备（包括断路器、隔离开关、负荷开关、重合器等）投、切电力设备和电力线路，以及在人工故障试验时进行电磁暂态过程现场试验。不适用于有关雷电和直流输电系统的电磁暂态过程试验，但本标准部分内容可供直流输电系统试验时参考。

## 2 现场试验目的

电力系统电磁暂态现场试验是为保障电力设备和线路正常安全运行的要求提出的，按照需要解决问题的性质和目的有选择地进行，并不是所有新设备（含线路）在建成投入运行时都必须进行现场试验。

现场试验的目的通常有下列几种。

### 2.1 考核设备操作时有关设备的技术性能和动作正确性

- a) 考核、检验制造厂生产的有关设备装置（如继电保护、断路器、避雷器和自动控制系统等）是否按合同要求正确动作，是否满足制造厂保证的技术性能指标。检验这些装置及其所属微电子设备抗电磁干扰（电磁兼容）的能力。
- b) 从电力系统安全运行考虑，检验有关设备装置（含线路）是否满足电力系统安全运行的技术条件及其过电压水平，并提供有关数据。如单相自动重合闸装置识别故障相能力，潜供电弧熄灭时间，如长线路、电缆、变压器、电抗器、电容器组投、切及首、终端带有变压器的线路投入时，产生过电压的严重程度和避雷器的负载能量及充电电流等；如在超高压系统引发故障和故障清除时自动控制系统（包括静止无功补偿装置控制等）的动作正确性和不同控制系统的相互作用等。

在新线路投运、系统调试和新型设备投产时尤为需要通过现场试验来考核和检验。

### 2.2 分析事故原因或研究异常运行有关因素

不论系统电压高、低，在发生比较重要的设备或系统事故后，不同部门的看法常有分歧。为了统一认识，查明事故或异常运行的确切原因，以便采取正确措施，防止今后再发生同类型事故，或研究和验证异常运行有关技术时，需要进行现场测量，并可同时验证设想的改进措施的有效性。

### 2.3 验证、核对模拟试验或计算结果

暂态网络分析仪（TNA）或电磁暂态计算程序（EMTP）已广泛地用于系统绝缘配合、电力系统总体设计、内过电压计算和新设备应用等方面。要使模拟试验或计算结果直接与现场试验结果有可比性，模型必须全面具备系统和设备的各项参数，但是电力系统中某些非线性特性不易模拟准确，例如：

- a) 由于电力变压器励磁饱和特性及线路和系统的不同参数，当变压器与线路同时一起合闸或断开时，将决定是否形成谐振过电压；
- b) 电磁式电压互感器的励磁特性，连同变电所其他设备及电网对地电容，在某些断路器断开或一相接地（非直接接地系统）或电压突变时将决定是否产生铁磁谐振过电压；
- c) 电抗器非线性特性，在线路跳闸后将影响放电过程，从而影响操作过电压；
- d) 避雷器非线性特性，特别在谐振条件下，在确定放电能量要求时，甚为重要；

e) 潜供电弧的非线性伏安特性, 在单相重合闸操作中是决定电弧熄灭时间的重要因素, 断路器的复燃和重击穿, 目前在 EMTP 上模拟尚有困难, 正在研究中。

以上这些非线性特性不易在模型选取时准确模拟, 加上有时需要核对计算方法的正确性, 就成为导致需要进行现场试验的一个重要目的。

进行某些涉及面不太广的现场试验, 与繁琐的模拟计算相比, 有时反而较为方便、简捷, 易得出结果, 且真实可信。

## 2.4 其他特定目的和研究需要

## 3 操作试验项目及其特性

电力系统通常进行的操作试验项目及其主要暂态特性列于表 1。

表 1 电力系统操作试验项目及其主要暂态特性

序号	操作试验项目		测量和验证目的	重要测量信号	一般频率范围 kHz	所需系统或设备数据
1	输电线路、电缆操作	投入、重合闸	过电压、避雷器负载对断路器特性的考核	线路充电电流、断路器动作时间、避雷器电流、分合闸控制信号	DC~20	线路特性、电源特性、断路器数据
		断开、故障清除、甩负荷	过电压、断路器暂态恢复电压、线路侧拍频电压	断路器恢复电压	DC~10	并联和串联补偿、避雷器、变压器参数
2	故障引发		过电压、控制系统反应、继电保护反应	故障电流、接地网电位	DC~10	继电保护参数、系统参数
3	单相接地故障清除 (单相操作)		过电压、潜供电流、断开相恢复电压、继电器动作	故障电流、潜供电流, 中性点电抗器电压、跨步和接触电压、架空地线电流	DC~20	并联电抗器数据、断路器数据、串联电容器数据、接地点接地电阻值、变压器参数、线路参数
4	投、切变压器和首端或终端带变压器的空载线路		暂态和谐振过电压、避雷器负载	断路器动作时间、避雷器电流、变压器磁通(测涌流)	DC~10	变压器参数(包括饱和特性)、并联和串联补偿、断路器、避雷器数据
5	电容器操作	投入(包括背靠背)	系统电压变化、暂态充电电流、避雷器负载	电容器电压和电流、远处电容器和变压器电压、断路器动作时间、避雷器电流	DC~20	电容器数据、断路器数据、限流电抗器数据
		断开	重击穿过电压、避雷器负载	断路器恢复电压		
6	故障时串联电容器保护动作		电容器保护设备动作和负载, 重新投入时暂态过程、次同期振荡	故障电流、电容器电压和电流、保护设备中的电流	DC~5	串联电容器数据、保护设备数据
7	并联电抗器操作(包括带线路)		复燃、断路器暂态恢复电压	母线电压、电抗器电流、断路器恢复电压	DC~20	并联电抗器和断路器数据、变电所特征
8	电动机操作		过电压、重击穿、断路器恢复电压、截流及其过电压	母线电压、电动机端电压	DC~20	电动机、电缆段和断路器数据、电源数据
9	隔离开关投、切空母线		过电压、切电容电流的能力、对二次回路的电磁干扰	母线电压和电流、避雷器电流、二次回路电磁干扰电压	50Hz~10MHz	隔离开关、母线长度和 CVT 数据, 电源数据

表 1 (续)

序号	操作试验项目	测量和验证目的	重要测量信号	一般频率范围 kHz	所需系统或设备数据
10	铁磁谐振过电压	过电压、激发谐振的因素 (单相接地、电压突变等)	母线电压、接地电流	DC~10	电压互感器、变压器数据、系统电容数据
11	二次回路电磁干扰电压测量	一次设备投入时, 对二次回路和电子设备的干扰影响	二次回路和二次设备电磁干扰电压、接地网电位	50Hz~10MHz	投、切的高压电力设备数据、与测量地点的距离及布置
注 1: 在每次试验时均应监测相应线路和设备的电压及电流; 注 2: 每次试验均应说明被操作线路或设备、相邻的线路和电缆的技术特性, 以及电网接线状况; 注 3: 二次干扰电压的测量, 在需要时进行。					

#### 4 试验准备

进行电力系统电磁暂态的现场试验涉及系统稳定、潮流计算、设备操作、继保整定、高压测量、通信保障等多项专业领域。试验准备是保证现场试验安全、高质量完成的关键。它包括建立试验组织机构、研究试验有关的重大技术和安全问题、编制试验实施方案和制订调度操作方案等。

##### 4.1 试验组织机构

现场试验通常涉及电力系统和变电所 (发电厂) 的运行操作, 系统调度, 测量仪器, 一、二次接线拆装, 继电保护, 通信保障等专业人员, 有时还应包括电网设计和制造厂等有关人员。

对重大的系统试验, 建议成立一个临时性的试验领导小组统一组织, 设试验总指挥、副总指挥, 并指挥试验工作, 在其下设立下列小组, 分工负责。

- 测量小组: 编制试验大纲和试验实施方案, 分析和解决试验中出现的测量技术问题, 完成测试工作, 编写试验报告。
- 调度操作小组 (包括调度人员): 根据试验实施方案编制调度操作方案、现场调度和操作被试电力设备。
- 工程小组: 负责试验中改换接线和被试设备的检修。
- 继电保护小组。
- 通信小组。
- 其他需要的人员。

先由试验领导小组负责人 (或工程指挥部负责人) 召集有关主要人员讨论明确试验目的、主要试验内容、需用的主要测量仪器、需研究的重要技术问题、各项工作的分工和职责、预定日期和工作进度等。指定试验方案起草人和重要技术问题研究人员。

也可以事先组织少数人员, 先行研究重要技术问题, 然后编制试验方案和调度方案, 成立试验组织。

##### 4.2 试验前应充分考虑的问题

研究、考虑下列几个方面的问题:

- 这次现场试验对整个系统可能产生的影响;
- 被试验的电力设备所遭受的试验条件是否超过它们的允许值;
- 必要时对所列试验条件进行模拟试验或计算, 得到初步计算结果后, 决定是否有部分试验内容需要更改或取消, 或者更深入地进行试验研究。
- 应采取的保护措施或应急措施。

主要的研究除暂态过程外, 需要时尚应包括短路电流计算、系统潮流计算和系统稳定性计算等。

这些研究的主要目的是预测可能的过负荷、电压偏离程度、继电保护意外动作, 或试验时可能伴随发生其他突发的情况。特别在人工故障试验时, 应考虑采取临时补充保护措施, 以保证系统运行的安全

和可靠。暂态过程的研究, 通常是通过电磁暂态计算程序或由模拟装置得出代表性的过电压波形和幅值, 预测对系统和设备可能的危险性, 得出过电压的统计数据, 并预测暂态过程的整个情况。一般需研究的内容列于表 2。

表 2 现场试验前需事先考虑的研究项目和内容

研究项目	内 容
潮流 系统稳定性 短路电流	明确试验操作时可能发生的问题: (1) 过负荷; (2) 母线电压偏离程度; (3) 继电保护意外动作; (4) 断路器电流 明确是否需要加装临时保护措施, 尤其在人工故障试验时, 采取措施保证电力系统安全、可靠。
暂态过程	预测试验操作时暂态过程情况: (1) 代表性波形; (2) 过电压最严重的程度; (3) 断路器恢复电压; (4) 避雷器动作和负载电流; (5) 系统谐振或铁磁谐振 明确限制过电压的保护措施。

4.3 制定具体试验实施方案

根据确定的试验大纲及重大技术和安全问题的研究结果, 制定具体试验实施方案, 同时列出试验现场运行、检修、试验人员均应遵守的安全注意事项, 形成完整的现场试验方案。

试验方案一般应包括试验目的、试验项目(内容)、试验条件及系统接线、试验步骤、测量内容、测量系统、继电保护、通信联络、安全注意事项等。

4.4 制定系统调度执行方案

根据试验方案, 编制保证完成试验方案内容的调度操作方案。方案内容应包括每项试验正式进行前各级调度机构应完成的系统布置、系统接线、计算潮流和节点电压及保护的定值; 每项试验结束转入下一项试验时, 完成相应的由试验方案确定的系统布置状态; 试验结束后, 恢复正常运行方式。调度操作方案还应包括各项试验中各有关运行部门应密切监视的设备运行参数、表计指示等, 并应列入可能出现的异常情况的应急措施, 以及明确各项试验前和结束后与试验组人员的协调的职责。

5 测量系统

5.1 基本要求

5.1.1 现场试验原理接线

现场试验测量系统的主要元件和原理接线如图 1~图 3 所示。关于测量转换装置、测量信号传输系统和测量仪器的选用要求将分述于后。

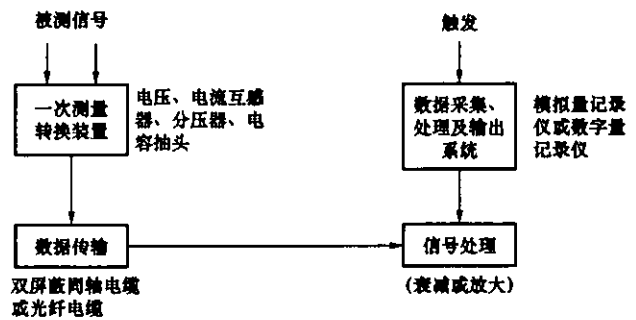
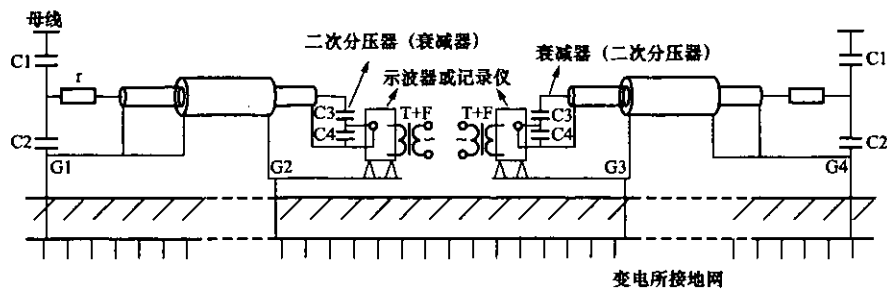
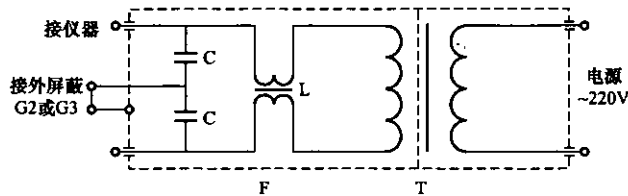


图 1 测量系统方框图



C1—高压分压器高压电容；C2—高压分压器低压电容；C3—二次分压器一次电容；  
C4—二次分压器二次电容；r—匹配电阻；F—低通滤波器（见图 b）；  
T—隔离变压器（见图 b）；G1、G2、G3、G4—接地端

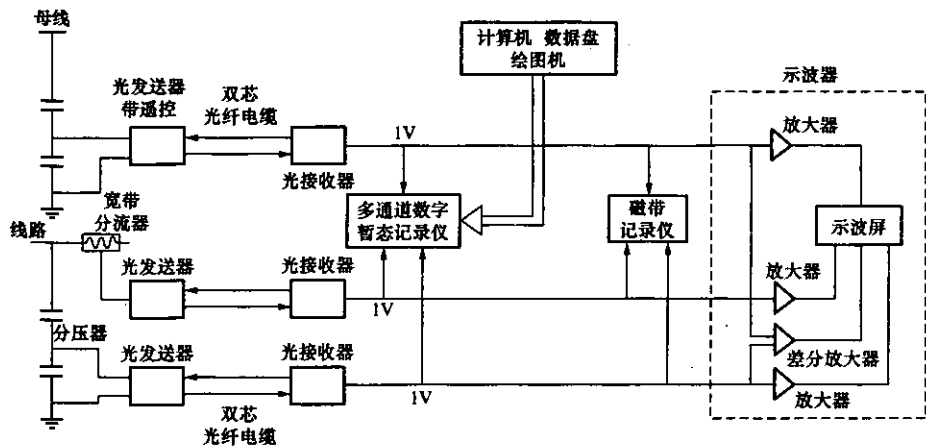
a) 原理接线图



C—低通滤波器中的电容器；L—低通滤波器中的电抗器

b) 隔离变压器和滤波器

图 2 线路操作试验采用双屏蔽同轴电缆原理接线图



注 1：电源开关、输入量程和校正信号可在光接收端遥控；

注 2：断路器恢复电压由示波器实时显示；

注 3：测量仪器选用一种或两种。

图 3 光纤传输信号测量仪器接线实例图

### 5.1.2 测量准确度的要求

测量系统包括下列三种主要元件：

- 测量转换装置：包括电压互感器、电流互感器、分压器、二次分压器和分流器等；
- 测量信号传输系统：包括同轴电缆、光纤电缆、光发送器和光接收器等；
- 测量仪器：包括数字式储存电子示波器和数字式暂态记录仪等。



由于电压互感器和电流互感器在较高频率和脉冲电压下引入额外的误差；光纤传输系统频率响应曲线平直部分的误差为 $\pm 0.5\text{dB}$ ，即为 $\pm 5\%$ ；以及现场电磁环境条件复杂，影响因素增多等原因，这三部分的测量准确度一般要求不大于表3数值。

表3 主要元件的测量准确度

元 件	测量准确度 %	
	幅值测量	时间测量
测量转换装置	$\pm 3$	$\pm 5$
信号传输系统	$\pm 5$	$\pm 5$
测量仪器	$\pm 2$	$\pm 4$

测量系统总体的准确度应不大于下列数值：

幅值测量为 $\pm 8\%$ 。

时间测量为 $\pm 10\%$ 。

总体频率响应：DC~10kHz 为 $\pm 0.8\text{dB}$ （测铁磁谐振过电压）；

DC~20kHz 为 $\pm 0.8\text{dB}$ （测电容操作过电压）；

50Hz~8MHz 为 $\pm 0.8\text{dB}$ （测二次回路电磁干扰）。

## 5.2 测量转换装置的选用和校验

### 5.2.1 常用测量转换装置的特性

现场试验中一般应尽量利用变电所已有的电力设备构成分压器来测量电压。通常可利用的设备有110kV及以上电压等级的电容套管和电容式绝缘结构的电流互感器末屏抽头。

电容套管的电压抽头和测量抽头小套管因有较高的频率响应（通常可达数百千赫），常被使用组成分压器。110kV及以上电压等级的电容式绝缘结构的电流互感器，可利用其主绝缘末屏抽头，配以适当的低压臂电容器组成成分压器，它具有与电容套管相似的频率响应特性。

较高电压系统中常用的电容式电压互感器（CVT），如果不接上中间变压器、继电器或通信设备，其频率响应可达100kHz及以上。

电磁式电压互感器（TV）仍然是使用广泛的电压测量转换装置，适用于频率不太高（10kHz以下）的暂态电压测量。常规的电压互感器和电容式电压互感器（CVT不加改进）多用来测量稳态电压。

35kV及以下电压可采用少油断路器的均压电容或其他合适的交流高压电容器组装成电容分压器使用。

电容分压器的高压臂电容，通常可选用100pF~1000pF或以上，组装后的工频耐压水平应达到系统电压相应的规定标准，外绝缘宜采用瓷套式，以防雨淋。

目前大多采用电流互感器测量高压电流，采用无感式电阻分流器测量避雷器电流。无感电阻分流器具有防晕结构，配以光纤传输，被测信号可用在高电压带电测量，其频响特性较高，仅在特殊要求时采用。

SF<sub>6</sub>气体绝缘组合电器操作时产生的陡波前暂态过电压（VFFTO）频率高达数十兆赫至几百兆赫，现场测量需考虑不少新的问题，应按相关的IEC标准和国家标准测试。

现场试验中常用测量转换装置的特性和应用范围列于表4，供选用参考。

表 4 常用测量转换装置特性和应用范围

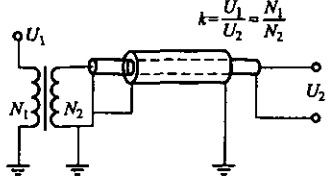
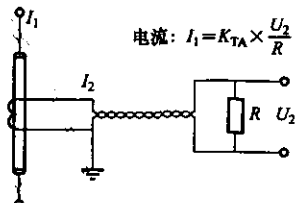
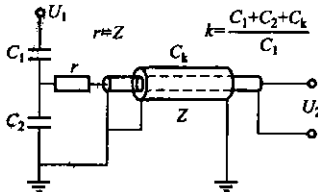
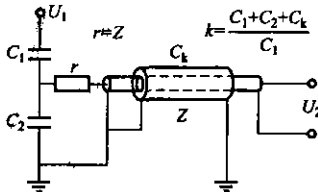
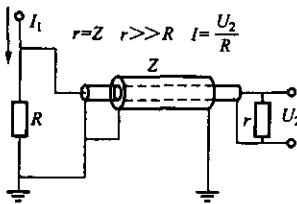
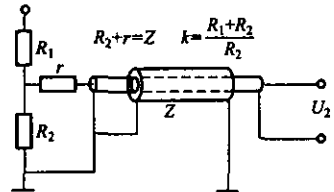
序号	转换装置频率范围和应用	应用条件	接线图、变比 $k$
1	电磁式电压互感器 (TV) DC~10kHz (25kHz) (1) 母线电压 (GIS 除外); (2) 线路电压; (3) 变压器电压; (4) 谐振过电压	(1) 高频时测量准确度随负载而变; (2) 高频时变比修正系数由试验决定; (3) 在某些将母线停电的操作中, 需接电阻负载, 以防止铁磁谐振	 $k = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$
2	电流互感器 (TA) DC~10kHz (25kHz) (1) 线路电流; (2) 变压器电流; (3) 电容器电流; (4) 电抗器电流; (5) 故障电流; (6) 电缆电流; (7) 断路器分合闸时间	(1) 高频时测量准确度随负载和铁芯设计而变; (2) 测量含有直流分量的电流时, 铁芯受饱和影响; (3) 测故障电流时, 保护级 TA 优于测量级 TA; (4) 高频时变比修正系数由试验决定; (5) 电阻分流器应接在二次侧, 应防止开路	 $\text{电流: } I_1 = K_{TA} \times \frac{U_2}{R}$ <p>式中 <math>K_{TA}</math>—电流互感器变流比</p>
3	套管电容及电容式绝缘 TA 末屏抽头 50Hz~500kHz (1) 母线电压; (2) 电抗器电压; (3) 断路器电压; (4) 变压器电压	(1) 需配以低压臂电容器组成电容分压器; (2) 分压比由试验决定; (3) 不应再接上其他负载	 $k = \frac{C_1 + C_2 + C_k}{C_1}$
4	电容式电压互感器的电容部分 (CVT) 50Hz~150kHz (1) 母线电压; (2) 变压器电压; (3) 断路器电压; (3) 线路电压	(1) 将原有的中间变压器引线断开, 配以低压臂电容; (2) 若原来一次回路中没有 CVT, 接上测量用 CVT 后, 因电容量较大, 可能影响暂态恢复电压波形; (3) 不应再接上其他负载	
5	电阻分流器 DC~数兆赫 (1) TA 电流 (2) 避雷器电流 (3) 线路电流	(1) 必须为无感式; (2) 一般用于低电位电路中; (3) 由于低电位电路, 有时需加特殊屏蔽	 $I_1 = \frac{U_2}{R}$
6	电容分压器 (由电容器组装) 50Hz~数兆赫 (1) 线路电压, 母线电压 (2) 变压器电压 (3) 断路器电压	(1) 需另行特殊组装; (2) 机械结构需注意	同序号 3 接线

表 4 (续)

序号	转换装置频率范围和应用	应用条件	接线图、变比 $k$
7	电阻分压器 DC~数兆赫 GIS 外壳电位等	(1) 允许功率较小, 在电压不太高的条件下使用; (2) 适用于频响要求较高的条件; (3) 无感式绕制	

5.2.2 测量转换装置的校验

5.2.2.1 测量分压器的频率响应特性

对首次使用的分压器, 可能时应测量它的频率响应特性, 测量接线图如图 4 所示。

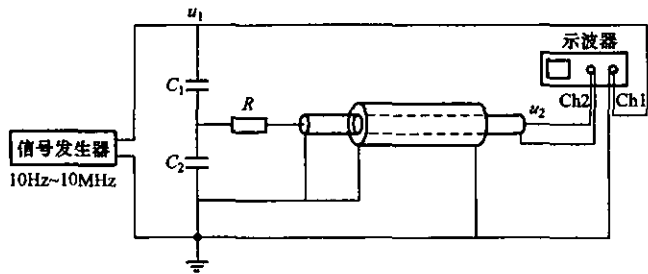


图 4 分压器频率响应特性测量接线图

用正弦波形的信号发生器对被试分压器施加电压恒定的信号  $u_1$ , 其幅值用示波器通道 Ch1 监测。示波器的另一通道 Ch2, 选用适当的 Y 轴放大倍率, 测量分压器的输出电压  $u_2$ , 在保持  $u_1$  电压幅值不变的条件下, 逐步升高频率, 观察  $u_2$  电压幅值开始缩小 (约下降 5%) 时的频率, 即为该分压器的最高使用频率。

5.2.2.2 电容分压器刻度因数的现场校核

利用变电所电力设备 (电容套管、TA 绝缘末屏等) 组成的电容分压器, 可用工频电压和电压互感器校核分压器的刻度因数, 并应把测量电缆的电容和二次分压器一并包括在内, 使校核结果真实可信。校核分压比接线图如图 5 所示。

分压器及其信号传输系统的刻度因数乘以仪器的读数, 即为测量值。

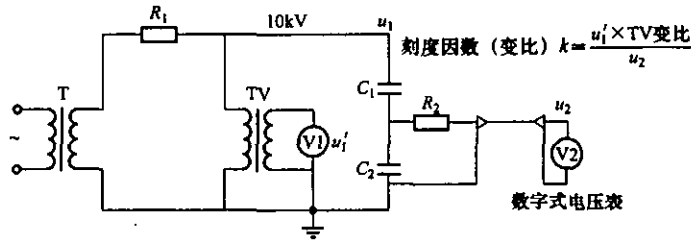


图 5 利用电压互感器现场校核分压比接线

5.2.2.3 二次分压器

为了配合暂态测量仪器额定输入电压 (1V 或 5V 等) 的需要和便于按波形幅度调节测量仪器的输入电压, 有时需要设置二次分压器 (见图 6)。二次分压器通常选用低电感的电容器作为  $C_3$  (51pF~200pF, 大多用 100pF), 固定在屏蔽盒中, 或用数只电容器用波段开关来选择; 为了调节方便,  $C_4$  可选用可变

电容箱，用屏蔽线连接。

一次分压器的输出电压一般设计选取 50V~100V，经二次分压器降为 1V 或 5V。二次分压器适用于输入阻抗较高的测量仪器（示波器、暂态记录仪等）。

测量分压器的频率响应时，应连同二次分压器一并进行。尤其当采用输入阻抗较小的磁带记录仪时，宜连同磁带仪测量整体的频率响应。选用时应检验分压器和低阻抗仪器是否能配合使用，必要时可增大  $C_3$  的电容值，或用阻抗变换器。

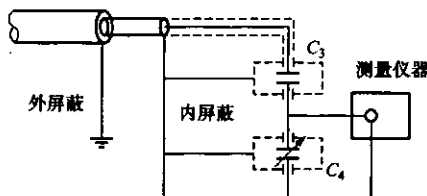


图6 二次分压器

#### 5.2.2.4 分流器

测量避雷器电流一般采用无感式电阻分流器。通常可采用套以塑料绝缘软管的电阻线，对折、绞合成“麻花式”无感分流器，具有较高的频率响应，能满足使用要求。

分流器的校验：50Hz 电流 ( $I_1$ ) 经电流表通入分流器，用数字式电压表测量分流器两端的电压 ( $U_2$ )，最好带上所用的同轴电缆一起测量。将输入电流 ( $I_1$ ) 除以输出电压 ( $U_2$ )，算出分流器的刻度因数。

### 5.3 测量信号传输系统

考虑到现场试验时万一发生设备故障，为了保障人身和测量设备的安全，测量仪器大多设置较远，传输测量数据的同轴电缆或光纤电缆长度大多均在百米或以上。若为了便于与主控制室人员联系，大多将测量仪器设置在主控制室内。

#### 5.3.1 同轴电缆

若采用同轴电缆传输测量信号，应尽可能采用双屏蔽同轴电缆（波阻抗为 75Ω 或 50Ω 均可），按图 2a) 接线。

采用同轴电缆传输信号应注意两个主要问题。首先是接地点问题。每台测量仪器及其直接测量回路（同轴电缆的线芯和内屏蔽有信号电流直接通过）应保持一点接地（图 2）。电缆外屏蔽不属直接测量回路，仅为扼制外界电磁干扰和出于安全需要，应在两端接地。在电抗器等设备漏磁干扰较强的地方，应采用光纤电缆传输信号。

实践经验表明，采用同轴电缆时，一台多通道的测量仪器只宜测量一组三相电压（或电流），所用的 3 台分压器底部的接地线宜连通，并在近旁一点与接地网连接。一台多通道测量仪器各通道不是完全隔离的，不宜同时测量来自两个或以上不同接地点（虽在同一接地网范围，但两者相距数十米以上）分压器的测量信号，应按图 2 所示用 2 台测量仪器测量。

只有采用下列措施之一，才宜将来自不同接地点的数个信号用一台多通道记录仪器同时进行测量。

- 将各通道分别改用 5.3.2 光纤电缆传输信号，代替同轴电缆；
- 用同轴电缆时，每个通道加装有足够绝缘水平的隔离放大器，其绝缘水平一般不低于 3kV (50Hz)；
- 用同轴电缆时，采用每个通道相互绝缘的、具有特殊差分输入式的记录仪器，但应注意各差分输入端对地（机壳）的绝缘水平；
- 如果可能的话，将处于不同接地点的数组分压器的接地极（需对地绝缘），用绝缘导线相互连接，然后在一点与接地网连接接地，在使用同轴电缆的条件下，可以改善对测量结果的影响。此法适用于用一般差分输入仪器测量断路器断口间的恢复电压，断口两侧的分压器的接地线合并在一处接地。

关于接地干扰问题的说明参见附录 A。

其次是其他电磁干扰问题。电磁干扰大多由暂态电流脉冲和电压脉冲的电磁感应产生，防止其他电磁干扰的方法参见 6.3。

### 5.3.2 光纤电缆

在变电所等有严重电磁干扰条件下传输信号时，光纤电缆是较为理想的器材。它有两个特点：第一，光纤电缆的信号发送端和接收端之间在电气上完全隔离，比较彻底地解决了上述地电位升高引起的问题，可以发挥多通道仪器的多种功能，提高测量准确性和安全性。第二，光纤电缆不受电磁干扰影响。

通常采用单芯光缆传输信号。在图 3 中采用的双芯光纤电缆，仅在特殊情况下使用，一芯传输测量信号，另一芯用来在接收端控制发送端的电池电源开关和量程选择。这样就可以将发送端放置在高电位的地点，进行带电测量。

采用光纤电缆传输暂态测量信号时，应选用适当频率响应的发送器和接收器，两根光缆靠接头连接，光缆不可打结和曲折。使用时注意防止光纤接头受污，若光缆不慎折断需用专用的光纤焊接器焊接。

测量信号用光纤传输系统的主要技术特性参见附录 B。

## 5.4 测量仪器

在记录暂态过程的测量仪器中，近代的数字式暂态记录仪和数字式储存电子示波器是专门为记录暂态过程设计的，使信号的捕捉、储存和分析简捷、方便，在现场试验中被广泛应用。

### 5.4.1 数字暂态记录仪和数字示波器

数字示波器和数字暂态记录仪有些区别：两者都有较高的采样率，但示波器一般产品记录长度较短（大多为 1kS~4kS），对快速现象能记录的时间段太短，有时不能满足需要。每次记录后能由屏幕立即显示、观察，并且需操作将记录数据送入计算机储存。示波器的通道数大多为 2~4 通道；暂态记录仪有较多的通道（2~8 通道或更多），最大的特点是记录长度较长（有 128kS、256kS、512kS 甚至 1MS），可以连续记录数次数据，可满足较多测量要求的需要，但有的有屏幕显示，有的没有屏幕显示，需将数据送入计算机后才能显示、观察。

近年来，某些数字示波器作了改进，扩大了记录长度（每个通道为 30kS、50kS 甚至高达 1MS 等），4 通道，采样率最高达 20GS/s，示波器内附有软盘，可存 1M 数据，存满后取出软盘，放入计算机进行处理、分析。有屏幕每次可观察波形，具有光标测量值数字显示功能，能立即了解幅值或时间的测量结果。这样的改进缩小了电子示波器与暂态记录仪的差距，较适合电力系统使用。

比较适合电力系统使用的常用数字暂态记录仪和数字式存储电子示波器技术特性参见表 5。

表 5 常用的数字暂态记录仪和数字式存储电子示波器技术特性

类别	频率上限 (-3dB) MHz	每通道最高 采样率 MS/s	最高 采样周期 ns	垂直 分辨率 bit	记录长度 kS (千点)		通道	
					暂态仪	示波器	暂态仪	示波器
A	2.5~20	1~20	50~1000	8	4~12, 512	4~16, 128	2~8 以上	2~4
B	100~150	100~200	5~10	8	32~128, 1MS	15~50	2~4	2~4
C	350~500	500MS/s~1GS/s	1~2	8	32~128, 1MS	15~50, 130	2~4	2~4

关于数字式记录仪器的主要技术参数的选用和测量电力系统暂态过程的仪器使用特点等参见附录 C。

### 5.4.2 模拟量记录仪

模拟量记录仪对数字式记录仪来说是一种可行的补充。一台多通道（例如 14 通道）中等或实验室精度的磁带记录仪，它记录的时间几乎没有多大限制，多种速度、频带宽度也够一般中、低频率使用，记录的数据还可以用慢速回放出来，送入频响较低的硬盘打印机、绘图仪，再用事后数字化的方式，送入计算机进行处理、分析。有的磁带记录仪带有数据处理系统，使用更为方便。

## 5.5 试验顺序控制器

试验顺序控制器是根据试验具体要求设置的。由操作人员手动启动后，按照预先设置好的时间顺序，发出测量仪器触发信号，操作断路器分（合）闸脉冲电压、重合闸脉冲等，以完成一个试验操作顺序，此控制器一般由继电器等自行组装而成，或采用市售的顺序控制器设置定值。图 7 为实际应用的一个例子。

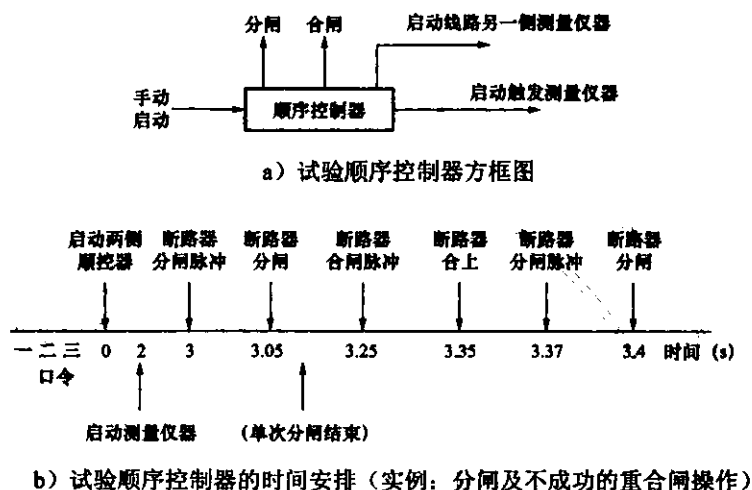


图 7 试验顺序控制器

## 6 有关技术问题和注意事项

### 6.1 检查测量设备的特性

- 转换装置：电流互感器、电压互感器、电容分压器、阻容分压器、电阻分压器、分流器、衰减器、光纤传输系统的准确度、刻度因数和频率响应等；
- 测量仪器：数字示波器、数字暂态记录仪、磁带记录仪的准确度、刻度因数、频率响应以及输入量程（衰减器）、线性度、A/D 转换器位数（bit）、分辨率、时基等。

### 6.2 接地

- 采用光纤电缆传输信号，能较彻底地解决接地电位转移及其环流问题，有条件时宜尽量采用。
- 同轴电缆一般采用一点接地方式，以消除接地环线。在现场试验中尽量采用双屏蔽同轴电缆，并保证被测信号电缆屏蔽严密和连接可靠。双屏蔽同轴电缆的外屏蔽至少应在两端接地。干扰严重的场合，同轴电缆外屏蔽宜多点接地。
- 分压器底部必须就近与变电所接地网的接地引出线直接连接，以减少接地引线的阻抗。
- 采用同轴电缆传输信号时，注意不同信号源接地点电位不同，一般不宜接在同一记录仪上，如用同一记录仪，需在记录仪端不接地，或两通道输入端不共地（见 5.3.1）。
- 测量仪器采用耐压 3kV 以上的隔离放大器或差分放大器输入被测信号。
- 电容器操作试验时，有时地电位升高，干扰显著，可视需要自测量转换装置到测量仪器之间敷设临时粗截面接地线（铜或铝线），此接地线可在沿途跨越电缆沟接地带时，多点接地，降低接地线阻抗。

### 6.3 其他抗电磁干扰措施

- 测量电缆应沿地面平放敷设必要时敷设在接地带或接地板下，并尽可能垂直于载流母线，以避免感应电压。
- 测量电缆敷设应短，其两端的环形接线应尽可能短，形成的环形面积应尽可能小。
- 用同轴电缆时，测量仪器的电源采用隔离变压器（加滤波器）或用正弦波不间断电源供电；采用

光纤电缆时，发送器的交流电源经隔离变压器供电，此时测量仪器可不用隔离变压器。

- d) 靠近开关操作设备的测量仪器，可能会受到干扰影响，可将仪器加一屏蔽外壳，此外壳与电缆外屏蔽一起接地（即接仪器附近的接地网）。

#### 6.4 环境问题

- a) 多数测量仪器为实验室型，应在规定的温度和湿度条件下工作，在户外工作时应注意当仪器自温度较低的户外搬进温度较高的室内时，可能发生结露现象，需待结露消失后才可使用。
- b) 试验现场可能场地空间有限，在敷设试验接线和安放仪器时注意与高压带电运行设备保持安全距离。
- c) 户外雨雪和污染可能降低分压器等设备外绝缘强度，原为户内设计的分压器不宜用于户外。

#### 6.5 测量仪器同步触发技术

- a) 可采用内部触发（梯度与电平触发等），数字式测量仪器可充分利用预触发功能。
- b) 采用外触发时，由断路器操作设备的辅助接点或试验顺序控制器进行触发。
- c) 采用光纤传输或调频（FM）信号发送和接收，以避免因干扰引起的假触发。
- d) 在第一次操作前，试验一下触发电路，应在拉开被试断路器的两侧隔离开关的条件下，操作被试断路器，检查触发是否正常，此时测量仪器记录的为电容耦合电压。

#### 6.6 电力设备操作、试验的安全

- a) 试验前应检查设备带电状况（高压用验电器，低压用电压表）。
- b) 试验前应在被试设备的各侧（断开电源包括隔离开关）做好安全措施方可进行试验接线。
- c) 试验前应检查测量电缆、分压器和测量探头等导通情况后，接好线。
- d) 在操作设备前应查看接地线、指示灯、安全标志等。
- e) 操作被试设备时，不要触及测量仪器。
- f) 在人工故障试验时，在故障接地点周围一定距离处设置遮栏，防止人员误入，受跨步电压危害，并告知所有人员不要接触附近金属构架，注意防止接触电压。
- g) 严格防止试验人员误入不属于试验范围的间隔，碰触运行设备的操作把手，二次设备等。

#### 6.7 其他注意事项

- a) 了解被试验设备技术数据限值。
- b) 了解测量转换装置、测量仪器技术数据限值。
- c) 使所有现场人员意识到试验正在进行，可能存在不正常情况。
- d) 在下列工作时应加强注意：  
敷设临时测量电缆，打开电缆盖板，应有区别地使用安全标志。不应在配电盘后无人监护下进行接线等。
- e) 做好试验时有关记录，包括时间、次数、操作条件等。
- f) 应做好试验前、后仪器的校正。
- g) 随时在现场研究测量结果的合理性，若有异常情况需及时处理；必要时重复进行该项试验。
- h) 在研究解决了结果差异之后，应即按试验计划方案进行试验；若需改变应按规定的程序进行。
- i) 未与运行操作人员协商讨论前，不应更改试验计划。
- g) 试验指挥人员、试验小组负责人和测量仪器专责操作人员最好视需要各带一台袖珍型录音机，可随时记录下试验过程中的备忘事件（临时决定、次序或定值更改、情况说明等）。这些录音对事后整理测量数据，填写试验报告和分析结果时是很有用的。

### 7 试验报告编写要求

#### 7.1 试验报告编写

在现场试验后应编写出一份内容完整、质量较好的试验报告，使试验结果不仅为本电网（或本单位）

解决某些技术问题，而且报告中列出的试验条件比较全面，可作为技术历史档案保存，即使将来电网发展、改变了，仍可据此作出分析，并可供其他电力系统利用和分析。

试验报告宜包括下列主要技术内容：

- a) 电网、设备参数和试验条件。
  - 1) 电力系统接线图及其主要参数：
    - 试验地点；
    - 系统接线；
    - 设备名称。
  - 2) 设备和线路参数：
    - 输电线路（绝缘、杆塔结构图形等）；
    - 操作的开关设备；
    - 变压器；
    - 并联电容器；
    - 串联电容器及其保护；
    - 并联电抗器及中性点电抗器；
    - 避雷器；
    - 阻波器；
    - 绝缘特性。
  - 3) 试验条件：
    - 试验内容概述和测量接线图；
    - 时间（投、切操作时间，各项操作顺序）；
    - 气候；
    - 系统电压；
    - 负荷潮流；
    - 试验前电压。
  - 4) 测量系统：
    - 接线图；
    - 测量转换装置：装置名称、频率范围、变比；
    - 数据传输系统：双屏蔽同轴电缆或光纤电缆；
    - 测量仪器：型号、出厂序号、频带宽度、采样率、记录时间、校正结果等。

## 7.2 试验结果和分析

- a) 试验操作项目。
- b) 测得的暂态过程：
  - 幅值（以标么值 p.u.表示）；
  - 频率；
  - 极性；
  - 上升速度（电压等）；
  - 过电压持续时间。
- c) 稳态结果：
  - 电压和电流均方根值（RMS）、峰值；
  - 过电压持续时间。
- d) 设备反应：
  - 发热；



——故障；

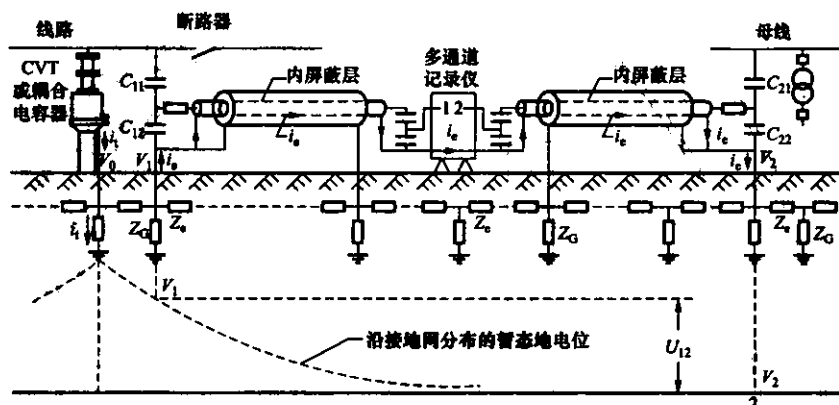
——外观。

- e) 需要叙述的事先计算（包括必要的理论分析等）或模拟试验结果。
- f) 结果分析和结论。

附录 A  
(资料性附录)  
关于接地干扰问题的说明

### A.1 关于同轴电缆应一点接地的补充说明

在投入 CVT、耦合电容器或电容分压器时，或者在投入人工接地故障时，有明显的暂态电容电流流入接地网，由于接地网本身的阻抗作用，使流入点的暂态地电位  $V_0$  明显升高，此升高的地电位向四周沿接地网导体的阻抗逐渐衰减，直到近百米以外渐趋平稳（见图 A.1）。



$C_{11}$ ,  $C_{21}$ —1、2号电容分压器的高压电容；

$C_{12}$ ,  $C_{22}$ —1、2号电容分压器的分压电容；

$i_t$ —在投入 CVT 或耦合电容器时，流入接地网的暂态电容电流；

$V_0$ — $i_t$  流入接地网，由于接地网阻抗作用，在流入点的暂态电位；

$V_1$ —在 1 号电容分压器接地点，受  $i_t$  影响的暂态电位；

$V_2$ —在 2 号电容分压器接地点的暂态电位（受  $i_t$  影响极小，可以认为是零电位）；

$U_{12}$ —由于  $V_1$  与  $V_2$  不同的电位之间的电位差；

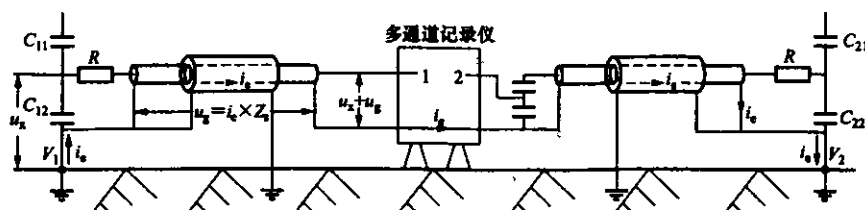
$Z_0$ —纵向的土壤阻抗；

$Z_g$ —横向的土壤阻抗；

$i_g$ —由于  $U_{12}$  电位差产生的干扰环流；

1, 2—多通道记录仪的信号输入端

图 A.1 同轴电缆非一点接地电路图



$u_x$ —信号电压；

$u_g$ —干扰电压；

$Z_s$ —电缆内屏蔽层阻抗；

其他符号含义同图 A.1。

图 A.2 测量电路中干扰信号  $u_g$  形成示意图（简化）

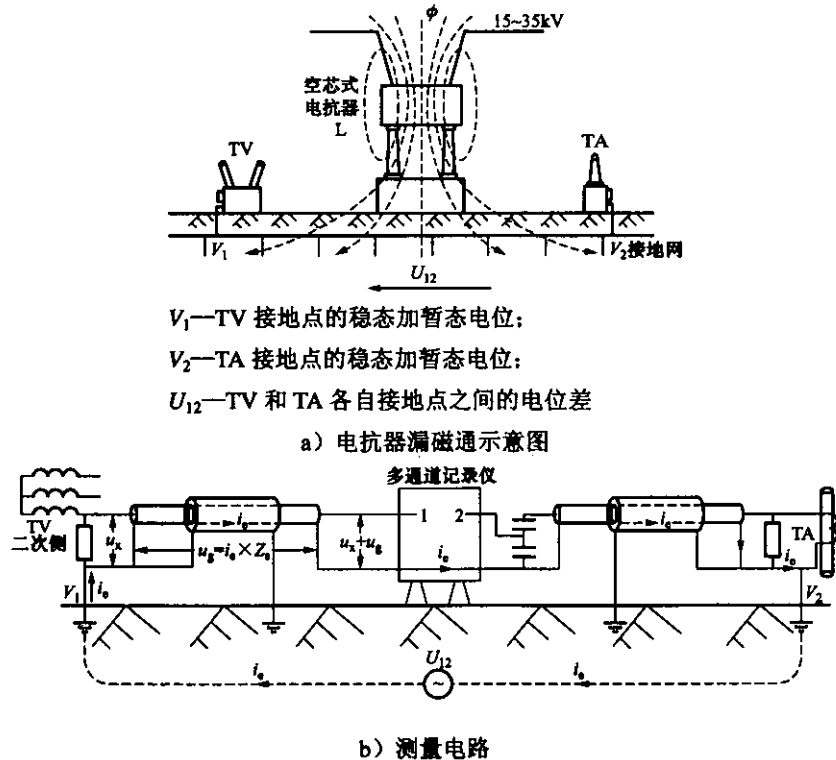
从图 A.1 可以看出,接地点附近百米范围内的地电位是不相等的,此时如果用一台多通道记录仪测量来自两个不同接地的信号,由于不同接地点之间存在着不同的暂态地电位,例如  $V_1$  和  $V_2$ ,它们之间的电位差为  $U_{12}$ 。

若将测量信号和干扰信号具体分析,如图 A.2 所示,在同轴电缆内屏蔽层中有环流流动,把环流  $i_e$  在电缆内屏蔽层阻抗  $Z_s$  造成的电压降  $U_g$  (干扰信号)一起连同真实的测量信号  $U_x$  测量进去,形成明显误差,因此要求设法实现测量系统一点接地,达到使内屏蔽层中无环流,消除干扰信号  $U_g$  的目的。因此内屏蔽不宜采用两点接地方式,同理不宜用一台多通道仪器在不采取措施下测量来自两个或两个以上接地点的测量信号。这是接地问题引起的干扰,已为多年现场试验所证实。

因为外屏蔽还是两端接地的,实际上在暂态过程中,外屏蔽层中还是有环流流动,但对测量的影响很小。

## A.2 漏磁通引起接地网电位不等

中压 (15kV~35kV) 电抗器通常称低抗,若是空芯式的,例如 BK-10000/35 型,在投入时和投入后,漏磁通极为明显,交变的漏磁通向地面窜入接地网,在安装位置的前、后、左、右四个方向上,在附近的接地网导体上感应出电压,使不同接地点之间出现电位差 [图 A.3a)], 如图中的  $V_1$  点和  $V_2$  点,两点之间的电位差  $U_{12}$ ,主要是稳态分量,还叠加暂态分量。有时达数伏或更大一些。



注: 图中  $V_1$ 、 $V_2$ 、 $U_{12}$  含义同图 A.3a), 其他符号含义同图 A.2 注。

图 A.3 电抗器漏磁通引起地电位不等示意图

若用一台多通道记录仪测量电抗器的电压和电流波形,由于相应的 TV、TA 分布在不同的位置上,例如图 A.3 中  $V_1$  和  $V_2$  点,它们各自的二次绕组也在此接地,即各接在不同的接地点上,其地电位为  $V_1$  和  $V_2$  点,测量系统形成两点接地,在同轴电缆的内屏蔽层中造成环流  $i_e$ 。与上述 A.1 条中相同的理由,造成测量结果受到严重影响。

变电所现场 TV 和 TA 的二次接地都已固定,不便重新拆开和改接,而且现场运行人员也不希望临时改接地,在这种情况下最好采用光纤传输测量信号,就能彻底解决接地干扰问题。

铁芯式三相中压电抗器尚未发现这种明显的漏磁现象。

附录 B  
(资料性附录)

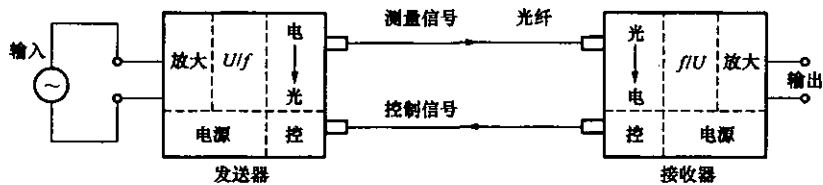
测量信号光纤传输系统主要技术特性

测量信号用光纤传输系统的原理图如图 B.1 所示。

光纤电缆传输测量信号的简要工作原理：被测量的调幅信号经幅值—频率转换器变成调频信号，经发光管将电信号变成光信号，组成信号发送器。光信号进入光纤电缆，到接收器，再经光电管将光信号还原成调幅信号（模拟量），进入测量记录仪。

通常大多选用仅传输测量信号的单通道（单芯光纤），其发送器和接收器采用交流供电方式；只有在特殊情况下，例如发送器处于高电位，或十分靠近高压带电设备，才采用双通道系统，发送器由电池供电，另一芯光纤作为控制通道，在接收器侧操作遥控开关，通过此控制通道，来改变发送器的输入量程和接通电源。

光纤传输系统的主要技术特性见表 B.1。



$U/f$ —电压/频率变换器； $f/U$ —频率/电压变换器

图 B.1 光纤传输系统原理图

表B.1 光纤传输系统的主要技术特性

序号	项 目	技术特性
1	通道	单通道或双通道（信号和控制各占用一个通道）
2	频带	DC~1MHz（-3dB），保证 700kHz，（频响平直 DC~400kHz，±0.5dB） DC~250kHz（频响平直，DC~100kHz，±0.5dB） DC~10kHz（频响平直，DC~10kHz，±0.5dB）
3	输入接线方式	普通单端输入或差分输入
4	输入量程	±1V，±5V
5	输出量程	±1V，±5V 输出阻抗<1Ω，1.0mA
6	调频	例：DC~1MHz 调频 9MHz±1MHz
7	非线性	±1.0%
8	传输误差	±0.1%满度（Fs）
9	电源	交流 220V、50Hz，电池或长效电池（供低耗型发送器）
10	光纤电缆	规格和特性由制造厂选配，光纤最大长度，通常为 1000m（也有 500m），由用户注明需要光纤长度，大多选用 200m~300m

注：注意选用频响曲线的平直部分，±0.5dB 已能满足使用要求。

## 附录 C (资料性附录)

### 数字式记录仪器参数选用和使用特点

选择和使用数字式记录仪时，宜注意下列事项。

#### C.1 频带

仪器的频带（频率上限值）应选为被测信号的最高频率的 5 倍或以上。这是由于仪器在频率上限值  $f_0$  时，其输出幅值已衰减 3dB，即衰减 29%，只有使用在  $0.2f_0$  时，幅值衰减误差才小于 2%，也就是使用在  $f_0/5$  以下才适宜。仪器的上升时间按同样的原理，应选为被测量信号上升时间的 1/5 以下。

下列近似公式可以表示频带（频率上限）与上升时间的关系，借此来选用适当的仪器：

$$\text{频带 (MHz)} = 0.35 / \text{上升时间 } (\mu\text{s})$$

#### C.2 垂直分辨率

垂直分辨率低于 8bit（例如 6bit）是不可取的，通常大多用 8bit，只有在特殊要求下才选择 10bit，一般高于 10bit 也是没有必要的。

#### C.3 采样率，记录长度和波形长度

采样率 (Sample rate) 是每秒采样的次数，与 A/D 转换器的特性有关，它的单位为 S/s (Sample/second)，例如 100MS/s。

记录长度 (Record length) 表示仪器记录一次的最大内部储存的容量，以点数 (Point 或 Sample) 表示。例如：1kS、50kS、128kS、1MS (1 兆点)。采样率和记录长度是数字记录仪的两个重要指标。

采样周期为两次采样点之间的时间间隔，以 ms/S、 $\mu\text{s}/\text{S}$ 、ns/S 表示，它是采样率的倒数。

波形长度 (Waveform length) 或称时间窗口 (Time Window)，是仪器每次记录的波形信号从开始到终止的持续时间，以秒 (s) 表示，它们之间的关系为：

$$\text{波形长度 (s)} = \text{记录长度 (S)} / \text{采样率 (S/s)}$$

#### C.4 使用特点

根据被测信号的最高频率分量和要求记录的波形长度，选用适当的采样率和记录长度：

- a) 对单次暂态过程，通常对被测信号高频分量的每个周期，采样 30 点或以上（测量误差能小于  $\pm 3\%$ ）。例如，若最高频率 20kHz，采样率可选 600kS/s 或以上。此时采样周期率为  $1\text{S}/(600\text{kS/s}) = 0.002\text{ms/S}$ ，即每隔  $2\mu\text{s}$  采样 1 点。
- b) 若要求记录的波形长度（或时间窗口）相当于 3 个 50Hz 的周期，即 60ms，则需记录长度  $= 60\text{ms} / (0.002\text{ms/S}) = 30\text{kS}$ 。可选用记录长度为 30kS 或 50kS 的数字式仪器。
- c) 如果需要观察全过程，要求记录更长的波形，则可选用记录长度更长的仪器（128kS 或 1MS）。有时作宏观测量，可适当减慢采样率，延长波形长度，例如上述例子中，选择采样率 100kS/s，记录长度若为 50kS，则波形长度可达：

$$\text{波形长度 } s = 50\text{kS} / (100\text{kS/s}) = 0.5\text{s}$$

可记录 50Hz 波形 25 个周期。

- d) 在个别情况下如果需要仔细地记录暂态过程的细节部分，例如断口重击穿时电压（电流）上升时间，达到较准确地测量过电压的目的，在选用采样率时宜顾及上升时间的要求，若信号上升

时间为  $0.1/\mu\text{s}$  ( $=100\text{ns}$ )，宜选用采样周期为  $10\text{ns/S}$  的采样率，即  $100\text{MS/s}$ ，此时  $50\text{kS}$  记录的波形长度为：

$$50\text{kS} \times 10\text{ns/S} = 500\mu\text{s} = 0.5\text{ms}$$

- e) 对某些暂态过程，例如隔离开关投、切空母线，整个过程较长，断口重击穿次数很多，波形等值频率较高，若要测量整个过程的一大部分，例如  $0.3\text{s}$ ，可用较慢的采样率  $3.125\text{MS/s}$ ，采样周期  $320\text{ns/S}$ ，记录长度  $1\text{MS}$ ，则波形长度可达  $320\text{ms}$ ，相当 16 个  $50\text{Hz}$  周期。若要测量重击穿时的单个电压（或电流）脉冲信号，采用较快的采样率  $200\text{MS/s}$ ，采样周期  $5\text{ns/S}$ ，记录长度为  $30\text{kS}$ ，则波形长度为  $150\mu\text{s}$ 。

C.5 按试验要求选用记录仪

在选用近代数字式记录仪时，宜优先选用电子示波器，其次，在有条件时选用暂态记录仪。按测量暂态过程不同的技术要求，可参考表 C.1 选择仪器，尽量选用具有光标测量值数字显示和内存软盘的结构，通道数自行选定，各主要参数不低于表 C.1 所列数值。

表 C.1 选用数字式记录仪的最低技术参数

试 验 技 术 要 求	基 本 要 求	测 量 重 击 穿 波 形	研 究 用 ( 例 如 研 究 GIS )
$f_{1, \max}$	$20\text{kHz}$	$5\text{MHz}$	$75\text{MHz}$
$f_{2(-3\text{dB})}$	$100\text{kHz}$	$25\text{MHz}$	$350\text{MHz}$
采 样 率	$600\text{kS/s}$	$100\text{MS/s}$	$200\text{MS/s}$ 、 $500\text{MS/s}$
记 录 长 度	$30\text{kS}$ 、 $50\text{kS}$ 或 $128\text{kS}$	$50\text{kS}$ 、 $128\text{kS}$ 或 $256\text{kS}$	$50\text{kS} \sim 256\text{kS}$ 或 $1\text{MS}$
注： $f_{1, \max}$ 为最大测量频率， $f_{2(-3\text{dB})}$ 为 $-3\text{dB}$ 时的上限频率。			