



线缆产品质量控制数字化表徵

电力电缆的结构

目前，在我国交流输电网络中的电缆大多采用图1-1所示的结构。从内到外主要分为线芯、绝缘层和护层。

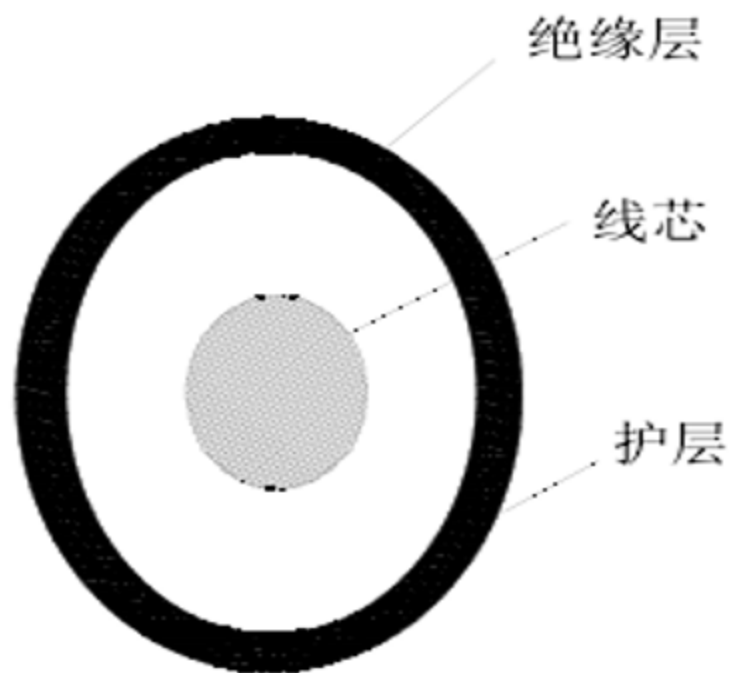


图 1—1 电力电缆的结构示意图



电力电缆的结构

1) 线芯

- 电力电缆线芯的作用主要是传送电流，线芯的损耗主要由导体截面积和电导系数来决定。为了减少电力电缆线芯中的损耗和电压降，电缆线芯一般由具有高电导系数的金属材料铜或铝制成。
- 电力电缆必须保证一定的柔韧性和可弯曲度，因此，较大截面的电缆线芯要由多根较小直径的导线绞合而成。实际上，根据线芯的外形可分为圆形线芯、中空圆形线芯、扇形线芯、椭圆形线芯四类。由于圆形线芯的电气特性比较均匀，在35KV及以上电压等级的电力电缆中主要采用圆形线芯，其它形式的线芯在低压线路中也有一定的运用。



电力电缆的结构

2)绝缘层

- 作为电力电缆的绝缘层材料，必须具有以下几个特性：
- (1)较高的击穿场强（脉冲、工频等）；
- (2)较低的介质损耗系数；
- (3)相当高的绝缘电阻；
- (4)优良的耐树枝放电、局部放电能力；
- (5)一定的机械强度和柔韧性；
- (6)电气及物理性能的长期稳定性等。

目前在高压电缆的生产工艺上，一般采用三层共挤的生产方式（内屏蔽层、绝缘层、外屏蔽层）。



电力电缆的结构

3)护层

- 为使电缆适应各种使用环境的要求，在电缆绝缘层外施加了覆盖层，统称为护层。
- 电缆的护层是构成电缆的三大组成部分之一，它的主要作用是保护电缆绝缘层在敷设和运行过程中，免受机械损伤和各种环境因素的影响，如水、日光、生物、火灾等的破坏，以保持电缆长时间的电气稳定性。因此，电缆护层的运行状况直接关系到电缆的使用寿命。
- 电缆护层所用材料繁多，主要可分为两大类。一类是由金属材料，如铝、铅、钢铜等，主要用以制造密封护套、铠装或屏蔽。由于金属材料具有不透水性，因此可以防止水分和其它有害物质进入电缆的绝缘层。另一类是非金属材料，主要有橡皮、塑料、涂料以及各种纤维制品。由于电缆金属材料的腐蚀属于电化学腐蚀范畴，因此，为了防止对金属护层的腐蚀，常采用非金属材料作为金属护层的外部保护。



电力电缆的电气参数

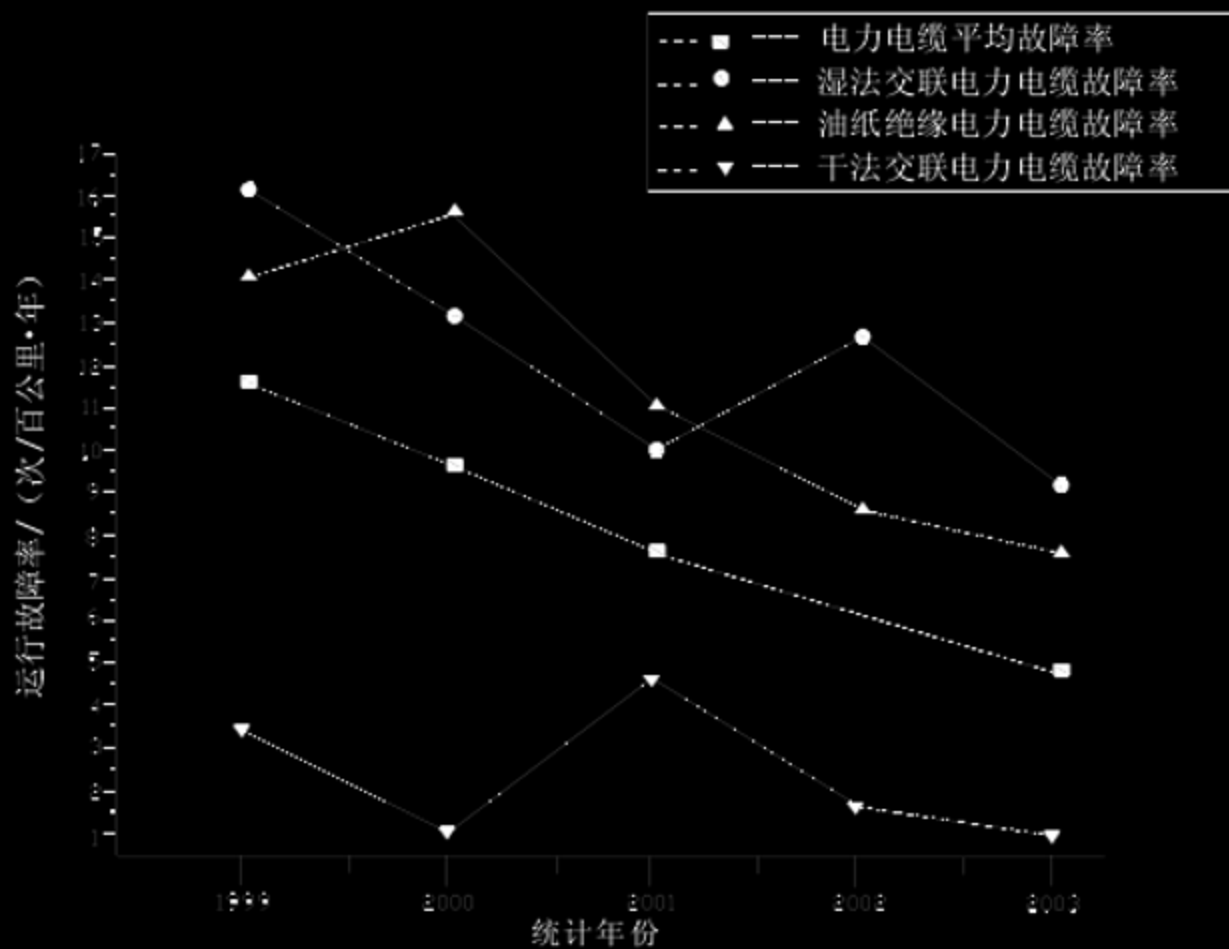
- 电力电缆的主要电气参数有线芯的有效电阻、电感、绝缘电阻以及电容四个参数,这些统称为电缆的一次参数。电力电缆的波阻抗、衰减常数、相位移常数则成为电缆的二次参数,二次参数可以从一次参数计算而得。电缆的电气参数决定电缆的传输性能,如电缆线路的电压调整率就主要是由电缆线芯的电阻和电感来决定的(对于长电缆线路,绝缘电阻和电容也影响到电压调整率)。



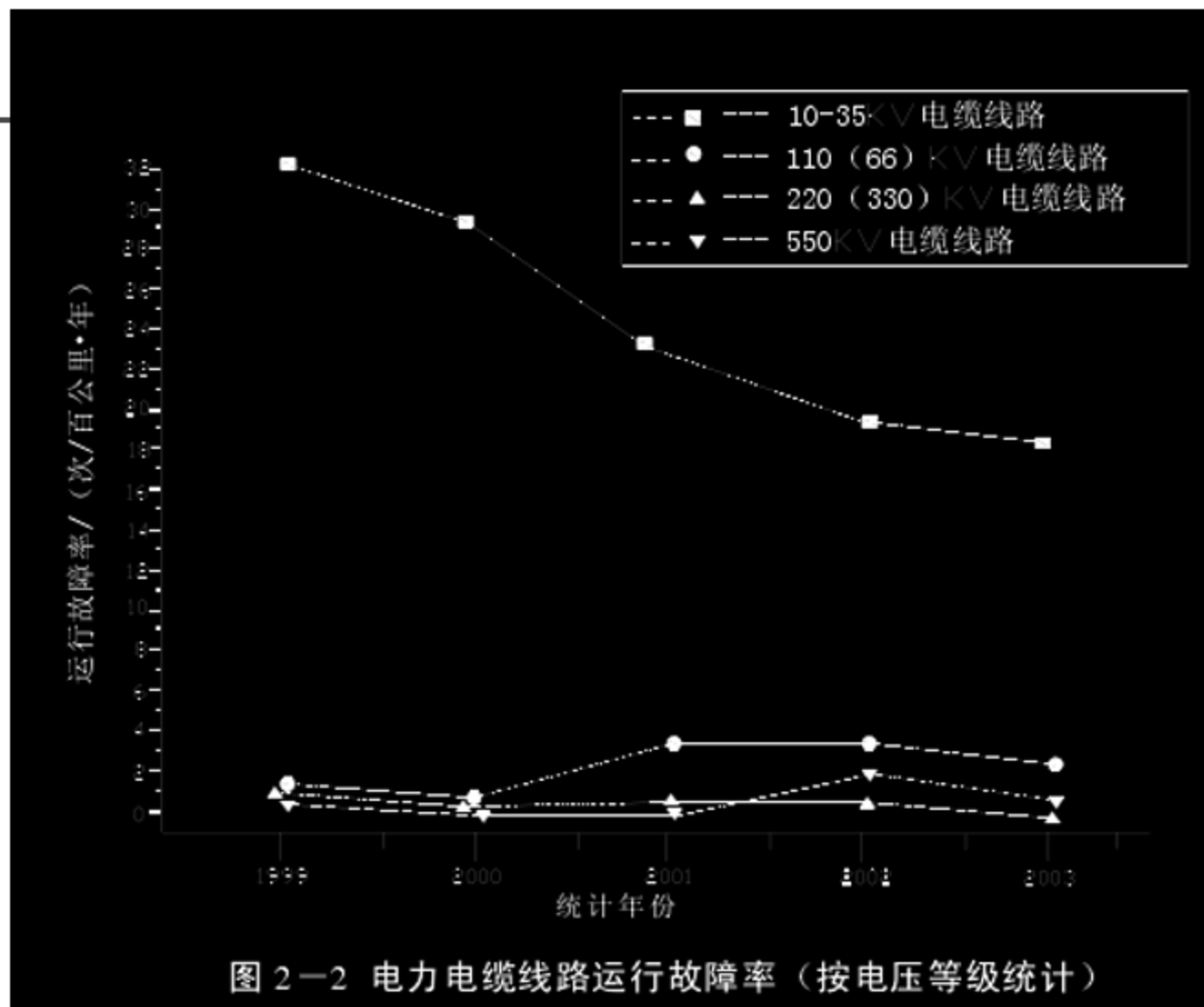
故障率统计

- 长期积累的电力电缆试验研究结果证实：电力电缆护层、电力电缆附件是电缆线路中绝缘结构相对薄弱、容易发生运行故障的部分。其次，电力电缆在制造、敷设施工、运行维护过程中，不可避免地会出现产品质量、过负荷运行以及外力破坏等问题，也是导致电缆线路中电缆本体发生运行故障的直接原因。然而这一试验研究结果需要经实际运行情况的验证，这里以故障率做为统计量。

故障率统计



故障率统计





故障率统计

- 统计结果表明：**10KV~220KV**电力电缆的平均运行故障率由**1999**年的**11.5次/（百km.年）**，逐年下降至**2003**年度的**5.6次/（百km.年）**。

- 与经济发达国家相比，我国电力电缆运行故障率高出许多。造成电缆线路故障率较高的原因主要在以下三个方面：
- 1) 二十世纪七十年代至八十年代投入运行的XLPE绝缘电力电缆产品均采用1+2挤出的生产设备和湿法蒸汽交联工艺，有近40,000km质量不稳定的电力电缆产品投入输配电网运行，且基本进入高故障率时期。
- 2) 由于电力电缆线路一次性投资较大，其直接成本是架空线路的4倍，如果计及拆迁、土建等间接费用，其投资成本约是架空线路的10多倍。电缆线路也就成为输配电网的瓶颈，特别是用电高峰季节，大约有72%的电缆线路长期处于过负荷运行状态且不能够及时地进行维护。同时，由于受到经济条件限制，部分区域或企业将过去投运的6KV油纸绝缘电力电缆升压至10KV电压系统中运行，造成电缆线路运行事故明显增加。
- 3) 在我国城市规划工作中，自来水、煤气、通讯、市政、路桥、房地产、电力以及环卫、绿化等基础建设工程缺乏系统管理，造成电力电缆线路外力破坏故障大幅上升。加之从业人员素质参差不齐，电力电缆线路敷设安装质量和运行维护得不到保证。

电力电缆故障成因分析

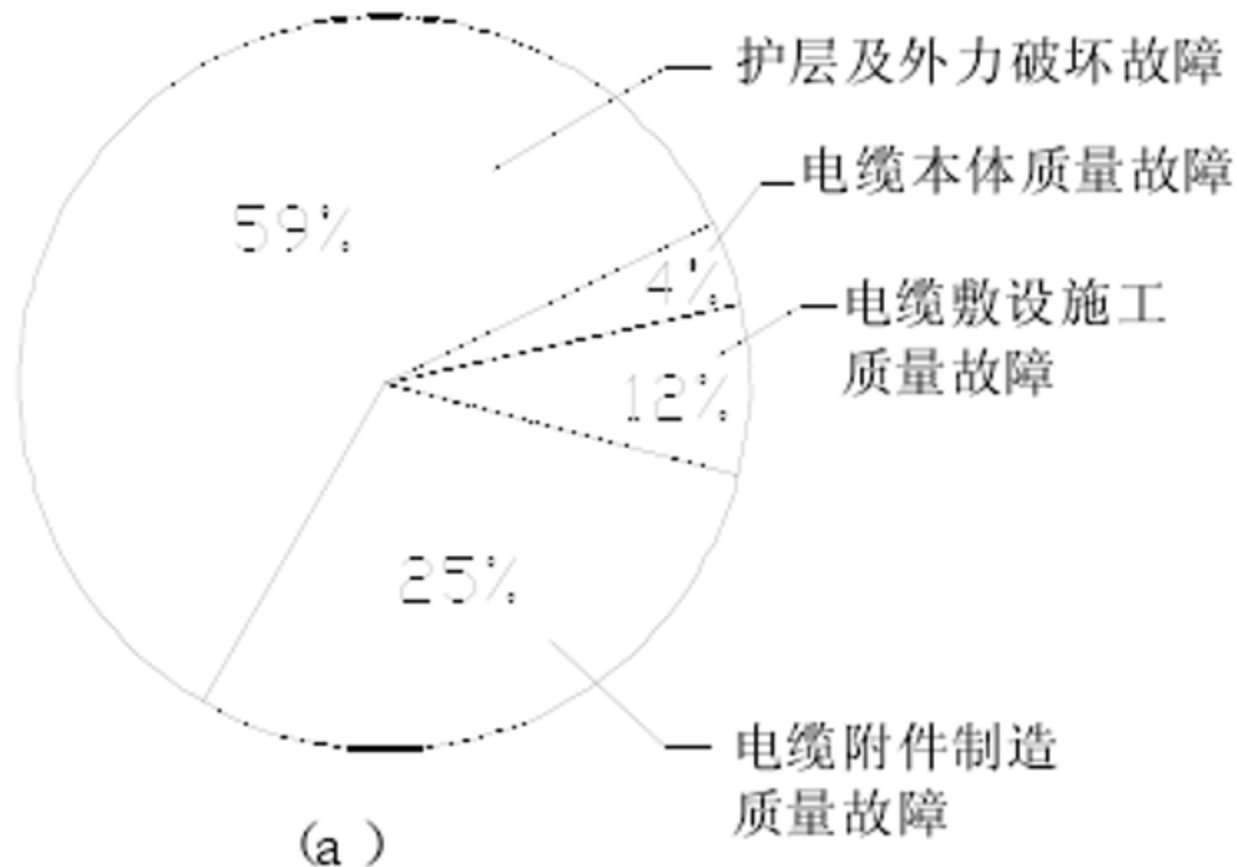
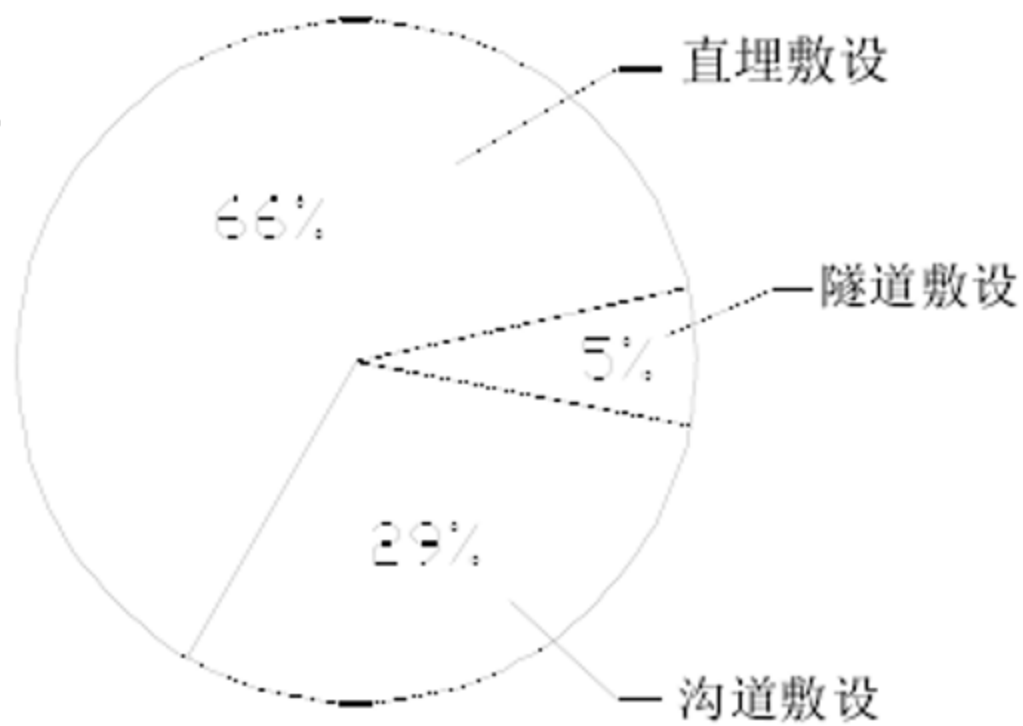


图 2—5 电力电缆线路运行故障类型统计图



(b)

图 三种电力电缆敷设方式的外力破坏故障率



电缆故障分类

电缆故障分为：开路故障、低阻故障和高阻故障三种类型

相间或相对地绝缘电阻高，但工作电压不能传输到终端或带载能力差

电缆相间或相对地绝缘受损，其绝缘电阻小到能用低压脉冲法测量的一类故障

相对于低阻故障而言

开路故障

若电缆相间或相对地绝缘电阻达到所要求的规范值，但工作电压不能传输到终端；或虽终端有电压，但负载能力较差。如图 1-1 在 A 相 A 点存在有电阻 R_k ，当 $R_k = \infty$ ，即为断线故障，这是开路故障的特例。





低阻故障

电缆相间或相对地绝缘受损,其绝缘电阻小到能用低压脉冲法测量的一类故障。如图 , 当 B 相 B 点对地电阻 $R_g=0$ 时, 为短路故障, 这是低阻故障的特例。

高阻故障

电缆相间或相对地绝缘损坏, 其绝缘电阻较大, 不能用低压脉冲法测量的一类故障, 它是相对于低阻故障而言的。包括泄漏性高阻故障和闪络性高阻故障 二种类型。

- 
- 对电缆绝缘在线监测的注意力主要集中在主绝缘上，开发了一些电缆主绝缘在线监测仪。日本从二十世纪八十年代起就开始对**XLPE**电缆主绝缘老化的诊断问题开始研究，提出了直流分量法、叠加电压法和电介质损耗法等多种诊断技术，并在**80**年代后期研制出多种可供实验室和工业现场直接使用的设备，如住友电气工业株式会社的在线运行电缆监测仪。在国内，上海电缆研究所研制的**CDZ**型**XLPE**电缆诊断仪等。这些技术在实际应用中发挥了较好的效果。



电缆绝缘的劣化和诊断内容

交联聚乙烯塑料电缆应用广泛，替代了油纸绝缘

一、绝缘劣化原因

1、热劣化

温度过高，材料氧化分解，导致电缆绝缘电阻和耐压性能下降
可通过检测其直流高压下的泄漏电流和测量交流电压下的介质损耗角正切



2、电气劣化

电晕放电发展树枝状放电

监测电缆局部放电

3、水树枝劣化

有机材料的长期吸水形成水树枝劣化

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

检测介质损耗角正切或直流泄漏电流



4、化学性劣化

化学部门，有溶解，龟裂等现象

测量介质损耗角正切和直流泄漏电流

二、电缆在线监测参数

介质损耗角正切

局部放电

直流泄漏电流



电缆绝缘的在线监测

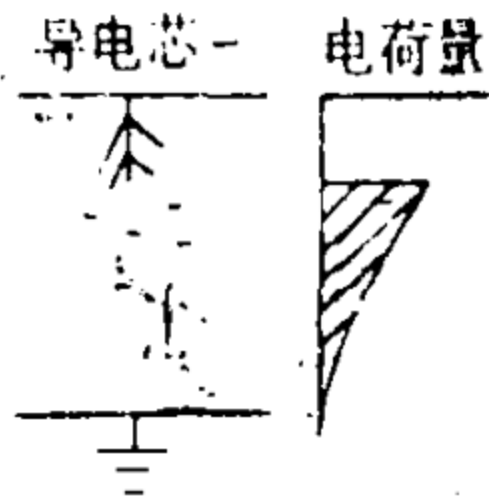
一、直流法

导电芯发生水树时，从导电芯到外皮有一个负电流流过，即水树枝整流作用（在交流电压下）

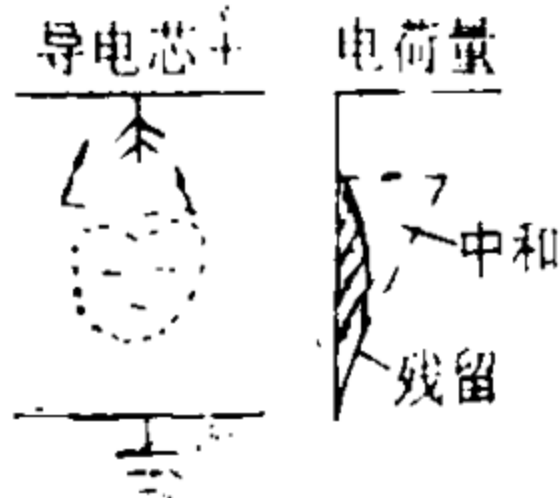
该电流（纳安级）与水树枝长度之间有一定相关性，以此可以判断水树或绝缘的劣化

通常认为直流电流小于**1nA**时绝缘良好，大于**100nA**时为绝缘不良，介于二者之间要加强监测

当外皮发生水树时，外皮有一个正电流流过。



(a) 交流负半周



(b) 交流正半周



(c) 交流负半周



1、直流成分法

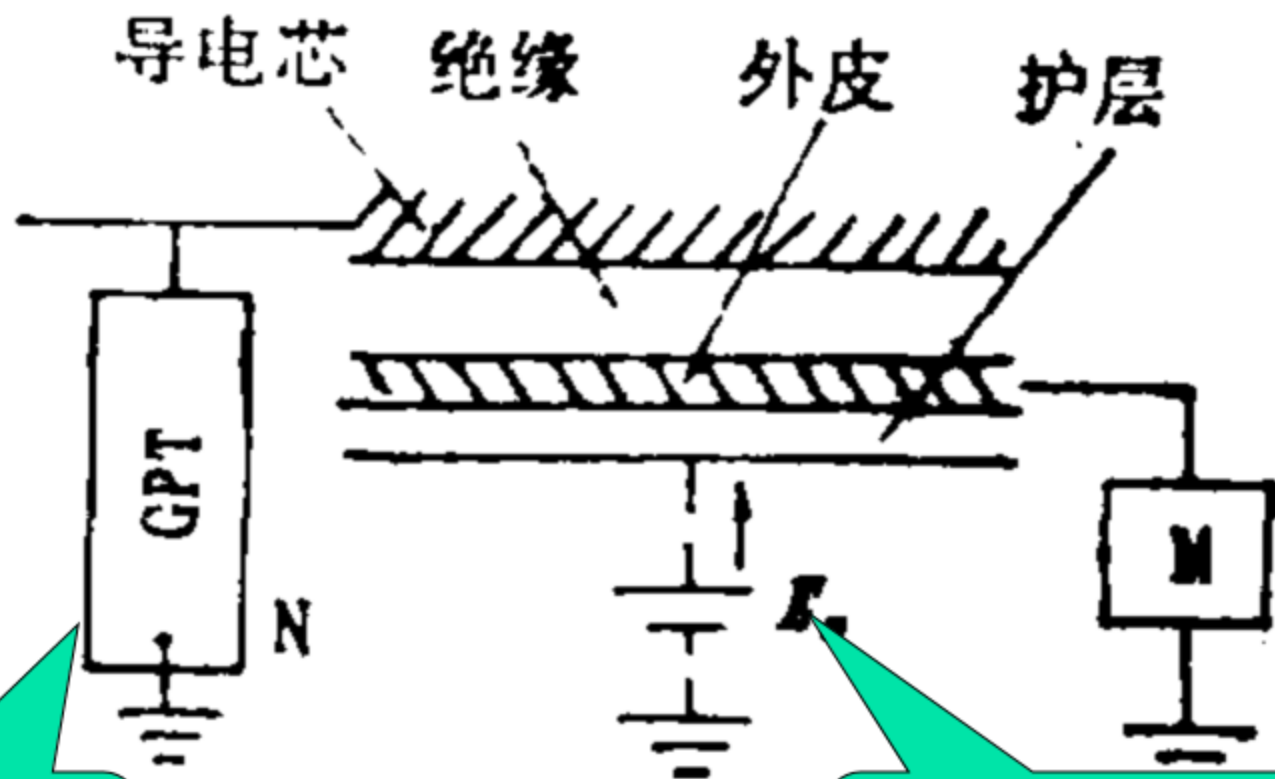
电缆中有水树时，类似于尖-板电极具有整流作用。运行电压作用下，在由电源线、电缆导电芯，**XLPE**绝缘、电缆接地线、**GPT**(接地保护用电压互感器)、电源线构成的回路中会有微弱的直流成份电流流过。将纳安级微电流测量装置**M**串接入电缆的接地线中如图所示，即可测出此电流。微电流测量装置应并接有低通滤波器及接地保护装置，以衰减交流成份、检出直流成份，并保证试验人员及装置的安全。通常认为直流成份电流小于**1nA**时绝缘良好，大于**100nA**时绝缘不良，介于两者间时要加强监测。



对于6.6KV和10KV两种电缆， 日本标准：

- 对额定电压为6.6KV的电力电缆，若直流泄漏电流小于0.5nA是好电缆；介于0.5nA~30nA之间，则电缆有危险，要加强监测，随时准备更换；大于30nA是坏电缆。
- 对额定电压为10KV的电力电缆，则直流泄漏电流小于1nA是好电缆，介于1nA和100nA之间，则电缆有危险，要加强监测，随时准备更换；大于100nA是坏电缆。

当电缆护套的绝缘电阻下降时，会出现化学作用电势 $E_s < 0.5V$ ，从而引起杂散电流



接地保护用电压
互感器

E_s 为护层对地
化学作用电势

- 
- 如图1所示，电缆护层的绝缘电阻下降时，由于护层与地之间化学作用电势 E_s 的作用，除了直流成份电流外，测量装置M中还将流过杂散电流，影响测量准确度。
 - 根据试验结果， E_s 最大不超过0.5V，因此当护层绝缘电阻小于200~500M Ω 时，杂散电流将影响诊断的可靠性。杂散电流会影响三相电缆零相电流波形的零线，可由此波形推算出杂散电流，并由测得电流扣除此杂散电流而得到准确的直流成份电流值。



2 直流叠加法

- 这种方法是借助电抗器将直流电压在线叠加于电缆绝缘,即直流电源经电抗器连接于三相导线,并由并联电容来免除交流高压对直流电源的影响,通过测量流过绝缘的直流电流来进行诊断。为了防止直流电压影响GPT二次线圈开口三角的输出电压,所加直流电压不能很高,约10~50V。由于电缆绝缘处于交流高压的作用之下,尽管所加直流电压不高,仍能真实反映绝缘的实际状况。水树长度增加时,直流叠加电流迅速增加,其交流击穿场强也迅速下降。用直流叠加法测得的电缆绝缘电阻大于1000MΩ时绝缘良好,小于10MΩ时绝缘不良,这分别相应于电流为10nA、1000nA左右,可用上述微电流测量装置测量。杂散电流的影响可通过正、反向叠加直流电压消除。



2、直流叠加法

水树长度增加时，直流叠加电流迅速增加

注意所加直流电压不要过高，一般为**10**伏~**50**伏

可以通过正反向叠加直流电压消除杂散电流的影响

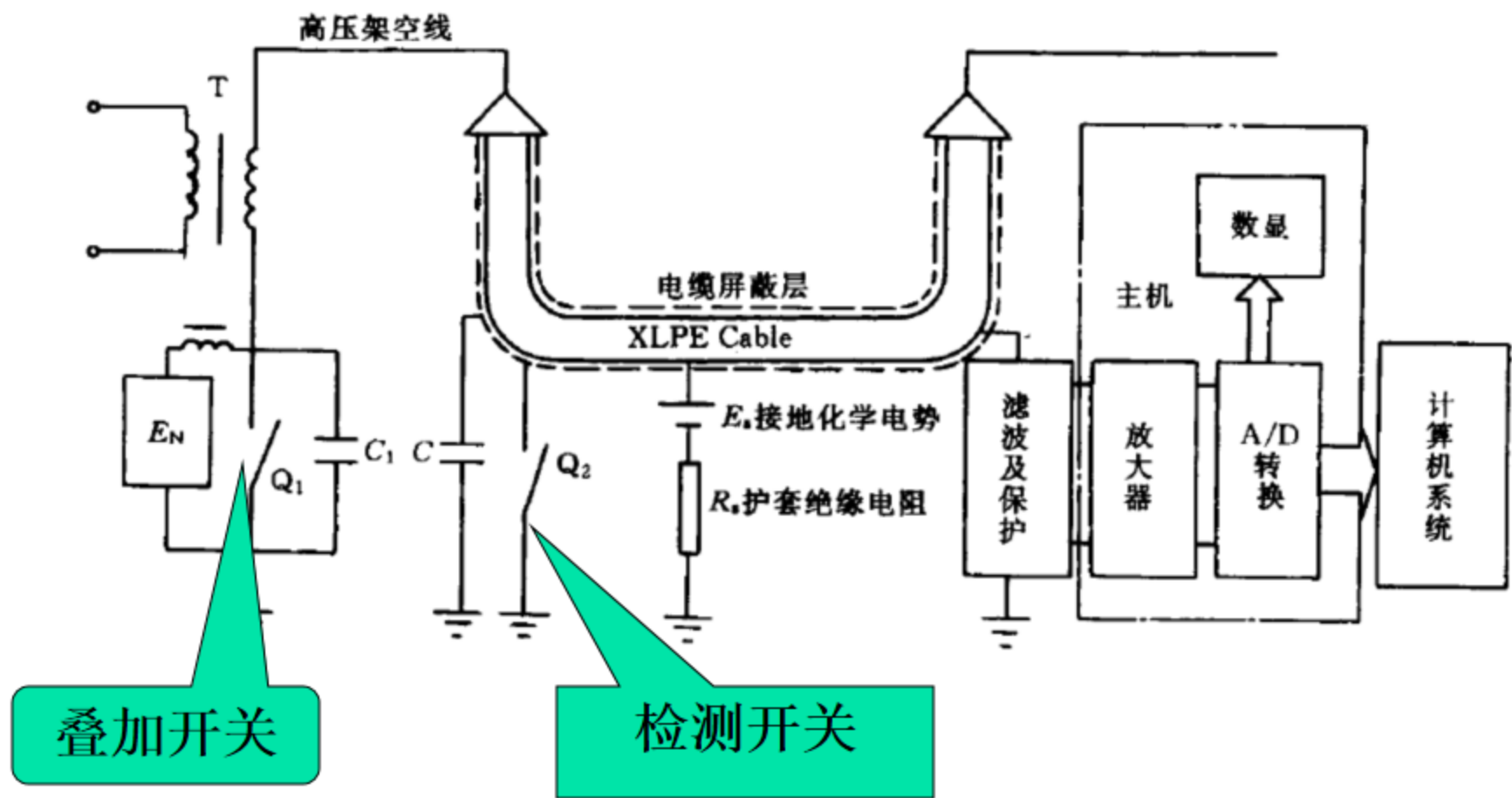


$$I = I_1 + I_{dc} + I_2$$

I_1 为叠加直流电压产生

I_2 为外干扰噪声引起的

I_{dc} 为直流分量



- 
-
- 日本已有电缆自动在线监测装置（**AOLCM**）产品，该类装置的特点是由计算机自动地打印。显示、存贮每天的监测数据，监测一条线路约需**8**分钟，

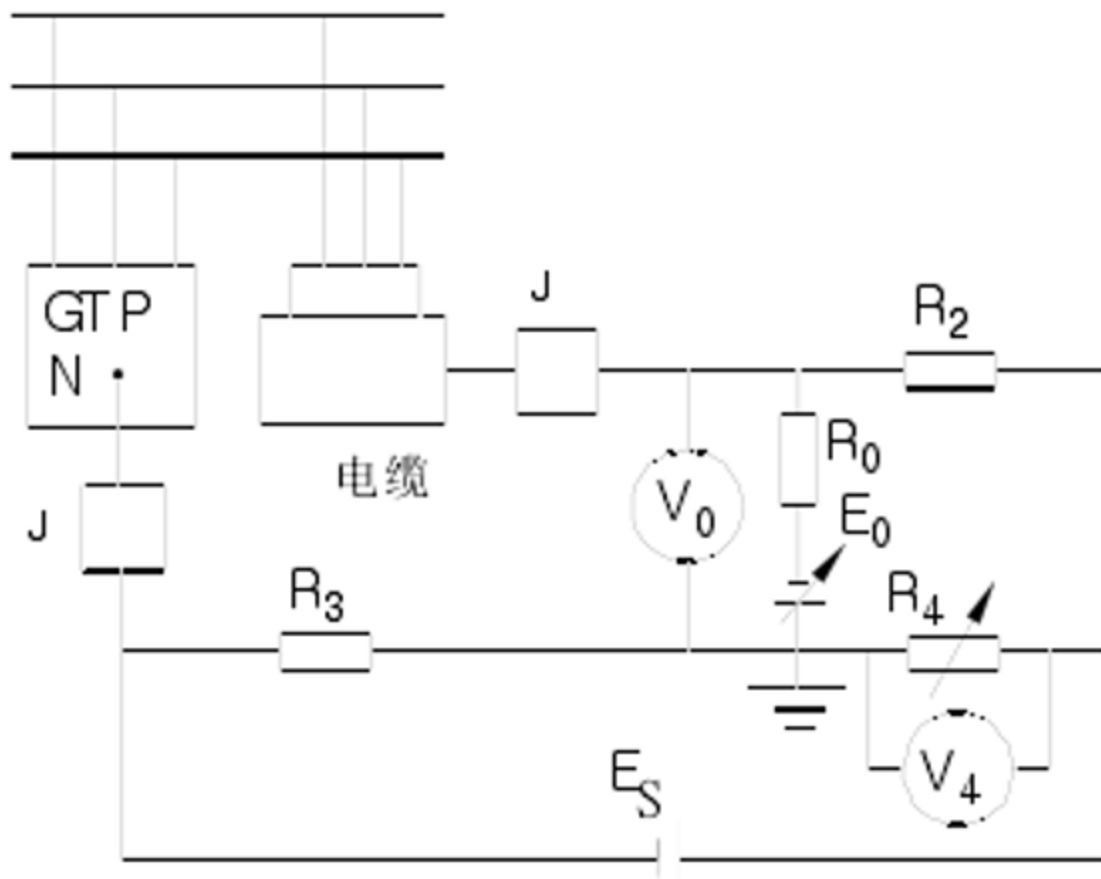
判据（日本住友公司，取E1为50V）

项目		测量结果	判断	结论
RB		无判断标准，根据发生的情况凭经验判断		
RI/MΩ	6KV	>1000	良	继续使用
	10KV	>5000		
	6KV	300~1000	轻度不良	监视使用
	10KV	1000~5000		
	6KV	30~300	中度不良	计划使用
	10KV	100~1000		
	6KV	<30	严重不良	立即跟换
	10KV	<100		
Rs/MΩ		>1	良	继续使用
		<1	不良	定位 修理
RT/MΩ		<100	良	继续使用
		>100	不良	定位 修理或更换



二、电桥法

用电桥测量电缆绝缘电阻





$$R_1 = \frac{(E_1 - U_4)R_2}{U_4}$$

- 
- 电缆护层与地之间化学作用电势 E_s 的影响，可调节 E_0 来消除，即反复调节 R_4 及 E_0 ，使 V_0 指示为零，此时 E_s 对电桥平衡没有影响。连接于三相高压导线其它设备的对地绝缘电阻与 R_3 并联，由于 R_3 之值并不参与计算，因此其它设备的绝缘电阻不影响测量结果。也要防止所加直流电压对GPT的有害影响。



工频法

- 将加于电缆的电压（通过电压互感器）及流过绝缘的工频电流（通过电流互感器信号取出，再通过数字化测量装置测出电缆绝缘的 $\text{tg}\delta$ 。当 $\text{tg}\delta$ 大于一定值时，绝缘可判为不良。注意电压、电流互感器角差对测量结果的影响。应用灵敏度为0.01%的测量装置可很好地监测绝缘，由此得到的 $\text{tg}\delta$ 反映的是绝缘缺陷的平均程度。



三、低频法

1、低频成分法

由于水树的存在，除了直流成份外，在电缆的充电电流中也含有低频成份。根据频谱分析，其频率在**10Hz**，特别是**3Hz**以下的低频电流可诊断绝缘。由于低频电流也是纳安级的，对测量装置要求较高。

2、低频叠加法

为避免直流微电流测量上的困难，可将**7.5Hz**、**20V**的低频电压在线叠加于电缆在电缆接地线中串接入测量装置，以得到相应的绝缘电阻值。一般情况下当绝缘电阻小于**1000 MΩ**时，性能不好；当绝缘电阻小于**400 MΩ**时，电缆应立即更换。

复合判断法

- 由于绝缘状态与其特性参数间的统计分散性，仅用一种方法来诊断绝缘，会有漏判或错判的可能。采用几种方法，互相配合进行复合诊断可提高诊断的正确性。采用包含直流叠加法及 $\text{tg}\delta$ 法的复合诊断，对不良电缆的诊断的准确率很高。根据测量装置研制的难易程度、现场测量中的干扰情况等，我国目前宜采用包含直流叠加法和 $\text{tg}\delta$ 法的复合判断法来对XLPE电缆进行在线诊断。



总结:

- 电桥法通过调节电压和电阻可削弱电缆护层与地之间化学作用产生的电动势ES的影响。考虑直流电压对GPT的有害影响，它仅适于<10kV的电缆。
- $\tan\delta$ 介损法反映电缆绝缘的整体缺陷水平，是目前对电容性设备绝缘水平的主要评判标准，但部分水树生长而没击穿时，引起绝缘电阻减少，很难使 $\tan\delta$ 变化，大大降低了检测精度。因介损法是电缆本身的属性，也可作为高压电缆的监测手法之一。
- 直流成份法利用在外界电场作用下电缆因整流效应而产生的直流分量，很难排除电动势ES的影响，故仅作为电缆绝缘在线检测的综合判据之一。
- 。

- 
- 差频监测法是在工频交流电下叠加低频电压，观察其对老化电缆的响应程度。
 - 研究发现含水树枝XLPE电缆同时施加两个频率相近或相似呈倍数关系的正弦电压时，检测回路中会产生超低频水树劣化特征电流信号，据此可在线诊断电缆绝缘的水树枝老化状态，叠加约101Hz的信号最佳，但需考虑信号加载的位置和可靠性因素。



XLPE电力电缆护层缺陷的影响 及其检测技术

- **XLPE**电力电缆护层缺陷的影响
- 护层缺陷、故障对电缆的运行和使用寿命的影响是显而易见的，其影响与危害视电缆的电压等级、电缆结构、敷设环境和电缆外金属屏蔽层的互联方式不同而不同。



1)对10KV及以下电压等级XLPE 电缆的影响

- 10KV及以下电压等级XLPE电缆一般为三相三芯电缆，金属屏蔽层互联且共用金属铠装及绝缘护层。由于三相电压的对称性，金属护层上所感应电压极其微弱，因此当护套绝缘损伤后对电缆的短期运行威胁不大。
- 但由于水分侵入，会导致电缆绝缘产生水树枝的几率增加，电缆的长期寿命受到严重影响，同时使得对电缆的绝缘状态在线监测技术受到影响或失效；如果出现电缆金属层被腐蚀情况，电化树枝对电缆寿命的威胁大于水树枝。

2)对35KV及以上电压等级电缆的影响

- 35KV及以上电压等级电缆多采用单根敷设方式，由于三相电缆很难对称敷设，多采用外金属屏蔽层交叉换位互联，然后一点或两点接地的方式，以保证各电缆感应电势相位对称和幅值相等。因此，一旦电缆护层绝缘破损，在电缆金属屏蔽层上的感应电势即会出现不平衡，导致环流、涡流，造成局部过热，严重影响电缆的长期寿命和短时运行安全，电缆金属护层接地时对载流容量的影响可达30%~40%。
- 如果电缆金属层被腐蚀，在被腐蚀处将出现空气隙和电场集中，极易产生局部放电和引发电树枝，甚至出现电化学树枝，对电缆正常运行造成威胁。除此之外，水分侵入导致引发水树枝几率增加，直接影响电缆的长期寿命。护层绝缘电阻下降严重和金属屏蔽层被腐蚀产生接地化学电势时还会对主绝缘的在线监视造成严重影响。



外护层缺陷或故障的影响主要是：

- (1)导致金属护层(电缆金属套或金属屏蔽层)出现多点接地，金属护层会产生环流造成损耗发热，导致绝缘层局部过热并加速绝缘老化，严重影响主绝缘寿命；
- (2)护层绝缘损伤、因外力或电磁力引起护层联接处位移应变和错位导致水分侵入，主绝缘产生水树老化的概率增加，对电缆寿命产生严重影响；
- (3)主绝缘在金属护层被腐蚀处产生电场集中，易于产生局部放电和引发电树枝，对电缆运行安全造成威胁。

XLPE电力电缆护层缺陷的检测技术



- 对高压**XLPE**电力电缆外护层的故障检测一般分两步进行，先用电桥法或压降比法进行故障预定位，然后根据不同情况分别采用直流冲击法、跨法电压法、音频法进行精确定位。



1)直流电桥法

- 直流电桥法预定位原理图如图所示。 R_1 为电桥的标准电阻， L 为电缆长度， x 为测量处与故障点的距离。设单位长度电缆金属层电阻为 R_0 ，调节电阻 R_2 ，使检流计指示为0，此时电桥平衡，有：

$$[L + (L - x)]R_0 / xR_1 = R_1 / R_2$$

解得：

$$x = 2L / (1 + R_1 / R_2)$$

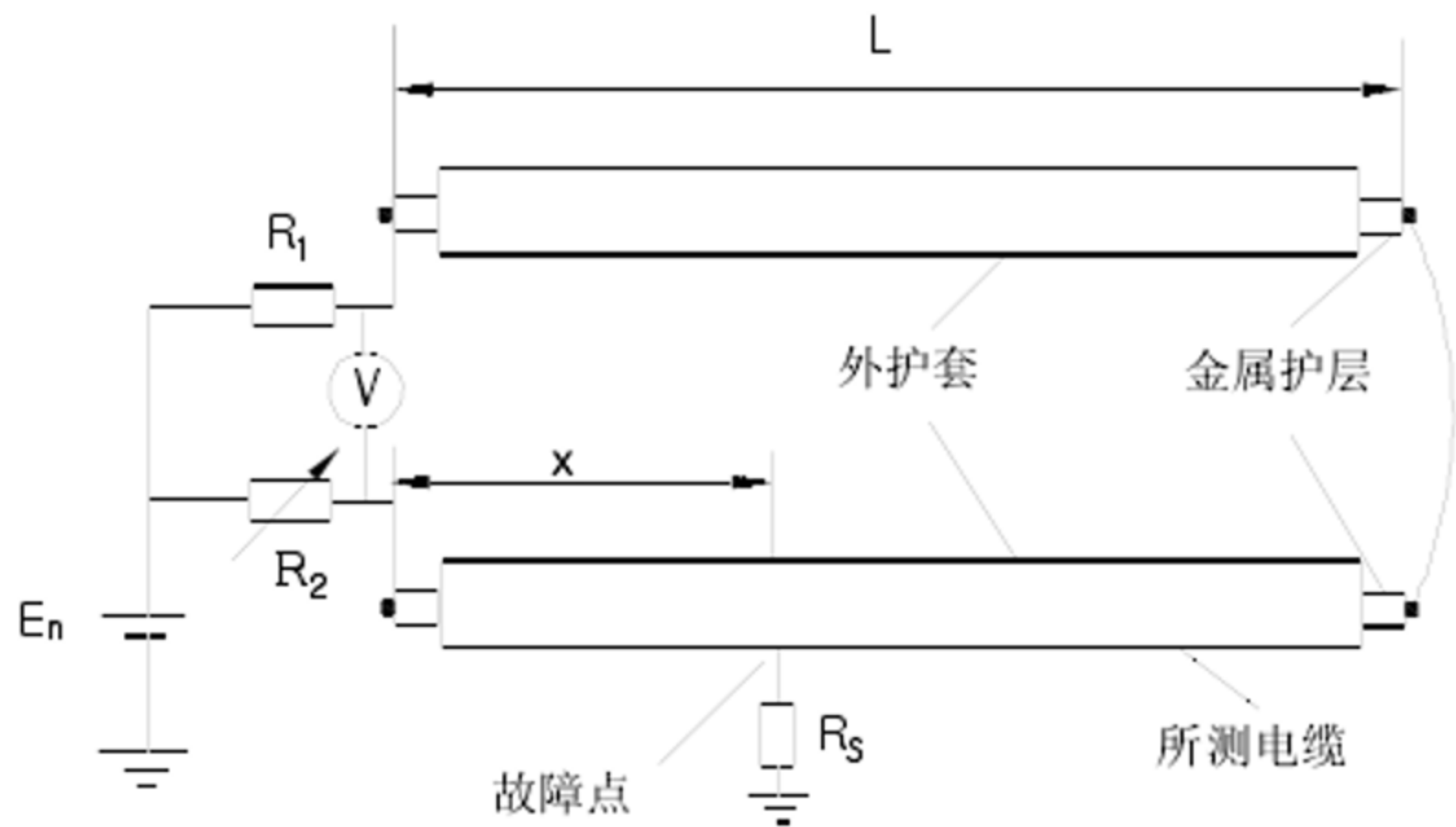


图1—6 电桥法原理图

- 
- 电桥法的优点是操作简单、使用方便；其缺点是需要知道电缆的准确长度等原始技术资料。另外，由于电缆的金属屏蔽层单位长度电阻 R_0 较小，一般为 $0.01 \sim 0.1 \Omega/\text{km}$ ，与接触电阻相近，因此接触电阻的大小对故障距离的测量精度有很大影响，测量时应采取措施以减小接触电阻，从而提高测量精度。



2)压降比较法

- 压降比较法原理如图所示，当测量开关打在“1”时，调节电压源 E_n ，由电流表读取电流值 I ，由电压表读取电压值 U_1 。设单位长度电缆金属护套电阻为 R_0 ，由测量电路可知，电压值 U_1 只与回路电阻 xR_0 有关，即得： $U_1 = IR_0 x$

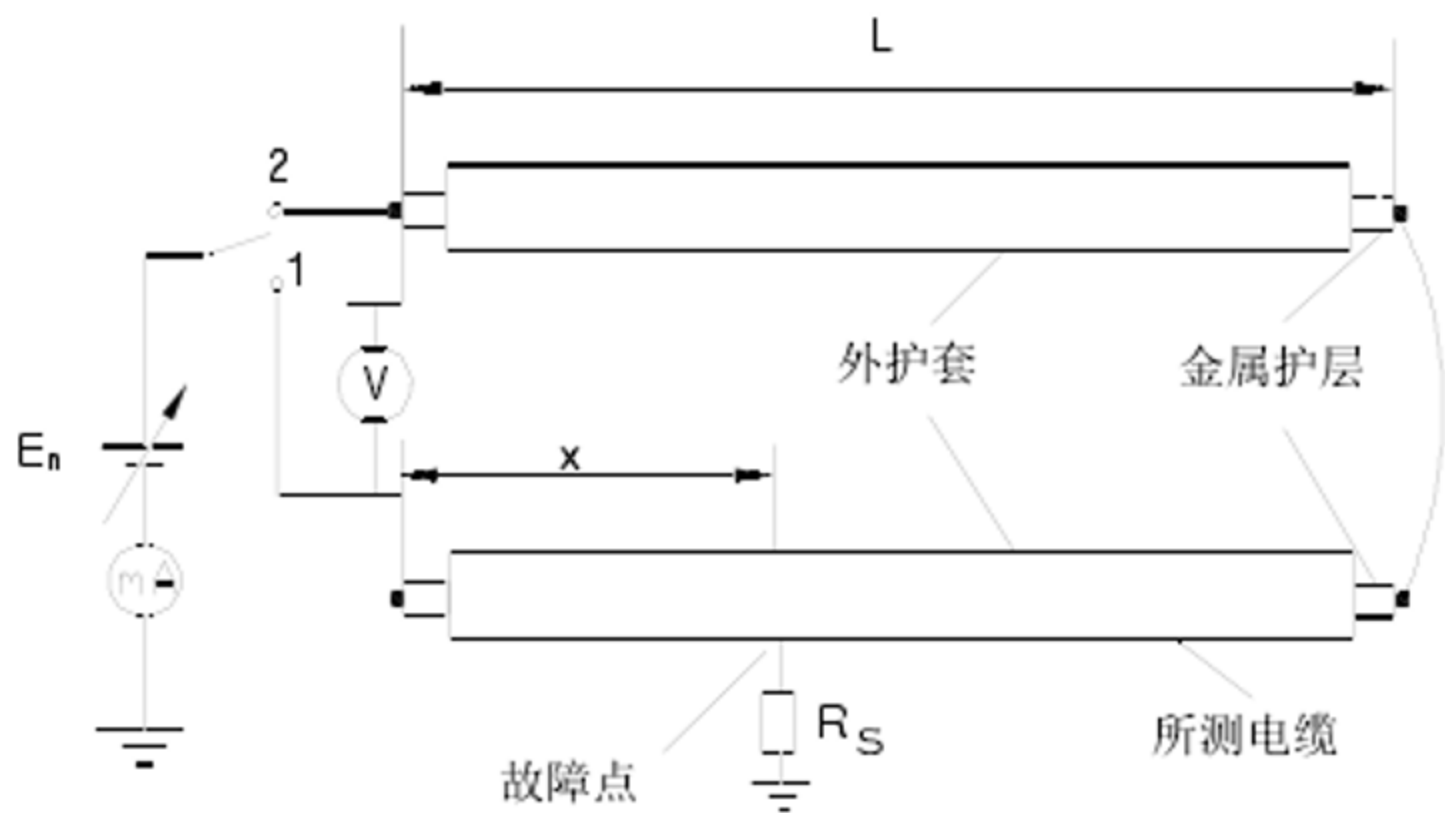


图1—7 压降比较法原理图

- 
- 同理，当开关打在“2”时，调节电压源 E_n ，使电流表电流仍为 I ，由电压表获得电压值 U_2 ， U_2 只与回路电阻 $(L-x)R_0$ 有关，即： $U = IR_0 (L - x)$
 - 消去 IR_0 ，即得故障点距离：

$$x = LU_1 / (U_1 + U_2)$$

应当注意，压降比较法适用于外护套只有**1**个故障点的情况，否则所得结果是多个故障点的平均值；另外，用压降比较法进行预定位时，需用绝缘完好的导线作为通路。



3) 直流冲击法

- 直流冲击法是比较原始的方法，其定位原理如图所示。
- 首先利用球隙放电产生脉冲电压，该电压在护层绝缘破损处产生多频谱放电电流、声、光及磁场等放电信号，然后通过现场检测放电信号来对故障点进行精确定位。该方法的特点是试验装置简单、操作方便，主要适用于新敷设的电缆，特别适于尚未填埋的电缆，这时利用裸耳即能听到故障点放电声，在深夜效果更明显。但由于此法的冲击电压及能量较高，长时间放电时对电缆金属护层及外护套都有破坏性，还会将正常运行时不必处理的薄弱点击穿扩大为故障点，因此对已投运的高压电缆不提倡使用此法。

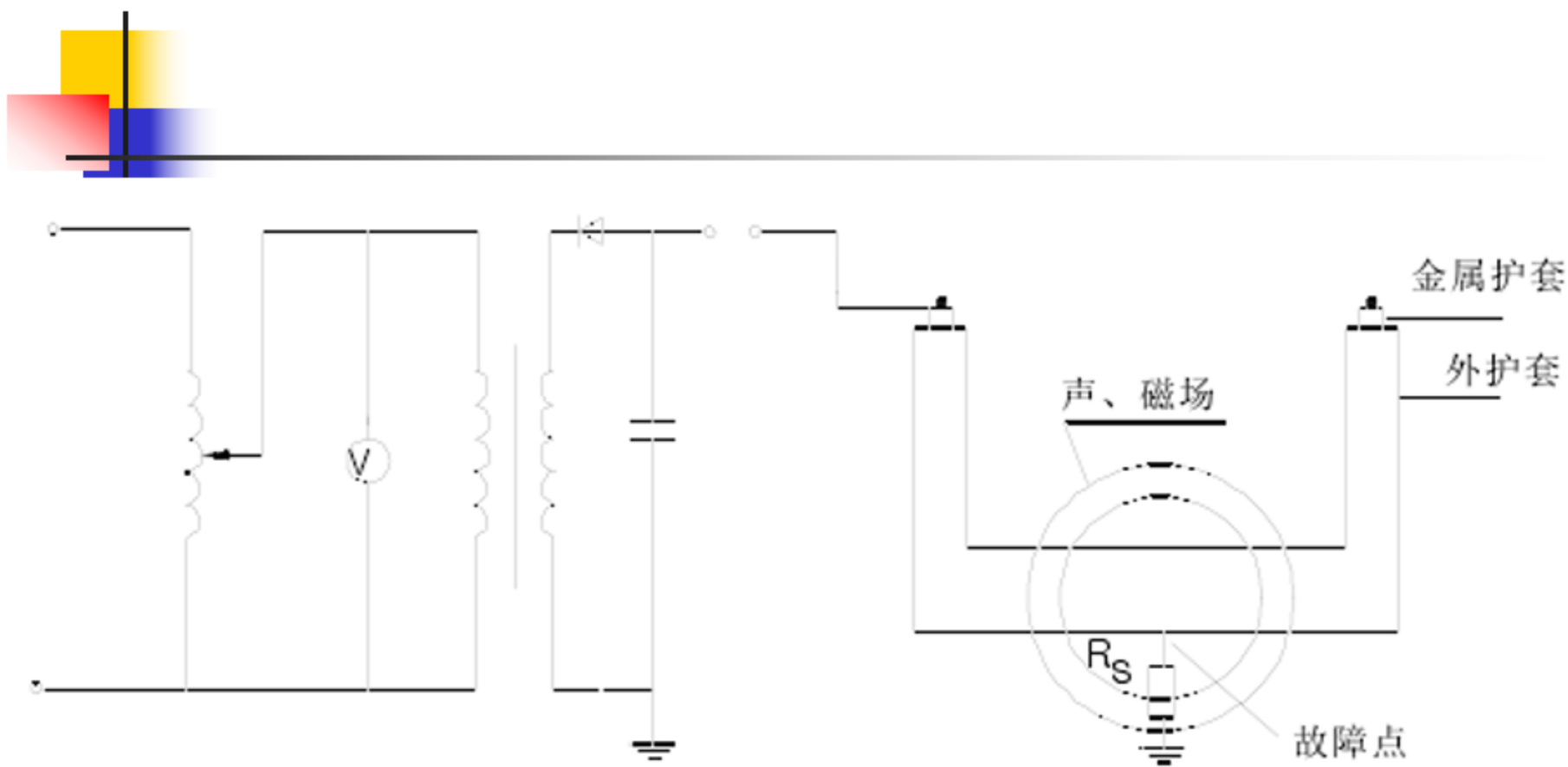
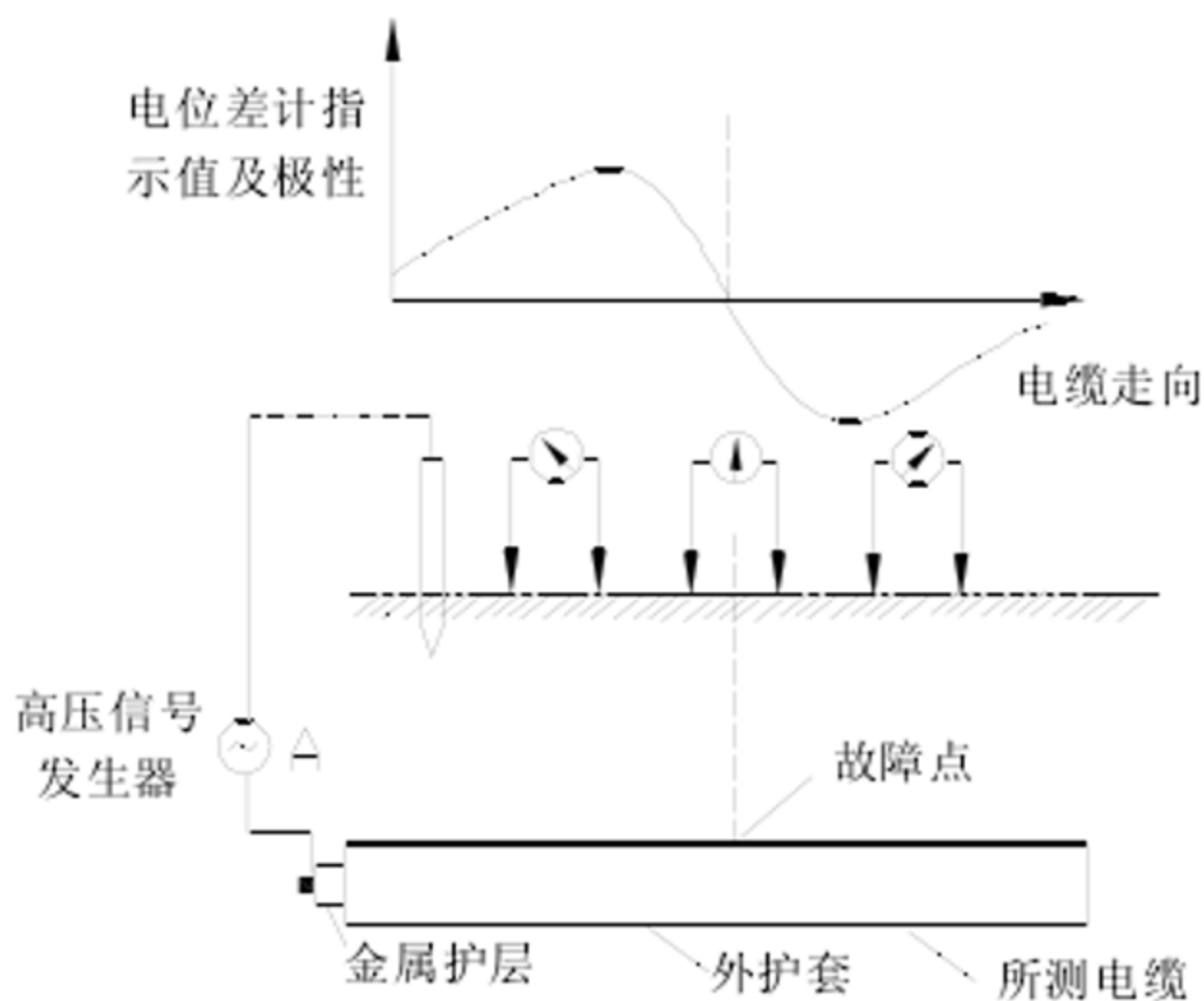


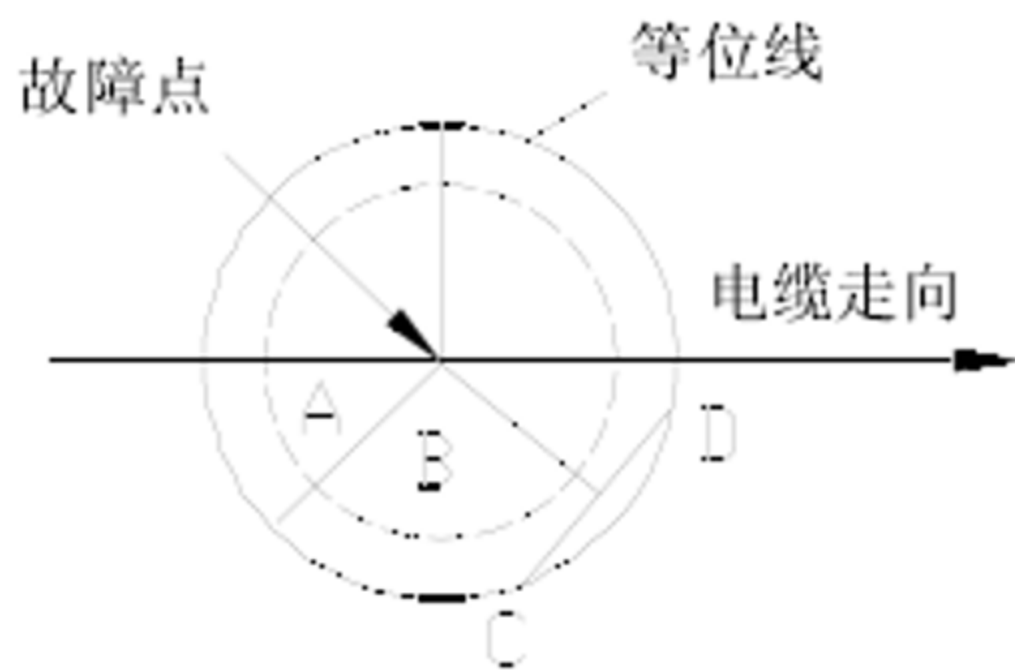
图1-8 直流冲击法原理图

4) 跨步电压法

- 跨步电压法是目前应用最为广泛且非常有效的高精度定位方法，其基本装备为一高压系列脉冲发生器和一套带有探针的电位差计或毫伏表。其原理如图所示。在电缆金属护层与地之间施加一高压脉冲电流，用电位差计沿电缆路径探测，根据不同的情况，可分别用以下2种检测方法。
 - (1) 当知道电缆走向时，可用探针沿电缆方向探测，在故障点附近时，电位差迅速增加，在故障点前达到最大值；在故障点正上方，电位差为零；过故障点后，指针反偏且又达最大值，其电位差计沿电缆走向的电位差值分布如图a所示。根据电位差值的这些特征就可对故障点进行定位。
 - (2) 当受电缆长度方向的地面情况限制不易测量时，可利用放电电流在故障点上方环形发散的特点来定位，定位方法如图b所示，在不同方向分别寻找2个等电位点，然后找出2组等电位点的垂直平分线的交点，即为故障点。此法在故障较为严重时使用效果较好。



(a) 跨步电压法原理



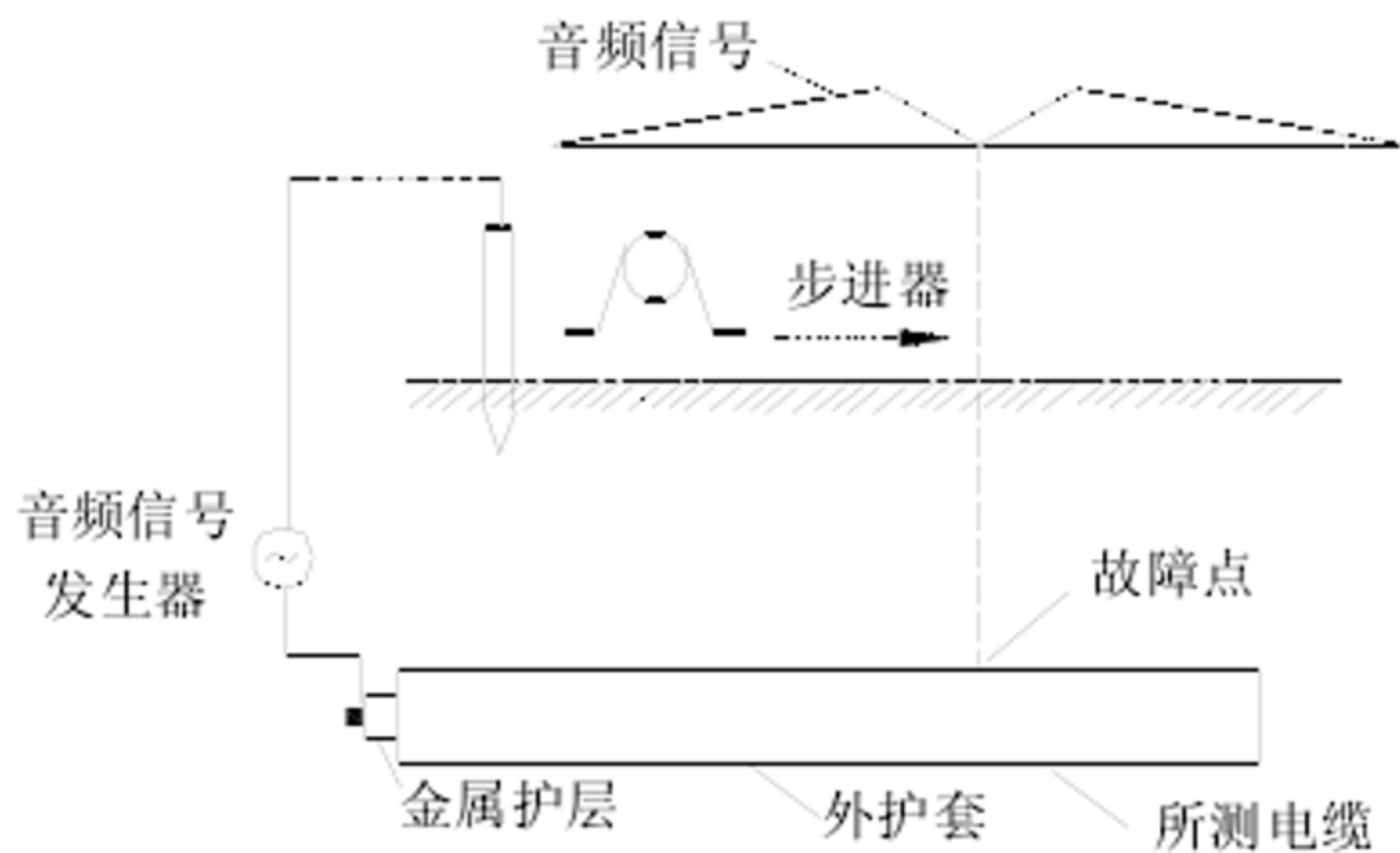
(b) 跨步电压法故障点定位

- 
- 跨步电压法的优点是原理简单、易操作、抗干扰好、破坏性少、定点直观准确，适于敷设于泥土地面内的电缆。其不足之处有：
 - (1) 易受地下金属管线（如水管、天然气管等电位体）的干扰，特别是变电站或电缆接头井周围的干扰更为严重；
 - (2) 在干燥地面或马路上接收信号很弱，须采取措施，否则可能很难测到信号。



5) 音频定位法

- 当地面干燥、水泥路面无法感应信号时，可采用音频法对电缆护层故障点进行定位。其原理如图所示。将音频信号发生器一端与金属护层连接，另一端通过地钎接地，将步进电压探头接在音频接收器上，沿电缆长度方向移动探头，在故障点附近将会收到很强的信号，而在故障点处接收到音频信号最弱，根据此特点，即可找到故障点。



- 
-
- 此方法的优点是所用电压不高，但判别故障点方向时不如跨步电压法直观，实际应用时也会受金属管道干扰。



总结：

- 综上所述，对于高压XLPE电缆外护套的绝缘故障，可分两步进行检测：先用电桥法或压降比较法进行预定位；然后根据具体情况，采取不同方法进行精确定位，对于未回填新敷设电缆的外护套故障，可用直流冲击法进行精确定位；对于已回填电缆和旧电缆，可采用跨步电压法和音频法进行定位。