

[控制系统]

电缆故障检测的技术应用

文/中国民用航空飞行学院 唐明琪

概述了电力电缆故障发生的原因和类型，分析了电桥法、高压闪络法等距离检测技术的优缺点和适用范围，以及声测法和声磁法等定点检测技术的优缺点和适用范围，总结技术案例的实践经验，旨在正确选择电缆故障检测方法、提升故障检测速度与质量。

电缆多数埋藏于地下，一旦发生故障引发停电事故，故障点很难找到，所耗费的人力、财力多，且会给经济、社会带来较大的负面影响。因此，检修人员有必要熟悉掌握电缆故障的成因和检测原则，并熟练掌握检测技术，才能快速准确地排除故障，大大降低各方面的损失。

电缆故障的成因和类型

1. 电缆故障发生的原因

(1) 绝缘击穿

电缆的绝缘击穿是比较普遍的一个故障，导致绝缘击穿的原因主要有以下几个方面。

1) 受潮和腐蚀。电缆在出厂时存在的诸如铅包上有裂缝、小孔、钢铠接头不当等问题会导致电缆受潮；受损后的电缆在运行过程容易引发绝缘受潮。腐蚀是引发电缆绝缘受潮最为主要的原因。

2) 电缆及其附件的质量存在问题。电缆本身的绝缘质量取决于电缆制造过程，若这一过程出现护层缺陷，如绝缘层上存在破裂、褶皱和重叠间隙等。

3) 因电缆内外因以及外界环境因素导致的电缆过热。过热易导致电缆的绝缘更为快速的老化，绝缘的性能降低，中间接头盒缺陷薄弱的位置更易发生击穿故障。电缆过热的外因指超负荷的运行导致的电缆温度上升，处于夏季时这一情况更为明显；内因指电缆的绝缘内部气隙游离致

使局部过热而造成绝缘炭化；外界环境过热指电缆敷设于接近热力管道位置、安装于隧道、电缆沟等通风不良位置时，导致电缆绝缘的老化速度加快。

(2) 机械损伤和过电压

机械损伤是运行中的电缆发生故障的又一个主要原因，多由于电缆在敷设、安装过程操作不当，或安装之后靠近于电缆路径的管道敷设等市政作业导致的。过电压指的是雷电天气等存在的大气过电压以及电缆内部的过电压，所引发的电缆的终端头故障等。电缆损伤的成因主要包括：直接的外力损伤，如施工过程中用力过大造成的拉伤，搬运、挖土等外力损伤，电缆敷设的弯曲度太大造成的绝缘受损；自然现象损伤，如地震、地基下沉带来的拉力过大造成的电缆拉断，终端头、中间接头位置因受潮或者温度上升等原因导致的内绝缘胶胀裂；其他设备引发的损伤，如其他的电力设备烧断电缆导体等。

2. 电缆故障的类型

电缆故障的类型比较多，而且事故类型复杂。可从故障的位置，将类型分为绝缘部分的故障和导电部分的故障。前者主要由于绝缘层损坏导致绝缘的性能被破坏，致使泄漏电流增大而造成的泄漏性故障，或因电压的等级升高引发绝缘击穿，电压在降低情况下使得绝缘增强而引发的闪络性故障。后者则主要体现为导体存在故障，如导体短接存在的短路故障、导体断线存在的开

路故障。

电缆故障的距离检测技术

1. 电桥法

电桥法在检测电缆故障过程中，操作简单而直接。按照接线形式的不同，电桥法可分为正接法与反接法。

(1) 正接法

根据电缆的全长、电缆的电阻等，将电缆终端的故障相和非故障相短接；从已知的电阻和可调的电阻，进行调节使得电桥获得平衡，可得知电缆故障点距离。除去上述方法，还可使用原理和上述方法相类似的电容电桥法对电缆的断路故障进行测量计算。

方便、简单、精确度高、操作安全，是正接法的优点；对于电阻 R_x 、 R_l 的要求高是正接法的缺点。电阻过大将对电桥灵敏度产生影响，电阻太小容易导致连线电阻计算的误差。此外，这一方法在闪络故障和高阻故障中不适用。原因在于故障的电阻高，则电桥当中的电流非常小，灵敏度一般的仪表难以进行测量。而一般的电缆故障多属于闪络故障和高阻故障，故障的电阻值基本超出这一方法的测量范围。为此，在采取这一测量方法之前，需要使用高压设备进行故障点烧穿，这一过程花费的时间较长。同时，存在故障点烧断但电阻反而上升的情况，或者电阻太低呈现出永久短路而导致声测法无法进行定位。正接法的另一个缺点在于需要掌握电缆的准确长度、原始资料，对于电缆线芯的要求也较高，且无法测量三相短路或者断路故障。

在现代的行波技术获得发展之前，施工现场多采取电桥法进行电缆检测，但目前这一方法的使用概率已经较低，在电缆的生产厂家或者技术相对落后的地方仍将电桥法作为主要的检测技术方法。

(2) 反接法

将正接法当中的电流表和电源进行互换，即为反接法。这一方法排除了正接法无法进行高阻故障测量的缺点，进行高阻故障定位时无需事先进行烧穿。同时，还可通过加大电压幅度使得故障点击穿，并在击穿的同时进行故障定位。

2. 高压闪络法

(1) 直流型高压闪络法

直流型高压闪络法适用于测量故障点的电阻

十分之高的，诸如闪络击穿性故障的技术法。测试速度快，所获得的波形简单而易于理解，且读数的精确度高，不必进行闪络故障和高阻故障的烧穿，可直接运用故障击穿所产生的瞬间脉冲信号进行故障测试，是直流型高压闪络法的优点。这一方法的缺点则在于，故障点进行几次闪络放电后，多造成故障点电阻下降而形成炭阻通道，致使这一测试方法无法继续使用；或者当故障点的电阻不高时，由于直流泄漏的电流大，电压基本上降至高压试验设备的电阻之内，而电缆上的电压小，故障点无法形成闪络而导致测量无法进行。

(2) 冲击型高压闪络法

在故障位置形成贯穿性的通道，或者故障的电阻不高时，电压逐渐地增大，仅仅是引起泄漏电流不断增大，但故障点不闪络，或因泄漏电流的不断增大而导致试验设备的容量处于极限、试验设备的电阻极大导致故障点无法加上高压，则必须采取冲击型高压闪络法。这一方法同样具备采集脉冲电压信号方式和采集脉冲电流信号方式，其中前者使用得更为普遍。操作方便，接线简单，波形分析容易，且适用于多数的高低阻故障和断路故障，是冲击型高压闪络法的优点。其缺点是当存在二次击穿放电、击穿电压的特殊情况之时，波形分析的复杂程度则增加，判断上存在困难。

3. 低压脉冲反射法

这一技术方法又称为雷达法，是在雷达的启发之下而发明出来，在于进行故障点的反射脉冲和发射脉冲存在的时间差观察而进行的测距，这一技术适用于电缆的断路、短路、低阻故障测量，原理在于测量时，脉冲信号自测试端被送入所需测试的电缆，脉冲沿着电缆而传播，在诸如短路点或断路点等阻抗不匹配位置，因波阻抗失配而形成反射，脉冲返回至测量端位置且被记录。从而，根据脉冲从入射到返回测量端的时间，以及电波在电缆当中的传播速度，可计算出传播路径长度，进而进行测量端和故障位置的距离计算。这一技术方法的优点在于直观、简单，易于识别电缆的分支点和接头的位置，且无需电缆准确长度的原始资料，缺点是由于脉冲有着一定时间宽度，在时间宽度内所到达的发射脉冲和反射脉冲重叠，则导致测试存在盲区，且发生脉冲宽度和测试的盲区成正比，这一技术方法不适

用于闪络性故障和高阻故障的测量。

4. 远端短路环法

和常规的测试接线法的区别在于，远端短路环法是在终端把故障线芯和电缆测量端位置，用一根完好的线芯进行连接，获得远端短路测试波形后，和没有短路的波形进行比较而获得路径不同的脉冲到达时间差。故障点沿着故障线芯传播而来的放电脉冲所走过的路程，即为故障点和测量端的距离，波形产生差异的时间，即为对应电流行波于故障点和远端的一次来回运动的时间，可以此确定故障点的距离。

电缆故障的定点检测技术

1. 声测法和声磁法

(1) 声测法

首先采用电缆测距法对长距离的电缆线路进行事故点的理论测试，然后根据电缆敷设的路径寻找事故点的位置，为声测法。具体的操作为，在电缆测试端位置连接冲击电压装置进行电缆的脉冲高压施加，故障点会产生规则放电，由于放电能量和电缆电容、电压平方成正比，较大的放电能量于故障点位置释放，故障点产生比较大声的放电声音。而后，在初测获得的故障点位置前后采取接收故障点放电响声的定点仪装置以确定故障点精确的位置。由于放电能量、电流平方和电阻成正比，声测法适用于电缆的高阻故障。这一方法使用过程中，存在由于电缆埋深太深，导致声音大小的差异无法区分而使得定点无法进行的情况。同时，在背景噪声较大的情况下，也难以进行精确定点。

(2) 声磁法

声磁法分为声磁同步法和声磁传播时间差法。声磁同步法是在声测法的基础上进行改进后的方法，即为采用声测法的同时，采取电磁波接收装置进行放电所产生的电磁波接收的方法。于故障电缆自伤进行冲击高压的施加，致使故障点放电而产生爆声，使用测量仪器进行声音信号与故障点放电之时所产生的脉冲磁场信号的同时检测。电磁波与声波同步接收，若在听到振动声波的情况下，同时显示故障点存在的放电电磁波，则说明距离故障点近，否则应当视为干扰信号。当背景的噪声比较大时，可采取这一技术法，以提升故障的识别能力，并通过检测接收到磁声信号的时间差，预估故障点和探头的距离。此外，

进行电缆两侧所接收到的脉冲磁场初始极性，还可以进行故障点的定点、电缆路径和故障电缆的寻找。声磁传播时间差法，在信号强弱不明显，导致故障点查找存在困难时使用，通过检测放电之时所产生的声音信号、电磁信号之间到达测量仪的时间差，进行电缆故障位置的定点。需要注意的是，时间差最小的位置即为故障点所在的位置。仪器在可以接收到放电电磁波和放电声波的情况，且这两种信号显示出时间差，便可进行故障点距离测量点远近的判断，是较为理想的定点方法。

2. 音频感应法

这一技术方法适用于低阻故障的探测，使用音频信号发生器对需要测试的电缆进行音频电流通入而发出电磁波，然后在地面使用探头沿着测试电缆的路径，进行电缆周围的电磁场变化信号接收，并将信号送入到放大器进行放大后送入到指示仪表或者耳机，根据指示仪表示值之大小或者耳机当中的声响强弱判断故障点位置。这一方法是对声测法和声磁法的补充，原因在于在低阻故障中，尤其是故障点所残余的绝缘电阻较为稳定且很低之时，让故障点产生击穿和振动声波是十分困难的。

技术实践案例

1. 电缆故障点查找

XK-1010型路灯电缆故障测试仪由发射机、路由接收机和绝缘接收机（A字架）组成。用该测试仪对500 m长的VV22-4×120 mm²+1×70 mm²电缆进行故障点查找。根据实际技术操作，得出以下经验：第一，接地钎应远离电缆反方向3 m以上，否则会造成箭头指向一直不变（校准A字架的基准方向，分为正效法和反效法：箭头一直指向地钎的反方向为正效法，箭头一直指向地钎方向为反效法；调试时，箭头指向（格子里的箭头）闪烁表示正常，箭头与电缆走向相反表示有故障）；第二，0~100 kΩ为严重接地，例如本次技术实践显示为10 kΩ，即为严重接地；第三，路由测试和绝缘测试综合判断的同一点为故障点，如用路由测试峰值法，当探测头无信号时和绝缘测试仪信号最强重合点为故障点。

2. 电缆测试仪的技术操作实践

XKS-1000多脉冲智能电缆仪系统由5部分组成：XK-3030型高频电源、XKS-1000电缆故

障测试仪、XKS-1000脉冲发生器、电容器和随机附件（球间隙、高压线、接地线、电源线和充电器）。用该测试仪进行故障探测的技术操作实践，其要点为，用绝缘电阻表确定故障性质，确定阻值范围（只能接近于0，因在实际环境中存在铠等因素，不可能完全为0）。故障的性质设定：短路和开路为低阻，高阻闪络和高阻泄漏为高阻。具体的测试步骤：首先用低压脉冲法粗测电缆全长，主机显示 $X=0.5VT$ ；在主机显示屏上选中测量和低压脉冲，并依次选速度、脉冲宽度和频率等的取值，如交联电缆依次选为172、0.1 μF 、30 m，后进行采样、调幅，直到出现的波形全为尖顶波；随后，选波形的第一拐点为起点，第二拐点为终点，计算机自动显示电缆长度如340 m。其次，接好故障线后，低阻值故障和断线按上面方法粗测为故障点的距离，误差在6 m左右，测得波形为负的半波形。一个峰值为一个波形，选 N 个峰值，计算机显示的距离除以 N 即为故障点的长度。除此之外，还应当在测试过程中缩小误差，最后的精确定位利用高压冲闪法，让故障点构成回路充分放电，然后定位故障点（1 m之内）。若是高阻故障用高压脉冲法、高阻故障分为：高阻泄漏和高阻闪络，不论是高阻泄漏还是高阻闪络都必须通过高压脉冲法进行粗测故障距离和进行精确定位，通过高压脉冲法分析故障波的周期来确定故障距离，如果配合多次脉冲发生器就可以减少人工识别波形这一步，直接转化为简单的短路波形，以上冲下拐点为一个波长来确定故障距离，然后进行精确定位。在定位之前，确定电缆的路径走向，目测，步跨，滚尺等有效途径降低粗测距离判断的误差，然后进行精确定位，合理应用定点仪上的声音、电磁、光柱等指示和显示途径，准确判断故障最大点。

3. 小结

根据XKS-1000智能测试仪的实际应用，总结安全操作要领和技术关键点。其一，电容放电时，应先用放电棒的尖端触碰、再用随机带的裸铜线触碰，这样逐步放电以减少放电声；且电容两级都要放电，虽然两级看起来是连通的，实际理论上不可能完全连通，所以都要放电，直到无火花产生才算放完，最好再用高压验电笔确认无电，这样以确保安全。其二，在接线时，多脉冲法比冲击高压闪络法（冲闪法）增加了脉冲发生器。冲闪法接线为高压电源到球间隙直接到电

缆；多脉冲是球间隙与电缆间要串接XKS-1000脉冲发生器，其余接线一样。其三，30 m长的电缆不易判断，至少要50 m以上。此外，本次技术实践使用的主机即XKS-1000智能测试仪电源为交流220 V，若测量处无电源应备发电机，以防无电源时能及时充电。其四，在接地问题上，主机不接地；脉冲发生器、高压电源XK-3030都要接地，其中XK-3030多一个工作接地；电缆在沟内或潮湿处时不需接地。其五，在A字架校准上，可采用正向法，即箭头指向故障点、箭尾对准接地钎；也可采用反向法，即箭头指向接地钎、箭尾对准故障点。此外，接地钎须在电缆反方向3 m以外（否则箭头指向无意义），箭头指向地钎接地点的方向相反，则说明电缆有故障；路由接收机 45° 为测深，误差在5 cm左右。

结束语

电缆故障维护的工作人员在熟悉各类故障探测的方法、原理基础之上，选取正确的探测技术并进行探测技术设备的正确使用，掌握故障波形分析的全面经验，是提升故障检测速度与质量的主要途径。EA

（收稿日期：2014.08.19）

（责任编辑：杨得润）

（上接第92页）

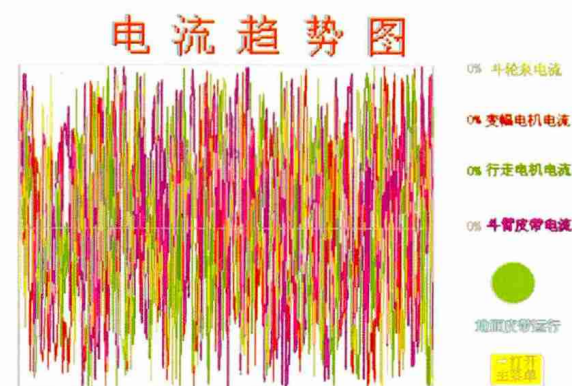


图8 电流趋势画面

结束语

目前，与国内同类设备相比，改造后的两台斗轮机控制较为先进，价格较为低廉，功能较为实用，同时大大提高了输煤斗轮机设备的安全性和可靠性，也为发电机组稳定运行奠定了坚实的基础。EA

（收稿日期：2014.12.05）

（责任编辑：杨得润）