

[隐患预警]

接触网上网电缆极早期隐患预警方法研究

文/尤红肖

中国铁路上海局集团有限公司合肥高铁基础设施段

作为高速铁路的唯一动力来源，接触网上网线由传统的架空线路演变成为混架或者纯电缆线路上网，线路受到水侵、外力破坏和鼠噬等影响，接触网电缆线路易发生隐患放电，进而导致故障跳闸。首先分析应用于输配电线路电缆故障检测方法手段以及存在的缺点，提出一种基于高频暂态特征的极早期电缆隐患放电预警方法，利用该方法可实现接触网上网电缆的隐患判定，消除接触网上网电缆隐患点，防止电缆线路由隐患放电演变成为故障跳闸，从而减小高速列车停运的可能性，具有巨大的经济效益。

我国高铁事业近年来得到大力发展，其线路结构以及线路供电方式发生较大的变化，传统的直供线路已无法满足现阶段生产、运输的需求，尤其是长三角及珠三角经济发达、人口密集区域。接触网线路从传统的直供线路演变成为复杂多T接的全并联AT线路，而AT供电方式线路必然存在牵引所、AT所和分区所上网线的情况，受到地理位置、设备建筑高度集中的影响，上网线无法采用传统的架空线形式上网。因此，绝大部分线路采用纯电缆线路上网的情况进行敷设。由于电缆线路占地面积小，绝缘性能良好，因此，经济发达区域、高架桥和长隧道区域线路常采用交联聚乙烯电缆线路上网，从而实现接触网线路的供电。

现阶段接触网线路本体采用6C检测方式，通过日常机车巡检，基本能够实现接触网线路本体的日常排查，但供电线路本体通过6C的方式无法实现故障的排查。随着越来越多的上网线由传统的架空线路演变成为混架及纯电缆形式敷设，接触网纯电缆上网线监测难度越来越大，而电缆线路受到水侵、外力破坏和鼠噬等影响，长时间高负荷运行必然存在隐患放电的情况。同时，接触网上网电缆隐患放

电情况不同于架空线路故障，无法人工直观排查，且是故障测距的盲区，一旦演变成故障跳闸，影响极其恶劣。本文提出一种基于高频暂态的极早期放电情况预警方案，通过在线式监测早日实现接触网上网电缆的隐患放电排查。

接触网上网电缆运行背景

近年来我国大力发展高铁事业，高速铁路无论是运营里程还是运营最高速度都得到极大提升，因此线路结构也更为复杂，尤其是经济发达区域以及人口密集的区域，受到建筑物及重大设备的影响，线路无法采用传统的架空线路的形式进行上网。因此采用绝缘性能更好、占地面积更小的交联聚乙烯电缆线路进行上网，图1所示为高速铁路电缆上网供电示意图。

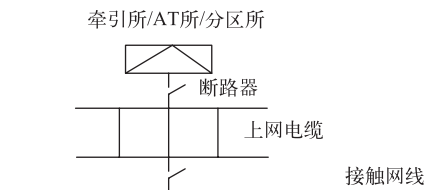


图1 高速铁路电缆上网供电示意图

受到接触网线高负载、高冲击特性的影响，为保证线路具备足够的负载能力，接触网电缆上网线大部分采用三拼电缆线路进行上网，通过在牵引所、AT所和分区所出口处采用远动刀开关进行电力控制，从而保证电缆线路的正常运行，其上网电缆结构如图2所示。其结构主要包括芯线（导体）、绝缘层、铠装层和绝缘外护套。由于牵引所、AT所和分区所一般情况下建设在离接触网正线不远处，因此上网电缆线路一般不长。该电缆线路的接地方式一般采用两端直接接地或者一端直接接地，另一端保护接地的方式运行。

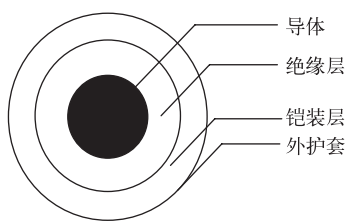


图2 电缆主体结构

电缆线路具备良好的绝缘性以及占地面积小的特性，因此得到广泛的应用。而电缆线路其走廊一般是电缆沟，受到地下雨水、小动物啃噬以及外力破坏等影响，极易发生不可逆的故障。同时上网电缆线为监测盲区，一旦发生故障，故障排查及故障处理难度大、时间长，从而导致接触网线路失电。因此，接触网上网电缆线路的状态监测显得尤为重要。

现有的电缆检测手段及缺点

由于接触网上网电缆近年来才得到广泛应用，关于接触网上网电缆的故障测距以及状态检测极少。现有的电缆检测方法大部分从输电电缆线路中获取，应对于电缆线路的状态检测大致可分为以下几种方法：注入法、二次脉冲法和声磁同步法，进行电缆线路的状态检测。

1. 注入法

注入法为典型的应用于输电电缆的故障检测方法，其检测原理为，当电缆线路发生低阻故障时，即发生永久型击穿类型的故障时，采用注入法进行故障接地点的判定。首先确认电缆故障相别以及故障类型，然后在一端开路的情况下注入特定频率的行波，利用电缆低阻故障行波遇到波阻抗不连续的

点反射的特性进行故障点检测，从而进行接地点的精确定位，其测距原理如图3所示。

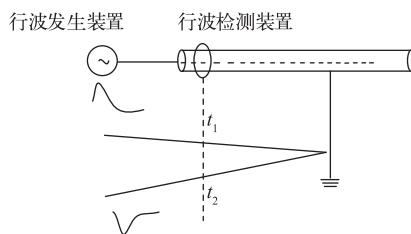


图3 注入法测距原理示意图

注入法只须检测特性频率波形的入射波头，以及反射波波头时刻及特定频率的波形在电缆线路中传输的波速度即可实现精确定位，定位原理为

$$L = \frac{(t_2 - t_1)v}{2} \quad (1)$$

特定频率的波形在电缆线路中传输的波速度为固定参数，不随注入特定频率的行波变化而变化，应用到电缆中进行求解时，取165 m/μs。

2. 二次脉冲法

二次脉冲法为典型的电缆低阻型故障检测方法，是指电缆线路存在不稳定接地时，利用注入高压的形式将电缆击穿，将电缆不稳定接地演变成稳定的弧光接地或者直接接地，然后用第二次注入的方法进行故障点精确定位，测距原理如图4所示。

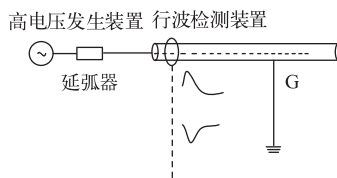


图4 二次脉冲法原理

二次脉冲法主要针对高阻类型的不稳定接地故障，将高压装置结合延弧器串联接入故障电缆中，通过对故障电缆施加高压的方法将不稳定接地点G点变成稳定接地点。此时故障点展现出低阻特性，然后利用延弧器发射检测信号，此时故障点G点的低阻特性会让延弧器发生的信号发生折反射，如图5所示为检测计算故障点位置，然后采用式（1）即可实现故障点的精确定位。

图5中 t_1 前段为施压高压击穿不稳定电缆区域， t_1 时刻为延弧器发出的特定频率的行波第一次到达监测终端的时刻，而 t_2 时刻为G点形成稳定的电弧接

地后，行波检测装置检测到的行波反射点，采用此方法即可实现精确定位。

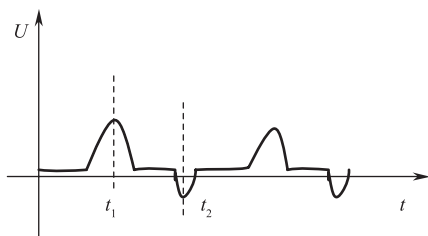


图5 二次脉冲法测距波形

3. 声磁同步法

声磁同步的故障测距方案是指利用在故障电缆中同时施加高压信号和声信号，首先进行电缆线路的故障点大致区间定位，而高压电缆存在稳定故障点时，此时高压电缆线路中在故障点处会出现明显的电流放电的声音，利用该声音可实现故障点精确定位。

以上几种方法均为确定电缆线路存在稳定或者不稳定接地的情况下，通过施加额外的信号，采用监测装置进行施加信号的采集，通过读取施加信号的特征进行故障点的准确排查。无论何种方法，都需要通过离线的方式进行测距，查找效率低下，花费的时间较长。这对于高速运行的接地网电缆线路来说，故障排查效率远远无法满足实际生产需要。因此，本文采用在线式电缆状态监测方法，在不需要电缆线路停电的情况下，实时监测电缆运行状态，从而实现电缆线路的极早期隐患放电预警。

接触网上网电缆预警系统

接触网上网电缆线路除外力破坏故障以外，均为发展性故障，发展性故障在放电初期到故障跳闸必然存在异常放电信号。本系统通过监测极早期接触网上网电缆隐患放电信号，采用放电发展规律进行识别，即可实现电缆隐患预警。

1. 系统构成

接触网上网电缆线路大致构成分为前端采集终端和后台服务器、后台识别算法，现场装置负责现场数据的采集，简单的分析，然后通过GPRS形式进行数据的发送。在选定待监测电缆后，监测终端分别安装于上网电缆终端头处，图6所示为现场监测终端安装位置示意图。

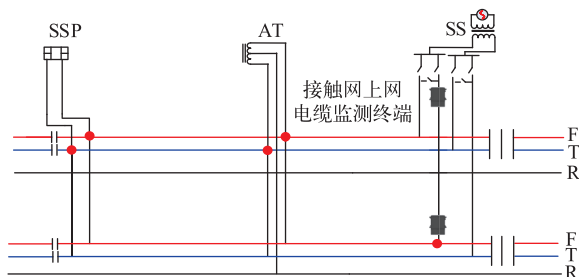


图6 监测终端安装示意图

由于接触网上网电缆线路长度一般小于1 km，因此上网电缆采用一端保护接地，一端直接接地，或者两端直接接地的方式运行。本系统中监测终端安装于两端的电缆终端头附近，用于更好地进行接触网上网电缆的状态监测。该监测终端拥有多个传感器，包括安装于芯线的电流互感器、安装于电缆终端头附近的温度传感器、安装于接地线上的环流传感器和安装于电缆表皮的工频电压传感器。

2. 系统算法

由于接触网上网电缆线路故障除开外力破坏故障为瞬时性，其他类型的故障均有规律可依。因此利用监测终端采集现场的数据，采用系统算法进行极早期隐患放电识别，对接触网上网电缆线路进行隐患放电预警，可辅助现场运维人员早日实现隐患排查，从而减小电缆线路由隐患放电演变成为故障跳闸的可能性。

1) 由于电缆线路极早期隐患放电时总在电压峰值展现明显的放电特征，其隐患放电流密集点总在工频电压直接正弦的极大值或者极小值处，因此选取工频电压正弦值幅值大于0.8倍的峰值作为放电区间时刻，即

$$U \geq 80\% \times |U_{\max}| \quad (2)$$

选取0.8倍以上的电压值 U 作为隐患放电特征区间，在该区间内进行隐患放电特征波形时刻求解，如图7所示。

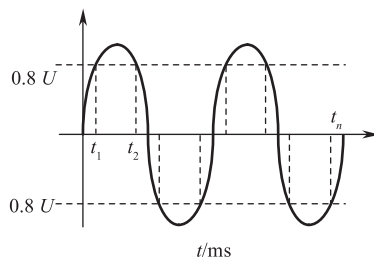


图7 隐患放电时刻求解

对于求取的 t ，进行时刻 t 集合求解，则 $t=\{t_1, t_2, t_3, t_4, \dots, t_n\}$ ，选取相邻两时刻进行监测终端上传的隐患放电行波电流数据分析。

$$t = \arcsin(0.8 U_{\max}) \quad (3)$$

2) 由于工频电压为毫秒级，而行波电压为微秒级，因此需要选取上述步骤1中相邻时刻段内毫秒级下属微秒级行波进行极早期隐患判定。依据隐患放电特性，电缆线路极早期的隐患放电电流放电幅值均为mA级别，同时其放电总是展现出极其相似的规律性，因此选取相邻时间段内的隐患放电波形求取波形的皮尔逊相关系数。

如图8所示，截取存在微弱放电电流的波形数据，进行相邻放电时刻段内放电波形进行皮尔逊相关系数求解

$$p = \frac{\sum_{n=1}^N |i_{k1}(n)| |i_{k2}(n)|}{\sqrt{\sum_{n=1}^N i_{k1}^2(n) \sum_{n=1}^N i_{k2}^2(n)}} \quad (4)$$

式中， p 值为相关系数值，若求取 p 值接近1，则证明存在极强的隐患放电，若求取 p 值接近-1，则系统不存在隐患放电； i_{k1} 、 i_{k2} 为相邻的时刻段内波形数据； N 为存在微弱放电波形总长度； n 为截取的波形段内第一个畸变点数，依次进行相邻时间段计算，若超过一半的 p 值大于0.8，则进行行波的双端定位。

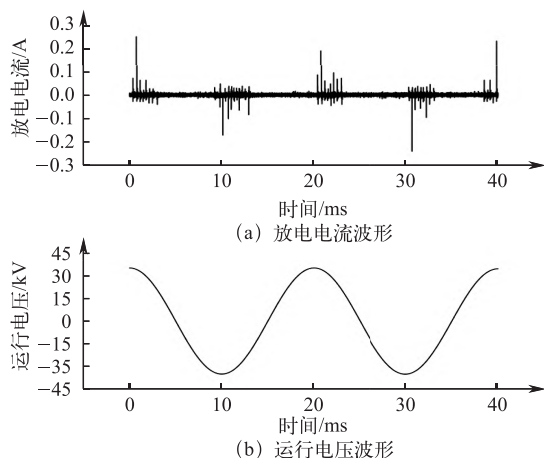


图8 工频电压内对应可能的隐患放电情况

3) 假设采用上述步骤2方法求取的 p 值一半大于0.8，则进行两监测终端的精确定位，采用同毫秒内的隐患放电行波进行精确定位，可输出多个精确

定位结果，对于输出的精确定位结果进行定位情况统计，输出如图9所示定位情况。

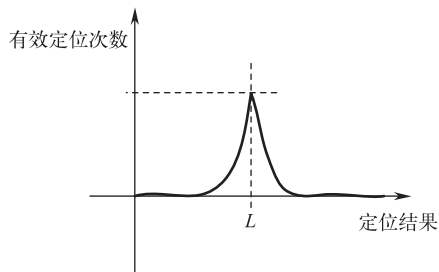


图9 隐患放电精确定位结果

解出隐患放电波形故障点位置，以定位结果为横轴，以有效定位次数为纵轴，可得出如图9所示定位结果分布情况，可大致判定上网电缆隐患放电点位于 L 处，从而实现隐患点排查。

4) 上述隐患监测系统为双端定位系统，主要监测上网电缆段内隐患放电情况，依据双端行波定位原理，靠近升压站侧的电缆终端头在不进行升压站断路器动作的情况下，若双端定位监测装置经常监测到隐患放电行波定位方向位于牵引所反向时，可大致判定隐患放电点位置位于监测终端与牵引所之间。由于上网电缆另一端通过电缆终端头与接触网线相连接，无法通过行波来源方向进行隐患放电点判定，可能是列车拉弧引起，因此无法直观判定。不过通过监测装置环流传感器可大致判定上网电缆终端头是否存在隐患放电，只需人工定时巡检上网电缆终端头即可实现隐患排查。

结束语

传统的应用于输电电缆的隐患检测方法均为离线注入式或者加压击穿式，其故障排查过程极为复杂，无法满足高铁电缆上网线路日常生产需求。

本方案提出一种基于微弱放电电流的极早期隐患放电电流识别方法，通过在线式采集终端以及后台系统算法相互配合，快速识别极早期隐患放电波形，利用多次定位结果分布情况进行电缆隐患放电预警，从而防止接触网上网电缆线路由隐患放电演变成故障跳闸的可能性，为接触网上网电缆线路提供有效的监测方案。EA

(收稿日期：2024-05-28)