

DOI:10.12158/j.2096-3203.2022.02.018

# 一种电弧引燃电缆的电气火源模拟方法

刘旭晖, 朱振宇, 郭玥, 靖子洋, 吴淑群, 张潮海

(南京航空航天大学自动化学院, 江苏 南京 211106)

**摘要:**在电缆火灾模拟试验中,火源是电缆防火性能评估的基础。现有的电气火源大多基于化学燃烧,较难反映故障电弧引燃特点。为了模拟故障电弧引燃电缆,文中开发了一种基于电弧的火源。首先,分析了110 kV 电缆发生接地线被盗或两侧交叉互联线被盗等故障时金属铠装层上的感应电压,其可高达数千伏。其次,对比研究了50 Hz 工频交流电压和20 kHz 交流电压条件下金属护层对地电弧和雅各布天梯电弧的击穿前电压与维持电压,发现两者电弧击穿与维持特性接近。然后,提出基于雅各布天梯电弧引燃电缆的电气火源模拟方法,并实验验证了该火源能够使110 kV 电缆引燃和火焰蔓延。最后,得出结论为:高频雅各布天梯电弧能够模拟故障电弧特点并有效引燃110 kV 电缆。

**关键词:**故障电弧;火源模拟;电缆火灾;感应电压;天梯电弧;电弧引燃

**中图分类号:**TM89

**文献标志码:**A

**文章编号:**2096-3203(2022)02-0136-07

## 0 引言

近年来,因电缆线路过载、短路、漏电等问题引起的火灾频发,给人民生命财产安全带来巨大威胁。例如,2019年,重庆某500 kV 变电站内电缆沟发生电缆火情造成线路跳闸,西南电网与华中电网解列,损失电力148万kW;2018年,南京某10 kV 线路电缆因缺陷导致绝缘击穿,击穿后接地点存在较大电容电流,引发大电流电弧,从而引起火灾导致变电站失电,其故障电弧的能量约为12.8~126 kJ。此外,据我国消防部门统计发现<sup>[1]</sup>,2006年—2015年,电气火灾约占我国全部火灾的30%,其中,由于电气线路故障引起的火灾占比72%,城市火灾中亦有2/3以上是由电线、电缆燃烧引起的<sup>[2]</sup>。现有防火工作主要集中于电缆通道内被动式防火措施典型布置和主动式选点采用,但对防火措施通道防火效果论证不足,防火成效难以达到预期。模拟电缆燃烧是预测火灾危险性的基础,也是评估电缆燃烧特性最直接有效的手段,能够更有效地预防电缆火灾的发生。

通常引燃电缆是由内部因素和外部因素综合作用导致,引燃电缆的火源可分为电弧引燃和燃烧物引燃。目前,电缆行业内已开展电缆火情模拟相关试验,火源模拟方法(用实验的方法模拟电缆火灾的火源)主要有以下4种<sup>[3]</sup>:(1)依据国际标准和国家标准,对电缆进行燃烧测试时,采用燃气喷灯模拟火源,加本生灯<sup>[4-8]</sup>,带型喷灯<sup>[9-12]</sup>等;(2)

使用辐射装置(如辐射炉、锥形测量仪等)对电缆进行热辐射模拟火源<sup>[13-17]</sup>;(3)利用电热丝缠绕电缆通电加热引燃电缆,模拟火源<sup>[18]</sup>;(4)用油盘装上燃油后点燃燃油,模拟火源<sup>[19-20]</sup>。上述电缆引燃的火源模拟方法能够较好地模拟燃烧物引燃,但难以模拟电缆发生电弧故障引发火灾的电弧引燃,具体表现如下:(1)电缆故障电弧的温度接近10 000 K,甚至可达30 000 K,远高于上述火源温度;(2)电缆故障电弧的作用面积小,能量释放集中,远小于上述火源面积。当上述火源模拟方法较难反映故障电弧引燃特点时,对电缆火情蔓延规律及防火性能评估研究会造成较大影响。因此,亟需研究一种基于电弧引燃的火源模拟方法,具备火源温度高、受热面积小的特点。

针对电缆护套悬浮电压异常引发火灾,文中分析了电缆护套悬浮电压,实验对比研究了外护套损坏情况下电弧与雅各布天梯电弧的电击穿与维持特性,提出了一种电弧引燃电缆的电气火源模拟方法,并成功引燃了110 kV 电缆。

## 1 电缆感应电压计算理论

电弧引燃电缆通常分为2种情况。一是电缆本体绝缘击穿或接头爆炸引发火灾,主要原因有电缆绝缘受损、绝缘老化、本体及附件质量不合格、施工工艺不良等;二是电缆护套悬浮电压异常引发火灾,主要原因为接地系统失效、接地方式错误导致电缆护套对地持续放电。文中主要对电缆护套悬浮电压异常进行分析。电力电缆金属护层上产生的感应电压主要是指电容耦合、电感耦合、电导耦

收稿日期:2021-11-05;修回日期:2022-01-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51977110)

合产生的感应电压之和<sup>[21]</sup>。电容耦合是由于电缆处于外面带电体的电场中,因此主要受电场影响。电感耦合主要是由于周边电缆中的电流交变产生了交变的磁场,当这个交变的磁场耦合到目标电缆上时,使得目标电缆上产生了感应电压。电导耦合通常是指电缆接地处电流漏泄入地,在电流流入地点附近地电位升高形成了感应电压。

### 1.1 电容耦合感应电压

图1为64/110 kV交联聚乙烯(cross linked polyethylene, XLPE)电缆模型。线芯导体屏蔽与绝缘屏蔽层、金属护层与地(或石墨外电极)间等效为 $C_1, C_2$ 的同轴圆柱形电容,两者串联,金属护层作为电容的一个极板,悬浮电压 $U_2$ 为电容 $C_2$ 上电压,线芯对地电压即相电压 $U_0$ 为64 kV。电缆参数:线芯半径11.9 mm,即 $R_1 = 11.9$  mm;绝缘层厚度17.5 mm,即 $R_2 = 29.4$  mm;金属护层厚度2 mm,即 $R_3 = 31.4$  mm;护套厚度4 mm,即 $R_4 = 35.4$  mm。

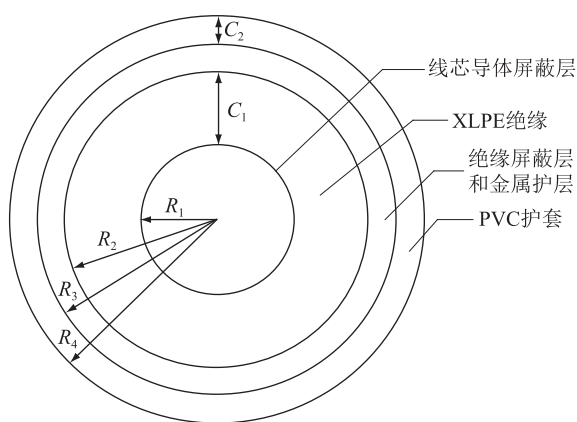


图1 单相电缆完全悬空计算模型

Fig.1 Single-phase cable completely suspended calculation model

XLPE的相对介电常数 $\varepsilon_{r1} = 4.3$ ;聚氯乙烯(polyvinyl chloride, PVC)的相对介电常数 $\varepsilon_{r2} = 5.5$ ;空气介电常数 $\varepsilon_0 = 8.85$ ;水泥相对介电常数 $\varepsilon_{r3} = 1.7$ ;水泥厚2 mm,即 $R_5 = 37.4$  mm。线芯导体与XLPE绝缘屏蔽层之间电容 $C_1$ 为:

$$C_1 = 2\pi\varepsilon_{r1}\varepsilon_0 \frac{l}{\ln(R_2/R_1)} = 264l \quad (1)$$

式中: $l$ 为电缆长度。

金属护层与地之间电容值 $C_2$ 的计算公式为:

$$C_2 = 2\pi\varepsilon_{r2}\varepsilon_0 \frac{l}{\ln(R_4/R_3)} = 2551l \quad (2)$$

考虑电缆PVC护套表面接地和放置在2 mm的水泥板上再接地2种情况。

当电缆PVC护套表层直接接地时,金属护层悬浮电压 $U_2$ 为:

$$U_2 = \frac{C_1}{C_1 + C_2} U_0 = 6002 \quad (3)$$

当电缆PVC护套间隔2 mm水泥接地时,水泥与地之间电容 $C_3$ 的计算公式为:

$$C_3 = 2\pi\varepsilon_{r3}\varepsilon_0 \frac{l}{\ln(R_5/R_4)} = 1720l \quad (4)$$

$C_2$ 与 $C_3$ 的串联电容为:

$$C'_2 = \frac{C_2 C_3}{C_2 + C_3} = 1027l \quad (5)$$

故间隔水泥接地时金属护层悬浮电压 $U_2$ 为:

$$U_2 = \frac{C_1}{C_1 + C'_2} U_0 = 13087 \quad (6)$$

上述计算表明,110 kV电缆单相接地被盗后的电容耦合感应电压可达数千伏。该结果与文献[22]计算结果接近,即220 kV线路中A相接地线被盗,A相整条电缆金属护层完全悬空,金属护层悬浮电压理论值为5866 V。另外,文献[23—24]分析了110 kV高压单芯电缆的金属护层感应电压,当某段电缆两侧的直接接地线或交叉互联线均被盗时,其护层感应电压将上升至数十千伏,极易引发故障电弧。实际上,由于实际电缆护套接地并不完全良好,所以文中金属护层对地电容 $C_2$ 通常小于理论值,故实际感应电压值一般应大于理论计算值。

### 1.2 电感耦合感应电压

依据文献[24]提出的多回路单芯电缆金属护层感应电压的简单计算方法,对于双回路三相并列的电缆线路,A相芯的感应电压简单计算公式为:

$$V_A = j\omega l \times 2 \times 10^{-4} \left( -\frac{1}{2} \ln \frac{nq\gamma s^2}{p^2 R_s^2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \ln \frac{n\gamma}{q} \right) \quad (7)$$

式中: $R_s$ 为电缆对参考导线的几何平均半径; $I$ 为电缆电流有效值; $\omega$ 为角频率; $s$ 为AB相间距; $n$ 为AC相间距; $q$ 为Ab相间距, $\gamma$ 为Ac相间距; $p$ 为Aa相间距。假定电流为750 A,电缆长度为400 m,三相双回路排列的A相护层感应电压为45.03 V,约为112.5 V/km<sup>[25]</sup>。文献[26—29]研究了适用于并联运行的电缆护套感应电压,发现双回三相水平排列ABCeba的护套感应电压最大约180 V/km。由此可见,电感耦合感应电压要远低于接地线被盗时的电容耦合感应电压。

### 1.3 电导耦合感应电压

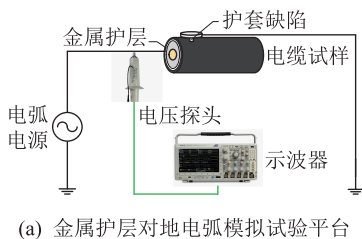
当电缆发生接地故障时,故障点的电压即为电导感应电压,接地电阻 $R$ 一般不大于4  $\Omega$ ,110 kV输电线路电流一般为600~1200 A。考虑线路电流为1200 A,则感应电压不大于4.8 kV。

综上所述,110 kV 电缆发生故障时,金属铠装层上的感应电压可达 10 kV 以上,若同时 PVC 护套存在破损,则极易产生故障电弧,引燃电缆并导致火灾。

## 2 金属护层对地电弧模拟

### 2.1 实验平台

由上述理论分析可知,在发生接地故障的情况下,电缆的金属铠装层可能会出现高达数千伏的悬浮感应电压。若电缆 PVC 护套存在破损,则该悬浮电压作用下可能会发生击穿,并形成电弧。为模拟电缆护套受损后,金属铠装层由于感应电压过高而对地发生电弧放电的现象,文中搭建了如图 2(a) 所示的简易实验平台,在外护套上钻孔至金属护层,并于孔上方放置一接地平板电极模拟电缆接地。实验首先采用了 50 Hz 大型交流电源测试电弧击穿前电压。由于 50 Hz 交流电源体积和重量较大,难以移动和调节,不适用于工程现场测试,因此也采用了 20 kHz 小型交流电源进行对比测试。图 2(b) 为 20 kHz 小型交流电源下产生的维持电弧。实验平台所用电缆型号为 YJLW02-64/110 kV,孔深 5 mm。高压电极直接接交流电源,平板电极直接接地。高压探头连接高压电极,型号为 Tektronix P6015A,示波器型号为 Tektronix MDO3034。



(a) 金属护层对地电弧模拟试验平台



(b) 维持电弧

图 2 金属护层对地电弧模拟

Fig.2 Simulation of metal-to-ground arc

### 2.2 实验结果

图 3 为 2 种电源(频率为 50 Hz 和 20 kHz)金属护层对地的电弧击穿前电压和维持电压波形。50 Hz 情况下,电弧击穿前电压波形为近似正弦波,击穿前电压幅值为 8~9 kV;击穿后电压波形发生畸变,正弦波顶部发生凹陷,电弧维持电压幅值为 0.75

kV。20 kHz 情况下,电弧击穿前电压波形近似正弦,其电压幅值为 6.5~7 kV;击穿后电压波形存在畸变,电弧维持电压幅值为 0.74 kV。

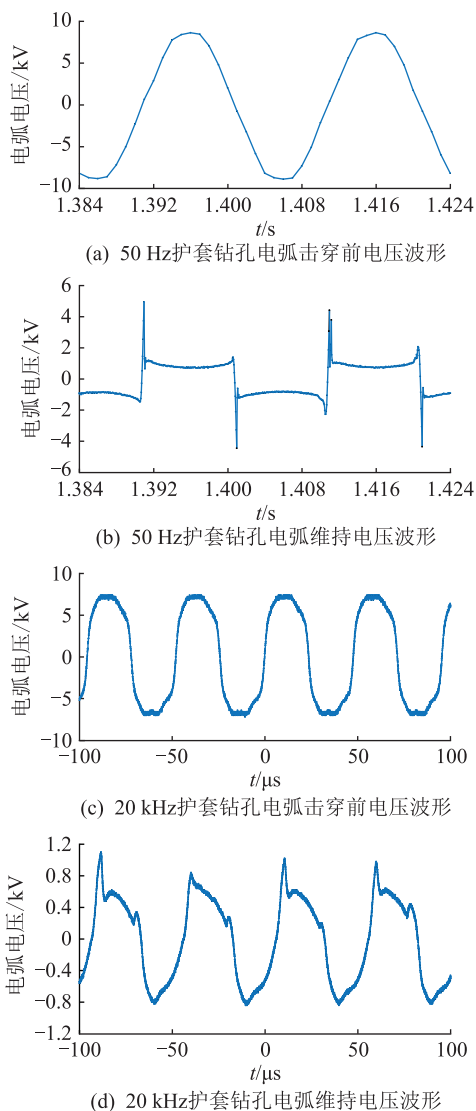


图 3 频率为 50 Hz 和 20 kHz 时金属护层对地的电弧击穿前电压和维持电压波形

Fig.3 The voltage waveforms before breakdown and sustained voltage waveforms of the metal sheath to the ground at 50 Hz and 20 kHz

通过对比频率为 50 Hz 和 20 kHz 2 种电源情况下电弧击穿与维持特性,发现两者的电弧击穿前电压均为数千伏,表明当发生单相接地线被盗故障或对地短路等故障后,金属护层上的感应电压为数千伏,很有可能导致故障电弧。另外,虽然频率为 20 kHz 情况下电弧击穿前电压幅值较工频 50 Hz 情况下的电弧电压幅值低 1~2 kV,但两者电弧维持电压十分相近。由于电缆成功引燃需要电弧维持一段时间以保证足够的热量注入,所以电弧维持特性对电缆引燃尤为重要。因此,从电弧维持角度看,可用 20 kHz 小型交流电源替代工频交流电源来产生

模拟电缆故障的电弧。

### 3 雅各布天梯电弧

虽然通过对电缆护套钻孔并施加交流高压可以一定程度地模拟故障电弧,但是该过程需要损坏电缆,每次实验前均需在电缆表面钻孔,且钻孔形状难以控制,导致实验可重复性较差,操作较繁琐。为简化上述步骤,在保证电弧维持特性一致的情况下,引入雅各布天梯电弧替代外护套钻孔引弧。雅各布天梯是2根呈羊角形的管状电极,当电极上施加高压时,电极底部空气击穿产生电弧,在电磁力的作用下可向上运动至电极顶端,因此其制作十分简便,将2根电极固定并弯曲 $75^{\circ}\sim 85^{\circ}$ 即可,且只要有高压输入便能反复产生电弧,并重复使用。图4为雅各布天梯电弧。调节天梯顶端间距能改变电弧尺寸和电弧维持电压,调节输入电源能够调节电弧功率。

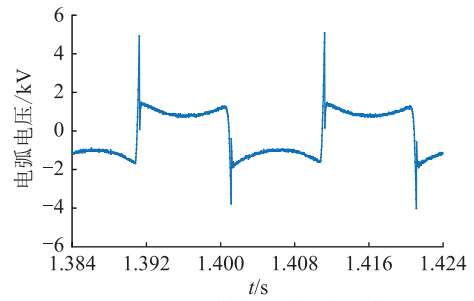


图4 天梯电弧  
Fig.4 Ladder arc

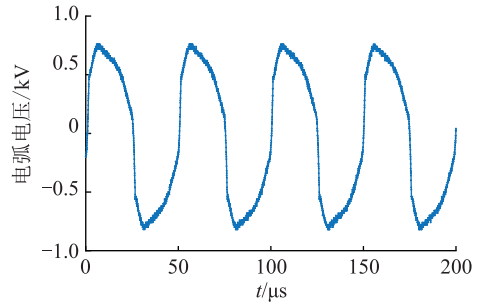
文中对频率为50 Hz和20 kHz电源作用下、顶端间距为5 mm的天梯电弧的维持电压进行测量。图5为电源频率分别为50 Hz和20 kHz时雅各布天梯电弧的维持电压波形。50 Hz时电弧维持电压波形与模拟金属护层对地电弧电压波形类似,且幅值为0.74 kV。20 kHz时天梯电弧维持电压波形畸变较小,类似正弦波,幅值为0.75 kV。

对电极间距6 mm,10 mm,12 mm的雅各布天梯电弧维持电压分别进行测试,得到了不同电源频率、不同电弧结构和不同电极间距下的电弧击穿前电压和维持电压,如表1和表2所示。

相同电极间距下,模拟金属护层对地电弧维持电压与雅各布天梯电弧维持电压相近,且电源频率对电弧维持电压影响较小,即20 kHz小型交流电源产生的电弧电压与工频故障电弧电压是相近的。随着电极间距的增大,2种频率下的电弧维持电压均显著升高,表明电极间距是影响电弧维持电压的主要因素。另外,通过控制雅各布天梯电弧的维持时间和注入功率,可以调节电弧能量,由此能够接



(a) 50 Hz天梯电弧维持电压波形



(b) 20 kHz天梯电弧维持电压波形

图5 2种频率下的电弧维持电压波形

Fig.5 Arc sustained voltage waveforms at two frequencies

表1 50 Hz电源下电弧电压幅值

Table 1 Amplitude of arc voltage at 50 Hz power supply

参数	电极间距或孔深度/mm			
	5	6	10	12
模拟金属护层对地电弧击穿前电压/kV	8~9	9~9.5		
模拟金属护层对地电弧维持电压/kV	0.75	0.82		
雅各布天梯电弧维持电压/kV	0.74	0.83	1.05	1.15

表2 20 kHz电源下电弧电压幅值

Table 2 Amplitude of arc voltage at 20 kHz power supply

参数	电极间距或孔深度/mm			
	5	6	10	12
模拟金属护层对地电弧击穿前电压/kV	6.5~7	7~7.5		
模拟金属护层对地电弧维持电压/kV	0.74	0.85		
雅各布天梯电弧维持电压/kV	0.75	0.84	1.08	1.28

近真实电缆的故障电弧能量。

本质上,电缆故障电弧引发火灾是由于发生故障时电弧温度高,能量大,迅速灼烧电缆护套产生火焰,同时护套会发生热解,产生可燃性气体并进一步燃烧。因此,文中提出利用雅各布天梯电弧直接施加在电缆护套表面,通过调节电弧施加时间与功率,以达到与真实故障电弧作用能量相近的目

的,从而模拟电缆故障电弧引发的电缆火灾。

#### 4 电弧引燃电缆

为了验证所提电弧火源模拟方法实际引燃电缆的可行性,在室外搭建如图 6 所示的电缆引燃实验平台,整个电气火源模拟装备小于 20 kg,所用设备及电缆与 2.1 节中相同。雅各布天梯设置顶端电极间距为 20 mm,施加电弧火源时间为 8 min<sup>[3]</sup>。



图 6 天梯电弧引燃电缆实验电路示意

Fig.6 Experiment circuit schematic diagram of cable ignited by the ladder arc

天梯电弧引燃电缆过程的电压、电流波形如图 7 所示。电弧电压有效值为 1.8 kV,电流有效值为 67.4 mA,电流滞后电压 7.83°。由于施加电弧时间为 8 min,电弧能量为 57.69 kJ,与实际故障电弧能量较为符合,因此从电弧能量角度考虑,该方法可通过控制施加电弧时间,一定程度地模拟故障电弧的能量。

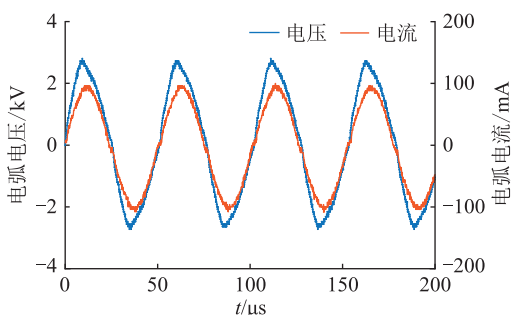


图 7 天梯电弧引燃电缆过程中电压和电流波形

Fig.7 Voltage and current waveforms during the ignition of the cable by the ladder arc

电弧引燃电缆情况如图 8(a) 所示。随着电弧施加时间的增加,电缆逐渐被引燃。在启动电弧至 62 s 后,侧面火焰爬升至电缆直径约 1/4 处; 98 s 后,侧面火焰达电缆直径 1/2 处; 280 s 后,火焰高度与电缆直径相当,并沿电缆轴向蔓延; 472 s 时火焰更加旺盛,火焰高度接近 2 倍电缆直径。图 8(b) 展示了燃烧后的电缆表面,在电弧施加位置处可以明显观察到电缆护套被完全破坏,里面的金属护层裸露清晰。另外该位置附近较大范围均有明显烧蚀

痕迹,表明了该电弧火源模拟方法能够实现 110 kV 电缆引燃并使火焰蔓延。



图 8 电弧引燃电缆实验

Fig.8 Experiment of the cable ignited by arc

#### 5 结语

文中分析了电缆金属铠装层的悬浮电压,提出了高频雅各布天梯电弧作为模拟故障电弧引燃电缆的电气火源方法,并实验验证了该方法能够有效引燃 110 kV 电缆。该电弧的功率和维持时间容易调节,装置简易,移动性较强,且不会引入其他化学杂质,方便定量进行燃烧特性的测试和分析,对了解故障电弧下引发电缆火灾行为及防火性能评估具有重要意义。

本文得到国网江苏省电力有限公司科技项目(J2020032)资助,谨此致谢!

#### 参考文献:

[1] 公安部消防局. 2017 年中国消防年鉴[M]. 昆明: 云南人民出版社, 2017.  
Fire Department of the Ministry of Public Security. 2017 China fire yearbook[M]. Kunming: Yunnan People's Publishing House, 2017.

[2] 张佳庆, 张博思, 王刘芳, 等. 电线电缆带电燃烧研究进展[J]. 材料导报, 2017, 31(15): 1-9, 35.  
ZHANG Jiaqing, ZHANG Bosi, WANG Liufang, et al. The state of the art of combustion behavior of live wires and cables[J]. Materials Review, 2017, 31(15): 1-9, 35.

[3] 李陈莹, 陈杰, 谭笑, 等. 电缆燃烧典型火源模拟方法综述[J]. 消防科学与技术, 2021, 40(3): 345-351.  
LI Chenying, CHEN Jie, TAN Xiao, et al. A review of typical fire source simulation methods for cable combustion[J]. Fire Science and Technology, 2021, 40(3): 345-351.

[4] 中国电器工业协会. 电缆和光缆在火焰条件下的燃烧试验: 第 11 部分 单根绝缘电线电缆火焰垂直蔓延试验: GB/T 18380.11—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.

- China Electrical Equipment Industry Association. Cable and optical cable fire test under flame conditions: part 11 vertical flame spread test for single insulated wire and cable; GB/T 18380.11-2008[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [5] Tests on electric and optical fibre cables under fire conditions- part 1: test for vertical flame propagation for a single insulated wire or cable; IEC 60332.1-2015[S/OL]. (2015-07-28). <https://webstore.iec.ch/publication/22995>.
- [6] Tests on electric and optical fibre cables under fire conditions- part 3: test for vertical flame spread of vertically-mounted bunched wires or cables; IEC 60332.3-2018[S/OL]. (2018-07-13). <https://webstore.iec.ch/publication/33848>.
- [7] Standard method of test for flame travel and smoke of wires and cables for use in air-handling spaces; NFPA 262—2019[S/OL]. (2018-11-05). <https://www.nfpa.org/codes-and-standards/all-codes-and-standards/list-of-codes-and-standards/detail?code=262>.
- [8] KIM S C, KIM J Y, BANG K S. Experimental study of fire characteristics of a tray flame retardant cable[J]. Journal of the Korean Society of Safety, 2013, 28(3): 39-43.
- [9] LI L, HUANG X J, BI K, et al. An enhanced fire hazard assessment model and validation experiments for vertical cable trays[J]. Nuclear Engineering and Design, 2016, 301: 32-38.
- [10] 罗夏, 黄成家, 毕昆, 等. 开放和封闭空间内不同间隙的竖向电缆燃烧试验研究[J]. 安全与环境学报, 2017, 17(3): 975-979.
- LUO Xia, HUANG Xianjia, BI Kun, et al. On the vertical cable tray combustion in regard to the different cable allocation in the open and wrapped-up space[J]. Journal of Safety and Environment, 2017, 17(3): 975-979.
- [11] CHAUDHARY A, GUPTA S K, GUPTA A, et al. Burning characteristics of power cables in a compartment[J]. Procedia Earth and Planetary Science, 2015, 11: 376-384.
- [12] KERÉKES Z, RESTÁS Á, LUBLÓY É. The effects causing the burning of plastic coatings of fire-resistant cables and its consequences[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2020, 139(2): 775-787.
- [13] MAGALIE C, ANNE-SOPHIE C, RODOLPHE S, et al. Fire behaviour of electrical cables in cone calorimeter: influence of cables structure and layout[J]. Fire Safety Journal, 2018, 99: 12-21.
- [14] WANG Z, WANG J. An experimental study on the fire characteristics of new and aged building wires using a cone calorimeter[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2019, 135(6): 3115-3122.
- [15] ZHANG B S, ZHANG J Q, XIE H, et al. Fire performance analysis of PVC and cabtyre cables based upon the ignition characteristics and fire growth indexes[C]//Advanced Functional Materials, 2018.
- [16] 贺元华, 张政, 伍毅. 低压环境下航空电缆材料燃烧特性的研究[J]. 塑料科技, 2020, 48(1): 71-74.
- HE Yuanhua, ZHANG Zheng, WU Yi. Experimental study on combustion characteristics of aviation cable materials under low pressure environment[J]. Plastics Science and Technology, 2020, 48(1): 71-74.
- [17] COURTY L, GARO J P. External heating of electrical cables and auto-ignition investigation[J]. Journal of Hazardous Materials, 2017, 321: 528-536.
- [18] 张晋, 徐大军, 宋文琦, 等. 综合管廊电力舱火灾特性试验研究[J]. 消防科学与技术, 2019, 38(11): 1532-1535.
- ZHANG Jin, XU Dajun, SONG Wenqi, et al. Experimental study on fire characteristics of cable cabin in utility tunnel[J]. Fire Science and Technology, 2019, 38(11): 1532-1535.
- [19] FAN D, DING H J. Cable tunnel fire experiment study based on linear optical fiber fire detectors[C]//Fourth Asia Pacific Optical Sensors Conference' SPIE Proceedings. Wuhan, China. SPIE, 2013.
- [20] GAO K, LIU Z M, JIA J Z, et al. Study on flame spread characteristics of flame-retardant cables in mine[J]. Advances in Polymer Technology, 2020: 8765679.
- [21] 牛金平. 高速铁路牵引电流在电力贯通电缆金属护套中的感应电压分析[J]. 高压电器, 2021, 57(1): 171-175.
- NIU Jinping. Analysis of induced voltage of traction current of high-speed railway in the metal sheath of power through cable[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(1): 171-175.
- [22] 王尉军, 杨远. 高压电缆金属护套接地系统被盗的危害及对策[J]. 贵州电力技术, 2016, 19(11): 53-56.
- WANG Weijun, YANG Yuan. The harms and countermeasures of high voltage cable metal sheath of stolen grounding line[J]. Guizhou Electric Power Technology, 2016, 19(11): 53-56.
- [23] 苟杨, 向泽, 马果, 等. 基于 ATP-EMTP 高压电缆接地线金属护层悬浮电压仿真分析[J]. 输配电工程与技术, 2018, 7(4): 110-118.
- GOU Yang, XIANG Ze, MA Guo, et al. Simulation analysis of suspension voltage based on ATP-EMTP high-voltage cable ground wire metal sheath[J]. Transmission and Distribution Engineering and Technology, 2018, 7(4): 110-118.
- [24] 戚星宇, 刘林旭, 吕志鹏, 等. 新型的电缆局部放电在线监测系统研究[J]. 供用电, 2020, 37(1): 51-55.
- QI Xingyu, LIU Linxu, LYU Zhipeng, et al. Research on a new online monitoring system for partial discharge of cables[J]. Distribution & Utilization, 2020, 37(1): 51-55.
- [25] 陈科技, 齐伟. 混合排列方式对双回路 XLPE 电缆护层环流的影响[J]. 高电压技术, 2018, 44(11): 3736-3742.
- CHEN Keji, QI Wei. Influence of mixed arrangement on sheath circulation of double-loop XLPE cable[J]. High Voltage Technology, 2018, 44(11): 3736-3742.
- [26] 王雄伟, 张哲, 尹项根, 等. 多回单芯电力电缆并联运行护套感应电压的计算与分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 77-84.
- WANG Xiongwei, ZHANG Zhe, YIN Xianggen, et al. Calculation and analysis of sheath induced voltage for multi-circuit single-core power cable lines in parallel[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 77-84.

[27] 刘金凯,梁永亮,郭宏,等. 脐带电缆故障电压行波相模分量特征分析及测距方法研究[J]. 供用电,2021,38(2):19-25.  
LIU Jinkai, LIANG Yongliang, GUO Hong, et al. Characteristics analysis of traveling wave phase-mode component of umbilical cable fault voltage and study of fault distance measurement[J]. Distribution & Utilization, 2021, 38(2):19-25.

[28] 陈玉,孙冠姝,张靖雯,等. 基于有限元分析的光纤复合低压电缆热场仿真和结构优化[J]. 智慧电力,2021,49(10):1-7.  
CHEN Yu, SUN Guanshu, ZHANG Jingwen, et al. Thermal field simulation and structure optimization of optical fiber composite low voltage cable based on finite element analysis[J]. Smart Power, 2021, 49(10):1-7.

[29] 廖星,冯玉雷,李健,等. 距离保护应用于共相并联电缆的

适用性分析[J]. 电力系统保护与控制,2021,49(1):98-105.

LIAO Xing, FENG Yulei, LI Jian, et al. Applicability analysis of distance protection used in common-phase parallel cables [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(1):98-105.

作者简介:



刘旭晖

刘旭晖(1997),男,硕士在读,研究方向为电缆故障电弧与等离子体技术(E-mail:iamliu-xuhui@163.com);

朱振宇(1997),男,硕士在读,研究方向为高压脉冲电源技术;

郭玥(1998),女,硕士在读,研究方向为故障电弧诊断技术。

### Electrical fire source simulation for igniting cable

LIU Xuhui, ZHU Zhenyu, GUO Yue, JING Ziyang, WU Shuqun, ZHANG Chaohai

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

**Abstract:** In cable fire test, a fire source is essential for the fire performance evaluation. Most of the existing fire sources for power cable are based on chemical fuel, which is unable to represent the cable fire caused by fault arc. Therefore, to simulate the ignition of power cable by fault arc, a fire source based on electrical arc is developed in this work. Firstly, the induced voltage on the metal armor layer is theoretically analyzed when the 110 kV cable has the ground wire stolen or the cross interconnection wires on both sides are stolen. Voltages can reach thousands of volts. Secondly, the pre-breakdown voltage and sustained voltage of the metal-to-ground arc in power cable and the Jacob's Ladder arc are compared. It is found that the breakdown characteristics of both arcs are similar for applied ac voltage with frequencies of 50 Hz and 20 kHz. Thirdly, a fire source based on Jacob's Ladder arc is proposed for the ignition of power cables. Experimental results show that the 110 kV cable can be successfully ignited by this fire source, and the flame is able to spread both vertically and horizontally. Finally, the conclusion is that the high frequency Jacob's Ladder arc can simulate the characteristics of the fault arc and effectively ignite the 110 kV cable.

**Keywords:** fault arc; fire source simulation; cable fire; induced voltage; ladder arc; arc ignition

(编辑 钱悦)