Vol.37 No.7 Jul. 2017

# 隧道敷设高压电缆特征导纳模型及局部 放电信号幅值分布特性

陈孝信,钱 勇,许永鹏,盛戈皞,江秀臣 (上海交通大学 电气工程系,上海 200240)

摘要:为了研究交叉互联电缆中局部放电信号的幅值分布特性,基于 Tylavsky 公式建立了隧道内三相电缆 系统的参数化特征导纳模型,利用该模型计算得到局部放电脉冲电流在交叉互联线上的幅值分布公式。研 究了电缆的敷设方式和隧道环境对幅值分布的影响。最后通过模拟实验和现场数据验证了所提模型和 结论的正确性。研究结果表明:信号幅值分布由特征导纳比值决定且呈现"两大一小"的特点;随着电缆中 心间距、电缆中心距隧道内壁距离的增大,三相幅值差异逐步减小。

关键词:隧道;高压电缆;交联聚乙烯电缆;交叉互联;局部放电;特征导纳;幅值分布 中图分类号:TM 247;TM 726.4 文献标识码:A DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.07.026

# 0 引言

局部放电是交联聚乙烯(XLPE)电缆绝缘缺陷 的重要表征<sup>[1-3]</sup>。通过局部放电带电检测或在线监 测,可以在正常供电的条件下对 XLPE 电缆进行状 态评估,有助于及时发现电缆早期劣化缺陷,从而提 高供电网络可靠性<sup>[4-7]</sup>。高频电流法是目前常用的电 缆局部放电检测方法,其检测频段一般在 3~30 MHz 之间<sup>[8]</sup>。110 kV 及以上电压等级的 XLPE 电缆多采 用交叉互联的接地方式。高频电流传感器以非接触 的方式安装在电缆金属护套或屏蔽层的交叉互联线 上,可以感应电缆内局部放电产生的脉冲电流,且不 影响电缆系统的正常运行<sup>[9-10]</sup>。

局部放电信号在三相交叉互联线上的分布可以 作为判断局部放电位置和排除外界干扰的重要依 据,是近年来的研究热点<sup>[11-13]</sup>。当前研究主要基于固 定的仿真参数或确定的实验环境,未考虑电缆敷设 参数的影响。实际上,高压电缆的敷设方式及敷设环 境与电缆中脉冲电流的传播有着密不可分的关系, 往往会影响局部放电信号的幅值分布,但目前尚未 见到相关研究的报道。

为了探讨不同敷设参数下局部放电信号在交叉 互联线上的分布特性,有必要从理论上建立电缆系统 模型。现有电缆建模手段如 ATP(Alternative Transients Program)等仿真软件大多基于 Ametani 和 Dommel 的直埋敷设电缆分布参数模型<sup>[14-15]</sup>。该模型使用 Pollaczek 公式<sup>[16]</sup>计算电缆外层与大地的回路阻抗。 由于假定导体直接被大地包围,Pollaczek 公式并不 适用于当前广泛采用的隧道敷设高压电缆系统。针 对地下隧道,Tylavsky 提出了一组线-地回路阻抗的 高频计算公式和低频近似公式<sup>[17]</sup>。吴命利等人通过 理论分析和实例计算进一步明确了其物理含义以及 适用范围<sup>[18-19]</sup>。由于考虑了隧道内导体与大地的邻 近效应和趋肤效应,Tylavsky 公式在高频段具有良 好的准确度。文献[20]利用低频近似公式对交叉互 联电缆系统中的行波传播进行了初步研究,但未涉 及交叉互联线上的电流幅值分布特性和敷设参数的 影响。

本文从电缆的分布参数矩阵出发,基于 Tylavsky 公式建立隧道内三相电缆系统的特征导纳模型,进 而得到局部放电脉冲电流在交叉互联线上的幅值分 布公式。在此基础上,研究了隧道半径、大地电阻率、 电缆中心间距和电缆距隧道内壁距离等参数对幅值 分布的影响,并通过实验和现场测量对模型和结论进 行了验证。

### 1 电缆模型

#### 1.1 隧道内电缆分布参数矩阵

三相电缆可以视作一个 6 导体传输线系统,其 分布阻抗矩阵 Z 和分布导纳矩阵 Y 决定了电缆上电 压和电流的传播特性。高频时电缆金属屏蔽层中电 流的趋肤效应增强,电流将被束缚在屏蔽层的内表面 和外表面,使得转移阻抗迅速减少,从而可以忽略转 移电抗的影响<sup>[21]</sup>。此时三相电缆的分布参数矩阵 Z 和 Y 具有以下形式:

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} z_{cc} & z_{m1} & z_{m1} & z_{ss} & z_{m1} & z_{m1} & z_{m1} \\ z_{m1} & z_{cc} & z_{m1} & z_{m1} & z_{ss} & z_{m1} \\ z_{m1} & z_{m1} & z_{cc} & z_{m1} & z_{m1} & z_{ss} \\ z_{ss} & z_{m1} & z_{m1} & z_{ss} & z_{m1} & z_{m1} \\ z_{m1} & z_{ss} & z_{m1} & z_{m2} & z_{ss} & z_{m1} \\ z_{m1} & z_{m1} & z_{ss} & z_{m1} & z_{m1} & z_{ss} \end{bmatrix}$$
(1)

收稿日期:2016-07-11;修回日期:2017-03-23

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目 (2014CB239506)

Project supported by the National Key Basic Research Development Program of China(973 Program)(2014CB239506)

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} y_{cs} & 0 & 0 & -y_{cs} & 0 & 0 \\ 0 & y_{cs} & 0 & 0 & -y_{cs} & 0 \\ 0 & 0 & y_{cs} & 0 & 0 & -y_{cs} \\ -y_{cs} & 0 & 0 & y_{ss} & -y_{mu} & -y_{mu} \\ 0 & -y_{cs} & 0 & -y_{mu} & y_{ss} & -y_{mu} \\ 0 & 0 & -y_{cs} & -y_{mu} & -y_{mu} & y_{ss} \end{bmatrix}$$
(2)

其中,*z<sub>cc</sub>*,*z<sub>ss</sub>*,*z<sub>ma</sub>*分别为内导体自阻抗、金属屏蔽自阻抗和导体间互阻抗;*y<sub>ss</sub>*=*y<sub>se</sub>+<i>y<sub>cs</sub>*+2*y<sub>ma</sub>*,*y<sub>sc</sub>*,*y<sub>se</sub>*,*y<sub>ma</sub>*分别为内导体自导纳、金属屏蔽对地导纳和金属屏蔽间 互导纳。文献[14-15]给出了直埋敷设隧道电缆时上述阻抗与导纳的计算公式。在隧道敷设时,导纳部分的计算方法相同,而阻抗*z<sub>cc</sub>*,*z<sub>ss</sub>*,*z<sub>ma</sub></sub>中包含的电缆--地 回路自阻抗<i>z<sub>s</sub>*和互阻抗*z<sub>m</sub>*改用 Tylavsky 高频计算 公式进行计算。

图 1 所示为隧道电缆结构,其中 R 为隧道半径, b 为电缆到隧道圆心的距离,d 为电缆中心间距, $\theta$ 为两电缆对圆心的夹角,r 为电缆半径, $r_1$ , $r_2$ , $r_3$ 分别 为内导体、绝缘层和金属屏蔽到电缆中心的半径。



图 1 隧道电缆结构 Fig.1 Structure of tunnel-installed cable 此时电缆-地回路自阻抗  $z_s$ 和互阻抗  $z_m$ 为<sup>[18]</sup>:  $z_s = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} ln \frac{R}{r} + \frac{m\rho}{2\pi R} \frac{K_0(mR)}{K_1(mR)} + \frac{m\rho}{2\pi R} \times$ 

$$\sum_{n=1}^{\infty} \left[ \frac{1}{n} \left[ \frac{b(b+r)}{R^2} \right]^n \frac{\frac{mR}{\mu_e}}{\frac{\mu_e n}{mR}} K_n(mR) + nK_n(mR) \right] (3)$$

$$z_{m} = \frac{j\omega\mu_{0}}{2\pi} \ln\frac{R}{d} + \frac{m\rho}{2\pi R} \frac{K_{0}(mR)}{K_{1}(mR)} + \frac{m\rho}{2\pi R} \times \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \frac{\cos(n\theta)}{n} \left( \frac{b^{2}}{R^{2}} \right)^{n} \frac{\frac{mR}{\mu_{e}} K_{n}'(mR) + nK_{n}(mR)}{\frac{\mu_{e}n}{mR} K_{n}(mR) - K_{n}'(mR)} \right] (4)$$

其中, $\rho$  为大地电阻率; $\mu_0$  为真空磁导率; $\mu_e$  为大地 相对磁导率; $\omega$  为角频率; $m = (j \omega \mu_e \mu_0 / \rho)^{1/2}$ ; $K_n (n = 0,1,2,\cdots)$ 为 n 阶第二类修正 Bessel 函数; $K'_n$  为  $K_n$ 的导数。为了简化计算结果,假设 3 根电缆完全对 称,即单根电缆参数相同,且任意两电缆间的距离和 夹角相等,d和 b 由实际距离的几何均距表示。

## 1.2 电缆特征导纳模型

三相电缆系统中各导体之间相互耦合,每一根 导体上的电压和电流都受其他导体上电压和电流的 影响。采用模量变换可以将导体解耦,转换成多个独 立的双导体传输线系统,进而可由分布参数矩阵Z和 Y求得特征导纳矩阵Y。<sup>[22]</sup>为:

$$\boldsymbol{Y}_{\mathrm{c}} = \boldsymbol{Z}^{-1} \boldsymbol{T}_{\mathrm{V}} \boldsymbol{\lambda} \boldsymbol{T}_{\mathrm{V}}^{-1}$$
 (5)

其中, $\lambda$ 为解耦后各模量的传播常数矩阵; $T_v$ 为电压 变换矩阵。 $\lambda$ 和 $T_v$ 本质上是矩阵乘积ZY对角化时 由其特征值和特征向量构成的矩阵,即<sup>[22]</sup>:

$$T_{\rm V}^{-1}ZYT_{\rm V}=\lambda^2 \tag{6}$$

与双导体传输线类似,特征导纳矩阵  $Y_{e}$  表征了 多导体传输线上电压波与电流波的关系。基于电缆 完全对称的假设,电压变换矩阵  $T_{V}$  可选取 Clarke 变 换矩阵的扩展矩阵<sup>[21]</sup>。将式(1)、(2)、(6)代入式(5) 并化简得到:

$$Y_{c} = \begin{vmatrix} Y_{cs} & 0 & 0 & -Y_{cs} & 0 & 0 \\ 0 & Y_{cs} & 0 & 0 & -Y_{cs} & 0 \\ 0 & 0 & Y_{cs} & 0 & 0 & -Y_{cs} \\ -Y_{cs} & 0 & 0 & Y_{1} & -Y_{ss} & -Y_{ss} \\ 0 & -Y_{cs} & 0 & -Y_{ss} & Y_{1} & -Y_{ss} \\ 0 & 0 & -Y_{cs} & -Y_{ss} & -Y_{ss} & Y_{1} \end{vmatrix}$$
(7)  
$$Y_{1} = Y_{sc} + Y_{cs} + 2Y_{ss}$$

$$Y_{\rm cs} = \sqrt{\frac{\gamma_{\rm cs}}{z_{\rm cc} - z_{\rm ss}}} \tag{8}$$

$$Y_{se} = \sqrt{\frac{y_{ss} - 2y_{mu} - y_{cs}}{2z_{mu} + z_{ss}}}$$
(9)

$$Y_{\rm ss} = \frac{1}{3} \sqrt{\frac{y_{\rm ss} + y_{\rm mu} - y_{\rm cs}}{z_{\rm ss} - z_{\rm mu}}} - \frac{1}{3} \sqrt{\frac{y_{\rm ss} - 2y_{\rm mu} - y_{\rm cs}}{2z_{\rm mu} + z_{\rm ss}}} \quad (10)$$

其中, $Y_{ss}$ 为电缆同轴特征导纳,即单根电缆同轴特征 阻抗的倒数,仅与电缆本身结构有关,一般在 0.025~ 0.1 S之间<sup>[23]</sup>; $Y_{ss}$ 为电缆金属屏蔽与大地之间的特征 导纳; $Y_{ss}$ 为电缆金属屏蔽之间的特征导纳。 $Y_{ss}$ 和 $Y_{ss}$ 受电缆系统外部环境的影响。若将 $Y_{ss}$ 视作节点导纳 矩阵,则三相电缆特征导纳模型可以自导纳与互导 纳的形式表示,如图 2 所示。



图 2 三相电缆特征导纳模型 Fig.2 Characteristic admittance model of three-phase cable

图 3 为特征导纳  $Y_{ex}Y_{se}$ 和  $Y_{se}$ 实部与频率的变 化关系曲线。敷设参数如下:隧道半径 R=2 m,大地 电阻率  $\rho=100 \Omega \cdot m$ ,电缆中心间距 d=0.2 m,电缆距 隧道内壁距离 R-b=0.5 m。电缆参数如下:型号为 YJLW03 127/220 1×1000,内导体半径  $r_1=19$  mm,绝 缘层半径  $r_2=46$  mm,金属屏蔽半径  $r_3=48.4$  mm,电缆 半径 r=53.4 mm,绝缘层相对介电常数  $\varepsilon_1=2.3$ ,外护套 相对介电常数  $\varepsilon_2=3$ ,内导体电阻率  $\rho_1=1.7\times10^{-8}$  Ω·m, 金属屏蔽电阻率  $\rho_2=2.1\times10^{8}$  Ω·m,各材料相对磁导 率 $\mu_e=1$ 。特征导纳在高频时变化十分缓慢,且此时 特征导纳的虚部比实部小 1~4 个数量级,因而可以 忽略<sup>[21]</sup>。考虑到高频电流法的检测频带在 3~30 MHz 之间,可以认为特征导纳  $Y_{es}$ 、 $Y_{es}$ 和  $Y_{es}$ 在该范围内是 固定值,本文采用频率为 10 MHz 时的计算结果。



图 3 特征导纳实部与频率的关系

Fig.3 Relationship between real part of characteristic admittance and frequency

# 2 交叉互联线上信号幅值分布特性

# 2.1 交叉互联的折反射研究

三相交叉互联电缆单元如图 4 所示。三相电缆 特征导纳矩阵 Y。在进行交叉互联后会产生变化,从 而引起电流波折反射。若忽略交叉互联线长度,则折 射系数 T<sub>bord</sub> 为<sup>[22]</sup>:

$$\boldsymbol{T}_{\text{bond}} = \boldsymbol{E} + (\boldsymbol{M} \boldsymbol{Y}_{e} \boldsymbol{M}^{\mathrm{T}} - \boldsymbol{Y}_{e}) (\boldsymbol{M} \boldsymbol{Y}_{e} \boldsymbol{M}^{\mathrm{T}} + \boldsymbol{Y}_{e})^{-1}$$
(11)  
$$\boldsymbol{M} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$
  
$$\boldsymbol{F} = \boldsymbol{h} \boldsymbol{6} \times \boldsymbol{6} \qquad \boldsymbol{\hat{\mathbf{M}}} \stackrel{\text{d}}{\to} \stackrel{\text{d}}{\to} \stackrel{\text{d}}{\to} \mathbf{K} \stackrel{\text{d}}{\to} \mathbf{M} \stackrel{\text{d}}{\to} \stackrel{\text{d}}{\to} \mathbf{K} \stackrel{\text{d}}{\to} \mathbf{$$

其中, *E*为6×6阶单位矩阵; *M*为进行交义互联后 对特征导纳矩阵 *Y*。的重新排列。将式(7)代入式(11) 中,得到折射系数 *T*bond 的矩阵形式为:

$$T_{\text{bond}} = \begin{bmatrix} 1 & T_{\text{cc}} & -T_{\text{cc}} & T_{\text{sc}} & 0 & -T_{\text{sc}} \\ -T_{\text{cc}} & 1 & T_{\text{cc}} & -T_{\text{sc}} & T_{\text{sc}} & 0 \\ T_{\text{cc}} & -T_{\text{cc}} & 1 & 0 & -T_{\text{sc}} & T_{\text{sc}} \\ T_{\text{cs}} & -T_{\text{cs}} & 0 & 1 & -T_{\text{ss}} & T_{\text{ss}} \\ 0 & T_{\text{cs}} & -T_{\text{cs}} & T_{\text{ss}} & 1 & -T_{\text{ss}} \\ -T_{\text{cs}} & 0 & T_{\text{cs}} & -T_{\text{ss}} & T_{\text{ss}} & 1 \end{bmatrix}$$
(12)
$$\begin{cases} T_{\text{cc}} = T_{\text{ss}} = 1/(3 + 4\alpha) \\ T_{\text{cs}} = (2 + 2\alpha)/(3 + 4\alpha) \end{cases}$$
(13)

$$T_{sc} = 2/(3+4\alpha)$$

$$\alpha - \frac{3Y_{ss} + Y_{sc}}{(14)}$$

$$\alpha = \frac{Y_{\rm ss} + Y_{\rm se}}{Y_{\rm cs}} \tag{14}$$

其中,T<sub>cc</sub>、T<sub>cs</sub>、T<sub>ss</sub>、T<sub>ss</sub>分别为内导体对内导体、内导体



Fig.4 Cross-bonded three-phase cable unit

对金属屏蔽、金属屏蔽对内导体以及金属屏蔽对金 属屏蔽的反射系数;根据特征导纳模型, $Y_{**}$ 和 $Y_{**}$ 为 电缆与外部环境间的特征导纳,而 $Y_{**}$ 为电缆内部的 特征导纳,故  $\alpha$ 可视为电缆外部与内部的特征导纳 比。由式(13)可知,电流在交叉互联处的折反射仅与 特征导纳比 $\alpha$ 有关。

## 2.2 局部放电信号幅值分布

如图 4 所示,局部放电通常仅发生于三相电缆 中的其中一相,该相电缆的内导体和金属屏蔽上将 有幅值相同、极性相反的初始电流<sup>[24]</sup>。该电流以单一 同轴模的方式传播,故电流幅值在各导体上的分布 不受传播衰减的影响。假设局部放电位于 A 相,则其 相邻交叉互联处的入射电流  $I_{inc} = [I_p, 0, 0, -I_p, 0, 0]^T$ , 其中  $I_p$  为电流传播至交叉互联处时的幅值。交叉互 联处的电流幅值  $I_{cb}$  即为折射系数  $T_{bord}$  与入射电流  $I_{inc}$  的乘积:

$$I_{cb} = T_{bond} I_{inc} = \frac{I_{p}}{4\alpha + 3} \begin{bmatrix} 4\alpha + 1 \\ 1 \\ 1 \\ -2\alpha - 1 \\ -1 \\ -2\alpha - 1 \end{bmatrix}$$
(15)

其中, I<sub>d</sub>的第4、5、6行元素分别为A、B、C相交叉互 联线上的电流(交叉互联线相序以放电侧电缆相序 为准)。当电缆内产生局部放电时,其相邻交叉互联 线上的信号幅值分布具有以下特点。

(1)与放电相相连的 2 条互联线上的电流信号 相等,记为 I<sub>major</sub>。以图 4 中 A-B、B-C、C-A 形式的 交叉互联为例,若 A 相放电,则在 A 相和 C 相互联 线上的信号相同。

(2)剩余互联线上的电流信号记为 I<sub>minor</sub>。该电流 和 I<sub>minor</sub> 拥有相同的极性,但是其幅值较小,即在交叉 互联线上存在"两大一小"的幅值特性。两者的比例 关系由特征导纳比α决定,即:

$$\frac{I_{\text{major}}}{I_{\text{minor}}} = 1 + 2\alpha \qquad (16)$$

当局部放电电流信号经过第一个交叉互联单元后,放电电流将不再仅由同轴模方式传播,而是以同轴模、屏蔽层模和大地模的混合形式传播<sup>[25]</sup>。3种模

式的传播速度和衰减率各不相同,这就意味着单脉 冲将会随着传播距离的增加而逐渐衰减并分离成多 个脉冲串。与直埋敷设不同,隧道敷设时屏蔽层模和 地模的传播速度往往大于或接近于同轴模的传播速 度,因而不可忽略<sup>[20]</sup>。同时屏蔽层模和地模的衰减率 会随频率显著变化。因此,在经过第一个交叉互联 单元后的信号幅值分布将变得十分复杂,可能呈现 不同的分布特征,对现场带电检测的指导作用有限。 本文着重讨论与放电点相邻的交叉互联线上的幅值 分布。

#### 2.3 电缆敷设参数对幅值分布的影响

隧道内三相电缆系统中局部放电电流在相邻交 叉互联线上的幅值分布仅与特征导纳比  $\alpha$  有关,因 此通过研究不同敷设参数(包括隧道半径 R、大地电 阻率 $\rho$ 、电缆中心间距 d 及电缆距隧道内壁距离 R-b等)对  $\alpha$  的影响,可以得到不同条件下的幅值分布特 性。以第 1.2 节中所述典型参数为基准条件,选取 220 kV XLPE 电缆为例进行分析。电缆敷设参数对 特征导纳比  $\alpha$  的影响如图 5 所示。



如图 5(a)和(b)所示,隧道半径 R 和大地电阻 率 $\rho$ 的变化总体上对  $\alpha$  造成的波动很小,约在 5%以 内。从图 5(c)中可以看到,电缆中心间距 d 对  $\alpha$  的 影响非常大,当电缆相互靠近时, $\alpha$  会迅速上升并在 2r 时达到最大;而当间距 d 较大时, $\alpha$  趋近于固定 值。图 5(d)中  $\alpha$  的变化规律与图 5(c)相似:当电缆 距隧道内壁距离 R-b 为 r,即外护套与隧道内壁直 接接触时, $\alpha$ 最大;随着电缆远离墙体, $\alpha$ 迅速下降并 趋于定值。

上述结果可用特征导纳模型进行解释。若将三 相电缆系统中任意两导体视作平行双导线,当导线 间距缩小时,该双导体传输线的特征阻抗将减小、特 征导纳将增大。其中电缆中心间距 d 主要影响 Y<sub>\*\*</sub>, 而电缆距隧道内壁距离 R-b 主要影响  $Y_{seo}$  结合式 (14)可知此时  $\alpha$  变大,进而  $I_{major}/I_{minor}$  的比值会相应 增大。

# 3 实验验证

为了验证特征导纳模型的可靠性与局部放电信 号幅值分布研究的准确性,采用 RG223 同轴电缆进 行模拟实验,建立三相电缆交叉互联系统。鉴于隧道 半径 R 以及大地电阻率  $\rho$  对信号幅值分布的影响不 大,将电缆系统布置于金属屏蔽室内,用于模拟地下 隧道,同时减少外部信号干扰。此隧道的等效半径 为4m,大地电阻率 $\rho$ 为1×10<sup>-7</sup> $\Omega$ ·m。RG223 同轴电 缆的参数如下:内导体半径  $r_1$ 为 0.45 mm,绝缘层半径  $r_2$ 为 1.475 mm,金属屏蔽半径  $r_3$ 为 2.1 mm,电缆半径 r为 2.675 mm,绝缘层相对介电常数  $\varepsilon_1$ 为 2.3,外护 套相对介电常数  $\varepsilon_2$ 为 3,内导体电阻率 $\rho_1$ 为 1.75× 10<sup>-8</sup>  $\Omega$ ·m,金属屏蔽电阻率 $\rho_2$ 为 1.75×10<sup>-8</sup>  $\Omega$ ·m。

电缆系统总长 40 m,交叉互联结构位于电缆中间,两边电缆长度各为 20 m。局部放电脉冲信号为 Tektronix AFG3101 产生的脉冲波,幅值为 10 V,上 升时间 10 ns。脉冲信号从 B 相一端输入,其余电缆 终端接 50 Ω 电阻负载。检测信号由 Keysight DSO6104 示波器进行记录。高频电流传感器的工作 带宽为 1~50 MHz,示波器采样频率为 2 GSa/s(每秒 采样 2G 个点)。实验系统如图 6 所示。



图 6 实验系统示意图

Fig.6 Schematic diagram of experiment system

实验采用4种不同的敷设方式,如图7所示。方式1和方式2中电缆紧密排列,相邻电缆之间间距为5.35 mm;方式3和方式4中电缆水平排列,相邻电缆之间间距为0.1 m,等效几何间距为0.126 m。方式1和方式3中电缆均与隧道内壁直接接触,电缆中心对内壁距离为2.675 mm,而方式2和方式4电缆中心距离隧道内壁0.5 m。每种敷设方式均进行5组测量,结果具有高度一致性,图8记录了其中一组信号。A相和B相的交叉互联线上的信号相似,而C相上的信号较小,同时三相信号初始脉冲的极性





相同,符合"两大一小"的分布特性。

为了进一步确认电缆敷设参数的影响,采用2 种方法表征实测信号幅值,第一种计算方法为时域 峰峰值,即直接使用时域信号正峰值和负峰值之差; 第二种计算方法为频域的平均幅度谱。即对时域信 号进行傅里叶变换后,取其 3~30 MHz 范围内幅度 谱的平均值。由于非理想条件下 A 相与 B 相的幅值 并不完全相等,故以 A 相与 B 相平均幅值除以 C 相 幅值的方式计算实测 Imaigr / Iminor 比值。表 1 显示了平 均幅度谱的 Iming / Iming 比值较时域峰峰值更接近理论 值,误差均小于10%。这是因为平均幅度谱排除了 信号传播时延及低频段幅度谱的影响,更符合理论 推导的前提;而时域峰峰值的优点在于简便直观, 适用于对准确性要求不高的场合。产生误差的原因 之一在于所用 RG223 同轴电缆为半柔性电缆,其半 径小,因此在进行紧密排列时难以做到完全贴合。实 验中方式1和2下电缆中心间距d会略大于2r.方 式1和3下电缆中心对内壁距离*R-b*略大于*r*,故结果普遍较理论值小。

为了验证电缆中心间距 d 对幅值分布的影响. 比较表1中方式1和方式3的平均幅度谱(比较方 式2和方式4亦可得到同样结论)。可以看到,当 电缆等效中心间距 d 从 5.35 mm 增加到 126 mm 时, Image / Iminer 比值从 4.04 降低至 2.52, 这一变化与 图 5(c)中特征导纳比 α 的下降趋势相符。为了验证 电缆距隧道内壁距离 R-b 对幅值分布的影响,比较 表1中方式1与方式2的平均幅度谱(比较方式3 和方式4亦可得到同样结论)。可以看到,当电缆距 隧道内壁距离 R-b 从 2.675 mm 增大到 500 mm 时, Imaior / Iminor 比值从 4.04 减小至 2.38,这一变化同样符 合图 5(d)中特征导纳比 α 的下降趋势。由式(16)可 知 $\alpha$ 与 $I_{min}/I_{minor}$ 之间存在正比例关系,故实验中上 述参数改变引起的幅值分布变化趋势与利用所提模 型推导的结果相符,从而验证了所提模型和研究结 论的准确性。

# 4 现场测量

使用高频与特高频联合检测方法对某 110 kV 电缆线路进行局部放电带电检测。在对比高频和特 高频两路信号并排除了外界干扰后,由特高频传感 器通过时差法确定 B 相电缆终端接头内存在局部放 电<sup>[26]</sup>。图 9 为与终端接头相邻的 1 号交叉互联线上 测得的高频电流信号。信号经 2 MHz、40 dB 高通放 大器处理后由 Keysight DSO6104 示波器采集,采样 率为 2 GSa/s。

图 9(a)显示三相交叉互联线上均存在局部放电脉冲,且在时间上一一对应。每簇信号以 20 ms 的工频周期重复,并在正负半周均有分布。测得 A、B、C 三相信号的整体峰峰值分别为 288 mV、281 mV 和 184 mV,则可大致估算 *I*<sub>major</sub> / *I*<sub>minor</sub> 比值约为 1.55。利用矩形窗口提取采样周期内包含的脉冲,得到 26 组局部放电脉冲信号。经小波滤波抑制背景噪声后,计算平均幅度谱,并以三相总和为基值进行归一化,结果如图 9(b)所示。各组数据比例相似,其中 A、B 相幅值大体相等,且均大于 C 相幅值。以此计算各组 *I*<sub>major</sub> / *I*<sub>minor</sub> 比值,经统计平均值为 1.47、标准差为 0.069, 与上文中由时域峰峰值方法得到的结果相近。

表 1 实测信号幅值及 I<sub>major</sub>/I<sub>minor</sub>比值

Table 1	Measured	signal	amplitudes	and	different	Innin /	/ I	ratios
rubio r	mousurou	Signai	umpintados	unu	unitoront	- major /	- minor	ratios

敷设	时域峰峰值/V		平均幅度谱/V			$I_{ m major}/I_{ m minor}$			
方式	A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相	时域峰峰值方法	平均幅度谱方法	理论值
方式 1	0.239	0.259	0.094	0.137	0.138	0.034	2.65	4.04	4.42
方式 2	0.269	0.236	0.138	0.119	0.124	0.051	1.83	2.38	2.64
方式 3	0.227	0.263	0.109	0.123	0.124	0.049	2.25	2.52	2.59
方式 4	0.233	0.216	0.187	0.119	0.119	0.083	1.20	1.43	1.41



图 9 电缆局部放电脉冲及幅值分布

Fig.9 Cable PD pulses and amplitude distributions

由第 2.2 节的分析结论可知,A 相和 B 相互联 线上的信号幅值相等,故应与放电相直接相连。结合 图 4 的交叉互联单元结构,A 相和 B 相互联线分别 连接了 A-B 相和 B-C 相,即两互联线均与 B 相直接 相连。因此局部放电点应位于 B 相,与实际情况相符。

## 5 结论

a. 本文基于 Tylavsky 公式建立了隧道内三相电缆系统的参数化特征导纳模型,为信号传播分析提供理论支持。

**b.**利用特征导纳模型推导出局部放电电流在交 叉互联线上的幅值分布公式。在相邻交叉互联线上 的电流信号极性相同,且幅值分布呈现"两大一小" 的特点,其比例关系仅由特征导纳比α决定。

c. 三相 XLPE 电缆系统的敷设参数会影响局部 放电脉冲电流在相邻交叉互联处的幅值分布。通过 模型分析和实验研究发现,幅值分布主要受电缆中 心间距和电缆距隧道内壁距离的影响,而隧道半径 和大地电阻率的作用有限。三相电缆中心间距越小, 电缆越靠近隧道内壁,则三根互联线上的信号幅值 差异越大。

## 参考文献:

- 常文治,李成榕,苏錡,等. 电缆接头尖刺缺陷局部放电发展过程的研究[J]. 中国电机工程学报,2013,33(7):192-201.
   CHANG Wenzhi,LI Chengrong,SU Qi,et al. Study on development of partial discharges at the defect caused by a needle damage to a cable joint[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33 (7):192-201.
- [2] 常文治,阎春雨,李成榕,等. 硅橡胶/胶联聚乙烯界面金属颗粒

沿面放电严重程度的评估[J]. 电工技术学报,2015,30(24): 245-254.

CHANG Wenzhi, YAN Chunyu, LI Chengrong, et al. Assessment of creeping discharge initiated by metal particles on the silicone rubber/XLPE interface in cable joints[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(24):245-254.

[3] 廖瑞金,周天春,刘玲,等. 交联聚乙烯电力电缆电树枝生长的混 沌特性分析[J]. 电工技术学报,2012,27(5):63-69.

LIAO Ruijin,ZHOU Tianchun,LIU Ling, et al. The chaos characteristics analysis for electrical treeing propagation in XLPE power cables[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012,27(5):63-69.

- [4] AHMED N H,SRINIVAS N N. On-line partial discharge detection in cables [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1998, 5(2):181-188.
- [5] 江秀臣,蔡军,董小兵,等. 110 kV 及以上电压等级交联电缆在线监测技术[J]. 电力自动化设备,2005,25(8):13-17.
  JIANG Xiuchen,CAI Jun,DONG Xiaobing, et al. On-line monitoring techniques for 110 kV and above XLPE cable[J]. Electric Power Automation Equipment,2005,25(8):13-17.
- [6] 郑文栋,杨宁,钱勇,等.多传感器联合检测技术在 XLPE 电缆附件局部放电定位中的试验研究[J].电力系统保护与控制,2011, 39(20):84-88.

ZHENG Wendong, YANG Ning, QIAN Yong, et al. Experimental research on partial discharge localization in XLPE cable accessories using multi sensor joint detection technology [J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(20):84-88.

 [7]姚林朋,徐颖敏,钱勇,等. 基于关联规则的 XLPE 电缆局部放电 模糊识别研究[J]. 电工技术学报,2012,27(5):92-98.
 YAO Linpeng,XU Yingmin,QIAN Yong, et al. Fuzzy pattern

recognition of partial discharge in XLPE cable based on association rule[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012,27(5):92-98.

- [8] WU M,CAO H,CAO J,et al. An overview of state-of-the-art partial discharge analysis techniques for condition monitoring[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine,2015,31(6):22-35.
- [9] WEISSENBERG W, FARID F, PLATH R. On-site PD detection at cross-bonding links of HV cables [C] // CIGRE. Paris, France: [s.n.], 2004:1-7.
- [10] 韦斌,李颖. XLPE 电缆绝缘接头局放在线检测方法探讨[J]. 高电压技术,2005,31(10):30-32.
  WEI Bin,LI Ying. Study on the method of PD on-line detection of XLPE cable insulating joints[J]. High Voltage Engineering, 2005,31(10):30-32.
- [11] BABAEE A,SHAHRTASH S M. On-line partial discharge defected phase selection and localization in cross-bonded single core cables [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(5):2995-3006.
- [12] SHENG B,ZHOU W,YU J,et al. On-line PD detection and localization in cross-bonded HV cable systems [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2014, 21 (5): 2217-2224.
- [13] 姚翔,李海生,付尚莹. XLPE 电缆交叉互联系统中的局放脉冲 传播特性[J]. 高电压技术,2008,34(2):416-418.
  YAO Xiang,LI Haisheng,FU Shangying. PD pulse transmission characters of XLPE power cable intersection grounding system
  [J]. High Voltage Engineering,2008,34(2):416-418.

- [14] AMETANI A. A general formulation of impedance and admittance of cables[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1980,99(3):902-910.
- [15] DOMMEL H W. EMTP theory book [M]. Portland, USA: Microtran Power System Analysis Corporation, 1992: 150-191.
- [16] POLLACZEK F. Uber das feld einer unendlich langen wechselstromdurchflossen einfachleitung[J]. Elektrische Nachrichtentech, 1926,3(4):339-360.
- [17] TYLAVSKY D J. Conductor impedance approximations for deepunderground mines [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1987, 23(4):723-730.
- [18] WU M. Physical interpretation of impedance formulas for conductors enclosed in a cylindrical tunnel[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(3):1354-1360.
- [19] 吴命利,范瑜,辛成山. 电气化隧道中的导线-地回路阻抗[J]. 中国电机工程学报,2006,26(5):176-181.
  WU Mingli,FAN Yu,XIN Chengshan. Impedance of conductorearth circuits in electric railway tunnel[J]. Proceedings of the CSEE,2006,26(5):176-181.
- [20] 陈玉林,龚庆武,陈允平,等. 高压电缆护层交叉互联时的行波 故障测距[J]. 高电压技术,2008,32(4):799-803.
  CHEN Yulin,GONG Qingwu,CHEN Yunping,et al. Study of traveling wave at the sheath-crossing point of high voltage power cable[J]. High Voltage Engineering,2008,32(4):799-803.
- [21] 吴维韩,张芳榴. 电力系统过电压数值计算[M]. 北京:科学出版社,1989:155-174.
- [22] 克莱顿·保罗. 多导体传输线分析[M]. 杨晓宪,郑涛,译. 北 京:中国电力出版社,2013:176-207.

[23] 鹿洪刚,覃剑,陈祥训,等. 电力电缆故障测距综述[J]. 电网技 术,2004,28(20):58-63.

LU Honggang, TAN Jian, CHEN Xiangxun, et al. Overview of power cable fault location [J]. Power System Technology, 2004, 28(20):58-63.

- [24] LEMKE E. Analysis of the partial discharge charge transfer in extruded power cables[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2013,29(1):24-28.
- [25] AMETANI A. Wave propagation characteristics of cables[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1980, 99 (2):499-505.
- [26] 郭灿新,张连宏,姚林朋,等.局部放电 HF/UHF 联合分析方法 的现场电缆终端检测应用[J].电力自动化设备,2010,30(5): 92-95.

GUO Canxin,ZHANG Lianhong,YAO linpeng,et al. Application of HF/UHF joint partial discharge analysis to on-site power cable terminal detection[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(5):92-95.

### 作者简介:



陈孝信(1990—),男,浙江苍南人,博士 研究生,研究方向为电力设备在线监测和故 障诊断技术(E-mail:shawcine@live.com):

钱 勇(1977—),男,湖北武汉人,讲师,博士,通信作者,研究方向为输变电设备 状态监测与智能化(E-mail:qian\_yong@sjtu. edu.cn)。

Characteristic admittance model and PD amplitude distribution of tunnel-installed high-voltage cables

CHEN Xiaoxin, QIAN Yong, XU Yongpeng, SHENG Gehao, JIANG Xiuchen

(Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: In order to study the amplitude distribution of PD(Partial Discharge) signals in cross-bonded cables, a parameterized characteristic admittance model of three-phase tunnel-installed cable is established based on Tylavsky's formulas to calculate the amplitude distribution of PD pulse current on the cross-bonded cables. The influences of cable laying mode and tunnel environment on the amplitude distribution are studied. The accuracy of the proposed model and the correctness of the obtained conclusions are verified by simulation experiments and field tests. Research shows that, with the characteristic expression of "two-larger-one-smaller", the amplitude distribution of PD signals is decided by the characteristic admittance ratio; the amplitude difference among three phases is reduced along with the increase of the space between cable centres and the distance between the cable centre and the inner wall of tunnel.

Key words: tunnel; high-voltage cable; cross-linked polyethylene cable; cross connection; partial discharge; characteristic admittance; amplitude distribution