

同隧道并行电缆交叉互联护层错位分段对金属护层电流的影响

张程华¹, 王丰润¹, 刘 博², 任志刚², 李华春², 鲁海亮¹

(1. 武汉大学电气与自动化学院, 武汉 430072; 2. 国网北京市电力公司电力科学研究院, 北京 100075)

摘要: 随着同隧道并行电缆数目增加, 电缆交叉互联段分段位置相同导致的零序护层电流超标问题愈发严重。根据电磁感应基本原理, 将分段长度相同但分段位置不同的多回并行电缆进行虚拟分段, 编程计算分段位置不同并行电缆的护层电流。研究表明: 同侧支架并行电缆分段位置不同对电缆护层电流影响远大于异侧支架并行电缆分段位置不同产生的影响; 大品字形回路电缆分段位置不同对护层电流影响大于小品字形回路电缆; 对于同支架同段长三回电缆典型敷设方式, 三回电缆分段位置相互错开时护层电流最小, 且中间层电缆受上下两回电缆负荷电流影响较大, 上下两层电缆护层电流受电缆分段变化影响的变化规律相同; 对于典型的敷设工况, 当负荷水平在 100~400 A 间变化时, 同支架并行电缆段护层相互错开分段, 上层电缆护层电流大小平均降低 17%, 中层电流大小平均降低 32%, 下层电缆平均降低 15%, 能有效降低护层电流水平。

关键词: 电缆敷设; 交叉互联; 电磁感应; 护层电流; 皱纹铝套电缆; 排列方式; 多回电缆; 编程计算

Influence of Cross-bonded Parallel Cable Joints in the Same Tunnel on the Current of Metal Sheath

ZHANG Chenghua¹, WANG Fengrun¹, LIU Bo², REN Zhigang², LI Huachun², LU Hailiang¹

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. State Grid Beijing Electric Power Research Institute, Beijing 100075, China)

Abstract: With the increase of parallel working conditions of the same tunnel cable, the problem of excessive zero-sequence sheath current caused by the same segment position of the parallel cable cross-interconnection section becomes more and more serious. In this paper, according to the basic principle of electromagnetic induction, the multi-circuit parallel cables with the same segment length and different segment positions are virtually segmented, and the sheath current of parallel cables with the same segment length and different segment positions is calculated by programming. It is found that the influence of different section positions of the parallel cable on the same side support on the current of the cable sheath is much greater than that of the cable on the opposite side support. The influence of large glyph loop cable on sheath current is greater than that of small glyph loop cable. For the typical laying method of three-circuit cable with the same length on the same side, the sheath current is the smallest when the three-circuit cable segments are staggered with each other, and the middle layer cable is greatly affected by the load current of the upper and lower two-circuit cables, and the upper and lower two-layer cable sheath current is affected by the change of cable segments. For typical laying conditions, when the load level changes between 100-400 A, the sheaths of the parallel cable sections of the same support are staggered and segmented. The current of the upper cable sheath is reduced by 17 % on average, the current of the middle layer is reduced by 32 % on average, and the lower cable is reduced by 15 % on average, which can effectively reduce the current level of the sheath.

Key words: cable laying; cross-bonded; electromagnetic induction; metal sheath current; corrugated aluminum sheath cable; arrangement method; multi-circuit cable; programmed calculation

0 引言

出于城市美观及空间利用的需求, 城市地区输配电网中广泛采用高压电缆。高压电缆隧道敷设方式具有敷设便利、巡检方便、输电安全的优点, 成为了城市敷设高压电缆的首选方案^[1-4]。为满足日益增长的用电需求, 隧道内并行敷设的高压电缆数目日益增多

^[3,5]。然而, 并行电缆线路之间存在复杂的电磁耦合, 金属护层上会产生相应的感应电流^[6-11], 若不对其进行控制, 护层感应电流将导致电缆线路损耗增加过热、有效载流量降低, 更甚者会烧毁电缆接头及接地箱, 影响电力系统的安全稳定运行, 增加不必要的巡检负担^[3, 12-16]。

隧道敷设高压电缆金属护层电流的产生及抑制是目前国内外研究的热点。文[6, 17-21]从交叉互联分段长度、电缆电气参数、接地电阻等参数方面介绍了护层电流的计算及抑制方法。文[1, 20]分析了电缆护层环流的产生原因,研究了交叉互联分段段长对护层电流的影响,认为当电缆三相交叉互联段相等时,可以有效降低电缆护层电流。文[6-7, 22]分析了电缆护层环流的影响因素,分析了排列方式、分段长度、相间距、回路间距对电缆护层电流的影响,并分析了不同因素对护层电流变化的影响。文[10, 17]认为多回路电缆交叉互联分段长度不均匀将导致电缆护层电流增大,认为在实际工程中应尽量保证电缆分段长度相等。文[9]分析了某工程实例下双回路电缆的零序护层电流产生的机理,提出通过控制相序及在护层中串入电感及电阻的零序护层电流抑制方法。

文中以电缆间电磁感应定律为基础,建立了同隧道并行电缆交叉互联错位分段的护层电流计算模型,并结合工程案例验证模型的准确性。之后,文中分析了典型排列方式下电缆错位分段对护层电流的影响因素,提出了电缆敷设安装时通过控制电缆错位分段位置的电缆护层电流预先控制方法。

1 并行电缆段分段位置不同时的护层电流计算方法及验证

1.1 并行电缆段分段位置不同时的护层电流计算方法

城市用 110 kV 及以上高压电缆通常为单芯结构,由于金属护层与芯线的电磁感应作用,金属护层上存在感应电压。为避免护层感应电压过大带来的风险,长距离电缆线路金属护层通常采用交叉互联的方式^[23-24]接地,因此金属护层上存在感应电流。护层电流由电容电流与感应电流构成,对于一般城市电缆,由于电缆长度较短,电容电流可以忽略^[4, 10],因此文中后续分析中主要考虑感应电流。

双回路并行电缆错位分段示意图见图 1。

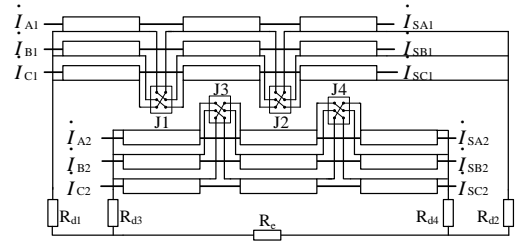


图 1 电缆交叉互联分段距离不一致示意图

Fig. 1 Schematic diagram of inconsistent distance of cable cross-bonded segments

图 1 中: R_{d1} 、 R_{d2} 、 R_{d3} 、 R_{d4} 为接地箱接地电阻; R_e 为大地回路等效电阻; i_{A1} 、 i_{B1} 、 i_{C1} 为第一条回路芯线电流; i_{A2} 、 i_{B2} 、 i_{C2} 为第二条回路芯线电流; i_{sA1} 、 i_{sB1} 、 i_{sC1} 为第一条回路金属护层电流; i_{sA2} 、 i_{sB2} 、 i_{sC2} 为第二条回路金属护层电流; J_1 、 J_2 、 J_3 、 J_4 分别为两回路电缆中间接头。

各回路电缆护层电流可由式(1)、(2)计算:

$$\dot{E} = Z\dot{i}_s \quad (1)$$

$$Z = Z_s + Z_d \quad (2)$$

式(1)、(2)中: \dot{E} 为芯线电流在护层上产生的感应电势矩阵; \dot{i}_s 为护层感应电流; Z_s 为护层阻抗矩阵; Z_d 为接地综合阻抗; Z 为回路综合阻抗。

由图 1 可见,双回路错位分段位置不同导致 J_1 、 J_2 、 J_3 、 J_4 位置不同,进而护层阻抗矩阵 Z_s 的不同。根据接头位置的不同,建立的电缆虚拟分段计算模型见图 2。

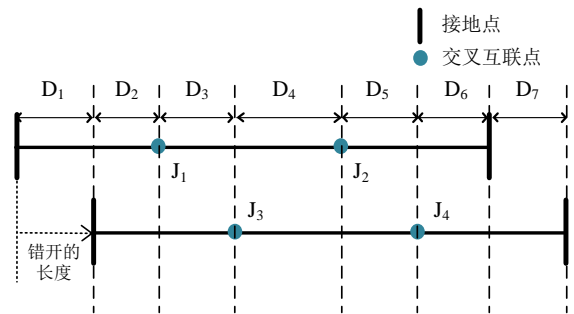


图 2 电缆虚拟分段示意图

Fig. 2 Schematic diagram of cable virtual segmentation

以交叉互联接头及两侧接地箱为分段点将双回路并行电缆模型分为 7 段。图 2 中: D_1 、 D_2 、 D_3 、 D_4 、

D_5 、 D_6 、 D_7 为虚拟分段； J_1 、 J_2 、 J_3 、 J_4 对应图 2 所示的交叉互连接地点。 D_1 、 D_7 段两回电缆未并行， D_2 、 D_3 、 D_4 、 D_5 、 D_6 段由于电缆在交叉互联位置金属护层产生换位，护层在 J_1 、 J_2 、 J_3 、 J_4 段交叉互联，根据不同分段，将 Z_s 分为 7 部分，对应 D_1 、 D_2 、 D_3 、 D_4 、 D_5 、 D_6 、 D_7 的护层阻抗矩阵

$$Z_s = Z_{s1} + Z_{s2} + Z_{s3} + Z_{s4} + Z_{s5} + Z_{s6} + Z_{s7} \quad (3)$$

D_i 段对应的 Z_{si} 中的 z_{ij} 元素为：

$$Z_{si} = L_i \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} \\ z_{21} & z_{22} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$z_{11}^0 = j \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & X_{13} \\ X_{21} & X_{22} & X_{23} \\ X_{31} & X_{32} & X_{33} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$z_{12}^0 = j \begin{bmatrix} X_{14} & X_{15} & X_{16} \\ X_{24} & X_{25} & X_{26} \\ X_{34} & X_{35} & X_{36} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$z_{21}^0 = j \begin{bmatrix} X_{41} & X_{42} & X_{43} \\ X_{51} & X_{52} & X_{53} \\ X_{61} & X_{62} & X_{63} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$z_{22}^0 = j \begin{bmatrix} X_{44} & X_{45} & X_{46} \\ X_{54} & X_{55} & X_{56} \\ X_{64} & X_{65} & X_{66} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$X_{ij, i \neq j} = 4\pi f \times 10^{-7} \ln \left(\frac{D_e}{s_{ij}} \right) (\Omega / \text{m}) \quad (9)$$

$$X_{ij, i=j} = 4\pi f \times 10^{-7} \ln \left(\frac{D_e}{r_{i, \text{GMR}}} \right) (\Omega / \text{m}) \quad (10)$$

$$D_e = 660 \sqrt{\frac{\rho_g}{f}} \quad (11)$$

$$r_{i, \text{GMR}} = \frac{(r_{s1i} + r_{s2i})}{2} \quad (12)$$

式(4)-(12)中： z_{11}^0 、 z_{12}^0 、 z_{21}^0 、 z_{22}^0 为 3×3 矩阵，分别表示两回电缆间初始状态下感抗；当 $i = j$ 时， X_{ij} 表示导体自感，当 $i \neq j$ 时， X_{ij} 表示导体互感，其中 1、2、3 为第一回电缆的 ABC 三相序号、4、5、6 为第二回电缆的 ABC 三相序号； D_e 为大地等值回路深度； s_{ij} 为两根电缆之间的距离； ρ_g 为土壤电阻率； f 为工频， $r_{i, \text{GMR}}$ 为第 i 根金属护层电缆护层的几何平

均半径， r_{s1i} 、 r_{s2i} 分别为护套的内半径与外半径。 L_i 为第 D_i 段的长度。

其中， D_1 段两回电缆不并行， D_2 段开始并行，故有：

$$Z_{s1} = L_1 \begin{bmatrix} z_{11}^0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$Z_{s2} = L_2 \begin{bmatrix} z_{11}^0 & z_{12}^0 \\ z_{21}^0 & z_{22}^0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

D_3 由于第一回电缆在 J_1 处交叉互联，电缆金属护层相位变化，令 Z_{s2} 第 1 行与第 1 列矩阵元素作如下变换，以 z_{11} 为例

$$z_{11}^1 = j \begin{bmatrix} X_{22} & X_{23} & X_{21} \\ X_{32} & X_{33} & X_{31} \\ X_{12} & X_{13} & X_{11} \end{bmatrix} \quad (15)$$

同理， D_4 段由于第二回电缆在 J_3 处交叉互联，令 Z_{s3} 第 2 行与第 2 列矩阵元素做相同变换，并以此得到 Z_{s4} 、 Z_{s5} 、 Z_{s6} 。对于 D_7 段，两回电缆之间不存在并行段，因此

$$Z_{s7} = L_7 \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & z_{22}^2 \end{bmatrix} \quad (16)$$

护层上电动势由芯线电流感应产生，有

$$\dot{E} = \dot{E}_{s1} + \dot{E}_{s2} + \dot{E}_{s3} + \dot{E}_{s4} + \dot{E}_{s5} + \dot{E}_{s6} + \dot{E}_{s7} \quad (17)$$

\dot{E}_i 段构成及 e_{ij} 初始元素为：

$$\dot{E}_{si} = L_i \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} \\ e_{21} & e_{22} \end{bmatrix} \dot{i}_t \quad (18)$$

$$e_{11}^0 = j \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & X_{13} \\ X_{21} & X_{22} & X_{23} \\ X_{31} & X_{32} & X_{33} \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$e_{12}^0 = j \begin{bmatrix} X_{14} & X_{15} & X_{16} \\ X_{24} & X_{25} & X_{26} \\ X_{34} & X_{35} & X_{36} \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$e_{21}^0 = j \begin{bmatrix} X_{41} & X_{42} & X_{43} \\ X_{51} & X_{52} & X_{53} \\ X_{61} & X_{62} & X_{63} \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$e_{22}^0 = j \begin{bmatrix} X_{44} & X_{45} & X_{46} \\ X_{54} & X_{55} & X_{56} \\ X_{64} & X_{65} & X_{66} \end{bmatrix} \quad (22)$$

式(18)中, e_{11} 、 e_{12} 、 e_{21} 、 e_{22} 为 3×3 矩阵。

其中, D_1 段两回电缆不并行, D_2 段开始并行, 故有:

$$\dot{E}_{s1} = L_1 \begin{bmatrix} e_{11}^0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} I_t \quad (23)$$

$$\dot{E}_{s2} = L_2 \begin{bmatrix} e_{11}^0 & e_{12}^0 \\ e_{21}^0 & e_{22}^0 \end{bmatrix} I_t \quad (24)$$

D_3 段由于第一回电缆在 J_1 处交叉互联, 电缆金属护层相位变化, 令 \dot{E}_{s2} 第 1 行矩阵元素作如下变换, 以 e_{11} 为例

$$e_{11}^1 = \begin{bmatrix} X_{21} & X_{22} & X_{23} \\ X_{31} & X_{32} & X_{33} \\ X_{11} & X_{12} & X_{13} \end{bmatrix} \quad (25)$$

同理, D_4 段由于第二回电缆在 J_3 处交叉互联, 令 \dot{E}_{s3} 第 2 行矩阵元素作相同变换, 并以此得到 \dot{E}_{s4} 、 \dot{E}_{s5} 、 \dot{E}_{s6} 。对于 D_7 段, 两回电缆之间不存在并行段, 因此:

$$\dot{E}_{s7} = L_7 \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & e_{22}^2 \end{bmatrix} I_t \quad (26)$$

$$I_t = [I_{A1} \quad I_{B1} \quad I_{C1} \quad I_{A2} \quad I_{B2} \quad I_{C2}]^T \quad (27)$$

式(26)、(27)中, I_t 为两回路芯线电流矩阵, 结合式(1)-(26)可得同隧道双回并行电缆交叉互联分段位置不一致时的电缆护层电流。文中推导以两回路为例, 若对多回路电缆护层电流进行计算, 需根据多回路电缆交叉互联分段情况更改式(3)、(16), 同时拓展式(4)、(17)为 $n \times 3$ 矩阵、式(26)为 $3n \times 1$ 矩阵, 其中 n 为回路数目, 并根据电缆交叉互联情况修改矩阵元素。

1.2 工程实例验证

以北京某工程为例验证本方法计算准确性。工程中 220 kV 甲线、乙线、丙一线、丙二线 4 条同隧道电缆, 电缆型号为 ZR-YJLW02-127/220KV-1 \times 1600mm²。其中甲线在第一交叉互联段结束后转入另一隧道, 乙线、丙一线、丙二线仍然在同隧道内并行, 其现场情况、排列情况

及并行情况分别见图 3、4。

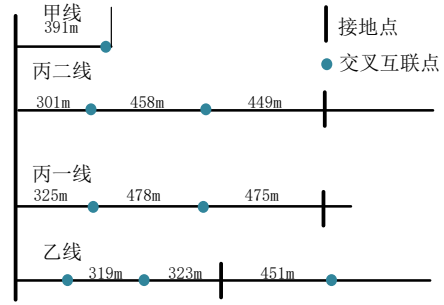
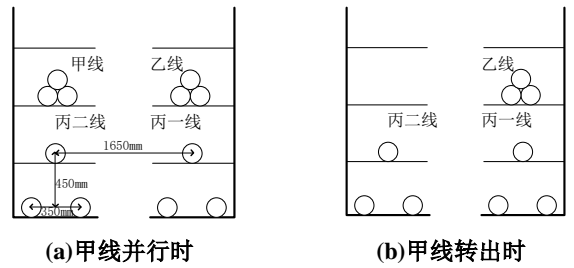


图 3 隧道内并行电缆分段长度图

Fig. 3 Sectional length diagram of parallel cable in tunnel



(a) 甲线并行时

(b) 甲线转出时

图 4 电缆敷设断面图

Fig. 4 Section diagram of cable laying

在现场安装电流传感器, 实地测量四回电缆接地阻抗、芯线电流、护层电流及分段长度。该段电缆所处隧道地网接地阻抗为 0.47Ω , 文中分析电缆均处于同一隧道内, 且距离较短, 因此后续分析中均以 0.47Ω 作为各交叉互连接地点的电阻。各交叉互联段的长度见图 3, 测量各回电缆距离见图 4, 四回电缆同一时刻芯线电流分别为 227 A、156 A、273 A、248 A。建立该工程的 MATLAB 计算模型, 采用文中方式计算上述四回线路的护层电流大小, 并与实测结果进行对比, 编程中涉及到电缆计算参数如表 1 所示, 计算结果与测量结果见表 2。

表 1 编程计算中所采用的参数

Table 1 Parameters used in programming calculation

参数名称	数值
线芯外径/mm	48.5
导体屏蔽厚度/mm	2.0
绝缘厚度/mm	24.0
绝缘屏蔽厚度/mm	1.0
金属护层厚度/mm	2.6

外护套厚度/mm	5.0
电缆外径/mm	135.2
线芯截面积/mm ²	1600
铝护套电阻率/(Ω·m)	2.8264×10 ⁻⁸
电缆支架间距/mm	1680
支架每层高度/mm	450
小品字电缆间距/mm	350
接地电阻/Ω	0.3
土壤电阻率/(Ω·m)	300

表 2 某工程护层电流计算结果与测试结果对照

Table 2 The calculation results of the protective layer current of a project are compared with the test results

线路名	相别	计算值/A	测量值/A	误差/%
甲线	A 相	21.9	19.5	12.3
	B 相	24.2	22.2	9.0
	C 相	19.5	18.2	7.1
乙线	A 相	12.9	11.2	15.1
	B 相	15.3	13.5	13.3
	C 相	11.4	10.0	14.0
丙一线	A 相	27.2	25.2	7.9
	B 相	24.8	23.4	5.9
	C 相	23.9	20.2	18.3
丙二线	A 相	20.5	23.7	13.5
	B 相	23.9	28.1	14.9
	C 相	20.1	22.3	9.8

从表 2 可见, 计算值与测量值基本一致, 但部分误差较大, 原因为隧道汇合处电缆排列方式非三角形排列, 环境中电磁感应复杂。同时, 由于部分电缆段长测量采用人工测量, 电缆长度测量结果存在一定误差。综上存在部分点误差较大, 但在误差允许范围内可以认为计算方法满足准确性要求, 能够反映护层电流的变化规律。

2 双回并行电缆分段位置不同护层电流特性

2.1 同侧支架双回路电缆分段位置不同对护层电流的影响

盾构隧道及暗挖隧道内通常存在两个电缆支架, 因此双回电缆存在布置于相同侧支架、布置于异侧支

架两种方式。首先分析布置于同一电缆支架上的两回电缆错位分段对护层电流的影响, 电缆型号为 ZR-YJLW02-127/220kV-1×1600mm²。小品字形(X 回路)布置于第二层, 小品字形(Y 回路)布置于三四层, 其中小品字形与小品字形均有 3 个完整的交叉互联段, 且每一个完整交叉互联段为 1 500 m, 每一小段段长为 500 m, 两回路负荷电流均为 400 A。对于文中分析地区的隧道敷设电缆。若无特殊要求, 电缆芯线均为 A 相靠近隧道壁, B 相居上, C 相靠外布置, 布置方式及电缆编号见图 5。固定小品字形电缆, 改变小品字形与小品字形电缆错位的距离。电缆交叉互联接地位置及错位示意图见图 6。

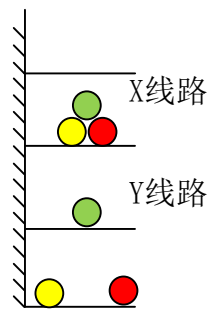


图 5 两回电缆敷设于同侧支架示意图

Fig. 5 The schematic diagram of cable distributed in the same bracket

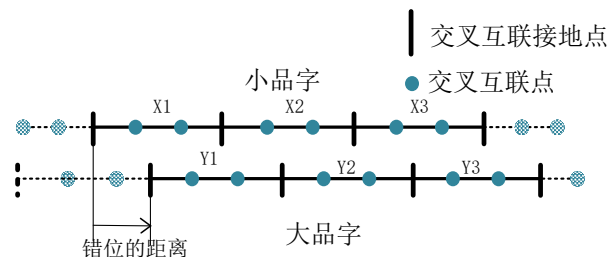


图 6 双回路电缆错位示意图

Fig. 6 Schematic diagram of cable cross-bonded mode

选取 X₂ 段与 Y₂ 段进行分析, X₂ 段与 Y₂ 段护层电流随两回电缆错位距离增大的结果见图 7、8。

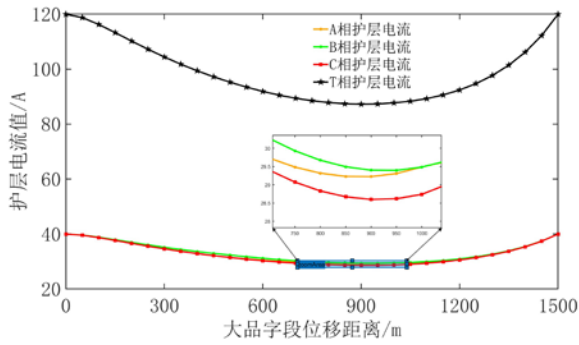


图 7 双回路电缆错位时 X_2 段护层大小变化情况

Fig. 7 The change of the size of the X_2 section of the shield layer when the cable of the big glyph is moved.

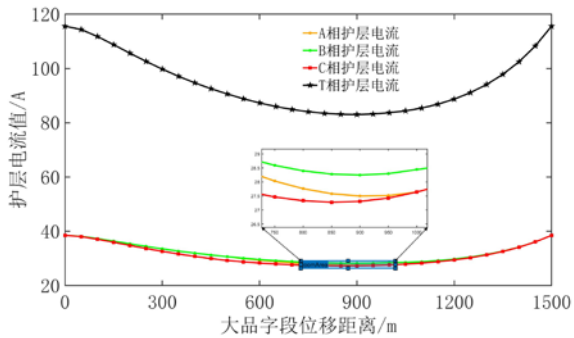


图 8 双回路电缆错位时 Y_2 段护层大小变化情况

Fig. 8 The change of the size of the Y_2 section of the shield layer when the cable of the big glyph is moved.

由图 7、8 可见，护层电流均基本呈现零序性质，因为交叉互联分段位置相同，各回路三段分段距离相等；随着错位分度距离增加， X_2 段与 Y_2 段的护层电流先减小后增大，且最小值向右偏移，因为电缆护层换位方式相同，错位距离为零时产生的零序感应电动势最大；同时由于在编程中每回电缆仅考虑 3 个交叉互联大段，大品字错位距离增大， X_2 、 Y_2 所受的影响不对称，且右侧更大，因此，故最小值向 1 500 m 处偏移。

2.2 异侧支架与同侧支架电缆间护层电流相互影响

分析异侧两支架电缆相互影响，分别令 X、Y 线路护层电流为 400 A 和 0 A，研究电缆敷设位置对护层电流的影响，两回电缆位于异侧支架示意图见图 9。

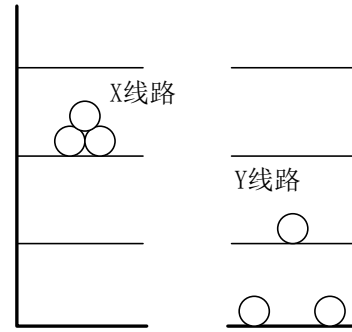


图 9 两回电缆敷设于异侧支架示意图

Fig. 9 Spatial position diagram of two loops cable attached to two supports

建立 3 段完整交叉互联线路，分析 X_2 、 Y_2 段 A 相护层电流变化规律。两回电缆之间的互相影响见图 10。

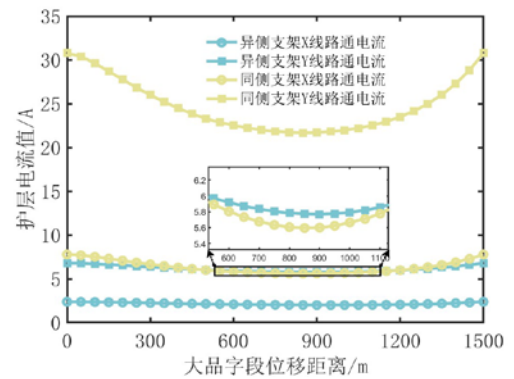


图 10 两回电缆之间的互相影响

Fig. 10 The mutual influence between two cables

由图 10 所示，两回电缆位于异侧支架的影响小于两回电缆位于同侧支架，且异侧电缆护层电流受错位分段的影响较低；同时，X 回路对 Y 回路的影响小于 Y 线路对 X 线路的影响，即小品字对大品字的护层电流影响小于大品字对小品字的护层电流影响。因为小品字排列相间距小于大品字排列，三相芯线电流产生的空间电磁场对外产生的空间磁场不对称性小于大品字形排列，因此在本文后续分析中仅考虑同侧支架电缆的影响。

3 三回并行电缆分段位置不同护层电流特性及其优化方法

3.1 三回电缆分段位置不同护层电流特性

由 2.2 节，异侧支架电缆错位对护层电流影响较小，因此本节仅分析同侧支架电缆错位的影响，典型的三回电缆敷设方式见图 11，三回电缆错位示意图见图 12。

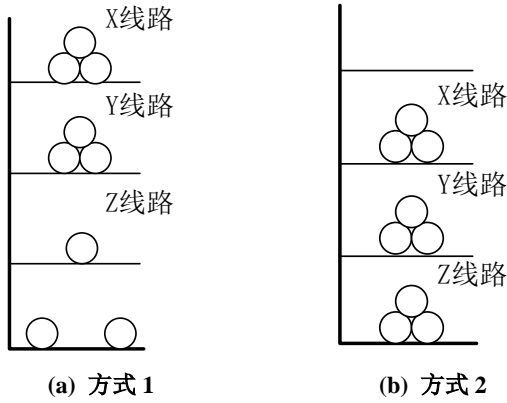


图 11 同支架三回电缆敷设方式示意图

Fig 11 Schematic diagram of laying method of three loops cable

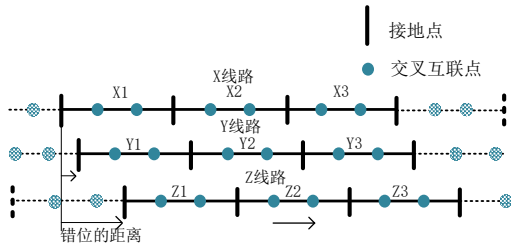
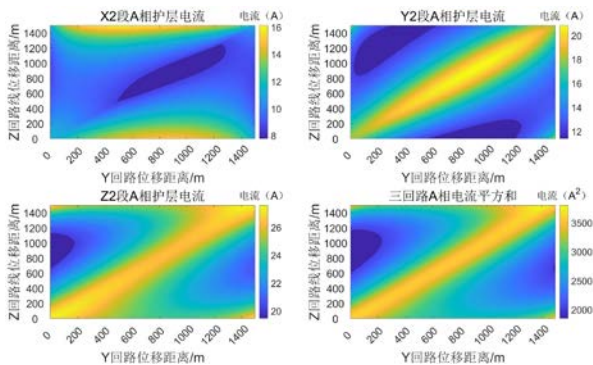


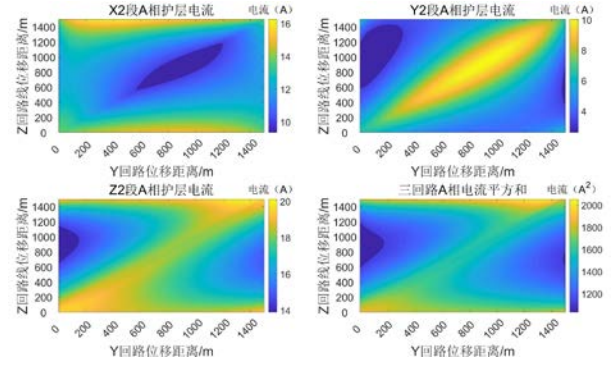
图 12 三回电缆错位示意图

Fig. 12 The schematic diagram of the movement of the three loops cable

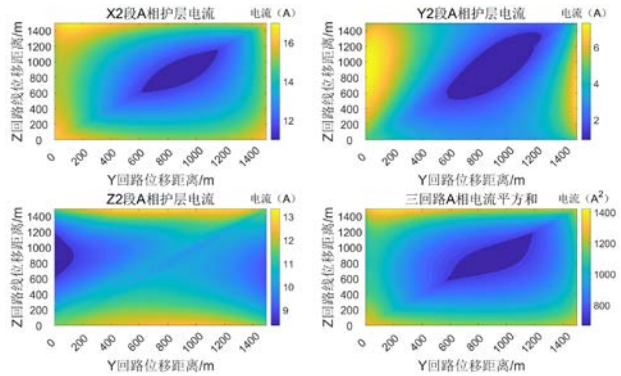
如图 12 所示，X、Y、Z 线路各有 3 个完整的电缆交叉互联段，并令三回线路的芯线电流为 300 A-200 A-100 A，200 A-200 A-200 A，100 A-200 A-300 A，改变 Y、Z 线路错位的距离，记录 X₂、Y₂、Z₂ 交叉互联段 A 相电缆护层电流。方式 1 布置下三回电缆护层电流见图 13。



(a) 负荷电流为 100 A-200 A-300 A



(b) 负荷电流为 200 A-200 A-200 A



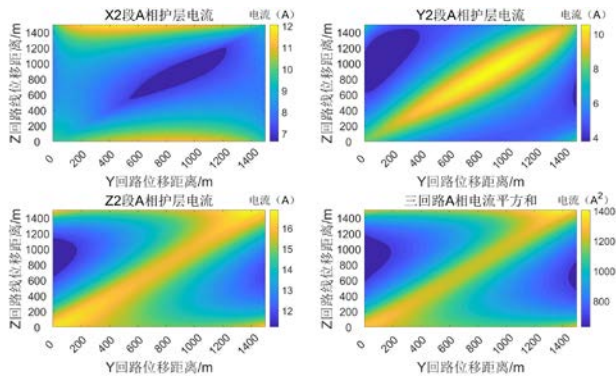
(c) 负荷电流为 300 A-200 A-100 A

图 13 两回小品一回大品敷设时不同芯线电流下护层电流变化图

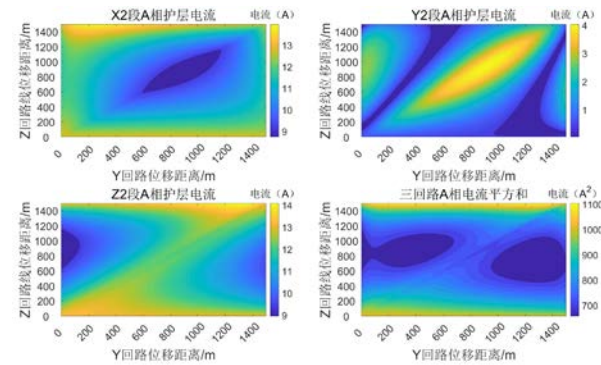
Fig. 13 The variation of sheath current under different core wire currents during the laying of two loops sketches and one loop sketches

改变 Y 线路 Z 线路交叉互联段错位距离，计算不同错位距离下的护层电流值。图 13 中深色区域为 X₂、Y₂、Z₂ 段各段护层电流最小的区域。对于方式 1 的敷设方式，X 线路护层电流取最小值时，Y 线路与 Z 线路错位 750 m 左右；Z 线路护层电流取最小值时，Z 线路错位 750 m 左右；Y 护层电流最小值，受到 X 回路与 Z 回路影响均较大，护层电流最小区域取决于 X 与 Z 回路芯线电流大小，且与 X 与 Z 回路中芯线电流较大的回路相似。护层电流的发热功率也受错位距离的变化而变化，基本与 Y₂ 段护层电流变化情况一致。

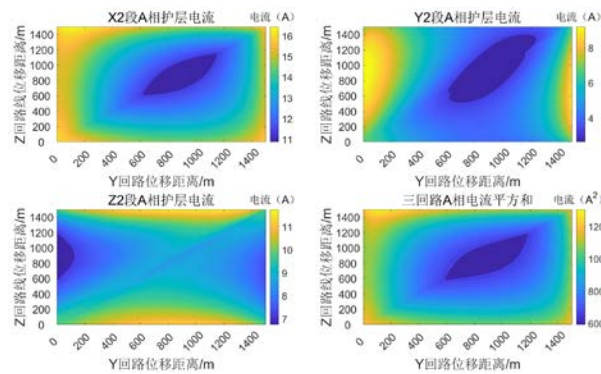
方式 2 布置下三回电缆护层电流见图 14。



(a) 负荷电流为 100 A-200 A-300 A



(b) 负荷电流为 200 A-200 A-200 A



(c) 负荷电流为 300 A-200 A-100 A

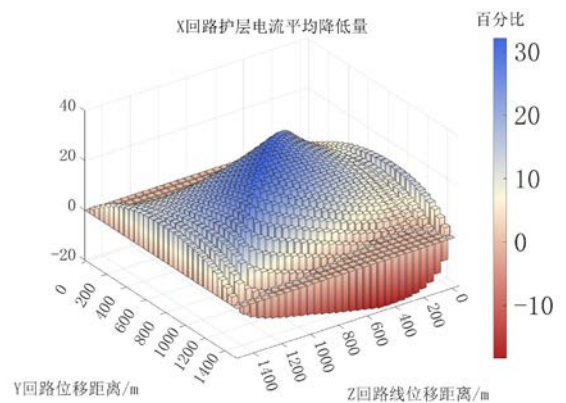
图 14 三回小品敷设时不同芯线电流下护层电流变化图

Fig. 14 The change of sheath current under different core current during the laying of three loops sketch

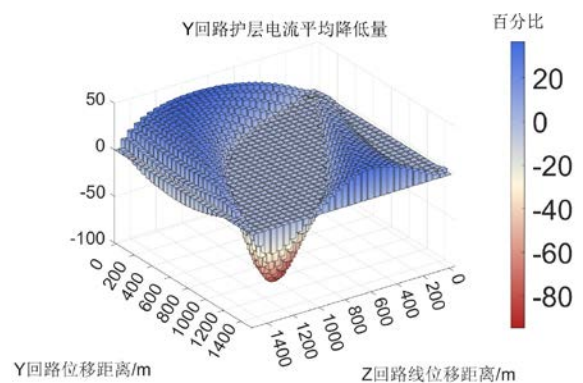
综合图 13、14，方式 1 与方式 2 护层电流随错位距离变化的规律相似。当三回均为小品字形时，X、Z 线路护层电流最小值区域均为当其与另两回相错 750 m 附近，Y 回路最小值区域的取值大小取决于 X、Z 两回路的芯线电流大小，且与回路芯线电流较大一回线路类似。对比图 13、14，不同负荷电流下的错位分段距离不同，需要计算多种负荷电流、不同错位方式下护层电流，选取使护层下降概率最大的 Y 线路与 Z 线路错位方式。

3.2 改变三回并行电缆段分段位置的护层电流控制方法

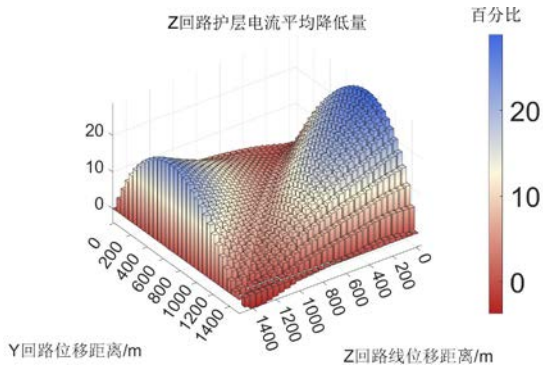
不同负荷电流下最优的错位分段距离不同，为分析最优错位距离，计算不同错位距离下不同负荷电流护层电流值，以护层电流平均降低量最大作为衡量错位距离优异程度的指标。令模型中 X、Z 线路的负荷电流在 100~400 A 之间变化，Y 线路的负荷电流保持为 250 A，改变 Y 与 Z 相对于 X 的错位距离，计算 X、Y、Z 的护层电流，并将相同错位距离下不同负荷电流的护层电流，与不错位且对应相同的负荷电流下的护层电流进行比较，计算不同错位分段距离相对于错位距离为零时的护层电流平均降低量，计算结果见图 15。



(a) X 回路



(b) Y 回路



(c) Z 回路

图 15 不同位置护层电流降低概率

Fig. 15 Probability of sheath current reduction at different positions

由图 15 可见，由于 Y 回路受上下 X，Z 两回电缆的影响较大，为了不使中间 Y 回路护层电流过大，建议在规划隧道敷设电缆线路时，尽量不使 Y 线路与 Z 线路的交叉互联接地点一致。由图 15 可得，建议电缆在敷设之初或后敷设电缆线路相互错开一个交叉互联小段，此时 X 线路护层电流大小平均降低 17%，Y 线路护层电流大小平均降低 32%，Z 线路护层电流大小平均降低 15%，能够从敷设之初抑制电缆护层电流。对于同支架三回电缆，在实际工程中应尽量使三回电缆交叉互联护层错位分段，以降低护层电流，减少能量损耗。

4 结论

文中建立了同隧道并行电缆交叉互联段长度相等，分段位置不一致的金属护层电流计算分析模型，分析了电缆错位分段时的护层电流变化规律，得到以下结论：

1)同侧支架并行电缆错位分段位置对电缆护层电流影响远大于异侧支架电缆错位分段的影响，在计算护层电流时只需考虑同一侧支架电缆间的影响。

2)对于典型的三回电缆敷设方案，中间回电缆受上下两回电缆负荷电流影响较大，上下两回电缆护层电流受电缆分段变化影响规律相同。

3)在同段长的典型敷设工况下，为控制电缆护层电流，考虑将三回电缆交叉互联单元相互错开，且尽

量不使中间层电缆与下层电缆的交叉互联分段位置一致。当三回电缆依次错开一交叉互联小段，且负荷水平在 100~400 A 间变化时，三回电缆护层电流各平均下降 17%、32%、15%。在电缆敷设及规划中应尽量使护层错位分段，以起到降低护层电流，减少能量损耗，提高电缆输电效率的作用。

参考文献：

- [1] 张重远, 芮皓然, 刘贺晨, 等. 高压单芯电缆金属护套感应电压仿真计算及最大允许敷设长度研究[J]. 高压电器, 2020, 56(5): 143-148.
ZHANG Chongyuan, RUI Haoran, LIU Hechen, et al. Induced voltage simulation of metal sheath and analysis on maximum allowable laying length for high voltage single-core cable[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(5): 143-148.
- [2] 邵森安, 马 颢, 丰如男, 等. 电力电缆国内外研究综述 [J]. 电线电缆, 2021(3): 1-6.
SHAO Senan, MA Xie, FENG Runan, et al. Review of researches on power cables at home and abroad[J]. Electric Wire & Cable, 2021(3): 1-6.
- [3] 刘 英, 肖 阳, 刘松华. 隧道内电缆集群敷设对载流量的影响研究[J]. 高压电器, 2019, 55(8): 123-130.
LIU Ying, XIAO Yang, LIU Songhua. Influence of cluster laying on permitted current rating of power cables in tunnels[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(8): 123-130.
- [4] LI Z, CHU Y, LI Q, et al. Study on sheath grounding mode and reasonable arrangement of return line for parallel cables[C]//16th IET International Conference on AC and DC Power Transmission.[S.l.]: IET, 2020: 2248-2252.
- [5] 张智辉, 唐兴佳, 陈泽铭, 等. 排管电缆群布置方式的联合优化方法研究[J]. 电测与仪表, 2020, 57(15): 8-13.
ZHANG Zhihui, TANG Xingjia, CHEN Zeming, et al. Research on joint optimization method for layout of pipeline cables[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(15): 8-13.
- [6] 朱广越, 齐明泽, 陈祥朋, 等. 相间距和回路间距对电力电缆金属护套环流的影响[J]. 东北电力大学学报, 2021, 41(2): 79-85.
ZHU Guangyue, QI Mingze, CHEN Xiangpeng, et al. The Influence of phase spacing and loop spacing on

- circulating current of power cable metal sheath[J]. Journal of Northeast Dianli University, 2021, 41(2): 79-85.
- [7] 王永志, 曹 炜, 梁海生, 等. 电缆护套环流估算公式的拟合及排列方式的优化[J]. 高压电器, 2017, 53(1): 77-82.
WANG Yongzhi, CAO Wei, LIANG Haisheng, et al. Fitting formula of sheath current and the arrangement optimization of cables[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(1): 77-82.
- [8] 潘 伟, 王 浩, 童 斌, 等. 高压电缆接地电流的计算及其影响因素分析[J]. 电力工程技术, 2019, 38(2): 147-151.
PAN Wei, WANG Hao, TONG Bin, et al. Calculation and analysis of grounding current and its influence factors of high-voltage power cables[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2019, 38(2): 147-151.
- [9] 苑玉宽, 李华春, 任志刚, 等. 双回并行敷设高压电缆零序护层电流计算及负荷相序优化方法[J]. 电瓷避雷器, 2022(3): 123-132.
YUAN Yukuan, LI Huachun, REN Zhigang, et al. Calculation of zero-sequence sheath current and load-phase sequence optimization method for double-circuit parallel laying high-voltage cables[J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(3): 123-132.
- [10] 陈科技, 齐 炜. 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. Effect of mixed arrangement on current in sheaths of two-circuit arranged XLPE cables[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(11): 3736-3742.
- [11] SHOKRY M A, KHAMLICHI A, GARNACHO F, et al. Detection and localization of defects in cable sheath of cross-bonding configuration by sheath currents[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(4): 1401-1411.
- [12] 蒲 路, 段 玮, 孙 骥, 等. 基于有限元法的单芯电缆接头线芯温度计算[J]. 电网与清洁能源, 2021, 37(2): 57-63.
PU Lu, DUAN Wei, SUN Ji, et al. Core temperature calculation of single-core cable joints based on FEM[J]. Advances of Power System & Hydroelectric Engineering, 2021, 37(2): 57-63.
- [13] 贺子琦, 陈 杰, 廖 敏, 等. 110 kV 电缆金属护套接地引线过温分析[J]. 湖南电力, 2019, 39(1): 40-42.
HE Ziqi, CHEN Jie, LIAO Min, et al. Analysis of metal bushing ground wires overheating for 110 kV cables[J]. Hunan Electric Power, 2019, 39(1): 40-42.
- [14] 陈 悦, 杨仕友, 覃 喜. 计及金属护套环流影响的高压电缆温度场及载流量的数值分析[J]. 电工电能新技术, 2021, 40(10): 18-26.
CHEN Yue, YANG Shiyu, QIN Xi. Numerical study on temperature field and ampacity of high voltage cables considering effect of circulating current in metal sheaths[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2021, 40(10): 18-26.
- [15] HONGTAO R, YING Z. Research on identification of cable sheath defects based on current analysis of cable sheath[C]//2022 International Conference on Electrical, Power and Grid Systems. United Kingdom: [s.n.], 2022: 012061-012068.
- [16] ZHU N, YANG F, LIU G. Sheath currents model and parameter calculation method on high voltage cable sheath multipoint grounding[J]. Huanan Ligong Daxue Xuebao, 2018, 46(10): 15-23.
- [17] 邹宏亮, 孙云莲, 张 弛, 等. 多回路电力电缆不同敷设方式对环流的影响[J]. 高电压技术, 2016, 42(8): 2426-2433.
ZOU Hongliang, SUN Yunlian, ZHANG Chi, et al. Effects of different multi-loop laying ways on circulating current of power cable[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(8): 2426-2433.
- [18] 吴志祥, 周 凯, 何 珉. 高压电缆交叉互联系统的 3 种优化接地方案[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(3): 135-140.
WU Zhixiang, ZHOU Kai, HE Min. Research on three optimized grounding schemes of HV cable cross connection system[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(3): 135-140.
- [19] 王尉军, 刘 兵, 殷 慧. 高压输电电缆敷设方式的选择研究[J]. 电线电缆, 2021(4): 29-32.
WANG Weijun, LIU Bing, YIN Hui. Research on the selection of laying methods for high-voltage transmission cables[J]. Electric Wire & Cable, 2021(4): 29-32.
- [20] 罗致远, 詹威鹏, 邬 韬, 等. 多回路电缆金属护套环流计算软件的开发与应用[J]. 电线电缆, 2014(2): 36-40.
LUO Zhiyuan, ZHAN Weipeng, WU Tao, et al. Multi-loop cable metal sheath circulation calculation software development and application[J]. Electric Wire & Cable,

2014(2): 36-40.

[21]梁海生, 李帆, 王永志, 等. 混合排列方式在交叉互联电缆中的应用[J]. 电线电缆, 2015(6): 41-44.

LIANG Haisheng, LI Fan, WANG Yongzhi, et al. The application of mixed arrangement in sheath cross bonding system[J]. Electric Wire & Cable, 2015(6): 41-44.

[22]齐明泽. XLPE 电缆金属护套接地电流特性与抑制措施研究[D]. 沈阳: 东北电力大学电气工程, 2022.

QI Mingze Research on circulation characteristics and suppression measures of metal sheath of XLPE cable[D]. Shenyang: Northeast Electric Power University, 2022.

[23]李根, 王航, 刘海康, 等. 基于逻辑回归的高压电缆交叉互联接地系统缺陷分类识别方法[J]. 高电压技术, 2021, 47(10): 3674-3683.

LI Gen, WANG Hang, LIU Haikang, et al. Classification and identification method of grounding system defects in cross-bonded HV cables based on logistic regression[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(10): 3674-3683.

[24]电力工程电缆设计标准: GB 50217—2018[S].2018.

Standard for design of cables of electric power engineering, GB 50217—2018[S].2018.

张程华(1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事高电压实验技术研究(E-mail: outsideration@Outlook.com)。