

DOI:10.12158/j.2096-3203.2023.02.017

# 基于改进遗传算法的隧道多回路电缆群相序优化

牛海清<sup>1</sup>, 李小潇<sup>1</sup>, 陈泽铭<sup>2</sup>, 聂程<sup>2</sup>, 余涛<sup>1</sup>

(1. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510641;

2. 广东电网有限责任公司广州供电局, 广东 广州 510620)

**摘要:**隧道集群敷设电缆具有负载能力高、方便检修等优点,在城市电网中得到了广泛应用。为了充分利用隧道电缆群的输电容量,文中提出一种基于改进遗传算法和多物理场仿真的隧道多回路电缆群相序优化方法。首先,考虑隧道敷设电缆的电磁环境、散热环境以及交叉互互联接地方式,建立隧道多回路电缆群电磁-热-流-路多物理场耦合模型;其次,在遗传算法中建立记忆种群,以减少联合仿真中调用有限元模型次数,提升计算效率;最后,以隧道电缆群线芯最高温度最小为目标函数,各回路电缆温度不超过90℃为约束条件,采用改进遗传算法对电缆相序进行优化。优化后文中算例的电缆金属护套总环流损耗下降了11.14%,电缆线芯最高温度下降了2.15%。研究表明,优化相序有利于改善隧道电缆群的散热,改进遗传算法大大减少了优化次数。

**关键词:**隧道敷设;高压电缆;多物理场耦合;遗传算法;相序优化;温度分布

**中图分类号:**TM726.4

**文献标志码:**A

**文章编号:**2096-3203(2023)02-0147-07

## 0 引言

随着现代社会城镇化和工业化的快速发展,人们对电能的需求与日俱增,电力电缆线路在输配电网络中的使用率愈来愈高<sup>[1-4]</sup>。隧道集群敷设相比于直埋敷设和排管敷设,具有空间容量大、散热条件好、负载能力高、便于运维检修的优点,在城市电网中应用广泛<sup>[5-6]</sup>。目前,关于多物理场耦合的理论研究已较为完善<sup>[7-8]</sup>,利用有限元软件建立隧道多回路电缆群仿真模型并计算,采用改进优化算法优化电缆的相序排列,对改善隧道电缆群的散热具有一定参考意义。

目前,在电缆多物理场仿真建模方面,文献[9]针对空气敷设电缆建立了热-流耦合模型,并分析和优化了影响电缆温度计算准确性的参数;文献[10]建立了隧道电缆及其钢支架的电磁-热-流多物理场耦合模型,通过对比电缆支架温升计算值与实验数据,验证了模型的准确性;文献[11]基于电磁场、热场和流场的耦合关系建立海底电缆的仿真模型,研究了敷设方式对海底电缆载流量的影响以及不同因素对海底电缆温度分布的影响。

在电缆的布置优化方面,国内外学者主要从减小金属护套环流和提高电缆群载流量两方面进行研究。文献[12]建立了等值电路计算模型,对多回路同相并联电缆的护套环流进行计算,并通过改变电缆的布置方式降低了电缆护套环流;文献[13]计算

并分析了在多回路电缆交叉互联分段不均匀情况下不同排列方式对电缆金属护套环流的影响,但以上研究均未涉及电缆的有限元仿真及温度分布计算。文献[14]采用改进粒子群算法对电缆群进行不等负荷优化,提高了排管敷设电缆的载流能力;文献[15]对电缆排列间距进行优化,改善了电缆群的互热效应,充分利用了边缘电缆的载流能力;文献[16]考虑地下排管电缆的历史敷设方式、历史负荷和环境温度,对排管电缆进行分流优化,降低了电缆运行温度,延长了电缆使用寿命。但以上研究均未涉及电缆相序的优化。

基于此,文中针对广州某地区隧道多回路电缆群,考虑隧道电缆的电磁环境、散热环境以及交叉互互联接地方式,建立其电磁-热-流-路的多物理场耦合模型,以隧道电缆群线芯最高温度最小为目标函数,各回路电缆温度不超过90℃为约束条件,通过改进遗传算法和 Comsol with Matlab 联合仿真优化电缆相序。

## 1 隧道多回路电缆群电磁-热-流-路多物理场数学模型

为仿真模拟隧道内部电缆群的电磁环境和散热环境,首先应考虑多个物理场及其之间的耦合关系<sup>[17]</sup>,如图1所示。

文中研究隧道风机停机时,隧道内空气为自然对流的工况。电缆的轴向尺寸远大于径向尺寸,因此对其建立二维仿真模型进行研究。多物理场控制方程如下。

收稿日期:2022-09-28;修回日期:2022-12-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(U2066212)

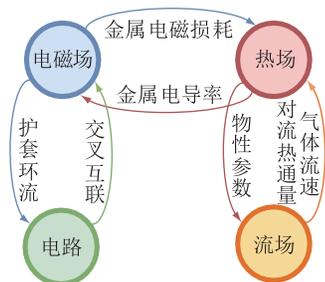


图1 多物理场耦合关系

Fig.1 Coupling relationship of multiple physical fields

(1) 电磁场控制方程。与传导电流密度相比,位移电流密度很小,通常可以忽略不计,因此将电磁场方程简化解耦为电场稳态方程和磁场低频稳态涡流方程,如式(1)和式(2)所示。

$$\begin{cases} \nabla^2 V = 0 \\ \mathbf{E} = -\nabla V \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \nabla(\nabla \cdot \mathbf{A}) - \nabla^2 \mathbf{A} = \mu \mathbf{J} \\ \mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $V$ 为电势; $\mathbf{E}$ 为电场强度; $\mathbf{A}$ 为矢量磁位; $\mu$ 为磁导率; $\mathbf{J}$ 为电流密度; $\mathbf{B}$ 为磁通密度。

(2) 热场控制方程。隧道内多回路电缆热量的传递主要通过热传导、热对流、热辐射的方式进行,其控制方程如式(3)一式(5)所示。

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \Phi \quad (3)$$

$$q = h \Delta T \quad (4)$$

$$\Phi = \varepsilon_1 A_1 \sigma_1 (T_1^4 - T_2^4) \quad (5)$$

式中: $\rho$ 为介质密度; $c$ 为介质比热容; $T$ 为介质温度; $t$ 为时间; $\lambda$ 为导热系数; $\Phi$ 为单位体积内热源的产热率; $q$ 为固体表面与流体间的热通量; $h$ 为表面对流换热系数; $\Delta T$ 为固体表面与流体的温度差; $\varepsilon_1$ 为有效热辐射率; $A_1$ 为有效辐射面积; $\sigma_1$ 为 Stefan-Boltzmann 常数; $T_1$ 、 $T_2$ 为表面的绝对温度值。

(3) 流场控制方程。隧道内空气的自然对流过程遵循质量守恒、动量守恒和能量守恒,其控制方程如式(6)一式(8)所示<sup>[18]</sup>。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = \mathbf{F} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{\eta}{\rho} \nabla^2 \mathbf{v} \quad (7)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla T = \frac{\lambda}{\rho c_p} \nabla^2 T \quad (8)$$

式中: $\mathbf{v}$ 为流速; $\mathbf{F}$ 为体积力; $p$ 为流场压力; $\eta$ 为流体动力黏度; $c_p$ 为定压比热容。

(4) 磁-热-流耦合方程。由图1可知,电磁场和热场、热场和流场之间均存在耦合关系,其关系

如式(9)一式(11)所示。

$$Q_v = \mathbf{J} \mathbf{E} = |\mathbf{J}|^2 / \sigma \quad (9)$$

$$\sigma(T) = \frac{\sigma_{\text{ref}}}{1 + \alpha(T - T_{\text{ref}})} \quad (10)$$

$$\rho(T) c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho(T) c_p \mathbf{v} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + Q_v \quad (11)$$

式中: $Q_v$ 为单位体积内的功率损耗; $\sigma$ 为介质电导率; $\sigma_{\text{ref}}$ 为参考电导率; $\alpha$ 为温度系数; $T_{\text{ref}}$ 为参考温度。

(5) 磁场耦合电路接口。电缆金属护套环流产生的环流损耗会对电缆的温度分布造成影响,因此必须考虑电缆金属护套的接地方式<sup>[19]</sup>。文中隧道多回路电缆采用交叉互联的接地方式。

在 Comsol 中分别建立 3 个磁场模块  $m_{f1}$ 、 $m_{f2}$ 、 $m_{f3}$ ,根据隧道电缆回路交叉互联三段分段的实际长度  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$ ,在二维模型中设置相应的磁场面外厚度,添加磁场耦合电路接口,连接接地电阻  $R_g$  和大地漏电阻  $R_e$  形成完整回路,如图2所示。

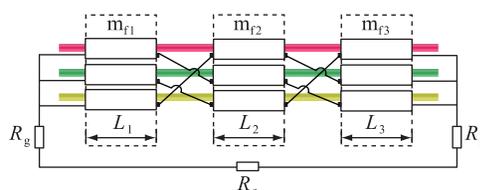


图2 交叉互联接地模型

Fig.2 Cross-bonding grounding model

## 2 隧道多回路电缆群相序优化的改进遗传算法

### 2.1 隧道多回路电缆群的相序优化问题

线芯温度不仅影响电缆的载流量,还影响电缆的安全经济可靠运行<sup>[20-21]</sup>。隧道中通常铺设多回路电缆线路,在运行过程中,负荷电流和金属护套环流发热是导致电缆温度升高的主要因素<sup>[22]</sup>。通过优化各回路电缆的相序组合,可以有效降低金属护套环流损耗和运行温度。

文中隧道多回路电缆群相序布置方式的优化,以隧道电缆群线芯最高温度最小为目标函数,各回路电缆温度不超过 90 °C 为约束条件,如式(12)所示。

$$\begin{cases} F = \max(-T_{\text{max}}(\mathbf{X})) \\ \text{s.t. } T_{i,j}(\mathbf{X}) \leq 90 \text{ } ^\circ\text{C} \\ \mathbf{X} = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_j \ \dots \ x_N] \\ j \in \{1, 2, \dots, N\} \\ i \in \{1, 2, 3\} \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $T_{\max}(\mathbf{X})$  为电缆群线芯温度的最大值;  $\mathbf{X}$  为由相序变量组成的相序向量;  $T_{i,j}(\mathbf{X})$  为第  $j$  回路电缆中  $i$  相的线芯温度;  $x_j$  为电缆群中第  $j$  回路的相序变量;  $N$  为电缆总回路数。

对隧道内每一回路三相电缆的相序进行编号, 第  $j$  回路和第  $j+1$  回路的相序布置方式如图 3 所示。

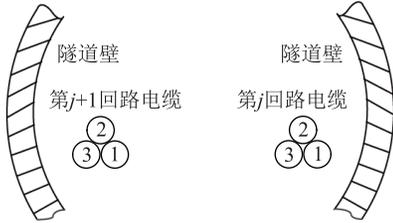


图 3 隧道回路电缆编号方式

Fig.3 Numbering method of tunnel cables

每一回路的三相电缆相位在全排列方式下共有 6 种组合, 文中定义相序矩阵如式 (13) 所示。其中, 矩阵每一列都表示一种可能的三相电缆相序组合方式。

$$\mathbf{A} = \frac{2\pi}{3} \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 1 & 1 & -1 \\ -1 & 1 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

则第  $j$  回路中  $i$  相电缆负荷电流的相位角弧度值  $(\mathbf{W})_{i,j}$  可表示为:

$$\begin{cases} (\mathbf{W})_{i,j} = (\mathbf{A})_{i,x_j} \\ x_j \in \{1, 2, \dots, 6\} \\ j \in \{1, 2, \dots, N\} \end{cases} \quad (14)$$

## 2.2 基于联合仿真的改进遗传算法

每回电缆有 6 种可能的相序,  $N$  回路电缆共有  $6^N$  种相序组合方式, 因此文中所研究的优化问题属于组合优化问题, 较为繁复。为提高优化效率、有效获得较优的相序组合方式, 文中利用交互计算平台 Comsol with Matlab 进行联合仿真, 并改进遗传算法。具体实现步骤包括建立隧道电缆群多物理场有限元模型、加载调用有限元模型计算各电缆导体温度、优化相序变量寻优搜索<sup>[23]</sup>。

遗传算法是一种启发式并行搜索算法, 具有较好的全局搜索能力, 在解决最优化问题中应用广泛<sup>[24]</sup>。算法基本流程包括种群初始化、适应值计算、选择运算、交叉运算、变异运算、种群更新、终止条件判断。其中适应值计算须通过联合仿真调用有限元模型获取相关参数, 其复杂度远高于其他步骤, 因此该优化问题的计算时间主要取决于适应值计算所需时间, 即通过联合仿真调用有限元模型的次数。

在遗传算法种群进化的过程中, 相邻代种群之间仅有部分个体发生变化, 存在大量相同基因位个体适应值重复计算的问题, 将其直接应用于联合仿真会导致优化计算效率低下。为提高计算效率, 文中提出适用于联合仿真的改进遗传算法, 即在遗传算法中原有种群  $P_k$  进化的基础上剔除重复个体, 并行地建立记忆种群  $M_k$ 。记忆种群  $M_k$  中每个个体都是独立非重复的, 随着原有种群  $P_k$  的进化而更新, 原有种群  $P_k$  从记忆种群  $M_k$  中读取适应值, 而进化不受其影响。该方法在原种群进化的基础上, 利用记忆种群保存原有种群个体的历史搜索记录, 能避免重复的有限元模型计算。具体计算流程如图 4 所示。

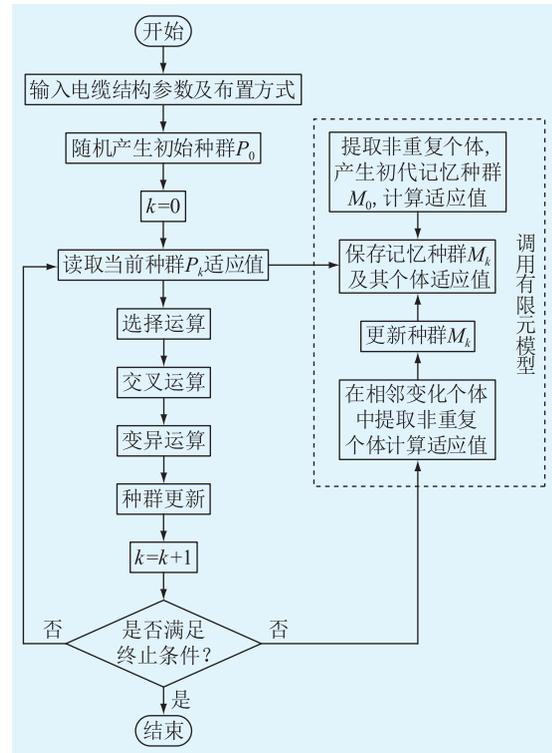


图 4 优化算法流程

Fig.4 Flow chart of the optimization algorithm

在相序优化过程中, 由于三相相序的对称性, 对于重复个体的定义包括 2 种情况: 一是基因位完全相同的个体; 二是虽然基因位不同, 但是相序旋转等效后基因位相同的个体, 例如在二回路电缆中, 相序 ABC-ACB、BCA-CBA 和 CAB-BAC 这 3 种情况是等效的, 计算的适应值相同, 均属于重复个体。

在文中各遗传算子计算方法如下。适应值  $f$  为种群个体基因对应的隧道电缆群线芯最高温度的负数, 即适应值计算式为:

$$f = -T_{\max}(\mathbf{X}) \quad (15)$$

选择运算模拟了个体的优胜劣汰, 通过轮盘赌

法进行选择,适应值高的个体被选中参与种群进化的概率更大,即种群中个体被保留到下一代的概率与其适应值大小成正比。交叉运算保持了种群的多样性,随机选取2个个体进行交叉,单点交叉通过在个体染色体上随机选取基因位,并交换该基因位右侧的部分染色体,得到2个新的子染色体。变异运算增加了基因的多样性,单点变异通过随机选取某一个体的某一基因位进行突变,产生新染色体。设置文中交叉概率为0.85,变异概率为0.1。

### 3 典型隧道多回路电缆群相序的优化

#### 3.1 隧道电缆多回路电缆群多物理场仿真

广州某隧道断面如图5所示。文中根据实际敷设情况,选取隧道内高压单芯电缆线路作为研究对象,电缆群共7回路,均为三角形排列,其中回路1—4为220 kV电缆,型号为YJLW02-127/220 1×2 000 mm<sup>2</sup>;回路5—7为110 kV电缆,型号为YJLW02-64/110 1×1 200 mm<sup>2</sup>。电缆相序布置方式如图5所示,此时对应的初始相序向量为  $X_0 = [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1]$ 。

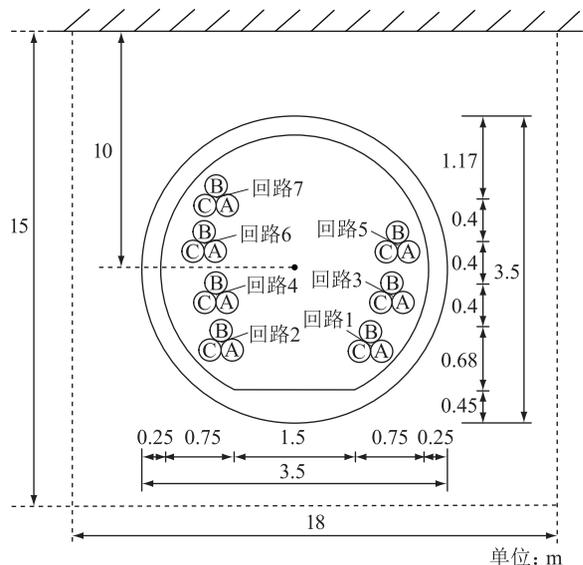


图5 隧道电缆结构示意图

Fig.5 Schematic diagram of tunnel cable structure

根据该隧道的实际参数以及多物理场有限元计算原理,建立隧道多回路电缆电磁-热-流-路多物理场耦合模型,模型正确性的验证参见文献[25],各物理场边界条件设置如下。

(1) 电场:电缆线芯为电势边界条件,对应各电缆的相电压,金属护套为接地端。

(2) 磁场:在各回路电缆的线芯和金属护套上施加线圈边界条件,线芯所在的线圈激励为各回路的负荷电流。

(3) 热场:根据实地测量数据,设置模型下边界温度为20℃;设置上边界为对流换热边界,选取地表和空气的自然对流换热系数为10 W/(m<sup>2</sup>·K);设置左右边界为热绝缘边界。

(4) 流场:隧道内空气为自然对流,因此须考虑重力对流体的作用,设置边界条件为无滑移的壁面条件。

(5) 电路:根据隧道敷设电缆回路的交叉互联分段位置,回路1、3、6的分段均为650 m-650 m-650 m;回路2、4、5、7的分段均为500 m-500 m-500 m,将电缆整体长度分为6段,与磁场  $m_{n1}—m_{n6}$  对应耦合。

在图5的相序布置方式下,220 kV电缆负荷电流为1 500 A,110 kV电缆负荷电流为1 200 A,该隧道电缆的多物理场仿真结果如图6所示。隧道内部电磁场主要集中在电缆附近,存在明显的自然对流形式的空气流动,隧道上方空气温度和流速均高于下方。各电缆线芯温度计算结果如图7所示。

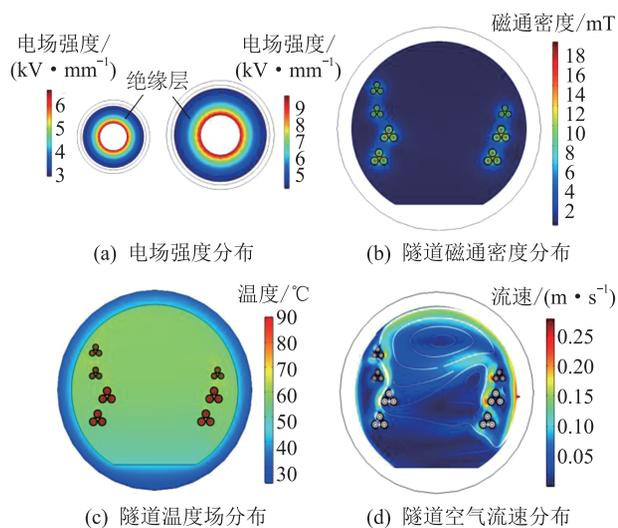


图6 多物理场仿真结果

Fig.6 Multi-physical field simulation results

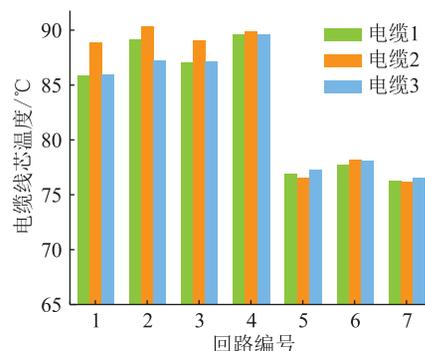


图7 电缆线芯温度

Fig.7 Cable core temperature

由图7可知,回路1—4的电缆线芯平均温度为88.3℃,回路5—7的平均温度为77.1℃。由于回

路1—4的220 kV电缆负荷电流高于回路5—7的110 kV电缆负荷电流,因此前者平均温度高于后者;而由于各电缆位置和护套环流的差异,相同电压等级和负荷电流的电缆线芯温度也存在差异。本算例中电缆线芯最高温度为90.3℃,最低温度为76.2℃。

### 3.2 基于改进遗传算法的隧道电缆群相序优化

针对3.1节中的隧道多回路电缆多物理场仿真模型,文中通过联合仿真利用改进遗传算法进行相序优化,设置每代种群 $P_k$ 个体数目为20,种群最大进化代数为1 000。该算法在迭代过程中的联合仿真交互状况如图8所示。

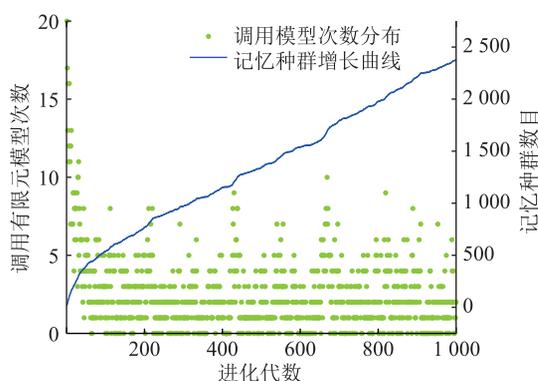


图8 联合仿真交互状况

Fig.8 Joint simulation interaction status

随着原有种群进化代数的增加,记忆种群规模呈对数形式增长,在第40代以后调用有限元模型的次数大大减少,平均每代调用有限元模型进行适应值计算的次数为1.96次。对于直接计算7回路全部相序排列,计算次数将高达279 963次;直接利用遗传算法的计算次数也需20 000次;而文中提出的改进遗传算法调用有限元模型的计算次数小于5 000次,所需的计算时间大大减少,具有加速收敛的作用,计算效率高。在实际工况中,对于4回以上电缆线路,全部相序排列数呈指数倍增长,直接计算量大且耗时长。因此文中算法更适用于4回以上电缆线路的相序优化,尤其对于多回路高压电缆线路,优化效果明显,且同样适于其他有限元联合仿真优化问题。优化前后的电缆参数如表1所示。

由表1可知,文中优化后的相序向量为 $X_1^* = [1\ 4\ 4\ 2\ 3\ 2\ 2]$ ,考虑相序旋转等效后的重复解,具有相同优化效果的相序布置方式还包括 $X_2^* = [3\ 6\ 6\ 4\ 5\ 4\ 4]$ 和 $X_3^* = [5\ 2\ 2\ 6\ 1\ 6\ 6]$ 。经过优化后,总体上该隧道电缆的金属护套环流损耗下降了29.95 W/m (11.14%),线芯最高温度下降了1.94℃ (2.15%),优化效果显著。在各回路电缆中,对于

表1 优化前后的电缆参数

Table 1 Cable parameters before and after optimization

回路编号	相序变量		环流损耗/(W·m <sup>-1</sup> )		线芯最高温度/℃	
	优化前	优化后	优化前	优化后	优化前	优化后
1	1	1	51.79	45.53	88.91	86.80
2	1	4	48.99	41.78	90.34	88.40
3	1	4	50.26	43.58	89.04	86.82
4	1	2	51.85	46.63	89.95	87.82
5	1	3	22.59	18.68	77.28	75.31
6	1	2	21.29	20.79	78.23	76.95
7	1	2	22.02	21.85	76.59	75.39

220 kV电缆和110 kV电缆,金属护套环流损耗分别下降了25.37 W/m (12.50%)和4.58 W/m (6.95%),线芯最高温度分别下降了1.94℃ (2.15%)和1.28℃ (1.64%)。

文中研究表明,不同的相序布置方式改变了各电缆相序的空间位置,从而改变了电缆群的磁场分布,直接影响了环流大小。采用改进遗传算法优化相序布置的方式使得各回路电缆的金属护套环流损耗均有所降低,从而减少电缆发热,降低了电缆群的线芯温度。同时对于电压等级高、负荷重的回路,改变相序对其温度的影响更加明显,因此考虑优化相序对电压等级高、负荷重的电缆回路优化效果更佳。

## 4 结语

文中针对隧道多回路电缆,考虑隧道电缆的电磁环境、散热环境以及交叉互联接地方式,建立了电缆群电磁-热-流-路多物理场耦合模型,引入改进遗传算法,以隧道电缆线芯最高温度最小为目标函数、以各回路电缆线芯温度不超过90℃为约束条件,对电缆的相序布置方式进行优化。文中算例的7回路电缆线路的相序经优化后,电缆金属护套总环流损耗下降了11.14%,线芯最高温度下降了2.15%,改善了电缆群散热,同时改进遗传算法大大减少了优化次数。这说明文中提出的基于隧道电缆多物理场仿真和改进遗传算法的相序优化方法计算效率高,优化效果显著。文中研究成果对改善隧道电缆的布置方式、提高有限元联合仿真的计算效率具有参考意义。

## 致谢

本文得到国家重点实验开放基金项目(K-A2021.425)资助,谨此致谢!

## 参考文献:

- [1] 梁永春. 高压电力电缆载流量数值计算[M]. 北京:国防工业出版社,2012.

- LIANG Yongchun. Numerical calculation of current carrying capacity of high voltage power cable [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012.
- [2] 魏艳慧, 郑元浩, 龙海泳, 等. 绝缘层厚度对高压直流电缆电场和温度场分布的影响 [J]. 电工技术学报, 2022, 37(15): 3932-3940.
- WEI Yanhui, ZHENG Yuanhao, LONG Haiyong, et al. Influence of insulation layer thickness on electric field and temperature field of HVDC cable [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(15): 3932-3940.
- [3] 李秋芳. 基于运行温度变化的排管电缆群寿命评估研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2018.
- LI Qiufang. Study on life assessment of cable group in pipes based on the operating temperature variation [D]. Wuhan: Wuhan University, 2018.
- [4] ZHOU C K, YI H J, DONG X. Review of recent research towards power cable life cycle management [J]. High Voltage, 2017, 2(3): 179-187.
- [5] 严有祥, 朱婷, 陈朝晖, 等. 交直流电缆共同敷设隧道内电磁场环境 [J]. 广东电力, 2018, 31(12): 20-26.
- YAN Youxiang, ZHU Ting, CHEN Zhaohui, et al. Electromagnetic environment in utility tunnel with AC and DC cable [J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(12): 20-26.
- [6] 刘俊俊, 黄新波, 赵隆, 等. 电缆隧道环境综合监测系统设计与应用 [J]. 广东电力, 2021, 34(3): 106-113.
- LIU Junjun, HUANG Xinbo, ZHAO Long, et al. Design and application of comprehensive environmental monitoring system for cable tunnel [J]. Guangdong Electric Power, 2021, 34(3): 106-113.
- [7] 朱璐, 莫文雄, 王勇, 等. 长距离电缆交接试验电源用电抗器结构设计及多物理场仿真研究 [J]. 高压电器, 2021, 57(9): 109-115.
- ZHU Lu, MO Wenxiong, WANG Yong, et al. Structure design and multi-physical field simulation study of reactor of power supply for long-distance cable handover test [J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(9): 109-115.
- [8] 林钰, 胡意茹, 李茜, 等. 复杂环境中海底电缆温度场及载流量模型研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(11): 39-46.
- LIN Yu, HU Yiru, LI Qian, et al. Analysis of submarine cable temperature field and ampacity model in complex environment [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(11): 39-46.
- [9] 郑文坚. 空气敷设电缆热一流耦合场仿真及其参数研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
- ZHENG Wenjian. The study of thermal-fluid coupling field simulation and parameters of cable in air [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.
- [10] 张宇娇, 郭栳炜, 汪振亮, 等. 基于电磁场一流场一温度场耦合分析的电缆支架温升计算及实验验证 [J]. 高压电器, 2019, 55(8): 143-148, 156.
- ZHANG Yujiao, GUO Zhiwei, WANG Zhenliang, et al. Calculation and experimental verification of cable support's temperature rise based on electromagnetic-fluid-thermal fields [J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(8): 143-148, 156.
- [11] 郝艳捧, 陈云, 阳林, 等. 高压直流海底电缆电-热-流多物理场耦合仿真 [J]. 高电压技术, 2017, 43(11): 3534-3542.
- HAO Yanpeng, CHEN Yun, YANG Lin, et al. Coupled simulation on electro-thermal-fluid multiple physical fields of HVDC submarine cable [J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(11): 3534-3542.
- [12] 赖胜杰, 夏成军, 池梓斌, 等. 考虑泄漏电流及层间耦合的高压电缆金属护套环流计算与分析 [J/OL]. 高电压技术: 1-12 [2022-12-07]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20220762>.
- LAI Shengjie, XIA Chenjun, CHI Zibin, et al. Calculation and analysis of circulating current in metal sheath for HV cable considering leakage current and inter-layer coupling [J/OL]. High Voltage Technology: 1-12 [2022-12-07]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20220762>.
- [13] 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.
- [14] 郑文坚, 牛海清, 宋廷汉, 等. 基于热场仿真及改进粒子群算法的电缆群负荷优化方法 [J]. 高电压技术, 2019, 45(6): 2010-2016.
- ZHENG Wenjian, NIU Haiqing, SONG Tinghan, et al. Load optimization method of cluster power cables based on thermal field simulation and modified particle swarm algorithm [J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(6): 2010-2016.
- [15] 鲁志伟, 葛丽婷, 郑良华, 等. 地下电力电缆集群的不等间距优化设计 [J]. 高电压技术, 2010, 36(8): 2068-2073.
- LU Zhiwei, GE Liting, ZHENG Lianghua, et al. Optimum design of underground power cables with unequal spacing [J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(8): 2068-2073.
- [16] 李秋芳, 周承科, 王航, 等. 地下排管多电缆线路分流对运行寿命的影响 [J]. 高电压技术, 2019, 45(5): 1576-1583.
- LI Qiufang, ZHOU Chengke, WANG Hang, et al. Influence of redistribution circuit current in an underground cable trench on cable service life [J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(5): 1576-1583.
- [17] 胡明丽. 基于多物理场耦合模型的高压电力电缆温度场与载流量计算 [D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
- HU Mingli. Calculation of thermal distribution and ampacity for high-voltage power cables by using multi-physics coupled model [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015.
- [18] 普郎特, 奥斯瓦提奇, 维格哈特. 流体力学概论 [M]. 郭永怀, 陆士嘉, 译. 北京: 科学出版社, 2016.
- PRANDTL L, OSWATITSCH K, WIEGHARDT K. Führer durch die strömungslehre [M]. GUO Yonghuai, LU Shijia, Trans. Beijing: Science Press, 2016.
- [19] 汪惟源, 程锦闽, 孙义, 等. 双回路电缆-架空线混合线路感

- 应电压电流计算[J]. 电力工程技术, 2021, 40(4): 89-94.
- WANG Weiyuan, CHENG Jinmin, SUN Yi, et al. Calculation of induced voltage and induced current of double circuit cable-overhead hybrid line[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(4): 89-94.
- [20] 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.
- [21] 傅晨钊, 司文荣, 祝令瑜, 等. 隧道电缆稳态温升快速计算方法研究[J]. 高压电器, 2021, 57(1): 75-81.
- FU Chenzhao, SI Wenrong, ZHU Lingyu, et al. Study on fast calculation method for steady temperature rise of tunnel cables[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(1): 75-81.
- [22] 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.
- [23] 贾云飞, 高璐, 汲胜昌, 等. 基于有限元仿真和遗传算法的1100 kV盆式绝缘子电气、机械性能综合优化[J]. 高压技术, 2019, 45(12): 3844-3853.
- JIA Yunfei, GAO Lu, JI Shengchang, et al. Comprehensive optimization of electrical and mechanical performance of 1100 kV basin-type insulator based on genetic algorithm and finite element simulation[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(12): 3844-3853.
- [24] 吴启迪, 康琦, 汪镭. 自然计算导论[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2011.
- WU Qidi, KANG Qi, WANG Lei. An introduction to nature-inspired computation[M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 2011.
- [25] 聂程, 郭少锋, 牛海清, 等. 隧道集群敷设高压电缆多物理场耦合电路仿真及其典型运行状态分析[J]. 广东电力, 2021, 34(2): 68-76.
- NIE Cheng, GUO Shaofeng, NIU Haiqing, et al. Simulation of multi-physical field coupling circuit of high voltage cable cluster laying in tunnel and analysis of typical operating states[J]. Guangdong Electric Power, 2021, 34(2): 68-76.

作者简介:



牛海清

牛海清(1969),女,博士,副教授,研究方向为电力电缆负载能力动态评估、电气设备绝缘的多物理耦合场仿真、电气设备状态检测状态评价及状态检修(E-mail: niuhq@scut.edu.cn);

李小潇(1998),女,硕士在读,研究方向为电气设备绝缘的多物理耦合场仿真;

陈泽铭(1996),男,硕士,研究方向为电气设备运行评估。

## Phase sequence optimization of tunnel multi-circuit cables based on improved genetic algorithm

NIU Haiqing<sup>1</sup>, LI Xiaoxiao<sup>1</sup>, CHEN Zeming<sup>2</sup>, NIE Cheng<sup>2</sup>, YU Tao<sup>1</sup>

(1. School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China;

2. Guangdong Power Grid Co., Ltd. Guangzhou Power Supply Bureau, Guangzhou 510620, China)

**Abstract:** Since cables laying in the tunnel have high load capacity and convenient maintenance, they have been widely used in the urban power grid. In order to make full use of transmission capacity, a phase sequence optimization method of tunnel multi-circuit cables based on an improved genetic algorithm and multi-physical field simulation is proposed. Firstly, considering the electromagnetic environment, heat dissipation environment and the cross-bonding grounding mode, an electromagnetic-heat-flow-circuit multi-physical field coupling model of tunnel cables is established. Secondly, the memory population is set up in the genetic algorithm to lessen the invocations of the finite element model and improve the calculation efficiency. Finally, an improved genetic algorithm is applied to the phase sequence optimization of cables in which minimizing the maximum temperature of cable cores is considered as the objective function and the cable temperature of each loop not exceeding 90 °C as its constraint condition. After optimization, the total sheath circulating loss of the cables decreases by 11.14%, and the maximum temperature of the cores decreases by 2.15%. The results show that the optimization of phase sequence is conducive to improving the heat dissipation of the tunnel cables, and the improved genetic algorithm greatly decreases the optimization times.

**Keywords:** tunnel laying; high voltage cable; multi-physical field coupling; genetic algorithm; phase sequence optimization; temperature distribution

(编辑 陆海霞)