

# 超高压交叉线路空间电磁环境分析

马明智,杨昌杰

(甘肃电通电力工程设计咨询有限公司,甘肃 兰州 730050)

**摘要:**针对存在交叉跨越的超高压输电线路,采用有限元法研究交叉线路三维空间电磁环境,分析不同相序排列及不同交叉角对空间电磁环境的影响。对于规划中或已建成的输电线路,当目标区域出现环境电磁场超标时,引入混沌变参数粒子群算法搜索屏蔽效果最好的屏蔽线架设位置,从而实现目标区域的最优屏蔽。

**关键词:**超高压交叉线路;电磁环境;有限元法;混沌;粒子群算法

**中图分类号:**TM 723 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2022)03-0053-04

**DOI:**10.16527/j.issn.1003-6954.20220309

## Analysis of Space Electromagnetic Environment of EHV Crossing Transmission Lines

MA Mingzhi, YANG Changjie

(Gansu Diantong Electric Power Engineering Design and Consulting Co., Ltd.,  
Lanzhou 730050, Gansu, China)

**Abstract:** Aiming at extra-high voltage (EHV) transmission lines with crossing, three-dimensional space electromagnetic environment of EHV crossing lines is studied by finite element method, and the influence of different phase sequence arrangement and different crossing angles on the space electromagnetic environment is analyzed. For the transmission lines in plan or having been built, chaotic particle swarm optimization algorithm with variable parameters is introduced when electromagnetic environment exceeds the standard in the target area, and the optimal erecting position of shielding lines is searched to make the best shielding effect, thus, the optimal shielding of the target area is achieved.

**Key words:** EHV crossing lines; electromagnetic environment; finite element method; chaos; particle swarm optimization algorithm

## 0 引言

超高压输电线路产生的工频电磁污染引起了社会各方面关注,公众对电磁环境问题的关注已成为电网发展的主要制约因素之一。因此,超高压输电线路的电磁环境问题成为线路设计的重要控制因素。目前,国内对超/特高压输电线路电磁环境公众暴露限值控制标准为:工频电场限值 $4\text{ kV/m}$ ,工频磁场限值 $100\text{ }\mu\text{T}$ ,线下耕地、园地、牧草地、养殖水面等场所工频电场限值 $10\text{ kV/m}$ <sup>[1]</sup>。随着输电网的大量建设,超高压输电线路工程不可避免地与相对电压等级较低的输电线路产生交叉跨越,而交叉区域电

磁环境问题比较复杂,其计算需要建立三维模型。相对于二维场,三维空间的电磁环境计算尚未有成熟的解析方法。目前,电磁环境的计算,主要有应用于微分方程型数学模型的有限元法和应用于积分方程型数学模型的逐次镜像法、模拟电荷法、矩量法等<sup>[2-7]</sup>。

下面采用有限元法,依托实际工程建立模型,分析超高压交叉输电线路下方工频电磁场的特征,研究影响其强度的相序排列及交叉角等因素;采用屏蔽线降低电磁污染超标的交叉线路场强强度,并对屏蔽线架设位置采用混沌变参数粒子群算法(chaotic particle swarm optimization algorithm with variable parameters, CPSO)进行寻优<sup>[3]</sup>,为输电线路设计提供指导依据。

## 1 研究模型

架空输电线路空间工频电磁场受导线对地高度、相间距离、分裂导线结构尺寸、导线布置形式、架空地线以及周围环境等诸多因素影响。电力系统大多采用通用设计塔型,这里以同塔双回 750 kV 输电线路与单回 330 kV 输电线路交叉情况为研究对象,建立相应模型,分析线路电磁环境特征以及导线不同相序排列与线路交叉角对工频电磁环境的影响。

交叉输电线路空间布置及相序排列方式如图 1 所示。所研究模型为:上层 750 kV 线路采用双回路鼓型铁塔,导线每相为 6 分裂排列,相邻子导线分裂间距为 400 mm,导线采用 JL/G1A-400/50 钢芯铝绞线,地线采用 1×19-13.5-1270-B 镀锌钢绞线;下层 330 kV 线路采用单回路猫头、干字型铁塔,导线每相为双分裂水平排列,分裂间距 400 mm,导线采用 JL/G1A-300/40 钢芯铝绞线;组合相序排列方式共 6 种。图 1 中:A1—C1 表示 750 kV 同塔双回线路的 1 回导线,A2—C2 表示 2 回导线,D1、D2 分别为 1、2 回线路地线;A3—C3 表示 330 kV 导线,D3 为其地线。根据排列方式不同,上层 750 kV 可排出 I~VI 六种,下层 330 kV 可排出 1~6 六种。

在输电线路三维电磁环境计算中,采用有限元法,将空间网格剖分成许多细小四节点三棱锥(四面体)单元,空间场量的计算可表示为:

$$u_e(x, y, z) = \sum_{i=1}^L N_{ei} \cdot U_i \quad (1)$$

$$N_{ei} = \frac{1}{V_e} \sum_{i=1}^L (p_i + q_i \cdot x + r_i \cdot y + s_i \cdot z) \quad (2)$$

式中: $L$  为空间三棱锥划分数量; $U_i$  为第  $i$  个三棱锥

顶点场量; $N_{ei}$  为第  $i$  个三棱锥的插值基函数; $p_i$ 、 $q_i$ 、 $r_i$ 、 $s_i$ 、 $V_e$  为由三棱锥顶点坐标计算出的系数。

工程用麦克斯韦方程组微分型式可表示为:

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (3)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (4)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (5)$$

$$\nabla \times H = \frac{\partial D}{\partial t} + J \quad (6)$$

引入矢量磁位,满足

$$B = \nabla \times A \quad (7)$$

相应有关场量的辅助方程为

$$D = \varepsilon E, B = \mu H, J = \sigma E \quad (8)$$

式(3)至式(8)中: $E$  为电场强度; $D$  为电位移; $B$  为磁通密度; $H$  为磁场强度; $\rho$  为电荷密度; $\varepsilon$  为介电常数; $\mu$  为磁导率; $\sigma$  为电导率; $J$  为电流密度; $t$  为时间。

以麦克斯韦微分方程组导出用于有限元处理电磁问题的微分方程,计算过程能考虑任意塔形和导线布置,准确计算空间任一点的电磁场强度数值解。

## 2 交叉线路电磁感应影响要因分析

为考察交叉线路三维电磁环境,在图 1 所示的空间模型中,以线路下方离地面 1.5 m 处某平面为考察区域,将目标区域划分成  $N \times N$  的小方形域,求取每个域的电磁场加权平均值,权重系数应反映每个小区域的重要程度。区域目标函数  $F$  可表示为

$$F = \sum_{j=1}^{N \times N} k_j \times E_j \quad (9)$$

式中: $E_j$  为第  $j$  个小方域电场强度或磁感应强度;

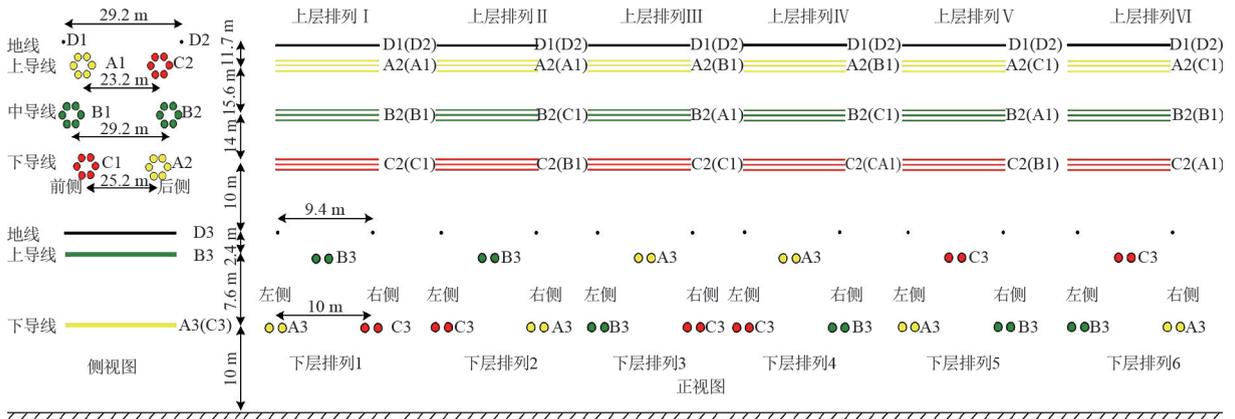


图 1 交叉输电线路空间布置方式及相序排列

$k_j$  为权重系数,  $\sum k_j = 1, k_j \in [0, 1]$ 。

## 2.1 导线相序排列方式对工频电磁场影响

### 2.1.1 导线相序排列方式对工频电场影响

对图1所示的交叉输电线路相序排列方式进行组合,根据式(9)求线下-40 m~40 m的正方形区域目标值  $F$ ,线路交叉角取  $90^\circ$ ,计算结果如表1所示。

表1 不同相序排列方式下区域电场强度

单位:kV/m

330 kV 排列方式	750 kV 双回路排列方式					
	排列 I	排列 II	排列 III	排列 IV	排列 V	排列 VI
排列 1	6.23	4.39	6.51	5.54	4.03	4.88
排列 2	4.65	4.37	4.55	3.91	4.34	4.01
排列 3	6.90	6.21	6.51	4.36	5.53	4.06
排列 4	4.58	4.16	4.55	4.01	4.22	4.03
排列 5	6.78	6.21	6.35	4.25	5.55	4.04
排列 6	6.02	4.18	6.34	5.52	3.92	4.88

图2绘制出了考察区域内电场强度  $E$  值。

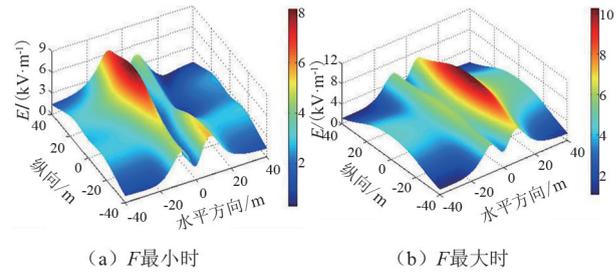


图2 交叉线路下方  $E$  值

由表1及图2可以看出,交叉输电线路线下工频电场受上层相序排列方式影响较大。当上层双回路采取同相序排列时,线下加权平均场强都较大(4.58~6.9 kV/m);当上层双回路采取逆相序排列时,线下加权平均场强都较小(4.01~4.88 kV/m),实际工程中可以采取上层线路逆相序排列方式。

### 2.1.2 导线相序排列方式对工频磁场影响

与工频电场相似,求解线下区域目标值  $F$ ,计算结果如表2所示。

表2 不同相序排列方式下区域磁感应强度

单位: $\mu\text{T}$

330 kV 排列方式	750 kV 双回路排列方式					
	排列 I	排列 II	排列 III	排列 IV	排列 V	排列 VI
排列 1	13.88	12.53	13.40	10.97	11.06	9.86
排列 2	13.91	13.47	13.02	11.07	12.58	11.13
排列 3	13.90	12.04	14.11	12.37	10.93	11.09
排列 4	13.89	12.52	14.46	13.61	12.38	12.87
排列 5	13.86	13.86	13.33	12.51	13.64	12.81
排列 6	13.82	13.40	14.08	13.66	13.55	13.54

图3绘制出了考察区域内磁感应强度  $B$  值。

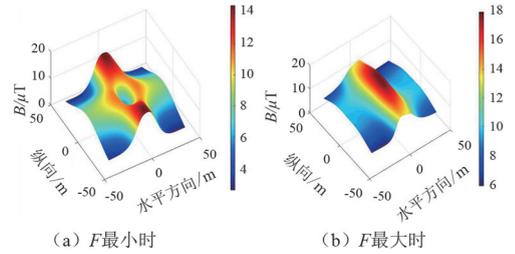


图3 交叉线路下方  $B$  值

由表2及图3可以看出,交叉输电线路线下工频磁场受上层相序排列方式影响较大。当上层双回路采取同相序排列时,线下加权平均场强都较大(13.82~13.91  $\mu\text{T}$ );当上层双回路采取逆相序排列时,线下加权平均场强都较小(9.86~13.54  $\mu\text{T}$ )。因此,在实际工程中推荐采取双回路逆相序排列方式。

## 2.2 线路交叉角对工频电磁场影响

利用2.1所得结果,考察工频电场区域目标值  $F$  最小时的相序布置方式,区域目标值  $F$  随角度变化情况。目标区域函数值  $F$  随线路交叉角变化情况如图4所示。

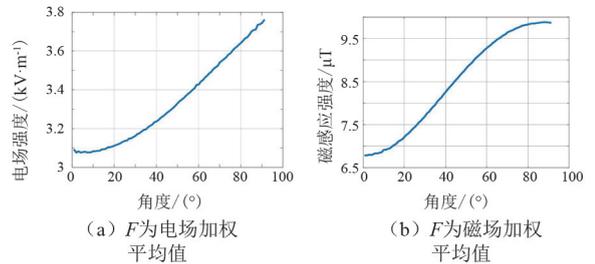


图4 目标区域函数值  $F$  随线路交叉角变化情况

由图4可见,随交叉角的增大,目标区域函数值  $F$  也相应增大。为提高输电通道本质安全,相关部门要求重要输电线路交跨角不宜小于  $45^\circ$ ,其线路下方电磁环境如图5所示。

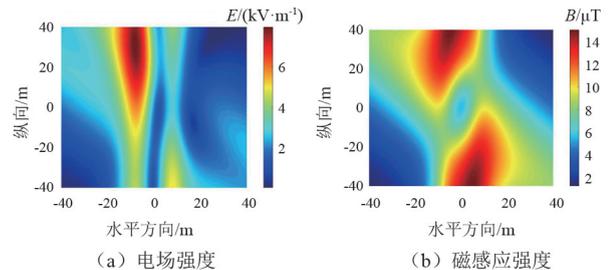


图5 交叉角  $45^\circ$  时线路下方电磁环境

## 3 屏蔽措施

由上述内容可知,交叉线路下方电场强度受相

序排列组合及交叉角影响,区域目标值  $F$  最小时,线下场强呈现的马鞍面加权平均场强不超标,而沿下层线路方向单侧场强超出标准要求。因此,采用在导线下方架设屏蔽线的方式减小地面工频电场。对屏蔽线架设位置采用 CPSO 算法进行寻优,实现屏蔽优化设计。

### 3.1 CPSO 算法

标准粒子群优化算法 (particle swarm optimization, PSO) 的数学描述为:假设在一个  $d$  维的目标搜索空间中,有  $m$  个代表潜在问题解的粒子组成的一个种群  $S = \{X_1, X_2, \dots, X_m\}$ , 该种群中的第  $k$  个元素  $X_k = \{x_{k1}, x_{k2}, \dots, x_{kd}\}$ , 表示第  $k$  个粒子在  $d$  维空间的一个矢量点。用  $P_{kd}(p_{k1}, p_{k2}, \dots, p_{kd})$  记录第  $k$  个粒子自身搜索到的最优点。而在这个种群中,搜索到的最好值记为  $g$ , 则  $P_{gd} = (P_{g1}, \dots, P_{gd})$ 。可以用  $V_k(v_{k1}, v_{k2}, \dots, v_{kd})$  表示第  $k$  个粒子的速度。PSO 算法采用式 (10) 实现。

$$\begin{cases} V_{(t)kd} = w \cdot V_{(t-1)kd} + c_1 \cdot \text{rand}_1(P_{(t-1)kd} - X_{(t-1)kd}) + \\ c_2 \cdot \text{rand}_2(P_{(t-1)gd} - X_{(t-1)gd}) \\ X_{(t)kd} = X_{(t-1)kd} + V_{(t)kd} \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $\text{rand}()$  产生  $(0, 1)$  之间的随机数;  $w$  为惯性权重系数;  $c_1, c_2$  为每个粒子的学习因子;  $t-1, t$  为粒子运动时刻。

惯性权重系数取以时间为变量的非线性函数, 如式 (11) 所示。

$$w(t) = (w_{\max} - w_{\min}) \times \tan(0.875 \times \left[ 1 - \left( \frac{t}{t_{\text{iter}}} \right)^K \right]) + w_{\min} \quad (11)$$

式中:  $t_{\text{iter}}$  为最大进化代数;  $t$  为当前进化数;  $K$  为控制因子;  $w_{\max}, w_{\min}$  为惯性权重区间上、下限。

PSO 算法存在易陷于局部最优、优化计算精度低、后期收敛慢的缺点。故根据混沌运动的随机性、遍历性等特点, 采用混沌控制参数变化的粒子群优化算法进行寻优计算。混沌 (chaos) 是由确定方程得到的非确定随机运动状态, 具有随机性、便利性及规律性等特点, 能在一定范围内不重复地遍历所有状态。逻辑斯谛方程是一个典型的混沌系统, 其公式为

$$x_{n+1} = \mu x_n (1 - x_n) \quad (12)$$

式中:  $\mu$  为混沌控制参数;  $x_n$  为混沌变量,  $x_n \in [0, 1]$ 。

CPSO 算法具体的流程描述如图 6 所示。

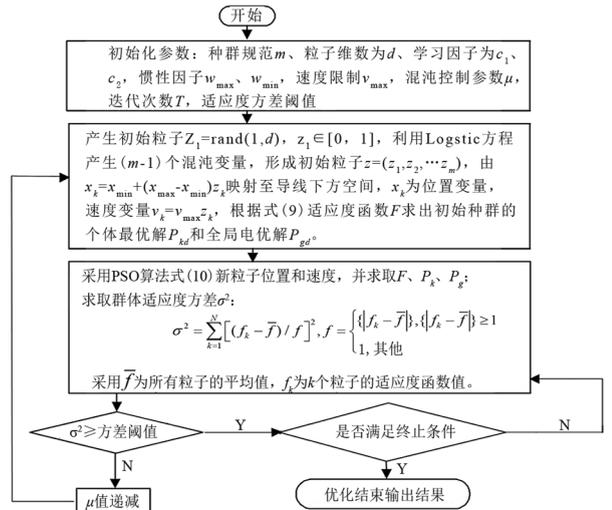


图 6 CPSO 算法流程

由于混沌变量的遍历性和随机性有助于增强种群的搜索能力, 在算法运行过程中, 根据种群的收敛情况, 动态地减小式 (12) 中混沌控制参数  $\mu$ , 降低混沌运动对种群结构的破坏, 摆脱陷入局部最优的困境。

### 3.2 CPSO 算法优化屏蔽仿真实验

以区域目标函数  $F$  作为 CPSO 算法的适应度函数, 并沿下层线路方向架设屏蔽线, 屏蔽线高度  $l_h$  在  $[0, 20]$  区间取值, 水平位置  $l_p$  在  $[-30, 30]$  区间取值。分别对架设单根及两根屏蔽线的位置进行寻优, 得到适应度函数收敛曲线, 如图 7 所示。由图可见, 混沌变参数粒子群优化算法在保证算法能摆脱局部最优的基础上, 明显提高了收敛性能。

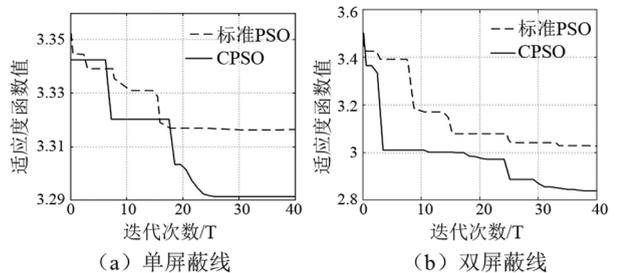


图 7 适应度函数收敛曲线

对屏蔽线架设位置通过 CPSO 算法寻优, 得到的架设位置为: 单屏蔽线  $l_h = 2.32 \text{ m}$ 、 $l_p = -8.49 \text{ m}$ ; 双屏蔽线  $l_{h1} = 3.12 \text{ m}$ 、 $l_{p1} = 7.80 \text{ m}$ 、 $l_{h2} = 2.32 \text{ m}$ 、 $l_{p2} = -8.50 \text{ m}$ 。架设屏蔽线后, 考察  $-40 \text{ m} \sim 40 \text{ m}$  正方形区域内, 交叉线路下方场强如图 8 所示。

(下转第 88 页)

器脉冲电流应力仿真研究[J].高压电器,2018,54(6):113-119.

- [11] 张雷,王康,杨晓平,等.一种改进型换流阀饱和电抗器电流应力分析[J].电力电子技术,2020,54(8):22-25.
- [12] 张雷,刘宁,董妍波,等.特高压直流换流阀电抗器端子发热问题研究[J].高压电器,2016,52(7):50-54.
- [13] 刘磊,汪得利,黄华,等. $\pm 1100$  kV/5455 A 特高压直流换流阀饱和电抗器散热设计与研究[J].高压电器,2020,56(7):23-28.

- [14] 陶敏,姚舒,董妍波,等.特高压换流阀用饱和电抗器的振动研究与优化方案[J].高压电器,2019,55(12):200-204.

作者简介:

唐世雄(1990),男,工程师,主要从事特高压直流换流站运维技术工作;

喻悦箫(1993),女,硕士,主要从事柔性直流输电及电力电子技术研究。

(收稿日期:2021-11-09)

(上接第 56 页)

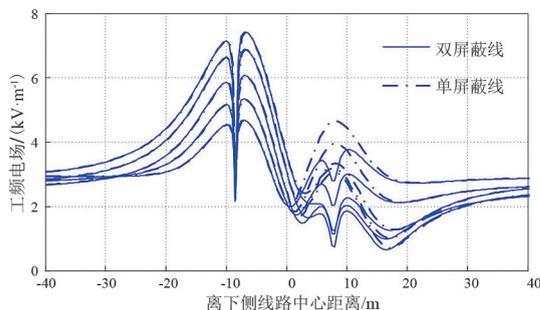


图 8 架设屏蔽线后线路下方不同横断面  $E$  值

架设屏蔽线后交叉线路下方  $E$  值如图 9 所示。

可以看出,CPSO 寻优位置基本在畸变的马鞍面电场峰值附近,架设单屏蔽线可以将加权场强均值从 3.91 kV/m 降至 3.29 kV/m,而架设双屏蔽线降可至 2.85 kV/m,场强峰值位置处降低较明显,屏蔽效果良好。

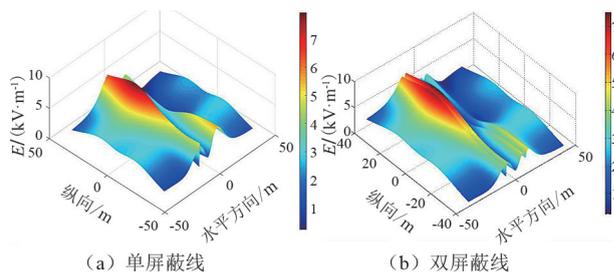


图 9 架设屏蔽线后交叉线路下方  $E$  值

## 4 结论

上面采用有限元法,通过一系列仿真实验,在构造的区域目标函数基础上,研究线路相序布置和交叉角对空间电磁环境的影响,并给出可用于工程的相序排列方式及交叉角建议:为简化设计难度,在满足设计要求时,上层双回路宜采用逆相序布置,交叉

角可适当减小,以降低空间电磁污染。

采用架设屏蔽线的方式改善地面电磁环境,并引入混沌变参数粒子群算法,对屏蔽线架设位置进行目标寻优,寻优过程中,动态减小混沌控制参数值,使算法在迭代过程中逐步减弱混沌运动,进而在保留混沌粒子群优化算法优点的基础上,又增添了粒子群体的多样性,实现快速跳出局部最优点,寻找全局最优解。通过 CPSO 算法对屏蔽线架设位置寻优,实现区域电磁环境屏蔽效果最优。

## 参考文献

- [1] 环境保护部.电磁环境控制限值:GB 8702—2014[S].北京:中国环境科学出版社,2014.
- [2] 宋福根,林韩,兰生.特高压输电线路交叉跨越区域工频电场分布计算[J].电气技术,2016(1):6-10.
- [3] 虎涛涛,单要楠.一种混沌变参数粒子群优化算法[J].自动化仪表,2017,38(3):37-40.
- [4] 肖冬萍,姜克儒,张占龙,等.工频电磁环境条件约束下的超/特高压输电线路结构布局寻优方法[J].中国电机工程学报,2015,35(9):2333-2341.
- [5] 倪正光,杨仕友,钱秀英.工程电磁场数值计算[M].北京:机械工业出版社,2004.
- [6] 陈楠,文习山,刘波,等.高压输电导线三维工频电磁场计算与测量[J].电网技术,2011,35(3):159-164.
- [7] 倪琳,段超,贾春兰.差分进化混合粒子群算法求解项目调度问题[J].计算机应用研究,2011,28(4):1286-1289.

作者简介:

马明智(1987),男,硕士,工程师,主要研究方向为输电线路电气设计与电力系统电磁计算;

杨昌杰(1993),男,助理工程师,主要研究方向为输电线路电气设计。

(收稿日期:2021-10-13)