

DOI: 10.13382/j.jemi.B2104120

优化模拟电流法计算超高压输电线路三维磁场*

欧阳文安 张 菁 胡进才 王大龙 吕 伟
(上海工程技术大学电子电气工程学院 上海 201620)

摘 要:为了获得更准确的输电线路下方磁场的三维分布,使用智能优化算法对模拟电流法中模拟电流的个数与位置参数进行寻优,解决了普通模拟电流法中模拟电流的位置和个数只能依靠经验来确定的问题,从而提高计算精度。建立基于输电线路实际物理形状的三维计算模型,通过不同方法计算上海市松江区洞泾-泗泾 500 kV 线路的三维磁场分布。将计算结果与实际测量结果进行对比,结果表明优化模拟电流法的计算误差为 4.54%,比传统计算方法的 12.21%降低了 7.67%。为优化模拟电流法计算输电线路的磁场分布提供理论基础,并对高压输电线路的建设有理论指导意义。

关键词:超高压输电线路;三维磁场计算;模拟电流法;实测数据

中图分类号: TM937;TN06 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 140.3530

Three-dimensional magnetic field calculation method for EHV transmission line by optimized simulation current method

Ouyang Wenan Zhang Jing Hu Jincai Wang Dalong Lv Wei
(College of Electronic and Electrical Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: In order to obtain a more accurate three-dimensional distribution of the magnetic field under the transmission line, an intelligent optimization algorithm is used to optimize the number and position parameters of the simulated current in simulation current method, which solves the problem that the position and number of the simulated current in the normal simulation current method can only be determined by experience, so as to improve the calculation accuracy. A three-dimensional calculation model based on the actual physical shape of transmission lines was established to calculate the three-dimensional magnetic field distribution of Dongjing-Sijing 500 kV line in Songjiang district, Shanghai by different methods. By comparing the calculation results with the actual measurement results, the results show that the calculation error of the optimized simulation current method is 4.54%, which is 7.67% lower than the 12.21% of the traditional calculation method. It provides a theoretical basis for optimized simulation current method to calculate the magnetic field distribution of transmission lines, and has a theoretical guiding significance for the construction of high-voltage transmission lines.

Keywords: extra-high voltage transmission lines; 3D magnetic field calculation; optimized simulation current method; the measured data

0 引 言

由于电网的规划与发展跟不上城市化进程的步伐,高电压、大电流输电导线不可避免地要经过人口较为密集的小城镇。长期生活在高压输电线下方的人会受到输电线路产生的电磁场的影响^[1-3]。工频电磁场短时间内对人的影响很难以被发现,所以长期被忽略。随着电

磁对环境的影响逐步显现,该问题也受到重视^[4-7]。输电线路的选址和设计应该考虑居民的健康,所以研究工频磁场的分布也能够为输电线路的选址和设计提供理论指导^[8-9]。

目前已经有较多文献对超高压输电线路的磁场分布问题进行研究^[10-13],但多为软件仿真^[14],使用理论计算的方法的较少。矩量法不适合应用在在输电线路^[15-17],有限元法通过对整个求解域进行分解后进行求

解,子区域越多计算越准确,所以其计算量十分庞大^[18-19]。模拟电流法比较适合应用在输电线路的磁场求解,但目前多为二维计算。目前的磁场分布计算方法都基于 Biot-Savart 定律,为了简化计算,大多都进行二维计算,或者将三维模型简化为二维模型进行计算^[20-21]。软件仿真虽然可以得到较为准确的结果,但建模复杂,且计算时间太长,而使用二维模型进行磁场分布计算,虽然计算时间较短,但由于模型与实际不符合,故计算误差较大。

本文提出的磁场分布计算方法,将输电线路的弧垂考虑在内,构建实际的三维计算模型,并用智能优化算法对模拟电流的参数进行寻优后,计算磁场分布,将其与传统计算结果进行比较,并用实测数据验证优化模拟电流法的有效性。

1 计算模型与原理

三相双回逆序高压输电线路三维磁场计算模型如图 1 所示。目前对工频磁场进行求解时,都将其视为准静态场,然后即可使用 Biot-Savart 定律对架空导线周围的磁场分布进行计算。对于一段长为 L 包含源电流 I 的导线,由 Biot-Savart 定律可求得其在点 P 产生得磁场为:

$$\vec{B} = \oint_{(L)} d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \oint_{(L)} \frac{I d\vec{l} \times \vec{r}}{r^2} \quad (1)$$

式中: $d\vec{l}$ 为积分路径 L 的微分; r 为电流元到点 P 的距离; $\vec{r}$ 为电流元指向待求点的单位矢量; μ_0 为真空磁导率。

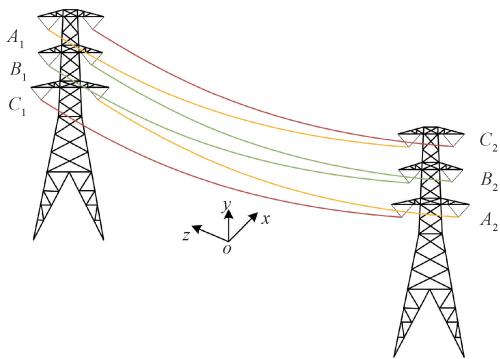


图 1 三相双回输电线路

Fig. 1 Three-phase double-circuit transmission line

模拟电流法属于一种等效替代的方法,基于电磁场的唯一性原理,在导线内部依据经验假设一组模拟电流、匹配点与校验点,用模拟电流产生的磁场来等效替代实际电流产生的磁场。建立方程组,将各模拟电流产生的磁场进行叠加,求解方程组得到模拟电流的值,继而求得待求场域中的任一点的磁场。而模拟电流的个数与位置

会直接影响到方程组的构建,从而影响计算精度,所以问题的关键在于如何确定模拟电流的个数和位置。

2 线路相关计算

为将线路的实际物理模型转换成便于求解的数学模型,需对输电线路进行相关的计算。

2.1 悬链线方程及弧垂计算

架空输电线受自生重力作用和环境的影响,架空线不可能呈直线而应呈悬链线形状^[22]。如图 2(b) 所示, A 、 B 为左右最高点。受到各种因素产生的综合比载 γ 的作用,架空线呈向下弯曲状态,点 O 导线的弧垂最大, σ_A 和 σ_B 为 A 、 B 两点的轴向应力。按图 1 选取坐标轴,在架空线上任选一点 C ,取长为 L_{OC} 的一段架空线为研究对象,如图 2(a) 所示。研究对象在 z 轴和 y 轴方向上受力平衡,那么:

$$\sum Z = 0, \sigma_z \cos \theta = \sigma_0 \quad (2)$$

$$\sum Y = 0, \sigma_z \sin \theta = \gamma L_{OC} \quad (3)$$

式(2)与(3)相除可得:

$$\tan \theta = \frac{\gamma}{\sigma_0} L_{OC} \quad \text{即} \quad \frac{dy}{dz} = \frac{\gamma}{\sigma_0} L_{OC} \quad (4)$$

经过一系列变换后可得悬链线方程为:

$$y = \frac{\sigma_0}{\gamma} ch \frac{\gamma}{\sigma_0} (z + C_1) + C_2 \quad (5)$$

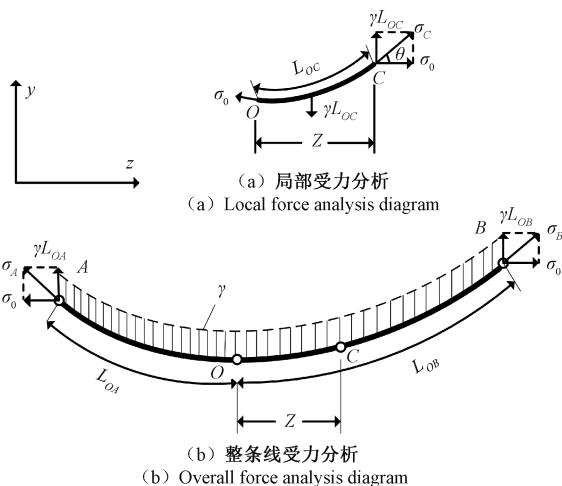


图 2 架空线受力分析

Fig. 2 Overhead line force analysis diagram

为了减小计算量,本文对左右等高架空线进行分析。选取弧垂最大的点为将坐标原点,建立二维直角坐标系,如图 3 所示。

当 $z = 0$ 时, $\frac{dy}{dz} = 0$, 代入式(5) 可解得 $C_1 = 0$; 当 $z =$

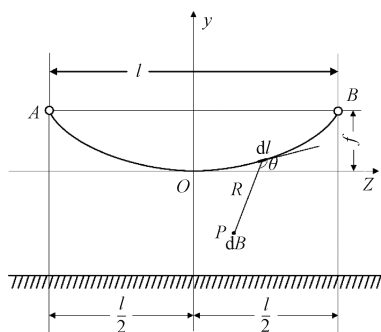


图 3 单根架空线分析图

Fig. 3 Single overhead line analysis diagram

0 时, $y = 0$, 代入式(5) 并利用 $C_1 = 0$, 解得 $C_2 = -\sigma_0/\gamma$ 。将 C_1 、 C_2 的值代入式(5) 并整理得到架空线的悬链线方程:

$$y = \frac{\sigma_0}{\gamma} \left(ch \frac{\gamma}{\sigma_0} z - 1 \right) \quad (6)$$

同时可以计算出最大弧垂 f :

$$f = \frac{2\sigma_0}{\gamma} sh^2 \frac{\gamma l}{4\sigma_0} \quad (7)$$

2.2 等效半径计算

因为模拟电流法需要在每个实际电流中设置多个模拟电流, 每增加一个模拟电流方程组的个数也增加一个, 所以在架空线数量较多, 且分裂根数较多时, 计算量会十分巨大。使用等效导线进行计算可以大大降低计算量^[23], 如图 4 所示, 等效半径计算公式为:

$$r_{eq} = R \sqrt{\frac{nr}{R}} \quad (8)$$

式中: r_{eq} 为等效导线半径; n 为分裂数。

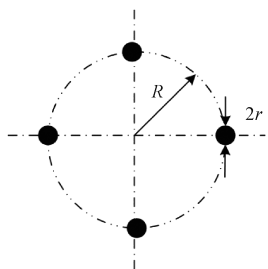


图 4 分裂导线示意

Fig. 4 Schematic diagram of split wire

3 磁场计算方法

3.1 传统计算方法

传统的的计算方法要么直接进行二维磁场分布计算, 要么将三维模型降到二维后进行计算。

将每条导线的悬链线近似看成平行于地面距地面高

度为 h 的无限长直导线, 结合导线的载流量, h 可由公式计算:

$$h = H - \frac{2}{3} \cdot f \quad (9)$$

式中: H 为导线悬挂点高度; f 为最大弧垂。

由于将架空线路视作无限长直导线, 所以模拟电流也选为放置在导线内部的无限长直电流。选取空间中点 S 为磁位参考点, 其磁位系数 $\vec{P}$ 和磁感应强度系数 $\vec{f}$ 为:

$$\vec{P} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left(\frac{r_0}{R} \right) \vec{e}_z \quad (10)$$

$$\vec{f} = \frac{\mu_0}{2\pi R} \vec{e}_\alpha \quad (11)$$

式中: r_0 为电流到点 S 的距离; μ_0 为磁导率; R 为实际电流到待求点的距离; $\vec{e}_z$ 为电流在待求点产生的单位磁位; $\vec{e}_\alpha$ 为电流在待求点产生的单位磁场。

假设有 n 个模拟电流, 其值为 I_n , 相应就有 n 个匹配点, 第 j 个匹配点的坐标为 (x_j, y_j) 。那么场域内任一点 $P(x, y)$ 的磁位为:

$$A_p = \sum_{j=1}^n P_j I_j \quad (12)$$

由 $B = \nabla \times A$ 可知, 点 P 处的磁感应强度为:

$$\vec{B}_p = \frac{\partial A_p}{\partial y} \vec{e}_x - \frac{\partial A_p}{\partial x} \vec{e}_y = B_{px} \vec{e}_x + B_{py} \vec{e}_y \quad (13)$$

其中:

$$B_{px} = \sum_{j=1}^n \frac{\mu_0 I_j}{2\pi} \cdot \frac{y_j - y}{(x - x_j)^2 + (y - y_j)^2} \quad (14)$$

$$B_{py} = \sum_{j=1}^n \frac{\mu_0 I_j}{2\pi} \cdot \frac{x - x_j}{(x - x_j)^2 + (y - y_j)^2} \quad (15)$$

将各分量合成, 则点 P 处的磁感应强度为:

$$B_p = \sqrt{B_{px}^2 + B_{py}^2} \quad (16)$$

3.2 优化模拟电流法

对图 2 单根导线进行分析, 如图 3 所示: 整档架空线的每一段电流元 Idl 都会对空间中任意一点 P 产生元磁场 dB , 并且方向一致。故点 P 处的磁感应强度为 dB 在整档架空线上的积分为:

$$B = \int_A^B dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_A^B \frac{Idl \sin \theta}{R^2} \quad (17)$$

将所有电流产生的磁场合并, 即可求得点 P 实际磁场。

在模拟电流法中, 磁场计算的准确率很大程度上依赖于模拟电流的位置和数量的选取。这些参数的取值是依靠经验来确定的, 而经验具有不确定性, 所以计算精度难以保证。为了找出最佳的模拟电流的位置和数量, 构建了由两个计算误差组成的适应度函数。这两个误差分

别为磁位误差和磁感应强度误差。

本文使用粒子群算法来对模拟电流的位置和个数参数进行寻优,其流程如图 5 所示。将模拟电流法封装成一个自变量为模拟电流位置和个数的函数。初始化后,计算每次调用模拟电流法函数的结果,再求出适应度函数,粒子群算法被用来进行寻优,直至达到停止条件,最后输出最优解及此时的模拟电流的位置和个数。再将此参数应用在模拟电流法上,对空间中的磁场分布进行求解。

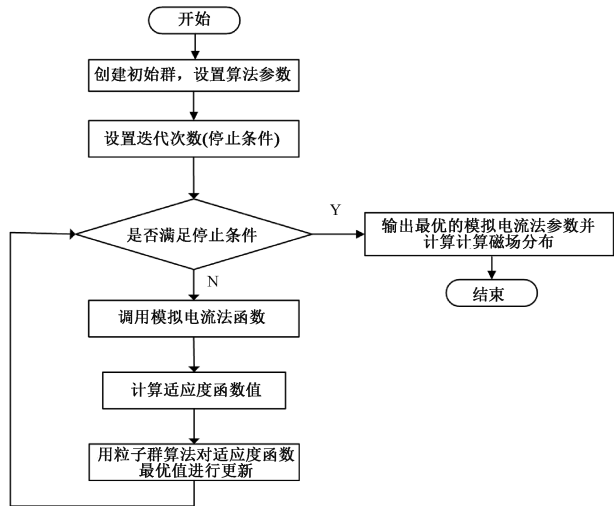


图 5 优化模拟电流法流程

Fig. 5 The flow chart of optimized simulation current method

4 现场测量

为验证本文优化模拟电流法的有效性,选取上海市松江区洞泾-泗泾 500 kV 超高压输电线路产生的磁场进行实际测量验证。测量仪器使用的是安诺尼(中国)科技有限公司生产的 NF-5035S 低频电磁场辐射测试套装,其内置 3D 磁场探头频率范围是 1 Hz~20 MHz,磁场测量范围是 100PT-20 MT,最小采样时间为 10 ms,精度为 3%。

测量时,为排除人体影响,将测量仪器放置在可升降木制三脚架上,用型号为 SN310940 的 10 m 光纤连接仪器与 PC。使用配套的 MCS 频谱分析软件测量数据,测量时天气晴朗,平均气温为 18 ℃。为减小误差,在同一位置多次测量计算平均值作为此点磁场强度的大小。

5 算例与结果分析

图 6 所示为 500 kV 三相双回输电线路,表 1 为各参数。为简化问题,计算悬链线方程时,不考虑覆冰及横向风等特殊比载。线路参数均来自于当地变电站。



图 6 实际输电线路

Fig. 6 Physical transmission line

分别用不同的方法对表 1 数据的模型进行求解,得到离地面 1.5 m 处的磁场分布,对结果进行对比分析。

表 1 500 kV 三相双回线路参数

Table 1 500 kV three-phase double circuit line parameters

参数	500 kV 三相双回线路	
导线材料	钢芯铝绞线	
A 相位置坐标/m	$A_1(-6.25, 58.28, -190.5)$	$A_2(6.34.37, -190.5)$
B 相位置坐标/m	$B_1(-6.46.52, -190.5)$	$B_2(5.5, 46.52, -190.5)$
C 相位置坐标/m	$C_1(-6.5, 34.37, -190.5)$	$C_2(5.75, 58.28, -190.5)$
档距/m	381	
电压等级/kV	500	
运行电流/A	736	
导线型号	LGJ-630/45	
分裂数	6	
分裂间距/mm	450	
分裂子导线横		
截面积/mm ²	630	

图 7 和 8 所示分别为传统方法与优化模拟电流法的计算结果。

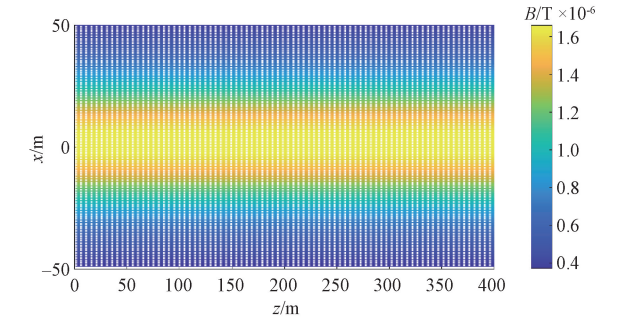


图 7 普通方法计算结果

Fig. 7 Normal method calculation result

图 9 和 10 所示为以弧垂最低点为原点,沿图 1 中 x

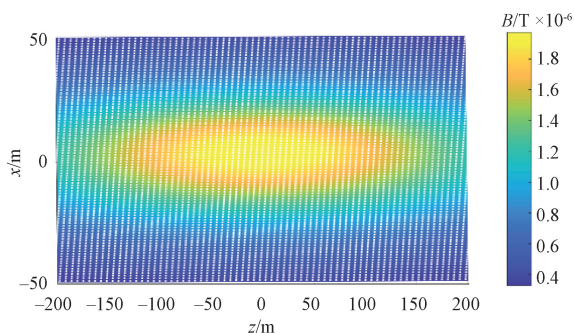
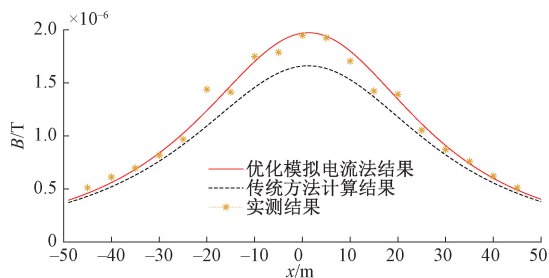
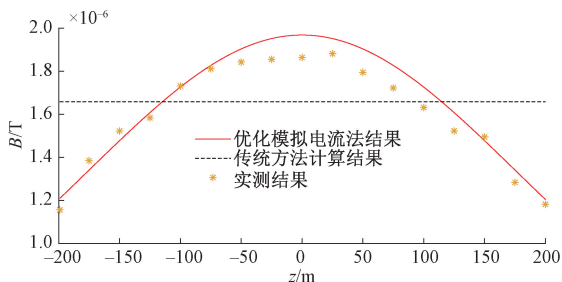


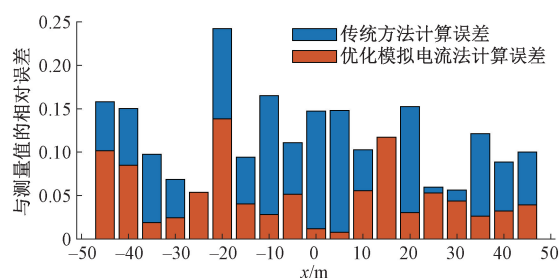
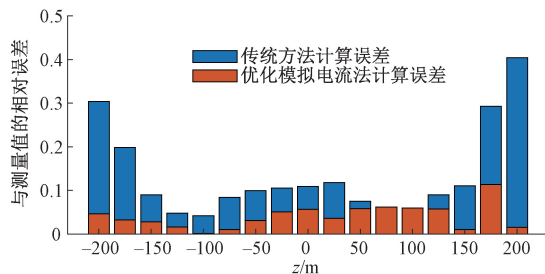
图 8 优化模拟电流法计算结果

Fig. 8 Calculation results of the optimized simulation current method

图 9 x 轴方向磁场分布Fig. 9 Magnetic field distribution in the x -axis direction图 10 z 轴方向磁场分布Fig. 10 Magnetic field distribution in the z -axis direction

轴和 z 轴方向的磁场分布对比结果。可以看出,沿 x 轴方向,传统计算方法和优化模拟电流法得到的结果磁场分布趋势一致,而沿 z 轴方向,由于传统计算方法将导线视为直线,所以其结果在 z 轴方向不变,误差较大。

以实测数据为标准,分别计算不同方法沿 x 轴和沿 z 轴方向的磁场分布相对误差。如图 11 和 12 所示,计算各个测量点的相对误差后,取平均值。沿 x 轴方向,普通计算方法和优化模拟电流法的相误差分别为 11.33% 和 5.04%,沿 z 轴方向相对误差分别为 13.08% 和 4.04%。综合 x 轴和 z 轴分析,普通计算方法与优化模拟电流法的误差分别为 12.21% 和 4.54%,证明了优化模拟电流法比普通计算方法得到的结果更符合实际,更可信。

图 11 沿 x 轴误差对比Fig. 11 X -axis error comparison图 12 沿 z 轴误差对比Fig. 12 Z -axis error comparison

6 结 论

本文将分裂导线进行等效,从而减小计算量,再结合输电线路的实际物理形状,建立输电线路的三维模型。使用智能寻优算法找出模拟电流法的最佳的位置和个数参数后,对三维磁场分布进行求解。

使用传统方法和优化模拟电流法分别对实际的 500 kV 输电线路磁场分布进行求解,再利用仪器测量的磁场分布来计算相对误差。得到优化模拟电流法计算的相对误差,从传统计算方法误差的 12.21% 下降到 4.54%。

总体来说,使用优化模拟电流法对输电线路的磁场分布进行求解,其求解精度要高于传统方法,且计算量远远小于软件仿真。本方法填补了模拟电流法计算三维磁场分布的空缺,对磁场的理论计算研究提供帮助,也对高压输电线路的设计提供理论指导。

参考文献

- [1] TALAAT M. Calculation of electrostatically induced field in humans subjected to high voltage transmission lines [J]. Electric Power Systems Research, 2014, 108:124-133.
- [2] 郝炳金. 磁场对人体的作用机理探析 [J]. 中国科技信息, 2014(11):52-53.
- [3] HAO B J. The mechanism of magnetic field on the human body [J]. China Science and Technology Information, 2014(11):52-53.
- [4] 田子山. 交流架空输电线路附近工频电场及其人体

- 内感应电流计算研究[D]. 重庆:重庆大学,2013.
- TIAN Z SH. Calculation of power frequency electric field from AC overhead transmission lines and induced current in human body [D]. Chongqing: Chongqing University,2013.
- [4] 朱普轩,杨光,贺建国,等.超/特高压输电线路电磁环境限值标准探讨[J]. 电网技术,2010,34(5):201-206.
- ZHU P X, YANG G, HE J G, et al. Several suggestions for electromagnetic environment of EHV and UHV transmission lines in China [J]. Power System Technology, 2010, 34(5):201-206.
- [5] 王琴,苏海峰,包家立,等.高压输电线路环境电磁场暴露健康效应的原初作用[J]. 高电压技术,2013,39(1):193-200.
- WANG Q, SU H F, BAO J L, et al. Primary reaction for the environmental electric and magnetic fields exposure around high voltage transmission line on health effects[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(1):193-200.
- [6] 苏超,刘振声,李黎,等.220 kV 架空输电线路下工频电场的电磁感应仿真分析[J]. 广东电力,2018,31(1):106-112.
- SU CH, LIU ZH SH, LI L, et al. Simulation analysis on electromagnetic induction of power frequency electric field under 220 kV overhead transmission lines [J]. Guangdong Electric Power, 2018,31(1):106-112.
- [7] 马其燕,崔翔,胡榕,等.特高压串补装置瞬态地电位升和电磁骚扰的测量方法和系统[J]. 高电压技术,2015,41(1):313-319.
- MA Q Y, CUI X, HU R, et al. Measurement method and system for transient platform potential rise and electromagnetic disturbance of ultra-high voltage series compensation device [J]. High Voltage Engineering, 2015,41(1):313-319.
- [8] 汪茜雯,田瑾,吴飞,等.一种基于有限元法的超高压输电线路三维电场计算方法[J]. 电子测量与仪器学报,2019,33(4):103-110.
- WANG R, TIAN J, WU F, et al. Three-dimensional electric field calculation method for EHV transmission line based on finite element method [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(4):103-110.
- [9] 潘茜雯. 500 kV 同塔双回紧凑型输电线路电磁环境研究[D]. 长沙:长沙理工大学,2017.
- PAN Q W. Analysis on electromagnetic environment of 500 kV double circuits on the same tower compact transmission lines [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology,2017.
- [10] 刘士利,王泽忠,孙静.基于线-面模型的边界元法计算特高压交流变电站设备附近工频电场[J]. 电工技术学报,2011(3):162-167.
- LIU SH L, WANG Z ZH, SUN J. Calculation of power frequency electric field near equipments in UHV substations with BEM based on line-area models [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011(3):162-167.
- [11] 陈楠,文习山,蓝磊,等.交叉跨越输电导线三维工频电磁场计算[J]. 高电压技术,2011,37(7):1752-1759.
- CHEN N, WEN X SH, LAN L, et al. Calculation and measurement of three-dimensional power frequency electrical and magnetic field under transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(7):1752-1759.
- [12] 潘茜雯,罗日成,唐祥盛,等.500 kV 同塔双回紧凑型输电线路电磁环境分析[J]. 高压电器,2017,53(11):183-190.
- PAN Q W, LUO R CH, TANG X SH, et al. Analysis on electromagnetic environment of 500 kV compact transmission line with double circuits on the same tower [J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(11):183-190.
- [13] 邢金,江波,赵伟,等.保护用大电流互感器抗电磁干扰能力的等效测试方法[J]. 清华大学学报(自然科学版),2013,53(7):1025-1029.
- XING J, JIANG B, ZHAO W, et al. Equivalent testing methods for shielding of heavy protective current transformers [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2013,53(7):1025-1029.
- [14] 同嘉.基于BIM全景可视化的架空电力线磁场三维仿真计算研究[J]. 高压电器,2020,56(3):175-181.
- TONG J. Study of overhead power line magnetic field 3D simulation calculation based on BIM panoramic visualization [J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(3):175-181.
- [15] MITSUFUJI K, MATSUAWA S, HIRATA K, et al. A ferrofluid motion analysis with particle method and magnetic moment method [C]. Electromagnetic Field Computation, IEEE, 2016.
- [16] 黄韬,吕建红,彭继文,等.基于矩量法的输电线路工频电磁场实测与计算分析[J]. 高压电器,2013,49(2):30-36.
- HUANG T, LV J H, PENG J W, et al. Calculation of power frequency electromagnetic field around transmission line based on moment method [J]. High Voltage Apparatus, 2013,49(2):30-36.
- [17] ZHANG X, KANG X, CHEN X, et al. Measurement of

- far field magnetic moment vector of a moving ferromagnetic object[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(18):10903-10912.
- [18] ELISEE J P, GIBSON A, ARRIDGE S. Combination of boundary element method and finite element method in diffuse optical tomography[J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2010, 57(11):2737-2745.
- [19] TAMITANI S, TAKAMATSU T, OTAKE A, et al. Finite-element analysis of magnetic field problem with open boundary using infinite edge element[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2011, 47(5):1194-1197.
- [20] 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.
CHENG N, WEN X SH, LIU B, et al. Calculation and measurement of three-dimensional power frequency electrical and magnetic field under transmission line[J]. Power System Technology, 2011, 35(3):159-164.
- [21] 王凯奇,沈立群,张华,等. 500kV 超高压输电线路附近工频磁场分析[J]. 电气技术,2016(6):70-73.
WANG K Q, SHENG L Q, ZHANG H, et al. Power frequency magnetic field analysis of 500kV EHV transmission lines[J]. Electrical Engineering, 2016(6):70-73.
- [22] EL DEIN A Z, WAHAB M A A, HAMADA M M, et al. The effects of the span configurations and conductor sag on the electric-field distribution under overhead transmission lines [J]. IEEE Transactions on Power

Delivery, 2010, 25(4):2891-2902.

- [23] WANG R, TIAN J, WU F, et al. PSO/GA combined with charge simulation method for the electric field under transmission lines in 3D calculation model [J]. Electronics, 2019, 8(10):1140.

作者简介



欧阳文安,2019 年于上海工程技术大学获得学士学位,现为上海工程技术大学硕士研究生,主要研究方向为电磁场理论计算。

E-mail: 15201822967@163.com

Ouyang Wenan received his B. Sc. degree from Shanghai University of Engineering Science in 2019. Now he is a M. Sc. candidate at Shanghai University of Engineering Science. His main research interest includes theoretical calculation of electromagnetic field.



张菁(通信作者),分别在 1991 年和 2005 年于上海交通大学获得学士学位和硕士学位,现为上海工程技术大学副教授,主要研究方向为电气工程及其自动化。

E-mail: zj2015@sues.edu.cn

Zhang Jing (Corresponding author) received her B. Sc. and M. Sc. both from Shanghai Jiao Tong University in 1991 and 2005, respectively. Now she is an associate professor at Shanghai University of Engineering Science. Her main research interests include electrical engineering and automation.