

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.06.009

特高压直流输电线环评中的逆问题研究

宋艳¹, 秦浩浩², 李阳阳³

(1. 国网湖北省电力公司, 武汉 430077; 2. 国网电力科学研究院, 武汉 430070;
3. 武汉智网兴电科技开发有限公司, 武汉 430070)

摘要:为了更好地对直流输电线路进行环境评估,得到详细的合成电场分布,文中针对直流输电线下合成电场的逆问题进行了研究。通过建立逆问题模型与方程,采用主元加权—修正 Newton 法对方程求解,得到输电线路的模拟场源参数,精确的计算出了直流输电线下合成电场值。结果表明:该方法有效的解决了逆问题的病态性、收敛速度问题,只需要均匀测量 8 个点左右即可获得一个准确的线下电场强度分布情况。在环评过程中,可以减少大量的测量工作。

关键词:合成电场; 逆问题; 主元加权—修正 Newton 法

Study on the Electric-field Inverse Problem in the Environmental Evaluation of UHVDC Transmission Lines

SONG Yan¹, QIN Haohao², LI Yangyang³

(1. State Grid Hubei Electric Power Company, Wuhan 430077, China;
2. State Grid Electric Power Research Institute, Wuhan 430072, China;
3. Wuhan Smart Grid Electric Power Information Technology Development Co., Ltd., Wuhan 430070, China)

Abstract: By establishing inverse problem model and equation, the solution of the equation was solved by the principal component weighted-modified Newton method, the simulation field source parameters of transmission line were obtained, and the electric field value of DC transmission line was calculated. The results show that: by this method the inverse problem of morbid state and the speed of convergence were solved effectively, the distribution of electric field intensity can be obtained by a uniform measurement of 8 points. In the environmental impact assessment process, this can reduce a lot of measurement work.

Key words: synthetic electric field; calculating inverse problem; principal component weighted-modified Newton method

0 引言

由于直流输电线路下电场会随着负载、风速、湿度、污秽等因素而发生变化,采用一般的电场数值计算方法不能有效地对环境测评时的电场分布进行数值计算^[1-7],而直接测量线下所有点的电场强度工作量巨大。常用的拟合方法往往需要均匀分布各个测点位置,在实际测评过程中,由于地理位置、设备原因,不可能均匀的分布测点位置,为了更好的评估直流输电线下电场的详细分布,文中基于静电场的

唯一性定理采用逆问题的方法对输电线下地面的电场值进行计算,即通过测量输电线下方地面一定数量测点的合成电场强度,采用逆问题的方法反向计算出场源参数,通过计算得到的场源参数来正向计算输电线下方地面其他点处的实际电场分布^[8-11]。

采用模拟电荷法,直流输电线路下电场与模拟电荷呈非线性关系,可以把该问题归结为非线性方程组的求解问题,其数学模型可以抽象为 $Fq=E$,其中: F 为非线性算子; q 为模拟电荷量; E 为测得的电场值。目前对于非线性方程组的求解方法有:主元加权迭代法^[12]、共轭向量基算法^[13]、修正 Newton 迭代

收稿日期:2016-01-05; 修回日期:2016-03-21

法^[14]、遗传算法^[15]、模拟退火法^[16]等。但是这些算法在收敛速度、精确度适用性等方面都有一定的局限性,不能对所有的非线性方程组进行求解。

根据非线性算子 F 的相关特性通过主元加权方法改善算子的病态程度,结合了修正 Newton 算法,提高算法的收敛速度,计算出了直流输电线路下方的合成电场分布。采用有限元—有限体积法^[17-19]对合成电场进行正问题计算,验证了方法的准确性。

1 问题的方法原理

1.1 建立模型与目标方程

以±800 kV 双极直流输电线路为例,横截面及测点分布见图 1。

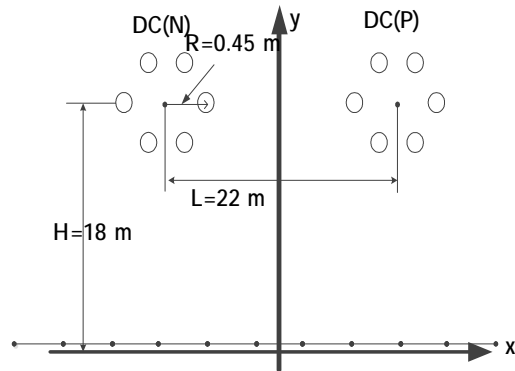


图 1 ±800 kV 同塔双极直流输电线路剖面示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the ±800 kV same tower bipolar DC transmission line profile

采用模拟电荷法^[20],基于静电场的唯一性定理及叠加原理,将空间电荷与导线产生的电场等效于导线内模拟电荷产生的电场,从而得到广义的电场系数矩阵 F 。

对图 1 中每根子导线,设置 1 个模拟线电荷,模拟电荷的位置设置在导线的中心。设 N 为模拟电荷数,则 $N=12$, M 为测点的个数。由模拟电荷法可得到

$$E=F(q). \quad (1)$$

式(1)中: q 为模拟电荷的大小; E 为测点的电场强度值。由于模拟电荷与测点的电场强度为非线性关系,且测点的个数不确定,所以方程(1)为不定非线性方程组, F 为非线性算子。

通常将该方程转换为二次泛函的形式,即

$$\phi(q)=\frac{1}{2}[E-F(q)]^T[E-F(q)]. \quad (2)$$

函数 $\phi(q)$ 的极小点 q^* 即为不定方程组(1)的最小二乘解。设 $g(q)$ 为 $\phi(q)$ 的梯度函数,则 $\phi(q)$ 取极值的必要条件即为

$$g(q)=\nabla\phi(q)=\frac{1}{2}[F'(q)]^T[E-F(q)]=0. \quad (3)$$

式(3)中,

$$F'(q)^T=(\frac{\partial F}{\partial q})^T=\begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial q_1} & \dots & \frac{\partial F_m}{\partial q_1} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial F_{1m}}{\partial q_n} & \dots & \frac{\partial F_m}{\partial q_n} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

1.2 非线性逆问题的线性化

对于式(3),可以通过分段线性化来进行求解。设 $q^*=q+\delta q$ 为方程(3)的精确解,对 $F(q^*)$ 在 q 处进行 Taylor 展开

$$F(q^*)=F(q)+F'(q)\delta q+\frac{1}{2!}F''(q)\delta q^2+\dots+\frac{1}{(k-1)!}F^{(k-1)}(q)(\delta q)^{(k-1)}+R(q,\delta q). \quad (5)$$

式(5)中, $R(q,\delta q)$ 为余项,忽略其高阶无穷小量,取 Taylor 展开式的前两项来近似代替 $F(q^*)$,得到

$$F(q^*)\approx F(q)+F'(q)\delta q. \quad (6)$$

由于 $E=F(q^*)$,所以对于接近 q^* 的 q 值,可以得到不定线性方程

$$E-F(q)\approx F'(q)\delta q. \quad (7)$$

从而就将对非线性方程的求解转化为对线性方程的求解。

1.3 主元加权法及阻尼最小二乘法简介

1.3.1 主元加权法

为便于表示,设 $G(q)=F'(q)$,则 $G(q)$ 为 $M\times N$ 矩阵,对式(7)两边乘以 $G^T(q)$,构造对称矩阵^[13]

$$G^T(q)G(q)\delta q=G^T(q)[E-F(q)]. \quad (8)$$

为解决方程组的病态性,对系数矩阵的主元进行加权^[2],形式为

$$G^T(q)G(q)+\lambda I. \quad (9)$$

式(9)中, I 为单位矩阵; λ 为加权因子。

由文[13]可得方程(8)可以转换为

$$\delta q=[G^T(q)G(q)+\lambda I]^{-1}G^T(q)[E-F(q)]+[G^T(q)G(q)+\lambda I]^{-1}\lambda I\delta q. \quad (10)$$

式(10)可以转换为

$$\delta q_{k+1}=b+A\delta q_k. \quad (11)$$

式(11)中: $b=[G^T(q_k)G(q_k)+\lambda I]^{-1}G^T(q_k)[E-F(q_k)]$;

$$A=[G^T(q_k)G(q_k)+\lambda I]^{-1}\lambda I.$$

选择合适的初始值 $q_0,\delta q_0$ 以及收敛条件,即可求得方程组的解。

1.3.2 阻尼最小二乘法

由于式(8)的系数矩阵存在很大的病态性,需要对其进行处理。阻尼最小二乘法^[14]通过增加一个阻尼项 μI 来改变矩阵的病态程度。即

$$\delta q=[G^T(q)G(q)+\mu I]G^T(q)[E-F(q)]. \quad (12)$$

式(12)中:阻尼因子 μ 一般取在 $10^{-2}\sim 10^{-4}$ 之间。

对式(12)进行转换有以下迭代格式

$$q_{k+1} = q_k + [G^T(q_k)G(q_k) + \mu I]^{-1} G^T(q_k) [E - F(q_k)] \quad (13)$$

由于在迭代格式中加入阻尼因子,影响了迭代法的收敛速度,需要选取合适的初值来提高算法的收敛速度。

1.4 主元加权—修正 Newton 法

由于主元加权法及阻尼最小二乘法中加权因子的设置不合理会导致算法的收敛速度变慢,运算量过大;而修正 Newton 法可以大大提高算法收敛速度及解的精确度。结合两种方法的优点提出了主元加权—修正 Newton 法来对式(7)进行求解。

1.4.1 主元加权

对方程(8)进行加权预处理,降低方程的病态程度,得到

$$\delta q_{k+1} = [G^T(q)G(q) + \lambda I]^{-1} G^T(q) [E - F(q) + \lambda I \delta q_k] \quad (14)$$

选取初值 q_0 直接求解方程(8)得到 δq 的初值,然后带入方程(14),设置合适的收敛条件,从而获得一个较好的初始值 $q_1 = q_0 + \delta q_{k-1}$ 。

1.4.2 修正 Newton 法

根据式(10),构成以下 Newton 迭代格式

$$q_{k+1} = q_k + [I + \lambda IG^T(q_k)G(q_k)]^{-1} * \{ [G^T(q_k)G(q_k)]^{-1} + \lambda I \} G^T(q_k) [E - F(q_k)] \quad (15)$$

为便于表述,设

$$A(q) = [I + \lambda IG^T(q)G(q)]^{-1} \{ [G^T(q)G(q)]^{-1} + \lambda I \} G^T(q) \quad (16)$$

则有

$$q_{k+1} = q_k + A(q_k) [E - F(q_k)] \quad (17)$$

把 m 步的 Newton 步合并成一步,并加入下山因子,可以得到

$$\begin{cases} q_{k,0} = q_k \\ \overline{q_{k,j}} = q_{k,j-1} + A(q_k) [E - F(q_{k,j-1})] \\ q_{k,j} = \eta \overline{q_{k,j}} + (1-\eta)q_{k,j-1} \\ q_{k+1} = q_{k,m} \end{cases} \quad (18)$$

式(18)中: $j=1,2,\dots,m; k=1,2,\dots; 0 < \eta \leq 1$ 为下山因子,在文中, m 取 2。

将式(14)所得初值带入式(18),选择合适的下山因子,设置相应的收敛条件,从而获得方程的解。

2 实例验证

对于图 1 中的模型,在地面依次设置 20 个测点,具体分布见图 2,相邻间距为 5 m,从而得测点的横坐标为 -46, -41, ..., 44, 49 m,纵坐标为 0 m。为了验证文中逆问题算法的正确性,即在考虑外加测量误差或干扰的影响时逆问题解的适定性,进行验证计算。采用有限元—有限体积法^[4]计算了地面 -50 m

至 50 m 处均匀分布的 101 个点的合成电场值,作为测点电场强度的标准值,然后将设置的 20 个测点的标准值加上一个随机产生的 $\pm 10\%$ 以内的误差,以此来作为各测点的模拟测量值。模拟电荷初始值取导线未起晕时的模拟电荷值,以加快收敛。笔者根据上述 20 个点的模拟测量值,采用 3 种方法分别求出模拟电荷值,然后根据模拟电荷法的原理计算出线路下方地面 -50~50 m 处均匀分布的 101 个点的合成电场值,与有限元—有限体积法的计算结果进行比较,具体见图 2-4。

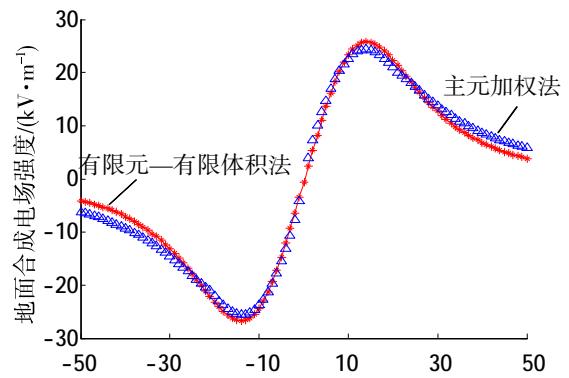


图 2 基于有限元—有限体积法的计算结果与主元加权法计算结果对比

Fig. 2 Comparison of the results of the finite element-finite volume method and the weighting method of the main element method

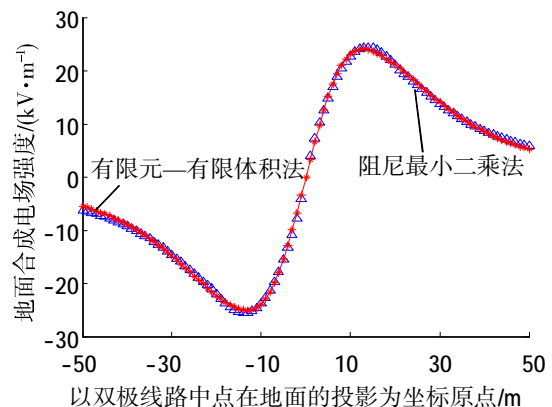


图 3 基于有限元—有限体积法的计算结果与阻尼最小二乘法计算结果对比

Fig. 3 Comparison of the results of finite element finite volume method and damping least square method

从图 2-4 可以看出,这 3 种方法都可以对直流线路地面合成电场的逆问题进行计算分析,但图 4 的效果最好,解的相对误差最小。

3 种方法的结果与基于有限元—有限体积法的计算结果的相对误差见图 5,从图 5 中可以看出,采用文中所提出的方法其相对误差基本小于 5%,相比其他两种方法优势明显。

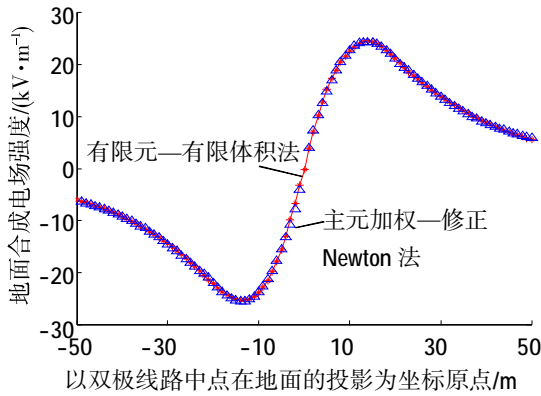


图 4 基于有限元—有限体积法的计算结果与主元加权—修正 Newton 法计算结果对比

Fig. 4 Comparison of the results of finite element-finite volume method and weighted-modified Newton method for calculation of principal element

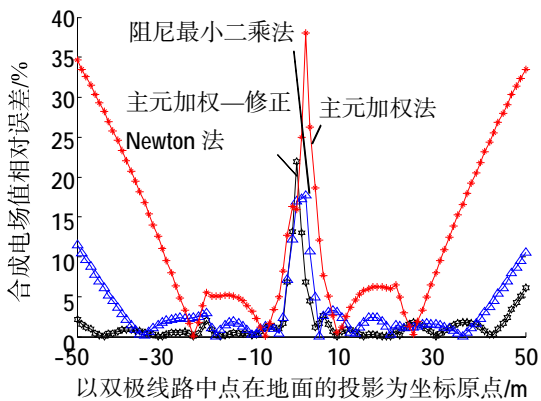


图 5 3 种方法的相对误差

Fig. 5 Relative error of the three methods

3 测点数目的影响

研究的主要目的是如何在环境测评中减少测量工作的情况下获得电场的详细分布情况。该节基于主元加权—修正 Newton 法分别计算了不同测点个数情况下获得的电场值。

采用主元加权—修正 Newton 法分别对随机分布的 15、13、10、8、6 个测点的情况进行了计算, 获得了测点个数不同情况下的导线模拟电荷量, 继而根据模拟电荷法得到了线路下方地面 -50~50 m 处均匀分布 101 个点的合成电场值, 表 1 为不同测点个数情况下 101 个点电场值与基于有限元—有限体积法的计算值的相对误差分布。

从表 1 中可以得出, 当测点数为 6 时, 有 18 个点的相对误差在 10% 以上, 测点数为 8 时有 6 个点的相对误差在 10% 以上。在环境测评中, 应用本方法可以大量减少测量工作, 对于特高压直流输电线路下方的合成电场, 测量 8~10 个点即可获得较理想的地面电场详细分布情况。

表 1 不同测量点数情况下 101 个点的相对误差分布
Table 1 The distributions of 101 points' relative error under different measurement points

测点数	30%~40%	20%~30%	10%~20%	5%~10%	0~5%
6	0	1	17	15	68
8	0	2	4	10	85
10	0	0	2	6	93
13	1	2	1	2	95
15	0	2	1	4	94

5 结论

根据特高压直流输电线路下合成电场的基本原理, 提出了地面合成电场的逆问题, 采用主元加权—修正 Newton 法有效的解决了该问题的病态性及收敛性, 并对测点个数对计算准确度的影响进行了分析。

1)建立了直流输电线路下地面合成电场逆问题的非线性不定方程。

2)提出了一种主元加权与修正 Newton 法相结合的迭代方法, 有效地解决了逆问题存在的病态性和收敛速度较慢的问题。

3)利用文中提出的方法对测点个数进行了分析, 在测量 8-10 个点的情况下即可准确的获得地面其他点处的合成电场分布, 误差范围可以控制在 5% 以内, 减少了大量的测量工作。

参考文献:

[1] 张文亮, 于永清, 李光范, 等. 特高压直流技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(22): 1-7.
ZHANG Wenliang, YU Yongqing, LI Guangfan, et al. Researches on UHVDC technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(22): 1-7.

[2] 邵方殷. 我国特高压输电线路的相导线布置和工频电磁环境[J]. 电网技术, 2005, 29(8): 1-7.
SHAO Fangyin. Phase conductor configuration and power frequency electromagnetic environment of UHV transmission lines in China[J]. Power System Technology, 2005, 29(8): 1-7.

[3] CARSTEA I, CARSTEA D. An inverse problem for electric stress in cable terminations[C]//8th International Conference on Telecommunications in Modern Satellite, Cable and Broadcasting Services.[S.I.]: IEEE, 2007: 565-568.

[4] KEIKKO T, ISOKORPI J, KORPINEN L. Electric fields in 400 kV transmission lines[C]//International Conference on Electric Power Engineering, Budapest, Hungary: IEEE, 1999: 1288-1289.

- [5] FLORKOWSKA B, JACKOWICZ-KORCZYNSKI A, TIMLER M. Analysis of electric field distribution around the high-voltage overhead transmission lines with an ADSS fiber-optic cable[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(3): 1183-1189.
- [6] LEE D I, SHIN K Y, LEE S D. Technique to decrease the electric field intensity on conductor surface using the asymmetrical-sized conductor bundle [C]//2008 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference. Chicago, USA: IEEE, 2008: 529-534.
- [7] 盛 锋, 周怀春, 韩曙东. 基于图像处理及辐射传热逆问题求解的二维炉膛温度场重建 [J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(10): 1-5.
SHENG Feng, ZHOU Huaichun, HAN Shudong. Reconstruction of temperature profiles in two dimensional furnaces from radiation image by solving inverse radiative heat transfer problem[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(10): 1-5.
- [8] 何 为, 杨 浩. 应用结合方法求解三维胸腔电流场逆问题[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(1): 85-88.
HE Wei, YANG Hao. Solving inverse problem of ECG current field using a combining method within a three dimensional thorax[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(1): 85-88.
- [9] 刘晓明, 郭 娜, 朱冬梅. 高压 SF₆ 断路器灭弧室电场逆问题求解研究[J]. 沈阳工业大学学报, 2006, 28(4): 384-387.
LIU Xiaoming, GUO Na, ZHU Dongmei. Study on inverse problem of electric field for high voltage SF₆ arc quenching chamber[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2006, 28(4): 384-387.
- [10] 杨 帆, 何 为, 何永长, 等. 高压输电线环境评估中的电场逆问题研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(25): 98-103.
YANG Fan, HE Wei, HE Yongchang, et al. Study on the electric-field inverse problem in the environmental evaluation of HV transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(25): 98-103.
- [11] 杨 帆. 电力设备工频电场正问题计算以及逆问题的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2008.
YANG Fan. Study on forward and inverse problem of power frequency electric field of transmission and distribution apparatuses and power frequency electromagnetic environment[D]. Chongqing: Chongqing University, 2008.
- [12] 唐 丽, 李鹏飞. 主元加权迭代法求解病态线性方程组[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(2): 381-383.
TANG Li, LI Pengfei. A pivot element weighting iterative method for solving ill-conditioned linear equations[J]. Science Technology and Engineering, 2012, 12(2): 381-383.
- [13] 刘继军. 不适定问题的正则化方法及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2005.
LIU Jijun. Regularization methods for ill posed problems and its application[M]. Beijing: Science Press, 2005.
- [14] 陈淑铭, 乔田田. 一个求解非线性最小二乘问题的新方法[J]. 烟台大学学报(自然科学与工程版), 2004, 17(1): 14-22.
CHEN Shuming, QIAO Tiantian. A new method of solving problem of nonlinear least square[J]. Journal of Yantai University(Natural Science and Engineering Edition), 2004, 17(1): 14-22.
- [15] 陈 磊, 霍永亮. 利用改进的遗传算法求解非线性方程组[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2015, 40(1): 23-27.
CHEN Lei, HUO Yongliang. On solution to nonlinear equation group by means of improved genetic algorithm[J]. Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition), 2015, 40(1): 23-27.
- [16] 张建国, 武 欣, 赵海涛, 等. 时间域电磁勘探数据的模拟退火法反演研究 [J]. 电子与信息学报, 2015, 37(1): 220-225.
ZHANG Jianguo, WU Xin, ZHAO Haitao, et al. A simulated annealing method for time-domain electromagnetic survey data inversion[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2015, 37(1): 220-225.
- [17] 周象贤, 卢铁兵, 崔 翔, 等. 基于有限元与有限体积法的直流输电线路合成电场计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(15): 127-133.
ZHOU Xiangxian, LU Tiebing, CUI Xiang, et al. Hybrid method for the simulation of ion flow field of HVDC transmission lines based on finite element method and finite volume method[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(15): 127-133.
- [18] 李永明, 邹岸新, 徐禄文, 等. 高压直流输电线路离子流场的计算方法研究[J]. 高压电器, 2013, 48(8): 1-7.
LI Yongming, ZOU Anxin, XU Luwen, et al. Calculation of ion flow field of HVDC transmission lines[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 48(8): 1-7.
- [19] 龙兆芝, 鲁 非, 雷 民, 等. 多回 HVDC 输电线路地面离子流场的计算[J]. 高压电器, 2012, 48(10): 31-36.
LONG Zhaozhi, LU Fei, LEI Min, et al. Calculation of ionic flow field for multi-circuit HVDC overhead transmission lines[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(10): 31-36.
- [20] ABDEL SALAM M, SHAMLOUL D. Computation of ion-flow fields of AC coronating wires by charge simulation techniques[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1992, 27(2): 352-361.
- 宋 艳(1981—), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电力系统电磁环境仿真分析。
- 秦 澔澔(1989—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电力系统电磁环境仿真分析。
- 李阳阳(1988—), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电力系统电磁环境仿真分析。