

# 非均匀半无限介质中振荡电偶极子 地表电场的数值模拟

韩德胜<sup>1</sup>, 赵和云<sup>2</sup>

(1. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081;  
2. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃兰州 730000)

**摘要:**以数值模拟方法对层状介质中振荡电偶极子电场进行了研究. 结果表明: (1) 在典型层状介质结构下, 地表不可能观测到此种信号源产生的电场信息. (2) 有断层存在时地表偶极子电场值可增大 2~3 个量级. 在常见的地壳电性结构中, 地表可得到零点几至几毫伏每公里的异常; 在特殊电性结构中可达上百毫伏每公里. 电场强度的最大点并不在震中, 而是在断层带上. 这表明地下介质的不均匀性一方面有利于地电异常的观测, 另一方面也是引起地表电场异常出现复杂性的原因.

**关键词:** 振荡电偶极子; 电场; 数值模拟

**中图分类号:** P310.1   **文献标识码:** A   **文章编号:** 1000-0844(2002)03-0193-05

## 1 层状介质模型的计算结果及讨论

水平层状介质模型将地壳分为两层<sup>[1]</sup>, 第一层模拟地壳的沉积层, 第二层模拟地壳的结晶岩层. 浅源地震的震源多在结晶岩地层中, 所以这一模型可以近似地模拟浅源地震以上的地壳结构. 通常情况下, 沉积岩层的电阻率为 30~100  $\Omega_m$ , 结晶岩层的电阻率大致为 400~1000  $\Omega_m$ . 本文计算中各层电阻率基本在这一范围内取值.

偶极源用来模拟孕震过程中产生的振荡电信号, 其强度的合理性关系到计算结果的可适用性. 日本学者 Yoshimori Honkura<sup>[2]</sup> 根据岩石受力产生电信号的两种主要机理, 估计偶极源的强度为 1~10<sup>5</sup> Am; 而希腊 Varotsos 等人<sup>[3]</sup> 根据另外的一些实验结果, 在其计算中取偶极源强度为 10<sup>3</sup> Am. 由此看来, 偶极源强度取为 1~10<sup>3</sup> Am 较为合适. 本文分别取其为计算的上、下限.

为了讨论该模型下不同电性结构、不同源深、不同源强度、不同源频率电信号在地表产生电场强度的大小和方向, 本文进行了以下 4 类计算:

### 1.1 不同电性结构的计算

计算结果如图 1. 其中: a 曲线代表  $\rho_1 = 200 \Omega_m$ ,  $\rho_2 = 4000 \Omega_m$ ; b 曲线代表  $\rho_1 = 33.3 \Omega_m$ ,  $\rho_2 = 1000 \Omega_m$ ; c 曲线代表  $\rho_1 = 500 \Omega_m$ ,  $\rho_2 = 10 \Omega_m$ ; d 曲线代表  $\rho_1 = 50 \Omega_m$ ,  $\rho_2 = 5 \Omega_m$  的电性结构.  $h_1$  为第一层厚,  $h_2$  为源深,  $f$  为频率. 由图可看出:

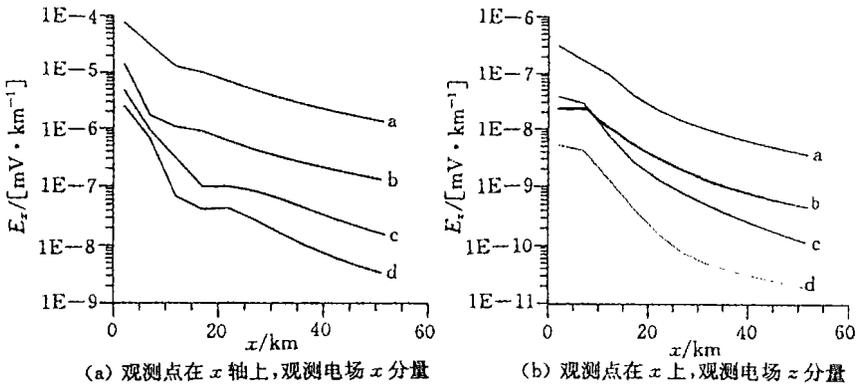


图1 源强  $1 \text{ Am}$  时不同电性结构结果对比图  
( $h_1 = 6 \text{ km}$ 、 $h_2 = 9 \text{ km}$ 、 $f = 0.1 \text{ Hz}$ )

Fig. 1 While the strength of dipole is  $1 \text{ Am}$ , the calculation result of various electrical structures.

(1) 地表电场值大小的主要影响因素为第二层介质的电阻率. 当其电阻率高时, 地表观测到的强度也大. 例如 a 曲线所示第二层电阻率为  $4000 \Omega_{\text{m}}$ , 地表观测到的场强也最大; 而 d 曲线的第二层电阻率仅为  $5 \Omega_{\text{m}}$ , 所以位于 a、b、c 曲线之下.

(2) 在水平层状介质下, 无论各层电性如何变化, 孕震在地表产生的电场强度随震中距的增大而逐渐衰减, 而且在震中距小的时候衰减较快, 震中距较大时, 衰减相对变慢, 似遵循指数衰减规律. 然而实际观测中并未发现严格的上述衰减规律, 表明地下介质的真实结构与典型的层状介质相差甚远.

(3) 在源强为  $1 \text{ Am}$  条件下, 无论哪种结构, 地表观测到电场强度的最大量级为  $10^{-5} \text{ mV/km}$ . 这在目前条件下不可能从强大地电场背景下识别出这种变化来.

## 1.2 不同源频率下的计算

根据室内岩石压力实验推知, 孕震过程可以产生各种频率的电信号. 本文选取图 1 中能最大限度得到地表电场值的一种电性结构 ( $\rho_1 = 200 \Omega_{\text{m}}$ ,  $\rho_2 = 4000 \Omega_{\text{m}}$ ), 在源强度为  $1 \text{ Am}$ , 第一层厚度为  $6 \text{ km}$ 、源深为  $9 \text{ km}$  条件下, 计算了源频率为  $0.01 \text{ Hz}$  (a 曲线)、 $0.1 \text{ Hz}$  (b 曲线)、 $1 \text{ Hz}$  (c 曲线) 和  $10 \text{ Hz}$  (d 曲线) 地表产生的电场强度, 结果如图 2 所示. 看出:

(1) 地表观测到电场强度的大小与地下源的频率之间的关系, 完全符合电磁场的趋肤效应规律, 即频率越高, 穿透厚度越小, 到达地表的强度也越小.

(2) 在该电性结构下, 当源频率在  $1 \text{ Hz}$  以下时, 地表观测到电场强度的值差别较小. 尤其是 z 分量, a、b、c 三条曲线几乎重合. 这就表明地表观测取 1 秒以上观测间隔较为适宜, 这样既不因观测频率增高而使仪器造价上升, 也能取得地震预报所需的孕震电信号. 值得指出的是, 图 2(b) 中 a 曲线似在 b 曲线与 c 曲线之间, 这可能或者因为它们之间本来就相差不大, 或者由计算误差造成.

## 1.3 不同源深的计算

图 3(a)、(b) 是源强度取  $1 \text{ Am}$ 、 $h_1 = 6 \text{ km}$ 、 $f = 0.1 \text{ Hz}$  时, 电性结构分别取  $\rho_1 = 200 \Omega_{\text{m}}$ ,  $\rho_2 = 4000 \Omega_{\text{m}}$  和  $\rho_1 = 33.3 \Omega_{\text{m}}$ ,  $\rho_2 = 1000 \Omega_{\text{m}}$  情况下不同源深的计算结果. 这两种电性结构中, 前者为一种极特殊的高阻型结构, 后者为实际中普遍存在的电性结构. 图中从上到下源深分别为  $9 \text{ km}$ 、 $12 \text{ km}$ 、 $15 \text{ km}$  和  $18 \text{ km}$ . 全部为观测点在地表 x 轴方向观测 x 分量. 由图可见, 不论何种电性结构, 源埋深越大, 地表观测到的电场强度越小. 对此并不难理解.

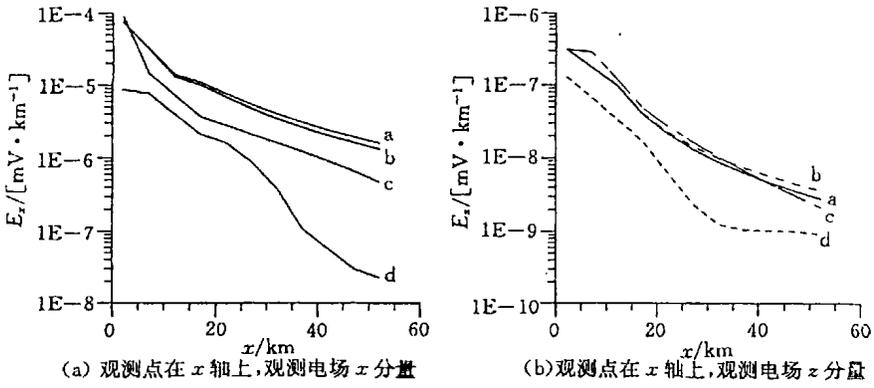


图2 源强 1 Am 时不同频率结果对比图 ( $\rho_1 = 200 \Omega_m$ 、 $\rho_2 = 4\,000 \Omega_m$ 、 $h_1 = 6 \text{ km}$ 、 $h_2 = 9 \text{ km}$ )

Fig. 2 While the strength of dipole is 1 Am, the contrast in various oscillating frequency of dipole.

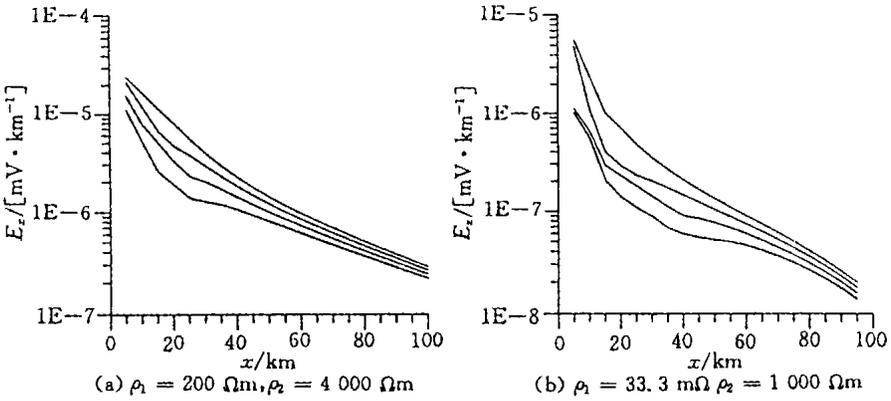


图3 源强 1 Am 时不同源深结果对比图 ( $h_1 = 6 \text{ km}$ 、 $f = 0.1 \text{ Hz}$ )

Fig. 3 While the strength of dipole is 1 Am, the contrast in various depth of source.

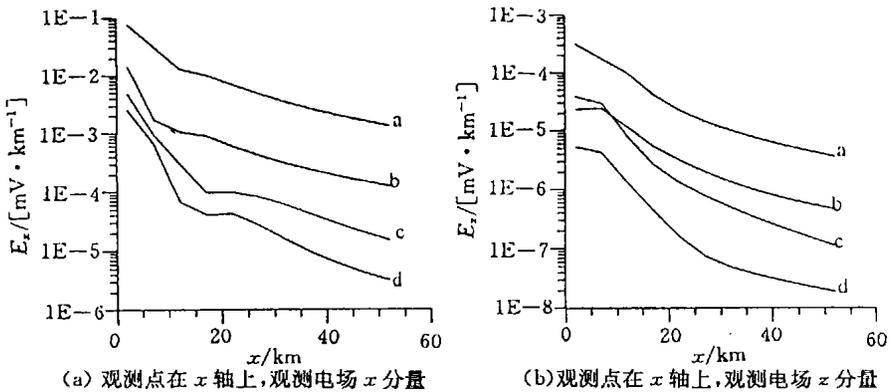


图4 源强 1 000 Am 时不同电性结构结果对比图 ( $h_1 = 6 \text{ km}$ 、 $h_2 = 9 \text{ km}$ 、 $f = 0.1 \text{ Hz}$ )

Fig. 4 While the strength of dipole is 1 000 Am, the contrast in various electrical structures.

## 1.4 不同源强度的计算

将 1.1 计算中源的强度取为  $1\ 000\ \text{Am}$ , 其它参数不变, 计算结果如图 4 所示. 由图看出:

(1) 在其它条件不变时, 源的强度增大  $1\ 000$  倍, 地表电场值也相应增大  $1\ 000$  倍. 这种正比关系从计算公式的推导中, 也可很容易得出.

(2) 在  $\rho_1 = 200\ \Omega\text{m}$ ,  $\rho_2 = 4\ 000\ \Omega\text{m}$  的电性结构下, 在  $x$  轴的震中附近观测  $x$  分量(图 4 (a)的 a 曲线)可达到零点零几至零点几毫伏每公里的量级. 虽然在目前观测系统下分辨其仍有困难, 但也接近可分辨的范围. 要指出的是, a 曲线所选电性参数极为特殊, 实际情况中非常

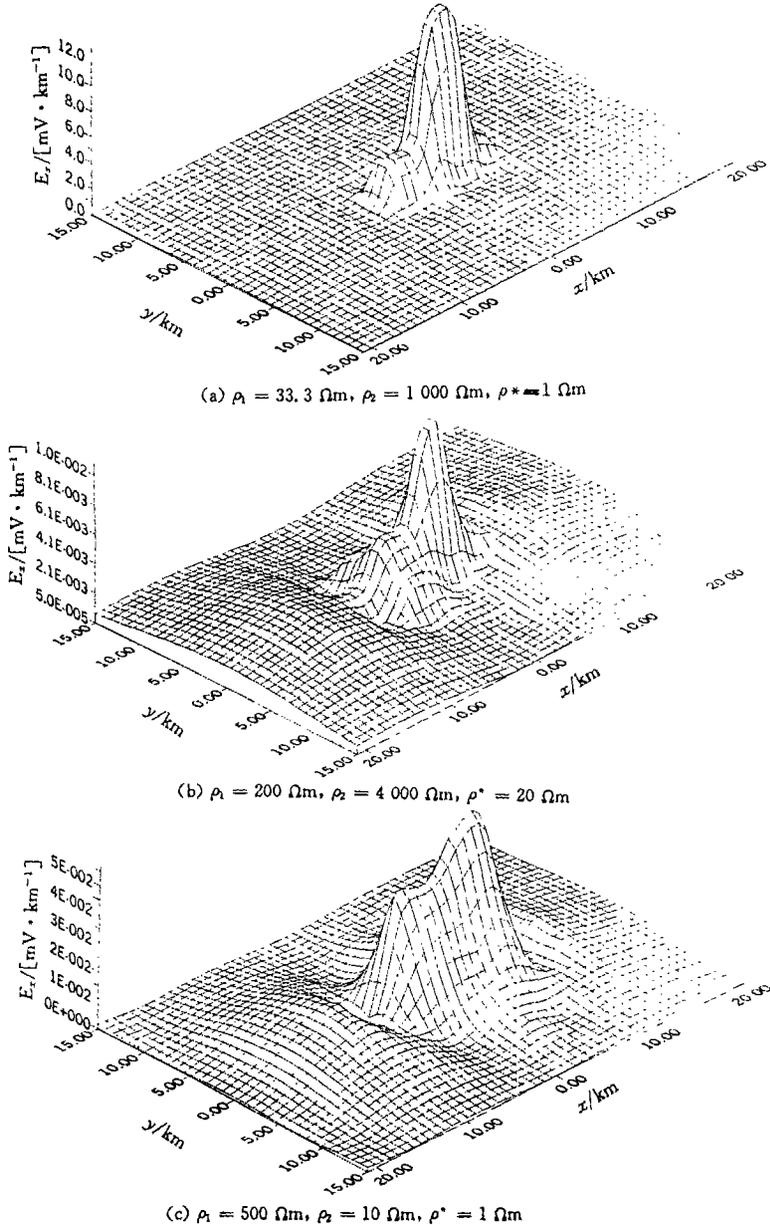


图 5 源强度  $1\ 000\ \text{Am}$  时地表电场  $x$  分量图

Fig. 5 While the strength of dipole source is  $1\ 000\ \text{Am}$ ,  
the  $x$  component at earth's surface.

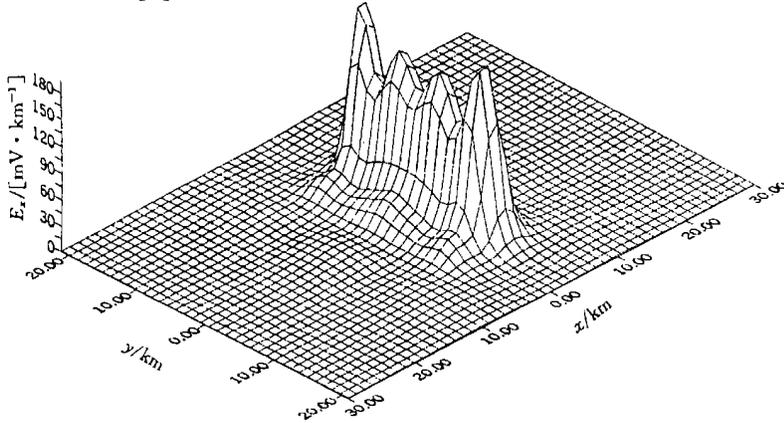
少见,再则偶极源的强度在实际情况中能否达到 1 000 A m 也值得考虑.但它表明,相同震级的地震孕育在不同的电性结构环境下,地表所得到的电磁异常是不相同的.特殊电性结构下,地表观测到的电信号比一般电性结构下高出近 2 个数量级.也就是说地电场台站有一个如何选择合适观测台址的问题.

(3) 孕震产生的电信号可能是一些分散的信号源,我们计算中所采用的偶极源相当于这些分散源的集中效应.在实际情况中,如果孕震使地表附近的岩石发生微破裂,加之特殊的地下电性结构,也不排除在地表观测到微弱电场异常的可能性,对此应有所估计.

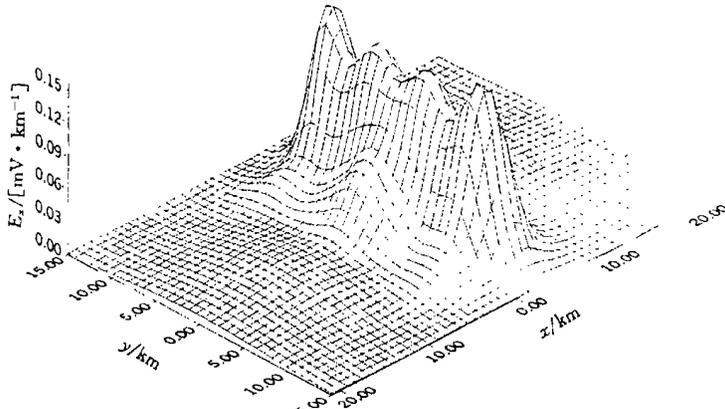
综上所述,本模型下计算结果最为显著的特点是,在典型层状介质结构下,地表一般不可能观测到因孕震产生的异常电场信息.但在特大震级的浅源地震孕育中、特殊电性结构条件下也可以在地表观测到微弱的地电场异常信号.

## 2 层状介质中存在断层时的计算结果及讨论

地壳除了上述层状结构的特征外,还有一个更重要的特征——其内存在规模不同、产状不同的断层.因此选择文献[1]中图2所示的介质模型,便可通过理论计算讨论断层对地电场异



(a)  $\rho_1 = 33.3 \Omega m, \rho_2 = 1\ 000 \Omega m, \rho^* = 1 \Omega m$



(b)  $\rho_1 = 200 \Omega m, \rho_2 = 400 \Omega m, \rho^* = 20 \Omega m$

图6 源强度 1 A m 时地表电场 x 分量图

Fig. 6 While the strength of dipole source is 1 A m, the x component at earth's surface.

常的影响. 断层在电性上表现为高导, 计算中取断层带的电阻率为第一层电阻率的 10% 以下, 即  $1 \sim 20 \Omega_m$ ; 断层的倾角取为  $71.5^\circ$ , 近似于直立; 宽 3 km、长 21 km, 断层出露地表; 代表孕震电信号的电偶极子位于断层底部中央, 埋深 9 km; 第一层厚度仍然取 6 km. 以下的计算和讨论着重于两个方面: (1) 不同电性结构对地表观测结果的影响; (2) 偶极源不同强度对地表观测结果的影响. 至于偶极源的频率和埋深, 由于对地表值的影响比较简单, 故不再讨论. 计算中偶极子频率均取为 0.01 Hz. 不同电性结构的讨论选择了三种搭配关系. 一种为常见的电性结构: 第一层电阻率  $33.3 \Omega_m$ 、第二层电阻率  $1000 \Omega_m$ , 断层电阻率  $1 \Omega_m$ ; 第二种为高阻型电性结构: 第一层电阻率  $200 \Omega_m$ , 第二层电阻率  $4000 \Omega_m$ , 断层电阻率取为  $20 \Omega_m$ ; 第三种为低阻型电性结构: 第一层电阻率  $500 \Omega_m$ , 第二层电阻率  $10 \Omega_m$ , 断层电阻率为  $1 \Omega_m$ . 偶极源的强度仍取估计值的上、下限, 即 1 Am 和 1000 Am 进行计算. 从计算结果(图 5, 图 6)可以明显地看出两个特征:

(1) 不论何种电性结构, 当有高导断层存在时, 地表断层和震中附近的电场强度比仅为层状结构下增大 2~3 个数量级. 例如, 图 2 中的 a 曲线与图 6(b) 的各种参数都相同, 但在地表震中附近二者的电场强度差近 3 个量级. 表明断层使深部电信号能更多地传播到地表.

(2) 在有断层存在时震中并不是电场强度最大测点, 而是离开震中一定距离的断层带上的电场强度最大. 这就打破了在典型模型计算中所看到的地表异常电场强度随震中距增大而衰减的规律. 表明地下介质电性的不均匀不仅仅使地下电信号更容易传播到地表, 同时也是地表电场异常表现出复杂性的基本原因.

此外, 可以看到第二层介质的电阻率是影响地表观测结果的主要因素之一, 高电阻率有利于孕震电信号传播到地表. 而偶极源的强度是另一个重要因素, 强度大时异常信号也大. 在最为有利的情况下(包括结构、源强度、源深、源频率), 地表能观测到的最大异常值为  $180 \text{ mV/km}$ . 显然相对于背景值十几毫伏每公里的变化是很容易被识别出来的.

### [参考文献]

- [1] 韩德胜, 赵和云. 非均匀半无限介质中振荡电偶极子地表电场的理论公式和计算方法[J]. 西北地震学报, 2001, 23(4): 346—353.
- [2] Yoshimori Honkura, Yuni Kuwata. Estimation of electric fields in the conducting Earth's crust for oscillating electric current dipole sources and implications for anomalous electric fields associated with earthquakes[J]. Tectonophysics, 1993, (224): 257—263.
- [3] Varotsos P, Alexopoulos K, Lazaridou M. Latest aspects of earthquake prediction in Greece based on seismic electric signals. II [J]. Tectonophysics, 1993, (224): 1—37.

(下转 219 页)

## THE CHARACTERISTICS OF STRUCTURE PLANE OF QUATERNARY FAULT IN SOILMASS AND ITS SIGNIFICANCE OF EARTHQUAKE AND GEOTECHNICAL ENGINEERING

JIANG Jian-ping<sup>1</sup>, ZHANG Yang-song<sup>2</sup>, GAO Guang-yun<sup>1</sup>, LUO Guo-yu<sup>3</sup>

(1. *Tongji University, Shanghai 200092, China*; 2. *Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China*; 3. *Nanjing University, Nanjing 210093, China*)

**Abstract:** The quaternary fault in soilmass as a kind of soilmass structure plane, become a new research field in geotechnical engineering. It is found by researching the characteristics of fault plane in soilmass that fault active connected with tick-slip movement when  $R < 80\%$ , and with steady state slip movement when  $R > 80\%$ .

**Key words:** Soilmass structure plane; Tick-slip; Steady state slip; Quaternary fault

(上接 198 页)

## NUMERICAL SIMULATION OF GEOELECTRICAL FIELD RESPONSE TO OSCILLATING DIPOLE SOURCE IN HETEROGENEOUS CRUST

HAN De-sheng<sup>1</sup>, ZHAO He-yun<sup>2</sup>

(1. *Institute of Geophysics, CSB, Beijing 100081, China*;  
2. *Lanzhou Institute of Seismology, CSB, Lanzhou 730000, China*)

**Abstract:** The geoelectrical fields induced by oscillating dipole source are numerically simulated in different heterogeneous models. The results show that for the model of ordinary layered media it is impossible to observe such electrical signals on earth surface. It is found that the surface field can be enhanced 2 or 3 orders if there is high conductive fault in the layered model. The surface abnormal electrical signals of ordinary electric structure is about several mV/km or less, however it could reach hundreds mV/km in special electrical structure. It is deserved to point out that the area of strongest abnormal signals is not over the epicenter, but is in some points of fault. This means the heterogeneity of electric structure is advantageous to detect abnormal electrical signals, on the other hand, it leads to the complex phenomena of abnormal electrical signals distribution on surface.

**Key words:** Oscillating dipole source; Electric field; Numerical simulation