

# 《工程地球物理学报》稿件模板

(通栏排版, 图、表随文排)

## 垂直线源井-地电位探测地下动态导体的三维有限元数值模拟

(论文的题名应简明、具体、确切, 能概括文章的要旨, 中文题名一般不超过 20 个汉字, 必要时可加副题名)

戴前伟<sup>1</sup>, 陈德鹏<sup>1</sup>, 熊健奎<sup>2</sup>, 冯德山<sup>1</sup>

(1. 中南大学 信息物理工程学院, 湖南 长沙 410083;

2. 云南省有色地质 地球物理化学勘查院, 云南 昆明 650000)

(作者单位应是全称, 保留至二级单位)

**摘要:** 利用钻孔金属套管作为线源供电, 在地表观察电位探测地下动态导体是一种实用的方法。在本文中, 以垂直钻孔套管为垂直线源, 介绍了垂直线源的地电场电位公式, 给出了异常电位的变分问题。针对有限元方程求解时计算速度慢和对内存要求高的问题, 利用对称超松弛预条件共轭梯度算法结合按行压缩存储技术, 提高了计算速度和减少了对内存空间的要求。采用异常电位的有限元法实现了井-地电位探测地下动态导体的三维数值模拟。通过一个低阻动态导体在不同埋深处模拟超大型垃圾场区渗滤液的地下去向, 算例结果表明利用垂直线源井地电位三维有限元研究探测地下动态导体是有效、可行的。

(摘要包含目的、方法、结果、结论四要素, 摘要应能反映论文的核心内容, 具有独立性和自含性, 尽量写成报道性文摘, 即不阅读论文的全文, 就能获得主要信息。本刊要求中文摘要写成 300 字左右)

**关键词:** 垂直线源; 井地电位; 动态导体; 三维; 有限元

(关键词是为了文献标引、检索工作采用, 应从论文中选取, 是用来表示全文的主题内容、信息的单词或术语。每篇论文选取 3 ~ 8 个词作为关键词, 尽量用《汉语主题词表》提供的规范词)

**中图分类号:**                      **文献标识码:**                      **收稿日期:** (此行内容由编辑定稿时完成)

## The 3-D Finite Element Number Modeling of Vertical Line Source Borehole-Ground DC Method Detecting Underground Dynamic Conductor

Dai Qianwei<sup>1</sup>, Chen Depeng<sup>1</sup>, Xiong Jiankui<sup>2</sup>, Feng Deshan<sup>1</sup>

(1. School of Info-physics and Geomatics, Engineering Central South University, Changsha 410083, China;

2. Yunnan Investigation Institute of Non-ferrous Geographic Geochemistry and Geophysics, Kunming 650000, China)

(英文单位名称, 应是作者单位公开的、公认的英文名, 不能自造单位名称)

**基金项目:** 国家自然科学基金(编号: 40804027)与湖南省科技计划项目(编号: 2007FJ4055)联合资助。

(基金项目资助的论文, 优先发表)

**作者简介:** 戴前伟(1968-), 男, 教授, 博士, 从事电磁法勘探研究。E-mail: qwdai@mail.csu.edu.cn

(本刊除介绍第一作者外, 还可以再介绍一位导师或学术影响大者)

(“基金项目”和“作者简介”, 可以放在文章的最最后面, 排版时由编辑加工完成)

**Abstract:** It is a simple and practical method to detect the underground dynamic conductor by vertical line source borehole-ground DC method. We presented the problem of anomalous potential and the geoelectric field potential formula of vertical line source in this paper. Combination of the symmetric successive over relaxation preconditioned conjugated gradient method (SSORPCG) with the compressed sparse row (CSR) method accelerated solution of the finite element equations and reduced the demand of memory. The 3-D finite element number modeling of vertical line source borehole-ground DC method is realized by the finite element method of anomalous potential. The penetration direction of underground sewage in the dumping place is simulated by a dynamic low-resistant conductor at different depths. The results showed that the algorithm in this paper is feasible and effective to detect the underground dynamic conductor by vertical line source borehole-ground DC method.

(本刊要求: 英文摘要 600 单词左右)

**Key words:** vertical line source; borehole-ground DC method; dynamic conductor; 3-D; FEM

(英文关键词应与中文关键词一致)

# 1 引言

充电法在地球物理探测中是一种古老而又时新的方法。在国外, 有 Sill 等 (1978)<sup>[1]</sup>、Rocroi (1985)<sup>[2]</sup>、Ushijima 等(1999)<sup>[3]</sup>等利用生产井的套管作为电极进行充电, 地表观测电位, 在地热层分布范围和深度确定、油田死油区的探测以及油田储层中高温蒸汽的推进前沿和舌进方向的监测上取得了成功的应用。在国内, 何裕盛 (1978, 2001)<sup>[4,5]</sup>对充电法和地下动态导体的充电法探测从数学物理理论、技术方法和推断解释上进行了较系统的研究, 并首次在国内外提出了“动态导体充电法”的概念, 但是其推断解释还是以定性和半定量解释为主。尽管井地电位充电法的正反演技术在研究油田剩余油分布问题上取得了很好成果<sup>[6~13]</sup>, 但其数值模拟方法基本上都是利用有限差分法来进行数值模拟。由于有限单元法在模拟物性参数分布复杂或场域的几何特征不规则时比有限差分法适应性更强, 本文在前人的基础上, 利用异常电位的有限元法实现了井-地电位探测地下动态导体的三维有限元数值模拟, 消除了线源处的奇异性。在求解方程式采用对称超松弛预条件共轭梯度 (SSORCG) 迭代算法, 引入了按行压缩存储 (Compressed Row storage, CSR) 技术, 提高了计算速度和减少了对内存空间的要求。最后通过地下动态低阻体来模拟垃圾场地下渗滤液的流向和范围对地表异常电位的影响, 算例表明该方法可行、效果良好。

(引言: 简要说明研究工作的目的、范围、相关领域的前人工作情况和知识空白、理论基础和分析、研究设想、研究方法和试验方案、预期结果和意义等。应言简意明, 不要与摘要雷同, 一般教科书中的知识, 不必在引言中赘述。一般引言部分至少应引用和标注 3—5 篇重要参考文献)

# 2 异常电位的变分问题

本文采用计算异常电位的方法求解三维正问题<sup>[14]</sup>。异常电位  $u$  的基本微分方程为

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla u) = -\nabla \cdot (\sigma \nabla u_0) \tag{1}$$

式中:  $u_0$  为正常电位,  $\sigma_0$  和  $\sigma$  分别表示大地 (围岩) 和异常体的电导率, 表示异常电导率

.....  
.....  
.....

(正文是论文的核心部分, 占主要篇幅, 可以包括: 研究对象、试验和观测方法、仪器设备、

材料原料、试验和观测结果、计算方法和编程原理、数据资料、经过加工整理的图表、形成的论点和导出的结论等。正文写作应精练，论点明确、论证严谨、论据充分、内容创新、数据可靠、方法科学、文字通顺简洁、可读性强。引用他人观点、资料、数据等，必须列出参考文献(公开出版物)或作脚注(非公开出版物)。凡是能用简要的文字讲解清楚的内容，尽量用文字陈述，用事实和数据说话；用文字不容易说明白或说起来比较繁琐的，可以用图、表来陈述。本刊要求，每篇文章的篇幅(包括图表等)一般不得超过 8000 字。

本刊要求：

- (1)稿件一律通栏排，不要双栏排。图、表一律随文排(黑白印刷)。
- (2)本刊认为“我们”二字是口语，删掉文章中所有“我们”二字。
- (3)英文缩写词，第一次在摘要和正文内出现时，必须给出全称。例如：长偏移距瞬变电磁法 LOTEM (Long Offset Transient Electromagnetic), ……。
- (4)量和单位的使用，请严格执行中华人民共和国法定计量单位的最新标准。稿件中的外文字符大、小写，上、下角标的位置必须分清。容易混淆的外文字母、符号，请在第一次出现时注明。
- (5)正文和公式里出现的物理量，一定要注明其含义)

### 3 垂直线源正常电位公式

对于均匀全半空间中的有限长线电流源，其理论电位公式为<sup>[17]</sup>：

.....  
.....  
.....

供电线源的径向距离； $I$  为供电电流强度； $u_{pA}$  为任何点  $p(r, z_p)$  由线电流源引起的电位。

### 4 方程求解和系数矩阵的存储

#### 4.1 方程求解

有限元线性代数方程组式(4)的求解是整个垂直线源三维有限元数值模拟中的关键，直接关系到求解速度。吴小平等(1999)<sup>[18]</sup>利用共轭梯度算法(ICCG)算法求得电阻率三维有限差分正演,在提高

.....  
.....

型垂直于  $x$  轴的表面方程相同，分别为  $x = -450, x = -200$ 、 $x = -450, x = 50$ 、 $x = -450, x = 300$ 。两个模型其它四个表面方程如表 1。

表 1 不同埋深低阻异常体的四个表面方程

Table 1 Four surface equations of the low-resistant anomalous bodies at different depths

模型编号	垂直于 $z$ 轴的表面方程	垂直于 $y$ 轴的表面方程
1	$z = -50, z = -100$	$y = \pm 50$
2	$z = -250, z = -300$	$y = \pm 50$

(表格按在文内出现的先后，顺序编号，每个表都要有中、英文表名。表格采用三线表，要求简洁明了、分栏合理、项目命名准确、量与单位使用规范。表中的文字、符号、量与单位，必须与

## 5 模型与算例

观测装置为 Pole-Dipole 的三极装置。模型空间为一个六面体，大小为1000m×1000m×1000m，

模型 1 沿 x 轴方向延伸变化形成的异常电位等值线图分别为图 1 (a)、图 1 (b) 和图 1 (c)。

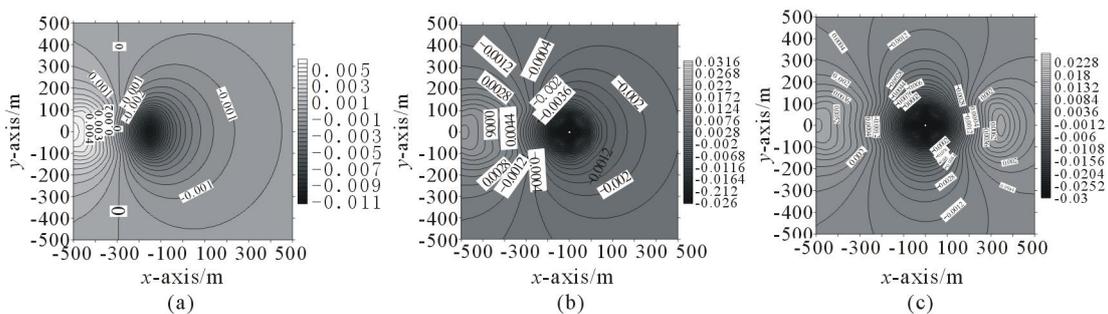


图 1 模型 1 异常电位等值线响应

Fig.1 The contour map of anomalous potential of model 1

模型 2 沿 x 轴方向延伸变化形成的异常电位等值线图分别为图 2 (a)、图 2 (b) 和图 2 (c)。

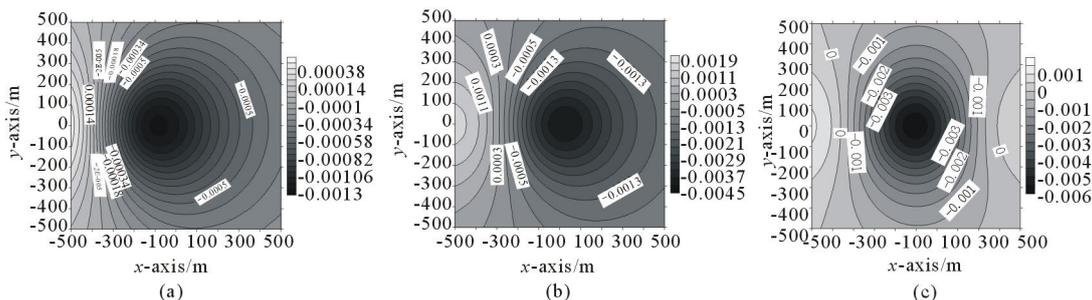


图 2 模型 2 异常电位等值线响应

Fig.2 The contour map of anomalous potential of model 2

(图件按在文内出现的先后，顺序编号，每个图都要有中、英文图名。图件要求简明清晰、大小适宜、线条均匀，图中的文字、符号、纵横坐标的量与单位，必须与正文一致。涉及国界线的图件必须绘制在地图出版社公开出版的最新地理底图上)

阻异常体在浅部时明显。可见，低阻异常体埋到一定深度后,地表观测值对其分布情况的分辨率大大降低。可以推测，当低阻异常体埋到较大深度后，基本上观察不到异常信息。

## 6 结论（或结语）

通过模型试验，可归纳-----。

1) 当地下有低阻异常体时，在地表能够观察到显著的异常电位且异常体在地面的.....

2) .....究网格剖分技术降低离散误差和提高计算速度，以及研究反演成像技术。

(结论或结语是整篇文章的最后总结。结论不应是正文中各段小结的简单重复，它应对研究对象进行分析、论证、考察或试验所得的结果作出总结。对理论的或实用的价值、意义进行评述，或对进一步深入本课题研究提出看法和建议)

---

(致谢: 一般单独成段、放在文章的最后面。它不是论文的必要组成部分。它是对在论文的写作过程中, 曾经给予指导、帮助或建议, 或在试验中做出某些贡献, 或给予过技术、信息、物质或经费帮助的单位、团体或个人致以谢意)

## 参考文献:

- [1] Sill W R, Ward S H. Electrical energizing of well casings[C]. Final report: Volume 77-8. [Roosevelt Hot Springs], 1978.
- [2] Rocroi J P, Koulikov A V. The use of vertical line sources in electrical prospecting for hydrocarbon[J]. *Geophysical Prospecting*, 1985, 33 (1):138-152.
- [3] Ushijima K, Mizunaga H, Tanaka T. Reservoir monitoring by a 4-D electrical technique[J]. *The Leading Edge*, 1999, 18(12):1422-1424.
- [4] 何裕盛, 夏万芳. 充电法[M]. 北京:地质出版社, 1978.
- [5] 何永盛. 地下动态导体的充电法探测分析[D]. 北京:中国地质大学, 2001.
- [6] 徐凯军, 李桐林. 垂直有限线源三维地电场有限差分正演研究[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2006, 36(1):137-141.
- [7] 王志刚, 何展翔, 魏文博. 井地直流电法三维数值模拟中若干问题研究[J]. 物探化探计算技术, 2006, 28(4):322-327.
- [8] 廉洁. 垂直线源井地直流电法正反演研究[D]. 北京:中国地质大学, 2007.

(1. 参考文献是现代科技论文的重要组成部分, 是反映文稿的科学依据和尊重他人研究成果而向读者提供文中引用有关资料的出处, 或为了节约篇幅和叙述方便, 提供在论文中提及而没有展开的有关内容的详尽文本;

2. 参考文献只列公开出版物(未出版、非正式、非公开出版的书、刊不能作为参考文献, 可作为脚注), 采用顺序编码制, 即按其在文章中出现的先后顺序编码, 用阿拉伯数字加方括号标注在文中右上角。例: ……反演成像的研究已有很多<sup>[2]</sup>, ……<sup>[8]</sup>;

3. 参考文献包括著者、题名、出版地、出版物全称或出版单位名、出版年、卷、期号、实际参考起止页码等基本信息。

4. 参考文献的作者项中应列出前3名作者, 姓在前(全称)名在后(外国人名用缩写), 第四人才能用“等”或“et al”。

5. 大量查阅新版图书、期刊资料是撰写学术论文的前提条件。引用相关学科大刊名刊的最新文献, 是文章水平上档次的重要标志。

本刊强烈建议作者引用《地球物理学报》《中国科学(D)》《地球物理学进展》和《本刊》发表的最新文献。本刊要求一般性研究论文所列的参考文献不低于10篇; 综述性论文所列的参考文献应达20篇以上。

6. 参考文献分别用专著[M]、期刊文章[J]、论文集[C]、学位论文[D]、报告[R]、报纸文章[N]、国家标准[S]、专利[P]、电子文献[EB/OL]等标注)

- [9] 刘昱, 王志刚, 何展翔. 井地电法供电电场分布模拟研究[J]. 工程地球物理学报, 2006, 3(5):331-336.
- [10] 王志刚, 何展翔, 刘昱. 井地直流电法三维数值模拟及异常规律研究[J]. 工程地球物理学报, 2006, 3(2):88-92.
- [11] 贾正元, 晋凤明. 井-地电法勘探在油藏评价中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2008, 5(3):326-331.
- [12] 屈有恒, 张贵宾, 赵连锋, 等. 井地有限线源三维电阻率反演研究[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(5):1393-1402.
- [13] 安然, 李桐林, 徐凯军. 井地三维电阻率反演研究[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(1):247-249.
- [14] 徐雨浙. 地球物理勘探中的有限单元法[D]. 北京:清华大学, 1994.
- [15] 阮百尧, 熊彬, 徐世浙. 三维地电断面电阻率测深有限元数值模拟[J]. 地球科学-中国地质大学学报, 2001, 22(1):73-77.
- [16] 黄俊革, 阮百尧, 鲍光淑. 齐次边界条件下三维地电断面电阻率有限元数值模拟法[J]. 桂林工学院学报, 2002, 22(1):11-14.

---

[17] 凌明友, 郝新武, 程同军, 等. 井一地电位成像技术研究剩余油分布[J]. 断块油气藏, 2003, 10(4): 55-58.  
[18] 吴小平, 徐果明. 利用 ICCG 迭代技术加快电阻率三维正演计算[J]. 煤田地质与勘探, 1999, (3): 62-66.  
[19] 吴小平, 汪彤彤. 利用共轭梯度算法的电阻率三维有限元正演[J]. 地球物理学报, 2003, 46(3): 428-432.  
[20] Saad Y. Iterative Methods for Sparse Linear Systems[M]. Boston :PWS Pub Co., 1996.

## 作者基本信息:

基金项目:..... 资助。

作者简介:..... E-mail:wang...@....

通信地址: 邮编、街道号、单位、收件人 (以便给你邮寄发票和刊物)

电 话: 1398.....36; 031-68.....37 (便于随时联系)

## 投稿方式:

欢迎通过电子邮箱发送。

### 格式要求:

发件人: feng.....dxj.....

收件人: cjeg@cug.edu.cn

主 题: 李小林 (第一作者姓名) 投稿; (第一作者姓名, 便于稿件登记、查找、区别于垃圾邮件)

李小林 (第一作者姓名) 修改稿; (一般情况下, 本刊只与第一作者联系)

李小林 (第一作者姓名) 查询; (第一作者负主要责任, 投稿 30 天后, 可来函来电话查询)