

地下三维金属目标电磁散射仿真软件开发

侯维娜¹, 刘湘梅¹, 邵建兴¹, 蒋泽¹, 高文利²

1. 重庆邮电大学光电工程学院, 重庆 400065

2. 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所, 河北廊坊 065000

摘要 基于地下电波法, 采用面向对象模块化设计思想开发了地下三维金属目标电磁散射仿真软件。首先, 介绍了该仿真软件所采用的数值计算方法: ① 根据海伦积分方程求解对称天线上电流分布, 进一步求其辐射场; ② 基于电场积分方程求解散射体的感应电流, 计算出散射场与总场。然后, 从基本结构、功能方面, 整体介绍该仿真软件设计思想与结构; 并按功能分为主控模块、工程管理模块、输入模块、分析计算模块, 分模块介绍该软件的具体设计与实现。最后, 通过一个仿真实例验证该软件的性能。仿真结果表明, 本软件的仿真结果与测试数据基本吻合, 故该软件具有可靠性与有效性。因此, 该仿真软件对地下目标散射特性分析及对地下物探深层介质中异物体的探测等具有直接指导意义。

关键词 地下电波法; 电磁散射; 海伦积分方程; 电场积分方程

中图分类号 TB97

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2010)01-0090-04

Development of Emulation Software for Underground 3D Geophysical Metal Targets

HOU Weina¹, LIU Xiangmei¹, SHAO Jianxing¹, JIANG Ze¹, GAO Wenli²

1. College of Electronic, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China

2. Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Sciences, Langfang, 065000, Hebei Province, China

Abstract Based on the underground EM wave method, the electromagnetic scattering emulation software for 3D metal target in a lossy medium is developed with the methodology of modularization and the paradigm of object-oriented design. Firstly, the numerical method of the simulation software is as follows. (1) Hallen integral equation is solved to analyze the antenna's currents; (2) based on the Electric Field Integral Equation (EFIE), the surface currents of the metal target is calculated, to obtain the scattering field and the total field. The basic structure and functions of the software are as follows. It is composed of control module, project management module, input module, analysis and calculation modules. The specific design and implementation of the software are described in this paper by modules. The new algorithm is verified by a simulating instance. It is shown that the emulation results agree well with the experiment results, which indicates the reliability and the validity of the software. The software can be used for analysis of scattering characteristics of underground targets and the different objects detection in geophysical exploration in the deep underground medium.

Keywords underground EM wave method; electromagnetic scattering; Hallen integral equation; electric field integral equation

0 引言

随着日益发展的工程需要, 在地下军事通信、矿藏勘探、隧道挖掘等诸多研究领域, 人们越来越关心地下介质中三维散射体的散射问题。诸如深层地质中的目标探测与识别, 地

下矿藏及其他地质目标的无线探测等都需要以电磁波的散射、逆散射理论作为基础^[1-3]。故地下目标散射问题在地质矿产开发、考古、航天、建筑、军事等很多领域都有着广泛应用。因此, 地下目标散射特性成为地下电磁波传播研究的热点^[4]。

收稿日期: 2009-09-17

基金项目: 中国高技术研究发展计划(863 计划)项目(2006AA06Z136)

作者简介: 侯维娜, 讲师, 研究方向为计算电磁学, 电子信箱: lxmholy@163.com

目前,电磁散射计算主要采用有限差分法、有限元法、积分方程法等数值计算方法,然后通过计算机编程快速精确计算,地下三维目标电磁散射的快速精确计算是全面深入了解地下三维目标电磁散射特征的重要工具^[5-6]。随着计算机技术的快速发展,基于这些数值计算方法,各类针对特殊实际应用的电磁场分析软件被开发出来。但是,在特定的应用背景中,这些商用仿真软件却显示出其应用的局限性。

基于地下电波法,本文开发了一款地下三维金属目标电磁散射仿真软件。首先简单介绍了该软件的基本模型与计算方法;然后从基本功能与结构,介绍了该软件的设计与实现模块设计与实现;最后通过一个仿真实例验证该软件的可靠性、有效性。该软件针对特定的应用具有较强的优势。

1 电磁散射模型与计算方法

在地下物探中,探测地下介质中散射体的分布常采用地下电波法。根据地下物探的实际工程要求,该软件基于地下电波法建立了地下三维金属目标电磁散射模型。下面将详细介绍模型与计算方法。

1.1 地下电波法模型

地下电磁波法是地下物探中广泛采用的先进方法之一^[7-10],它是利用无线电波中钻孔或坑道中发射和接收,根据不同位置上接收到的场强大小,确定地下不同介质分布的地下物探方法,基本模型如图1所示。

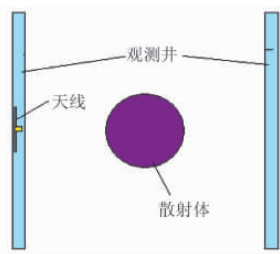


图1 基本模型

Fig. 1 Basic model

当传播空间为均匀介质时,可以根据地下电波传播规律求得场的分布。若均匀介质中存在金属散射体,地下电磁波照射到金属散射体上时,在散射体表面会产生感应电流。由于感应电流的作用,金属目标将会产生二次辐射场,此时传播空间中的总场为入射场和散射场的叠加。由于散射场的影响,使得位于散射体附近的总场发生畸变。如果散射较大,则在其附近的总场分布会出现凹陷。因此,可以根据场的分布来确定散射体的大小、形状和分布。地下电波法就是根据上述原理来探测地下介质中的异物。

由上述分析可知,要研究地下三维金属目标的散射特性,需要求解地下电波入射场、散射场及总场的分布。然后,根据总场相对入射场的畸变以及散射场的分布来分析其散射特性。在实际勘探中,地下电波入射场一般由圆柱对称天线辐射场提供。因此,地下三维金属目标电磁散射计算主要包括地下圆柱对称天线辐射场和地下三维金属目标散射场的计算,然后根据入射场和散射场求解总场的分布。

1.2 地下圆柱对称天线辐射场的计算

地下圆柱对称天线的基本结构如图2所示。图2中, l 为天线单臂长度; a 为天线的导线半径; z' 为天线轴上任意一点

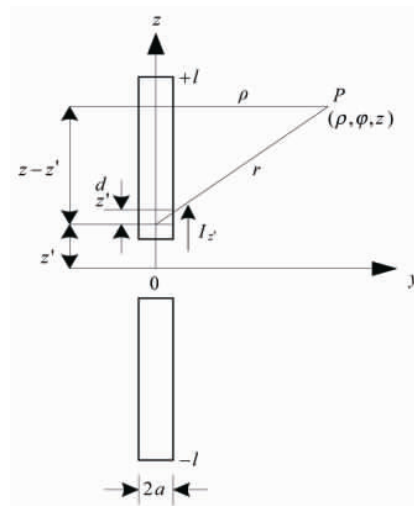


图2 圆柱对称天线

Fig. 2 Symmetry dipole antenna

沿天线轴线的坐标; P 为天线辐射场的任意测量点,其柱坐标为 (ρ, φ, z) 。

根据天线理论,以电压 V ,角频率 ω 的片状源激励长为 $2l$ 的圆柱对称天线,在天线附近(即场点为位于天线臂上的点),对称天线电流分布满足海伦积分方程^[11-12]:

$$\int_{-l}^{+l} I(z') \frac{e^{-jkr}}{r} dz' = c \cos kz + \frac{2\pi V}{j\eta} \sin k|z| \quad (1)$$

其中, $I(z')$ 为天线上的电流分布, $r=[(z-z')^2+a^2]^{\frac{1}{2}}$ 为源点到场点间的距离, c 为待定常数, $k=\omega\sqrt{\mu\epsilon_c}$ 为有耗媒质中电磁波的传播常数, $\eta=\sqrt{\mu/\epsilon_c}$ 为媒质中的本征阻抗。

因此,可以根据海伦积分方程先求解天线电流分布,然后求解其辐射场。该软件是利用矩量法求解上述海伦积分方程,具体计算方法如下。

1) 将天线分为 $2N$ 段,则每段长 $h=l/N$,选取正弦函数作为基函数,将天线电流分布函数表示为

$$I(z') = \sum_{n=1}^N a_n \sin[nk(L-z')] \quad (2)$$

2) 在各段的中点 $z_m = \left(m - \frac{1}{2}\right)h$ ($m=1, 2, \dots, N$)处选用点冲击匹配法,试函数 $W_m = \delta(z-z_m)$,构造矩阵方程。先依据所得矩阵方程求解天线的电流分布,然后进一步求天线辐射场。

1.3 地下三维金属目标散射场计算

当天线的辐射场 $E^{inc}(r)$ 、 $H^{inc}(r)$ 照射到媒质中的金属目标时,设在金属物体表面 S 上产生感应电流为 $J(r)$,金属目标产生的散射场为 $E^{scat}(r)$ 、 $H^{scat}(r)$ 。根据理想导体表面上电场切向分量为零的边界条件,可得电场积分方程^[13-14]

$$-E_t^{inc}(r) = [-j\omega A(r) - \nabla\phi(r)]_t, \quad r \in S \quad (3)$$

式中, $A(r) = \mu \int_S J(r') G(r, r') dS'$

$$\phi(r) = -\frac{1}{j\epsilon\omega} \int_S \nabla' \cdot J(r') G(r, r') dS'$$

$$G(r, r') = \frac{e^{-j\sqrt{k} |r-r'|}}{|r-r'|}$$

其中, r 和 r' 分别为源点与场点的方向矢量, A 为矢量场, ϕ 为标量场, G 为格林函数。

对于散射场的计算, 该软件是利用矩量法求解上述电场积分方程来实现的。

1) 将理想导电目标的表面用形状大小相似的三角形进行剖分, 再采用 RWG 矢量基函数 $f_n(r)$ 将电流 $J(r)$ 展开为

$$J(r) = \sum_{n=1}^N a_n f_n(r) \quad (4)$$

2) 采用加略金法, 即试函数亦采用 RWG 矢量基函数 $f_n(r)$, 构造矩阵方程。然后根据所得矩阵方程, 求解散射体的面电流分布, 进一步求金属目标的散射场。

2 软件的设计与实现

2.1 软件的基本结构与功能

该软件主要是根据媒质、天线、激励源、观测井与散射体的基本参数, 计算地下天线辐射场、金属目标散射场, 然后求解传播空间的总场分布。软件基本结构与功能如图 3 所示。

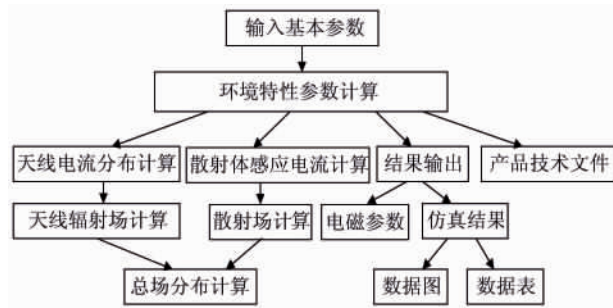


图 3 仿真软件的基本结构

Fig. 3 Basic structure of the emulation software

根据软件的基本结构与功能, 基于面向对象的程序设计, 采用模块化设计思想, 分块设计各模块。该软件包括 11 个窗体模块和 4 个主模块, 其中, 11 个窗体模块包括参数输入、几何模型、仿真结果数据图与数据表等窗体模块。下面仅对系统的主模块做理论分析和技术处理说明。

2.2 主控模块

由于该仿真软件庞大而复杂, 且随着软件的不完善, 其功能模块将不断扩充, 为用户提供友好的人机界面, 因此不论从软件本身的完善还是从用户的使用角度看, 开发一个简单方便的操作界面是极其必要的。它为分析计算功能的实现提供了必不可少的前、后处理模块, 是整个软件的支持部分。主控模块实施对系统其他功能模块的控制。为了方便用户使用, 利用 Visual C++ 6.0 强大的功能, 实现了地下三维金属目标散射仿真软件的基本界面, 如图 4 所示。

2.3 工程管理模块

该模块实现对仿真工程的查看与管理, 包括工程管理、

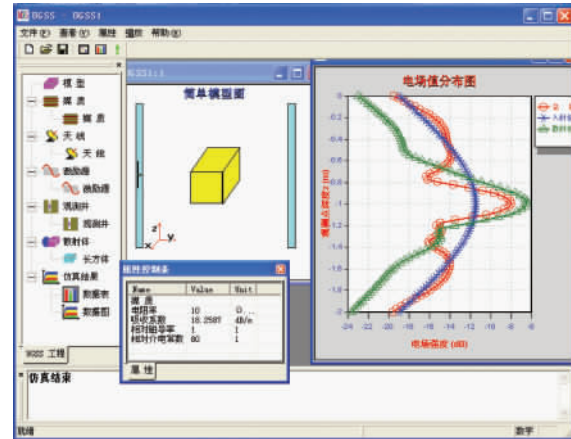


图 4 基本界面

Fig. 4 Basic interface

信息显示和信息管理窗口, 均采用浮动窗添加实现。

工程管理窗口用来显示管理仿真工程, 其功能主要通过一个 TreeCtrl 控件和 Image 控件来完成。该界面在仿真过程中会自动显示用户参数设置、散射体选择及仿真执行等信息, 体现了界面开发的易使用和易学习原则。

信息显示窗口用来显示仿真各基本组成的参数, 便于用户查看校对各参数, 其功能通过一个 GridCtrl 控件实现。通过点击工程管理窗口中基本组成的相应节点显示其参数。

信息管理窗口用来显示仿真工程完整性检查结果和仿真进程提示。该软件提供了“仿真工程完整性检查”功能, 在执行仿真之前检查用户参数设置的完整性。

2.4 输入模块

该模块主要实现媒质、激励源、天线、观测井与散射体等 5 个基本组成的参数输入, 采用对话框来实现, 辅以详细的文字提示, 并对输入参数进行类型、界限的校验与提示, 允许用户随时修改参数, 基本实现了“所见即所得”的形象化设计。由于对话框较多, 这里仅以长方体形散射体设置对话框为例, 简单说明对话框主要功能。如图 5 所示, 该对话框主要包括散射体尺寸、位置和散射场计算剖分精度设置。

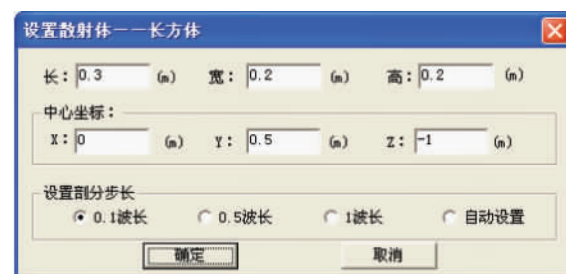


图 5 长方体形散射体参数设置对话框

Fig. 5 Dialog box of setting scatter parameters for cuboid

输入数据的正确性与完整性对软件的运行结果具有决定性作用。为了保证输入数据的齐全与正确, 采用以下出错校验方法。

1) 数据类型的验证:防止输入非法数据。

2) 数据界限的校验:检查某项输入数据的内容是否位于规定范围之内。

系统运行时,主要通过这两种方法检查输入数据的有效性和准确性。在程序中,当输入数据出错或忽略了某项参数输入时,提示对话框弹出显示出错信息并提示重新输入数据,待改正数据后再进行下一步处理。

2.5 分析计算模块

该模块实现对地下三维金属目标电磁散射特性的计算。由前述计算方法可知,该模块由地下电波入射场、散射场和总场计算 3 个子模块组成。基于上述计算方法,采用 C++ 语言编写各个子模块,完成地下三维金属目标电磁散射特性的核心计算,然后将所得仿真结果输出到主控模块显示和保存。其中,各子模块的计算过程对用户不可见,各计算模块相互独立,用户可根据需要移植成为程序包。

3 仿真实例

为了验证该软件的可靠性、有效性,用该软件仿真了一个实例,并将仿真结果与实验测试结果进行对比分析。

实例 当天线和金属球均置于有耗媒质 ($\varepsilon=82\varepsilon_0$, $\mu=\mu_0$, $\sigma=0.2737$) 中,对称圆柱天线沿 z 方向放置,天线全长 $2l=0.06$ m,半径 $a=3.18$ mm,频率 $f=600$ MHz,置于原点位置;金属球放置在 $(0\text{m}, 0.2\text{m}, 0\text{m})$ 时,观察点在 $x=0\text{m}, y=0.3\text{m}$ 的对称线上。将所得仿真结果与实验数据联合作图比较,结果见图 6。

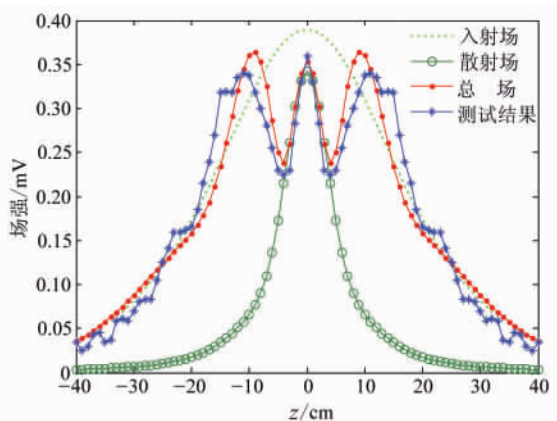


图 6 有耗媒质中的电场分布

Fig. 6 Electrical intensity distribution in the lossy medium

由于金属散射体的遮挡及其散射场的影响,有耗媒质空间中总场在散射体附近 $z=0\text{m}$ 将产生畸变。从图 5 可知,仿真结果和实验测试结果的总场在 $z=0\text{m}$ 附近均产生显著畸变,且由于球的对称性,总场畸变呈对称分布。该软件仿真所得总场畸变与试验结果基本吻合,验证了该软件的可靠性和有效性。即该软件能够较准确地模拟有耗介质空间存在三维金属目标时,传播空间的入射场、散射场及总场分布。

4 结论

基于地下电波法,开发一种地下三维金属目标电磁散射仿真软件,能够准确模拟有耗媒质中三维金属散射体场分布。对地下目标散射特性分析,确定各种因素的影响程度,及地下物探中深层介质中异物体探测等具有直接指导意义。

参考文献 (References)

- [1] 管志宁. 我国磁法勘探的研究与进展 [J]. 地球物理学报, 1997, 40 (增刊): 299-306.
Guan Zhining. *Chinese Journal of Geophysics*, 1997, 40(Suppl): 299-306.
- [2] 牛之琰. 时间域电磁法原理[M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1992: 5-10.
Niu Zhilian. *Theory of time domain electromagnetic method* [M]. Changsha: Central South Industry University Press, 1992: 5-10.
- [3] 孙之珂, 王继伦, 齐文秀, 等. 我国金属与非金属矿物探的回顾与展望 [J]. 地球物理学报, 1997, 40(增刊): 351-360.
Sun Zhike, Wang Jilun, Qiwenxiu, et al. *Chinese Journal of Geophysics*, 1997, 40(Suppl): 351-360.
- [4] 吕保维, 王贞松. 无线电波传播理论及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2003: 511-516.
Lu Baowei, Wang Zhensong. *The radio wave theory and its applications* [M]. Beijing: Science Press, 2003: 511-516.
- [5] 盛新庆. 计算电磁学要论[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 11-27.
Sheng Xinqing. *A brief treatise on computational electromagnetic* [M]. Beijing: Science Press, 2004: 11-27.
- [6] 张晓燕, 盛新庆. 地下目标散射的 FDTD 计算 [J]. 电子与信息学报, 2007, 29(8): 1997-2000.
Zhang Xiaoyan, Sheng Xinqing. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2007, 29(8): 1997-2000.
- [7] 何继善. 电波勘探的发展与展望 [J]. 地球物理学报, 1997, 40 (增刊): 308-313.
He JiShan. *Chinese Journal of Geophysics*, 1997, 40(Suppl): 308-313.
- [8] 雷振英. 井中声波透视测量和解释系统及其探测金属矿的应用效果[J]. 物探与化探, 1991, 5: 340-351.
Lei Zhenying. *Geophys Geochem Explor*, 1991, 5: 340-351.
- [9] 吴以仁, 周凤桐. 钻孔电磁波法[M]. 北京: 地质出版社, 1982: 15-23.
Wu Yiren, Zhou Fengtong. *Borehole electro-magnetic method*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1982: 15-23.
- [10] 吴燕清. 地下电磁波探测及应用研究[D]. 长沙: 中南大学地学与环境工程学院, 2002: 30-38.
Wu Yanqing. *Underground electromagnetic wave methods and applications* [D]. Changsha: School of Geoscience Environmental Engineering, Central South University, 2002: 30-38.
- [11] Karlsson A Physical limitations of antennas in a lossy medium[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2004, 52(8): 2027-2033.
- [12] 谢处方, 王石安, 文希理. 加载与媒质中的天线 [M]. 成都: 电子科技大学出版社, 1990: 95-98.
Xie Chufang, Wang Shian, Wen Xili. *Loading antennas and antennas in lossy medium*[M]. Chengdu: UEST Press, 1990: 95-98.
- [13] He J Q, Cui T L. Method of moments analysis of electromagnetic scattering from a general three-dimensional dielectric target embedded in a multi-layered medium[J]. *Radio Science*, 2000, 35(2): 305-313.
- [14] Andersh D, Hazlett M, Lee S, et al. A high-frequency electro-magnetic scattering prediction code and environment for complex three-dimensional objects[J]. *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, 1994, 36(1): 65-69.

(责任编辑 杨书卷)