

《工程地球物理学报》稿件模板

(通栏排版, 图、表随文排)

基于蒙特卡洛方法的瞬变电磁接收机过渡过程研究 (省略版)

(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)

王广君^{1,2}, 段雪影^{1,2}, 黄鲸琿^{3,4}, 胡祥云^{3,4*}

(1. 中国地质大学 自动化学院, 湖北 武汉 430074;

2. 中国地质大学 复杂系统先进控制与智能自动化湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430074;

3. 中国地质大学 地球物理与空间信息学院, 湖北 武汉 430074;

4. 中国地质大学 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北, 武汉, 430074)

(作者单位应是全称, 保留至二级单位)

摘要: 传统的瞬变电磁法在浅层存在探测盲区, 限制了在浅层地表结构探测中的应用。瞬变电磁探测仪接收机的过渡过程的影响是导致浅层存在探测盲区的主要原因之一。当发射机关断时间及发射电流确定的情况下, 接收机电路的过渡过程会导致实测信号发生畸变, 影响浅层数据的反演。本文通过对接收机接收线圈的二阶电路建模分析, 结合自制的瞬变电磁系统“WLZTEM-2022”的实测数据, 在已知均匀半空间条件下通过蒙特卡洛反演得到接收线圈的RLC参数, 从而实现瞬变电磁法浅层探测信号的矫正。实验结果表明, 通过过渡过程校正后的早期瞬变电磁探测数据更接近瞬变电磁的早期正演数据, 通过计算本文定义的误差函数, 校正后的误差定量上比矫正前的误差约减小了3倍; 此外, 通过把反演得到的过渡过程中RLC参数加入到传统的瞬变电磁正演算法中, 可以得到对过渡过程准确建模后的早期($t < 1\mu s$)的理论总场曲线, 从而提高瞬变电磁系统浅层(0-5m)的探测能力。本文研究成果对提高瞬变电磁法浅层探测精度、减小早期探测盲区具有实际应用价值。

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 41630317); 地质过程与矿产资源国家重点实验室科技部专项经费资助(编号: MSFGPMR01-4); 中央高校基本科研业务费专项资金(编号: G1323519204); 中国国家留学基金资助(CSC No. 202206410063)。

(基金项目资助的论文, 优先发表)

第一作者: 王广君(1964-), 男(汉族), 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事智能仪器及图像处理与模式识别的研究。
Email: gjwang@cug.edu.cn

通讯作者: 胡祥云(1966-), 男(汉族), 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事重磁电综合地球物理技术的应用。
Email: xyhu@cug.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)

(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,应写出具体结果、结论,注重方法的创新点,具体得出哪些结果,结论所具有的科学价值、应用价值等,尽量用具体数字来说明该项工作取得的进展或成效,将定量分析结果、判定依据具体明确地阐述清楚。例如某项性能指标提高了百分之多少,避免“效果很好”这类的含糊其辞。本刊要求中文摘要写成300~500字)

关键词:瞬变电磁法;浅层探测;Simulink;过渡过程

(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)

Research on Transient Electromagnetic Receiver Transient Process Based on Monte Carlo

Wang Guangjun^{1,2}, Duan Xueying^{1,2}, Huang Jinghui^{3,4}, Hu Xiangyun^{3,4}

(1. School of Automation, China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074, China;

(2. Hubei Key Laboratory of Advanced Control and Intelligent Automation for Complex Systems, China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074, China;

3. Institute of Geophysics and Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074, China;

4. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei, 430074, 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)

Abstract: The traditional transient electromagnetic method (TEM) has a blind spot in shallow detection and can only accurately invert the geological structure of the deep surface. The influence of the transition process of the TEM receiver is one of the main reasons for the detection blind area in shallow layer. When the turn-off time and transmission current of the transmitter are determined, further research on the circuit performance characteristics of the receiver is needed. In this paper, through modeling and analysis of the second-order circuit of the receiver based on Simulink, combined with the measured data of the self-made transient electromagnetic system

"WLZTEM-2022", rLC parameters of the receiving coil are obtained through inversion under the condition of known uniform half-space. Thus the shallow detection signal of TEM can be corrected. The experimental results show that the early transient electromagnetic detection data corrected by the transition process is very close to the early forward transient electromagnetic data. According to the error function defined in this paper, the error after correction is about 3 times smaller than that before correction. In addition, by adding the RLC parameters in the transition process obtained by inversion into the traditional TEM forward algorithm, the numerical simulation results verify that the accurate modeling of the transition process can obtain the theoretical total field curve at the early stage ($t < 1\mu s$), and improve the detection ability of the shallow layer (0-5m) of the transient electromagnetic system.

The research results of this paper have practical application value to improve the accuracy of shallow detection and reduce the blind area of early detection.

Key words: TEM; Shallow detection; Simulink; Transient process

(英文摘要和关键词应与中文摘要和关键词一致)

1 引言

瞬变电磁法是一种高效率、无损、低成本的物探方法。通常通过发射机发射一个脉冲信号激励地下地质体产生二次场,然后对接收机测得的感应电压进行反演从而得到地下介质的信息。瞬变电磁法自 1956 年 Wait^[1]提出以来已经成为了地表地质调查中^[2]最重要的方法。例如对铜、钼、铅锌、铝土矿、铀等金属资源的勘察^[3];对岩土工程勘察中的采空区(空洞)、含水构造、土石分界及岩层富水情况进行地球物理勘察^[4]。近年来,由于城市的快速发展,浅层地质结构的探测与成像在城市地下空间利用、防灾减灾等方面的作用越来越重要,城市地下空间的地质结构的精确勘察可以有效地避免地质灾害和巨大的经济损失^[5,6,7]。

传统瞬变电磁法的浅层探测能力受限于发射机的关断时间和接收机的过渡过程^[8,9]。由于发射机的关断时间不为零,在早期会激发一次场,导致探测到的早期信号是一次场和二次场叠加的总场,此外,非零关断的磁场响应与理想关断的磁场响应之间存在差异,导致后期计算视电阻率存在误差,从而影响瞬变电磁法浅层探测中对二次场的反演解释精度^[10]。为此,付志红等推导了斜阶跃场源激励下的瞬变响应解析式,并提出了一种不需要进行关断效应校正直接计算全程视电阻率的方法,可减小视电阻率的误差^[11]。中南大学席振铎教授于 2016 年提出了等值反磁通瞬变电磁法^[12],可以有效地剔除一次场的影响,该方法采用上下平行共轴两组相同线圈为发射源,从而保证在该双线圈合成的一次场零磁通平面上一次场的大小为零。在此基础上,周超等提出了一种将等值反磁通瞬变电磁法和微动法联合起来的联合方法,为城市地下空间调查工作提供了一种行之有效的物探组合手段^[13]。史存焕等提出了一种共轴偶极的瞬变电磁装置方法,可减小多匝线圈的互感效应^[14]。但是目前对于瞬变电磁系统中的过渡过程还没有充分的研究,在传统的瞬变电磁法的浅层探测中,通常通过延时接收的方案来减小过渡过程对信号造成的畸变,但是这样会造成浅层探测的盲区。此外,接收线圈的大

小和匝数也会对过渡过程造成影响^[15]，所以有必要对瞬变电磁系统中的过渡过程进行进一步的研究。

本研究基于 Simulink 对瞬变电磁接收机的过渡过程进行建模分析，通过与自制的瞬变电磁系统“WLZTEM-2022”的均匀半空间实测数据结合，在已知均匀半空间条件下反演得到接收线圈的等效电路的 rLC 参数，即内阻 r 、电感 L 、分布电容 C ，得到的 rLC 参数可以用于未知地下介质浅层探测中过渡过程的矫正，且该方案易在接收机的 FPGA（Field Programmable Gate Array）上实现，实验结果验证了基于 Simulink 对瞬变电磁接收机的过渡过程建模的正确性，以及对浅层探测中过渡过程的矫正的必要性，并且提供了一种高精度的瞬变电磁法浅层探测的方案。

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

（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。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 方法简介

由于瞬变电磁每个接收线圈的分布参数都不一样，且分布电容 C 的计算非常困难且复杂，在实际中，也没有办法直接测量线圈的分布电容，因此本文提出了一种全新计算 rLC 参数的方案，即在正演的过程中考虑过渡过程的影响，通过基于 Simulink 对接收机过渡过程的二阶电路的建模分析，把接收线圈的 rLC 参数也加入到传统的正演模型中。当瞬变电磁系统的发射线圈和接收线圈大小和匝数设计好之后，通过传统的正演模型和 Simulink 对接收机过渡过程的二阶电路的建模，结合已知均匀半空间条件下的瞬变电磁系统“WLZTEM-2022”的实测数据，通过蒙特卡洛反演得到二阶电路的 rLC 参数。所以本文的正演过程分为两个部分：一是基于传统瞬变电磁法的非零关断的电磁响应；另一个是基于 Simulink 对过渡过程二阶电路的建模。

（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、

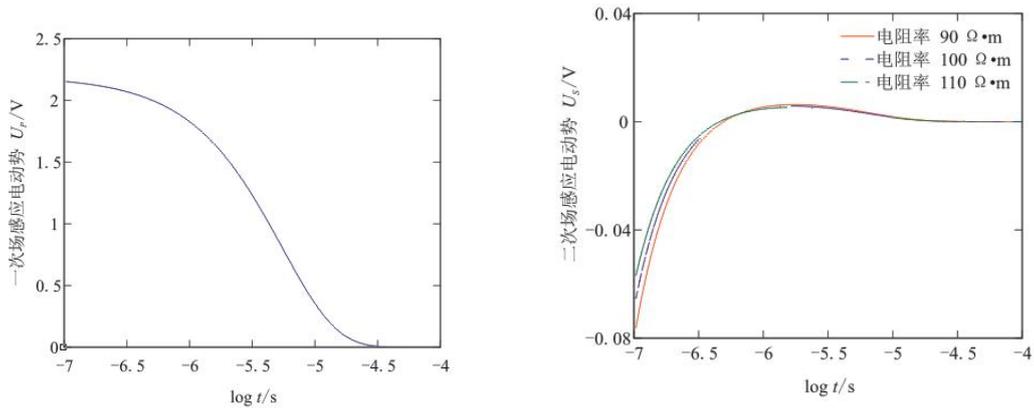
论证严谨、论据充分、内容创新、数据可靠、方法科学、文字通顺简洁、可读性强。引用他人观点、资料、数据等，必须列出参考文献(公开出版物)或作脚注(非公开出版物)。凡是能用简要的文字讲解清楚的内容，尽量用文字陈述，用事实和数据说话；用文字不容易说明白或说起来比较繁琐的，可以用图、表来陈述。。

本刊要求：

- (1) 稿件一律通栏排，不要双栏排。图、表一律随文排。
- (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，一定要注明其含义和单位。)

3.2 rLC 参数反演

在对过渡过程的 rLC 参数反演之前，需要理论计算的非零关断电磁响应 $U_0(t)$ ，如图所示。图 6 (a) 是根据发射机发射的实际电流理论计算的一次场感应电动势 $U_p(t)$ ，图 6 (b) 是根据野外实际的均匀半空间的电阻率 ρ 所对应的非零关断条件下的二次场感应电动势 $U_s(t)$ 。



(a) 一次场的感应电动势

(b) 二次场的感应电动势

图 6 理论计算的 nonzero 关断电磁响应 (未通过过渡过程)

Fig. 6 Field measurement data of transient electromagnetic system "WLZTEM-2022"

(1. 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。分图要有分图名。

2. 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。纵横坐标和色标所表示的物理量及单位均要标明。

3. 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)

4 结论

1) 通过理论数据与瞬变电磁测量的实验数据对比, 发现未通过过渡过程处理的总场与实验数据在早期有较大差异, 验证了对浅层探测中过渡过程的矫正的必要性。

1) 通过对瞬变电磁仪器接收机的过渡过程建模及对接收线圈分布参数的蒙特卡洛反演, 可以得到线圈的 rLC 参数, 经过过渡过程后的理论曲线与实测的曲线在早期吻合, 通过计算本文定义的误差函数 ψ , 经过过渡过程校正后的误差定量上比矫正前的误差约减小了 3 倍。

2) 反演的结果表明反演的数据长度会影响反演的 rLC 参数, 反演的数据长度越大, 反演得到的 rLC 参数越小, 得到的感应电压曲线变化越剧烈; 该文章提出的反演算法可以直接移植到接收机的 FPGA 上。

3) 把反演得到的过渡过程中 rLC 参数加入到传统的 TEM 正演的算法中, 可以得到对过渡过程准确建模后的早期 ($t < 1\mu s$) 的理论总场曲线, 从而提高瞬变电磁系统浅层 (0-5m) 的探测能力。

(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程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] Wait, J.R. Transient fields of a vertical dipole over a homogeneous curved ground [J]. Canadian Journal of Physics, 1956, 34(1): 27-35.
- [2] Wang, B., Liu, J., Hu, X., Liu, J., Guo, Z., Xiao, J., Geophysical electromagnetic modeling and evaluation: A review [J]. Journal of Applied Geophysics, 2021, 194(3): 104438.
- [3] Guo, Z., Xue, G., Liu, J., Wu, X.. Electromagnetic methods for mineral exploration in china: A review[J]. Ore Geology Reviews, 2020, 118(3): 103357.
- [4] 郭润平, 张康, 田江环, 等. 瞬变电磁法大电流多匝重叠小回线装置在岩土工程勘察的应用效果[J]. 工程地球物理学报, 2021, 18(04): 503-512
- [5] 覃晖, 唐玉, 王铮铮, 等. 综合探测技术在隧道超前地质预报中的应用[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(S2): 681-686.
- [6] 张子强. 瞬变电磁法在隧道工程地质风险预测与评估中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2021, 18(05): 671-677.
- [7] 谢昭晖, 陈清, 吴牧阳, 等. FCTEM 小回线瞬变电磁法在铁路桥梁基础勘查中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2021, 18(5): 568-572.
- [8] 白登海, Maxwell Meju. 瞬变电磁法中两种关断电流对响应函数的影响及其应对策略[J]. 地震地质, 2001, 23(2): 245-251.
- [9] 党瑞荣, 赵文涛, 任志平. 瞬变电磁法中接收线圈过渡过程分析[J]. 石油仪器, 2009, 023(002): 7-9.
- [10] 陈明生, 许洋铖. 对瞬变电磁测深几个问题的思考(三)——瞬变电磁场关断效应及全期视电阻率的普适算法[J]. 煤田地质与勘探, 2017, 45(04): 131-134.
- [11] 孙天财, 付志红, 谢品芳. 斜阶跃场源关断时间对测量结果的影响及校正研究[J]. 工程地球物理学报, 2008, 5(3): 287-293.
- [12] 席振铎, 龙霞, 周胜等. 基于等值反磁通原理的浅层瞬变电磁法[J]. 地球物理学报, 2016, 59(9): 3428-3435.
- [13] 周超, 刘怡, 赵思为. 综合物探在城市地下空间地质调查隐伏断层探测中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2022, 19(1): 64-70.
- [14] 史存焕, 刘黎东, 贾祥雨. 基于共轴偶极装置的瞬变电磁超前地质预报方法与应用[J]. 工程地球物理学报, 2021,

18(5):579-588.

[15] 鲍明晖, 余慈拱, 王谦, 胡晓锐, 付志红. 瞬变电磁法小线圈装置过渡过程影响研究[J]. 工程地球物理学报, 2014, 11(03):366-369.

[16] Fitterman, D.V., Anderson, W.L. Effect of transmitter turn-off time on transient soundings. Geoprospecting[J], 1987, 24:131-146.

[17] Knight, J.H., Transient electromagnetic calculations using the gaverstehfest inverse laplace transform method[J]. Geophysics, 1982, 47(1):47.

[18] Guptasarma, D., Singh, B., New digital linear filters for hankel j0 and j1 transforms. Geophysical Prospecting[J], 1997, 45: 745 - 762.

[19] 李维波, 毛承雄, 陆继明, 等. 分布电容对 Rogowski 线圈动态特性的影响 研究[J]. 电工技术学报, 2004, 19(6):12-17.

[20] 王家映. 地球物理资料非线性反演方法讲座(一)地球物理反演问题概述 [J]. 工程地球物理学报, 2007, 4(1):1-3.

(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^[2], ……^[8];

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。

本刊建议作者多引用发表的期刊文献。本刊要求参考文献应达 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)

