

doi: 10.11720/wtyht.2015.4.29

周磊, 严良俊, 谢兴兵, 等. 激发极化介质的瞬变电磁一维正演[J]. 物探与化探, 2015, 39(4): 837-841. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2015.4.29>

Zhou L, Yan L J, Xie X B, et al. The 1D TDEM forward modeling for induced polarization media[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2015, 39(4): 837-841. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2015.4.29>

激发极化介质的瞬变电磁一维正演

周磊¹, 严良俊¹, 谢兴兵¹, 王志刚², 隋俊杰³

(1. 长江大学 油气资源与勘探技术教育部重点实验室, 湖北 武汉 430100; 2. 中国石油东方地球物理公司, 河北 涿州 072751; 3. 中国石化石油物探技术研究院, 江苏 南京 210000)

摘 要: 为了研究激发极化介质所产生的激电效应对瞬变电磁的响应规律, 先求解相同装置的频率域电磁法响应, 将表征介质激电效应的 Dias 模型在频率域中引入, 然后采用正弦变换得到带有激电信息的瞬变电磁响应; 重点讨论均匀半空间和层状可极化大地下的瞬变电磁响应特征。通过正演模拟分析得到: 在均匀半空间情况下, 极化率越大极化效应越强; 激电时间常数越大, 出现激电异常的时间越晚; 极化电阻系数越大, 出现激电异常时间越早。对于中间层极化率相同的不同电阻率的三层模型呈现如下规律: H 型地电断面反映极化层能力最强, K 型反映极化层能力最差, A 型和 Q 型介于两者之间。

关键词: 激发极化介质; 瞬变电磁; 电偶源; 一维正演; Dias 模型

中图分类号: P631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2015)04-0837-05

随着勘探深度的不断增加, 电性源瞬变电磁法在中深部找矿、油气探测等领域发挥着重要的作用。在野外进行瞬变电磁法采集时往往会观测到信号的反转, 通常认为这是由于岩矿石的激发极化效应引起的^[1-3], 因此, 探讨激电效应对瞬变电磁响应的影响规律非常重要。对此, 国内外已有不少学者作了研究: Morrison 等人指出激电效应在重叠回线瞬变测量中可能表现为符号反转^[4]; Flis 等对时间域瞬变电磁法中激电效应影响的物理机制进行了探讨, 认为瞬变电磁响应中信号的反转现象可以被用来探测地下是否有极化的矿化物存在^[5]。国内外的很多学者对瞬变电磁法的激电效应也进行了研究^[6-9]。笔者基于 Dias 模型, 在电偶源瞬变电磁场正演的基础上对含激电参数的 TEM 信号开展计算, 并对正演结果进行了分析。

1 Dias 模型

Dias 模型是由 C. A. Dias 提出的一种用来描述矿化岩石激发极化效应的新的数学模型, 具有拟合精度高和参数物理意义明确的优势^[10-13]。Dias 模

型等效电路如图 1 所示, R 、 R_s 分别为与极化部分并联、串联的电阻; r 为极化通道中发生极化部分的电阻; C_{dl} 为响应部分的电容, Z_{dl} 为电容阻抗; a 为实常数, ω 为角频率, Z_w 为 Warburd 阻抗。

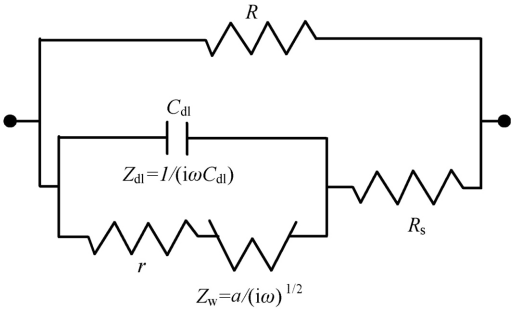


图 1 Dias 模型等效电路

Dias 模型的等效电路和相应的复电阻率计算公式为

$$\rho(w) = \rho_0 \left\{ 1 - m \left[1 - \frac{1}{1 + iw\tau' \left(1 + \frac{1}{\mu} \right)} \right] \right\},$$

其中: $\rho(w)$ 为考虑极化效应后与频率相关的复电阻

收稿日期: 2014-06-25

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目(2013CB228605); 国家自然科学基金项目(41274082); 国家石油重大专项(2011ZX05019); 油气资源与勘探技术教育部重点实验室(长江大学)开放基金资助项目(K2014-13)

率; ρ_0 为包含极化效应时的直流电阻率(零频电阻率), $\rho_0=\rho_i/(1-m_i)$, $i=1,\cdots,n$; ρ_i 为不包含极化效应的第 i 层的电阻率;极化率 m 是表示激电效应的“强度参数”, $m=(\rho_0-\rho_\infty)/\rho_0$,为 $0\sim 1$ 的无量纲参数; η 为电化学参数, $\eta=a/r$,反映单元中极化(感应)电流和扩散电流的相对大小,其量纲为 $s^{1/2}$; δ 为 $0\sim 1$ 的无量纲参数, $\delta=r/(r+R_s)$,表示孔隙中受极化源影响的部分,只反映极化电流; τ,τ',τ'' 为弛豫时间常数,与产生极化的粒子的平均尺寸有关,具有 s 的量纲,其中 $\tau=rC_{dl},\tau'=(R+R_s)C_{dl},\tau''=(aC_{dl})^2$,经推导化简^[8]得 $\tau'=\frac{\tau(1-\delta)}{\delta(1-m)},\tau''=\tau^2\eta^2,\mu=i\omega\tau+(i\omega\tau'')^{1/2}$ 。

2 含激电效应的电偶源 TEM 一维正演

对含激电效应的电偶源瞬变电磁法正演,采取先求解相同装置的频率域电磁法的正演,并在频率域中用 Dias 模型的复电阻率代替地层的直流电阻率,然后采用正弦变换得到带有激电信息的电偶源瞬变电磁响应。在 TEM 方法下,对无极化且极化强度变化的均匀半空间介质模型以及层状介质模型进行正演计算,由此总结激电效应对 TEM 的影响规律。

如无特别说明,地电模型采用以下缺省参数:时间常数 $\tau=0.005\text{ s}$, $\eta=9\text{ s}^{1/2}$, $\delta=0.8$,电偶极子长度为 $1\,000\text{ m}$,发射电流 1 A ;发射的中心点坐标为 $(0,0)$,接收点坐标为 $(0,5\,000)$,单位 m 。

2.1 均匀半空间模型

首先利用均匀半空间模型的解析解来验证本文所采用的数值算法的正确性。均匀半空间情况下大地的电阻率为 $\rho_{\text{half}}=100\text{ }\Omega\cdot\text{m}$,数值解采用模型参数为 $\rho_1=\rho_2=\rho_3=100\text{ }\Omega\cdot\text{m},h_1=200\text{ m},h_2=400\text{ m}$ 。

从图 2 中可以看出,均匀半空间情况下数值解与解析解在 $10^{-6}\sim 10\text{ s}$ 的范围内拟合得非常好,可以说明本文所采用的数值算法的正确性。

为了解不同激电参数对均匀半空间水平电场曲线的影响,取均匀非极化大地介质电阻率 $\rho_{\text{half}}=100\text{ }\Omega\cdot\text{m}$ 。图 3 给出了均匀半空间情况下的不同激电参数正演模拟结果。图 3a 为不同电化学参数的水平电场振幅曲线,可以看出随着电化学参数的增大,水平电场曲线基本无变化。由此可知,电化学参数对极化效应基本无影响。

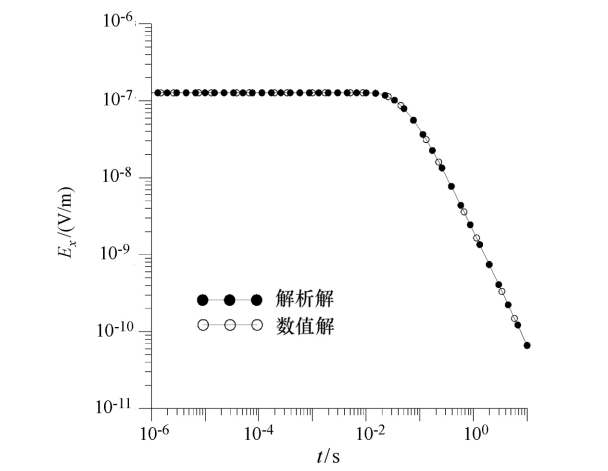


图 2 均匀半空间情况下解析解与数值解对比

图 3b 为不同极化率的水平电场振幅曲线,可以看出随着 m 的增大,水平电场振幅曲线先增大到极大值后快速减小。从而,极化率越大,水平电场振幅曲线变化越明显,即极化率越大,极化效应越强。

图 3c 为不同时间常数的水平电场振幅曲线。当时间常数逐渐增大时,水平电场曲线随时间轴往右平移。因此,激电时间常数越大,出现激电异常的时间越晚。

图 3d 为不同极化电阻系数的水平电场振幅曲线。从图中可以看出,随着极化电阻系数的增大,水平电场振幅曲线形状基本保持不变,只是曲线沿时间轴往左平移。从而可知,极化电阻系数越大,出现激电异常时间越早。

综上所述,激电参数对水平电场振幅曲线的影响规律与 Dias 模型中这些参数对激电频谱曲线的影响规律相同。这也与 Dias 模型物理意义一致,进一步验证了程序的可靠性。

2.2 TEM 三层模型正演

均匀半空间模型结果说明极化地层产生的异常可以反映极化层的存在,为了进一步了解含激电信息的一维电偶源瞬变电磁与电阻率断面类型的关系,对反映普遍情况的典型三层地电模型中间层极化情况进行计算。模型参数见表 1,正演结果如图 4 所示。

表 1 三层地电模型参数

模型类型	电阻率/ $(\Omega\cdot\text{m})$			层厚 m	m
	ρ_1	ρ_2	ρ_3		
H 型	100	10	100	$h_1=200$ $h_2=400$	$m_1=m_3=0$; 中间层极化时, $m_2=0.5$; 中间层不极化 时, $m_2=0$
A 型	100	500	1000		
Q 型	100	500	10		
K 型	100	500	100		

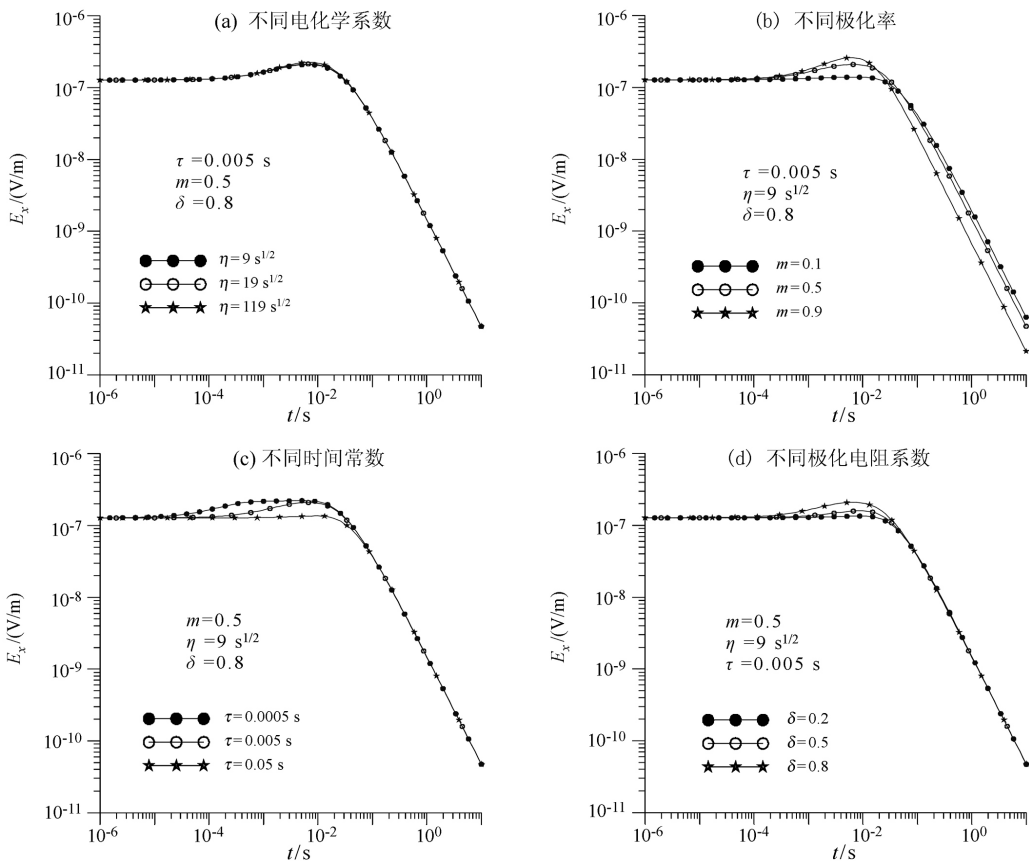


图 3 均匀半空间不同激电参数 TEM 正演结果

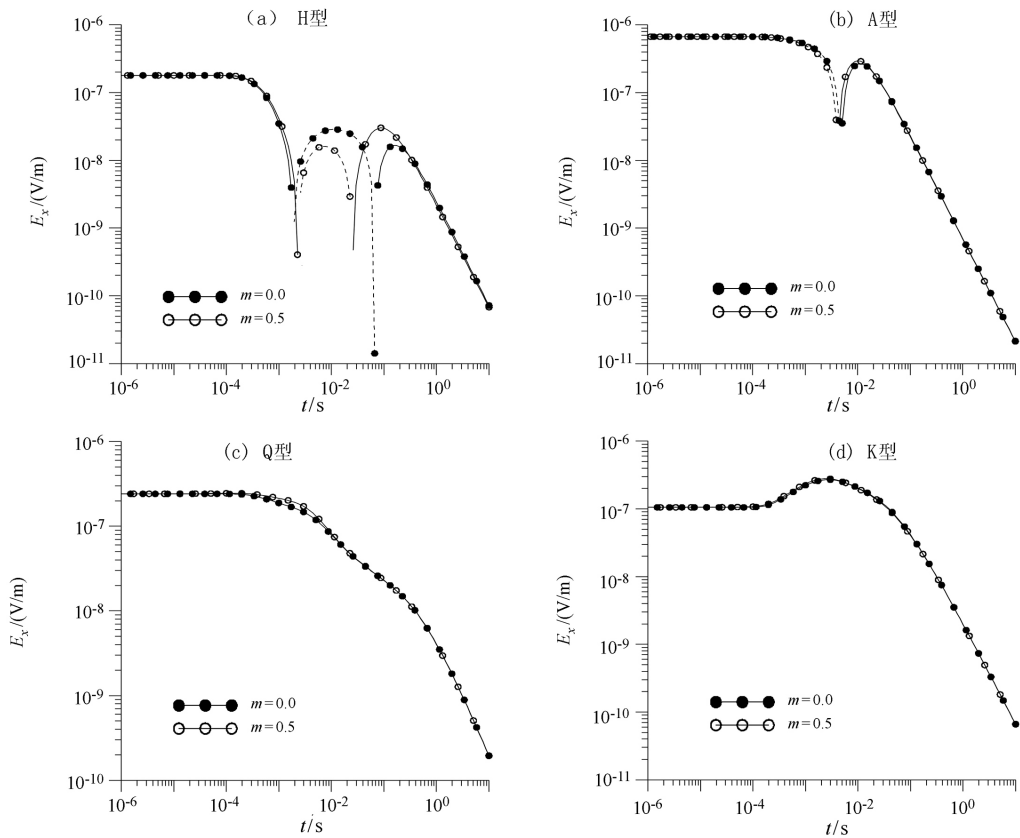


图 4 三层模型正演结果(实线为正,虚线为负)

对于典型的三层地电模型,考虑中间层极化时计算的电场幅值均与不极化时存在明显的差异。计算出的相对异常平均值的排序为:H型(50.76%)>A型(7.27%)>Q型(2.86%)>K型(1.59%),这说明H型断面的激电异常最大,反映极化层的能力最强,K型断面的激电异常最小,反映极化层的能力最差,A型和Q型介于两者之间。

对H型地电断面而言,其电场的瞬变响应早期为正值,然后由正值变为负值,经历时间较短,很快又由负值变为正值,并快速衰减。对比有、无极化情况下的正演结果可发现:在0.001~0.2 s的范围内,极化情况下的电场振幅曲线比无极化情况下的电场振幅曲线的幅值要高。这主要是由于极化体在感应涡流的作用下产生了极化电流,即:在瞬变电磁响应的早期,感应涡流衰减很小,极化体处于充电状态,此时极化电流与涡流同向,随着瞬变过程的继续,涡流逐渐衰减,当涡流衰减到不能维持极化体充电状态时,极化体发生放电形成反向极化电流,如果在某时刻感应涡流已衰减得相当微弱,或极化体激电效应很强,则反向极化电流可能会超过感应涡流。

对A型地电断面,其电场水平分量振幅曲线先是负值后逐渐变为正值,则在中间层存在极化的情况下其电场振幅曲线略高于不存在极化时的电场振幅曲线。对于K型地电断面,在有、无极化下其电场水平振幅曲线在全时间段基本重合。对于Q型地电断面,在0.001 s附近时,其电场振幅曲线在极化情况下比无极化情况下幅值要高。需要注意的是,当不存在极化时,H型模型出现了二次变号的现象,这可能是由低阻层引起的。

综上所述,对中间层为极化层的三层水平地层模型的研究表明,电阻率断面类型的影响是不可忽略的。H型断面激电异常最大,反映极化层的能力最强;K型断面的激电异常最小,反映极化层的能力最差;A型和Q型断面则介于两者之间。

3 结论

在电偶源瞬变电磁激发极化效应的研究过程中,通过对均匀半空间以及可极化层状大地的瞬变电磁响应的分析,可以得出以下结论:

(1) Dias模型在电偶源瞬变电磁方法的研究中是适用的,通过对比电场幅值考虑激电效应前后的曲线,可以明显地看到极化层所引起的异常。

(2) 对均匀半空间模型和典型三层模型(只有

中间层为极化层)的情况研究表明,电阻率断面类型的影响是不可忽视的。在均匀半空间情况下,极化率越大,极化效应越强;激电时间常数越大,出现激电异常的时间越晚;极化电阻系数越大,出现激电异常时间越早。对于中间极化率相同的不同电阻率模型呈现如下规律:H型断面的激电异常最大,反映极化层的能力最强,K型断面的激电异常最小,反映极化层的能力最差,A型和Q型介于两者之间。

(3) 在无极化的层状导电大地上,H型地电断面的电场表现出由早期的正值变为负值,在很短的时间后迅速变成正值的复杂瞬变响应,A型地电断面的电场则表现出在早期由负值变为正值的复杂瞬变响应,这是值得重视的现象,需要进一步研究其物理和电化学原因。同时,这种现象也能为我们在进行电偶源瞬变电磁资料的处理解释时提供新的思路。

参考文献:

- [1] 傅良魁.激发极化[M].北京:地质出版社,1982.
- [2] 罗延钟,张桂青.频率域激电法原理[M].北京:地质出版社,1988.
- [3] 牛之琰.时间域电磁法原理[M].长沙:中南工业大学出版社,1992.
- [4] Morrison H F, Phillips R J, O'Brien D P. Quantitative interpretation of transient electromagnetic fields over a layered half space[J]. Geophysics Prospect, 1969, 17: 82 - 101.
- [5] Marcus F F, Gregory A N. Induced-polarization effects in time-domain electromagnetic measurements [J]. Geophysics, 1989, 54 (4): 514 - 523.
- [6] Fiandaca G, Auken E, Christiansen A V, et al. Time domain induced polarization: Full-decay forward modeling and 1D laterally constrained inversion of Cole-Cole parameters [J]. Geophysics, 2012, 77(3): 213 - 225.
- [7] 殷长春,刘斌.瞬变电磁法三维问题正演及激电效应特征研究[J].地球物理学报, 1994, 37(1): 486 - 492.
- [8] 徐凯军,李桐林,刘展.激电效应对瞬变电磁影响特征研究[J].物探化探计算技术, 2010, 32(6): 613 - 616.
- [9] 黄力军,罗延钟.时间谱电阻率法可行性初探[J].地质科技情报, 1995, 14(2): 98 - 104.
- [10] Dias C A. Analytical model for a polarizable medium at radio and lower frequencies [J]. Journal of geophysical research, 1972, 77 (26): 4945 - 4956.
- [11] Dias C A. Developments in a model to describe low-frequency electrical polarization of rocks [J]. Geophysics, 2000, 65(2): 437 - 451.
- [12] 丁柱,童茂松,潘涛.岩石复电阻率 Dias 模型及其反演方法[J].大庆石油地质与开发, 2005, 24(5): 90 - 92.

[13] 童茂松,丁柱.岩石复电阻率频谱模型参数的反演[J].测井技术,2006,30(4):303-305.
[14] 底青云,王若.可控源音频大地电磁数据正反演及方法应用[M].北京:科学出版社,2008.

The 1D TDEM forward modeling for induced polarization media

ZHOU Lei¹, YAN Liang-Jun¹, XIE Xing-Bing¹, WANG Zhi-Gang², SUI Jun-Jie³

(1. Key Laboratory of Exploration Technologies for Oil and Gas Resources, Ministry of Education, Yangtze University, Wuhan 430100, China; 2. BGP, China National Petroleum Corporation, Zhuozhou 072751, China; 3. Sinopec Geophysical Research Institute, Nanjing 210000, China)

Abstract: To study the IP effect ("induced polarization effect") generated by IP media according to the rule of TEM response, the authors firstly solve the electromagnetic responses which have the same K-factor, introduce the Dias model describing IP effect in the frequency domain, and then use the sinusoidal transform to get TEM response with the IP information. As the chargeability increases, the amplitude of the electric filed is changed in the homogeneous half-space. With the increase of the relaxation time, the IP anomaly appears in the late time. And the IP anomaly appears in the early time when the polarization resistance coefficient is increased. Among different resistivity models with the same chargeability in the middle layer, it can be summarized that the H-type model can easily show the polarization layer, while the K-type is the worst model to manifest the induced polarization effect, with the performance of the A and Q-type lying between H and K type.

Key words: IP media; transient electromagnetism; electric dipole; 1D forward; Dias model

作者简介: 周磊(1985-),男,长江大学地球探测与信息技术专业在读博士研究生,主要研究方向为电法勘探及数值模拟。
通讯作者: 严良俊(1964-),男,教授,博士,湖北荆州人,从事电磁法勘探研究工作。E-mail:yljemplab@163.com