

文章编号:1000-1441(2004)05-0487-05

浅层瞬变反演电阻率资料 在表层速度成像中的应用

严良俊¹, 苏朱刘¹, 胡文宝¹, 吴信全², 卿绍强²

(1. 长江大学地球物理与石油资源学院, 湖北荆州 434023; 2. 新疆正通诚信科技发展有限公司, 新疆乌鲁木齐 830016)

摘要:通过浅层瞬变电磁测深反演的电阻率剖面与同一测线的微测井速度深度曲线的对比研究认为, 表层速度结构与电阻率分层有较好的对应关系, 这种关系表现为非线性。提出了对弗斯特公式的修改方法, 即在对数域中以电阻与深度的高阶多项式来近似表示地层速度, 通过利用剖面上微测井速度资料及其该测点上瞬变反演的电阻率资料, 用共轭梯度法反演求取多项式系数, 给出了速度与电阻率及深度的经验关系式, 并利用该关系式对瞬变电磁测深反演的电阻率剖面进行速度成像。试验剖面的速度成像结果对认识表层速度结构和划分低、降速带有参考价值, 对地震资料的静校正的速度建模有指导作用。

关键词:瞬变电磁测深; 反演; 成像; 低、降速带; 地层速度; 共轭梯度

中图分类号: P631. 325

文献标识码: A

在西部复杂山地的地震勘探中, 二维和三维地震勘探的静校正问题尚未完全得到解决, 其主要原因是建立低、降速带的速度模型存在困难。目前较为有效的解决办法是在地震勘探工区进行为数不多的小折射或大折射或微测井, 以此实现表层速度建模。然而这些方法实现起来成本较高, 且仅为一地之见或一孔之见; 在小折射或大折射或井孔位置选择时又有一定的随意性, 表层速度建模的准确性较差, 从而使静校正问题难以得到解决。

浅层瞬变电磁测深方法(近场测深)作为近年来电磁法勘探最为活跃的勘探技术, 其勘探方式灵活多变, 成本低廉, 分辨率与工作效率较高, 已广泛应用于油气勘探、矿产调查、找水、地热勘探和工程地质领域, 取得了良好的地质效果^[1,2]。该方法还被广泛用于 MT 静校正^[3], 提高了 MT 方法的解释精度。加拿大凤凰地球物理公司的 MulTEM 和 FasTEM 浅层瞬变电磁测深系统具有频带宽、上限频率高(28 kHz)和采样率高(0.31 μ s)等特点, 能进行 5~500 m 深度范围内的目标勘探。我们研究开发的 FasTEM 和 MulTEM 处理与解释系统, 可对中、浅层电性结构进行高分辨率电阻率成像。

地层的速度与其电性及埋深有着较为复杂的关系, 在这方面的研究文献较少, M. 格劳尔(1987)^[4]与徐群周(2000)等^[5]以弗斯特公式近似研究了层速度与电阻率的关系。针对试验工区复杂低、降速带一般埋深在 0~300 m 之间, 且地层的

速度分层与岩石的电性、地质层位有关的特点, 我们提出了以 MulTEM 和 FasTEM 瞬变电磁测深获取的浅层高分辨率电阻率法资料为基础, 以少量的微测井资料进行电阻率与速度标定, 研究电性结构与地震低、降速带之间的对应关系, 建立电阻率与层速度间的转换关系, 从而实现表层速度建模, 最终使电法勘探资料能够用于地震静校正。

1 反演电阻率结果与微测井速度分层对比

浅层瞬变试验测线长 14 km, 布设测点 138 个, 点距 100 m, 每个测点上都进行了 MulTEM 和 FasTEM 观测, 应用高精度反演方法^[6,7], 获取了试验测线瞬变资料的高分辨率电阻率深度剖面(图 1)。从图 1 可看出, 在 0~300 m 深度内可划分 7 套电性层。第 1 层(0~50 m)为第四系高阻戈壁沙层; 第 2 层为第四系, 埋深在 30~100 m, 为甚高阻干砂层, 电阻率大于 200 $\Omega \cdot$ m; 第 3 层为厚度 20 m 左右的第四系泥岩层, 电阻率小于 10 $\Omega \cdot$ m; 第 4~第 7 层, 埋深 100~300 m, 为第三系高阻(50~100 $\Omega \cdot$ m)和低阻(10 $\Omega \cdot$ m 左右)互层。

收稿日期: 2003-11-04; **改回日期:** 2004-02-19;

作者简介: 严良俊(1964—), 男, 博士, 现从事电磁勘探方法理论研究工作。

基金项目: 国家自然科学基金(40174040)和中石油科技发展部“十五”攻关项目(1-6)资助。

该测线有3口微测井,分别为L-01、L-02与L-03(图1),与其对应点处的瞬变测深点号分别为FM03-102、FM03-132与FM03-238。将各井旁瞬变测深反演电性层底面埋深与微测井速度层底面埋深进行对比,图2、图3和图4分别为3个测点的对比图。由图可见,从单点反演的结果看,浅层瞬变对薄的电性层的分辨能力是相当高的,可以清晰地显示出200 m埋深处10 m厚的低阻层。结果还表明,在表层结构中,相对地震波速度而言,电性层的层次多,地层的电阻率差异更明显。时距曲线的拐点,即速度层底界面,与相应的

反演电阻率模型主要电性层对应良好。各微测井速度分层与相应的瞬变测深点反演电性层详细数据对比结果如表1所示。表中数据表明,反演电性层与速度层的埋深基本相符,平均符合精度小于3.6%,这说明瞬变测深反演电阻率剖面真实可信,且具有较高的反演精度,同时也说明电性界面与地震波速度界面有一定的对应关系。将电阻率剖面与微测井速度进行对比,我们还发现,层速度由浅到深不断增大,总体而言,电阻率越小,则速度越大。因此,建立电阻率与速度的关系是有可能的。

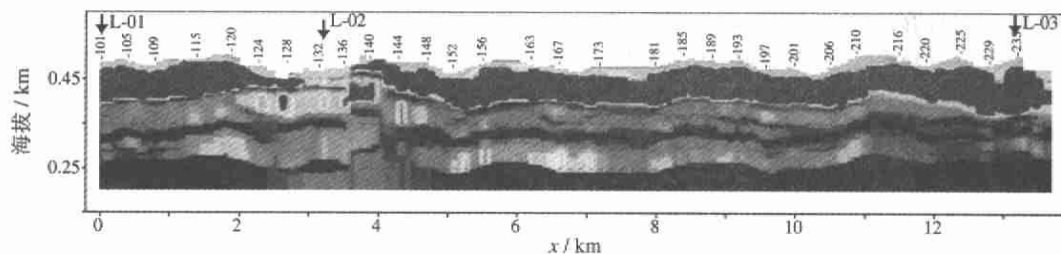


图1 试验测线浅层瞬变反演电阻率剖面(箭头处为微测井)

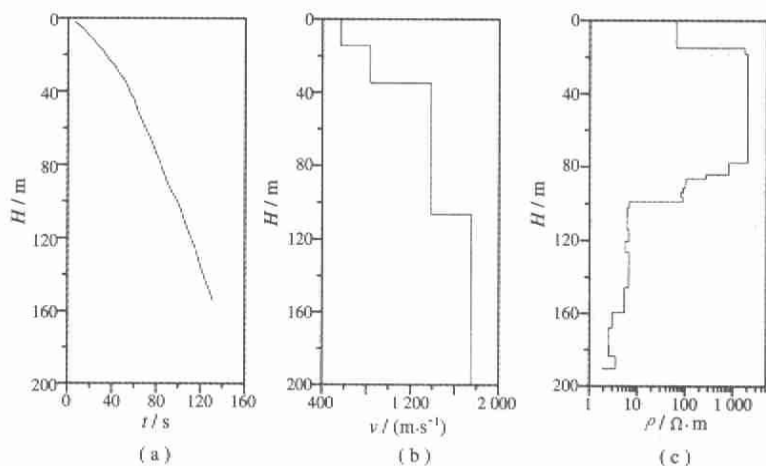


图2 L-01井时距曲线与FM03-102号测点瞬变测深反演电阻率曲线对比

(a)时距图;(b)速度-深度曲线;(c)反演电阻率-深度曲线

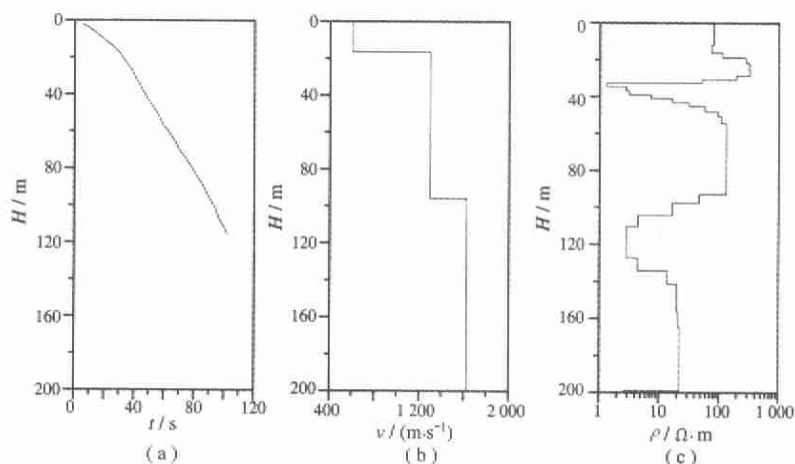


图3 L-02井时距曲线与FM03-132号测点瞬变测深反演电阻率曲线对比

(a)时距图;(b)速度-深度曲线;(b)反演电阻率-深度曲线

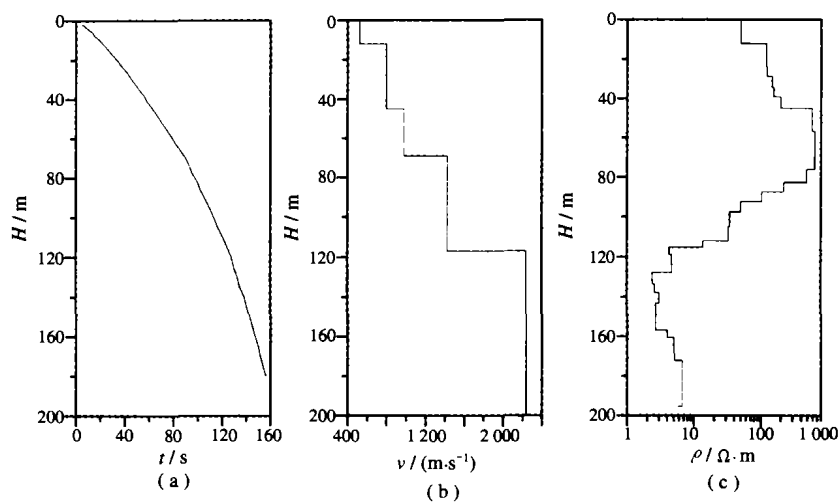


图 4 L-03 井时距曲线与 FM03-238 号测点瞬变测深反演电阻率曲线对比
(a)时距图;(b)速度-深度曲线;(c)反演电阻率-深度曲线

表 1 微测井速度分层底面埋深与瞬变测深点反演电性层底面埋深对比

井号/测点号	电性层底面埋深/m	速度层底面埋深/m	层速度/(m·s ⁻¹)	拟合度, %
				$\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{A_i - \bar{A}}{A_i} \right)^2}$
L-02/ FM03-132	16.0	16.5	600.0	3.1
	97.5	92.5	1 296.9	
			1 623.0	
L-01/ FM03-102	14.9	14.5	565.0	3.8
	?	35.0	832.0	
	98.9	106.5	1 383.9	
			1 749.0	
L-03/ FM03-238	12.2	12.0	525.8	3.7
	44.9	45.0	797.9	
	76.1	69.0	979.0	
	92.3	93.0	1 429.0	
			2 239.0	

上述这种关系进行了研究,并认为地层的传播速度存在如下关系,即弗斯特公式^[5,8]

$$v \approx k \rho^{\alpha} H^{\beta}$$

(2)

如果对(2)式取对数,则我们可以看到,lgv与lgρ和lgH的关系只是一次近似,即线性关系,这难以较精确地反映速度与电阻率及深度之间复杂的非线性关系。

我们在进行了微测井的速度与该点处瞬变资料反演电阻率及深度各种近似关系公式研究后认为,以lgρ和lgH的高阶多项式来拟合地层速度,可得到较好的拟合精度。为此,在速度成像方法中,我们采用了如下函数关系来进行速度剖面成像,即

$$v = v(\rho, H)$$

(1)

式中,ρ为电阻率,H为岩石的埋深。曾有学者对

2 速度成像算法的基本原理

将浅层瞬变测深得到的反演电阻率数据与测线上微测井速度曲线相结合来进行速度剖面成像方法研究是本次试验的重要内容。试验证明,相同岩性的不同物性参数间存在着一定的相互关系;同时,各种测井资料表明,岩石的传播速度与埋深也有一定的相互关系。所以,地层的传播速度与岩石的电性(电阻率)以及岩石的埋深有关,在数学上可表示为

$$\lg v \approx a_1 \lg H + a_2 (\lg H)^2 + a_3 (\lg H)^3 + a_4 \lg \rho + a_5 (\lg \rho)^2 + a_6 (\lg \rho)^3 + a_7 \quad (3)$$

式中, a_1, a_2, \dots, a_7 是待定系数。一旦系数确定后, 即可应用反演电阻率剖面按上式求解速度, 从而实现速度剖面成像。具体做法是:

1) 将微测井的时距图转换成速度—深度曲线;

2) 将速度与相应点瞬变测深反演电阻率曲线插值到相同深度剖面上;

3) 用实测速度与多项式理论值构造如下目标函数:

$$\phi(m) = \| \lg v^s - \lg v(m) \|^2 \quad (4)$$

式中, $m = a_1, a_2, \dots, a_7$ 为系数向量;

4) 用共轭梯度法求解系数向量;

5) 应用确立的多项式函数关系, 可将反演电阻率剖面转换成速度剖面。

3 速度成像与低、降速带划分

由于速度成像是利用微测井速度与反演电阻率剖面来进行多项式拟合, 因而, 微测井的速度曲线形态的好坏直接影响到拟合多项式系数求取的精度。本次试验测线上有 3 口微测井, 在求取速度剖面时, 为了保证可靠的精度, 测线上所有微测井同时参与多项式系数的求取, 即系数的求取是最大可能地去同时拟合一条测线上微测井的速度。

图 5 是实际速度曲线(由时距曲线转换而得)与由电阻率转换的速度曲线对比结果(点画线为实测速度, 实线为成像速度)。从图中可以看出, 曲线的拟合较好, 整体拟合误差小于 5%, 说明转换在测井点处具有较高的精度。由此试验, 速度成像剖面为地震速度建模提供量化数据的精度是有保证的。

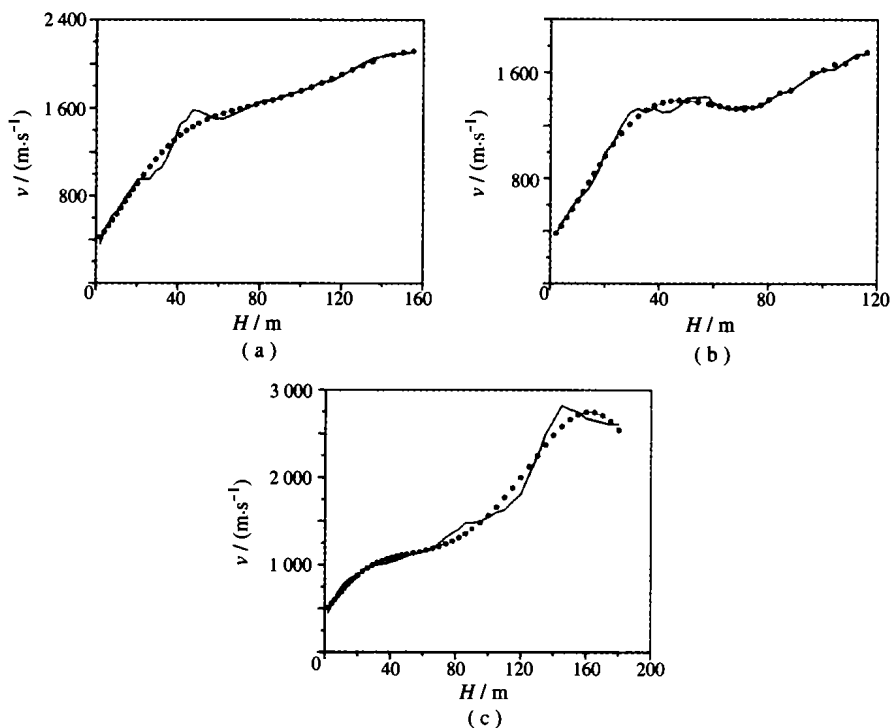


图 5 实测地层速度与电阻率成像速度对比

(a)L-01 井; (b)L-02 井; (c)L-03

低、降速带一般为地表风化层和松散沉积的未成岩地层。在试验测线, 地表风化层和松散沉积的未成岩地层在电性上多表现为高阻, 研究各电性层的岩性发现, 第 1 电性层、第 2 电性层和第 3 电性层为第四系沉积, 是未成岩的松散沉积物, 速度较低; 其下的第 4 电性层为第三系泥质砾岩, 为半成岩沉积, 地震速度也较低; 第 5 电性层及其以下为第三系成岩的泥岩与砂岩, 地震速度增大。由表 1

知试验测线上 3 口微测井的低、降速带的位置分别是: L-01 井在 106.5 m, 速度 1749 m/s; L-02 井在 92.5 m, 速度 1623 m/s; L-03 井在 93 m, 速度为 2238 m/s。显然, 从这 3 口微测井的资料我们可以推测低、降速带底面埋深应在 90~150 m 左右, 对比图 2、图 3 和图 4 发现, 微测井点的低、降速带埋深与第 2 低阻层顶面位置相当, 故可将此电性层可作为低、降速带的标志层。

应用电阻率剖面转换成速度剖面的计算公式((3)式),可方便地将图1视电阻率深度剖面转换成速度剖面。

图6是试验测线的速度剖面,该速度剖面可作

为地震静校正速度建模的重要依据。图中标出了1500 m/s和2000 m/s 2层速度界面,各面的埋深分别在60 m和120 m左右,2000 m/s的速度界面可解释为低、降速带的底界面。

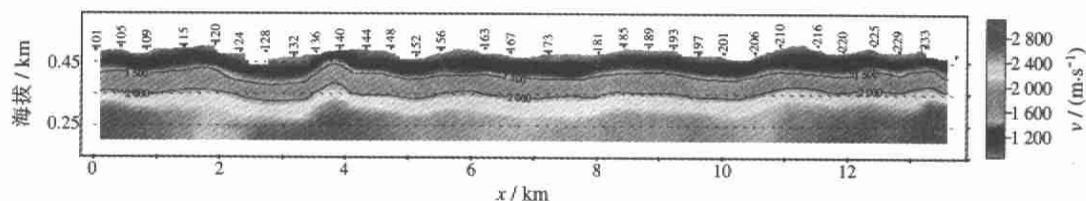


图6 由电阻率剖面转换的速度成像剖面

4 结束语

试验测线反演电性剖面的电性层位及其电阻率值与微测井速度层位及其数值有着较好的对应关系,这为进行电性与速度关系研究提供了有利条件。本次方法试验中进行的速度与电阻率及深度关系的探讨,修正了弗斯特公式,提出了以对数域中的电阻率及深度的高阶多项式来近似对数域中的速度,并给出了求解多项式系数的有效算法。利用微测井的速度及反演电阻率求取的速度剖面,对地震静校正的速度建模具有重要参考价值。

参 考 文 献

- 1 Fitterman D V, Stewart M T. Transient electromagnetic sounding for groundwater[J]. Geophysics, 1986, 51(4):995~1005
- 2 Cooper N J, Swift R. Application of TEM to Cyprus-type massive sulphide exploration in Cyprus[J]. Geophysics, 1994, 59(4):202~214
- 3 Sternberg B K, Washburne J C, Pellerin L. Correction for the static shift in magnetotellurics using transient electromagnetic soundings [J]. Geophysics, 1988, 53(11):1459~1468
- 4 格劳尔 M. 地震岩性学[M]. 北京:石油工业出版社, 1987. 135~138
- 5 徐群周,伍善华,张露菲. 地层条件下流体驱排时岩石波速和电阻率的实验研究[J]. 石油物探, 2000, 39(1): 124~126
- 6 苏朱刘,胡文宝. 中心回线方式瞬变电磁测深虚拟全区视电阻率和一维反演方法研究[J]. 石油物探, 2002, 41(2):216~221
- 7 苏朱刘,罗延钟,胡文宝. 大地电磁测深“正演修正法”一维反演[J]. 石油地球物理勘探, 2002, 37(2):138~144
- 8 严良俊,徐世浙,胡文宝,等. 中心回线瞬变电磁测深法快速电阻率成像方法及应用[J]. 煤田地质与勘探, 2002, 30(6):58~61

(本文编辑:张仪宁)