磁源瞬变电磁法中心回线装置 全程视电阻率定义及计算

冯兵^{1,2},孟小红¹,张斌²

(1. 中国地质大学 地球物理与信息技术学院,北京 100083; 2. 长安大学 地质工程与测绘学院,陕西 西安 710054)

摘要:讨论了磁源TEM 中心回线装置全程视电阻率的计算问题。利用电偶极子的瞬变场叠加来计算磁源TEM 中心回线装置的瞬变场,均匀半空间的计算结果表明,该方法是可行的。用电偶极子的瞬变场定义了磁源瞬变电磁法中心回线装置全程视电阻率,通过对二、三、四层电性断面的视电阻率的计算,并与TEM 晚期视电阻率进行了对比,说明了该定义的优越性。实测磁源TEM 资料的计算表明,用电偶极子的瞬变场定义的磁源瞬变电磁法中心回线装置全程视电阻率较好地反映了电性断面特征,其对浅层磁源TEM 探测及资料解译具有使用价值。

关键词:磁源瞬变电磁法;中心回线装置;晚期视电阻率;电偶极子;全程视电阻率

中图分类号: P631 文献标识码: A 文章编号: 1000 - 8918(2010) 05 - 0686 - 05

磁源瞬变电磁法中心回线装置全程视电阻率的 计算,归纳起来主要有两类:一是利用瞬变电磁法中 心回线晚期、早期公式合成一个近似的全区视电阻 率,这种近似值在中期的误差较大或无定义:第二类 是从中心回线的解析表达式计算视电阻率,但这种 计算较难,因为 TEM 场值表达式是视电阳率以及时 间的隐函数,必须采用数值方法计算。目前研究的 主要成果有:殷长春、朴化荣发表了电磁测深法视电 阻率定义问题的研究^[1];黄浩平提出了垂直磁偶极 子全区视电阻率的求法^[8]; Raiche 等提出了一种计 算精确的晚期视电阻率的迭代算法^[6];白登海给出 时间域瞬变电磁法中心回线全区视电阻率的数值计 算^[4]:李建平、李桐林发表的层状介质任意形状回 线源瞬变电磁全区视电阻率的研究[3];翁爱华给出 了小方形回线叠加计算全区视电阻率的方法技 术^[7]。笔者针对磁源瞬变电磁法中心回线装置全 程视电阻率的定义及计算,提出利用均匀半空间电 偶极子瞬变场的叠加来定义和计算全程视电阻率。

磁源瞬变电磁法中心回线装置全程视电 阻率的定义

首先,对均匀半空间电偶极子瞬变场及视电阻 率做如下定义^[1-2]。对水平电偶极子发射,均匀半 空间地面任意一点的时域垂直磁场为^[3]

$$h_{z}(x,y) = \frac{Idly}{4\pi r^{3}} \cdot \left[\left(1 - \frac{3}{2u^{2}} \right) \operatorname{erf}(u) + \frac{3}{u\sqrt{\pi}} \cdot \operatorname{e}^{-u^{2}} \right],$$
(1)

 $u = \sqrt{\mu_0 r^2 / (4\rho t)}$, $r = \sqrt{x^2 + y^2}$,

式中,I为电流,dl为电偶极子长度,t为采样时间, ρ 为均匀大地电阻率,r为收发距,x,y为测点坐标。

垂直磁场与均匀半空间的电阻率是隐函数关 系,给定实测的 h_z,通过给定半空间电阻率计算理 论的∂h_z(t)/∂t,当两者之间的误差达到要求时,则 给定的电阻率为地下半空间的电阻率;当地下介质 的电阻率不均匀时,则给定的电阻率为地下半空间 的视电阻率。

下面介绍磁源瞬变电磁法中心回线装置全程视 电阻率的定义。不管发射回线的形状如何,只要将 回线的各边看作电偶极子,则回线中心点的电磁场 可看成由多个水平电偶极子在该点的电磁场累加而 成。此种方法的关键是如何才能将回线各边看作电 偶极子。众所周知,当线源到测点的收发距远大于 线源本身的长度时才能将线源看作电偶极子,而在 实际测量中,这种条件很难满足。解决方法是将回 线各边进一步剖分,可将回线的4个发射边看作4 个线源,将每条线源分解为若干个小的线源,并满足 各线源到测点的收发距远大于线源本身的长度,则 若干个小线源可作为电偶极子处理,求取每个电偶 极子的电磁场然后叠加,即可求得中心点的场。

任意一边 l 产生的垂直磁场 h 为

$$h_{zl} = \sum_{j=1}^{m} h_{z}(x, y)_{j}, \qquad (2)$$

将回线各边磁场累加后可得回线的总磁场,即

$$h_{\mathbb{H}} = \sum_{l=1}^{n} h_{zl}, \qquad (3)$$

式中,m 为回线其中一个边分成的电偶极子个数,n 为回线的边数。式(3)为均匀半空间回线中心点的 瞬变磁场。利用式(1)~式(3)可计算均匀半空间 回线中心点的瞬变磁场。在上述公式中,垂直磁场 与均匀半空间的电阻率是隐函数关系,利用电偶极 子视电阻率定义的方式,可定义磁源瞬变电磁法中 心回线装置全程视电阻率。

2 均匀半空间下两种算法的垂直磁场对比

为了说明方法的正确性,需要验证磁源瞬变电 磁法中心回线装置的垂直磁场可由电偶极子的垂直 磁场累加而成。

模型电阻率为 10 Ω · m,回线边长为 500 m × 500 m,发送电流为 10 A,按对数间隔取时 10⁻⁴ ~

10⁻¹ s,共31 个采样点。TEM 中心回线计算采用 RECTAN-TEM 正演程序,该程序可以计算回线内任 意一点的垂直磁感应强度对时间的导数和视电阻 率。电偶极子叠加计算回线中心垂直磁场时,将每 条边均匀剖分成50 段进行计算。

图1为2种方法计算的∂B_z/∂t 衰减曲线和相对 误差曲线。图中可见2种方法计算的曲线一致,相 对误差仅在±0.8%的范围内波动,说明了上述计算 方法的可行性,同样反过来说明了利用均匀半空间 电偶极子的瞬变场定义磁源瞬变电磁法中心回线装 置全程视电阻率的可行性。

图 2 为均匀半空间下不同电阻率计算的回线中 心一点的 $\partial B_{z}/\partial t$ 曲线和回线中心点的 B_{z} 曲线。回 线边长 400 m,发送电流 15 A,电阻率依次为 10、50、 100、200、500 $\Omega \cdot$ m。图 2a 显示,在晚期给定时间 t后,电阻率和 $\partial B_{z}/\partial t$ 值是一一对应的,但在中期不同 电阻率的曲线有交汇,给定时间后电阻率和 $\partial B_{z}/\partial t$ 不是一一对应的,利用 $\partial B_{z}/\partial t$ 求全程视电阻率具多 解性。图 2b 中可看出,在计算的时间范围内任意给 定时间,电阻率和 B_{z} 是一一对应的,因此可以唯一 求出全区视电阻率值。故笔者采用垂直磁场 B_{z} 计 算全区视电阻率而不用实际测量的 dB_{z}/dt 。



图1 2种方法计算的 $\partial B_z / \partial t$ 衰减曲线(a)和相对误差曲线(b)



图 2 均匀半空间下不同电阻率计算的 $\partial B_z / \partial t(\mathbf{a}) \rightarrow B_z$ 曲线(b)

3 理论模型计算结果分析

3.1 均匀半空间模型的全区视电阻率

大回线的边长为 500 m,发送电流为 10 A,模型 电阻率为 100 Ω · m。计算点为回线的中心位置。 从图 3a 中可以看出中心点的晚期视电阻率尾枝趋 于均匀半空间电阻率,在首枝远大于均匀半空间电







阻率值。从图 3b 中可以看出,电偶极子定义的全程 视电阻率,不论早期、中期或晚期,均趋于均匀半空 间电阻率,客观地反映了地电断面。

3.2 两层模型的全区视电阻率

图 4a 为两层 D 模型晚期视电阻率与电偶极子 定义的全程视电阻率对比曲线。计算参数为:发射 回线边长 400 m,发送电流 10 A,第一层电阻率 100 Ω・m,厚度 100 m,第二层电阻率 10 Ω・m,计算点 为回线的中心位置。图 4b 为两层 G 模型晚期视电 阻率与电偶极子定义的全程视电阻率得对比曲线, 计算参数为,发射回线的边长 400 m,发送电流 10 A,第一层电阻率 10 Ω・m,厚度 100 m,第二层电阻 率为 100 Ω・m,计算点为回线的中心位置。

在 D 型、G 型地电断面中,两种方式定义的视 电阻率在首枝段不重合且差别较大,在中段两者相 互接近,不完全重合,在尾枝段两者接近重合。首枝 段电偶极子定义的全程视电阻率趋近于第一层电阻



图 4 两层模型框内中心点视电阻率曲线对比



图 5 三层 H、A、K、Q 模型框内中心点视电阻率曲线

率,而晚期视电阻率由于不满足晚期条件,不趋近于 第一层电阻率,G型断面偏差较大。尾枝电偶极子 定义的全程视电阻率较晚期视电阻率较早的趋近于 第二层电阻率。可见从分析及解释的角度看,电偶 极子定义的全程视电阻率优于晚期视电阻率。

3.3 三层模型计算的全区视电阻率

图 5 为三层模型框内中心点视电阻率曲线,发 射回线边长 400 m,发送电流 10 A,计算点为回线的 中心位置。图中可见,H 型、A 型地电断面中,两种 方式定义的视电阻率在首枝段不重合,在中段两者 相互接近,不完全重合,有交叉,在尾枝段两者接近 重合。在首枝段,电偶极子定义的全程视电阻率趋 近于第一层电阻率,而晚期视电阻率由于不满足晚 期条件,不趋近于第一层电阻率,A 型断面偏差较 大;在尾枝,全程视电阻率较晚期视电阻率较早的趋 近于第二层电阻率。A 型断面两者的中段及尾枝吻 合性较好,而 K 型、Q 型地电断面中两种方式定义 的视电阻率与 H 型、A 型地电断面有类似特点,可 得到相同的结论。

3.4 四层模型计算的全区视电阻率

图 6 为计算的四层模型全程视电阻率曲线和晚 期视电阻率曲线对比,发射回线边长 100 m,发送电 流 15 A,计算时间为 10 μs ~0.01 s。从图中看,全 程视电阻率曲线在早期趋于第一层的电阻率,在中 期曲线先升后降,反映了第二层的高阻地层和第三



图 6 四层 KH 模型框内中心点视电阻率曲线对比



层的低阻地层,晚期趋于第四层的电阻率;而晚期公 式计算的视电阻率曲线基本反映了第二、三、四层的 电阻率,但是在早、中期曲线偏大,偏离了真实的第 一层电阻率;不同点上2种定义计算的视电阻率曲 线在早、中期不重合。

4 实例分析

奧陶系

勘探区位于沁水煤田南部,区内大部分基岩裸 露,局部黄土覆盖,黄土厚度不超过24m。地层发 育正常,从老到新有奥陶系中统马家沟组、峰峰组; 石炭系中统本溪组,上统太原组;二叠系下统山西 组、下石盒子组和第四系松散沉积。

测区新生界地层在纵向上电阻率变化较大,但 由于厚度较小,位于物探装置的盲区内;二叠系上石 盒子组上部地层以泥岩和砂质泥岩为主,呈低阻;上 石盒子组下部地层以砂岩、泥岩互层为主,呈低阻; 下石盒子组、山西组地层以砂泥岩为主,电阻率表现 为中、低阻;石炭系地层含灰岩及煤层,表现为中、高 阻;奥陶系地层以灰岩为主,电阻率最高。整套地层 的电性在纵向上呈现为低一中低一中一高的特征反 映,为 AA 型(表1)。

	表1 测区地层电电阻率	$\Omega \cdot m$
地层	主要岩性	电阻率
新生界	黄土、黏土、砾石层	30 ~ 100
二叠系	泥岩、砂岩、粉砂岩及煤层	30 ~ 70
石炭系	泥岩、铝土岩、粉砂岩、灰岩及煤层	40~100

灰色层状石灰岩、白云质灰岩

一般 > 500

选取该区 13 线的部分测量数据进行资料处理。 测点位于发射的中部,共2个点,用2种不同的方法 处理。结果(图7)显示,两者的曲线特点在晚期道 基本类似,在早期道区别较大。电偶极子定义的全 程视电阻率较好地反映了二叠系、石炭系及奥陶系 的电阻率的变化情况,有利于分析解释。而晚期视 电阻率在早期道计算结果远大于真实的电阻率,在



图7 实测视电阻率曲线

晚期道出现不圆滑的折线,这种偏差是由于不满足 晚期条件所导致的。在定性解释及分析中,可以看 出电偶极子定义的全程视电阻率优于晚期视电阻 率。

5 结论

分析均匀半空间、二层、三层及四层地电断面计 算的电偶极子定义的全程视电阻率和晚期视电阻率 的结果,均可得出电偶极子定义的全程视电阻率优 于晚期视电阻率的结论。

早期道不满足晚期视电阻率计算公式的条件, 形成了首枝的假高阻现象。利用电偶极子定义的全 程视电阻率较好地解决了该问题。晚期视电阻率的 首枝假高阻与发射线框边长有关,且表现为正变关 系。电偶极子定义的全程视电阻率与发射线框边长 无关。这对于浅层 TEM 勘探及资料解译具有应用 价值。

参考文献:

- [1] 朴化荣.电磁测深法原理[M].北京:地质出版社,1990.
- [2] 考夫曼 A,凯勒 G V. 频率域和时间域电磁测深[M]. 北京:地 质出版社,1987.
- [3] 李建平,李桐林,赵雪峰,等. 层状任意形状回线源瞬变电磁全 区视电阻率的研究[J]. 地球物理进展,2007,22(6).
- [4] 白登海.时间域瞬变电磁法中心方式全程视电阻率的数值计 算[J].地球物理学报,2003,46(5).
- [5] 李吉松,朴花荣.电偶源瞬变测深一维正演及视电阻率响应研究[J].物探化探计算技术,1993,15(2).
- [6] Raiche. Transient electromagnetic field computations for polyg-onal loops on layered earths[J]. Geophysics, 1987, 52.
- [7] 翁爱华.矩形大定源瞬变测深数据模型约束反演[J].物探化 探计算技术,2008,30(4).
- [8] 黄皓平,朴化荣.水平层状大地上垂直磁偶源频率测深中的全 波视电阻率[J].地球物理学报,1992,35(3).

DEFINITION AND CALCULATION OF ALL-TIME APPARENT RESISTIVITY FOR CENTRAL LOOP DEVICE OF MAGNETIC SOURCE TEM

FENG Bing^{1,2}, MENG Xiao-hong¹, ZHANG Bin²

(1. School of Geophysics and Information Technology, China University of Geoscience, Beijing 100083, China; 2. College of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: Calculation of all – time apparent resistivity for the central loop TEM magnetic source devices is discussed in this paper. Homogeneous half – space calculation results show that it is feasible for transient electric dipole superposition to calculate the magnetic field source device TEM central loop transient field; the definition of all – time apparent resistivity for magnetic source central loop device using electric dipole transient field. Through the calculation of apparent resistivity and apparent resistivity for the two – layers, three-and four – layers electric section and comparison with late – time apparent resistivity for TEM, the superiority of the definition is illustrated. The calculations of magnetic source TEM field data show that the definition of all-time apparent resistivity for magnetic source central loop device using electric dipole transient field better reflects the characteristics of Electric section and it is valuable for shallow magnetic source TEM detection and data interpretation

Key words: Magnetic source transient electromagnetic method; late-time apparent resistivity; electrical dipole; all-time apparent resistivity

作者简介:冯兵(1962-),男,副教授,中国地质大学(北京)博士研究生,主要从事电法勘探的理论及应用研究。