

瞬变电磁法偶极装置模型实验研究

刘长胜 林君 嵇艳鞠 吴国强

(吉林大学 地球信息探测仪器教育部重点实验室 吉林 长春 130026)

摘 要：通过室内大量的模型实验，分析了偶极装置下导电球体、柱体及球柱组合体的瞬变响应特征，研究了偶极装置的探测分辨能力，讨论了极距大小和测点定位问题，最后归纳出偶极装置的一些工作特点。偶极装置下异常曲线形态较为复杂，解释难度较大，但受一次场影响较小，浅层探测分辨能力强，而且野外工作方便灵活，这些特点为偶极装置在诸如海底等特殊环境中进行瞬变电磁探测奠定了基础。

关键词：瞬变电磁法，模型实验，偶极装置，分辨能力

中图分类号：P631 文献标识码：A 文章编号：1000-8918(2006)05-0430-05

瞬变电磁法因其独特的优点在陆地地球物理勘探中有较多的应用，常规观测装置有重叠回线、中心回线、偶极装置、大回线(大定源)、分离回线等。各种观测装置都有其自身的特点^[1-4]，其中在野外勘探中最为常用的是重叠回线和中心回线。但在海底探测或某些特殊条件下，由于受环境限制，不宜使用发射线圈边长为上百米的重叠回线和中心回线等装置，此时需要缩小线圈尺寸或采用偶极装置。因此，研究偶极装置特点及其与小线圈重叠回线和中心回线的区别显得较为重要。

国内外一些学者针对该装置的海底电磁法探测开展了一定的研究工作^[5-8]，其中，S. J. Cheesman 等人通过理论计算对比了海底瞬变电磁探测中各种偶极-偶极装置的探测效果，为实际应用提供了理论指导。但是这些文献对偶极装置本身的实际工作特点研究较少。笔者通过对大量室内模型实验结果的分析，研究了垂直共面磁偶极装置(以下简称为偶极装置)在模型实验中所表现出来的特征，进一步揭示了该装置的一些工作特点以及与其他装置的一些差异，为其在野外勘探中的应用提供了重要参考，也为浅海低等特殊环境瞬变电磁探测奠定了一定基础。

1 方法原理

瞬变电磁法基于法拉第电磁感应原理，观测的是导电介质内部感应涡流产生的电磁场。均匀半空

间中感应涡流的传播遵从烟圈理论。局部电性异常体中感应涡流的变化由异常体自身的特性决定。接收点的二次磁场大小、方向及衰减快慢取决于异常体本身的电性、形状、尺寸等物理参数，以及观测装置与异常体的耦合状态。通过观测二次磁场在接收线圈产生的感应电压(称为二次感应电压)可反演推断目标体的电性及状态参数。

物理模拟实验中采用的观测装置是野外工作装置按一定的比例缩小后的结果，其中偶极装置^①如图 1 所示。观测装置参数见表 1。实验采用吉林大学研制的 ATEM-II 瞬变电磁仪，发射电流 1.6 A，发射频率 25 Hz，关断时间约 340 μs，采样率 5 μs，叠加 1 024 次。实验采用了几种典型的模型来反映偶极装置的特点及其与其他装置的一些差别。

表 1 模型实验观测装置参数

装置类型	发射线圈 T_x	接收线圈 R_x
偶极装置*	边长 20cm，100 匝	直径 5cm，等效面积 200m ²
中心回线	边长 20cm，100 匝	直径 5cm，等效面积 200m ²
重叠回线	边长 20cm，100 匝	边长 20cm，100 匝

* 偶极装置的极距 r 分别取 20、30、60cm。

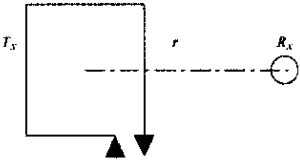
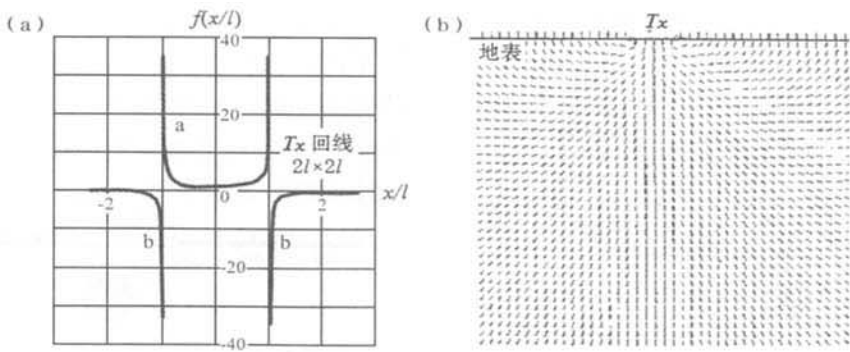


图 1 偶极装置示意

① 当极距为 20、30 cm 时，由于发射线圈边长相对而言较大 ($>1/5r$)，不宜将发射场看作偶极场，但接收线圈仍可看作偶极，此时不是严格意义上的偶极-偶极装置，但可看作偶极装置或分离回线。



a—磁场垂直分量沿 x 轴的幅值变化 b—主剖面下方磁场的磁力线分布 (任意比例尺)
图 2 边长为 $2l$ 方形回线主剖面磁场分布 (据蒋邦远 1998)

观测装置中方形发射回线产生的一次磁场分布如图 2 所示。当接收线圈位于发射线圈外侧较远处,其接收到的一次场很小,而在发射线圈内部尤其是靠近边线时,一次场较大。随着发射线圈的移动,当异常体埋深较小时,穿过异常体的磁力线方向变化比较剧烈,而当异常体埋深较大时,穿过异常体的磁力线方向变化则比较缓和。

2 偶极装置下局部导体的瞬变响应

这里重点分析几种规则导电异常体——球体、柱体和球柱组合体在偶极装置下的瞬变响应特征,其中,柱体直立,球柱组合时柱体直立于球体之上,且几乎接触。表 2 列出了文中给出的剖面曲线所涉及的几种异常体的具体参数。所有剖面曲线的纵轴表示感应电压(ε)对发射电流(I)和接收线圈面积(A)的归一化结果。观测到的二次感应电压均以

接收点的一次感应电压为参考方向。

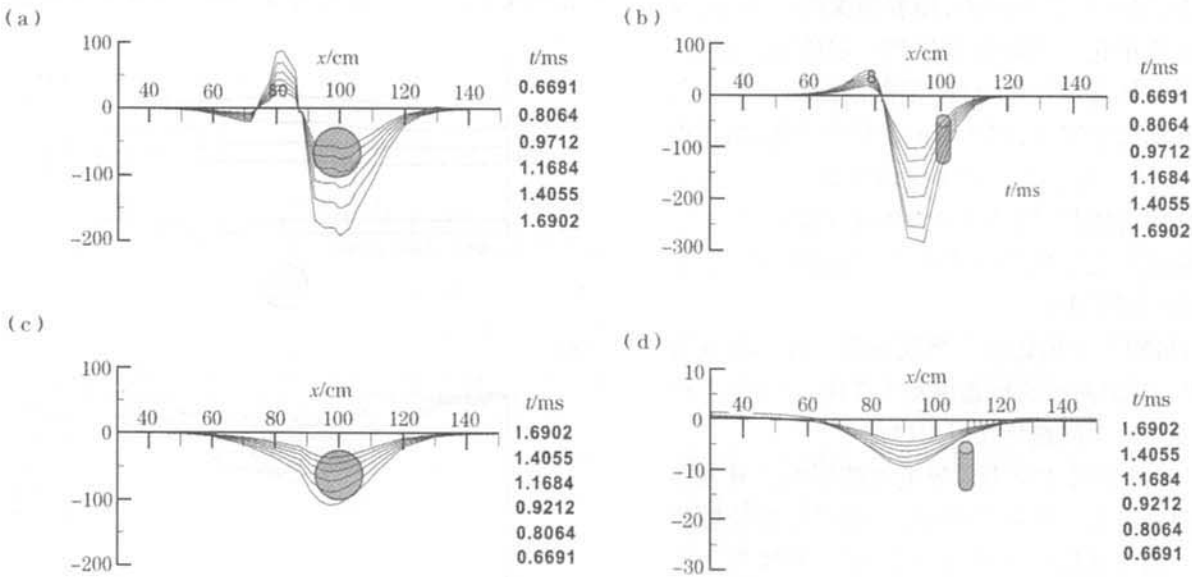
表 2 几种异常体的参数

异常体	尺寸	电导率
导电球体	直径 15cm	约 10^7 S/m
导电柱体	直径 4.7cm, 长 16.8 cm	约 10^7 S/m

注 围岩介质为水, 体积为 $1.8\text{ m} \times 1\text{ m} \times 0.75\text{ m}$ 。

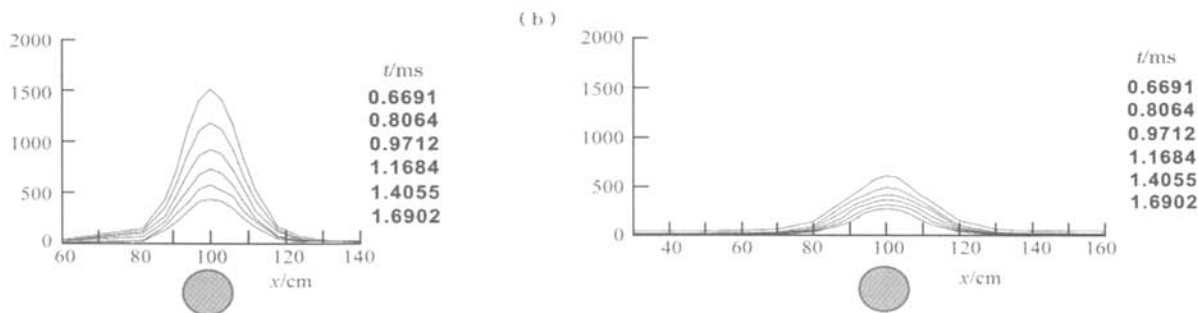
2.1 剖面曲线形态特征

实验中偶极装置观测到的直立导电柱体和导电球柱组合体的瞬变响应特征相似,但导电球体与不同,剖面曲线更为复杂。现以导电球体和柱体为例,取极距 20 cm,发射线圈的中心位置记为测点,实验测得的剖面曲线如图 3 所示。图 3 表明,偶极装置下,球体和柱体的剖面曲线呈现多峰或是单一负峰。当埋深较浅时,球体的异常特征为 2 个负峰夹 1 个正峰,距离异常体中心较近的负峰幅值最大,而柱体的异常特征为 1 个小正峰接 1 个大负峰,负



a—球体的响应,球顶点埋深 3cm b—直立柱体的响应,柱顶面埋深 3cm c—球体的响应,球顶点埋深 6cm d—直立柱体的响应,柱顶面埋深 24cm。球体和柱体的中心均位于 $x = 100\text{ cm}$ 处。

图 3 偶极装置下导电球体和柱体的实测瞬变响应剖面曲线归一化结果



a—重叠回线下球体的响应,球顶点埋深 6 cm;b—中心回线下球体的响应,球顶点埋深 6 cm,球体的中心均位于 $x = 100$ cm 处。

图 4 同点装置下导电球体的实测瞬变响应剖面曲线归一化结果

峰距离异常体中心较近;当埋深较大时均为单一负峰。无论埋深大小,最大负峰的顶点都没有正对着异常体的中心,其中柱体的偏离较远。但中心回线和重叠回线下导电球体、柱体、球柱组合体的剖面曲线形态相同,不随埋深变化,均为单一的正峰,且正峰的顶点正对着球体的中心。这 2 种装置下导电球体的实测剖面曲线如图 4 所示。

2.2 影响剖面曲线形态的几点因素

(1)异常体形状的影响。当埋深较浅时,球体、柱体和球柱组合体的剖面曲线表现出了不同的形态特征。其中,球体和柱体的剖面曲线相差较大,埋深较浅时球体比柱体多 1 个小负峰。球柱组合体与柱体的剖面曲线特征相似,只是球柱组合体的正峰幅值较小,其原因可能是柱体位于球体之上,主要体现的是柱体的瞬变响应特征。

(2)异常体埋深的影响。埋深较浅时剖面曲线形态复杂,呈现出多个峰值,随着埋深的增加,曲线形态变得简单化。当埋深增加到一定值时,无论是球体还是柱体与球柱组合体,剖面曲线均为单一负峰。如在偶极装置下,图 3 中的 2 种异常体,当顶点埋深大于 6 cm 后,其剖面曲线均简化为单一的负峰。其原因可能是,当局部异常体埋深较大时,发射线圈的移动不会导致穿过其中的一次磁场方向发生剧烈变化(见图 2b)。

(3)极距大小的影响。当偶极距由较小值变为较大值时,剖面曲线的形态也发生变化,甚至发生极性的改变。这个问题将在后面讨论。

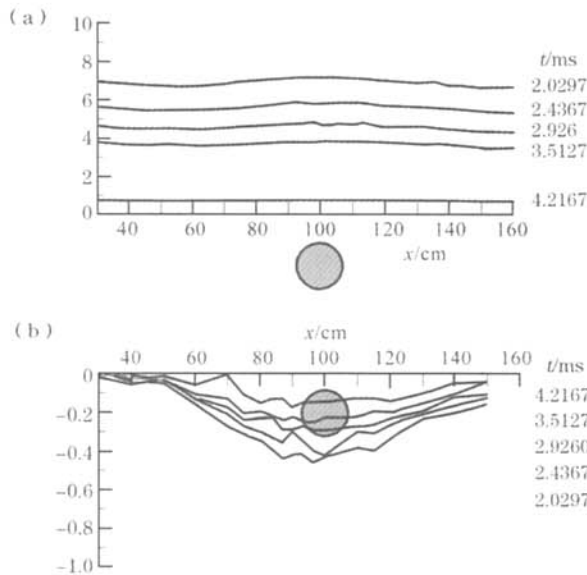
(4)异常体尺寸及围岩导电性的影响。异常体尺寸对曲线形态的影响不明显,主要是对响应幅值的改变。如当球体的直径减小 $1/3$ 时,曲线形态几乎不变,但峰值减小,峰的宽度也减小。实验中围岩介质导电与否对观测结果影响不明显,将异常体置于水槽或空气中其剖面曲线形态一致,幅值相当。这可能是由于水槽的体积有限和围岩介质水的电导

率不高的缘故。

3 偶极装置探测的分辨能力

瞬变电磁法的探测能力与装置类型、工作参数、仪器性能、目标体大小及电导率、目标体与围岩的电性差异、环境噪声水平等有密切关系。在实际工作中,由于被测区域和环境是无法人为改变的,观测仪器选用也是受限的,这时往往通过选择合适的观测装置和工作参数来达到较大的探测深度和较好的勘探效果。

为了研究偶极装置探测能力与其他观测装置的差异,实验中采用同一测量仪器和完全相同的工作参数(即收发线圈相同,发射电流相同)进行中心回线和偶极装置的对比实验。图 5 为 2 种装置下 1 个埋深较大的导电球体的瞬变响应剖面曲线。结果表明,偶极装置对埋深较大的导电球体的探测效果比中心回线要好,异常更为明显。对导电直立柱体和



a—中心回线装置,球体顶点埋深 45 cm;b—偶极装置,球体顶点埋深 45 cm。球体中心位于 $x = 100$ cm 处。

图 5 导电球体埋深较大时 2 种装置探测归一化结果

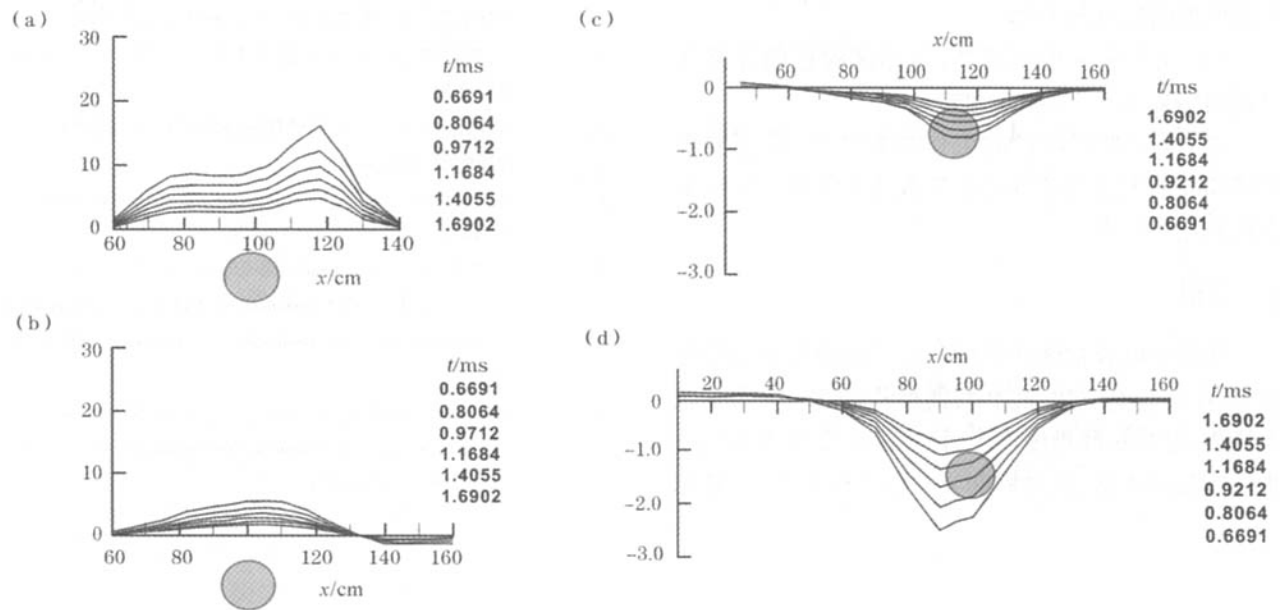
球柱组合体也有这种特点。中心回线下球体埋深减小到 40 cm 时,剖面曲线异常仍不如偶极装置下球体埋深为 45 cm 时明显。重叠回线由于所用的接收线圈等效面积小等原因探测深度更小(33 cm)。这说明偶极装置对一些低阻局部异常体反映比较灵敏,有较高的分辨能力。

4 极距与测点定位问题的讨论

偶极装置在应用中需要确定的工作参数比同点装置多,除了确定线圈边长等基本参数外,它还要确定偶极距大小和测点定位方式。实验表明,这 2 个参数非常重要,它们的选择会直接影响探测结果。图 6 是在不同极距以及不同测点定位方式下测得的

导电球体的瞬变响应。

(1)极距大小。极距的大小不仅影响发射线圈和接收线圈的耦合程度、观测信号强弱,还会明显影响瞬变响应曲线的形态。由图 6bd 可见,随着极距的变化,球体瞬变响应剖面曲线发生较大的变化。当极距为 20 cm 和 30 cm 时,曲线呈现出较大的负峰,而当极距达到 60 cm 时,曲线呈现出较大的正峰,感应电压极性发生改变。这种现象取决于异常体中感应涡流产生的二次磁场的分布特征及接收线圈在该场中的位置。可见,极距的大小是使局部异常体瞬变响应复杂化的一个重要因素,在分析瞬变响应异常特征应该充分考虑。



a—极距 60cm,收发线圈中点记为测点,球顶点埋深 6cm;b—极距 60cm,收发线圈中点记为测点,球顶点埋深 15cm;c—极距 30cm,收发线圈中点记为测点,球顶点埋深 15cm;d—极距 20cm,发射线圈中心记为测点,球顶点埋深 15cm。球心位于 x=100cm 处。

图 6 不同偶极距和测点定位时导电球体实测剖面曲线归一化结果

(2)测点定位。在野外勘探中,被测区域往往是未知的,采用偶极装置时一般将发射和接收线圈的中点记为测点。对于一维大地探测,这是很合理的,但对于局部异常体探测而言,这样并不完全合适。通过这种定位方法得到的响应曲线,不一定总能从中准确定位异常体中心在测线上对应的位置。其原因主要是发射和接收线圈的位置不能完全等效互换。图 6a、c 将发射和接收线圈的中点记为测点,峰值偏离球体中心较远,且往右偏。图 6d 将发射线圈中心记为测点,极距较小,峰值偏离球心也较小,但往左偏。可见若以发射线圈中心和收发线圈中点之间的某一点记为测点,则能通过最大峰值位置较为准确地确定球心在测线上对应的位置。

由图 6ac 又可以看出,即使同一种测点定位方式,极距不同或埋深不同,峰值偏离球心的大小也不同。在同一种定位方式下,不同形状的异常体峰值偏离异常体中心位置的程度也有所不同(图 3a、b)。因此在用偶极装置对局部异常体进行瞬变电磁探测时,测点的准确定位是很困难的,没有统一标准,难以根据瞬变响应剖面曲线准确定位局部异常体在测线上对应的位置。但如果知道被测目标体的大致形态及埋深,则可通过室内模型实验寻找较为适合的测点定位方式。另外,极距较小,测点定位不当带来的偏差也较小。最后,如果将从同一测线 2 个相反方向测量的剖面曲线绘在一起,则根据对称点可以很好地定位异常体位置。

5 偶极装置的工作特点

发射线圈一次场分布规律和上述实验结果分析表明,与同点装置相比,偶极装置具有如下特点。

(1)一次场影响较小,对于需要较早延时采样数据的浅层勘探而言,偶极装置由此而显示出了较大的优势。

(2)曲线形态复杂,对称局部异常体的瞬变响应剖面曲线并不对称;且随着观测点不同,感应电压可能会因穿过接收线圈的二次磁场方向发生变化而出现符号改变。

(3)探测分辨能力较强,对一些低阻局部异常体反映较为敏感,在相同条件下,偶极装置能探测出更深的低阻局部异常体。

(4)地质噪声相对较高,目标区附近的异常体对观测结果会有一定的影响。

(5)应用时需设计的工作参数增多,除了要确定诸如线圈大小等常规工作参数外还要确定极距大小和测点定位方式。

6 结语

几种导电异常体在偶极装置下的瞬变响应特征表明,在瞬变电磁法探测中,偶极装置的响应曲线较为复杂,地质解释难度增大,许多因素都会导致响应曲线形态的变化;在对局部异常体进行探测时,要充

分考虑偶极距选择和测点定位等因素,在探测工作中,要注意压制噪声,提高信噪比。但偶极装置也有其自身的优点,如灵活方便,探测分辨能力较强,一次场的影响较小等,这些特点对某些特殊环境探测和浅层瞬变电磁探测非常有利。在浅海瞬变电磁探测中,偶极装置的这些优点,使其成为一种比较理想的观测装置。

参考文献:

- [1] 蒋邦远.实用近区磁源瞬变电磁法勘探[M].北京:地质出版社,1998.
- [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.
- [3] 布塞利 G,麦克拉凯 K G,鲁特 H.瞬变场法野外工作方法和数据解释手册[M].蒋邦远译.北京:地质出版社,1992.
- [4] 静恩杰,李志聪.瞬变电磁法野外工作方法[J].中国煤田地质,1995,7(3).
- [5] 王一新,王家林.瞬变电磁系统探测浅海底电导率的研究[J].地球物理学报,1998,41(6).
- [6] Coggon J H, Morrison H F. Electromagnetic investigation of the sea floor[J]. Geophysics, 1970, 35(3): 476.
- [7] Edwards R N. Two-dimensional modeling of a towed in-line electric dipole-dipole sea-floor electromagnetic system: The optimum time delay or frequency for target resolution[J]. Geophysics, 1988, 53(6): 846.
- [8] Cheesman S J, Edwards R N, Chave A D. On the theory of sea-floor conductivity mapping using transient electromagnetic systems[J]. Geophysics, 1987, 52(2): 204.

ON MODEL EXPERIMENTS OF TEM DIPOLE CONFIGURATION

LIU Chang-sheng, LIN Jun, JI Yan-ju, WU Guo-qiang

(Key Lab of Geo-Exploration and Instrumentation (Jilin Univ), Ministry of Education, Changchun 130026, China)

Abstract: A mass of model experiments are performed. By studying the response of several typical conductive bodies in dipole transient electromagnetic systems, this paper analyses the exploration resolving power of dipole configuration, discusses the problems about dipolar distance and the way to fix the detecting point, and finally concludes the working characteristics of this configuration. The forms of response curves of these bodies in dipole transient electromagnetic measurement are complicated and more arduous to interpret. However, the disturbing of primary field is small for dipole configuration and it has strong ability to distinguish dissimilar bodies from background. Moreover, it is very convenient and flexible. So it adapts to be used in the transient electromagnetic detecting of shallow sea-floor and other special environment.

Key words: TEM, model experiment, dipole configuration, resolving power

作者简介:刘长胜(1979-),男,湖北咸宁人,吉林大学硕士研究生,主要从事瞬变电磁法数据处理研究。