

地下动态导体充电法探测概论

何 裕 盛

(航空物探遥感中心 北京 100083)

摘 要 根据“动态导体”的特点开展研究,形成了 1 套地下动态导体的充电法探测理论和方法,并就其应用对象和地电模型、技术基础、部分探测方法和初步应用等方面进行了介绍。

关键词 充电法 动态导体 压裂

图书分类 P631.3+23

地下动态导体充电法以研究“动态导体”为基础,主要解决水文、工程和环境问题。所谓动态导体指其形状、规模和导电性随时间而变化的导体。这类导体在自然界确实普遍存在着,如某些地下水,在人文条件下也确实存在着,如油田开采中的大型压裂和注水等。通过概念的延拓之后,固态导体成为动态导体的特例。为了确定和查明动态导体在地下的分布和产状,使用常规方法有时会遇到困难。动态导体的形状、规模和导电性随时间而变化,规模和埋深幅度相差悬殊,充电条件也特别,根据这些特点开展研究,形成了 1 套地下动态导体的充电法探测理论和方法。这里仅就其主要部分进行介绍。

1 方法的应用对象和地电模型

1.1 充电法在水文、工程和环境方面的应用对象

使用充电法除能有效地探测金属矿体外,还可在探测动态导体的许多方面发挥特殊作用。

1. 确定油田钻井压裂裂缝的方位和规模。在油田开采过程中,对低产油井进行大型压裂,用强大压力向油井内注液和加沙,使油层出现裂缝。在注液和加沙时,加入食盐等有关强电解质盐类,使裂缝形成充满电解液的导体,成为导电裂缝。用充电法确定该导体裂缝的方位和估计其规模,以便以后在垂直于导电裂缝的方向上选择注水井位置,以压迫石油向压裂裂缝汇聚,从而提高油井的石油产量。有时还要求使用充电法了解导电裂缝的规模和其它参数。

2. 确定向井下注水的水流方位和分布。在石油开采或其它工程施工中,使用充电法确定注水井的水流方向,可以提高注水效益。

3. 地震地质和构造地质中确定地应力方向。使用充电法,通过向地下注入强电解质等措施,查明岩石中最大应力方向,为地震地质和构造地质提供有益资料。

4. 地热开发中选择热水井井位。在干地热区开发地热资源时,可在地热区先打 1 口井,然后对该井进行大型压裂,同时注入导电液,形成动态导体裂缝,使用充电法确定导电裂缝的方位。再在裂缝末端打第 2 口井。在第 1 口井注水,从第 2 口井抽出被加温了的水,从而达到地热开发的目地。

5. 查明地下水分布、流速、流向。在水文地质工作中,为确定地下水的流速、流向,通常将

食盐、氯化铵等强电解质投入井中待测的含水层位。盐晕起初呈圆形,由于地下水的移动,盐晕也向前移动,但同时井孔的盐又不断溶解,形成新的盐晕,于是盐晕的形态由圆形变成了似椭圆形。由于盐晕的电阻率比淡水低很多,可以认为是良导体。可以通过盐晕的充电电场来了解盐晕的形态,从而了解地下水的运移情况,特别是流速、流向。

6. 追索地下污染源和查明污染流的分布。有些工厂将污水偷偷地排入地下,这些污水含有大量氯、苯、酸、碱等污染物,对环境和生态的破坏性极大。这些污染物排入地下后,形成良导电溶液,即形成动态导体。使用充电法可以对污染物进行追踪,查明其方位和分布,也可用于治理后的检查和经常性监测。

7. 追索地下管道、管线。在城市及广大农村,特别是施工档案不健全的地方,经常遇到查明地下金属管道、管线分布和地下电缆漏电部位等任务。使用充电法可以有效地追索它们的分布,实现无损探测。

8. 查明或追索地下河、地下溶洞和地裂缝。在岩溶地区,地质构造条件十分复杂,但只要条件合适,使用充电法可以查明地下河和地下溶洞的分布。用充电法可以有效地监测煤田和矿田采区地下水动态。由于地震、地面沉降或其它原因出现的地裂缝,大部为草皮或表土覆盖,需查明其分布情况。这类问题使用动态导体充电法探测方法可以解决。

9. 查明水坝、堤坝地下隐患,探测和监测地下水库,确定其部位和规模。对天然的和人工的地下水库进行充电法探测,圈定其分布范围。对地下水库的蓄水量进行定期或不定期监测。

10. 煤成气调查。为了有效回收煤成气,需要用钻孔来勾通排放区内的自然裂缝系统。对于深处不可采的煤,可以用垂直孔进行大型压裂,实现这种勾通作用。通过注入强电解液,使用充电法来圈定裂隙分布是可行的。

11. 地下地电背景动态监测。对一些重要地区,如核电站、机场,重要工业和军事设施、基地,在建设之前和建成初期应观测其充电电场,作为重要背景资料保存。以后相隔一段时间再重复观测其充电电场,通过先后对比来研究地下地电、地质、工程、水文、地基稳定性等情况的变化,从而查明各种隐患。这种监测是很重要的。

12. 固态矿体开采监测。因开采而变化(减少)的固态导电矿体,也是动态导体。通过不同时期的监测,可以了解采空情况。有些老矿区,虽然已经采空,实际仍有异常存在,可通过解释推断,查明盲矿体和遗留矿体,指导开采方向。

1.2 几种充电法地电模型

解决探矿、水文、工程和环境问题的第 1 步,是将具体问题转换为地电模型。地电模型是指以电性特征建立的并与地质模型部分对应或全部对应的模型,包含的因素有(1)按电阻率数值大小划分导体与介质的界线,包含动态导体变化不同时期的界线(2)标示出电极分布和充电点位置(3)标示出其它电性特征(4)与地质模型部分对应或全部对应。下面给出一些与动态导体充电法有关的地电模型(图 1)。

1. 导体出露地表(图 1 I)。将供电电极 A 与露头接触。供电电极为 B 或 B_0 。如为后者,即 B_0 影响很小,可以忽略。图中 A' 为最佳充电点,一般难以找到。对这种地电模型,要求得出导体的方位和在地面上的大致分布位置、范围以及长度、宽度和倾角。

2. 供电电极 A 通过钻孔或地下坑道与导体接触(图 1 II)。供电电极为 B 或 B_0 。如为后者,即其影响很小,可以忽略。一般钻孔为非导体。图中 A' 为最佳充电点,一般难以找到。对这种地电模型,要求得出的参数同地电模型 I。

3. 供电电极 A 通过钻孔与导体接触,钻孔亦为导体,其它同地电模型 II(图 1 III)。钻

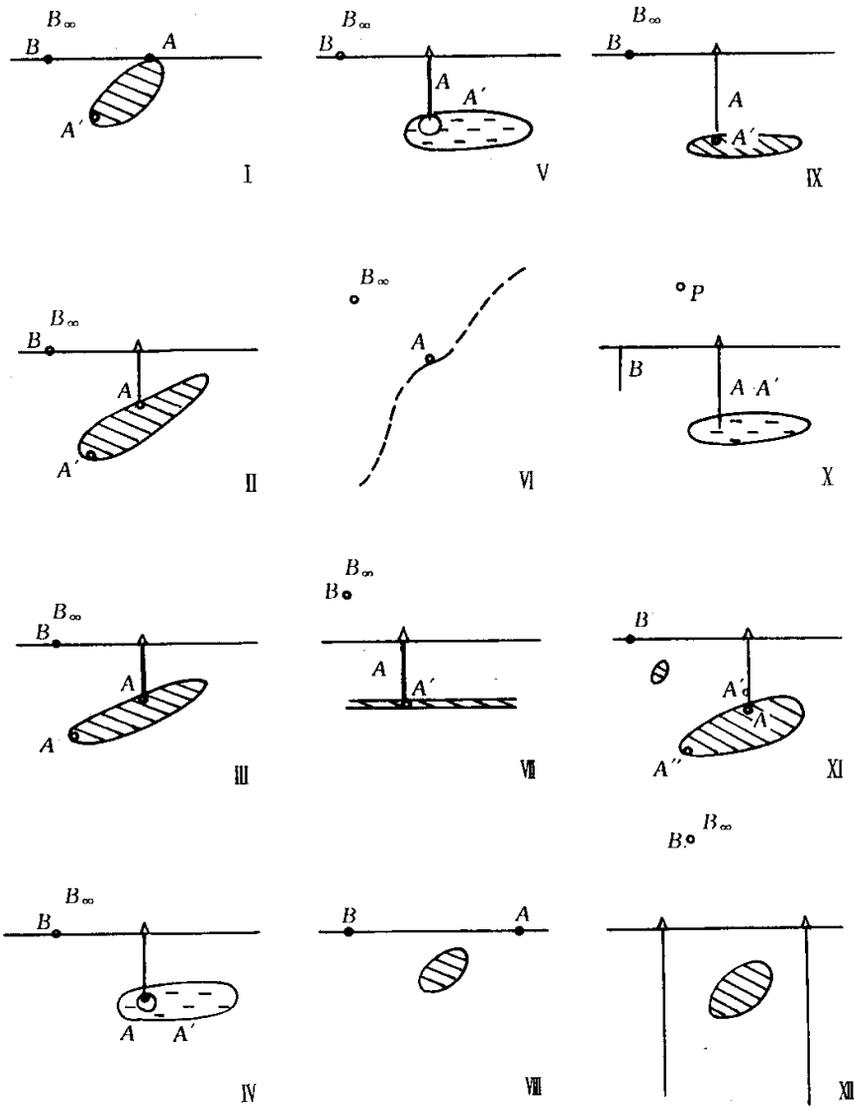


图 1 充电法地电模型示意

孔 A 和矿体共同组成 1 个充电体。问题之一是应当通过计算或使用量板消除 A 孔的影响。

4. 供电电极 A 通过钻孔或地下坑道与液态导体(如盐水)接触(图 1IV)。液态导体形状和规模随时间而变化(如拉长)。一般钻孔为非导体。供电电极为 B_{∞} 。在确定地下水流速、流向时,要用到这种模型。放置如盐类等电解质前的电场可视为正常场;放置电解质若干时间后,形成拉长形状的导电液体的充电电场为异常场。可以通过导电水体生成前后的对比,确定水体的流速和流向。

5. 供电电极 A 通过钻孔或地下坑道与液态导体(如盐水)接触(图 1V)。液态导体的形状和规模随时间而变化(如拉长)。钻孔为导体。其它同地电模型 IV。在油田开发区,供电电极有 A、B。通过 A 钻井压裂、注水等措施使地下形成液态导体(如盐水),液态导体从无到有并形成拉长形状。钻井亦为导体。供电电极 B 在测区边缘,应考虑其影响。可进行二次观测(在裂缝静后),供电电极的极性为 A_+ 、 B_- ,用环线梯度观测来确定导电裂缝的方位。

二极二次观测或二极二次系列,是指 2 个供电电极 A 、 B 形成的供电回路,动态导体形成前和形成后均进行观测的系列。

6. 供电电极 A 通过露头、钻孔或地下坑道与线形导体(如地下含水溶洞、地下河流、受污染的地下排水阴沟、水管等)接触(图 1Ⅵ,平面图)。一般钻孔为非导体。供电电极为 B_{∞} 。对于这种地电模型,要求对它们的分布进行追踪。

7. 供电电极 A 通过钻孔或地下管道、导线等与目的物接触(图 1Ⅶ)。供电电极为 B 或 B_{∞} 。对于这种地电模型,要求对它们的分布进行追踪。另外供电电极与地下电缆芯连接,确定电缆漏电部位。

8. 地下存在良导体,供电电极 A 和 B 安置在地表(图 1Ⅷ)。该导体称非充电导体。对于这种模型,要求确定导体的位置和大致分布范围。

9. 供电电极 A 通过钻孔不与导体接触,留有很小的距离(图 1Ⅸ)。一般钻孔为导体。供电电极在测区边缘 B ,应考虑其影响,或安置于很远 B_{∞} ,可忽略其影响。对钻孔 A (围岩)和矿体 A' (导体)充电,通过二者对比,可以突出异常。

10. 供电电极有 A 、 B 、 P (图 1Ⅹ)。通过 A 钻井压裂、注水等措施使地下形成液态导体(如盐水)。液态导体从无到有并形成拉长形状。钻井亦为导体。供电电极 B 和 P 在测区边缘,应考虑其影响。进行三极供电二次观测,供电电极的极性分别为 $A_+ B_-$ 、 $A_+ P_-$ 、 $B_+ P_-$ 。三极二次观测或三极二次系列,是指除供电电极 A 、 B 外,还设置 1 个辅助供电电极 P 。动态导体形成前,分别进行 $A_+ B_-$ 、 $A_+ P_-$ 和 $B_+ P_-$ 的供电和观测;动态导体形成后,进行 $A_+ B_-$ 的供电和观测。

11. 供电电极 A 先与导体接触,形成充电地电模型(图 1Ⅺ),再安置在围岩中形成围岩充电模型。围岩介质中存在干扰体。供电电极为 B_{∞} 。这种模型用于消除干扰体的影响。

12. 在地表和钻孔中充电,即围岩充电(图 1Ⅻ)。要求通过地表及孔中观测,以及通过它们的组合,确定导体截面的位置和分布范围。

1.3 观测仪器和设备

在常规充电法工作中,对仪器和设备要求不高,一般的电法勘探仪器和设备均适用。对于动态导体充电法,探测目标相对较深或较小时,在使用新观测方法、新测线布置方式情况下,对仪器和设备也就有了较高的要求。如实行“高密度”观测法,即布设电缆和多电极,供 1 次电流观测多个测点数据,可使用多电极电测数据采集系统。它由电测主机——MIR-1C 多功能直流电测仪、电极转换控制器——MIS 系列微机控制多路电极转换器、高密度电缆和专用电极以及高密度电阻率法数据处理软件等 4 部分构成。^①

2 方法的技术基础

2.1 二极供电电极系列基本公式

二极供电电极系列,就是指由电极 A 和 B 向地下供入电流而构成回路的系列。一般 A 为正极, B 为负极。动态导体充电法着重研究的参数是纯异常和视纯异常。

地下动态导体生成前,仅有工作井 A 和汇流井 B 向地下介质供电(图 2),这时在介质中形成电场。在地表上任意点 M 处的电位(假定 N 在无穷远)为

① 李志武,多电极电测数据采集系统,地质矿产部机械电子研究所工程物探装备开发中心,1993.3

$$U = U_A + U_B, \tag{1}$$

式中, U —地下人造动态导体生成前在 M 点处的电位; U_A — M 点处仅由充电井供电的电位; U_B — M 点处仅由汇流井供电的电位。

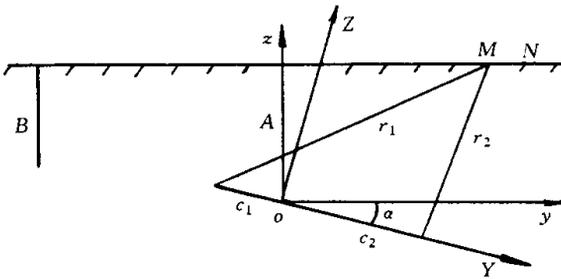


图 2 充电法地电模型

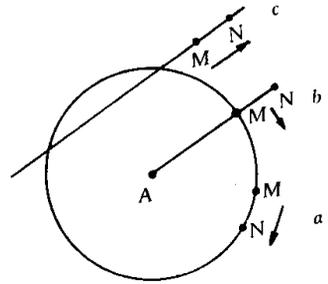


图 3 几种测线上的电位和梯度观测示意

地下动态导体生成后,除有充电井 A 和汇流井 B 向地下介质供电外,还有动态导体 C 向介质供电,导体 C 由 c_1 和 c_2 组成。这时 M 点处的电位 U' 为

$$U' = (1 - n)U_A + nU_C + U_B, \tag{2}$$

式中, U' —地下充电动态导体生成后总电场在 M 点处的电位值; U_C —仅为地下充电动态导体电场在 M 点处的电位值; n —地下充电动态导体生成后,充电井 A 和动态导体 C 共同将电流流向介质,动态导体分得电流的比例系数(数值范围 $0 \sim 1$)称为分流系数。

将动态导体生成后 M 点的电位值减去动态导体生成前 M 点的电位值,即将(2)式减去(1)式,称为视纯异常

$$U_s = U' - U = nU_C - nU_A. \tag{3}$$

可以看出(3)式已消除了 U_B 的影响,即消除了汇流井的影响(不论 B 极形状、大小如何),但并没有消除 U_A 的影响,即没有消除充电井的影响。

地面上任意 2 点 M 和 N 之间的电位差,可以参照上面的式子表示为

$$\Delta U = \Delta U_A + \Delta U_B; \tag{4}$$

$$\Delta U' = (1 - n)\Delta U_A + n\Delta U_C + \Delta U_B; \tag{5}$$

$$\Delta U_s = \Delta U' - \Delta U = n\Delta U_C - n\Delta U_A. \tag{6}$$

图 3 示出了几种测线上的电位和梯度排列。 a 为环形测线上的纵向梯度排列; b 为环形测线上的横向梯度排列; c 为直线测线上的纵向梯度排列。

2.2 三极供电电极系列基本公式

2.2.1 分流系数和动态导体的接地电阻

动态导体的接地电阻和分流系数在确定动态导体方位和规模的方法中占有重要位置。

1. 电极 A 的接地电阻 R_A : 在地下半空间地表上设 A_+ 、 B_- 供电系统,电极 A 与 B 总的接地电阻 $R_{AB} = V_{AB}/I_{AB}$ 。在实际工作中,将测站与电极 A 连接一段短导线 r_A ,与电极 B 连接导线 r_B ,另布设电极 P (辅助电极)连接导线 r_P (图 4),组成三极供电电极系列。这 3 个电极的接地电阻不应相差太大,不要超过 1 个数量级,以便保证精度。设 $R_{AB} = (R_A + R_B + r_A + r_B)$, $R_{AP} = (R_A + R_P + r_A + r_P)$, $R_{BP} = (R_B + R_P + r_B + r_P)$, 电极 A 的接地电阻公式为

$$R_A = \frac{R_{AB} + R_{AP} - R_{BP}}{2} - r_A. \tag{7}$$

万方数据

因此,只须测出 R_{AB}, R_{AP}, R_{BP} 和 r_A 就可以求出 R_A 。

测量接地电阻比较简单,如测量接地电阻 R_{AB} ,须测量供电线路端点 1 和 2 的电压 V_{AB} (图 4) 和供电导线中的电流强度 I_{AB} ,根据欧姆定律即可算出 R_{AB} 。测量 R_{AP} 和 R_{BP} 的方法相同。对 r_A ,可事先用电表测出这段导线的电阻 r_A ,也可根据导线参数算出。

2. 动态导体的接地电阻 $R_C = R_A R_{AC} / (R_A + R_{AC})$,其中 R_A 为导体生成前 A 井的接地电阻; R_{AC} 为导体生成后 A 井和动态导体的总接地电阻。

3. 分流系数 $n = (R_A + R_{AC}) / R_A$ 。只要在导体生成前、后各测量 1 次工作井 A 的接地电阻,根据上式即可算出 n 值。

2.2.2 纯异常梯度基本公式

一般分 3 次供电: $A_+ B_-$, $A_+ P_-$, $B_+ P_-$ 。主要用来测量由动态导体引起的纯异常 ΔU_C , A 井的接地电阻 R_A , 以及分流系数 n 。假定除充电井 A 和汇流井 B 外,增设辅助电极 P (参见图 4),在导体生成前分别对 $A_+ B_-$, $A_+ P_-$ 和 $B_+ P_-$ 供电,在地表 MN 处的相应电位差为 ΔU_{AB} , ΔU_{AP} 和 ΔU_{BP} ,可得纯粹由 A 电极电场在 MN 处形成的电位差

$$\Delta U_A = \frac{(\Delta U_{AB} + \Delta U_{AP} - \Delta U_{BP})}{2} \tag{8}$$

导体生成后对 $A_+ B_-$ 供电,在 MN 处的相应电位差为 $\Delta U'_{AB}$,可得

$$\Delta U_C = \frac{\Delta U'_{AB} - \Delta U_{AB}}{n} + \Delta U_A \tag{9}$$

对于环形测线,纵向梯度 $\Delta U_A = 0$,横向梯度 ΔU_A 等于常数。这 2 种情况都容易解释推断。

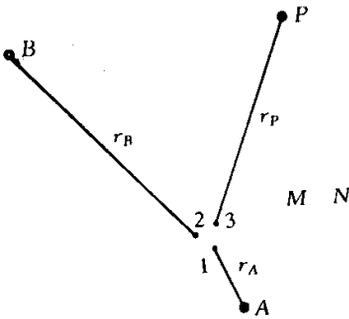


图 4 三极供电电极系列测接地电阻的方法

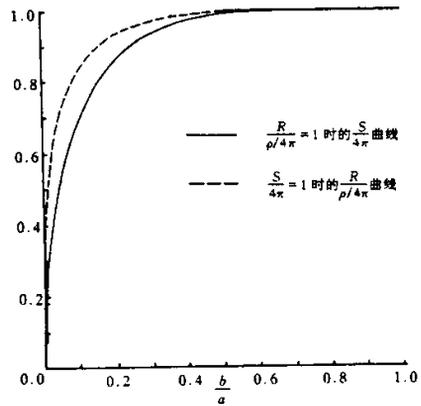


图 5 伸长旋转椭球体的参数关系

2.3 电阻等效导体

可以证明,如果有不同形状的数个导体,只要接地电阻相等,则它们的表面面积也近似相等。可称它们为“电阻等效导体”。电阻等效导体的 1 个重要特点就是它们的表面面积近似相等,用这个概念,可以比较容易地估计动态导体的规模和形状。以伸长旋转椭球体为例(球体是伸长旋转椭球体的特例)。伸长旋转椭球体的表面面积公式为

$$\left. \begin{aligned} \frac{S}{4\pi} &= \frac{b}{2} \left(b + \frac{a}{\epsilon} \arcsin \epsilon \right) \\ \epsilon &= \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a} \end{aligned} \right\} \tag{10}$$

伸长旋转椭球体接地电阻公式为

$$\frac{R}{(\rho/4\pi)} = \frac{\operatorname{arsh} \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{b}}{\sqrt{a^2 - b^2}} \quad (11)$$

对于(11)式,在保持 $\frac{R}{(\rho/4\pi)} = 1$ 的条件下,赋以不同的 a ,从而求出相应的 b ,再将相应的 a, b 值代入(10)式,从而求出当 $\frac{R}{(\rho/4\pi)} = 1$ 时的 $\frac{S}{4\pi} - \frac{b}{a}$ 关系曲线(图5)。该曲线说明,在接地电阻不变的情况下,导体的形状在由球体向伸长旋转椭球体转化过程中,其表面面积在相当一段区间内变化很小,当 b/a 由1降到0.23时, $S/4\pi$ 由1降到0.90,即误差仅为9.8%。

(未完待续)

A PRELIMINARY DISCUSSION ON THE “ MISE-A-LA-MASSÉ ” DETECTION OF UNDERGROUND DYNAMIC CONDUCTOR

He Yusheng

(Aerogeophysical Survey and Remote-Sensing Center ,Beijing 100083)

Abstract Through studies based on characteristics of “ dynamic conductor ”, this paper has formed a suite of “ mise-a-la-masse ” detection theories and techniques for underground dynamic conductor, and described the object of their application, the geoelectric model, the technical basis, some detection methods and their preliminary application.

Key words “ mise-a-la-masse ” method, dynamic conductor, fracturing

第一作者简介 何裕盛,高级工程师,男,1934年生,吉林市人。1958年毕业于长春地质学院物探系,从事物探和遥感地质等专业的研究工作。发表论文20余篇。已发表的专著有《充电法》、《导电纸模拟在地质工作中的应用》等,近期完成了《地下动态导体的充电法探测》。