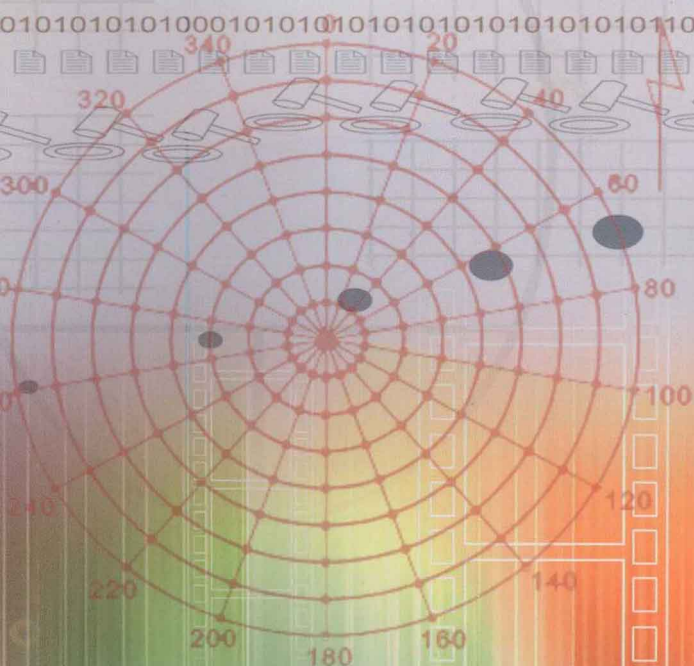


JINGJIAN JIANCE JISHU

电位法视纯异常 井间监测技术

张金成 编著



石油工业出版社

内 容 提 要

本书主要介绍了电法勘探领域中一项新科技成果——地下动态导体充电法探测中的“环线径向电位差法”的理论、方法工作原理和实例。环线径向电位差法（生产中简称电位法）适用于地下隐蔽动态导体参数的探测，这种探测方法可有效地用于探测油井人工压裂裂缝方位、产状和规模，注水井注水推进方位、产状、规模，地热区地热开采，地下水流速、流向测定，以及地下污染源调查，煤层气工程开发等。书中还探讨了定量解释方法，提供了部分解释推断量版数据。

本书可供物探、石油、煤气田、地质、水文、工程、建筑等方面的研究人员、工程技术人员、教师和学生参考使用。

图书在版编目（CIP）数据

电位法视纯异常井间监测技术/张金成编著.
北京：石油工业出版社，2011.8
ISBN 978-7-5021-8597-8
I. 电…
II. 张…
III. 充电法勘探-应用-油气井-监测-研究
IV. ①P631.3②TE2

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2011）第 157198 号

出版发行：石油工业出版社
（北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011）
网 址：www.petropub.com.cn
发行部：(010) 64523620
经 销：全国新华书店
印 刷：保定彩虹印刷有限公司

2011 年 8 月第 1 版 2011 年 8 月第 1 次印刷
787×1092 毫米 开本：1/16 印张：11
字数：282 千字 印数：1—2000 册

定价：46.00 元
（如出现印装质量问题，我社发行部负责调换）
版权所有，翻印必究

序

大港油田钻采工艺研究院张金成等人经过近三十年的研究和应用,为我国油气开发等领域提供了一种新型的井间监测技术,即电位法视纯异常井间监测技术。该技术在测定油井人工压裂裂缝方位、注水井注水推进方向、煤层气人工压裂裂缝方位以及调剖工艺效果评价、稠油蒸汽开采方面的监测等得到应用。到目前为止已经完成 800 多口井的现场实际监测,效果良好。这一方法经受了较长期的考验。面对各领域、各单位专业人员的需要,编写了此书。

20 世纪 80 年代,大港油田采油工艺研究所的研究小组,首次开展了充电法确定油井压裂裂缝方位的研究,提出了确定导电裂缝方位的工作方法——环线径向电位差法。在长期实践中,经过不断完善和提高,形成了一套完整的理论和野外施工、观测方法。在仪器研制和资料解释方法等方面有了很大进步,并积累了丰富的经验。该书正是对这些研究成果的总结和提高。具有下列特点:

首先将地面电法勘探向井中延伸,将充电法从找矿扩展到工程方面的井间监测,建立了动态导体充电法的基本理论和实用的井间监测方法技术。既拓展了电法勘探的应用领域,也丰富了充电法理论。其次,该书遵循“实验、理论、再实践”的原则,使二极供电二次观测法的测量原理、工作方法和施工技术更趋完善、成熟。增加了三极供电二次观测法,探讨了分层压裂、分层注水测量原理和施工方法,介绍了测量结果的定量解释方法。第三,书中以大量的应用实例阐明测量技术上的新思维。以“压低干扰,突出异常”为主线,面对不同地质目标体,在信号随机编码、观测电极布局以及施工工艺等方面的可操作性和实际经验进行了总结。

总之,这是一本既有理论原理,又有实践经验,内容丰富、可读性强的书。该书的出版,对工程问题的井间监测工作的广泛开展,提高监测效果将起到积极的推动作用。



2011 年 5 月 13 日

前 言

1980年,原石油工业部大港油田采油工艺研究所按照李国才总工程师的要求,在充分调研国内外人工压裂裂缝测试成果基础上,成立了由采油工艺研究所丁庆年、张金成等人负责,地矿部勘探地球物理地球化学研究所吴汉荣、何裕盛等人参加的联合研究小组,首次开展了充电法确定油井压裂裂缝方位的研究。研究组以建立地电模型的方法研究了地下导电裂缝的充电电场,提出了确定导电裂缝方位的工作方法——环线横向梯度观测法(即环线径向电位差法),以及二极供电二次观测法,初步形成了环线径向电位差法的基本理论和野外施工、观测的方法。该方法在大港油田得到有效的应用和完善。这种方法在探测深度上有所突破,达到千米以上。在之后的实践中,特别是在确定油井人工压裂裂缝方位、注水井注水推进方位监测得到广泛应用,取得了明显的经济效益。经过十多年的应用,到目前为止已经完成800多口井的监测。

2001年,由何裕盛撰写的《地下动态导体的充电法探测》,书中提出了“环线纵向梯度法”,同时对“环线横向梯度法”作了补充。

多年来,大港油田钻采工艺研究院在仪器研制、施工工艺和资料解释方法等方面做了大量研究和现场试验工作,并积累了丰富的经验。

迄今为止,业已出版的著作和文献,直接用于野外和室内实际工作,有时可能会遇到困难,满足不了现实需要。自2001年以来,我们就着手这方面的资料搜集和充实,并研究提升到理论层面等工作,取得新成果。针对各领域、各单位专业人员的需要,有必要提供一本实用参考书,所以我们编写了《电位法视纯异常井间监测技术》以飨读者。编写中将完善的理论和应用上的新成果、新经验也补充了进去。

本书除具有实用和指导意义外,还具有如下特点:增加了定量解释;丰富了二极供电二次观测法的内容,增加了三极供电二次观测法。探讨了分层压裂、分层注水测量原理,阐明了施工方法。介绍了协助解释推断的正演模拟方法。书中列举了早期工作实例和近期用先进仪器、设备和新技术完成的大量工作实例。

本书分为三章。第一章主要介绍二极供电一二极观测法。主要介绍了纯异常、视纯异常和准纯异常定义和表达式,动态导体充电法基本公式,对线形动态导体异常分析和正演模拟,水槽和土槽模型实验,工作方法和技术,定性解释准则和解释方法,一些早期应用实例。

第二章介绍了三极供电一二极观测法。包括方法原理、基本公式、工作方法和技术、数据处理方法、定性解释和定量解释。包括估计动态导体规模的原理和方法,定性解释和定量解释。定量解释中,包括使用的基本公式和确定线形动态导体长度、对称程度,两翼的长度和裂缝体的倾角等。使用了量板对比方法,还有多层注水水流的监测等。

第三章专门介绍了近年来采用先进观测系统等新技术在生产实践中一些应用实例和经验。包括油井和煤层气井人工压裂裂缝方位监测、注水井注水推进方向的监测、调剖工艺效果评价监测、稠油井汽驱扩散方位监测等实例。

大港油田钻采工艺研究院刘延平院长对编著本书给以大力支持和鼓励；在编写过程中得到老专家何裕盛老师的指导和协助；冯启宁教授、杨天吉教授、李希文教授等对手稿进行了审阅和肯定、并提出宝贵而中肯的修改意见。在这里一并给以由衷的感谢。在编写过程中，还有项目组成员郑永哲、李伯芬、郝锦彤、宋建国、王浩、王小剑、石华荣、王爱国等人参与了有关工作。

笔者在这里强调，除了介绍比较成熟的理论、方法和经验之外，还增加了属于试验性、探索性的内容，尚须在使用中摸索经验，发现问题，解决问题，不断提高理论和技术水平。

书中不当之处在所难免，敬请读者指正。

目 录

绪论	(1)
第一节 工作对象和任务	(1)
第二节 环线径向电位差法理论特点	(2)
一、研究思路	(2)
二、建立地电模型	(2)
第三节 环线径向电位差法工作特点	(3)
一、二极供电—二次观测法	(3)
二、三极供电—二次观测法	(3)
第一章 二极供电环线径向电位差法理论和方法	(5)
第一节 基本原理	(5)
一、纯异常、视纯异常和准纯异常定义和表达式	(5)
二、供电电流分流系数	(7)
第二节 动态导体充电法基本公式	(9)
一、充电线形导体电场电位公式	(9)
二、充电线形导体电场电位差公式	(11)
三、充电线形导体电场电位公式的两种形式	(11)
四、垂直电极 A 和 B 在测点 MN 的电位差	(13)
五、电极 A、B 和裂缝体在测点 MN 的电位差	(14)
第三节 裂缝异常分析和正演模拟	(15)
一、裂缝异常大小的估计和确定裂缝方位的方法	(15)
二、数学模拟正演举例	(20)
三、水槽和土槽模型实验	(22)
第四节 施工方法和技术	(24)
一、仪器、设备和测量精度	(24)
二、工作方法	(27)
第五节 二极供电法的定性解释方法	(29)
一、确定裂缝方位的方法	(29)
二、环线径向电位差观测法曲线特点	(32)
三、环线半径 r 和 MN 极距 Δ 的选择	(35)

四、二极供电多次观测法和三极供电多次观测法	(36)
五、负视纯异常的使用和极坐标平面图	(36)
第六节 野外工作实例	(38)
一、港 6-29 井	(38)
二、656 井	(38)
三、羊 10-32-2 井与羊 12-10-2 井	(40)
四、小结	(42)
第七节 充电井偏斜对异常的影响	(43)
一、充电井井口作为环线中心的情形	(43)
二、注液点源中作为环线中心的情形	(51)
三、小结	(55)
第二章 三极供电环线径向电位差法理论和方法	(57)
第一节 三极供电环线径向电位差法	(57)
一、地电模型	(57)
二、基本工作程序	(58)
三、三极供电系列基本公式	(59)
四、仪器和设备	(62)
五、野外工作部署	(62)
六、野外观测方法	(63)
七、野外观测数据的处理	(63)
第二节 定性解释方法	(64)
一、估计动态导体规模	(64)
二、定性解释推断	(72)
第三节 定量解释推断方法	(74)
一、实际计算用电位差 ΔU_c 公式	(74)
二、量板对比法	(75)
三、解释推断模拟实例	(79)
第四节 多层注水水流的探测和井斜测量	(91)
一、多层注水水流的探测	(91)
二、环线径向电位差法测定井斜	(96)
三、环形测线径向电位差法工作精度要求	(98)
第三章 环线径向电位差法（电位法）应用实例	(100)
第一节 油井和煤层气井人工压裂裂缝方位监测	(100)
一、吉林油田长平 3 井压裂裂缝方位监测	(100)

二、新疆克拉玛依油田 T87097A 井压裂裂缝方位监测 (109)

三、新疆克拉玛依油田 951769 井压裂裂缝方位监测 (114)

四、山西宁武盆地武试 5-3 井和武试 5-5 井压裂裂缝方位监测 (118)

五、大地电位法对晋试 1 井煤层压裂裂缝监测 (121)

六、山西吉试 1 井压裂裂缝方位监测 (124)

第二节 注水井注水推进方向监测 (125)

一、延长油田丛 34 井注水推进方位监测 (125)

二、大庆油田 82-622 井注水推进方位监测 (135)

三、大港油田西新 36-6 井和新 36-7 井注水推进方位监测 (139)

第三节 调剖工艺效果评价监测 (140)

一、大庆油田杏 7-2-更 24 井调剖工艺效果评价 (140)

二、大港油田港西 18-61 井调剖工艺效果评价 (143)

三、电位法在辽河油田稠油“蒸汽开采”中的应用 (149)

结束语 (153)

参考文献 (154)

附录 (155)

绪 论

本书所指“电位法”是“环线径向电位差法”的简称。该方法是将用于人工压裂的金属套管井作为充电电极井 A，在比较远处选择已有钻井金属套管作为汇流电极井 B。在地面上布置环形测线，沿半径方向布置观测电极 MN，电极 M 在环形测线上，沿环线布置多对 MN 电极（一般为 24 对）。在井中压裂注液前对 A 井充电并观测一次 MN 间的电位差（背景观测）。然后对井下某处进行压裂和注液，注入含有盐类的电解液，使地下出现有一定规模的导电裂缝。裂缝与 A 井融合为一个导体。压裂过程中和压裂后再对 A 井充电，并观测一次（或多次）MN 间的电位差（总场观测）。根据对观测结果数据的处理和分析（解释推断），确定裂缝体的方位、产状和规模，这是环线径向电位差法的基本原理。实际上它属于电法勘探中充电法的一个变种（图 1-1-1）。

该方法是在 1982 年提出的。当时主要用于确定导电裂缝方位，使用了二极供电二次观测法（供电电极为正极 A 和负极 B，压裂前和压裂后各观测一次的方法）和解释推断方法（环线横向梯度观测法，本书改为环线径向电位差法），并立即在大港油田得到有效地应用。后来又提出了三极供电二次观测法（供电电极为三极 ABP，即 AB、AP、BP 分别充电观测的方法），到目前为止，该方法还没有得到推广应用。

第一节 工作对象和任务

（1）在低渗油田（煤田）开发中，需要对生产井施行大型水力压裂，希望形成一条或多条几何形态可控的人工裂缝，以增大导流能力。为了评价压裂效果，要求在施工中监测人工压裂裂缝的几何参数，即确定其规模和产状（裂缝方位、长度、高度和倾向、倾角）。

随着油田开发进程的不断深入，地层压力不断下降，为了保证正常开采，需要通过钻井套管向地层注入大量的液体或气体，确定地层注入液体或气体的流动方位和产状。

（2）在水文或工程探测中，需要确定地下水流的走向和方位、规模和产状（长度、宽度和倾向、倾角）。

（3）在地热区地热开发。通过向地下施行压裂—注水—地热增温—抽取热水方案开采地热。本方法在于确定其水流的走向、方位和水体产状。

类似的工程作业还有很多，将这些作业实例概括为一个共性的假设条件和要解决的问题：

（1）作业之前地下目标导体不存在。

（2）通过人为或天然环境变化之后，地下出现了目标导体（动态导体）。

（3）需要确定目标体规模和产状（方位、长度、宽度和倾向、倾角）。

这些问题均可用环线径向电位差法解决。所求的目标导体的走向方位和产状等探测参数是解决工程地质问题的基础。

第二节 环线径向电位差法理论特点

一、研究思路

通过压裂和注入工作液所形成的充电导体电场，在地面上 MN 两点间形成的电位差非常微弱。为了测量出 MN 两点间电位差，压制干扰信号，采取建立“环线径向电位差法”的思路，以“压低干扰，突出异常”。

(1) 利用油井压裂施工和注水井注入工作液的机会，在液体中加入盐类，使注入液体成为导体。在地面上观测时，选择最简便的环线排列。沿径向布置的 AMN 属于单极梯度法。由于选择的 MN 间距离比较大，所以称为“环线径向电位差法”。

(2) 对于被测井为直井（套管与地面垂直，以下充电井简称 A 极，电流返回井简称 B 极）的情形，采用二极供电二次观测法进行动态导体形成前的观测（背景观测）和动态导体形成后的观测（总场观测）。以取得电位差数据，然后将它们相减，所得到的异常即视纯异常 ΔU_s 。它与动态导体形成的纯异常 ΔU_c 呈线性关系，A 电极电场为常数，同时消除了 B 电极的影响。利用实测的视纯异常 ΔU_s 进行解释，以此确定动态导体的方位和长度。

(3) 对于被测井为斜井（偏离垂直线一定角度）的情形，采用三极供电—二次观测法。该方法消除了 A 电极和 B 电极的影响，得到直接用于解释的纯异常 ΔU_c 。可以确定裂缝体的走向、方位、两翼的长度、倾角和规模等。

(4) 假设裂缝体具有线形特征，即在一个方向上有所伸长。如线形导体（伸长旋转椭球体）、矩形薄板等。在进行现场观测时，采用阵列式布置观测电极，即将所有观测电极（一般为 24 对 MN）一次布置完毕。进行第一次观测后，保持电极绝对不动，以保证第二次观测时，保持接地条件完全不变。

二、建立地电模型

这里所定义的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。地电模型包含的因素有：(1) 按电阻率数值大小划分界线；(2) 标示出电极分布和充电点（套管与动态导体接触点）位置；(3) 标示出其他电性特征；(4) 与地质模型部分对应或全部对应；(5) 是双地电模型，即动态导体形成前和动态导体形成后各为一个模型。

书中经常给出这样两个相互关联的双地电模型。第一个地电模型：假设 A 电极套管，埋入地下，或许相对铅垂线偏离 β 角。围岩电阻率大体上为 ρ （围岩介质中的电阻率分布不一定很均匀）。第二个地电模型：增加了后来形成的与钻井底部相接触的伸长形动态导体（参见第二章的图 2-1-1）。

钻井与后来形成的动态导体的充电接触点（即注液点）设为坐标原点 O，A 井从地表井口到 O 点的长度为 Z_A 。假设动态导体位于 yOz 平面上，其长度为 $2c$ （这里仅绘出了导体的长轴），导体倾角为 α ，充电接触点到导体端点的距离为 c' ，简称“点端距”，地表到 y 轴或动态导体的深度为 z 。包含 A 井的垂直平面 $y'Oz$ （图 2-1-1b）与包含动态导体的垂直平面 yOz （图 2-1-1a）的夹角即钻井套管偏斜的方位角为 γ （图 2-1-1c）。

第三节 环线径向电位差法工作特点

工程和环境中的许多问题,有些是能用动态导体的充电法特别是环线径向电位差法探测来解决的。更多的问题可以提升为充电法地电模型,然后使用动态导体的充电法探测理论和方法去解决。

一、二极供电—二次观测法

(1) 须布置两个供电电极。主要供电电极 A, 汇流电极 B。这里规定电极 A (如钻井或钻孔金属套管) 必须与地平面垂直。

(2) 环形测线。在野外, 将观测电缆布置在以充电井井口为中心, 一定距离 r 为半径的圆形环线上。M 在圆周上, N 沿径向布置, MN 并与电缆连接。在供电电极 AB 供电情况下进行 MN 电位差观测。

(3) 背景观测。在动态导体形成前 (第一地电模型) 进行背景观测。观测内容为: 在 AB 供电情况下观测 AB 的电压和电流, 求出它们的接地电阻; 在 AB 供电情况下观测环形测线上各 MN 的电位差和供电电流。

(4) 总场观测。通过向地下注入工作液, 在地下形成电解液型导体即动态导体。在动态导体形成后 (第二地电模型) 进行总场观测。即在动态导体形成后再进行部分上述观测。观测内容为: 在 AB 供电情况下观测 AB 间的电压和电流, 求出它们的接地电阻; 在 AB 供电情况下观测环线上各 MN 的电位差和供电电流。

(5) 确定导体的走向方位。计算出纯由裂缝导体电场形成的电位差值或视纯异常值, 根据绘制的曲线图确定导体的走向方位。

(6) 估计动态导体 (相对钻井套管注液点) 的对称性, 粗略估计两翼的长度。

(7) 正演估计。对解释推断结果进行正演计算, 如果计算得出的数据与野外实测大体一致, 那么, 解释推断结果的可靠性将大大增加。在野外施工前, 如在给定压裂井压裂层段深度, 预计动态导体规模情况下, 对任务要求进行正演计算, 得出观测异常的可能性和选择探测方法和合适的环线半径等。

(8) 在成果平面图上用各种符号表示出工作液或动态导体的走向方位和长度。根据这些基本参数, 对各有关层位注入水的分布与其他物质 (如剩余油体等) 分布的相互关系进行解释, 用以解决工程地质问题。

二、三极供电—二次观测法

(1) 须布置三个供电电极。主要供电电极 A, 汇流电极 B 和辅助电极 P。这里假设电极 A (如钻井或钻孔金属套管) 允许与地平面不垂直, 或与铅垂线不一致而有一个偏斜角 β , 对 B 极和 P 极的倾斜情况没有要求。

(2) 环形测线。在野外, 将观测电缆布置在以套管与动态导体的接触点在地表的投影点为中心, 一定距离 r 为半径的圆形环线上。M 在圆周上, N 沿径向布置, MN 与电缆连接。在供电电极 AB 供电情况下观测 MN 电位差。

(3) 背景观测。在动态导体形成前 (第一地电模型) 进行背景观测。观测内容为: 在 $A+B-$ 、 $A+P-$ 、 $B+P-$ 分别供电情况下观测 AB、AP、BP 间的电压和电流, 求出它们的

接地电阻；在 $A+B-$ 、 $A+P-$ 、 $B+P-$ 分别供电情况下观测环形测线上各 MN 的电位差和供电电流。

(4) 总场观测。通过向地下注入工作液，在地下形成电解液型导体即动态导体。在动态导体形成后（第二地电模型）进行总场观测。即在动态导体形成后再进行部分上述观测。观测内容为：在 $A+B-$ 、 $A+P-$ 、 $B+P-$ 分别供电情况下观测 AB、AP、BP 间的电压和电流，求出它们的接地电阻；仅在 $A+B-$ 供电情况下观测环线上各 MN 的电位差和供电电流。

(5) 确定动态导体的走向方位。计算出纯由动态导体电场形成的 MN 电位差值，根据绘制的曲线图确定导体的走向方位。

(6) 确定动态导体产状。在已知动态导体走向方位和重新进行测点编号的基础上，根据绘制的特殊对数曲线与高精度解释推断量板对比，确定出导体的长度和倾角，顺便估计宽度。

(7) 确定动态导体规模和宽度。将野外观测数据进行简单处理，求出地下目标动态导体的接地电阻，计算动态导体表面面积（估计动态导体规模）和动态导体的宽度。

(8) 正演估计。对解释推断结果进行正演计算，如果计算的数据与野外实测大体一致，那么，解释推断结果的可靠性将大大增加。在野外施工前，根据任务要求，如在给定压裂井压裂层段深度，预计动态导体规模情况下，进行正演计算，以得出观测异常的可能性和选择探测方法与合适的环线半径等。

(9) 在成果平面图上用各种符号标出注入工作液或动态导体的走向方位和长度。根据这些基本参数可以对各有关层位注水的水分布与其他物质（如剩余油体等）分布的相互关系进行解释，用以解决工程地质问题。

动态导体充电法与常规充电法相比，其优点为在消除供电电极和围岩不均匀造成的干扰上大有提高，在观测精度和解释推断精度上提高一到两个数量级。该方法最适宜的探测深度在 1000m 以内，在地电条件合适情况下，探测深度可达 2000 ~ 3000m。探测动态导体长度与埋深之比（称径深比）最好不小于 0.2。

第一章 二极供电环线径向 电位差法理论和方法

第一节 基本原理

环线径向电位差法（简称环线电位法）是以确定人工压裂裂缝方位为主的方法。我们所利用的是钻井导电金属套管，钻井 A 与地平面垂直。地面上以 A 为中心 r 为半径布置环形测线，M 在环线上，MN 沿径向方向布置。一般在环线上布置多个测点（24 个测点）。沿径向可设一个 MN 或两个 MN。压裂前 A + B - 供电，测量一次 MN 电位差。压裂时注入导电液体。压裂后在地下形成长条形充满导电液体的裂缝。压裂后 A + B - 供电，再测量一次 MN 电位差（图 1-1-1）。将压裂后电位差 ΔU_h 减去压裂前电位差 ΔU_q ，称为视纯异常 $\Delta U_s = \Delta U_h - \Delta U_q$ 。根据视纯异常 ΔU_s 来判断压裂形成裂缝的走向方位。

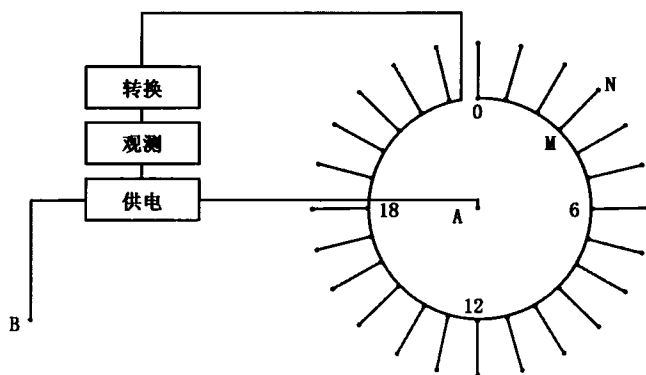


图 1-1-1 环线径向电位差测量排列平面示意图

假定在地下电阻率为 ρ 的导电介质中存在垂直向下的压裂井 A（供电电极）、汇流井 B（另一供电电极，位于测区边缘）和深部水平分布的良导性裂缝。该裂缝假设是由压裂施工造成的，深度为 z ，相对压裂点呈不对称分布（两翼不相等），其压裂点到裂缝右端部的距离为 c' 。裂缝长度为 $2c$ ，倾角为 α （图 1-1-2）。假定电极 A、B 和 $2c$ 都是由线形导体组成。当然对于裂缝体 $2c$ ，也可理解为以该线形段端点为焦点的伸长旋转椭球体。

为了讨论视纯异常 ΔU_s 的性质，我们需要推导出地表环线径向排列的 MN 电位差的公式，以及根据 MN 电位差的公式换算出导电裂缝在地表的电位差公式（纯异常公式）。

一、纯异常、视纯异常和准纯异常定义和表达式

我们将给出纯异常、视纯异常和准纯异常等参数，其中每一个都可作为用于确定导电裂缝方位的重要参数。

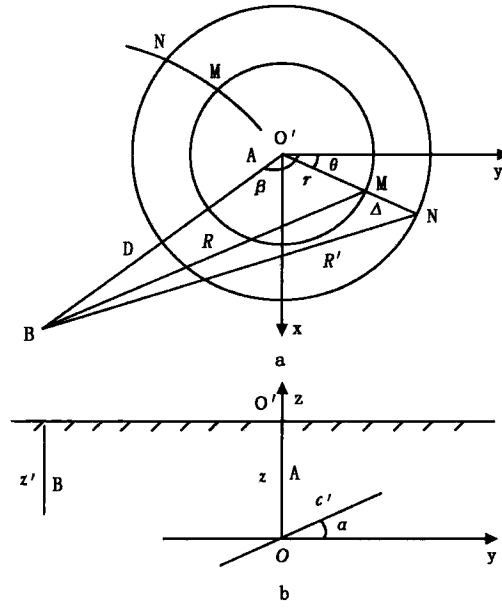


图 1-1-2 充电线形导体坐标位置图
a. 径向电位差法平面环线图; b. 截面图

压裂前即地下动态导体生成前在 A + B - 供电条件下其电场在 MN 电位差为:

$$\Delta U_q = \Delta U_A + \Delta U_B \quad (1-1-1)$$

式中 ΔU_A ——由 A 电极电场在 MN 形成的电位差;

ΔU_B ——由 B 电极电场在 MN 形成的电位差。

式 (1-1-1) 及以下公式中均假定供电电流为单位值 (设 $I=1$)。

压裂后即地下动态导体 (裂缝体) 生成后在 A + B - 供电条件下 MN 电位差变为

$$\Delta U_h = (1-n) \Delta U_A + n \Delta U_c + \Delta U_B \quad (1-1-2)$$

式中 n ——充电动态导体 (导电裂缝) 生成后, 工作井和动态导体共同将电流流向介质, n 为动态导体分得电流的比例系数 (数值范围 0 ~ 1);

ΔU_c ——由动态导体 (导电裂缝) 电场在 MN 形成的电位差, 称为纯异常。

在动态导体充电法观测数据中, A 电极、B 电极以及其他干扰不可忽略, 只有消除它们的影响之后, 才能成为纯异常。

1. 关于视纯异常

将动态导体生成后 MN 电位差 ΔU_h 减去导体生成前的电位差 ΔU_q 即式 (1-1-2) 减去式 (1-1-1), 我们称为视纯异常 ΔU_s

$$\Delta U_s = \Delta U_h - \Delta U_q = n \Delta U_c - n \Delta U_A = n (\Delta U_c - \Delta U_A) \quad (1-1-3)$$

可以看出, 二式相减后产生的视纯异常已经消除了 B 电极的影响 (不论 B 电极形状、大小如何), 但是没有消除 A 电极的影响。在式 (1-1-3) 中第二项 $-n \Delta U_A$ 为常数项 (A 电极是与地面垂直的, 环线上各测点 MN 电位差 ΔU_A 相等), 它使视纯异常 ΔU_s 曲线整体上

移，第一项 $n\Delta U_c$ 中 n 将纯异常 ΔU_c 缩小，但曲线形态不变。也就是说，视纯异常反映了纯异常的形态，或者说与纯异常呈线性关系。电位差法就是利用视纯异常的这种性质，确定动态导体的方位。因为 $\Delta U_A \gg \Delta U_c$ ，所以 ΔU_s 一般为负值。

2. 关于纯异常

为了提取纯异常，即充电裂缝体形成的异常，式 (1-1-3) 还可以写成

$$\Delta U_c = \frac{\Delta U_s}{n} + \Delta U_A = \frac{\Delta U_h - \Delta U_q}{n} + \Delta U_A \quad (1-1-4)$$

也就是说，导电裂缝在 MN 产生的纯异常 ΔU_c 等于压裂后的观测值 ΔU_h 减去压裂前的观测值 ΔU_q ，除以分流系数 n ，再加上 ΔU_A 。注意，式 (1-1-4) 中均把供电电流作为单位值 $I=1$ 。

3. 关于准纯异常

准纯异常 $\Delta U'_c = n \cdot \Delta U_c$ ，由式 (1-1-3) 得

$$\Delta U'_c = n \cdot \Delta U_c = \Delta U_s + n \cdot \Delta U_A \quad (1-1-5)$$

准纯异常 $n \cdot \Delta U_c$ 与纯异常 ΔU_c 成正比。

由此可见，纯异常、准纯异常和视纯异常的曲线形态是相同的，其解释方法（确定导电裂缝方位的方法）也是相同的。

4. 求 A 井电场 MN 的电位差 ΔU_A （图解法）

式 (1-1-4) 和式 (1-1-5) 中都有 A 电极电场 MN 电位差 ΔU_A 。可以用如下方法求 ΔU_A 。如图 1-1-2 所示，压裂前的观测中以 B 电极为中心，适当长度为半径绘弧（以 BA 长度为半径更好），在测量环线上交于两点 MN（一般有两对 MN）。确定好 MN 的电极位置。在压裂前测量 ΔU_q 过程中顺便测量出 MN 的电位差。因为这时式 (1-1-1)

$$\Delta U_q = \Delta U_A + \Delta U_B$$

中的 ΔU_B 等于零。也可以在工作中不必特意测量 MN 电位差，而是根据这个道理直接利用 ΔU_q 的测量结果找出 MN 位置的数据，即为 ΔU_A 。

二、供电电流分流系数

在视纯异常式 (1-1-3) 和纯异常式 (1-1-4) 中均有分流系数 n 。知道分流系数，就可以从式 (1-1-4) 得出纯异常 ΔU_c 。可见分流系数的重要性。为了求分流系数，需要先求出 A 电极的接地电阻 R_A 和裂缝体的接地电阻 R_c 。一种方法是在野外布设一个辅助供电电极 P。使用三极供电系列。

1. 三极供电系列基本公式

三极供电电极系列基本公式中的参数，主要包括电极 A 的接地电阻 R_A （以及与动态导体的“合接地电阻” R_{AC} ）、动态导体（裂缝体）的接地电阻 R_c 、分流系数 n 和 MN 电位差纯异常 ΔU_c 等参数。

1) 测量导体接地电阻的联立方程法

导体接地电阻 R 等于导体表面的电位 U （指导体表面到无穷远的电位差）与从导体表面流入介质中的电流强度 I 之比，即 $R = U/I$ 。在地下半空间地表上设 A + B - 供电系统，A 电极与 B 电极总的接地电阻 R_{AB} 等于 AB 两点间的电压 U_{AB} 与供电线中的电流强度 I_{AB} 之比，

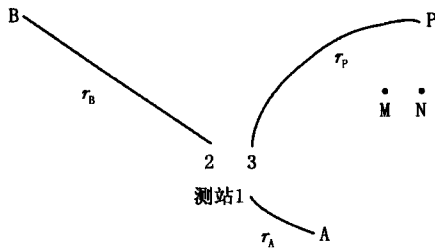


图 1-1-3 三极供电电极系列测定
接地电阻的方法

即 $R_{AB} = U_{AB}/I_{AB}$ (图 1-1-3)。

在实际工作中, 将测站与电极 A 连接一段短导线, 与电极 B 连接导线, 另布设电极 P (辅助电极) 连接导线, 组成三极供电电极系列。这三个电极的接地电阻不应相差太大, 不要超过一个数量级, 以便保证精度。这时测得的接地电阻 R_{AB} 中包含了导线电阻 r_A 和 r_B ; R_{AP} 中包含了导线电阻 r_A 和 r_P ; 而 R_{BP} 中包含了导线电阻 r_B 和 r_P 。所以联立方程为

$$\left. \begin{aligned} R_{AB} &= R_A + R_B + r_A + r_B \\ R_{AP} &= R_A + R_P + r_A + r_P \\ R_{BP} &= R_B + R_P + r_B + r_P \end{aligned} \right\} \quad (1-1-6)$$

解联立方程后, 得到求电极 A 的接地电阻公式

$$R_A = \frac{R_{AB} + R_{AP} - R_{BP}}{2} - r_A \quad (1-1-7)$$

为求 A 极的接地电阻, 只需测出 R_{AB} 、 R_{AP} 、 R_{BP} 和 r_A 就可以了, 不必测出 r_B 和 r_P 。

测量接地电阻 R_{AB} , 须测量供电线路端点 1 和 2 的电压 U_{AB} 和供电导线中的电流强度 I_{AB} 。根据欧姆定律可知 $R_{AB} = U_{AB}/I_{AB}$ 。测量 R_{AP} 和 R_{BP} 的方法相同。对 r_A , 可事先用电表测量出这段导线的电阻 r_A , 也可根据导线参数算出。

有时也可能需要 B 极和 P 极的接地电阻数据, 这里也给出它们的公式:

$$R_B = \frac{R_{AB} + R_{BP} - R_{AP}}{2} - r_B \quad (1-1-8)$$

$$R_P = \frac{R_{AP} + R_{BP} - R_{AB}}{2} - r_P \quad (1-1-9)$$

2) 测量导体接地电阻的电桥法

在不供电的情况下, 使用分辨率 $10^{-10} \Omega$, 量程为 $1 \times 10^{-5} \sim 100 \Omega$ 的高精度电桥进行测量。测出 R_{AB} 、 R_{AP} 、 R_{BP} 和导线电阻 r_A , 利用式 (1-1-7) 求出 R_A (第一次压裂前) 和 R_{AC} (第二次压裂后)。在一个现场试验中取得的 n 约为 0.6 ~ 0.75。

为了提高测量接地电阻的精度, 在技术上、仪器和装备上还有待改进和提高。

2. 动态导体的接地电阻 R_C

电流从 A 井井壁和动态导体 2c 表面分别流入介质, 因为属“同端流入”, 可以认为 A 井的接地电阻 R_A 和动态导体的接地电阻 R_C 是并联的, 则它们的接地电阻应满足

$$\frac{1}{R_{AC}} = \frac{1}{R_A} + \frac{1}{R_C} \quad (1-1-10)$$

由此可得电极 A 与动态导体“合接地电阻”:

$$R_{AC} = \frac{R_A R_C}{R_A + R_C} \quad (1-1-11)$$

改变式 (1-1-11), 同时也就得到动态导体的接地电阻 R_c 为:

$$R_c = \frac{R_A R_{AC}}{R_A - R_{AC}} \quad (1-1-12)$$

式中 R_A ——动态导体生成前测得 A 井的接地电阻;

R_{AC} ——动态导体生成后测得 A 井的接地电阻, 即 A 井和动态导体的总接地电阻。

3. 分流系数 n

地下动态导体生成后, 工作井 A 和动态导体 $2c$ 共同将电流流向介质, n 为动态导体 $2c$ 分得电流的比例系数 (数值范围 0~1), 称为分流系数。动态导体和 A 井的电位是相等的, 均为 U 。

动态导体生成后, 根据欧姆定律知道

$$R_A = \frac{U}{(1-n)I}, \quad R_c = \frac{U}{nI}$$

从这两个式子可以解出

$$n = \frac{R_A}{R_A + R_c} \quad (1-1-13)$$

将 R_c 代入式 (1-1-13) 后, 可得出所求分流系数 n 值公式

$$n = \frac{R_A - R_{AC}}{R_A} \quad (1-1-14)$$

于是得出了求分流系数 n 值的一个极为简单的结果: 对工作井 A, 在导体生成前和导体生成后都要测量一次工作井 A 的接地电阻, 然后, 根据式 (1-1-14) 即可算出 n 值。值得注意的是, 在导体生成前测得的接地电阻为 R_A , 导体生成后测得的接地电阻已变成 R_{AC} 。它们之差与导体生成前接地电阻之比, 就是分流系数。

式 (1-1-14) 说明, 分流系数只与电极 A (井管) 和裂缝体的接地电阻有关。可以证明, 井管的表面面积, 特别是裂缝体表面面积几乎决定了分流系数的大小。

后面还有介绍测定分流系数 n 的另一些方法。

第二节 动态导体充电法基本公式

本节主要介绍了充电裂缝体、电极 A、电极 B 分别在测点 MN 的电位差公式。为了加强理解, 介绍了整个推导过程。首先推导出电位公式, 然后求出电位差公式。在环线径向电位差法中 MN 间距比较大, 不宜用梯度表示, 而用电位差表示, 直接将 M 电位减去 N 电位。将充电线形导体作为环线径向电位差法的主要地电模型。

一、充电线形导体电场电位公式

1. 初始电位公式

在均匀介质、各向同性、充满全空间情况下, 置一水平线形导体, 其坐标如图 1-2-1a 所示。假设电流从线形导体上均匀流出, 其单位长度上流出的电流应为 $I/2c$, 由元段 $d\eta$