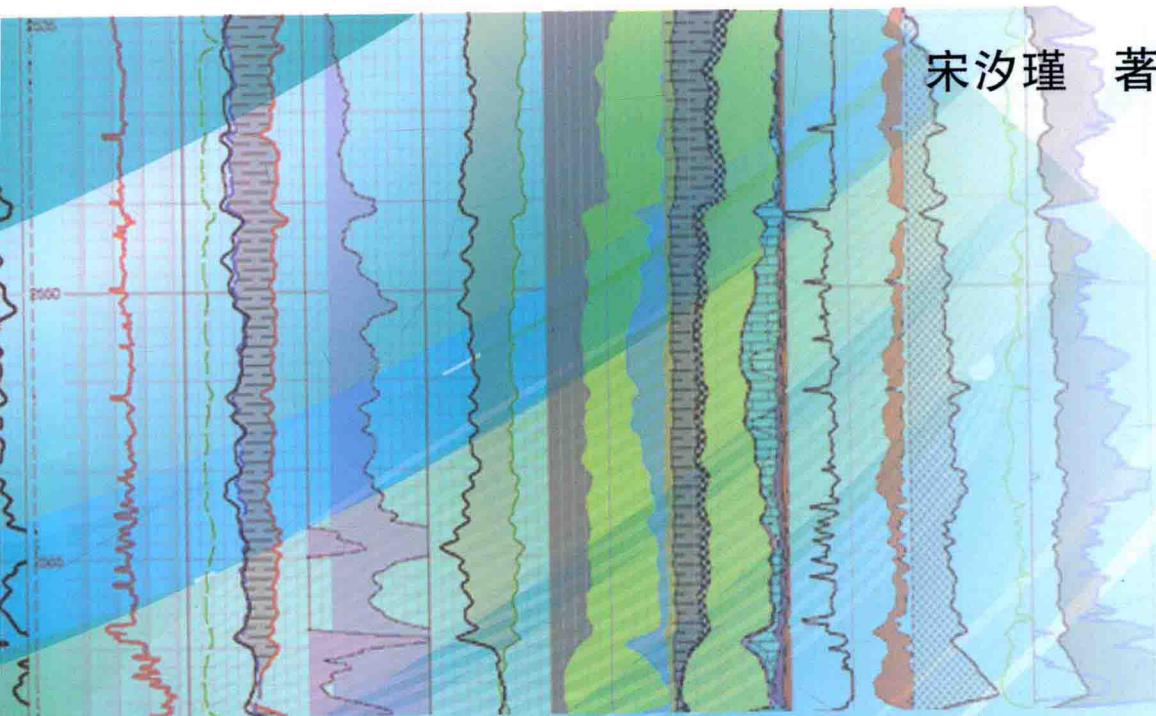


油气生产井 瞬变电磁探测技术

宋汐瑾 著



中國石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

油气生产井瞬变电磁探测技术

宋汝瑾 著

中国石化出版社

油气生产井瞬变电磁探测技术 / 宋汐瑾著

图书在版编目(CIP)数据

油气生产井瞬变电磁探测技术 / 宋汐瑾著.
—北京:中国石化出版社, 2017. 12
ISBN 978-7-5114-4771-5

I. ①油… II. ①宋… III. ①瞬变电磁法-应用-油气开采
IV. ①TE38

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 302544 号

未经本社书面授权,本书任何部分不得被复制、抄袭,或者以任何形式或任何方式传播。版权所有,侵权必究。

中国石化出版社出版发行

地址:北京市朝阳区吉市口路9号
邮编:100020 电话:(010)59964500
发行部电话:(010)59964526
<http://www.sinopec-press.com>
E-mail:press@sinopec.com
北京柏力行彩印有限公司印刷
全国各地新华书店经销

*

787×1092 毫米 16 开本 8.5 印张 205 千字
2018 年 1 月第 1 版 2018 年 1 月第 1 次印刷
定价:38.00 元

前 言

近些年来,随着我国经济的持续快速发展,对油气资源提出了新的更大的需求。鉴于老油田与正开采油田中现有庞大数量的套管井,开展有关套管外地层电阻率特性识别技术的研究具有相当重要的意义。长期以来,电阻率测井多采用谐变电磁场,但这种方法存在一些固有缺陷。如感应测井混叠在二次场中的直耦信号,需要采取多项措施加以消除,从而增加了仪器设计的难度与复杂性。过套管电阻率测井中由于电极系与套管壁接触不良而造成信噪比偏低,使得仪器分辨率不佳、工作效率不高。频域电磁测井中由于金属套管对电磁波强烈的屏蔽作用,造成接收线圈难以获取来自地层的响应信号,限制了该方法在生产井测井领域中的进一步应用。

瞬变电磁法利用阶跃波或脉冲电流场源作为激励,在一次场的间歇期测量响应信号随时间的变化规律。该方法具有对电阻率敏感、不存在直接耦合、探测距离与时间特性相对应等优点,因而对目标体的分辨率明显优于频域电磁法。另外,瞬变电磁信号中的低频成分还能够有效提高信号对套管的穿透能力。因而,可以较好地解决传统电阻率测井中的诸多问题。目前,国内外关于瞬变电磁法的研究成果主要集中于地热与地壳结构调查、物探与工程勘查等领域。这些应用中的发射装置通常采用沿地面布设的大回线框,有效探测范围为地下半空间。与此不同,油气生产井测井仪器的响应受到井眼周围有效探测范围内所有地层导电性的综合影响,因而是全空间地球物理场问题。针对油气生产井的实际工作环境与特点,笔者提出了基于瞬变电磁法的生产井电阻率测井方法。研究了油气生产井瞬变电磁探测基础理论、方法及关键技术。

本书首先介绍了电磁波在非均匀介质中传播时产生的传播效应,为进一步揭示生产井中电磁波的传播特性提供了理论依据;然后基于电磁感应原理,提出了油气生产井瞬变电磁电阻率测井方法,建立了生产井瞬变电磁测井正演模型,讨论了井中电偶源的频域电磁响应特征和井中磁偶源的瞬变电磁响应特征;根据理论研究结果,构建了井中瞬变电磁探测装置实验系统,确定了井中探测

装置的参数设计原则，并给出了取值范围；最后结合生产井瞬变电磁探测装置原理样机，开展了大量室内、外实验研究，验证了井中瞬变电磁探测方法的有效性。

本书受到“西安石油大学优秀学术著作出版基金”“国家自然科学基金(41604122)”和“中国石油科技创新基金(2017D-5007-0305)”的联合资助，在此一并表示感谢！

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 测井技术的发展	1
1.2 瞬变电磁法	3
1.3 生产井电磁探测技术	5
第 2 章 非均匀介质中电磁波的传播效应	10
2.1 均匀导电介质中的场	10
2.2 分层有耗介质中的场	14
第 3 章 生产井瞬变电磁法及频域电磁响应特征	32
3.1 生产井瞬变电磁电阻率测井方法	32
3.2 均匀介质中电偶源的频域电磁响应	37
3.3 生产井中时谐电偶源的电磁响应	42
3.4 井中时谐电偶源的电磁响应特征	51
第 4 章 生产井瞬变电磁响应计算及特征	59
4.1 频率域与时间域电磁场的关系	59
4.2 均匀介质中磁偶源的时域电磁响应	65
4.3 生产井瞬变电磁测井计算模型	68
4.4 井中磁偶极源的瞬变电磁响应特征	76
第 5 章 瞬变电磁探测系统设计及关键技术	83
5.1 瞬变电磁探测装置实验系统设计	83
5.2 井中瞬变电磁探测装置形式	87
5.3 井中瞬变电磁法发射技术	92
5.4 井中瞬变电磁法接收技术	99
第 6 章 井中瞬变电磁探测装置实验	109
6.1 瞬变电磁信号检测方法	109
6.2 瞬变电磁探测装置原理样机	114
6.3 瞬变电磁探测装置实验	115
后记	122
附录 本书使用的部分符号及缩写词	124
参考文献	125

第1章 概述

21 世纪能源需求日趋严峻, 油气资源的勘探与开发工作必将成为影响我国发展的重大战略内容。2016 年, 世界能源行业经历着油价暴跌后带来的动荡与巨变, 油气行业在再平衡进程中艰难前行。随着勘探工作的日益深入, 油气资源日益减少, 勘查目标已由地表或近地表转向地下深处的隐伏油气藏, 找油难度越来越大。提高采收率, 保持原油持续稳产, 是实现我国石油工业的“二次创业”和油气资源可持续发展的重要举措。

电磁法勘探是应用地球物理学中方法种类最多、应用面最广、适应性最强的一门分支学科。自 20 世纪 80 年代以来, 随着经济建设的迅猛发展和科学技术的不断进步, 与其他地球物理方法一样, 电磁法在理论和方法技术等方面都得到了很大的提高, 取得了许多应用成果。实践证明, 该方法具有场源灵活、方法多样以及稳定高效等诸多优点。由于电磁法已发展成为探测油气、金属和非金属矿产的一种非常重要的方法, 并且在深部地质构造研究、工程勘查、考古和环境监测等领域也得到了广泛应用。近年来, 随着方法理论的更新、仪器精度的提高和计算机技术的进步, 电磁法能解决的地质问题越来越多, 已逐步发展成为地球物理学中应用领域最为广泛的一种探测方法。

地球物理测井是勘探地球物理领域的一个重要分支, 是一门实用性很强的边缘学科。它以不同岩石的物性差异为基础, 将电磁学、声学、核物理学、热学、光学、力学等学科的基本理论和测量方法用于油气井及其他矿井中, 通过相应的地球物理方法连续地测量反映岩石某种物性参数随井的变化, 从而研究油气田、煤田、水文工程等方面的钻井地质剖面, 划分油气层、煤层, 确定油气的储集特征, 煤质含量等。另外, 它在钻井工程和油田开发中也有广泛的用途。因此, 地球物理测井是石油学科中的重要学科之一, 在石油工业中占有极其重要的地位。

1.1 测井技术的发展

地球物理测井是应用最为广泛的探测油气资源分布的方法, 通过对测井资料的分析能够得到可靠的油气资源分布状况, 进而对开发现状作出评估。随着测井技术的不断提高, 人们提出了多种探测方法, 包括地面地震法、地面地震-井中探测法、井中核、声、电探测法。针对单井所开展的工作主要有: 地震法、中子寿命法、碳氧比(C/O)法以及电阻率法等。

地震法是油气资源探测和油藏动态监测的常规方法。地震法包括四维地震、井间地震成像和储层物性动态变化空间分布规律研究等。相比之下, 瞬变电磁法通过几十年的发展, 无论是在对探测环境的适应性, 还是对地质问题的灵活性, 以及对地层信息的分辨率等方面都有了全方面的提高, 使其对油藏开发阶段的油气资源探测成为可能。对于油田开发中地震勘探与电磁勘探方法的研究表明, 在水驱油、气驱油以及油层界面高度降低的过程中, 地层所表现的非均质性明显, 电性差异远大于地震信号的差异。电磁信号对此十分敏感, 而地震方

法不能直接探测到这些变化。因此,电磁探测技术对含油富集区的识别、开采方案的优化以及采收率的提高,有着广阔的应用前景。

中子寿命法又称脉冲中子俘获法或热中子衰减时间法,这种方法通过脉冲中子源脉冲式地向地层发射中子,然后用探测器记录地层吸收热中子的宏观俘获截面及热中子的平均生存时间。热中子的平均生存时间与地层中的岩石及流体的元素成分有关,因而根据中子寿命可以了解地层的性质,定量求取相关参数。这种方法适用于中、高孔隙度地区,要求地层水矿化度大于 $3 \times 10^4 \text{mg/L}$,探测深度有限,典型值为15cm。

碳氧比(C/O)法通过测定地层中的碳和氧、钙和硅的相对含量来确定含油饱和度。其特点是不受地层水矿化度变化的影响,特别适用于高孔隙度($> \pm 20\%$)的地区。但常规碳氧比测井求含油饱和度的误差较大,影响其测量误差的主要因素有井眼尺寸、井中流体矿化度、俘获本底值、中子脉冲周期及中子管等。另外,其探测深度也不够理想,只有约23cm的探测深度。

声波法是过套管测井的一种有效方法,常用来探测水泥环与套管的胶结质量及水泥环与地层的胶结质量,当水泥环与套管和地层胶结良好时,可以探测到地层特性,进而识别油气资源。但是,该方法受水泥环的厚度、套管直径、胶结质量、岩石孔隙度和泥质含量的影响较大。

电磁波传播法是由测量电磁波通过地层时的相偏移及衰变速率来确定油气资源的分布情况。这种方法的测量频率为1100MHz,测量对矿化度变化不敏感,适于在未知矿化度或淡水地层中应用。其探测深度仅有5cm,并且受井眼附近侵入带的影响很大;由于金属套管对电磁波的屏蔽作用,这是最能反映储层含油性的电阻率测井方法,但又难以应用于生产井。

电阻率法利用已建立的含水、含油饱和度的评价方法寻找未动用油、气,通过与裸眼井电阻率对比,根据衰竭指数定性评价油层水淹程度、跟踪油藏流体饱和度的变化以及油藏流体界面的运移情况。其误差来源主要是地层参数,如孔隙度、胶结指数、饱和度指数、泥质含量、地层水电阻率、储层温度和压力等,误差为 $\pm 10\%$ 。尽管核及核磁共振测井已经开始广泛应用于储层含油气饱和度的评价,但由于受核测井探测深度的限制以及对储层孔渗特征、地层水矿化度的要求,使得测量结果很难反映原地层的真实情况。而地层电阻率法成本低廉,施工方便,且探测深度大,在油田不同的开发阶段,通过对比不同开发时期目的层电阻率的变化,可以了解油藏的开采情况。该方法已逐渐成为油藏动态监测的有效方法之一。

过套管电阻率测井最先在1939年,由L. M. Alpin提出的。由于当时在理论和方法上还不完善,这项技术没有得到深入的发展。1990年,Kaufman提出的基于传输线方程的套管井电阻率测井近似理论模型和测量理论,奠定了过套管电阻率测井的基础。1993年,PML(Para Magnetic Logging)公司研究出可验证过套管地层电阻率测量设想的模型样机,Baker Huger公司的过套管电阻率测井仪由于受设计的局限而停留在实验阶段。经过多年的基础理论研究和实践,阿特拉斯公司和天然气研究院于1995年共同开发了生产井地层电阻率测井仪,并于两年后取得了PML及其技术。1998年,斯伦贝谢公司开发了过套管地层电阻率测井仪CHFR(Cased Hole Formation Resistivity)。2000年,贝克阿特拉斯研制了过套管电阻率测井仪TCRT(Through Casing Resistivity Test)。与此同时,俄罗斯也推出了过套管电阻率测

井仪。2002年,斯伦贝谢公司又推出 CHFR - PLUS,对第一代仪器作了改进。此类仪器的测量原理类似于裸眼井测井中的侧向测井,即当外加电流流入井眼进入附近岩层中时,在与套管相接触的电极系的各电极上施加一定的电压,通过地层并利用地表电极形成回路。通过测量套管上不同两点之间的电压降而求解出流入地层的电流,进而由电流与电压的关系求出地层电阻率,并以此判断油气资源的分布情况。

1.2 瞬变电磁法

瞬变电磁法以其比频率域方法效率高、对场地的适应性强,且具有对低阻含水体特别灵敏、受体积效应影响小,以及纵、横向分辨率高等优点,近年来得到越来越广泛的应用,被认为是最具发展前景的地球物理勘探方法之一。将瞬变电磁法用于地质勘探的设想,早在20世纪30年代就有人提出。最早的时域电磁法在西方称为 Eltran 法,它基于 L. W. Blna 在1933年获得的发明专利。Eltran 法是利用脉冲电流激发供电偶极在大地中形成的电磁场,并利用与供电偶极在同一直线上的另一电偶极检测经大地传导后的电磁场。从原理上讲,从不同电导率地层界面反射的能量可以作为瞬变信号用接收机记录下来,这与反射地震波法很类似,但 Eltran 法比地震勘探简便、经济,因此使一些石油公司产生了浓厚的兴趣,并发表了一系列介绍各种野外实验结果的文章。但后来的理论分析指出,对于沉积盆地中通常存在的良导岩石,由于脉冲激发的瞬变响应频率较低,难以达到识别各个反射波所需要的分辨率的程度。

早在1937年,前苏联的 A. P. Kraev 就提出了瞬变电磁测深法。20世纪50年代,前苏联基本建立了瞬变电磁法解释理论与野外施工的方法技术。50年代以后,由 B. A. Силоров 和 B. B. Тикшаев 等人建立了近区建场测深法,主要试图用于地震勘探方法勘查油气田时效果不好的地区。前苏联在瞬变电磁法理论研究方面一直走在世界前列。在50~60年代,由 Л. Л. Ванъян 和 A. A. Куфманн 等人成功地完成了瞬变电磁法的一维正、反演。在70~80年代,前苏联地球物理工作者又在二维、三维正演方面做了大量工作。在80年代初,前苏联学者 Жланов 提出了电磁波拟地震波的偏移方法,他吸取了“偏移成像”的广义概念,在电磁法中确定了正则偏移和解析偏移两种方法。在80年代末,Каменеский 等人又从激发极化现象理论出发,研究了时间域瞬变电磁法的激电效应特征及影响,成功地解释了瞬变电磁法晚期段电磁响应的变号现象。由 ф. М. Каменцкий 主编的《金属物探过渡过程法应用指南》及 B. A. Силоров 的专著《脉冲感应电法勘探》反映了当时前苏联的应用水平。

在西方,1951年首先由 J. R. Wati 提出了利用瞬变电磁场法寻找导电矿体的概念。相继有多伦多大学、美国地质调查所、犹他大学、科罗拉多矿业学院、澳大利亚联邦科学工业研究所、澳大利亚矿物研究所等单位投入研究,知名学者发表的论文甚多。自20世纪70年代以来, J. R. Walt、G. V. Kelelr、A. A. Kuamfna 等人对该方法的一维正、反演及方法技术进行了大量研究。自80年代以来,随着计算机技术的发展,西方各国在瞬变电磁法的二维、三维正演模拟方面做了大量工作,代表性人物有 G. W. Hohmna、P. Weidelt、G. F. West、A. P. Raiehe、B. R. SPies、J. H. Knight、San Filippo 和 T. J. Lee 等。理论研究方面的代表性著作有 A. A. Kaumfan 和 G. V. Keller 的专著《频率域和时间域电磁测深》及 M. N. Nbahgain 主编的《应用地球物理学中的电磁方法》等。

我国于20世纪70年代初期开始研究瞬变电磁法,先后投入研究的单位有:原长春地质学院、中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所、原桂林有色矿产地质研究院、原中南工业学院、原西安地质学院、西安交通大学、原北京有色矿产地质研究院、中国地质大学等。1996年,刘继东、方文藻讨论了地面大回线源在地下形成瞬变电磁场的正演计算方法,其在正演计算时将频率域中相同模型、相同装置条件下的谐变场结果转换到时间域上来,在计算方法上采用了安德森等人提出的线性数字滤波法。2001年,李貅、薛国强、宋建平为提高瞬变电磁法的对地探测精度,从瞬变电磁场的传播特性和电磁响应特性两个角度考虑,提出了瞬变电磁成像方法。国内学者主编的主要书籍有:朴化荣主编的《电磁法测深原理》,牛之琏主编的《时间域电磁法原理》以及方文藻主编的《瞬变电磁测深的理论与应用》。从20世纪90年代开始至今,国内关于TEM法的研究进入了蓬勃发展和广泛应用阶段。由于短偏移距TEM法能够实现频率域方法中无法实现的近区勘探,特别是中心探头装置不存在记录点问题,且有极高的工作效率。因此,在中、深层水文地质勘探中,TEM法已成为主要的勘探方法。近年来,随着探测深度的增加,长偏移距瞬变电磁测深(Long-Offset Transient Electromagnetic Sounding,简称“LOTEM”)法的应用日见增多。同时,由于浅层工程地质勘探的需要,又促进了浅层AFSTEM法的发展。

在理论上不断取得进展的同时,随着电子技术的高速发展,各类电磁法仪器相继问世,形成了各种电磁测量系统,并得到了广泛应用。加拿大GRONE地球物理公司于70年代初最先推出了性能稳定、实用可靠的商品化瞬变电磁仪,其他公司也相继推出了相关仪器,如加拿大GEONICS公司为勘探深部矿产和地质填图而设计的适用于大定回线装置的中功率仪器EM-37系统、加拿大GEOMETRICS公司生产的适用于重叠回线装置的多道轻便型仪器、法国BRGM公司推出的用于电阻率和时域激发极化电法勘探的SYSCALR2系统、澳大利亚SIROTEM系统及前苏联的MPPO系统。进入20世纪90年代后,随着电子技术和计算机技术的发展,出现了一些多功能系统,如美国ZONGE公司生产的GDP系统、加拿大PHOENIX公司生产的V-5、V-6型系统以及V-8网络型多功能系统。国外仪器最大特点是发射系统与接收系统全智能化,形成多功能的工作站。我国自70年代初期开始着手研究瞬变电磁仪器系统,最早研制并投入生产的是原地矿部物化探研究所。其生产的仪器型号为WDC21、WDC22,后又研制了IGGETEM220瞬变电磁系统。1988年原西安物化探研究所采用脉冲压缩技术研制成功大功率的LC21系统并投入生产,后来又研制EMRS21、EMRS22瞬变电磁仪。1992年长沙高新技术产业区智通新技术研究所与原中南工业大学合作生产出SD21型、SD22型仪器,白云仪器厂在此基础上研制了MSD21、B-YF5MSD1瞬变电磁系统。1996年石油天然气总公司与西安石油仪器厂开始研制用于深部探测的大功率高精度瞬变电磁仪器。北京矿产地质研究所王庆乙教授研制了TEMS23S瞬变电磁仪器。吉林大学林君教授研制了A-TEM22瞬变电磁仪器。重庆奔腾数控技术研究所研制了WTEM系统。限于我国电子技术工艺水平,虽然一些厂家在生产用于深部勘探的大功率仪器和用于浅部探测的小功率仪器,但在生产工艺上、原器件焊接技术上和性能稳定上都与国外仪器有很大的差距。目前,除少数仪器有所独创外,大多是在国外仪器基础上的开发改进,目前一流的大功率、多功能瞬变电磁法仪器仍然依赖于进口。

1.3 生产井电磁探测技术

1.3.1 生产井电磁探测技术研究内容

电磁法是根据电磁感应原理研究天然或人工(可控)场源在大地中激励的交变电磁场分布,并根据观测到的电磁场分布研究地下电性及地质特征的一种地球物理方法。根据所研究场的性质,生产井电磁探测技术可以分为频率域电磁探测技术和时间域(瞬变)电磁探测技术。如图1-1所示为生产井电磁探测技术的主要研究内容。本书基于瞬变电磁法开展对油气生产井测井技术的研究,主要研究内容包括两个部分,即生产井瞬变电磁探测基础理论研究和其方法技术研究。图1-1中深色区域表示本书所涉及到的研究内容。在基础理论研究中,正演研究根据已知的地层电导率和发射、接收线圈系结构参数及物理参数求取瞬变电磁响应,是反演研究的基础,也是优化探测装置线圈系参数的理论根据。在进行正演计算时,典型的方法有频域法和直接时域法。

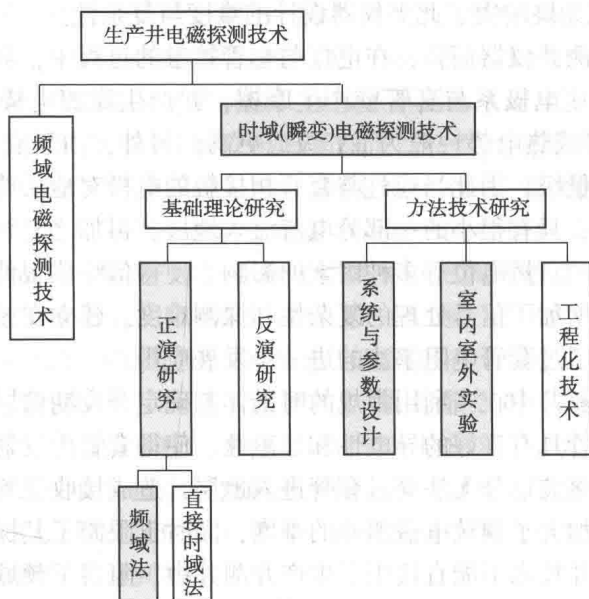


图 1-1 生产井测井技术研究内容

正演研究的正确性需要通过相应的模拟实验结果加以验证,从而建立生产井瞬变电磁探测的相关理论和方法,为测井解释提供理论依据。反演研究是从实验装置的测量结果出发,根据已经建立的理论,反推出地层特性参数,并与已知的介质特性参数进行对比,以此验证相关理论的准确性。有关生产井瞬变电磁方法技术的研究主要分为系统构建与装置参数设计、室内外实验研究以及工程化技术研究等。瞬变电磁探测装置发射线圈与接收线圈的间距、轴线方向、匝数等结构参数以及瞬变电流信号的持续时间、周期、电流等物理参数是影响探测性能的关键参数。通过对探测装置结构参数与物理参数的优化匹配,使其对地层的探测性能达到最佳。室内外实验研究用于验证瞬变电磁法线圈系结构参数设计的合理性及所建立的正演模型和计算方法的正确性。

1.3.2 生产井测井技术存在的主要问题

1) 频率域电磁测井技术

感应测井是中、低电阻率地层剖面淡水泥浆中最重要的电阻率测井方法。根据线圈系结构和信号处理方法的不同,感应测井仪器主要分为三类:聚焦感应测井、阵列感应测井以及高分辨率感应测井。其中,聚焦感应测井仪通过在井下布置多个发射线圈和接收线圈来改善其探测性能,地面只有简单的信号处理。阵列感应测井根据井下丰富的地层信息,在消除二维环境影响的同时,进行复杂的侵入解释和薄层分析,对准确评价油气储集特征具有重要作用。高分辨率感应测井仪的设计思路是井下线圈系聚焦与地面信号处理相结合。线圈系聚焦保证仪器有足够的径向探测深度,小的井眼影响,足够的纵向分辨率信息。同时,通过地面信号处理进一步改善仪器纵向分辨率。经过多年的发展,感应测井技术及其相关理论已经取得很大发展,也得到了一定程度的实际应用,但存在与测量信号中的直耦信号,即发射信号未经过地层就直接进入接收线圈所造成的耦合信号,却是这一体制本身难以克服的问题。在感应测井仪器的硬件设计与信号处理中,需要采取多种措施消除混叠在测量信号中直耦信号(一次场)的影响,这就无疑增大了此类仪器设计的难度与复杂性。

对于过套管电阻率测井仪器而言,在电极与套管接触的过程中,会产生热电势,同时也会因测井仪器的提升而使电极系与套管壁产生摩擦,并产生摩擦电势,由于被测信号多为 nV 级信号,而摩擦电势或热电势一般为 μV 级或更高。另外,由于套管本身的电导率比地层的电导率大好几个数量级,因此当通过与套管相接触的电极对地层施加发射电流时,绝大部分电流消耗在套管上,只有很小的一部分电流流入地层,再加之套管的锈蚀、套管外水泥的胶结质量、地层本身的自然电位等多种因素的影响,使得信噪比很低,有用信号实际上淹没在了噪声之中,这就增加了信号处理的复杂性和探测难度。建立在该方法基础上的测井仪器成本昂贵,从而制约了过套管电阻率法的进一步发展应用。

另外,在频域电磁测井中,当利用常规的时谐体制确定开发期储层分布时,由于普遍存在于生产井中的金属套管具有良好的导电性和导磁性,使得套管内发射的高频电磁波信号绝大部分都会被屏蔽,电磁波信号无法穿过套管进入地层,造成接收装置无法获取来自地层的响应。套管的存在无疑加大了频域电磁测井的难度,同时也限制了其探测范围,这就使得许多已经成熟的裸眼井测井技术不能直接用于生产井测井中,阻碍了频域电磁测井方法的进一步发展。

综上所述,频域电磁法采用时谐激励信号,接收线圈中的信号是地层的涡流所产生的二次场与直耦信号(一次场)的叠加。在通常情况下,直耦信号往往比体现地层特性的二次场信号还要大。尽管可以通过引入聚焦线圈的方法消除直接耦合,但要完全消除其影响仍然需要进行复杂的信号处理,并进行严格的工艺控制,更重要的是影响了测量效果。

2) 时间域电磁测井技术

瞬变电磁法的激励信号是宽频脉冲,即一种突然上升或下降并持续一定时间后,突然跳变为零的瞬态信号。该方法在发射脉冲的间歇期观测响应信号,从理论上讲,由于此时发射信号的幅度为零,因而不存在直接耦合信号,测量结果体现了地层的真实性。由于没有直耦问题,所以也不需要硬件聚焦,从而可以简化硬件结构,降低信号处理的复杂性和探测难度,提高仪器的测量性能。

井中瞬变电磁法采用非接触式探测方法,在发射信号的关断期,通过接收线圈测量来自地层的响应信号,从而可以有效避免过套管电阻率测井仪器中,由于套管磨损、变形等因素致使电极系接触不良,而造成的信噪比偏低等问题。

相对于频域电磁法而言,瞬变电磁法在探测目标地层的瞬态响应时,能够更为方便地获取其宽带时域特性。瞬变电磁信号本身具有很宽的频谱,包含了丰富的低频和高频成分,高频成分会被套管屏蔽,但其中的低频成分能够有效穿透套管进入地层,进而提高仪器的探测深度。

此外,由于瞬变电磁法是一种时域测量法,不同时间的接收信号与不同距离处的被测介质相对应。瞬变电磁信号具有陡峭的前沿,由于信号的波前以光速传播,系统的各部分依次受到信号的作用,所以信号与系统相互作用的过程可以直接在时间上追踪。这就意味着,探测深度可以用接收信号的延迟时间来确定。对于生产井而言,可以方便地将井液、套管等介质所引起的信号从时间上与来自地层的响应信号区分开,从而准确判断地层中二次场异常响应,达到识别油气资源地质特征的目的。

目前,国内有关地面瞬变电磁法的理论研究成果较多,对于大地瞬变电磁响应与视电阻率计算的研究和应用较广泛。刘长胜、林君(2006)建立了海底表面磁性源的瞬变电磁响应模型,分析了海水电导率对瞬变电磁响应的影响。郑仁淑(2005)根据海底电磁法的特点,计算了一组三维异常体模型的瞬变电磁响应,模拟了不同海水深度、不同偏移距对异常的影响。薛国强、宋建平、李貅(2003)从瞬变电磁场的传播特性和电磁响应特性两个角度考虑,提出了水平层状介质中的瞬变电磁成像方法。薛国强、李貅、郭文波等(2005)借鉴平面电磁波场测深成熟的解释方法,开展了从瞬变电磁涡流场测深数据到平面波场数据的快速等效转换的研究。李貅、薛国强、宋建平等(2005)对瞬变电磁测深数据与平面电磁波场数据等效转换算法进行了优化。杨文采,(1997);郭文波、李貅、薛国强等(2005)研究了磁偶源瞬变电磁法快速成像的方法,详细讨论了电磁波与地震波在介质中的传播规律,分析了磁偶源瞬变电磁场在远区的响应特性。闫述、陈明生、傅君眉(2002)直接在时间域对负阶跃脉冲激发的二维瞬态场进行了数值分析,通过模拟计算不同时刻瞬态电场在地下的分布形态及地面上感生电动势相应的变化,揭示了低阻异常体对感应涡流的聚集作用,低阻覆盖层对瞬变场扩散的减速作用,以及瞬变场的延时效应。但此类关于瞬变电磁场理论及应用的研究成果均是在水平层状媒质模型中得到的。

针对生产井频域电磁法,胡文宝、徐振平、王军民(2007)针对套管井中频域电磁法,采用解析法正演计算了在不同频率的源信号激励下金属套管外的电磁响应,分析了时谐激励信号的频率响应特征。沈金松、孙文博(2007)分析了金属套管井中有限尺寸线圈的电磁响应特征,讨论了井眼泥浆参数、套管参数和不同线圈尺寸对电磁测井响应的影响,考察了金属套管中频域电磁测井对地层电阻率变化的灵敏度。但对于有关油气井中瞬变电磁响应数值模拟方面的研究未见报道。实际上,地面瞬变电磁法的发射框沿地面布设,有效探测范围为地下半空间,而井中瞬变电磁响应分布规律受井眼周围地层有效探测范围内所有地层导电性的综合影响,因而是全空间地球物理场问题。原有的地面瞬变电磁理论不再完全适用于井中瞬变电磁法的理论研究,因此,需要针对轴对称分层媒质中瞬变电磁场的理论及应用进行研究。

在仪器技术方面,孙天才(2005)针对瞬变电磁法中,发射电流波形对瞬变电磁测量结

果的影响进行了详细讨论,并给出了相关的校正方法。王艳、刘长胜、林君等(2005)对瞬变电磁法应用于浅海底进行资源勘探或工程地质勘查的具体问题,就仪器系统研制、观测装置小型化、拖曳式测量及海水影响等内容进行了研究。刘长胜、林君、嵇艳鞠(2006)根据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。嵇艳鞠、林君、于生宝等(2006)针对瞬变电磁法中,由于发射电流关断时间不为零、接收线圈的谐振频率有限等因素,造成早期瞬变电磁信号发生畸变的问题,研究了瞬变电磁方法中发射电流关断期间总磁场的形成过程,论证了一次场、二次场和总瞬变场的关系,分析了接收线圈的频率特性和关断时间对瞬变电磁场的影响,提出从总磁场中剔除一次磁场影响的方法,为获得电流关断期间和电流关断后的早期瞬变电磁场提供了方法依据。李实、李创社(2000)介绍了利用工控机组成高性能瞬变电磁仪的具体方法,并就其应用作了阐述。国内专门针对油气生产井而设计的瞬变电磁探测系统还尚未问世,但上述研究成果为生产井中瞬变电磁探测仪器的研制提供了良好基础。

综上所述,国内有关瞬变电磁法的研究,无论从基础理论方法研究上,还是在仪器研制上,均落后于世界先进水平。因此,研究油气井中瞬变电磁探测理论及方法必将进一步推动我国瞬变电磁探测技术的发展,同时也为测井技术的发展提供新的方法和手段。

根据以上分析,地面瞬变电磁法在理论研究与仪器技术方面已经取得很大发展,也获得了一定程度的实际应用。然而,生产井瞬变电磁法距实际应用还存在较大差距。根据油气生产井的实际工作特点,笔者认为应该首先从以下几个问题入手,开展生产井瞬变电磁探测理论与方法技术的相关研究:

(1) 电磁波在非均匀介质中产生传播效应研究。油气生产井中发射的电磁波信号在均匀导电介质中传播时,会出现幅度衰减和相位移动,即产生趋肤效应。当电磁波信号遇到井下各导电媒质层的交界面,尤其是金属套管的内、外壁时,则会出现透射、反射和折射等现象,即产生传播效应,进而会对井中接收线圈上瞬变电磁响应的变化规律造成一定影响。传统分析方法对电磁波在媒质交界面产生的传播效应缺乏直观表述,给瞬变电磁响应计算以及特征分析带来一定影响。为此,有必要针对油气生产井非均匀介质中电磁波的传播效应开展深入研究,通过形象化表述,进一步揭示了传播效应对瞬变电磁响应的影响规律,为瞬变电磁响应正演计算奠定基础。

(2) 深入研究生产井频域电磁响应特征。瞬变电磁法以频域电磁法为基础,测井系统的频率特性与时间特性之间存在着密切的关系。利用傅里叶积分变换,可以把一个瞬态的时间过程分解成各频率分量稳态过程的叠加。因此,利用测井系统的频率特性可以解释系统时域响应波形的某些特征,研究生产井频域电磁响应特征对分析其瞬变电磁响应特征具有重要的指导意义。绕于芯棒上的环电流源是测井领域中经常采用的一种发射装置形式,而目前关于这种装置的频域电磁响应特征尚没有系统的分析结果。本书应该从频域电磁法着手,详细分析生产井的频域电磁响应特征,为进一步分析生产井瞬变电磁响应特征打下良好基础,也为瞬变电磁探测装置参数设计提供理论依据。

(3) 建立油气生产井瞬变电磁探测理论模型,分析生产井瞬变电磁响应特征。目前,国内外有关地面瞬变电磁法的研究较多,对于大地瞬变电磁响应与视电阻率计算的研究和应用较广泛。但有关瞬变电磁场理论及应用的研究成果均是在水平层状媒质模型中得出的,对生

产井中瞬变电磁响应数值模拟方面的研究则接近空白。因此,急需针对油气生产井的实际特点,建立井中瞬变电磁探测理论模型。在频域研究成果的基础上,根据时间域与频率域电磁响应的转换关系,对井中瞬变电磁响应特征进行深入研究,详细探讨生产井中各介质层参数对井中瞬变电磁响应的影响。从而为瞬变电磁响应接收信号曲线形态的判断以及生产井瞬变电磁探测装置参数设计提供理论基础。

(4) 研究生产井中瞬变电磁探测系统关键技术及其参数设计原则,实施瞬变电磁电阻率测井方法的室内、外模拟实验。将瞬变电磁法应用于油气生产井测井领域,应该首先根据理论分析结果完成瞬变电磁探测系统构建及其参数设计,探测装置参数的确定对于整个仪器的探测性能具有决定性作用。另外,有关生产井瞬变电磁探测模型的理论分析结果还需要与具体的实验结果进行对比。通过大量的室内、外实验结果,验证生产井瞬变电磁探测理论模型和正演计算方法的正确性,以及瞬变电磁法应用于油气生产井进行电磁探测的可行性和有效性。

第2章 非均匀介质中电磁波的传播效应

在传统的电磁场理论中，着重研究随时间按正弦规律变化的稳态场，即时谐场。长期以来，电磁测井也多采用谐变电磁场，但这种方法存在一些固有缺陷。如始终存在于接收信号中的一次场难以完全消除，从而对来自地层的二次场信号造成一定影响。对于频域电磁法而言，普遍存在于生产井中的金属套管对电磁波信号具有强烈的屏蔽作用，因而限制了该方法在生产井测井领域的进一步应用。近些年来，与电磁脉冲有关的瞬变电磁场的研究已引起人们极大的重视。为解决频域电磁测井中存在的诸多问题，国际上正积极探索电磁脉冲测井问题。为此，本书首次将瞬变电磁法引入生产井测井领域，研究基于瞬变电磁法的生产井电阻率测井基本理论与方法技术。瞬变电磁法由于是在发射信号的间歇期，观测来自地层的二次场响应，因而有效地避免了频域电磁法的直耦问题。另外，瞬变电磁信号所包含的频率成分极其丰富，其中的低频成分对于穿透金属套管十分有利，从而可以提高该方法的探测深度。

研究生产井瞬变电磁探测理论，应该首先搞清楚生产井中电磁波的传播效应，为正确计算井中瞬变电磁响应奠定基础。电磁波信号在均匀导电介质中传播时，会出现幅度衰减和相位移动，即产生趋肤效应。而当电磁波信号遇到油气生产井中各导电媒质层的交界面，尤其是金属套管的内、外壁时，则会出现透射、反射和折射等现象，即产生传播效应，进而对井中接收线圈上瞬变电磁响应的变化规律造成一定影响。因此，有必要首先针对非均匀介质中电磁波的传播效应开展深入研究，进一步揭示电磁波传播效应对井中电磁响应的影响规律。

2.1 均匀导电介质中的场

2.1.1 场方程及其解

令均匀介质中有一半径为 a_T 、匝数为 N_T 的发射线圈。当其中通以交变电流 $I_T = I_0 e^{i\omega t}$ 时，其在空间形成的电磁场也随时间按正弦规律变化，即有： $E = E_0 e^{i\omega t}$ ， $H = H_0 e^{i\omega t}$ 。这里，描述电磁场变化规律的麦克斯韦方程可表示为：

$$\begin{cases} \nabla \times H = J_T + (\sigma + i\omega\epsilon) E \\ \nabla \times E = -i\omega\mu H \\ \nabla \cdot H = 0 \\ \nabla \cdot E = 0 \end{cases} \quad (2-1)$$

式中， σE 和 $i\omega\epsilon E$ 分别为介质中的传导电流密度和位移电流密度。对于工作频率低于 10^5 Hz

的地球物理测量问题来说,均满足 $\sigma \gg \omega \varepsilon$ 的条件。因此,位移电流项可忽略不计。 J_T 为发射线圈中的源电流密度。由式(2-1)知,发射线圈在均匀介质中产生的电场强度满足非齐次赫姆霍兹方程:

$$\nabla^2 E + k^2 E = i\omega \mu J_T \quad (2-2)$$

其中,波数 $k = \sqrt{-i\omega \mu \sigma}$ 。在球坐标系中,对式(2-2)进行求解,知电场强度仅存在 φ 方向分量:

$$E_\varphi = -\frac{i\omega \mu m}{4\pi r^2} e^{-ikr} (1+ikr) \sin\theta \quad (2-3)$$

其中, r 表示场点到源的距离。发射磁矩 $m = S_T N_T I_T$, S_T 为发射线圈面积, N_T 为发射线圈匝数, I_T 为发射电流。则在导电介质中,由 E_φ 作用所产生的涡流密度也仅有 φ 方向分量:

$$J_\varphi = \sigma E_\varphi = -\frac{i\omega \mu \sigma m}{4\pi r^2} e^{-ikr} (1+ikr) \sin\theta \quad (2-4)$$

根据电场强度与磁场强度的关系,源在均匀导电介质中任意一点产生的磁场存在 r 分量和 θ 分量,即:

$$H_r = \frac{m}{2\pi r^3} e^{-ikr} (1+ikr) \cos\theta \quad (2-5)$$

$$H_\theta = \frac{m}{4\pi r^3} e^{-ikr} (1+ikr - k^2 r^2) \sin\theta \quad (2-6)$$

对于不导电的均匀介质,波数 k 为实数。在记入时间因子后,场量的指数部分为 $e^{i\omega t - ikr}$ 或 $e^{i\omega(t - \frac{r}{V})}$ (其中, $V = \frac{\omega}{k}$ 表示波速)。它表示发射源产生的电磁场以波动形式向远处传播,到达

距离为 r 的场点时,相位滞后 kr ,或时间推迟 $\frac{r}{V}$,这就是电磁波的推迟效应。而对于导电均匀介质而言,波数 k 为复数,即:

$$k = \sqrt{\omega^2 \varepsilon \mu - i\sigma \mu \omega} = a - ib \quad (2-7)$$

其中,

$$a = \frac{1}{\delta} \left\{ \left[\left(\frac{\omega \varepsilon}{\sigma} \right)^2 + 1 \right]^{\frac{1}{2}} + \frac{\omega \varepsilon}{\sigma} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2-8)$$

$$b = \frac{1}{\delta} \left\{ \left[\left(\frac{\omega \varepsilon}{\sigma} \right)^2 + 1 \right]^{\frac{1}{2}} - \frac{\omega \varepsilon}{\sigma} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2-9)$$

这里, a 为相位系数, b 为衰减系数。此时,场量公式的指数部分为 $e^{-br} e^{-iar}$,记入时间因子后则为 $e^{-br} e^{i\omega t - iar}$ 或 $e^{-\frac{r}{\delta}} e^{i\omega(t - \frac{r}{V})}$,其中 $V = \frac{\omega}{a}$ 为波速或相速。与不导电介质中的场量对比可知,

在导电介质中,电磁场以波动形式向远处传播,不仅有相位移,而且存在幅度衰减。另外,对于油气井中电磁法而言,测井装置均工作于较低的频率范围,满足 $\varepsilon \ll \frac{\sigma}{\omega}$,则式(2-7)可简化为: