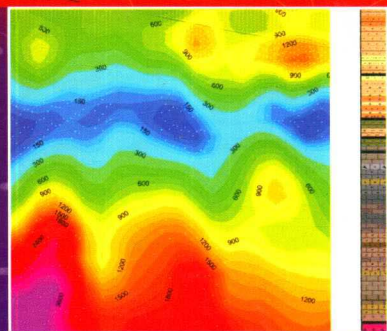
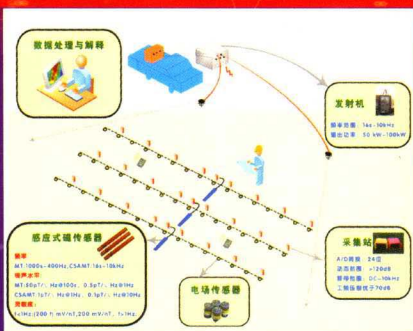


地面电磁探测(SEP)系统及其在典型矿区的应用

底青云 等著



中国科学院页岩气与地质工程重点实验室成果

地面电磁探测 (SEP) 系统 及其在典型矿区的应用

底青云 等 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系统地介绍了地面电磁探测 (SEP) 系统的软硬件分系统及系统整体在典型矿区的应用成果。第 2 章至第 5 章主要介绍了电磁法仪器研制中的关键技术, 主要包括大功率发射、分布式电磁采集、电场传感器、磁场传感器等。第 6 章至第 8 章主要介绍了电磁法数据处理与正反演研究, 主要包括电磁法噪声抑制、地形校正、静态校正、可控源音频电磁法 (简称 CSAMT 法) 中的近场校正与大地电磁法 (简称 MT 法) 中参数提取等数据预处理技术, 二维、三维 CSAMT 法和 MT 法的数值模拟算法, 二维、三维 CSAMT 法和 MT 法反演算法研究等。第 9 章详细介绍了 SEP 系统在典型矿区的应用与效果。

本书可供地球物理电磁法行业大中专院校的师生、科研单位的研究人员及相关部门的工作人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

地面电磁探测 (SEP) 系统及其在典型矿区的应用/底青云等著. —北京: 科学出版社, 2016

ISBN 978-7-03-049100-8

I. ①地… II. ①底… III. ①电磁法勘探—研究 IV. ①P631.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 143735 号

责任编辑: 张井飞 / 责任校对: 何艳萍

责任印制: 肖 兴 / 封面设计: 陈 敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 6 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2016 年 6 月第一次印刷 印张: 13 1/2

字数: 320 000

定价: 169.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

地球电磁法（Electromagnetic method，简称 EM）在资源探测，尤其是金属矿探测中发挥着重要的作用，但长期以来我国电磁探测高端装备大多从国外进口。为了推进地面电磁装备的国产化进程，以便加快深部资源的开发利用，作者和课题组成员从 2010 年至 2015 年承担了深部探测技术与实验研究专项（Sinoprobe）中的深部探测关键仪器装备研制与实验项目（Sinoprobe-09）中的第二课题“地面电磁探测（SEP）系统研制”（Sinoprobe-09-02），开展了装备研发、数据处理、资料解释等方面的系统研究。为了使本书更加完整，作者在整理“地面电磁探测（SEP）系统研制”课题成果的基础上，也编入了作者及研究团队以往的相关部分成果内容，形成频率域天然源和人工源电磁法仪器研制、探测方法和探测实例的一体化内容。

本书首先介绍了包括大功率发射机、分布式采集站、磁传感器（感应式、高温超导和磁通门传感器）等方面的研制技术；然后介绍了电磁探测方法和软件研究成果，具体包括：大地电磁法（MT）和可控源音频大地电磁法（CSAMT）探测方法以及电磁数据正、反演处理软件的研制；最后介绍了 SEP 系统在河北张北县、河北康保县、内蒙古兴和县曹四夭钼矿、内蒙古阿拉善地区、黑龙江省三江地区等矿产测区的矿产资源探测结果，以及 SEP 系统与我国市场上普遍使用的高端商用仪器系统的生产性比对试验结果。

全书共分十章。第 1 章、第 10 章由底青云、王妙月编写；第 2 章由刘汉北、真齐辉、底青云编写；第 3 章由王中兴、张文秀、底青云编写；第 4 章由王中兴、底青云编写；第 5 章由吴树军、底青云编写；第 6 章、第 7 章和第 8 章由王若、底青云、王妙月编写；第 9 章由底青云、付长民编写。全书由底青云统稿，底青云、王妙月、真齐辉、王亚璐、薛国强校稿。

由于本书编写时间仓促，难免有疏漏之处，请读者不吝指正！

目 录

前言

第1章 绪论	1
1.1 地面电磁探测的主要历史进展	1
1.2 地面电磁测深的实践探索	2
1.3 国内外仪器研制现状	3
1.3.1 国外仪器研制现状及趋势	3
1.3.2 国内仪器研制现状	5
参考文献	7
第2章 大功率电磁信号发射机	9
2.1 大功率电磁信号发射机基本原理	9
2.2 大功率电磁信号发射机的研制现状	10
2.2.1 基于励磁方式的大功率电磁信号发射机	10
2.2.2 脉宽调制 DC/DC 全桥变换器的大功率电磁信号发射机	17
2.3 发射桥的软开关设计	19
2.3.1 吸收电容的选择	19
2.3.2 移相软开关驱动	20
参考文献	20
第3章 分布式电磁采集站	22
3.1 采集站的构架	22
3.2 微弱电磁模拟信号调理	23
3.2.1 带通正反馈高频增益补偿	23
3.2.2 全差分运放电路	24
3.3 信号采集与数据处理	24
3.3.1 多接收机的同步	25
3.3.2 数据抽取	26
3.3.3 基于 FPGA 的 DFT	31
3.4 强干扰下微弱地面电磁信号处理	34
3.4.1 环境随机干扰的同步叠加	34
3.4.2 基于梳状滤波的工频干扰抑制	35
3.4.3 尖峰干扰抑制	38
3.4.4 低频 $1/f$ 噪声抑制	40
3.5 采集站性能测试与野外实验	41

3.5.1	一致性测试	43
3.5.2	与国外仪器的对比测试	45
	参考文献	47
第4章	电场传感器	49
4.1	勘探电场传感器的发展历程	49
4.2	地面电极的原理与结构	50
4.3	地面电极的信号调理	51
	参考文献	54
第5章	磁场传感器	56
5.1	磁传感器发展历程	56
5.1.1	感应式磁传感器发展历程	56
5.1.2	磁通门传感器发展历程	57
5.1.3	超导磁传感器发展历程	58
5.1.4	地面电磁测深系统中的磁传感器	58
5.2	感应式磁传感器的研制	59
5.2.1	感应式磁传感器原理	59
5.2.2	感应式磁传感器设计	61
5.3	磁通门传感器的研制	64
5.3.1	磁通门传感器原理	64
5.3.2	磁通门传感器设计	67
5.4	高温超导磁传感器的研制	69
5.4.1	高温超导磁传感器原理	69
5.4.2	高温超导磁传感器设计	72
	参考文献	74
第6章	电磁数据预处理	76
6.1	预处理流程	76
6.2	去噪处理	77
6.2.1	方法技术	77
6.2.2	数值试验	79
6.3	地形校正	81
6.3.1	基本理论	82
6.3.2	数值试验	82
6.4	静态校正	86
6.4.1	静校方法	86
6.4.2	数值试验	87
6.5	近场校正	91
6.5.1	基本方法	91
6.5.2	数值试验	91

6.6	MT 参数计算	94
6.7	实测数据处理	94
6.7.1	CSAMT 勘探实测数据处理	94
6.7.2	MT 勘探实测数据处理	96
	参考文献	98
第7章	地面电磁数据正演模拟	99
7.1	大地电磁二维正演	99
7.1.1	大地电磁正演模拟理论	99
7.1.2	大地电磁二维正演算例	102
7.2	大地电磁三维正演	104
7.2.1	交错采样有限差分法	104
7.2.2	边界条件	108
7.2.3	解大型线性代数方程组的共轭梯度法	109
7.2.4	三维张量阻抗元素的计算	109
7.2.5	大地电磁三维正演算例	110
7.3	可控源音频大地电磁二维正演	112
7.3.1	2.5 维有限元数值模拟	112
7.3.2	一次场计算	115
7.3.3	边界条件	115
7.3.4	稀疏矩阵的 CSR 存储	115
7.3.5	共轭梯度方程求解	117
7.3.6	其他分量求取	117
7.3.7	2.5 维 CSAMT 正演算例	118
7.4	可控源音频大地电磁三维正演	120
7.4.1	CSAMT 正演的基本方程	120
7.4.2	有限长电偶源全空间一维数值模拟	121
7.4.3	二次场计算的交错网格有限差分法	123
7.4.4	三维 CSAMT 正演算例	127
	参考文献	135
第8章	电磁数据反演成像	137
8.1	大地电磁二维反演	137
8.1.1	二维非线性共轭梯度反演方法	138
8.1.2	雅可比矩阵的计算	139
8.1.3	二维反演示例	142
8.2	大地电磁三维反演	143
8.2.1	三维快速松弛反演算法的灵敏度函数表达式	144
8.2.2	求最小构造的目标函数	147
8.2.3	求最小构造的快速松弛反演	148

8.2.4	三维反演示例	149
8.3	可控源音频大地电磁二维反演	153
8.3.1	数据空间反演	153
8.3.2	雅可比矩阵	154
8.3.3	二维反演示例	154
8.4	可控源音频大地电磁三维反演	156
8.4.1	目标函数	156
8.4.2	反演流程	156
8.4.3	三维反演示例	157
	参考文献	160
第9章	系统集成实验与典型矿区野外测试	161
9.1	系统总体设计	161
9.1.1	发射机接口	162
9.1.2	采集站接口	162
9.1.3	磁传感器接口	162
9.1.4	收发同步协议	162
9.2	系统集成与室内测试	163
9.2.1	系统参数测试	163
9.2.2	系统功能测试	164
9.3	SEP系统野外探测试验	166
9.3.1	概况	166
9.3.2	系统野外比对试验	169
	参考文献	201
第10章	结论和讨论	202
10.1	结论	202
10.2	讨论	204
	参考文献	207

第1章 绪 论

地球为人类提供各种资源，同时也给人类带来很多自然灾害。只有了解地球内部的物质组成、结构及其动力学机制，才能充分揭示成矿、成灾、成盆等规律，发现人类所需的矿产与油气资源，才能全面认识地质灾害发生、发展过程与机理，及时预测灾害，减少损失。此外，地球的各种物理参数为各种民生与国防安全等工程设计提供重要的依据。

地球物理学是通过对高空、地表直至地核的广大区域进行定量探测，然后对测量数据进行处理解释，进而了解地球内部物质组成与结构，阐明地球内部物质运动及其动力学过程的最重要的地学学科之一。地球物理学分为地震学、重力学、地磁学、地电学、电磁学、热学、放射性学等子学科。地球内部运动的电荷和电流可在地球内外产生电磁场。地球的基本磁场是由地球外核的电流体系所产生。随时间可变的电场和磁场相互感应，既和地球介质的电导率与介电常数有关，也和地球介质的磁导率有关。早期研究地球磁性参数的学科主要是地磁学，研究地球电性参数的学科主要是地电学。在近代，采用考虑电磁耦合来研究地电磁学，而地磁学和地电学可以包括在地电磁学中。所以，研究地磁场、地电场、地电磁场的学科统称为地球电磁学。

地面电磁探测主要是与地磁学、地电学以及地电磁学紧密相关的地球电磁学中的一种测量手段。它是通过对天然和人工的电磁信号的采集，开展地电磁探测研究。通过对数据的处理解释，推断反演地球内部的电性参数和磁性参数以及电性和磁性物质的结构与分布，为寻找矿产资源、油气资源、水资源以及研究地球深部结构及其动力学机制等服务，同时，在通信、导航和环境监测等领域发挥重要作用。

1.1 地面电磁探测的主要历史进展

在地球物理各分支学科中，地磁学最先向近代科学转变，英国医生吉伯（W. Gilbert）的名著《论磁》论证了地球是一个大磁体，存在两极，并解释了磁偏角、磁倾角的存在，继而在全球范围内开展大规模地磁测量。19世纪30年代德国数学家、物理学家高斯（C. F. Gauss）发明了地磁场强度测量方法，并用球谐分析法阐述了地球磁场的起源，从而奠定了地磁学基础。现代地磁学认为地球的主磁场是由地球外核的电流体系引起的。

人们对于地电学的研究是从发现地球内部存在电流开始的，地电记录最早是在电报线两端观测到的，19世纪末，曾取得一些可置信的地电记录，直到1910年，西班牙 Elbro 观察台开始了连续的地电记录，至1938年取得了长时期地电记录资料，随后澳大利亚、美国、加拿大、挪威、日本等都进行了地电记录，开始了对地球电性结构的观测研究（傅承义等，1985）。19世纪初，福克斯（P. Fox）首先在硫化金属矿上观测到了自然电流场，并在1835年开始试图用电法寻找金属矿，这便是最早的自然电场法，开启了应用地电学

的知识进行电法勘探的先河。利用人工场源的电阻率法在 19 世纪末也被提了出来。20 世纪初,又发现了激电现象,在地电勘探方法中又发展了激发极化法 (IP),一直应用至今。

在地磁法和地电法的基础上,以麦克斯韦方程组为基本理论依据,发展了地电磁法。以 20 世纪 40 年代末和 50 年代初提出的大地电磁法为标志,开启了电磁法研究新的历史发展阶段。原苏联学者 A. H. TuxoHoB 和法国学者 L. Cagniard 提出一种天然场源电磁法,称为大地电磁法 (MT),MT 同时测量电场和磁场,将其转化成频率域的卡尼亚视电阻率,消除了源的影响。采用平面波的卡尼亚视电阻率资料来探测地球深部介质的电性参数 (电导率或电阻率),在地壳和上地幔电性结构探测中有相当大的优势。由于天然场源的强度比较弱,获取每个观测点的观测资料都需要很长的时间,资料采集效率不高,将 MT 应用于勘探地壳上地幔的电性结构和油气构造背景采用粗网格普查时,这种费时的方法尚可接受,但当 MT 应用于金属矿详勘时,这种方法显然存在不足,于是人工源电磁法应运而生。应用电磁感应的电磁法 (EM),早在 1917 年,一位美国物探工程师康克宁就提出此想法,并于 1925 年获得找矿成果,在 20 世纪 20 年代,EM 地面方法在美国、加拿大等地发展,50 年代后发展了航空电磁法,60 年代和 70 年代早期发展了频率域电磁法 (FEM 或 FDEM) 和时间域电磁法 (TEM 或 TDEM) (Telford et al., 1990)。在频率域电磁法中音频范围的频率电磁法称为可控源音频大地电磁法 (CSAMT),可控源音频大地电磁法最早是由加拿大多伦多的 D. H. Strangway 教授和他的研究生 Myron Goldtern 于 1971 年提出的, R. L. Zonge 等将其形成了勘探方法,并在金属矿、地热资源等勘探方面得到了应用。20 世纪末至今,电磁法在海洋勘探中得到了广泛应用,从海上 MT 到海洋可控源电磁法 (MCSEM),从陆上多通道 TEM (MTEM) 到海上 MTEM,并成功研制出深水拖缆电源。20 世纪 90 年代以来,电磁勘探方法、理论、正反演解释取得了很大进展,特别是在三维积分方程法正反演取得了显著成果,为人工源电磁测深方法的进一步发展奠定了基础。

近几十年来,我国的电磁法勘探理论方法、技术都有了很大的发展,但仪器研发相对较缓,主要偏重于直流电法仪器和小型电磁法仪器。直到 90 年代初,我国大地电磁测深队伍已发展到 20 多个,至 1991 年年底,已完成大地电磁测深点 6500 个,80% 用于石油天然气构造普查,其余用于地壳上地幔、地震监视等研究 (刘国栋, 1994)。在 2010 年国家的深部探测技术与实验研究专项 (SinoProbe) 的项目中 (大陆电磁参数标准网实验研究子项目) 开展对全国范围的 MT 测深研究,对高原等重点区域则进行了加密探测,加强了对我国地壳上地幔电性结构的研究。

我国地面电磁探测在以下两项技术上走在世界的前列。一项是何继善院士发展的广域电磁法,通过采用自行研制广域电磁法仪器进行多项探测实践研究,结果表明,这种方法在探测深度和探测分辨率上都有所提升。另一项是正在研发的极低频探地工程 (WEM) 在资源勘探以及地震监测中的应用研究。WEM 找矿的前期理论研究成果已有发表。

1.2 地面电磁测深的实践探索

20 多年来,作者和课题组其他成员使用加拿大凤凰公司生产的 V4、V6、V8 系列设

备,在北京、江苏、广东、山西、河南、内蒙古、甘肃、安徽等地进行了地下热水、煤矿、金属矿等 CSAMT 探测研究,同时,还把 CSAMT 应用到宜万线铁路隧道、石太线铁路隧道薄弱结构、南水北调西线隧道薄弱结构等工程探测中,都取得了较好的应用效果。采用 WEM 方法在河南泌阳油田进行试验性探测,获得了该盆地深部地电断面结构的可靠信息。通过以上研究应用成果的总结,形成了以下共识。

(1) 金属矿的赋存构造一般比较复杂,很多矿区地形也比较复杂,金属矿地震方法尚未完全过关,因此主要探测手段是激电法、电阻率法等电方法和 TEM、CSAMT 等电磁方法,探测深度一般在 1km 以浅。由于浅部矿已探明的储备严重不足,到 1km 以下的深度甚至到 3~5km 深度找矿已不可避免,因此发展能探测到 3km 左右深度范围内的地面电磁精细勘探方法已提到议事日程上来。

(2) 油气构造的探测深度一般在 3km 左右,目前也有加深的趋势,过去油气勘探主要靠反射地震法,但该方法对火成岩中的裂缝型油气藏、火成岩盖层下的油气圈闭、构造或地形复杂的南方海相碳酸盐岩中的油气等勘探效果有限,迫切需要发展高分辨率的电磁勘探方法进行补充。地震剖面与地电磁剖面两种资料共同解释油气赋存状况,结果更加可靠。因此能源勘探也期待着新的电磁勘探方法的出现。

(3) CSAMT 方法的发射源比较笨重,在山地进行勘探时,发射源的运输比较困难,源和测点的距离一般在 10km 左右,AB 极连线和测线需要平行。在这些条件的限制下,发射极的位置选择常常也比较困难。因此,期待有轻便大功率的发射机的出现。

(4) 目前国内所研究和应用的广域电磁法,可望实现地下 6km 左右深度范围的目标体的电磁探测。但广域电磁法的源非常笨重,未能解决山区源位置移动选址难的问题。在广域电磁法的应用中,为了提高探测深度和垂直横向分辨率,将源点和测点的距离扩大到了 20km,导致该方法以较小的收发距获取较大探测深度的优势受到一定的限制。正在研究的 WEM 法,有望探测 10km 以内的电性体。WEM 发射源天线长度很大,而且建在高阻区,因此,有可能在全国范围内接收到信号,在波导区进行探测时仍然有一些技术问题需要研究。

(5) 我们在现有的 CSAMT 观测中,直接用观测的电场和磁场单分量来解释也可能得到好的效果。首先在近场和过渡场区,信号的强度大大增强,使得探测到 3km 深度范围内的电性结构成为可能。但在近场和过渡场地区,需要作源的校正,方法研究和仪器研制需要同步发展。

通过以上分析可知,为了满足实际需求,开展地面电磁探测的仪器研制、探测方法和实际应用一体化的研究是十分必要的。

1.3 国内外仪器研制现状

1.3.1 国外仪器研制现状及趋势

国外一部分电法仪器公司把原有的直流电法仪、时间域电磁法仪和频率域电磁法仪组合成多功能电法仪器,仪器采用板卡式模块化设计,多种方法尽可能共用通用的硬件平

台，通过不同的软件处理实现不同方法的测量。具有代表性的仪器包括美国 Zonge 公司 GDP 系列多功能电法仪器，目前已发展到第 4 代，最新产品为 GDP32 II；加拿大 Phoenix 地球物理公司生产的 V 系列多功能电法仪，最新仪器是 2006 推出的第 8 代系统 V8。上述两种仪器功能经过 30 多年的不断完善，可进行几乎所有的电法勘探方法测量，包括电阻率法、大地电磁法（MT/AMT）、可控源音频大地电磁法（CSAMT）、时域和频域激发极化法（TDIP/FDIP）、瞬变电磁法（TEM）、复电阻率或频谱激电法（CR/SIP）等。在不断完善测量功能的同时，加拿大 Phoenix 公司最近也在研发新一代的电磁勘探系统。Zonge 公司也正开发了 ZEN 多通道采集站，并增加了无线组网功能，以便于开展多台仪器的分布式测量。近年来，原本只用于 MT 测量的德国 Metronix 公司的 GMS07 系统也加入了 CSAMT 测量功能，并计划继续增加其他方法的测量功能以实现多功能化。

美国 Geometrics 公司和 EMI 公司联合生产的 EH4 混合源频率域电磁测深系统（图 1.1），结合了 CSAMT 和 MT 的部分优点，利用人工发射信号补偿天然信号某些频段的不足，以获得高分辨率的电阻率成像。但由于设备重、功耗大、通信距离近等不利因素的制约，目前实际应用还以单主机多通道集中采集为主，未实现大规模分布式测量。

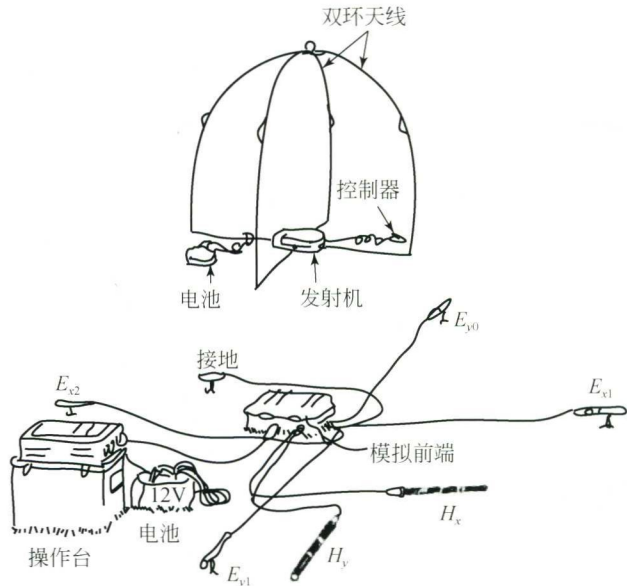


图 1.1 EH4 混合源频率域电磁测深系统

近年来，国外电法勘探仪器最值得关注的一个发展趋势是将广泛应用于地震勘探领域的分布式采集及其相关技术引入电法勘探领域。1997 年，澳大利亚 MIMEX 公司推出具有 100 道的分布式电磁系统-MIMDAS；2001 年，加拿大 Quantec Geoscience 公司完成了第一代的 Titan-24 分布式电磁系统，每个采集站有 1 道或 2 道。MIMDAS 和 Titan-24 两种系统的采集单元核心均采用 Refraction Technology 公司的地震数据采集模块 Reftek-120，两种系统可进行 IP 和 MT 两种方法测量。2012 年，Quantec Geoscience 公司又提出了 Orion 3D 测量技术，实现更大规模的三维电法勘探。

美国 KMS 公司在国际地球物理学学术界和石油工业界（主要是电磁和测井），有三十多年电磁法、测井、油藏工程技术方面的经验，创建了电法的第二大服务公司，研发和倡导了很多完整的地球物理系统，包括硬件、采集和解释等技术。2009 年推出了 KMS-820 阵列式数据采集系统，该采集系统既能采集电磁信号，也可以采集地震信号，通过获取地下电阻率和波速来勘探油气和探测深部构造。

KMS-820 感应式磁传感器是 KMS 公司与乌克兰利沃夫空间研究中心（Lviv Centre of Institute of Space Research, LCISR）合资研发和生产的高性能电磁探头，如 LEMI-118 为低噪声、低能耗高频感应线圈磁探头，用于在 $1 \sim 70000\text{Hz}$ 频段范围的磁场波动研究，多用于 AMT 方法；LEMI-120（频段 $0.0001 \sim 1000\text{Hz}$ ）是经典的低频、最低噪声感应磁探头，这款宽频地面感应磁探头，专门用于测量地磁场变化，特别是用于大地电磁（MT）和控制源的大地电磁（CSAMT）测量；LEMI-134 为高频（ $0.5 \sim 200000\text{Hz}$ ）、极低噪声、集成式、重量轻的感应磁探头，基于最小质量逼近的一种新算法使重量最小化而保存必要的长度来实现宽频带低噪声的水准。此外，KMS 还研发出用于石油和海洋的高达 200kW 的大功率发射机。该公司产品尚处于推广阶段，实际探测应用实例还较少。

英国爱丁堡大学的 Ziolkowski, Brucos Hobbs 和 Wright 等学者于 2001 年提出了多通道瞬变电磁法（multi-transient electromagnetic, MTEM），并申请了发明专利，该方法通过向大地发送阶跃波或伪随机编码激励信号，利用沿轴线排列的分布式接收机，采集距发射源不同偏移距的电场响应，将接收电场信号与发送电流信号进行反卷积运算，得到大地的冲激响应，根据冲激响应的峰值时间估计大地的电阻率分布，对一定深度的高阻薄层有很高的分辨力。2004 年在法国进行了陆上 MTEM 勘查油气藏的试验，得到了油气藏清晰的图像，后来这种探测技术和仪器在海洋油气勘探中也得到了应用。

综上所述，经过几十年的发展和不断更新换代，国外电法仪器在单一方法精细测量、仪器的多功能化以及多通道容量的分布式测量等方面不断取得新的进展，正朝着大功率激发、多分量多参数采集、分布式阵列观测等方向发展。

1.3.2 国内仪器研制现状

与国外电法勘探仪器相比，目前国内研制的仪器功能相对单一，主要用于中浅层探测。瞬变电磁法（TEM）、直流电阻率法以及激发极化法的仪器基本实现了国产化。国内形成产品化的 TEM 仪器包括：长沙白云仪器有限公司的 MSD-1、西安强源物探研究所的 EMRS-3、重庆奔腾数控技术研究所的 WTEM、中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所的 IGGETEM-20、吉林大学仪器科学与电气工程学院研制的 ATEM-2、北京矿产地质研究所研制的 TEMS-3S、中国地质大学（武汉）的 CUGTEM-8 等。在直流电阻率和激发极化仪器方面，主要产品包括重庆地质仪器厂的 DZD-6A、重庆奔腾地质仪器厂的 WGMD-9、吉林大学工程技术研究所研制的 EM60D 高密度电法仪、中南大学研制的 SQ-3C 双频激电仪和 WSJ-3 伪随机激电仪、北京地质仪器厂的 DWJ 系列微机激电仪以及重庆地质仪器厂 DJF 系列大功率激电仪。由于上述仪器品种齐全，与国外仪器性能接近且具有明显的价格优势，这部分国产电法勘探仪器在国内地质勘探市场中得到应用。但由于上述方法和仪器的探测深度较小，大多在 500m 以内，适合于解决浅层资源探测和工程环境领域的中浅

层探测问题,在深部矿产资源勘探中应用较少。

我国于 20 世纪 60 年代中期开始研制具有大探测深度的频率域电磁法仪器,原中国科学院兰州地球物理研究所研制了光电负反馈式磁力仪,与匈牙利产的大地电流仪共同组成大地电磁观测站,获得了我国最早的大地电磁数据。1970 年,国家地震局地质研究所试制成功了感应式晶体管线路的模拟大地电磁仪,并在此基础上发展成 LH-I 型模拟记录大地电磁测深仪,该仪器在 70 年代中期到 80 年代初期被广泛应用。20 世纪 80 年代,原长春地质学院仪器系研制了 GEM-I 型宽频带数字大地电磁测深仪,90 年代初又研制了 GEM-II 型滩海阵列大地电磁仪,并在辽东湾深部地质构造研究中得到了应用(王东坡等,2000)。虽然我们研发深部电磁探装备时间较早,但与国外相比,发展的速度较慢,特别是近十多年,随着国外先进电法仪器的大量涌入,对国内仪器研发和制造行业产生了巨大的冲击,造仪器不如买仪器的观念盛行,国家对自主研发仪器投入严重不足,仪器水平与国外的差距被进一步拉大,国内市场逐渐被国外仪器垄断,最终导致目前大探测深度的频率域电磁法仪器完全依赖进口的被动局面(陆其鹄等,2007)。

随着隐伏资源大深度勘查和工程地质精细勘察的实际需要的增加,大探测深度电磁法仪器的开发受到了越来越多的重视,从 20 世纪 90 年代后期起,国家相继开始对多家科研单位的仪器研制进行立项资助。例如在国土资源部的资助下,中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所研制了阵列式被动源电磁法系统(林品荣等,2006),吉林大学研制了集中天然源 MT 方法和人工源 CSAMT 方法的混场源电磁探测系统(程德福等,2004),中国地质大学(北京)在国家高技术研究发展计划(863 计划)的支持下研制了海底大地电磁仪器(魏文博,2002)。特别是 2007 年以来,国家对大探测深度电法勘探仪器研制的投入进一步增加,国内多家单位正在开展相应仪器的研究工作。

吉林大学在国家自然科学基金科学仪器基础研究专款项目《大深度(500~1500m)分布式电磁探测关键技术与仪器研究》的资助下,针对现有电法勘探技术及仪器在深部资源勘探中存在的不足,结合国外仪器的最新发展趋势,先后研制了 CSAMT 与 IP 联合探测的分布式接收系统原理样机和 DPS-1 型科研实验样机;提出了 CSAMT 与 IP 联合探测方法,采用主动源方法提高矿区测量环境下的抗干扰能力,利用 CSAMT 勘探深度大和 IP 浅部探测结果准确的优点,通过 IP 测量,不但能得到有效反映矿体的激发极化参数,同时获得的极化电阻率可对 CSAMT 高频段视电阻率进行约束,从而提高 CSAMT 深部电性结构探测的分辨率。

中南大学开展的广域电磁测深方法和仪器研究,突破 CSAMT 远区的限制,重点解决火山岩油藏的大深度探测问题。湖南继善高科技研发的 DGE-16 广域电磁仪是一款新型电磁仪,该仪器以“广域电磁法”理论为基础,并配合先进的电子技术和计算机技术,成功突破了传统人工源电磁法所固有的瓶颈可应用于油气藏/地热探测、页岩气探测、金属矿/地下水探测、煤田采空区探测等领域。

随着研究的进一步深入,我国频率域电磁法仪器也将迈上一个新台阶,逐步缩小与国外高端仪器的差距。

参 考 文 献

- 程德福, 王君, 李秀平, 等. 2004. 混场源电磁法仪器研制进展. 地球物理学进展, 19 (4): 778 ~ 781
- 底青云, 王妙月, 付长民, 等. 2013. “地-电离层”模式电磁波传播特征研究. 北京: 科学出版社
- 董树文, 李廷栋, 陈宣华, 等. 2013. 我国深部探测技术与实验研究进展综述. 地球物理学报, 55 (12): 3884 ~ 3901
- 董树文, 李廷栋, 高锐, 等. 2015. 我国深部探测技术与实验研究与国际同步. 地球学报, (01): 9 ~ 25
- 傅承义, 陈运泰, 祁贵仲. 1985. 地球物理学基础. 北京: 科学出版社
- 何继善. 2010. 广域电磁法和伪随机信号电法. 北京: 高等教育出版社
- 林君, 王言章, 刘长胜. 2010. 高端地球物理仪器研究及我国产业化现状. 仪器仪表学报, 31 (8): 173 ~ 180
- 林品荣, 郑采君, 石福升. 2006. 电磁法综合探测系统研究. 地质学报, 80 (10): 1539 ~ 1548
- 刘国栋. 2004. 电磁法及电法仪器的新进展和应用. 石油地球物理勘探, 39 (11): 46 ~ 51
- 刘国栋. 1994. 我国大地电磁测深的发展. 地球物理学报, 37 (Suppl.), 301 ~ 310
- 陆其鹄, 彭克中, 易碧金. 2007. 我国地球物理仪器的发展. 地球物理学进展, 22 (4): 1332 ~ 1337
- 庞恒昌, 吴锐. 2014. 新技术在电法勘探中的应用. 石油仪器, (1): 54 ~ 58
- 汤井田, 任政勇, 周聪, 等. 2015. 浅部频率域电磁勘探方法综述. 地球物理学报, 58 (8): 2681 ~ 2705
- 佟训乾, 林君, 姜弢, 等. 2013. 陆地可控震源发展综述. 地球物理学进展, 27 (5): 1912 ~ 1921
- 王东坡, 曾效箴, 薛林福, 等. 2000. 海洋阵列大地电磁测深法在辽东湾滩海深部地质构造研究中的应用. 石油与天然气地质, 21 (4): 293 ~ 299
- 魏文博. 2002. 我国大地电磁测深新进展及展望. 地球物理学进展, 17 (2): 245 ~ 254
- 杨洋, 邓锋华, 李帝铨. 2013. 基于伪随机信号的大深度激发极化法在油气勘探中的应用. 物探与化探, 37 (3): 438 ~ 442
- 张建国, 武欣, 齐有政, 等. 2014. 时间域编码电磁勘探方法研究. 雷达学报, 3 (2): 158 ~ 165
- 张建国, 武欣, 赵海涛, 等. 2015. 时间域电磁勘探数据的模拟退火法反演研究. 电子与信息学报, 37 (1): 220 ~ 225
- 张赛珍, 王庆乙, 罗延钟. 1994. 中国电法勘探发展概况. 地球物理学报, 37 (Suppl.), 408 ~ 424
- 中国地球物理学会. 1985. 中国地球物理学基础. 北京: 科学出版社
- Garner S J, Thiel D V. 2000. Broadband (ULF - VLF) surface impedance measurements using MIMDAS. Exploration Geophysics, 31 (2): 173 ~ 178
- Gharibi M, Killin K, McGill D, et al. 2012. Full 3D Acquisition and Modelling with the Quantec 3D System - The Hidden Hill Deposit Case Study. ASEG Extended Abstracts, (1): 1 ~ 4
- Golden H, Herbert T, Duncan A. 2006. GEOFFERRET: A new distributed system for deep-probing TEM surveys; 76th SEG Annual International Meeting Uranium workshop extended abstracts
- Goldie M. 2007. A comparison between conventional and distributed acquisition induced polarization surveys for gold exploration in Nevada. The Leading Edge, 26 (2): 180 ~ 183
- Joosten W L. 1982. Seismic Telemetry; The Future of Geophysics. SEG 52nd Annual International Meeting Expanded Abstracts, 47 ~ 48
- Telford W M, Geldart L P, Sheriff R E. 1990. Applied Geophysics. Ind Edition. New York: Cambridge

University Press

- Weissling B. 2008. Advances in electrical resistivity imaging of karst voids. The Geological Society of America abstracts with 42nd Annual Meeting, 40 (3): 30
- Ziolkowski A, Hobbs B A, Wright D. 2007. Multitransient electromagnetic demonstration survey in France. Geophysics, 72 (7): 197 ~ 209

第 2 章 大功率电磁信号发射机

大功率电磁信号发射机是可控源地面电磁测深系统的重要组成部分，只有发射功率足够大，才能保证接收机获得信号的信噪比足够高，从而保证足够的探测深度和精度。例如，最近相关研究表明（底青云等，2013），采用两台 500kW 发射设备通过相距 100km 长的供电电极向地下供电，可实现全国国土范围内地下深部（>10km）电性结构的有效探测。

为了更加全面地了解地面电磁测深所用的发射机，本章首先介绍发射机的工作机理和研制现状，随后介绍基于励磁方式与脉宽调制（PWM）DC/DC 全桥变换器这两种大功率电磁信号发射机，最后，简单地介绍一下发射桥如何实现零电压开关（ZVS）。

2.1 大功率电磁信号发射机基本原理

大功率电磁信号发射机原理框图如图 2.1 所示，发电机提供一个三相电源，三相电经过整流稳压模块后获得一个稳定的直流电压，然后通过发射桥向 AB 电极发射某一频率的方波信号。

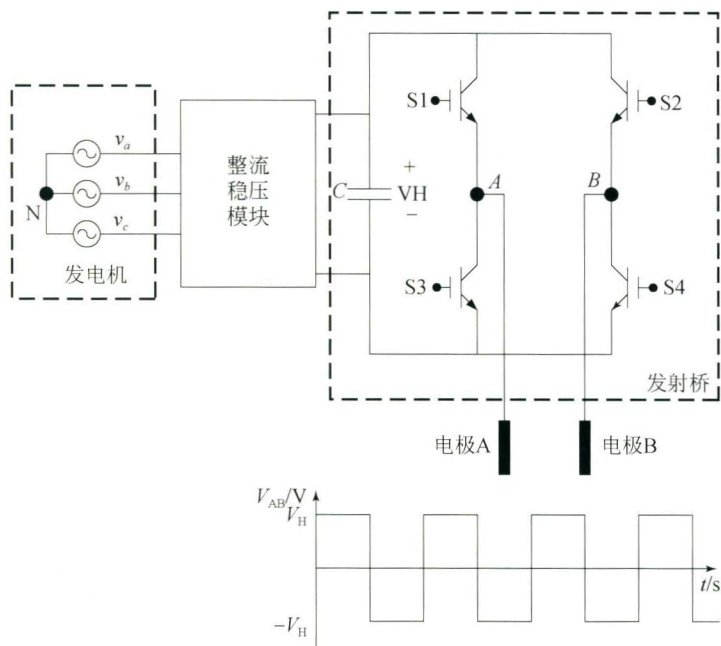


图 2.1 大功率电磁信号发射机基本原理框图