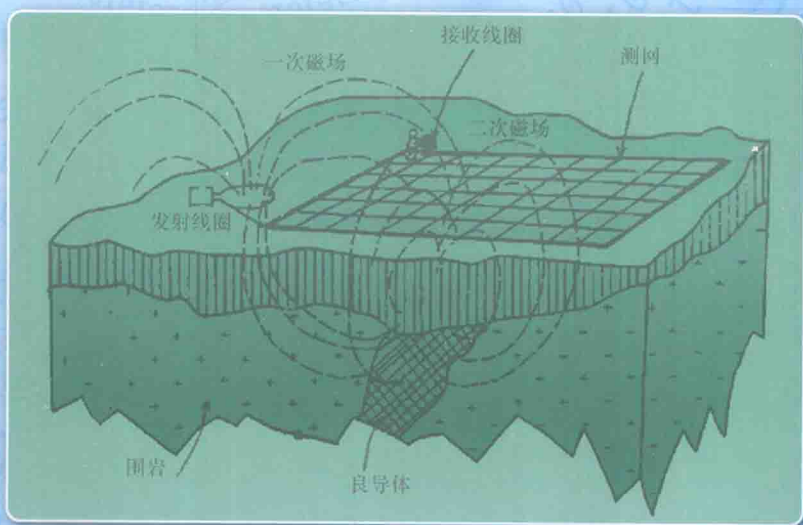


浅层瞬变电磁雷达

地下工程建设预报预警北京市重点实验室

叶英 著



地质出版社

浅层瞬变电磁雷达

叶 英 著

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

内 容 提 要

全书共分6章,首先从瞬变电磁法的基本理论出发,介绍了地面瞬变电磁法、地下瞬变电磁法、航空瞬变电磁法和海洋瞬变电磁法的理论、仪器及行业应用现状。其次讨论了浅层瞬变电磁法的理论基础、发展现状、信号特征及处理方法。然后研究了浅层瞬变电磁雷达的概念、工作装置、各种参数计算及数据处理方法,介绍了浅层瞬变电磁雷达的仪器设计、发射-接收一体机的研制、多种同步技术和不同场景的现场测量方法。最后列举了用瞬变电磁雷达探测城市地下管线、探查城市浅层地质问题、进行地铁施工超前地质预报等典型案例,以说明其应用效果。

本书反映作者和合作者多年来的研究成果和业绩,可供地质、地球物理工作者、大专院校高年级学生、研究生作为教材或参考书。

图书在版编目(CIP)数据

浅层瞬变电磁雷达 / 叶英著. —北京:地质出版社, 2016. 12

ISBN 978-7-116-10061-9

I. ①浅… II. ①叶… III. ①城市-瞬变电磁法
IV. ①P631.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第261918号

责任编辑:田野 程静

责任校对:张冬

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京海淀区学院路31号,100083

咨询电话:(010)66554528(邮购部);(010)66554631(编辑室)

网 址: <http://www.gph.com.cn>

传 真:(010)66554686

印 刷:北京地大天成印务有限公司

开 本:787 mm × 1092 mm $\frac{1}{16}$

印 张:15.25

字 数:370千字

版 次:2016年12月北京第1版

印 次:2016年12月北京第1次印刷

定 价:48.00元

书 号:ISBN 978-7-116-10061-9



(如对本书有建议或意见,敬请致电本社;如本书有印装问题,本社负责调换)

前 言

近年来,随着社会经济的发展和人民生活水平的提高,人类活动范围与工程建设领域的不断拓展,不少地质灾害和人为地质问题严重影响人民的日常生活与生产建设活动,工程与环境地质问题成为人们关注和研究的焦点。

城市地下空间基础条件问题越来越受到重视,尤其是老城区杂乱的城市管线埋藏位置模糊、路基塌陷、岩溶分布区内浅层不良地基、堤坝管涌等浅层地质问题所带来的危害日趋严峻,由于分布范围和涉及领域广且与人类日常生活息息相关,近年因浅层地质问题由于未能及时掌握而造成严重的事故时有发生。因此高精度、高效率地探测浅层地质问题也就显得更加重要和迫切。

浅层地质问题是所有地质问题中与人类生产活动最密切,影响也是最为直接的,查明和解决浅层地质问题迫在眉睫。而查明工程与环境地质问题大多涉及浅层(近地表层)探测与评价,需进行精细探测。浅层地质问题的隐蔽性、直接性、破坏性等特点促使人们迫切需要寻求相应的勘查理论、技术与设备。

地球物理探测技术因快速、经济、直观、无破坏性等特点受到了普遍的重视,目前,对地表以下浅部目标体探查技术手段主要是电磁类勘查技术、弹性波类勘查技术和人工开挖法。电磁类勘查主要包括直流电阻率法、自然电场法、瞬变电磁法、探地雷达法等;弹性波类勘查技术主要包括瑞雷波、地震影像、井间地震等。而对于城市道路地下管线及空洞探测主要依靠地质雷达及钻探法,但由于成本较高、检测精度不足等原因导致其难以对城市道路空洞和管线进行大面积预排查。同其他方法相比,瞬变电磁法具有快速、轻便、体积效应小、横向分辨率高、探测范围广、屏蔽层穿透能力强等特点,发展较快,应用广泛,该方法技术越来越多地应用于工程与环境地质问题。由于所有的浅层探测方法手段均是由相应的深部探测方法发展而来,因此,应基于常规瞬变电磁法进行浅层瞬变电磁法的研究。

广泛的工程勘查需要既快速又行之有效的勘测手段,至今,“高密度电阻率法”、“探地雷达”、“浅层地震法”、“浅层频域EM”等方法由于受干扰、接地、探测效率、探测深度等影响,局限性很大,而TEM当前技术水平(仪器及方法)又难于满足需求。因此,高分辨率探测浅层的地下目标体已经成

为瞬变电磁法发展的热门方向。

在国外,由于理论和技术上的许多困难,浅层瞬变电磁法多年来一直处于搁置状态。在20世纪80年代,McNeil(1984)提出了数值算法对初期信号进行斜阶跃后沿校正;Raiche(1984)研究了斜阶跃激励的层状大地响应;Asten和G. Price(1985)研究了早期瞬变电磁信号的特征并提出了3种坐标平移法来校正受关断效应影响的早期信号;Fitternlan和Anderson(1987)从Duhamel积分推导了任意输入作用下,输出瞬变过程与发射电流函数之间的解析式;20世纪90年代,由于环境与工程探测的迫切需要,浅层地球物理方法得到快速的发展,瞬变电磁法的浅层探测能力及浅层分辨能力逐渐受到重视。20世纪90年代中后期(1994~1998年)美国国家自然科学基金会执行了一个专门的研究项目称“Avery Early Time Electromagnetic System”,简称VETEM计划,由Pellerin等人领导执行(Pellerin et al., 1994, 1995, 1996, 1997, 2000)。该项目研究取得了突破性进展,研究成果形成了一种相对独立的VETEM方法。VETEM系统可以探测埋藏在0~5m内的非导电体和导电体两者差异。另一种应用在浅层探测系统是由美国Zonge公司研制的甚早期瞬变电磁测量系统(NanoTEM),该系统已经成为商业化产品,能够探测几米到一百米左右的电性目标体,由于受关断时间和早期采样时间的限制,因此仍难以用来研究高分辨率浅层的电性探测问题。

在国内,浅层瞬变电磁方面的研究相对滞后,2004年,在美国VETEM系统研制的启发下,吉林大学林君等研制了有自主知识产权的ATTEM系统。该系统重点主要集中在仪器研发方面,可以全程密集采样(含关断期间)的发射电流和全程TEM信号,把TEM的记录和解释扩展到全时域,可以记录发射电流的衰减曲线和全过程的总瞬变场,最大限度地利用了仪器所能采集到的参数。但是ATTEM系统仍要通过数理计算的方式来剔除一次场,求取二次场,只是在记录参数及后续数据处理方面有所改进。2006年,吉林大学的嵇艳鞠等利用ATTEM系统在电流关断期间对一次场进行剔除计算,实现了对二次场的提取。2006年重庆大学与重庆奔腾数控技术研究所合作开发的WTEM-1在系统操控性能、高速关断技术、高动态信号采集、GPS同步控制、有源磁探头设计等方面取得了进展。2007年作者带领团队研发UEP(地下工程瞬变电磁地质预报系统),发射电流30A,双极性波,上升沿触发,采样间隔 $10\mu\text{s}$,用系统延时控制采样时间,扫描式移动工作,大大提高了最早的采样时间,目前正在研究成套的系统设备,面向城市浅层(0~20m)的地下工程结构、地下管线及浅层地质目标体的勘查。2008年,中国矿业大学杨海燕对矿井巷道全空间中的多匝小回线源瞬变电磁场受电流关断效应的影响进行研究。2008年,重庆大学的马静等研究了线圈的暂态过程对一次场的影响,提出消除线圈暂

态过程的新方法，并研制了相应的线圈，有效减弱了线圈暂态过程对后续数据处理的影响。目前，市场还缺乏成套的 TEM 软件，有些学者尽管在数据处理、模拟、反演等方面的研究取得了突破，但仅仅局限于某一方面，很难形成一个完整的系统，严重限制了我国浅层探测技术的发展。对于瞬变电磁浅层探测，一方面从仪器入手突破关断时间的屏障是解决问题的关键；另一方面，从基本理论和方法技术入手解决早期信号利用问题，尤其是关断期间信号的利用，这还有待于大量的研究。

书中内容主要介绍作者及团队在浅层瞬变电磁的方法、仪器、数据处理及成像等方面的研究成果，抛砖引玉，期望推动我国在城市浅层瞬变电磁法的广泛应用。

瞬变电磁雷达 (Transient Electromagnetic Radar, 简称 TER) 是使用调制的瞬变电磁波形和定向天线向地下空间中的特定空域发射电磁波以搜索目标。搜索域内的物体 (目标) 把能量的一部分反射回雷达接收机处理这些回波，从中提取距离、速度、角度位置和其他目标识别特征等目标信息。瞬变电磁雷达探测系统包括电磁发射系统、电磁采集系统和计算机；电磁发射系统由能够连续发射脉冲式低频电磁信号的波形发射器、驱动器、输出级和电磁感应装置的发射天线组成；电磁采集系统由电磁感应的接收天线、信号放大器、滤波器、A/D 转换器及 ARM 处理器组成。瞬变电磁雷达能在方法上弥补地质雷达在探测深度上的不足，结合地质雷达与瞬变电磁仪二者优点，克服地面瞬变电磁探测定点测量效率低的问题，采用正反方向波采集叠加的方法，实现快速移动扫描式探测，同时弥补地质雷达探测深度有限及干扰严重等技术问题，最终实现地表至较大深度内地质体的快捷、便利及无损探测。

作者及团队利用研制的仪器采用不同装置的组合针对城市地下管线探测、城市浅层地质探查、地铁施工超前地质预报、各种未知结构物、构件钢筋分布、探宝等方面做了典型的实验与应用案例，以说明其应用效果。

作者早期 1987 ~ 1993 年曾参加了利用 PEM 瞬变电磁系统在内蒙古赤峰大井子铜矿外围的找矿工作；1993 ~ 1996 年在中南大学师从牛之珪教授攻读硕士研究生，期间参与了 SD-1 仪器的软件编写工作，利用 SD-1 在杭州钱塘江大桥留下段开展了路基岩溶分布探测，取得较好的效果；1997 年利用 SD-1 在京昆线山西省内进行采空区探查工作，探查的采空区也得到了实际钻孔验证。2001 年负责交通部联合攻关项目“雁门关隧道施工超前地质预报应用技术研究”，提出了将瞬变电磁法用于隧道掌子面进行超前地质预报的可行性；2007 年主持北京市科委重大科技需求专项“城市暗挖隧道施工超前地质预报系统研究”和国家“863”项目“复杂地质条件下隧道施工地质灾害预警装备与系统研究”，研制了 UEP 地下工程瞬变电磁地质预报系统；2009 年负责交

通部联合攻关项目“浅埋、大跨度、穿越煤系地层市政隧道信息化施工”，将 UEP 地下工程瞬变电磁地质预报系统用于 108 国道南村隧道，探测到掌子面前方煤层的分布范围，取得了预期效果；2011 年主持北京市科委重大项目“地下管线及地下空洞综合探测技术研究”，将 UEP 地下工程瞬变电磁地质预报系统用于城市地下管线探测，通过与各种地质雷达的探测能力比较，进一步明确采用浅层瞬变电磁方法探测深部管线的优越性；2012 年参与了项目“瞬变电磁隧道超前地质预报关键技术与应用”；2015 年主持北京市政路桥集团项目“城市浅层瞬变电磁雷达研制与应用”，希望把浅层瞬变电磁法做成新型民用雷达，以期在城市浅层地质勘查、既有市政设施探查、钢筋分布及探宝等领域将瞬变电磁法的这个“高大上”的专业设备小型化、民用化，把瞬变电磁雷达的应用研究推进到一个实用化的阶段。

在本书的编写中，作者曾多次得到恩师瞬变电磁专家牛之璉老师的多方指导。在漫长的研究期间，得到过北京大学李正斌教授、山东大学李术才教授、长安大学李貅教授、中国科学院地质与地球物理研究所薛国强研究员、北京市勘察设计研究院周宏磊总工、北京交通大学各位老师和师兄的合作与交流。得到北京市政路桥集团、北京市市政工程研究院领导对研究工作的大力支持。

书中的内容得到了地下工程建设预报预警北京市重点实验室团队、项目组的多方协助与合作，特别是侯伟清、许鹏、张守威等做了大量具体细致的基础性工作，在此表示感谢。

作者于北京

2016 年 1 月 21 日

目 录

1 瞬变电磁法发展概论	1
1.1 方法的发展	1
1.2 仪器的发展	3
1.3 数据处理软件	8
1.4 行业的应用	9
1.5 展望	19
参考文献	21
2 瞬变电磁法的基本理论	23
2.1 瞬变电磁法原理	23
2.2 瞬变电磁响应基本特征	33
2.3 地面瞬变电磁装置	49
2.4 地下瞬变电磁装置（地 - 井、坑道）	56
2.5 航空瞬变电磁装置（地 - 空方式）	60
2.6 海洋瞬变电磁装置	61
参考文献	63
3 浅层瞬变电磁法理论基础	64
3.1 城市浅层地质问题	64
3.2 浅层电磁法的探测问题	66
3.3 浅层瞬变电磁法发展现状	69
3.4 浅层瞬变电磁响应信号特征	72
3.5 过渡过程影响分析	74
3.6 过渡过程信号处理	89
参考文献	94
4 瞬变电磁雷达系统	96
4.1 瞬变电磁雷达的概念	96

4.2	瞬变电磁雷达的工作装置	97
4.3	数据采集	106
4.4	数据滤波去噪	111
4.5	参数计算	119
4.6	数据可视化	124
4.7	定性分析与定量解释	153
	参考文献	158
5	仪器设计	160
5.1	浅层瞬变电磁雷达设计要求	162
5.2	电磁发射机	164
5.3	电磁接收机	175
5.4	同步技术	200
5.5	测量轮触发	203
5.6	发射线圈与接收线圈的制作	203
5.7	测试结果	208
	参考文献	211
6	应用与实践	212
6.1	重叠回线装置雷达探测	212
6.2	大定回线源装置雷达探测	222
6.3	偶极法装置雷达探测	225
6.4	其他装置雷达探测	228
6.5	雷达各种干扰典型波谱	231
	参考文献	236

1 瞬变电磁法发展概论

瞬变电磁法 (Transient Electromagnetic Method) 或称为时间域电磁法 (Time-domain Electromagnetic Method), 英文缩写为 TEM, 其基本原理是介质在一次电流脉冲场激发下会产生涡流, 在脉冲间断期间涡流不会立即消失, 在其周围空间形成随时间衰减的二次磁场。二次磁场随时间衰减的规律主要取决于异常体的导电性、体积规模和埋深, 以及发射电流的形态和频率。因此, 可以通过接收线圈或接地电极测量和分析二次场有关信息来了解异常体的空间分布, 从而达到探测地下目标体的目的。瞬变电磁法与常规电法相比具有如下优势:

1) 在低阻围岩条件下, 常规电法易受浅层低阻屏蔽, 而瞬变电磁法能穿透较厚的低阻覆盖层, 其地形影响也容易判别; 在高阻围岩的条件下, 瞬变电磁法穿透能力强, 几乎不受地形影响;

2) 理论上瞬变电磁法比直流电法分辨率高 $1/3$ 次方;

3) 瞬变电磁法采用密集采样方式, 采样数据为千个至数百万个深度数据, 大大提高了对勘查目的物空间位置及形态的控制能力;

4) 瞬变电磁法观测纯二次场, 消除了频域方法的主要噪声源 (装置耦合噪声), TEM 噪声主要来自天然电磁场及人类文化设施的噪声 (简称人文噪声) 干扰, 受地形起伏、一次场不稳定及发射接收点位误差影响小。可以进行近区观测, 减少旁侧影响, 增强电性分辨能力;

5) 可用加大发射功率的方法增强二次场, 随机干扰影响小; 通过多次脉冲激发和场的重复测量叠加, 可提高信噪比和观测精度, 也可增大勘探深度;

6) 可通过选择不同的时间窗口进行观测, 有效地压制地质噪声, 可获得不同勘探深度覆盖等一系列优点, 使剖面与测深工作于一体, 提供了更多有用信息, 减少了多解性;

7) 对线圈形状、方位和点位等要求可以放宽; 由于测量磁场, 受静态位移的影响小, 测量工作简单, 工作效率高;

8) 可以使用同点装置 (如重叠回线或中心回线), 与探测的地质体达到最佳的耦合, 得到的异常幅度大、形态简单、横向分辨率高;

9) 由于测量装置采用的是不接地回线, 故不受接地电阻等问题的影响, 特别是在直流电法无法应用的区域, 例如冻土地带、水泥路面、沙漠区域、基岩出露地区、海水表面等, 利用瞬变电磁法均可方便地进行探测, 彰显了其独特的优越性。

1.1 方法的发展

1.1.1 在国外

最早提出利用电流脉冲激发供电电偶极形成时域电磁场的是美国科学家 L. W. Blum

(1933年),当时利用不同电导率地层界面电磁波的反射与地震发射波信号的相似性,进行了大量的试验和比较。1951年由J. R. Wait提出来利用瞬变电磁场法寻找导电矿体的概念,他在示波器屏幕上观测到瞬变场波形,这种快速增长(或减小)的磁场将使导体电激发起涡流场,可以观测到衰变电压。1958年加拿大Barringer公司开始研制应用于航空的INPUT系统,于1962年投入使用。在同时期内(1950~1960年),苏联科学家成功地完成了瞬变电磁法的一维正、反演,建立了瞬变电磁法的解释理论和野外工作方法。同时应用时域电磁法测深即建(立)场(测深)法,此法主要用于地震探测油田效果不理想的地区。初期发接距 $r \geq (4 \sim 6)H$ (H 为高阻基底上部沉积岩的总厚度),称为远区建场法,20世纪60年代又发展了 $r \leq 0.7H$ 的近区建场法。在同期内,还创立了应用与勘查金属矿产的过渡过程法。20世纪60年代以后近区建场法和过渡过程法得到更广泛及成功的应用与发展,制造出了适用于钻井、航空和海洋等领域的变种方法、理论和技术。

20世纪60年代中期到70年代末,“短偏移”“晚期”“近区”这类方法迅速发展起来。

美国等西方国家在20世纪70~80年代,短偏移法一直处于实验和研究阶段,未被广泛应用,而长偏移法得到了应用,特别是在地热调查和地壳结构调查中。比较有代表性的学者:G. V. Keller (1977)和Stemberg (1979)。随后,J. R. Wait, G. V. Keller, A. A. Kaufman等科学家对瞬变电磁法一维正、反演计算及方法技术进行了大量研究。

20世纪80年代以后随着计算机技术的发展,在二三维正演模拟技术方面,G. W. Hohmem, A. P. Raiche, B. R. Spies, M. N. Nabighian等学者,发表了大量论文。

1.1.2 在国内

我国瞬变电磁法起步于20世纪70年代,先后从加拿大引进磁源EM37、47、67及PEM系统;从澳大利亚引进源SIROTEMII、TerraTEM;油气田勘探部门引入西方电性源的瞬变电磁法(LOTEM)及俄罗斯在建场测深电法仪(ЦЭС-3型),成为深部构造及含油气目标探测的有效方法;此外,很多单位也开展了理论基础及方法技术研究,朴化荣(1990)《电磁测深法原理》、牛之珪(1992)《时间域电磁法》、蒋邦远(1998)《实用近区磁源瞬变电磁法勘探》以及1997年由牛之珪等编写的《瞬变电磁法技术规程》等专著产生了较大影响。投入研究的单位主要有中南工业大学、长春地质学院、地质矿产部物化探研究所、西安地质学院、有色金属工业总公司矿产地质研究院和中国地质大学等。较早开展这项工作的有朴化荣、曾孝篇、王延良等人,他们将脉冲式航电仪用于地质填图和找矿中;牛之珪等将瞬变电磁法用于金属矿勘探上,取得了明显的效果;方文藻、李琳等用线性数字滤波技术实现了大回线源瞬变电磁测深的正演计算,并将大回线源瞬变电磁测深法广泛用于地热和地下水调查、工程调查和地质灾害调查。物化探研究所、中国有色金属工业总公司地质研究院、西安地质学院和中南工业大学等单位相继研制了瞬变电磁仪器,并发展了理论和技术方面的研究,获得了大量有价值的研究成果及成功的应用实例。作者较早(1987年在华北有色地勘局第一物探大队)地参与了PEM瞬变电磁系统的研究和野外找矿工作。

以前,瞬变电磁法只局限于金属矿勘探,1992年以后随着仪器的智能化与数字化,瞬变电磁法开始步入工程、环境、灾害地质调查中,如探测地下采空区、陷落柱等煤田灾

害,划分地下断层、寻找地下水,金属矿产勘探、石油、煤炭等非金属矿产调查、工程场地地质勘查、隧道超前地质预报等领域。目前,瞬变电磁法已经几乎涉足了勘探地球物理的所有领域,取得了良好的效果。

1.2 仪器的发展

TEM 探测的精度与探测深度与仪器的性能是分不开的。

1.2.1 国外的研究现状

(1) 地面及井中瞬变电磁仪研究现状

国外瞬变电磁仪器总体来说性能稳定,实用可靠。1953年美国 Newmont 勘探公司申请了第一个专利,1962年 McLaughlin 和 Dolan 研制出 EMP-1 型仪器,拉开了瞬变电磁仪器研制的大幕,1964年 EMP-1 野外实验成功,1974年 EMP-1 正式用于野外。同期,1974年 Crone 公司推出偶极系统的商品仪器;1977年 CSIRO 研制出 SIROTEM-I;1972年 Lamontagne 研制出 UTEM-1;1980年 Geonics 研制出 EM-37、1996年研制出 EM-67 等。到20世纪80年代末,多功能电法仪器相继问世,美国 Zonge 公司的 GDP12、GDP16、GDP32;加拿大的 V-5、V-6、V5-2000 等。俄罗斯(含前苏联)的仪器一类是用于矿产勘查的过渡过程法(МПП)仪器;另一类是用于深部构造测深的建立场法(ЗС)仪器,主要型号有 МППО-1 型、МППО-4 型、МППУ-2 型、Импульс 轻便型、Импульс-ц 数字化型、应用于勘查油气田的 Цикл-2、4 型及 ЦЭС-1、2、3 型数字站,TEM-FAST 是俄罗斯近期产品,为工程勘查用的仪器。德国具有代表性的仪器是 Metrontx 公司的 DEMS-IV 系统。

总体上,瞬变电磁仪经过五次改进更型。性能稳定、实用可靠的商品化瞬变电磁仪器始于20世纪70年代初期,主要有以下几个产品。

1) 加拿大 CRONE 公司的 DigitalPEM 系统,匹配 2.4kW 和 4.8kW 两种发射机,发射机的发射电流下降沿固定模式有 200Ls、300Ls、500Ls、1000Ls、1500Ls 5 种,发射线圈为任何状态、任何大地耦合条件下,发射机都可自动调整发射电流下降沿时间保持不变,接收传感器为棒状探头,探头脚架为可调式支架,能方便地调节探头地状态以满足测量三分量的要求,工作装置主要为中心回线、定源大回线和偶极-偶极。配有地-井 TEM 系统,井中三分量探头为分体式,即垂直分量和水平分量为两个探头,野外工作时每一激发回线状态下,分别测量垂直分量和水平分量,这样相对降低了工作效率,但大大增加了安全性,由于分体式比整体式三分量探头长度短得多,因此减小了卡探头的概率。

2) 加拿大 GEONIC 公司的 EM 系列,接收机型号为 PROTEM,可与 EM47、EM57、EM67 发射机配套形成小、中、大功率 TEM 系统,发射机自测电流下降沿时间,接收机依据发射机的自测值置入电流下降沿时间,以确定采样延迟时间的零时刻,单分量低频接收线圈为直径 100cm 空芯线圈,单分量 750Hz 高频接收线圈为直径 70m 空芯线圈,三分量探头尺寸为 70cm × 70cm × 30cm,相对国内外其他品牌的瞬变电磁仪器而言,主要有三方面特色:①可同时进行三分量数据采集;②采用积分器采样,各采样道均为独立的积分

器，信噪比较高；③EM47 发射机：在 40m × 40m 线圈的条件下，发射电流下降沿时间为 2.5Ls。TDEM47 系统是瞬变电磁法用于工程勘查的仪器。三分量井中探头为一体探头。在国外使用的主要装置为定源大回线，同样也适用于中心回线装置。

3) 澳大利亚联邦科学工业研究院的 SIROTEM - 0 型瞬变电磁仪，为中功率仪器，接收探头为 50cm × 50cm × 50cm 的立方体，该仪器除可用于中心回线、定源大回线装置外，还可用于重叠回线装置，目前该类型的仪器已停产。

4) 加拿大多伦多大学的 UTEM 系统，发射电流波形为连续三角波，测量输出的参数为感应电动势二次场与一次场的比值，目前测量结果还无法转换成电阻率参数，该系统主要用定源大回线装置进行工作，配有三分量地 - 井 TEM 系统。

5) 加拿大凤凰公司的 V8 多功能电法仪，专门配套了用于 TEM 功能型号为 T - 4 发射机，用电池组提供发射机电源，发射电流下降沿时间最短为 6Ls，接收探头有两种型号，中频探头 MTEM - AL，采样延时段 20Ls ~ 800ms，高频探头 FTEM - AL，采样延时段 6Ls ~ 8ms，两种探头均为空芯线圈，该系统可用于浅层工程地质勘查。

6) 美国 ZONGE 公司的 GDP - 32 多功能电法仪，原系统中 TEM 常规数据采集方式的采样率为 30.4Ls，配套的接收探头为频带 8kHz，有效接收面积为 10000m²，除此还配有 NT - 20 型快速关断电流的小功率发射机和电池组供电的 ZT - 30 型 TEM 发射机，新型的 GDP - 32 接收机具有密集采样功能，采样率最高可达 1.25Ls，等间隔密集采样最多可达 2048 个。该系统虽然配有快速关断电流的小功率发射机，但缺少配套的高频接收探头。

国外的瞬变电磁仪器主要有上述 6 种，相对功能较为完善、性能稳定可靠的是 PEM 型和 EM 系列，这两种型号的仪器为专一的瞬变电磁法仪器，都有 30 年左右的历史，经逐步改进完善，发展到目前真正实用型的仪器。其他类型的 TEM 仪器都存在一定的缺陷，主要是发射电流下降沿时间未知，原因是在进行动源装置测量时，随大地与发射回线的耦合关系不同、回线形状变化，发射电流下降沿时间随之改变，而发射机不能自动调整下降沿时间保持不变或逐测点读取下降沿时间，另外有些系统没有配套的接收探头。

国外的主要瞬变电磁仪器发射机性能见表 1.1，接收机见表 1.2。

表 1.1 国外 TEM 电磁系统发射机性能一览表

机型	加拿大 PEM	澳大利亚 SIROTEM - II	加拿大 TEM - 47	加拿大 TEM - 37	美国 Nano TEMNT - 20	美国 VETEM	CUSTEM - 1
电流波形	双极性梯形波，占空比 1	双极性梯形波，占空比 1	双极性梯形波，占空比 1	双极性梯形波，占空比 1	双极性矩形波	双极性矩形波	双极性矩形波
基频/Hz	(50Hz) 8.33, 16.66, 33.33ms; (60Hz) 10, 20, 40ms	(50Hz) 25 ~ 0.12ms; (60Hz) 30 ~ 0.12ms	(50Hz) 30, 75, 315ms; (60Hz) 25, 62.5, 262.5ms	(50Hz) 3, 7.5, 30ms; (60Hz) 2.5, 6.25, 25ms	—	—	—

续表

机型	加拿大 PEM	澳大利亚 SIROTEM - II	加拿大 TEM - 47	加拿大 TEM - 37	美国 Nano TEMNT - 20	美国 VETEM	CUSTTEM - 1
关断时间	0.5, 1.0, 1.5 μ s	16 ~ 140 μ s	2.5 μ s	300 μ s	1.2 ~ 6 μ s	10ns	30 μ s
输出电压	24 ~ 120V	24V	0 ~ 9V	20 ~ 160V	—	—	12 ~ 36V
输出电流	20A	10A	3A	30A	20A	1 ~ 10A	10A
电源	2kW 发电机	24V 电瓶	12V 电瓶	2.8kW 发电机	10 ~ 30V 电瓶	—	12 ~ 36V 电瓶

表 1.2 国外 TEM 电磁系统接收机性能对比表

机型	DigitalPEM	TEM - 37	SIROTEM - III	V8
增益	10 - 1280 自动、手动		0.1、1、10、100	
叠加次数	512 ~ 65536 二倍增长, 共 8 档	16 ~ 16384	1 ~ 9999	
延时范围	76.5 μ s ~ 31.75ms 对数间隔	6 μ s ~ 80ms	50 μ s ~ 2s	6 μ s ~ 80ms
延时窗口	最多 35 个窗口	20 个窗口	最多 53 个窗口	20 个窗口
输入通道	1	3	1、2、3 任选	3
同步	电缆、无线电、石英钟	电缆、石英钟	大功率配石英钟	电缆、GPS
液晶	256 \times 128		400 \times 600	
操作方式	菜单式人机对话	菜单式人机对话	菜单式人机对话	菜单式人机对话

(2) 航空瞬变电磁仪研究现状

目前国外的航空瞬变电磁仪仪器主要有固定翼飞机时间域电磁系统和直升机时间域电磁系统。

固定翼飞机时间域电磁系统有：加拿大的 GEOTEM、MEGATEM；澳大利亚的 TEMPEST；南非的 SPECTREM。

直升机时间域电磁法系统有：南非的 ExplorHEM (1997)、HELITEM (1997)；加拿大的 HELIQUESTEM (1997)、THEM (1998)、AeroTEM (1999)、SCORPION (2002)、HELIGEOTEM (2005)；美国的 NEWTEN (1998)、ORAGSTEM (2003)；澳大利亚的 HOISTEM (1998) 等。

国外的航空瞬变电磁仪仪器总体来说技术指标先进，基本频率和脉冲宽度范围大，测量三分量或二次磁场，发射磁矩大，能全时段采样，最大探测深度达 400 ~ 500m，适用于地形崎岖地区，在普查矿产、地下水、地质填图等方面，有望替代地面系统。目前世界上公认的先的系统是 TEMPEST 系统，它采用先进的信号处理技术，提高信噪比，响应频率范围是 25 ~ 37.5Hz，覆盖的频率范围宽，提高了对地电分辨能力，适宜于探测导电层覆盖下的良导体，能够精确补偿由于系统几何因素变化的影响。加拿大的 AeroTEM 系统采用了 GPS 定位、导航，且解释方面可以模拟三维响应，计算 2.5 维空间电导率的变化，

有实时提供图件,适用于航测面积大的工作。

1.2.2 在国内

我国从20世纪70年代开始研制的脉冲式航电仪用于野外实验研究,从90年代至今,在国内,TEM法进入了蓬勃发展和广泛应用阶段。但无论从方法理论研究还是仪器研制方面均落后于世界先进水平,特别是在仪器研制方面,除少数有所独创外,大多是在国外仪器基础上的开发改进,一流的大功率多功能瞬变电磁法仪器目前仍然依赖进口。

国内的瞬变电磁仪器,近年来由于市场的需求,多家大专院校、研究所和仪器生产厂家进行研制,目前勘查中或多或少在应用的有下面几种。

1) 地球物理地球化学勘查研究所生产的IG-GETEM-20瞬变电磁仪,发射机的性能类似PEM系统,中功率发射机发射电流下降沿固定模式有200Ls、300Ls、500Ls、1000Ls 4种,小功率发射机可自测发射电流下降沿时间,采样率4Ls,采样窗口包括每个延迟时间级次10、14、20、30个采样道4种模式,目前该型号仪器为国内瞬变电磁仪中功能较完善、性能较稳定可靠的仪器。

2) 长沙智通技术研究所的SD-50系统,该系统的功能类似澳大利亚的SIROTEM型瞬变电磁仪,电源为电池组,主要工作装置为重叠回线方式,发射电流基频25Hz、6.25Hz、2.5Hz 3种。相对国内瞬变电磁仪而言,该类型仪器是性能较稳定的仪器,在有色系统应用较为广泛。主要缺陷是为了防止大地与回线耦合关系和回线的尺寸、形状发生变化,导致发射电流波形振荡,采用了较小的阻尼电阻,使装置的固有过渡过程较大,反映在解释结果的表征是计算的视电阻率在几欧姆米至几十欧姆米范围内,比其他电法的结果至少低一个数量级。在此基础上,长沙白云仪器开发有限公司研制出了MSD-1型瞬变电磁仪,发射电流基频率225Hz、75Hz、25Hz、8.3Hz、2.5Hz、0.83Hz、0.25Hz,最大发射电流20A,记录(时窗)时间范围0.008~864ms,最大输出电压48V。

3) 吉林大学仪器科学与电气工程学院的ATEM型瞬变电磁仪,该仪器的特点:①感应段和过渡段全时域密集采样,仪器自身未进行窗口叠加处理,输出结果为等间隔单采样点的数据序列;②最大发射电流可达80A。

4) 重庆地质仪器厂生产的TEMII型瞬变电磁仪,为吉林大学ATEM型瞬变电磁仪的成果转化产品。

5) 重庆奔腾数控技术研究所研制的WTEM瞬变电磁仪(2006),主要技术指标为:最大输出电压200V,最大输出电流50A,发射电流基频0.0625Hz、0.125Hz、0.25Hz、0.5Hz、1Hz、2Hz、4Hz、8Hz、16Hz、32Hz,同步方式电缆、石英钟、GPS 3种。WTEM-1Q型小功率系统,接收发射一体机,用于浅部工程勘查。

6) 中国地质大学(武汉)的CUGTEM-4型和CUGTEM-GK1型瞬变电磁仪,是以单脉冲激发为基础发展起来的,可进行几次叠加,CUGTEM-4型最大的输出电流200A,CUGTEM-GK1型最大的输出电流30A,GPS同步方式,采样率1Ls、4Ls、16Ls 3种模式,发射电流基频225Hz、75Hz、25Hz、12.5Hz、6.25Hz。

7) 西安物化探研究所的 EMRS - 2 型瞬变电磁仪和中国有色金属工业总公司北京地质矿产研究所的 TEMS - 3 瞬变电磁仪均为单脉冲激发方式, 可发射几百安培的电流, EMRS - 2 型瞬变电磁仪主要采用装置组合是小线圈中心回线方式, TEMS - 3 型瞬变电磁仪主要采用装置组合是重叠回线方式。

单脉冲型在 20 世纪 60 年代苏联曾试用过, 目前国外再未使用。单脉冲型一般脉冲电流很大, 最高达几百安培, 但无法采用瞬变电磁技术中普遍采用的多次叠加技术来压低干扰, 所谓的大电流实际起到补充无叠加技术之不足。此类型发射的大电流是靠电容放电得到, 其结果是电流波形, 一般情况下不理想, 由此导致的装置固有过渡过程较长, 由于发射电流较大, 需要接收机有非常大动态范围, 否则早期信号经常会处于饱和状态被限幅。由于难以采用多次叠加技术, 一般情况下晚期响应信噪比较低。

8) 北京市市政工程研究院研制的 TER 电磁仪, 主要特点可接收总场, 通过调节参数也可接收二次场, 功能更灵活, 触发方式多样, 包括 GPS、测量轮、手动等触发, 以扫描式的测量方式为主, 也可点测、线测, 可三维成像, 只有样机, 目前还没有批量生产。

国内主要发射机性能比较见表 1.3, 接收机性能比较见表 1.4。

表 1.3 国内 TEM 电磁系统发射机性能一览表

机型	ATEM 系统	WTEM - 1D10kW	WTEM - 1X	TEMS - 3S	FDK - 1 多功能	BYF5MSD1
单位	吉林大学	重庆万马物探 仪器有限公司	重庆万马物探 仪器有限公司	北京矿产地 质研究所	西安煤炭 研究院	北京天一指航通 信技术有限公司
电流波形	单极性、双 极性梯形波, 占空比可调, 31 个频点	单极性、双极 性梯形波, 10 个 频点	单极性、双 极性梯形波, 10 个频点	单次脉冲	连续脉冲 方波 单次脉冲	225Hz、75Hz、 25Hz、8.3Hz、 2.5Hz、0.83Hz、 0.25Hz
关断时间	自由沿	1 ~ 1000 μ s	0.1 ~ 100.0 μ s	—	—	—
输出电压	24 ~ 120V	小于 200V	5.5 ~ 8V 5.5 ~ 20V	600V	—	—
输出电流	连续最大 50A 单次: 100A	小于 50A	小于 10A	单脉冲强场源 100 ~ 200A	单次: 600A 连续: 200A	1 ~ 20A
电源	4 ~ 150V 电瓶	内置 12V 可 充电电池	12V, 24V	50kW 发电机	—	—

表 1.4 国内 TEM 电磁系统接收机性能对比表

指标	CUGTEM - GK1 型	TEMS - 3S	WTEM - 1J/GPS	BYF5MSDI	WDC - 2B	IGGETEM - 20	ALEM - II	FDK - 1 多功能
增益	—	—	8、32	—	6、60、600、6000	1/2、1、16、64、20、80、320、1280	0.1、1、10、100	0、20、40、60
叠加次数	—	单次	1 ~ 9999 次	32 ~ 2048 次	32768 二倍增长	32 ~ 4096 二倍指数幂增长	1 ~ 9999 任选	0 ~ 1024
延时范围	1 μ s、4 μ s ~ 10ms	10 ~ 2560ms	—	0.008 ~ 864ms	50 μ s ~ 2.5s	2 μ s ~ 999 μ s	1 μ s、5 μ s、10 μ s ~ 40ms 任选	5 μ s、10 μ s、20 μ s
延时窗口	—	任意编程	50 道	40 道	最多 25 个窗口	最多 88 个窗口	任意编程	任意编程
输入通道	1 道	1 道	1 道	—	1 道	2 道	1 道	12 道
同步	GPS 同步	电缆、石英钟	电缆、GPS 同步	—	电缆	电缆、GPS 钟	GPS 同步、导线同步	—
液晶	640 × 480 点阵	—	掌上电脑	240 × 128 液晶	240 × 64	256 × 128	400 × 600	—
操作方式	菜单式 人机对话	菜单式 人机对话	菜单式 人机对话	—	—	菜单式 人机对话	菜单式 人机对话	—

1.3 数据处理软件

在瞬变电磁解释技术方面，一维反演和二维电阻率成像是较成熟、实用的方法，仍是目前瞬变电磁资料的常用解释手段。二维或三维瞬变电磁反演解释技术方面仍处于探索研究阶段，离真正实用阶段有相当大的距离。瞬变电磁的二维正演 20 世纪 80 年就有相关报道，由于纯二维问题，在瞬变电磁法中激发源为单条或两条无限长直导线，因此不具有实