

地电磁场探测及其研究前沿

何继善*

(中南工业大学, 长沙, 410083)

[摘要] 大地中存在多种形式的天然的或人工的电磁场, 研究它们的形成、发展规律和实际应用是地电磁学科的基本任务。现有的应用地电磁场进行探测的方法都是基于电磁场的稳态空间分布, 分辨率不高, 而且不能提供阻抗界面的性质。如能应用地电磁场的运动学和动力学特征进行探测, 则可使地电磁场的研究取得突破性进展。此外, 从方法上, 研究伪随机谱, 区分异常源性质, 研制全智能的多道、轻便仪器, 二维和三维数据处理与解释, 层析成像特别是频率不高的地电磁场数据的层析成像, 新的数学方法如小波交换、分形几何的应用等都是当前的研究前沿。

[关键词] 地电磁场, 垂向分辨率, 电磁测深, 激发极化, 运动学, 动力学

1 概述

地球表面的千姿百态和地球内部各种岩石的错综分布, 各种断层、裂隙、褶皱的存在, 地球内部压力、温度的差异, 以及各种地下介质的导电性、介电常数、导磁率和电学性质的千差万别, 使得地电磁场的发生、发展及分布均十分复杂。

地球是一个很大的导体, 但地球外的大气几乎是绝缘的, 而在 60 km 以上的电离层却是一层特殊的导电壳层, 它和地球表面形成了一个很有趣的波导。太阳风和地球磁场的相互作用, 激发起脉冲电磁波。由于与电离层中的等离子体碰撞的关系, 对于那些频率高于几赫兹的电磁波来说, 电离层几乎是不透明的。频率高的电磁波在通过电离层后将引起急剧的衰减, 到达地表的电磁波主要是在几赫兹以下, 其功率谱随着频率的降低而增强。

由于聚集在大气中的静电荷放电而形成雷暴闪电, 并形成一种在时间上是分立的随机的电磁脉冲群, 其视频率谱主要分布在音频范围。由于地表-电离层波导的作用, 雷电电磁场能量可以传播很远, 且较均匀地一直分布到距离雷暴中心很远的地方。

太阳风电磁场和雷暴电磁场一起形成了遍及地球表面的天然电磁场。由于通常都在距场源很远的地方进行接收, 因此, 天然电磁场的波前面接近平面, 常将它们视为平面波。但它们不是典型的平面波, 在同一个波前面上, 各处的振幅是不相等的。此外, 还可由许多其它原因形成地电场, 如地下金属矿体的电化学反应, 地下水在岩石中运移时各种离子的不同吸附作用, 植物根系的生物电作用, 岩石形变的压电效应, 以及地下人工管线的腐蚀等等, 它们大都只分布在局部范围。除天然场源外, 在地电场研究中, 还用接地电极或不接地回线造成人工场源。人工场源的波形可以是多种多样的, 归纳起来为两大类: 频率域和时间域。前

* 中国工程院院士。

本文于 1994 年 11 月 28 日收到。

者为不同频率的稳定的连续电磁波，用来研究地下介质的频率响应，后者为瞬时脉冲波，用来研究地下介质的瞬态响应。

地电磁场研究的结果可以解决许多科研、人类生产和生活中所提出的各种各样问题，如研究地球内部构造，寻找石油、天然气、煤田、金属和非金属矿、地下水等地下资源，修筑房屋、公路、桥梁、堤坝、机场、海港的地基探测，环境监测，灾害预测乃至寻找古墓址、文物保护等等，地电磁场的探测与研究都可发挥其十分独特而有效的作用。

2 地电磁场研究现状

在地电磁场的研究中，可以将其按内涵分为两方面：一是研究各类电磁场源的本质和它们存在和发展中的内在规律；另一方面则是探讨它们在科学研究、生产及生活中的应用。后者发展了一系列用于研究大地的电磁探测方法^[1,2]，如电磁测深法，激发极化法，自然电场法等。这些方法及其变种多达数十种，但可按下列方式归类：就场源而言，可分为天然场源（如大地电磁测深法）和人工场源（如充电法）两大类；就所依据的物理化学参数而言，主要是电阻率和电化学特性，前者包括各类电磁测深法，后者主要是激发极化法、极发曲线法和自然电场法；就测量方式而言，则可分为频率域和时间域两大类，分别研究电磁场的频率特性（如CSAMT法）和研究其时间特征（如TEM法）。这些方法已经在科学研究和国民经济中发挥了很大的作用。

然而，上述所有的电磁探测方法，几乎都有一个致命的弱点，那就是它们都是基于研究电磁场在空间分布上的稳态特性，并且主要是停留在线性系统。这样一来，导致两大缺点：其一是垂向分辨率不高。例如对于水平层状介质中探测低电阻率层而言，其深度与分辨尺度之比一般不大于10，也就是说在1 km以下难于分辨出100 m厚的导电层。高电阻率层的分辨率则更低。对于二维或三维地质体，其分辨率还与地质体的形状、产状（即地质体的空间赋存状态）有关，但总的来说一般不会高于水平层状介质。例如，在地面下有一球状空洞，其电阻率可以看作是无限大，是高电阻体的极限状态，如果用视电阻率法来寻找这一空洞，当视电阻率的测量误差为±5%时，那么当空洞顶的深度大于洞的直径0.35倍时，就很难发现它了。如果是一良导性球体，分辨率会好些，在上述条件下，发现此良导体的极限深度为其直径的0.575倍，可见其分辨率也是不高的；另一缺点是难于分辨阻抗面的性质。例如，当用电阻率法发现了地下低阻体引起的异常，那么这一低阻异常体究竟是什么？是地下水还是金属矿？或是地下金属建筑物？电阻率法本身无法回答。

导致这两大缺点的原因是因这些方法都是研究电磁场在空间上的稳态分布，而且在实际工作中是研究其在地表的分布。当地下存在低电阻率或高电阻率的异常地质体时，会使电磁场的空间分布发生改变。只有当这种改变使地表场的分布有足够强的异常，且此异常必须大于测量误差的三倍以上，方有足够的把握认定它确实是异常而不是误差，才能发现异常地质体的存在。而且这种改变与距异常地质体距离有关，距离越远，影响越弱，当弱到与测量误差可比或更小时，对地表场分布的影响就无法辨别了。由于是研究场的宏观分布，自然也就无法取得有关阻抗界面的详细信息。因此，只研究地电磁场在空间的稳态分布就不可能进一步提高地电磁场探测精度。

有一种误解，似乎像TEM这类方法，是在断电之后测量感应的二次场，因此不存在正常

场的影响，因而其垂向分辨率要高些。其实不然，因为从场的总体空间分布来看，在各测点上测得的二次场本身就包含了正常场，其分辨率与其他的电磁测深法也是相当的。之所以存在上述误解，是将一次场与正常场这两个不同的概念搞混了。

3 地电磁场研究的前沿

解决上述问题的有效途径就是将电磁波的运动学和动力学应用到地电探测中去。其原理是在地表激发电磁波向地下传播，达到某一波阻抗界面形成反射波返回地面，如果在地面能接收且识别此反射波，则可根据波在地下的旅行时间和波速精确地求出波阻抗界面的深度，这便是电磁波运动学的研究。它的应用可以使垂向分辨率大为提高。例如，当深度是1 km时，垂向分辨率可以提高2个数量级。电磁波动力学则是研究电磁波在传播过程中波形和强度的变化及其与地下介质分布的关系。所发射的电磁脉冲是一个复杂的波群组合体，它经过地下返回地面后的波形相对于入射波波形的变化是它在地下旅行的记录，是地下介质性质的综合反映。因此，详细研究电磁波动力学可为波阻抗界面的性质提供更多的信息。然而，由于地电磁波的传播速度大，激发波还未消失时，反射波已到达地面，而激发波强度比反射波要大1到几个数量级，因而，几乎无法识别出反射波，更谈不上详细地分析其波形，这就是为什么至今停留在电磁场空间分布稳态研究的主要原因。地质雷达虽已运用了运动学，但其探测深度只有几米。

近年来科学技术的发展，为突破这一难关带来了曙光。在总辐射能量为有限的条件下，一个 p 秒（微微秒）级的无载频电磁脉冲形成的电磁波有明显地类似于粒子的性质，它在时间和空间的高度集中性，可称为“电磁导弹”^[9]，具有一系列特殊优点。它具有极强的抗吸收能力，可将能量集中在某一最大辐射方向，且以任意慢的速度随距离衰减，并且还具有从接近直流到数十千兆赫的频谱。以电磁导弹做成的探地雷达将是地电观测的一项革命性突破，不仅大大提高了探测深度，且有很高的分辨能力，对低截面或强吸收目标的探测能力也将大为提高。实现电磁导弹式探地雷达的关键是 p 秒级甚至更快的大电流开关和兆瓦级的瞬时功率，这一技术现已进入实现时期。当然，困难仍然是很大的，例如， p 秒级脉冲虽已是很窄了，但与理想的窄脉冲相比，仍然很宽，其有效的抗吸收能力能够达到什么程度，即实际能探测多深仍是问题。而且，地下电性的局部不均匀性（即与探测对象尺度相比很小的不均匀性）和界面不够平滑对其传播和反射的影响也都是有待研究的问题。

尽管由于波速大，使得如何分辨电磁波的反射波是电磁波运动学和动力学研究的难点。然而，与弹性波相比，控制激发电磁波的波形，特别是重复激发相同波形电磁波却是容易实现的。从这一方面说，它为电磁波的运动学和动力学研究的突破提供了良好条件。

雷电形成的天然电磁场中，存在分立的窄脉冲群，它有类似电磁导弹的性质。然而雷电场源是随机的，既带来附加的问题也带来更多的信息。测定电磁波的旅行时间和分析入射及反射群的谱的变化，不但可以提高分辨率而且可以获得地层性质（如油、水或金属矿）的信息。

非线性电性的研究，特别是地电化学方法中非线性现象的研究可以提高对异常源性质的判断能力，至少在井中或矿山坑道中测量可以较快的实际应用。为了提高灵敏度和抗干扰能力，开展频率域中非线性的研究是十分重要的。

就测量仪器而言,以伪随机信号为基础的宽频观测系统、长延时的时间域系统、以及目前的8至10道扩展到1024道乃至更多道的全智能仪器,以形成同时的面积性观测,可以大大提高测量速度和测量精度,发现非同时测量所不能发现的物理和化学现象。

在地电磁场测量数据处理与反演解释中遇到许多困难,归纳起来有三:一是复杂地电条件下严密的正演解析极难得到;二是数据处理中抗干扰能力与分辨率之间的矛盾;三是反演的多解性与难于直观成象。

除了少数典型情况(如水平层状介质等)外,在复杂的地电条件下,定边界条件解麦克斯韦方程目前还几乎无法直接求解,因而难于得到各种条件下的正演解析结果,影响了研究者的视野。数值和物理模拟已在一定程度上缓解了这个问题。

目前地电磁场的数据处理方法极多,它们各有所长,在对实际数据的处理方面有一定成效。然而,现有的很多数据处理方法几乎都有一共同特点,即以各种形式滤波为基础。这类数据处理方法的共同弱点是分辨率与信噪比之间的矛盾,即提高信噪比必降低分辨率,而提高分辨率则又以降低信噪比为代价。

目前层析成像在地球物理中的应用已很热^[4,5]。地震波成像已有很多工作,尽管它也只用声波方程,有其近似性,但在电磁成像研究中,遇到了比地震波成像更大的难题。首先,低频电磁波是扩散方程而不是波动方程,更不是声波方程。因此,目前成像的已有研究成果用于电磁波成像时,还有很大距离,必须探求全新的方法。其次,目前在非线性方程线性化中,Born近似只能用于低对比度介质,而地下相邻介质的电阻率差异可达几个数量级,因而Born近似应该是不能应用的,因此还必须寻求其他的线性化途径。总之,根据电磁场本身特点研究新的成像途径已应列入日程。

新的数学方法包括小波变换与分形几何等的应用^[6],不但可以为地球物理数据处理提供新的解释参数,并在同时提高分辨率和信噪比、层析成像、以及分析大地对电磁波的色散衰减等方面提供新的可能的方法。

参 考 文 献

- [1] Nabighian M N (Editor). *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics*, Society of Exploration Geophysicists (U. S. A.), 1989.
- [2] 何继善. 伪随机三频激电法研究. *中国有色金属学报*, 1994, 4 (1) .
- [3] Wu T T. *Electromagnetic missiles*. *J. Appl. Phys*, 1985, 57 (1) .
- [4] Beard L P and Hohmann G W. *Subsurface imaging using approximate IP inversion*. 62nd Ann. , SEG, 1992.
- [5] He Jishan and Ren Baolin. *TEM imaging technique*, *Transactions of NFSOC* 1993, 3 (2) .
- [6] Daubechies I. *Ten lectures on wavelets*, Capital City Press, 1992.

GEOELECTROMAGNETIC FIELDS AND THEIR FRONTIERS OF STUDY

He Jishan

(*Central South University of Technology, Changsha 410083*)

Abstract In the earth there exist various forms of natural and artificial electromagnetic fields, the

study of whose formation, laws of development and practical application constitutes the fundamental tasks of the discipline of geoelectromagnetics. The currently applied methodologies of surveying electromagnetic fields are based on the steady state distribution of the electromagnetic fields. Their resolution is low and there is a lack of ability to provide the properties of impedance interface. If the kinetic and dynamic properties of geoelectromagnetic fields can be applied to the prospecting process, breakthroughs can be made in research. In addition, in terms of methodology, the present frontiers of research are pseudo random spectra, distinction of properties of anomalous fields sources, development of high intelligence, multichannel and portable instruments, processing and interpretation of two and three dimensions electromagnetic field data, computer tomography, and in particular, the computer tomography of low frequency electromagnetic field data, application of new mathematical method such as wavelet transform and fractics.

Key words geoelectromagnetic fields, vertical resolution, electromagnetic sounding, induced polarization, kinetics, dynamics

· 信息 ·

我国科技论文数继续保持增长势头

据中国科学技术信息研究所最近公布的《1993 年中国科技论文统计与分析》表明,按科学引文索引 SCI、工程索引 EI 和科学技术会议录索引 ISTP 统计,1993 年我国科技人员在国际上发表的期刊论文和会议论文共 20 178 篇,比上年增长 9.2%。按论文总数排序前三位的国家为美国、英国、日本,它们发表的论文总数分别占世界科技论文总数的 36.45%、7.89%、7.89%。我国的排序与去年相同,仍处于第 12 位,论文数占 1.82%。如按最能反映基础研究水平的 SCI 所收录的论文数统计,1993 年中国的论文数为 9 617 篇,处第 15 位,比上年增长 4.2%,占 SCI 收录论文总数的 1.28%。此外,1993 年我国科技人员在 1 218 种《中国科技论文统计源期刊》上共发表论文 101 983 篇,比上年增长 3.5%,其中在国家级、省部级基金和国外基金资助下产生的论文为 15 237 篇,占 14.94%。15 237 篇论文中,在国家自然科学基金资助下产生的为 9 559 篇,占 62.74%,数量上比上年增长约 10%,从一个侧面反映了基金投入的产出情况。

(综合计划局 沈新尹供稿)