第 1 章　引　言

20 世纪 50 年代初，苏联学者吉洪诺夫[1]（A.H.Тихонов）提出关于大地对天然电磁场的频率响应的三点假设，随后法国学者卡尼亚[2]（L.Cagniard）论证了他的前两条理论，早期大地电磁测深法（简称 MT）理论由此奠定。自 MT 方法问世以来，经过近 60 年的深入研究和广泛应用，已经发展成为电法勘探领域最成熟的物探方法之一。

1.1 大地电磁的发展及研究现状

当前社会经济对石油、天然气和矿产等资源的需求日益增加，对 MT 勘探的测量技术和处理方法的成效要求也越来越高。同时，随着仪器性能和反演成像技术的改进，MT 方法开始从区域普查工作向区块勘探甚至局部构造问题的方向发展。例如：用于工程、地热等高频段的大地电磁应用方法 AMT、CSAMT，用于研究建立地壳与上地幔结构和动力学模型的长周期大地电磁测量等（这里的 MT 指广义的大地电磁法）。由此，在现有的 MT 处理技术基础上，不断研究摸索出新的反演成像技术，从大量实测信息中提取出更为丰富的地电信息将是我们工作的重点。

全世界电磁法的发展已经有 100 多年的历史（石应骏、刘国栋、陈乐寿、傅良魁、王家映等），我国解放前在个别金属矿地区进行过电法勘探，在油气领域的勘探几乎为零（赵国泽，2007），我国大地电磁测深工作始于 60 年代初，1965 年中科院在西北地区开展了大地电磁实测工作，取得了我国第一批大地电磁测深资料；70 年代初，由于地震预报的需要，大地电磁测深工作在我国才真正开始起步，中国地震局在 1973 年成功地研制了 LH-1 型感应原理大地电磁测深仪，而后又研制了 SD-1 型数字大地电磁测深系统(国家地震局地质研究所大地电磁测深组等，1984)，并在我国的西北、华北和华南等地区开展了大量的测深工作。从上世纪 70 年代到如今，随着一些新算法的提出和电子计算机的广泛应用，大地电磁测深的数据处理有了突飞猛进的发展，形成了许多相对较成熟的技术。在 MT 观测的时间序列处理方面，引入小波理论和多尺度信号处理等方法（王绪本，1999，徐义贤，2000，赵国泽，2003 等）以减少大地电磁观测响应函数中的噪声。在瞬变电磁法中，对信号关断时间的改进和校正方法（白登海，2001），由于人们在处理大地电磁实测资料时假定地下的介质是无磁性的，传统的 MT 数据处理通常只是考虑以视电阻率为单参数的反演方法，但这种处理方法在火成岩或高磁性物质存在的地区就会受到磁导率的影响。

上世纪 70 年代中后期，由于张量阻抗分析方法的提出及应用，同时随着计算机技术的蓬勃发展，大地电磁测深无论在仪器研制，或是数据采集、处理技术

与反演、解释方法等方面的研究，都融合了当代先进的科学理论和高新技术。虽然从20世纪90年代后期开始，三维MT资料的处理解释是非常热门的研究课题，也有很多课题组或个人取得了相当大的进展，交错网格法等已成为大地电磁三维正演计算的主要方法之一（黄临平，2002，沈金松，2003，谭悍东，2003等），3D 正演技术正在逐步被应用于实测资料解释中，但二维正反演的研究还是需要我们不断的完善，尤其是从反演的效果来看仍然存在一些问题，主要因素包括资料误差、实际用于解释的资料不齐全（只用到视电阻率、相位甚至只用某一种单一极化资料）、极化方式的判别、走向角判断不准、正演时网格设计不合理、3D畸变影响等因素造成（徐世浙，2005）。

首先，大地电磁是地下深部结构探测研究的重要手段。MT 的理论形成后最先是在地壳上地幔结构探测中得到应用，我国也是首先将此种方法应用于南北地震带北段和华北平原盆地的探测研究（顾群，1980，国家地震局兰州地震研究所/地质研究所大地电磁测深组，1981），并在相对稳定区地壳结构、造山带或严重变形区、近代火山区或新生代裂谷区、强震区的地壳电性结构、地壳内低阻层的成因研究、上地幔过渡带的电性结构等方面取得了很多有意义研究成果。

其次，大地电磁方法在能源、矿产和工程勘探方面都发挥着重要的作用。由于电磁场和地壳电阻率被认为是对地震前兆反应最灵敏的物理量之一，MT 方法在地震等灾害的预测监测方面也有着很大的研究前景（赵国泽，2007）。

当前大地电磁方法研究的主要任务是提高其分辨率，提高分辨率大体有三种途径：第一是提高观测资料的精度和密度，第二是选择合适的电导率结构模型，第三是增加观测信息，利用多种大地电磁资料作联合反演。目前发展最快，也是最前沿的课题，就是MT反演成像问题。

MT 反演成像方法目前主要有三个研究分支：（1）传统的基于目标函数（通常为最小二乘法）极小的电阻率反演方法，目前比较流行的有Occam方法、快速松弛方法（RRI）、非线性共轭梯度法（NLCG）；（2）拟地震偏移的方法，如时间域大地电磁有限差分偏移法（于鹏等 1999）；（3）基于能量密度理论的概率成像方法（王绪本等 2002）。

从生产实践的要求来看，由于MT勘探要求同时了解定性（结构分布）和定量（岩石电阻率等）的地球物理信息，偏移成像和概率成像都不能完全满足其要求，且上述两个研究分支目前仍处于理论研究阶段。因此，目前在MT实际资料的解释方面，更迫切的是基于现有的电阻率反演方法的更深层的理解和改进，使得其更好的为MT勘探服务。

1.2 大地电磁反演中的一些问题

当今处理 MT 实测资料的主流方法仍然是电阻率反演。在二维反演中，比较经典的有 OCCAM 反演、快速松弛反演（RRI）、非线性共轭梯度反演（NLCG）等方法。OCCAM 反演（S.C.Constable 等，1987），在保证电性分布连续或光滑的条件下，寻求与实测数据拟合最好的地电模型，直到达到指定的拟合精度。该方法对初始模型依赖程度小，收敛稳定，并且成像效果良好。但其需要直接计算雅可比矩阵，反演速度极慢，这在一定程度上限制了其推广应用。快速松弛反演方法（J. T. Smith 和 J. R. Booker，1991）是 MT 快速反演的一个代表，该方法通过一个假设，把二维反演问题转化成一系列一维反演问题，从而避免了二维灵敏度的计算，提高了反演速度，但该方法对较复杂的地电剖面，反演效果较差。非线性共轭梯度方法（W. Rodi 和 R. L. Mackie，2001），突破了线性迭代反演的框架，直接对非二次的极小化问题求解，其模型序列由一系列沿着计算的搜索方向的线性搜索来确定。而且该方法利用线性系统的迭加原理以及格林函数的互易关系，通过整体计算雅可比矩阵与一个向量的乘积，极大的减小了计算工作量。但由于在每次迭代中，对模型的修正量不大，因此与 OCCAM 相比，其反演过程需要很多次迭代；而且模拟实验表明，其反演结果对初始模型有较大的依赖性。这些最优化迭代反演方法研究成果已经比较成熟，被广泛用于 MT 反演解释中。影响反演结果的因素很多，如反演网格密度、模型平滑度、拟合函数以及最重要的初始模型选择等等。相对其他直接反演方法而言，最优化反演是一个计算量很大的过程，而且并不能保证得到合乎地质解释的结果。为丰富 MT 解释的方法研究，作为一般最优化迭代反演的必要补充，必须研究计算速度相对较快又比直接反演精确的反演成像方法。

本论文依托于国家自然科学基金项目—电磁场概率成像（No.4074036）研究课题中已有的研究成果和后续工作以及国家自然科学基金项目—龙门山中段地壳及上地幔电性结构及动力学特征（No.40674035），借助我校自主研发的大地电磁 MTSoft2D 系列资料处理软件系统（王绪本等），在反演程序和资料预处理方面增加更多的功能和改进，使软件的处理应用能够适合更多地域情况的大地电磁实测资料。

1.3 研究思路及研究内容

值得我们关注的是，在 MT 实测数据中能够得到的参数可以达到十余种，可目前的大地电磁方法大多是选取视电阻率作为研究的参数。本课题的研究内容是当磁化率和电阻率同为参数变量时如何推导由 MT 数据同时反演电阻率和磁化率

的计算公式，然后利用成像技术得到视电阻率和磁化率的分布图像。对电阻率和磁化率之间的非线性关系采用前人所发展的数值算法进行简化处理，力求能够更好的处理观测数据与物性参数之间的非线性关系，并在有限元算法的基础上实现新方法的正演程序代码编写。本研究可以对大地电磁的处理解释提供一种新的途径，提高大地电磁实测资料的利用率，避免有用信息的浪费，减小多解性，提高大地电磁资料解释的精确度。大地电磁测深中的解释参数有很多，以磁化率为参数对 MT 解释增加了一种手段，并且它不增加另外的勘探成本。

在实际研究中我们考虑电阻率和磁化率同为参数变量的二维大地电磁的正演算法研究，对电阻率和磁化率参数之间的非线性关系进行数学方法的处理，以期能够达到在算法基础上进行反演方法的程序编写，实现同时反演电阻率和磁化率参数分布的二维反演方法。

本文主要完成的内容有：首先分别考察岩石的电阻率和磁化率及对大地电磁响应的影响。其次从麦克斯韦（James·Clerk·Maxwell）方程组出发编写电阻率和磁化率同为参数时的二维大地电磁正演计算程序。利用计算数值方法实现正演计算，对模型计算结果进行比较和分析，讨论磁化率对 MT 响应的影响。最后在已有的非线性共轭梯度反演算法程序的基础上进一步完善它的电阻率反演算法，加入磁化率参数变量信息进行公式推导和研究，在二维 NLCG 反演中，通过已有的 MTSoft 系列软件进行 MT 实测数据电阻率反演和磁化率参数改变时的影响研究。