



# 徐世浙院士文集

徐世浙 著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本文集收集了中国科学院院士徐世浙先生自 20 世纪 60 年代以来的大部分论著,它们代表了徐世浙院士在计算地球物理、古地磁、地震前兆预报、重磁位场延拓等领域的研究成果。

本文集可供地球物理专业大学生、研究生和科技人员阅读参考,也可作为应用数学专业师生的参考资料。

### 图书在版编目(CIP)数据

---

徐世浙院士文集/徐世浙著. —北京:科学出版社,2012

ISBN 978-7-03-035963-6

I. ①徐… II. ①徐… III. ①地球物理学-文集 IV. ①P3-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 260876 号

---

责任编辑:韩 鹏 张井飞/责任校对:刘小梅 钟 洋

责任印制:钱玉芬/封面设计:王 浩

**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>

**双 青 印 刷 厂 印 刷**

科学出版社发行 各地新华书店经销

2012 年 11 月第 一 版 开本:889×1194 1/16

2012 年 11 月第一次印刷 印张:46 1/2 插页:1

字数:1 146 000

**定价:298.00 元**

(如有印装质量问题,我社负责调换)

# 出版说明

中国科学院院士徐世浙先生是国际著名地球物理学家，在计算地球物理领域做出了卓越的贡献，并在国内外产生了深远的影响，从而在地学界享有盛誉。

本文集收集了徐世浙院士自 20 世纪 60 年代以来的大部分论著，它们代表了徐世浙院士在计算地球物理、古地磁、地震前兆预报、重磁位场延拓等领域的研究成果。因所收集论著源自多种学术期刊，且时间跨度大，各源刊格式标准可能不统一，本着尊重历史、忠于原著的原则，所用物理量单位、符号、图例、参考文献等尽量保留原文风貌，未做统一标准的处理。

诚愿以此纪念徐世浙院士从事勘探地球物理事业六十周年。

感谢滕吉文院士、杨文采院士欣然为本文集作序。

本文集由戴世坤、杨长福负责徐世浙先生文稿的收集、整理和初步编辑工作，李予国、张训华、严良俊对本文集的完成起了重要作用，刘颖、张钱江、赵慧、李刚、叶益信、王启、张秀丽、严波、罗鸣、徐震寰、蔡骥、王顺国、李昆、张汝玲、李鹏飞、陈铭、张虎、代小威、鲁瑶、聂松、卓武、蒋小兵、刘钟尹、黄登、段双敏等做了大量文字打印、图件清绘工作。

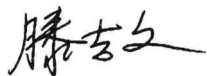


# 序 一

我和徐世浙教授是同时代的人。1952年，我们同时进入长春地质学院地球物理勘探系学习。当时分为两个班，我是甲班，他是乙班。他从一年级下学期就被选为班长，直至毕业。1956年他以优异成绩毕业并留校任教，当时年仅20岁。我与徐世浙教授相识、相交整整60年。回忆起来，他无论是在学术造诣方面还是在品德修养方面都很值得称赞，给我留下了极其深刻的印象。60年里，徐世浙教授严谨治学，在计算地球物理领域取得了卓越的成就。20世纪60年代中期，他创造性地提出用构制保角变换坐标网的方法，将数学上无法用许克变换的任意地形曲线变换为水平线，首次解决了任意地形磁场、重力场的曲线延拓和电阻率法二维地形改正问题，使地球物理位场的计算更加准确和科学，这对我国广大山区的地球物理资料的解释有重要意义。徐世浙教授是国内最早将有限元法用于地球物理勘探的学者之一，有效地解决了许多地球物理计算难题。首次解决了计算地球物理中如2.5维电场纵剖面电位的计算、电导率分层线性变化的点电源场的数值解、一维分层连续介质大地电磁场模拟和地形对大地电磁场的影响等难题。徐世浙教授是国际上最早将力学中的边界单元法应用于地球物理勘探的奠基人之一。20世纪80年代以来，徐世浙教授致力于边界单元法在地球物理勘探中的应用研究，解决了许多地球物理计算中的难题。国外用有限元法计算电阻率三维地形改正问题，需解一个含有50 000个以上未知数的线性方程组，用边界元法只需解含有不到100个未知数的线性代数方程组，效率提高几千倍，此项工作获得国内外知名学者的高度评价。过去没有面激发极化异常的数值计算方法，他用边界单元法解决了这个问题。在三维电阻率正演计算方面，他首先导出了适合于复杂性分布的三维电场的积分方程表达式，为边界单元法解决三维电场的数值计算提供了方法基础。他解决了大地电磁场三维地形影响的数值模拟难题。徐世浙教授还将边界元法应用在位场延拓与变换、磁异常和重力异常、大地电磁场模拟和地温场的地形影响模拟等方面。他的研究成果使我国在这一领域的成就居国际领先地位。他的三部计算地球物理系列专著受到国内外专家的高度评价。他的专著《地球物理中的边界单元法》是该领域国际上的首部著作，在国内出版后立即引起美国勘探地球物理学家协会的高度重视，被评价为“是对地球物理学的一个重要贡献”（摘自英文版序）。

60年里，徐世浙教授传道授业，培养了一大批优秀的学生。值徐世浙教授从事勘探地球物理学60周年之际，他的学生为表达对老师的诚挚敬意，收集整理老师的研究论文集结出版，既为总结老师的学术思想，也为我们留下宝贵的学术财富。我对本书的出版，表示衷心的祝贺。

中国科学院院士



2012年5月16日

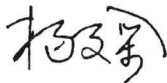
## 序二 坚守在应用地球物理学的学术家园

对于古今中外的科学家而言，苏格拉底的理念是他们最好的圣经。苏格拉底认为人的价值在于传播美德，由于不懂得美德，才导致了邪恶。最高的美德是智慧，对智慧的美德一无所知的生活是毫无价值的。对于科学家而言，他的价值体现在他的发现上，但他的发现却是他快乐的主要源泉。他们的快乐主要来自探索求知（即追求智慧）的过程，而不是结果。人生的价值就在于明白更多的东西，使自己变得更聪明，并从中取得更多的快乐。人人都在追求他心目中的“快乐”，而科学家追求的快乐只是一种过程，这种过程对于别人（或社会）来说是没有价值的。因此，爱因斯坦说<sup>①</sup>：“要追究一个人自己或一切生物生存的意义或目的，从客观的观点看来，我总觉得是愚蠢可笑的。”他接着说：“要是没有志同道合者之间的亲切感情，要不是全神贯注于客观世界——那个在艺术和科学工作领域里永远达不到的对象，在我看来，生活就会是空虚的。”很明显，探索客观世界中那些永远达不到的对象的过程，就是爱因斯坦人生的价值和快乐的主要源泉。

在徐世浙先生与我交往的30多年里，我一直感受到他执著地探索地球物理学中那些难题的过程给他带来的价值和快乐。他的确是一位把专业作为自己精神家园主体的科学家，而我也一直以有他这位知音和同行而自豪。在“文革”那些科学界暗淡无光的岁月里，他不但没有放弃地球物理学的学术研究，而且利用时间充裕的机遇，潜心钻研数理科学与地球科学之间尚未攻破的壁垒，以十年磨一剑的不屈不挠精神，把泛函分析和变分法的理论系统地应用到勘探地球物理学中来。在乌云消散、科学春天重新回归的1980年代，他一连出版了三部勘探地球物理学专著。他的著作不仅鼓舞我们这些中国同行去努力攀登科学高峰，而且为美国勘探地球物理同行们所折服，以致美国勘探地球物理家协会（SEG）为之翻译出版。当我收到他寄给我的书和傅承义先生写的序言时，敬仰之情油然而生，又为他高兴，又自愧不如。30年时光一晃而过，但学友的激励和共鸣使我终身不忘。

古人云：“圣人之于天下，耻一物之不知。”（见《法言·君子》）我欣赏这句话的内涵，但是并不认为个人可以通晓世界万物的奥秘。庄子云：“人生天地之间，若白驹之过隙，忽然而已。”与天地相比，人生过于短促，不可能涉猎太多的学问。但是，如果通过个人不懈地学习和思考，对客观世界了解得越多，钻研得越深，个人的生命就越有价值。科学家在思维的空间了解得越广，探索得越深，自由度就越大，也就愈有价值，愈加快乐。徐世浙先生就是这样一位有自信 and 快乐的科学家。60年来，他的著作丰硕，学生无数，为勘探地球物理科学和教育做出了巨大的贡献。在徐世浙先生治学六十周年之际，我挥毫写下这篇小序，以记友谊。

中国科学院院士



2012年3月23日

<sup>①</sup> 见阿尔伯特·爱因斯坦《我的世界观》

# 徐世浙院士生平

徐世浙院士 1936 年 10 月 2 日出生于浙江省台州市。1950 年下半年进入台州中学高中部学习。1952~1956 年在长春地质学院地球物理勘探系学习。1956 年 8 月至 1974 年任长春地质学院地球物理勘探系助教。1974~1983 年任中国科学技术大学助教、副教授。1984~1998 年任青岛海洋大学副教授、教授，历任海洋地质系主任、校学术委员会副主任、研究生部主任、地质地球物理研究所所长，同时聘为国务院学位委员会地球物理地质学科评议组成员、国家博士后流动站管理委员会专家组成员。1988~1997 年当选为山东省第七、八届人民代表大会常务委员会委员。1999 年至 2012 年 7 月任浙江大学地球科学系教授。2001 年当选为中国科学院院士。徐世浙院士是国际著名地球物理学家，在计算地球物理领域做出了卓越的贡献，并在国内外产生了深远的影响。

20 世纪六七十年代，徐世浙院士创造性地提出用构制保角变换坐标网的方法，将数学上无法用许克变换的任意地形曲线变换为水平线，在国内外首次解决了任意地形磁场、重力场的曲线延拓和电阻率法二维地形改正问题，使地球物理场的计算更加准确和科学。

地球物理勘探的解释是在观测面为水平的假设下进行的，但实际观测是在起伏的地形上进行的。起伏的地形对地球物理勘探观测结果形成严重的干扰，怎样消除地形的影响是十分重要的问题。20 世纪 50 年代，苏联学者提出用保角变换的方法进行电法地形改正与磁场、重力场的曲线延拓。但保角变换只能对几种特殊形状的地形，如三角形、半圆形等可以用解析函数表达的地形进行电法地形改正和重磁位场延拓。实际地形是复杂的，没有解析函数可以表达，所以这种方法不能用于实际资料解释。徐世浙院士基于保角变换理论，利用水槽中的电模型试验完成了数学上无法进行的保角变换，解决了二维任意地形的改正问题。1965 年和 1966 年，他先后在《地球物理学报》上发表论文《二度磁场、重力场解析延拓的实际方法》（《地球物理学报》，Vol. 14, No. 2）和《二度地形对电阻率法的影响》（《地球物理学报》，Vol. 15, No. 1）。这项成果在物探界产生了重要的影响。1979 年《地球物理学报》的《金属矿地球物理勘探三十年》一文中写道：“徐世浙同志提出了消除二度地形影响的保角变换法。”1989 年《物探与化探》上发表的《电法勘探的某些进展》一文中写道：“我国还发展了校正地形影响的转换法，这一方法的理论基础是由徐世浙在 60 年代中期奠定的。”徐世浙院士总结了复变函数在地球物理中的应用成果，分别出版了《保角变换在电法勘探中的应用》（地质出版社于 1977 年出版）和《地球物理中的复变函数》（科学出版社于 1993 年出版）。

20 世纪 80 年代以后，徐世浙院士致力于地球物理数值计算方法的研究，是国内最早将有限元法用于地球物理勘探中的学者之一。他首次解决了计算地球物理中的一些难题，如 2.5 维电场纵剖面电位的计算、二维大地电磁场地形影响等，出版了国内计算地球物理领域《地球物理中的有限单元法》（科学出版社于 1994 年出版）这一经典论著。

徐世浙院士还是国际上最早将力学中的边界单元法应用于地球物理勘探的学者之一，解决了地球物理数值计算中的许多难题。他对边界单元法的杰出贡献，通过出版该领域在国际上的首部著作——《地球物理中的边界单元法》（科学出版社于 1995 年出版）得以充分体现。

20 世纪 70 年代，边界单元法首先在力学中发展起来。80 年代初，徐世浙院士将边界单元法应用于地球物理数值计算，解决了地球物理数值模拟中的许多难题。例如：国外用有限元法计算电阻率三维地形改正问题，需解一个含有 50 000 个以上未知数的线性方程组，他用边界元法，只需解含有不到 100 个未知数的方程组，效率提高几千倍。论文在美国勘探地球物理学家协会杂志 *Geophysics*

(1988年第4期)上发表,编辑部的评价是:“此文涉及一个重要而困难的问题,文中所用的方法是最恰当的。”过去没有面激发极化异常的数值计算方法,徐世浙院士利用边界单元法解决了这个难题。在三维电阻率法正演计算方面,有限单元法与有限差分法都因计算量太大,而未能达到实际使用水平,徐世浙院士导出了适合于复杂物性分布的三维电场积分方程的简单表达式,为边界单元法解决复杂物性分布的三维电场数值计算提供了方法基础。大地电磁法的三维地形影响,是国内外尚未解决的计算难题,他用边界单元法解决了这一难题,论文发表在《中国科学》1997年D辑第4期上。徐世浙院士还将边界元法应用到位场延拓与变换、电阻率法、磁异常和重力异常、大地电磁场和地温场模拟等领域的地球物理数值计算中。徐世浙院士总结边界单元法的应用成果,出版了《地球物理中的边界单元法》(科学出版社于1995年出版),这是该领域国际上的首部著作。国内出版后,向美国勘探地球物理学家协会转让版权,翻译为英文 *The Boundary Element Method in Geophysics*, 于2001年出版。这是我国地球物理学家在国外出版的第二部专著。

我国从20世纪50年代开始,开展了古地磁研究工作,但直到80年代初,还没有一本国内的古地磁著作。徐世浙院士收集国外的古地磁资料,编著了我国第一部古地磁学专著《古地磁学概论》(地震出版社于1982年出版),有力推动了我国古地磁研究工作。

20世纪70~80年代,徐世浙院士在中国科学技术大学从事地震前兆预报研究。当时的中国正处于地震高发期,各种各样的土的、洋的、有用的、没有用的预报方法都被用来预报地震,其中有一种方法叫土地电,在全国应用最广。将两个电极插在地上,中间串联着电表,由电表的读数来预报地震。在海城地震的实际调查中,徐世浙观测到两组靠得很近的土地电表读数截然不同,脑海里留下了疑问,这与地震有什么关系呢?回校后,他带着这个问号立即开展了实验研究工作,最后证实了电表读数变化的主要原因不是地震,而是电极周围水分引起的电极电位的变化,与地震无直接联系。根据实验结果写出了几篇文章,在国内首先对土地电预报地震提出了质疑。其中一篇论文《土地电机制的实验研究》刊登在《地震》编辑部编《土地电机制研究文集》(1982年)的第一篇,国家地震局在厦门召开了土地电机制研讨会,根据该文集上的论文,经过讨论,否定了土地电的地震预报作用,从而撤销了全国上千个土地电地震预报站,为国家节省了一大笔无意义的支出。

20世纪90年代中后期,徐世浙院士又开辟了新的研究方向,提出位场曲面向下延拓的新方法——插值迭代法。实际工作中,重力场和磁场常常在起伏面上测量,而重磁资料的定量解释方法一般要求测量数据分布在一个平面上,因此需要将实测资料换算到一个平面上。重力场和磁场是位场,这项工作称为位场延拓。20世纪60年代,最早的位场延拓方法是保角变换法,它只能延拓二维位场。20世纪70年代开始,主要用等效源法进行三维位场的延拓。在等效源法中,必须解一个大型线性代数方程组,计算时间主要消耗在这上面。位场延拓的主要方法是快速傅里叶变换法,但它只能用于向上延拓,向下延拓的稳定性很差。位场向下延拓可以了解深部的地质情况,有十分重要的用途。2002年以来,徐世浙院士致力于曲面位场延拓新方法的研究,在国内外重要杂志上发表相关论文8篇。2007年,在总结前期工作的基础上,徐世浙院士提出了新的曲面位场向下延拓方法——插值迭代法(论文《曲面曲化平的插值-迭代法》,发表于2007年11月的《地球物理学报》上),计算速度比等效源法提高了几百倍,精度也有所提高,可用于大规模航磁资料的处理。

2005年以来,徐世浙院士提出了重磁资料反演视密度与视磁性的新方法。提出了基于高精度位场曲化平、切割分离、大深度位场向下延拓的迭代法视密度或视磁性反演方法,大大改善了反演效果和节省了计算时间。

位场(重力场、磁场)三维反演是个难度极大的课题,至今还没有大家公认的较好的位场三维反演方法。现有的位场三维反演技术的基本思路是将地下场源区域规则划分成若干小长方体单元,通过正演拟合反演这些单元的物性。这种反演思路的主要问题是:①计算时间特长,以天计算。②方程组的病态十分严重,解的稳定性很差。徐世浙院士三维反演方法的思路与前人的完全不同。在起伏地



形条件下,通过以下步骤完成反演,获得地下物性的近似分布:①用高精度的迭代法位场曲化平技术,将起伏地形上的位场延拓到平均水平面。②用切割法对平面上的位场进行不同深度层源的切割分离。③用大深度位场向下延拓的迭代法,将各个切割层在地面的位场下延至相应的深度。④用不均匀物性的棱柱体组合公式将位场反演为视密度或视磁性。这种反演方法的计算时间以分钟计算,解的稳定性很好。

2005年后,徐世浙院士将近十几年来创立的位场理论新技术用于油田和金属矿的多处实际资料处理,取得了良好的效果。同时徐世浙院士的最新位场理论研究成果受到了海军、航空等国防科研单位的广泛关注和高度重视;位场延拓技术是磁探艇、磁导航等国防科技的关键技术之一,徐世浙院士的位场延拓新技术在磁探艇、磁导航等领域取得了显著成效,为地磁导航技术发展作出了重要贡献,得到业界的高度认可。遗憾的是正当他满怀信心致力于祖国国防科技事业的时候,高龄且重病在身的他被病魔和长期的劳累所击倒。自从2008年底住进医院,他就再也没有离开过医院。即便如此,他仍继续科学研究,指导学生,直到鞠躬尽瘁。

徐世浙院士长期从事地球物理科研教学工作,以第一作者出版的中文专著有5部,在美国出版英文专著一部。以第一作者发表论文90余篇,获6项省部级奖以及全国科技大会重大成果奖,直接培养硕士研究生、博士研究生、博士后30余名。

徐世浙院士一生淡漠名利,任助教达22年之久,毫无怨言,在平凡的岗位上做出了不平凡的贡献。徐世浙院士生活俭朴,身为院士而依然乘公交车亲自去为本科生上课、监考。2006年,70高龄的他居然为了节省时间由骑自行车改骑电动自行车,直至2006年5月在亲自去售票点购买火车票的路上,终因身体反应不灵敏被撞断3根肋骨而住院,被医生和夫人强行禁止再骑车。徐世浙院士严于律己,从不向组织和单位提出个人要求,1968年婚后分居长达7年之久,依然安心工作。徐世浙院士意志坚强,即使2000年就被确诊为肝癌,并做了大手术,出院后坦然面对,顽强而默默地和病魔作斗争,从不在人面前表现得像癌症患者。他患上绝症后,也从未停止科学研究。随着时间的推移和年龄的增大,癌细胞扩散的速率也增加,必须手术的周期也由4年变成2年一次。2008年底由于工作过于劳累,罹患脑血栓,在参加浙江省地质学会会议期间在现场无法站立,住进医院。徐世浙院士在医院继续指导学生、在病床上编写程序、校对论文的情景无不为一校领导、医护人员、学生所感动。

徐世浙院士一生光明磊落,实事求是,敦厚朴实,谦虚谨慎,潜心研学,执求真理,赤诚报国,不愧为新中国知识分子科学报国、教育强国的优秀代表。他的治学精神和高尚品德以及为科学奉献的行为是广大科学工作者尤其是青年学者的光辉典范。

# 目 录

出版说明

序一

序二 坚守在应用地球物理学的学术家园

徐世浙院士生平

|                                      |     |
|--------------------------------------|-----|
| 薄层矿体上磁测的定量解释·····                    | 1   |
| 二度磁场、重力场解析延拓的实际方法·····               | 17  |
| 二度地形对电阻率法的影响·····                    | 26  |
| 根据磁测结果计算磁性矿体截面积的一种方法·····            | 36  |
| 浅谈压磁效应·····                          | 40  |
| 土地电与电极电位、接地电阻的关系·····                | 44  |
| 关于压磁效应和膨胀磁效应·····                    | 51  |
| 古地磁的应用·····                          | 57  |
| 二度直流电场的若干解答·····                     | 63  |
| 地电阻率前兆机制探讨·····                      | 81  |
| 地磁变化的不规则性对震磁效应的干扰·····               | 85  |
| 土地电机制的实验研究·····                      | 93  |
| 介绍位场向外延拓的一个简单公式·····                 | 101 |
| 评价地震预报效果的一种方法·····                   | 103 |
| 薄板磁性体磁测资料的一种解释方法·····                | 105 |
| 有限单元法及在物探中的应用简介·····                 | 112 |
| 电极电位对土地电的影响·····                     | 128 |
| 地极长期迁移的古地磁证据·····                    | 131 |
| 过滤电场对土地电的影响·····                     | 135 |
| 二维磁场反演的幂级数法·····                     | 137 |
| 磁场垂直分量 $Z$ 与水平分量 $H$ 互相换算的有限单元法····· | 151 |
| 应用有限元法计算磁各向异性体的磁异常·····              | 155 |
| 应用有限元法进行二维磁场计算、上延和换算·····            | 160 |
| 厚板磁性体反演的幂级数法·····                    | 170 |
| 二维分块均匀物体的重力异常的计算·····                | 176 |
| 用边界单元法计算任意形体的重力异常及其导数·····           | 181 |
| 水平地形三维电场的边界单元解法·····                 | 191 |
| 点源二维地电剖面的边界单元解法·····                 | 197 |
| 用有限元法计算二维重力场垂直分量及重力位二阶导数·····        | 208 |
| 三维变密度体重力异常的正演·····                   | 215 |
| 二维各向异性地电断面大地电磁场的有限元解法·····           | 218 |
| 边界单元法原理及其在地球物理勘探中的应用简介·····          | 226 |

|                                                                                                     |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 任意形状均匀磁化体磁异常的计算·····                                                                                | 236 |
| 三维地形均匀各向异性岩石点电源电场的边界单元解法·····                                                                       | 242 |
| 三维地形上点电源电场的边界单元解法·····                                                                              | 249 |
| 水平地形三维地质体激发极化异常的计算·····                                                                             | 254 |
| 地形对大地电磁勘探的影响·····                                                                                   | 263 |
| 电导率分段线性变化的水平层的点电源电场的数值解·····                                                                        | 270 |
| 水平地形二维地电断面点源电场的正演·····                                                                              | 276 |
| 电阻率法点电源二维地形改正的方法与实践·····                                                                            | 284 |
| 二维良导体的电阻率及面激发极化异常的计算·····                                                                           | 287 |
| 计算任意形体磁异常的边界元法·····                                                                                 | 296 |
| Quantitative Estimation of an Annual Variation of Apparent Resistivity ·····                        | 309 |
| 起伏地形二维位场上延与换算的边界单元法·····                                                                            | 315 |
| 海山磁性之反演·····                                                                                        | 319 |
| 起伏地形下二维电阻率异常的正演·····                                                                                | 323 |
| Two-Dimensional Magnetotelluric Modeling by the Boundary Element Method ·····                       | 326 |
| 点源二维各向异性地电断面的直流电场有限元解法·····                                                                         | 341 |
| 点电源二维电场问题中傅氏反变换的波数 $k$ 的选择·····                                                                     | 348 |
| An Integral Formulation for Three-dimensional Terrain Modeling for Resistivity Surveys ·····        | 353 |
| 溶洞视电阻率异常计算·····                                                                                     | 363 |
| 电阻率法二维地形改正的地质效果·····                                                                                | 365 |
| 多域地电断面均匀电场边界元法正演·····                                                                               | 369 |
| 复杂地电条件下点源三维电阻率模拟的新方法·····                                                                           | 375 |
| 磁场总梯度切线法反演二维磁性体的参数·····                                                                             | 382 |
| 用边界单元法进行保角变换的数值模拟·····                                                                              | 391 |
| 海山磁性反演精度的研究·····                                                                                    | 394 |
| 非均匀磁化的海山磁性的反演·····                                                                                  | 400 |
| The Effect of Two-dimesional Terrain With Point Source on Resistivity Surveys ·····                 | 405 |
| 用边界单元法模拟二维地温场的地形影响·····                                                                             | 411 |
| 边界单元法中的基本解——评王坚强同志的论文《三维电阻率模拟的边界元方法》·····                                                           | 414 |
| 电阻率法中求解异常电位的有限单元法·····                                                                              | 417 |
| 电阻率测深一维反演的曲线对比法·····                                                                                | 421 |
| 电导率分层连续变化的水平层的大地电磁正演·····                                                                           | 425 |
| The Curve Comparison Method for MT Inversion of One-Dimensional Continuous Medium ·····             | 431 |
| 大地电磁一维连续介质反演的曲线对比法·····                                                                             | 439 |
| 电导率分块连续变化的二维 MT 有限元模拟 (I) ·····                                                                     | 445 |
| 电导率分块连续变化的二维 MT 有限元模拟 (II) ·····                                                                    | 455 |
| 垂直断层附近三维不均匀体点源电场的边界单元法·····                                                                         | 459 |
| Computation of Potential on Longitudinal Sections in a 2-D Electric Field with a Point Source ····· | 464 |
| 点源二维电场中纵剖面上电位的计算·····                                                                               | 474 |
| Terrain Correction for Uniform Field in Resistivity Surveys ·····                                   | 482 |
| 用边界元法模拟三维地形对 MT 场的影响 ·····                                                                          | 491 |
| Modeling of 3-D Terrain Effect an MT Field Using BEM ·····                                          | 494 |

|                                                                                                                                    |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Numerical Modeling of 3-D Terrain Effect on MT Field .....                                                                         | 498 |
| 大地电磁场三维地形影响的数值模拟.....                                                                                                              | 505 |
| 大地电磁 $H_z$ 型波二维地形改正的方法与效果 .....                                                                                                    | 511 |
| Modelling the 2D Terrain Effect on MT by the Boundary-element Method .....                                                         | 515 |
| A Boundary Element Method for 2-D DC Modeling with a Point Current Source Resistivity .....                                        | 525 |
| Selection of the Wavenumbers $k$ Using an Optimization Method for the Inverse Fourier Transform in 2.5D Electrical Modelling ..... | 535 |
| Calculation of Electrical Potentials along a Longitudinal Section of a 2-D Terrain .....                                           | 541 |
| 起伏地形位场快速延拓新方法.....                                                                                                                 | 550 |
| A New Method for Continuation of 3D Potential Fields to a Horizontal Plane .....                                                   | 556 |
| 将航磁异常从飞行高度向下延拓至地形线.....                                                                                                            | 563 |
| 切割法在陆东地区磁异常解释中的应用.....                                                                                                             | 567 |
| 位场延拓的积分-迭代法 .....                                                                                                                  | 571 |
| 位场大深度向下延拓.....                                                                                                                     | 578 |
| Modeling the 3D Terrain Effect on MT by the Boundary Element Method .....                                                          | 582 |
| Surfer 和 Grapher 在地球物理位场延拓可视化软件开发中的应用.....                                                                                         | 589 |
| 从航磁资料延拓出海面磁场.....                                                                                                                  | 596 |
| 迭代法与 FFT 法位场向下延拓效果的比较 .....                                                                                                        | 602 |
| 对油气藏潮汐重力勘探的探讨.....                                                                                                                 | 606 |
| 复电阻率测井的数值模拟研究.....                                                                                                                 | 614 |
| 国外大地电磁研究现状.....                                                                                                                    | 620 |
| 含气泥质砂岩频散特性的实验研究.....                                                                                                               | 626 |
| 基于位场分离与延拓的视密度反演.....                                                                                                               | 630 |
| 泥质砂岩复电导率模型研究.....                                                                                                                  | 636 |
| 泥质砂岩复电阻率的频散特性实验.....                                                                                                               | 640 |
| 频率域航磁总场与梯度分量的转换研究.....                                                                                                             | 648 |
| 普光气田重力异常的视密度反演.....                                                                                                                | 658 |
| 三维地形大地电磁场的边界元模拟方法.....                                                                                                             | 664 |
| 视密度反演在东海及邻区重力异常解释中的应用.....                                                                                                         | 670 |
| 位场曲化平的插值-迭代法 .....                                                                                                                 | 678 |
| 位场向下延拓的波数域迭代法及其收敛性.....                                                                                                            | 682 |
| 位场向下延拓的迭代最小二乘法.....                                                                                                                | 690 |
| 位场向下延拓迭代法收敛性分析及稳健向下延拓方法研究.....                                                                                                     | 698 |
| 新疆色尔特能地区视密度和视磁性的反演.....                                                                                                            | 706 |
| 岩石复电阻率的“U”形曲线 .....                                                                                                                | 712 |
| 重力归一化总梯度的稳定解法.....                                                                                                                 | 717 |
| 重力异常三维反演——视密度成像方法技术的应用.....                                                                                                        | 724 |



# 薄层矿体上磁测的定量解释\*

**摘要** 宽度小于顶部埋藏深度的层状矿体,在磁法定量解释中,可以看成“无限薄”的层状矿体。正因为它是“无限薄”,我们可以找到比较简单的计算产状的方法,而且其中某些方法与一般认为使磁测解释复杂化的因素-倾斜磁化的方向关系极小。

对于大多数接触式铁矿来说,一般符合“无限薄层状”条件。在这类矿床上,地质要求物探解决的产状要素一般是埋藏深度、矿体的倾向,在条件良好时,还要求计算矿体的储量。下面我们来介绍几个产状的解释方法。

## 1 走向与下延很大,倾斜磁化矿层求埋藏深度和倾角的方法

### 1.1 求埋藏深度 $h$ 的方法

#### 1) 方法

在所测得的曲线极大与极小之间找出一一点  $X_{\frac{1}{2}}$ ,使它的磁场  $Z_{\frac{1}{2}}$  等于极大值与极小值的代数平均值。即  $Z_{\frac{1}{2}} = \frac{1}{2}(Z_{\max} + Z_{\min})$ 。这一点  $X_{\frac{1}{2}}$  与极大值  $X_{\max}$  的距离近似等于深度,如图 1 所示,即

$$h = |X_{\frac{1}{2}} - X_{\max}| \quad (1)$$

#### 2) 方法的应用条件

- (1) 既适于直立磁化,直立矿层;也适于斜交磁化,倾斜矿层;
- (2) 既可用于  $Z$  曲线的解释,也可用于  $H$  曲线的解释;
- (3) 与正常场的选择无关;
- (4) 要求矿体的宽度小于埋藏深度;
- (5) 要求矿体的下延大于埋藏深度的 4 倍以上;
- (6) 要求矿体的走向大于埋藏深度的 3 倍以上。

在上述条件下,该方法求深度的误差在 20% 左右。

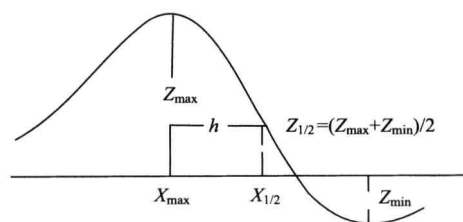


图 1

#### 3) 证明

(1) 适合于斜交磁化与倾斜矿层的证明:

埋深  $h$ , 宽度  $2b$ , 倾角  $\alpha$  的矿层, 在磁化强度  $I$ , 磁化方向与层面夹角  $\beta$  的情况下, 磁场的公式是

$$Z = 4bI \sin \alpha \frac{\cos(\theta + \beta)}{h} \cos \theta \quad (2)$$

式中,  $\theta$  的意义如图 2 所示。

磁场在  $X$  方向的微商是

\* 论文发表在《长春地质学院学报》, 1962, 作者为徐世渐

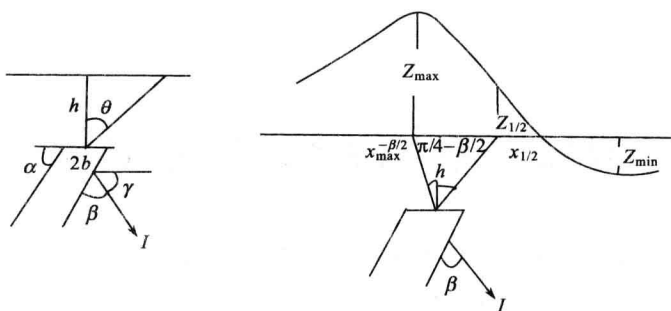


图 2

$$\frac{dz}{dx} = -4bI \sin \alpha \frac{\sin(\beta + 2\theta)}{h^2} \cos^2 \theta \quad (3)$$

因此,当  $\theta = -\frac{\beta}{2}$  或  $\theta = -\frac{\pi - \beta}{2}$  时,  $\frac{dz}{dx} = 0$ , 即磁场达到极值,前者相当于极大,后者相当于极小。分别代入式(2),得到

$$Z_{\max} = \frac{4Ib \sin \alpha}{h} \cos^2 \frac{\beta}{2} \quad (4)$$

$$Z_{\min} = -\frac{4Ib \sin \alpha}{h} \sin^2 \frac{\beta}{2} \quad (5)$$

将式(4)和式(5)相加,得到

$$Z_{\max} + Z_{\min} = \frac{4Ib \sin \alpha}{h} \cos \beta \quad (6)$$

在式(1)中令  $\theta = \frac{\pi}{4} - \frac{\beta}{2}$ , 这条射线相应于地面某点  $X_{\frac{1}{2}}$ , 将  $\theta$  代入式(1)中,得到  $X_{\frac{1}{2}}$  的磁场

$$Z_{\frac{1}{2}} = \frac{2Ib \sin \alpha}{h} \cos \beta \quad (7)$$

比较式(6)、式(7),我们有

$$Z_{\frac{1}{2}} = \frac{1}{2} (Z_{\max} + Z_{\min}) \quad (8)$$

即  $X_{\frac{1}{2}}$  的磁场是极大值与极小值的平均值。现在我们求这一总  $X_{\frac{1}{2}}$  与极大点  $X_{\max}$  的距离

$$X_{\frac{1}{2}} - X_{\max} = h \tan\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\beta}{2}\right) - h \tan\left(-\frac{\beta}{2}\right) = h \left[ \tan\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\beta}{2}\right) + \tan\left(\frac{\beta}{2}\right) \right] \quad (9)$$

将不同的  $\beta$  值代入式(9)中,得到表 1。

表 1

| $\beta$          | 0   | 15°     | 30°     | 45°     | 60°     | 75°     | 90° |
|------------------|-----|---------|---------|---------|---------|---------|-----|
| $X_i - X_{\max}$ | $h$ | $0.90h$ | $0.86h$ | $0.83h$ | $0.86h$ | $0.90h$ | $h$ |

当  $\beta$  值取  $90^\circ \sim 360^\circ$  中的值时,  $X_{\frac{1}{2}} - X_{\max}$  在上列数值中循环。

如果我们容许求埋藏深度的误差在 20% 左右,我们可以近似地取

$$h = |X_{\frac{1}{2}} - X_{\max}| \quad (10)$$

显然,该公式与磁化方向无关。

此外,因为式(9)中的  $X_{\frac{1}{2}} - X_{\max}$  只与  $\beta$  有关,而与矿体倾角  $2$  无关,因此,式(10)亦与矿体倾角无关。

(2) 适合于  $H$  曲线的证明。

现在我们来证明磁化方向为  $\beta$  的  $H$  曲线与磁化方向为  $\beta+90^\circ$  的  $Z$  曲线完全相同, 见图 3 即

$$H_{(\beta)} = Z_{(\beta+90^\circ)} \quad (11)$$

$H$  和  $Z$  的下脚标只表示磁化的方向, 没有其他意义

根据磁场和重力位的关系, 我们有

$$H_\beta = K \frac{\partial^2 \mu}{\partial x \partial (\beta)} = K \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{\partial \mu}{\partial \beta} \right] \quad (12)$$

式中,  $\mu$  为矿体的重力位;  $\partial(\beta)$  表示在  $\beta$  方向的微分,  $K$  是重力场和磁场之间的比例系数。将  $\beta$  方向的微分化为坐标轴的微分, 就有

$$H_\beta = K \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial \mu}{\partial x} \sin \beta + \frac{\partial \mu}{\partial z} \cos \beta \right) \right] = K \left[ \frac{\partial^2 \mu}{\partial x^2} \sin \beta + \frac{\partial^2 \mu}{\partial x \partial z} \cos \beta \right] \quad (13)$$

同理, 将  $Z_{(\beta+90^\circ)}$  写成类似的形式

$$Z_{(\beta+90^\circ)} = K \frac{\partial^2 \mu}{\partial x \partial (\beta+90^\circ)} = K \left[ \frac{\partial^2 \mu}{\partial x \partial z} \cos \beta - \frac{\partial^2 \mu}{\partial z^2} \sin \beta \right] \quad (14)$$

因为对二度矿脉来说,  $\frac{\partial^2 \mu}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \mu}{\partial z^2} = 0$  即

$$\frac{\partial^2 \mu}{\partial x^2} = -\frac{\partial^2 \mu}{\partial z^2} \quad (15)$$

将式(15)代入式(14)并与式(13)比较, 得到式(11)。

因此, 可以把磁化方向为  $\beta$  的  $H$  曲线看成磁化方向为  $\beta+90^\circ$  的  $Z$  曲线。我们在前面已经证明了公式(1)的求  $h$  方法是适用于任何磁化方向的  $Z$  曲线, 所以它也适于任何磁化方向的  $H$  曲线。

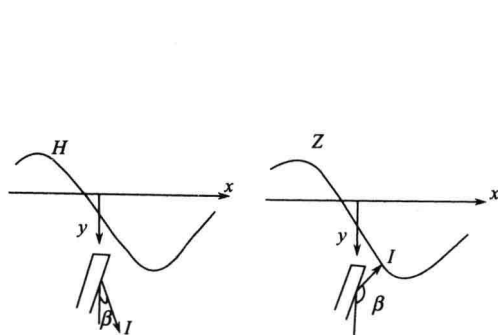


图 3

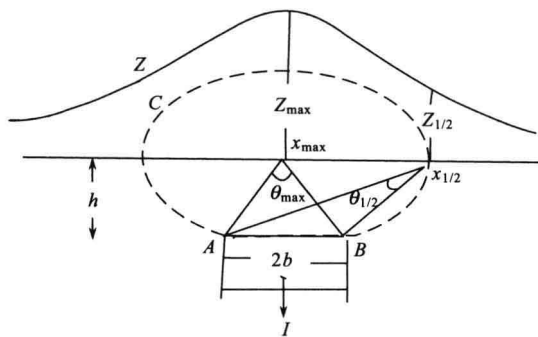


图 4

(3) 与正常场选择无关证明

从图 1 可以看到:  $X_{\frac{1}{2}}$  的磁场恰好在极大值与极小值的中间, 因此, 即使正常场改变了,  $X_{\frac{1}{2}}$  的位置是不变的。例如: 原来的  $Z_{\max} = 1000\gamma$ ,  $Z_{\min} = -200\gamma$ , 则  $X_{\frac{1}{2}}$  的磁场  $Z_{\frac{1}{2}} = 400\gamma$ , 如果正常场上升  $200\gamma$ , 则新的极大值、极小值和  $X_{\frac{1}{2}}$  点的磁场分别为  $Z_{\max} = 800\gamma$ ,  $Z_{\min} = -400\gamma$ ,  $Z_{\frac{1}{2}} = 200\gamma$ , 这时  $X_{\frac{1}{2}}$  的磁场仍旧符合  $Z' = \frac{1}{2} |Z'_{\max} + Z'_{\min}|$ , 因此  $X_{\frac{1}{2}}$  的位置是不变的。于是  $|X_{\frac{1}{2}} - X_{\max}|$  亦不变化。

(4) 矿体宽度条件的证明

宽度  $2b$  的厚矿层, 在顺层磁化时, 磁场公式为

$$Z = 2I\theta$$

式中,  $\theta$  是观测点对矿顶边缘  $A, B$  张的角度。

所以它的等磁力线(即  $\theta = \text{常数}$  的那些点的几何轨迹)是通过矿顶边缘二点  $A, B$  的圆。若有某圆  $C$  的圆心在  $X_{\max}$  上, 则根据几何上关于圆心角( $\theta_{\max}$ )和圆周角( $\theta_{\frac{1}{2}}$ )的定理有

$$\theta_{\frac{1}{2}} = \frac{1}{2}\theta_{\max}$$

所以  $X_{\frac{1}{2}}$  点的磁场强度是  $X_{\max}$  点磁场强度的一半, 即

$$Z_{\frac{1}{2}} = \frac{1}{2}Z_{\max}, \text{ 又因为 } X_{\max} \text{ 是圆心, 所以}$$

$$|X_{\frac{1}{2}} - X_{\max}| = \overline{X_{\max}A} = \sqrt{h^2 + b^2}$$

当  $2b < 1$  时,  $|X_{\frac{1}{2}} - X_{\max}| < 1.12h$ 。

所以宽度小于埋深的矿体用公式  $|X_{\frac{1}{2}} - X_{\max}|$  求深度的误差小于 12%。

#### (5) 矿体下延条件的证明

因为下延有限矿体的磁场公式比较复杂, 所以要从数学上来推导公式  $h = |X_{\frac{1}{2}} - X_{\max}|$  的误差是有困难的。我们这里只好用理论曲线实验的办法来推导误差。

作为下延为埋深 4 倍的理论曲线(走向无限), 如图 5 所示, 量出  $|X_{\frac{1}{2}} - X_{\max}| = 0.9h$ , 如果取  $h = |X_{\frac{1}{2}} - X_{\max}|$ , 则误差在 10% 左右。对于  $\frac{2l}{h} > 4$  的矿体误差将小于此数。

#### (6) 矿体走向条件的证明

我们同样用理论曲线实验的办法来求式(1)的误差。作出走向为埋深 3 倍的理论曲线(矿体下延无限, 剖面通过极线的中点), 如图 6 所示, 量出  $|X_{\frac{1}{2}} - X_{\max}| = 0.9h$ , 如果取  $h = |X_{\frac{1}{2}} - X_{\max}|$ , 则误差在 10% 左右, 对于  $\frac{2l}{h} > 3$  的矿体, 其误差将小于此数。

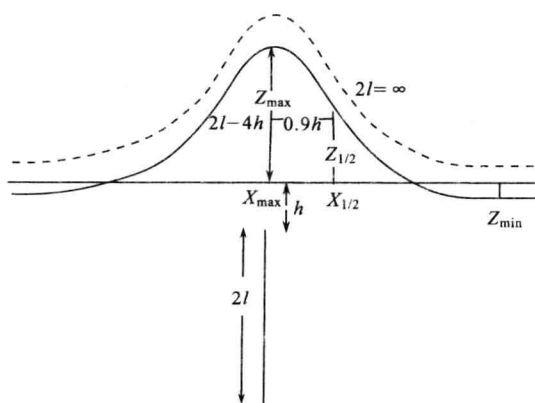


图 5

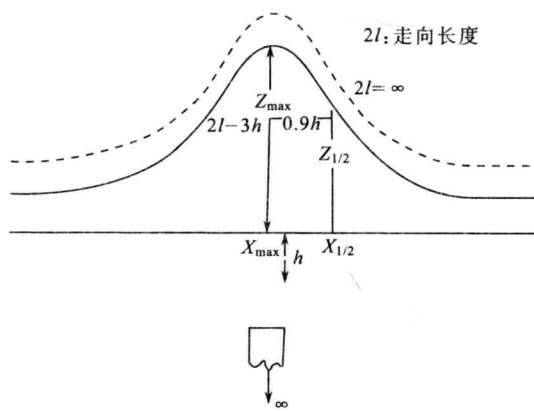


图 6

## 1.2 求倾角 $\alpha$ 的方法

在谈计算方法之前, 我们首先证明一个问题: 单单利用磁测曲线是求不出矿体倾角的。例如, 图 7 中三种倾向的矿体, 由于磁化方向与层面平行(顺层次化), 其磁场曲线都是对称的。

此外,我们从磁场公式(2)也可以看出,角度  $\alpha$  是以  $4bI\sin\alpha$  之积出现在因子中,所以即使  $\alpha$  不同,而  $4bI\sin\alpha$  保持不变,则产生完全相同的磁场曲线,所以单单根据曲线不知道矿体究竟向哪个方向倾斜,只有知道磁化方向后,才能知道矿体的倾向。

应该指出:在实际工作中,有人单单根据磁力线两侧不对称的程度(或根据那一侧出现负值),而不考虑磁化方向就去推断矿体的倾角,这在理论上是没有任何根据的。实际上,磁场曲线两侧的不对称性只取决于磁化方向与层面的夹角  $\beta$ ,我们从曲线上也仅能求出  $\beta$ ,只要再知道磁化方向与水平面的夹角  $\gamma$  后才能用公式(图 2)。

$$\alpha = \pi - (\beta + \gamma) \quad (16)$$

算出矿层的倾角。

一般来说:磁化方向与感应磁性、剩余磁性和消磁作用有关,所以要知道  $\gamma$  角,必须预先知道这些因素的影响。解决这个问题不是很简单。本文不准备讨论这个问题,现在我们假定  $\gamma$  是已知的,仅仅研究根据曲线求  $\beta$  的办法。

在一般求  $\beta$  的方法中,常常利用  $\beta$  与极大值、极小值的相对关系来进行。例如已有的公式

$$\beta = \arccos \frac{|Z_{\max}| - |Z_{\min}|}{|Z_{\max}| + |Z_{\min}|} \quad (17)$$

就是这样的公式。

但是实际上由于(1)极小值测定的误差较大;(2)极小值受正常场选择的影响大;(3)极小值受相邻矿体的影响大;(4)极小值受矿体下端有限的影响大,所以式(17)带来了较大的误差。

例如图 8 中有一顺层磁化的矿体,由于下延有限( $\frac{2l}{h}=3$ )出现了负值。根据式(17)计算结果,得到  $\beta=52^\circ$ ,但是实际的  $\beta=0^\circ$ ,为了减小这种误差,我们建议利用  $\beta$  与曲线两侧不对称的关系来进行,这个方法是,在曲线上做三条切线(两条在拐点处,一条在极大点处见图 9),量出  $m_1$  和  $m_2$ ,代入公式

$$\beta = 2\left(\arctan \frac{m_1}{m_2} - 45^\circ\right) \quad (18)$$

即可求出  $\beta$ 。公式亦是一个近似公式,在矿层下延无限时, $\beta$  的误差一般只有几度。对于图 8 中下延有限的情况,用式(18)求出误差为  $10^\circ$ ,这要比式(17)求出的结果误差小许多。

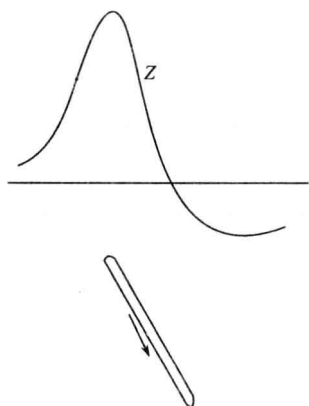


图 8

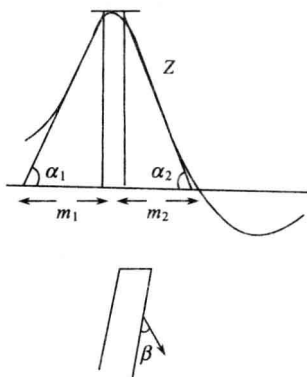


图 9

下面我们来证明这个公式。

从图 9 中可以看到: