

磁异常 共轭解释理论与方法

CIYICHANG GONG'E JIESHI LILUN YU FANGFA

晏月平 蔡家雄 戴前伟 著

地质出版社

磁异常共轭解释理论与方法

晏月平 蔡家雄 戴前伟 著

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本书介绍了基层地球物理工作者在多年工作经验的基础上提出并实现的一种地球物理反演解释方法,适用于复杂磁场环境的反演解释。全书主要由正演模型及反演方法两个主要部分组成,分为7章。第1章为绪言;第2章介绍了磁异常共轭解释方法的正演模型;第3章至第6章介绍了磁异常共轭解释方法的理论依据,其中第3章介绍了共轭解释的理论基础;第4、第5章介绍了共轭解释方法体系及优化解释结果的关键技术;第6章结合生产实例介绍了磁异常共轭解释的适用范围、实现过程和应用效果;第7章为总结与展望。

本书可供从事地球物理反演研究及野外生产的有关工作者参考。

图书在版编目(CIP)数据

磁异常共轭解释理论与方法 / 晏月平等著. —北京:
地质出版社, 2014. 1

ISBN 978-7-116-08715-6

I. ①磁… II. ①晏… III. ①磁异常-研究 IV.
①P318.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 017284 号

责任编辑: 吴宁魁

责任校对: 关风云

出版发行: 地质出版社

社址邮编: 北京海淀区学院路 31 号, 100083

电 话: (010) 82324513 (编辑室)

网 址: <http://www.gph.com.cn>

传 真: (010) 82310759

经 销: 北京中地金土图书发行有限公司

电 话: (010) 82324508, (010) 82324556

印 刷: 北京地大天成印务有限公司

开 本: 787mm × 960mm $\frac{1}{16}$

印 张: 9.25

字 数: 150 千字

版 次: 2014 年 1 月北京第 1 版

印 次: 2014 年 1 月北京第 1 次印刷

定 价: 30.00 元

书 号: ISBN 978-7-116-08715-6

(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)

第一作者简介

晏月平，男，获地学类博士学位。现供职于湖南省有色地质勘查局二四七队，兼职省级以上多个地学专业学会常务理事、副主任、委员等。先后在桂林冶金地质学院、武汉大学、中南大学攻读学位。从事地球物理勘查工作近30年，工作项目遍及全国各主要成矿区带，涉及区域地质、矿产、水工环等多个领域，曾到非洲加纳主持该国全国性地质考察近4个月。编制中型以上地球物理勘查成果报告近40份，其中含2个综合性研究项目和多个国外矿产勘查项目。发表科研论文10多篇。湖南省“十一五”找矿成果获奖项目中，有5个项目的物探工作由作者负责完成。因在找矿上的成绩，曾获九三学社中央委员会优秀社员荣誉称号，以及湖南省人民政府、中国有色金属工业协会找矿成果二等奖各一次。近年来，侧重于磁法、电法找矿方法研究，在生产实践中取得了较好的应用效果。

序

磁异常共轭解释方法旨在揭示以往磁异常研究中遗留的空白，以图形的共轭变换为基础，依据磁异常剖面与平面特征正反演递进研究，建立起完全适应于自然界中复杂磁异常的解释系统。

磁异常解释实践必然会遇到多组构造控制形成的不同方向、不同埋深、不同产状的多个磁性体在恶劣地形中产生复杂异常的“异向问题”。该类问题之所以被遗留成为研究领域的空白，原因可能是多方面的。其主要原因理应是上述具有多组磁化特征的磁性体组成的叠加异常，难以在一组解释方法中得以解决。若将内含不同磁化特征复杂磁异常的“异向问题”简化为磁化特征一致的“同向问题”加以处理，其结果在多数情况下是不可信的。可见，开拓“异向问题”研究，提出系统的解释体系，具有重要的现实意义。

拟定偏位定律与发现聚焦原理是建立磁异常共轭解释体系的理论基础。偏位定律确保了平面异常中不同位置、不同方向的解释剖面均可以给出相同精度水平的反演结果。“聚焦解释”确保了同一剖面异常中不同埋深磁性体均可以获得相同精度水平的反演结果；简言之，磁异常共轭解释体系是为三维空间内设计的均衡高精度解释系统。有理由指出，偏位定律与聚焦原理具有重要的理论意义。

磁异常共轭解释方法为研究复杂异常建立了统一可变的模型基础，提出变形函数，在修定薄板模型的基础上，演化出厚板、弧、环、向斜、背斜、褶皱、侧伏板、顶伏板等形变模型，多种贴近自然界中地质实际模型的建立，无疑给复杂异常的正反演研究，提供了便于利用的捷径。

磁异常共轭解释方法中提出的差分曲化平解释，系统讨论了不同地形对共轭解释的影响，通过“尺度”与“角度”两种约束变无解为有解，再通过“差分化平”，结合原点跟踪与高程跟踪，解决了恶劣地形对共轭解释的影响。

磁异常共轭解释方法为处理复杂磁异常提出了一项理性技术——睦邻分解与调整。该项技术的提出，为“过分”叠加的复杂异常获得成功分解提供了支撑。一个零距离叠加的背斜异常，无论其异常平面或剖面特征均酷似

单体异常。就是这样的深度叠加异常，通过睦邻分解与调整获得了精确的分解。

磁异常共轭解释方法能获得多项突破性研究成果，是开拓性研究思路与多重实践紧密相结合的结果。研究的目标始终集中在解决异向叠加的复杂异常解释问题上。青海郭根来异常的定量解释过程，应用了异常分解、共轭调整、侧伏处理、变磁计算、曲面校正、域外拟合等技术措施，是恶劣地形条件下复杂异常解释应用的范例。

利用共轭解释体系去解释实测异常，一般均采用趋势解释方法为开端。因此可省去数据处理的过程。面积磁测工作完成后，若磁测精度确保资料可靠，即可直接选择异常特征明显的磁测剖面异常进行定量解释。完全可省去测制解释剖面的多余工序。解释异常的认可程度可用剖面异常的拟合度及平面异常的相似度加以综合评定。因此，共轭解释能给出相对最佳的解释结果。

磁异常共轭解释方法在青海、内蒙古、广东、云南、湖南等地用于航磁、地磁的解释，初步取得了良好的应用效果与验证。相信该方法将在我国今后找矿事业中发挥应有的作用！

蔡家雄

2013.3.28 于长沙

前 言

危机矿山、矿山深边部攻深找盲等找矿命题，对矿产目标的空间定位提出了更高的要求。本书作者在生产实践中遇到了诸多相关的问题，在探索多种解决方法的基础上提出了磁异常共轭解释方法，建立了共轭解释方法体系，具有重要的理论和实际意义。

磁异常解释是磁法勘探的重要命题，是将磁异常转换为地质认知的关键环节，也是磁法勘探研究的热点和难点，以往的研究主要从数理模型出发，而以异常特征为出发点的反演方法少见，但对因磁化方向差异而影响异常解释的“异向问题”在现实中普遍存在，尚未见相关成果，是磁异常解释问题中的空白领域。

磁异常共轭解释技术是基于磁异常特征并结合多种解释方法的创新性磁异常解释方法，它有相对独立、完整的方法体系，本书对该方法的理论基础和解释方法体系进行了较为系统的研究，并对典型地质体和地质构造进行了模型研究，最后结合实际磁法勘探的生产，阐述了利用共轭解释实现复杂磁异常解释的技术，并介绍了钻孔验证结果。

磁异常共轭解释方法相对于传统解释方法，其创新性主要体现在以下方面：

(1) 对 Grant F. S. 在 1965 年发表的薄板磁异常正演公式进行了研究，修正了公式中角度处理上的问题，并提出了修正式；通过设定不同参数、不同地理环境，对修正式进行了反复验算，结果表明修正后的薄板公式可以作为薄板磁异常计算公式。

(2) 根据磁异常“加法”原理，以薄板体磁异常正演公式为基础，按特定规则推导任意形体磁异常正演公式，为复杂形体磁异常正演计算提供了新的途径，从而避开了复杂的积分与矩阵运算，提出了具有统一基础模型、演化成了一系列贴近地质构造形体的数学模型。同时也适应于非均匀磁化、剩磁问题等。

(3) 单一或叠加地质体模型的任意剖面、同一剖面下不同磁化方向及不同走向的磁性体叠加等情况下的磁异常解释问题称为“异向问题”，在已有磁异常反演方法中还未见相关成果。本书提出的偏位解释方法，通过引入

剖面偏角、剖面位移等概念,提出偏位定律,成功实现了“异向问题”求解,填补了磁异常反演领域中“异向问题”空白。

(4) 开展了磁异常“变深聚焦”研究,提出了变深聚焦定律,利用聚焦步长解释异常能分别对不同深度的磁性体实现聚焦,获得同等解释精度的聚焦解释结果。为大尺度深度空间内实现高精度解释提供了理论基础。

(5) 建立了磁异常共轭三角形的图形变换函数与共轭比值函数,提出了磁异常图形变换理论,为磁异常的图形域解释提供了理论基础。鉴于共轭三角形浓缩了磁异常的整体信息,共轭元及其函数简化了异常与磁性体参量之间的关系,从而使磁异常分段求解成为可能,为避免磁异常反演期间复杂线性方程组求解、复杂矩阵的运算及简化解释过程创造了条件。

(6) 研究了变换图形技术,即采用规律性变化模型参数而改变共轭三角形,渐次搜索并无限逼近共轭点目标,通过携带反演模型参数的相似共轭元实现模型参数的分步求解。它是共轭解释的关键技术,与等比换算、平面校正等共同组成共轭解释的基本过程,是完全不同于已有解释方法的新的磁异常反演方法。划定阶段分别求取不同模型体参数的过程,实际是复杂函数的分段求解过程,是共轭解释相对于常规解释的重要优势所在。由于解释过程融入了磁异常剖面特征和平面特征,因而解释结果具有更高的可靠性。

(7) 针对复杂地形环境下磁异常,提出了差分曲化平解释方法,为起伏地形条件下磁异常的解释建立了独立的方法理论,也为磁异常曲化平处理提供了全新的思路。针对典型复杂磁性体及磁异常,提出了相应的解释方法,如变磁解释、侧伏解释、厚板解释、趋势解释、梯度解释等,为共轭解释处理常见复杂磁异常提供具体的方法,也为其他复杂磁异常处理提供了思路。

(8) 本书还对共轭解释中磁场调平、睦邻分解、共轭校准等关键技术进行了研究,为共轭解释结果更加符合地质实际提供了技术支撑。

最后说明,磁异常共轭解释法作为一种新的反演解释方法,提出的各种理论和观点,以及相关的实施方法,难免有不妥之处,恳请读者批评指正。

作者

2012年12月21日于长沙

ABSTRACT

Such prospecting propositions as crisis mines, deep side of mines, searching for deep deposit and undetected mines proposes much higher requirement for spatialization of mineral target. Therefore, under the subsidization of resource crisis mine prospecting fund project replaced by Yaogangxian tungsten deposit of Hunan province, Machangjing – Xiaolongtan Cu – Mo ore of Yunnan province overall geological exploration fund project and Baoshan – Pingding Lead – Zinc polymetallic ore zone of Guangdong province geophysical exploration comprehensive research enterprise funded project, this thesis conducts the study of interpretation method with conjugate element of magnetic anomaly and completes the conjugate element interpretation method system, which is provided with significant meaning both in theory and practice.

The interpretation on magnetic anomaly is the key link which transforms the magnetic anomaly as the geological cognition, which also is the hotspot and difficult point on study for magnetic exploration. The past studies mainly start from mathematical model, and the inversion method which takes its starting point as anomaly characteristics is rare, however, there is prevalent presence of “incongruous problem” which influences anomaly interpretation due to difference in magnetization direction in reality and relevant achievements cannot be seen yet, which is a blank field in interpretation problem of magnetic anomaly.

The conjugate element interpretation on magnetic anomaly is an innovative interpretation method of magnetic anomaly combined with many interpretation methods and based on magnetic anomaly characteristics, it is provided with a relatively independent and complete method system. This thesis has conducted rather systematic research for method systems of theoretical basis, basic principle and interpretation of this method and has also carried out the model study for

typical geological body and geological structure, and finally, in combination with production of practical magnetic detection, the thesis elaborates the technology of realizing the complex magnetic anomaly interpretation by making use of conjugate element interpretation and introduces the verification results of drill hole.

The innovativeness of study in the thesis is mainly reflected in the following aspects:

(1) The thesis studies the thin plate magnetic anomaly forward formula which is published in 1965 by Grant F. S. , revises problems in treatment of angle in the formula, comes up with corrected formula (Formula 2.2) and performs the repeated check computations for the corrected formula via setting different parameters and different geographic environments. And the results show that the corrected thin plate formula can be used as thin plate magnetic anomaly computational formula.

(2) According to “Addition” principle of magnetic anomaly, the magnetic anomaly forward formula for arbitrary body will be deduced according to the specific rules and based on thin plate magnetic anomaly forward formula (formula 2.2) to provide the new way for magnetic anomaly forward formula of complex body, so as to avoid the complex integration and matrix operation and puts forward a series of mathematical model with unified foundational model, which is close to geological structure body. These relatively simple forward formulas are also applicable to such problems as nonuniform magnetization and remanence.

(3) The interpretation problem for magnetic anomaly under circumstances of magnetic superposition from different magnetization directions and different trends on an arbitrary profile or on the same profile of single or superposed geologic body model is called “Incongruous Problem” . Relevant achievements have not been seen yet in the existing inversion methods for magnetic anomaly; the thesis puts forward interpretation method for dyssymmetry, and further proposes dyssymmetry discipline through introducing the concepts of profile declination, profile displacement, which realizes the solving of “incongruous problem” successfully to fill the blank of “incongruous problem” in magnetic anomaly inversion field.

(4) The thesis comes up with and develops study of “Deepened Focus” for magnetic anomaly, and puts forward Deepened Focus discipline, realizes the

focus separately for magnetic in different depths by utilizing interpretation anomaly of step length of focusing, to acquire the focus interpretation results of the same interpretation precision; and the focus interpretation results provide the theoretical foundation for achieving the interpretation with high precision in deep space with large scale.

(5) This thesis establishes the graphics transformation function and conjugate ratio function for magnetic anomaly conjugate triangles and propose the magnetic anomaly graphics transformation theory. This lays the theoretical foundation for interpretation of graphic domain of magnetic anomaly. Considering that the conjugate triangle has concentrated integral information of magnetic anomaly and conjugate element as well as its function has simplified relation between anomaly and parameters of magnetic, so that it is possible for solving in subsections of magnetic anomaly and also creates the conditions for avoidance of solution for complex linear simultaneous equations during inversion of magnetic anomaly, complex matrix operation and simplified interpretation process as well as accurate solution.

(6) This thesis studies the graphics transformation technique, namely it is to change the conjugate triangle by applying the law variable model parameter, gradually searching and limitlessly approaching the conjugate point to realize the subsection solution of model parameter through carrying the similar conjugate element of inversion model parameter, which is the key technology of conjugate interpretation. It constitutes basic process of conjugate interpretation together with equal ratio conversion and Planar Rectification, and is a new inversion method for magnetic anomaly which is totally different from the existing interpretation methods. In fact, the process of obtaining parameters for different models separately on the divided stages is the solving process in subsections for complicated function, which is an important advantage of conjugate interpretation relative to normal interpretation. Because of integration of profile features and plane features of magnetic anomaly in the interpretation process, the interpretation results possess a higher reliability.

(7) Aiming at magnetic anomaly under complicated topographical environment, the thesis proposes the difference curve to plane interpretation method for magnetic

anomaly, which has built independent method and theory for interpretation of magnetic anomaly under accidented relief and also provided a brand new thinking for curve to plane treatment of magnetic anomaly. For typical complex magnetic and magnetic anomaly, it puts forward the corresponding interpretation methods, such as variable magnetism interpretation, lateral trending interpretation, thick plate interpretation, trend interpretation and gradient interpretation. On one hand, proposals of these methods provide the specific methods for conjugate interpretation in handling the common complicated magnetic anomaly, on the other hand, they offer thinking for conjugate interpretation in further treatment of other complicated magnetic anomaly.

(8) The thesis also discussed some skills for the perfect conjugate interpretation. such as magnetic field leveling, good-neighborly decomposition, conjugate Rectification, etc, It provides technical support that conjugate interpretation result came close the production more actual.

Key Words forward calculation; incongruous problem; deepened focus; conjugate interpretation; graphics transformation

主要物理符号汇集表

符号名称	物理意义	单位 (符号)
ΔT 、 T_c	总量场磁异常	纳特 (nT)
ΔT_m	实测磁异常或理论模型磁异常	纳特 (nT)
ΔT_e	反演模型磁异常	纳特 (nT)
ΔT_j	剩余磁异常	纳特 (nT)
Z_a	垂向场分量	纳特 (nT)
H_a	水平磁场分量	纳特 (nT)
M	磁化强度	安培/米 (A/m)
M_s	剖面内有效磁化强度	安培/米 (A/m)
b	板状体上顶半宽度	米 (m)
L	板状体走向半长度	米 (m)
l	板状体下延长度	米 (m)
h	板状体上顶埋深	米 (m)
X_0	板状体上顶中心坐标	米 (m)
I_0	地球磁场倾角	度 (°)
A	板状体走向与磁北夹角	度 (°)
i_s	剖面内有效磁化倾角	度 (°)
β	板状体倾角	度 (°)
ξ	磁化特征角	度 (°)
ϕ	厚板体顶面倾角 (顶伏角)	度 (°)
θ	板状体沿走向侧伏角	度 (°)
m_s 、 m	剖面内有效磁矩、磁矩	安培·米 ² (A·m ²)
a 、 c 、 d 、 e	共轭元	无单位
R	极线角	度 (°)
G_{23}	异常长轴拐点间距	米 (m)
G_{MN}	正负极值点间距	米 (m)
C_d	似长深比、异常长短轴之比	无单位
P_j	解释偏角	度 (°)
W_y	剖面位移	米 (m)
C_h	深度因子	无单位

目 录

序

前言

ABSTRACT

主要物理符号汇集表

1 绪 言	(1)
1.1 磁异常解释研究的目的与意义	(1)
1.2 复杂磁异常解释研究现状	(2)
1.2.1 复杂形体磁异常正演模型研究现状	(2)
1.2.2 复杂磁异常解释研究现状	(4)
1.3 本书结构及主要研究进展	(9)
1.3.1 研究的主要内容及进展	(9)
1.3.2 本书结构	(11)
2 ΔT 磁异常正演及形变函数模型	(12)
2.1 薄板 ΔT 磁异常正演模型	(12)
2.2 厚板 ΔT 磁异常正演模型	(15)
2.3 顶面侧伏薄板 ΔT 磁异常正演模型	(18)
2.3.1 顶面单向侧伏	(18)
2.3.2 顶面双向侧伏	(19)
2.3.3 顶底双向侧伏	(19)
2.4 背斜 ΔT 磁异常正演模型	(20)
2.5 向斜 ΔT 磁异常正演模型	(22)
2.6 环形体 ΔT 磁异常正演模型	(23)
2.7 变磁模型 ΔT 磁异常正演模型	(26)
2.8 形变函数	(27)
2.9 本章小结	(28)
3 共轭解释法理论基础	(29)
3.1 图形变换	(29)
3.1.1 共轭元	(29)

3.1.2	异常平面要素	(30)
3.1.3	共轭元函数	(31)
3.1.4	共轭网络	(38)
3.2	共轭响应	(41)
3.2.1	共轭响应基本原理	(41)
3.2.2	薄板与厚板异常共轭响应与识别	(46)
3.2.3	叠加体共轭响应与异常识别	(49)
3.3	变深聚焦	(49)
3.3.1	聚焦原理	(50)
3.3.2	深度估计	(54)
3.3.3	初始步长	(57)
3.4	差分曲化平解释	(58)
3.4.1	模糊解释	(58)
3.4.2	差分化平	(60)
3.4.3	模型检验	(61)
3.4.4	原点跟踪	(65)
3.4.5	高程跟踪	(65)
3.5	共轭元解释的基本过程	(65)
3.5.1	共轭追踪	(67)
3.5.2	等比换算	(68)
3.5.3	平面校正	(68)
3.5.4	模型检验	(69)
3.6	本章小结	(70)
4	共轭解释方法体系	(71)
4.1	偏位解释法	(71)
4.1.1	方法原理	(71)
4.1.2	模型算例	(72)
4.2	趋势解释	(74)
4.3	侧伏解释	(75)
4.3.1	侧伏判定	(76)
4.3.2	侧伏异常解释	(77)
4.4	厚板解释	(79)
4.4.1	顶面水平厚板异常解释	(80)
4.4.2	顶面倾斜厚板异常解释	(81)

4.5	变磁解释	(83)
4.6	梯度异常解释法	(85)
4.7	复杂异常解释	(86)
4.8	本章小节	(87)
5	优化解释结果的关键技术研究	(88)
5.1	磁场调平	(88)
5.2	睦邻分解	(89)
5.2.1	睦邻分解基本思路	(89)
5.2.2	睦邻退让系数	(90)
5.2.3	睦邻调整	(91)
5.3	异向解释技术与方法	(92)
5.3.1	异向分解	(93)
5.3.2	异向迭代与调整	(94)
5.3.3	分核聚焦	(96)
5.4	共轭校准	(96)
5.4.1	校准总则	(96)
5.4.2	剖面校准	(96)
5.4.3	平面与剖面结合校准	(100)
5.4.4	调整综述	(100)
5.5	共轭软件	(101)
5.5.1	软件功能简介	(101)
5.5.2	解释精度与可信度	(102)
5.6	本章小结	(102)
6	共轭解释应用与实例	(103)
6.1	适用范围	(103)
6.1.1	应用条件	(103)
6.1.2	解释范畴分析	(104)
6.2	复杂异常解释实例	(106)
6.2.1	青海郭根来异向叠加异常	(106)
6.2.2	广东某地磁铁矿地面 ΔT 磁异常	(112)
6.2.3	广东七星桥厚板异常	(112)
6.2.4	环形 ΔT 磁异常	(114)
6.3	图幅解释实例	(115)
6.3.1	航磁图幅解释	(116)

6.3.2 地面 ΔT 磁异常图幅解释	(117)
6.4 本章小结	(119)
7 总结与展望	(120)
7.1 全文总结	(120)
7.2 展望	(121)
参考文献	(123)
后记	(129)