

勘查地球物理 勘查地球化学文集

第 10 集

测井和井中物探

曾繁超 蔡柏林 方松耕 主编

地质出版社

勘查地球物理 勘查地球化学文集

第 10 集

测井和井中物探

曾繁超 蔡柏林 方松耕 主编

地 质 出 版 社

内 容 提 要

本文集选编了钻孔地球物理勘探——测井和井中物探方面的论文共20篇。其中应用于金属和非金属矿的有6篇；应用于煤田的有6篇；应用于水文地质和工程地质的有8篇。它们大多数是“六五”期间的工作和科研成果，比较集中地反映了我国非石油钻孔地球物理勘探方面的发展水平及其应用前景。

本文集可供钻孔物探、地质工作者、地质院校师生以及有关的研究工作者参考。

勘查地球物理勘查地球化学文集

第 10 集

测井和井中物探

曾繁超 蔡柏林 方松耕 主编

责任编辑：方 林

地质出版社出版发行

（北京和平里）

地质出版社印刷厂印刷

（北京海淀区学院路29号）

新华书店总店科技发行所经销

开本：787×1092¹/₁₆ 印张：16.875 插页：2页 字数：392000

1990年2月北京第一版·1990年2月北京第一次印刷

印数：1—970册 国内定价：7.40元

ISBN 7-116-00545-5/P·463

前 言

本文集共选编了20篇论文，其中大多数是“六五”期间钻孔地球物理的工作和科研成果。读者由此可以得出这一时期我国钻孔地球物理（除石油测井）的概貌及其前景。

这一期间地球物理测井发展的重要标志是：应用领域更加广泛，除煤田、水文地质、非金属矿测井以外，工程地质和地热测井也取得了明显的地质效果和社会经济效益。“测井方法在地基和滑坡勘察中的应用”和“地温法在寻找黄山地下热水中的应用”两篇论文就是该方面的实例。测井资料解释工作更加深入，除“三定”（定位、定厚、定性）以外，测井分析工作者都致力于从定性推断发展到定量解释，从单孔解释发展到多孔解释，从人工发展到计算机处理解释等。“回归分析在固体非金属矿测井地质解释中的应用”、“应用测井资料对煤质分析以及沉积环境的研究”、“淄河铁矿店子矿区水文测井资料的综合分析”、“测井在松嫩平原水文地质工作中的作用与效果”等论文就是这方面的实例。其结果，必然导致我国的非石油测井进入数字化阶段。“数字测井在煤田的初步应用”就是个良好的开端。与此同时，一些数字处理方法的研究成果也应运而生，如“最优化技术在测井数字处理中的应用”、“FUZZY模式识别和聚类分析在煤田测井中的应用”。

这一期间井中物探处于提高阶段。在大规模生产实践的基础上，按三种磁铁矿矿床成因类型建立了井中磁测的物理-地质模型，为在模型指导下找矿奠定了初步的基础。钻孔电磁波法的应用范围从金属矿扩大到水文、工程地质和矿山地质。“井中磁测的进展与展望”、“井中电磁波法在我国的应用现状和前景”就是这方面的综述。在这期间，钻孔电磁波法资料处理、解释软件的研制也取得了进展。这不仅提高了该方法的解释水平，而且也为其它井中物探方法的软件开发提供了经验。“应用井中磁测发现安徽马头山铜矿床”和“广西岩溶区钻孔电磁波法应用条件和效果”两篇论文则是这方面工作成果的小结。前者阐述了井中物探在寻找隐伏矿、深部矿体中的独特作用；后者提供了井中物探在岩溶区电站坝基和水利工程勘察中一些令人信服的实例。

当前，新一轮固体矿产普查和水文地质普查的序幕已经展开，钻孔地球物理应用于工程地质的道路也已开辟。我们诚挚地希望本文集能对读者的工作有所裨益。

本文集的中译英工作由张中民、刘云女同志完成，在此一并表示感谢。

目 录

井中磁测的进展与展望.....	蔡柏林	王作勤	(1)
井下电磁波法在我国的应用现状和前景.....	王惠濂		(16)
回归分析在固体非金属矿测井地质解释中的应用.....	郑建屏	秦镜蓉	(29)
萤石矿中子活化测井.....	徐凤曾	师立谱	王世传 (47)
盐类矿床地球物理测井.....	许玉明	齐 建	(61)
应用井中磁测发现安徽马头山铜矿床.....	荣 黎	沈保华	(74)
最优化技术在测井数字处理中的应用.....	黄智辉	潘和平	(82)
数字测井在煤田的初步应用.....	李大庆	刘天成	(93)
应用测井资料对煤质分析以及沉积环境的研究.....	宋振岭		(104)
FUZZY模式识别和聚类分析在煤田测井中的应用			
.....	廖木火	熊立民	刘 伟 (118)
羊草沟煤田测井的地质效果.....	高学雁	赵宏图	(133)
利用模拟测井曲线进行煤质分析的初步研究.....	王照林		(148)
地下电磁波法方法基础研究与资料处理、解释软件研制的进展			
.....	吴以仁	张学玲	刘立振 金瑞霞 (158)
广西岩溶区钻孔电磁波法应用条件和效果.....	聂振邦		(170)
淄河铁矿店子矿区水文测井资料的综合分析.....	张文郁	孟祥进	李润祥 (190)
测井方法在地基和滑坡勘察中的应用.....	李庆仁	孟奇猛	(201)
超声成像测井在山西地下水勘探中的应用.....	陈世选	张孝贵	张灵荣 (216)
测井在松嫩平原水文地质工作中的作用与效果.....	赵宏图	阴占存	(229)
浙江省水文测井现状及应用.....	蒋崇孝		(244)
地温法在寻找黄山地下热水中的应用.....	徐惠明		(255)

井中磁测的进展与展望

蔡 柏 林

(中国地质大学北京研究生院)

王 作 勤

(首都钢铁公司地质勘探公司)

井中磁测包括井中三分量磁测和磁化率测井,其基本原理与地面磁法勘探一样,是基于研究各种岩、矿石的磁性差异及由此而引起的地磁场变化。井中磁场强度测井(即单分量测量)和磁化率测井,可用于解决井壁地质问题,诸如划分磁性层,确定磁性层的深度和厚度,提供磁性参数(磁化率、磁化强度)等。井中三分量磁场强度测量则是普查勘探磁铁矿床和含磁性矿物多金属矿床的一种有效的井中物探方法。与其它井中物探方法相比它具有明显的优点,首先它在钻孔中实现了全方位测量,其次,它测量的是无源(天然)场,仅需用单孔即可实施测量,原则上钻孔有多深就可探测到多深。因此,这种方法特别适用于在厚覆盖地区,与航空和地面磁法立体综合寻找磁性或含磁性矿物的深部隐伏金属矿床。

在我国井中磁测的发展和应用已有廿多年历史,为适应生产需要重庆地质仪器厂先后生产了790台井中三分量磁力仪(包括JSZ-I、II型和JCX-I、II型)及磁化率测井仪。地矿部第一综合物探大队101队进行了大量理论研究和生产实践,编著出版了《井中三分量磁测》、《井中磁测》等专著。地质、冶金、有色金属总公司等地质系统生产部门,廿多年来在普查勘探磁铁矿床上测量了几千个钻孔,解决了大量地质问题,诸如:验证评价地面磁异常;发现井旁盲矿,确定其空间位置;预报井底盲矿,估算其可能见矿深度;确定矿体产状、延伸和模式;确定构造断裂位置以及评价磁铁矿含量等,为指导钻进,合理布置钻孔网,矿床储量计算提供了可靠的地质依据。例如在鄂东程潮铁矿区,地面和井中磁测立体综合解释,建议布置钻孔119个,其中101个钻孔见矿,见矿率达84.9%。在冀东迁安铁矿区,用井中磁测预报井底盲矿,其见矿率达92%;井中磁测与地质、钻探相配合确定了白马山矿区矿体复向斜模式,使铁矿储量净增5076万吨。目前井中磁测已是普查勘探磁铁矿床必不可少每孔必测的找矿手段。

但是随着找矿难度的增加,也给井中磁测的发展提出了新课题,其中如为系统地研究金属矿床的深部结构,要求建立并研究我国磁铁矿床井中磁测的物理-地质模型,以便在模型指导下进行找矿;为改变长期以来井中磁测工作中依靠手工作业进行数据计算、绘图及解释的状况,要求开发应用袖珍和微型计算机;为探测(直接或间接)含磁性矿物的深部多金属矿要求提高井中磁力仪精度等等。本文将论述近年来在这些方面的进展,并探讨其进一步研究方向。

一、磁铁矿床井中磁测物理-地质模型

在我国幅员宽广的领土内,存在着从太古界到第四系各个地质时代的地层系统,其中包括不同的变质岩系和火山岩系,也有各期地壳运动过程中所形成的各个火成岩类,具有多样化的地质和构造特征,这有利于不同类型铁矿和许多其它矿产的形成。就我国东部地区说,主要的铁矿类型有:沉积变质铁矿,这是一组十分重要的铁矿类型,主要分布于东北、华北两大区的许多省、市、区(如辽宁鞍山、本溪、冀东迁安等地);与中-酸性岩浆侵入活动有关的接触交代-热液型铁矿床,这是一组点多面广以富矿为主的铁矿床,如山东金岭铁矿、鄂东铁矿等;与中性(偏基性或偏酸性)钠质或偏钠质火山-侵入活动有关的铁矿床,如宁芜铁矿。它们是鞍钢、首钢、大冶钢铁公司和马鞍山钢铁公司等主要的矿产资源基地,在国民经济中占有重要的地位。这些铁矿床的地质-地球物理研究程度较高,积累了丰富的资料。但目前迫切要求在其外围和深部查明未出露矿床的发展远景,以扩大资源储量。找矿实践业已证明航空、地面和井中磁测立体综合具有显著的找矿效果。但长期以来,在井中磁测的推断解释中,限于应用简单规则几何形态磁性体来模拟实际复杂的矿体模式,这对于寻找深部矿受到一定的局限。因此,根据上述三组铁矿类型的矿床地质参数和地球物理参数,分别建立并研究其物理-地质模型及立体构造模型,乃是现阶段系统地研究这些铁矿区的深部地质结构,提高井中磁测深部找矿地质效果的重要途径。

所谓物理-地质模型可理解为是引起异常目标体的抽象,其总体大小、形状和物理性质上的差异,在某种近似程度上接近于调查目标体。在普查勘探阶段,所建立的物理-地质模型要反映整个一组相类似的地质体总和及其规则化的概念。

(一) 建立物理-地质模型所需的基础资料

1. 物理参数,即调查目标体岩矿石的物理性质,如磁化率、密度、放射性、电阻率、弹性波传播速度等;
2. 矿体地质参数,其中包括规模参数和形状参数,即调查目标体的形状、大小、产状及埋藏深度等;
3. 疏松沉积层,覆盖层、下伏地层的厚度及其起伏情况。

因为上述因素很大程度上决定着应用各种地球物理方法的充分和必要条件。但这些参数具有随机性质,应从大量典型地质体的测量统计概括的结果中获得。

(二) 建立物理-地质模型通常是基于以下三个基本原则

1. 类比原则,即基于在具有相似地质-地球物理条件的地质体(或区域内)上获得的资料,来选择建立待调查目标的模型。这一原则在实际中应用得较普遍。
2. 相关原则,即用待调查目标的某些工业指标与观测物理场参数间,以及与同一目标体上其它物理性质间的回归关系来建立模型。这一原则在地球物理测井中经常应用。
3. 反馈原则;它可归结为通过处理和解释试验性地球物理调查资料的成果,以逐次逼近的方法来建立模型。亦即随着对模拟目标体信息量的积累,利用反馈关系,把模型更大程度上趋近于调查目标

(三) 四大磁铁矿床井中磁测特殊物理-地质模型的建立

正是从上述基本概念和原则出发,我们系统地统计分析了位于我国东部地区的三种成

因类型的磁铁矿床（河北迁安、山东金岭、鄂东及宁芜铁矿）的矿床地质参数和物理参数。在此基础上，对四大磁铁矿床具有代表性的矿区建立起井中磁测的特殊物理-地质模型，如表1：

表1

矿区名	地质—地球物理分类	磁性分类	矿体形态	模型近似几何图形
孟家沟	太古代变质岩系中的变质铁硅类型	磁各向异性	水平厚板	
杏山			短翼向斜	
姑子山			不对称向斜	
羊崖山			紧密倒转向斜	
水厂			叠加向斜	
白马山			向复斜	
脑峪门			背斜	
北屯			复背斜	
王旺庄	火山地质构造中的矽卡岩—磁铁矿类型	磁各向同性	板状体	
大冶			透镜状和不规则透镜状的叠瓦式	
程潮			"	
金山店			板状及透镜状	
钟九	火山地质构造中的方解石—磷灰石—假象赤铁矿—磁铁矿类型		不对称簸箕形	
白象山			不对称平缓弓形	
马村			板状及透镜状	
东庄			透镜状	

然后以特殊模型的组合和联系再抽象出每一成因类型磁铁矿床具有代表性的，概括的几何图象，构成几种一般化的典型模型如表2：

表2

典型物理—地质模型名称	模型近似几何图形	地质—地球物理和磁性分类	矿区名称
板状体		矽卡岩—磁铁矿磁各向同性	王旺庄等
向斜		变质铁硅质磁铁矿磁各向异性	白马山
背斜			脑峪门
叠瓦式透镜体或不规则体		矽卡岩—磁铁矿磁各向同性	大冶
平缓箕形		方解石—磷灰石—假象赤铁矿—磁铁矿，磁各向同性	钟九
平缓弓形			白象山

并建立起各种典型模型通用的数学解析模型（详见BHMPGMCI程序），用数值模拟方法正演计算每一种典型模型的井中磁异常。图1是河北迁安铁矿区典型的向斜模型的一套井中三分量磁测图版。图1-a是中心剖面上 ΔZ 和 $\Delta H_{\perp}$ 曲线的分布特征，用它指导发现井旁向斜磁性体，确定其翼端头和核部空间位置。利用过矿前井段 ΔZ 和 $\Delta H_{\perp}$ 曲线的分布特征，可预报井底盲矿，估算可能见矿深度。图1-b, c是中心剖面上 ΔZ 等值线及 $\Delta T_{\perp}$ 矢量分布特征； ΔZ 等值线分布呈猴头图象，这是向斜模式的重要特征，由猴头面额、两腮，下颚磁异常分布特征，可圈定向斜模式范围及轮廓。一对旁侧孔的 $\Delta T_{\perp}$ 矢量轨迹包线组合呈明显的心脏形，由心脏形线的轮廓和一些特征点（共切点、顶点等）可圈定向斜模式，求取两翼产状及延伸长度。用矢量交会法也可确定向斜两翼端头及核部的空间位置。 $\Delta T_{\perp}$ 矢量发散尾部延长线的“共尾性”是确定向斜核部空间位置的重要标志，在实际地质解释中对于确定是否是向斜模式具有重要意义。

总之，这些特殊或典型模型的建立，在方法学上具有广泛的意义，它使井中磁测工作逐渐地过渡到在模型指导下进行找矿的阶段。

（四）立体地质填图概念的提出

为了系统地研究金属矿区深部地质结构，近年来，还提出了立体地质填图的概念。所谓立体地质填图，就是要查明一定空间内每个点上的地质体、断裂、不整合面和地质结构的其它几何要素的位置，其可靠性和精度要与地表相同比例尺工作的精度相适应。同时还应研究地质体的物质成分，其它特性和含有某种矿产的可能性。显然，要达到这样的成果是极其复杂的，要解决这些问题，在当前只能看作是一个研究的方向。按目前地质、地球物理、地球化学方法和钻探的发展水平，还只能完成上述中有限部分任务，这就是建立并研究具有控矿意义和引起物理场异常的地质客体的立体构造模型。对金属矿区说，是要建立深达500m的立体物理—地质模型。

为了直观的，度量性的展示出深达500m的地质介质的立体结构信息，通常采用工程

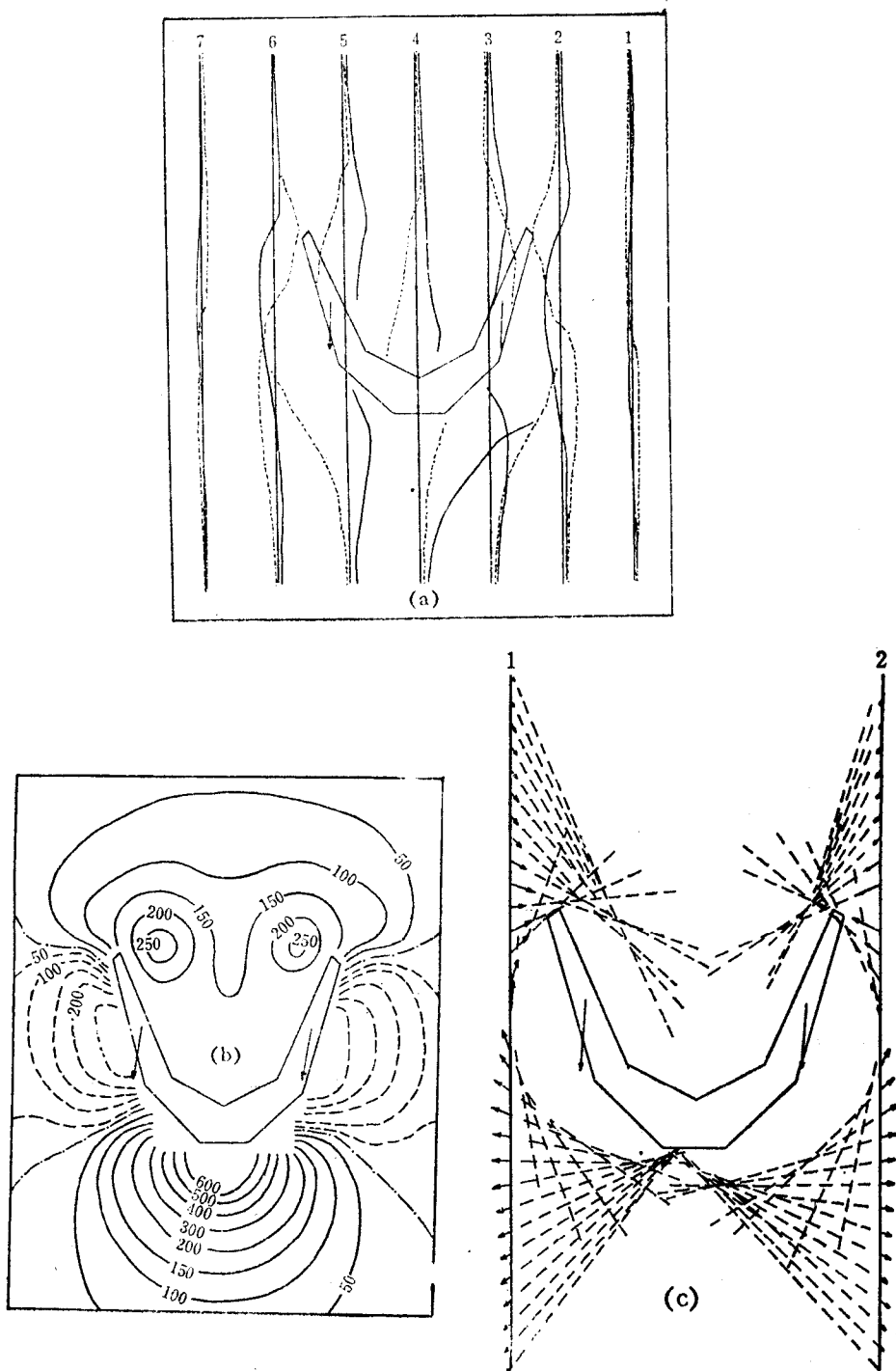


图 1 典型向斜模型三分量井中磁测图版

Fig. 1 Charts of tridimensional borehole magnetic survey of typical synclinal model

a—中心剖面上 ΔZ 和 $\Delta H_{\perp}$ 曲线分布特征; b—中心剖面上 ΔZ 等值线分布特征; c—中心剖面上 $\Delta T_{\perp}$ 矢量分布特征

a—Distribution characteristic of ΔZ and $\Delta H_{\perp}$ on the central profile; b—Distribution characteristic of ΔZ contour on the central profile; c—Distribution characteristic of vector $\Delta T_{\perp}$

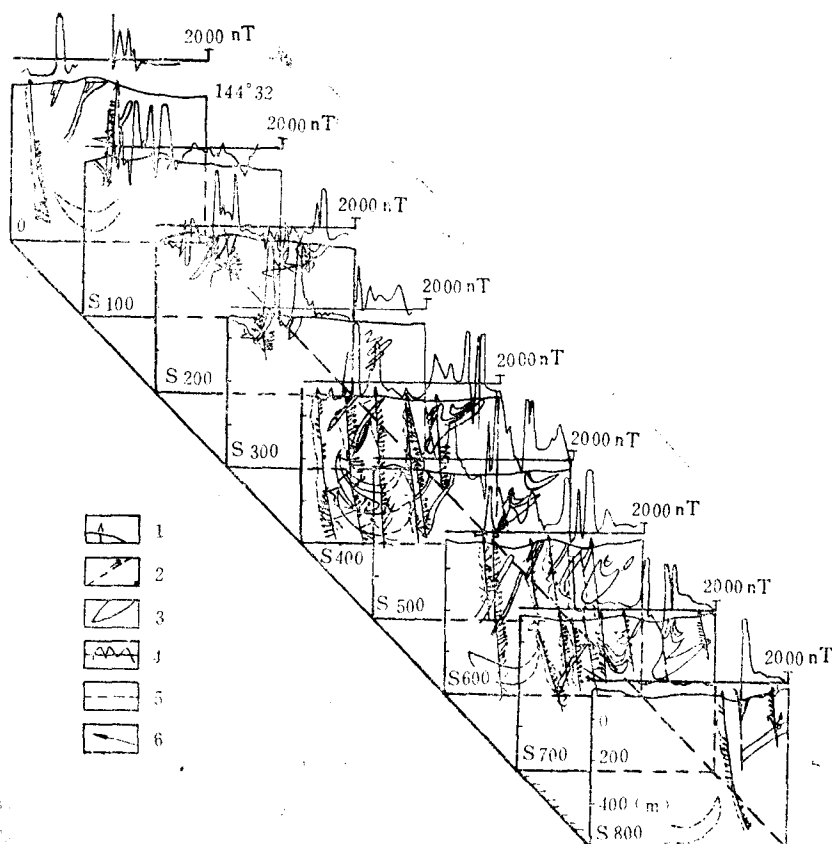


图 2 白马山矿区深部磁铁矿体向斜模式的走向框图

Fig. 2 Strike schematic drawing of syncline model of deep magnetic iron ore body in Beimashan ore area

1—钻孔; 2—断层; 3—矿体; 4—地面 ΔZ 曲线; 5—井中 ΔZ 曲线; 6— $\Delta T_{\perp}$ 矢量

1—Borehole; 2—Fault; 3—Ore; 4—Surface ΔZ curve; 5—Borehole ΔZ curve; 6—Vector $\Delta T_{\perp}$

上画法几何和机械制图的基本原理,以主观、俯视和侧视图形式来展示调查目标各个侧面的形态及其地球物理场异常的空间分布特征。把一组主视图或俯视图,侧视图组合起来还可构成框图,用框图便可展示调查目标沿走向或沿深度方向,沿横向方向的变化特征,图2是研究河北迁安铁矿白马山矿区深部磁铁矿体向斜模式的走向框图。由于沉积变质式铁矿的层位相对稳定,我们根据勘探程度较高的剖面(如图中S 400线)的地质和井中磁测资料,再在典型向斜物理-地质模型的指导下,基于类比和外推,就可勾划出呈向斜模式深部矿体的分布及其走向延伸长度,并预测其向南或向北延伸的远景。这样做可大大节省矿区勘探工作量。

在研究金属矿区深部地质结构中,应充分重视利用地面和井中地球物理勘探立体综合的成果。对一些磁铁矿区的初步研究已证明,它能取得满意的地质效果。

二、井中磁测的应用软件

长期以来,井中三分量磁测观测数据的计算、绘图及解释借助于手工作业,这不仅使

室内计算工作量十分繁重费时，而且直接影响在井场及时地向地质钻探提供更多的有用信息。为了改变这种工作状况，提高工效，在井场实现实时处理解释，最终使井中磁测工作数字化。近年来，我们把袖珍或微型计算机开发应用于井中磁测工作，并相应研制了一套应用软件，其内容包括：

(一) BHMCP程序 (程序的结构如图3)

它适用于在井场或室内对井中三分量磁测数据进行计算及绘图，其主要功能是：

1. 打印图头标号，如测量日期，矿区名称，剖面及钻孔编号等；
2. 按测点深度顺序列表打印原始观测数据；
3. 检查观测质量，当质量符合规范要求时，才进行数据计算及绘图，否则显示告知“Sorry Redo”，表明质量不合要求，需返工重测；

4. 按直孔或斜孔数据计算方法步骤，分别计算以下参量：

直孔： ΔZ 、 ΔH 、 ΔT

斜孔： ΔZ 、 ΔH 、 ΔH_L 、 ΔH_H 及 ΔT_L 、 ΔT_H 并按深度顺序列表打印上述计算结果；

5. 按实际孔斜坐标绘制出直孔或斜孔的各种曲线图和矢量图。图的纵、横比例尺可根据需要任选；

6. 在井场对发现的可靠矿异常需进行解释时，可将本程序直接与BHMCI程序链接。

(二) BHMCI程序 (程序的结构如图4)

它适用于对简单规则形状磁性体在井场进行实时解释，其主要功能是：

1. 输入和打印原始数据，当单独使用本程序时，用 DATA 语句形式输入，也可在 BHMCP 程序控制下链接本程序；

2. 绘制 ΔZ - ΔH 参量图，判别待发现磁性体的形状和产状，以便选择相应的解释方法；

3. 打印主程序菜单、设置主控制转向开关，供用户根据地质任务的需要，选择其解释内容；

4. 利用特征点解析法 (ΔZ 曲线) 或矢量解释法 (ΔT_L 矢量)，解释旁侧异常，确定井旁盲矿空间位置。图5是河北白枣山矿区1线ZK6应用BHMCP程序计算绘图的结果(图5a)及应用BHMCI程序对发现的旁侧异常解释结果实例。根据 ΔZ 曲线和 ΔT_L 矢量特征及 ΔZ - ΔH 参量图(图5b)分析可见，ZK6从一向孔倾斜、向上无限延伸的薄板状磁性体尾部旁侧穿过，最后选用 ΔZ 曲线特征点法和 ΔT_L 矢量交会法，由计算机实时解释打印

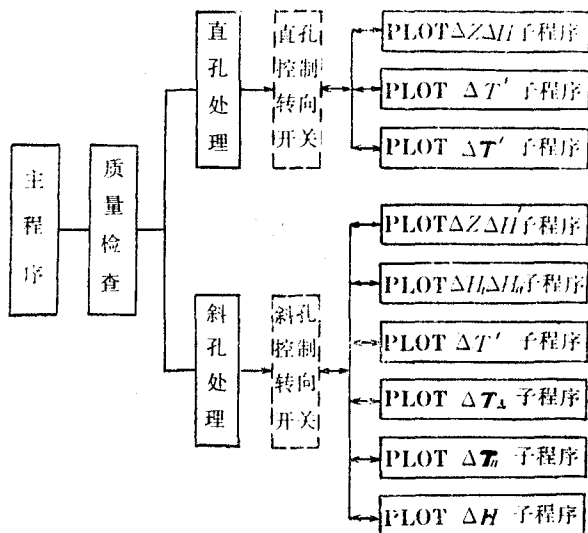


图3 BHMCP程序结构方框图

Fig. 3 Program structural block diagram of BHMCP

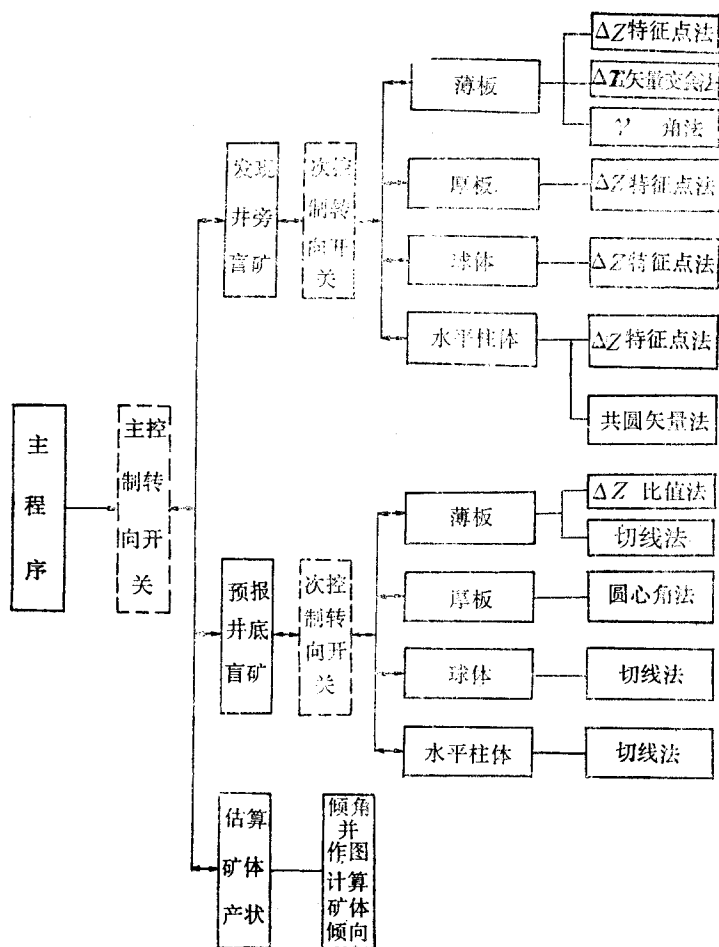


图 4 BHMCI程序结构方框图

Fig. 4 Program structural block diagram of BHMCI

输出具体结果，并由示意图示出推断矿体的位置(图5c)，这是一个由 BHMCP, BHMCI 程序控制的资料处理及解释的自动流程，仅需十几分钟即可完成。

5. 预报井底盲矿，估算见矿深度

图 6 是河北迁安铁矿区 ZK78-12 按薄板，用任意点切线法作图解释的预报结果

6. 利用见矿井段内磁场，估算矿层倾向和倾角，或根据 ΔT_n 垂直板状矿体（两端无限延伸）板面原理，用作图法以钻孔柱状图形式输出其结果，其解释实例如图 7。

(三) BHMPGMCI 程序

该程序是各种成因类型磁铁矿床井中磁测物理-地质模型的数学解析模型，它是基于组合多边形截面柱体正演计算井中三分量磁异常方法而编制的，其主要功能是：

1. 正演计算各种成因类型磁铁矿床（磁各向同性或各向异性）井中磁测物理-地质模型（任意形状）的磁异常；

2. 计算磁各向异性磁性体的磁参数；

3. 用人机对话方式选择和修改拟合模型参数，进行反演拟合解释，并用图示和打印

1977年5月2日

Project Area: Baizao Tool Model: JSZ
Borhole No: 1-6 Ev= 100 (nT/mU)
Total Depth: 196 (m) A = 90 °
Tube Position: 6 (m) Zo= 42300 (nT)
Point Number : 17 Ho= 26800 (nT)
Operator: XIEJUN

1:2000

1cm=5000 (nT)

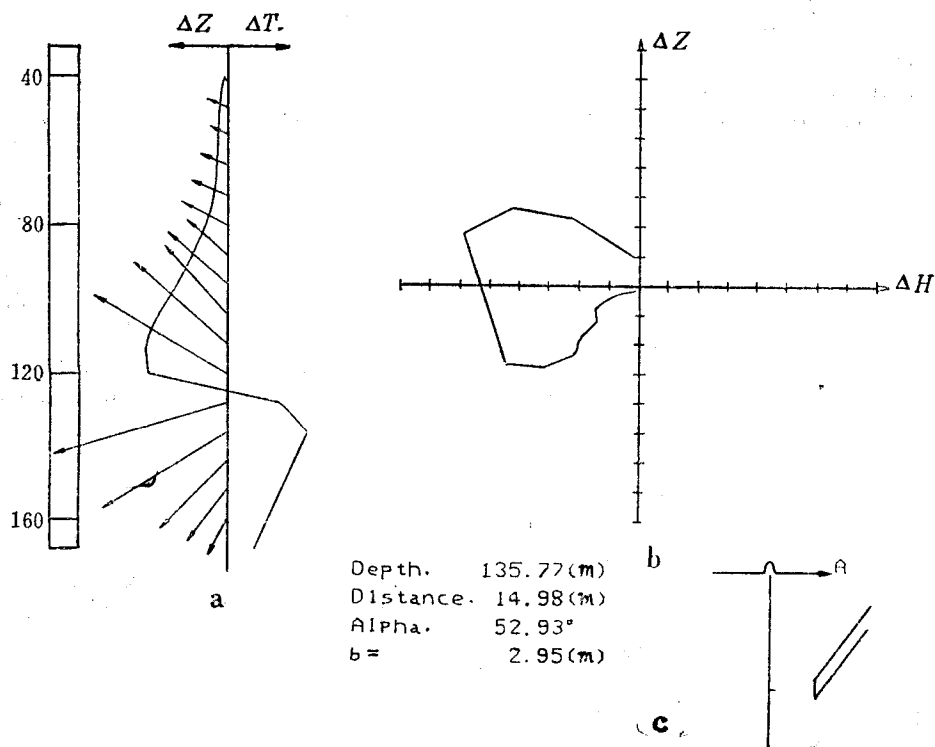


图 5 白枣山矿区 1 线 ZK6 解释成果

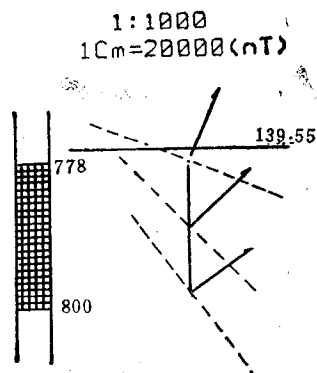
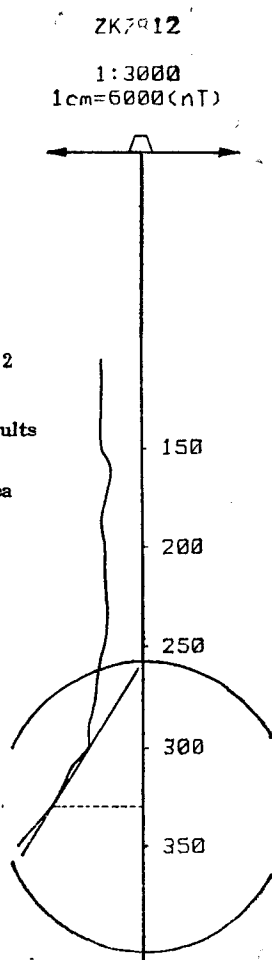
Fig. 5 Interpretation results of borehole ZK6 at sectional line 1 in Beizaoshan ore area

数据形式输出其解释结果, 图 8 是河北迁安杏山矿区 C16 线 ZK824 的拟合解释结果, 图 8a 是 ΔZ 曲线的拟合结果, b 是 $\Delta H_{\perp}$ 矢量的拟合结果。拟合解释结果表明 ZK824 孔旁侧赋存着四个复杂形状的磁性体, 井中观测所得的是其叠加磁异常, 矿体在 XOY 平面和 XOZ (钻孔所在勘探剖面) 剖面上的投影范围及分布状况如图 8c 所示。

上述三程序用 BASIC 语言编制, 可在 PC-1500 袖珍机或 IBM 微机上实现计算解释。也可作为重庆地质仪器厂研制的 JBS-I 型轻便数字测井系统井中磁测的应用软件。所列实例已证明程序是可行的, 能基本满足井中三分量磁测现场工作需要, 并为井中三分量磁测实现数字化和开展模拟井中磁测奠定了基础。

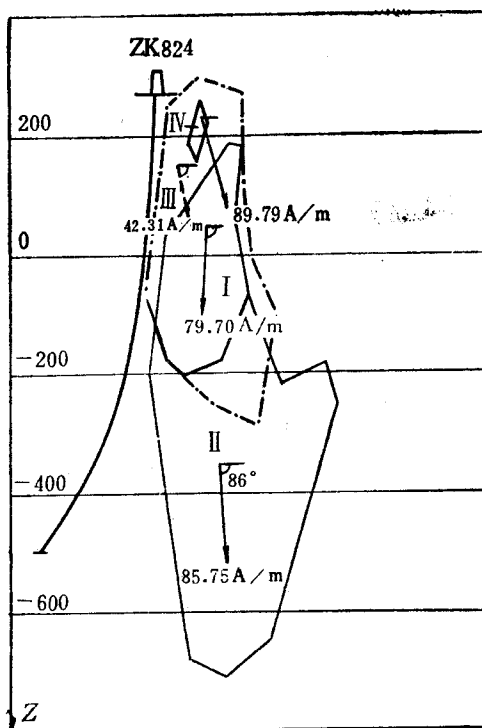
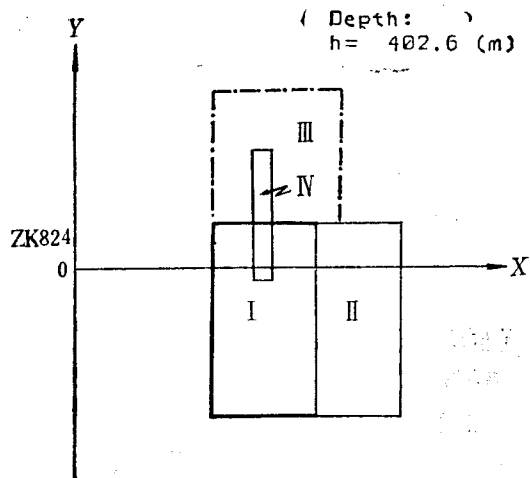
图 6 迁安铁矿区ZK78-12
解释成果

Fig. 6 Interpretation results
of borehole ZK78-12 in
Qianan iron ore area



$h(m)$	P	α
780	203.27	$42^{\circ}21'$
790	181.22	$54^{\circ}03'$
800	177.49	$53^{\circ}49'$
Ave: 187.46		$52^{\circ}04'$

图 7 估算矿层倾向和倾角实例
Fig. 7 Example of evaluation
of inclination and dip of ore bed



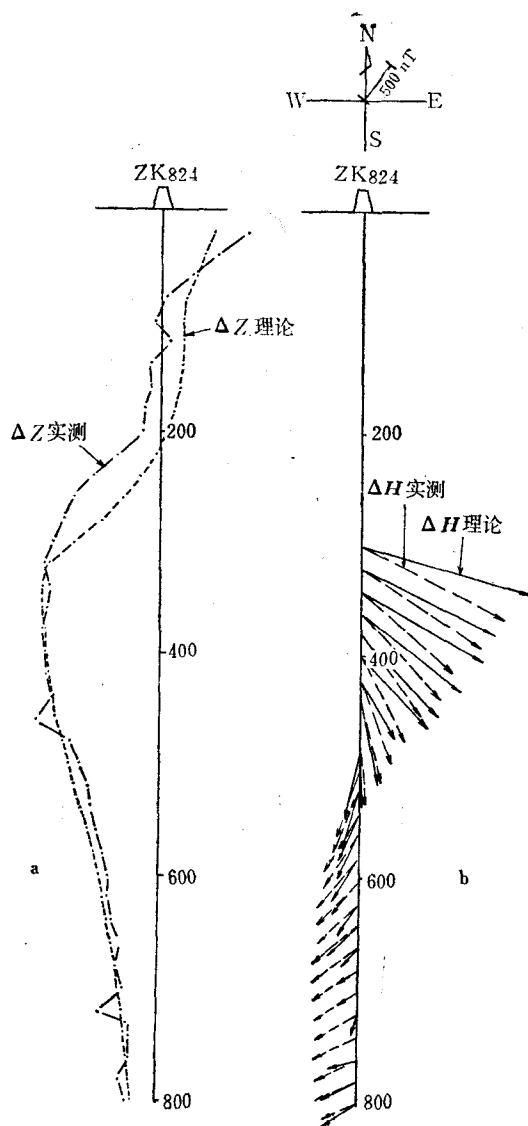


图 8 杏山铁矿区C16线ZK824拟合解释结果

Fig. 8 Results of fitting interpretation of borehole ZK824 at sectional line C 16 in Xingshan ore area

a— ΔZ 曲线的拟合结果；b— ΔH 矢量的拟合结果；c—矿体在XOY平面和XOZ（钻孔所在勘探剖面）剖面上的投影范围和分布状况

a—Fitting result of ΔZ curve; b—Fitting result of vector ΔH ; c—Project range and distribution state of ore on XOY plane and XOZ profile

三、提高井中磁力仪精度，实现井中磁测工作数字化

由重庆地质仪器厂生产的JSZ或JCX型井中三分量磁力仪，其磁场垂直分量 ΔZ 的测量精度为 $<200\text{nT}$ ，水平分量 ΔH 的测量精度为 $<300\text{nT}$ 。显然，他们只能用来普查勘探具强

表 3

矿物名称	磁化率值 $\kappa(\text{SI})$
磁铁矿	$7.1 \times 10^4 - 14.2 \times 10^6 \times 10^{-6}$
磁黄铁矿	$10^4 - 25 \times 10^4 \times 10^{-6}$
钛铁矿	$82 \times 10^4 - 16.3 \times 10^5 \times 10^{-6}$
黄铜矿	$375 - 1500 \times 10^{-6}$
黄铁矿	$100 - 5000 \times 10^{-6}$
闪锌矿	$40 - 6500 \times 10^{-6}$
黑锰矿	1660×10^{-6}

磁性的磁铁矿床，而不能用于探测磁性较弱的含磁性矿物的多金属矿床。根据标本测定各种金属矿物的磁化率值如表 3：

应该指出，黄铜矿和黄铁矿的磁化率值是许多硫化矿物中的典型，与表中的强磁性亚铁磁性矿物相比，硫化矿物基本是非磁性的。所以说，多金属矿石的磁性只取决于其中亚铁磁性矿物的数量，主要是磁铁矿，有时是钛铁矿或磁黄铁矿矿物的数量，要探测这样的弱磁性体就必须提高井中磁力仪的精度。

(一) 井中磁力仪的测量精度

为了讨论井中磁力仪的测量精度，首先引入井中三分量磁测探测距离的概念，探测距离决定于许多因素，其中最主要的是仪器精度，除此还与磁性体的体积、形状、产状、磁化强度，钻孔相对于磁性体位置，所测磁场分量以及干扰场的大小等有关。因此不能无条件地，笼统地说它能探测多远、多大的矿体。只能固定某些因素之后，才能大致估计其探测距离。我们以垂直磁化球体和直立无限延深薄板为例来说明，并假定以三倍观测误差作为可探测的可靠磁异常值，这时对于磁场垂直分量 ΔZ ，其旁侧探测距离 D ，和可预报井底盲矿深度 h （钻孔打在矿体正上方）的近似表达式：

球体

$$D = 1.1176 \sqrt[3]{\frac{J}{\delta}} \cdot R$$

$$h = 1.4082 \sqrt[3]{\frac{J}{\delta}} \cdot R$$

薄板

$$D = 0.6667 \frac{J}{\delta} \cdot b$$

$$h = 1.333 \frac{J}{\delta} \cdot b$$

式中 J 为磁性体磁化强度， δ 为井中磁力仪测量精度， R 为球半径， b 为薄板半宽度。

公式表明，如果我们给定了探测范围（ D 或 h ）、磁性体磁化强度及线度（ R 或 b ），就可求出仪器的精度。也就是说，在给定条件下，我们可用上列表达式来估算为探测磁性较弱含磁性矿物多金属矿所需井中磁力仪的测量精度，从而为提高井中磁力仪精度提供依据。为此，假定 $D=100\text{m}$ ， $h=50\text{m}$ ， $R=50\text{m}$ ， $b=10\text{m}$ ，含磁性矿物多金属矿的磁化强度 $J=1-5\text{A/m}$ （注意，通常磁铁矿的 $J=50-60\text{A/m}$ ）。在这样的条件下，探测旁侧 100m