

高等学校教材試用本

磁法勘探教程

长春地质学院編

只限学校内部使用

本书较全面地介绍了磁法勘探的原理、各种仪器、工作方法、资料的解释理论和方法、实际应用等。适合高等学校金属、石油、航空物探专业师生作为教学用书。

磁法勘探教程

长春地质学院编

*

地质部地质书刊编辑部编辑(北京西四羊市大街地质部院内)

中国工业出版社出版(北京佟麟阁路西10号)

(北京市书刊出版事业许可证出字第110号)

中国工业出版社第四印刷厂印

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ · 印张 $20 \frac{1}{4}$ · 插页 1 · 字数 455,000

1962年1月北京第一版·1962年1月北京第一次印刷

印数 0001—2,170 · 定价(10-6) 2.40元

*

统一书号:15165·1133·(地质-101)

目 录

緒論	1
§1 磁法勘探的实质及地位	1
§2 磁法勘探发展簡史	2
第一章 地磁場	
§1 地磁場的概述	5
§2 地磁場的构成及起源	10
§3 地磁場随时间的变化及起源	12
§4 地磁場的測量	15
第二章 岩石及矿石的磁性	
§1 物质的磁性	17
§2 矿物的磁性	21
§3 火成岩的磁性	24
§4 沉积岩的磁性	30
§5 变质岩的磁性	32
§6 矿石的磁性	32
§7 古地磁学簡介及其与磁法勘探的关系	34
§8 磁化物体的消磁作用	36
第三章 磁法勘探仪器	
第一部分: 地面磁測仪器	42
§1 地面磁測仪器的基本原理	42
§2 M-1型磁力仪	49
§3 刃口式磁秤	50
§4 悬絲式磁秤	65
§5 瑞典 ABEM-3(4)型悬絲式磁秤	69
§6 其它类型的地面磁測仪器	78
§7 各类地面磁測仪器的特点比較	81
第二部分: 航空磁測仪器	82
§8 坡莫合金磁灵敏元件的磁性特点	82
§9 脉冲电压式的磁能式和航空磁测仪	84
§10 偶次谐波电压式航空磁力仪	90
§11 核子旋进式磁力仪	92
第四章 磁法勘探的工作方法	
第一部分: 地面磁測工作方法	100
§1 地面磁測任务的接受及測区的選擇	100
§2 磁測比例尺及測網的选擇和布置方法	101
§3 磁測精度的要求及保證精度的措施	106
§4 野外磁測工作的进行	112
§5 磁測結果的整理及作图	113

§ 6 几种野外磁测工作方法.....	124
§ 7 岩石磁性的测定方法.....	128
§ 8 磁法勘探的经济技术指标及工作組織.....	145
第二部分: 航空磁测工作方法.....	152
§ 9 地质任务选择比例尺及飞行高度.....	152
§ 10 測綫的布置及平面联系.....	154
§ 11 飞行方法.....	155
§ 12 航空磁测資料整理.....	157
第五章 磁法勘探資料的解釋理論和方法	
§ 1 磁异常与地质构造及各种矿床的关系.....	161
§ 2 磁异常的地质解釋方法問題.....	178
§ 3 正問題的意义及其計算的基本公式.....	181
§ 4 几种規則形状磁性体的磁場.....	186
§ 5 磁异常計算的反問題.....	204
§ 6 选择法.....	207
§ 7 特征点法.....	221
§ 8 图解法.....	234
§ 9 切綫法.....	237
§ 10 磁位高次导数法的应用.....	244
§ 11 积分法.....	248
§ 12 无源空間中磁場的計算方法.....	251
§ 13 磁場空間分布法.....	262
§ 14 根据磁測結果計算磁性鉄矿儲量問題.....	267
§ 15 根据磁測結果計算基底深度的問題.....	268
§ 16 进行定量解釋时复杂情况的处理.....	270
§ 17 磁异常地质解釋的步驟.....	276
第六章 磁法勘探的实际应用	
§ 1 磁法勘探所能解决的地质問題.....	287
§ 2 在小、中比例尺区域地质測量及研究大地构造方面的应用.....	288
§ 3 磁法勘探在普查勘探鉄矿床上的应用.....	293
§ 4 在大比例尺地质測量和普查金属非金属矿产时的应用.....	301
結束語.....	317
参考文献.....	320

結 論

§ 1 磁法勘探的实质及地位

地质找矿勘探方法一般是根据地质科学理论与实际工作经验，凭借对自然界地质现象的直接观测，按照一定的勘探程序来了解地下矿产资源的分布情况。当地表的天然岩石露头及其它地质标志不够充分的时候，对地质现象的直接观测将受到限制。随着人们对已知矿产的开采利用，出露在地表容易直接观测的与矿产有关的地质现象将愈来愈少，人们必须到那些地表岩石露头很少，浮土复盖很多的地区去找矿，必须要利用一些间接的找矿方法。地球物理勘探就是其中之一。它根据地下岩石矿体的物理性质的差异，将在地表形成一定特点的天然或人工的“物理场”，观测并研究分析这些物理场的特点，可间接了解地下某方面的地质情况，对矿产的存在及分布提供一定线索。

磁法勘探是一种地球物理勘探方法。它根据地下岩石矿体的磁性差异，在地表形成一定特点的天然的磁场，迭加在地球所产生的磁场之上，称为“磁异常”，磁法勘探的主要内容就是测定并分析研究这些磁异常，寻找出它与地下地质构造的关系，作出关于地下地质情况及矿产分布的有关结论，这也就是磁法勘探的主要任务。

自然界的岩石矿物中具有明显强烈磁性的是磁铁矿，用磁法来找磁铁矿是最早的地球物理勘探方法。但随着方法的应用发展，其作用已远远超过这一点，因为不仅是磁铁矿能形成磁异常，自然界许多岩石矿物都具有大小不等的磁性差异，能产生大小不等的磁异常。现代仪器已完全有可能将微小的磁异常及微小的磁性差异测定出来，这些磁异常反映了更多，更全面，更复杂的地质情况。

岩石磁性来源，约可分为两种：一种是岩石存在于地壳里，受地磁场磁化感应而具有的磁性，另一种则是岩石自形成开始至现在经过了复杂的磁化过程所保留下来的剩余磁性。这些磁性对各种不同的岩石是彼此各异的，其所形成磁异常的形态决定于地质体的产状，大小，埋藏深度及其生成历史等。掌握磁异常与地质体之间关系的一般规律对磁异常的地质解释是很重要的。这些规律的掌握一方面依靠生产实践所积累的经验，一方面也需根据现有的理论对资料进行分析研究。从理论上研究磁异常与地质体之间的关系是学习磁法勘探的一个主要内容。

要完成磁法勘探的实际工作，需要用仪器对磁场作精确的测定，从已得的数据中消除外界非磁性岩体引起的磁场的干扰因素获得正确可靠的数据。目前磁法勘探的仪器有多种，它们应用的原理也有所不同。野外工作方法的正确布置及应用对取得磁法勘探的地质效果有密切的关系，了解并掌握各种磁测仪器的原理结构，操作规程及野外工作方法也是学习磁法勘探的重要环节。

因此，课程的主要内容有以下几方面：

一、理论基础：包括地球磁场，岩石矿物的磁性，各种磁性体在地表所产生磁场的计算，磁性体磁场在空间的分布规律、转换及其与磁性体产状的关系等。

二、仪器构造原理及野外工作方法和室内数据整理：包括地面及航空的各种磁法勘探

所用仪器的工作原理及工作方法,磁法野外工作的布置、进行,以及所获记录数据的计算整理,各种成果图的绘制方法等。

三、磁测结果的地质解释及实际应用:即磁异常地质解释的一般步骤和规律,由磁异常变为地质结论的推断方法。磁法勘探在解决各种不同地质问题时的实际应用及其实例等。

从研究地质问题的方法来看,磁法勘探用的主要是物理及数学方法,因而和其它地质科学有明显的区别,但从解决的问题来看,完全是地质问题,磁法勘探又必需与地质科学紧密结合,故磁法勘探与数学、物理、地磁、电磁、电子及各种地质课程间有着密切的联系。

从当前磁法勘探在生产中应用的情况说明,此方法较其它方法有稍优越之处,即目前所用的仪器已能较精细地测出复杂而微弱的磁场,各种外界干扰因素对测定结果影响不大,故经过不太复杂的野外工作就可获得准确而清晰的磁异常。磁异常一般又与多种地质情况有联系,故在解决各种不同地质问题时磁法都能取得一定效果。再加上仪器容易制造,轻便,野外工作需要的劳动力少,能在很短的时间内获得大面积上的测定成果。这些原因使磁法勘探逐渐成为地质找矿勘探中普遍应用的一种方法,尤其在推广综合普查勘探方法以来,磁法勘探成为重要的“兵种”之一,是我国地质勘探事业中不可缺少的武器。

§2 磁法勘探发展简史

早在18世纪末,在俄罗斯,人们就发现了库尔斯克地区内磁针有巨大的偏差,当时的因诺荷节夫院士就预言这些现象是地下埋藏有巨型铁矿引起的。十月社会主义革命胜利后,在列宁的建议下,成立了库尔斯克磁异常研究委员会,才对这一区域的磁场分布情况进行了仔细的测定和研究,终于发现了储量达60亿吨的大型磁铁矿床。在这以后磁法勘探连同其它地球物理勘探法,随着苏联社会主义经济建设的蓬勃发展而成长壮大起来。

在1923年,苏联成立了实用地球物理研究所,专门对地球物理勘探方面的问题进行研究,并建立了国家的地质勘探仪器工厂,着手研究并制造有关的仪器。各有关大学院校,也设置了地球物理勘探专业。以后在乌拉尔及库兹涅茨地区组织了大规模的磁法勘探,在寻找铁、铬、镍、锰、铜、铅、鋅、铝矾土及其它有用金属矿产方面,在复盖区进行地质填图,圈定火成岩及成矿接触带或直接寻找矿体等,都起了重大的作用。当时所用的仪器,绝大部分都是苏联自造的M-1及M-2型磁力探矿仪。

自1930年起,苏联的磁法勘探开始应用于寻找石油、煤田构造及工程地质方面,但需与重力勘探结果相配合来进行地质解释,在区域地质普查、划分大地构造单元方面都有很好的效果。

苏联在1956年第一次制成了感应式航空磁力仪。它在大面积寻找铁矿及普查其它金属矿床上都迅速地取得了成效,完成了大量任务。第二次世界大战后,苏联试制成功了灵敏度很高的饱和式航空磁力仪,感应式仪器逐渐被它所代替。饱和式航空磁力仪的灵敏度,可设计成不同的大小,不仅适用于寻找金属矿,亦适用普查油田构造,目前,此种仪器在区域地质普查,划分构造单元,寻找含油气远景地区的工作中已成为不可缺少的工具。

除了苏联以外,其它人民民主国家,如匈牙利及德意志民主共和国等,地球物理勘探事业都很发达,民主德国的悬丝式磁秤世界各国都广为采用。

在世界各资本主义国家中,开始应用磁法勘探也是从20世纪初开始,在美国、英国、日本及西欧等国家都曾普遍应用。最初出现的磁力仪是瑞典的泰良-铁贝尔磁力仪

(Tahlen-Tibberg), 又称万能磁力仪(苏联所制的 M-1 磁力仪与此相似)。其后由德国人施密特(Shmidt)设计了刀口式垂直磁称(苏联所制 M-2 式磁力仪与此相似)及水平磁秤, 可分别测定磁性岩体磁场的垂直及水平分量。近年来, 瑞典、加拿大、日本等国也都制出了一些地面用的轻便磁力仪, 都由私人公司作为商品向外出售。其目的是为了资本家的利润。在航空磁测方面, 某些国家亦采用饱和式航空磁力仪及其它新型仪器。在这些国家里, 磁法勘探也不仅用于寻找磁铁矿, 还用于其它矿产, 如石油煤田的普查勘探中。但一切矿产、仪器、工人及勘探成果等都是资本家的私有财产, 与社会主义国家的勘探事业, 有着本质的区别。他们的地质地球物理勘探事业是为了资本家的利益, 作为为资本家掠取最高利润的战争服务的工具, 因而他们的勘探工作是带有掠夺的性质, 所以根本就不能够促成地质地球物理勘探事业的真正发展。

在我国, 伟大祖国勤劳勇敢的人民, 对于磁法勘探的基础地磁科学的开辟作出了最为卓越的贡献(在第一章中将谈到这一点)。

解放前我国是一个半殖民地半封建的国家, 整个地球物理勘探工作都谈不上任何应用和发展。除了帝国主义为了掠夺我国的矿产资源, 在一些地方作过地球物理工作外, 大约在 1936 年以后也曾作过少量的地球物理工作; 但是由于反动政府不問这一工作, 致使工作规模不可能很大, 技术设备也极为简陋, 对找矿几乎未起到什么作用。

全国解放后由于党和人民政府组织和领导了地球物理勘探工作, 磁法勘探和其它地球物理勘探方法一样在我国获得了大规模的迅速发展, 不但完全改变了解放以前的面貌, 而且进展日新月异, 为许多资本主义国家所望尘莫及。

磁法在我国首先用于寻找金属和非金属矿产, 1950~1954 年先后组织了很很多磁法勘探队(在各地找寻铁矿), 解决了数十年来未解决的一些关于矿床下部延伸的问题, 发现了一些矿体, 普查了一些地区的磁铁矿床及地下盲矿等等, 在普查勘探过程中磁法找磁铁矿取得了明显的地质效果。以后在弱磁性铁矿区, 以及多金属矿区也经常采用磁法勘探, 组成了包括磁法的若干金属矿地球物理勘探队。成功地完成了有色金属矿床等等矿区的地球物理勘探工作, 其中磁法勘探结果成为地球物理资料中的重要资料之一。

1958 年全国各个战线在总路线的光辉照耀下, 取得了大跃进的辉煌成绩, 全国人民破除迷信、解放思想, 形成了全民办地质的热潮, 磁法勘探在大炼钢铁, 全民找矿的运动中作出了重要贡献, 找出了各种大中小型的磁铁矿和有色金属矿床。与此同时, 普及了磁法勘探的知识, 使其为广大群众所掌握, 在更大程度上发挥了磁法勘探的作用。

磁法在我国用于普查油气田构造方面是从 1950 年开始, 最先主要用地面磁测, 以后逐渐用大面积、高精度的航空磁测, 它也是石油物探工作中不可缺少的综合方法之一, 几年来在我国若干有含油远景的地区都作过大面积的地面磁法普查, 取得了一定的地质效果。

航空磁测是地球物理勘探中的先进方法, 它效率高, 可以迅速地在大片荒无人烟的面积上取得磁测成果, 供给地质工作者以宝贵的资料。我国在苏联的援助下 1954 年就开始了航空磁测, 开始时运用苏联感应式航空磁力仪普查铁矿床, 并圈定超基性岩体, 1956 年采用了苏联 AЭМ-49 型电子自动饱和式航空磁力仪和 АСГМ-25 型航空综合地球物理测量台等二种类型的航空磁力仪, 分别在平原地区和山区进行区域性的面积测量, 划分了平原地区的大地构造单元, 指示了含油远景区域。同时几年来依靠航空磁测找到了大量磁铁矿体, 发现了很多含有镍、铬的超基性岩体及其它火成岩和沉积岩的接触带, 指出了金属矿成矿的良好远

景区,指示了找矿方向。几年来在我国大部分地区都作过了航空磁测,取得了丰富的工作经验。

在仪器制造方面,悬丝式磁秤、力门式磁秤,在我国都已试制成功。目前我国自造的地面磁测仪器已能大部分满足生产上的需要。另外有些单位还试制成功了一些先进的新型的地面及航空磁测仪器。这些都是物探工作者在党的领导下破除迷信,敢想敢干而创造出来的成绩。

磁法勘探和其它物探方法一样在党的领导下十余年来取得了飞跃的发展,这些成绩的取得也是和苏联及各社会主义兄弟国家的援助分不开的,特别是苏联对我国物探事业的真诚无私的援助,是我国物探事业迅速发展并能以先进技术武装起来向世界科学水平迈进的重要因素之一。

目前我国的磁法勘探象其它各门科学一样正处在一个新的发展阶段,那就是因为我国幅员广大,地区辽阔,矿产种类多,地质情况复杂,还有许多地质上的盲区需要进行工作,磁法勘探必须适应我国的具体情况(如磁场倾角及各种岩石的磁性特点等),在原有基础上向前推进。

第一章 地磁場^{[1][2][3][5]}

§ 1 地磁場的描述

一、地磁場的发现

磁法勘探的发展与地磁学的发展有着紧密的关系。地磁学的发展同天文学、大地测量学等一样,有着悠久的历史。

在世界上我国人民最先发现了磁的现象,并在实际中加以利用。

我国科学家沈括(公元1031~1095年)在他所著的“梦溪笔谈”中说:“方家以磁石磨针锋,则能指南,然常微偏东,不全南也”。又说:“亦有指北者,恐石性亦不同……。”在同一时期的“武经总要”中,还记载了用铁片在地磁场中淬火获得强磁性以制作指南仪器的方法。

这些记载说明我国最先发明磁性指南仪器,并且表示当时已能精确地定出地理子午线的方向。当时的指南仪器进步到细长的针形,因而才能发现地磁子午线与地理子午线间的不一致,这是世界上最早关于地磁偏角的记载。同时在实际上也发现了磁的两极性。

指南针用于航海,也是我国最早,朱彥著的“萍州可谈”中记公元1099—1102年间的事说“舟师识地理,夜则观星,昼则观日,阴晦则观指南针”。公元1123年出使朝鲜的徐兢也记载说“是夜洋中不可住,经观星斗前迈,若晦冥则用指南浮针,以揆南北”。

外国关于指南针的记载,最早是十二世纪末到十三世纪初。

由此可见,无论指南针的发明和应用于航海,我国至少要比外国早一、二百年,而磁偏角的发现,外国晚于我国四百多年。公元1492年哥伦布由欧洲航行到新大陆的途中,才发现有地磁偏角,并同时发现磁偏角是因地而异的。

磁针指示的方向与正北有偏差以及磁偏角因地而异的发现,大大推动了对地球磁场的研究工作,因为航海需要知道全球各地,特别是海洋上,海岸上磁偏角的可靠数据。从这个时候起,地磁学开始了蓬勃的发展。首先是对各地的磁偏角进行了许多测量,随后又对地磁场其它的要素进行了研究,并发现了地磁场随时变化的现象。在发现中出现了一些有名的学者,如吉伯、高斯、西蒙诺夫等人,他们对地磁场的特性、数学理论的研究以及观测方法的制定方面都有很多贡献。

随着观测精度的提高,对地磁场的分布的研究,逐渐全面而准确了。这时就发现了有的地方地磁场变化急剧,不是平缓的单调变化,发现了许多“磁异常”,以后经过研究肯定了这些异常与地壳地质构造、矿产分布有着密切的关系,因此地磁学出现了一个新的分支——磁法勘探。磁法勘探是在十九世纪以后才发展起来的。

二、地磁要素及其分布规律

大家都知道,磁针在地球的任何地方都受到磁力的作用,这说明地球周围空间各点都存在有磁场。为了表示各点磁场强度,常用矢量 $\vec{T}$ 表示。为方便起见,通常所探讨的不是总磁场强度 $\vec{T}$,而是将 $\vec{T}$ 分解为直角坐标的分量来研究这些分量在地球各处的分布和变化。总磁场强度的分量及其与坐标轴的夹角称为地磁要素。如图(1-1),总磁场强度 $\vec{T}$ 是按直角坐标系来分解的, x 轴沿地理子午线,指正北; y 轴向东, z 轴向下。矢量 $\vec{T}$ 在 z 轴上的

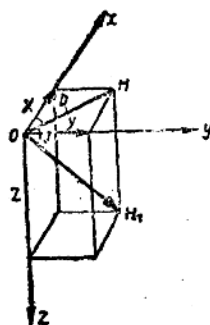


图 1-1

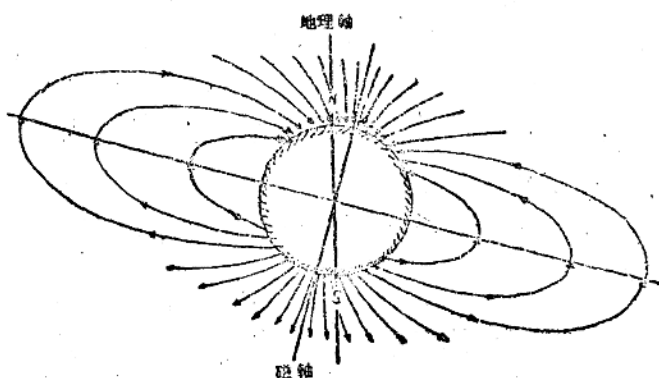


图 1-2 地球磁场的磁力线

投影叫垂直分量 Z , $\vec{T}$ 在水平面 xy 上的投影叫水平分量 H , H 在 x 轴上的投影叫北向分量 X , H 在 y 轴上的投影叫东向分量 Y , x 轴与 H 分量间的夹角叫磁偏角 D , 向量 $\vec{T}$ 与水平面所夹之角叫磁倾角 I 。

我們規定, 向量 $\vec{H}$ 由北向东的磁偏角为正, 向西为负。向量 $\vec{T}$ 在北半球指向地平线之下, 倾角为正, $\vec{T}$ 指向上时, 倾角为负。

D, H, I, X, Y, Z 都称为地磁要素, 其中 (H, Z, D) 、 (X, Y, Z) 、 (H, D, I) 为独立的三组, 知道任一組, 就能求出全部的地磁要素。

各要素的相互关系如下:

$$X = H \cos D, Y = H \sin D, Z = H \tan I;$$

$$H = T \cos I, Z = T \sin I, \tan I = \frac{Z}{H};$$

$$H^2 = X^2 + Y^2, T^2 = H^2 + Z^2, \tan D = \frac{Y}{X}.$$

观测結果表明, 某一地点的要素数值并不是固定不变的, 它們随着时间在不断地变化。这种变化具有不同的周期, 有的以一昼夜为周期。如果把每年平均值算出来, 又可发现年平均值也在变化, 其周期为几百年, 叫长期变化, 此外还有磁暴和磁扰, 它們的周期很短, 有的没有什么明显的規律, 和昼夜变化統称短周期变化。

这两种变化不仅在特征上有差别, 而且来源也不同。短促变化主要是来源于高空电离层的电流系, 而长期变化则来源于地球内部, 很可能和产生地磁场的根源一致。

球谱分析区分出, 地球的主要磁场来源于地球内部, 只有 1% 左右是来自球外的, 目前对外部来源的真实性还有怀疑。此外还可区分出, 昼夜变化和磁暴的大部分 (約 2/3) 均来源于球外, 只有小部分 (約 1/3) 来源于球内, 而这一小部分可能是由于地球导电层在外磁场变化时引起的感应电流造成的。

地磁场在地球表面上的分布情况见图 1-2, 可用地磁要素的等值线图来表示。对地面各点的地磁要素经过测定后, 将每一要素具有相同值的各点, 在平面图上用线连起来, 即称为该要素的等值线, 具有不同数值的等值线就组成了地磁图。一般地磁等量线图有等偏线图、等倾线图、水平等力线图、垂直等力线图等。

因为地磁各要素在时间上不是恒定的,而是不断变化的,所以要使地磁图的描繪适合于某一特定的时期,普遍采用一年的中期,即七月一日。例如繪制 1945 年代的图,就应该把要素的数值都化成为 1945 年七月一日零时零分的数值。现时地磁图的繪制通常是按五年一次,編成 1945, 1950 等等年代的地磁图。

地磁場强度的单位是奥斯特(Oe),在实际测量中和磁法勘探工作中常使用一較小的单位,叫做伽瑪(用希腊字母 γ 表示)。 $1\gamma = 10^{-5}\text{Oe}$ 。

在地球上, Z 的分布情况大致是,在接近地球赤道处, Z 值为零,愈向两极, Z 值增加。在两极附近, Z 值达 $0.6 \sim 0.7\text{Oe}$, 在北半球, Z 分量向下,而在南半球则相反。 Z 的等值线与緯綫近乎平行(见图 1-3)。

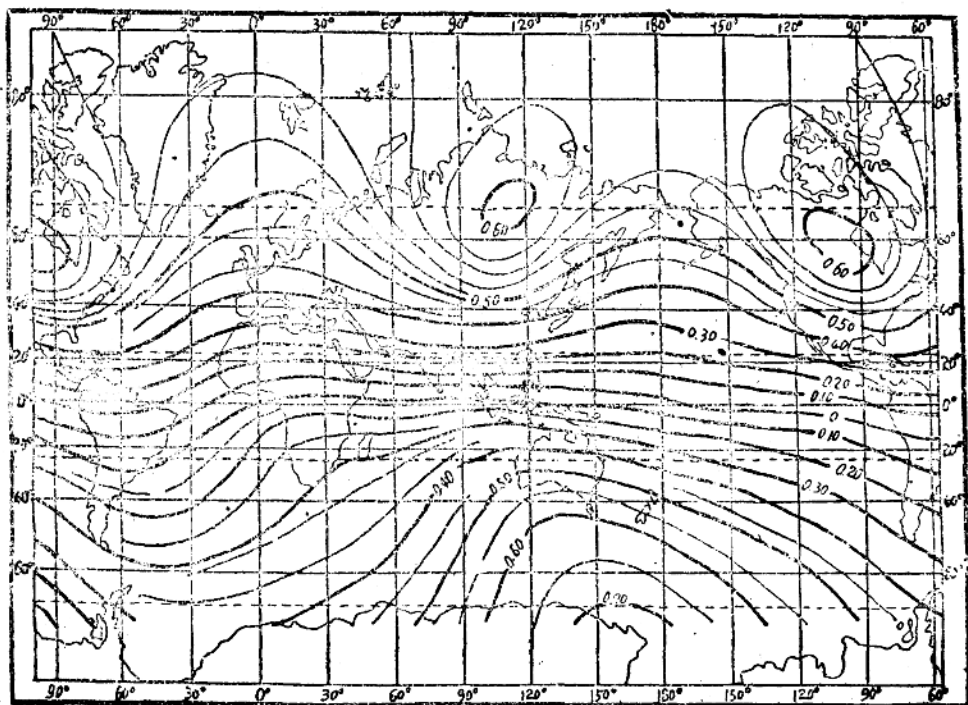


图 1-3 世界—— Z 等值綫图

H 值在接近赤道处最大,达 $0.3 \sim 0.4\text{Oe}$,并向两极逐渐减少。在两极附近, H 减少到零,在全球絕大部分地区內, H 始終指向北方(不是正北)。

在赤道附近,磁傾角 I 几乎为零,向两极逐渐增大,在两极附近的某个地点, $H=0$, I 为 90° ,这个地点就是南北两磁极,这两点的地理坐标是:北磁极 72°N , 96°W ; 南磁极 70°S , 150°W (见图 1-4)。

一般的磁偏角数值在 $\pm 10^\circ$ 以內,但在地理两极及地磁两极处, D 等值綫形成四个交点,即磁偏角的所有数值(由 0 到 $\pm 180^\circ$)都会在这些点上出现。因为在每一地理极附近, H 的方向几乎是一定的,但是繞地理极一周时,不論范围多么小,正北的方向会有 360° 的变化,因此从 0 到 $\pm 180^\circ$ 的等偏綫都集中于两极。在磁极上,則正北方向几乎不变, H 的方向有 360° 的变化,因此也出现各个偏角数值,等偏綫也都集中于此。

如果产生地磁场的物理机构已知,或根据地面上一定数量的观测值再根据位论,就可以得出表示地磁场各分量及倾角和地理坐标的关系的数学公式,利用这些公式可以解决许多科学上和实用上的问题。

1835年,俄国学者И. М. 西蒙诺夫教授,根据当时的观测值提出一种假说,说是地球的磁场是一个均匀磁化的球体的磁场,与两磁极联线平行而又通过地球中心的直径是这个均匀磁化球体的磁轴。以后高斯也提出了类似的更完备的理论。

一个均匀磁化的球体,在P点的磁位可用下式表示:

$$U = -\frac{M}{r^2} \sin \varphi \quad (1.1)$$

其中 φ 是纬度, M 是总磁矩, $r=OP$ (图1-5)。

假定地磁轴与地球转动轴相重合,磁场强度可写为下式(令 r =地球半径 R):

$$\left. \begin{aligned} X=H &= -\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial U}{\partial \varphi} = \frac{M}{R^3} \cos \varphi \\ Z &= -\left(-\frac{\partial U}{\partial R} \right) = +\frac{2M}{R^3} \sin \varphi \\ T &= \frac{M}{R^3} (1+3\sin^2 \varphi)^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \right\} \quad (1.2)$$

由前面二式可知,

$$\text{在赤道处, } \varphi=0^\circ, Z=0, H=T=\frac{M}{R^3}$$

$$\text{在两极处, } \varphi=90^\circ, H=0, Z=T=\frac{2M}{R^3}$$

即两极处磁场为赤道处磁场的两倍,这是大致符合实际情况的。

此外,比例数 $\frac{Z}{H}$ 就是倾角 I 的正切,因此(1.2)式中两个方程式相除,即得

$$\operatorname{tg} I = 2 \operatorname{tg} \varphi \quad (1.3)$$

实际上,在许多地方磁倾角与纬度的关系是服从上述规律的。这个公式在古地磁学研究中有很大用途。

由以上这几点看到,我们可以用均匀磁化球体的磁场来表示地磁场的一级近似值。利用这些公式,可以计算地磁场分量的各种梯度和地球磁矩。

计算梯度

在地面上移动或向上移动一个单位距离时地磁要素的变化量,就叫做这要素的梯度。

现来计算垂直分量和水平分量沿磁纬方向和沿高度的梯度。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\Delta Z}{\Delta \varphi} &= Z_0 \operatorname{tg} \varphi = 2H, \quad \frac{\Delta Z}{\Delta R} = -\frac{3Z}{R}; \\ \frac{\Delta H}{\Delta \varphi} &= -H \operatorname{tg} \varphi = \frac{Z}{2}, \quad \frac{\Delta H}{\Delta R} = -\frac{3H}{R}; \\ \frac{\Delta T}{\Delta \varphi} &= \sin I \frac{\Delta Z}{\Delta \varphi} + \cos I \frac{\Delta H}{\Delta \varphi}, \quad \frac{\Delta T}{\Delta R} = -\frac{3T}{R} \end{aligned} \right\} \quad (1.4)$$

如果取地球半径 $R=6000$ 公里,某地的 $Z=46700\gamma$, $H=27000\gamma$,则某地地磁场的梯度值为

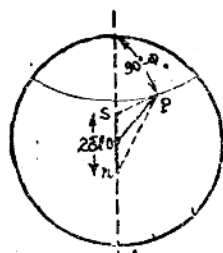


图 1-5

$$\frac{\Delta Z}{\Delta \varphi} = 9.4\gamma/\text{公里}, \frac{\Delta Z}{\Delta R} = -23.4\gamma/\text{公里}$$

$$\frac{\Delta H}{\Delta \varphi} = -4.1\gamma/\text{公里}, \frac{\Delta H}{\Delta R} = -13.5\gamma/\text{公里}$$

$$\frac{\Delta T}{\Delta \varphi} = 5.9\gamma/\text{公里}, \frac{\Delta T}{\Delta R} = -27\gamma/\text{公里}$$

就是說在当地每上升一公里,垂直强度要减小 23.4 γ ,水平强度要减小 13.5 γ ,总强度要减小 27 γ ;在地面上向北移动一公里,垂直强度增加 9.4 γ ,水平强度减少 4 γ ,总强度增加 5.9 γ 。

实际上由于各种因素的影响,梯度值并不正好与计算结果相同,上面的计算只是给我们一个数量级的概念。

计算地球磁矩

如地球上某点的磁场值已知,则可根据公式算出 M 值,按 B. И. 阿法纳西耶娃的计算,得到: $M = 8.3 \times 10^{25} \text{CGS}$ 单位。地球的平均磁化强度 $J = 0.072 \text{CGS}$ 单位。平均说来,地球表层的磁化强度并未达到这个数值。如果认为地球的磁化是集中于半径等于地球半径二分之一的同心球里面,那末这个中心核的磁化强度达 $J = 0.58 \text{CGS}$ 单位。计算表明,这个球核的 J 和软铁制成的球体磁化强度是同级的。如果利用最好的硬磁性合金来制造一只与地球磁矩相等的球体,那末这个球体的直径约 1000 公里左右。

§ 2 地磁场的构成及起源

把地球磁场认为是一个均匀磁化球体的磁场是很近似的,经过分析,实际上,地面所观察到的磁场,可以写成下式:

$$T = T_0 + T_m + T_a + T_e + \delta T$$

其中 T_0 是基本磁场,相当于均匀磁化球体的磁场, T_m 是地壳内部非均匀构造所引起的磁场称大陆磁场, T_a 是地壳表层非均匀磁化所引起的,称异常磁场。 T_e 是地球以外的原因所引起的磁场,如大气圈中的电离层及太阳宇宙射线等所引起的磁场, δT 是磁场随时间变化的部分。

大陆磁场分布的面积很大,达数万平方公里,表现出陆地与海洋间磁场的差异。

异常磁场 T_a , 可分为两部分:一部分 T'_a , 是由较大的区域地质构造所引起,称为区域异常;另一部分 T''_a , 是由较小的地质体等所引起,称为地方异常或局部异常。

通常将均匀磁化球体的磁场,大陆磁场及外部磁场的总和,合称为正常磁场 T_n 。

$$T_n = T_0 + T_m + T_e$$

因为地磁场随时间变化的部分 δT , 只占微小的数值,故地磁场 T 可写为:

$$T = T_n + T_a$$

即地磁场是正常磁场与异常磁场之和。

如果地面上正常磁场的分布为已知的話,则可将地质构造的磁异常划分出来,根据它可以研究地球表层的构造,此即磁法工作的主要任务。当磁法勘探的目的,是要解决小的,局部的地质问题时(如普查矿产),则正常磁场可认为是:

$$T_n = T_0 + T_m + T_e + T'_a$$

磁异常是: $T_a = T''_a$ 。磁异常都产生在正常磁场的背景上,正常场相对于异常来说常可看作

是均匀不变的,二者的划分,由勘探的目的来确定。

基本磁場 I_0

根据地面的观测和上一节的理論計算結果的比較可見,地球的基本磁場可看作是一个均匀磁化的球体的磁場。对地磁場沿高度的分布以及由地面向下的分布的測定表明,地磁場的变化規律与均匀磁化球体所应有的变化規律是相同的,并且表明,产生基本磁場的源位于地核內。

关于基本磁場的起源問題,到目前为止还没有公認的理論。不过 Я. И. 弗兰克耳和 М. 埃耳沙塞有关地磁場起源的假說得到愈来愈多的証实。根据現代的概念,半徑等于地球半徑之半的地核,是处于准液体和准金属状态之下的,也就是說它有較小的粘滯性和較好的导电性。当核內沿着半徑的方向有一个不大的温度梯度时,就会产生物质由核心向外部和由外部向核心的对流現象以及温差电流現象。上述这些現象就会导致核內物质大規模的闭合旋渦运动,这种运动的速度約为每秒一微米。温差电流在核內产生一个初始磁場,它被核內准金属液体的环流的自激作用所加强,这种作用类似于发电机的自激作用。环流的分布是各种各样的,但由于科里奥力的作用,产生一个总的磁矩,与地球轉軸稍稍不对称。因此,地球的均匀磁化磁場是一种派生的現象。

根据上述假說,地磁場可能具有不同的极性,即地磁 N 极在地理南极附近,地磁 S 极在地理北极附近(现在地磁場情况),或者相反,极性的改变可能是由于环流状况改变的緣故,地球磁場的上述两种稳定状态是相对的,因为存在有长期变化。长期变化具有地磁軸繞地理軸以大約 500 年的周期而运动的特点,因此在几千年的时间之内,地磁极的平均位置是与地理极的位置相重的。地磁場的上述一些性質对发展解决許多重大地質問題的古地磁学方法來說是很重要的,关于古地磁学,我們将在第六章內作一些简单的介紹。

大陆磁場

前面已經提到过,大陆异常分布面积很大,它是由利用地磁图量出的正常磁場减去根据公式計算的均匀磁化磁場得到的,也叫剩余磁場。地球上一共有六个剩余磁場地区,在中心的地方, Z 值极大,有的向上,有的向下,而 H 几乎为零(这里 Z, H 是指剩余的),强度最大而形状又規則的是亚洲东部的一个,即所謂东亚大陆异常,它包括了全部亚洲以及欧洲一部分,垂直强度数值达到正常值的 30%。数值小一点而符号相反的异常地区在非洲西部。包括全部非洲及一部分大西洋海面。

分析大陆磁場的 X 及 Y 分量說明, Z 等力綫的中心区就是磁力綫的发源地,大陆磁异常可以看作是这些中心之下蘊藏着巨大的磁化物体或者强大的旋渦电流的結果。

关于大陆异常的真实性問題现在还没有明确的答复,但由于許多現象跟磁緯度有关系而大陆异常的地区特征又很明显,因此认为比較可靠的假說是:地球是順着地磁軸产生了均匀磁場,同时由异常区某些岩石的磁化或旋渦电流所引起的大陆异常是独立存在的。

关于大陆磁場源的深度問題也没有解决,現有理論分为两类,一类是深地說,认为大陆磁場源的深度为地球半徑的一半或三分之一,另一类是浅地說,以为大陆磁場源集中在地表层,約在地下几百公里处。

深地說理論,是根据观测数据,采用数学方法,計算大陆磁場源的深度,如 И. Л. 卡利宁得出,如果在离地球中心 $0.4-0.5R$ 处,有一磁性球体或扁球体,具有一定的磁矩,就可解釋东亚大陆磁場。因此他认为大陆磁場并不与地壳有关,而是与更深的地层有关。头几个人

造地球卫星的观测结果，对上述理论是有利的。

但是浅地说的根据也不少。这种理论是以某些物理上的事实，即说明大陆磁场与地壳所产生其它物理现象和地质现象之有某种联系的事实作为根据的。如 И. И. 卡占里发现大陆磁场异常中心总是分布在已经查明或推断的地盾或地台中，并发现 Z 强度的零值线是通过一定类型的地槽地带。B. И. 波契塔雷夫发现大陆磁场垂直分量和重力沿纬度方向的变化有同样的特征，而重力的变化与地壳构造是非常一致的，对照起来，发现在玄武岩上的磁场为极大，而在花岗岩之上则为极小，实际上玄武岩的磁性的确比花岗岩强，可见浅地说也有一定的物理根据。

要最后解决这个问题，还须进行大量的不同高度的观测及研究。

磁异常

磁异常地区，就是一个磁场与邻近地区的磁场有显著差异的地区，同时地磁要素的正常的单调的增加或减小规律有了变化。

这种变化就是地磁要素的梯度的明显变化，而正常梯度在很大的范围内实际上是不变的。因此地磁要素的梯度在一个地区中的显著变化，就是判断该地区存在磁异常的基本标准。

磁异常是由于磁性岩层受了地球正常磁场磁化产生了附加磁场，这个附加磁场就叫做异常磁场。

因为地面上所观测到的磁场总是正常的与异常的二者之和，所以要把异常磁场区分出来，就必须要知道正常磁场，不过正常磁场是个未知数。为了求得正常场，可以采用以下的方法。

在一个被磁化的物体的周围围成一个封闭表面，通过这个表面的磁力线之和等于零，利用这个性质，就可求出异常场来。为此只要把异常地区的观测值 (Z 或 H) 取其平均值，这个平均值就是正常的数值。在实际上，就是把相当大的一块面积内的测定值平均起来算是正常值。

上述结论只是对一个孤立的磁异常来说是正确的，如果有许多异常迭加在一起，则必须把求均值的面积加以扩大。在这种情况下，求正常场的比较方便的方法就是采用离开异常中心很远的若干个测点的数值拿来平均，在磁法勘探中，为了区分磁异常，就是采用后一种方法。

磁异常是由于磁性岩石或矿石在地磁场作用下产生的磁场迭加在正常场上形成的。它与地壳表层的地质构造及矿产分布有着密切的关系，磁法勘探正是研究这些异常来解决地质问题的一种地球物理方法。

磁异常的数值，由几十伽玛到几万伽玛，由岩石或矿石的磁性强弱、矿体的深度大小等因素决定。

§ 3 地磁场随时间的变化及起源

在地面上某一固定地点对地磁要素作长期的观测，发现地磁要素值随时间而变化。为了研究这个现象，在地球各处设立长久性的地磁台对地磁各要素 (Z, H, D) 作连续测定，并在一些所谓的标准点上有系统地作反复的测量（每隔三——五年）。根据记录的分析，可确定地磁场有几种不同特征和不同原因的随时间变化。

一、历年变化,又叫长期变化,把地磁要素的年平均值逐年对比,发现其值逐渐变化,各处变化数值不同,并在长时期内也不一致,这种长期变化,据推测其周期为500年。

我国各处地磁要素每年变化数值的大小是, Z 值由 $20\gamma \sim 70\gamma$, H 值由 $+15\gamma \sim +50\gamma$, I 值由 $-1.5' \sim +1.5'$, D 值由 $-1.0' \sim -4.5'$ (负号表示减小, 正号表示增加)。由此可见,每年的变化是很小的。

如将地球上各处具有相同年变化值的点,联成线画在图上,就构成地磁要素等年变率曲线图,此图是围绕若干长期变化中心而形成的封闭曲线。这些变异中心如苏联里海南岸及南美东海岸附近等地。在里海南岸, Z 值每年增加 100γ , 向外变化逐渐减少, H 值每年减少 40γ , 向外很快变为零。我国尚未见此种详细的年变率图。

将长期变化中心和地震区对照起来,就会发现这些中心大多数在地震区内,可见地磁场的长期变化是由地球内部的因素所引起,显然,地磁与地壳中各种物理的和地质的变动过程间存在着密切关系,由实验很早就确定了物体当加热或冷却时会改变它自己的磁性,当物体压缩或拉长时,也会改变它的磁化能力,因此地壳内部的各种运动,将引起地磁场的变化,是完全可以解释的。关于它们之间的相互关系,正在深入研究中。

历年变异因非常迟缓,对磁法勘探的野外工作影响很小,可不加考虑。但在进行绝对测量(或在磁法勘探中,把几年内的各地区测定结果联测起来)以及利用正常磁场图时,应考虑到历年变化。由于有长期变化,必须把所有绝对测量及正常地磁场图都化到一定时间,一般是某一年的中期(七月一日)如 1950. 7。一般地磁图上附有各地磁要素的等年变率曲线,为了求出今年的地磁要素值,我们从图上查出某处的要素值,以及该处这个要素的年变率,相差的年数(地磁图年代和今年的差数)乘以年变率,得到修正值,它和从地磁图上查得的要素值的代数和,就是我们所需要的数值。

二、昼夜变化(以后简称日变),它的周期是一太阳日,其特征是随地方时而变化,同一纬度的各点,日变几乎是相同的。在白天的变化比夜间强,夏季比冬季强,即变化的强度决定于观测点上空被太阳照射的时间的长短,也即各个地磁要素的日变并非始终不变,而是逐日不停地在变化着,同时观测表明,容易遭到变化的主要是振幅,而位相却几乎保持不变。

同一纬度上的各点,日变几乎是相同的,但同一经线上的各点,则遵循着一定规律变化。由图 1-6 可见,垂直分量 Z 在赤道上的变化接近于零,南北球具有相反的符号,北向分量在赤道上的变化最大,曲线在南北纬 30° 处反向,东向分量在赤道上的变化几乎等于零,随着纬度增大,变化幅度也变大,南北球曲线方向相反。

太阳日变化还和当天的地磁活动性有关,有所谓静磁日变化和扰磁日变化,它们之间有显著的差别,不过在低纬度差别不大,在高纬度地区则有极显著的差别。

在一个范围相当大的地区内(半径 4~5 百公里)日变的规律是基本相同的。

日变的数值,对 Z 和 H 来说可达数十伽玛,因此在进行精密磁测时,将对结果有所影响,必须测定日变曲线来进行校正。这是很容易理解的,因为在磁法勘探过程中需要研究的只是由地质构造的非均匀性所引起的在一定测区内地磁场的变化。如果不考虑地磁场随时间的变化,那末在完全均匀的地质构造上,磁场应该是在各点不变的。由于磁场随时间变化,就会出现假异常,因为各个点是在不同的时间里测量的,或者,地层构造不均匀,有异常存在,由于上述原因也会使磁异常发生畸变。因此在进行弱磁测时,必须了解日变的规律,订出消除这种干扰的方法。当然在探测强磁异常时,由于异常本身很大,日变的数值常在测定