

磁法勘探教程

〔苏联〕A·A·洛加乔夫 著

中国工业出版社

磁 法 勘 探 教 程

〔苏联〕 A·A·洛加乔夫 著

吴 荣 祥 等 译



中 国 工 业 出 版 社

А.А.Логачев

КУРС МАГНИТОРАЗВЕДКИ

Гостехиздат Ленинград 1962

* * *

磁法勘探教程

吳榮祥等 譯

*

地质部地质书刊编辑部編輯 (北京西四羊市大街地质部院内)

中国工业出版社出版 (北京德胜门内大街10号)

北京市书刊出版业营业许可出字第110号

中国工业出版社第四印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店經售

*

开本 $850 \times 1168^{1/32}$ · 印张 11 · 字数 250,000

1965年9月北京第一版·1965年9月北京第一次印刷

印数0001—1400·定价(科五)1.80元

*

统一书号: 15165·4071(地质-349)

前 言

这本“磁法勘探教程”是根据为培养“地球物理找矿勘探”专业物探工程师而批准的教学大纲编写的。供大专学校学生用的“磁法勘探教程”第一版已在1951年出版。从那个时候以来，制成了在地面和空中测量磁异常的新仪器，研究出了计算磁化体埋藏深度、产状要素和磁化强度的新方法，得到了关于岩石磁化强度的新资料，以及关于应用岩石天然剩余磁化强度获得有关地磁场发展史的某些情况的新资料；推广了应用磁法解决各种不同地质任务的经验。

为了阐明这个方法的现状，它的理论基础和实际应用，本教程不得不重新编写。从1951年版本中只将至今仍有一定价值的某些磁力仪的描述部分保留了下来，在内容上作了很大压缩，但这并无损于掌握仪器结构的基本原理。某些问题，如测量前仪器的准备工作、野外工作和野外测量结果整理过程中的技术要求等等，在磁法勘探工作的现行规范中已做了详细的论述，在编写时就省略了。本书在描述仪器及其应用时，也考虑到在培养物探技术员的中等专业学校用的“磁法勘探教程”中，对测量技术问题已作过详尽讨论的情况。本书集中注意的是磁测结果的地质解释问题，其中包括利用磁化体磁场的现代理论计算磁化强度、埋藏深度，并尽可能用来推断磁化体形状、大小及其空间位置的问题。

作者注意到在磁异常的地质解释工作中已经积累的经验具有很大的意义，因此对应用磁法解决各种不同地质任务方面给予重视；磁法应用的经验是通过磁场图和剖面曲线图来说明的。在第一版中已经举过的某些实例，在本书中仍然采用。

本书最后附有大量参考文献目录，其中以有关磁场理论和磁法实际应用部分居多。这样做的目的，在于使得学生便于进行独

立工作，尤其在課程作业时感到方便。

在准备編写本教程的过程中，还考虑到在探討一些計算磁化体埋藏深度（和尽量計算其他产状要素）的方法方面，正进行着紧张的工作，根据这些方法就可以制訂使用現代电子計算机的规划。C.B. 沙拉耶夫（列宁格勒矿业学院）研究出来的方法是有远景的方向之一，其实质在于将各种不同矿体磁場强度的已知解析表达式分解为有理分式，分式中含有的未知参量可以用現代电子计算机求得。根据作者的請求，由 C. B. 沙拉耶夫編写了有关这方面的理論基础（§ 56）。

在完成本教程手稿的同时，全苏地质勘探科学研究所 H. Б. 多尔特曼的领导下完成了关于整理岩石物理性质实验資料的工作。根据作者的請求，H. Б. 多尔特曼扼要地叙述了关于岩石磁化率和剩余磁化强度資料的主要結果（§ 13）。

当选择資料說明磁法勘探的应用經驗，尤其是航空磁測的經驗时，航空磁測大队队长 B. H. 贊德尔、E. A. 卡斯帕罗娃及其同事們給予作者很大的帮助。

本书手稿經 B. M. 揚諾夫斯基教授（列宁格勒大学）、列宁格勒矿业学院地球物理探矿教研室 K. П. 索科洛夫、C. B. 沙拉耶夫和 И. Г. 克魯申等几位副教授以及列宁格勒大学地球物理探矿教研室科学研究员 A. C. 謝苗諾夫教授和 Ю. И. 庫特里亞切夫审閱。作者在最后整理手稿准备付印过程中，怀着感激的心情注意并考虑到了他們的意見。

目 录

前言

緒論	1
----------	---

第一章 地磁場	5
---------------	---

§ 1 地磁場的一般知識	5
--------------------	---

§ 2 正常地磁場	11
-----------------	----

§ 3 磁異常	17
---------------	----

§ 4 地磁場隨時間的變化	19
---------------------	----

§ 5 地磁變異	23
----------------	----

第二章 岩石磁性	28
----------------	----

§ 6 岩石磁化強度的一般特徵	28
-----------------------	----

§ 7 岩石磁性和礦物成分之間的關係	32
--------------------------	----

§ 8 岩石磁性同磁化場和溫度之間的關係	37
----------------------------	----

§ 9 岩石的天然剩餘磁化強度	43
-----------------------	----

§ 10 磁化強度和物體形狀之間的關係	49
---------------------------	----

§ 11 岩石標本磁化強度的測定	51
------------------------	----

§ 12 天然產狀岩石磁化強度的測量	64
--------------------------	----

§ 13 關於岩石磁化強度的實驗資料	68
--------------------------	----

第三章 地磁場及其變化的測量	78
----------------------	----

§ 14 絕對測量在磁法勘探中的應用	78
--------------------------	----

§ 15 磁偏角的測量	80
-------------------	----

§ 16 用磁經緯儀測量水平分量	81
------------------------	----

§ 17 用拉庫爾H型石英絲磁力儀(QHM)測量水平分量	86
------------------------------------	----

§ 18 垂直分量和磁傾角的測量	88
------------------------	----

§ 19 用核子(質子)磁力儀測量總向量 T	91
--------------------------------	----

§ 20 地磁場變化的測量	93
---------------------	----

§ 21 微磁變化的測量	97
--------------------	----

第四章 測量磁異常的技術和方法	100
-----------------------	-----

V

§ 22	用感应式航空磁力仪在大面积上测量 Z_n	100
§ 23	铁磁探测器的T型航空磁力仪	103
§ 24	脉冲式T型航空磁力仪	106
§ 25	二次谐波式T型航空磁力仪	110
§ 26	航空磁测比例尺	112
§ 27	航空磁测测线的联系	115
§ 28	野外测量误差的主要原因和减小误差影响的措施	119
§ 29	磁测图的整理	122
§ 30	航空磁测结果的图示	124
§ 31	地面磁测的磁秤	129
§ 32	M-2型磁力仪	131
§ 33	M-2型磁力仪野外测量的进行, 测量结果的整理和图示	136
§ 34	M-1型磁力仪及其应用	139
§ 35	M-17型磁力仪	146
§ 36	M-18型磁力仪	148
§ 37	施密特水平磁秤及其应用	151
第五章	磁化体磁场的理论基础	154
§ 38	磁场理论在磁法勘探中的应用范围	154
§ 39	磁场和引力场解析表达式间的关系	158
§ 40	直立柱体和球体的磁场	160
§ 41	薄板状体的磁场	165
§ 42	水平圆柱体的磁场	172
§ 43	厚板状体的磁场	178
§ 44	阶梯上的磁场	182
§ 45	旋转椭球体和圆柱体的磁场	184
§ 46	水平柱体上磁场强度的计算	187
§ 47	根据平面上给定场 Z 的分布来计算场 H	190
§ 48	计算高于已知场分布的给定平面的磁场强度	195
§ 49	计算低于已知场分布的给定平面的磁场强度	200
§ 50	将曲面上测得的磁场强度转换到水平面	202
§ 51	磁场强度梯度的计算	205
§ 52	场 ΔT 的解析表达式	208
§ 53	应用简单公式计算磁化体埋藏深度、产状要素和磁化强度的	

可能性	212
§ 54 利用磁場強度的增量計算磁化體的埋藏深度	218
§ 55 根據磁場的空間分布計算磁化體的埋藏深度和確定其形狀	226
§ 56 通過把函數 Z 和 H 變換為多項式和有理分式的方法計算磁化體的埋藏深度和產狀要素	233
§ 57 根據遠處點的磁場強度計算磁化體的埋藏深度	241
§ 58 根據 Z 曲線的拐點和極值點的橫坐標計算磁化體的埋藏深度	244
§ 59 磁化體下界面深度的計算	246
§ 60 計算磁化體埋藏深度的量板	250
§ 61 關於磁場強度解析表達式中所有參量計算方法的一般性意見	254
第六章 磁法勘探的應用	258
§ 62 航空磁測在小比例尺地質填圖中的應用	258
§ 63 航空磁測在石油和天然氣礦床普查中的應用	264
§ 64 磁法勘探在中比例尺和大比例尺地質填圖中的應用	272
§ 65 鐵礦床的普查和勘探	281
§ 66 其他礦床的普查	302
§ 67 微磁測量	316
§ 68 根據疏松沉積物的磁化率作地質填圖	321
§ 69 工作的組織	324
參考文獻	328

緒 論

磁法勘探簡單說來是研究地質構造和尋找并勘探礦產的方法之一，它是以利用由各種岩石的不同磁化強度所引起的地磁場變化為基礎的。在地質科學中，利用天然物理場和人工建立的物理場解決地質任務的方法，統稱為“地球物理勘探法”。地質測量和普查勘探工作，都是按照一定順序採用各種不同方法來完成的；至于確定採用包括地球物理方法在內的某些方法的順序，以及採用得是否合適，取決于所提出的任務、地質條件、地理的和其他條件。磁法勘探，正如任何其他地球物理方法一樣，要同在已知場合下既經濟又有效的一些其他方法合理配合，才會奏效，這些方法的應用順序應該使每一種方法得到的新資料和新結論不是簡單地湊合在一起，而是能對各種方法所得地質結論的完整性和嚴密性相互有所影響。

磁法的簡稱與其內容不是完全相稱的，因為在現今的實際工作中，它主要用于不同比例尺的地質填圖和普查不同的礦產，即或者用于直接發現礦體，或者用于確定成礦有利條件，並為其他方法圈定普查面積。

在勘探階段，目前磁法的作用暫時還是比較小的，儘管它在勘探中應用的可能性遠沒有全部發揮出來。已經確定採用的磁法勘探這一名稱，代替了以前更不恰當的、現在有時仍沿用的名稱“磁力測量”。磁法勘探的實質不僅僅是測量，並且與其說在于測量，倒不如說是在于對所觀測到的磁場進行地質解釋。磁法勘探是以有關礦床地質學和岩石物理性質的理論、地磁場理論和地質體磁化理論、磁化體磁場的數學理論為基礎的。

應用磁法工作量的不斷增長，令人信服地證明磁法在任何比例尺的地質填圖中的應用都是適宜的，因為不均勻的地質構造在

磁場图上有所反映，这就在許多情況下有可能來追索被浮土覆蓋的岩層接觸帶、岩漿形成物的形狀和大小、構造斷裂，還可能直接發現某些礦床。

在大面積上，尤其在難以通行的荒無人煙地區，地面磁測队的效率不高，使磁場的研究受到限制。

建立航空磁測方法，把在大面積上研究磁異常的速度加快了幾十倍，顯著地降低了單位測量面積的成本，實際上也就消除了蘇聯境內磁法勘探無法到達的界限。隨着這一方法的发展，以及能較精確地自動記錄磁異常儀器的制成，保證了對蘇聯全境几乎都作了比例尺為 1:1000000 磁測工作，有一半以上作了比例尺為 1:200000 的磁測工作。這些工作對一般地質測量、普查油氣礦床和其他礦床具有重大的意義。

現在，正在製造高穩定度和高精度的新式磁力儀，以及使測線較精確地聯系的儀器，這樣必將擴大航空磁測在地質調查中的作用。

擴大航空磁測的工作量，不會使地面磁測的意義降低，因為要想解決許多實際的任務，均須採用大比例尺，而這種比例尺是航空測量所無法達到的。

因此，製造高精度地面測量弱磁異常的新式儀器的工作，現在仍然在繼續進行中，這樣就會有助於擴大磁法勘探在地質勘探工作中的應用範圍。

磁法勘探中一個必要的階段，就是獲得有關磁異常的分布資料，其詳細程度和精度要符合地質任務的要求；磁法勘探的大部分經費正是在這個階段內花費掉的，因此當製造新儀器時，要重視給操作員配備以較輕便和高效率的儀器，提高勞動生產率，降低野外工作成本。

所獲得的有關磁場強度的資料要用對於引出地質結論來說最為簡便的圖表形式表示出來。顯然，根據磁場測量結果（同時考慮到其他方法所獲得的資料）得出的地質結論是否全面，論據是否充分，就決定着所完成工作的實用價值大小。

在地质解释时,要利用通过实验积累起来的关于不同地质体、构造断裂带、金属矿床等等上面磁场变化特性的资料,以及计算磁化体产状要素及其磁化强度的各种不同方法。运算的结果能以不同的精度作出有关磁化体埋藏深度、大小和空间位置、磁化强度的结论,因此在许多情况下对评价某一测区内普查某些矿产的远景及选择今后最经济的工作方法,都具有决定性的意义。正由于这样,许多研究人员正在探索计算不同形状及不同空间位置地质体的产状要素和磁化强度的新的途径。

在解释复杂场时,有必要将这种磁场进行转换,以便分出相当于最简单形状矿体的磁场变化。为此,正在拟定制造模拟装置的方法;利用这些装置,通过实验途径可以选择与实测场十分相似的场(更确切地说,与经过转换和换算成简单形状矿体的场相似)。

根据实测磁场,在许多情况下能够计算引起异常的岩石(或矿体)磁化强度的平均值。在一定地质条件下,这个值可以说明所测异常的可能性质,在综合利用不同地球物理方法时更是这样。因此,为了发展磁法,对岩石磁性,首先是磁化强度的研究,具有巨大的意义。

对岩石的天然剩余磁化强度研究之后,发现这种性质随时间的稳定性很高,因此就有一种想法,认为岩石的天然剩余磁化强度不仅能用来作为磁法地质填图和普查的基础,而且还能用来做为认识漫长地质时期内地磁场的一种手段。这个有成效地发展起来的新方向获得了公认,称之为古地磁学。

在回顾近几年来,尤其是近十年来磁法勘探发展的同时,应该指出,方法的理论基础、技术和工作方法的水平,已经有了很大的提高。拟定了根据在平面上给定的场来计算空间内磁场的实用方法,以及根据平面内磁场强度垂直分量的已知值计算水平分量的方法;已有成效地开始采用将复杂地形条件下在地表测得的磁场强度换算到某一水平面上的工作。最近几年,几乎所有旨在寻求计算产状要素的方法的理论工作,探讨的并不是垂直磁化的特

殊情况，而是矿体倾角任意、实际磁化方向为一般的情况。在复杂异常的地质解释时，是用求得高次微商或者高次有限差值的方法将实测场进行换算。在进行复杂计算时，不断扩大使用近代计算机的试验；供整理地球物理测量结果用的专门计算机正在设计中。

发展和实际运用理论方面的成就，对野外工作方法已有一定影响，因而在野外测量的实际工作中，现在不仅测量场的强度，而且测量强度的增量。磁测井正在发展。还同时采用短周期磁暴和大地电流作为研究深部地质构造的手段。

改进磁场测量技术方面的成就，同样是十分巨大的，制造灵敏度高、实际上没有零点变化的核子（质子）磁力仪，具有特殊重大的意义。

方法应用的可能性远没有全部发挥。为了提高磁法勘探工作的经济效果，必须在理论、工作方法、技术方面继续大力开展科学研究工作，并且要提供条件以便把研究工作的肯定成果迅速推广到实际工作中去。

第一章 地 磁 場

§ 1. 地磁場的一般知識

無論是在地表上还是用裝有磁力儀的火箭和人造衛星在遠離地表的高空上對地磁場強度進行多次測量，其結果都可以一級近似地把地磁場看作為磁化軸與旋轉軸大約成 $11^{\circ}.5$ 角的球體的磁場。根據磁場強度的實驗數據能夠算出地球的磁矩 M ，按最新數據， $M = 8.3 \times 10^{25}$ CGS。

在有關地磁場的理論中，通常討論磁場強度沿直角坐標系的諸分量，其中 x 軸是水平的，其正向指向地理北， y 軸也是水平的，正向指向東， z 軸是垂直的，正向指向下。磁場強度向量 T 沿各個軸的分量分別稱為北分量 (X)、東分量 (Y) 和垂直分量 (Z)；向量 T 在水平面上的投影稱為水平分量 $H = \sqrt{X^2 + Y^2}$ 。分量 H 和 x 軸之間的夾角稱為磁偏角；向量 H 偏離 x 軸向東，偏角為正，如偏離 x 軸向西，則偏角為負。 xy 平面和向量 T 之間的夾角稱為磁傾角，以 I 表示 (圖 1)。

根據地表不同點上磁場強度的實驗數據，能夠確定在地理坐標為 φ 和 λ 的每一點上，用地理坐標的函數形式表示出磁場強度沿坐標軸的各個分量。這時，可利用高斯提出的解析表達式；根據這些解析表達式，無窮級

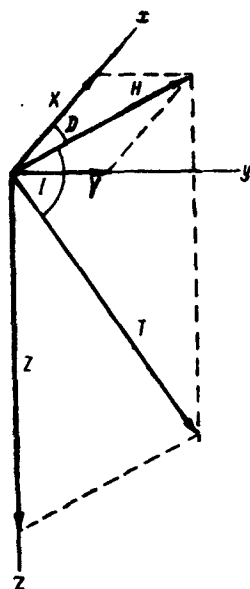


圖 1 地磁場要素

数的每一个展开项是 $\theta = 90^\circ - \varphi$ 和 λ 的球谐函数的总和；对展开的每一项来说，都具有两个常系数。根据包含有已知坐标点上磁场强度实验数据的方程式，可以算出这些常系数。必要的方程数目由乘积 $n(n+2)$ 来决定，其中 n 是所利用的展开项数目。如果像高斯所作的那样，只限于四次展开项，那末就应该有24个方程式。为了增加解题的可靠程度，高斯利用了36个方程式，用最小二乘法解方程[高斯，1952年；克雷洛夫，1922年；扬诺夫斯基，1953年]。

为了近似地了解地表上磁场强度的变化，我们利用球体磁位的表达式，即偶极子位的表达式，计算展开级数的前几项。

在距离为 r 的 P 点上，磁质量 m 的磁位表达式可由下式来决定：

$$U = -\frac{m}{r}$$

利用这个磁位表达式，可以求得引力沿任何方向 s 的表达式，即位沿此方向的微商，并冠以相反的符号。

我们在地表的一点 P 上，对位于地球球心并沿旋转轴定向的偶极子的位进行计算（图2）。

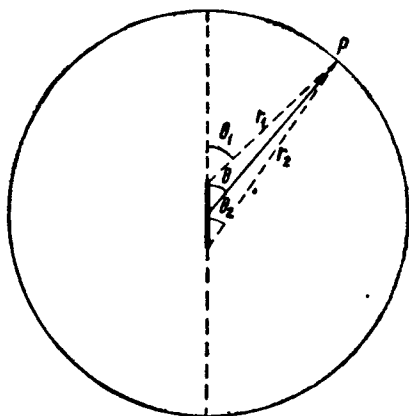


图2 P 点上偶极子的场强度

$$U = m \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) = m \left(\frac{1}{r - l \cos \theta_1} - \frac{1}{r + l \cos \theta_2} \right) =$$

$$= m \frac{l (\cos \theta_1 + \cos \theta_2)}{r^2}$$

在 l 不大的情况下, θ_1 和 θ_2 角可认为是相等的。这时, 由于分母中 $l^2 \cos^2 \theta$ 项与 r^2 相比很小, 所以这一项可以忽略不计。我们指出, $2lm = M$, 即等于地球的磁矩, 于是求得:

$$U = M \frac{1}{r^2} \cos \theta \quad (1.1)$$

要求得地磁场强度的垂直分量 Z 和水平分量 H , 就要分别求得对过 P 点圆的法线和切线的微商表达式, 即 dr 和 $r d\theta$ 的微商表达式。对 (1.1) 微分后, 求得:

$$Z = \frac{2M}{r^3} \cos \theta, \quad H = \frac{M}{r^3} \sin \theta \quad (1.2)$$

总向量 T 等于

$$T = \frac{M}{r^3} \sqrt{1 + 3 \cos^2 \theta} \quad (1.3)$$

而其方向由磁倾角 I 决定:

$$\operatorname{tg} I = \frac{Z}{H} = 2 \operatorname{ctg} \theta = 2 \operatorname{tg} \varphi$$

从这些公式中就可以得出关于磁场强度与地区纬度 $\varphi = 90^\circ - \theta$ 之间关系的一般概念。

总向量 T 在 $\theta = 0^\circ$ 的两极为最大, 而在 $\theta = 90^\circ$ 的赤道上为最小。 T 值的变化范围从 $\frac{2M}{r^3}$ 到 $\frac{M}{r^3}$ 。将 M 值和地球半径 r 代入, 则可求得 T 值从 0.66 变到 0.33 CGS。按所得的公式, 垂直分量值从两极上为 0.66 CGS 变到赤道上为零值, 而水平分量从两极上为

零值变到赤道上为 0.33CGS。磁場强度的单位为奥斯特。为了測量地磁場强度，常用 $1 \text{ mG} = 10^{-3} \text{ G}$ 和 $1 \text{ r} = 10^{-5} \text{ G}$ 。

上面的計算值一級近似地与磁場强度的实测值相符。由于地表上磁場强度的分布規律和磁矩值都是根据实验数据来确定的，所以两者自然是相符的。但在个别地段内，实测值与均匀磁化球体場理論值之間有很大的偏差，这一点是由于地球深部构造和表面构造的特性所引起的。

关于基本地磁場产生的原因，有过許多不同的假設。現在，几乎所有从事这个問題研究的学者都得出結論，认为地磁場是地核中有电流存在的結果。

根据地震資料推断，横波传播深度不能大于2900公里，而縱波速度在此深度上从 13.6 公里/秒变到 8 公里/秒，因此，可以作出結論：半径約 3500 公里的地核，具有金属导电性液体的性质。有人假設，物质在一定深度上的流动状态(液态)，就决定金属物质(重物质)和硅酸盐物质(輕物质)有可能按比重进行分层。在分界面以上，硅酸盐物质具有固体的性质。还有一种假設：根据地壳密度为 3.5—5 克/厘米³到地核密度为 8—10 克/厘米³的跃变来确定上述分界面。

根据最新的观点，认为不必假設物质在地核界面上是分层的。当地核界面上的压力为百万个大气压时，原子外层电子便向較高的能級位移，于是，物质变得致密，导电性增大到和金属一样。

如果假設地核具有液体的性质，那末就应该假設，依靠放射性元素衰变的能量，可能会产生涡流运动。在物质导电性很高的情况下，将会产生热电子电流[Elsasser, 1939]或感应电流[Фер-

① 奥斯特(G)——1930年由国际會議規定为CGS制中磁場强度的单位。

从1963年起，为了利用更方便起見，由苏联国家标准局(ГОСТ)9867—61 規定采用新的“国际单位制”(СИ)，其中以新的磁場强度单位 A/m 或 aG/m

(安培-匝/米)代替奥斯特。于是， $1 \text{ G} = \frac{1}{4\pi} \times 10^3 \text{ aG/m}$ 。

ншель, 1947]。

后一种假设的依据较为充足。在有一定的一次磁场存在的情况下，产生的电流会引起二次场，使一次场加强。靠着放射性元素衰变的能量，场将一直不断地增强下去，直到衰变能量等于物质粘滞性和其阻抗所引起的消耗能量为止。在这种情况下，一次磁场源的问题就没有很大的意义，只要把由于地球旋转所产生强度极小的磁场或由于太阳旋转而产生的太阳磁场作为一次磁场就足够了。

磁场强度和均匀磁化球体场之间的偏差，可以在面积大小极不相同(从十分之几平方公里到几百万平方公里——一个洲大小)的区域内观测到。在很大面积上观测到的偏差在文献中有着不同的名称：“世界性”、“洲际性”、“大陆性”异常，有时就叫做“剩余磁场”。世界性异常由地磁图来确定，地磁图是把测得的磁场强度减去假设地球沿其磁轴均匀磁化时算出的磁场强度编成的，大多数研究人员把地球表面划分出八个这样的异常。最强烈的而又清楚地圈出的大陆性异常，在以南雅库特为中心的亚洲地区内见到，其强度为正常场的30%。

尽管有许多学者对大陆性异常产生的可能原因提出了他们相当肯定的意见，但是这个问题到现在还没有搞清楚。不同意见的主要分歧在于：一些人把异常源认为是地核，另一些人认为是地壳。Ю. Д. 加里宁[1940]利用了亚洲东部的大陆性异常场强度的现有资料，通过计算确定了异常源位于0.4—0.6地球半径的深处(深度随着对异常源形状的不同假设而变)。这个结果是与最近用地球人造卫星在高空中所进行的地磁场观测结果相一致的。根据得到的有关异常源深度的数据，就能够假设基本地磁场和剩余地磁场产生的原因是共同的。但是，在评价这些结论的可靠程度时，应该注意到下列两种重要情况：1) 由于计算时所用的资料是按很稀的测网得到的，因此根据这些资料只可能作出大大平滑了的异常轮廓线；2) 划分大陆性异常的方法也是有争论的。尤其是，减掉地球磁化轴与旋转轴倾斜成 11° — 12° 时均匀磁化场的