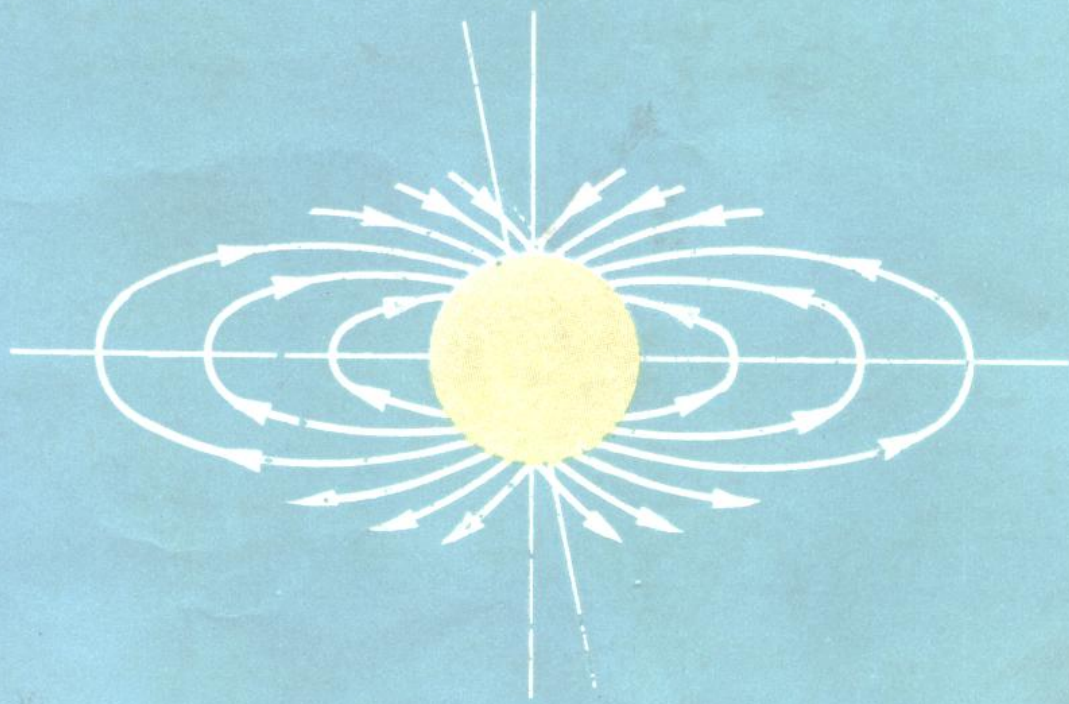


地
球
磁
场

地球磁场

它的历史、起源以及其它行星的磁场

[美]R·T·梅里尔 [澳]M·W·麦克尔希尼 著
国家地震局地球物理研究所第五研究室 译



中
国
科
学

.27
85



中国科学技术出版社

地球磁场

—它的历史、起源以及其它行星的磁场—

(美)R.T.梅里尔

著

(澳)M.W.麦克尔希尼

国家地震局地球物理研究所第五研究室 译



中国科学技术出版社

8610788

内 容 提 要

本书概述了地磁学和古地磁学的基础知识与近20年来的研究成果。全书共分12章，系统地介绍了地球磁场及其长期变化和短期变化，古地磁学与考古地磁学，地磁倒转，地球磁场及其长期变化的起源理论，以及月球、太阳、行星和陨石的磁场。

本书是从事地球科学研究人员，大学地球物理系与地质系学生，研究生和教师的重要参考书。

* * *

The Earth's Magnetic Field
R. T. Merrill M. W. Mc Elhinny
Academic Press Inc.

* * *

地 球 磁 场

——它的历史、起源以及其它行星的磁场——

[美]R. T. 梅里尔 [澳]M. W. 麦克尔希尼 著

国家地震局地球物理研究所第五研究室 译

责任编辑：崔秀琴

*

中国科学技术出版社出版(北京海淀区魏公村白石桥路32号)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

北京工业大学印刷厂印刷

*

开本：787×1092毫米1/16印张：17 字数：410千字

1986年7月第一版 1986年7月第一次印刷

印数：1—2,500册 定价：3.60元

统一书号：13252·1506 本社书号：1281

序

就我们今天看来，一些最早的科学探索是地球磁场的研究。皮特靳斯·佩雷格里纳斯 (Petrus Perigrinus) 1259 年所著《磁铁信札》(《Epistola de Magnete》) 今天被认为是人们写过的第一篇科学论文。然而直到可以利用考古地磁学和古地磁学在时间上往回延伸地磁场的历史记录的时候，我们对于地球地磁的历史和起源的了解才有了大的进展。古地磁学最有意义的发现之一是地磁场过去曾多次改变了它的极性。这个发现在板块构造理论的发展中起了决定性的作用，它对所有地球基本磁场起源模型都是一个约束条件。然而两种极性状态的存在对大多数地磁模型并不是一个强有力的限制。事实上，两种相反极性状态的存在与 30 年前建立的地球磁场起源理论并不矛盾。随后获得的并不令人吃惊的观测结果，似乎给基本磁场起源理论加上了有力得多的限制。

在过去的四分之一世纪中，地磁学的科学研究有三个主要领域。有与现代地磁场和它的长期变化有关的一些传统的地磁学领域。其次，古地磁和考古地磁的研究也已在世界上许多地方开展。从这些研究中产生的地磁领域往往仅是第二位的，其主要目标在于大陆漂移和板块构造。第三群研究者是从事基本地磁场及其长期变化的起源研究的理论家。不幸的是，这三个方面的研究者仍然处于互相隔离状态，例如，古地磁学家通常是理论基础相对薄弱的实验工作者。他们对发电机理论的理解往往相当粗糙。同时，理论家往往发现难于理解古地磁研究成果和不容易正确评价它们是怎样冲击发电机理论的。

本书是把地磁学中所有这三个类型的研究结合在一起的一种尝试。理论家需要以可应用于发电机理论的方式掌握向他们提供的古地磁学的成果。这样，他们能更多地了解一些观测对他们的理论所加的约束。同样，古地磁学家需要以他们能够理解的方式，掌握向他们阐述的发电机理论和以更有效的形式来表述他们的数据。我们希望本书能为这种目的服务。这样在第一章的历史介绍之后，在第二章中表述了关于现代地磁场和历史观测的较为传统的地磁学领域。古地磁学的各种方法和技术以及理论基础在第三章中给出。第四、五和第六章分三个论题表述了古地磁学和考古地磁学的研究成果。第四章叙述的是大致追溯到约 50,000 年前的地磁场的研究。第五章是关于地磁场的倒转，而第六章表述了时间早于 50,000 年前的和在几百万年或几亿年地质时间尺度上的地磁场的研究。第七、八和九章是讨论发电机理论的。第七章是基本不用数学为古地磁学解释发电机理论的物理基础的尝试。接着在第八章中使用了较多的数学技巧对发电机理论作进一步的理论处理。第九章阐明了地磁场长期变化和倒转起源的理论方面。第十章是我们把理论和实验两方面结合在一起，并使其相互联系起来的尝试。

地球仅是太阳系中具有或曾经具有内源磁场的几个行星体中的一个，因此我们在最后两章中讨论了月球、太阳、行星和陨石的磁场，试图确定在巨大的太阳系天体中产生磁场的必要和充分条件。

没有哪本书的写作没有得到同行们的帮助。我们在这里应特别感谢菲尔·麦克法登 (Phil Mcfadden)，因为他在统计理论方面与我们进行了令人鼓舞的讨论和不断给予关心，在过

去 18 个多月中他发展了这些理论。戴维·巴拉克拉夫 (David Barraclough) 慷慨提供了在第二章中采用的 1980 年地磁图。我们感谢他协助提供这些最新的图；而许多教科书中复制的是过时的地磁图。菲尔·麦克法登 (Phil McFadden)，罗斯·泰勒 (Ross Taylor)，特德·利利 (Ted Lilley) 和卡西·康斯特布尔 (Cathy Constable) 对本书某些章节作了重要的评论。我们感谢盖尔·斯图尔特 (Gail Stewart) 为多次的修改稿耐心地打字，感谢琼·考利 (Joan Cowley) 绘制了所有的插图。最后我们要感谢我们的家庭成员对我们要完成本书有时需要过长的工作日的谅解。

完成本书化了五年时间，因为我们发现在写作本书的过程中我们在发展这个学科。我们感到这是一个巨大的激励，希望读者将和我们分享我们对这世界最古老的科学之一的综合探索的热情。

R. T. 梅里尔

M. W. 麦克尔希尼

1983年9月于西雅图(美)

和堪培拉(澳)

目 录

序

第一章 地磁学与古地磁学的历史	(1)
1.1 磁罗盘.....	(1)
1.2 磁偏角、磁倾角与长期变化.....	(3)
1.3 地磁图与磁极探索.....	(5)
1.4 化石磁性与古代磁场.....	(6)
1.5 瞬时地磁变化——外磁场.....	(7)
1.6 地球磁场的起源.....	(8)
第二章 现代地磁坊：历史观测的分析与描述	(10)
2.1 地磁分量和地磁图.....	(10)
2.2 地球磁场的球谐分析描述.....	(11)
2.3 唯一性及其它数学问题.....	(22)
2.4 地磁长期变化：内源随时间的变化.....	(26)
2.5 外磁场.....	(35)
第三章 古地磁学基本原理	(41)
3.1 岩石磁学.....	(41)
3.2 磁性矿物学.....	(49)
3.3 古地磁的方向和磁极.....	(52)
3.4 古地磁强度方法.....	(60)
第四章 近代的地磁坊：古地磁的观测	(66)
4.1 考古地磁的结果.....	(66)
4.2 近代湖沉积的分析.....	(77)
4.3 地磁偏移.....	(82)
4.4 地磁功率谱.....	(87)
第五章 地磁坊的倒转	(92)
5.1 场倒转的例子.....	(92)
5.2 海洋磁异常.....	(96)
5.3 倒转序列的分析.....	(103)
5.4 极性过渡期的状况.....	(108)
第六章 时间平均的古地磁坊	(114)
6.1 地心轴向偶极子的假说.....	(114)
6.2 二次项.....	(118)
6.3 地球偶极矩的变化.....	(127)
6.4 古地磁长期变.....	(130)
第七章 地球磁坊的起源 (1)：引言与物理基础	(138)

7.1 地球内部的性质	(138)
7.2 一些非发电机假说	(141)
7.3 发电机问题	(143)
7.4 磁感应方程	(146)
7.5 发电机理论的一般概念	(150)
第八章 地球磁场的起源 (2): 高级发电机理论基础	(160)
8.1 向量球谐函数	(160)
8.2 运动学发电机	(162)
8.3 湍流和磁流体发电机	(168)
第九章 长期变化的源和磁场倒转	(176)
9.1 长期变化	(176)
9.2 磁场倒转	(182)
第十章 古地磁学和发电机理论	(187)
10.1 概述	(187)
10.2 永久磁场	(187)
10.3 地磁场的变化	(194)
10.4 核-幔边界	(196)
第十一章 月球磁学	(201)
11.1 月球构造及内部	(201)
11.2 现代磁场	(202)
11.3 月核	(204)
11.4 月球岩石的磁性	(208)
11.5 月球磁场的起源	(214)
第十二章 太阳、行星和陨石的磁场	(217)
12.1 太阳系的起源	(217)
12.2 太阳	(217)
12.3 陨石磁性	(224)
12.4 行星磁场	(226)
12.5 太阳系中的发电机	(229)
附录A SI 和 CGS 高斯单位及其换算因子	(232)
附录B 通用性理论介绍	(233)
参考文献	(235)
索引 (略)	

第一章 地磁学与古地磁学的历史

1.1 磁罗盘

在古代，中国人和希腊人就已经知道了天然磁石（磁铁矿）具有吸引力的特性。人们以为，公元前六世纪，希腊哲学家泰勒斯（Thales）进行了最早的磁体观测。从公元前三世纪到公元六世纪期间，中国文献已有关于磁体具有吸力功能的大量记载，但在泰勒斯时代前却找不着有关这方面的记载文章（李约瑟[Needham]，1962）。泰勒斯用万物有灵论来解释这种特性。在古代中国，通常称之为慈石，即“爱石”，它可与磁体的法文一词“aimant”相比。

磁罗盘的发明在科学上具有非常重要的意义。它是最早发明的刻度盘和指针仪器，而且是在现代科学研究中起着重要作用的那些自记仪器的前身。日晷更为古老，然而它仅是一个移动的影子而不是仪器本身运转。风向标也很古老，然而在古代的所有风向标中都没有为了精确读数的刻度圆盘。

目前知道的最早磁罗盘是由中国人发明的，时间至少在公元一世纪，很可能在公元前二世纪（李约瑟，1962）。这种罗盘（译者按：正式名称叫“司南”）由可以在一块光滑板（叫“地盘”）上自由旋转的磁石勺组成，王振铎（1948）制作了它的模型（图1.1）。由于这种勺子的自然磁化方向可以定在其主轴上，因此这个简单罗盘会自动指向南北，而不必考虑其所切割下来的石块（磁石）的磁化。这个勺子可以放置在南北方向上，经过加热并通过居里点冷却下来的处理之后，获得了热剩磁。用这种方法产生的较大磁化强度具有克服

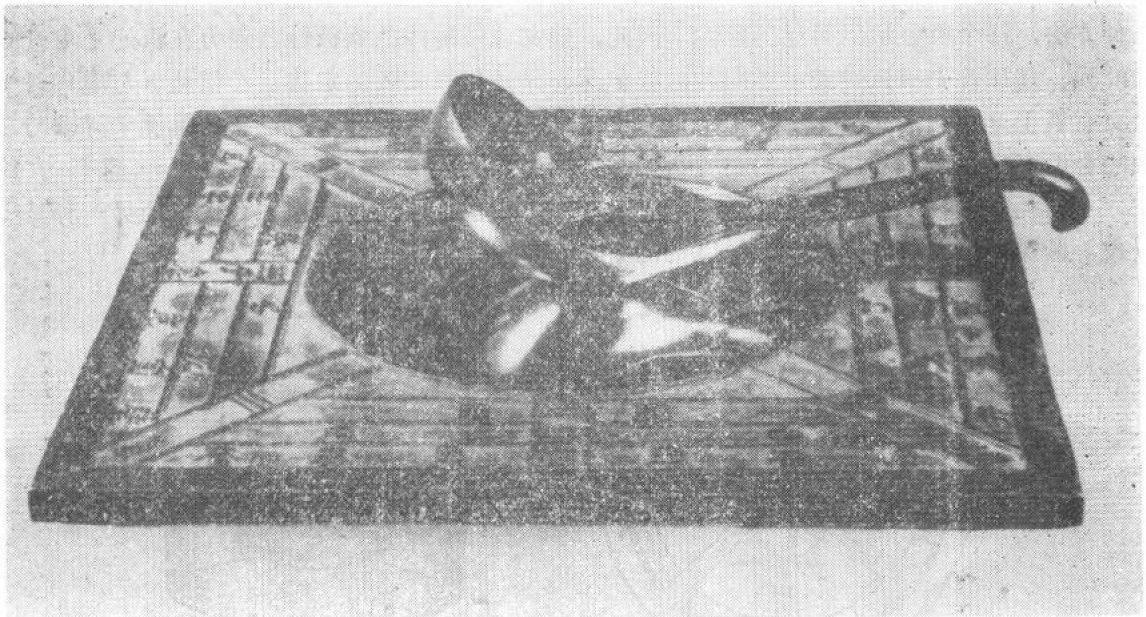


图1.1 王振铎(1948)制作的磁石勺与青铜地盘模型。这可能是磁罗盘的最早形式。向左为北。此图是经剑桥大学出版社准许后，从李约瑟(1962)著作中复制成的

勺子与地盘之间摩擦阻力的作用。在随后的几个世纪中，由于发明了漂浮式、干支点式以及应用丝和其他纤维的悬挂式的装置，从而克服了摩擦阻力造成的不便。

1190年，英国圣·奥尔本斯(St. Albans)的修士亚历山大·尼克汉(Alexander Neckham)首次提到，罗盘于12世纪传入欧洲。但是如何传入欧洲却无人知晓，大多数人接受的观点是经阿拉伯人之手由海路传到欧洲的(本杰明[Benjamin], 1895)。然而，经由陆路传入的可能性仍然存在，因为关于罗盘的记载，最早的阿拉伯文献多少要比欧洲文献晚些，也尚未发现印度文献的有关记载(李约瑟, 1962)。中国人认为指南是磁体的基本特性，而欧洲航海罗盘指针是指北的。这种差异相当重要，因为在欧洲它对磁指向性理论具有影响。

12世纪初，关于磁指向性的哲理认为，罗盘针指向北极星。由于北极星与其他星体不同，它的位置是固定不变的，因此推断，与指针相摩擦的磁石从北极星那里得到“效能”。在这一世纪中，还提出了关于存在北极磁石山脉的想法。北极星将它的效能传给磁石山脉，然后磁石山脉再传给指针，从而指针自己就指向北极星。按这种最早的理论，磁指向性是从天上降到地上的(史密斯, 1968)。

1266年罗杰·培根(Roger Bacon)首先对罗盘针北南指向的普遍性观点表示怀疑。几年后，来自皮卡第(Picardy)的意大利学者皮特勒斯·佩雷格里纳斯(旅行家彼得)对北极磁石山脉观点提出了疑问。磁铁矿藏出现于世界很多地方，那么为什么北极磁铁矿藏与众不同呢？然而，佩雷格里纳不仅进行了逻辑推理，而且用球状磁石做了一系列的实验。他在1269年所写的《磁铁信札》报道了这些工作。《信札》虽写于1269年，并在其后的几个世纪中在欧洲广泛流传，但直到1558年才挂上佩雷格里纳斯之名印刷出版(史密斯, 1970a)。在欧洲，他首先定义了磁极性的概念。他发现了磁子午线，并阐述了确定磁石球体极位置的几种方法，每个极显示出明显的磁性。因此，他发现了磁体的偶极性，磁力在极处是垂直的且最强，并且首先用公式表示了同种磁极相斥、异种磁极相吸的定律。《信札》与现代科学论文有着十分相似之处。佩雷格里纳斯与他的同代人不同，那些人以已有的推测来寻求与之相吻合的事实，而他却应用他的实验数据来得出结论。他的著作可能是世上第一篇科学论文。《信札》的第二部分包含了对两种型式的磁罗盘的描述，一种是漂浮式；而另一种是支点式。佩雷格里纳斯罗盘是欧洲记述的第一个支点式罗盘(图1.2)。

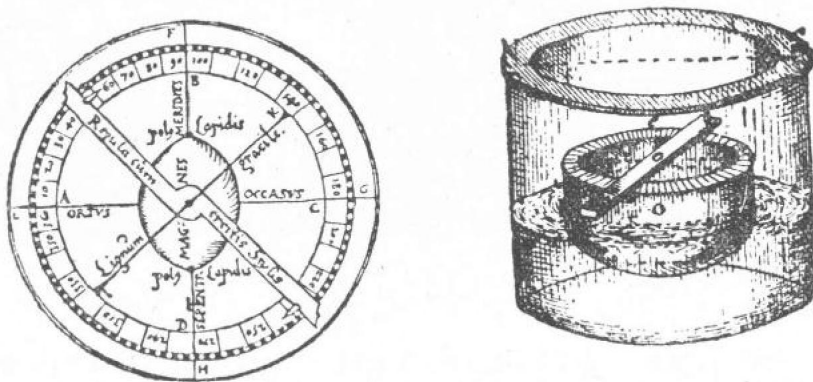


图1.2(a) 佩里格里纳斯《信札》中所描述的漂浮式罗盘，由贝特里(Bertelli)于1868年复制。一块卵

形的磁铁(magnets)放置在一个碗中, 整个碗漂浮于由大的透明容器所盛的水中。碗口有刻度: 0°对应于东, 90°对应于南(meridies), 180°对应于西(occasus), 270°对应于北(septentrio)。这些方向分别相对于佩雷格里纳斯预先确定每极(polus lapidis)的磁铁轴而言。一把带有一些竖直针的尺子放于有刻度的碗口, 用以测定太阳或月球的方位。旋转尺子, 直到针影恰好落在尺子的纵向上, 则太阳(或月球)的磁方位角就是尺子与磁轴之间的夹角。薄木条是用来确定大容器的基准线的。注意, 佩雷格里纳斯的图解所示的罗盘式样与精确细节, 在各流传本中稍有差别。这里的资料选自1558年第一版与史密斯的著作(1970a)(据史密斯图集,《地球科学评论》新闻增刊6.1, A15, 1970)

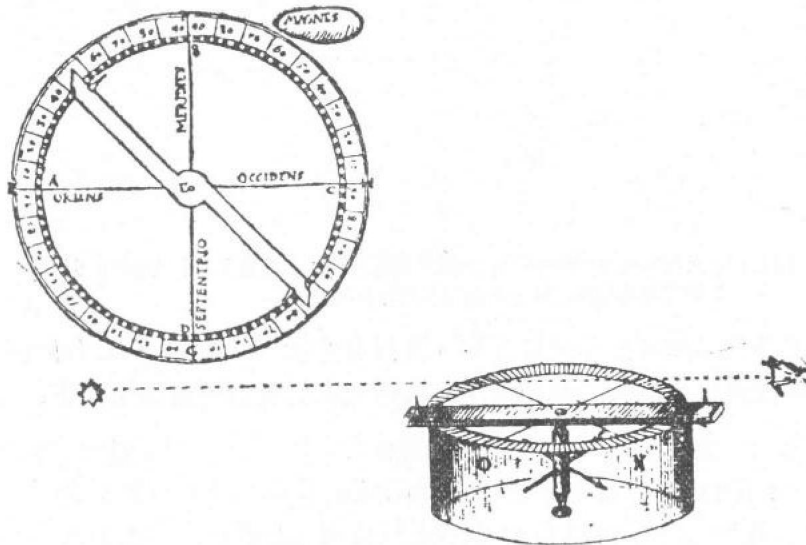


图1.2(b) 佩雷格里纳斯支点式罗盘, 由贝特里于1868年复制。铁磁棒通过支架放置, 支架可以在透明容器中旋转(参见: 现代罗盘的固定支架)。带有竖直针的尺子跟漂浮式罗盘中的作用一样。与上述类似, 容器亦有刻度。oriens = 东; occidens = 西。这里所示的天然磁石曾被用来磁化过铁针。选自史密斯著作(1970a)

1·2 磁偏角、磁倾角与长期变化

大约在公元720年, 中国的佛教徒天文学家一行最先对磁偏角进行了观测(李约瑟, 1962)。然而, 磁偏角的知识却没有跟罗盘一起传入欧洲。虽然在公元720—1280年间中国人记录了至少9次的偏角测量(图1.3), 但在欧洲的第一次测量可能是于1510年左右纽伦堡牧师格奥尔格·哈特曼(Georg Hartmann)在罗马所进行的。一般认为, 哥伦布于1492年首次航行到西印度期间, 他最先发现了欧洲地区的磁偏角。这种看法似乎不真实(查普曼与巴特尔斯, 1940), 因为有确凿的证据说明, 在欧洲至少1400年代初期就知道了磁偏角, 纵然在随后的世纪中未记录过精确的测量。

格奥尔格·哈特曼于1544年的信中提到, 他在那年发现了磁倾角, 但是该信件于1831年才在柯尼斯堡(现苏联加里宁格勒)档案馆中发现。所以, 他的发现对地磁学的研究没有影响。1576年, 英国水文学家罗伯特·诺曼(Robert Norman)再次发现了倾角。看来中国人没有发现倾角的任何记录。

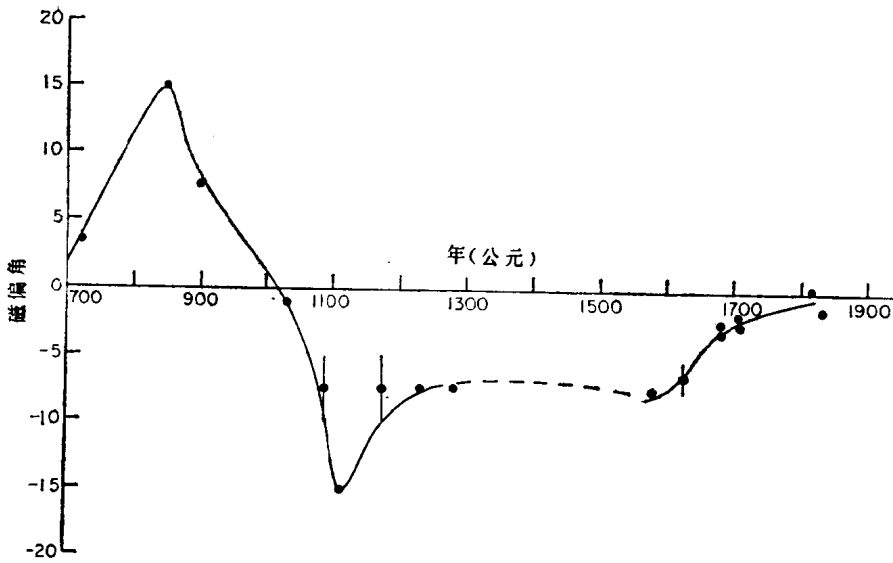


图1.3 公元720—1829年中国磁偏角随时间的变化。误差棒表示中文书中所引用的偏角的范围。据史密斯与李约瑟(1967)

1634年，格雷沙姆学院天文学教授亨利·吉利布兰德 (Henry Gellibrand) 首先发现了磁偏角随时间的变化。吉利布兰德的结论所依据的在伦敦的观测结果如下：

日期	观测者	偏角
1580年10月16日	威廉·巴勒 (William Borough)	11.3°E
1622年6月13日	埃德蒙·冈特 (Edmund Gunter)	6.0°E
1634年6月16日	亨利吉利布兰德	4.1°E

威廉·巴勒是海军审什员，而埃德蒙·冈特是天文学教授吉利布兰德的前任。虽然冈特注意到他与巴勒测量之间的差异，但他却没有认识到其中的意义，而把它归因于早期测量的可能不精确性。

同时，1546年数学家兼地理学家格哈特·梅凯特 (Gerhard Mercator) 从磁偏角的观测中首先认识到，磁针所指的地点不可能在天上，从而使他认识到磁极确实是固定在地球上。随后，诺曼和巴勒都认为，磁指向性与地球有关，而且焦点从极区移至较接近地心的一个区域。这个时期地磁研究的最佳成果是伊丽莎白女皇一世的内科医生威廉·吉尔伯特 (William Gilbert) 于1600年出版的，根据他关于磁学的实验研究成果写成的科学论著《论磁体》(De Magnete)。

在一系列的实验中，他研究了在球形磁石表面上的倾角变化。因此，他作出了第一个实用的倾角仪。虽然吉尔伯特必定大大地依靠皮特勒斯·佩雷格里纳斯的工作(史密斯, 1970a)，但他却比佩雷格里纳斯具有更为广泛的一般观测基础可资利用。佩雷格里纳斯知识中最主要的不足，是忽视了磁倾角，而这恰恰是使吉尔伯特认识到“地球本身就是一个巨大磁体”的极为重要的信息。假定，佩雷格里纳斯知道他的磁铁跟罗盘针的行为一样，那么他也许能象吉尔伯特一样，能将他的球状磁石推广到地球。事实上，米切尔 (Mithche, 1939) 已认

为，如果没有诺曼关于磁倾角的发现，那么绝写不出《论磁体》来。吉尔伯特的著作实际是许多世纪以来有关地磁学的思想和实验的结晶。他的结论结束了当时流行的关于磁学与磁针的许多不切实际的推测。除了地球的圆球性之外，地球作为整体的第一个特性就是磁性。87年之后，牛顿发表了他的《原理》一书，其中提出重力理论。

1.3 地磁图与磁极探索

磁罗盘作为航海的导航工具显然是十分有用的。葡萄牙海员发明了海上磁偏角的测定方法；有了这一成果，这些海员中最出色的一位是乔·德·卡斯特罗 (Joao de Castro)，1538年他率领了11艘航行到东印度的航艇中的一艘。他使用一台带有磁针的类似于日晷的仪器，确定了中午前后在相同高度上的太阳的磁方位角。分别按顺时针与逆时针方向测量的方位角差值之半即为磁偏角。在沿着印度西海岸和红海的航行中，卡斯特罗继续进行他的观测，在1538—1541年间获得了43组偏角观测值。要绘制世界范围的偏角变化图，这些观测为最早最有意义的尝试。这种方法很快地广泛应用于航海之中。

在1698—1700年间，埃德蒙·哈利 (Edmund Halley) 根据在大西洋的北部与南部的两次航行中的资料，画出了第一张地磁图。这是首次纯粹为科学目的而进行的海上航行，结果于1702年出版了第一张全球磁偏角图。1768年，约翰·卡尔·威尔克 (Johann Carl Wilcke) 在斯德哥尔摩出版了第一张全球磁倾角图。

德国探险家亚历山大·冯·胡姆玻尔特 (Alexander Von Humboldt) 首先发现了磁场强度与纬度的依赖关系。在1799—1803年间经过美洲的航行中，他在磁子午面内摆动倾角磁针，并且在10分钟内测量其摆动的次数。在秘鲁的地磁赤道上，摆动的次数为211；而向南与向北其摆动次数减少；这表明从赤道到磁极，磁场强度有规律地增加。后来，冯·胡姆玻尔特应用观测在水平面上罗盘针振荡时间的方法来确定水平强度的相对量值。在科学普查中普遍采用了这种较简单方法。1825和1826年，挪威大学应用数学教授克里斯托弗尔·汉斯廷 (Christopher Hansteen) 出版了最早的H与F的等力线图。

1838年，德国数学家卡尔·弗里德里希·高斯在他的科学论文《地磁学概论》(“Allgemeine Theorie des Erdmagnetismus”) 中，首先应用数学的形式来表示地磁场。根据在沿七个纬圈、经度间隔 30° 的84个点上从等磁线图获得的X、Y、Z的数值，高斯计算了地磁场位的球谐表达式中的系数。为此，他应用了三种等磁图(巴洛[Barlow]的等偏角图，1833；霍纳[Horner]的等倾角图，1836；萨拜因[Sabine]的等强度图，1837)。

高斯能够预测地磁极的位置；地磁极就是最适合的偶极轴与地球表面的交点。然而，北磁极与南磁极的位置(倾角为直角处，即倾角极)不是容易计算的，而是依赖于已有等值线图的外推。因此，对于早期极区的探险者来说，磁极的定位是十分有兴趣的问题。1831年5月31日，詹姆斯·克拉克·罗斯 (James Clark Ross) 发现了北磁极的位置在北纬 $70^\circ 05'$ ，西经 $96^\circ 46'$ 。后来，他试图找到南磁极，但未成功；至少过去了78年，才有寻找南磁极的机会。在1907—1909年沙克尔顿 (Shackleton) 探险队到南极期间，包括两名地质学家埃奇沃思·戴维 (T. W. Edgeworth David) 教授与道格拉斯·莫森 (Douglas Mawson) 教授的澳大利亚小组从罗伊兹角出发，他们自己认为，他们在1909年1月16日已经找到了南磁极的位置。然而，现在看来，由于测量不精确和必需品准备太匆忙，他们找到的位置并

不准确。随后计算获得了1909年南磁极最可能的位置为南纬 $71^{\circ}36'$ 、东经 $152^{\circ}0'$ ，它位于当时戴维和莫森的最后工作站西北约130公里的地方（韦布[Webb]和克里[Chree], 1975）。

1.4 化石磁学与古代磁坊

德莱西 (Delesse) 和梅隆尼 (Melloni) 分别在1846年与1853年对某些岩石平行于地球磁场而磁化的现象进行了最初的观测。在18世纪后期，已经观测到某些岩石具有非常强的剩余磁化强度，因为它们对罗盘针的影响很大。1797年，冯·胡姆玻尔特把这些效应归因于闪电的冲击。福尔格赫雷特 (Folgheraiter, 1899) 继续了德莱西和梅隆尼的工作，而且还研究了砖块与陶器的磁化。他论证说，如果知道砖块或盆钵在烧窑中的位置，那么，在其冷却中所获得的剩余磁化应当可以提供当时地磁场方向的记录。

继福尔格赫雷特的工作之后，戴维 (1904) 与布隆赫斯 (Brunhes, 1906) 研究了由熔岩流焙烧的而不是人工焙烧的物质。他们比较了岩流物质与在其下的被烧硬的粘土的磁化方向。他们报导了大致与现代磁场方向相反的自然剩余磁化的最初发现。被烧硬的粘土也具有反向磁化的事实，使得人们初步推测地球磁场本身在过去年代中曾经倒转过。梅尔坎顿 (Mercanton, 1926) 指出，如果地球磁场本身过去曾经倒转过，那么在世界各地都应当找到相反磁化的岩石。他从斯匹次卑尔根群岛、格陵兰、冰岛、法罗群岛、马尔、扬马延岛以及澳大利亚等地采集了岩石标本，发现有些岩石的磁化方向与现代地磁场方向相同，而另一些则大致相反。同时，Matuyama (1929) 在日本与中国东北地区近一或二百万年的熔岩中观测到了类似效应。然而，他注意到，与现代地磁场（正极性场）反向的熔岩一般要比同向的熔岩古老得多。这是时间序列与反向磁化岩石有关的第一次启示。罗奇 (Roche, 1951, 1953, 1956, 1958) 根据采自法国中央高原的岩样所观测到的极性交变详细指出这种时间序列，而且他认为最后一次倒转的时间是在后更新世的中期。霍斯帕斯 (Hospers, 1953, 1954) 对冰岛的熔岩序列，克拉莫夫 (Khramov, 1958) 对西土库曼的沉积序列进行了类似的观测。

薛瓦利埃 (Chevallier, 1925) 用埃特纳 (意大利) 的熔岩流，首先利用化石磁化来研究过去年代的长期变化 (图1.4)。应用考古地磁方法，特利埃 (Thellier) 和特利埃 (1951, 1952) 在法国与库克 (Cook) 和贝尔希 (Belshe, 1958) 在英国详述考古地磁方法在焙烧的炉床和陶器上的应用。约翰逊等 (1948) 首先试图利用新英格兰大约5,000—10,000年前各种沉积物来测定沉积物的近代长期变化。格里菲斯 (Griffiths, 1953) 利用瑞典的各种粘土进行了类似的尝试。而特利埃 (1937a, b) 开创了利用考古材料来进行过去强度变化的研究。随后，特利埃和特利埃 (1959a, b) 发表了特利埃方法的成果和细节概要。

梅尔坎顿 (1926) 提出了相当高明的建议，并于1930年创立了化石磁学在岩石上的可能应用。他建议，因为目前地磁轴与自转轴近似相关，所以它有可能检验磁极移动与大陆漂移的假说。到了韦格纳 (Wegener, 1924) 的大陆漂移假说时代，它又有可能成为解决争论的一种简单方法。然而，古地磁学是一种新的技术，被许多人认为是没有前途的，而且韦格纳的假说无论如何在欧洲和北美一般已名声狼藉了。20多年过去了，又有人重新研究古地磁学以检验磁极移动与大陆漂移假说。北美的格雷厄姆 (Graham, 1949) 以描述至今仍然应用的野外方法的经典论文开拓了研究的道路。1950年代初，由布莱克特 (Blackett) 和朗科恩

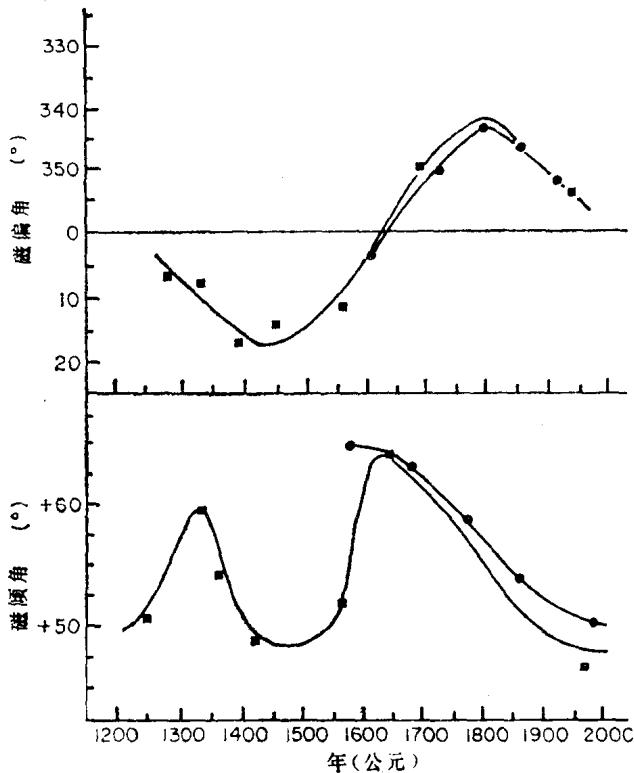


图1.4 薛瓦利埃(1925)根据埃特纳火山历史熔岩的磁化所确定的西西里地区的长期变化(黑方块表示),圆点表示磁场的直接观测值

(Runcorn)领导的英国小组所做出的工作表明,欧洲与北美的磁极差异大约为 25° 。这说明,大陆漂移曾经出现过,这两块大陆从前比今天靠近得多(朗科恩1966;欧文[Irving], 1956)。从南非和澳大利亚所获得的资料表明,有着更为明显的差异(格雷厄姆和黑尔斯[Hales], 1957;欧文, 1957)。

1.5 瞬时地磁变化——外磁场

1722年,格雷厄姆在伦敦用显微镜仔细观测罗盘针,发现了瞬时地磁变化,它比缓慢的长期变化要快得多。他注意到,某些天偏角变化缓慢而有规律,在另一些天则呈现不规则变化,有时变化较大而且较快。因此,在不同天之间,他进行了重要的区分,有些天为磁静日,另外一些天为磁扰日。1759年,坎顿(Canton)也在伦敦发现夏天的静日变化比冬天的大。随后,高斯和他的继承者从

1834年起发现了其他地磁分量的日变化。当时提出了许多推测,静日的太阳变化(S_q)形态慢慢地弄清楚了,发现 S_q 强度变化 50nT 左右,并与太阳黑子数年均值的增减存在相关性。这使斯图尔特于1882年推断, S_q 的起源必定是高空中的电流。1889年,舒斯特(Schuster)对 S_q 进行了球谐分析,从而证实了斯图尔特的推论,即 S_q 来自外源,但还发现很小部分来自内源。他把它正确地归因于由外源在地球内部感应的电流。

当时,一个导电的高空大气层的看法是存在电离层的最初启示。布赖特(Breit)和图夫(Juve)(1925, 1926)与阿普尔顿(Appleton)和巴尼特(Barnett)(1925)应用无线电波进行初次探测之后,才最后证明了电离层的存在。1922年,华盛顿的卡内基学院地磁系在紧靠磁赤道的秘鲁万卡约设立了地磁台。观测表明, S_q 水平分量强度比当时估计的要大2倍左右。随后,在磁赤道南北两边各约 2° 的窄带内都发现了这种增强现象。由这些观测所得出的狭窄赤道电流系统称为赤道注电流。

除了太阳静日变化 S_q 之外,还有扰日变化 S_D 。在过去的100年中,已经深入研究了 S_D 和磁暴期间的附加场,特别探讨了磁暴与极光的关系。过去曾经提出许多关于磁暴和极光的理论,但已被抛弃。1896年,伯克兰(Birkeland)阐述了,当电子流射向磁化球体时,磁场将使电子流向着两个磁极偏移。要产生极光与磁暴,从太阳发射的粒子流必须含有密度很高的带电粒子。然而,这种高密度、单一符号的带电粒子,在到达地球之前很久,便由它

们之间的静电斥力而弥散。因此，林德曼 (Lindemann, 1919) 认为，太阳微粒流可能是静电中性的，而不是电离的。查普曼和费拉罗 (Ferraro) (1931, 1932, 1933) 根据这一假设提出了一种理论，并且推断了这种微粒流冲击地磁场所导致的某些后果。他们发现在这种微粒流作用下将形成磁性空腔，而地磁场被局限于此区域内，戈尔德 (Gold, 1959) 称之为磁层。

20 世纪 30 年代，人们尚还不了解在延伸到几万公里的地球周围空间存在等离子体，也不了解存在着来自太阳的稳定等离子体流。比尔曼 (Biermann, 1951) 从慧星观测中推断存在这种等离子体流，而帕克 (Parker, 1958) 认为其源可能是太阳日冕中电离气体的流体动力学膨胀。当然，在太阳活动期间，太阳风将大大增强；这种活动引起在磁暴初相时所观测到的扰动，如同查普曼和费拉罗原先提出的那样。最后，范·艾伦 (Van Allen) 等 (1958) 利用火箭和卫星进行的高空大气探测，导致发现了地磁捕获辐射的存在。在此发现的第二年，测定了所谓“范·艾伦带”的捕获辐射的大体特性。

1.6 地球磁场的起源

威廉·吉尔伯特在他的《论磁体》中最先认识到地球磁场起源于地球内部。他认为，其源为在地球中心的永久磁化 (磁石)。随后，在 17 世纪上半世纪，雷内·笛卡尔 (Rene Descartes) 提出了对地球磁场起源的很多看法 (马蒂斯 [Mattis], 1965)。笛卡尔认为，地磁与“穿透成分” (threaded parts) 有关，它经由单通道穿过地球，主出入口在南北极。穿透成分有两种形式，一种是从北极流入而从南极流出，另一种则与此相反。这两种情况，穿透成分都具有现代术语的所谓“闭合场线”的性质。穿透成分经过空气而与穿过地球的穿透成分相连接。如果穿透成分在旅行过程中遇到磁石，那么它们将放弃原来途径而穿过磁石。它们在磁石内外缠绕，引起复杂的磁旋涡。这显然是对非偶极场的最初解释。

在现代，爱因斯坦于 1905 年写完他的狭义相对论不久，把地球磁场的起源问题描述为在物理学中尚未解决的五个最重要问题之一。布莱克特 (1947) 认为，大的天体可能具有正比于其角动量的磁偶极矩，它是由目前尚不了解的某些新的物理定律引起的。为了检验这种假设，布莱克特 (1952) 试图测量所预计的随着地球自转的纯金球的微弱磁场。尽管他应用了为此目的而特别设计的灵敏的无定向磁力仪，可是他得到了否定的结果，因此认为他的假设是错误的。在古地磁学的初期，他所研制的灵敏无定向磁力仪，被用来测量沉积岩的弱磁化，而且是一种重要的仪器 (第三章)。电荷分离的物体的自转将在该物体外部产生磁场，这为布莱克特假设提供了一种可能的物理解释。然而，英格里斯 (Inglis, 1955) 对地球内部的大磁场可能来源于温度与/或压力梯度引起的电荷分离的可能性表示怀疑。尽管这种过程可能在地球中是不重要的，可是它在其他一些巨大星体中可能仍起重要作用。

约瑟夫·拉莫爵士 (Sir Joseph Larmor, 1919a, b) 首先提出，诸如太阳这样的巨大星体可能具有磁场，该磁场来自自激发电机过程。但是，考林 (Cowling, 1934) 的轴对称的磁场不可能由对称性的运动来维持的理论发现，动摇了这种看法。它是最初的反发电机定理，而且也是为创立更普遍的反发电机定理而进行的广泛理论工作的开始。这种理论工作一直在继续着，直到由奇尔德雷斯 (Childress, 1970) 和罗伯茨 (G. O. Roberts, 1970) 所作出的某些重大理论突破为止，他们阐明了不存在这种普遍的反发电机定理。第八章给出了

这种观点的进一步讨论。

埃尔萨塞 (Elsasser, 1946a, b, 1947) 和布拉德 (Bullard, 1949a, b) 首先对发电机理论作出了重要的数学贡献。他们首先用比较现代的观点来讨论发电机。他们把磁流体力学发电机理论应用于液态核, 以建立自我维持的发电机模型; 而不依赖于金属丝、刚体圆盘等同极发电机方法。然而, 阿尔文 (Alfven, 1940) 对磁流体力学发电机理论的贡献是关键性的, 它在以后的地球发电机理论中起着重要的作用。特别是, 他提出的冻结场的概念 (第七章) 与磁流体力学波的思想是当代大多数发电机理论的核心。

第二章 现代地磁场: 历史观测的分析与描述

2.1 地磁分量和地磁图

对地磁场的直接测量在地磁台站连续进行着, 此外还有海洋、陆地、航空以及卫星的各种直接磁测。描述地磁场的常用方法就是简单地绘制诸如总强度和倾角的不同磁场分量。对各分量的定义如图 2.1, 某一地磁分量的等值线图即等磁图, 是最常用的表示这种数据的方法。磁偏角的等值线图叫等偏图, 磁倾角的等值线图叫等倾图。而等强度图, 对某一磁场分量, 比如说, 水平场, 则叫等力线图。长期变化的等磁图称为等变图。图 2.2 所示的就是上述各种等磁图的例子, 它们给出了地磁场及其长期变化的图示。

在 17 世纪吉尔伯特的工作之后, 地磁学家们已经认识到, 地球表面的磁场可以很好地

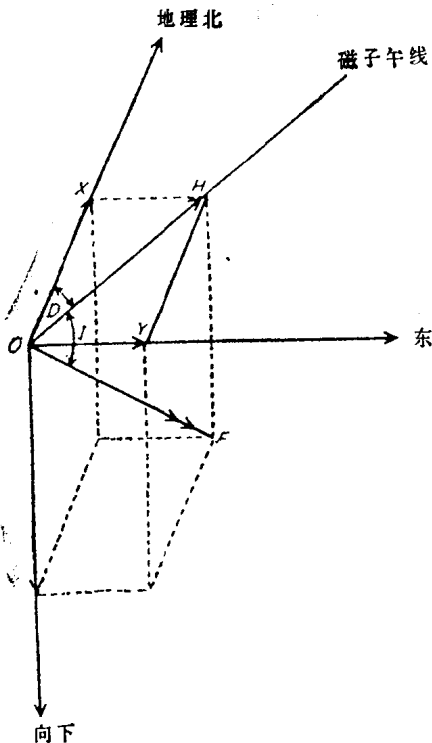


图 2.1 地磁场的主要分量。偏角 D 为磁针与真北的偏离 (东偏为正)。磁针位于磁子午面内, 总强度 F 在磁子午面内, 总强度 F 与垂直分量 Z 的夹角为倾角 I , 下倾为正 (如位于北半球) 上倾为负 (如位于南半球)。 F 的水平分量 H 与垂直分量 Z 由下面两式分别定义: $H = F \cos I$, $Z = F \sin I$ 。与 I 一样, Z 以向下为正。水平分量可分解为北向分量 X 和东向分量 Y , $X = H \cos D$, $Y = H \sin D$, $\tan D = Y/X$, $\tan I = Z/H$

用一个位于地心、与地球自转轴成 11.5° 夹角的磁偶极子场来近似表示。这样的一个偶极子可以解释大约 90% 的地表磁场。北半球大部分地区地磁场下倾, 而在南半球大部分地区的地磁场则上倾。通过地心沿偶极子轴的直线交于地球表面的两点, 称之为地磁极。它们和磁极不同, 磁极为地表上磁场垂直于地表的点。如果地表磁场可以完全用地心偶极子来描述, 则地磁极与磁极重合。但实际上并非如此, 因为地表磁场用地心偶极子最佳拟合后还剩余 10% 的成分。地磁场的这一剩余部分称之为非偶极子磁场。地磁偶极场、非偶极子场二者都随时间变化。

由于在本书后面将可清楚见到的种种原因, 地磁场的定量描述是重要的。尽管本章后面几节讨论了一些定量表示地磁场的其他方法, 但本书重点描述最广泛应用的球谐分析。利用全球的各种资料, 通常对连续记录的台站资料给予较大的权重, 得出描述地磁场的截断球谐分析的系数。这些系数包含有与地磁场及其随时间变化有关的大量信息。但是人们常常不能正确地评价它, 因为应用场的球谐表达式往往得出不正确的“物理”解释。所以本章将

用大量篇幅讲解对球谐分析的理解及其在描述地磁场中的应用。本章还将描述最近 150 年左