

478007

地球基本磁场

安振昌 编著



中南矿冶学院



图书馆藏

地 球 基 本 · 磁 场

安振昌 编著

地球基本磁场

安振昌 编著

编辑：国家地震局地球物理研究所
出版：《地震地磁观测与研究》编辑部
（北京海淀区清华东路）

印刷：北京工业大学印刷厂
装订

前 言

“地球基本磁坊”是国家地震局地球物理研究所负责编纂的地震地磁观测与研究的丛书之一。本书是著者根据从事地磁、地球物理勘探和高空物理的科研工作,并参考国外有关科研成果写成的。全书共分八章,第一章简要介绍地磁坊的基本内容;第二、三和四章分别介绍地磁测量、地磁资料的整理、地磁图;第五、六、七、八章依次介绍地磁坊的模式、表示局部地区地磁坊分布的数学方法、长期变化、高空磁坊的计算方法。该书可供从事地球物理、地球物理勘探和空间物理科研和教学的科技工作者参考使用,也可供大专院校地球物理、地质和空间物理等专业的学生阅读。

本书在编写过程中,祁贵仲教授提出许多指导性意见,陈志强先生审校部分章节,刘成瑞、詹贤鋈和张崇阳同志负责编辑和组织出版,在此一并致谢。本书编写中,承国家地震局监测处和国家地震局地球物理研究所科研处的积极支持,在出版过程中又得到北京工业大学印刷厂的大力协助,著者对此表示衷心的感谢。

由于著者水平有限,缺点错误在所难免,恳请读者批评指正。

著 者

一九八二年五月

地球基本磁场

前言

第一章 地磁坊	(1)
1.1 基本磁坊	(1)
1.1.1 地磁要素	(1)
1.1.2 基本磁坊	(2)
1.2 变化磁坊	(5)
1.2.1 电离层和磁层	(5)
1.2.2 变化磁坊	(8)
1.3 中心偶极子和偏心偶极子	(13)
1.3.1 中心偶极子	(13)
1.3.2 偏心偶极子	(16)
1.4 偶极子磁坊 非偶极子磁坊 磁极	(21)
1.4.1 偶极子磁坊与非偶极子磁坊	(21)
1.4.2 磁极	(23)
1.5 地磁坊的太阳周变化	(24)
1.5.1 引言	(24)
1.5.2 “球谐分析——谱分析”方法及其主要 结果	(26)
1.5.3 “谱分析——球谐分析”方法及其主要 结果	(29)
参考文献	(33)
第二章 地磁测量	(36)

2.1 引言	(36)
2.2 地磁测量的种类	(37)
2.2.1 陆地磁测	(37)
2.2.2 海洋磁测	(38)
2.2.3 航空磁测	(38)
2.2.4 卫星磁测	(39)
2.3 中国的地磁测量	(41)
2.4 世界地磁测量	(43)
参考文献	(43)
第三章 地磁测量资料的通化	(45)
3.1 通化的概念	(45)
3.2 选择通化方法的依据	(45)
3.3 变化磁场的改正方法	(47)
3.3.1 方法(一)	(47)
3.3.2 方法(二)	(48)
3.3.3 方法(三)	(49)
3.3.4 方法(四)	(51)
3.3.5 变化磁场改正的检验	(54)
3.4 年变率的改正方法	(55)
3.5 仪器差的改正方法	(55)
参考文献	(56)
第四章 地磁图	(57)
4.1 引言	(57)
4.2 编制地磁图的基本原则	(58)
4.2.1 投影	(58)
4.2.2 比例尺	(58)

4.2.3 等值线的间隔	(60)
4.2.4 等值线的光滑和展平	(61)
4.3 编制地磁图的主要方法	(62)
4.3.1 图解法	(62)
4.3.2 泰勒多项式法	(64)
4.3.3 球谐分析法	(65)
4.4 地磁图的编制过程	(65)
4.5 地磁图的质量	(66)
4.6 世界地磁图	(68)
4.6.1 英国出版的世界地磁图	(68)
4.6.2 美国出版的世界地磁图	(70)
4.6.3 苏联出版的世界地磁图	(71)
4.6.4 <i>IGRF</i> 1975.0 世界地磁图	(71)
参考文献	(86)
第五章 地磁场的模式	(89)
5.1 引言	(89)
5.2 地磁场的球谐模式	(89)
5.2.1 简史	(89)
5.2.2 1965.0 年的国际地磁参考场 (<i>IGRF</i> 1965.0)	(92)
5.2.3 1975.0 年的国际地磁参考场 (<i>IGRF</i> 1975.0)	(96)
5.2.4 1980.0 年的地磁场模式	(108)
5.3 地磁场的偶极子模式	(115)
5.3.1 方法	(115)
5.3.2 分析与讨论	(119)

5.4 地磁场的电流环模式.....	(126)
5.4.1 方法.....	(126)
5.4.2 分析与讨论.....	(133)
参考文献.....	(135)
第六章 表示局部地区地磁场及其长期变化分布的	
数学方法	(138)
6.1 引言.....	(138)
6.2 二维幂多项式方法.....	(138)
6.2.1 方法.....	(138)
6.2.2 分析与讨论.....	(139)
6.3 球谐分析方法.....	(148)
6.3.1 方法.....	(148)
6.3.2 分析与讨论.....	(150)
6.4 曲面样条函数方法.....	(153)
6.4.1 方法.....	(153)
6.4.2 用曲面样条函数表示 1970 年中国地区	
地磁长期变化的分布.....	(154)
6.4.3 分析与讨论.....	(155)
参考文献.....	(157)
第七章 长期变化	(160)
7.1 引言.....	(160)
7.2 偶极子磁矩的衰减.....	(162)
7.3 地磁场的西向漂移.....	(165)
7.3.1 长期变化的西向漂移.....	(166)
7.3.2 非偶极子磁场的西向漂移.....	(172)
7.4 长期变化的其它特征.....	(174)

7.4.1 中心偶极子轴的西向旋进·····	(174)
7.4.2 非偶极子磁场的北向漂移·····	(174)
7.5 长期变化脉冲·····	(174)
7.6 长期加速度·····	(176)
参考文献·····	(179)
第八章 高空磁场的计算方法 ·····	(182)
8.1 引言·····	(182)
8.2 Zmuda 方法·····	(183)
8.2.1 数理依据·····	(183)
8.2.2 计算公式·····	(184)
8.2.3 计算方法·····	(187)
8.3 球谐分析方法·····	(192)
8.3.1 借助于全球范围地磁场球谐分析的计算 方法·····	(192)
8.3.2 借助于局部地区地磁场球谐分析的计算 方法·····	(195)
参考文献·····	(198)

第一章 地磁场

1.1 基本磁坊

地磁坊是地磁学的主要研究对象。我们的祖先最先发现地磁坊的存在。指南针是我国古代四大发明之一；1600年 Gilbert 提出“地球是一个巨大的磁石”的著名论断；Gauss 于1838 年对地磁坊进行了球谐分析，为地磁学的发展奠定了理论基础；Chapman 为现代地磁学的发展作出了卓越的贡献。

1.1.1 地磁要素

地磁坊所占据的空间是非常大的，从地核一直到磁层边界。地磁坊是一个矢量坊，要描述某一地点的地磁坊需要三个独立的分量，这些分量通常叫作地磁要素（图1.1）。

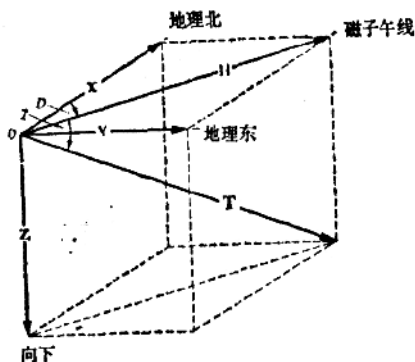


图 1.1 地磁要素

地磁要素之间的相互关系为

$$\left. \begin{aligned} H &= T \cos I, & Z &= T \sin I = H \tan I, \\ X &= H \cos D, & Y &= H \sin D, \\ X^2 + Y^2 &= H^2, & X^2 + Y^2 + Z^2 &= H^2 + Z^2 = T^2 \end{aligned} \right\} (1.1)$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta H &= \Delta T \cos I - \Delta I T \sin I, \\ \Delta Z &= \Delta T \sin I + \Delta I T \cos I, \\ \Delta Z &= \Delta H \tan I + \Delta I H \sec^2 I, \\ \Delta X &= \Delta H \cos D - \Delta D H \sin D, \\ \Delta Y &= \Delta H \sin D + \Delta D H \cos D. \end{aligned} \right\} (1.2)$$

1.1.2 基本磁场

地磁场的部分来源于地核，叫作地球的基本磁场 [1, 9, 13, 14, 16]。基本磁场随时间的缓慢变化，叫作地磁场的长期变化。长期变化随时间也有缓慢的变化，叫作地磁场的长期加速度。Malin 分析了 1942.5—1947.5, 1947.5—1952.5, 1952.5—1957.5, 1957.5—1962.5 各个期间的长期变化^[11]，并在此基础上推导出 1942—1962 年期间的长期加速度（图 1.2—1.4）。

地壳岩石及磁性矿物所产生的磁场，也是基本磁场的一部分，叫作地壳磁场。

基本磁场是由正常磁场和异常磁场组成的。根据地磁场的空间位置，可以定义以下三种正常磁场：

1. 正常磁场是由中心偶极子磁场组成的

这就是通常所说的均匀磁化球体产生的磁场，它是由地核内的电流体系产生的。地磁场球谐模式的前三项($n=1$)代表了这种正常磁场在全球的分布。以这种正常磁场为背景，可以研究世界磁异常的特征。

2. 正常磁场是由中心偶极子磁场和世界磁异常组成的

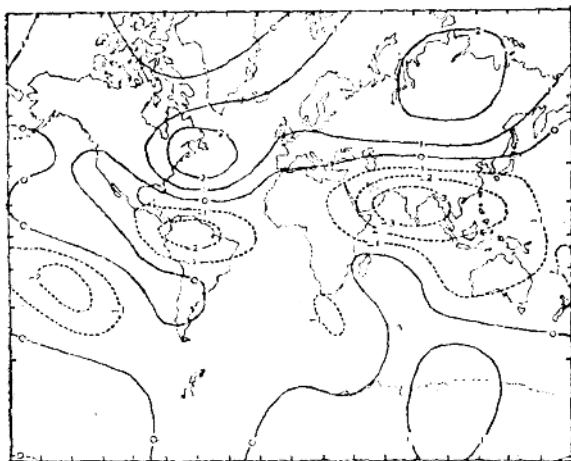


图 1.2 地磁场的长期加速度 $\vec{X}$, 单位: $\text{nT}/\text{年}^2$

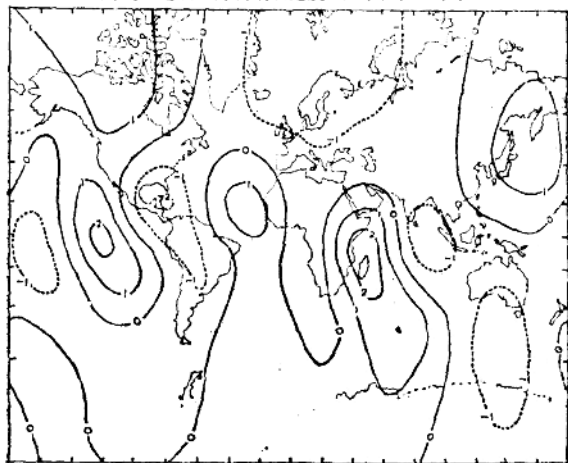


图 1.3 地磁场的长期加速度 $\vec{Y}$, 单位: $\text{nT}/\text{年}^2$

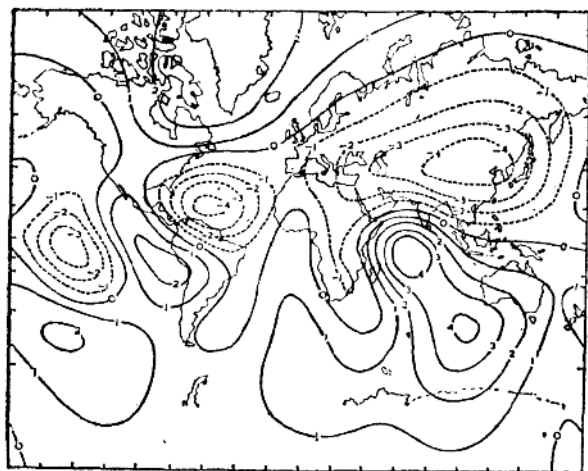


图 1.4 地磁场的长期加速度 $\dot{Z}$, 单位: nT/年²

通常认为这种正常磁场来源于地球的深部, 是由地核内的电流体系以及核幔界面的涡旋电流体系产生的。国际地磁参考场($n=8\sim 12$)就表示出这种类型的正常磁场在整个地球上的分布。可以认为这种类型的正常磁场只包含地核场, 而不包含地壳场, 这就是说, 用这种类型的正常磁场的表示式, 可以近似地把地核场与地壳场区分开来。

3. 正常磁场是由中心偶极子磁场、世界磁异常和区域磁异常组成的

这种正常磁场不仅包括地核场, 而且也包括了地壳内的大范围的区域磁异常。是否可以认为某一局部地区的地磁场模式, 就表示了这种类型正常磁场的分布, 利用这种类型的正常磁场可以对地方磁异常进行初步地分析。

1.2 变化磁坊

地磁坊有很小的一部分来自地球的外部空间，是由电离层和磁层里的电流体系产生的，它随时间而变化，且与太阳活动有密切的关系，这就是地球的变化磁坊^[9, 12, 17]。

1.2.1 电离层和磁层

这里主要介绍电离层和磁层里的各种电流体系，它们是产生变化磁坊的根源。

1.2.1.1 电离层

在地面上空 90 公里到 130 公里的高度，由于太阳的电磁辐射产生了一种电流体系，它所产生的变化磁坊是最主要的变化磁坊之一。太阳静日变化 S_q 电流体系就是这种电流体系的简化模式（图 1.5）。太阳静日变化是平静变化坊中的最主要的成分。

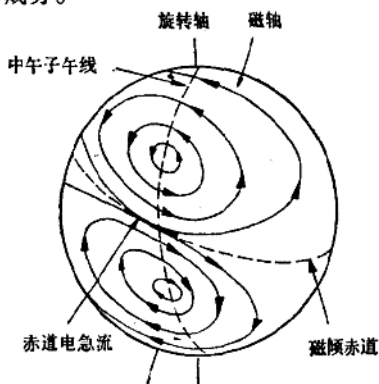


图 1.5 S_q 电流体系略图

由于电离层中的电离气体受到地磁坊的作用，所以，电流不必在电坊的方向上流动。电离层里的电流是很复杂的，对于无限大的电离层，如果电坊平行于磁坊，则电流平行于磁坊

和电坊；如果电坊垂直于磁坊，则有一种平行于电坊的电流，叫 Pederson 电流，另一种电流垂直于电坊和磁坊，叫 Hall 电流。对于实际的电离层，它的厚度是有限的，由于有限电离气体的自然极化，将产生一个附加的电坊，这将增加初始电坊方向上的 Pederson 电流，而且由极化坊和磁坊产生了感应的 Hall 电流。

1.2.1.2 磁层

在地球附近的空间(如离开地面几千公里)，地磁坊的形态和一个放在地心的磁偶极子所产生的磁坊差不多，但是，在远离地球的地方(如离开地面几万公里)，由于太阳风与地磁坊的相互作用，使得地磁坊的形态发生了很大的变化。太阳风是一种热的完全电离的气体，主要是由电子和质子组成的。太阳风与地磁坊相互作用，形成了三种基本的电流体系，把地磁坊限制在磁层里(图 1.6)。

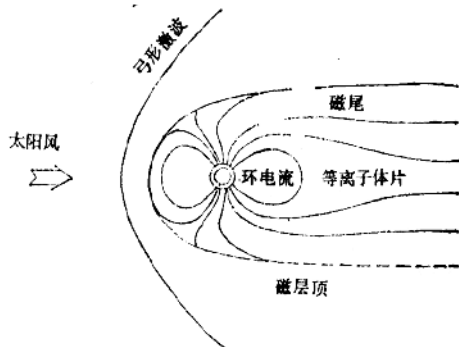


图 1.6 地球的磁层

磁层的结构是复杂的。因为太阳风是超音速流，所以将产生弓形激波，在弓形激波的里面是磁层顶，磁层顶实际上

是太阳风与地磁坊之间的边界,在这里有磁层顶电流,它是磁层里第一个基本电流体系。太阳风压缩地磁坊的向阳面,把背阳面的地磁坊拉长,形成一个长长的尾巴——磁尾。在向阳面,磁层顶离开地面约 10 个地球半径(一个地球半径是 6370 公里),而磁尾的长度有几百个地球半径。在磁尾等离子体片上有磁层的第二个基本电流体系——等离子体片电流,在等离子体片两侧,磁力线的方向恰好相反。在离地面较近的地方,磁层顶电流和等离子体片电流的影响较弱,故地磁坊磁力线的形状与磁偶极子磁力线的形状是差不多的。然而,太阳风的作用通过第三种基本电流体系——环电流,在地面上仍能被观测到。环电流是由被地磁坊捕获的质子和电子形成的,它是围绕地球的西向电流。上述这三种基本电流体系所产生的磁坊,对于地球的内源磁坊来说,是一些附加的扰动磁坊,这些扰动是用两种不同的方式表现出来的,一种是较稳定的变化,另一种是脉冲变化。

1. 磁层顶电流

由于太阳风与磁层等离子体的相互作用而产生磁层顶电流,这种相互作用包括行星际磁力线与地磁坊磁力线的合并,这种合并导致了磁通量从向阳面向磁尾的传输,磁坊能量被储存在磁尾。太阳风压力的变化,或磁坊的变化,都将引起合并速率的振荡,结果有各种各样的波动在整个磁层里传播,这些波动可以是周期为几秒钟到几分钟的连续的磁坊振动,也可以是没有明显周期的脉冲变化,正如在地面上所观测到的那样,这些波动的幅度只有几个伽马的量级。

2. 等离子体片电流

虽然等离子体片电流在范围上是非常巨大的,但因为它

距离地球很远，故对地磁场的扰动是一种稳定的扰动。但是，出现在极光带的巨大脉冲扰动经常与等离子体片电流的大范围溃消有关，这种溃消的原因还不清楚，看来是磁尾结构的不稳定性造成的，磁尾的不稳定性导致了储存在磁尾的磁场能量的大量释放。溃消的等离子体片电流找到一条进入地磁场极光带的通路，产生了幅度常常大于 100 伽马的磁扰动（表现为水平强度的减小）。有时，强烈的行星际激波或行星际磁场的有利的定向，能引起磁尾的不稳定性，产生磁亚暴。因为行星际激波常常是由太阳耀斑产生的，因此，磁亚暴与太阳耀斑有着密切的关系。

3. 环电流

环电流是一种比磁层顶电流或等离子体片电流更为稳定的电流体系。在磁暴期间，来自等离子体片的粒子注入到环电流里，产生了一种附加的磁场扰动，比较大的扰动有 100 伽马的量级。

1.2.2 变化磁场

电离层和磁层里的复杂的电流体系产生的磁场叫作变化磁场。除了上面提到的四种基本电流体系以外，还有些次要的电流体系，如场向电流，它是由捕获粒子的运动而产生的，电流的方向沿着磁力线，在电离层和磁层之间形成回路。另外，在极区还有偶然发生的电流，这种电流与带电粒子的注入和磁尾能量的释放有关。

根据地面的观测，要把地磁场的内源场和外源场完全分离开来，这是很困难的。不过，地磁场的球谐分析为这种分离提供了一种方法，在地磁场的球谐表达式里，不仅包括内源场系数，而且也包括外源场系数，根据地磁台站资料，可