

中国现代科学全书

CHINESE ENCYCLOPAEDIC SERIES OF MODERN SCIENCES

● 固体地球物理学

● SOLID GEOPHYSICS

● 徐文耀 编著

地磁学

GEOMAGNETISM

地震出版社

中国现代科学全书

CHINESE ENCYCLOPAEDIC SERIES OF MODERN SCIENCES

● 固体地球物理学

● SOLID GEOPHYSICS

责任编辑：姚家榴

封面设计：文理工



ISBN 7-5028-2109-0



9 787502 821098 >

ISBN 7-5028-2109-0/P · 1132

(2665) 定价：30.00元

中国现代科学全书·固体地球物理学

地 磁 学

徐文耀 编著

地震出版社

图书在版编目(CIP)数据

地磁学/徐文耀编著. —北京:地震出版社, 2003. 4

(中国现代科学全书·固体地球物理学)

ISBN 7-5028-2109-0

I. 地… II. 徐… III. 地磁学—普及读物 IV. P318-49

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 049334 号

地磁学(中国现代科学全书·固体地球物理学)

徐文耀 编著

责任编辑: 姚家榴

责任校对: 张晓梅

出版发行: 地震出版社

北京民族学院南路 9 号

邮编: 100081

发行部: 68423031 68467993

传真: 68423031

门市部: 68467991

传真: 68467972

总编室: 68462709 68423029

传真: 68467972

E-mail: seis@ht.rol.cn.net

经 销: 全国各地新华书店

印 刷: 潍坊长城印刷厂

版(印)次: 2003 年 4 月第一版 2003 年 4 月第一次印刷

开本: 850×1168 1/32

字数: 386 千字

印张: 14.375

印数: 0001~1500

书号: ISBN 7-5028-2109-0/P·1132 (2665)

定价: 30.00 元

版权所有 翻印必究

(图书出现印装问题, 本社负责调换)

中国现代科学全书总编辑委员会

名誉主编	胡 绳	钱伟长	吴阶平	周光召
	许嘉璐	罗豪才	季羨林	王大珩
	郑必坚			
主 编	姜士林	郭德宏	刘 政	程湘清
	卞晋平	王洛林	许智宏	白春礼
	卢良恕	徐 诚	王洪峻	明立志

固体地球物理学编辑委员会

主 编	徐文耀			
编辑委员	(以姓氏笔画为序)			
	王妙月	王谦身	叶正仁	白武明
	姚振兴	滕吉文		

序

就像空气和水一样，地磁场也是人类生存不可缺少的环境条件之一。地磁场包围在地球周围，像一道天然的屏障，保护着地球上的生命，使其免受高温、高速太阳风的威胁和宇宙高能粒子的轰击。地磁场伴随着地球的形成和演变过程，地球上的生命，包括人类在内，是在地磁场的环境中产生和进化的。在漫长的历史进程中，到处留下地磁场影响的痕迹和地磁场注入的“基因”。

地磁场的主要部分起源于地核，它穿过近 3 000 km 厚的地幔和地壳到达地表，并远远地扩展到太空，从而把地球内部的信息携带出来，为人类认识无法到达的地球深部提供了有效的途径。地磁场的另一部分是由地壳岩石磁性产生的，它使人类有了一种强有力的探矿手段。地磁场中还有一小部分起源于地球周围空间的电流体系，所以地磁场也是地球空间环境探测和空间天气预报的重要内容。

中国人最早发明了指南针，在此基础上，发展出越来越精密的地磁仪器。航海家用它们来测定航向，医生用它们诊断人体疾病，卫星带着它们探测宇宙磁场结构，天文学家用它们监视着太阳的活动，古地磁学者用它们寻找岩石中残留下来的古代地磁场痕迹……

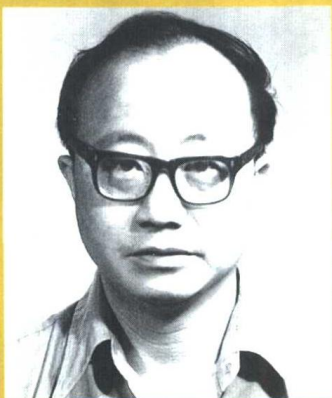
地磁学是一门古老的基础学科，同时也是一门充满活力的应用学科。随着科学技术，特别是计算机和航天技术的发展，地磁学的新发现不断给人们带来新的希望和激动，地磁学的研究领域不断在扩展，概念不断在更新，地磁学与其他学科交叉结合，诞生出极富生命力的边缘学科。

本书试图用比较通俗的语言，阐明地磁场的一些基本概念：地磁场是什么？它的空间分布和时间变化有什么特征？地磁场是怎样产生的？研究地磁场有什么用？未来时代地磁学会怎样发展？对于一门历史悠久、积累丰富而又发展迅速、日新月异的学科来说，在如此有限的篇幅内要把上述问题交代清楚，对我来说并非易事。有些内容只好简写（如古地磁），有些内容干脆略去（如地磁仪器），材料的取舍很难完全得当。

在此，我要衷心感谢朱岗昆教授在本书写作过程中给予的指导和教诲，感谢马石庄、安振昌、杨少峰等同志的帮助和指正。

徐文耀

2000年1月



作者简介

徐文耀，1944年生，1966年毕业于西安交通大学数理系力学专业。1967年分配到中国科学院兰州地球物理研究所工作，1978年考取中国科学院地球物理研究所研究生，攻读地磁与高空物理。现任中国科学院地球物理研究所研究员。

内 容 简 介

地磁场是地球固有的基本特性,是人类和整个生动圈生存的重要环境条件之一。本书从形态学和物理起源两个方面分别介绍组成地磁场的四个主要部分:主磁场、变化磁场、地磁异常场和感应磁场。本书的读者对象是地球和空间科学爱好者,也可供有关专业读者参考。

目 录

第一章 地磁学概述	(1)
第一节 电磁场——普遍存在的宇宙物质	(1)
第二节 地磁场——地球固有的基本特性	(15)
第三节 外地核——地球主磁场的发源地	(29)
第四节 岩石层——局部地磁异常的起源	(32)
第五节 电离层与磁层——近地环境的重要组成	(35)
第六节 太阳——变化磁场的根本来源	(44)
第七节 地磁学——古老而未成熟的学科	(45)
第二章 地球主磁场的空间结构及其长期变化	(64)
第一节 主磁场空间分布的一般特点	(64)
第二节 主磁场的球谐分析	(71)
第三节 主磁场的多极子表示	(80)
第四节 主磁场模型和地磁坐标系	(89)
第五节 国际参考地磁场	(98)
第六节 主磁场的长期变化	(99)
第七节 主磁场的西向漂移	(106)
第八节 主磁场的极性倒转和古地磁	(118)
第三章 地球主磁场起源和地磁发电机理论	(122)
第一节 地球主磁场起源研究的历史回顾	(122)
第二节 地球发电机过程的深部环境	(129)
第三节 地核介质的力学性质和电磁性质	(132)
第四节 圆盘发电机	(141)

第五节	运动学发电机·····	(147)
第六节	湍流发电机和平均场电动力学·····	(156)
第七节	磁流体发电机·····	(158)
第八节	地球发电机过程的能源问题·····	(166)
第四章	地壳磁场和地磁异常·····	(170)
第一节	地壳磁场的一般特点·····	(170)
第二节	地磁异常的描述方法·····	(172)
第三节	区域地磁图和区域磁场模型·····	(184)
第四节	地磁异常的正演·····	(193)
第五节	地磁异常的反演·····	(196)
第六节	海底磁异常·····	(202)
第七节	航空磁异常·····	(206)
第八节	卫星磁异常·····	(208)
第五章	地球变化磁场及其等效电流体系·····	(221)
第一节	变化磁场的一般特点·····	(221)
第二节	变化磁场的分析方法·····	(226)
第三节	变化磁场的等效电流体系·····	(241)
第四节	平静太阳日变化 S_q ·····	(249)
第五节	太阴日变化 L ·····	(263)
第六节	磁暴与太阳扰日变化 S_D ·····	(266)
第七节	地磁亚暴与湾扰·····	(274)
第八节	钩扰·····	(280)
第九节	地磁脉动·····	(281)
第十节	地磁活动性和地磁指数·····	(287)
第六章	地球变化磁场的起源和空间电流·····	(297)
第一节	磁场中带电粒子的运动·····	(297)
第二节	磁流体中的电流·····	(307)

第三节	电离层与磁层电流体系	(320)
第四节	磁层顶电流	(322)
第五节	赤道环电流	(327)
第六节	磁尾电流	(331)
第七节	场向电流	(335)
第八节	电离层电流	(338)
第七章	地球感应磁场和地球内部电磁性质	(350)
第一节	地球感应磁场的一般特点	(350)
第二节	电磁感应的基本原理	(356)
第三节	地球电导率模型	(359)
第四节	全球电导率背景	(364)
第五节	区域电导率分布	(369)
第六节	局部电导率异常	(371)
第八章	近地电磁环境和空间天气	(385)
第一节	近地空间电磁环境的一般概念	(385)
第二节	太阳活动	(387)
第三节	行星际空间的结构和变化	(400)
第四节	磁层与太阳风的相互作用	(407)
第五节	电离层与磁层的耦合	(423)
第六节	地磁活动与太阳的关系	(430)
第七节	地球电磁环境对人类活动的影响	(437)
主要参考书目		(447)

第一章 地磁学概述

第一节 电磁场——普遍存在的宇宙物质

一、自然界的电磁场

在科学技术和日常生活中,磁场是我们最熟知的自然现象之一。从指南针、玩具磁铁、磁化水杯到电器电表,从地球、太阳、银河系到宇宙太空,从分子、原子、原子核到基本粒子,从蜜蜂、信鸽、鱼类到人类肌体,……磁场几乎无处不在。唯物主义认为,宇宙万物都是由物质组成的,而粒子和场是自然界物质存在的两种基本形态。

在以粒子形态存在的物质中,有我们熟悉的三种聚集态——固体、液体、气体,它们是由分子、原子、电子、质子、中子和许许多多其他基本粒子组成的。除此之外,还有我们不太熟悉的第四种聚集态——等离子体。等离子体是由带电粒子和中性粒子组成的宏观电中性物质。在浩瀚的宇宙中,百分之九十九的粒子物质呈等离子体态:星云、星际物质和太阳一类的恒星是等离子体,地球外核、电离层和磁层也是等离子体;极光和闪电发生时会产生等离子体,核爆炸和卫星返回大气层时也会产生等离子体。即使在日常生活中我们也常常接触到等离子体,如霓虹灯和日光灯管中的稀薄气体、电弧焊火焰等等。

在以场形态存在的物质中,电磁场是宇宙中最重要,最普遍的一种场。虽然电磁场的存在不能被肉眼直接感知,但通过它与其他物质的相互作用,如磁极之间的相互吸引或排斥,磁场对通电导

线的作用,磁场对导电流体运动状态的影响等等,人们逐渐认识了电磁场的物质性和能量特点。图 1.1 是几种常见磁场的示意图,上面两图是条形磁铁和通电螺线管周围细铁屑排列的实验图,中间两图用磁力线形象地描绘出它们的磁场分布情况,箭头表示磁场方向,磁力线的疏密表示磁场强度的大小,下面两图显示出圆电流线圈的磁场和地球磁场的相似性。

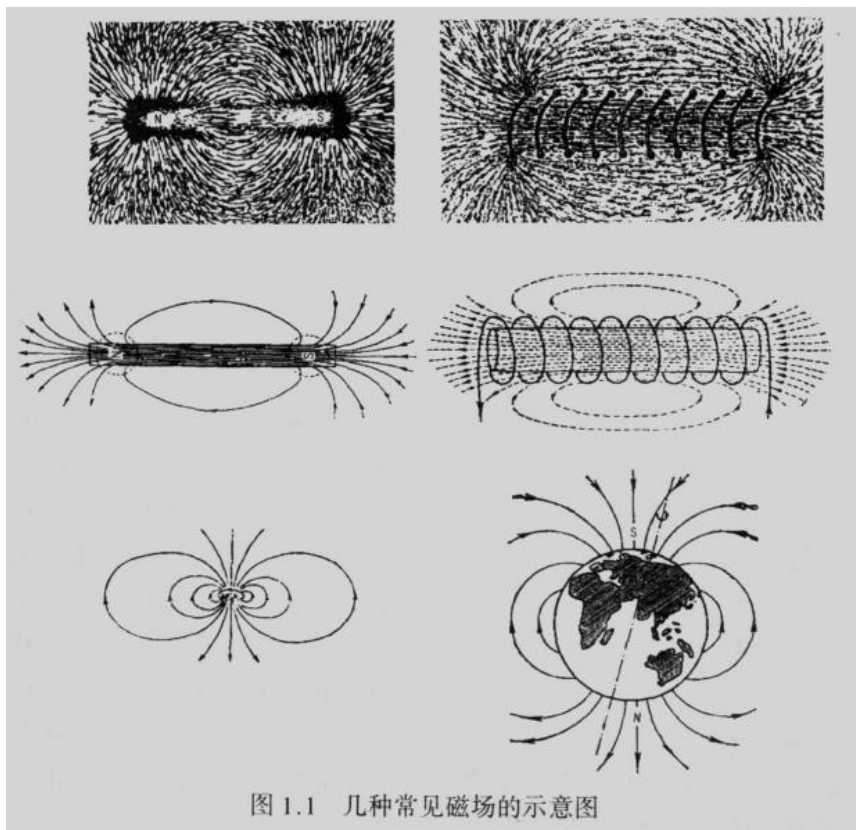


图 1.1 几种常见磁场的示意图

磁场是宇宙天体固有的基本属性。水星、地球、木星、土星、天王星和海王星等行星,中子星、脉冲星和太阳等恒星,银河系和其他星系都有强度不同,结构各异的磁场。近年来的空间探测发现,

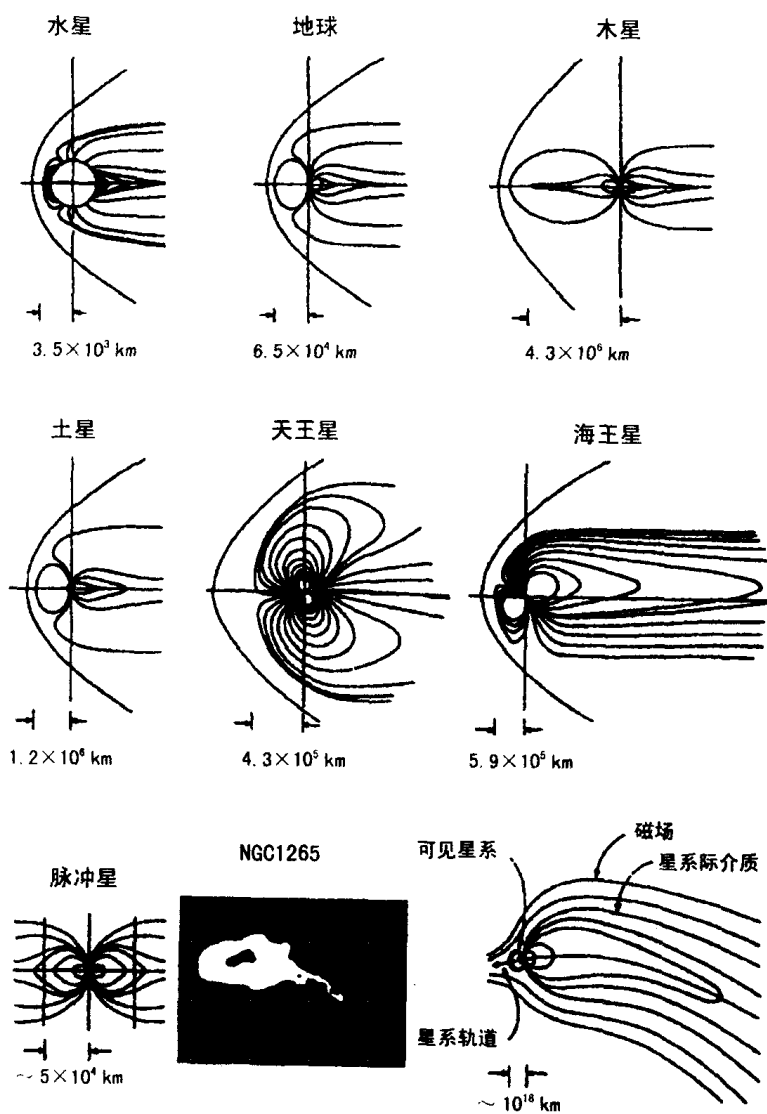


图 1.2 宇宙天体磁场结构的比较

行星的卫星也具有磁场,地球的卫星——月球的磁场十分微弱,但木星的卫星却有很强的磁场。

天体磁场产生于天体内部,并远远地扩展到周围空间。磁场渗透在该天体周围的等离子体中,使之成为磁化等离子体。变化的磁场与运动的等离子体相互作用,产生了复杂的能量、动量和物质交换过程。不同天体的磁场和等离子体之间也发生相互作用,从而形成各自的分布区域和作用范围,也形成了充满太空的宇宙磁场。例如,地球磁场与太阳风(向外运动的太阳大气)作用形成地球磁层,构成了近地空间的范围;太阳磁场与星际风作用形成日球层,构成了太阳系的空间范围;同样,银河系及其他星系的磁场与其外运动的星系际风等离子体和磁场相互作用也构成了它们各自的范围。在这一层一层嵌套式的空间结构中,磁场起着主导作用。图 1.2 用比较的方法给出太阳系行星、脉冲星、星系等几种天体的磁场结构示意图,由此可以看出天体磁场的普遍性及其结构的相似性。图 1.3 是日球层的示意图,显示出空间磁场的不同层

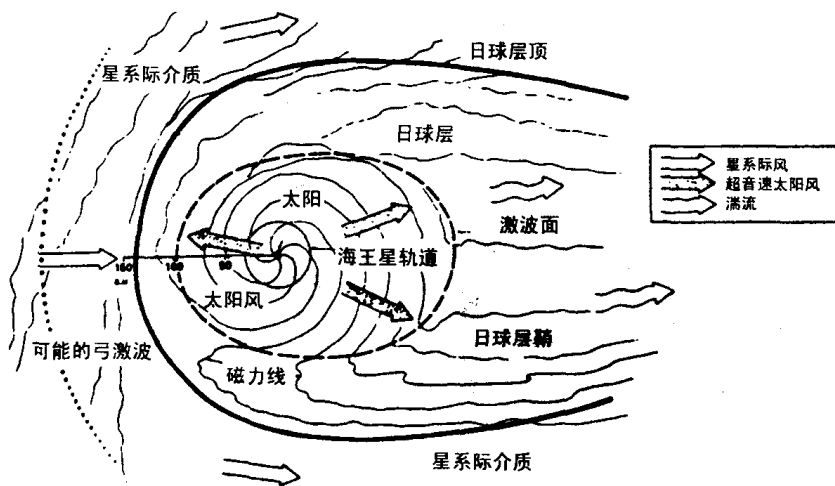


图 1.3 日球层磁场结构和星际风示意图

次和嵌套式结构。表 1.1 列出太阳系行星磁场的基本参数。

表 1.1 太阳系行星磁场的主要参数

	日心距/ AU	半径/ km	自转 周期/ h	磁矩 M_E	赤道 磁场/ 10^{-4} T	最大 磁场/ 10^{-4} T	最小 磁场/ 10^{-4} T	磁轴与 行星轴 夹角度	磁层 顶距
水星	0.39	2439	1407.5	1/1500	0.004			14.0	
金星	0.72	6055	5832.0						
地球	1.00	6372	24.0	1	0.31	0.68	0.24	10.8	11Re
火星	1.52	3398	24.6	1/3000	0.0006			-15.0	
木星	5.20	71398	9.9	20000	4.28	14.30	3.20	-9.7	45R _j
土星	9.55	60330	10.7	580	0.22	0.84	0.18	-0.0	21R _s
天王星	19.19	25559	17.2	49	0.23	0.96	0.08	-59	27R _u
海王星	30.07	24764	16.1	27	0.14	0.90	0.10	-47	26R _n
冥王星	39.52	1350	153.3						

注：1. AU 是天文单位(地球到太阳的距离)， $1\text{AU} = 1.5 \times 10^8 \text{km}$;

2. 1980 年地球磁矩 $M_E = 7.906 \times 10^{22} \text{Am}^2$;

3. Re、R_j、R_s、R_u 和 R_n 分别是各行星的半径。

在宇宙形成和演化的过程中,磁场起着重要作用。根据目前流行的大爆炸宇宙理论,现在的宇宙从最初的高温致密状态向外膨胀已经历了 100~200 亿年的漫长过程,银河系在 100 亿年以前形成,太阳至少也有 50 亿年的历史,从各方面来说,天文宇宙已进入了它的中年期。但令人惊异的是,宇宙并不像简单理论所预期的那样安静:新的星体仍在形成,太阳还在沸腾,大量宇宙天体活动相当剧烈,如脉冲星、活动超新星、X 射线星、 γ 射线源、活动星系和类星体等,在整个银河系,特别是在活动星体附近,电子、质子、氦核和重核被加速到接近光速……空间探测发现了太阳磁场的复杂结构,也发现了其他行星及其卫星的固有磁场,其中尤以近年来对木星和木卫磁场的探测引起科学家的极大兴趣。磁场在宇