



生物磁学 及其应用

李国栋 编著

科学出版社

生物磁学及其应用

李国栋 编著

科学出版社

1983

内 容 简 介

本书主要介绍生物磁学的发展历史,研究内容,在工、农、医方面的应用以及有关的物理基础。为了便于非磁学工作者阅读,第一章对物质的磁性、磁场的产生和测量亦作了适当的说明。

本书可供具有中等文化程度的生物学、物理学、医学、农业方面的广大读者参考。

生物磁学及其应用

李国栋 编 著

责任编辑 高小琪

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街 157 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1983 年 2 月第 一 版 开本: 787×1092 1/32

1983 年 2 月第一次印刷 印张: 5

印数: 0001—4,200 字数: 95,000

统一书号: 13031·2161

本社书号: 2953·13—6

定 价: 0.65 元

前 言

当前我们正面临着一个科学迅速发展，技术不断进步的时代。当代科学技术发展的一个重要特点是各门科学技术在工作深入、领域扩大和联系增多的基础上相互影响和相互渗透，由此促成了许多新的边缘学科的兴起。

磁场对生物的影响及生物的磁性和磁场这些生物磁学现象的发现和研究，虽然有着悠久或较长的历史，但是生物磁学作为一门磁学和生物学之间的边缘学科而获得迅速发展和广泛应用，以及受到普遍的重视，却还是比较近期的事。

我们的祖国不但是最早发现和利用物质磁性的国家，发明了对世界有巨大影响的指南针；而且也是最早发现和利用磁的生物效应的国家。远在两千多年前的西汉时代，便有了磁石治病的记载，此后历代的医药典籍上都有着这方面的丰富的资料。现代，磁场治疗（磁疗）和磁场麻醉（磁麻）等在医药上的试验和应用，磁场处理水（磁化水）在工农业生产和医药上的试验和应用，都是生物磁学中值得注意和研究的重要课题。

从更广的范围看，生物磁学除了在工农业生产和医药方面的应用以外，在环境保护、生物（包括医学）工程等方面也有着许多新的和重要的应用。

这些应用的基础是什么呢？这就要涉及磁场的生物效应、生物材料的磁性和生物磁场现象等许多生物磁学的基础研究问题。

本书的目的在于简略地介绍生物磁学的历史发展，研究内容，在工、农、医各方面的应用以及有关的物理基础。为了便于非磁学工作者阅读，在本书开头对物质的磁性、磁场的产生和测量亦作了适当的说明。

本书在编写过程中，曾先后得到沈淑敏(中国科学院生物物理研究所)、朱靖(中国科学院动物研究所)、郁百钢(北京钢铁学院)、袁重华(北京钢铁研究院)和唐德修(上海华东医院)等同志的帮助，得到国内一些单位和同志寄送的试验和工作的资料，作者谨对他们表示深切的谢意。并希望读者提出批评指正。

李 国 栋

1981年7月

中国科学院物理研究所

目 录

一、生物磁学的意义	1
(一) 物质的磁性和磁场	1
(二) 生物磁性和生物磁学	12
(三) 生物磁学的历史发展	14
(四) 当前生物磁学的研究和应用概况	21
二、磁(场)生物效应和生物磁现象	24
(一) 不同磁场的生物效应	24
(二) 磁场对于生物分子、细胞、组织、器官及活体的影响	39
(三) 生物磁场现象	46
(四) 生物材料的磁性与结构和功能的关系	54
三、生物磁学的应用	71
(一) 生物磁学在农业方面的应用	71
(二) 生物磁学在医学方面的应用	82
(三) 生物磁学在环境保护方面的应用	96
(四) 生物磁学在生物工程等方面的应用	107
四、生物磁学的物理基础	119
(一) 概述	119
(二) 磁场生物效应的宏观特点	120
(三) 磁场生物效应的微观机制	129
(四) 磁场生物效应的物理基础——磁学定律	136

一、生物磁学的意义

(一) 物质的磁性和磁场

提起磁性，恐怕许多人都会觉得它是一种相当少见的现象，想到的不过是“磁石吸铁”，“指南针指示方向”等而已。实际上，这是一种误解。磁性是一种极为普遍的现象，它是任何物质都具有的一种基本的属性。物质是由原子组成的，原子是具有磁性的；原子又是由原子核和电子组成的，同样，电子和原子核也是具有磁性的；原子核又是由带正电的质子和不带电的中子组成的，同样，质子和中子也具有磁性；再深入到物质结构的更深入的层次，如各种基本粒子以及组成基本粒子的层子或夸克，一般说来，它们也都具有磁性。这是从物质的微观结构层次看，各种层次的物质都是具有磁性的。如果从另一方面看，从更大范围的物质形态看，我们生活的地球是有磁性的，地球以外的其他天体，如月球、太阳等也都具有磁性。因此，物质的磁性是物质的一种普遍的性质。

既然物质的磁性是普遍存在的，为什么在我们生活中看到和遇到的磁现象却很少呢？磁性究竟是什么？怎么知道物质都具有磁性？

我们生活中的磁现象很少吗？不是。我们生活中看到和

遇到的磁现象是很多的。但是,由于一般没有注意或没有深入思索,许多磁现象被忽略了,或者未想到它们与磁现象的联系;另外,由于许多磁现象表现的磁性很弱,不用特殊灵敏的仪器,也测量不出它们的磁性。例如,我们生活中经常要用到电,但如果没有电和磁的相互作用(称为电磁感应),发电机就不会发出电来;如果不利用磁性材料,便制造不出发电机、电动机和变压器。电话机、扬声器(喇叭)、磁性录音机、电子计算机和许多电气仪表,如果不利用磁性材料就不能工作。收音机中的磁天线、中周变压器,电视机中的偏转线圈和回扫变压器等,都要使用磁性材料或利用某些磁作用。但是这些磁现象往往被忽略了,或者往往没有想到它们与磁现象的联系。又例如,地球是一个巨大的磁体,它产生的磁场要用指南针或其他仪器才能显示或测量出来;地球磁场受到太阳的影响,每天 24 小时都有变化;大的地震发生前、发生时和发生后,也会引起地球磁场的异常变化;人的心脏跳动和大脑活动,都会产生很微弱的磁场。这些非常微弱的磁现象,只有用特殊灵敏的仪器,才能探测出来。因此,微弱的磁现象在一般生活中是感觉不到,也显示不出来的。又例如,除磁铁能吸引的物质(如铁、钴、镍和它们的某些合金或化合物)被称为磁性物质以外,其他的物质都被认为是没有磁性的。实际上,所有物质都具有磁性,只不过是能被磁铁吸引的物质的磁性强,或称为强磁(性)物质,其他物质的磁性弱,或称为弱磁(性)物质罢了。如果使用专门的仪器(例如磁天平)来测量,就会发现所有的物质都是具有或强或弱的磁性的,磁性强弱可以相差几

十万倍到几千万倍以上！因此，对于占绝大多数的弱磁（性）物质，同强磁（性）物质相比，在一般情况下就被认为是没有磁性的物质，习惯上被称为无磁性物质或非磁性物质，准确地讲，应该称为弱磁（性）物质。

既然所有物质都具有磁性，只是有些物质磁性强，种类较少，而绝大多数物质的磁性很弱，而且强弱相差极为悬殊，那么怎样测量和区分这些物质的磁性呢？一种常用的测量磁性的方法叫磁天平法。简单说来，这方法是把一小块要测量的物质放在极强而又不均匀的磁场中，然后测量这物质在这磁场中受力的大小和方向。因为物质在不均匀磁场中会受到力的作用（称为磁力），所以知道物质具有磁性。如果物质没有磁性，在不均匀磁场中就不会受力。如果物质在不均匀磁场中受到的磁力是使它趋向磁场强的区域，便称这物质为顺磁（性）物质；相反地，如果物质在不均匀磁场中受到的磁力是使它离开磁场强的区域，便称这物质为抗磁（性）物质。例如水（ H_2O ）是一种抗磁（性）物质，把它放到不均匀的磁场中，它便会受到一种力（磁力）使其离开磁场强的区域（图1）。要定量地表示物质磁性的强弱，常用这物质在磁场中的磁化强度 M 与磁场强度 H 之比值 χ 来表示， χ 称为这物质的磁化率。磁

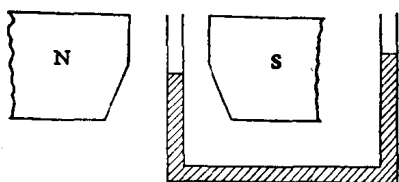


图1 抗磁性的水在不均匀磁场中趋向磁场弱的区域

化强度是单位体积的物质中各电子磁矩的矢量和（原子核的磁矩远小于电子磁矩而可略去），用 M 表示，其单位在厘米·克·秒电磁单位制中为高[斯]（符号为 G），在国际单位制中为特[斯拉]（符号为 T）， $1 \text{ 特斯拉} = 10^4 \text{ 高斯}$ 。磁场强度是量度磁场强弱的量（磁场的解释见后面），用 H 表示，其单位在厘米·克·秒电磁单位制中为奥[斯特]（符号为 Oe），在国际单位制中用安[培]/米（符号为 A/m）， $1 \text{ 安/米} = 4\pi/10^3 \text{ 奥} = 0.0126 \text{ 奥}$ 。在厘米·克·秒电磁单位制中，因定义真空的磁导率值为 1，故有时也用高斯为磁场强度单位。顺磁物质的磁化强度与磁场方向相同，故磁化率为正，其数值约为 10^{-3} — 10^{-4} ；抗磁物质的磁化强度与磁场方向相反，故磁化率为负，其数值约为 10^{-6} — 10^{-5} 。强磁物质（有时称铁磁物质）的磁化率也为正值，但其数值约为 1 — 10^3 或更高，比顺磁物质要大得多。表 1 中列出常见的几种物质在室温下的磁化率。

物质的磁性是这物质在不均匀磁场中受到力的作用（称为磁力）而表现出来的。磁场又是什么呢？简单说来，磁场是物理场的一种形态，处于磁场中的磁矩①会受到力（在不均匀磁场中）或转（力）矩（在均匀磁场中）的作用，处于磁场中的运动电荷也会受到力（称为洛仑兹力）的作用。从现代科学的观测和研究已经知道：宇宙空间到处都有或强或弱的磁场存

① 从微观看，原子中，电子的自旋和轨道运动都可以产生磁矩；从宏观看，一封闭电流回路也可以产生磁矩，磁矩的大小与电流和回路面积的乘积成比例。

表 1 几种物质在室温下的磁化率

物 质	磁 性	质量磁化率 χ_m^*
水 (H_2O)	抗磁性	-0.699×10^{-6}
金刚石 (C, 金刚石结构)	抗磁性	-0.49×10^{-6}
石墨 (C, 层状结构)	抗磁性	-3.5×10^{-6}
铜 (Cu)	抗磁性	-0.086×10^{-6}
铝 (Al)	顺磁性	0.65×10^{-6}
硫酸亚铁 ($FeSO_4$)	顺磁性	74.2×10^{-6}
含结晶水硫酸亚铁 ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$)	顺磁性	41.5×10^{-6}
铁 (Fe)	强磁性(铁磁性)	$10-10^{4**}$
镍 (Ni)	强磁性(铁磁性)	$10-50^{**}$
锰-锌铁氧体	强磁性(亚铁磁性)	10^2-10^{1**}

* 质量磁化率 χ_m 与一般(体积)磁化率 χ 的关系为 $\chi = \chi_m d$, 其中 d 为物质的密度

** 强磁性物质的磁化率平方与纯度、处理、温度和磁场强度都有关系

在,例如,地球表面的磁场约 0.5 奥,太阳表面磁场约 1 奥,太阳黑子磁场约 10^2-10^3 奥,月球表面磁场约 $10^{-5}-10^{-3}$ 奥,白矮星表面磁场约 10^6 奥,中子星表面磁场约 10^{12} 奥,行星之间的行星际磁场约 10^{-5} 奥,恒星之间的恒星际磁场约 10^{-6} 奥,星系(如银河系)之间的星系际磁场约 $10^{-8}-10^{-9}$ 奥。

一般在实验室或应用中产生磁场的方法,或者利用永磁体(如稀土-钴永磁体、钕铁氧体、钕铁氧体等),或者利用电磁体(如电磁铁、超导磁体等)。不论用永磁体或电磁体、要想经济有效地得到在一定空间范围内具有一定磁场强度和(或)一定磁场梯度的磁场,都需要进行专门的磁体或磁路设计。磁场梯度是指磁场不均匀的程度,用每单位长度磁场的变化量

来表示,单位为奥/厘米。在一定范围内磁场变化越大,则磁场梯度也越大。

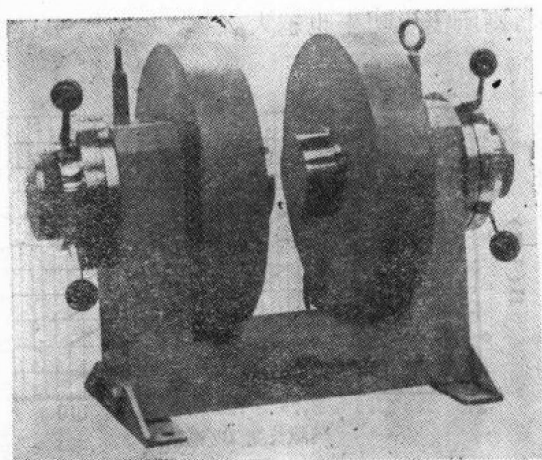
一般说来,永久磁体产生强度恒定的磁场,装置较经济,不需外电源,但得到的磁场强度不够强且不能变化。各种电磁体能产生强度高而可变的磁场,装置较复杂,需要外电源和冷却设备。超导磁体可以较为经济地产生很强的恒定磁场。如果要产生 30—50 万奥以上的强磁场,需要采用脉冲磁场,磁场的持续时间约在毫秒甚至微秒以下。表 2 列出几种类型

表 2 几种磁体类型及其产生的磁场

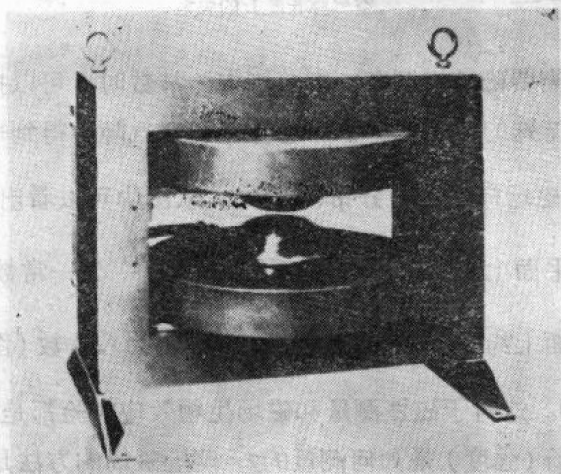
磁 体 类 型	最大磁场 H_m (奥)	常用磁场范围(奥)
永(久)磁体	20,000	0—8,000
一般电磁体	40,000	0—30,000
超冷螺线管	100,000	25,000—60,000
超导螺线管	140,000	30,000—100,000
混合型超导螺线管*	185,000	
水冷螺线管(短时用)	250,000	75,000—150,000
液氮冷却螺线管(脉冲用)	750,000	<400,000
爆炸型磁场装置(瞬时用)	10,000,000	>500,000

* 是指由一般螺线管与超导螺线管组合成的螺线管系统

的磁体所能产生的磁场。图 2 (a), (b) 是两种常用的电磁体。(a) 是磁极部直径 10 厘米的水平型电磁体, 空气隙长度可以调节; (b) 是磁极部直径 23 厘米的垂直型电磁体, 空气隙长度不能调节。若把磁极端部作成锥削型, 即磁极部直径到空气隙处逐渐减小, 则可使空气隙中磁场增强, 但均匀区域减小。例如, 在磁极部到空气隙处直径比为 3:1 的情形下, 不同



(a)



(b)

图 2 (a) 水平型电磁体；(b) 垂直型电磁体

极部直径的电磁体的空气隙中心磁场强度与空气隙长度的关系如图 3 所示。可以看出，磁极部直径越大，磁场越强，磁场

区域越大,则所需电功率也越大。

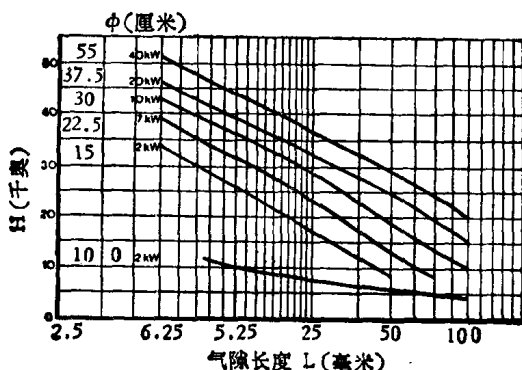
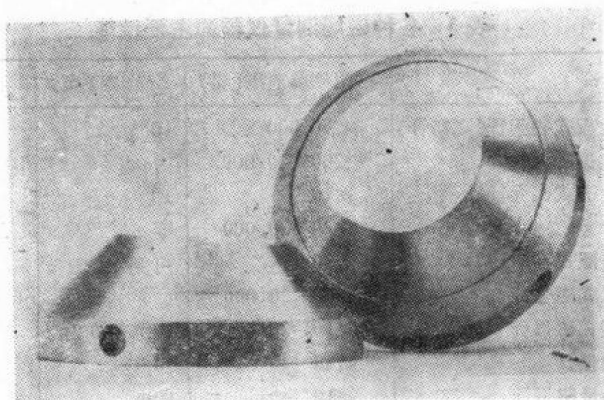


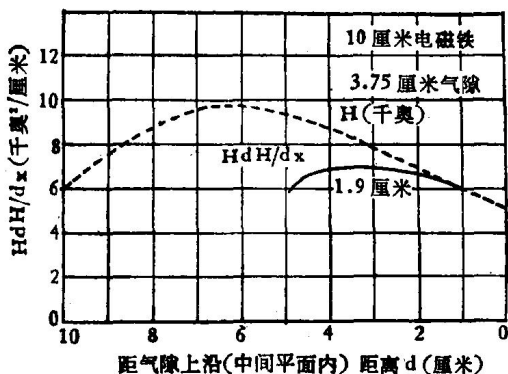
图3 锥形型极部的电磁体的空气隙中心磁场 H 与空气隙长度 L 的关系

在需要磁场梯度在一定范围内为常数时,可以把磁极端部作成特殊的形状(图 4a),这样可在空气隙中得到一定的磁场 H 和磁场梯度 $\frac{dH}{dx}$ 分布(图 4b)。从图中可以看出,在空气隙中间平面上在约 4 厘米的范围内, $H \frac{dH}{dx}$ 为一常数;另外,在这平面上约 2.5 厘米的范围内, $\frac{dH}{dx}$ 也为一常数(图中未画出数值)。这对于磁性测量和磁场生物效应实验都是需要的。

磁场(强度)是如何测量的? 测量磁场的方法是很多的(表 3)。物质在磁场中产生的许多效应,原则上都可用来测量磁场。一般用来测量强磁场的方法有利用半导体在磁场中的霍耳(Hall)效应(见第四部分)的高斯计法,有利用金属(如铋)在磁场中改变电阻的磁电阻法,有利用电磁感应感生电



(a)



(b)

图4 (a) 恒定磁场梯度的磁极端部形状; (b) 这种磁极端部在空气隙中产生的 H 和 $H \frac{dH}{dx}$ 分布, 磁极部直径=10 厘米, 空气隙长度=3.8 厘米, d = 空气隙中间平面上从极部前沿算起的距离

动势的发电机法和探测线圈法, 有利用核磁共振的共振法等。较为常用的是高斯计法(图5)和核磁共振法(图6)。一般用来测量弱磁场的方法, 除了也可用上述的高斯计法和核磁共

表3 各种磁场测量仪器的主要性能

名 称	常用测场范围(奥)	分辨率(奥)	精度
霍耳效应式磁强计(高斯计)	$<50,000$	10^{-3}	0.1%
核磁共振磁强计	200—20,000		10^{-4} — 10^{-5}
质子旋进式磁强计	<10	10^{-6}	
磁通计	20—20,000		1%
旋转线圈式高斯计	$<10^7$	可变	0.01%
磁电阻式磁强计	200—20,000		(1—0.1)%
磁通门式磁强计	<10 —20	10^{-6} — 10^{-7}	
薄膜磁强计	<10	10^{-6}	
光泵标量磁强计	<10	10^{-7}	
光泵矢量铷 (^{87}Rb) 磁强计	<10	10^{-9}	
光泵矢量氮磁强计	<10	10^{-7}	
超导量子干涉式磁强计	$<10^{-5}$	10^{-10}	

振法等外,还可利用强磁材料非线性磁化效应的磁通门式磁强计法,利用强磁薄膜磁化特点的磁膜磁强计法,利用光磁共振效应的光泵磁强计法,利用约瑟夫森(Josephson)结效应的超导量子干涉计法等。其中的磁通门式磁强计和光泵磁强计已应用于空间弱磁场的探测,超导量子干涉磁强计已可测量约 10^{-10} — 10^{-11} 奥的极弱磁场(如人脑磁场)。

从宏观上看,物质都具有或强或弱的磁性,而且磁性的强弱相差是极为悬殊的(表1)。如果从物质的微观结构看,这些种类不同、强弱悬殊的磁性又是怎样产生的呢?这里仅从原子结构的观点略作定性的简单的解释。原子磁性的来源一般说来有三个方面:(1)核外电子的轨道运动,(2)核外电子的自旋,(3)原子核的自旋。但因原子核要比电子重成千倍,故原子核磁性也比电子弱很多,一般不加考虑,只有在特殊情

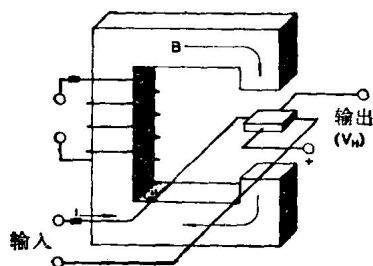


图5 高斯计

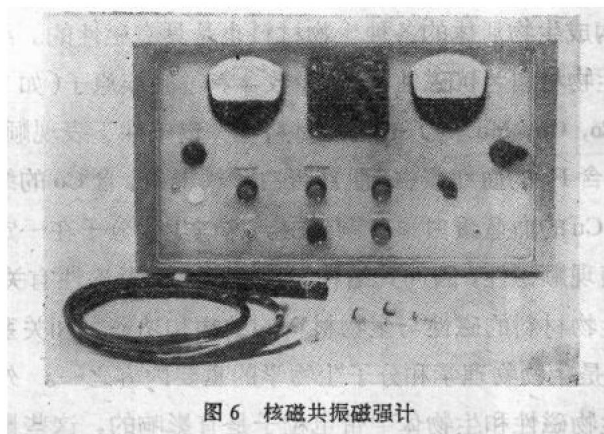


图6 核磁共振磁强计

况(例如以后讲的核磁共振和穆斯堡尔效应)才表现出来。

因此,从物质的微观结构看,物质的磁性来自原子的磁性,而原子磁性又主要来自核外电子的轨道磁矩和自旋磁矩。由带有满壳电子壳层的原子组成的物质表现抗磁性,由带有未满电子壳层的原子组成的物质表现顺磁性。顺磁原子的未抵消自旋之间如果存在着强相互作用(称为交换作用),还可使这些顺磁原子的磁矩有序地排列起来,产生比抗磁性和顺磁性强几十万倍甚至更高的强磁性。抗磁性是任何物质都具