

舰船消磁理论与方法



JIANCHUAN XIAOCI
LILUN YU FANGFA

刘大明 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press



NUAA2012030135

U665
1016-4

舰船消磁理论与方法

刘大明 编著



国防工业出版社

·北京·

2012030135

内 容 简 介

本书主要内容包括:必要的铁磁学及地球磁场的相关知识;舰船磁场测量原理和方法;舰船磁场的分类、性质及对应的消磁处理过程与方法;消磁控制设备,以及消磁后结果磁场的稳定性等。

本书可作为高等院校相关专业学生的教学用书,亦可供其他读者阅读参考。

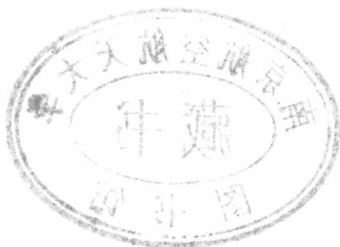
图书在版编目(CIP)数据

舰船消磁理论与方法 / 刘大明编著. —北京:国防工业出版社, 2011. 11

ISBN 978-7-118-07733-9

I. ①舰… II. ①刘… III. ①船用电气设备-消磁系统 IV. ①U665.18

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 207299 号



※

国防工业出版社出版发行
(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)
三河市鑫马印刷厂
新华书店经售

*

开本 787 × 1092 1/16 印张 12 $\frac{3}{4}$ 字数 289 千字
2011 年 11 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 26.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

2010030132

前 言

舰船消磁技术产生于第二次世界大战期间。战争实践表明,舰船消磁大大地减少了敌方运用磁性水中武器所造成的损失,是对抗磁性水中武器的有效手段。半个多世纪以来,舰船磁场作为一种重要的信息源,更加广泛地运用于水雷、鱼雷等水中武器和对潜艇磁探测领域。随着磁性水中武器以及空中、水下磁探设备性能的提高,其对水面舰船与潜艇的威胁明显增大,必然推动着舰船消磁技术的发展。当今许多国家不惜巨资大力研发舰船消磁技术和装备,可见其在未来海上多种形式军事较量之中的重要作用。

舰船消磁技术涉及理、工、军事等学科领域,具有较强的复合性;同时从理论研究、工程实施到勤务作业,又具有很强的针对性和专业性。因此对于不少人来说,“舰船消磁”这个话题比较陌生,系统讲授相关知识的书籍与文献资料也不多见。如果本书能为舰船消磁及相关领域的大学生、研究生和专业人员提供系统了解专业知识的途径,能为对舰船消磁感兴趣的人们提供一个全景式的观察窗口,作者将感到十分欣慰,这也正是出版本书的目的。

本书对舰船消磁技术所包含的内容进行了筛选和浓缩,并吸收了近年来新出现的一些理念与成果,力求能体现这一专业领域的全貌和当前发展水平。本书内容大体包括以下几个部分:必要的铁磁学及地球磁场的相关知识,这是舰船磁场产生的内因和外因;舰船磁场测量的原理和测量方法,这是获取舰船磁场数据并进行处理的基础;舰船磁场的分类、性质及对应的消磁处理过程与方法,这是舰船消磁工作的核心任务;消磁控制设备,这是达到目标的途径和手段。书中还对消磁后结果磁场的稳定性进行了分析,并提出了提高稳定性的措施。作者相信,在了解上述内容之后,读者会对舰船消磁有一个比较完整而客观的认识。经过消磁的舰船,不能说在任何情况下都可以免除磁性武器和磁性探测的威胁,但可以大大降低受损概率,所以消磁是重要的、不可少的。

本书在撰写和审定过程中,得到了阎理教授的许多指导和帮助;此外,书中引用了若干教材、专著及文献资料中的部分内容,限于篇幅,不一一列出,在此一并致谢。

限于作者水平,书中错误和缺陷在所难免,恳请读者批评赐教。

作者

2010年12月

目 录

0 引言	1
0.1 船舶消磁的由来和作用	1
0.2 舰船消磁方法	2
第1章 地球磁场	3
1.1 地球磁场的基本特性和地磁要素	3
1.2 地磁场的构成	6
1.3 基本磁场的解析表示	9
1.4 变化磁场	12
1.5 地磁图	17
第2章 铁磁学的基本知识	23
2.1 物质按磁性分类	23
2.2 铁磁性物质内的几种能量	25
2.3 铁磁性物质的技术磁化	32
2.4 正弦磁场和突变磁场对厚金属板的磁化	39
2.5 铁磁性物质在衰减的正弦交变磁场中的磁化——相邻振幅的 临界衰减率	44
第3章 磁场测量原理	49
3.1 磁通门式(饱和式)测磁原理	49
3.2 磁场梯度计	68
3.3 利用霍尔元件测磁	70
3.4 利用磁通计测量磁场	72
3.5 利用核子自旋进动测磁	74
3.6 光泵测磁法	78
3.7 超导测磁方法	85
第4章 舰船磁场分析	88
4.1 舰船在地球磁场中的磁化特点	88
4.2 舰船磁场分解	91
4.3 舰船磁场的分布规律	92
4.4 舰船磁场的计算分解	93
4.5 舰船磁场的其他来源	97
第5章 舰船磁场的测量	100
5.1 标准测量深度	100

5.2	测量点的划分,标准测量点与基准测量点	100
5.3	测量方法	101
第6章	临时线圈消磁(磁性处理)——固定磁性的消除	111
6.1	临时线圈消磁的指标	111
6.2	一般消磁法	112
6.3	一般消磁法中的几个问题	115
6.4	局部消磁	116
6.5	综合消磁	118
6.6	由消磁船对舰船实施综合消磁的步骤	120
6.7	在固定式消磁站对舰船进行综合消磁的步骤	122
6.8	自动消磁	123
第7章	舰船消磁系统	129
7.1	消磁系统绕组的种类	129
7.2	消磁系统绕组各区段的安匝量计算	130
7.3	消磁系统绕组的电计算	138
7.4	消磁绕组安匝的调整	141
第8章	消磁电流调整器	144
8.1	引言	144
8.2	测地磁消舰磁式电流调整器的工作原理	144
8.3	由经纬度、舰船航向角和姿态角控制的各绕组电流	157
8.4	关于闭环自动消磁的问题	159
第9章	舰船磁场的换算	163
9.1	近距离深度换算方法简介	163
9.2	调和函数的积分表达式	165
9.3	半空间区域上的格林函数及边值问题	168
9.4	用解半空间拉普拉斯方程边值问题的积分公式进行磁场深度换算	171
9.5	边界元法	174
9.6	磁体模拟法	180
第10章	关于舰船磁场的稳定性问题	186
10.1	舰船磁场稳定性的概念	186
10.2	影响舰船磁场稳定性的因素	186
10.3	提高舰船磁场稳定性的途径	196

0 引言

0.1 船舶消磁的由来和作用

战争的形式不外乎两种,一是进攻,一是防御。进攻使用的武器随着时代的进步不断地变化,从冷兵器到枪炮直至目前的热核武器,从单一的陆军到海军、空军。防御的手段也在不断地变化和发展,从盾、铠甲、钢盔、到掩体、装甲车、……、防御工事等。

舰船消磁是在战争中产生的防护手段。

第二次世界大战初期,德国海军使用了一种新型水雷封锁英国航道,使英国许多舰船被炸沉,海上交通几乎瘫痪。战争迫使英国海军必须认真地对待这种新式武器,当这种水雷实物被同盟国得到以后,经解剖研究,发现这种新式武器是利用舰船磁场起爆的非触发磁性水雷。

舰船何以能够使磁性水雷爆炸呢?原来地球是一个巨大的磁体,在其周围的空间存在着地球磁场。钢铁建造的舰船受到地球磁场的作用被磁化,形成了舰船磁场。是舰船的磁场引爆了磁性水雷。

图0-1为磁性水雷引信动作原理。水雷沉底之后,安全装置解脱,磁针在“+”、“-”触点之间静止,处于待机状态。当舰船在水雷上方(或附近)通过时,由于舰船磁场的作用使磁针动作,闭合触点,接通起爆管电路,引起水雷爆炸。

图0-2为磁感应水雷引信动作原理。水雷沉底后,继电器触头处于断开位置,当舰船在水雷上方(或附近)通过时,由于磁场的变化,在水雷引信感应线圈中产生了感应电势,继电器线圈中便有了电流,使其触头吸合,接通起爆管电路,引起水雷爆炸。

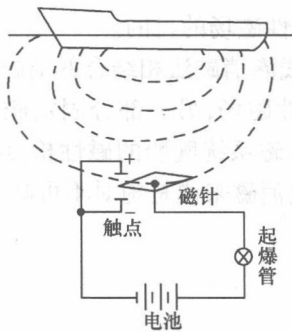


图0-1 磁性水雷引信动作原理

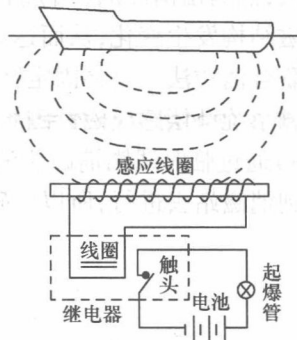


图0-2 磁感应水雷引信动作原理

上面两个例子说明了不管是哪一类磁性水雷都是利用舰船磁场使引信动作的。于是人们提出了一种设想:如果将舰船磁场消除掉,磁性水雷不是就失去作用了吗?正是基于这种设想才产生了舰船消磁。事实上舰船的磁场是不可能被完全消除的,只能将其尽量

减小,减小到规定的标准之内。所以舰船消磁就是为了防止水中磁性武器攻击,尽量地减小舰船周围磁场的一种科学技术。

当然同水雷斗争的手段不仅是舰船消磁,还有扫雷等其他手段。

经过消磁后的舰船是否就绝对安全,再不会受到磁性武器攻击呢?不是的。正如古人打仗,为了保护自己而身披铠甲,然而穿上铠甲并不是绝对地保险、可以刀枪不入了,当然穿上铠甲比赤膊上阵安全。舰船消磁所起的防护作用正是这样。在第二次世界大战中德国于1939年开始使用磁性水雷,1940年英国很快就在自己的舰艇上安装了消磁系统,接着其他同盟国的舰船也相继装上了消磁系统,同时又采取了扫雷等其他斗争手段,使德国在战争后期布放的大量水雷并未收到预期的效果。据统计在第二次世界大战中双方布放的水雷比第一次世界大战多几倍,但水雷炸沉舰船的百分比反而比第一次世界大战少(第一次世界大战水雷炸沉的舰艇约为总损失的27%,第二次世界大战降为总损失的10%),这与舰船采取了消磁技术和扫雷等防御措施是有密切关系的。

0.2 舰船消磁方法

钢铁建造的舰船受到地球磁场磁化,有了磁性,在其周围空间产生磁场,这个磁场称为舰船磁场。舰船磁场由固定磁性磁场和感应磁性磁场两部分组成。固定磁性磁场一般认为是不变的,感应磁性磁场则是随地磁纬度和舰船姿态(航向、倾斜、摇摆)而变化的。对舰船进行消磁有3种方法:

(1) 固定绕组消磁法。即在舰船上安装消磁绕组、消磁电源与电流调整器等设备(这些设备统称为消磁系统),消磁绕组通电时,使该电流产生的磁场与舰船磁场大小相等,方向相反,从而达到补偿舰船感应磁性磁场的目的。有时也用它补偿一部分固定磁性磁场。

(2) 临时线圈消磁法。这种消磁法是由专门的消磁船(站)进行的。消磁时要在被消磁的舰船外面临时绕上消磁线圈,或是将被消磁的舰船开进预先敷设有消磁线圈设施的空间中去,然后由消磁船(站)的供电设备向消磁线圈通以强大电流,使舰船钢板及内部设备的磁结构发生变化,从而达到消除舰船固定磁性磁场的目的。

(3) 联合消磁法。是将固定绕组消磁法和临时线圈消磁法相结合的消磁方法。即用船上的消磁系统补偿感应磁性磁场和一部分固定磁性磁场,另一部分固定磁性磁场仍到消磁船(站)通过临时线圈消磁法消除掉。另外,有消磁系统舰船的磁性检测和消磁绕组调整也要到消磁站去进行,所以消磁船(站)对于舰船消磁来说是绝对不可缺少的。

第1章 地球磁场

舰船在地磁场中被磁化而形成自己的磁场——舰船磁场。舰船磁场和地磁场有直接的关系,消磁工程技术人员应该而且必须对地磁场有所了解,如地磁场的特点、描述方法、数量级、如何变化及这些变化对测量和水雷引信的影响等。本章就是为此而设置的。

1.1 地球磁场的基本特性和地磁要素

1.1.1 地球磁场

地球具有磁性,在 3000 多年前就为我国先民发现。据文字记载,战国以前,我国先民就知道磁石的吸铁性和指极性。关于指南针,北宋沈括(1032 年—1096 年)在《梦溪笔谈》中写道:“方家以磁石磨针锋,则能指南,然常微偏东,不全南也”,说明当时已经知道磁偏角的存在,并能做成不同样式的磁针。北宋宣和元年(1119 年)朱熹著《萍州奇谈》中记载:“舟师识地理,夜则观星,昼则观日,阴晦观指南针”,说明当时已将指南针用于航海。据考证,在 838 年—1099 年间,我国首先将磁针用于航海事业,以后传到欧洲,对发现美洲新大陆做出了贡献。

地球是一个天然磁体,如图 1-1 所示,在其周围空间存在着磁场,即地球磁场。它有两个磁极,南磁极在地理南极附近,极性 N;北磁极在地理北极附近,极性 S。地球磁场磁力线由南磁极处垂直而出,由北磁极处垂直而入。南、北磁极与地理学上的两极是不重合的;其地理位置也不是固定不变的,而是在不断地变化着。表 1-1 列出由不同年代的观测结果推算出的各年代的磁极位置。地磁轴和地球自转轴之间有 11.5° 的夹角。

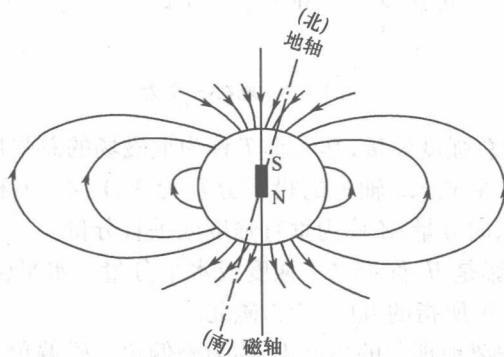


图 1-1 地球磁场的分布

表 1-1 各年代的磁极位置

年代		1600	1700	1770	1829	1885	1900
北磁极	北纬	78°42'	75°51'	66°00'	73°21'	69°57'	69°18'
	西经	59°00'	68°48'	104°00'	93°56'	82°45'	96°37'
南磁极	南纬	81°16'	77°12'	—	72°40'	73°45'	—
	东经	169°30'	155°15'	—	150°45'	153°00'	—
年代		1922	1950	1960	1965	1970	1975
北磁极	北纬	71°	72°	74°54'	75°30'	76°12'	76°06'
	西经	96°	96°	101°00'	100°30'	101°00'	100°06'
南磁极	南纬	72°25'	70°	67°06'	66°30'	66°00'	65°48'
	东经	154°00'	150°	142°42'	139°54'	139°06'	139°24'

1.1.2 地磁要素

地面一点的地磁场强度 T 具有-定的大小和方向,因而是一个矢量,它可以用一个三维坐标系来表示。

在图 1-2 中, O 点是测点,以测点 O 为原点建立直角坐标系。其中, x 轴指北,与地理子午线(地理经度线)同向,以向北为正; y 轴指东,与纬度圈同向,以向东为正; z 轴垂直于地平面而指向下,以向下为正。 xy 平面就是地平面或水平面。

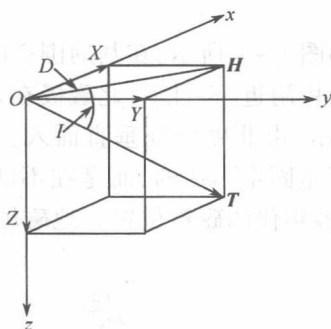


图 1-2 地磁三要素

T 是 O 点地磁场的总强度矢量,其大小 T 称为地磁场的总强度。矢量 T 对这个坐标系来说可以表成 OT ,它在 x, y, z 轴上的投影分别为 X, Y, Z 。 X 称为北向强度或北向分量; Y 称为东向强度或东向分量; Z 称为垂直强度或垂直分量。

T 在水平面上的投影是 H ,称为水平强度或水平分量。水平强度矢量 H 所指的方向就是磁罗盘磁针的正极 N 所指的方向,称为磁北。

水平强度矢量 H 偏离地理北的角度 D ,称为磁偏角。磁偏角 D 也就是磁子午面和地理子午面的夹角。 T 所在的垂直平面 zOH 称为磁子午面,而 xOz 面即地理子午面。规定 D 向东偏为正,向西偏为负。水平面与矢量 T 间的夹角 I ,称为磁倾角。规定 I 向下俯为

正,向上仰为负。在北半球大部分地区磁倾角为正。磁偏角 D 、磁倾角 I 及地磁的各分量 (T, H, X, Y, Z) 一共 7 个物理量统称地磁要素,它们之间有如下关系:

$$\begin{cases} X = H\cos D \\ Y = H\sin D \\ Z = H\tan I \\ H = T\cos I \\ Z = T\sin I \\ H^2 = X^2 + Y^2 \\ T^2 = H^2 + Z^2 \\ \tan D = \frac{Y}{X} \end{cases} \quad (1-1)$$

显然,在这 7 个地磁要素中 X, Y, Z 是直角坐标系的 3 个坐标数; H, D, Z 是柱坐标系的 3 个坐标数; T, I, D 是球坐标系的 3 个坐标数。要想确定地面一点地磁场 T 的大小和方向,至少要测出任何 3 个彼此独立的坐标数。由此可见,所谓地磁三要素就是确定地磁场的大小和方向所必要的 3 个互相独立的坐标数。这 3 个坐标数不一定属于同一个坐标系,但必须是彼此独立的。所谓彼此独立是指这 3 个坐标数不能包含在同一个变换关系式中。在理论计算中,最常用而又最适用的地磁三要素是 X, Y, Z 。但是,在实际磁测中,目前只有 I, D, H, Z, T 的绝对值是能够直接测量的。

地磁要素绝对值的测量称为绝对磁测。在地磁三要素的绝对测量中,磁偏角 D 是必须测量的,其他两个要素可以根据实际情况任意选测。通常观测的是 H, I, D ,故常称地磁水平分量、磁倾角和磁偏角为地磁三要素。

纵观整个地球,地球磁场矢量大体指向北方,北半球向下,南半球向上。在磁极地方,指南针指向垂直方向。地磁垂直分量在磁北极是 $+0.6340\text{Oe}$,在磁南极是 -0.6740Oe ,在磁赤道是零。地磁水平分量在磁赤道处最大,约为 $0.350\text{Oe} \sim 0.420\text{Oe}$,在磁极处为零。地球总磁场的最小值是 0.280Oe ,位于南美洲的巴西,最大值是 0.710Oe ,位于澳大利亚的南部。

我国国土广袤,地磁要素的变化也较大。以海南岛南部和黑龙江漠河附近为例,各要素的大致变化见表 1-2。

表 1-2

	海南岛南部	漠河附近
地磁垂直分量 Z	0.160e	0.560e
地磁水平分量 H	0.390e	0.200e
磁倾角 I	$\sim 21^\circ$	$\sim 70^\circ$
磁偏角 D	在 $+15^\circ \sim -11^\circ 30'$ 之间变化;在玉门、边坝以西为正值,以东为负值	

1.1.3 地磁场的基本特性

经过对地磁场的多年观测和研究,人们了解到地磁场具有如下基本特性:

(1) 地磁场近似于一个放在地心的磁偶极子的磁场。这是地磁场的一个最基本的特性。这个磁偶极子的磁轴 $N_m S_m$ 和地轴 NS 斜交一个角度 $\theta, \theta = 11.5^\circ$ 。图 1-3 是地心磁

偶极子场的磁力线的分布情况。前面已指出,北磁极 N_m 和南磁极 S_m 是按地理位置来区分的。按磁性来说,地心磁偶极子的正极 n 和负极 s 应分别对应于南磁极 S_m 和北磁极 N_m 。图 1-3 中用箭头 \overline{sn} 表示出偶极子的磁矩方向。

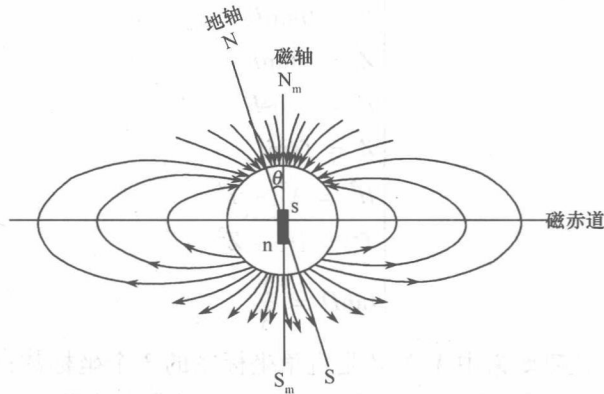


图 1-3 地球磁偶极子场的理想情况

(2) 地磁场的第二个特性是它的磁场很弱,平均强度约为 $0.50e$ 。在地磁学中常用 γ 作为磁场强度的单位。 $10e = 10^5 \gamma$ 。

(3) 地磁场的第三个特性是它在长时期内基本上是稳定的,但是,在相当稳定的磁场之上却叠加着复杂的短期变化磁场。因此,地磁场可以划分为稳定磁场和变化磁场两个基本部分。稳定磁场是地磁场的主要部分,并且主要起源于地球内部。变化磁场主要起源于地球外部,并且强度很弱。从更长的历史时期看,有的研究结果称地球的两个磁极曾颠倒过。

1.2 地磁场的构成

在地球表面上观测到的磁场是几种具有不同来源的磁场的总和。在各种地磁现象中,首先可以把地磁场区分为性质不同的两个部分:一部分是地球的稳定磁场 T^0 ,另一部分是地球的变化磁场 δT 。变化磁场是很弱的,最大的变化量(磁暴)也只有地磁场强度的 2%~4%,一般在 1% 以下。因此,稳定磁场是地磁场的主要部分。地磁场的构成可用下式表示:

$$T = T^0 + \delta T$$

式中 T ——总磁场;
 T^0 ——稳定磁场;
 δT ——变化磁场。

可以把地球的稳定磁场和变化磁场划分为起源于地球内部和地球外部的两个部分:

$$T^0 = T_i + T_e$$

$$\delta T = \delta T_i + \delta T_e$$

式中 T_i ——起源于地球内部稳定磁场,称为地磁场的内源磁场,强度约为地磁场 T^0 的 94%;

T_e ——起源于地球外部的稳定磁场,称为地磁场的外源磁场,强度约为地磁场强度的6%。

由此可见,地球的稳定磁场主要起源于地球内部。因此,所谓地球的稳定磁场就是主要起源于地球内部而变化非常缓慢的磁场。

δT_i 是变化磁场的内源磁场,约占变化磁场 δT 的 1/3; δT_e 是变化磁场的外源磁场,约占变化磁场 δT 的 2/3。但是,从本质上讲,变化磁场是起源于地球外部的各种电流体系。例如,地磁日变化就是起源于高度约为 100km 的大气电离层中的电流体系。这种外部电流体系就是产生外源磁场 δT_e 的原因。由于地球也是导体,所以外部电流体系所产生的磁场还会对地球内部产生电磁感应作用,从而形成一个内部电流体系。这种内部电流体系就是产生内源磁场 δT_i 的原因。由此可见,变化磁场中的内源磁场并非有一个独立的起源,它只是外源磁场所产生的感应磁场。因此,变化磁场就是起源于地球外部而叠加在稳定磁场之上的地磁场的各种短期的变化。

由上述内容可知,可进一步把地磁场区分为 3 个基本部分:

$$T = T_i + T_e + \delta T$$

式中 T_i ——内源磁场;

T_e ——外源磁场;

δT ——变化磁场。

内源磁场就是磁偶极子磁场、大陆磁场和异常磁场之和,即

$$T_i = T_o + T_m + T_a$$

T_o 是磁偶极子磁场。因为均匀磁化球体的磁场与磁偶极子磁场是等效的,所以 T_o 又称为地球的均匀磁化磁场。一般认为,地核(外核)物质的对流运动所形成的涡流电流是磁偶极子磁场的成因。地球的中心部分是高温的液态金属介质,黏滞系数很小,可能同地壳一样,其中也含有少量的放射性物质,在其蜕变过程中释出热能,使地核中形成温度梯度,再加上重力作用就会使液态金属介质产生对流运动,而形成封闭的涡流。只要有极小的初始磁场存在,运动的金属体中就会产生感应电流,在对流运动的适宜形态下感应电流又会引起加强原始磁场的次生磁场。只要有支持对流运动的能量,这种磁场就会一直增长上去而达到实际所观测到的数值。在这种情况下,地核就好比一个自激的发电机一样。

因涡流环对地理赤道的倾斜及其形状和数值的分布不均,使磁偶极子的轴偏离地球自转轴。

这就是比较流行的地球偶极子磁场成因的一种假说——自激发电机假说的定性描述。

T_m 是大陆磁场。精确的地磁测量表明,各地磁要素在地面上的分布,在相当广泛的地域内并不符合地心磁偶极子场的分布规律,二者之间存在较为显著的差异,因为这种差异出现在广大的地域内,所以称为大陆磁场。

为了显示出大陆磁场的特点,通常从磁测数据中减去按地心磁偶极子场计算出来的地面各点(测点)的磁场数值,并把这个差值按照测点的地理位置标在地图上,画出等值线图。这种图称为大陆磁场等值线图或大陆磁场分布图。因为大陆磁场是从地磁场中减去磁偶极子场的结果,所以大陆磁场又有剩余磁场、大陆磁异常、非偶极子磁场等名称。

图 1-4 是 1965 年的世界大陆磁场垂直分量分布图。该图表明,大陆磁场是围绕 8 个中

心分布的,有亚洲东部、南大西洋、南印度洋、非洲大陆、北美洲、北太平洋、冰岛、澳大利亚南部等。各大陆磁场的中心具有不同的极性,在图中用 N 和 S 标出。各中心的垂直强度也不同,最强者约为地磁场平均强度的 30% ~ 35%,最弱者约为地磁场平均强度的 6%。

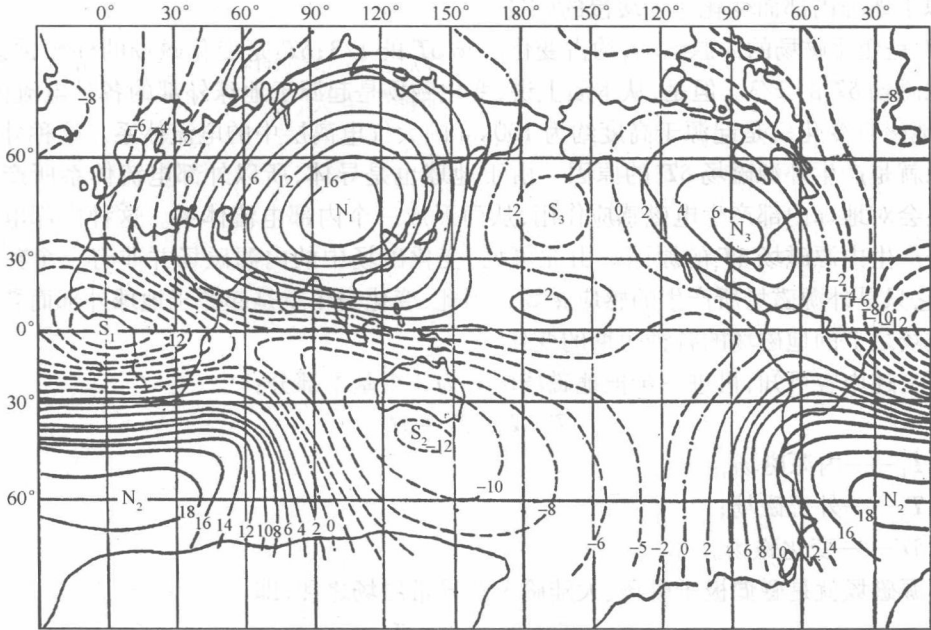


图 1-4 1965 年世界大陆磁场垂直分量分布图

大陆磁场的成因可能是地球内部构造的不均匀性。一般认为,在地幔和地核的边界附近,可能存在着物质对流运动,并形成涡流电流,从而产生大陆磁场。1958 年人造地球卫星的高空磁测结果表明,大陆磁场随着高度的增加而衰减很慢。这是大陆磁场可能起源于地球内部深层说法的一个例证。

T_a 是异常磁场,简称磁异常。在比较小的范围内,例如在几百平方千米、几十平方千米或几平方千米范围内,地磁要素的地面分布在很多区域呈现出复杂的情况。在这些区域,不仅地磁场的水平梯度(磁场强度沿地面水平方向的变化)变化很大,而且这种梯度变化还很不一致,这种地磁场梯度发生显著变化的区域就叫做磁异常区。例如,世界著名的苏联库尔斯克磁异常区,由于地下 200m 深度附近埋藏着很厚的含有磁铁矿的石英岩脉,因此,该地区地磁垂直分量达到 1.50e,水平分量达到 0.80e,梯度达到 10e/km 以上。为了突出磁异常区的磁场特征,常绘制磁异常的等值线图,即从磁测数据中减去该地区的地磁场的正常值,或直接测定异常区的磁场和正常磁场的差值,这种差值即异常值。把各测点的异常值按照各测点的地理位置标在一张平面图上,并连成等值线,即为磁异常平面等值线图。

异常磁场的成因在于地壳构造的不均匀性。地壳内的岩层在地磁场(主要是磁偶极子磁场 T_0)中受到磁化作用而产生异常磁场。

在实际应用中,通常又把异常磁场分成两类,即

$$T_a = T'_a + T''_a$$

式中 T'_a ——地壳深部岩层的磁化所产生的磁场,称为区域异常,因为岩层较深,所以区域异常的特点是分布范围较广(在几十平方千米以上),磁场梯度较小,磁异常也较弱;

T''_a ——地壳浅部岩层(包括矿体)的磁化所产生的磁场,称为局部异常或地方异常,因为岩层较浅,所以局部异常的特点是分布范围较小(一般只有十几平方千米或几平方千米,甚至更小),磁场梯度较大,磁异常也较强。

归纳起来,地磁场的构成成分可用下式表示:

或
$$T = T_0 + T_m + T_e + T_a + \delta T \quad (1-2)$$

$$T = T_0 + T_m + T_e + T'_a + T''_a + \delta T$$

式中 T_0 ——磁偶极子磁场;

T_m ——大陆磁场;

T_e ——外源磁场;

T_a ——异常磁场;

T'_a ——区域异常;

T''_a ——局部异常;

δT ——变化磁场。

由于磁偶极子磁场和大陆磁场是地磁场的主要成分,并且二者的起源很可能和地球的起源有密切关系,所以在地磁学中就把二者之和($T_0 + T_m$)称为基本磁场,它是起源于地球内部,并构成地磁场主体的稳定磁场。

异常磁场 T_a 和地质构造、地下矿藏有着密切关系,其实用价值很高,早已是生产部门的勘测对象和研究对象,因此,在一般情况下,把 $T_n = T_0 + T_m + T_e$ 称为正常场, T_a 称为异常场。因为外源磁场 T_e 很弱,所以正常磁场 T_n 和基本磁场是基本相同的,故可写成

$$T_n \approx T_0 + T_m$$

在世界地磁图上所表示的磁场就是这种正常磁场。

1.3 基本磁场的解析表示

1.3.1 均匀磁化球体的磁场

地磁测量结果表明,地磁场和一个地心磁偶极子的磁场近似。还可证明一个均匀磁化球体的磁场和一个磁偶极子的磁场是等同的。因此,可近似地假设地磁场为均匀磁化球体的磁场。现在来分析后者的数学形式。

设地球为均匀磁化的球体,则相当于在地心处存在一个磁偶极子,它在地表面任一点 p 产生的磁位为(图 1-5)

$$U = \frac{M \cdot r}{r^3} \quad (1-3)$$

或
$$U = \frac{M}{r^2} \cos\phi = -\frac{M}{r^2} \cos\theta \quad (1-4)$$

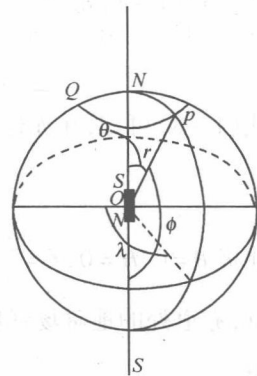


图 1-5 地球表面 p 点位置的球坐标示意图

式中 M ——地球总磁矩;

r ——球心 O 到 p 点的距离;

ϕ ——磁矩 M 与点 p 矢径 r 的夹角。

为简化起见,假定地磁轴与地球自转轴重合,则 $\phi = \pi - \theta$, θ 是 p 点的地理纬度角。

由于磁场是负磁位的梯度,所以

$$\mathbf{T} = -\text{grad}U \quad (1-5)$$

式中 \mathbf{T} —— p 点地磁场总强度矢量。

在地球表面以 p 点为原点建立一个直角坐标系,取 x 轴向北, y 轴为东, z 轴向下,则可求出 \mathbf{T} 的三个分量:

$$X = -\frac{\partial U}{\partial x}; \quad Y = -\frac{\partial U}{\partial y}; \quad Z = -\frac{\partial U}{\partial z} \quad (1-6)$$

X 、 Y 、 Z 分别是 \mathbf{T} 的北向分量、东向分量和垂直分量。由图 1-5 可知, pN 是过 p 点及地理北极 N 的大圆弧,即过 p 点的地理子午线的一段弧长,故 \mathbf{T} 在 pN 切线方向的分量即北向分量 X ; QP 为过 p 点的纬度圈,故 \mathbf{T} 在 QP 切线方向的分量即为东向分量 Y ; \mathbf{T} 在矢径 r 方向的分量即为垂直分量 Z ,但 Z 与 r 的方向相反,即 Z 增加的方向为 r 减小的方向。因此,直角坐标系的坐标变量可用 r, θ, λ 表示为

$$\begin{aligned} dx &= -r d\theta \\ dy &= r \sin\theta d\lambda \\ dz &= -dr \end{aligned} \quad (1-7)$$

式中 λ —— p 点的经度角。

由于设地磁轴与地球自转轴重合,偶极子在 p 点产生的磁位与经度角 λ 无关,故 $Y = 0$ 。其他分量为

$$\begin{cases} X = H = -\frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial \theta} = \frac{M}{r^3} \sin\theta \\ Z = \frac{\partial U}{\partial r} = \frac{2M}{r^3} \cos\theta \end{cases} \quad (1-8)$$

式中 r ——地球半径。

由式(1-8)得总磁场强度

$$T = \sqrt{Z^2 + H^2} = \frac{M}{r^3} (1 + 3\cos^2\theta)^{\frac{1}{2}} \quad (1-9)$$

由式(1-8)可知,在赤道处, $\theta = 90^\circ$, 有

$$H = \frac{M}{r^3} = T, \quad Z = 0$$

在北极 $\theta = 0$, $H = 0$, $Z = \frac{2M}{r^3}$ 。在南极 $\theta = \pi$, $H = 0$, $Z = -\frac{2M}{r^3}$ 。

可见,赤道处的地磁场强度只有两极处的地磁场强度的 $1/2$ 。

又因

$$\frac{Z}{H} = \tan I$$

将式(1-8)中两式相除,得

$$\tan I = 2 \cot \theta$$

由这些近似公式计算的结果与实际观测值相比较,个别地方虽有较大差别,但大体上是相符合的。

1.3.2 地磁要素梯度值的计算

在地面上向垂直或水平方向移动一个单位距离时地磁要素的变化值称为这项要素的梯度值。

现计算 H 、 Z 、 T 沿地磁子午线(近似设其为地理子午线)方向及沿高度的梯度值。

$$\begin{cases} \frac{\partial Z}{\partial x} = \frac{\partial Z}{-r\partial\theta} = \frac{2M}{r^4} \sin\theta = \frac{2H}{r} \\ \frac{\partial H}{\partial x} = \frac{\partial H}{-r\partial\theta} = -\frac{M}{r^4} \cos\theta = -\frac{Z}{2r} \\ \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial T}{-r\partial\theta} = \frac{M}{r^4} \frac{3\sin\theta\cos\theta}{(1+3\cos^2\theta)^{\frac{1}{2}}} = \frac{H}{r} \sin I + \frac{Z}{2r} \cos I \end{cases} \quad (1-10)$$

式中

$$\begin{aligned} \sin I &= \frac{Z}{T} = \frac{2\cos\theta}{(1+3\cos^2\theta)^{\frac{1}{2}}} \\ \cos I &= \frac{H}{T} = \frac{\sin\theta}{(1+3\cos^2\theta)^{\frac{1}{2}}} \end{aligned}$$

将式(1-8)、式(1-9)分别对 r 求偏导,得

$$\begin{cases} \frac{\partial Z}{\partial r} = \frac{-6M}{r^4} \cos\theta = \frac{-3Z}{r} \\ \frac{\partial H}{\partial r} = \frac{-3M}{r^4} \sin\theta = \frac{-3H}{r} \\ \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{-3M}{r^4} (1+3\cos^2\theta)^{\frac{1}{2}} = \frac{-3T}{r} \end{cases} \quad (1-11)$$

例如,北京地磁台的垂直强度与水平强度分别为

$$Z = 46193\gamma, \quad H = 29884\gamma$$

若取 $r = 6370\text{km}$, 则各种梯度为

$$\frac{\partial Z}{\partial x} = 9.38 \gamma/\text{km}$$

$$\frac{\partial H}{\partial x} = -3.63\gamma/\text{km}$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 5.91\gamma/\text{km}$$

即自该地每向北移动 1km, Z 值增加 9.38γ , H 值减少 3.63γ , T 值增加 5.91γ 。

$$\frac{\partial Z}{\partial r} = -21.76 \gamma/\text{km};$$

$$\frac{\partial H}{\partial r} = -14.07\gamma/\text{km};$$

$$\frac{\partial T}{\partial r} = -25.91\gamma/\text{km}$$