

3 0 8 6 7 0 0 2

TJ6  
01

# 舰船物理场

叶平贤 龚沈光 编著

HL 55106



C0064389

兵器工业出版社

## 出版说明

遵照国务院关于高等学校教材工作的分工，原兵器工业部教材编审室自成立之日起就担负起兵工类专业教材建设这项十分艰巨而光荣的任务。由于各兵工院校，特别是参与编审工作的广大教师积极支持和努力，及国防工业出版社、兵器工业出版社和北京理工大学出版社的紧密配合，自1985年到1988年共编审出版了89种教材。

为了使兵工类专业教材更好地适应社会主义现代化建设培养人才的需要，反映兵工科学技术的先进水平，达到打好基础、精选内容、逐步更新、利于提高教学质量的要求，在总结第一轮教材编审出版工作的基础上，制订了兵工教材编审工作的五个文件。指导思想是：以提高教材质量为主线，完善编审制度，建立质量标准，明确岗位职责，充分发挥各专业教学指导委员会的学术和咨询作用，加强从教材列选、编写到审查整个教材编审过程的科学管理。

1985年根据教学需要，我们组织制订了“七五”教材编写规划，共列入教材116种。这批教材主要是从经过两遍教学使用、反映较好的讲义中遴选出来的，较好地反映了当前兵工教材的科学性和适合我国情况的先进性，并不同程度的更新了教材内容，是一批较好的新型教材。

本教材由蔡鹄、李绍周、郝力勤高级工程师主审，李谦教授担任责任编委，张守中副教授担任主管编辑。

限于水平和经验，这批教材的编审出版难免有错误之处，希望广大读者批评指正。

机械电子工业部兵工教材编审室

1989年8月

## 前 言

舰船物理场是指舰船存在时，在其周围的空间出现的不同物理性质的场，例如，磁场、声场、水压场、电场、热场、重力场、光场、宇宙射线场等。由于当舰船不存在时，海洋环境中已经存在有各种场（通常称为背景场或者海洋环境场），例如地磁场、自然噪声场、风浪、潮汐等引起的水压场……等，所以，我们直接观测到的是这些背景场与舰船物理场相叠加的合成场，而舰船物理场则是这种合成场与背景场之差。因此，舰船物理场所分布的空间，就是由于舰船存在而引起的物理性质发生了变化的空间，舰船物理场的强度则以由于舰船存在而引起的周围空间该物理场参量的增量来度量。

舰船物理场是一门研究舰船的各种物理场以及与之有关的各种背景场（海洋环境场）的规律的科学。它是为了满足战争的需要，在发展水雷非触发引信的基础上，逐步形成和发展起来的。早在第一次世界大战末期，就出现了利用舰船磁场引爆的非触发磁性水雷。在第二次世界大战中，除了广泛使用磁性水雷外，又相继出现了利用舰船声场引爆的声水雷（音响水雷）和利用舰船水压场引爆的水压水雷。在与反水雷手段（包括扫雷具和消磁、消声隔振等防护措施）作斗争的过程中，这些水雷的引信性能不断地得到改进，并且，在单一引信的基础上，又出现了两种或两种以上引信构成的联合引信，进一步提高了非触发水雷的战术技术性能。另一方面，非触发水雷的发展，又促使人们进一步研究舰船物理场，进而设计出各种反水雷兵器或采取有效的舰船防护措施，以对付各种新型水雷。正是这种水雷与反水雷的相互斗争，推动了舰船物理场研究的不断发展。

第二次世界大战以后，世界各军事强国在大力发展尖端武器的同时，也在积极发展包括各种水中兵器在内的常规兵器。在水雷兵器方面，除继续研究利用舰船磁场、声场、水压场外，还在积极研究一些新的舰船物理场如电场、重力场等，同时也在研制各种主动引信如主动超声引信等，这些是利用舰船对物理控制场（如超声场）的反馈信息工作的。但是，各国现役水雷的非触发引信大多数甚至绝大多数仍然利用磁、声、水压三种物理场。20世纪70年代以来，出现了装有声、磁、水压三种引信并利用微机进行控制运算的组合引信，工作制度可任意组合，具有较强的抗扫雷、抗干扰、目标识别和炸点控制功能，在硬件不变的前提下，通过修改软件可在一定范围内改进引信性能。这为开发利用这三种物理场提供了有效手段。可以预期，随着微电子技术和信息处理技术的发展，必然会出现性能更加完善可靠的水雷智能引信。自然，对于新物理场的研究，如能导致新型非触发水雷的出现，定会增强海军的作战实力。

本书是水雷工程和反水雷工程专业的专业基础课〈舰船物理场〉的教材，适应教学大纲76学时，全书约30万字，平均4千字/学时。本书也可供从事水雷、反水雷、舰船防护以及其它水中兵器方面工作的工程技术人员参考。本教材的先修课为电工基础、水声学、电子技术和流体力学。

本教材共四篇十章：舰船磁场及海洋环境磁场（四章）、舰船声场及海洋环境噪声场（二章）、舰船水压场及海洋环境水压场（二章）以及其它物理场概述（二章）。第一、二篇由叶平贤编写，第三、四篇由龚沈光编写。

本教材是在海军工程学院1981年11月出版的《舰船物理场》一书的基础上加以删改充实完

成的。

本书由中国船舶工业总公司第七研究院第710研究所研究员级高级工程师蔡鹏审阅了第二、四篇,高级工程师李绍周审阅了第一篇,高级工程师郝力勤审阅了第三篇,并提出了许多宝贵意见,在此谨向他们表示衷心感谢。

由于作者的业务水平和思想水平不高,难免有错误不当之处,敬希读者批评指正。

作者

1990年10月

# 目 录

## 第一篇 舰船磁场及海洋环境磁场

<b>第一章 地球磁场及海洋环境磁场</b> .....	( 2 )
§1.1 地磁场的构成 <sup>(1)</sup> .....	( 2 )
§1.2 地磁要素.....	( 4 )
§1.3 地磁图 <sup>(1)</sup> .....	( 4 )
§1.4 变化磁场 <sup>(1), (2), (5)</sup> .....	( 16 )
§1.5 电磁感应和电导率异常.....	( 27 )
§1.6 地震引起的磁场 <sup>(7)</sup> .....	( 30 )
参考文献.....	( 32 )
<b>第二章 舰船磁场分析和测量</b> .....	( 33 )
§2.1 铁磁性物体的磁化.....	( 33 )
§2.2 舰船在地磁场中的磁化.....	( 38 )
§2.3 舰船磁场分析.....	( 40 )
§2.4 舰船消磁概述.....	( 50 )
§2.5 舰船磁场测量概述.....	( 55 )
参考文献.....	( 62 )
<b>第三章 舰船磁场的深度换算</b> .....	( 63 )
§3.1 用解拉普拉斯方程边值问题的方法进行磁场深度换算.....	( 63 )
§3.2 视舰船为旋转椭球体时磁场的换算 <sup>(1)</sup> .....	( 66 )
§3.3 视舰船为旋转椭球体阵列时磁场的换算.....	( 80 )
§3.4 视舰船为磁偶极子阵列时磁场的换算.....	( 86 )
§3.5 潜艇空间磁场的圆柱面换算.....	( 99 )
参考文献.....	(105)
<b>第四章 物理场的模拟</b> .....	(106)
§4.1 物理模拟与数学模拟.....	(106)
§4.2 相似理论概述.....	(107)
§4.3 方程分析法应用举例和舰船模型的建造.....	(111)
参考文献.....	(116)
本篇结语.....	(117)

## 第二篇 舰船声场及海洋环境噪声场

<b>第五章 舰船声场</b> .....	(119)
§5.1 概述.....	(119)
§5.2 舰船声场的来源和组成 <sup>[1]</sup> .....	(121)
§5.3 舰船辐射噪声的特性和谱级.....	(133)
§5.4 舰船辐射噪声的换算和计算.....	(149)
§5.5 舰船辐射噪声测量概述.....	(152)
参考文献.....	(156)
<b>第六章 海洋环境噪声场</b> .....	(157)
§6.1 概述.....	(157)
§6.2 水动力噪声和热噪声 <sup>[1]</sup> .....	(162)
§6.3 冰下噪声 <sup>[1], [4]</sup> .....	(171)
§6.4 生物噪声 <sup>[1]</sup> .....	(172)
§6.5 地震噪声 <sup>[1], [2]</sup> .....	(176)
§6.6 工业噪声 <sup>[4]</sup> .....	(178)
§6.7 水中爆炸噪声 <sup>[4]</sup> .....	(180)
§6.8 海洋噪声测量概述 <sup>[1]</sup> .....	(138)
参考文献.....	(191)
本篇结语.....	(192)

## 第三篇 舰船水压场及海洋环境水压场

<b>第七章 舰船水压场</b> .....	(193)
§7.1 以中线面上的源汇代换舰船时, 舰船水压场的计算.....	(193)
§7.2 考虑舰船横剖面面积实际分布时, 舰船水压场的计算.....	(211)
§7.3 计及兴波时, 舰船水压场的计算.....	(220)
§7.4 舰船水压场的特性.....	(229)
§7.5 舰船水压场的实验研究.....	(233)
参考文献.....	(236)
<b>第八章 海洋环境水压场</b> .....	(237)
§8.1 进行波水压场.....	(237)
§8.2 海浪水压场.....	(245)
§8.3 潮汐水压场 <sup>[2], [4], [5], [6]</sup> .....	(263)
§8.4 水流水压场.....	(271)
§8.5 其它自然因素产生的海洋环境水压场简介.....	(275)
参考文献.....	(281)
本篇结语.....	(282)

## 第四篇 其它物理场概述

<b>第九章 舰船电场及海洋环境电场</b> .....	(283)
§9.1 舰船电场.....	(283)
§9.2 海洋环境中的自然电场.....	(287)
参考文献.....	(290)
<b>第十章 舰船重力场及海洋环境重力场</b> .....	(291)
§10.1 重力场的含义及舰船重力场 .....	(291)
§10.2 海洋自然环境重力场 .....	(293)
参考文献.....	(296)

# 第一篇 舰船磁场及海洋环境磁场

现代舰船的船体和上层建筑以及各种武器装备一般均由钢铁制成。即使是采用非磁性材料（如铝、木或玻璃钢等）制造船体的现代化扫雷舰艇及其他小艇也仍需要用钢铁或低磁钢制造各种武器装备。这些由钢铁或其它磁性材料制成的物体在地磁场中都要被磁化。在被地磁场磁化的舰船周围的空里，存在着舰船磁场。所谓舰船磁场，就是由于舰船的出现所造成的周围空间磁场的增量。

一般舰船尽管采取了现代化的消磁措施，但在其周围仍然存在一定强度的舰船磁场，而且其区域性较好，因而直到现在，利用舰船磁场作用而动作的水雷磁引信仍然是水雷非触发引信中的主要类型之一。水雷磁引信按工作原理分为下列四种

1. 静磁引信：利用舰船磁场强度的绝对值动作的引信。
2. 动磁引信：利用舰船磁场强度随时间的变化率动作的引信。
3. 静磁梯度引信：利用舰船磁场强度梯度的绝对值动作的引信。
4. 动磁梯度引信：利用舰船磁场强度梯度随时间的变化率动作的引信。

前两种引信在已往的战争中已得到实际的应用，其中，动磁引信曾占主要地位。动磁梯度引信在工程兵水雷中已有应用。

水雷所在的海域，除了不时出现的舰船磁场外，还始终存在着环境磁场，它主要包括地磁场、海水磁场和地震引起的磁场。环境磁场对于舰船磁场来说是一种背景干扰场。水雷磁引信必须区别舰船磁场和环境磁场才能正常地工作。为此，应合理地选择引信的动作参数和拟定引信的工作制度。显然，缺乏对舰船磁场和环境磁场规律性的了解无法作到这一点。

为了与装有磁引信的非触发水雷作斗争，除了舰船本身采取消磁措施外，还可以采取猎雷和扫雷两种手段。尽管猎雷技术具有独特的优点而且发展很快，但因种种条件的限制，到目前为止，用电磁扫雷具扫除磁性水雷仍不失为一种重要的斗争手段。对于扫雷工程人员来说，深入了解舰船磁场和环境磁场，不仅有助于深入掌握水雷磁引信的性能特点，也会对正确设计电磁扫雷具有裨益。

本篇包括地球磁场和海洋环境磁场、舰船磁场分析和测量、舰船磁场的深度换算以及物理场的模拟等内容。



# 第一章 地球磁场及海洋环境磁场

## §1.1 地磁场的构成<sup>(1)</sup>

地球具有的磁场称为地磁场。地磁场近似于一个置于地心的偶极子的磁场。这是地磁场的最基本的特性。这个偶极子的磁轴 $N_m S_m$ 和地轴 $NS$ 斜交一个角度 $\theta_0$ ， $\theta_0 \approx 11.5^\circ$ 。图1-1是地心偶极子磁场的磁力线的分布情况。在地理北极 $N$ 附近的 $N_m$ 极称为地磁北极，在地理南极 $S$ 附近的 $S_m$ 极称为地磁南极。 $N_m$ 与 $S_m$ 就是磁轴与地面的两个交点。应当指出，地磁北极 $N_m$ 与地磁南极 $S_m$ 是按地理位置说的。按磁性说，偶极子的正极 $n$ 与负极 $s$ 应分别对应于地磁南极 $S_m$ 与地磁北极 $N_m$ 。图1-1中用箭头表示出偶极子的磁矩方向。

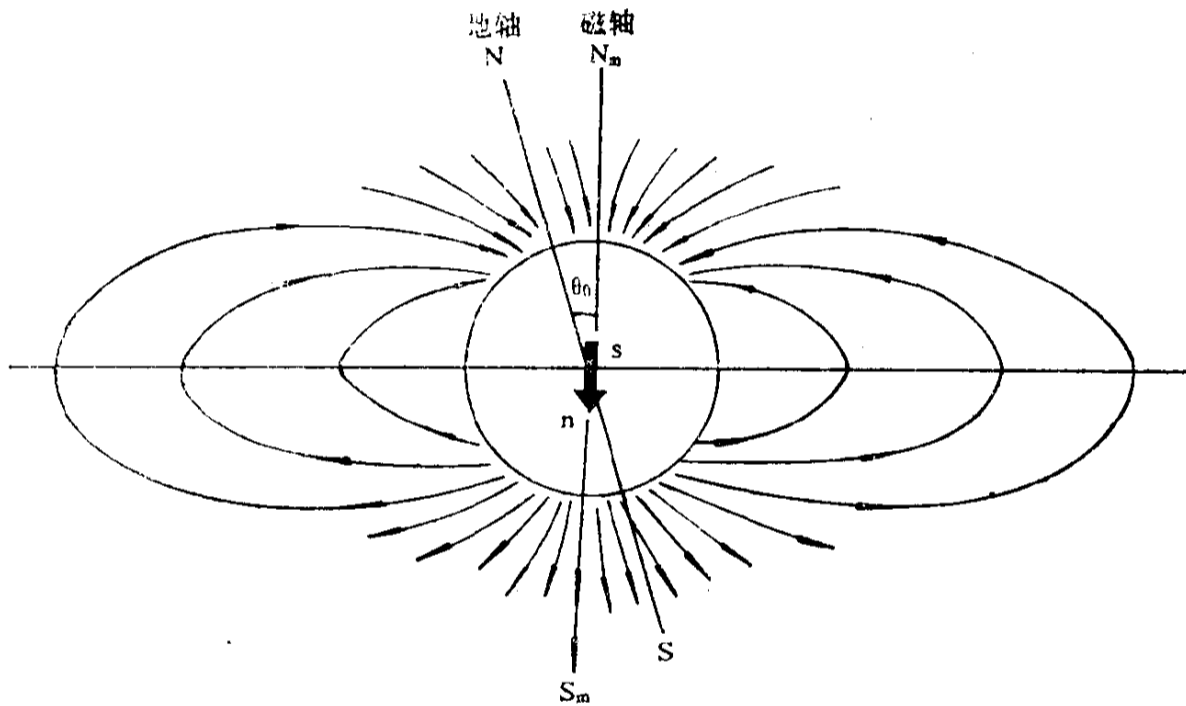


图1-1 地心偶极子磁场示意图

地磁场是一个弱磁场，在地面上的平均磁感应强度约为 $0.5 \times 10^{-4} \text{T}$ （特斯拉）。这是地磁场的又一个显著特点。在地磁学中，特斯拉这个单位太大，通常采用 $\text{nT}$ （纳特斯拉，简称纳特）为单位， $1 \text{nT} = 10^{-9} \text{T}$ <sup>①</sup>。

地磁场是由各种不同来源的磁场叠加构成的。按其性质，可把地磁场 $B_T$ 区分为两大部分：一部分是主要来源于地球内部的稳定磁场 $B_T^0$ ，另一部分是主要起源于地球外部变化磁场 $\delta B_T$ ，即

$$B_T = B_T^0 + \delta B_T$$

这又是地磁场的一个重要特点。变化磁场比稳定磁场弱得多，最大的变化也只占地磁场感应强度的2—4%。因此，稳定磁场是地磁场的主要部分。

<sup>①</sup> 在高斯制中，磁感应强度的单位是高斯(Gs)， $1 \text{Gs} = 10^{-4} \text{T}$ 。过去在地磁学中常以 $\gamma$ 为单位， $1 \gamma = 10^{-5} \text{Gs}$ ，故 $1 \text{nT} = 1 \gamma$ 。

运用一定的数学分析方法，可以把稳定磁场和变化磁场划分为起源于地球内部和地球外部两部分：

$$B_T^0 = B_i + B_e$$

$$\delta B_T = \delta B_i + \delta B_e$$

其中  $B_i$  是起源于地球内部的稳定磁场，称为地磁场的内源场，占地磁场感应强度的99%以上。 $B_e$  是起源于地球外部的稳定磁场，称为地磁场的外源场，只占地磁场感应强度的1%以下。由此可见，地球的稳定磁场主要起源于地球内部。

$\delta B_i$  是变化磁场的内源场，约占变化磁场的1/3； $\delta B_e$  是变化磁场的外源场，约占变化磁场的2/3。外源变化磁场起源于地球外部的各种电流体系。这种外部电流体系的磁场还会在具有导电性质的地球内部感应出一个内部电流体系，后者就是产生内源变化磁场的原因。可见，内源变化磁场只是外源变化磁场的感应磁场。因此，变化磁场的起源是地球外部的各种电流体系。

内源稳定磁场除偶极子磁场外还有其它成分，可以表示为

$$B_i = B_o + B_m + B_a$$

其中  $B_o$  为地心偶极子磁场， $B_m$  为非偶极子磁场， $B_a$  为异常磁场，常称磁异常。

地心偶极子磁场等效于均匀磁化球体的磁场。一般认为，地核(外核)物质的对流运动所形成的涡流电流是地心偶极子磁场的成因。精确的地磁测量表明，各地磁要素在地面上的分布，在相当广的地域内并不符合地心偶极子磁场的分布规律，二者之间存在较为显著的差异。从世界正常磁场地磁图中减去按地心偶极子磁场计算出来的地面各点磁场数值，这种差值即为非偶极子磁场，也称作大陆磁场、大陆磁异常或剩余磁场。非偶极子磁场的成因还不很清楚，一般认为，在地核和地幔边界附近可能存在着物质的对流运动，并形成涡流电流，从而产生非偶极子磁场。人造地球卫星高空磁测结果表明，非偶极子磁场随高度的增加衰减很慢。这是非偶极子磁场可能起源于地球深部的一个依据。异常磁场又可分为两类

$$B_a = B'_a + B''_a$$

其中  $B'_a$  为区域异常，是地壳深部岩层的磁化所产生的磁场，一般分布范围较广(几十平方千米以上)，磁场梯度较小，磁异常较弱； $B''_a$  为局部异常或地方异常，是地壳浅部岩层(包括矿物)的磁化所产生的磁场，一般分布范围较小(几或几十平方千米)，磁场梯度较大，磁异常较强。

归纳起来，地磁场的构成成分可表示如下

$$B_T = B_o + B_m + B_e + B'_a + B''_a + \delta B_T$$

由于偶极子磁场和非偶极子磁场是地磁场的主要成分，并且二者的起源很可能有密切关系，所以在地磁学中把二者之和称为地球的基本磁场  $B_n$ ，即

$$B_n = B_o + B_m$$

因此，地球的基本磁场是起源于地球内部并构成地磁场主要成分的稳定磁场，其变化极为缓慢，称为地磁场的长期变化。地球的变化磁场则是起源于地球外部而叠加在基本磁场之上的各种短期的地磁场变化。

## §1.2 地磁要素

地磁场 $B_T$ 是矢量，可用三维坐标系来表示。常用的坐标系有以下三种。

### 1.2.1 直角坐标系 ( $X, Y, Z$ )

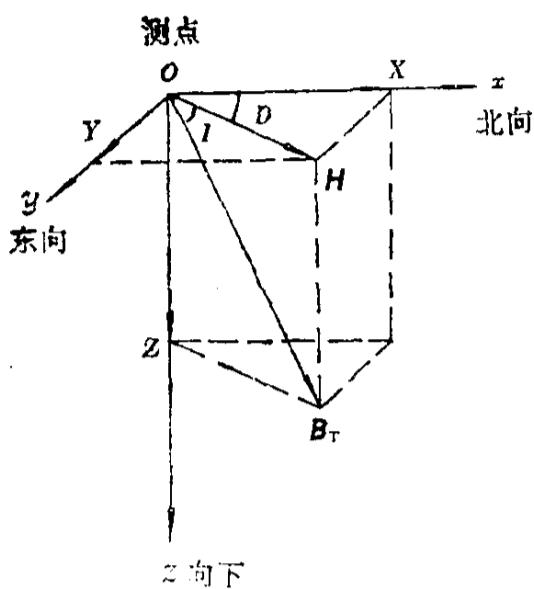


图1-2 地磁要素图

在图1-2中，O点是测点 $x y z$ 是以测点O为原点的直角坐标系，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。 $xOy$ 平面就是地平面或水平面。

$B_T$ 是O点地磁场的总磁感应强度矢量，其数值 $B_T$ 称为地磁场的总磁感应强度。 $B_T$ 在 $x$ 、 $y$ 与 $z$ 轴上的投影是 $X$ 、 $Y$ 与 $Z$ 。 $X$ 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。

这个坐标系在理论研究上比较重要，但一般不能直接测出 $X$ 和 $Y$ ，所以，通常采用球坐标系或柱坐标系。

### 1.2.2 柱坐标系( $H, D, Z$ )

$B_T$ 在水平面上的投影 $H$ 称为水平强度或水平分量。水平分量所指的方向是指南针的正极 $n$ 所指的方向，称为磁北。水平强度矢量偏离地理北方向的角度 $D$ 称为磁偏角。磁偏角也就是磁子午面与地理子午面的夹角。按照规定， $D$ 向东偏为正，向西偏为负。

### 1.2.3 球坐标系 ( $B_T, I, D$ )

$B_T$ 偏离水平面的角度 $I$ 称为磁倾角。按照规定， $B_T$ 下倾为正，上仰为负。在北半球大部分地区磁倾角为正。

上列的 $I$ 、 $D$ 、 $H$ 、 $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 、 $B_T$ 等七个物理量都叫做地磁要素，它们之间有如下关系

$$X = H \cos D,$$

$$Y = H \sin D,$$

$$\operatorname{tg} I = Z / H,$$

$$\operatorname{tg} D = Y / X,$$

$$H^2 = X^2 + Y^2,$$

$$B_T^2 = H^2 + Z^2,$$

$$B_T = H \sec I,$$

$$B_T = Z \operatorname{csc} I.$$

要想确定地面上一点的地磁场的强度与方向，至少要测出任意三个彼此独立的地磁要素，称为地磁三要素。目前只有 $I$ 、 $D$ 、 $H$ 、 $Z$ 与 $B_T$ 的绝对值是能够直接测量的。在地磁三要素中，磁偏角 $D$ 是必须测量的，其他两个要素可根据实际情况任意选测。

## §1.3 地磁图<sup>[1]</sup>

为了清晰地表现地磁场的分布规律，一般将地磁要素绘成等值线图，也就是在地图上将某种地磁要素具有相同数值的各点(已化为同一时刻的数值)连成的曲线所形成的图。例如将磁偏角数值相同的各点连起来的曲线就是等偏线图。其它则有等倾线图、水平强度等值线图及垂直强度等值线图等等。这种地磁图可以把整个地球或个别区域的地磁场的数值和特征清晰地显示出来。

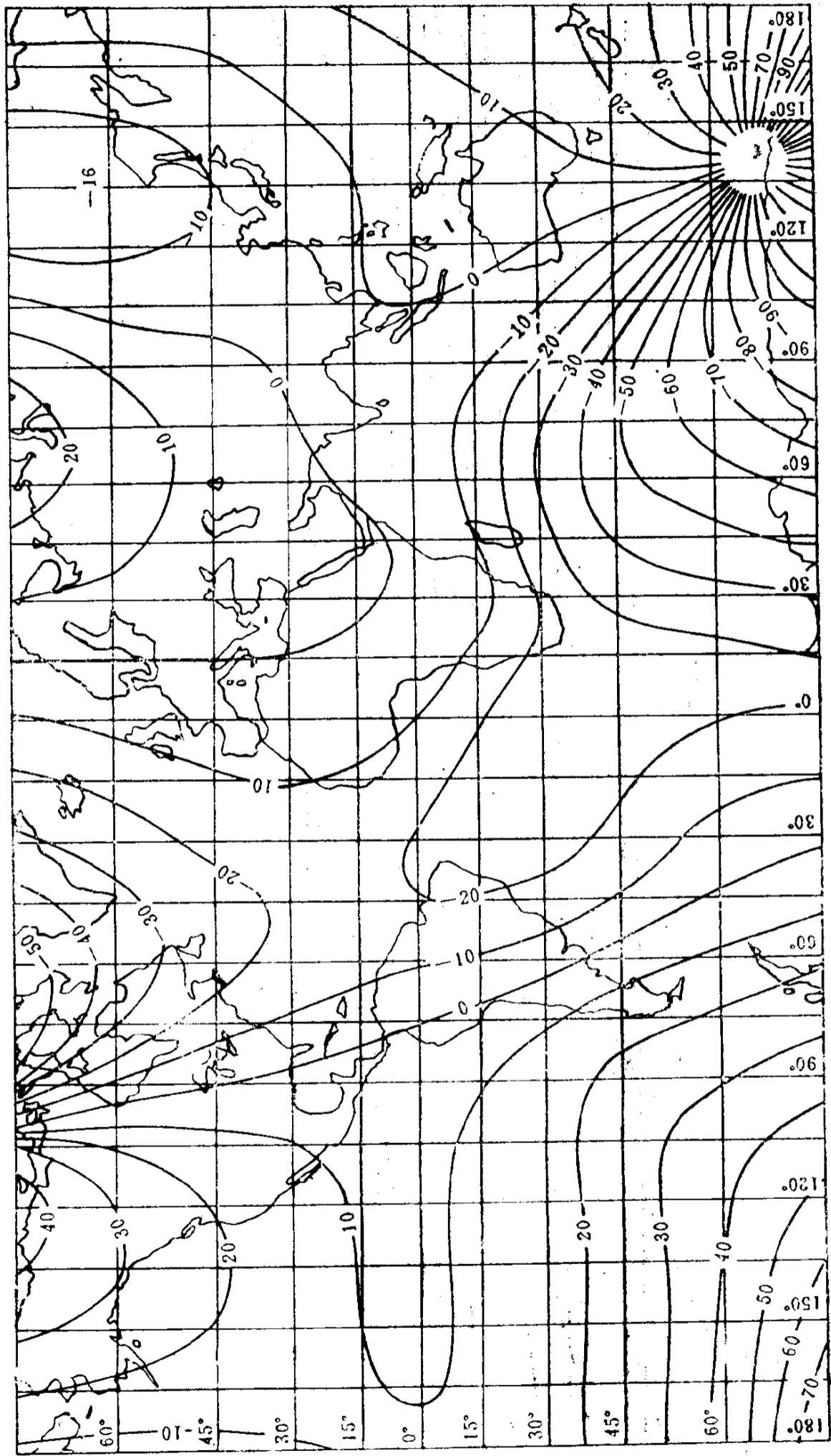


图1-3 世界地磁场偏角等值线图(1980.0年)(单位为 $^{\circ}$ )

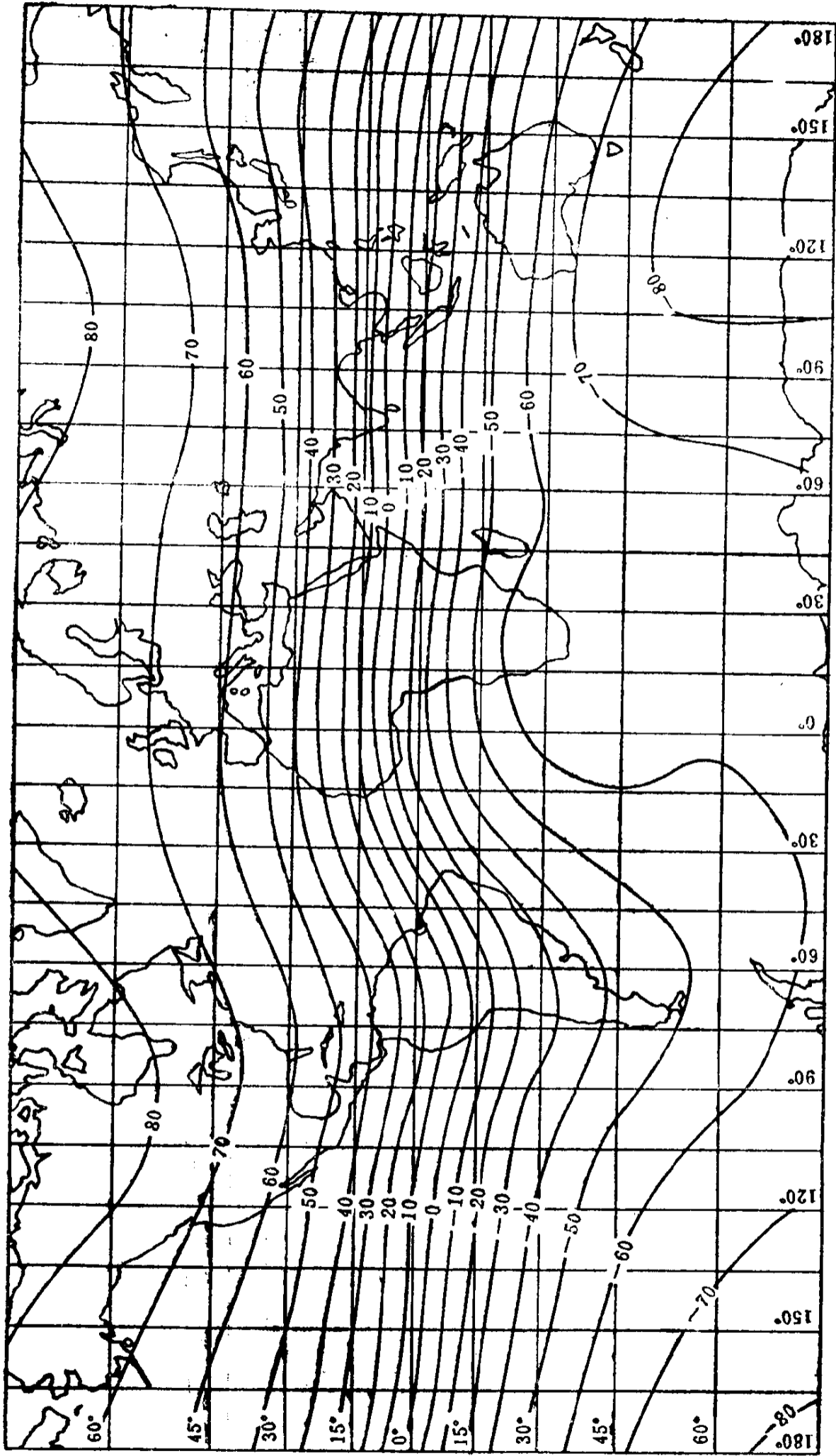


图1-4 世界地磁场倾角等值线图(1980.0年)(单位为 $^{\circ}$ )

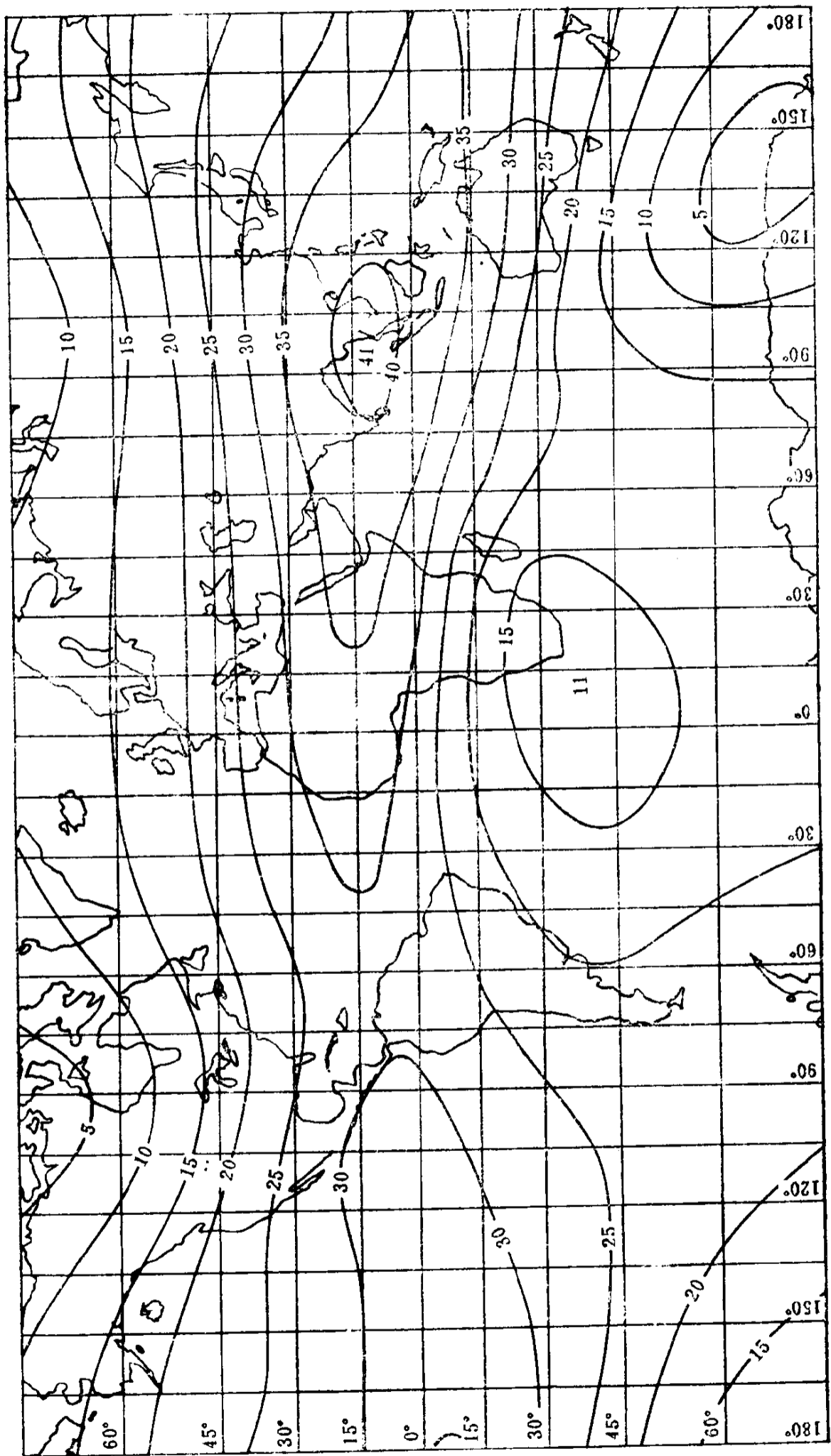


图1-5 世界地磁场水平强度等值线图(1980.0年)(单位为 $\mu T$ )

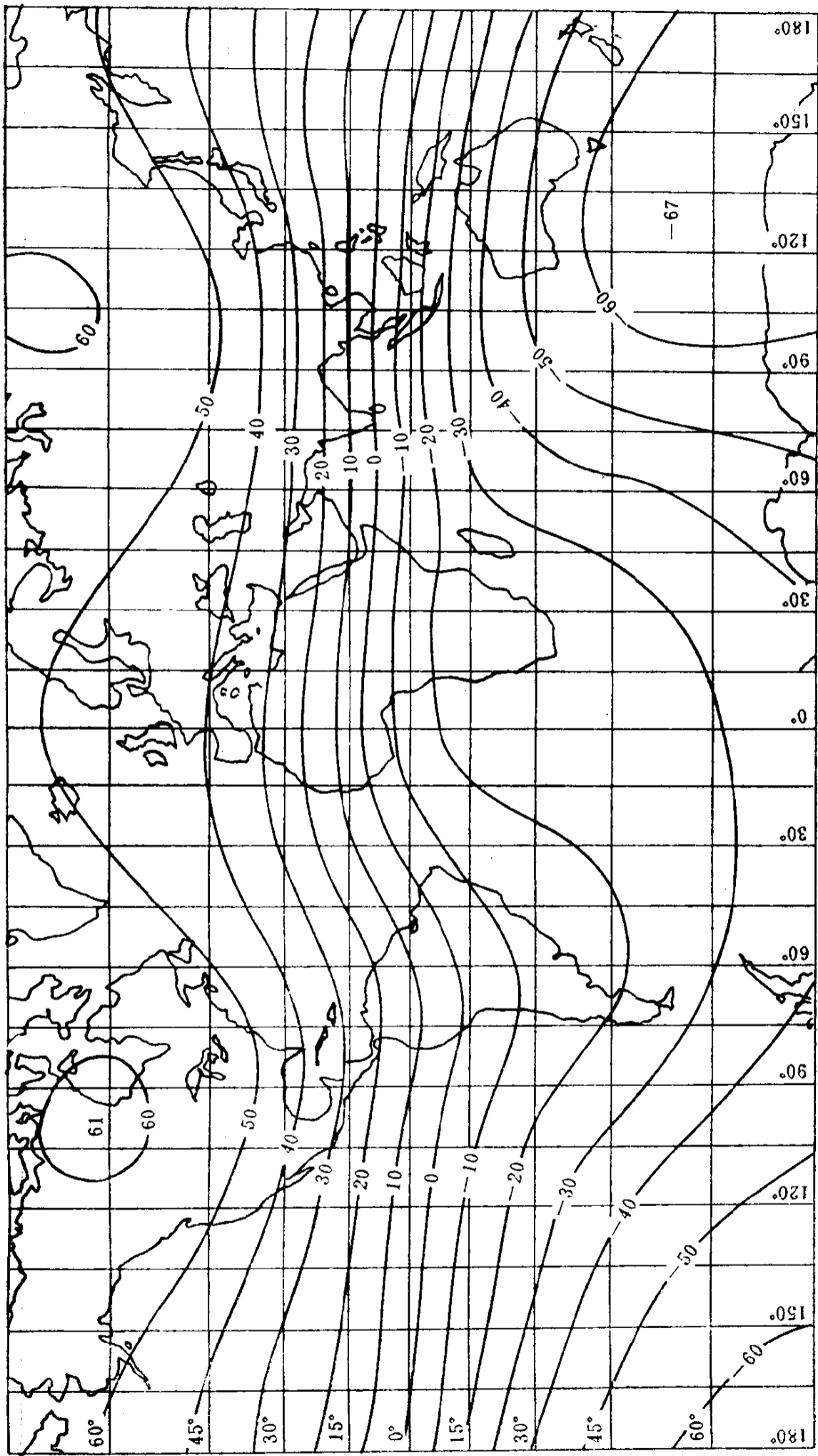


图1-6 世界地磁场垂直强度等值线图(1980.0年)(单位为 $\mu T$ )

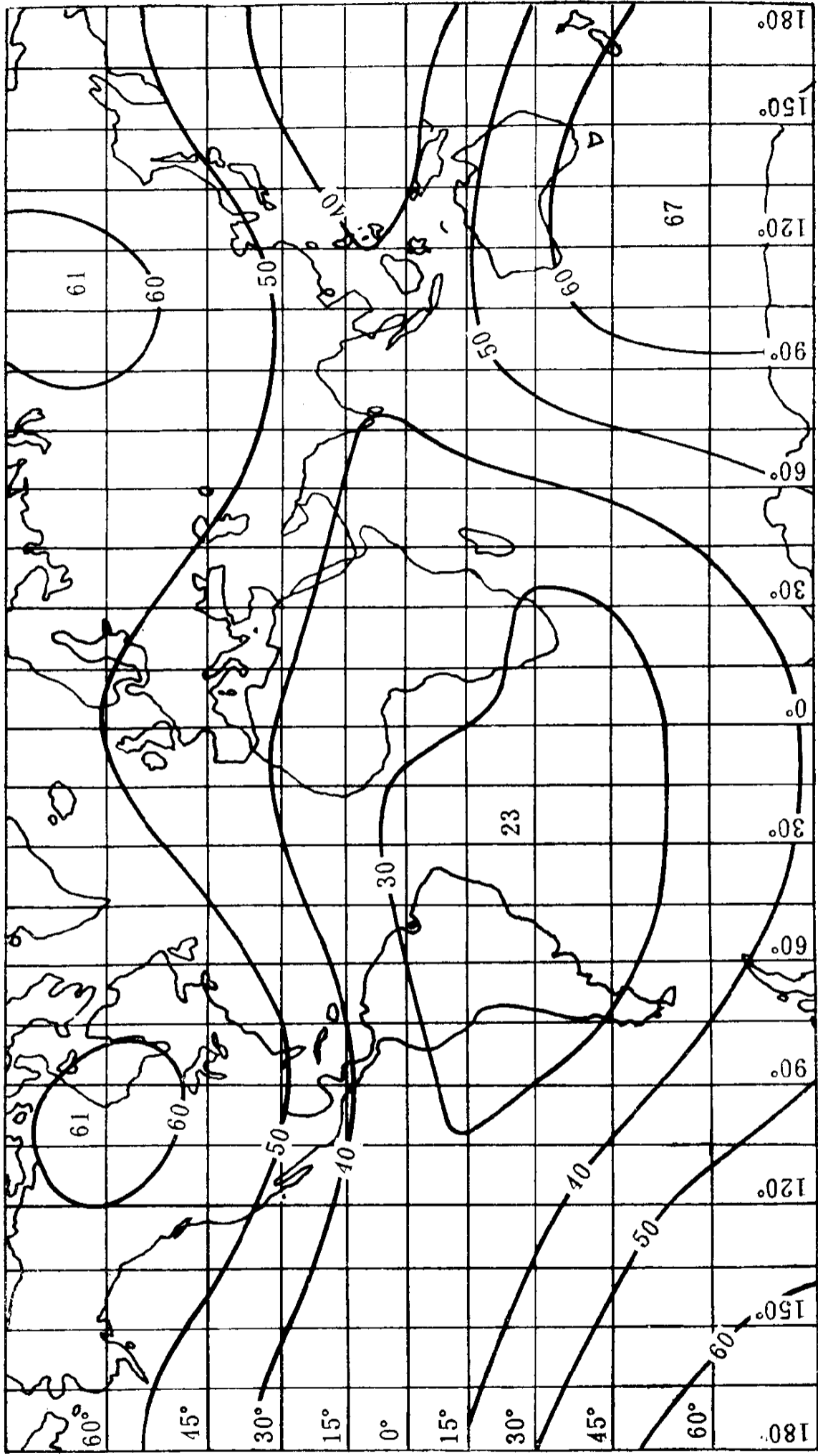


图17 世界地磁场总强度等值线图(1980.0年)(单位为 $\mu T$ )



由于地磁要素是随时间变化的，因而必须把观测数值都化到某一特定日期，这种步骤叫做通化。世界地磁图通常每5年画一次，日期一般选在某一年的1月1日，也有选在某一年的7月1日的。前者称为某一年零年地磁图，后者称为某一年地磁图或某一年代地磁图。例如1980.0年地磁图就要求把所有地磁要素的数值都通化为1980年1月1日0时0分的数值。

### 1.3.1 世界地磁图

世界地磁图表示了地球表面各地磁要素的分布情况。图1-3~图1-7分别是1980.0年的等偏线图、等倾线图、水平强度等值线图、垂直强度等值线图与总强度等值线图(见第5~9页)。

等偏线是从一点出发汇聚于另一点的曲线簇。它有两条 $D=0^\circ$ 的等偏线，把磁偏角分为正负两个区域。等偏线在南北两半球上汇聚于四个点，两个点是磁极，两个点是地极。

等倾线是大致沿纬度分布的一系列平行曲线，分布均匀而规则。零值等倾线称为磁赤道，或倾角磁赤道。由赤道至两极，倾角由 $0^\circ$ 逐渐增到 $\pm 90^\circ$ 。磁极就是倾角 $I = \pm 90^\circ$ 的两点。

水平强度等值线大致是沿地理纬度排列的曲线簇。从北磁极到南磁极，其数值先由零逐渐增到最大，再逐渐减小到零。最大值在赤道附近，但在不同的子午线上最大值不尽相同，其中最大的值为 $0.4 \times 10^{-4} \text{T}$ ，在巽他群岛附近。

垂直强度等值线也是大致沿纬度排列的曲线簇。在南北两极处数值最大，约为 $(0.6 \sim 0.7) \times 10^{-4} \text{T}$ ，而在赤道附近为零。

从世界地磁图上可见，各地磁要素等值线的分布是不均匀的，甚至在某些地区形成封闭的曲线。这正说明了非偶极子磁场的存在。

不仅地磁要素的数值随时间变化，而且南北磁极的位置也随时间变化。表1-1列出由不同年代的观测结果推算出来的磁极位置。

表 1-1 各年代的磁极位置

年 代	北 磁 极		南 磁 极	
	北 纬	西 经	南 纬	东 经
1600	78°42'	59°00'	81°16'	169°30'
1700	75°51'	68°48'	77°12'	150°15'
1829	73°21'	93°56'	72°40'	150°45'
1900	69°18'	96°37'	—	—
1950	72°	96°	70°	150°
1960	74°54'	101°00'	67°06'	142°42'
1970	76°12'	101°00'	66°00'	139°06'
1980	78°12'	102°54'	65°36'	139°24'

### 1.3.2 中国地磁图

解放后，在全国各地设立了一定数量的地磁基准观测台与野外观测点，并把观测结果绘制成相应年代的地磁图。图1-8到图1-12是我国1970.0年的地磁图。从图上可看出各地磁要素的分布特点：

垂直强度 $Z$ 从南到北由 $-0.1 \times 10^{-4} \text{T}$ 增至 $0.56 \times 10^{-4} \text{T}$ ；

水平强度 $H$ 从南到北由 $0.40 \times 10^{-4} \text{T}$ 减小至 $0.21 \times 10^{-4} \text{T}$ ；