

大地电磁测深测量及仪器

张秀成 编著

地 质 出 版 社

目 录

前言

第一章 概论	1
§ 1 大地电磁测深仪器发展概况	1
一、概述	1
二、国外大地电磁测深仪的研制情况	2
三、几个典型的磁场接收器简介	3
四、大地电磁测深仪的发展状况	5
§ 2 场源与信号	6
一、大地电磁场微变的源和谱的特征	6
二、信号特征	7
§ 3 对大地电磁测深仪器的基本技术要求	9
一、磁场接收器类型的选择	9
二、大地电磁测深仪整机性能的基本要求	10
第二章 电场的测量	13
§ 1 电场接收器的类型	13
§ 2 电场接收器的噪声测试	13
一、噪声的定义及表示式	13
二、电场接收器噪声的测试	14
§ 3 电场接收器噪声测试实例	15
一、电场接收器噪声测试结果	15
二、关于电场接收器噪声的稳定性	17
§ 4 电场接收器的温度系数	17
一、温度系数的基本理论	17
二、不极化电极温度系数的比较	18
§ 5 电场接收器的极化电位差	20
一、各种电极的极化电位差	20
二、极化电位差随时间的变化	20
§ 6 几个实用的管式不极化电极的制作方法	21
一、制作方法	21
二、电极的布放	22
三、电极应用的选择	22
第三章 磁场接收器的设计	23
§ 1 磁场接收器的噪声及信号源	23
一、磁场接收器的电路组成	23
二、磁场接收器的信号及噪声	23
三、信噪比的理论计算	25

四、放大器的噪声因数	25
§ 2 空心线圈的最佳设计	25
一、圆柱线圈的性质	25
二、空心线圈	27
§ 3 给定质量磁心线圈的最佳设计	28
一、影响信号的主要因素	28
二、给定质量后磁场接收器的设计计算图表	33
三、线圈信噪比的最佳条件	34
四、结论	36
§ 4 给定长度后磁心线圈的最佳设计	37
一、最佳灵敏度设计	37
二、最佳信噪比设计	38
三、结论	39
§ 5 设计的类比定律	39
一、灵敏度计算类比定律	39
二、信噪比计算类比定律	39
§ 6 设计实例	40
一、低频磁场接收线圈的设计	40
二、高频磁场接收线圈的设计	41
第四章 磁心及结构噪声	42
§ 1 铁磁性物质的基本知识	42
一、复合导磁率	42
二、磁心损耗和磁肤效应	43
§ 2 直棒磁心的损耗及噪声	45
一、磁心的噪声系数	46
二、磁心的导磁率和信噪比	50
§ 3 中空磁心问题的讨论	53
一、中空磁心和实心磁心的比较	53
二、中空磁心和叠层磁心的比较	55
§ 4 屏蔽和附加损耗噪声	56
一、屏蔽噪声系数	56
二、屏蔽损耗对导磁率的影响	57
三、结构附加损耗	57
第五章 磁场接收线圈和前置放大器的配合	64
§ 1 放大器的背景噪声	64
一、概述	64
二、电压噪声分量 A	65
三、电流噪声分量 B	65
§ 2 线圈的选择	67
一、电阻 R_1 的选择	67
二、分布电容的计算	68

§ 3 负反馈放大器的噪声系数	71
一、电压串联负反馈	72
二、电压并联负反馈	72
§ 4 磁通反馈	73
一、原理简述	73
二、噪声系数的计算	74
三、反馈线圈的选择	75
四、实例	76
第六章 磁场接收器的校准	77
§ 1 感应电动势的测量	77
§ 2 视阻抗的测量	77
一、低阻抗的测量	77
二、高阻抗的测量	81
§ 3 磁场接收器噪声的测量	82
一、测量方法	82
二、实例	83
§ 4 信号磁场的形成	84
一、旋转磁铁的磁场	84
二、通电线圈的磁场	87
三、螺旋线圈磁场和均匀磁场的比较	89
§ 5 校准	91
一、磁场接收器输出的电信号的测量	91
二、相对校准和绝对校准	92
三、高频时的特殊问题	93
四、正弦场校准和随机场校准的比较	94
五、校准的设施及基地	94
附录 振荡电路特性	95
一、电压响应	95
二、磁场响应	96
三、振荡电路的阻抗	97
四、振荡电路的噪声	97
第七章 大地电磁测深系统中的数据采集放大器	99
§ 1 概论	99
一、直流放大器	99
二、测量放大器	99
三、脉冲放大器	100
四、运算放大器	100
五、数据放大器	100
§ 2 数据采集系统中放大器的技术指标要求	101
一、放大器的静态特性指标	101
二、放大器的动态特性指标	105

§ 3 数据采集系统中放大器的分类	107
一、数据采集系统中放大器的分类方法	108
二、数据采集系统中放大器的分类	109
§ 4 放大器的抗干扰特性	117
一、串模干扰及其抑制法	118
二、共模干扰及其抑制法	120
§ 5 放大器的低漂移特性	124
一、放大器的零点漂移	124
二、放大器的零漂抑制	126
第八章 采集放大器和其他外部电路器件的配合	130
§ 1 放大器和现场信号的关系	130
一、信号源形式	130
二、放大器和信号源的连接	131
三、屏蔽线的接法及误差分析	132
四、信号源内阻的影响	136
五、放大器和其他测量仪表的联用	137
六、信号传输线的敷设	138
§ 2 放大器和采样器的配合	139
一、采样开关开路的影响及过载恢复电路	139
二、采样信号间的相互影响(邻道的交叉串扰)	141
三、直流增益和数据脉冲增益	142
四、数据脉冲基线的积累现象	146
§ 3 放大器和模-数(A/D)转换器之间的配合	149
一、放大器和逐次比较式模-数(A/D)转换器的配合	149
二、放大器和其他模-数(A/D)转换器的配合	156
§ 4 放大器容性负载的影响	157
一、容性负载对放大器动态性能的影响	157
二、容性负载对模-数(A/D)转换器的影响	159
三、容性负载对V-T式模-数转换器的影响	159
§ 5 正确的接地、走线及电网干扰的抑制	160
一、正确的接地和走线	160
二、电网干扰的抑制	161
§ 6 采集系统中放大器的测试	161
一、增益及线性度和稳定度的测试	162
二、共模抑制比	163
三、输入电阻	164
四、输出电阻	165
五、最大输出电压(V_{OM})和电流(I_{OM})	166
六、温度漂移和时间漂移	166
七、噪声	166
八、动态特性	167
第九章 信号处理	168

§ 1 RC有源滤波器	168
一、低通滤波器	168
二、高通滤波器	173
三、带通滤波器	177
四、带阻滤波器	181
§ 2 电压比较器	183
一、单限电压比较器	184
二、双限电压比较器	190
§ 3 采样-保持电路	197
一、采样-保持电路的基本性质和要求	197
二、反相型采样-保持电路	199
三、同相型采样-保持电路	201
第十章 典型实例	205
§ 1 仪器基本原理	205
§ 2 电、磁场微变信号的接收	206
一、磁感应式磁场接收器的设计	206
二、磁场接收器接收线圈的有关技术参数	208
§ 3 信号的模拟处理	209
§ 4 数据的采集	211
参考文献	215

第一章 概 论

§ 1 大地电磁测深仪器发展概况

一、概 述

大地电磁测深方法 (Magneto-Telluric Method, 简称M. T法) 产生于50年代初期, 由法国地球物理研究中心前所长路易斯·卡尼尔 (Louis Cagniard) 教授和苏联的吉洪诺夫 (Tnxhob) 先生, 差不多同时提出。在60和70年代, 大地电磁测深方法得到进一步发展和完善。目前, 它与地震勘探方法一起, 已成为深部地球物理勘探的重要手段, 和地震方法相比, 它还能解决一些地震方法难以解决的问题。最近几年来, 更在油气田勘测, 火山地质和地热等方面得到广泛应用, 从而发现了一些以前难以确认的大地构造和矿床。在节省能源和实用性方面, 没有任何一种人工源方法可与它相比。在许多地震方法不能应用的地区, 大地电磁测深方法都行之有效。

近30年来, 随着大地电磁测深勘探技术、电子工业和计算机技术的飞速发展, 大地电磁测深仪器装备也在不断地发展、完善和提高。从仪器装备的组成和记录方式来看, 大致可分为三代: 第一代是模拟光点记录大地电磁测深仪; 第二代是模拟带式大地电磁测深仪; 第三代是数字大地电磁测深仪。这三代大地电磁测深仪经历的时期不同, 各有其特点。大地电磁测深方法发展时期, 正好是伴随着第一代大地电磁测深仪, 大多数是由电子管制成, 用于大地电磁测深方法的探讨。它是大地电磁测深仪的雏型和始祖, 其结果用于方法研究。第二代模拟带式记录大地电磁测深仪用于60和70年代, 是利用磁带或纸带记录。大多数利用晶体管或集成电路。它利用磁带记录的特性, 可多次回放并作某些数据处理, 但处理速度慢, 信噪比低。第三代数字大地电磁测深仪是在模拟记录的基础上发展起来的。在70年代末和80年代, 这种数字大地电磁测深仪广泛应用于野外的大地电磁测深勘探中。随着电子计算机技术的发展, 它逐步得到完善和提高。这第三代数字大地电磁测深仪的特点是动态范围大, 记录速度快而精确, 可现场进行回放并作各种数据滤波和计算解释, 处理速度大大提高。

近几年来, 欧美几家主要地球物理仪器制造公司, 为了改进大地电磁测深仪器装备的性能, 在大地电磁测深系统的产品结构、制造工艺、磁性材料和电子器件的选择等各方面进行了大量的探索与研究。新仪器不断涌现。

国内, 大地电磁测深工作开展得较晚。60年代开始研究, 65年试制了静磁原理光电负反馈大地电磁测深仪, 并在我国西北地区取得了第一批大地电磁测深数据。于1971年, 又试制了感应原理晶体极大大地电磁测深仪和LH-1型模拟记录大地电磁测深仪。1976年, 在

此基础上又研制了数字大地电磁测深仪。但是，尽管陆续研制了各这型号的大地电磁测深仪，但技术水平发展缓慢，由于种种原因，特别是由于磁场接收器尚未达到一定的水平，所以，一直到现在尚未能广泛用我国自己生产的数字大地电磁测深仪装备野外队，多数仍依赖进口。随着我国国民经济的发展，数字大地电磁测深仪的研制、生产水平正在不断发展和提高，一个全面数字化、小型化和现场处理的大地电磁测深仪时代已经到来。

二、国外大地电磁测深仪的研制情况

西方和苏联开展大地电磁测深的技术研究都比较早，因此，仪器的发展和应用也比较早。为了较清楚的了解有关情况，我们首先将国外的仪器设备研制情况作些简单讨论。

1. 电、磁场接收器

大地电磁测深用电、磁场接收器（俗称电极、磁探头）包括两部分：电场接收器和磁场接收器。

电场接收器有三类：金属电极、石墨电极和不极化电极。目前国内外常用的是不极化电极。它的种类有许多种，主要有：铅-氯化铅、镉-氯化镉和铜-硫酸铜不极化电极三种。国外经常使用的是镉-氯化镉和铅-氯化铅两种。不极化电极的封装形式有素烧瓷罐、塑料管状等多种形式。

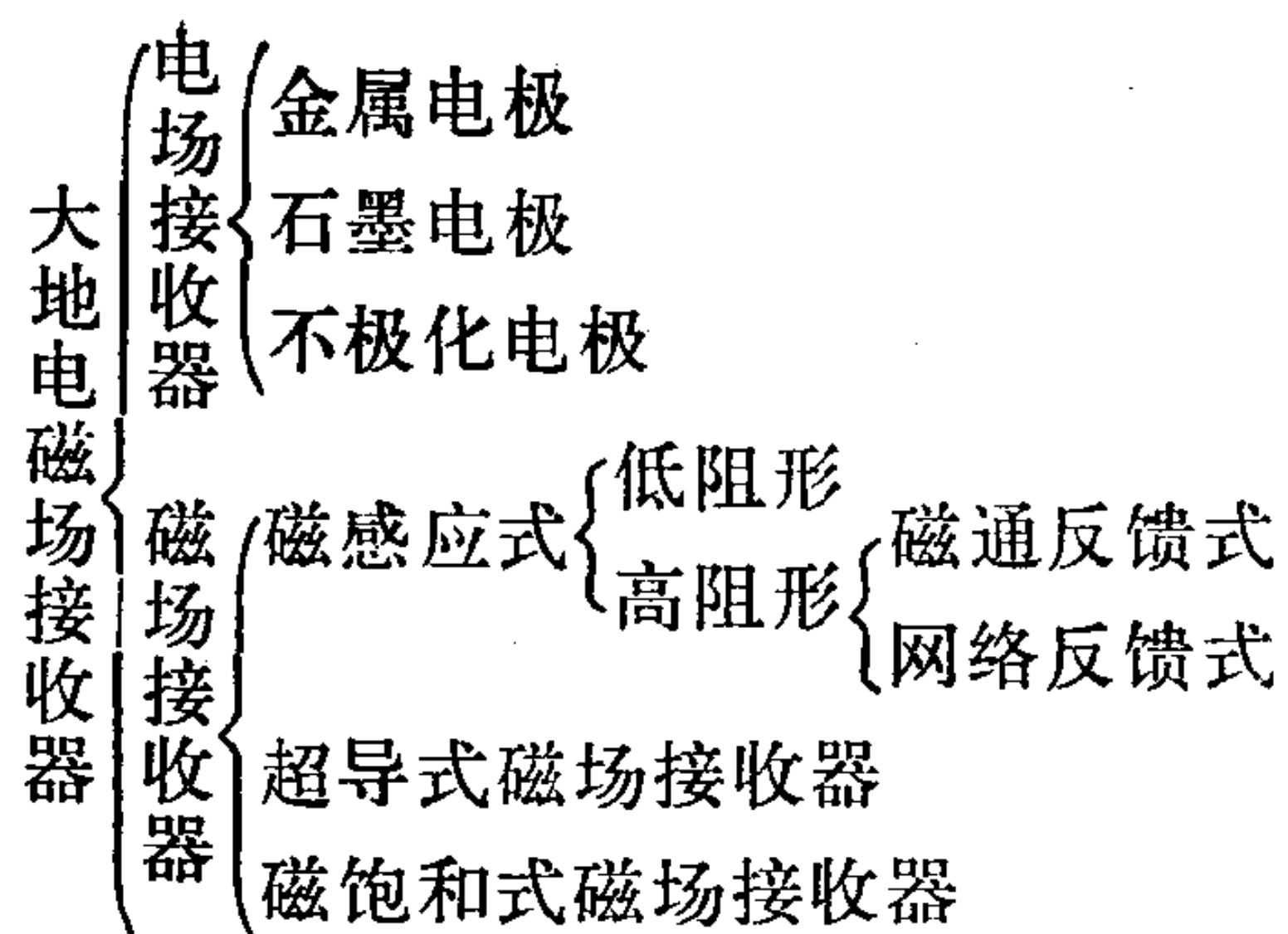
磁场接收器也有许多种，用于大地电磁测深勘测的主要有三种：感应式、超导式和磁饱和式三种。而主要的和应用最广泛的是感应式磁场接收器。在有些情况下，则是用超导式磁场接收器和感应式磁场接收器配合使用。超导磁场接收器的主要特点是在低频（约低于10Hz时）范围内，信噪比高于感应式，但其不利之点是要耗费氦气和携带不便。至于饱和式磁场接收器则更少使用，因为它只能响应到4Hz左右，而大地电磁测深勘测的电磁信号可高达几kHz。

目前，有两种类型的磁感应式磁场接收器：高阻型和低阻型。法国和苏联研制的磁场接收器都是高阻型，且苏联的磁场接收器线圈固有频率恰好在所测频带内，其阻尼是可调的，以便在其通带内，调节其频率响应曲线。法国磁场接收器的固有频率远在频带之外。高阻型磁场接收器的特点是接收线圈的电感量和电阻都很大，一般分别为几十万亨利和几百千欧姆。因而，线圈本身灵敏度高。信噪比高。但是，它要求前置放大器具有高输入阻抗和低噪声。相反地，在美洲（加拿大和美国等）和西德，测流行低阻型磁场接收器。其电感量仅为几十亨利。相应地，其灵敏度和信噪比都比较低。故要求其前置放大器要具有高的增益和小的漂移。但其优点是因为输入阻抗低，所以，放大器噪声小和受外界干扰影响小。一般其前置放大都为斩波低噪声放大器。

上述两种类型磁场接收器都要求一定的前置放大相配合，以便对信号进行处理加工（放大、滤波等），但是，实际上都丝毫没改变其信噪比，这是一个普遍存在的问题，本书后续章节中将加以详细讨论。

由前置放大器的线路来看，磁场接收器又可分为磁通反馈式和网络反馈式。磁通反馈的优点是可使通带内的灵敏度为一常数 and 性能十分稳定可靠。

综上所述，磁场接收器可概括分类如下：



除此而外，从磁场接收器的机械结构来看，磁场接收器又可分为三分量组合一体式和三分量分立式两种。

三、几个典型的磁场接收器简介

1. 法国感应式磁场接收器CM-11

它是一种三分量分立磁通负反馈高阻型磁场接收器，接收线圈和前置放大器直接耦合，坡莫合金片状磁心，整个探头装在一个密封的塑料筒中。

技术数据：

磁心长度：110.5cm；

探头直径：9.9cm；

灵敏度：50mV/nT（包括前放）；

频率范围：5mHz—50Hz；

噪声密度：约 $0.16\text{m}\mu\text{T}/\sqrt{\text{Hz}}$ ，（在1Hz时）；

线圈电感：30万亨利；

这种磁场接收器体积小，重量轻，仅为13.3kg，便于搬运，且灵敏度较高，噪声小，具有很高的分辨率，响应频率也较高，是一种较为合适的磁场接收器。

2. 西德感应磁场接收器KIM-803

它是一种三分量合一、低阻型磁场接收器。每个分量的接收器都由两个主线圈和一个测试线圈组成。磁心是由坡莫合金细丝组成，这些细丝被箍入灌有硅橡胶的细铜管中，从而使之具有良好的机械稳定度。

技术数据：

磁心长度：60cm；

磁心直径：10mm；

线圈外径：34mm；

线圈灵敏度： $20\mu\text{V}/\text{nT}\cdot\text{Hz}$ ；

线圈电感：350H；

线圈电阻：1.2k Ω ；

固有频率：1800Hz；

频率范围：约响应到350Hz；

噪声密度：约 $0.5\text{m}\mu\text{T}/\sqrt{\text{Hz}}$ （在1Hz时）。

这种磁场接收器，体积小，重量轻，三分量合一，搬运方便。但是，灵敏度和信噪比

低些，仅适用于一般条件较好时的大地电磁测深测量。

3. 美国感应磁场接收器MTC-4SS (或6SS)

这是一种低阻感应三分量分立式磁场接收器。磁心为层状坡莫合金。

技术数据:

磁心长度: 185cm;

壳外径: 7.5cm;

线圈灵敏度: $137 \pm 3 \mu\text{V}/\text{nT} \cdot \text{Hz}$;

线圈电感: 605H;

线圈电阻: 438Ω ;

频率范围: 约到300Hz;

噪声密度: 约 $1.5 \text{mT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。

这种磁场接收器灵敏度较高, 适用频率范围也较广, 但它的重量太重, 达30kg 以上, 因此, 搬运不方便。

4. 加拿大磁感应磁场接收器MTC-60

这种 MTC-60 磁场接收器是与凤凰地球物理有限公司的16道强量大地电磁测深系统配合使用的。它的磁心也是高导磁率的坡莫合金制成的。

技术数据:

磁心长度: 152cm;

壳外径: 11.4cm;

线圈电感: 1300H;

线圈电阻: 1900Ω ;

灵敏度: $100 \text{mV}/\text{nT}$

频率范围: 0.55mHz—384Hz

噪声密度: 约 10mT

此种磁场接收器适应频率范围较宽, 灵敏度也较高, 可适用于多种类型的大地电磁测深测量。但是, 它有一个转折频率 (F_c)

$$F_c = \frac{R_L}{2\pi L}$$

对于高于转折频率 F_c 的信号而言, 磁场接收器的综合增益保持常数; 而对于低于转折频率 F_c 的信号来说, 线圈和前置放大器具有电压放大性能, 电压增益是常数, 因而, 对于磁场变化来说, 它的增益与频率成正比。

5. 美国超导磁场接收器GMP-45

这是美国SHE公司生产的一种三分量磁场接收器。其轴向正交性优于 1rad 可同时测得三磁场分量。

技术数据:

场量子数磁场 (H_0):

x 轴	y 轴	z 轴
1.357nT	1.356nT	1.185nT

场灵敏度:

x 轴	y 轴	z 轴
97.7mV/nT	95.1mV/nT	95.0mV/nT

噪声密度:

x 轴	y 轴	z 轴
0.026mnT/ $\sqrt{\text{Hz}}$	0.028mnT/ $\sqrt{\text{Hz}}$	0.03mnT/ $\sqrt{\text{Hz}}$

频率范围: 可响应到200Hz。

这种磁场接收器的特点是灵敏度高、噪声小,但是,它很容易接收射频干扰,所以,一般加有分流电阻。

除上述几种磁场接收器之外,还有许多种磁场接收器不一一叙述。上述各种仅是在大地电磁测深勘测技术中经常使用的几种。

四、大地电磁测深仪的发展状况

目前,大地电磁测深仪进一步发展的趋向可大致归纳为如下几个方面:

1. 适时数据处理

在野外工作现场,随着数据的收录进行适时处理和回放,画出一些主要结果解释曲线,从而可随时监视其工作质量。

2. 采用相关处理方法

相关处理主要采用了两种方法,一种是各道之间的相关处理,另一种是采用远参考道进行相关处理。这样可大大降低噪声,提高信噪比。

3. 扩展动态范围和可测频率范围

尽量采用较多位的模/数转换器和放大增益自动控制。例如,加拿大凤凰公司的16道张量大地电磁测深系统中,就是采用了十六位A/D转换器;法国LAGAS的MT系统可测量直流到1000Hz的信号。

4. 高度自动化

大地电磁测深系统中,多采用通用小型微机作为野外控制部件,室内尽量采用世界范围通用的HP服务网。程序设计中,尽量使之易懂,简便,便于仪器自动化和操作人员掌握使用。

5. 一机多用,增强设备的适应性

同一套设备,可用来作电磁法测量,也可用作测深勘测;既可用做人工源法,又可用作自然场源的接收机;既可配用感应式探头,又可配作超导式磁场接收器等等。例如,加拿大的CSAMT系统和法国的TELMAG3系统都属这种类型的设备。

6. 包装趋于便携化

系统的功能越来越复杂和完善,但在包装方面则越来越便携化。为此尽量采用CMOS微处理机,在结构设计方面,多采用集装箱式结构。

采用上述新技术。现报导的计有法国LAGAS的8道MT系统和CGG的M3T系统、美国Geotronix公司的MT系统、西德的KIM大地电磁测深系统和加拿大的凤凰公司16道张量大地电磁测深系统。

以法国LAGAS实验室的8道MT系统为例,可看出当前的一般发展趋向。它的特点是:(1)有很宽的频率测量范围:DC—1000Hz。(2)信噪比高,噪声密度仅为80mV/

$\sqrt{\text{Hz}}$ ，且采用了三个磁分量的双迹记录方式，通过相关处理，可进一步提高信噪比。

(3) 对五个大地电磁测深分量进行实时强量处理，可在二维或三维解释方法中进行结果解释，适时的现场回放可及时纠正测量误差。(4) 微机自动控制，操作简便。(5) 集装箱式包装，运输方便。

这种8道MT系统，有8个模拟输入道，采用差分对称输入，且有一个“有源屏蔽输出端”，从而可降低噪声和各种干扰的影响。Intel8085是本系统的中心控制器件。数据记录设备可有三种：一般磁带机、超小型盒式数字磁带机(Tektronix4924)和IBM通用机。最适合野外应用的是超小型盒式数字磁带机，它的体积小、重量轻，容量大。和一般盒式磁带机相比，它的容量要大得多，而使用手续又比磁盘简便得多。其超小型盒式数字记录磁带还可和大型计算中心连接，以便进行更详细和精确的处理解释工作。

另外，这种MT系统还可和超导磁场接收器连用。GMS45(美国的SHE公司产品)是其配套超导磁场接收器，其灵敏度为 10^{-4}nT 。在直流至100Hz的范围内，其灵敏度为感应式磁场接收器的100倍。它的动态范围是134dB。其氦容器可连续使用三个星期。目前，这种系统已研制完毕投入国际市场。

§2 场源与信号

一、大地电磁场微变的源和谱的特征

地球磁场的变化部分以及它所感应的电流称为大地电磁场的变异，通常也称为大地电磁场。这种在地球表面观测到的电磁现象主要起因于地球外部，并具有宽广的电磁谱，具有很宽的频率范围和动态范围，且在某些周期附近显示出尖峰形状的极大值，看来这与影响地球磁场的某种作用过程有关。但是就大地电磁场变化的频率范围而言，更长期的变化可以从古地磁研究中得到证实。除了地球外部的原因之外，通常认为这种变化与地核内等离子体的对流和湍流有关。更短周期的变化包括无线电频率、红外线、可见光、紫外线、X射线以及 γ 射线，这些变化与太阳的电磁辐射和宇宙射线等因素有关。

就其场源来说，当周期小于1S时，大地电磁场主要是由雷电活动引起的。有的地方，电力传输系统的感应场可能是主要的噪声源，但是这样的电磁噪声仅限于50Hz的频率上。

周期大于1S的大地电磁场具有各种不同的形态变化特征。这些变化覆盖了1周/秒至¹周/11年的整个频率范围，它们与太阳的活动密切相关。太阳黑子活动有11年的周期，大地电磁场亦有相同的周期；大地电磁场的周年变化与地球公转周期一致，季节变化的极大值出现在春节和秋分；太阳自转有27天的平均周期，大地电磁场的变化也与之相应；大地电磁场还有太阳日和太阴日的变化。

电磁脉冲、电磁湾、电磁暴等短期变化是进行大地电磁测深的主要微变类型，它们与太阳的活动也有密切关系。

随着空间探测技术和等离子体物理的迅速发展，目前已对太阳活动与地球磁场的作用过程有了进一步的认识和了解。研究表明，这些微变主要来源于太阳微粒流和电磁辐射与地球磁层、电离层的相互作用。太阳活动过程中，日冕等离子体的不断膨胀形成了“太阳

风”并且“冻结”着太阳磁场。太阳风等离子体具有很强的导电性，当它随太阳磁力线传播而与地球磁场相遇时，迫使地磁场的效应局限在一个空穴——磁层之内。太阳风等离子体可进入磁层之中，一些电离层的等离子体也可以扩散并流向磁层，因此，磁层内充满了等离子体。这些等离子体与地磁场相互作用而产生的流磁波受制于流磁波的波动方程，并形成磁层中的电流体系。磁层中的电流体系包括磁层边界电流、中性层电流、环电流和极区电射流。

此外，流磁波在电离层E层（90—140km高度）中产生很大的水平电流薄层，引起大气中的电磁辐射。图1.1给出了流磁波如何沿磁力线分布及电离层的示意图。而且，电离层本身在太阳光波辐射强度的变化和潮汐效应的作用下也将产生电流。磁层中的电流和电离层中的电流共同组成了高空电流体系，它们是影响地磁场变化的重要因素。这些高空的电、磁过程形成了各种复杂的电磁辐射，它们经磁层和电离层传播到地球表面，引起我们通常在大地电磁测深工作中所观测到的电磁脉动、电磁湾和电磁暴等大地电磁场微变。

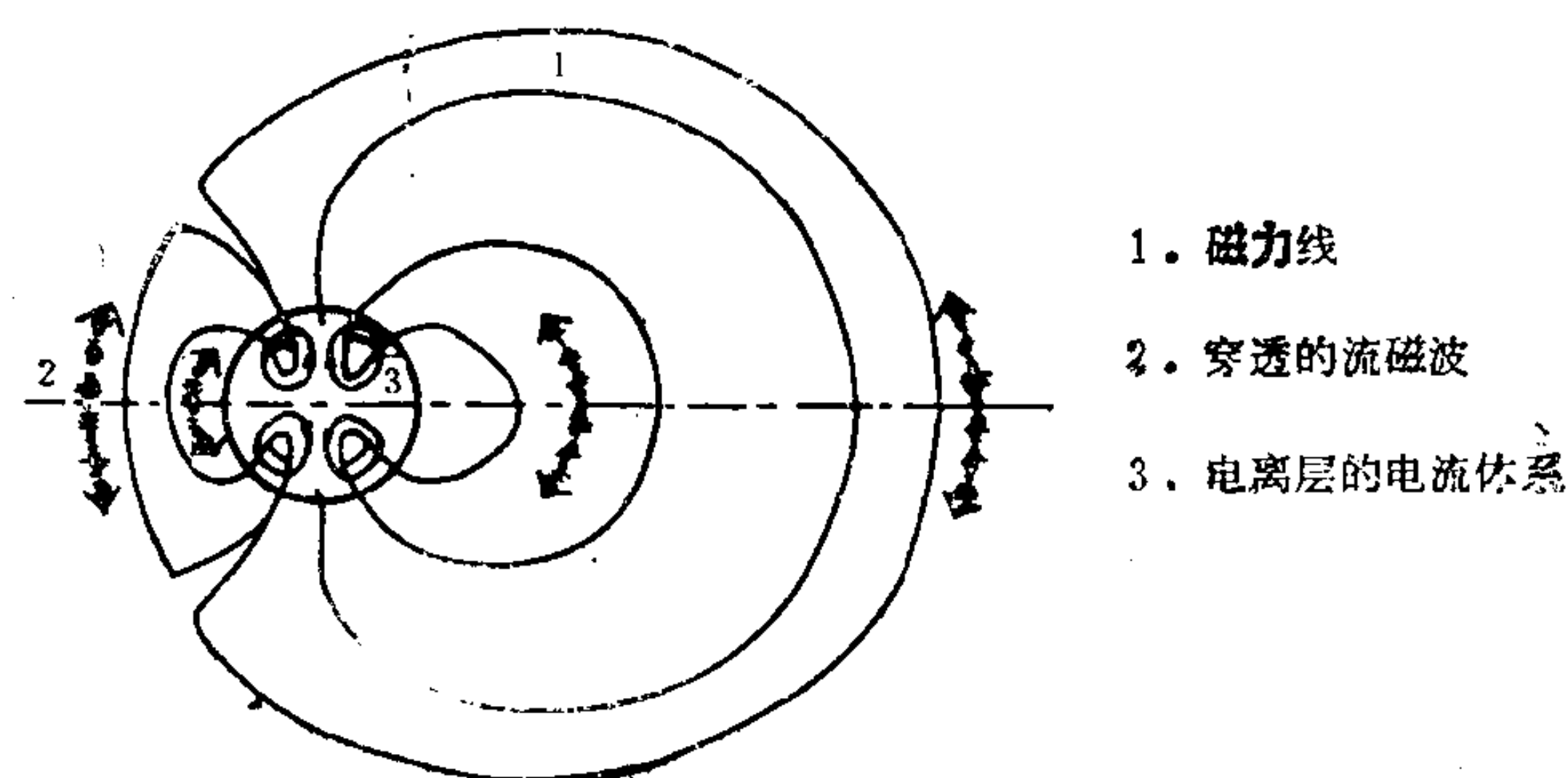


图 1.1 流磁波沿磁力线的穿透

尽管大地电磁场展布的频率范围极宽，但是，就目前大地电磁测深所使用的频率范围而言，还主要限于周期小于1天而大于1ms的大地电磁场。周期大于1天的大地电磁场因其记录时间过长往往不加选用，周期小于1ms的大地电磁场因其不能穿入地下很深，通常也在所研究的频率范围之外。在这样的频带内，大地电磁场，在周期为1s左右时，振幅最小；而在更短和更长的周期，其振幅都增大。

二、信号特征

1. 信号的定义

所测客观自然现象，称之为信号。在大地电磁测深勘测中，所测信号就是大地电磁场微变。其频率范围可为1mHz—10kHz。

在这个大地电磁微变信号的频段内，即1mHz—30kHz，Bleil曾给出了它的变化频谱，给出了信号随频率的变化速率，如图1.2所示。这个信号的频率范围有7个数量级的宽度，可以覆盖下列几个频段：

- (1) 磁脉动：mHz—5Hz。
- (2) 超低频：5—1000Hz左右
- (3) 甚低频：1K—30kHz。

这三个频段是以频谱密度 (δ_H) 的变化特征而划分的。实际上，磁场的波动是一个随

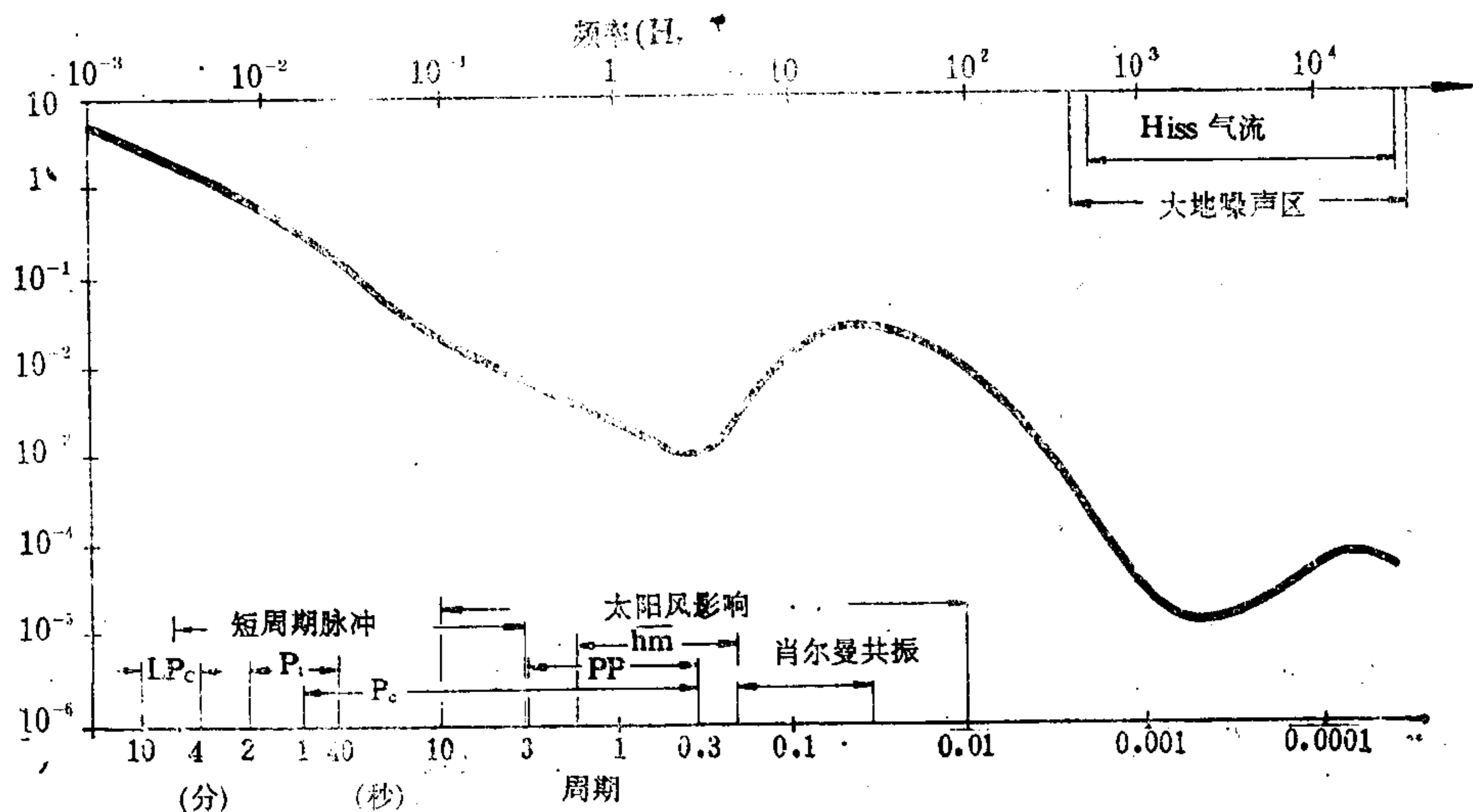


图 1.2 地磁信号频谱

机变化量，所测信号的有效值和频带的平分根成正比，而能量则是和频带宽度成比例。

2. 地磁脉动

很长时间以来，人们就对周期超过几秒的微动磁脉冲进行了研究，并且按照其特征进行了分类：

- (1) “LPc”脉动：长时间的且相对连续的地磁脉动。
- (2) “PC”脉动：形状规则的地磁脉动。趋于白天出现。
- (3) “pi”脉动：形状不规则的且是夜间发生的脉动，常常有一些快速变化叠加其上。

有些脉冲是与太阳黑子的出现、极光、夜辉、宇宙射线和电离层干扰等因素有关，确切地说，它们是带电粒子和地磁场相互作用的结果。

3. 超低频 (ELF) 频段

这个频段信号的主要来源是大气风暴，特别是来自亚热带和赤道地带的大气风暴。这个能量可能会激起大气电离层共振腔的共振。

一些闪电会激起一系列的减幅波，从统计学观点来说，这些电磁波在频率和幅度方面都是足够稳定的。1960年 Balser 和 Wagner 曾测得了这些共振形式的频率是：8、14、20 和 26 Hz。在其设备选择性不十分高时，勘测者们将愿意利用这些频率的信号。

但是，在这些频率上，信号现象的幅度值将随季节和周日而波动，其原因是策源地随测点而变化，也随电离层的高度而变化。在地球上的低纬度区，电离层空腔的滤波效果并不灵敏，但是，由于策源地就在低纬度区，所以伴随着存在激烈放电现象，从而带来一些干扰；在中纬度区，可以利用这种信号源，其共振现象影响并不十分严重。

4. 甚低频 (VLF) 频段：

除大气风暴和地磁共轭变化点的影响之外，这种大地电磁微变的场源还存在于大气外层空间：连续气流、“hiss”气流、磁性层等离子区中电磁波和离子束间的离散发射等。

从其场源观点出发，和 ELF 频段的信号相比，VLF 段则更接近微动脉冲频段。

综合Dowder、Benderitter和Lokken所测得的结果，我们可以得到图1.3所示结果。由图中可知，在VLE频段，2—3kHz以上时，信号的幅度又有重新上升的趋势。

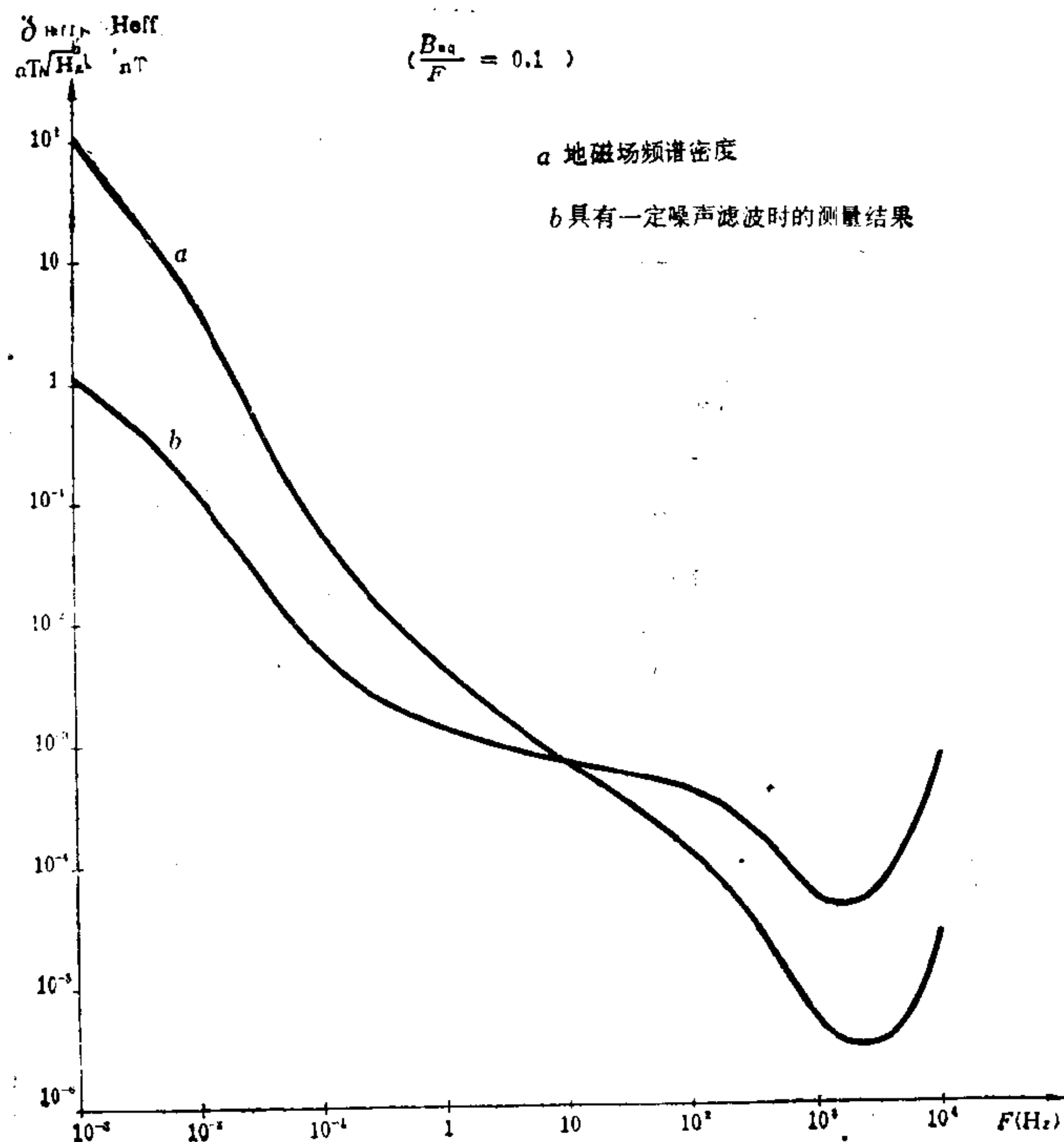


图 1.3 大地电磁信号的频谱密度

应当注意，在研究和比较各种地点和时间所测结果时，不要忘记当时的各种条件：当时太阳黑子活动和地磁活动的程度、当地地层深处地层的电磁特性和场源的分布等等。而地层深处地质结构的电磁特性对地表电磁场分量以及对频谱分布所带来的影响正是大地电磁测深方法的基本理论依据。由图中结果可以看出：在所给定的频率范围内，大地电磁测深磁场接收器所应具有的最高灵敏度。灵敏度界线还要保证有一定的保险系数，从而规定出磁场接收器的灵敏度数值。在保持磁场接收器体积尽量小的情况下，必须使其噪声不得超过一定界限值。也就是说，在设计磁场接收器各种参数时，必须保证其信噪比处于最佳状态。

§ 3 对大地电磁测深仪器的基本技术要求

一、磁场接收器类型的选择

由场源和信号特征的讨论，对所测物理参量已经有了一定的了解，由此可根据下述条件来选择合适的磁场接收器。

1. 大地电磁勘探中所测量是场的一些分量而不是总场，这就是说要利用定向磁场接收器；
2. 在沉积盆地至花岗岩基底的石油勘探中，所利用的频段为1mHz—100Hz；

3. 在矿床勘探中，是处于地表进行勘测，所利用的频率范围为10—1000Hz左右；

4. 在实际的勘探中，人们希望都只用一个磁场接收器来覆盖尽量多的频段。

总括上述条件，致使人们经常使用一种具有磁心的磁感应式传感器作为大地电磁测深磁场接收器。粗看起来，有些令人惊奇，因为这些信号有的达几百秒或上千秒的周期，似乎不可能利用磁感应式磁场接收器。但是，由大地电磁信号的频谱密度测量可知，低频信号的幅度是逐渐升高的，这正好抵消了感生电动势随周期增大的减小。另外，磁感式磁场接收器对高频段的大地电磁微变信号则特别敏感（根据磁感应定律，感应电动势是和频率成正比例的），这是其他类型的磁场接收器所不能比拟的。

在磁场传感线圈之后，直接连接有一个低噪声电子放大器作为前置放大器，以便提高磁场接收器的灵敏度。在具有前置放大器的磁场接收器中，磁通负反馈的应用可进一步改善其性能，从而使其灵敏度在有用频段内不仅和频率无关，而且和一些其他复杂参数，例如，磁心初始导磁率、阻压、固有频率等，都无关系。且提高了磁场接收器的温度和机械应力变化及振动等的稳定性。

二、大地电磁测深仪整机性能的基本要求

从目前飞速发展的科学技术水平来看，想要对大地电磁测深仪的技术要求提出全面的系统的指标是有困难的。我们仅就大多数或一般地质条件下都使用的大地电磁测深仪器的基本技术要求作些简单的讨论。

1. 对电、磁传感器的要求

一般情况，在陆地上是利用不极化电极作为电场传感器，而在海洋中是用石墨电极作为电场传感器，对电场传感器的基本要求是噪声要低，稳定性要好。对于磁场传感器来说，种类较多，有磁感应式，超导式和磁饱和式等，但对磁场传感器的基本要求都是要求其信噪比要高、稳定性（特别是热稳定性和机械稳定性）要好，且通带要和所测信号的频带相吻合。当然，对于电、磁场传感器来说，灵敏度、阻尼和体积的大小也是很重要的因素。

2. 记录长度

在大地电磁勘探中，勘探深度一般要求达1万米以上，所以，所使用的最低频率信号，一般为0.001Hz左右。为了很好的获得原始资料，不带来额外失真，一般要求记录中能包括十个周期信号，故对于最低频信号为0.001Hz的信号来说，其记录长度（每个记录块的时间）要达 $10 \times 1000s$ ，即最少为10000s以上。

3. 幅频特性

仪器的幅频特性决定于其勘测深度和目标。如果感兴趣的目标是浅层石油或金属矿床，就可用高频带进行勘测；如果感兴趣的是深部构造，就须用低频频段进行勘测。一般，大地电磁测深仪器是分档复盖DC在几kHz的频段。

4. 相位特性

目前使用的大地电磁测深仪器都带有滤波器，作为理想情况，可以规定一个相位频率响应，去保证通过滤波器后的全部信号受到同样的延迟。实际上，理想情况是不存在的，在低频段，滤波器延迟影响很小，可以忽略不计，高频段，则要进行适当校正。随着数字处理技术的引进，可以对任何频率信号进行适当的计算处理校正，方法也是简便的。

5. 一致性

大地电磁测深勘测是利用三个磁道和两个电道(H_x 、 H_y 、 H_z 、 E_x 和 E_y)进行张量阻抗计算来进行解释的,因此,各道一切有意义的指标的一致性是十分重要的。所谓有意义的技术指标就是放大程度、精度、灵敏度、相位和振幅特性的一致性。

各道间的差别,任何系统都不可避免,但要有一个限度。目前,一般要求是达 $\pm 0.2\%$ 以下。表示道的一致性的更为直观的方法是脉冲响应特性测定法,即对仪器各道输入同样脉冲,观察系统输出端的最终脉冲响应。一般要求脉冲响应的高振幅部分的时间差小于 $\pm 10\%$ 个周期,脉冲响应的指定波峰或波谷之幅度差小于 $\pm 2\%$ 或更低些。

6. 前置放大器

预计有效大地电磁微变信号有100dB的动态范围,由外界地质噪声以上80dB到外界地质噪声以下20dB。前置放大器必须能满足这一范围的要求。即前置放大器的输入噪声电平比外界地质噪声电平低20dB,最低限度不能大于外界噪声水平。当然,其输入阻抗和频率响应要和电、磁场接收器相配合。

7. A/D转换器

和所测信号的动态范围相一致,A/D转换器,A/D转换器动态范围要达80dB左右,且为多道双极性A/D转换器。其转换时间应能满足最高频率信号的采样要求。

8. 谐波畸变

在尽力确立理想的仪器技术要求时,要求仪器系统既不损失任何信息(由前述指标要求保证来实现),也不增加任何信息。后者就是指在大地电磁信号之外不希望有的成分。它们可能由仪器系统中的噪声(下一部分讨论)和非线性造成。

大地电磁测深仪器各部分都维持线性。但是,最好的线性系统,在输入信号超过一定范围时,也会变成非线性系统。因此,对非线性要求,受到所能处理的最大振幅限制。在动态范围内,输入的最大信号通过系统产生的谐波畸变应小于 $\pm 0.05\%$ 。

谐波畸变系指对仪器输入一单频正弦波(如5Hz),而在输出端产生的为输入频率整数倍的新的频率,如10Hz、20Hz等信号,这称之为谐波畸变。

计算公式之一为:

$$F_D = \sqrt{\frac{\sum (x_i - s_i)^2}{\sum s_i^2}}$$

其中: s_i 为输入单频正弦波理论上的第*i*个采样点的幅值; x_i 为在记录上读取的第*i*个采样点的幅值。

9. 系统的噪声

仪器系统的噪声来源于多方面,如热噪声、散粒噪声、磁性涨落噪声,与 $1/F$ 成反比的噪声(由半导体表面污染、缺陷及漏电效应引起),调制噪声和数字化噪声等。但其中主要是热噪声,对这种噪声在仪器中关心的是在通频带内有限的选择部件的噪声。例如,当通带是DC—100Hz,噪声电阻为 $2000\Omega \cdot m$ 时,热噪声的有效振幅约为 $0.056\mu V$ 。这就要求仪器输入端具有最小噪声 $0.06\mu V$ 以下。

热噪声计算公式

有效热噪声电压 $e_R = \sqrt{4KT\Delta FR}$ 其中: k 为波兹曼常数, $k = 1.38 \times 10^{-23} J/^\circ K$; T 为绝对温度; ΔF 为频带宽度; R 为热噪声源电阻。