

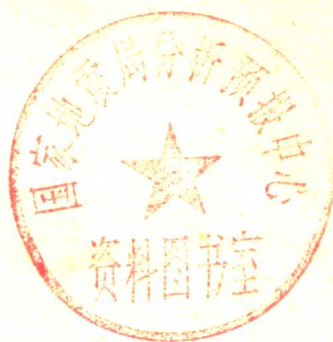
56.294

01633

003189

# 大地电磁勘探原理

G·波斯坦道弗 著 徐世浙 冯洛玕 译



01633  
56.294

地质出版社

# 大地电磁勘探原理

G. 波斯坦道弗 著

徐世浙 冯洛玕 译

地质出版社

## 内 容 提 要

本书全面论述了大地电磁探测的基本原理、资料的处理以及解释推断方法等。

全书分八章。简明地叙述大地电磁法的特点、天然交变电磁场的场源、各种地下电性模式的大地电磁法理论、野外记录的人工处理和数字处理方法、记录仪器以及野外工作方法等。最后还介绍了典型的地质实例。

本书内容全面，叙述扼要，图表丰富，可作为地质和地球物理工作者学习大地电磁法的入门指导书。

# Principles of Magneto-Telluric Prospecting

by

GOTTFRIED PORSTENDORFER

1 9 7 5

GEBRÜDER BORNTRAEGER · BERLIN-WEST · STUTTGART

## 大地电磁勘探原理

G. 波斯坦道弗 著

徐世浙 冯洛玕 译

地质部书刊编辑室编辑

地质出版社出版

(北京西四)

地质印刷厂印刷

(北京安德路47号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

开本787×1092<sup>1/16</sup>·印张5<sup>6/8</sup>·字数140,000

1980年5月北京第一版·1980年5月北京第一次印刷

印数1-2,975册·定价1.20元

统一书号：15038·新515

## 译者的话

大地电磁探测是以天然交变电磁场为场源，研究地下电性结构的地球物理勘探法。它成本低廉，操作轻便，尤其是它不受高阻层屏蔽，勘探深度较大。大地电磁法自五十年代问世以来，在国外的地球物理勘探中已获得广泛应用；近几年来，由于仪器的改进和电子计算机的应用，发展格外迅速。

大地电磁测深用于探测地壳和上地幔，勘探深度可达100—200公里；它用于地震预报，可监视地壳深部电阻率的变化；它在火成岩、砾岩覆盖区的石油勘探中，可弥补地震勘探的不足；它在沉积盆地的勘探中，用于研究结晶基底的起伏；亦曾有人将高频大地电磁法试用于地下水和金属矿的勘探。

本书作者是一位对大地电磁工作富有经验的东德学者。书的前半部分系统介绍了大地电磁法的基本理论，却又避免复杂的数学运算，同时介绍了模型实验和模拟网络求解法的梗概。后半部分扼要地介绍了对野外记录进行人工处理和数字处理的方法、记录仪器和野外工作方法。最后给出若干典型的地质实例。可以认为，本书是较好的大地电磁法的入门书籍。

七十年代初期，我国业已开展大地电磁探测工作，但至今还没有一本系统介绍大地电磁法原理和应用的专著。我们希望本书中译本的出版，能对发展我国大地电磁探测工作起一定作用。

由于我们水平有限，译文中难免有不少缺点和错误，诚恳地希望读者批评指正。

译者 1979年7月

## 编辑前言

大体上说，从1953年L.Cagniard在“Geophysics”发表他的评论文章以后，说英语的国家的地球物理学者便认真地转而研究大地电磁法。自那时以来，无论从理论上或者实践上，大地电磁法都已成为一门高度发展的技术；而且为了确定地下深达数十公里的电导率结构，曾作过大量的大地电磁探测。

我们知道，电磁测深资料不是绝对准确的，而且不同的地学工作者在对资料的解释上又颇多歧离。尽管如此，好长时间以来使人感到有必要编写一本能系统地总结大地电磁学科现状的英文专著。

苏联和东欧国家至今已进行了最广泛而系统的大地电磁工作。在先进的数据自动记录和处理系统问世之前，它们的探测工作主要是用笔尖、墨水和照相记录进行的，因而东欧的地球物理学者对大地电磁资料（信号和噪音）的性质便有丰富的感性认识，并有人工处理资料的技巧；然而在西方，我们则感到这类有价值的经验稍有欠缺。

这本专著能由富有大地电磁工作经验的德意志民主共和国弗赖贝格 G.波斯坦道弗教授担任编写工作，我们感到特别的高兴。

法国 巴黎 G.Kunetz      瑞典 布利登 D.S.Parasnis

## 作者前言

在天然大地电磁变化场应用于东德地球物理勘探的过程中,我曾写过三部专著(1954, 1961和1965)。头两部专著乃依据法国学者的开拓性工作,介绍了“大地电流法”的基本问题和应用的可能性。第三部专著论述了大地电磁法的基本问题,特别就它应用于水平层状介质问题进行了讨论。

由于在地壳和地幔的探测中,大地电磁法的野外操作和数据处理等技术有了迅速的发展,以及国际上大地电磁探测文献的大量增加,这些就促使我产生了下述愿望:对“大地电流”、“大地电磁测深”、“地磁测深”等经典方法的理论和实际成果加以总结。

特别要指出的是,作者在本书中引用了苏联学者的许多经验。由于横向不均匀性使大地电磁场在很大距离范围内发生畸变,从而本书涉及的主要课题,在于介绍横向不均匀性或各向异性构造模型的计算或测量结果以及探测方法等。本书还介绍应用计算机的可能性,同时还叙述较早期的数据人工处理方法。另外,对测量仪器、野外工作方法及地质实例等只作简略的描述。

与作者在弗赖贝格矿业学院的讲稿相比,本书在论述的方式上有了改进。有时出于概括,有必要使书中回避复杂的数学演算,而且对许多单篇的论文不作叙述。另一方面,书中以大量图表来说明实例,同时列出国际文献目录以作参考。

作者向G.Kunetz博士和D.S.Parasnis博士表示感谢。他们在本书底稿的编写过程中提供了不少补充内容及宝贵意见。作者也要向弗赖贝格矿业学院地学部的全体同事们表示感谢,由于他们技术上的帮助使底稿得以完成。

德意志民主共和国 弗赖贝格 G.波斯坦道弗  
1971.12.

# 目 录

编辑前言

作者前言

第一章 引论 .....	1
§ 1.1 电磁探测法在深部勘探中的作用 .....	1
§ 1.2 发展简史 .....	4
第二章 地球的天然电磁场 .....	5
§ 2.1 天然电磁变化场的场源 .....	5
§ 2.2 天然电磁场的特性和频谱 .....	7
第三章 基本的理论问题 .....	11
§ 3.1 平面简谐电磁波在任意形状地质介质的边界平面上的入射 .....	11
§ 3.2 大地电磁场各分量同地质介质的构造和电阻率的定量关系 .....	14
3.2.1 均匀的和水平层状的半空间 大地电磁测深和大地电磁剖面 .....	16
3.2.1.1 典型的地电参数的估算 .....	24
3.2.1.2 均匀各向异性半空间 水平层状各向异性半空间 .....	26
3.2.1.3 任意的二维非均匀半空间 .....	28
3.2.1.3.1 借助解析公式的解 .....	28
3.2.1.3.2 将地下介质分为不连续格点的求解法 .....	30
3.2.1.3.3 借助电解槽中的模型实验求解 .....	32
3.2.2 计算的(或测量的)非均匀(或各向异性)模式一览表 .....	33
3.2.2.1 二维垂直接触带上的场的畸变 .....	33
3.2.2.2 二维良导盆地上的场的畸变 .....	33
3.2.2.3 二维台阶上的场的畸变 .....	33
3.2.2.4 二维背斜上的场的畸变 .....	39
3.2.2.5 倾斜的二维构造上的场的畸变 .....	40
3.2.3 横向不均匀或各向异性介质上的大地电磁测深曲线 .....	40
3.2.3.1 二维垂向不均匀性附近的大地电磁测深曲线 .....	41
3.2.3.2 二维倾斜构造上的大地电磁测深曲线 .....	41
3.2.3.3 三维构造上的大地电磁测深曲线 .....	42
3.2.3.4 各向异性层状介质上的大地电磁测深曲线 .....	42
3.2.3.5 在非均匀各向异性介质上大地电磁探测的结论 .....	42
第四章 野外记录的处理 .....	46
§ 4.1 用复极化矢量确定场分量间的张量关系式中的诸元 .....	46
§ 4.2 张量元的环形图的确定 .....	51
§ 4.3 磁场椭圆和电场椭圆 .....	52
4.3.1 “相对椭圆”解释法 .....	55
4.3.2 “绝对椭圆”解释法 .....	55

<b>第五章 野外记录的数字处理</b> .....	57
§ 5.1 用时间域滤波器进行数字处理 .....	57
§ 5.2 用傅氏分析进行数字处理 .....	61
§ 5.3 用统计频率分析进行数字处理 .....	62
§ 5.4 场分量张量关系式的诸元的数字处理 .....	64
§ 5.5 用计算机解释大地电磁测深曲线 .....	65
<b>第六章 仪器和野外记录方法</b> .....	67
§ 6.1 感应线圈 .....	67
§ 6.2 光电反馈的微磁变仪 .....	68
§ 6.3 电子旋进磁力仪 .....	68
§ 6.4 测量电场的电极排列 .....	69
§ 6.5 记录仪 .....	69
<b>第七章 地质实例</b> .....	71
§ 7.1 大地电流法 .....	71
§ 7.2 大地电磁法 .....	73
§ 7.3 地磁测深 .....	76
§ 7.4 声频磁测 (AFMAG) .....	77
<b>第八章 关于大地电磁探测精度和解释精度的结论性说明</b> .....	79
<b>参考文献</b> .....	80



# 第一章 引 论

## §1.1 电磁探测法在深部勘探中的作用

地壳和上地幔中曾发生过哪些过程，以致岩石和矿产具有如今的分布状况，这是近代地学所关注的问题。为此，就有必要发展地球物理勘探方法，以便获得深达上地幔的地球物质组成及构造等方面的资料。

能够穿透至深部的低频电磁波，受到电阻率横向和垂向不均匀性的影响；随着二次场的形成，使电磁波发生畸变。这类二次场就成为了解大地构造的适宜的工具。

在各种岩石物性参数中，电阻率 $\rho$ （欧姆·米）特别重要。对于含水饱和的沉积岩有

$$\rho_0 = \frac{a}{\varphi^m} \cdot \rho_w \quad (1)$$

其中  $\rho_0$ —含水饱和的岩石电阻率；

$\rho_w$ —孔隙内的电解液电阻率；

$\varphi$ —岩石孔隙度；

$$1.3 < m < 2.3;$$

$$0.5 < a < 1.$$

因此，当已知液体的电阻率 $\rho_w$ ，并用电磁法测得 $\rho_0$ 后，就可获取对石油和天然气勘探颇显重要的参量，即孔隙度 $\varphi$ 的资料。

结晶岩的导电机制可用下述公式表示：

$$\rho = \frac{1}{\sum_{i=1}^3 \frac{1}{\rho_i} \cdot e^{-E_i/\kappa \cdot T_k}} \quad (2)$$

式中  $T_k$ —绝对温度（°K）；

$\kappa$ —玻尔兹曼常数（ $= 1.38 \times 10^{-23}$ 焦耳/度(K)）；

$E_i$ —激活能（焦耳）（1电子伏特 $= 1.6 \times 10^{-19}$ 焦耳）。

其中  $i = 1$ —杂质半导体导电，

$i = 2$ —本征电子导电，

$i = 3$ —离子导电。

由上式可知，如果用电磁法测出 $\rho$ ，由高温高压实验得知 $\rho_i$ 和 $E_i$ ，就能获得温度 $T$ 的资料，而温度 $T$ 是了解地壳和上地幔内各种过程的最重要的参量。

而后，高温高压的实验结果还表明，脱水和熔融过程可导致电导率的反常增长；所以说，电磁法尚能提供构造圈中发生变质作用、岩浆作用以及花岗岩化等过程的资料。

图1表示地表附近岩矿的电阻率值分布范围。

图2表明，地壳和上地幔内含10%铁橄榄石的橄榄岩（岩浆岩）的电阻率，其数值变

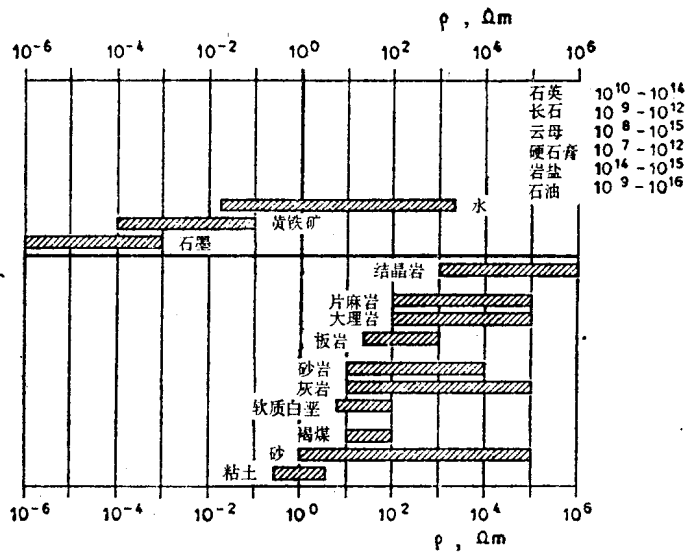


图1 近地表的壳中的典型岩矿的电阻率量级范围

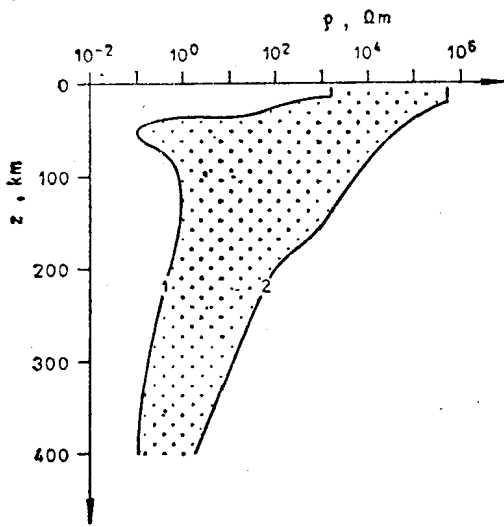


图2 含10%铁橄榄石的深部橄辉岩电阻率随深度的变化

曲线1代表地向斜、岛弧和含5%熔融物质的断裂带。曲线2代表前寒武纪地盾和古老地台。  
据Lyubimova, Feldmann (1970)

化很大。此图资料取自高温高压实验，也利用了前寒武纪地盾及断裂带两种极限情况的温度-深度关系曲线。

现在我们要问，究竟哪些电磁测深法能够用于研究电阻率随深度  $z$  变化的函数  $\rho(z)$  呢？

图3表示各种电测深法和电磁测深法探测高阻基底(例如结晶岩)上的厚沉积盆地的可能性。该例的地层特性为：电阻率1—2欧姆·米、厚2000米的良导表层，其下有厚1000米的绝缘盐层，再往下是厚6500米、电阻率中等大小的沉积岩；沉积盆地总厚度为10公里。用熟悉的等距四极法探测该沉积盆地时，AB电极距要大于10公里。最近报导，使用动力线的AB电缆长度达20—30公里，甚至100公里 (Blohm和Flathe, 1971)；但是，使用这么长的电缆进行日常操作，通常是难于实现的。苏联开展的偶极

法(图3A)，用两组分开的偶极——供电偶极(AB)和电压测量偶极(MN)进行操作。这种方法虽有技术上的优点，但横向不均匀性可能使场产生强烈的畸变。向AB输入直流脉冲，改变偶极距，测得MN上的电压，即可算出视电阻率  $\rho_o(r)$ 。在偶极距大于10公里时， $\rho_o(r)$  曲线有条渐近线，这条渐近线表征绝缘盐层上的地层的纵向电导  $S_1$ ；但由于

盐层的屏蔽效应，要得到关于盐层以下沉积层的任何资料是怎么也不可能的。

交变场法对此不足能有所弥补。尽管存在如像盐层那样的绝缘层，交变场仍然能依照趋肤效应的规律穿透绝缘层，以达到下部介质。对于这类方法，直流电法勘探的等值原理只部分地有效。

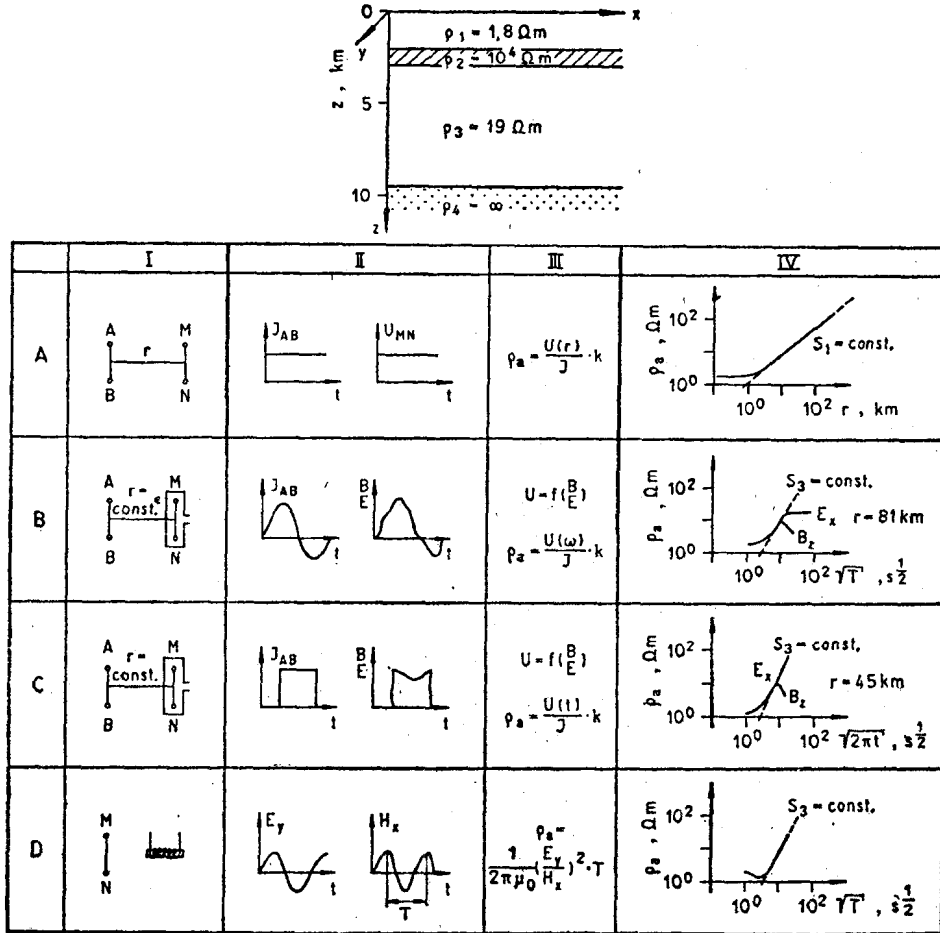


图3 沉积盆地地电剖面的电磁测深法原理

据Militzer, Porstendorfer (1968)

- A—偶极测深法      C—过渡场法      B—频率测深法      D—大地电法  
 I—电极的布置方式      II—在时间域上资料的表示法      III—视电阻率计算公式  
 IV—测深曲线分别表示成偶极距或建场时间或电磁波周期的函数。  
 AB—供电偶极      t—时间      MN—测量偶极       $S_1$ —纵向电导。  
 B—磁感应强度       $S_1 = \frac{h_1}{\rho_1}$       H—磁场强度       $S_3 = \sum_{i=1}^3 \frac{h_i}{\rho_i}$   
 E—电场强度       $\rho_i$ —第i层电阻率      I—电流强度      U—电压  
 $h_i$ —第i层厚度      K—装置系数      r—偶极距       $\rho_a$ —视电阻率  
 $\omega = 2\pi/T$       T—周期

我们首先讨论一下所谓“频率测深法”（图3 B）。通过固定的供电偶极（AB），将具有不同频率（1/T）的信号输入地下；然后在固定的接收点（MN）上检测电场

分量 $E_{MN}$ ，或者用探测线圈检测磁场分量 $B_z$ 。当偶极距足够远时，由测深曲线 $\rho_a(T)$ 的渐近线，可得到高阻基底以上所有导电层的纵向电导 $S_0$ 。显而易见的是，为此必须供给周期 $T \approx 100$ 秒的大功率交变电流，这在目前还不是切实可行的。

另一种方法是向AB偶极输入持续时间长的方波信号，而在MN上考察过渡场(图3C)。按照傅里叶定理，任一时间函数可变换成频率函数。那末将输入和输出信号的谱函数相分离，就能获得地下的滤波特性，这种滤波特性同欲求的测深曲线相当。只有当偶极距很大时，计算 $S_0$ 所需的渐近线才是可靠的。然而，由于需要大功率电源，而且又有天然地电流和工业电流的干扰，这种方法的应用不久就受到局限。

利用天然变化电磁场能够克服上述缺陷。天然变化电磁场总是现成可用的；而且场源离观测点很远，以致可以简化成平面波来处理(图3D)。

## §1.2 发展简史

天然电磁场法在勘探中使用几种不同的野外操作方法和解释技术，这是随时间发展的必然结果。

根据C.Schlumberger的思路(1921)，经过研究诞生了“大地电流法”。这个方法是将测点和基点上同时测量的大地电流场加以对比。

Wiese于1951年在东德着手进行地磁垂直分量长周期变化的系统分析，以用于勘探，并提出了所谓“地磁测深法”。与此相当的方法是Ward等人在1958年利用地磁短周期变化发展而成的所谓“声频磁法(AFMAG)”，该法已在航空中使用。

以Tichonov(1950)和Cagniard(1950)的思路为基础的“大地电磁法”，得到了特别顺利的发展。利用测点上同时刻的电场和磁场分量，能够计算电阻率随深度变化的函数值。目前该法既应用于勘探实践，也应用于上地幔的探测。特别是在苏联，Berdichevski及其同事们将此法系统地应用于石油和天然气构造勘探，从而积累了大量的经验。按照勘探实践的近代观点，对这些方法进行统一的讨论是必要的。以下我们将通称这些方法为“大地电磁勘探法”。有关这些方法的发展过程，Fournier(1966)曾作过很好的论述。

## 第二章 地球的天然电磁场

### §2.1 天然电磁变化场的场源

地球天然电磁变化场的主要部分起源于太阳。在地球周围空间，任何时候都存在由太阳爆发所产生的强度可变的太阳等离子流和短波辐射。太阳等离子流主要由伴有低强度磁场的高能质子组成。这些等离子流以运动速度300—800公里/秒的所谓“太阳风”同地球外层磁场相遇。带正电和带负电的粒子进入地球磁场力线的影响范围，它们被俘获，并分别在传播方向和磁力线方向相垂直的方向上偏转。因此，在地球外层磁场区域，导电的等离子体环绕着地球。如果在这样的介质中产生压力变化，那末该压力变化的传递，不光是遵守流体动力学规律，而且还服从电动力学规律。我们称这类现象为磁流体现象。理论上处理它时，要将经典的电动力学方程和流体动力学方程联立(Matsushita和Campbell, 1967)，因为等离子体速度、电流密度和磁场构成了矢量积。由此可导出磁流体波的波动方程。磁流体波以所谓“阿尔芬速度(Alfvén velocity)” $V_A$ 沿磁力线方向传播。阿尔芬速度同沿磁力线方向的磁场强度成正比，而同带电粒子密度成反比。

以超音速 $V_S$ 到达的太阳等离子体，同以速度 $V_A$  ( $V_A < V_S$ )、被磁力线俘获的等离子体相互作用，在等于十四倍地球半径的空间处产生了冲击波。地磁场对太阳风的阻力，使等离子流转向，从而感生了电流，形成了地磁场边界，使地磁场与外部空间隔断。这就形成了所谓“磁层(magnetosphere)”。与纯磁偶极场相比，磁层受到了强烈的畸变。

图4展示出地球外的环绕带、由太阳风形成的磁场、产生的冲击波、磁层的非对称形状以及由极高能量等离子体组成的所谓“辐射带”。

图5表示在冲击波波阵面产生的压力波，即沿着磁力线传播的磁流体波是如何传入电

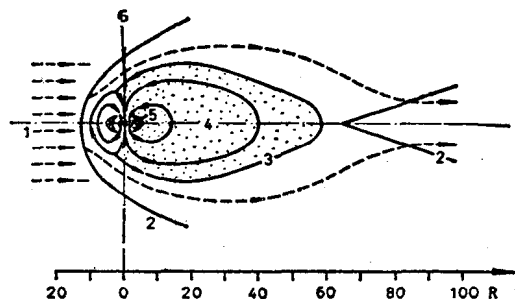


图4 流过地球的太阳风及其磁场  
据Matsushita等(1967)

1—太阳风；2—冲击波波阵面；3—磁力线；4—磁层等离子体；5—辐射带；6—地球；R—地球半径(6370公里)

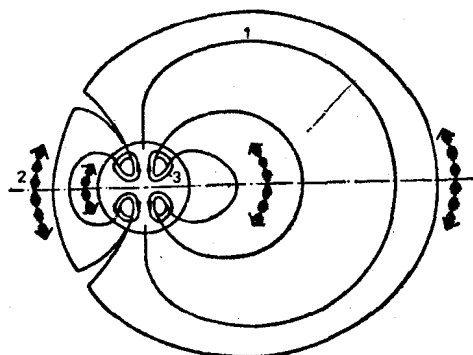


图5 沿磁力线方向磁流体波的穿透  
据Matsushita, Campbell (1967) 和 Kertz (1965) 重绘和增补

1—磁力线；2—穿透的磁流体波的符号表示；3—电离层的电流体系

离层中的。我们可以预期，沿磁力线方向将发生共振，从而出现某些频率占优势的传播现象。

与磁层的等离子体不同。受太阳紫外线和X射线电离作用形成的电离层（60—100公里）等离子体，还具有水平导电性。由于电离层的霍尔导电性，磁层的磁流体现象在90—140公里高度的电离层内产生了许多大的水平电流壳层。这些电流壳层传递着不同磁层半球的磁力线间的能量，而且它们还是进入大气中的纯电磁辐射的源。另一方面，由太阳辐射加热变化和潮汐效应引起的压力差所产生的导电电离层的风系，在地磁场作用下构成了电流体系，该电流体系在磁层等离子体中引起沿磁力线的磁流体现象。

我们应用图6所示的信息传输四端网络图，以说明在电离层底部产生电磁场的机制。太阳风的等离子流，在磁层之外的冲击波波阵面上产生地震型的狄拉克（Dirac）脉冲信号 $X(t)$ 。这种信号起初包含所有的频率，各个频率的振幅都相同。在磁流体波穿透磁层（ $M$ ）和电离层（ $I$ ）的过程中，某些频率的振幅由于共振现象而被放大，另一些频率的振幅则被减小。因此，磁层和电离层的行为像个滤波器，这个滤波器的特性可以用频率域上的振幅响应 $A(f)$ 和相位响应 $\phi(f)$ （图6b）以及时间域上的滤波算子 $K(\tau)$ 表征（图6a）。〔在此附带提一下：Vanjan(1971)用这类方法成功地研究了“月球”滤波器对太阳风的作用，这就有可能获得关于月球内部的电导率分布的资料〕。

电离层底部的纯电磁信号 $Y(t)$ 具有阻尼振荡的形式。实际上我们处理的是具有随机特性的许多脉冲 $X_i$ 。这些脉冲与滤波算子褶积，从而得到输出信号 $\Sigma Y_i$ （图6c）。由于大区域的等离子流的缘故，输入信号不呈单个狄拉克脉冲的形式，对于每个信号我们可把它

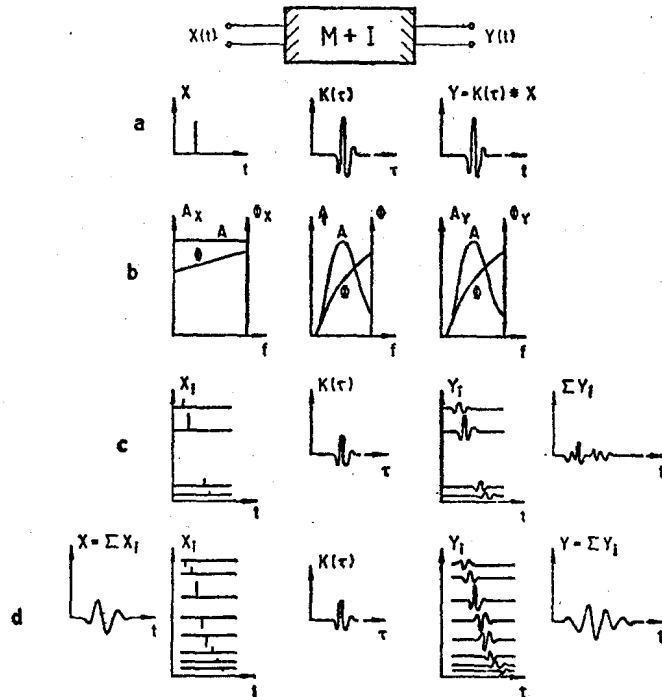


图6 信息通过“滤波器”——磁层和电离层传至地面的图解

$X(t)$ —磁层外冲击波波阵面上的输入信号； $Y(t)$ —电离层底部的输出； $M$ —磁层； $I$ —电离层； $A$ —振幅； $\phi$ —相位； $f$ —频率； $\tau, t$ —时间； $K(\tau)$ —滤波算子

分解为一系列离散的不同振幅和符号的狄拉克脉冲。这些离散的脉冲应分别同滤波算子  $K(\tau)$  褶积，然后叠加起来即得到输出信号  $\Sigma Y_i$  (图·6d)。滤波算子  $K(\tau)$  是电离层状态 (电导率) 以及输入和输出分布位置的函数。

实际探测结果证实了以上所述的模式，因此大地电磁记录能够看作随机平稳过程，

## §2.2 天然电磁场的特性和频谱

如表 1 所示，由于各种电磁的、磁流体的和核的相互作用，在非导电的地球大气中产生宽带的电磁频谱。表上列出各种频段的命名、相应的各种地球物理的遥感方法、变化场的场源、大气的透射情况、所用的检测装置、所测的物理性质以及探测上的应用等等。

我们发现，典型的大地电磁方法是用此电磁频谱中所谓“脉动 (P)”作场源的。为了说明电磁场变化的数量级，可看图 7。在包含所谓“湾扰 (b)”至所谓“天电 (极低频)”的各种周期的电场和磁场振幅谱中，可以看出随周期增加，振幅一般亦增加，不过也有些明显的例外。电场曲线以电阻率  $\rho = 1$  欧姆·米为基准。电阻率增加 100 倍，电场增加一个数量级。在脉动范围内，我们可以识别连续的有规则的脉动  $P_i$  与脉冲似的无规则的脉动  $P_i$ 。表 2 和表 3 给出它们的频段和命名。

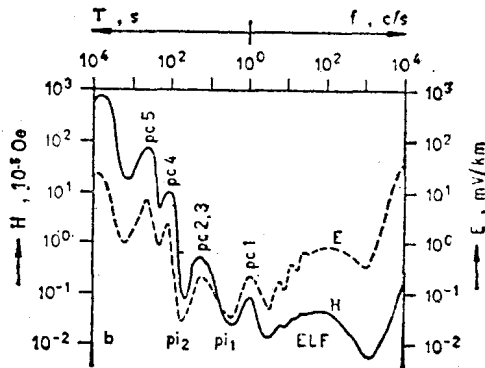


图 7 在  $10^{-4}$  秒  $< T < 10^4$  秒的周期范围内，大地电磁变化场的振幅谱  
据 Matsushita, Campbell (1967) 重绘和增补

在直径 1000 公里的范围内， $P_i$  脉动的出现一般能够互相对比。在赤道邻近  $P_i$  脉动的初次场最为均匀。有时在日半球各处，特别在磁力线的共轭点上，还观察到它们同时出现 (在共轭点处，南北半球的脉动矢量的旋转方向相反)。正如图 8 所示，在世界各地的记录中有时可见到  $P_i$  脉动。脉动的强度和它们的主周期从南到北增加。可以看到，最大的  $P_2$  和  $P_3$  脉动正好出现在地方时 12 时前。夜晚经常观察到长周期脉动。在脉动的活动性指数、太阳风速度、电离层扰动指数和行星地磁活动性指数等之间具有很好的相关性。由此我们能确立典型的二十七天重复特性，而这种特性同太阳的自转有关。在春、秋分期间发现季节性极大。在非导电的大气层中一般不能记录到不受二次场影响的初次场 (这种二次

表 1 电磁频谱及其在地球物理勘探中的应用

根据Hood和Ward的资料重绘并增补 (1969)

介质的穿透深度 $g = 1/\lambda m$	km $1.6 \cdot 10^3$ $1.6 \cdot 10^2$ $1.6 \cdot 10^1$ $1.6 \cdot 10^0$ $1.6 \cdot 10^{-1}$ $1.6 \cdot 10^{-2}$	m $10^5$ $10^4$ $10^3$ $10^2$ $10^1$ $10^0$ $10^{-1}$ $10^{-2}$ $10^{-3}$	cm $10^6$ $10^5$ $10^4$ $10^3$ $10^2$ $10^1$ $10^0$ $10^{-1}$ $10^{-2}$ $10^{-3}$ $10^{-4}$ $10^{-5}$ $10^{-6}$	$\mu m$ $10^0$ $10^1$ $10^2$ $10^3$ $10^4$ $10^5$ $10^6$	$\lambda$ $10^0$ $10^1$ $10^2$ $10^3$ $10^4$ $10^5$ $10^6$
在大气中的波长 $\lambda = 1/\nu m$					
频段与命名	长期变化 太阳质子变化 季节性变化 日变化 ssc, sfc $D_{st}$ , $S_L$ , $b$ , $P_i$ - $P_c$ - $P_i$	极低频 噪声 基低频 高频 超高频 微波 红外 紫外 X射线 Y射线			
周期	年 $3 \cdot 10^8$ $3 \cdot 10^6$ $3 \cdot 10^4$ $3 \cdot 10^2$ $3 \cdot 10^0$ $3 \cdot 10^{-2}$ $3 \cdot 10^{-4}$ $3 \cdot 10^{-6}$ $3 \cdot 10^{-8}$	天 秒	Hz $10^0$ $10^1$ $10^2$ $10^3$ $10^4$ $10^5$ $10^6$ $10^7$ $10^8$ $10^9$ $10^{10}$ $10^{11}$ $10^{12}$	MHz $10^0$ $10^1$ $10^2$ $10^3$ $10^4$ $10^5$ $10^6$	GHz $10^0$ $10^1$ $10^2$ $10^3$ $10^4$ $10^5$ $10^6$
大气透射					
方 法	古地磁学	地磁测深 大地电流 大地电磁测深	音频磁测 各种电磁波法 电磁脉冲法	无线电测高 雷达 微波辐射测量	红外 紫外内标和盖勒计数器 X射线摄影 光谱法
场源	天然 人工的	太阳风等离子体及电离层和磁层的磁流体的强度变化 核爆炸	地球和电离层的空腔共振 太阳的加热效应和来自地球内部的热对流 雷暴 电离层扰动 电子轰击器	太阳 磁流体的空腔共振 空腔共振器	太阳 磁流体的空腔共振 空腔共振器 各种灯气体放电管 中子放射性 聚变 Y射线放射性
检测装置	磁力仪	电磁感应子 原子磁进磁力仪 磁变仪 电子磁进磁力仪 核磁共振	辐射热流计 热流计 磁导天线 光电探测器 电视摄影机	肉眼 电离检测器 电视摄影机	肉眼 电离检测器 电视摄影机
所测的物理性质	磁化强度的变化	磁导率 电导率	介电常数 发射率和反射率 几何形状 颜色 发光	天然的同位素的放射性 放射性化学元素	天然的同位素的放射性 放射性化学元素
探测上的应用	地磁磁移	地壳和地幔的电导率及其构造 沉积盆地的构造	地质构造 地壳温度 工厂中的一些测定	地壳和地幔的电导率及其构造 沉积盆地的构造	地壳和地幔的电导率及其构造 沉积盆地的构造



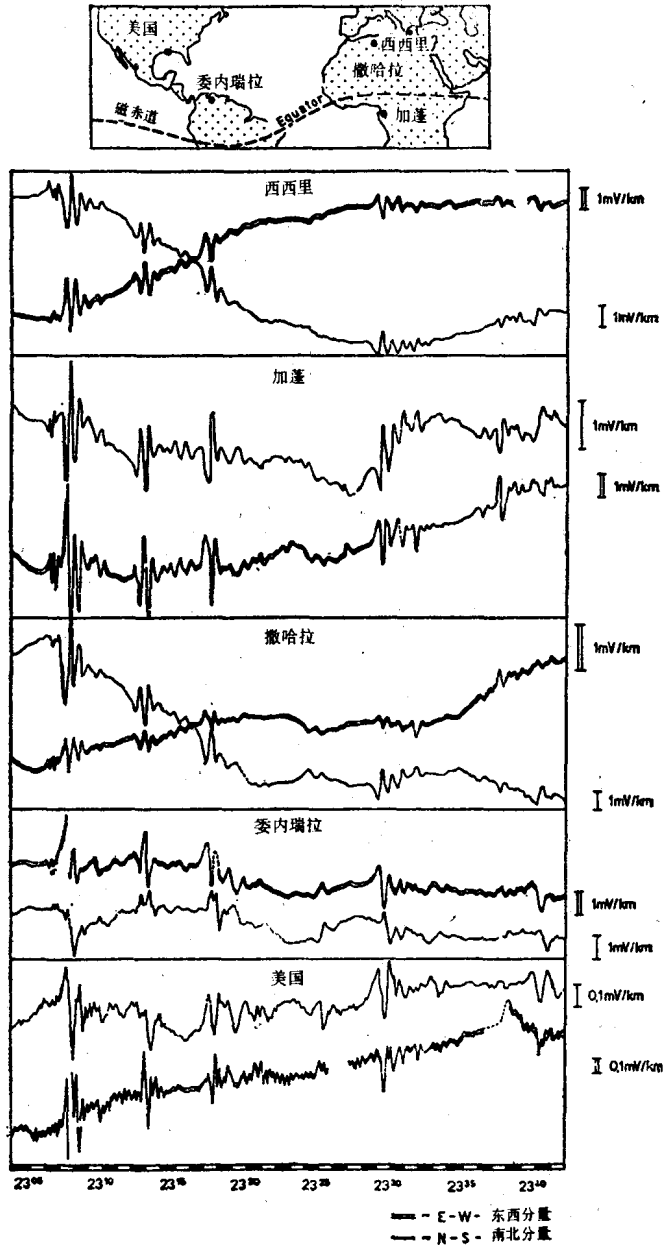


图8 1952年2月24日23:04—23:42(格林威治时间)于世界各测点上同时记录到的电场脉动  
据Kunetz (1954)