

高等学校教学用书

地电概论

北 京 大 学 孙 正 江 编
中 国 科 学 技 术 大 学 王 华 俊

地 震 出 版 社

地 电 概 论

北 京 大 学 孙正江
中国科学技术大学 王华俊 编

地 震 出 版 社

1 9 8 4

内 容 提 要

地电学是利用电法勘探的某些方法, 研究固体地球内部以及周围介质的电性和电场分布规律的一门学科, 本书主要包括大地电场、自然电场、有源直流电场、大地电磁测深和有源交变电磁场等五个部分。前两部分主要介绍固体地球内部天然电场的性质、成因和分布规律等基础知识, 后三部分着重介绍几种常用的地电观测方法及其理论基础, 以及在地球电性研究、地球物理勘探、地震预报研究中的应用。

本书除作为高等院校理科地电学教材之外, 亦可供地球物理勘探、地震等专业人员参考。

地 电 概 论

北 京 大 学 孙正江 编
中国科学技术大学 王华俊

责任编辑: 姚家榴

地 震 出 版 社 出 版

北京复兴路63号

北京新村印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

全国各地新华书店经售

850×1168 1/32 93/3印张 250千字

1984年6月北京第一版 1984年6月北京第一次印刷

印数: 0001—2600

统一书号: 13180·221 定价: 1.80元

绪 论

地电学是研究大气、海洋和固体地球内部电性及电场分布的一门科学。它与电法勘探的主要区别是：地电学利用电法勘探中的某些方法，来研究固体地球内部介质及其周围的电性和电场分布规律，而电法勘探的主要目的在于找矿。由于地电学是一门新兴的科学，所以它的研究范围至今仍在不断扩展。

早在十九世纪初就观测到固体地球表层有电流流动，后来又观测到大气和海洋中也有电流流动。但是这些观测是零星的，附属于地磁学、电法勘探、大气物理、空间物理和海洋物理。随着科学的发展，有必要像地磁、重力和地震学那样，把上述分散的内容集中成为地电学，并加以深入系统的研究。1940年查普曼（S. Chapman）和巴特尔斯（J. Bartels）在他们的著作《地磁学》中，把地电学部分集中成为一章，并命名为“地电流”，其中主要包括大地电场、自然电场、电法勘探和海洋中的电流等内容。1951年克拉耶夫（А. П. Краев）把上述内容编成《地电原理》一书，其中主要包括大气电性、大气电场、海水电性、岩石电性、大地电场、自然电场、有源直流电场和直流电法勘探等部分。克拉耶夫去世后，他的学生和战友于1965年又再版了《地电原理》。在新版《地电原理》中，除了增加交变电磁场的内容外，还对原版的部分内容作了若干修改和补充。

十九世纪中期，地电工作的主要目的是解释地球变化磁场的成因。二十世纪初，由于许多国家随着工业的发展，对资源的需求越来越迫切，所以电法勘探获得了迅速的发展。这时，地电学工作的重点转向电法勘探。

本世纪五十年代，吉洪诺夫和卡尼尔（А. Н. Тихонов，

L. Caniard) 奠定了大地电磁测深基础, 该法很快在石油勘探方面得到了广泛运用。由于该法勘探深度大, 不受高电阻层的屏蔽, 所以在探索地球内部电性分布和温度变化等方面也得到充分利用。目前还利用这种方法研究地壳和上地幔中的低电阻层的隆起与地震活动带之间的关系, 从而开辟了地震预报研究的新途径。

本书是根据全国地震专业教材会议拟定的提纲编写的。内容包括大地电场、自然电法、有源直流电场、大地电磁测深和有源交变电磁场等五部分内容。前两部分主要描述固体地球内部天然电场的性质、成因和分布规律等基础知识; 后三部分介绍了几种常用的地电观测方法和理论基础, 以及在地球电性研究、地球物理勘探、地震预报研究中的应用。

在编写本书的过程中, 中国科学技术大学郭自强、云南大学李同英, 浙江工学院吴乃爵、北京大学陈显杰、国家地震局地球物理研究所钱书清和安徽省地震局汪雪泉等同志曾提出过许多宝贵意见, 完成初稿后又经过北大地球物理系地球物理教研室朱仁益、陈大元和王丽华等同志全面审查和修改, 作者在此深表感谢。

目 录

绪 论

第一章 大地电场..... (3)

§ 1.1 大地电场的测量方法..... (3)

§ 1.2 大地电场的分类..... (5)

§ 1.3 地电日变化..... (6)

§ 1.4 地电微变化..... (8)

§ 1.5 地电湾扰和地电暴..... (15)

第二章 自然电场..... (19)

§ 2.1 自然电场的成因..... (19)

§ 2.2 简单几何模型上自然电场的计算..... (32)

§ 2.3 压电效应和震电效应..... (53)

§ 2.4 地电场的数值计算..... (69)

§ 2.5 野外工作方法和资料处理..... (90)

第三章 有源直流电场 (96)

§ 3.1 岩石电性..... (96)

§ 3.2 均匀无限介质中的点电源电场..... (117)

§ 3.3 具有平面分界面的两个半无限均匀介质中的
点电源电场..... (119)

§ 3.4 水平层状介质中的点电源电场..... (122)

§ 3.5 倾斜层状介质中的点电源电场及视电阻率的
计算..... (130)

§ 3.6	垂直层状介质中的点电源电场·····	(136)
§ 3.7	均匀各向异性介质中的点电源电场及视电阻率的计算·····	(138)
§ 3.8	平面电场的计算·····	(144)
§ 3.9	地电参数的测量方法及视电阻率的计算·····	(155)
§ 3.10	接地电阻·····	(174)
§ 3.11	仪器及测量方法·····	(180)
§ 3.12	电阻率法在地震预报中的应用·····	(187)

第四章 大地电磁测深 ····· (193)

§ 4.1	电磁场·····	(193)
§ 4.2	层状半无限介质中的平面电磁波·····	(200)
§ 4.3	视电阻率及其理论曲线的计算·····	(208)
§ 4.4	二维介质的张量阻抗·····	(223)
§ 4.5	源场影响·····	(228)
§ 4.6	仪器及工作方法简介·····	(233)
§ 4.7	资料解释·····	(239)
§ 4.8	大地电磁测深应用简介·····	(246)

第五章 交变电磁场 ····· (250)

§ 5.1	电磁场的势和非齐次波动方程·····	(250)
§ 5.2	均匀无限介质中的偶极子场·····	(261)
§ 5.3	半无限介质中的偶极子场·····	(266)
§ 5.4	阻抗及场矢量倾角·····	(278)
§ 5.5	交流电法·····	(285)
§ 5.6	其他交流电磁法简介·····	(297)
§ 5.7	交流电法应用·····	(303)

绪 论

地电学是研究大气、海洋和固体地球内部电性及电场分布的一门科学。它与电法勘探的主要区别是：地电学利用电法勘探中的某些方法，来研究固体地球内部介质及其周围的电性和电场分布规律，而电法勘探的主要目的在于找矿。由于地电学是一门新兴的科学，所以它的研究范围至今仍在不断扩展。

早在十九世纪初就观测到固体地球表层有电流流动，后来又观测到大气和海洋中也有电流流动。但是这些观测是零星的，附属于地磁学、电法勘探、大气物理、空间物理和海洋物理。随着科学的发展，有必要像地磁、重力和地震学那样，把上述分散的内容集中成为地电学，并加以深入系统的研究。1940年查普曼（S. Chapman）和巴特尔斯（J. Bartels）在他们的著作《地磁学》中，把地电学部分集中成为一章，并命名为“地电流”，其中主要包括大地电场、自然电场、电法勘探和海洋中的电流等内容。1951年克拉耶夫（А. П. Краев）把上述内容编成《地电原理》一书，其中主要包括大气电性、大气电场、海水电性、岩石电性、大地电场、自然电场、有源直流电场和直流电法勘探等部分。克拉耶夫去世后，他的学生和战友于1965年又再版了《地电原理》。在新版《地电原理》中，除了增加交变电磁场的内容外，还对原版的部分内容作了若干修改和补充。

十九世纪中期，地电工作的主要目的是解释地球变化磁场的成因。二十世纪初，由于许多国家随着工业的发展，对资源的需求越来越迫切，所以电法勘探获得了迅速的发展。这时，地电学工作的重点转向电法勘探。

本世纪五十年代，吉洪诺夫和卡尼尔（А. Н. Тихонов，

L.Caniard) 奠定了大地电磁测深基础, 该法很快在石油勘探方面得到了广泛运用。由于该法勘探深度大, 不受高电阻层的屏蔽, 所以在探索地球内部电性分布和温度变化等方面也得到充分利用。目前还利用这种方法研究地壳和上地幔中的低电阻层的隆起与地震活动带之间的关系, 从而开辟了地震预报研究的新途径。

本书是根据全国地震专业教材会议拟定的提纲编写的。内容包括大地电场、自然电法、有源直流电场、大地电磁测深和有源交变电磁场等五部分内容。前两部分主要描述固体地球内部天然电场的性质、成因和分布规律等基础知识; 后三部分介绍了几种常用的地电观测方法和理论基础, 以及在地球电性研究、地球物理勘探、地震预报研究中的应用。

在编写本书的过程中, 中国科学技术大学郭自强、云南大学李同英, 浙江工学院吴乃爵、北京大学陈显杰、国家地震局地球物理研究所钱书清和安徽省地震局汪雪泉等同志曾提出过许多宝贵意见, 完成初稿后又经过北大地球物理系地球物理教研室朱仁益、陈大元和王丽华等同志全面审查和修改, 作者在此深表感谢。

第一章 大地电场

地球表面存在着天然的变化电场和稳定电场。天然的变化电场是由地球外部的各种电流系在地球内部感应产生的，分布于整个地表或广大地区，一般具有较小的梯度。天然的稳定电场主要是由矿体、地下水和各种水系产生的，分布于局部地区，一般具有较大的梯度。各种天然的全球性或区域性的变化电场，称为大地电场，而各种天然的地方性的稳定电场，称为自然电场。这两种电场总称为地电场。

§1.1 大地电场的测量方法

测量大地电场的装置如图1-1所示。 M ， N 是一对埋入地下的电极，一般埋深两米左右。电极间的距离一般在一公里以上，常用化学性质比较稳定的铅板制作电极，其面积约为 30×20 厘米²。 G 是座式电流计，灵敏度约为 $10^{-7} - 10^{-9}$ 安培/毫米。 R 是一个阻抗较大的电阻，必须远大于两个电极之间的接地电阻。这时，电流计就可以近似地记录 M ， N 两个电极之间的电位差 Δu_{MN} 。由电位差 Δu_{MN} 和极距 MN 可算出测点 O 处（ M ， N 的中点）的平均电场强度 E_{MN} ：

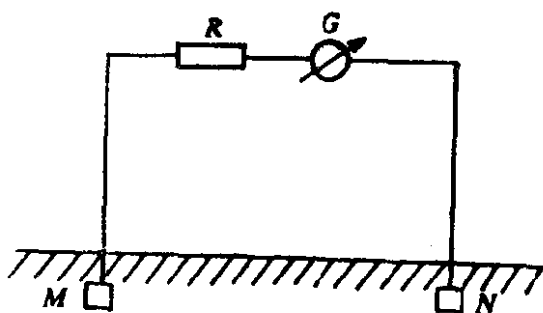


图1-1 地电观测线路

$$E_{MN} = \Delta u_{MN} / MN, \quad (1-1)$$

E_{MN} 就是沿 MN 方向的电位梯度，一般以毫伏/公里为单位。

大地电场是个矢量，因此，必须沿 x ， y 两个方向布设两组

电极，分别测量出电场的北向分量 E_x 和东向分量 E_y ，才能确定测点 O 处大地电场的强度和方位角 α ：

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2},$$

$$\operatorname{tg} \alpha = E_y / E_x. \quad (1-2)$$

在固定台站上，为了获得较大的信号，电极距常取得很大。表1-1给出了世界上几个著名的地电台采用的极距。流动台站采用的电极距较小，一般为400到600米。

表1-1 几个国家的地电观测极距

国 家	台 名	南北极距(公里)	东西极距(公里)
德 国	Barlin	120	262
美 国	Tueson	56.8	93.9
美 国	College	1.3	1.2
英 国	Greenrich	25.0	15.6
澳大利亚	Watheroo	3.4及2.0	9.9及5.6
西 班 牙	Ebro	1.3	1.4
加 拿 大	Chesterfield	1.3	0.9

图1-2是大地电场的两段记录图。从图中量出各个时刻的 E_x 和 E_y ，按式(1-2)可算出各个时刻的场强 E 和方位角 α 。在 x, y 坐标系中，先点出各个时刻的电场矢量 E 的端点，再按时间顺序连接各个端点就得到图1-3所示的曲线。从图中可以看到两种

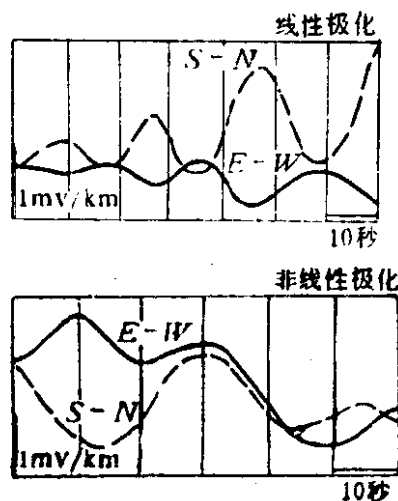


图1-2 大地电流场记录

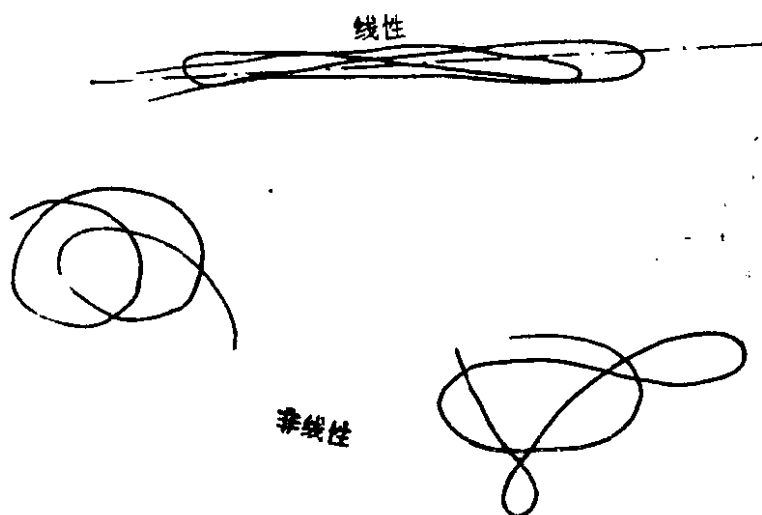


图1-3 大地电流场的极化

情况：第一种，电场矢量的端点沿着一定方向分布，各点近似落在一条直线上。这种情况称为线性极化。这条直线称为极化轴。第二种，电场矢量的端点不落在一条直线上。这种情况称为非线性极化。图1-2和图1-3说明，大地电场的强度和方向都是随时间变化的。

§1.2 大地电场的分类

大地电场的变化可分为两大类型，一类是地电场的平静变化，另一类是地电场的干扰变化。平静变化是连续出现的，具有确定的周期性。其中最重要的一种变化是静日地电日变化，周期为一天。干扰变化是偶然发生的，持续一段时间以后就消失了。地电场干扰变化又可分为各种类型：高频地电变化，周期约为 10^{-4} —1秒；地电脉动，周期一般为0.2—1000秒；地电湾扰，形如海湾而没有周期性，变化的持续时间约为1—3小时；扰日地电日变化，周期为1天；地电暴，具有独特的形态，变化的持续时间约为1—3天。

静日地电日变化和扰日地电日变化具有相同的周期，两者叠加在一起构成的地电变化称为地电日变化。

高频地电变化和地电脉动，不仅周期短，而且变化幅度一般也较小，常称为地电微变化，必须用高灵敏快速记录仪才能记录下来。

大地电场起源于天电，它是天电在地壳和地球内部所产生的感应电场。不同类型的地电变化具有不同的天电场源。地电日变化的场源是分布在电离层中的电流系，其中，静日地电日变化的电流系主要分布在中、低纬度地区的上空，高度约为100公里，而扰日地电日变化的电流系主要分布在高纬度地区的上空，高度约为300公里。高频地电变化的场源是在对流层中产生的雷电，主要分布在赤道上空8公里附近。太阳辐射来的带电粒子一方面绕着地磁场的磁力线运动，另一方面还沿着磁力线的方向在两极

之间往返振荡。电荷的这种运动所产生的电磁效应就是电磁脉动的一种场源。太阳辐射出来的高速太阳风和带电粒子流，在地磁场作用下，在高度约为300公里的极区电离层中形成一个电流系，并在距离地心约为5—7个地球半径的远处形成一个赤道电流环，它们分别是地电湾扰和地电暴的场源。

大地电场在地面上的分布，不仅取决于外部场源，而且还取决于地壳和地幔的电性结构。因此，应用大地电场资料可以研究地壳和地幔的电性结构，也可以探测矿产和地热等资源。

应当指出，大地电场和地球变化磁场是密切联系，不可分割的。它们的场源都是各种天电，因此两者具有相同类型的变化。地球的变化磁场属于地磁学的重要内容之一，本书不做介绍。

§1.3 地电日变化

一、地电日变化的形态

地电日变化的形态如图1-4所示，实线和虚线分别为地电和地磁的日变化。由图可见，地电北向分量日变化与地磁东向分量日变化的形态比较一致，而地电东向分量日变化与地磁北向分量日变化的形态比较一致，不过地电日变化与地磁变化之间有一定的相位差。

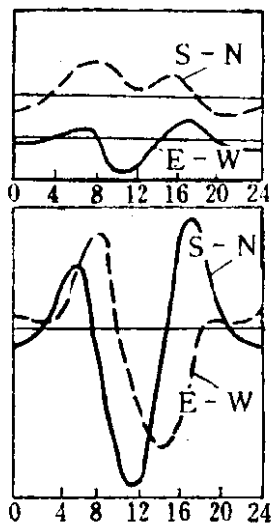


图1-4 地电日变化

地电和地磁的日变化都是以日为周期的变化，但是形态并不是简单的正弦型。这说明它们含有多种谐波成份。用傅氏级数进行波谱分析表明，它们含有周期为24，12，8，6小时的各次谐波，而主要的谐波成份是周期为24小时的全日波和周期为

12小时的半日波。一般说来，地电日变化的半日波比全日波强，而地磁日变化的半日波比全日波弱。

二、地电日变化随时间的变化

一个台站所记录到的地电日变化是逐日而异的,变化的幅度和相位都会有变化,不过幅度的变化要比相位的变化更明显。这种逐日变化没有明显的规律性,必须利用多年的资料进行统计分析才能看出变化的规律来。地电日变化的幅度具有1年和大约11年的周期变化。前者称为年变化或季节变化,一般夏季幅度大,冬季幅度小。后者称为11年变化或太阳周变化,它和太阳活动密切相关。太阳活动的强弱一般用太阳黑子数来表示,黑子数越高太阳活动越强。图1-5给出了大地电场、地磁场和太阳黑子数的逐年变化,三者之间的相关性是非常明显的,变化的平均周期约为11年。

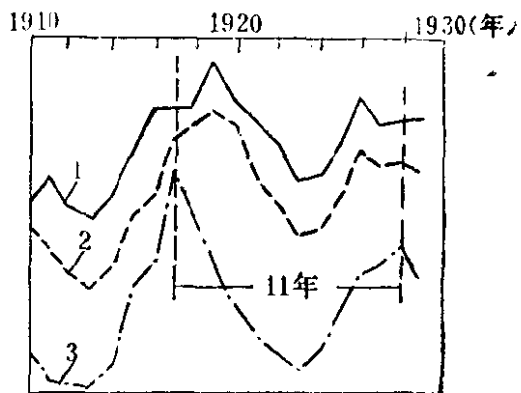


图1-5 地电地磁日变幅的长期变化
1.大地电场强度;
2.磁场强度;
3.太阳黑子数

三、地电日变化的地面分布

地电日变化形态和幅度是因地而异的,主要随着纬度的改变而改变。在不同纬度处,不仅幅度不同,而且形态还可能反向。利用世界各个地电台站的同一时刻的大地电场观测值,可以画出大地电场或大地电流在地面上的分布,称为大地电流的世界分布图。图1-6是吉什(O. Gish)利用1936年世界时18点的全球资料编制的大地电流分布图,这是全年地电资料的平均结果。由于全球地电台站的数目太少,且南半球主要是海洋,所以此图只能给出大地电流地面分布的一个梗概。由图可见,电流是呈涡旋形分布的,并且全球应有16个涡旋形电流,南北半球各8个,不过南半球只能画出4个。涡旋电流的中心随纬度的分布具有一定的规律性:在中低纬度区,中心位置在 $\pm 30^\circ$ 附近;在高纬度区,中心位置接近于 $\pm 70^\circ$ 。涡旋电流的方向(顺时针或反时针),随着经

纬度而交替改变。

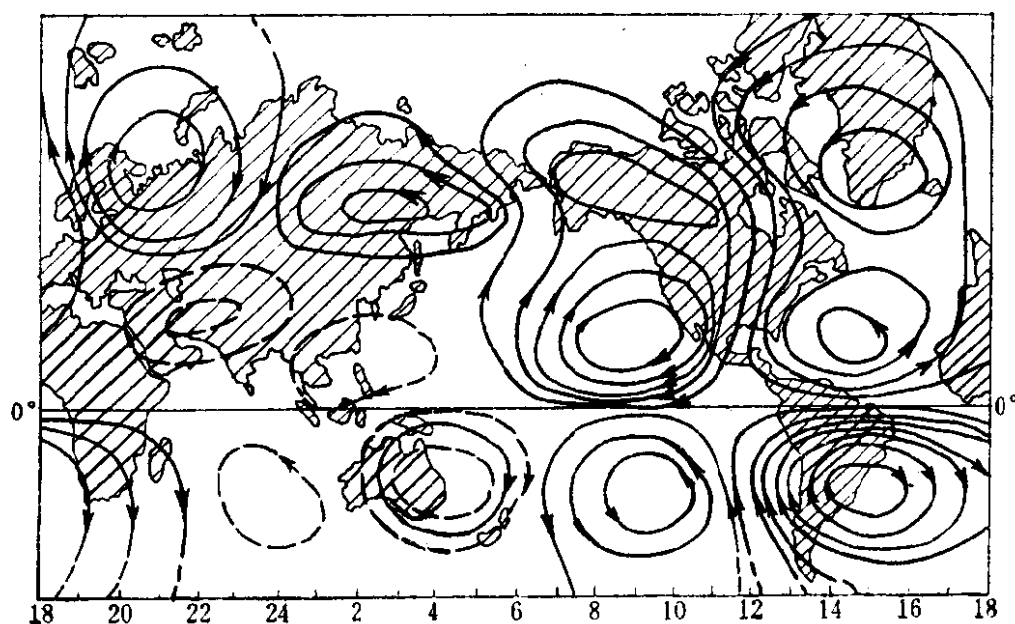


图 1-6 地电场的分布图

赤道两侧的8个涡旋电流与静日地电变化相对应，白天的电流强，夜间的电流弱。高纬度处的涡旋电流与扰日地电日变化相对应，电流强度昼夜相差不多。这种电流系相对于太阳的位置是固定的，地球自转一周，各地的大地电场就出现了以日为周期的变化，并且整个过程应经历两次起伏。地电日变化的幅度平均为10毫伏/公里。

§1.4 地电微变化

由于高频地电变化幅度比较小，所以常称为地电微变化，其频率如图1-7所示。 E 和 H 分别表示电场和磁场，二者频谱是一一对应的。从图中可以清楚地看出变化幅度与变化频率的关系：在1赫兹附近，幅度最小；高于或低于这个频率，变化幅度增大，并且在一些频段上幅度具有极值。

由雷电引起的高频地电变化的频率为 $1-10^4$ 赫兹。按无线电波划分，这是低频段（ELF）。地电脉动 P 的频率为 $10^{-3}-1$ 赫

兹，其中又可分为许多小频段。频率 10^{-4} — 10^{-3} 赫兹的变化已经是地电干扰了。

一、高频地电变化

有一种局部的天气系统称为雷暴系统，主要产生于赤道上空约8公里处，它产生的电磁噪音的影响几乎遍及全球。雷暴的数目在时间上也有一定的统计规律，通常最大值出现在世界时20点左右，最小值在04点左右。这种时间规律与阳光照射的地表性

质有关。世界时20点左右，阳光直射到太平洋上，海水的蒸发作用最大，大气的对流最激烈，同时赤道两侧的地下电流也最强。这时，水蒸汽所携带的不同电性的粒子最多，电荷的积累与释放作用也就最强烈，所以雷电暴的数目也就最多。相反，当世界时4点时，太阳直射于干燥的非洲大陆，水蒸汽最少，因此雷电的数目也最少。雷电的数目还有一对次极大和次极小，分别出现在10点和02点左右。图1-8是利用极距为1公里的电极记录到的雷电信号，频率为8赫兹的地电变化明显可见。所记录的低空闪电产生的电磁噪音的频谱与闪电的距离有密切关系。图1-9是以40赫兹噪音的强度为标准的频谱曲线。每条曲线都有两种优势频率，它们的频差随着距离的增大而增大，它们的能量却随着距离的增大

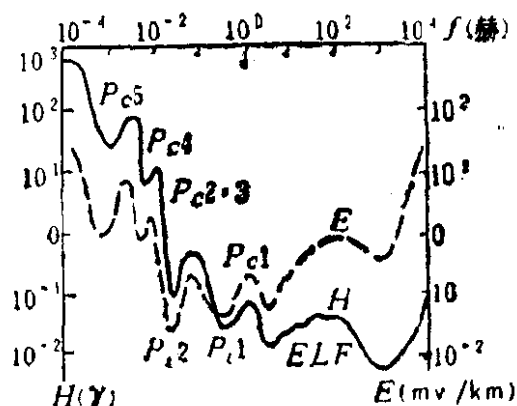


图1-7短周期电磁脉动频谱图

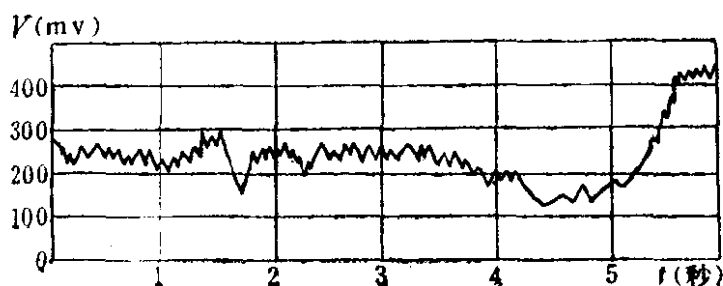


图 1-8 雷电信号记录图

而减小。此外, 较低优势频率的电磁波能量比另一个优势频率的电磁波能量总要小一些。

闪电产生的电磁脉冲示于图1-10, 当距离很近时, 单个闪电产生单个脉冲(a)。当距离很远时, 由于电磁波的反射, 单个闪电可以产生多个脉冲(b)。图中还附有多个雷暴对应多个脉冲的例子(c)。

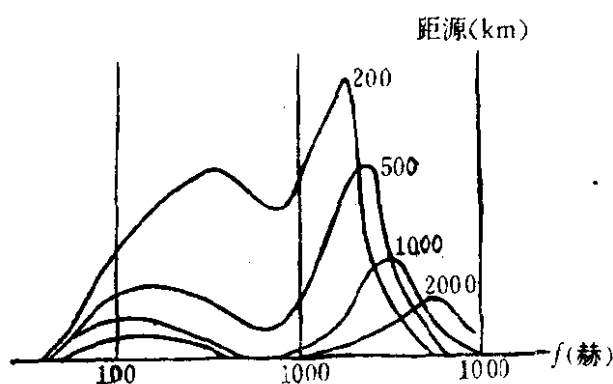


图1-9 噪声频谱图

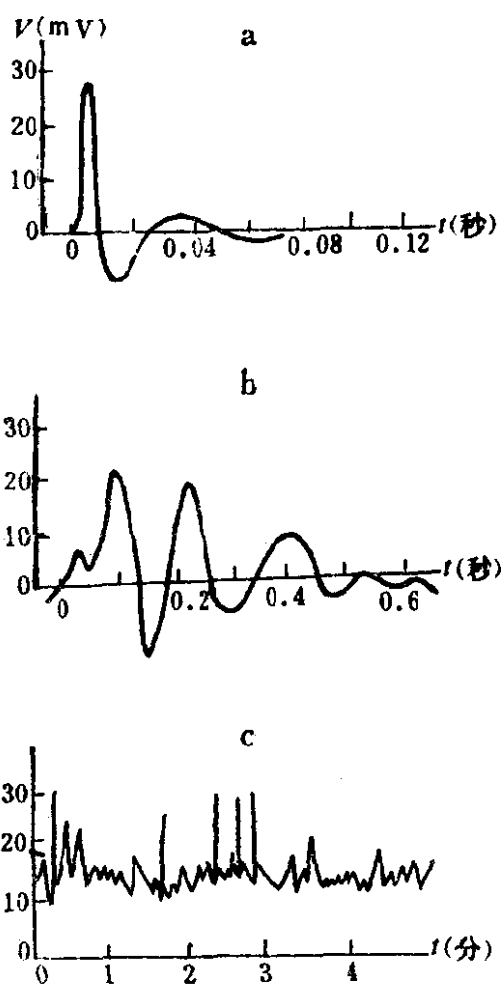


图1-10 闪电产生的电磁脉冲

a. 距16公里, 单个闪电; b. 距160公里, 单个闪电; c. 距30公里, 多个雷暴

雷电产生的电磁波, 频率较高, 穿透深度只有几百米。以雷暴和闪电的电磁波为场源的勘探方法称为声频电磁法。

二、地电脉动

地电脉动和地磁脉动具有相同的周期和成因。脉动的周期一般为0.2—1000秒, 很少有短于0.1秒和长于1500秒的。根据脉动的形态可以把它分为两大类: 一类称为规则脉动 p_r , 另一类称为不规则脉动 p_i 。这两类脉动又各细分为若干小类。

p_r 脉动: 幅度较稳定, 形态较规则, 脉动的持续时间从几分钟到八小时不等。按照脉动的周期又可把 p_r 型脉动分为六种类