



国防特色院士文库

# 极低频与超低频 无线电技术

**HEUP** 哈尔滨工程大学出版社  
Harbin Engineering University Press

北京航空航天大学出版社 北京理工大学出版社  
哈尔滨工业大学出版社 西北工业大学出版社



国防特色院士文库

# 极低频与超低频无线电技术

陆建勋 编著

哈尔滨工程大学出版社

北京航空航天大学出版社 北京理工大学出版社  
哈尔滨工业大学出版社 西北工业大学出版社

## 内容简介

本书共分7章。在第1章概述中说明极低频和超低频的定义,主要性能和特点;第2章介绍了极低频与超低频天线的设计与测量;第三章详细介绍了极低频与超低频无线电波的传播和相关理论计算;第4章介绍了噪声与干扰分析;第5章介绍了极低频与超低频信号的人工产生及大功率发射机的原理与设计;第6章介绍了极低频与超低频信号的接收、调制与解调的原理与设计;第7章介绍了极低频与超低频的应用与发展。

本书可供关心极低频与超低频无线电技术的科学研究和工程技术人员参考使用。

## 图书在版编目(CIP)数据

极低频与超低频无线电技术/陆建勋编著. —哈尔滨:  
哈尔滨工程大学出版社, 2012. 11  
ISBN 978-7-81133-947-5

I. ①极… II. ①陆… III. ①低频-无线电技术  
IV. ①TN014

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 263652 号

## 极低频与超低频无线电技术

陆建勋 编著  
薛 力 责任编辑

\*

哈尔滨工程大学出版社出版发行

哈尔滨市南岗区东大直街 124 号 发行部电话:0451-82519328 传真:0451-82519699

<http://press.hrbeu.edu.cn> E-mail: [heupress@hrbeu.edu.cn](mailto:heupress@hrbeu.edu.cn)

哈尔滨市石桥印务有限公司 各地书店经销

开本:787×1092 1/16 印张:21.75 字数:540千字

2013年1月第1版 2013年1月第1次印刷

ISBN 978-7-81133-947-5 定价:110.00元

# 序

国际上对极低频和超低频的应用研究从 20 世纪 50 年代就开始了,其研究目的主要是为了解决陆地对远洋深潜潜艇进行指挥通信的需要,重点是解决超低频无线电波的发射、传播和水下接收等相关理论与应用;同一时期,为了满足地下石油、矿产资源开发的巨大需求,地球物理中自然源电磁法应运而生;进入 20 世纪 70 年代,超低频在军事通信的研究与工程建设中有很大大进步,利用人工产生超低频信号在地质探测方面也有了很大发展;到了 20 世纪 90 年代,在超低频对上述需求基本能满足情况下,对更深的水下通信、深层地下资源的开发、地震预测的研究、日地空间的研究以及空间电磁环境对空间运载器的影响等,对极低频的研究又提出了更多更高的需求。无论地球物理还是无线电物理都对这一前沿科学进行了不懈地努力地探索。

我国无线电技术近年发展很快,移动通信、电视、卫星通信、卫星导航、军事电子等大量无线电都在向频率高端发展,但是我们也有一些专业人员,为了工作的需要,长期从事低频、甚低频、超低频和极低频的研究,随着我国对矿产石油资源的急速需求,我国地质与地球物理的科研人员也在地质结构研究上利用无线电低频频率对大地趋肤深度很深的特点开展了各种电磁探测方法的研究,实际超低频和极低频在目的空间包括大陆、海洋、大气层、电离层、磁层的研究都具有其特殊功能,相信这一领域的信息电子科学技术研究还会有更大的发展。跨学科的学术交叉融合也将会带来新领域的开拓和创新,本书提及的“极低频探地(WEM)工程”就是学科交叉的创新产物。

《极低频与超低频无线电技术》一书,涉及发射、接收、天线、电波传播、噪声干扰、国内外的研究与发展等,包括了无线电物理和地球物理领域极低频与超低频的有关最新知识和国内外研究成果,各章既包括理论分析,也重视工程技术的设计,同时显示了极低频与超低频的特色,内容十分丰富。目前全面介绍极低频与超低频无线电技术的图书还极为少见,尤其将无线电物理和地球物理共同关心的内容综合进行介绍更是罕见,本书中的许多内容是我国科学研究和工程技术人员多年积累的知识和创新成果,是我国信息电子学术书籍中近年少有的优秀作品,相信这本著作的出版将为我国电子科学技术在无线电低端频率的理论、应用和发展起到重要的参考作用。



2011 年 10 月

# 前 言

自从无线电技术发明以来,最早是用于超远程通信,第一次横越大西洋用的频率是 800 kHz,属长波波段,以后建立了许多远洋电台,频率从 82 kHz 降到 12 ~ 30 kHz,已经进入甚低频频段,低端无线电由于超远程无线电通信、导航、授时的需要,长波和甚长波在 20 世纪中期发展很快。此后随着无线电技术飞速的发展,微波接力、雷达、电视、卫星通信、卫星导航、移动通信、军事电子等的大量需求,无线电频率转向高端发展,在现代无线电频率中,新波段的研究往往都集中在更高波段的开发上,毫米波、亚毫米波甚至已经接近红外和光波。而在无线电频率中,300 Hz 以下的超低频、极低频和更低的频率虽然因携带的信息量很少往往不被重视,但它对介质的巨大穿透力和在地球周围空间的超远距离传播的特点是其他频段所无法完成的,这个特点近年来越来越引起人们的关注。

极低频、超低频无线电技术的应用领域十分广阔,早在 20 世纪中期就发明了利用大气中的天然超低频和极低频电磁信号来探测地质构造,其后又发明了人工产生超低频、极低频的方法,在地球物理方面,应用相当广泛,首先可用于对某些地区或目标进行长期的、系统的环境参数监视,例如利用极低频、超低频监视地下岩层电参数的变化进行地震预测的研究;利用不同深度地壳电阻率的变化进行地下和大陆架局部矿藏和油气层的探查;超低频信号还可以进行地下无线通信,电离层和磁层研究、寻找废弃放射性物质的储藏地;还可以用于山体塌方、泥石流预报研究、对大型水电站和原子能发电站等进行地质结构稳定性监视、地震短临电磁前兆的研究以及地球固体潮汐的研究等。最新的研究成果说明一个多用途的大功率发信系统其有效覆盖半径可达数千公里,探测深度可达数十公里,具有同时向不同的区域为所有用户发送事先计划好的信号的可能性,在有效覆盖范围内可以为广大的用户服务。在军事应用方面,极低频、超低频无线电技术由于对海水有很强的穿透能力,自 20 世纪 50 年代美国和前苏联为了核潜艇的水下安全通信动用了很大的力量研究开发超低频(30 ~ 300 Hz)岸对潜通信系统,1958 年美国开始研制北极星核潜艇的同时,就开始研究利用超低频解决与深水核潜艇进行指挥通信的问题。为此美国利用威斯康辛州国家森林公园花岗岩高电阻率地区建立了 WTF 试验台,1963 年利用 WTF 通过实验证实它可以和 4 600 km 外水下 100 m 深的潜艇进行通信。此后又在密执安州建立 MTF 试验台,两试验台用电话线连接同步发射在 1989 年 10 月正式投入使用,2005 年这套超低频对潜通信系统停止工作,实际他们正在研究更新的极低频发射技术,2001 年美国利用电离层加

热办法成功实现极低频(2.22 Hz)对大深度潜艇的通信发射,在8 000 km外成功接收。俄罗斯在前苏联时代从1967年即开始研究超低频对潜通信,1981年开始在北部科拉半岛高电阻率地区建设“宙斯(ZEVS)”超低频发射台,1984年底投入运行,其规模和效率都优于美国的WTF/MTF超低频台。军事应用对超低频、极低频无线电新技术的发展起到重要的推动作用。

无线电技术发明100多年以来,300 Hz以下频段的超低频、极低频和更低的频率虽然有不少的实际应用,在地球物理和无线电物理方面国内外也有不少文章和专著,但跨学科的交流很少,应用范围和方法不同,包括术语与理论推导也各有侧重,对极低频、超低频技术全面系统进行介绍的书籍更是少见。本书的各章作者长期从事极低频、超低频无线电物理与应用的研究,也是“极低频探地(WEM)工程”的主要参与者,该工程采用近代极低频、超低频无线电广播发射技术以及地质数据处理技术,提供一种全新的人工源无线电磁探测新方法(WEM法),主要用于地下资源探测、地震预测和其他前沿科学研究,该工程本身就是近代无线电物理与地球物理跨学科结合的产物,编写本书的目的就是希望加强无线电物理与地球物理学学科间的交流与沟通。本书的特点主要是通过极低频、超低频的收发系统,包括天线、无线电波传播、噪声处理等基础理论阐述了极低频、超低频在常用无线电波段很少考虑的一些特殊性质,同时在电波传播、噪声分析、天线设计、接收和发射系统设计等方面提供了较详细的论述和部分工程设计知识,对超低频、极低频无线电发展的最新技术也进行了介绍,其中包括部分国内外最新研究成果,这些都是本书具有的特色之处。

本书共分7章。在第1章概述中首先说明极低频和超低频的定义,介绍了极低频、超低频无线电的主要性能和特点,相应地补充了一些基础性的知识,便于读者在阅读后面一些章节时有所参考;第2章介绍了极低频与超低频的天线,包括发射天线、接地系统和天线性能的测量,以及电接收天线、磁接收天线的设计;第3章详细介绍了极低频与超低频无线电波的传播和它的理论计算方法,本章篇幅较大,比较详细的从基础出发进行了理论推导,体现了极低频、超低频与众不同的特色;第4章介绍了噪声与干扰分析,包括自然噪声、工业噪声、干扰与抗干扰,电磁辐射和电磁兼容等问题;第5章介绍了极低频与超低频信号的人工产生,包括大功率极低频与超低频发射机的总体技术、关键电路与功率合成、天线匹配电路的设计等;第6章介绍极低频与超低频信号的接收、调制与解调方法,包括地质探测用接收机及无线通信用接收机的关键技术;第7章介绍了极低频与超低频的应用与发展,介绍极低频与超低频在通信、地下资源探测、大陆架资源探测、地震预测、空间科学研究、极低频的研究与发展、最后介绍我国的极低频探地(WEM)工程建设的原理、试验和特点。每章的开始都简短介绍本章内容,各章最后都附有参考

文献,本书第1、7章由陆建勋执笔,第2章由张大奎执笔,第3章由袁翊执笔,第4章由张杨勇执笔,第5章由沈运先执笔,第6章由刘勇执笔。全书都是编者们长期从事极低频与超低频科学与技术研究和国内外交流积累的成果提炼而成。本书作者特别感谢赵国泽、汤吉、底青云等专家提供的科学实验数据和有关资料,丰富了本书的内容,也感谢李俊清、卓贤军、张佳炜和夏莹协助校正与整理本书部分章节。通过本书的阅读希望给关心极低频与超低频无线电技术的科学研究和工程技术人员提供有益的知识 and 参考。本书同时也希望做到加强不同学科间的交流。作者在撰写过程中,参考或引用了国内外一些专家学者的论著,在此一并表示感谢。由于对跨学科的知识有限,发生错误和疏漏之处在所难免,希望读者能及时给予指正。

**陆建勋**

2011年8月

# 目 录

|                                 |     |
|---------------------------------|-----|
| <b>第 1 章 概述</b>                 | 1   |
| 1.1 极低频与超低频的定义                  | 1   |
| 1.2 极低频与超低频的基本特性                | 2   |
| 1.3 极低频/超低频电磁波的近区、远区、波导区分析      | 5   |
| 1.4 天线的辐射方向与近区、远区、波导区的关系        | 9   |
| 1.5 天线的极化方向与处理                  | 12  |
| 1.6 电磁法探测地质的基本原理                | 13  |
| 1.7 极低频/超低频用于地质探测的基本原理与方法       | 14  |
| <b>第 2 章 极低频与超低频天线</b>          | 19  |
| 2.1 发射天线                        | 19  |
| 2.2 接地系统的设计                     | 39  |
| 2.3 发射天线系统性能的测量                 | 42  |
| 2.4 接收天线                        | 45  |
| <b>第 3 章 超低频和极低频电磁波的传播</b>      | 52  |
| 3.1 地面上空四种偶极子产生的近距离电磁场          | 52  |
| 3.2 电磁波波导传播理论                   | 67  |
| 3.3 地-电离层波导内垂直电偶极子和水平电偶极子的电磁场公式 | 75  |
| 3.4 椭圆极化波和地面上的合成水平电磁场           | 81  |
| 3.5 电磁场的方向性及其控制                 | 97  |
| 3.6 发射台产生的电磁场                   | 104 |
| 3.7 超低频和极低频电磁波理论的应用分析           | 118 |
| <b>第 4 章 噪声与干扰分析</b>            | 131 |
| 4.1 研究概况                        | 131 |
| 4.2 大气噪声的来源                     | 133 |
| 4.3 大气噪声时域特征                    | 135 |
| 4.4 噪声幅度统计特征                    | 141 |
| 4.5 与传播相关的噪声特征                  | 143 |
| 4.6 大气噪声强度统计特征                  | 148 |
| 4.7 大气以外的其他干扰来源                 | 169 |
| 4.8 工业噪声                        | 170 |

---

|            |                             |            |
|------------|-----------------------------|------------|
| 4.9        | 电磁辐射与电磁兼容问题 .....           | 171        |
| 4.10       | 大功率人工发射源的近场干扰分析 .....       | 174        |
| <b>第5章</b> | <b>极低频与超低频信号的人工产生 .....</b> | <b>179</b> |
| 5.1        | 功率器件的种类与特性 .....            | 179        |
| 5.2        | 极低频/超低频功率信号的产生 .....        | 190        |
| 5.3        | 功率合成 .....                  | 200        |
| 5.4        | 天线匹配调谐 .....                | 214        |
| 5.5        | 国外常用地质探测发射机介绍 .....         | 218        |
| <b>第6章</b> | <b>极低频与超低频接收与处理技术 .....</b> | <b>228</b> |
| 6.1        | 水下通信系统 .....                | 228        |
| 6.2        | 电磁法探测接收系统 .....             | 251        |
| 6.3        | 海洋电磁探测接收系统 .....            | 269        |
| 6.4        | 电磁波随钻测量系统 .....             | 281        |
| 6.5        | 低频段信号放大技术 .....             | 293        |
| <b>第7章</b> | <b>极低频与超低频的应用与发展 .....</b>  | <b>300</b> |
| 7.1        | 极低频与超低频无线电通信技术 .....        | 300        |
| 7.2        | 地下资源探测 .....                | 306        |
| 7.3        | 地震预测研究 .....                | 314        |
| 7.4        | 空间科学研究 .....                | 318        |
| 7.5        | 极低频国际研究概况 .....             | 323        |
| 7.6        | 极低频探地(WEM)工程 .....          | 331        |

# 第1章 概 述

本章对极低频与超低频的定义进行了说明,介绍了极低频、超低频无线电具有的基本性能和特点,例如在不同介质中传播的特性,近区、远区、波导区的关系与划分,天线极化,天线波瓣在不同条件下的变化等,补充了一些后面章节未曾论及的基础知识,最后介绍了电磁法探测地质的基本原理与方法,便于读者阅读后面一些章节时参考。

## 1.1 极低频与超低频的定义

按照《中华人民共和国无线电频率划分规定》,我国无线电频率从 0.03 Hz 至 3 000 GHz 共划分为 14 个频带(见表 1-1-1)。

表 1-1-1 中华人民共和国无线电频带划分规定

| 带号 | 频带名称     | 频率范围                | 波段名称     | 波长范围              |
|----|----------|---------------------|----------|-------------------|
| -1 | 至低频(TLF) | 0.03 ~ 0.3 Hz       | 至长波      | 1 000 ~ 10 000 Mm |
| 0  | 至低频(TLF) | 0.3 ~ 3 Hz          | 至长波      | 100 ~ 1 000 Mm    |
| 1  | 极低频(ELF) | 3 ~ 30 Hz           | 极长波      | 10 ~ 100 Mm       |
| 2  | 超低频(SLF) | 30 ~ 300 Hz         | 超长波      | 1 ~ 10 Mm         |
| 3  | 特低频(ULF) | 300 ~ 3 000 Hz      | 特长波      | 100 ~ 1 000 km    |
| 4  | 甚低频(VLF) | 3 kHz ~ 30 kHz      | 甚长波      | 10 ~ 100 km       |
| 5  | 低频(LF)   | 30 kHz ~ 300 kHz    | 长波       | 1 ~ 10 km         |
| 6  | 中频(MF)   | 300 kHz ~ 3 000 kHz | 中波       | 100 ~ 1 000 m     |
| 7  | 高频(HF)   | 3 MHz ~ 30 MHz      | 短波       | 10 ~ 100 m        |
| 8  | 甚高频(VHF) | 30 MHz ~ 300 MHz    | 米波       | 1 ~ 10 m          |
| 9  | 特高频(UHF) | 300 MHz ~ 3 000 MHz | 分米波      | 1 ~ 10 dm         |
| 10 | 超高频(SHF) | 3 GHz ~ 30 GHz      | 厘米波      | 1 ~ 10 cm         |
| 11 | 极高频(EHF) | 30 GHz ~ 300 GHz    | 毫米波      | 1 ~ 10 mm         |
| 12 | 至高频(THF) | 300 GHz ~ 3 000 GHz | 丝米波/亚毫米波 | 1 ~ 10 dmm        |

注 1:频率和波长范围均含上限,不含下限。注 2:1 Mm(兆米) = 1 000 km。

我国无线电频率划分的方法与国际电信联盟 ITU 标准是相同的,本书涉及的范围实际包括了其中最低的 4 个频带,即 0.03 Hz 至 300 Hz 之间的无线电频率,统称为极低频与超低频(实际包含至低频),有些场合为了简化又统称为极低频,如“极低频探地(WEM)工程”(0.1 ~ 300 Hz)实际包含了极低频、超低频和至低频的频段。

国际上对无线电频率的划分主要有国际电信联盟 ITU 标准和 IEEE 标准之分。IEEE 标准在国际学术性文章中比较通用,对无线电频率的划分与 ITU 有所不同,从 3 Hz ~ 300 GHz 共分 11 个频带(见表 1-1-2)。其中 30 ~ 300 Hz 称为 ELF,3 ~ 30 Hz 称为 ULF。

表 1-1-2 IEEE 的无线电频带划分规定

| 名称                              | 频率范围             | 用途             |
|---------------------------------|------------------|----------------|
| ULF (Ultra - Low Frequencies)   | 3 ~ 30 Hz        |                |
| ELF (Extremely-Low Frequencies) | 30 ~ 300 Hz      | 海军战略通信         |
| VF (Voic Frequencies)           | 300 ~ 3 000 Hz   |                |
| VLF (Very-Low Frequencies)      | 3 kHz ~ 30 kHz   | 海军战略通信         |
| LF (Low Frequencies)            | 30 kHz ~ 300 kHz | 海军通信,导航,导航信标   |
| MF (Medium Frequencies)         | 300 kHz ~ 3 MHz  | 导航,导航信标,调幅广播   |
| HF (High Frequencies)           | 3 MHz ~ 30 MHz   | 短波,业余无线电       |
| VHF (Very-High Frequencies)     | 30 MHz ~ 300 MHz | 调频广播,电视,警用/救火  |
| UHF (Ultra-High Frequencies)    | 300 MHz ~ 3 GHz  | 卫星,GPS,移动电话,电视 |
| SHF (Super-High Frequencies)    | 3 GHz ~ 30 GHz   | 卫星通信           |

本书的极低频(3 ~ 30 Hz)按国家标准应为 ELF。IEEE 同频段称 ULF,为避免混淆应以中文为准,有的地方写极低频(ELF/ULF)以示同一频段。

1.2 极低频与超低频的基本特性

1.2.1 在不同介质中的穿透能力

无线电波对介质具有一定的穿透能力,我们用趋肤深度的概念表示穿透深度,即电场或磁场幅度衰减到原值的 1/e 的深度(衰减到原值的 36.8% 的深度)称为趋肤深度,用  $\delta$  表示。

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi\mu_0 f \sigma}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\lambda}{30\sigma}}$$

(1.2.1)

式中  $\sigma$ ——介质导电率;  
 $\lambda$ ——波长, $\lambda = 1/f$ 。

趋肤深度  $\delta$  也可以近似的用下式表示

$$\delta \approx 1/2\pi \sqrt{1 - \rho_a T}$$

(1.2.2)

式中  $\rho_a$ ——介质电阻率, $\rho_a = \frac{1}{\sigma}$ ;  
 $T$ ——电磁波的周期, $T = \frac{1}{f}$ 。

0.1 ~ 300 Hz 的极低频趋肤深度  $\delta$  值视不同地质的导电率  $\sigma$  而定,其深度可从几百米到几十千米甚至上百千米,这就是应用电磁场探测地下介质电性的物理基础。不同介质下的趋肤深度见表 1-2-1。

表 1-2-1 不同频率电磁波在不同地质条件下的趋肤深度

(单位:km)

| $f/\text{Hz}$<br>$\sigma/(\text{s/m})$ | 300  | 200  | 100  | 75   | 45   | 30   | 10   | 5    | 1    | 0.5  | 0.1  |
|----------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 太古代岩*<br>$4 \times 10^{-5}$            | 4.61 | 5.63 | 7.96 | 9.17 | 11.8 | 14.5 | 25.2 | 35.6 | 79.6 | 112  | 252  |
| 花岗岩<br>$2 \times 10^{-4}$              | 2.06 | 2.52 | 3.56 | 4.1  | 5.3  | 6.5  | 11.3 | 15.9 | 35.6 | 50.3 | 112  |
| 干沙、多岩陆地<br>$1 \times 10^{-3}$          | 0.92 | 1.13 | 1.59 | 1.83 | 2.37 | 2.9  | 5.04 | 7.12 | 15.9 | 22.5 | 50.3 |
| 农田、丘陵<br>$2 \times 10^{-3}$            | 0.65 | 0.8  | 1.13 | 1.3  | 1.68 | 2.06 | 3.56 | 5.03 | 11.3 | 15.9 | 35.6 |
| 草原、丘陵森林<br>$5 \times 10^{-3}$          | 0.41 | 0.51 | 0.71 | 0.82 | 1.06 | 1.3  | 2.25 | 3.18 | 7.11 | 10.1 | 22.5 |

\* 俄罗斯科拉半岛 ZEVS 台建立在太古代结晶岩上。

从表 1-2-1 可以看到,电磁波的频率越低,介质的导电率越低,其“趋肤深度”就越大。改变电磁波的频率即相当于改变了“趋肤深度”,利用这一特点可以探测不同地层的特性,这就是类似 CT 一样的“层析方法”(Tomographical method)。

0.1 ~ 300 Hz 频率范围内的电磁波对海水也有很强的穿透能力(见表 1-2-2),由于大气噪声进入海水也要同样衰减,因此极低频电磁波也有可能对大陆架地层进行探测。

无线电波在海水中的衰减公式如下:

$$\alpha = 0.0173\sqrt{f \cdot \sigma} \quad (1.2.3)$$

式中  $\sigma$ ——海水介质导电率,当  $\sigma = 4 \text{ s/m}$  时,  $\alpha = 0.0346\sqrt{f}$ 。

表 1-2-2 大陆架 - 不同频率在海水中的衰减(海水导电率:4 s/m)

| 频率/Hz                      | 300 | 100   | 75  | 30   | 10   | 5     | 3    | 1     | 0.1   |
|----------------------------|-----|-------|-----|------|------|-------|------|-------|-------|
| 衰减率 $\alpha/(\text{dB/m})$ | 0.6 | 0.346 | 0.3 | 0.19 | 0.11 | 0.077 | 0.06 | 0.035 | 0.011 |
| 衰减 30 dB 深度/m              | 50  | 87    | 100 | 158  | 272  | 390   | 500  | 867   | 2700  |

### 1.2.2 电磁波与声波在不同介质中的波长比较

声波在空气中传播速度按 330 m/s 计算,海水中按 1 500 m/s 计算,岩石中按 3 000 m/s 计算,人工地震波频率范围设为 0.1 ~ 100 Hz,如表 1-2-3 所示。

表 1-2-3 声波在不同介质中的传播速度

| 频率/Hz | 空气中      | 海水中      | 岩石中     |
|-------|----------|----------|---------|
| 0.1   | 3.3 km/s | 15 km/s  | 30 km/s |
| 1     | 330 m/s  | 1.5 km/s | 3 km/s  |
| 100   | 3.3 m/s  | 15 m/s   | 30 m/s  |

电磁波在空气中传播速度按  $3 \times 10^8$  m/s 计算,在  $\sigma = 4$  s/m 海水中按  $1.5 \times 10^3$  m/s 计算,在  $\sigma = 0.001$  s/m 岩石中按  $3.1 \times 10^4$  m/s 计算,频率范围设为 0.1 ~ 100 Hz,电磁波在不同介质中的波长如表 1-2-4。括号内为电磁波波长相对声波波长的倍数。

表 1-2-4 电磁波在不同介质中的波长

| 频率<br>/Hz | 空气中波长<br>$\sigma = 0$                         | 海水中波长<br>$\sigma = 4$ s/m | 岩石中波长                |                     |
|-----------|-----------------------------------------------|---------------------------|----------------------|---------------------|
|           |                                               |                           | $\sigma = 0.001$ s/m | $\sigma = 0.01$ s/m |
| 0.1       | $300 \times 10^4$ km<br>( $90 \times 10^4$ 倍) | 5 km<br>(0.33 倍)          | 310 km<br>(10 倍)     | 98 km<br>(3.3 倍)    |
| 1         | $30 \times 10^4$ km<br>( $90 \times 10^4$ 倍)  | 1.58 km<br>(1)            | 98 km<br>(32 倍)      | 310 km<br>(10 倍)    |
| 100       | $3 \times 10^3$ km<br>( $90 \times 10^4$ 倍)   | 158 m<br>(10 倍)           | 9.8 km<br>(320 倍)    | 3.1 km<br>(100 倍)   |

可见在海水中 1 Hz 电磁波波长与 1 Hz 声波波长基本相等,在此基础上频率越低电磁波波长比声波波长越短,频率越高电磁波波长比声波波长越长。在岩石中则电磁波波长相对声波波长要大数倍到上百倍。可见电磁波在海洋地质探测中在低频端有其优势。

### 1.2.3 电磁波的传播衰减特性

极低频/超低频电磁波传播十分稳定,由于波长很长,在电离层波导传播情况下在超低频和极低频频段,地-电离层波导内只能传播一个模式,即 0 阶横磁波模式( $TM_0$ )。传播模式简单,干扰小,极低频在地-电离层波导传播模式下每 km 衰减不到 1 dB,白天和夜间由于电离层高度的变化衰减率虽有所不同,100 Hz 以下也只有零点几 dB 的变化,因此即使在电离层受磁暴或高空原子弹爆炸影响时,极低频/超低频电磁波相对其他频率传播的扰动要小得多,如

图 1-2-1 所示。

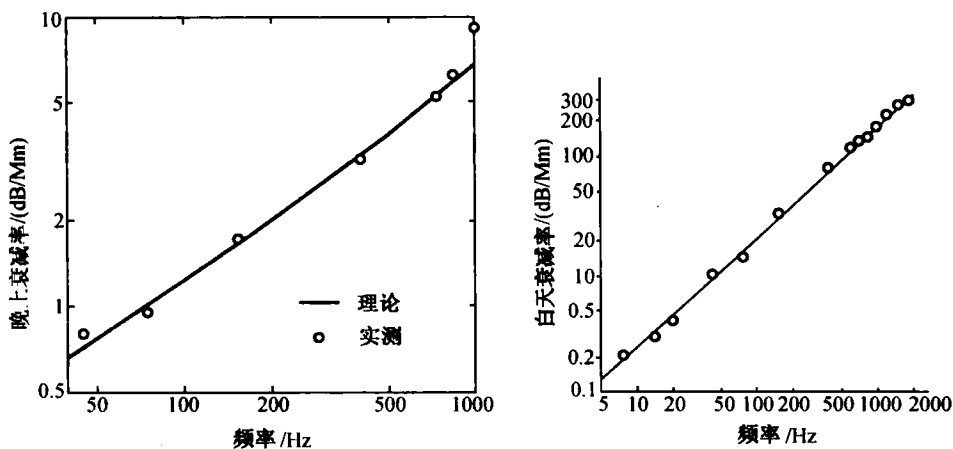


图 1-2-1 超低频电磁波传播衰减率理论计算与实测资料(左)(晚上)和(右)白天对比

### 1.3 极低频/超低频电磁波的近区、远区、波导区分析

#### 1.3.1 用场强公式计算方法的分析

极低频/超低频无线电波的传播从发射源算起按距离可划分为三个区域:近区(准静态场、近场)、远区(感应场、远场)和波导区(辐射场、波导场),三个区之间的边界位置与大地电阻率、发射信号的频率以及电离层高度等参数有关。计算近区、远区和波导区的划分有多种方法。用场强计算公式的表达方法可以较准确地说明三个区域划分的含义,本书第4章详细地用计算公式分析了地面上垂直的电偶极子和与地面平行的电偶极子,垂直磁偶极子和水平磁偶极子四种偶极子产生的近距离电磁场。这里所谓的近距离电磁场,是指电磁场计算中可以忽略地面上空电离层影响的最远距离范围内的电磁场。这个距离大致等于2~3倍电离层高度,即100~200 km。在这样的距离范围内,地面可以看作是平面。

以地面附近X方向两端接地天线(相当水平磁偶极子)的电磁场计算为例,从地面上水平磁偶极子的电磁场导出地面上水平电偶极子的电磁场。这样导出的场被称为一次场。从地面上的一次水平磁场通过边界条件导出水平电场和垂直磁场,称为二次场。把一次场公式与相应的二次场公式相加才是完整的地面附近水平磁偶极子天线的近似代数公式值,下面仅引用其产生的X方向总电磁场直角分量公式如下:

$$E_x = \frac{\eta_f}{j\omega\mu_0} \frac{I_m dl}{\pi r^3} (1 + jk_0 r) e^{-jk_0 r} (3\cos^2\varphi - 2) - \frac{\eta_f}{j\omega\mu_0} \frac{I_m dl}{2\pi r^3} k_0^2 r^2 e^{-jk_0 r} \cos^2\varphi \quad (1.3.1)$$

$$H_x = \frac{3}{2j\omega\mu_0} \frac{I_m dl}{2\pi r^3} (1 + jk_0 r) e^{-jk_0 r} \sin 2\varphi - \frac{1}{2j\omega\mu_0} \frac{I_m dl}{2\pi r^3} k_0^2 r^2 e^{-jk_0 r} \sin 2\varphi \quad (1.3.2)$$

尽管公式是多项,很复杂,但可以看出该公式中包含  $\frac{1}{r^3}$ ,  $\frac{1}{r^2}$  和  $\frac{1}{r}$  项,就代表了近场、远场和辐射场的划分,图 1-3-1 所示为海面上垂直电场的近场、远场和辐射场随距离的不同衰减曲线,代表公式计算结果。虽然明确划分三个区域是困难的,但可以看出在距离最近的区域内符合  $\frac{1}{r^3}$  关系,其次才是  $\frac{1}{r^2}$  的关系,最后是  $\frac{1}{r}$  关系。

下面说明不同频率的影响:图 1-3-2 为利用近似公式值计算水平磁场天线在 90 Hz 辐射的磁场和电场强度与距离的关系,图 1-3-3 为同样天线工作在 10 Hz 辐射的磁场和电场强度与距离的关系,可见 90 Hz 辐射的磁场和电场分别在 400 m ~ 200 km 附近,  $H\phi$  和  $E\theta$  开始呈现  $\frac{1}{r}$  的辐射/波导传输特性,而在 10 Hz 辐射的磁场和电场强度与距离的关系分别在 1 000 m ~ 2 000 km 附近才呈现  $\frac{1}{r}$  的波导传输特性,说明频率越低同样天线远区和波导

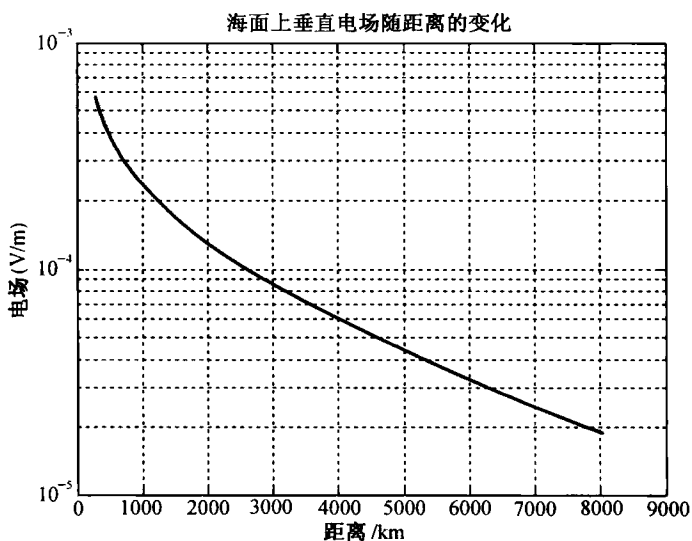


图 1-3-1 单根发射天线产生的垂直电场  
随距离的变化 (100 Hz)

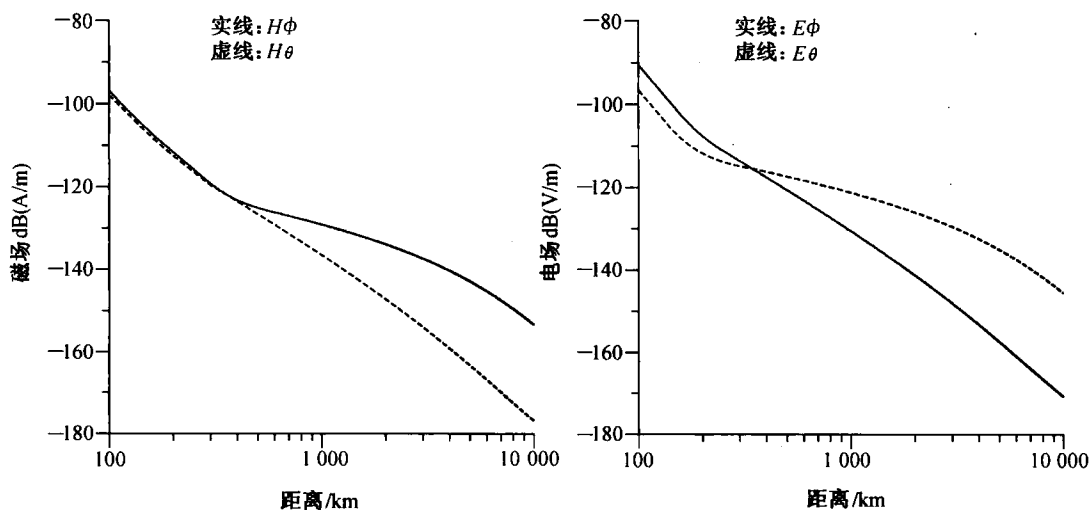


图 1-3-2 90 Hz 辐射的磁场和电场强度与距离的关系 (白天)

区转换距离越远,磁场和电场还有所不同。

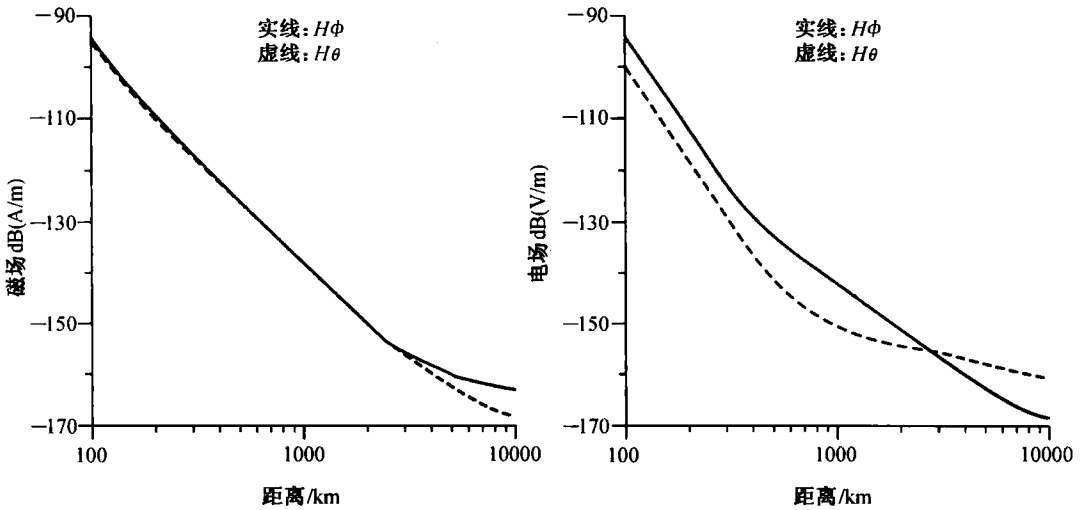


图 1-3-3 10 Hz 辐射的磁场和电场强度与距离的关系(白天)

### 1.3.2 近场与远场的其他划分方法

利用极低频进行大地测量的基本条件是穿透地层的电波必须是平面垂直入射波,这对利用自然源的 MT 法是没有问题的,但对人工源则是比较重要的问题,因为人工源是利用两端接地的天线来产生电磁辐射的,通常除有空间辐射地电磁波外还有地下电流产生的地层波在地下传播,当地层波  $\lambda e$  衰减到很小而只有空间辐射的电磁波存在时才可以视为是平面垂直入射波。

地层波在地下衰减

$$\frac{E_r}{E_0} = e^{-2\pi r/\lambda e}, \text{ 当 } r = \frac{\lambda e}{2\pi}, \frac{E_r}{E_0} = e^{-1} \text{ 定义此时 } r = \delta, \delta = \frac{\lambda e}{2\pi} \text{ 即趋肤深度, 当 } r = \lambda e, \frac{E_r}{E_0} = e^{-2\pi} =$$

0.001 86 基本可忽略不计,即地层波幅度可以忽略时定义为远场,即  $r \geq \lambda e$ ,由于  $\lambda e = 2\pi\delta$ 。在地质勘探中,划分近场与远场通常以  $r \leq 2\pi\delta$  定义为近区,  $r \geq 2\pi\delta$  定义为远区,通常以  $6\delta$  定义为近区与远区的划分距离,这就是前面计算公式中 ( $\rho \gg \delta$ ) 的理由,因为只有远场和波导场才可以将一次场近似为平面垂直入射波来计算。

另一种方法是从近场计算出发去计算近区与远区的划分,以  $1/r^3$  和  $1/r^2$  场强关系来划分

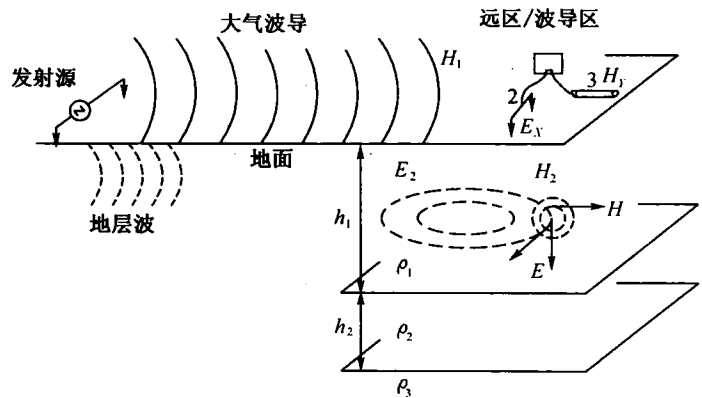


图 1-3-4 人工源电磁法示意图

近区与远区,以 $|E_x|$ 或 $|H_y|$ 分量的振幅相差 10% 为标准来划分远区与波导区。用近场计算近区要复杂得多,因为它的天线很长必须考虑进去,同时天线的方向性也考虑在内,根据文献 [1] 计算,用  $f=0.1\text{ Hz}$ ,  $f=5\text{ Hz}$  和  $f=100\text{ Hz}$  (大地电阻率  $5\,000\ \Omega$ , 电离层高  $60\text{ km}$ , 天线长  $2L$ ) 情况下得到如下结果。

根据图 1-3-5 和利用三个频率的数据可以推算  $0.1\sim 300\text{ Hz}$  的近区、远区和波导区边界与频率的关系曲线,如图 1-3-6 所示。

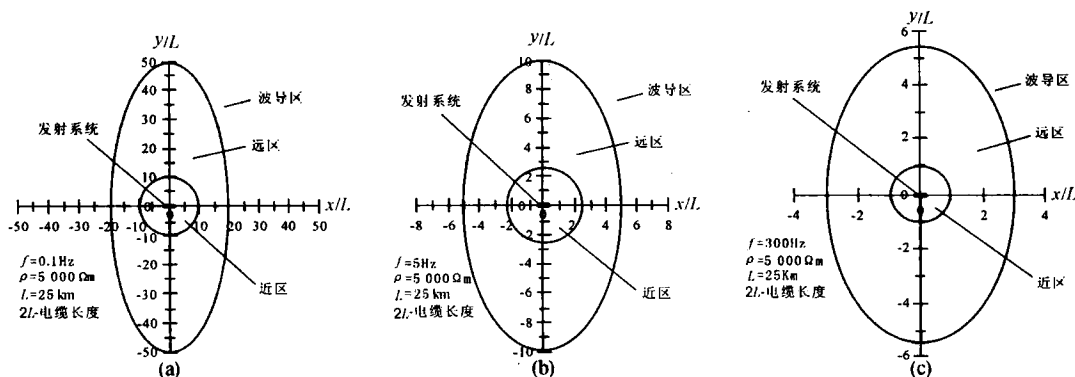


图 1-3-5 发射系统在发射频率为  $0.1\text{ Hz}$  (a),  $5\text{ Hz}$  (b),  $300\text{ Hz}$  (c) 时近区、远区和波导区的边界

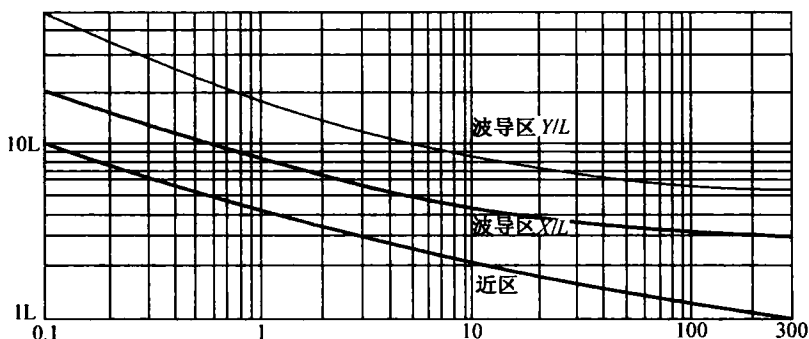


图 1-3-6 近区、波导区边界与频率的关系  
(大地电阻率  $5\,000\ \Omega$ , 电离层高  $60\text{ km}$ , 天线长  $2L$ )

在  $f=0.1\text{ Hz}$  时近区边界应在  $10L$ , 如此近似推算不同频率和在天线长度的近区、波导区距离,例如天线  $60\text{ km}$  时各种频率近区范围见表 1-3-1 所示 (小于下列数值为近区)。

表 1-3-1  $60\text{ km}$  天线各频率的近区范围

(单位:  $\text{km}$ )

| Hz                | 0.1 | 0.5 | 1   | 5   | 10 | 30  | 70  | 100 | 300 |
|-------------------|-----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|-----|
| $L$ 的倍数           | 10  | 5   | 4.1 | 2.4 | 2  | 1.4 | 1.2 | 1.1 | 0   |
| $60\text{ km}$ 天线 | 300 | 150 | 127 | 75  | 63 | 49  | 41  | 37  | 30  |