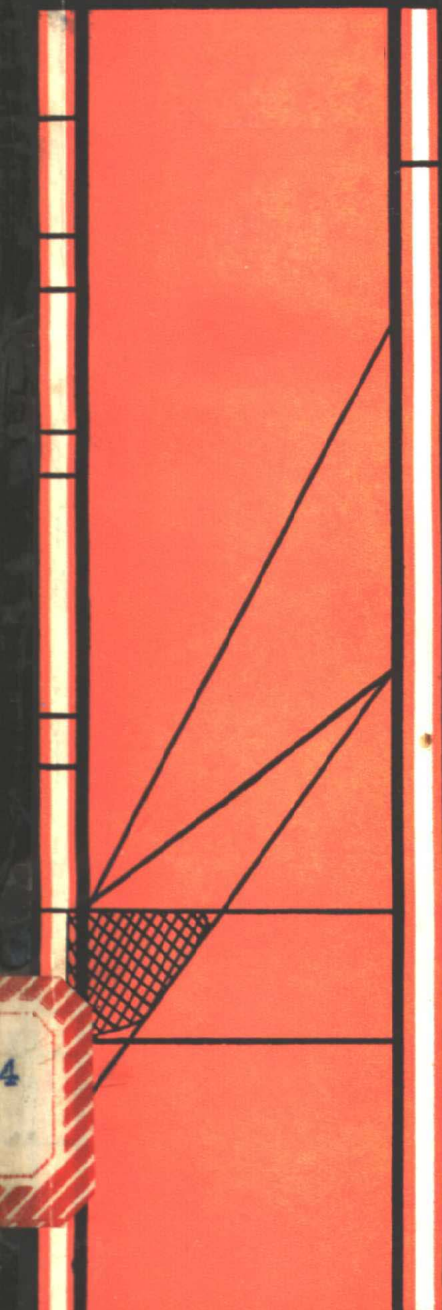


[ 苏 ]    A · Д · 佩特罗夫斯基    著

# 地下无线 电波法

地质出版社



# 地下无线电波法

〔苏〕 A.Д.佩特罗夫斯基 著

陆克 蔡刚民 译

邢凤桐 校

地质出版社

本书阐述普查和勘探金属矿床的地下无线电波法的理论基础和方法技术。全书分两部分：第一部分探讨岩石和矿石的有效电磁参数和频率的关系、无线电波在各向异性介质和层状介质中的传播特点，以及存在各种形状、大小的非均匀体时电磁波绕射的规律性；第二部分对无线电波法进行分类，介绍了仪器，并研究了在不同地球物理-地质条件下解决普查和勘探问题的实例。本书可供有关地球物理勘探人员和地质人员参考。

А. Д. Петровский  
РАДИОВОЛНОВЫЕ МЕТОДЫ  
В ПОДЗЕМНОЙ  
ГЕОФИЗИКЕ

ИЗДАТЕЛЬСТВО «НЕДРА»

Москва 1971

地下无线电波法

〔苏〕 А. Д. 佩特罗夫斯基 著

陆克 蔡刚民 译

邢凤桐 校

地质部书刊编辑室编辑

责任编辑 张怀素

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：850×1168<sup>1</sup>/<sub>32</sub> 印张：7<sup>1</sup>/<sub>8</sub> 字数：201,000  
1981年10月北京第一版·1981年10月北京第一次印刷

印数1—1,680册·定价2.30元

统一书号：15038·新692

## 前 言

本书从理论基础到野外测量方法系统地叙述了地下无线电波法。本书不仅研究了已经得到实际应用的那些方法，而且也探讨了有希望的一些方法；后者会使普查和勘探金属矿床的方法更加完善。

在一部著作中既要叙述理论基础和野外测量方法，又要叙述方法的实际应用，就有必要分成两大部分。

第一部分研究了无线电波法的物理-数学基础。在探讨无线电波法的理论时，除了已知严格的和近似的解以外，还利用了数学分析、数值计算和模型实验的新结果。

本书的篇幅有限，我们不再罗列已知问题的一系列求解过程，这样就有可能较详细地讨论物理解释和分析各种现象的种种特点。在引用新结果的情况下，结论的叙述是相当详细的，如各向异性介质中的场、非理想导电半平面上或带上的绕射。

第二部分叙述了地下无线电波法的方法技术。这一部分与第一部分无关，可以单独利用。但是应当指出，为了正确地解释测量结果，了解所观测到的各种现象的特点是很重要的，而这些特点正是在第一部分叙述理论时所探讨的。

第二部分主要是根据作者取得的资料写成的；同时也利用了其他研究人员的著作，这些著作涉及了地下无线电波法的各种不同方案。

作者向所有曾经在研究工作中，在把研究成果应用于野外实践的过程中，以及在本书编写中给予帮助的人们致以谢意。

## 译者的话

地下无线电波法是地下物探方法的一种，近年来有很大发展。它的主要优点是能够发现钻孔打漏的矿体，解决已打到的矿体是否相连的问题；在有利的地质条件下，根据地下无线电波资料可以放稀勘探网度，求得矿床储量。生产实践证明，它有显著的经济效果。目前这种方法不仅用于勘探金属矿床，还用于寻找非金属矿（如压电石英）和解决工程地质问题，应用范围在不断扩大。

我国有许多部门应用地下无线电波法，积累了不少资料，但尚未整理出版。为了满足科研和生产的需要，推动方法的发展，我们翻译了这本《地下无线电波法》，供有关同志参考。

本书全面系统地介绍了地下无线电波法的理论基础、方法分类、仪器、野外工作方法及资料的推断解释，最后列举了找矿实例。不足之处是理论基础与实际应用结合得不够紧密。

本书原名《地下地球物理中的无线电波法》(Радиоволновые методы в подземной геофизике)。为简单明确起见，译为《地下无线电波法》。在翻译过程中，我们订正了原书中的一些错误，个别与技术无关的语句没有译出。全书由邢凤桐同志校对，吴以仁、纪英楠、瞿兴昌、周鹤鸣同志进行了认真的审阅，在此表示深切的谢意。

译者的业务水平、外文水平和汉语表达能力不高，译稿虽经多次校对、润色，但缺点、错误仍然难免，敬请读者批评指正。

## 绪 论

凡是发射装置和接收装置（或其中之一）置于钻孔中或山地工程中的物探方法，都称为地下物探方法。相应地可以分成钻孔的方法、坑道的方法及钻孔-坑道的方法。地下物探方法作为一种独立的物探方法的出现，还是不久以前的事；那时普查和勘探深部固体矿床的必要性大大增加，而地面物探方法不能达到这个深度。

地下物探方法的基本任务是：发现、识别（分类）、圈定矿体和其他非均匀体（如充水溶洞）的大小和形状；估计钻孔和山地工程周围有用组分的含量。

测井方法和坑道核物理试验只是用来研究井壁和坑壁上的岩石和矿石，一般来说，不属于地下物探方法。之所以把测井方法划分出来，是因为它主要解释一维的问题；而地下物探方法解释的是二维或三维的问题。二维或三维的问题使地下物探同地面物探接近起来。

因此，目前地下物探正借用和发展测井的测量技术及地面物探的解释方法，并加以综合。

在综合地质勘探工作中，地下物探具有测井和地面物探的特点。与测井类似之处是地下物探与钻孔的钻进和山地工程的掘进同时进行；它们又象地面物探，可以指导钻探及矿山勘探工作。地下物探较之测井方法的优点是：它能够研究钻孔旁和坑道旁的空间；而较之地面物探的优点是：它能够研究深部问题。矿床的构造是各种各样的，因此近年来有必要制定一套地下物探综合方法，其中包括无线电波法。

地下无线电波法的工作频率在0.01至200兆赫范围内。在这个频段内，生产上用的频段是0.5至10兆赫，部分地使用了0.15

至 0.5 兆赫及 10 至 40 兆赫频段。某些实验工作正在研究 0.01 至 0.15 兆赫和 40 至 200 兆赫的范围。在一定的地电条件下, 使用这些频段颇有远景。

为了普查和勘探有用矿产而利用无线电波的想法, 虽然在发明无线电之后很快就产生了, 但实际应用无线电波法是在五十年代才开始。

苏联于 1923 年至 1925 年, 在 A. A. 佩特罗夫斯基 (Петровский) 领导下, 已开始研制各种不同的无线电波法方案。A. A. 佩特罗夫斯基及其同事们从 1923 年至 1941 年所撰写的著作, 涉及了应用无线电波的广泛问题, 不仅用来普查和勘探, 而且用来解决某些工程地质问题<sup>[31, 32]</sup>。这些著作和以后的大部分著作一样, 着重讨论了阴影法; 后来把阴影法称为无线电波透视法。在战后年代里, 许多研究单位如全苏物探研究所, 列宁格勒矿业学院, 苏联科学院乌拉尔分院, 莫斯科地质勘探学院, 莫斯科大学, 全苏勘探技术研究所, 中央有色、稀有和贵金属矿山勘探技术研究所, 中亚地质和矿物原料研究所等都从事了无线电波透视法和无线电波法其它方案的研制工作。与坑道方案同时, 钻孔方案很快地发展起来, 进行了大量的实验研究<sup>[55, 85, 91, 92, 111, 113, 116-119]</sup>, 制造了仪器样机<sup>[40, 43, 117]</sup>, 研究了理论基础<sup>[28, 40]</sup>。在地质勘探的实际工作中开始使用这些方法<sup>[69, 71, 74, 75, 109]</sup>。国外同时进行实验工作的有: 保加利亚、美国、捷克斯洛伐克和其他国家<sup>[53, 83, 127-130]</sup>。

有关研究岩石的电磁性质<sup>[9, 15, 30]</sup>、绕射理论、波的传播<sup>[13, 16, 47, 48, 49]</sup>和矿山问题的著作<sup>[38, 124]</sup>, 对地下无线电波法的发展都有很大的意义。

所要研究的问题涉及范围很广, 并且非常复杂, 因此产生了一些独立的研究方向, 如无线电波法的理论、测量方法、仪器和普查勘探方法。

本书虽然对这些方面都有所反映, 但是着重研究理论、测量方法、观测方法技术和解释推断的一般问题。本书的两大部分再细分为六章, 每一部分为三章。第一章介绍了岩矿电磁性质的特

征及其在无线电波法频段内与频率的关系。详细叙述了均匀各向异性介质中电偶极子场的求解问题。第二章探讨了存在平面分界面和平面层时偶极子元的场及平面波的场，同时计算了平面分界面对测量结果的影响。较详细地讨论了用于求解和对测量结果进行物理解释的阻抗边界条件。第三章叙述了非理想导电半平面上平面波绕射问题的近似求解结果，扼要地分析了半平面、带、圆板、球和圆柱体产生的异常场。第四章试图对无线电波法的测量方法和装置进行分类。第五章简单地描述了仪器和观测方法，其细节一般在说明书和方法手册中都有。第六章讨论了解释推断方法，并列举了无线电波法在不同地质勘探阶段的应用实例。

# 目 录

|          |   |
|----------|---|
| 绪论 ..... | 1 |
|----------|---|

## 第一部分 理论基础

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| 第一章 均匀各向同性和各向异性介质中的场 .....      | 4  |
| § 1 均匀各向同性岩石和矿石的电磁性质 .....      | 4  |
| § 2 浸染状矿石的有效参数 .....            | 13 |
| § 3 各向同性介质中偶极子元的场, 平面波 .....    | 19 |
| § 4 均匀各向异性介质中横向电偶极子的场 .....     | 26 |
| § 5 各向异性介质的波参数 .....            | 33 |
| § 6 纵向电偶极子的场 .....              | 35 |
| 第二章 层状介质中的场 .....               | 43 |
| § 7 存在两个半空间时的偶极子, 严格的解 .....    | 43 |
| § 8 平面波的反射系数和透射系数, 阻抗边界条件 ..... | 50 |
| § 9 偶极子场的近似公式 .....             | 59 |
| 第三章 存在有限地质体时的场 .....            | 75 |
| § 10 偶极子元场中的理想导电半平面 .....       | 75 |
| § 11 平面波场中具有任意参数的半平面 .....      | 81 |
| § 12 带上和缝隙上的绕射 .....            | 91 |
| § 13 圆板, 球体, 圆柱体 .....          | 97 |

## 第二部分 测量方法和推断解释方法

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 第四章 地下无线电波法的分类及其一般特点 .....   | 109 |
| § 14 分类原则 .....              | 109 |
| § 15 吸收系数和波长 .....           | 112 |
| § 16 无线电波透视法和反射法极限作用距离 ..... | 117 |
| § 17 射线法 .....               | 121 |
| § 18 绕射-射线法 .....            | 127 |

|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| § 19 绕射法 .....                | 134 |
| § 20 其他测量方法的特点 .....          | 139 |
| 第五章 仪器和观测方法 .....             | 149 |
| § 21 仪器 .....                 | 149 |
| § 22 电天线和天线效应 .....           | 158 |
| § 23 磁天线（环形天线）及其与电天线的比较 ..... | 171 |
| § 24 观测方法，频率和测量装置的选择 .....    | 178 |
| 第六章 地下无线电波法资料的解释方法和实例 .....   | 193 |
| § 25 正常场 .....                | 193 |
| § 26 划分异常和圈定异常 .....          | 196 |
| § 27 根据无线电波法资料确定异常体的特点 .....  | 203 |
| § 28 地下无线电波法的应用实例 .....       | 213 |
| 结论 .....                      | 228 |
| 参考文献 .....                    | 232 |

## 绪 论

凡是发射装置和接收装置（或其中之一）置于钻孔中或山地工程中的物探方法，都称为地下物探方法。相应地可以分成钻孔的方法、坑道的方法及钻孔-坑道的方法。地下物探方法作为一种独立的物探方法的出现，还是不久以前的事；那时普查和勘探深部固体矿床的必要性大大增加，而地面物探方法不能达到这个深度。

地下物探方法的基本任务是：发现、识别（分类）、圈定矿体和其他非均匀体（如充水溶洞）的大小和形状；估计钻孔和山地工程周围有用组分的含量。

测井方法和坑道核物理试验只是用来研究井壁和坑壁上的岩石和矿石，一般来说，不属于地下物探方法。之所以把测井方法划分出来，是因为它主要解释一维的问题；而地下物探方法解释的是二维或三维的问题。二维或三维的问题使地下物探同地面物探接近起来。

因此，目前地下物探正借用和发展测井的测量技术及地面物探的解释方法，并加以综合。

在综合地质勘探工作中，地下物探具有测井和地面物探的特点。与测井类似之处是地下物探与钻孔的钻进和山地工程的掘进同时进行；它们又象地面物探，可以指导钻探及矿山勘探工作。地下物探较之测井方法的优点是：它能够研究钻孔旁和坑道旁的空间；而较之地面物探的优点是：它能够研究深部问题。矿床的构造是各种各样的，因此近年来有必要制定一套地下物探综合方法，其中包括无线电波法。

地下无线电波法的工作频率在0.01至200兆赫范围内。在这个频段内，生产上用的频段是0.5至10兆赫，部分地使用了0.15

至 0.5 兆赫及 10 至 40 兆赫频段。某些实验工作正在研究 0.01 至 0.15 兆赫和 40 至 200 兆赫的范围。在一定的地电条件下, 使用这些频段颇有远景。

为了普查和勘探有用矿产而利用无线电波的想法, 虽然在发明无线电之后很快就产生了, 但实际应用无线电波法是在五十年代才开始。

苏联于 1923 年至 1925 年, 在 A. A. 佩特罗夫斯基 (Петровский) 领导下, 已开始研制各种不同的无线电波法方案。A. A. 佩特罗夫斯基及其同事们从 1923 年至 1941 年所撰写的著作, 涉及了应用无线电波的广泛问题, 不仅用来普查和勘探, 而且用来解决某些工程地质问题<sup>[31, 32]</sup>。这些著作和以后的大部分著作一样, 着重讨论了阴影法; 后来把阴影法称为无线电波透视法。在战后年代里, 许多研究单位如全苏物探研究所, 列宁格勒矿业学院, 苏联科学院乌拉尔分院, 莫斯科地质勘探学院, 莫斯科大学, 全苏勘探技术研究所, 中央有色、稀有和贵金属矿山勘探技术研究所, 中亚地质和矿物原料研究所等都从事了无线电波透视法和无线电波法其它方案的研制工作。与坑道方案同时, 钻孔方案很快地发展起来, 进行了大量的实验研究<sup>[55, 85, 91, 92, 111, 113, 116-119]</sup>, 制造了仪器样机<sup>[40, 43, 117]</sup>, 研究了理论基础<sup>[28, 40]</sup>。在地质勘探的实际工作中开始使用这些方法<sup>[69, 71, 74, 75, 109]</sup>。国外同时进行实验工作的有: 保加利亚、美国、捷克斯洛伐克和其他国家<sup>[53, 83, 127-130]</sup>。

有关研究岩石的电磁性质<sup>[9, 15, 30]</sup>、绕射理论、波的传播<sup>[13, 16, 47, 48, 49]</sup>和矿山问题的著作<sup>[38, 124]</sup>, 对地下无线电波法的发展都有很大的意义。

所要研究的问题涉及范围很广, 并且非常复杂, 因此产生了一些独立的研究方向, 如无线电波法的理论、测量方法、仪器和普查勘探方法。

本书虽然对这些方面都有所反映, 但是着重研究理论、测量方法、观测方法技术和解释推断的一般问题。本书的两大部分再细分为六章, 每一部分为三章。第一章介绍了岩矿电磁性质的特

征及其在无线电波法频段内与频率的关系。详细叙述了均匀各向异性介质中电偶极子场的求解问题。第二章探讨了存在平面分界面和平面层时偶极子元的场及平面波的场，同时计算了平面分界面对测量结果的影响。较详细地讨论了用于求解和对测量结果进行物理解释的阻抗边界条件。第三章叙述了非理想导电半平面上平面波绕射问题的近似求解结果，扼要地分析了半平面、带、圆板、球和圆柱体产生的异常场。第四章试图对无线电波法的测量方法和装置进行分类。第五章简单地描述了仪器和观测方法，其细节一般在说明书和方法手册中都有。第六章讨论了解释推断方法，并列举了无线电波法在不同地质勘探阶段的应用实例。

# 第一部分 理论基础

## 第一章 均匀各向同性 和各向异性介质中的场

对于岩石来说,“均匀介质”的概念大多是有条件的,因为岩石是矿物的集合体,从物理和化学观点来看是非均匀体。作为研究对象的岩石,一般有裂隙网、细脉、岩墙等穿插,使所研究的介质更不均匀。然而在无线电波法理论中,如果在某种介质中以必要的精度观测到的某一频率的场与电磁性质已知的均匀介质中理论计算的场相符合,就认为这种介质是均匀的(确切地说是准均匀的)。

### §1 均匀各向同性岩石和矿石的电磁性质

**有效参数。**在麦克斯韦方程中有三个参数表示介质的电磁性质:电导率 $\sigma$ 、介电常数 $\epsilon$ 和磁导率 $\mu$ 。这些参数表征介质的宏观性质;但其值不仅取决于介质的宏观性质,而且首先取决于其微观结构(原子-分子结构)。

研究岩石有效参数时,无线电波法理论的最主要任务是研究所谓频散问题,即所研究的参数与电磁场频率 $f$ 的关系。频散的存在一般可以用下面两个因素来解释:1.电荷移动过程和电磁极化的惯性;2.统计上均匀分布的非均匀体对介质有效参数的影响,这些非均匀体比测量装置要小得多。

载流体电荷移动的惯性导致以下结果。随着频率的增高,出现了外加电压(电场强度)与其产生的电流之间的相位移,相当于出现了复电导率:

$$\check{\sigma}_f = \sigma'_f + i\sigma''_f \quad (1.1)$$

电导率决定于 $\sigma'_f$ , 而 $\sigma''_f$ 相当于导体的极化。

电介质电极化过程的惯性也会使场强与电感应之间产生相移:

$$\check{\epsilon}_f = \epsilon'_f + i\epsilon''_f \quad (1.2)$$

式中 $\epsilon'_f$ 表示某个频率上物质的极化率, $\epsilon''_f$ 表示介电损失。

同样,在强磁性介质中也产生磁损失 $\mu''_f$ ,并且出现了复磁导率:

$$\check{\mu}_f = \mu'_f + i\mu''_f \quad (1.3)$$

式中 $\mu'_f$ 表示某个频率的介质磁导率。

将(1.1)式和(1.2)式代入复介电常数 $\check{\epsilon}$ 的关系式中<sup>[40]</sup>,得到:

$$\check{\epsilon} = \epsilon'_f - \frac{\sigma''_f}{\omega} + i \left( \frac{\sigma'_f}{\omega} + \epsilon''_f \right) \quad (1.4)$$

设

$$\begin{aligned} \epsilon'_f - \frac{\sigma''_f}{\omega} &= \epsilon_{\bullet\phi} \\ \sigma''_f + \omega\epsilon''_f &= \sigma_{\bullet\phi} \end{aligned} \quad (1.5)$$

去掉表示参数是有效参数的符号“ $\bullet\Phi$ ”,得到复介电常数的一般值:

$$\check{\epsilon} = \epsilon + i \frac{\sigma}{\omega} \quad (1.6)$$

如果将(1.3)式代入波数公式( $k = \omega \sqrt{\mu \epsilon}$ ),且设 $\mu^*_{\bullet\phi} = \mu'_f$ ,则形式上可以把磁导率 $\mu'_f$ 转为介电常数的有效值 $\epsilon^*_{\bullet\phi}$ 和电导率的有效值 $\sigma^*_{\bullet\phi}$ ,去掉符号 $f$ 后得到

$$\epsilon^*_{\bullet\phi} = \epsilon_{\bullet\phi} - \frac{\mu''_f}{\mu'_f} \frac{\sigma_{\bullet\phi}}{\omega}; \quad \sigma^*_{\bullet\phi} = \sigma_{\bullet\phi} + \frac{\mu''_f}{\mu'_f} \omega \epsilon_{\bullet\phi} \quad (1.7)$$

式中  $\epsilon_{\cdot\phi}$  和  $\sigma_{\cdot\phi}$  由 (1.5) 式求出。

这一结果在研究介质中的波数、吸收系数和波长时是正确的。在一般情况下, (1.7) 式中的有效参数  $\epsilon_{\cdot\phi}^*$ 、 $\sigma_{\cdot\phi}^*$ 、 $\mu_{\cdot\phi}^*$  代入麦克斯韦方程所得到的结果, 与 (1.1—1.3) 式中的参数  $\epsilon_f$ 、 $\sigma_f$ 、 $\mu_f$  代入的结果是不同的, 这时电场和磁场之间关系的确定将不正确。为了全面求解麦克斯韦方程组, 必须知道四个参数:  $\epsilon_{\cdot\phi}$ 、 $\sigma_{\cdot\phi}$ 、 $\mu_f'$  和  $\mu_f''$ 。但是我们不知道岩矿的参数  $\mu_f'$  和  $\mu_f''$ , 所以对于所有均匀非磁性岩石来说, 可以认为  $\mu_f$  等于  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  亨/米; 在其他情况下, 等于按磁测资料确定的数值 (浸染状矿石例外, 单独研究)。

**$\epsilon_{\cdot\phi}$ 、 $\sigma_{\cdot\phi}$  与场频率的关系。** 根据无线电波法频段内的现有资料, 电荷移动过程的惯性实际上很不明显, 即  $\sigma_f = \sigma_f'$ ; 而  $\epsilon_{\cdot\phi}$ 、 $\sigma_{\cdot\phi}$  同频率的关系主要决定于  $\epsilon_{\cdot\phi}'$ 、 $\epsilon_{\cdot\phi}''$  同频率的关系。在均匀电介质情况下可以做如下解释。

介电常数  $\epsilon$  由下式确定,

$$\epsilon \mathbf{E} = \epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P} \quad (1.8)$$

式中  $\epsilon_0 = \frac{10^{-9}}{36\pi}$  法/米——空气的介电常数;  $\mathbf{P}$ ——极化向量,

与电场强度成正比,

$$\mathbf{P} = \chi_e \epsilon_0 \mathbf{E} \quad (1.9)$$

$\chi_e$  称为电介质极化率。

在一定的频率范围内,  $\chi_e$  对应于两种类型的极化  $\mathbf{P}_1$  和  $\mathbf{P}_2$ ,

它们是根据稳定时间来划分的。假设极化  $\mathbf{P}_1$  在  $\tau_1 \ll \frac{1}{f_i}$  时间段内稳定 (原子和电子极化), 其中  $f_i$  是一定频段内的任一频率; 极化  $\mathbf{P}_2$  在  $\tau_2 = \tau \approx \frac{1}{f_i}$  时间段内稳定 (定向极化或体积极化)。这样, 极化  $\mathbf{P}_1 = \chi_{e1} \epsilon_0 \mathbf{E}$  很快达到稳定, 其滞后相当小, 可以忽略; 而极化  $\mathbf{P}_2 = \chi_{e2} \epsilon_0 \mathbf{E}$  则以一定速度达到稳定, 这个速度与  $\chi_{e2} \epsilon_0 \mathbf{E}$  和

该时刻的  $P_2$  值之差成正比<sup>[6]</sup>：

$$\frac{dP_2}{dt} = \frac{1}{\tau} (\kappa_{e2}\epsilon_0 E - P_2) \quad (1.10)$$

式中  $\tau$ ——某一确定的时间。

将  $P = P_1 + P_2$  代入 (1.8) 式，考虑到  $P_2(t) = P_2 e^{-i\omega t}$ ， $\frac{dP_2}{dt} = -i\omega P_2$ ，且  $\epsilon = \tilde{\epsilon}_f$ ，得到

$$\tilde{\epsilon}_f = \epsilon_0 \left[ 1 + \kappa_{e1} + \frac{\kappa_{e2}}{1 + (\omega\tau)^2} + i \frac{\kappa_{e2}\omega\tau}{1 + (\omega\tau)^2} \right] = \epsilon'_f + i\epsilon''_f \quad (1.11)$$

$$\epsilon'_f = \epsilon_0 \left[ 1 + \kappa_{e1} + \frac{\kappa_{e2}}{1 + (\omega\tau)^2} \right] \quad (1.12)$$

$$\omega\epsilon''_f = \frac{\epsilon_0 \kappa_{e2} \omega^2 \tau}{1 + (\omega\tau)^2} = \sigma_e \quad (1.13)$$

$\epsilon'_f$  决定着与频率有关的有效介电常数， $\sigma_e = \omega\epsilon''_f$  是有效电导率的一个组成部分。

当  $\omega = 0$  时， $\epsilon'_f = \epsilon_0 (1 + \kappa_{e1} + \kappa_{e2}) = \epsilon^0$ ；当  $\omega \rightarrow \infty$  时， $\epsilon'_f = \epsilon_0 (1 + \kappa_{e1}) = \epsilon^\infty$ 。

于是

$$\epsilon'_f = \epsilon^\infty + \frac{\epsilon^0 - \epsilon^\infty}{1 + (\omega\tau)^2} \quad (1.14)$$

$$\sigma_e = \omega\epsilon''_f = \frac{(\epsilon^0 - \epsilon^\infty)\omega^2\tau}{1 + (\omega\tau)^2} \quad (1.15)$$

在无线电波法频段内， $\epsilon^0 - \epsilon^\infty$  与  $\epsilon^\infty$  差别很小（这种假设与现有实验资料也不矛盾<sup>[30]</sup>），因此可以明白为什么实验时观测到的  $\epsilon'_f$  与频率的关系很小。由于  $\epsilon^0 - \epsilon^\infty$  与  $\epsilon'_f$  具有同一数量级，则在  $\omega\epsilon'_f > \sigma'_f$ （准电介质中）， $\omega\tau \approx 1$ ， $\omega^2\tau\epsilon'_f > 1$  的条件下， $\sigma'_f$  的大小将可以与  $\sigma'_f$  相比较，并且  $\sigma_e$  与频率的关系决定着  $\sigma_{\phi}$  与频率的关系。