

激发极化的实验和理论

J·伯廷 J·洛布 著

地质出版社

激发极化的实验和理论

J.伯廷 J.洛布 著

陈 玲 等译

地质出版社

内 容 提 要

本书共四章。第一章介绍方法原理、仪器参数、负激发极化、干扰效应、野外测量电极排列方式以及实验室内测量结果,第二章介绍方法的应用和史例,第三、四章分别就激发极化的宏观和微观两方面的理论作了详细的阐述。内容比较全面,叙述由浅入深。书中还对激发极化各家的主要理论和近十多年来发表的主要文献作了扼要的介绍和评论,并附有大量插图。可供从事该方法生产和科研的物探人员、大专院校有关专业师生参考。

本书第一章由陈玲、任怀宗译出,第二章由吴奇石、罗励泽、卫茂椿译出,第三、四章由贝庚译出;由杨传耕、李恭、贺永康同志校对,贺永康同志最后作了全面的校对。

Experimental and Theoretical Aspects of Induced Polarization

by

J. Bertin and J. Loeb

1976

Gebrüder Borntraeger • Berlin • Stuttgart

激发极化的实验和理论

J. 伯廷 J. 洛布 著

陈玲 等译

*

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: $787 \times 1092^{1/16}$ • 印张: $17^{3/8}$ • 字数: 421,000

1980年10月北京第一版·1980年10月北京第一次印刷

印数1—2,290册·定价2.60元

统一书号: 15038·新512

前言

1 材料的组织

本专著的目的在于介绍激发极化（以下简称 IP）法 15 年来广泛应用后达到的技术水平。

资料主要来源于书籍、科技杂志里的论文以及一些科学会议或座谈会上的发言，也包括我们自己的经验。在文献目录中列举了大量文献和参考书目，而且还对几位著名作者的观点作了简短的介绍。

我们深知，远没有把全部可用的文献都列举出来。一个作者当着手撰写象激发极化这样的专题著作时，一开始就得阅读有机会得到的全部书籍和文献，而每本书或每篇文献又列举了与所研究问题有关的另一些参考文献，等等。这样下去，要阅读的文献数量就会成倍地增长。幸好有些文章几乎为所有作者所利用，这些文章当然是最重要的，它们包含了主要的观点。因此我们不会因为大量资料未纳入而感到不安，我们确信没有漏掉重点。由于语言上的原因，挑选的书籍文献有所侧重；因为我们对英、德、法、意等西语比俄语更为熟悉。加之收集西方的文献比收集东方的文献容易，因此在我们的文献目录中没有把东方的文献充分列举出来。我们打算叙述任何首次发现，毕竟有许多观点是“流行的”，并且很多西方作者也都很熟悉苏联的文献。

自然，我们不能不表达自己的见解。对于其他人的一些见解，除了介绍以外也还要给以评价，并增加一些我们认为有关材料。重点在于把理论和实验证据相比较。我们将要看到，要满意地弄清楚它们之间的关系，还有许多工作要做。

本书分两部分。第一部分讨论事实（应该说是一些不容怀疑的事实）和 IP 法的实践。

第一章根据野外和实验室测量结果收集来的实验事实介绍了 IP 法；叙述了应用这种方法所需要的仪器和测量技术。除 IP 现象以外，本章还包括一些能干扰测量的扰真效应的有用成果。

第二章说明如何实际使用 IP 法，该章分三段。第一段（A 段）是关于金属矿的找矿勘探即推断解释方法的，它讨论了影响测量成果的各种因素之间的互相干扰，以及在各种找矿勘探方法中 IP 法所能起到的作用；分析了 IP 法的局限性和可能性。第二段（B 段）介绍 IP 法的其他应用，比第一段要短得多。这是因为一方面，对非金属对象来说 IP 法应用不广；另一方面，第一段的许多研究成果，对于金属和非金属两方面的问题都适用。第三段将介绍一些重要的史例。

第二部分阐述理论。一种物理理论决不仅仅是一种新发现；我们所依靠的各种已知真理都是经过艰苦努力将实验事实搜集起来加以系统化的结果。作为第一步，许多有成就的地球物理学家都能消化整理他们在野外得到的经验，而不是急于把他们的发现和有关地层

的物理性质的确切假定联系起来。这种技能确实十分可贵，但却不是通过交流就能轻易获得的。知识的增多、效能的提高，来自我们对事实更好的理解。我们将尽力了解科学家和地球物理学家们的工作，并努力更深入地钻研这个课题。

我们认为把这些材料分为“宏观”理论和“微观”理论比较合适。第一步，我们是想确定与实验装置无关的可极化介质的某些特性。这些特性或者是放电时极化物质的状态，可以当成瞬变电磁场的初始条件；或者是研究频率效应时电流密度 i 和电场 E 之间的某种关系。第二步针对应用归纳出一些电磁定律，这时我们假定对极化物质的性质已作了正确的描述。这两步统称为“宏观理论”（第三章）。

第三章中我们对 IP 现象只作了一些表面上的描述，第四章则把这些现象与电化学联系起来。由于均匀介质显示不出 IP 效应，所以我们集中研究某种特殊状态的物质。最简单的模型就是包裹有一层电解质的、埋在不极化覆盖层中的导电或绝缘的小颗粒，因此称这部分为“微观”理论。

IP 理论研究工作的一个特点是需要近似计算；例如，正象我们以后将要看到的那样，在剖面计算中可以容许忽略时间特性。这种方法在严密性方面是易于受到批评的，因为没有哪个作者对引入的误差作过估计。但是野外物探人员很需要哪怕是不完善的 IP 理论量板和曲线。当然只要有可能，我们每次都力图用实验结果来检验理论。和读者的推测一样，理论和实践之间还有很多矛盾存在。在本书的结论中我们择要提出一些难题，还提出了今后研究工作的方向，以解决至今还未能回答的一些问题。

我们认为，在讨论正题之前，作为本书的背景，先向读者简单介绍一下 IP 研究工作的历史，可能是有益的。

2 历史

现在我们回顾一下标志 IP 技术发展的几个主要阶段。我们只限于从开始到 1960 年这段时间。1960 年可以认为是 IP 开始广泛用于生产的一年。不过生产性的 IP 测量显然在此以前很早就已作过，而研究工作（包括理论的和实验的）到现在仍一直在进行。

法国科学家 C. 施伦姆贝格^[B14]对发展电阻率法和自然电位法作了许多工作，IP 现象的发现也应归功于他。他把这种现象命名为“Polarisation Provoquée”（激发极化），简称 PP。1920 年在金属硫化物矿床上首次进行了时间域测量。

奇怪的是，施伦姆贝格关于激发极化法的一些著作竟无人过问达 15 年之久，而且也没有人想在实践中加以应用。必须承认，他本人也并不打算利用自己的发现。在当时的技术条件下，要精确地检出微弱的 IP 信号确实很困难。加之施氏又发现没有矿体存在时也有或强或弱的 IP 现象出现。因此他宁可将有效的手段用于对金属矿勘探有用的自然电位法，因为自然电位（SP）信息比较强，野外操作也十分容易。我们提请读者注意，在这 15 年期间，在施氏的指导下进行过几次 IP 野外试验。作为实例，我们复制了 1929 年在刚果布拉柴维尔附近测得的 PP 和电阻率等值线图。

直到 1932 年和 1934 年，美国人韦斯^[170]和巴勒^[111]才进行了试验，他们隐约觉得有可能提出一种基于电化学效应的勘探方法。另外在美国，波塔彭科-彼得森公司 1940 年提出一种基于含油和不含油地层的选择性极化效应的油矿勘探方法，但是这些实验都没有取得

令人满意的效果。

三十年代末期,苏联在油田测井中引入了IP法,用以确定地层的渗透率。1941年达赫诺夫^[30]提到了用这种方法勘查硫化矿的可能性。我们还必须引用美国埃夫詹^{[40][41]}的文章,他在四十年代就曾注意到,从某些地层的性状来看,它们的介电常数好象为真空介电常数的 10^8 到 10^{11} 倍。他甚至取得了一种利用频率极低的交流电的勘探方法(Elflex)的专利权。更晚一些时候,到了1956年,他的工作在意大利由贝尔卢吉金^[9]继续进行。

只是到了四十年代末期,差不多在施伦贝尔格发现激发极化之后三十年,经过认真的、系统的研究,最后才使IP法同时在美国和苏联的勘探工作中得到了利用。1946年纽蒙特勘探公司与新泽西州的布坦射频实验室协作,着手研究IP现象。1947到1952年期间他们完成了很多野外实验工作。在1948到1954年期间,赛格尔^{[142][143]}导出了各种形体(其中包括层状体、接触带和岩脉)时间域的IP响应公式。从1949年起维特^[B18]对IP法进行了许多研究,包括电容耦合和电磁耦合效应,IP响应随粒度、形状和取向的变化,以及由时间域响应曲线向频率域响应曲线的转换。

1950年以前,所有IP测量都是在时间域进行的。1950年根据实验室测量结果,科列特^[29]和赛格尔提出了用不同频率的交流测量方法。维特大大地扩展了这种方法的可能性,并在当年进行了成功的试验。在1951到1958年期间,维特^[B18]和内斯^[112]对频率响应进行了广泛的野外和实验室研究。这些工作有许多是由纽蒙特公司承担的,后来都总结在维特和其他一些科学家凯勒^[81]、布兰特^[20]和鲍德温^[7]等人合作编写的“超电压研究及其在地球物理中的应用”这本专题论文集中(1959)。

当时在美国,除纽蒙特公司以外,其他研究小组也对IP发生了兴趣。我们现在列举其中三个小组:华盛顿海军军需实验室的布莱尔^[17]于1953年指出利用IP法勘探磁性矿和硫化矿的可能性,但显然他还没有认识到岩石中有非金属的IP存在。麻省理工学院(MIT)的一些科学家如马登^{[96][98][99]}、马歇尔^[103]、哈洛夫^{[60][61]}和内斯^[113]等人1953年以来都从事于实验工作,导致了交流IP法有成效的发展。这个小组还完成了大量的有关非金属效应或IP背景效应的基础研究工作。新墨西哥州矿山技术学院的瓦奎尔^[163]则致力于应用IP法进行地下水勘探。1953年到1958年期间他进行了室内和野外实验。弗里希和巴特拉^[49]从瓦奎尔的结果出发,导出了一个估算两层情况下IP效应的数学表达式。

苏联在五十年代完成了不少IP法的研究工作,但是我们收集到的资料很少。这些研究工作主要是在列宁格勒的全苏勘探方法和技术科学研究所柯马罗夫指导下进行的。在苏联偏重于用强大的直流电流通入地下很长时间。我们将介绍柯马罗夫、约菲、克罗波尼娜和谢苗诺夫^[86]在西伯利亚的金属硫化矿床上所做的勘查工作。我们也要提到罗基田斯基^{[129][130]}的工作,他主要对沉积岩的极化现象感兴趣。

在欧洲其他国家,IP法的研究工作开始较晚,做得也少。可以提一下德意志民主共和国的布赫海姆^{[21][22][23]}及其学派,他们曾在瑞士(1957)的一些矿脉上用变频交流IP法作过工作,试图区分块状矿和浸染矿,并想取得有关矿物粒度方面的资料。还有罗斯基^[115]所做的一些工作,是用他自己设计的十分轻便的仪器完成的。

在南斯拉夫,舒米^[157]在他本国矿山和瑞典的康克伯格(1959)地区使用过时间域法。后来他又热心于非金属极化现象的研究。应该提一下与舒米的工作多少有些关系的瑞典波利登公司的马姆奎斯特^[101]的贡献(1960),他企图对舒米在野外观察到的复杂的激发极

化放电曲线寻求理论上的解释。虽然 IP 效应是法国科学家施伦姆贝格发现的,但是法国很晚才进行 IP 法的研究,直到1957—1959年法国地球物理总公司 (C. G. G) 才进行了旨在同时用于水文和找矿勘探的时间域野外实验。然而只是在四年之后该公司才将这一方法用于实际找矿。

尽管这会超出我们所要介绍的历史范围之外 (我们说过到 1960 年为止), 但我们还要引用科学调查总会 (DGRST) 在1964年到 1967 年期间所完成的研究工作。该项工作是由法国地质矿产调查局 (BRGM)、巴黎大学应用地球物理实验室和国家科学研究中心 (CNRS) 的地球物理研究中心等单位协作进行的。很多科学家如鲍德温^[8]、乔治尔^[54]、罗塞尔^{[132][133][136]}以及图尔尼尔^[162]等同时用频率域方法和时间域方法从事了全面的实验室和野外实验工作。本书中列有许多有关该项工作的参考文献。

符 号 表

第一章和第二章中所用的符号

A, B	供电电极
$a_1, a_2, \dots, a_n$	指数的系数
$A_1, A_2, \dots, A_n$	归一化指数的系数
$a = \frac{L}{l} - \frac{1}{2}$	表征单极-偶极排列和四极排列的数
C_1, C_2	供电电极
F	频率域中的高频
f	频率域中的低频
$FE, FE_f, F, FE_f^T, FE_f^L$	频率效应
$(FE)_a, (FE_f)_a, (FE_f^T)_a, (FE_f^L)_a$	视频率效应
I	电流强度
IP	激发极化
K	电极排列的几何系数
L	电极排列极距; 脉冲法测量中的量
l	接收偶极的长度
$M, M_{t_1, t_2}, M_{t_1, t_2}^T$	充电率
$M_a, (M_{t_1, t_2})_a, (M_{t_1, t_2}^T)_a$	视充电率
MF	金属因数
M, N	测量电极
$n = \frac{L}{l} - 1$	表征偶极-偶极排列的数
$n' = \frac{L}{l}$	表征偶极-偶极排列的数
P, P_t, P_t^T	极化率
$P_a, (P_t)_a, (P_t^T)_a$	视极化率
P_1, P_2	测量电极
PFE	百分频率效应
$(PFE)_a$	视百分频率效应
T	时间域中充电时间或通电时间
t	时间域中断电后采样时间
t_1, t_2	充电率 M 的积分时间间隔
t_1, t_2	L 的积分时间间隔
ΔV	一次电位差
ΔV_{IP}	二次电位差-瞬变 IP 现象
ΔV_{IPt}	在时间 t 时的二次电位差
θ	时间域中断电时间
ρ	电阻率

$\rho_a, \frac{\rho_a}{2\pi} \cdot \left(\frac{\rho_a}{2\pi} \right)_a$	视电阻率
σ	电导率
σ_a	视电导率
$\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$	指数的时间常数
φ	频率域中的相位移

第三章和第四章中所用的符号

a	球体半径(20.13节); 导线长度(20.22节);
	特征长度(24.14节)
b	特征长度(26.32节)
c	电磁波传播速度(20.12节)
d	壳层的厚度(24.2节)
$\text{div } A$	矢量 A 的散度 $= \frac{\partial A_x}{\partial x} + \frac{\partial A_y}{\partial y} + \frac{\partial A_z}{\partial z}$
e	电子的电荷(26.32节)
$\text{erfc}(x)$	余误差函数 $= 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-z^2} dz$
$h(t)$	拉普拉斯变换的原象
i 或 j	电流密度
i 或 f	$\sqrt{-1}$
h	传播因数(20.13节)
h	玻耳兹曼常数(一个粒子的)(26.32节)
h	反射系数(18.2节)
m	充电率(18.2节)
n	与面正交的单位矢量
p	极化因子(18.6节)
q	表面电荷密度(20.13节)
r	球坐标系中的半径(20.13节)
s	与 s 同, 拉普拉斯变换导出符号
u	迁移率(第四章)
v	还原电位(24节)
v	意思为: 对所有的...值来说
C	电容(20.111节); 离子浓度(23节)
C_F	每平方米的电容
D	扩散系数
E	电场强度
F	法拉第常数

G	吉布斯常数	Z	离子价
H	磁场强度	γ	传播常数 (18.6节)
H_2	赫 (频率单位)	δ	电荷密度 (第四章); 损失角 (18.8节)
$H_{3/2}^{(1),(2)}$	3/2阶汉克尔函数	Δ	拉普拉斯算符 $\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ (第四章)
$I_{3/2}$	3/2阶贝塞尔函数	ϵ	介电常数
J	物质的通量	ϵ_{IP}	能产生激发极化效应的物质的介电常数
L	长度	ζ	亥姆霍兹电位 (21.5节)
$L(S)$	拉普拉斯变换	η	粘滞度 (21.5节)
$[L]$	矩阵 (23节)	η	矿石品位 (24节)
M	偶极密度	λ	级联网络的一个单元的幅度增益 (20.22节)
$[M]$	转移矩阵 (20.22节)	λ	长度比例因子 (27节)
PFE	百分频率效应	μ	化学位 (第四章)
P	极化矢量密度	ρ	电阻率 (第三章)
P	单位电荷的力 (18.6节)	ρ	球坐标系中的径向坐标 (第四章)
P	压力 (23节)	σ	电导率
P	离子压力 (26.2节)	τ	在体积分中 $d\tau$ = 体积元
Q	电荷密度 (20.13节)	τ	时间常数 (20.24节)
Q	反射系数 (18.5节)	φ	调制函数 (20.24节)
R	克分子玻尔兹曼常数	φ	FE的相位移
S	拉普拉斯变换导出符号	φ	电位 (第四章)
SP	自然电位	ω	角频率
T	时间常数		
T	开耳芬温度 (只在第四章 RT 项中出现)		
U	电位		
V	电压		

目 录

前 言

符 号 表

第一章 IP法介绍, 实验事实	1
1. 激发极化现象的存在	1
1.1 实验结果	1
1.2 IP记录曲线实例	2
1.21 强极化标本的测量结果	2
1.22 弱极化地层的野外测量结果	2
1.3 IP现象的起因	3
2. IP法的原理	4
2.1 时间域: 直流法	4
2.11 原理	4
2.12 可测定的IP物理量	4
2.121 采样	4
2.122 面积的测量	5
2.123 放电曲线的形态	5
2.13 测量周期长度的影响	6
2.131 T 小, θ 大	7
2.132 T 和 θ 都小——正反向周期测量	9
2.2 频率域: 交流法	9
2.21 原理	9
2.22 交流复电阻率模量的利用	10
2.23 相位的利用	11
3. 仪器参数: 对IP的影响	12
3.1 供电电流强度: IP现象的线性	12
3.11 野外测量结果	12
3.12 实验室内测量结果	13
3.13 结论	16
3.2 充电时间 T (时间域)	16
3.21 ΔV_{IP_i} 的变化或 P_i 与 T 的关系	16
3.22 IP放电曲线的形态与 T 的关系	16
3.221 实验结果	16
3.222 放电曲线的分析	18
3.23 结论	20
3.3 断电时间 θ (时间域)	20

3.4 参数 t (时间域)	21
3.41 IP放电曲线的形态	21
3.42 结论	22
3.5 频率 (频率域)	23
3.51 实验结果	24
3.52 结论	24
3.6 信噪比	26
3.61 频率域	26
3.62 时间域	26
3.621 游散电流	26
3.622 自然电位 (SP)	26
3.623 电极噪声	26
3.624 大地电流	26
3.625 测量电线的摆动	27
4. 负激发极化	27
4.1 时间域法	27
4.11 负IP的存在	27
4.12 负IP的解释	27
4.13 模型上获得的负IP例子	29
4.2 频率域法	30
5. 复杂的IP现象 (时间域)	30
5.1 复合的IP波形	30
5.2 不对称的IP放电曲线	31
6. EM电磁耦合: 对IP的干扰	32
6.1 时间域	33
6.11 如何减小EM耦合对IP的干扰	33
6.12 均匀大地中理论的EM耦合 (梯度排列)	33
6.2 频率域	36
6.21 如何减小EM耦合对IP的干扰	36
6.22 均匀大地中理论的EM耦合 (偶极-偶极排列)	36
6.23 两层情况下理论的EM耦合 (偶极-偶极排列)	38
6.24 结论	43
7. 仪器设备	43
✓ 7.1 频率域	44
7.11 电动发电机	44
7.12 发送器	44
7.13 接收器	44
7.14 结论	44
7.2 时间域	44
7.21 脉冲法的直读仪器	44
7.211 电动发电机	45
7.212 发送器	45

7.213 接收器	45
7.214 结论	47
7.22 瞬变法中用的记录接收器	48
7.3 辅助设备	49
7.31 电缆	49
7.32 电极	49
7.321 供电电极	49
7.322 测量电极	49
7.33 发送器—接收器间的联系	50
8. 测量装置	50
8.1 激发极化测深 (IPS)	50
8.2 地面剖面测量	51
8.21 偶极-偶极排列	51
8.211 描述	51
8.212 讨论	52
8.22 单极-偶极排列	53
8.221 描述	53
8.222 讨论	54
8.23 梯度排列	55
8.231 描述	55
8.232 讨论	56
8.24 对称四极排列	57
8.241 描述	57
8.242 讨论	57
8.3 电极效应	58
8.31 定义	58
8.311 电阻率电极效应	58
8.312 IP电极效应	58
8.32 供电电极相对极化体位置的影响	58
8.321 梯度排列	58
8.322 偶极-偶极排列	59
8.323 单极-偶极排列	59
8.33 结论	60
8.4 激发极化测井	63
8.41 C在井中-P在地面的IP测井	63
8.411 描述	63
8.412 讨论	64
8.42 C在地面-P在井中的IP测井	65
8.421 描述	65
8.422 讨论	66
8.43 C和P均在井中的IP测井	66
8.431 描述	66
8.432 讨论	68

8.44 结论	68
9. 实验室测量	68
9.1 介质特征参数对IP的影响	69
9.11 物质的性质	69
9.12 矿物含量	70
9.13 矿物粒度	72
9.14 标本的电阻率	73
9.15 岩石中电解质的影响	75
9.2 实验室内的模型实验	77
9.3 结论	80
第二章 IP法的应用和史例	82
A. IP法在金属矿勘探中的应用	82
10. 极化物质	82
10.1 矿体	82
10.2 主要的导电矿物	83
11. 野外测量结果的表示方法	85
11.1 IPS (激发极化测深) 曲线	85
11.2 IP剖面图	86
11.3 IP假断面图	87
11.4 IP等值线图	88
12. IP测量结果的解释	91
12.1 理论量板和曲线图	91
12.11 IP测深量板	91
12.12 用于地面剖面测量的IP理论曲线	96
12.13 IP测井理论曲线	101
12.14 结论	103
12.2 IP成果的其他解释方法	103
12.21 重复AB剖面测量	104
12.22 利用磁法量板	105
12.3 原始IP测量结果的校正	106
12.31 激发极化与电阻率的相互关系	106
12.311 金属因素	108
12.312 统计校正	108
12.32 偶极-偶极排列混合绘图法	113
12.321 定义	113
12.322 应用	113
12.323 结论	116
12.4 IP放电曲线的分析	116
12.41 短采样时间过程—L/M比值	116
12.42 长采样时间过程	119
12.43 结论	122
12.5 IP解释的特点	122

12.51 人为原因引起的IP异常	122
12.52 电极效应	125
12.53 EM耦合	127
12.54 负IP	128
12.6 结论	130
13. 怎样进行IP测量	130
13.1 工区地电情况	131
13.2 IP勘探对不同矿化类型的适用性	131
13.3 信噪比	132
13.4 EM耦合	134
13.5 仪器设备	134
13.6 测量装置	135
13.7 结论	136
14. IP法在金属矿勘探中的作用	136
14.1 用于金属矿勘探的其他地球物理方法	136
14.11 电阻率法	136
14.12 自然电位法 (SP)	137
14.13 充电法	138
14.14 电磁法 (EM)	138
14.15 磁法 (Mag)	139
14.16 放射性法	139
14.17 重力法	139
14.18 地震法	140
14.19 结论	140
14.2 地球物理方法在金属矿勘探中的作用	140
14.21 一般性普查测量	140
14.22 详细测量	141
14.23 验证测量	141
15. IP法的可能性和局限性	142
15.1 IP法的优点	142
15.2 IP法的缺点	144
15.21 野外效率和费用	144
15.211 野外效率	144
15.212 费用	145
15.213 主要地面物探方法的比较	145
15.22 IP法不具选择性	146
15.23 电解激发极化	146
15.24 IP和电阻率的相互关系	146
15.25 EM耦合	146
15.26 IP结果的解释	147
15.27 勘探深度	147
15.3 结论	148
B. IP法的其他应用	148

16. 某些实例	149
16.1 冲积层水文学	149
16.11 例 1	149
16.12 例 2	151
16.2 岩溶(喀斯特)灰岩	151
16.21 例 1	151
16.22 例 2	153
16.3 构造调查	153
16.4 结论	155
C. 史例	155
17. 史例介绍	156
17.1 高岭土	156
17.2 岩溶灰岩中的地下水	158
17.3 冲积层	159
17.4 低品位浸染硫化铜矿	162
17.41 加拿大不列颠哥伦比亚的克雷恩矿床	162
17.42 加拿大不列颠哥伦比亚的布伦达矿床	166
17.43 加拿大不列颠哥伦比亚巴拜因湖区	167
17.44 加拿大不列颠哥伦比亚的洛耐克斯矿床	168
17.5 可能有浸染带的块状多金属矿	171
17.51 加拿大西北地方派恩帕因特的金字塔 1 号矿	171
17.52 加拿大魁北克省奇博加莫湖区的亨德森矿	175
17.53 瑞典北部斯凯夫特地区的坎克伯格矿床	179
17.54 苏联某多金属矿床	179
17.55 伊朗侯赛因·阿巴德矿床	180
17.6 黄铁矿体	183
17.61 法国拉克拉波斯的莱苏利尔矿床	183
17.62 法国莱斯博尼斯的赛因贝尔矿床	186
17.7 锰矿	192
第三章 “宏观”理论	195
引言	195
18. 论文摘要	196
18.1 维特 ^{[B18]和[165]}	196
18.2 赛格尔 ^[142] (还可参考[B18]和[143])	197
18.3 柯马罗夫等 ^[87]	199
18.31 表面偶极密度	199
18.32 体积偶极密度	199
18.4 蒙吉利和佩特拉 ^[109]	200
18.5 弗里希和巴特拉 ^[49]	200
18.6 布哈塔恰里亚 ^[15]	202
18.7 马登和坎特韦尔 ^[97]	203
18.8 霍曼等人 ^[77]	204

18.9 其他论文	204
19.18节的综合评述	204
19.1 关于利用拉普拉斯变换的评论	204
19.2 “准恒定”场理论的可能性	205
19.21 一种简化的时间特性理论	205
19.22 边界条件	206
20.本书作者提出的一种宏观理论	207
20.1 IP介电常数	208
20.11 交流工作方法	208
20.111 芬齐-康蒂尼的冲击法实验	209
20.112 尼尔森的交流模型 (还可参考富勒和沃德的文章 ^[50])	209
20.113 交流测量中相位的利用	209
20.114 金属因数	210
20.12 瞬变-时间常数	210
20.121 自泄空过程 (Self-depletion process)	211
20.122 剩余极化	211
20.13 球状包裹体的计算	212
20.131 “归一化时间积分”的解释	213
20.2 比较复杂的放电曲线	214
20.21 具有集总参数的电路模型	214
20.22 电路图的“麦克斯韦化”(据洛布 ^[95])	215
20.23 瓦尔堡电阻 ^[168]	217
20.24 数据处理	217
21. 扰真效应	219
21.1 施伦姆贝格电极排列中的EM耦合 (据杜瓦尔、洛布和罗克罗艾, 见第一章 6节, 并参考[36])	219
21.11 瞬变效应	220
21.12 载有交流电的发送回路 (图240) 的影响	220
21.13 发送和接收回路间漏电引起的耦合效应	222
21.2 双偶极排列中的EM耦合效应	222
21.21 EM效应为零的一种电极排列	222
21.3 自然电位	222
21.4 电极极化	223
21.5 动电学效应	223
22. IP测深和IP剖面测量	223
22.1 单个偶极的场	224
22.2 负IP	224
22.21 电场的水平分量	225
22.22 瞬变法测量中的负IP	225
22.23 变频法测量中的负IP	226
22.24 自泄空电流的作用	226
22.3 推断解释用的IP量板曲线和图	226
22.4 激发极化效应与磁效应的对比	227

22.5 IP在测井中的应用	229
第四章 “微观”理论	230
引言	230
23. 均匀物质的通性	231
23.1 电导率和动电学效应	232
23.2 渗透率	232
23.3 扩散作用	232
24. 粒状构造的描述	233
24.1 球状模型	236
24.11 尼尔森的微观理论 ^[14]	236
24.12 把问题列成方程式	236
24.121 关于电荷移动的问题	236
24.122 关于物质守恒的问题	236
24.123 电学定律	237
24.124 电荷守恒	237
24.13 稳定态	237
24.14 充电过程完结时的状态	238
24.2 均匀极化场中的球状模型	238
24.21 导电核心	240
24.211 偶极矩	240
24.22 绝缘核心	241
24.3 矿石含量少的情况下宏观的物理量	241
24.4 核心半径 R_0 的影响, 与实验结果的比较 (见第一章9.13节)	242
24.5 d/a 数量级为1时发生的情况	243
24.6 24节综述	243
24.61 成效	243
24.62 缺点	243
25. 平面波模型中的瞬变效应 (瓦尔堡的理论 ^[168])	244
26. 有没有“比IP”?	245
26.1 IP效应中临阈电压的存在	245
26.2 自然电化学电位	246
26.21 没有极化场存在时的球体核心	246
26.22 有外场存在时的球体核心	248
26.3 半导体物质	249
26.31 不同的导电模式	249
26.311 禁带	250
26.32 场方程式	250
26.33 埋在无矿覆盖层中半导体矿石颗粒的解	252
27. 关于均匀层和不均匀层的评述	253
28. 标本测量和模型实验 ^[8]	254
28.1 标本在强电场中的非线性特性	254
28.2 模型实验的一致性定则	254
29. 结论	255
参考文献	