

高等学校教材
工程物探



高等学校教材

工程物探

河海大学 周天福 主编

D/31-971



高 等 学 校 教 材

工 程 物 探

河海大学 周天福 主编

中国水利水电出版社

内 容 提 要

《工程物探》全书共分十章。第一章至第四章为电法勘探；第五章至第七章为地震勘探；第八章为岩体声波探测；第九章为重力法、磁法及放射性勘探；第十章为地球物理测井。在内容上既定出了工程勘察中常用的地球物理勘探方法及新技术新方法，又注意到工程物探方法的多样性，对多种方法技术作了全面的知识性介绍。本书着重于各种物探方法的基本原理、物理实质、应用条件、资料解释方法及综合应用等方面的阐述，并注意与地质及各类工程的结合，内容系统全面、重点突出，条理清楚，逻辑性强，理论联系实际，反映了当前工程物探水平。

本书适用于水利电力类高校工程地质及水文地质专业，也可供建工、环境地质、矿业、岩土工程类高校相近专业师生和从事各类工程勘察、设计、施工部门的工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

工程物探/周天福主编. —北京：中国水利水电出版社，1996

高等学校教材

ISBN 7-80124-338-2

I. 工… II. 周… III. 工程地质-地球物理勘探-高等学校-教材
IV. P631

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (96) 第 25018 号

书 名	高等学校教材 工程物探
作 者	河海大学、周天福 主编
出 版	中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044)
发 行	新华书店北京发行所
经 售	全国各地新华书店
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市朝阳区小红门印刷厂
规 格	787×1092 毫米 16 开本 14 印张 325 千字
版 次	1997 年 10 月第一版 1997 年 10 月北京第一次印刷
印 数	001—500 册
定 价	13.80 元

前 言

本书是由水利部科教司教学委员会组织编写的,适于高等院校工程地质及水文地质专业开设工程物探课程的需要。鉴于物探方法多,基础知识广,而本课程所分配到的学时有限(54学时),故在内容取舍上,以电法勘探、地震勘探和岩体声波探测以及测井三部分为重点,对其他一些常规的成熟的物探方法及某些新技术新方法也尽量作全面的知识性介绍。书中系统地介绍了这些物探方法的基本原理、物理实质、应用条件和资料解释方法。本书力求条理清楚、深入浅出,注意地球物理与地质密切结合以及在工程勘察实践中的应用。在教材内容的取舍上亦同时考虑了地质、环境地质、岩土工程、建工、矿业等相近专业学生学习物探的需要。

本书由周天福主编。参加编写工作的有海河大学周天福(绪论、第一、二、三、四章)和施逸忠(第五、六、七、八、九章)以及华北水利水电学院的李健民(第十章)。全书由上海勘察院教授级高级工程师陈文华担任主审。在编写过程中,得到陈文华同志和我校同事及兄弟院校、生产科研单位的大力帮助,在此一并致谢。由于水平有限,教材中的缺点和不足之处在所难免,敬请读者批评指正。

编 者

1992年2月·南京

目 录

前 言

绪 论	1
第一章 电阻率法的理论基础	8
第一节 岩石的电阻率及其影响因素	8
第二节 均匀介质中的稳定电流场	10
第三节 非均匀介质中的稳定电流场	15
第四节 视电阻率的概念	18
第五节 电阻率法的仪器和设备	21
复习思考题	24
第二章 电阻率剖面法	25
第一节 联合剖面法	25
第二节 对称四极剖面法	35
第三节 中间梯度法	38
第四节 偶极剖面法	40
第五节 高密度电阻率法	41
第六节 对电剖面法的一些干扰因素的处理	44
复习思考题	47
第三章 电阻率测深法	49
第一节 电阻率测深法的基本原理和野外工作方法	49
第二节 电测深曲线类型及特点	53
第三节 电测深资料的定性解释	59
第四节 电测深曲线的定量解释	63
第五节 电测深法的应用	79
复习思考题	83
第四章 其他电法	84
第一节 充电法	84
第二节 自然电场法	88
第三节 激发极化法	92
第四节 电磁法	96
复习思考题	102
第五章 地震勘探的理论基础	104
第一节 弹性介质中的波	104
第二节 地震波的传播	107

第三节 地震勘探的地质基础	113
复习思考题	115
第六章 折射波法	116
第一节 折射波的时距曲线	116
第二节 折射波的野外工作方法	123
第三节 折射波法资料的整理与解释	126
第四节 折射波法的应用	131
复习思考题	134
第七章 反射波法	135
第一节 反射波的时距曲线	135
第二节 反射波法野外工作方法	139
第三节 反射波法的资料解释	143
第四节 反射波法的应用	145
复习思考题	147
第八章 岩体声波探测	148
第一节 概述	148
第二节 声波仪的基本原理	149
第三节 声波探测	150
第四节 声波探测应用实例	154
附录 桥基动测	157
复习思考题	159
第九章 重力、磁法和放射性勘探	160
第一节 重力勘探	160
第二节 磁法勘探	166
第三节 放射性勘探	170
复习思考题	175
第十章 地球物理测井	176
第一节 电测井	176
第二节 弹性波测井	195
第三节 放射性测井	204
复习思考题	215
参考文献	217

绪 论

一、地球物理勘探的概念

地球物理勘探,简称“物探”,是一种对天然存在的或人工建立的地球物理场进行观测,借以查明地下岩体的地质构造,寻找矿产或解决各种水文、工程地质和环境地质问题的勘探方法。

所谓地球物理场,指的是存在于地球及其周围的具有物理作用的空间。例如,具有重力作用的空间称为重力场,具有磁力作用的空间称为磁场,具有电流作用的空间称为电场,等等。众所周知,组成地壳的各种岩(矿)体在某些物理性质方面往往有明显的差异。例如,相对于周围的岩体而言,磁铁矿的磁性强,金属硫化物的导电性好,放射性矿体的放射性强等等,这些差异会引起相应的地球物理场的局部变化,这种变化称为地球物理异常。地球物理异常按物理场的性质可分为重力异常、磁力异常、电性异常、放射性异常等。用专门的仪器测量物理场的分布状况,通过分析和研究物理场异常变化规律,并结合当地的地质资料,推断出地下一定深度范围内地质体的分布规律,从而达到地质勘探的目的。

地球物理异常是相对于其正常场的偏差。正常场是由具体物理参数均一的岩体所决定的地球物理场。其均一性与研究范围大小有关。地球物理异常按范围大小可分为大陆异常、区域异常(几千至几万平方公里)和不同级别的局部异常(小于几千平方公里)。在解决具体物探任务时,常利用的是区域异常和局部异常。在研究局部异常时,可将地球正常场、大陆异常和区域异常之和视为正常场,作为背景值,认为它们对研究范围内的影响是稳定的。有了这样的概念,就可能根据异常的级别划分出场的某些假定的正常场水平,从而突出有用的异常。

必须指出,我们观测到的地球物理场都是由正常场、各种异常场和干扰场叠加而成的。所谓干扰,是指能使地球物理场的测量结果发生畸变,致使解释推断困难的所有因素。例如,由上覆岩层和下伏岩层的影响,断面上部的不均匀性、局部地形等而引起的干扰是地质成因干扰的;而场的短期变化、游散电流等的干扰则是非地质成因的干扰。干扰可以是随机的,也可以是非随机的干扰。有的干扰可以通过技术和计算手段消除,有的干扰是无法消除的。在物探工作中必须从干扰背景上划分出由被探测地质目标所引起的异常,并对其作出定性的和定量的解释。

由此可见,物探方法与一般地质勘探方法不同,它具有一定的“透视性”。它并不直接观测研究出露于地表的岩(矿)体和地质构造,而是凭借仪器观测地球物理场的变化,以查明地下的地质问题。透视性、效率高、成本低是物探工作的最大优点。在工程地质勘察中,合理地应用综合物探,不仅可以指导钻探的布置,减少钻探和山地工作量,缩短勘察周期,降低成本,而且可以填补难以进行钻探工作地段的地质“空白”。但是,也必须认识到物探技术的应用也具有一定的条件性和局限性,解释成果有时具有多解性的缺点。例如石灰岩和花岗岩,它们的纵波速如果都是 5000 m/s 的话,用地震勘探就不能区分它们。但

这两种岩石的磁性不同，用磁法勘探得花岗岩一侧磁场较强，达 1000 伽玛，石灰岩一侧磁场较弱，仅 200 伽玛，很容易将它们区别。如果一个深埋地下的小溶洞，虽然洞中水的电阻率比石灰岩低得多，但它的存在不足以改变电场在地面上的分布状态，电法勘探就不能发现它。这反映了物探的条件性。此外，同一物理现象，可以由多种不同因素所引起，例如地震波初至时间的延长，可以由地震波旅行路程的延长引起，也可以由地层弹性波速度的降低引起。这反映了物探的多解性。

工程物探的特点是：探测的地质目标埋藏浅、形体小；干扰因素多，要求精度高；要与地质、钻探、工程施工相配合，工作周期短，提交成果要快；要提供岩土体物理力学参数及某些工程特性参数。在工作中要想取得较好的地质效果，需要根据具体的地质条件，合理地选用综合物探方法，按一定的地质——物理模型和最优化工作程序进行工作，并与地质、钻探、试验等勘察手段密切结合，进行综合研究，以利于更好地解决各种地质问题。

二、地球物理勘探的分类

地球物理勘探是一门应用科学，它利用的物性参数多，场源、装置形式多，观测内容或测量要素多，应用范围广。为实现不同探测目标，适应多种地质条件，物探方法、种类十分繁多。随着物探应用领域不断的扩大和科学技术的发展，还会涌现出许多新的方法。

(一) 按地球物理场的性质分类

1. 电法勘探

电法勘探是以岩(矿)体电性差异为基础的一大类物探方法。目前，在电法勘探中已经利用的岩(矿)体的电学性质有导电性、电化学反应性、介电性及导磁性。岩(矿)体的任何一种或数种电学性质的差异或改变，均能引起与其有关的电场或电磁场(天然存在的或人工形成的)在空间分布状态方面发生相应的变化。因此，人们便可在地面、空中、海洋、钻孔或地下坑道中，用仪器观测电场或电磁场的分布特点和变化规律，查明地质目标在地壳中的存在状态(大小、形状、产状和埋藏深度)以及电学参数值的大小，从而实现电法勘探的地质目的。按照所观测的电场来源类型，电法勘探的基本方法及其应用范围见表 0-1。

表 0-1 电 法 勘 探 分 类 简 表

场的来源	基本方法	应 用 范 围
天然场	自然电场法	探测地下水流向及地下水同地表水的补给关系；检查库坝漏水点；普查找矿
	大地电磁法	探查区域地质构造
人工场	电阻率剖面法	地质填图，追索断层破碎带和古河道，追索各种高低阻地质体的分布及接触面，探查岩溶发育带及覆盖层下的基岩起伏；查地热田
	电阻率测深法	划分倾角很小的岩层界线；探查基岩起伏、埋深、风化岩厚度；确定含水层厚度、埋深；划分咸水、淡水界线；探查地质构造；查地热田
	激发极化法	普查找矿；划分含泥质地层；确定含水层埋深、探查含水层、溶洞、断层带、裂隙带；追索古河道
	充电法	追索地下暗河、含水裂隙带；测地下水流速、流向；研究滑坡；了解低阻地质体分布范围和形态；探查良导矿体
	电磁法	地质填图；找水；划分岩层界线，探测地质构造；探测暗河、溶洞、地下电缆和金属管道

2. 地震勘探

地震勘探是以岩（矿）体弹性差异为基础的一类物探方法。它是根据人工激发所产生的地震波在地下传播过程中，遇到弹性性质不同的分界面时所产生的面波、反射波、透射波或折射波等，利用地震仪在地面接收记录地震波的旅行时间，再结合波的传播速度资料，就能确定界面的埋藏深度和产状。此外，还可以根据波速、波形、振幅、频率等方面的资料进行岩性的研究，提供岩体力学参数。

地震勘探也有许多分支方法，目前比较常用的是反射波法和折射波法。

岩体声波探测法是利用频率较高的声波或超声波来测定岩体弹性性质的一种物探方法。由于其波长较短，易被岩体吸收，探测范围较小，所用仪器和工作方法也与地震法不同，独立成为工程地质勘察中不可缺少的测试手段。它能对岩体质量、混凝土构件质量、水泥灌浆效果作出评价。

3. 重力勘探

重力勘探是以岩（矿）体密度差异为基础的物探方法。岩（矿）体密度的差异会使地球重力场发生变化，从而引起重力异常，用仪器观测并分析研究重力异常，就能探查地下地质结构、地质构造和矿床、地热田分布情况。

微重力勘探是通过测量重力场的微小变化（微伽）来研究地质构造和工程地质问题的一种方法。它能探测地下的断层破碎带和洞穴，检查水泥灌浆效果，监测地震和岩体的稳定性等。

4. 磁法勘探

磁法勘探是以岩（矿）体磁性差异为基础的物探方法。借助于专门仪器进行地磁测量，获得磁异常的资料，分析磁异常与地下磁性地质体的对应关系，可反推磁性地质体在地下的分布和产状特征。磁法勘探主要用于找矿，找热水，地质填图和研究深部地质构造问题。

5. 放射性勘探

放射性勘探是以岩（矿）体放射性差异为基础的一类物探方法。它主要是测量地壳内天然放射性元素放出的射线强度和气态放射性元素氡（Rn）的浓度，以达到解决有关地质问题的目的。放射性勘探有很多种方法，如天然伽玛法、中子法、伽玛-伽玛法、中子-伽玛法、静电 α 卡测量、 α 径迹测量、 ^{210}Po 法、同位素示踪法等等。放射性勘探除用于寻找放射性矿和油气田外，还用于地质填图、划分岩层界线、确定含水层位置、寻找基岩地下水、探测地热和地下热水、测定岩土体的密度、测定河水泥砂含量、研究大坝渗流问题等方面。

（二）按观测场所分类

根据观测场所的不同可以分为：①航空物探；②地面物探；③海洋物探；④地下物探（将仪器置于地下坑道、钻孔中进行观测）。此外，利用卫星在宇宙中进行重磁法、无源无线电法、红外探测的就称为卫星地球物理勘探。

（三）按应用范围分类

按生产实践中地球物理勘探应用的范围，可以分为：①区域物探；②固体矿产物探；③油气田物探；④工程及水文物探等。

物探方法地质效果的好坏，不仅取决于方法的种类，还与地形地质条件的复杂程度、仪器性能、干扰水平以及人的主观作用等因素有关。实践证明，只有充分发挥人的作用，选

择最佳探测方法组合，优化工作程序，选择适当的观测方法，与地质密切相结合，才能确保物探的地质效果，发挥物探的独特优势。

三、工程物探的主要任务

1. 区域稳定性评价和工程选址

现以杭州湾核电站选址的地球物理调查为例加以说明。在该电站先后进行了大中小比例尺的重力、磁法、地震、电法、 α 径迹、汞气测量、声波、岩土动力参数测定，并广泛收

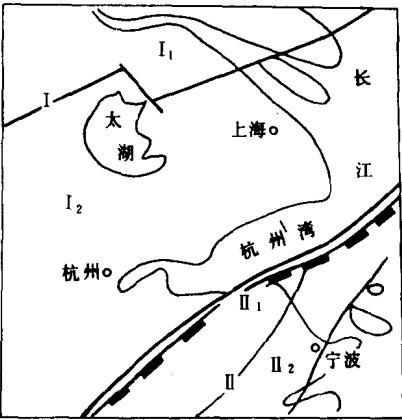


图 0-1 杭州湾地区大地构造略图

I—扬子断块区 (I₁—扬子断块、
I₂—江南断褶带)；
II—华南断褶区 (II₁—武夷云开断褶带、
II₂—东南沿海断褶带)

集了区域地质地震资料，水准测量资料，查明杭州湾位于江南断褶带 (图 0-1)，它是重磁力升高区 (图 0-2)，为前震旦系深变质岩组成的稳定断块。莫霍面呈平板状，埋深 29~30 km，无明显梯级带。据卫星重力测量计算结果编制的地幔对流应力场得知，杭州湾是一个远离孕震活动带的地幔对流平稳区。预选区半径 320 km 范围内的区域断裂如图 0-2 所示。电站半径 8 km 范围内长度大于 1.5 km 的断层，特别是第四系断层、全新世断层的位置、形状、产状、活动性的调查表明，核岛区是一个新构造运动不强烈，第四系活动断层不发育的稳定地区。

在工程选址方面，我们举黄河小浪底坝址选择为例。竹峪坝址是一个比较坝址，原先认为地质条件较好，覆盖层不厚，施工条件较理想，是个好坝址。计划派两个勘探队，开动四部钻机。事先去一个地震小组工作 30 天，查明覆盖厚达 50 m。后派一部钻机，计

划打三个验证孔，当打完两孔就不打了，因已证明物探精度达 99%。结果改变了竹峪坝址的勘探布置，节省了费用。这说明物探为坝址比较发挥了侦察兵的作用。

2. 覆盖层和风化层的探测

在坝址、厂址、码头及其他地基勘察中要分别探测覆盖的总厚度，各分层厚度和埋深，各层的密度、干容重、孔隙度和透水性，覆盖层中古河道的位置，河谷深槽和基岩起伏等。主要用电法勘探、地震勘探、水声勘探和各种测井方法。

在坝址和主要建筑物区探测基岩风化层，主要使用初至折射波法和电测深法，辅助使用浅层反射波法和对称四极电剖面法。通常只能测得强风化带底界面以上的风化层厚度。在条件有利时，可用电阻率测井、地震波测井、声波测井及放射性测井，在钻孔和平洞中对风化岩体进行详细的分带。

3. 隐伏断层破碎带的探测

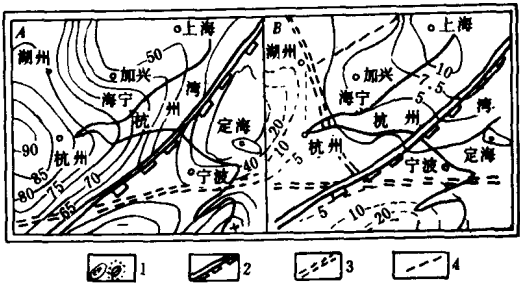


图 0-2 沪杭区重磁向上延拓等值线图

A—航磁图 (向上延拓 30 km，单位 nT)；B—重力图 (向上延拓 25 km，单位 mGal)；1—正负重磁等值线；2—地壳断裂；3—基底断裂；4—盖层断裂

要查明隐伏断层破碎带的位置、规模、分布和延伸情况等。主要用地震勘探、电法勘探中的电阻率法、激电法、充电法、自然电场法、甚低频法、微重力法、静电 α 卡法等。

4. 喀斯特探测

喀斯特探测主要是探测建筑区岩溶漏斗、溶洞、暗河的平面分布和岩溶地下水的分布等情况。主要使用电法勘探中的电测深和电测剖面法、自然电场法、激发极化法、甚低频法、PS岩性测深法(Petro-Sonde)、无线电波透视法、声波透视法、地质雷达、微重力法等。这些方法也可用于探测煤矿采空区、废弃坑道及其他洞穴。此外,用测温法可查明水下和地表下地下暗河的出露点。

5. 地下水的勘查和水文地质参数的测定

地下水的勘查包括大面积的区域地下水调查,个别地区和厂矿企业的水源勘查,查找古河道、洪积扇、基岩储水构造,确定含水层的埋深和厚度,地下水的赋存、运动、补给关系,区分咸淡水,勘查地下水污染情况以及库坝渗漏情况等。主要采用电阻率法、激发极化法、地震勘探、甚低频法、PS岩性测深法、放射性勘探、遥感以及各种测井方法。

水文地质参数的测定主要是测定地下水流向、流速、渗透速度、影响半径,在条件有利时配合水文地质试验确定含水层导水系数、渗透系数、涌水量等。主要用各种测井法、自然电场法、充电法、同位素示踪法、电阻率法等。

地下热水的勘查主要采用测温法、电阻率法、激发极化法、自然电场法、重磁法、静电 ∞ 卡法等。

6. 环境地质勘测

这方面的探测内容很多,面广量大,如对水域面积、江河湖海岸及滩涂变迁,沙漠、冰川冻土、森林和植被覆盖、可耕地的变化,以及区域滑坡、泥石流、黄土崩塌、水土流失、地面塌陷、水域水质变化等进行普查、勘察、动态监测和预测。使用的方法是多种多样的。如用折射地震波法和电法对三峡库区十四个大型滑坡进行了系统勘察。当滑坡体上有钻孔时,可以用充电法确定滑动方向和滑动速度。又如1986年9月在杭州玉皇山脚下开凿隧洞,引钱塘江水更换西湖湖水时,就用自动测井仪在换水过程中测量水电阻率的变化,确定了更换水(混合流)的运动方向、路线、速度、分布形态,揭示了湖水更换的基本规律,对换水效果和经济合理的换水方案提出了依据。这是用物探方法开展环境保护和治理的成功例子。

对工程的主要工程部位、生活设施、建筑材料等进行环境放射性检测,主要用自然伽玛测量、射气测量、 α 卡法、伽玛测井等。

7. 岩土体物理力学参数的测定

测定的内容主要包括:电阻率、纵波速度、横波速度、密度、容重、动泊松比、动弹性模量、动剪切模量、动抗力系数、孔隙率、各向异性系数、地基承载力等工程设计所需参数。主要采用地面地震法、地震测井、地震跨孔原位测试、声波法、声波测井、密度测井、电阻率测井等。例如,要修缮至今已有八百多年历史的杭州六和塔,但无建塔资料,于是用浅层地震法和跨孔地震法测定了塔基岩土体的物理力学参数,用直达波初至法测定了塔身的波速,计算了塔身自重和地基承载力,论证了地基是稳定的,可以承载。

8. 建筑物和地基处理工程质量的无破损检验

其内容包括：①土木工程施工过程中的物理探测，如隧洞洞周和开挖面前方隐伏不良地质现象的探测，围岩松弛带的探测；②施工影响的检测，如大坝坝基开挖和边坡开挖中爆破对岩体影响的探测；③施工质量的检验，如大坝混凝土强度的检测，桩基质量检测，地基加固处理效果的检测，灌浆质量的检测等，主要采用地震法、声波法和测井法。

9. 其他

如地基和建筑物卓越周期检测，地下古墓、古矿坑道、地下电缆和金属管道探测，石雕风化深度和防风化保护浆液渗入深度的探测等方面都可以用工程物探方法取得良好的效果。

工程物探使用的方法在不断发展中，应用领域也将会不断扩大，工程物探在四化建设中必将发挥更大的作用。

四、我国工程物探的发展概况

电法勘探的兴起已有一个半世纪的历史。在中华人民共和国成立之前，我国电法勘探的基础极其薄弱。仅有少数人，如丁毅在 30 年代、顾功叙在 40 年代试用电法找铁矿。新中国成立之初，电法勘探随国家建设迅猛发展，大规模的开展了电阻率法和自然电场法工作。1957 年试用了激发极化法，70 年代初陕西第一物探队首创激电衰减时找水法，石油部门用激电法找油气亦获成功。接着又先后引进了频率域（即“交流”）激电法、频谱激电法，并研制了相应的观测仪器，使激电法不断发展。电磁法的应用始于 60 年代，研究工作断续进行了近 30 年，仍处于试验研究阶段，没有在生产中推广应用。但用于工程物探的甚低频电磁法、磁偶源频率测深法、无线电波透视法、用于煤田勘探的电偶源频率测深法以及用于油气田和深部地质构造研究的大地电磁法却发展较快。至今已发展到有相当规模，并取得了令人信服的地质效果。对直流电法的地形改正，我国在 60 年代进行了多种物理模拟实验研究，在 70 年代初又提出了“坐标网模拟转换法”，用微机进行二维地形影响校正。从 70 年代中开始发展电测资料的数字（电算法）自动解释现已普及，使推断解释水平大为提高。

地震勘探始于 20 世纪 20 年代。我国从 1951 年起运用地震法勘探石油，1957 年开展工程地震勘探。这段时期以折射波法和透射波法为主。70 年代浅层反射法才逐渐兴起，但发展较快，与发达国家同时进入实用阶段。80 年代初，落后的多道光点示波地震仪被信号增强型工程地震仪所取代，采集数据记录在磁带（盘）上，在电子计算机上进行处理，提高了解释精度。浅层反射波技术在工程中的应用在近几年已逐渐增多。例如在龙羊峡水库对覆盖层的分层、三峡新滩滑坡勘察、上海地铁、黄浦江和武汉长江过江隧洞、南京过江管道工程、江阴和铜陵长江大桥选址、风陵渡黄河大桥工程选址等，浅层反射法都取得满意的效果。地震波速层析成像（CT）技术 1989 年在二滩电站岩体质量研究中首获成功。同时，跨孔法、水声法、面波法、常时微动测量等新技术也相继得到应用。

测井工作在我国起步较晚。1954 年在平顶山进行了第一个煤田钻井测井，1955 年后相继开展了工程物探测井、金属和非金属矿测井，使用的是半自动模拟记录仪。60 年代至 70 年代末期发展了井中激发极化法、超声成像法、跨孔电磁波等新方法，研制出 JH-1 型全自动模拟综合测井仪，可作视电阻率、自然电位、自然伽玛等十余种测井。80 年代，测井的

数据采集系统跨入数字化阶段,方法和仪器逐步实现了系列化和组合化。JZS-1 型车载数字综合测井系统、JXW-1 型微机测井系统、JBS-1 型轻便数字测井系统、JWT-4 型跨孔电磁波仪就是代表。我国井中磁测在理论和方法技术上居世界领先地位。

其他物探方法如重磁、放射性勘探在我国的发展也是从无到有,从小到大,至今已取得了巨大发展。种类繁多的氦气测量技术已处于世界前列。

第一章 电阻率法的理论基础

电阻率法是以岩（矿）体的导电性差异为基础的电法勘探方法。由于地下各种岩（矿）体的导电性能有差别，因而它们对人工电场的反应各不相同。在电阻率法中由供电电极将电流通入地下，建立起稳定电流场，将电测仪器经测量电极接地，通过观测和研究人工电场的分布规律，从而推断地下地质体的分布和产状，达到解决某些地质问题的目的。

用电阻率法解决地质问题时，必须知道岩（矿）体的电阻率大小及不同导电性地质体存在时电场的变化和分布规律。因此，首先介绍岩石电阻率及人工电场的有关知识。

第一节 岩石的电阻率及其影响因素

一、岩石的电阻率

在电法勘探中，用来表征岩（矿）石电性好坏的参数为电阻率（ ρ ）。由物理学得知

$$\rho = R \frac{A}{L} \quad (1-1)$$

式中： R 为电阻； L 、 A 分别为导体的长度和横截面积。

此式表明电阻率是表征导体材料的导电性的物理量，由材料性质决定。电阻率在数值上等于电流垂直流过单位横截面积条件下，单位长度导体的电阻。其单位为欧姆·米或记作（ $\Omega \cdot m$ ）。物质的电阻率越低，其导电性越好；反之，若物质电阻率越高，则其导电性越差。现将常见岩（矿）石的电阻率列于表 1-1，以供参考。

由表 1-1 可见，大多数金属硫化矿物和氧化矿物的电阻率均较低，造岩矿物的电阻率较高。岩浆岩和变质岩的电阻率较沉积岩为高。

二、影响岩石电阻率的因素

自然界的岩石电阻率大小主要是由其矿物成分与结构、岩石的孔隙性、含水量、水的矿化度、温度等因素决定的。

1. 岩石电阻率与矿物成分、结构的关系

岩石中含造岩矿物多，其电阻率就高。当岩石中有少量良导电矿物，彼此不相连，分散于岩石中或虽含有较多良导电矿物，但又被高电阻矿物所包围时，岩石的电阻率仍然很高。当岩石含少量良导电矿物，但只要它们彼此相连呈网状或片状分布时，其电阻率可变得很低。

不少岩石是由胶结物和矿物骨架颗粒组成的。设胶结物的电阻率为 ρ_1 ，矿物骨架颗粒电阻率为 ρ_2 ，则整体岩石的电阻率 ρ 与 ρ_1 、 ρ_2 及颗粒体积含量（ V ）和颗粒形状有关。理论计算表明，无论颗粒是高阻还是低阻，当其体积含量 $V < 60\%$ 时，岩石的电阻率 ρ 受 ρ_2 的影响甚少，其值接近于胶结物电阻率（ ρ_1 ）；仅当颗粒含量 $V \geq 60\%$ 以上时， ρ_2 才对 ρ 有明显作用。这是由于 V 不大时，各颗粒是孤立存在的，胶结物则是彼此连通的，故此时胶结

表 1-1

常见矿物岩石的电阻率

 $(\Omega \cdot m)$

类 别	名 称	电 阻 率	类 别	名 称	电 阻 率
矿 物	磁铁矿	$10^{-6} \sim 10^{-3}$	沉 积 岩	页岩	$50 \sim 3 \times 10^2$
	石墨	$10^{-6} \sim 10^{-3}$		砂岩	$10 \sim 10^3$
	黄铁矿	$10^{-3} \sim 1$		砾石	$10 \sim 10^4$
	方铅矿	$10^{-3} \sim 1$		石灰岩	$50 \sim 10^5$
	黄铜矿	$10^{-3} \sim 1$	岩 浆 岩	花岗岩	$6 \times 10^2 \sim 10^5$
	褐铁矿	$10^3 \sim 10^6$		正长岩	$10^2 \sim 10^5$
	石英	$> 10^6$		闪长岩	$5 \times 10^4 \sim 10^5$
	长石	$> 10^6$		辉长岩	$10^3 \sim 10^5$
	云母	$> 10^6$		玄武岩	$10^2 \sim 10^5$
	角闪石	$> 10^6$		熔岩	$10^2 \sim 10^4$
	方解石	$> 10^6$	变 质 岩	片麻岩	$2 \times 10^2 \sim 3.4 \times 10^4$
	硬石膏	$10^4 \sim 10^6$		片岩	$20 \sim 10^4$
沉 积 物	粘土	$1 \sim 2 \times 10^2$		石英岩	$2 \times 10^2 \sim 10^5$
	砂	$3 \sim 10^2$		大理岩	$10^2 \sim 10^5$
	卵石	$3 \sim 6 \times 10^{2 \sim 3}$			

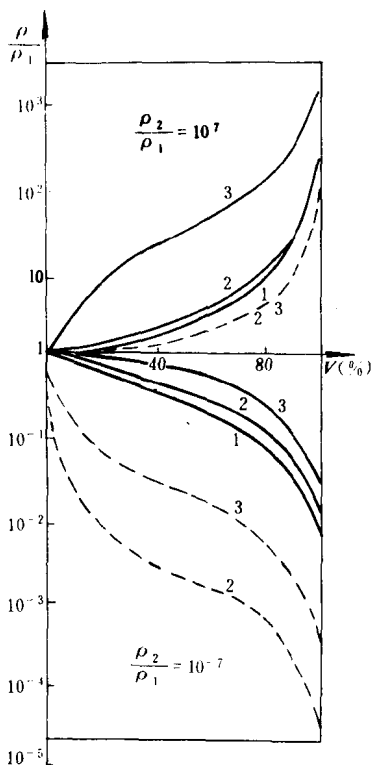


图 1-1 岩矿电阻率与矿物颗粒形状
关系曲线 (实线为 ρ_n , 虚线为 ρ_t)
1—球状颗粒; 2—针状颗粒; 3—片状颗粒

物起主要导电作用。而当 V 相当大以致各颗粒彼此连通时, ρ_2 对整体岩石电阻率有明显影响。

岩石中含针、片状矿物较多时, 横向电阻率 ρ_n 总是大于纵向电阻率 ρ_t , 且随矿物颗粒形状、导电性不同而有差异 (图 1-1)。对于由两种薄层交替成层的情况, 设其电阻率和厚度分别为 ρ_1 、 h_1 , ρ_2 、 h_2 , 则按电阻并联和串联, 可算出沿层理方向和垂直层理方向的电阻率 ρ_t 和 ρ_n 为

$$\left. \begin{aligned} \rho_t &= \frac{h_1 + h_2}{\frac{h_1}{\rho_1} + \frac{h_2}{\rho_2}} \\ \rho_n &= \frac{h_1 \rho_1 + h_2 \rho_2}{h_1 + h_2} \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

由于取这两者之差时有关系 $\rho_n - \rho_t = \frac{h_1 h_2 (\rho_1 - \rho_2)^2}{(h_1 + h_2)(h_1 \rho_2 + h_2 \rho_1)} \geq 0$ 故只要 $\rho_1 \neq \rho_2$ 、 $h_1 \neq 0$ 和 $h_2 \neq 0$, 无论 ρ_1 和 ρ_2 及 h_1 和 h_2 各值的大小如何, 皆有 $\rho_n > \rho_t$ 。这表明了层状岩石导电的各向异性, 常用各向异性系数 λ 表示, 它等于 ρ_n 与 ρ_t 的比值的平方根, 即

$$\lambda = \sqrt{\frac{\rho_n}{\rho_t}} \quad (1-3)$$

一般情况下, λ 在 1~2 之间, 石墨碳质页岩 $\lambda=2.0$

~2.8, 垂直和平行层面两个方向上的电阻率相差达 4~7 倍以上, 这在电法勘探资料解释中应予重视。此外, 常用平均电阻率 ρ_m 来表示各向异性介质的电阻率, ρ_m 等于 ρ_n 与 ρ_t 乘积的平方根, 即

$$\rho_m = \sqrt{\rho_n \rho_t} \tag{1-4}$$

2. 岩石电阻率与所含水溶液的关系

自然界的岩石都存在孔隙、裂隙, 有些岩石中还存在气孔、溶孔、溶洞。岩石的这些空隙中可能充满着液体或气体。若孔隙、裂隙、溶洞位于潜水面以上, 空隙中充填的是电阻率无限大的空气, 则使岩石电阻率剧增。人工开挖的隧洞、旧矿巷道等也有类似的情况。若岩石位于潜水面以下, 孔隙、裂隙、溶洞中充满了地下水, 则同完整岩石相比, 其电阻率可降为原来的几十分之一。岩石的电阻率与岩石的孔隙率、裂隙和溶洞发育程度、含水量及水的矿化度有关。一般含水量大的岩石电阻率较低, 而含水量小或干燥岩石的电阻率较高。

表 1-2 几种天然水的电阻率 ($\Omega \cdot m$)			
名称	电阻率	名称	电阻率
雨水	>1000	海水	0.1~10
河水	0.1~100	矿井水	1~10
潜水	<100	深成盐渍水	0.1~1

地下水的矿化度变化范围较大, 淡水的矿化度小于 1 g/L, 咸水的矿化度大于 10 g/L, 含盐分越多, 水的电阻率越低。因此, 各种水的电阻率也有很大的不同 (表 1-2)。可见, 当相同成分和孔隙率的岩石埋藏于不同地下水环境时, 其电阻率将不同。利用这个特性, 用电阻率的差异可划分含淡水和含咸

水的层位。

3. 岩石电阻率与温度的关系

温度对近地表含水岩石电阻率的影响, 表现为随温度升高使水中带电子活动性强、使盐类的溶解度增大, 从而引起电阻率降低, 其规律为

$$\rho_t = \frac{\rho_{18C}}{1 + \alpha_t(T + 18)}$$

式中: ρ_{18C} 为岩石在 18℃ 时的电阻率; T 为岩石所处的环境温度; α_t 为温度系数, 约为 $0.025 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。但是, 如果温度下降到零度以下, 岩石中水结冰, 这时岩石的电阻率将不再遵循上式的规律而急剧增高。

在地下深处高温高压作用下, 岩石中结晶水脱出, 岩石的电阻率会降低。

第二节 均匀介质中的稳定电流场

一、稳定电流场的性质

1. 电流密度与电场强度的正比性

描述稳定电流场的物理量有电场强度 $\vec{E}$ 、电流密度 $\vec{J}$ 和电位 U 。在稳定电流场的任意一点上, 电流密度矢量 $\vec{J}$ 与电场强度矢量 $\vec{E}$ 在数量上成正比, 且方向一致, 比例系数为该点岩石的电导率, 即

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} = \frac{\vec{E}}{\rho} \quad (1-5)$$

这便是稳定电流场中的欧姆定律。这个公式既适用均匀介质，也适用于非均匀介质。因为在介质不均匀的情况下，我们总能选取一个足够小的体积元，将其电阻率看作是均匀的。式(1-5)又称为欧姆定律的微分形式。

2. 稳定电流的连续性

在稳定电流场中，虽然有电荷的运动，但那只是空间点上一些电荷元被另一些电荷元所代替，而该点的电荷密度仍保持不变。稳定电流场中的电流满足电量守恒定律，它表明除去电源点外，流入流出任一包围电流源的闭合曲面 S 的电流的代数和为零，电流密度既不可能增加，也不能减小。一般情况下，电流密度的法向分量 J_n 沿任一闭合曲面 S 的积分应该等于零，即

$$\oiint_S J_n dS = 0 \quad (1-6)$$

它说明在稳定电流场中电流是连续的，此式就是电流连续性的积分表达式。

利用积分学的奥一高定理，可将上式化为微分形式。因为在矢量 $\vec{J}$ 为连续的域内，若闭合曲面 S 所包围的体积为 v ，面上的向外法线为 $\vec{n}$ ，则在直角坐标系中由奥一高公式可得

$$\begin{aligned} \oiint_S J_n dS &= \oiint_S [J_x \cos(\vec{n}, x) + J_y \cos(\vec{n}, y) + J_z \cos(\vec{n}, z)] dS \\ &= \iiint_v \left(\frac{\partial J_x}{\partial x} + \frac{\partial J_y}{\partial y} + \frac{\partial J_z}{\partial z} \right) dv \end{aligned} \quad (1-7)$$

于是，结合式(1-6)及式(1-7)有

$$\frac{\partial J_x}{\partial x} + \frac{\partial J_y}{\partial y} + \frac{\partial J_z}{\partial z} = 0 \quad (1-8)$$

这就是电流连续性的微分表达式。它表示电流密度矢量 $\vec{J}$ 沿直角坐标系的三个方向的空间变化率的总和为零。即在稳定电流场中，电流线是连续的，除电源点外，空间任何点上不会有正电荷或负电荷的积累。

3. 稳定电流场的势场性

从稳定电流场的上述性质可知，电流在空间的分布是稳定的，即不随时间而变化，它和静电场一样是一种势场。场内任一点（除场源外）的电位 U 与场强 E 有如下关系

$$\vec{E} = - \text{grad} U \quad (1-9)$$

式(1-9)说明空间某点的电场强度等于电位的负梯度。

在极坐标系中，式(1-9)可写成

$$\vec{E} = - \frac{dU}{dr} \cdot \frac{\vec{r}}{r} \quad (1-10)$$

式中： $\frac{\vec{r}}{r}$ 代表单位矢量，其模值为1， $\vec{r}$ 的方向与 $\vec{E}$ 的方向相同。

在直角坐标系中，场强 E 沿 x 、 y 、 z 轴三个方向的分量分别为

$$E_x = - \frac{\partial U}{\partial x}, \quad E_y = - \frac{\partial U}{\partial y}, \quad E_z = - \frac{\partial U}{\partial z}$$

于是场强和电位梯度可分别写成