高等学校教材
地球物理系列

# 地 球 物 理 测 井

尉中良　邹长春　编著

地质出版社
·北　京·

需要全本请访问 www.ertongbook.com

## 内 容 提 要

本书系统介绍地球物理测井的基本原理、测量方法及在实际中的应用。第一、二、三章介绍电测井、声波测井、核测井三种基础测井的理论、测量、分析方法和应用技术；第四、五章介绍在上述三种测井物理基础上开发出的地层倾角测井、成像测井和核磁共振测井等现代测井技术；第六、七章介绍测井资料解释及测井地质解释。本书是地球物理勘探专业、石油地质专业本科生学习地球物理测井的教科书，亦可供有关专业研究生、科技人员阅读参考。

**图书在版编目** (CIP) **数据**

**地球物理测井/尉中良等编著. —北京: 地质出版社,** 2005.8

ISBN 7-116-04396-9

**Ⅰ. 地... Ⅱ. 尉... Ⅲ. 测井-高等学校-教材** **Ⅳ.** P631.8

**中国版本图书馆** CIP **数据核字** (2005) **第** 055055 **号**

---

**责任编辑:** 陈军中
**责任校对:** 王素荣
**出版发行:** 地质出版社
**社址邮编:** 北京海淀区学院路 31 号, 100083
**电　　话:** (010) 82324508 (**邮购部**)
**网　　址:** http://www.gph.com.cn
**电子邮箱:** zbs@gph.com.cn
**传　　真:** (010) 82310759
**印　　刷:** 北京智力达印刷有限公司
**开　　本:** 787 mm×1092 mm $^{1}/_{16}$
**印　　张:** 26.125
**字　　数:** 600 千字
**印　　数:** 1—2200 册
**版　　次:** 2005 年 8 月北京第一版·第一次印刷
**定　　价:** 30.00 元
ISBN 7-116-04396-9/P·2564

---

(凡购买地质出版社的图书，如有缺页、倒页、脱页者，本社出版处负责调换)

# 中国地质大学（北京）

# “地球物理系列教材编委会”

主　任：刘光鼎

成　员：程业勋　　管志宁　　李金铭

许　云　　曾华霖　　尉中良

乌达巴拉　　魏文博

# 序

地球是一个庞大而复杂的系统。人类在这颗星球上世世代代生息繁衍，并在生产和科学实践中不断地研究和深化对地球的认识。随着人类文明的进步，有数学、物理、化学和地质学等基础学科的诞生；在物理学的领域中，又有取得系统规律性认识的力学、光学、热学、电学、磁学和原子物理学等分支学科。地球物理是应用物理学的理论、方法与技术来研究地球、认识地球，从而相应地又有重力、地磁、地电、地震、地热和放射性等分支学科产生。

地球物理探索地球的各种物理现象本身的规律性，如研究重力场、地磁场、地电场、地震波场等；并利用这些规律性取得对地球的认识，如具有全球分布的地壳、地幔和地核的分层性等等。另一方面，地球物理方法还可激发出多种不同尺度的人工场，如人工电场、电磁场、地震波场等，并利用其探索地球。这样，地球物理可以应用多种物理手段主动灵活地进行目的明确的地球研究，解决经济建设中出现的问题，如矿产资源的探查和开发、环境的监测和保护，以及各种自然灾害的监测与防治等。因此，从某种意义来讲，地球物理有地球物理场作为理论基础，同时又是研究认识地球的高科技。

中国的国民经济建设规模宏伟，对地球物理的需求十分迫切。近年来，中国的油气资源供需矛盾突出，已经引起了广泛注意。远景资源量中还有78%的石油和93%的天然气有待发现，显然亟待增加风险勘探，争取有更多的发现。但是，地质条件的复杂性使勘探具有高难度，致使许多业内人士无限感慨地说油气资源：“成也物探，败也物探”。其实问题何止于油气勘探？煤炭的勘查，恶性事故频发的大小煤矿，如老窖水、瓦斯气、采空区、陷落柱、小断层等一系列的与地质有关的问题，都有待于地球物理去解决；经济建设迫切需要的金属矿如金、铜、铅、锌及各种有色金属矿，实际都处于一种“等米下锅”的状态；如何应用地球物理方法攻深找盲，寻找大矿、富矿，则是当前找矿中的关键问题。为了解决中国北方缺水问题，一直在论证并推行东、中、西三条南水北调的路线，解决这些工程问题必然要用到地球物理；

与此同时，还应使用地球物理方法探查地下水资源，以合理利用江河、湖泊的地面水和地下水资源。此外，长江、黄河的高边坡、堤坝、水库大坝的管涌，以及铁路、公路、桥梁、码头、机场的基础与桩基都需要地球物理工作来提供数据资料以解决问题。总之，在资源、环境的各种领域中，有广泛、大量的地球物理课题，深化地球物理工作，探索其规律，这是时代的要求，必将极有益于我国的国民经济建设。

既然国家经济建设和社会发展对地球物理工作有着广泛的需求（姑且不论地球物理在军事与国家安全上的作用），那么，振兴、开展地球物理工作就具有重要的意义。

北京地质学院于 1952 年建校时，就有地球物理探矿系和地球物理教研室。在傅承义教授主持工作期间，他首先集中精力抓教材建设，领导并参与研讨教学大纲的编制，指定谭承泽编写磁力勘探，萧敬涌编写重力勘探，陈癸尊编写电法勘探，刘光鼎编写地震勘探，并亲自审阅、修改，为以后的发展奠定了基础。随后，在补充了大量前苏联的地球物理资料之后，形成了培育新中国第一批地球物理工程师的基本教材。中国地质大学（北京）在原北京地质学院的基础上发展起来，继承过去的优良传统，并在不断实践中积累了丰富的资料和宝贵经验，理应与时俱进，在新的高度上编写出新的教材。特别是当前地球物理学科发展迅速，而又十分缺乏教学参考书的情况下，编写出高水平的新教材就显得尤其重要。

为此，我向吴淦国校长建议，由中国地质大学（北京）地球物理与信息技术学院负责编写一套“地球物理系列教材”。此事经学校有关领导同志商定，正式列入学校“地学专业基础课和专业课教材专项建设规划”。同时，这套教材的编写和出版还得到“地下信息探测技术与仪器”教育部重点实验室和“地球探测与信息技术”北京市重点学科的大力支持。

经过一段时间的酝酿，中国地质大学（北京）地球物理与信息技术学院于 2002 年 12 月 26 日成立了“地球物理系列教材编委会”。会议上宣布接受邀请参加编写教材的作者为（之后有所调整）：

(1) 重力场与重力勘探　　曾华霖
(2) 地磁场与磁力勘探　　管志宁
(3) 地电场与电法勘探　　李金铭
(4) 地震波场与地震勘探　　姚　姚



需要全本请访问 www.ertongbook.com

(5) 核辐射场与放射性勘查　　程业勋、王南萍、侯胜利

(6) 地球物理测井　　尉中良、邹长春

(7) 地球物理场与地球物理勘探　　刘光鼎、张贵宾等

各位作者提交了教材大纲，进行交流；会议还深入讨论了地球物理教材的内容、结构与编写的指导思想；要求于 2004 年内提交全部教材的送审稿。

2003 年 12 月 18 日再次召开地球物理系列教材编委会，编委们认真讨论了曾华霖教授提交的《重力场与重力勘探》送审稿，进一步贯彻编写指导思想。2004 年 2 月 24 日第三次编委会上，经过讨论强调了教材的科学性与系统性；同时传达了吴淦国校长关于教材应当是精品的主张。此次会议还形成以下共识：地球物理系列教材是专著性的，可以作为地球物理相关专业大学本科生的教科书，研究生的参考书，亦可供地球物理工作者参考；教师可以从教材中选择适当的内容向学生讲授，而教材的篇幅不受学时的限制。此外，还讨论了教材的审查方法与出版事宜。2004 年 12 月 20 日召开第四次编委会，确定了教材送审、评审和出版的日程安排。

现地球物理系列教材已基本按期完成，经过审阅、修改，近日即将提交地质出版社公开出版，很快就会与广大读者见面。我们真诚地希望读者们按照吴淦国校长提出的“特色 + 精品”的要求来审查这套地球物理系列教材，多多提出宝贵意见，以便进一步提高质量，使它在培养新一代地球物理学家的过程中能有所贡献，在全面建设小康社会中为振兴地球物理事业起到积极的推动作用。

在地球物理系列教材编写过程中，魏文博教授做了大量组织工作，特此致谢。

中国科学院院士

中国地球物理学会荣誉理事长

中国地质大学（北京）地球物理与信息技术学院院长



2004 年 12 月 29 日

# 前　　言

地球物理测井（简称测井）是地球物理学的重要分支，它以物理学、数学、地质学为理论基础，采用先进的电子及传感器、计算机信息论、层析成像和数据处理等技术，借助专门的探测仪器设备，沿钻井剖面观测岩层的物理性质（岩石物理性质），以研究和解决地质问题，进而发现油气、煤、金属与非金属、放射性、地热、地下水等矿产资源。近年来已扩展到工程地质、灾害地质、生态环境、考古研究等应用领域。

测井作为勘探与开发油气田的重要方法技术，至今已近 80 年的历史。随着科技进步和测井技术本身的发展，它在油气勘探、开发和生产的全过程中发挥着更大的作用，为油气工业带来更高的经济效益。

近十几年来的测井技术，特别是 20 世纪 90 年代后，取得了重大进展。按照传统的观点，测井技术在油气勘探与开发中，仅仅对油气层做些储层储集性能和含油气性能（孔隙度、渗透率、含油气饱和度和油水的可动性）定量或半定量的评价工作，这已远远跟不上油气工业迅猛发展的需要。而当今测井工作中评价油气藏的理论、方法技术有了长足的发展，解决地质问题的领域也在逐步扩大。目前，地球物理测井研究和解决油气勘探与开发问题，有以下几方面。

油气藏的基础地质问题研究

1）利用地球物理测井信息进行地层层序划分和标定。

2）利用测井资料进行油气藏精细地质构造以及断层研究。

3）以构造地质学基本理论为指导，通过构造应力分析，充分利用测井信息进行裂缝型储集带定量研究，认识裂缝发育分布规律。

4）地球物理测井沉积学的研究，综合其他地质资料，进行沉积微相的分析，确立沉积环境和古水流方向。

石油地质问题研究

1）利用地球物理测井信息解释评价油、气、水层，计算含油气岩系的孔隙度、渗透率和含油（气）饱和度。

2）利用测井信息研究生油层、盖层及油气的生、储、盖组合。

3）利用测井信息研究油储储量参数、地下流体性质、分布状况。

此外，测井工作还可用于现代地应力场定量分析，预测和监测地层压力、破裂压力，为合理开发油气和科学钻探提供依据。

本书以地球物理测井的物理基础、测量方法、应用技术为主线，着力构建一个比较完整的知识系统，以使读者比较全面地了解和掌握地球物理测井。

地球物理测井学科是地球物理学的重要分支。其物理基础是由测量对象的物理性质和相关变化规律所决定的。只有对研究对象的物理性质、井中各种地球物理场分布及变化规律有所了解和认识，才可能从整体上理解地球物理测井的测量方法和解释应用技术。为

此，本书的第一、二、三章集中讨论了电测井、声波测井和核测井三种基础测井方法的理论基础、测量原理、分析方法和应用技术；而在第四、五章中则集中讨论了由上述三种测井物理基础所发展起来的地层倾角测井、成像测井和核磁共振测井等现代测井技术的测量原理、分析方法和应用技术。

地球物理测井是解决有关矿产资源地质、工程地质、灾害地质、生态环境等问题的手段和依据，是对钻井内实际地质情况有条件地间接反映，必须将测井信息进行深加工，转换成地质信息、工程信息以及灾害地质、生态环境等信息，才能达到认识问题和解决问题的目的。当今的地球物理测井信息应用的发展趋势是综合有内在联系的多种资料，综合研究油气和其他矿产资源开发中有关勘探、开采和工程等问题。本书的第六、七两章地球物理测井信息采集、处理、解释、应用的方法和技术，着重讨论油气评价和油气藏的测井地学研究问题。

地球物理测井是一门仍在迅速发展的技术学科，伴随着油气等矿产资源开发的难度加大和科学技术的快速发展，测井新理论、新方法、新技术也在不断出现和发展。为了使读者对本学科的发展动态有所了解，书中有关章节介绍了地球物理测井学科前沿的研究概况和发展趋势，以供读者参考。

本书的内容主要是根据地球物理与信息技术专业、地质资源与地质工程专业和石油天然气工程学科专业本科生的学习需要而编撰的。由于不同专业学生的物理基础和知识背景有所差异，因此，使用本书时的内容选取和学时安排也应该有所不同。对于地球物理与信息技术学科的学生，应该较系统地学习第一、二、三、四、五章的内容；对于石油天然气工程学科的学生则应该偏于第六、七章的油气藏的解释评价和地质解释部分。

本书可以作为上述各学科专业研究生的参考用书，同时也可以作为上述各学科行业工程技术人员的继续教育读本。

作者

2005 年 5 月于北京

# 目　　录


序

前　言

第一章　电测井…… (1)

第一节　普通电阻率测井 …… (1)

一、岩石的电学性质 …… (1)

二、普通电阻率测井 …… (4)

第二节　侧向测井 …… (10)

一、侧向测井的原理 …… (10)

二、微侧向测井 …… (12)

三、邻近侧向测井 …… (13)

四、球形聚焦和微球形聚焦测井 …… (13)

五、双侧向测井 …… (14)

六、方位侧向测井 …… (15)

第三节　感应测井 …… (17)

一、感应测井原理 …… (18)

二、感应测井探测特性 …… (21)

第四节　介电测井 …… (26)

一、岩石介电常数和电磁特性 …… (26)

二、介电测井原理 …… (30)

三、介电测量 …… (31)

四、电磁波传播测井 …… (33)

第五节　自然电位测井…… (40)

一、地层岩石中的自然电动势 …… (40)

二、自然电位曲线幅度和形状 …… (42)

三、自然电位曲线的应用 …… (48)

第二章　声波测井 …… (52)

第一节　岩石的声学性质 …… (52)

一、岩石的非完全弹性体性质 …… (52)

二、岩石的弹性力学及声学参数 …… (53)

三、声速与岩层孔隙度、含油气水性质的关系 …… (56)

四、声波测井中的声波 …… (58)

第二节　声波速度测井…… (59)

一、井眼补偿声波测井 …… (59)

二、声波速度测井应用 …… (61)

第三节　声波幅度测井…… (65)

一、裸眼井声波幅度测井（声波衰减测井） …… (65)
二、声波水泥胶结测井 …… (66)
第四节　声波全波测井 …… (72)
一、长源距声系和记录方式 …… (72)
二、裸眼井声波全波波列（井壁波场传播模式） …… (73)
三、声波全波测井资料处理技术及应用 …… (77)
第三章　核测井 …… (78)
第一节　自然伽马和自然伽马能谱测井 …… (78)
一、自然伽马测井 …… (78)
二、自然伽马能谱测井 …… (87)
第二节　散射伽马测井 …… (96)
一、矿物和岩石对伽马射线的散射与吸收 …… (97)
二、密度测井和岩性密度测井 …… (101)
三、密度测井的应用 …… (104)
第三节　中子测井 …… (106)
一、中子测井理论概述 …… (106)
二、中子测井原理 …… (111)
三、中子测井应用 …… (117)
第四节　脉冲中子测井 …… (122)
一、脉冲中子测井理论概述 …… (122)
二、脉冲中子测井原理 …… (125)
第四章　地层倾角测井 …… (135)
第一节　地层倾角探测器概述 …… (135)
一、地层倾角测井仪 …… (135)
二、高分辨率地层学地层倾角测井仪（SHDT） …… (135)
三、地层倾角测井数据资料 …… (135)
第二节　地层倾角测量原理 …… (137)
一、根据地层法向矢量计算地层倾角和倾向 …… (137)
二、地层倾角测井数据处理及成果显示 …… (144)
第三节　地层倾角测井的地质应用 …… (148)
一、倾角模式及其地质含义 …… (148)
二、地层倾角测井构造地质学研究 …… (149)
三、地层倾角测井研究沉积相带内地层圈闭 …… (155)
第五章　成像测井 …… (161)
第一节　成像测井系统 …… (161)
第二节　微电阻率扫描成像测井 …… (163)
一、地层微电阻率扫描测井原理 …… (163)
二、全井眼地层微电阻率扫描成像仪（FMI） …… (165)
三、微电阻率成像数据处理 …… (167)
四、资料解释与应用 …… (169)
第三节　阵列感应成像测井 …… (171)

一、阵列感应测井原理 …… (171)
二、阵列感应测井软件聚焦合成 …… (171)
三、阵列感应测井曲线的应用 …… (174)
第四节　方位电阻率成像测井 …… (177)
一、测量原理 …… (177)
二、辅助测量 …… (179)
三、方位电阻率测井的应用 …… (182)
第五节　偶极横波成像测井 …… (185)
一、偶极横波成像测井原理 …… (185)
二、偶极横波测井仪器的工作方式 …… (186)
三、偶极横波成像测井的应用 …… (187)
第六节　核磁共振测井 …… (189)
一、核磁共振测井物理基础与实验 …… (189)
二、核磁共振测井方法 …… (202)
三、核磁共振测井的应用 …… (214)
第六章　测井资料解释 …… (229)
第一节　测井资料综合解释基础 …… (229)
一、测井解释评价的地质依据 …… (229)
二、数据的采集和收集 …… (239)
三、纯岩石地层的基本解释关系式 …… (242)
四、泥质地层的基本解释关系式 …… (248)
第二节　复杂地质条件的解释 …… (257)
一、复杂岩性储层的测井解释 …… (257)
二、低电阻油气层的测井解释评价 …… (265)
三、水淹层解释模型研究 …… (287)
第七章　测井地质解释 …… (294)
第一节　测井资料的地质解释 …… (294)
一、测井地质解释的内涵与外延 …… (294)
二、测井地质解释研究的内容 …… (294)
三、测井地质解释的研究方法论 …… (294)
第二节　测井资料的层序地层学分析 …… (297)
一、地质上的层序地层和测井层序的概念 …… (297)
二、测井层序分析方法 …… (300)
三、单井测井层序处理实例 …… (310)
四、以测井层序为基础的多井对比 …… (312)
第三节　测井沉积学研究 …… (313)
一、测井沉积学概念及解释模型 …… (313)
二、碎屑岩测井沉积微相建模与划分 …… (334)
三、碳酸盐岩测井沉积微相研究 …… (337)
四、测井沉积学解释计算机辅助系统 …… (342)
第四节　测井构造地质学分析 …… (350)
一、测井构造研究的一般方法 …… (350)



需要全本请访问 www.ertongbook.com

二、褶皱构造倾角解释方法 …… (351)
三、断裂构造倾角测井解释方法 …… (352)
四、不整合面地层倾角测井解释 …… (353)
五、利用井壁成像测井研究地质构造 …… (354)
六、逆冲带和水下沙坝地层倾角测井解释 …… (355)
第五节　测井烃源岩研究 …… (356)
一、烃源岩的测井分析与评价 …… (356)
二、烃源岩的测井评价参数 …… (360)
三、应用实例 …… (361)
第六节　裂缝储层定量分析与预测 …… (364)
一、岩心裂缝观测与破裂实验分析 …… (365)
二、井壁成像测井解释裂缝 …… (366)
三、裂缝预测 …… (370)
四、裂缝分布规律研究 …… (373)
第七节　盖层的测井分析与评价 …… (374)
一、盖层概述 …… (374)
二、泥页岩盖层测井评价参数 …… (374)
三、有效盖层的识别与评价 …… (378)
四、其他岩性盖层的测井分析 …… (379)
五、储盖结合测井分析 …… (379)
第八节　油藏描述 …… (383)
一、油藏描述概念 …… (383)
二、关键井研究 …… (386)
三、测井数据标准化 …… (387)
四、测井相分析 …… (389)
五、测井解释模型、单井评价与地层对比 …… (392)
六、油田构造、储集体的几何形态及参数集总 …… (393)
七、油气储量、成果显示与单井动态模拟 …… (396)
参考文献 …… (399)

# 第一章　电　测　井

## 第一节　普通电阻率测井

### 一、岩石的电学性质

岩石作为一种多孔（孔隙中含流体）混合介质，表征其电学性质的参数为电阻率 R、电导率 σ、介电常数 ε和磁导率 μ。石油测井的研究对象主要是沉积岩，只涉及研究电阻率、电 导率和介电常数。对于金属矿测井和石油测井中的工程应用问题，还涉及研究岩石和介质的磁导率。

目前所使用的电测井方法包括普通电阻率测井、侧向测井、感应测井、介电测井、电磁波传播测井和核磁共振测井。

（一）地层岩石导电的一般概念

岩石的导电性用电阻率量度，单位是欧姆·米，记作 Ω·m。岩石导电性亦可用电导率量度，电阻率的倒数是电导率，用 σ表示，单位是西门子/米，记作 S/m。实际使用时，常用毫西门子/米。表 1－1 列出常见地层岩石和矿物的电阻率。

表 1－1　常见岩石和矿物电阻率

| 名　称 | 电阻率/（Ω·m） | 名　称 | 电阻率/（Ω·m） |
|---|---|---|---|
| 粘　土 | （1～2）×$10^2$ | 硬石膏 | $10^4$～$10^6$ |
| 泥　岩 | 5～60 | 石　英 | $10^{12}$～$10^{14}$ |
| 页　岩 | 10～100 | 白云母 | 4×$10^{11}$ |
| 疏松砂岩 | 2～50 | 长　石 | 4×$10^{11}$ |
| 致密砂岩 | 20～1000 | 石　油 | $10^9$～$10^{16}$ |
| 含油气砂岩 | 2～1000 | 方解石 | 5×$10^5$～5×$10^{12}$ |
| 贝壳石灰岩 | 20～2000 | 石　墨 | $10^{-6}$～3×$10^{-4}$ |
| 石灰岩 | 50～5000 | 磁铁矿 | $10^{-4}$～6×$10^{-3}$ |
| 白云岩 | 50～5000 | 黄铁矿 | $10^{-4}$ |
| 玄武岩 | 500～$10^5$ | 黄铜矿 | $10^{-3}$ |
| 花岗岩 | 500～$10^5$ | | |

由表 1－1 可见：不同的岩石有不同的电阻率。同种岩石的电阻率不是单一值，而是分布在一定范围内。岩石的电阻率通常比组成它的矿物的电阻率低最多。为了弄清上述现象的原因，先要回忆一下物质导电的机理。

物质导电是因其内部有载流子存在。自由电子、离子都是载流子。载流子的多少与性质决定着物质导电性的好坏。矿物和岩石的导电性也由载流子的多少和性质决定，只是它们当中的离子除盐类溶于水后离解而成的离子外，还包括矿物晶体里的离子。岩石由两部分组成，其一是固体部分，包括组成矿物、胶结物及各种杂质，测井中称为骨架；其二是流体部分，包括水、油、气等，流体的多少取决于岩石的孔隙度。岩石的物理性质由其骨

架、孔隙流体的物理性质及其相对含量决定。火成岩、沉积岩的骨架都是造岩矿物，仅在个别情况下富集导电性良好的金属矿物。所以，岩石骨架电阻率很高，一般都看作不导电。

地层岩石都有一定的孔隙，特别是某些沉积岩，其孔隙较发育，因此才能成为油气储集层。火成岩、变质岩的孔隙度比较低。近年来也发现有孔隙发育的火成岩，如孔隙度达25.2%的煌斑岩、裂缝发育的花岗岩，它们都可能成为油气储集层。岩石孔隙中充填的地层水都溶有若干种盐类，于是地层水中含有大量的离子，其导电性较好，使得地层岩石的电性也得以改善。这种依赖孔隙水中离子导电的岩石，称为离子导电岩石。石油测井中研究的岩石都属于这类岩石。

既然地层岩石的导电性依赖于其孔隙中的离子运动，不难看出下列因素都要影响岩石的导电性：盐的种类（不同盐类离解的离子数和离子价不同)；温度和压力（影响离子的运动速度)；孔隙度（孔隙度大，地层水多，离子数目也多)；孔道弯曲度（孔道越弯曲，离子运动的阻力越大，离子走的路程越长)；含油气情况（油气排走一部分甚至全部地层水，使孔隙中离子数目减少，而油气又基本不导电)。测井解释时，常常把上述大量的影响因素归纳为岩性（包括矿物成分和岩石结构)、孔隙度、含油气性以及地层水电阻率响应。由此可见，测量地层岩石电阻率能够识别岩性、确定孔隙度、判断油气水层。同时也可看到，地层岩石的电阻率具有多解性。如岩石电阻率高可能是含油气引起，也可能是岩性改变或孔隙不发育引起的。

(二) 油气储层岩石的导电性

1. 碎屑岩

这类岩石都有一定的孔隙，孔隙中饱含地层水。孔隙形状比较简单，孔道截面均匀，弯曲度小。所以，这类岩石电阻率变化范围较小。

砂层中含有高矿化度地层水时，其电阻率可低于1 Ω·m；含淡水时，砂层电阻率也只有几十至几百欧姆·米，是碎屑岩类中电阻率最低的一种岩性。

砂岩的电阻率高于砂层，变化范围也大，从几个欧姆·米到上千欧姆·米。与砂岩的分选程度、胶结物及胶结程度有关。分选差、胶结好的致密砂岩的电阻率高；分选好、胶结弱者电阻率低。泥质胶结砂岩的电阻率低于硅质、钙质胶结的砂岩。砂岩是碎屑岩类中可成为油层的主要岩性，含油砂岩的电阻率高于不含油的同种砂岩。

粉砂岩的组成颗粒较细，分选好，孔道均匀，离子运动的阻力较小。再者，粉砂岩中常有均匀分布的泥质或粘土颗粒，它们也增加了粉砂岩的导电性（见“粘土岩”)。因此，粉砂岩的电阻率比较低。

砾岩的颗粒较粗，分选很差，多数胶结良好，孔隙度很低。因而，砾岩的电阻率较高，高者可大于1 kΩ·m。也有孔隙发育的例子，这时的导电性与砂岩相差无几。

2. 粘土岩

一般说来，粘土岩的电阻率低于碎屑岩。这是因为这种岩石颗粒细、分选好、总孔隙发育，离子在孔道中运动受的阻力很小。不仅如此，由于粘土矿物内部低价离子（如$Mg^{2+}$）置换高价离子（如$Al^{3+}$)，使得矿物晶体内部缺少正电荷，晶体表面呈负电性。当这种矿物晶体置于水溶液时，就会吸引正离子到其表面。这些正离子受到的吸引力并不是一样大，在粘土颗粒表面附近的正离子受到的吸引力最强，一般不会移动。距离晶体表

面稍远的正离子受到的吸引力较弱，在外电场的作用下，很容易改变位置。这就是泥质颗粒表面的扩散偶电层（图 1－1）。由于扩散偶电层的正离子换位，增加了泥质颗粒的导电性。这种附加导电性明显地降低了粘土岩的电阻率。通常，泥岩的电阻率是最低的，为 5～60 Ω·m。

页岩的矿物成分与泥岩相同，仅仅结构比泥岩致密。因而，电阻率比泥岩要高一些。

3. 碳酸盐岩

石灰岩、白云岩的颗粒极细，孔隙度极小，一般小于 7%，几乎不含水。致密石灰岩、白云岩的电阻率高达（5～6）× $10^3$ Ω·m。碳酸盐岩在外界条件作用下，可形成溶洞或裂缝。孔隙通道极其复杂，连通性较差，并且变化十分剧烈。裂缝性的白云岩、石灰岩呈现明显的低电阻率，是碳酸盐岩中的储集层。无论何种碳酸盐岩，含泥质时，电阻率明显降低，如泥灰岩的电阻率近于砂岩电阻率。

4. 石膏和岩盐

孔隙度极低，如石膏仅 1%。因而，电阻率都很高。同样，当它们含泥质时，电阻率下降。

(三) 地层岩石的介电常数

地层岩石也是一种电介质。在电场的作用下，地层岩石中的新、老偶极子都会重新定向排列而极化。岩石极化能力用介电常数 ε表示。真空的介电常数 8.85× $10^{-12}$ F/m，用 $\varepsilon_0$ 表示。岩石的相对介电常数 ε 为

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \qquad (1-1)$$

表 1－2 列出了若干种矿物和岩石的相对介电常数，从表中可以看出岩石的相对介电常数为 4～8，即岩石骨架的介电常数变化不大；但岩石孔隙中水和油的介电常数相差甚大。岩石含水时，其介电常数明显高于该岩石含油时的介电常数。孔隙度不同的含水岩石中，孔隙度大的岩石，介电常数也大（图 1－2）。这就表明，影响地层介电常数的主要因素是孔隙中的水、孔隙度及水的相对含量（图 1－3）。例如岩石含泥质时，介电常数明显增加。

水的介电常数与温度的关系密切，但矿化度的变化对水的介电常数影响不大。表 1－3 是水的介电常数随温度的改变。

表 1－2 介电常数

| 电介质 | 相对介电常数 $\varepsilon_r$ | 电介质 | 相对介电常数 $\varepsilon_r$ |
|---|---|---|---|
| 空 气 | 1.000585 | 石 英 | 3.8 |
| 天然气 | 1 | 云 母 | 5.4 |
| 石 油 | 2～2.4 | 正长石 | 4 |
| 水 | 50～80 | 泥 岩 | 50～60 |
| 石灰岩 | 7.5～9.2 | 硬石膏 | 6.35 |
| 砂 岩 | 4.65 | 石 膏 | 4.16 |
| 白云岩 | 6.9 | 岩 盐 | 5.6～6.35 |

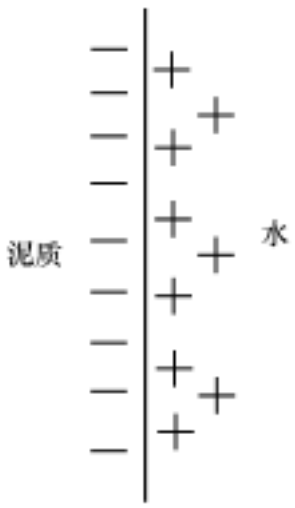



图 1－1　泥质颗粒表面的扩散偶电层

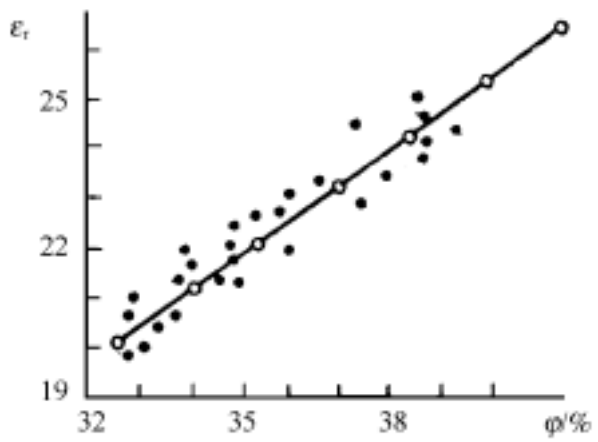



图 1－2　介电常数与孔隙度关系

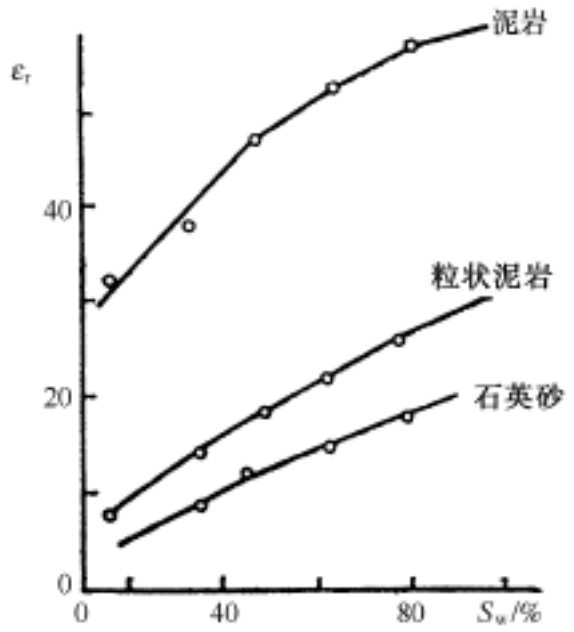



图 1－3　介电常数与含水饱和度关系

表 1－3　水的介电常数随温度的变化

| T/℃ | 0 | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $\varepsilon_r$ | 88 | 80 | 73 | 67 | 61 | 55 |

## 二、普通电阻率测井

### (一) 普通电阻率测井原理

电阻率测井就是沿井身测量井周围地层电阻率的变化。为此，需要向井中供应电流，在地层中形成电场，研究地层中电场的变化，求得地层电阻率。其测量原理如图 1－4 所示。把供电电极 A 和测量电极 M、N 组成的电极系放到井下，供电电极的回路电极 B (或 N) 放在井口。当电极系由井底向上提升时，由 A 电极供应电流 I，M、N 电极测量电位差 $\Delta U_{MN}$，它的变化反映了周围地层电阻率的变化。通过变换，即可测出地层的视电阻率。这样就能给出一条随深度变化的视电阻率曲线，可用下式表示:

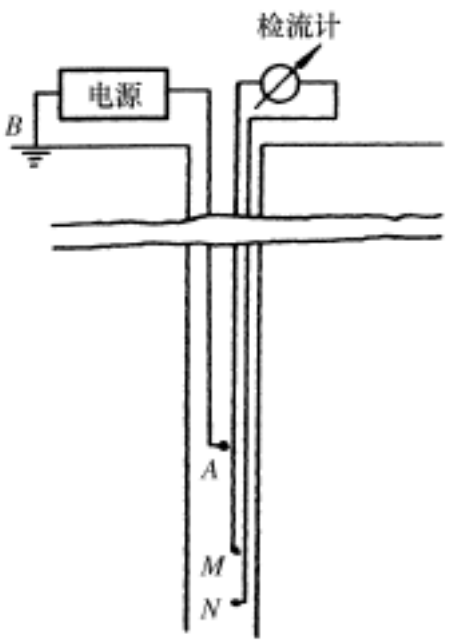



图 1－4　普通电阻率测井原理

$$R_a = K\frac{\Delta U_{MN}}{I} \qquad (1-2)$$

式中: $R_a$ 为视电阻率，Ω·m; $\Delta U_{MN}$ 为 MN 电极间的电位差，mV; I 为供电电流，测量时电流恒定，mA; K 为电极系系数。

假设井与周围地层为均匀介质，其电阻率用 $R_t$ 表示。A 电极形成的等位面为球面，与 A 电极相距为 r 处的电流密度为

$$j = \frac{I}{4\pi r^2} \qquad (1-3)$$

其电场强度可用微分形式的欧姆定律表示:

$$E = j \cdot R_t = \frac{I \cdot R_t}{4\pi r^2} \qquad (1-4)$$

对上式积分，可得 r 处的电位:

$$U_r = \frac{IR_t}{4\pi r} \qquad (1-5)$$

A 电极与 M、N 电极的距离分别为$\overline{AM}$和$\overline{AN}$，M、N 电极的电位分别为

$$U_M = \frac{I \cdot R_t}{4\pi \overline{AM}} \qquad (1-6)$$

$$U_N = \frac{I \cdot R_t}{4\pi \overline{AN}} \qquad (1-7)$$

M、N 电极间的电位差为

$$\Delta U_{MN} = U_M - U_N = \frac{IR_t}{4\pi}\left(\frac{1}{\overline{AM}} - \frac{1}{\overline{AN}}\right)$$

$$= \frac{IR_t}{4\pi} \cdot \frac{\overline{MN}}{\overline{AM} \cdot \overline{AN}}$$

由此得出均匀地层的电阻率:

$$R_t = \frac{4\pi \overline{AM} \cdot \overline{AN}}{\overline{MN}} \cdot \frac{\Delta U_{MN}}{I} = K\frac{\Delta U_{MN}}{I} \qquad (1-8)$$

$$K = \frac{4\pi \overline{AM} \cdot \overline{AN}}{\overline{MN}} \qquad (1-9)$$

K 为电极系系数，它的数值与电极间的距离有关。

如果使用 A、B 电极供电，M 电极测量（此时 N 电极位于井口），A 电极的电流 I 和 B 电极的 - I 对 M 电极均有贡献。根据电位叠加原理:

$$U_M = \frac{IR_t}{4\pi} \cdot \frac{1}{\overline{AM}} - \frac{IR_t}{4\pi}\frac{1}{\overline{BM}} \qquad (1-10)$$

由于 N 电极位于井口，离 A、B 电极很远，则

$$U_N = 0$$

则

$$\Delta U_{MN} = \frac{IR_t}{4\pi}\left(\frac{1}{\overline{AM}} - \frac{1}{\overline{BM}}\right) = \frac{IR_t}{4\pi}\frac{\overline{AB}}{\overline{AM} \cdot \overline{BM}}$$

$$R_t = \frac{4\pi \overline{AM} \cdot \overline{BM}}{\overline{AB}} \cdot \frac{\Delta U_{MN}}{I} \qquad (1-11)$$

$$K = \frac{4\pi \overline{AM} \cdot \overline{BM}}{\overline{AB}} \qquad (1-12)$$

如果$\overline{AM} = \overline{AB}$，$\overline{AN} = \overline{AM}$。这两种电极系得出同样的结果。因此把前者称为直接供电（单极供电）电极系，后者称为互换供电（双极供电）电极系。

在实际测井时，由于地层厚度有限，上、下有围岩，对于渗透性地层又会形成侵入带，各部分介质的电阻率不同，实际上是非均匀介质。因此，用上式得出的电阻率不等于地层的真电阻率，称为视电阻率 $R_a$。在一定程度上 $R_a$ 反映了地层电阻率的变化。通常，



需要全本请访问 www.ertongbook.com