

中国石化员工培训教材

测井资料采集与评价技术



CEJING ZILIAO CAIJI
YU PINGJIA JISHU

中国石化员工培训教材编审指导委员会 组织编写
本书主编 侯庆功 张晋言

中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

培训教材

测井资料采集与评价技术

中国石化员工培训教材编审指导委员会 组织编写

本书主编 侯庆功 张晋言

中国石化出版社

内 容 提 要

《测井资料采集与评价技术》为《中国石化员工培训教材》系列之一,主要服务于测井专业关键技术岗位人员岗位培训和相关专业技术人员知识更新,以本专业中初级专业技术人员为读者对象,突出“先进性”和“实用性”,内容以“四新”技术、技术应用和创新等为主,既介绍本专业技术发展趋势,也介绍技术应用和创新案例。主要内容包括:电法测井、声波测井、核测井、核磁共振测井、生产测井、地面采集系统与井下仪器、测井工艺及数据传输、常见事故分析与实例、测井设计与质量控制、井壁取心技术、射孔技术、测井数据处理、测井储层评价、生产测井解释、测井资料的地质与工程应用,以及质量安全与环境管理等内容。

本书是专业技术人员进行员工岗位技能培训的必备教材,也是专业技术人员必备的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

测井资料采集与评价技术/侯庆功主编. —北京:
中国石化出版社, 2014. 6
ISBN 978 - 7 - 5114 - 2795 - 3

I. ①测… II. ①侯… III. ①测井资料 - 采集②测井
资料 - 评价 IV. ①P631. 8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 083078 号

未经本社书面授权,本书任何部分不得被复制、抄袭,或者以任何
形式或任何方式传播。版权所有,侵权必究。

中国石化出版社出版发行

地址:北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编:100011 电话:(010)84271850

读者服务部电话:(010)84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail:press@sinopec.com

北京科信印刷有限公司印刷

全国各地新华书店经销

*

787 × 1092 毫米 16 开本 20 印张 501 千字

2014 年 7 月第 1 版 2014 年 7 月第 1 次印刷

定价:60.00 元

中国石化员工培训教材

编审指导委员会

主 任：李春光

委 员：戴 铨 谭克非 章治国 初 鹏

吕长江 张卫东 吕永健 徐 惠

张吉星 雍自强 寇建朝 张 征

蒋振盈 齐学忠 翟亚林 耿礼民

吕大鹏 郭安翔 何建英 石兴春

王妙云 徐跃华 孙久勤 吴文信

王德华 亓玉台 周志明 王子康

序

中国石化是上中下游一体化能源化工公司，经营规模大、业务链条长、员工数量多，在我国经济社会发展中具有举足轻重的作用。公司的发展，基础在队伍，关键在人才，根本在提高员工队伍整体素质。员工教育培训是建设高素质员工队伍的先导性、基础性、战略性工程，是加强人才队伍建设的重要途径。

当前，我们已开启了建设世界一流能源化工公司的新航程，加快转变发展方式的任务艰巨而繁重，这对进一步做好员工教育培训工作提出了新的更高要求。我们要以中国特色社会主义理论为指导，紧紧围绕企业改革发展、队伍建设和员工成长需要，以提高思想政治素质为根本，以能力建设为重点，积极构建符合中国石化实际的培训体系，加大重点和骨干人才培训力度，深入推进全员培训，不断提高教育培训的质量和效益，为打造世界一流提供有力的人才保证和智力支持。

培训教材是员工学习的工具。加强培训教材建设，能够有效反映和传递公司战略思想和企业文化，推动企业全员学习，促进学习型企业建设。中国石化员工培训教材编审指导委员会组织编写的这套系列教材，较好地反映了集团公司经营管理目标要求，总结了全体员工在实践中创造的好经验好做法，梳理了有关岗位工作职责和 workflows，分析研究了面临的新技术、新情况、新问题等，在此基础上进行了完善提升，具有很强的实践性、实用性和较高的理论性、思想性。这套系列培训教材的开发和出版，对推动全体员工进一步加强学习，进而提高全体员工的理论素养、知识水平和业务能力具有重要的意义。

学习的目的在于运用，希望全体员工大力弘扬理论联系实际的优良学风，紧密结合企业发展环境的新变化、新进展、新情况，学好用好培训教材，不断提高解决实际问题、做好本职工作的能力，真正做到学以致用、知行合一，把学习培训的成果切实转变为推进工作、促进改革创新的实际行动，为建设世界一流能源化工公司作出积极的贡献。



二〇一二年七月十六日

前言

根据中国石化发展战略要求,为加强培训资源建设、推进全员培训的深入开展,集团公司人事部组织梳理了近些年培训教材开发成果,调研了企业培训教材需求,开展了中国石化员工培训课程体系研究。在此基础上,按职业素养、综合管理、专业技术、技能操作、国际化业务、新员工六类,组织编写覆盖石油石化主要业务的系列培训教材,初步构建起中国石化特色的培训教材体系。这套系列教材围绕中国石化发展战略、队伍建设和员工成长的需要,以提高全体员工履行岗位职责的能力为重点,把研究和解决生产经营、改革发展面临的新挑战、新情况、新问题作为重要目标,把全体员工在实践中创造的好经验好做法作为重要内容,具有较强的实践性、针对性。这套培训教材的开发工作由中国石化员工培训教材编审指导委员会组织,集团公司人事部统筹协调,总部各业务部门分工负责专业指导和质量把关,主编单位负责组织培训教材编写。在培训教材开发和编写的过程中,上下协同、团结合作,各级领导给予了高度重视和支持,许多管理专家、技术骨干、技能操作能手为培训教材编写贡献了智慧、付出了辛勤的劳动。

本教材共包括16章,既介绍了测井专业的基础理论和技术发展趋势,也介绍了技术创新案例,主要内容包括:电法测井、声波测井、核测井、核磁共振测井、生产测井、地面采集系统与井下仪器、测井工艺及数据传输、常见事故分析与实例、测井设计与质量控制、井壁取心技术、射孔技术、测井数据处理、测井储层评价、生产测井解释、测井资料的地质与工程应用、质量安全管理、测井工程师岗位职责以及测井技术标准等内容。

《测井资料采集与评价技术》教材由胜利测井公司负责组织编写,江汉测录井工程公司、江苏地质测井处、华东测井公司、华北测井公司参加部分内容编写。主编侯庆功、张晋言,具体编写人员为:魏文忠、韦文翔、张延明、王国防、张德峰、刘树勤、翟勇、刘海河、郭红旗、杨双彦、张林、刘伟、顿新忠编写。此外,胜利测井公司的柏强、曹守敏、陈新生、戴为民、葛承河、李军、李丽、盘宗业、王现兵、许大华、项国庆、张启子,江汉测录井工程公司魏远明,江苏地质测井处陈建清,华东测井公司谢金平,华北测井公司李健伟等参

与了部分编写工作。本教材已经中国石油化工集团公司人事部组织审定通过，主审赵文杰，参加审定的人员有中石化工程研究院谢关宝，华北测井公司李健伟，审定工作得到了胜利石油管理局的大力支持，中国石化出版社对教材的编写和出版工作给予了通力协作和配合，在此一并表示感谢。

由于本教材涵盖的内容较多，不同企业之间所使用的各类仪表不尽相同，编写难度较大，加之编写时间紧迫，不足之处在所难免。本教材中未介绍的仪表，请按其使用说明书进行操作，同时敬请各使用单位及个人对教材提出宝贵意见和建议，以便教材修订时补充更正。

目 录

第1章 电法测井	(1)
1.1 自然电位测井	(1)
1.2 电阻率测井	(2)
1.3 地层倾角测井	(14)
1.4 电阻率成像测井	(15)
1.5 井径测井	(16)
1.6 井斜方位测井	(17)
1.7 介电测井	(17)
第2章 声波测井	(20)
2.1 声波速度测井	(20)
2.2 声波幅度测井	(22)
2.3 声波全波列测井	(24)
2.4 多极子阵列声波测井	(25)
2.5 声波成像测井	(28)
2.6 垂直地震剖面测井	(28)
第3章 核测井	(31)
3.1 自然伽马和自然伽马能谱测井	(31)
3.2 密度及岩性密度测井	(33)
3.3 中子孔隙度测井	(35)
3.4 脉冲中子测井	(37)
3.5 宽能域中子伽马能谱测井、氯能谱测井	(40)
第4章 核磁共振测井	(42)
4.1 基本原理	(42)
4.2 核磁共振测井方法	(43)
4.3 提供的地层地质信息和解释模型	(45)
4.4 核磁共振测井设计和观测模式的选择	(46)
4.5 核磁共振测井的应用	(48)
第5章 生产测井和其他测井	(56)
5.1 温度测井	(56)
5.2 压力测井	(56)
5.3 井下流量测井	(57)
5.4 持水率测井	(59)
5.5 多臂井径测井	(61)
5.6 电磁探伤测井	(62)
5.7 电缆地层测试	(63)

第6章 地面采集系统与井下仪器	(69)
6.1 测井采集系统概述	(69)
6.2 数控测井系统	(71)
6.3 成像测井系统	(73)
第7章 测井工艺及数据传输	(105)
7.1 电缆输送测井	(105)
7.2 管具输送测井	(106)
7.3 欠平衡测井技术	(114)
7.4 测井井下数据传输与记录	(116)
7.5 快速测井平台技术	(125)
第8章 常见事故分析与实例	(126)
8.1 测井施工危险因素分析	(126)
8.2 遇卡原因与卡点确定	(128)
8.3 仪器落井与打捞	(131)
8.4 事故案例分析	(137)
第9章 测井设计与质量控制	(141)
9.1 测井设计	(141)
9.2 测井现场质量控制	(146)
9.3 测井施工的有关要求	(149)
第10章 井壁取心技术	(151)
10.1 井壁取心位置确定	(151)
10.2 撞击式井壁取心	(151)
10.3 旋转式井壁取心	(157)
第11章 射孔技术	(164)
11.1 射孔器	(164)
11.2 射孔设计及优化	(166)
11.3 射孔作业	(167)
11.4 射孔安全	(175)
第12章 测井数据处理	(180)
12.1 测井资料处理与解释系统介绍	(180)
12.2 数据处理	(181)
第13章 测井储层评价	(192)
13.1 油气层测井评价的基本原理	(192)
13.2 各类油气层的综合评价技术	(217)
13.3 电缆式地层测试资料的解释	(231)
第14章 生产测井解释	(236)
14.1 注入剖面解释	(236)
14.2 产出剖面解释	(242)
14.3 剩余油饱和度测井	(248)
14.4 工程测井解释	(255)

第 15 章 测井资料的地质与工程应用 (266)

15.1 测井资料的地质应用 (266)

15.2 测井资料的工程应用 (273)

第 16 章 质量、安全、健康与环境管理 (282)

16.1 QHSH 管理体系 (282)

16.2 QHSE 管理体系主要内容 (283)

16.3 QHSE 应急管理及预案 (290)

16.4 QHSE 作业指导书及现场检查表 (295)

参考文献 (299)

附录 1 测井工程师岗位职责 (301)

附录 2 测井技术标准索引 (305)

第1章 电法测井

1.1 自然电位测井

人们在早期的生产实践中就发现这样一种现象, 当一个单独的电极在井中移动时, 可以记录到一条电位变化的曲线。这种电位的变化非常稳定, 有极高的可重复性。在没有人为地向井内供电的情况下, 置于井内用作测量的电极沿井筒移动时, 可以测量到井内电位的变化。显然, 这个与岩性有关的电位是由自然电场产生的, 故称之为自然电位。自然电位测井就是沿着井眼连续测量在地层电化学作用下产生随井深变化的电位。

对于完全含水的储集层, 储集层的自然电动势主要由三种因素形成的: 扩散电动势, 扩散—吸附电动势和过滤电动势。

1.1.1 扩散电动势

假设泥浆滤液(C_m)矿化度小于原状地层水溶液矿化度(C_w), 即 $C_w > C_m$ 。且假设岩性很纯, 岩石孔隙几乎没有离子双电层, 这时泥浆滤液与原状地层水溶液的交界面由无数孔隙构成的透性隔膜, 在渗透压作用下, 高浓度地层水中的离子将向低浓度的泥浆滤液中扩散。由于 Cl^- 迁移速度明显高于 Na^+ , 将使泥浆滤液一侧 Cl^- 相对增多, 而地层水一侧 Na^+ 相对增加, 在接触面两侧形成正、负电荷富集。应用电化学知识, 可导出两种自由溶液相接触时计算扩散电动势的涅耳斯特方程, 该方程为:

$$E_d = K_d \times \lg(R_m/R_w) \quad (1-1)$$

式中 K_d ——扩散电动势系数, mV;

R_m ——泥浆滤液电阻率, $\Omega \cdot m$;

R_w ——地层水电阻率, $\Omega \cdot m$ 。

1.1.2 扩散—吸附电动势

对岩性不太纯、泥质含量较多的储集层, 岩石颗粒表面将形成明显的离子双电层, 阳离子交换现象将会非常显著。这时岩石孔隙内有两种水, 一种是孔壁表面包括双电层在内的粘土水, 它富含 Cl^- 、 Na^+ 很少, 扩散层内的 Na^+ 可保持正常的迁移率, 另一种是离孔壁较远的“远水”, 它是正常的地层水, 两种离子基本平衡。这时在浓度差作用下发生的离子扩散包括两部分, 一部分是远水中的离子扩散, 与纯岩性储集层一样; 另一部分是双电层的扩散层中被静电吸引的阳离子发生的扩散。对于纯泥岩, 岩石孔隙内没有远水, 即只有扩散层中的阳离子扩散, 无阴离子扩散, 将产生最大的反向电动势。

1.1.3 过滤电动势

为了防止井喷, 钻井时的泥浆柱压力略大于地层压力。在此压力差的作用下, 泥浆滤液会向岩石孔隙内渗滤, 并会带动离子双电层中扩散层的流体向同一方向流动, 泥浆滤液为电

中性、而扩散层富集阳离子，故在低压一侧形成正电荷富集，而在高压一侧形成负电荷富集，从而形成过滤电动势。

自然电位的幅度和曲线形状，在砂泥岩地层剖面中，主要决定于造成自然电场的静自然电位(SSP)，并受自然电流分布的影响。SSP的大小取决于岩性、地层温度、地层水和泥浆中所含离子成分以及他们的电阻率 R_m 和 R_w 之比；而自然电流的分布则决定于它所流经的介质电阻率及地层厚度和井径的大小。

自然电位定性应用有：在砂泥岩地层剖面中划分储集层和计算泥质含量；协助判断油气水层和水淹层；地层对比和沉积相研究等。在定量应用方面，经常用来估算泥质含量和确定地层水电阻率。

1.2 电阻率测井

自20世纪20年代发明电测井以来，电阻率测井一直是勘探、开发石油天然气的重要测井方法。尤其在60年代，电阻率测井得到了迅速发展，新仪器、新方法不断出现，使得电阻率测井成为划分油气层、计算油气饱和度的重要依据。

1.2.1 电极系测井

电极电阻率测井是世界上最早发展起来的测井方法，也是石油测井技术中最基本和最常用的测井方法之一。这类测井方法以地层岩石的导电性质为测井基础，在划分钻井地质剖面 and 判断流体性质等工作中起着重要作用。在电极测井时，先由供电电极在井内建立起电场，再由测量电极来测量电场中某点的电位或某两点的电位差，从而了解处在测量空间的介质导电特性。因此，电阻率测井的理论实质是研究井下各种不同介质中电场的分布问题，对于均匀介质，通过测量电位差，由式(1-2)很容易求出介质电阻率的数值。

$$R_t = k \frac{\Delta V}{I} \quad (1-2)$$

式中 R_t ——岩石电阻率， $\Omega \cdot m$ ；

ΔV ——测得的电位差，V；

k ——比例系数；

I ——通过的电流，A。

但是，在实际的井剖面中，采用单极供电线路(见表1-1)所测得的电位差 ΔV 。不仅仅反映地层岩石的真电阻率 R_t ，还要受泥浆电阻率 R_m 、目的层的厚度 h 、上下围岩电阻率 R_s 、泥浆侵入带电阻率 R_i 、井径 d 、侵入带直径 D 以及电极系结构等因素的影响，因为这些介质的电阻率通常是不同的。因此就不能直接用式(1-2)求解的电阻率数值来表示井下岩石的真电阻率值，而是地层的视电阻率。

电极系测井又分为梯度电极系测井和电位电极系测井两种。当电极系的单电极到靠近它的成对电极间的距离大于成对电极间的距离时，称为梯度电极系。当电极系的单电极到靠近它的成对电极间的距离小于成对电极间的距离时，成为电位电极系。目前在现场使用的电极测井有2.5m底部梯度测井、4m底部梯度测井，0.4m电位测井等(表1-1)。由于电测井没有使用聚焦原理，使得测井无法达到深探测与高分辨率的统一。反映储层的测井特征如下：

表 1-1 普通电极系的分类

类型	电位电极系				梯度电极系			
	单极供电		双极供电		单极供电		双极供电	
	正装	倒装	正装	倒装	正装	倒装	正装	倒装
图示								
电极距	AM	AM	AM	AM	AO	AO	MO	MO
电极系名称	单极供电 正装电位电极系	单极供电 倒装电位电极系	双极供电 正装电位电极系	双极供电 倒装电位电极系	单极供电 正装(底部)梯度电极系	单极供电 倒装(顶部)梯度电极系	双极供电 正装(底部)梯度电极系	双极供电 倒装(顶部)梯度电极系

(1) 无论对于厚岩层还是薄岩层，梯度电极系的曲线对着高电阻率岩层的地方显示为相对高的数值；而在低电阻率岩层上则显示为相对低的数值。据此，我们可以利用曲线的变化判断岩层电阻率的相对高低。

(2) 梯度电极系视电阻率曲线的形态，相对于岩层中心具有不对称性。底部梯度电极系的曲线，在高阻层底界面处出现极大值，顶界面出现极小值；顶部梯度电极系的曲线则与此相反，这是利用视电阻率曲线确定地层界面的重要指示信息。

(3) 对于高阻厚层而言，对着地层中心部分有一段与深度轴平行的直线，其数值近似等于岩层的真电阻率；但是随着地层厚度减小以及围岩影响的存在，地层中心处的直线段消失，对应的数值将不再近似等于岩层真电阻率。

(4) 对于高阻薄层，在成对电极一方距高阻层界面一个电极距处，曲线出现假极大值；这是由于高电阻率岩层对电流产生屏蔽作用的结果，它并不表示该处岩层的电阻率增高。因为对着高阻薄层界面处的曲线只有一个极大值尖峰最接近于该层的真电阻率，可取它的极大值近似作为薄层的曲线数值。

实践证明：电极测井的应用受到一定条件的限制。因为用普通电极系所测得的视电阻率与很多因素有关，使得在测井定量解释中，无法使用其测井数据。尤其在盐水泥浆和膏盐剖面中，由于井内充满电阻率很低的高矿化度泥浆或地层电阻率特别高，普通电极测井因受井内泥浆分流和围岩低阻的严重影响，使供电电极流出的电流大部分沿泥浆或围岩流动，而流入高阻层的却很少，因此测量的视电阻数值降低且曲线变化平缓，甚至几乎是一条直线，失去了应有的功能效力。

1.2.2 侧向测井

侧向测井是在普通电阻率测井电极系的基础上研制的电流聚焦测井。它迫使电流不沿井筒流动而硬把电流挤入地层，测井的结果受泥浆电阻率、井径及地层厚度影响小，测量结果可以用于测井定量解释。

侧向测井的基本原理是采用电流屏蔽方法，在主供电电极两侧分别装有屏蔽电极，并给它们供以相同极性的电流，使其电位都相等（见图 1-1）。由于同极性电流的相互排斥作用，

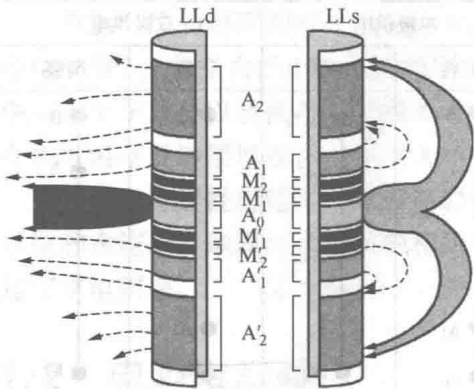


图 1-1 双侧向测井原理图

将迫使主电极的电流经聚焦后流入地层，因而减小了井眼和围岩的影响。显然，主电流是呈水平层状电流束，垂直于井轴侧向流入地层的，这样就使井的分流作用和低阻层对电流的影响减至最小程度。因此，侧向测井在高矿化度泥浆和高阻薄层剖面中，能获得较真实地反映地层电阻率变化的测井曲线，并能解决普通电极系测井所不能解决的问题。这种测井方法不仅是盐水泥浆和膏盐剖面（的测井项目），也是淡水泥浆和薄互层剖面中的主要测井方法之一。

通常按电极系结构和电极数目的不同，侧向测井可划分为三侧向、六侧向、七侧向、八侧向和双侧向（有 9 个电极）测井；按探测深度，它们又有深、中、浅之分；还可分为普通聚焦和球形聚焦型。它们的基本原理相同，只是装置结构或探测特性有所差异。目前，现场使用最多的侧向测井是深浅双侧向和微球形聚焦测井组合。

1. 双侧向测井

双侧向测井工作方式采用“恒功率法”测量，即采取屏流调整主电流的方式。由屏流在监督电极间产生的电位差调节电流 I_0 的大小，以便使监督电位差趋向于零，从而使主电流聚焦。这时测量主电流 I_0 和监督电极的电位 V_{m1} ，再将它们的积 $I_0 \times V_{m1}$ （此处 I_0 和 V_{m1} 是可变的，但其乘积为常数），与选定的恒定功率比较，用其差值调节屏蔽电流，从而开始新的测量过程。测量的视电阻率为：

$$R_{DLL} = K \frac{V_{m1}}{I_0} \quad (1-3)$$

式中 V_{m1} ——监督电极的电位，V；

I_0 ——测量主电流，A；

K ——双侧向电极系系数，按深、浅侧向分别给定。

双侧向测井探测深度、纵向分层能力和电阻率的测量范围比电极系测井有了明显的提高，其测井数据可用来进行定量测井解释，也可用来划分厚度在 0.4m 以上的低阻泥岩夹层，高阻致密层和不同岩性的地层剖面，利用测井解释图版，可以求出地层真电阻率 R_t 和侵入带直径 D_0 。在渗透层处，根据深浅侧向视电阻率曲线重叠出现的幅度差，可直观地判断油气和水层，以及裂缝发育情况。深、浅侧向的探测深度差别较大，深侧向探测半径约为 115cm，浅侧向探测半径约为 30 ~ 35cm，这样深、浅侧向与微球形聚焦组合测井可以获得深、中、浅三条电阻率曲线，提高了测井时效和满足了测井定量解释的需要。

双侧向测井需要导电泥浆，泥浆电阻率必须低于地层电阻率，当地层电阻率超过 2000Ω·m 时，在盐水或在淡水泥浆中，双侧向是优先选择的电阻率测井项目。

2. 球形聚焦测井

球形聚焦测井是一种探测深度浅，但受井眼影响的浅探测电阻率测井，常与双感应测井组合应用。实验研究表明，较好的球形聚焦电极系是 $A_0 0.112 M_0 0.091 A_1 0.2 M_1 0.101 M_2$ 。电极对称排列，主电极距主电流回路电极 B 的距离为 2.524m，该电极为柱形，长 0.601m。

其中 M_0 和 M_0' 为测量电极, A_1 和 A_1' 为辅助电极, M_2 和 M_2' 为监督电极。同名电极之间用粗导线连接。主电极流出的电流分为两部分: 流入辅助电极 A_1 和 A_1' 的电流称为辅助电流, 它基本上在仪器外壳与井壁间的泥浆及泥饼中流动, 故将主电流挤入地里, 井眼影响小; 流入回路电极 B 的电流称为主电流, 它在辅助电流排挤下进入地层, 在地层内呈辐射状流动, 其等位面大体上是以主电极表面为中心的球面, 球形聚焦由此得名(图 1-2)。用监督电极电位差 $\Delta V_{M_1 M_2}$; 调节主电流大小, 使该电位差接近于 0; 给测量电极 M_0 与监督电极中点的电位差规定一个恒定值, 当该电位差不等于该值时, 它将自动调节辅助电流使之保持恒定。根据测量的主电流和选择的恒定电压可计算球形聚焦测井视电阻率。球形聚焦测井由于使用辅助电流, 使主电流不可能在井眼内流动, 因此常见井眼直径和地层电阻率范围内, 其测量的视电阻率的井眼校正系数可保持在 0.9 ~ 1.1 的范围内, 对于一般的解释, 这一影响可以忽略。球形聚焦测井的探测半径比八侧向还小, 大约 0.3m。它是经常与双感应测井组合应用的浅探测项目。

微球形聚焦测井是按球形聚焦测井原理设计的冲洗带电阻率测井, 其电极系结构和电流分布如图 1-3。电极系装在贴井壁的绝缘极板上。极板中心是面积较大的长方形主电极 A_0 ; 其外是两个矩形环状电极, 靠近 A_0 者为测量电极 M_0 , 另一个是参考电极 A_1 ; 再向外, 对称排列两对监督电极, 对称电极两两相连; 用极板金属护套和支撑板做回流电极 B 。

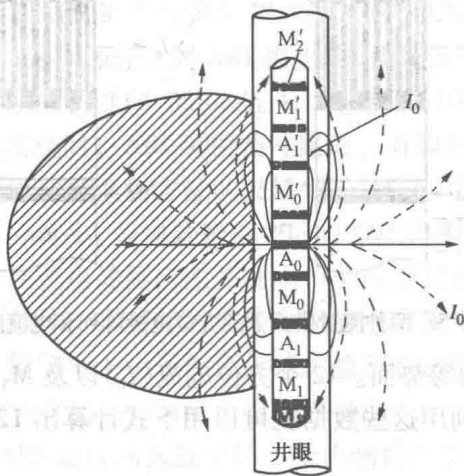


图 1-2 球形聚焦电极系与电流分布

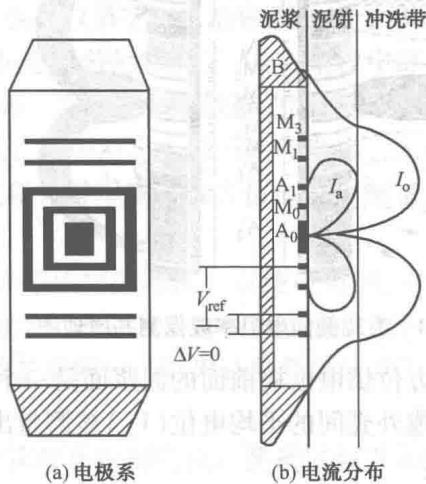


图 1-3 微球形聚焦电极系与电流分布

因为微球形聚焦测井与球形聚焦测井原理相同, 而微球形聚焦电极系贴在井壁上, 故其辅助电流主要在泥饼附近流动, 从而迫使主电流垂直穿过泥饼流向地层, 因而泥饼影响减小; 由于主电流回流电极 B 距主电极不远, 故主电流进入地层后又很快发散, 这使其探测深度很浅。当微球形聚焦测井近似几何因子为 1 时, 其探测深度才大约 5cm。因此, 微球形聚焦测井是目前最好的冲洗带电阻率测井方法。

3. 方位侧向电阻率成像测井

20 世纪 90 年代以来, 侧向测井在常规双侧向测井仪的基础上, 演变和发展了新一代侧向测井仪器, 它们是方位侧向成像测井和阵列侧向测井, 如斯伦贝谢 (Schlumberger) 公司的方位侧向测井仪 ARI 和高分辨率方位侧向测井电极系 HALS, 斯伦贝谢 (Schlumberger) 公司的高分辨率阵列侧向成像 HRLA 和 Baker Atlas 公司的阵列侧向测井仪 HDLL。

1992 年, Davies 等人推出了新一代侧向测井仪—方位电阻率成像测井仪 ARI。ARI 是一

种阵列侧向型宏观电阻率成像测井仪器。它是由常规双侧向测井仪演变而来的，即在双侧向 A_2 屏蔽电极的中部增加一个方位阵列电极，以测量井周 12 个方位的定向电阻率值，同时保留了深、浅侧向测量(图 1-3)。其中方位电阻率测量的垂向分辨率为 20cm，方位分辨率 30° ，探测深度与深侧向的相近。

在方位阵列电极的详细图解(图 1-4)中显示了由这个电极阵列所做的深测量和辅助测量的电流路径。深探测的方位电阻率测量工作频率为 35Hz，与深侧向的一样，其电流从 12 个方位供电电极流向地面，这些电流在顶部由 A_2 电极上部发出的电流聚焦，在底部则由 A_2 电极下部发出的电流及 A_0 、 A_1 、 A_1' 及 A_2' 发出的电流聚焦，另外，每一个方位电极电流都由其相邻方位电极发出的电流聚焦。

在每个供电电极上都安装有一个监督电极(见图 1-5)，它通过一个反馈电路控制供电电极电流，而监督电极的电位与方位阵列电极两侧的屏蔽电极 A_2 中的环状监督电极的平均电位保持一致。

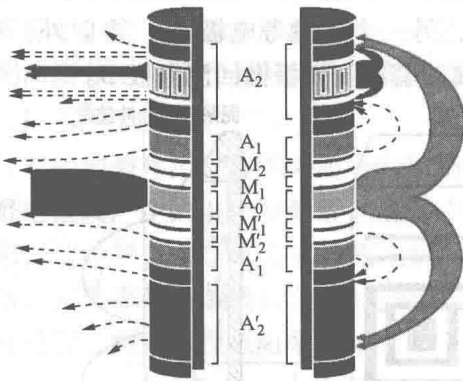


图 1-4 方位侧向电阻率成像测井原理图

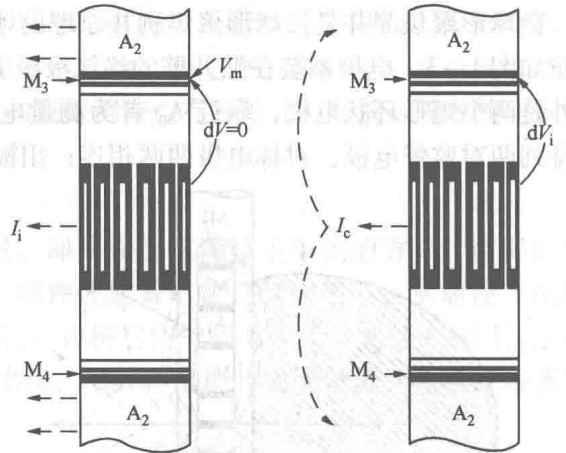


图 1-5 两种测量模式下的方位电极阵列和电流路径图

在方位供电电极前面的泥浆面是一个有效的等势面。12 个方位电流(I_i)以及 M_3 、 M_4 电极与电缆外壳间的平均电位(V_m)被测量出来，利用这些数据就可以用下式计算出 12 个方位电阻率：

$$R_i = k' \frac{V_m}{I_i} \quad (1-4)$$

式中 k' ——几何因子；

I_i ——方位电流，A；

V_m ——电极与电缆外壳间的平均电位，V。

对 12 个方位电阻率求和，就可以得到一个高分辨率电阻率测量曲线，这种技术就相当于用相同高度的单柱状电极代替方位阵列电极。

方位电阻率测量对仪器偏心和井眼不规则的反应很灵敏，为此，增加了辅助方位测量，以便对这些影响加以校正。在方位电阻率测量的同时进行一个辅助测量，此辅助测量的工作频率为 71kHz，从而可以避免与 35Hz 的深探测之间的相互干扰。

在辅助测量模式下，电流从每一个方位电极流向屏蔽电极 A_2 ，而方位电极和环状监督电极 M_3 和 M_4 为测量电极。测量记录方位监督电极的电位与环状监督电极的平均电位之间的电位差(dV_i)。

由于每个方位电极流过相同的电流(I_c), 所以可以利用下面的公式计算出 12 条电阻率曲线:

$$R_{ci} = C \frac{dV_i}{I_c} \quad (1-5)$$

式中 C ——几何因子;

dV_i ——方位监督电极的电位与环状监督电极的平均电位之间的电位差, V;

I_c ——流过方位电极的电流, A。

在一个无限均匀的流体中, R_{ci} 就是流体电阻率。辅助测量的探测深度非常浅, 其电流路径与仪器接近, 并且大部分的电流回流到与方位阵列电极相接近的 A2 电极中。

由于井眼流体比地层的导电性更强, 所以绝大部分的电流流经泥浆, 因此测量响应主要与每个方位电极前面的泥浆体积有关, 也就是说测量响应受井眼尺寸和形状以及仪器偏心的影响极小。

辅助测量的主要目的是对方位电阻率进行井眼不规则和仪器偏心影响校正提供资料, 同时得到一个电间隙, 根据这个电间隙, 如果泥浆电阻率(R_m)是已知的或单独测量的, 就可以计算出井眼的尺寸和形状。

为满足组合测井的需要, Smits 等人于 1995 年研制出了高分辨率方位侧向测井电极系 HALS。HALS 是平台快车 PLATFORM EXPRESS 组合仪器(还包括密度、中子和自然伽马等测量)的一部分。同 ARI 相比较, HALS 中的方位电极阵列移到了 A0 主电极中部, 而且整个电极系的长度(4.88m)是 ARI 电极系(10.15m)的一半。它们所依据的测量原理是相同的, 但具体实施时, ARI 采用硬件聚焦、有源测量方式; 而 HALS 采用了软件聚焦、无源测量方式。利用软件聚焦方法的灵活性, HALS 可以合成高分辨率深、浅方位电阻率测量, 以及常规和高分辨率(垂向分辨率 20cm)双侧向测量。

硬件聚焦的侧向测井利用一个反馈回路调节屏蔽或探测电流, 以使电极 M_1 和 M_2 维持等电位条件, 从而使用电极发射的电流聚焦进入地层。理论上, 这种做法要求放大器增益无穷大, 但实际上为了保证仪器的稳定性, 这一增益是有限的。结果是监督电极并不是精确地处于等电位状态, 因而会引起测量误差。

HALS 通过两次独立的非聚焦测量的叠加来计算聚焦探测电流。测量结果以某种方法相加, 以消去监督电压, 从而满足聚焦条件。从而避免了反馈回路问题, 改善了聚焦精度。而且这种方法增加了灵活性, 因为可以替换不同的聚焦条件而不必修改硬件。

方位电阻率成像测井改善了侧向测井的一些不足。测量结果可用于对方位电阻率进行仪器偏心 and 井眼形状及尺寸变化影响的校正; 方位电阻率测井的 LL_{hr} 曲线探测深, 纵向分辨率高, 提高了薄层定量解释评价精度; 方位电阻率测井的成像与微电阻率扫描成像或声波成像测井用于判断裂缝的有效性, 尽管方位电阻率测井的成像的清晰度和分辨率不如微电阻率扫描成像, 但它仍然能清楚的识别出开口裂缝(如图 1-6); 方位电阻率测井的 LL_d 和 LL_{hr} 的电阻率读数受方位非均质性的影响非常大, 方位电阻率成像能大大改善电阻率测井解释的准确度; 利用方位电阻率测井可以计算地层倾角, 虽然其精度不如地层倾角计算的高, 但用方位电阻率成像可以很好地计算构造倾角, 探测一些意料不到的构造特征(如不整合和断层)及证实所预想的构造特征; 利用方位电阻率测井可以探测和识别水平井中电阻率受井眼平行的地层的影响, 在测井解释评价中可以有选择最具代表性的电阻率测量结果, 提高测井解释精度; 方位电阻率测井消除了格罗宁根(Groningen)效应的影响, 使测量精度更为可靠。