

测井分析家协会 第46届年会论文集

中国石油集团测井有限公司 编



石油工业出版社
PETROLEUM INDUSTRY PRESS

测井分析家协会 第46届年会论文集

中国石油集团测井有限公司 编

石油工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

测井分析家协会第46届年会论文集/中国石油集团测井有限公司
编. —北京:石油工业出版社,2006.10
ISBN 7-5021-5722-0

I. 测…

II. 中…

III. 油气测井-文集

IV. TE151-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 107975 号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里2区1号 100011)

网 址:www.petropub.com.cn

发行部:(010)64210392

经 销:全国新华书店

印 刷:石油工业出版社印刷厂

2006年10月第1版 2006年10月第1次印刷

889×1194毫米 开本:1/16 印张:53.25

字数:1580千字 印数:1—1800册

定价:185.00元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

编 译 委 员 会

主 任 李剑浩

副主任 孙宝佃

委 员 冯启宁 李庆华 杜环虹

高 杰 郭海敏 张超谟

张家田 仵 杰

序 言

由 SPWLA（国际岩石物理学家与测井分析家协会）主办的“岩石物理学家”期刊在全球范围内发行，影响面广。SPWLA 于每年 6 月定期举办年会及展览会。在年会上发表的论文水平高，反映了当前测井技术发展趋势和热点。如果我们全面、系统地研究这些论文，使测井工程技术、研发、教学人员做到“知己知彼”，工作可以少走弯路，有利于创新中国品牌测井技术。同时，我们如果能及时有针对性地利利用这个平台将中国测井特色技术反映到国际上，这对于扩大影响、提升地位、树立形象也是一个极好的途径。自 20 世纪 80 年代，我国曾先后派出过几批团组参会和组织年会文集的翻译出版，均起到了很好效果，并成立了 SPWLA 北京分会。

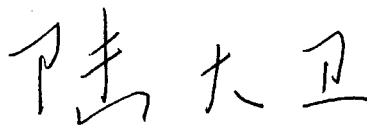
但由于种种原因，自 20 世纪 90 年代中期，有计划系统地翻译出版年会文集的工作停顿了。只有个别文章被选登在相关期刊杂志上。国内派团参加年会也比较少。SPWLA 北京分会的活动实际已停止多年。

2005 年第 46 届 SPWLA 年会在美国路易斯安那州新奥尔良市召开。参会人员达 629 人之多，宣读论文 52 篇，张贴论文 23 篇，28 家公司展出其新产品。中国石油天然气股份有限公司组团参加了会议。这次，由中国石油集团测井有限公司李剑浩总经理安排技术中心承办组织翻译该会议的全部文章，由石油工业出版社正式出版。这是件好事，有益于大家的事。如果今后每年都能继续办，自然会得到广泛支持和欢迎。

SPWLA 北京分会 主席

中国石油学会测井专业委员会 主任

中国石油天然气集团公司测井重点实验室学术委员会 主任



2006 年 9 月

目 录

大斜度井和水平井地层评价综述：存在的问题，对问题的认知及未来发展方向 (A)	
..... Q. R. Passey 等著 唐 宇 译 陆大卫 校 (1)	
跨学科服务公司面临的 LWD 技术和商业挑战 (B)	
..... Jeremy (Jez) Lofts 等著 唐 宇 译 陆大卫 校 (15)	
专业化随钻测量的价值：在墨西哥湾 RAM POWELL 油田的最新经验 (C)	
..... Yakov Volokitin 等著 唐 宇 译 李庆华 校 (21)	
用随钻核磁共振测得的北海白垩岩地层孔隙度和含水饱和度 (D)	
..... Matthew G. Reppert 等著 唐 宇 译 李庆华 校 (37)	
比较随钻测井与电缆测井电阻率模拟和时间推移测井以支持复杂环境中的作业决策 (E)	
..... M. Borghi 等著 唐 宇 宋红伟 译 唐小梅 李庆华 校 (47)	
消除层界面影响有助于各种倾角随钻传播测量的地层电阻率测井解释 (F)	
..... Jian Yang 著 宋红伟 译 唐小梅 校 (61)	
磁定向测量数据的误差特性 (G) Erik Nyrnes 著 宋红伟 译 唐小梅 校 (75)	
新型集成随钻测井平台提供新一代地层评价服务 (H)	
..... Geoff Weller 等著 郭海峰 译 张超谟 校 (93)	
用特深随钻电阻率测井进行储集层定位 (I)	
..... Tron B. Helgesen 等著 郭海峰 译 张超谟 校 (107)	
恶劣环境下的随钻测井地层压力及流体流度测量 (J)	
..... Trond Gravem 等著 郭海峰 译 郭海敏 校 (119)	
利用井下流体分析技术识别垂向间格划分和流体组分变化——实例研究 (K)	
..... Oliver C. Mullins 等著 刘军锋 译 郭海敏 校 (133)	
地层测试器的混相与非混相流动模拟在作业计划中的应用 (L)	
..... Wilson C. Chin 等著 刘军锋 译 郭海敏 校 (141)	
新一代电缆地层测试器 (M) Y. Manin 等著 刘军锋 译 郭海敏 校 (160)	
利用早期确定的压力—体积—温度资料与地层测试资料减少岩石物理不确定性分析技术 在西非的应用 (N) Adil G. Ceyhan 著 张晓岗 译 张占松 校 (169)	
低孔低渗储集层电缆地层测试最小测试时间的确定 (O)	
..... HuFalong 等著 张晓岗 译 张占松 校 (179)	
三维测量（方位、径向与轴向）地层声波特性的电缆声波测井仪 (P)	
..... V. Pistre 等著 张晓岗 译 李维彦 校 (186)	
弹性波各向异性及泥质分布 (Q) Schön J. 等著 王培虎 译 章成广 校 (200)	
疏松慢速地层中的随钻声波测量 (R) ... Xiaoming Tang 等著 王培虎 译 李维彦 校 (214)	
岩石物理模拟：Krief 与 Gassmann 方程的对比及其在验证和估计纵波和横波的速度中 的应用 (S) Michael Holms 等著 王培虎 译 李维彦 校 (222)	
时差—频率投影曲线：精确计算声波时差中的一种新的质量控制方法 (T)	
..... T. Plona 等著 郭海峰 译 章成广 校 (235)	

- 加利福尼亚州极慢速地层声波特性 (U) J. Walsh 等著 吴锦伟 译 章成广 校 (241)
- 运用新模式声波仪器评价墨西哥 Cuitlahuac 油田的横波各向异性 (V)
..... E. Wielemaker 等著 吴锦伟 译 李维彦 校 (247)
- 南非坦夸—卡鲁盆地二叠系露头模拟中的多尺度裂缝描述及井筒数据对比 (W)
..... J. K. J. Taal 等著 张晓岗 吴锦伟 译 张占松 校 (254)
- 微水力压裂与井眼成像相结合测量全应力张量——一个实例研究 (X)
..... J. Desroches 等著 吴锦伟 张晓岗 译 唐小梅 校 (259)
- 用于确定薄层与井眼形状可视化的改进随钻测井密度图像及其处理技术 (Y)
..... Nicolas Meyer 等著 张艳红 译 张超谟 校 (271)
- 碳酸盐岩类型的确认及预测: 岩心与测井数据综合方法在 Tengiz 油田的应用 (Z)
..... Mark Skalinski 等著 陈红兵 仵杰 译 张超谟 李庆华 校 (281)
- 裂缝形式及裂缝开度分布——加拿大西部 Foothills 实例 (AA)
..... Richard Y. Shang 等著 仵杰 译 李庆华 校 (293)
- 高品质高置信度随钻井眼电成像提供更快速地质—岩石物理解释 (BB)
..... Jeremy (Jez) Lofts 等著 仵杰 译 李庆华 校 (301)
- 储集层描述中的井眼成像技术: 对碎屑岩及碳酸盐岩储集层标准解释工作流程的实现 (CC)
..... D. V. (Vivek) Chitale 著 党瑞荣 译 李庆华 校 (309)
- 用水力单元模拟澳大利亚海上油田地质沉积特性和流体饱和度的改进方法 (DD)
..... Shripad Biniwale 等著 党瑞荣 译 李庆华 校 (319)
- 稠油藏油黏度分类 (EE) Jim Seccombe 等著 党瑞荣 译 李庆华 校 (333)
- 用阵列感应测量值自动计算渗透率——应用于现场资料 (FF)
..... Jesus M. Salazar 等著 党瑞荣 译 李庆华 校 (342)
- 岩石物理学为油田注入新的活力 (GG) ... R. Krishnan 等著 张家田 译 李庆华 校 (360)
- 在印度近海一口探井中用井眼稳定性评价及电缆测井、随钻测井和地震资料实时优化
钻井性能 (HH) Theodore Klimentos 等著 张家田 译 李庆华 校 (367)
- 双密度测井——在哈萨克斯坦阿克塞卡拉克格纳油田采集大裂缝井段有效孔隙度数据
和评价岩性各向异性方法 (II) J. Russo 等著 张家田 译 李庆华 校 (375)
- 得克萨斯州西部二叠纪盆地中利用电缆测井在孔洞型碳酸盐岩中区分孔隙类型和确定
渗透率 (JJ) Chunming Xu 等 王兵 译 李庆华 校 (380)
- 不含油钻井液中普遍存在的中子/密度仪器响应——对未解决的新见解 (KK)
..... A. Badruzzaman 等著 马继涛 译 李庆华 校 (390)
- 核测井中井眼和甲酸盐基钻井液系统侵入对信号的影响 (LL)
..... J. Galford 等著 廖广志 译 杜环虹 校 (403)
- 产出剖面与注入剖面——挑战与机遇 (MM)
..... Liang - Biao Ouyang 著 付娟娟 译 孙宝佃 校 (420)
- 改善多相生产测井结果: 一种新的气—液流多相涡轮响应模型 (NN)
..... Andrew Colin Whitaker 等著 肖亮 译 孙宝佃 校 (432)
- 胶结差套管井的声波测井数据分析及处理 (OO)
..... XiaoMing Tang 等著 孙志峰 译 孙宝佃 校 (440)
- 直井和水平井中钻井液滤液侵入和盐水混合条件下核测量的蒙特卡罗模拟 (PP)
..... Alberto Mendoza 等著 王晚星 译 孙宝佃 校 (447)

- 应用脉冲中子俘获仪器预测地层密度 (QQ)
 John A. Quirein 等著 王晓星 译 杜环虹 校 (462)
- 裸眼井中碳/氧仪器响应 (RR) Larrv A. Jacobson 著 王晓星 译 孙宝佃 校 (470)
- 利用裸眼井和套管井电阻率测井资料监控加拿大麦肯泽三角洲 Mallik 5L-38 探井热测
 试时天然气水合物的分解 (SS) B. I. Anderson 等著 肖亮 译 杜环虹 校 (481)
- 动电测井测量渗透率的潜力研究 (TT) J. Singer 等著 张万龙 译 江国法 校 (488)
- 用于有效地质导向和准确随钻地层评价的新型定向电磁波测井仪 (UU)
 Qiming Li 等著 郭浩鹏 译 江国法 校 (503)
- 多分量感应测井在评价科威特北部复杂井眼环境下低阻油层的应用 (VV)
 Fawzia Hussain 等著 张万龙 译 孙宝佃 校 (519)
- 三轴阵列感应测井在提高薄层油气估算中的应用实例——泥岩为各向异性的层状砂泥岩
 分析 (WW) Jean-Baptiste Clavaud 等著 郭浩鹏 译 杜环虹 校 (535)
- 用多分量感应测井数据得到各向异性地层的倾角和方位角 (XX)
 M. Rabinovich 等著 李冬梅 译 杜环虹 校 (551)
- 采用岩石物理方法监测封存的二氧化碳饱和度的变化 (YY)
 Shinichi Sakurai 等著 李鹤升 译 江国法 校 (563)
- 从岩心数字图像分析岩石构造和特性 (ZZ)
 M. Saadatfar 等著 李鹤升 译 曹文杰 校 (577)
- 准确评价泥质砂岩的岩石物理方法 (AAA)
 Saleh B. Alruwaili 著 李鹤升 译 曹文杰 校 (595)
- 使电缆测井和随钻测井的深度一致——深度处理新方法的使用和实例 (BBB)
 Jeremy (Jez) Lofts 等著 李鹤升 译 江国法 校 (611)
- 用电缆能谱测井改善粘土特征描述和地层评价水平——尼日利亚实例 (CCC)
 Dapo Adeyemo 等著 李鹤升 译 曹文杰 校 (618)
- 沉积环境对岩石物理属性的影响 (DDD)
 Rahul Dastidar 等著 李庆华 译 孙宝佃 校 (628)
- 从负债数据采集到成本效益数据采集的机会 (EEE)
 Edwin Quint 等著 李庆华 译 杜环虹 校 (637)
- 尼日利亚深水更佳油田开发计划：用核磁共振提高流体分类 (FFF)
 Russell W. Spears 等著 李庆华 译 杜环虹 校 (640)
- 气井岩石物理解释的核磁共振 T_1/T_{2APP} 与 T_{2APP} 二维反演新方法 (GGG)
 Gabor Hursan 等著 李庆华 译 杜环虹 校 (649)
- 随钻磁共振提高了储集层评价效率 (HHH)
 M. Borghi 等著 李庆华 译 杜环虹 校 (656)
- 用 NMR 的 T_1 识别流体类型：综合 T_1 和 T_2 谱测量改进对含气致密砂岩和非常规
 储集层的解释 (III) Mike Mullen 等著 罗艳颖 译 曹文杰 校 (665)
- 中东非均匀碳酸盐岩储集层的来自核磁共振测井、电阻率测井和油基钻井液钻井
 取心的含水饱和度 (JJJ) Marc Fleury 等著 李鹤升 译 江国法 校 (675)
- 砂岩和粒屑灰岩 NMR 弛豫中微孔隙和大孔隙间的扩散耦合 (KKK)
 Vivek Anand 等著 沈爱新 译 江国法 校 (687)
- 钻井液基础油污染对原油 T_2 分布的影响 (LLL)
 A. Kurup 等著 沈爱新 译 曹文杰 校 (700)

- 根据数字化岩心图像进行 NMR 岩石物性预测 (MMM)
 C. H. Arns 等著 王 黎 译 江国法 校 (714)
- 用 MRIL 数据进行储集层高渗孔道和残余油饱和度分布的研究 (NNN)
 WangYan 等著 王 黎 译 江国法 校 (728)
- 利用多维高分辨率核磁共振剖面法评价低阻油气层 (OOO)
 U. Guru 等著 曹文杰 译 (737)
- 含油饱和度和润湿性对岩石电阻率测量的影响: 一种均质的孔隙级方法 (PPP)
 E. Toumelin 等著 江国法 译 杜环虹 校 (747)
- 层状地层或 R_v 小于 R_h 时电阻率各向异性对介电测井的影响 (QQQ)
 Martin G. Luling 等著 曹文杰 译 江国法 校 (762)
- 墨西哥深水海湾的地层压实监测: 应用、经验和最佳实际应用 (RRR)
 Juun van der Horst 等著 江国法 译 曹文杰 校 (777)
- 气水合物储集层的地层评价 (SSS) Doug Murray 等著 冯兴强 译 王 黎 校 (788)
- 饱和混合流体的双孔隙碳酸盐岩地层电阻率模拟 (TTT)
 E. Kazatchenko 等著 郑庆林 译 王 黎 校 (797)
- 利用岩石物理测井资料和三维叠前地震数据的联合随机反演评价远离井的流体单元的
 空间连续性——在墨西哥湾深水油气储集层中的应用 (UUU)
 A. Contreras 等著 郑庆林 冯兴强 译 沈爱新 校 (807)
- 通过数字岩心分析在薄层砂岩中测量电阻率和渗透率的各向异性 (VVV)
 A. Ghous 等著 冯兴强 译 沈爱新 校 (820)
- 钻井液中的烃类气体色谱分析进展——半透膜技术在快速热导检测 (TCD) 气相色谱
 谱法中的应用 (WWW) Aurel Brumboiu 等著 冯兴强 郑庆林 译 曹文杰 校 (834)

大斜度井和水平井地层评价综述： 存在的问题，对问题的认知及未来发展方向 (A)

Q. R. Passey 等著 唐 宇 译 陆大卫 校

(中国石油集团测井有限公司技术中心)

摘要 通常要钻取大斜度和水平 (HA/HZ) 井, 常常首选的测井系列是能辅助将井地质导向到某一特定目标。在许多情况下, 这些井穿过地层或部分储集层, 这些储集层没有垂直评价井。在这些情况下, 所采集的测井曲线将用于有效厚度与总厚度比、孔隙度和含水饱和度等常规地层评价。对于某一已知地层, 将直井中测井响应与大斜度井/水平井中的测井响应相比较, 结果表明存在很大的差异。例如, 最新研究表明: 由于大斜度井中视倾角的不确定性, 使得孔隙度值相差 6pu, 含水饱和度不确定性超过了 50%, 真地层厚度相差 200%~300%。因此, 直井常规地层评价方法也许并不适合准确地描述大斜度井和水平井中的地层和流体。

产生不同响应的原因有很多, 但大多数原因都与将许多测井仪器设计成用于近似水平地层的直井这一事实有关。在近水平井和水平井里, 我们必须改进解释方案以说明以下几个问题: (1) 与井眼有关的地层的几何形状; (2) 测量的井周方向; (3) 地层各向异性对电阻率、声波和核响应的影响; (4) 非常规侵入剖面; (5) 引起仪器倾斜的重力和井眼底部的岩屑垫层。虽然井眼成像测井可能是描述近水平井相对地层倾角的最好方法, 但当井斜超过 80° 时, 要获得十分准确的地层倾角仍是一个问题。岩屑垫层对密度和核测井响应都有很大的影响。由于对这些井进行测井现在依然困难重重, 因此要建立一个把差质量的测井响应与因几何形状、各向异性和其他井眼影响造成的非常规测井响应区分开来的备忘录是十分重要的。

2004 年 11 月, 在新墨西哥的 Taos 召开了一次 SPWLA 专题会议, 目的是讨论解决有关 HA/HZ 井中的地层评价难题。会议结束时, 对与会者的一项调查指出: 将来在水平井或大斜度井用于地质导向的测井资料标准定性的使用难以满足将来可能面对的许多情况。在许多地方, 不能钻垂直评价井, 因此使用延伸井 (如从海岸钻到近海岸储集层) 来进行地层评价是十分重要的。总的意见一致认为我们研究出的近直井现行解释方案常常并不适用于大斜度井或水平井。经营公司和服务公司必须全力协作才能解决这些难题。经营公司需要愿意分担在现场数据评价中所遇见的解释问题和现有困难实例。服务公司需要分担仪器响应所受的实时限制问题并需要在解释方面 (例如模拟的仪器响应功能和图版手册) 提供其他帮助来协助 HA/HZ 井的解释。经营公司和服务公司一致认为一些新仪器在设计方案上要求能对 HA/HZ 井进行定量描述。

一、引 言

在过去的 15 年中, 钻井技术已发展到能普通地钻大斜度井和水平井。通过获取一个较小的“轨迹”, 能够常规钻 HA/HZ 井已对边远或环境比较敏感地点有着积极的影响。对于近海储集层, HA/HZ 井已经提高了在中央构造所钻井的经济效益并进一步开发了较小的卫星油藏。由于钻井业已提高了钻大斜度井或水平井的能力, 地层评价部门也继续提高了对这些井测井的能力, 已研究出许多向井下传送测井仪器的技术。这些方法包括过油管传送工具, 钻杆辅助测井和随钻测井 (LWD)。随钻测井已经成为评价 HA/HZ 井的主要方法。

Clavier 在 1991 年论述道: “水平井解释的发展已落后于钻井技术。从直井中继承下来的常规技术仍占主流。我们还没有完全解决解释难题。” 虽然测井业机械地赶上了钻井作业程序, 但对各种仪器响应的理解和解释却还没有跟上, 我们仍要面对十几年前摆在我们面前的许多难题。

二、大斜度井和水平井的定义

本文将用到下列定义：

- (1) 直井（或近垂直井）是相对于层面的视倾斜角小于 30° 的井；
- (2) 中斜度井的视倾斜角为 $30^\circ \sim 60^\circ$ ；
- (3) 大斜度（HA）井的视倾斜角为 $60^\circ \sim 80^\circ$ ；
- (4) 水平井是视倾斜角大于 80° 的井。

很明显，通过以上定义我们能理解到：真正的直井在穿过盐丘附近或其他结构比较复杂区域中的倾斜度较大地层（如 70° ）时，与穿过水平地层的 70° 斜井一样，会遇见一些同样的解释困难。但也存在一些水平井所特有的井眼环境因素，这些因素主要与重力对岩屑、仪器位置和钻井液滤液侵入剖面的影响有关。

2003 年，ExxonMobil 在全球范围内曾钻了大约 700 口井。在这些井中，大约有 40% 井斜为 60° 或更大（有 20% 井斜大于 80° ）。我们作业的方向是针对井斜更大的井；我们的困难是准确地解释这些井。

三、为什么对大斜度井和水平井进行测井

对大斜度井和水平井进行测井的原因有很多，基本上可分为三类：

- (1) 对井进行地质导向（定性解释）；
- (2) 确定完井井段（定性）；
- (3) 获取地层和流体性质（定量）。

首先，考虑将井眼地质导向穿过目的层。在地质导向中，不需要深入理解仪器响应。最近十年的经验清楚地表明测井业能够使用这些仪器成功地把井眼定位在所需要的地层。许多经营公司利用测井（通过 LWD）将井眼地质导向到达指定位置。所使用的测井系列设备常常精简化（伽马和/或电阻率测井仪器）。这种测井系列可满足一个有许多垂直评价井油田中的加密井需求，但今天在许多地方，以大斜度钻的评价井是为了探测多个目的层。不幸的是，我们常常期望根据仅用于地质导向而设计的非常有限的测井系列确定上述的（2）和（3）。

在一个有许多垂直评价井的油田中，用于对井进行地质导向的基本测井系列常被用于确定完井井段。用伽马曲线可确定砂岩井段，对电阻率曲线的定性分析可把含水井段与含油气井段区分开来。如果油和气都含有，则需要其他的测井仪器（例如密度和中子测井仪器）。

第三个作用是能够对井眼进行全面的岩石物理或地球物理评价。在这一点，我们对仪器的理解失败了。在测井业，通常有一种错误的理解是：在水平井和大斜度井中，“仪器不能正确读数”。仪器读数很好。但对大斜度井和水平井环境中仪器响应没有很好理解，也不能用非常规曲线响应快速确定出地层和流体特性。通常利用已经被取心的直井（半垂直）创建和刻度岩石物理模型。在没有进行刻度的地区，充分理解直井中的大多数测井曲线以进行合理的分析。当测井读数和特征改变时，随着井眼变得与层面平行，这些刻度和理论解释都无法给出定量的结果。

四、在 HA/HZ 地层评价中存在的问题

对大斜度井和水平井进行测井和分析存在一些潜在的问题。这些问题通常分为四类：

- (1) 储集层性质问题；
- (2) 作业问题；
- (3) 几何形状问题；
- (4) 含糊的问题（怎样区分（1）、（2）和（3））。

除非有充足的补偿井,要区分出由于几何形状和别的因素引起的储集层性质和影响的变化是不可能的。而且大多数储集层本来就具有各向异性的特征,而大多数仪器被设计成用于在与直井垂直的相对各向同性的水平面中进行测量。现在在垂直平面中进行测量,如图1所示。

存在着许多与 HA/HZ 井测井有关的作业问题。为了使用常规电缆测井仪器,在这些井中必须使用钻杆辅助作业,这是一项比较麻烦且十分耗时的作业。鉴于此,大多数 HA/HZ 井是用 LWD 仪器进行测量,这常常使所采集到的数据的数量和类型受到限制。无论是使用钻杆辅助作业或 LWD 仪器,深度控制,特别是 TVD(真垂直深度)将增加 HA/HZ 井解释的不确定性。

HA/HZ 井也存在着与仪器和井眼相互作用有关的许多问题。这些井中存在着有狗腿、冲蚀地段、岩屑层和不对称侵入。而且,有些仪器是聚焦和方位性的,有些仪器测的是井周的平均响应。

HA/HZ 井测井解释中存在的最大问题是需把 HA/HZ 对测井的影响与储集层性质的实际变化区分开来。用 HA/HZ 井开发油田,会出现一种与常规测井不一样的测井曲线。对仪器响应进行准确模拟的能力现在刚好赶上数据采集的能力。

五、为什么 HA/HZ 井中的测井读数不同

在 HA/HZ 井之间所观察到的一些差异是由于电缆测井仪器和 LWD 仪器的差异引起的。很容易解释这些差异。排除仪器设计问题,垂直测井环境和水平测井环境存在三个主要差异,这些差异对测量有很大的影响:

- (1) 井眼和地层之间的几何关系;
- (2) 侵入过程和近井眼环境(包括岩屑层);
- (3) 仪器传送的方法。

虽然这些差异可以似乎是三个且很明显,但它们常对仪器响应有很大的影响,影响程度与许多因素有关,如:相对地层井斜角、钻井液的类型、地层各向异性和地层流体等。

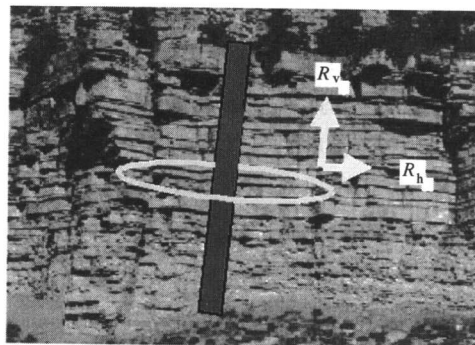
1. 几何关系

井眼和地层之间的几何关系会对仪器响应产生很大的影响。在近垂直井中,测井仪器与地层层面通常是半垂直的。图1(a)表示的是典型测井环境,这种几何形状在过去20年中已被具体研究过。例如,目前有感应仪器用于分层、侵入和地层倾角的1D、2D和3D模型。

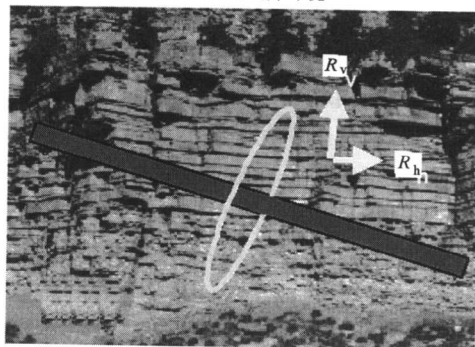
在 HA/HZ 井中,测井仪器通常与地层半平行。图1(b)显示的是典型 LWD 环境。已经建立了 HA/HZ 井的简单模型。测井界和学术圈正在开发更复杂的模型。此影响程度与仪器和层面之间的相对倾角以及地层的各向异性大小有关。

2. 侵入

这两种测井环境之间的第二种主要差异是侵入过程。在直井中,钻井液滤液侵入井眼周围区域,形成一个钻井液滤液侵入孔隙的环空带。此环空带本质上或多或少是径向的或居中的。图2(a)表示的是当向下看井轴时(此情况下,是垂直的),钻井液滤液侵入过程的示意图。在这种几何形态中,不管测井仪器与井眼的哪一边接触,它



(a) 典型测井环境



(b) 典型 LWD 环境

图1 砂泥岩夹层能显示出与地层电阻率各向异性和井斜有关的不同电阻率响应
此露头代表被(a)直井和(b)大斜度井穿透的三角洲前缘沉积; R_v —地层垂直电阻率; R_h —地层水平电阻率

们看起来几乎是一样的。

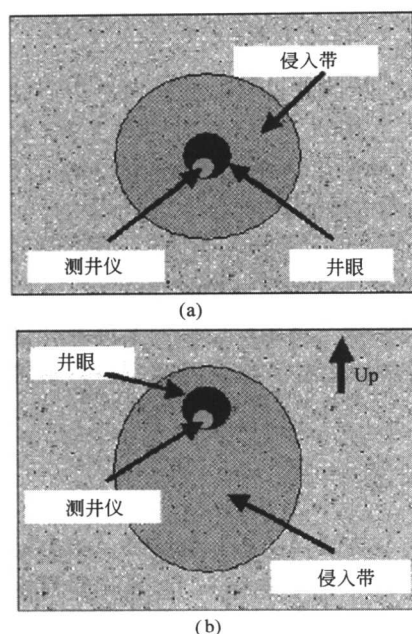


图 2 钻井液滤液侵入过程示意图

(a) 直井径向对称侵入简单示意图；

(b) 水平井侵入剖面严重地受重力影响性是在建立填砂模型中产生的。

3. 传送方法

两种测井环境之间的最后一个差异是传送方法。当用电缆传送且规定了重力、井眼几何形态和缆线扭矩时，仪器可在井眼中自由旋转。对于深探测非聚焦型仪器，这对测井结果的影响很小或没有影响。对于浅探测聚焦型仪器，探测点的方向是很重要的。经验表明，由于密度滑板的重量，仪器就旋转进滑板指向井眼低边的位置处。由于聚焦型仪器通常定位在密度测量的方向上，它们也能探测到井眼低的一边。

测井仪器的常规电缆配置受井斜角的限制（小于 $60^{\circ} \sim 70^{\circ}$ ）。与所测地层类型有关，在这些井斜角范围内，许多与各向异性 and 侵入有关的问题开始变得更加明显。在这些井中，由于滑板的重量，仪器通常以核孔隙度仪聚集在井眼低边的方式旋转。因此，除了中子仪以外，椭圆形侵入区的影响通常是最小的。

在进行随钻测井时，通常当钻柱和仪器正旋转时就进行测量，虽然这对传播电阻率仪来说不是个大问题，但对孔隙度仪却很重要。老式的 LWD 密度仪曾经遇到过此类问题。为了解决此问题，LWD 公司制造了可用于在井眼周围周向采集数据的仪器。最简单的办法是把井眼划为四个象限——上、下、左、右。假设仪器位于井眼低的一边，下象限将提供最好的数据，但经验表明：如后面所讨论的那样，不需要这样做。

从上面的讨论可以看出，毋庸置疑，对于同一地层，在直

在 HA/HZ 井几何形态中，侵入过程是十分不同的。确切地说，侵入带所形成的形状与地层流体和钻井液滤液之间的密度差异、滤液类型和地层中任意的渗透率各向异性有关。现在不能很好理解此过程。如果流体为混合型，则此情况就特别真实。

直观地说，由于受重力的影响，HA/HZ 井中的高密度流体侵入将集中在井眼低的一边。而且，与直井不同的是，侵入过程不呈径向状态或集中在井眼周围。图 2 (b) 显示的是当向下看井轴时（此种情况下，是水平的），钻井液滤液侵入过程的示意图。此几何形态下，测井仪器所识别的不同环境与它和井眼的哪一边接触有关，尽管这对深探测非聚焦型仪器不会引起大的问题，但它对浅探测聚焦方位型仪器（如密度测井仪）会产生大的影响。

实际的侵入形状和体积可能是十分复杂的，这与地层流体和钻井液滤液之间的流体性质的差异有关。图 3 中给出了在科罗拉多矿业学校所制作的填砂模型水平井侵入剖面上所观察到的一些实验结果（Peeters 等，2002）。

图 3 (a) 为水基钻井液滤液侵入剖面，同时也给出了模拟的侵入前沿流线。图 3 (b) 为油基钻井液滤液侵入剖面，注意：侵入剖面强烈受到小规模的渗透性非均质性影响，这种非均质性是在建立填砂模型中产生的。

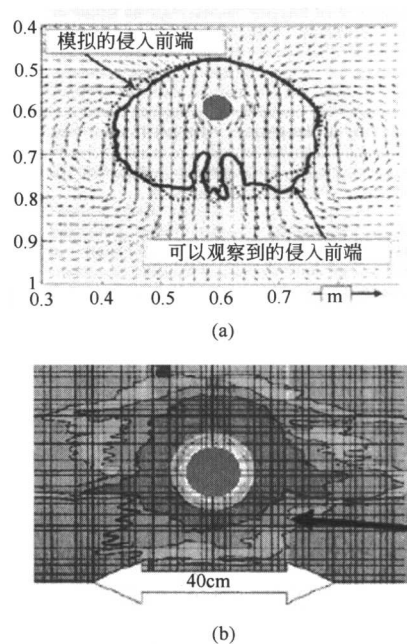


图 3 两个从实验室填砂模型

中观察到的侵入剖面实例

(a) 水基钻井液滤液侵入剖面；

(b) 油基钻井液滤液侵入剖面

井和 HA/HZ 井中所观测到的仪器响应可能是十分不同的。

六、现场观测结果

从此研究项目中得到的最基本的观测结果就是相当简单——相对井斜角越大，在对测井曲线进行解释时遇到的问题就越多。虽然确切的转折点与所测的具体井眼和地层有关，但在过去几年中，从分析和模拟仪器响应所得出的经验可得到下面的观测结果：

(1) 所有斜井都对测井仪器响应有影响。影响的程度与井眼和层面的相对倾角以及仪器类型有关。

(2) 对于井斜角小于 30° 的井，可以定量使用所有测井曲线，不用校正几何形状；唯一例外的是也许声波横波以约 30° 的角度分裂（参见图 12）。

(3) 对于井斜角为 $30^\circ \sim 60^\circ$ 的井，某些测井曲线受到不利影响。电阻率曲线受到影响，但常规模拟通常可以校正视倾角。声波测井响应将受到不利影响，特别是在各向异性地层（如泥岩地层）中。因此声波测井响应需要多口不同井斜角的刻度井用于校正。核孔隙度测井一般质量较好。

(4) 对于井斜为 $60^\circ \sim 80^\circ$ 的井，大多数测井受到不利影响。要正确地解释测井曲线必须考虑几何形状影响。使用电法成像仪器和核成像仪器都能确定出相对倾角。对于地层电阻率 R_t ，可进行电阻率曲线模拟。但由于存在多个影响测井曲线的因素（如：各向异性、地层倾角、侵入、井眼质量差和仪器偏心），所以要准确解释出这些结果不太可能。通过借助于倾角、井眼条件和围岩等因素，核孔隙度测井曲线也许能使用。

(5) 对于井斜大于 80° 的井，所有测井曲线都会受到定量评价和解释方面的不利影响。为了能对这些曲线进行成功的解释，用可以得到的井眼成像测井资料确定出井眼与层面的关系以及能够定量计算出在确定真垂直厚度（TVT）和实际地层厚度（TST）中倾角不确定性，这一点是十分关键的。如果没有获得这些数据，任何解释最好应是定性的。

1. 电阻率响应

当井斜角越来越大时，所注意到的第一类响应之一就是传播电阻率仪响应的偏振角的产生。这些偏振角是由特殊的仪器响应功能造成的，图 4 中给出了实例，同时也注明了在地层界面处从伽马曲线和电阻率曲线上所观察到的扩展的围岩影响。偏振角开始出现在 $60^\circ \sim 70^\circ$ 相对倾角的周围。当对井进行地质导向时，这些偏振角对于探测地层界面是很有用的。

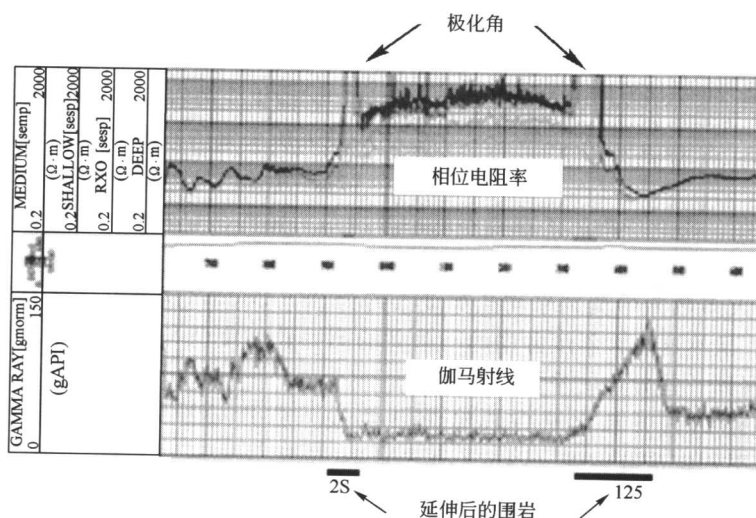


图 4 大斜度井中的伽马和相位电阻率实例
注意偏振角和延伸的围岩响应

另一方面,在 HA/HZ 井和直井中所观察到的电阻率值差异会给解释带来困难。由于在许多含油气储集层中所观察到的各向异性,HA/HZ 井显示出了明显更高的电阻率值。如果出现的是短时间侵入,那么这种侵入对随钻测井的影响通常是很小的。

对感应仪和传播电阻率仪响应的研究调查表明了电阻率各向异性是如何影响测井读数。这两种仪器都能产生一种感应电流,感应电流在与仪器轴垂直的平面上以循环的方式在仪器周围流动,如图 1 所示。在直井中,砂泥岩地层为电流流动提供了平行路径,但在大斜度井中,感应电流被迫依次流过砂岩和泥岩地层。尽管实际的物理机理更复杂,但很明显,LWD 电阻率响应不同于上面两种情况。

图 5 中给出了在斜井中电阻率各向异性是如何影响含水饱和度计算的一个实例。对于 45° 的斜井(图 5 (a)),若已知孔隙度和水的电阻率,那么 $5:1$ 的电阻率各向异性就会引起 S_w 较小的变化(仅为 $5su$,此值是用直井计算得出的)。但对于井斜 85° 井眼所穿过的同样地层,假设电阻率各向异性为 $5:1$,则测量的电阻率会引起计算出的 S_w 产生高达 $25su$ 的变化。如果电阻率各向异性大于 $5:1$,则对 S_w 的影响就更大。

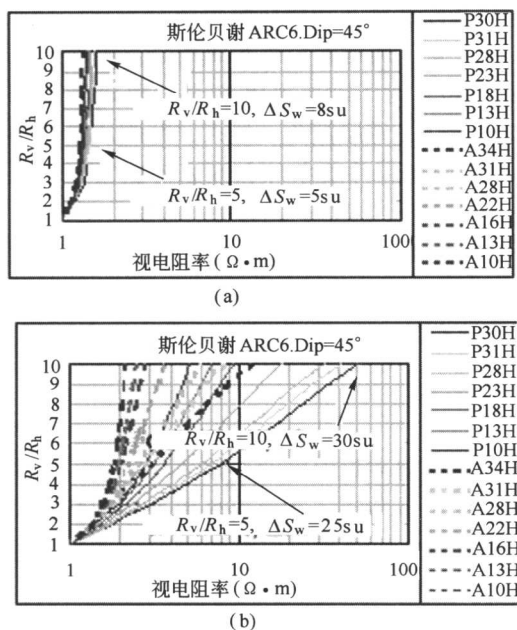


图 5 地层电阻率各向异性(从 $5:1$ 到 $10:1$)
对电阻率响应的影响(电阻率为井斜的函数)
两种比较结果指示了对含水饱和度值的影响
(假设孔隙度和水的电阻率一定)

到出现了一些类似问题。图 6 中给出了在以不同的井斜角所钻的 9 口井中,含油储集层砂岩的平均密度孔隙度值。

对于该油田,在大多数井中测井平均孔隙度大约为 $28 \sim 30pu$,这个值与测量岩心所得的平均孔隙度值 $29.5pu$ 一致。虽然这些大斜度井中的一些井的测井孔隙度值与取心孔隙度值十分一致,但当井斜超过 80° 时可观察到一些异常的平均孔隙度值。

图 7 中给出了该油田直井和水平井典型测井曲线。直井(图 7 (a))的平均密度孔隙度为 $29.5pu$,而水平井的平均密度孔隙度(图 7 (b))为 $34.5pu$ 。

从图 7 中的水平井测井曲线上,我们不能立即发现明显的特征,这说明孔隙度值值得质疑,但这口水平井有太高的平均孔隙度,大约为 $5pu$ 。

随着周向 LWD 密度测井仓的开发成功,服务公司已开始提供井眼密度成像服务。利用标准的高

边/低边/高边惯例，在井的相对位置处是以密度读数为基础的。这些图像可用在许多任务中。如果图像质量足够好，那它们就可像电测井井眼成像图的使用方式一样，用于确定出地层倾角。

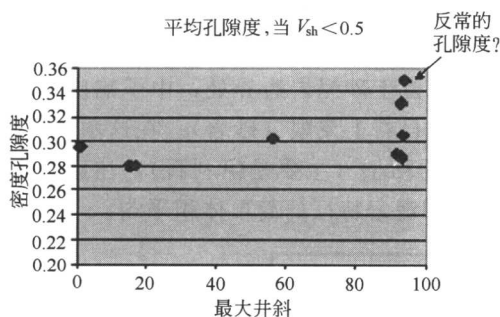


图6 含油砂岩的平均密度孔隙度与井斜的函数关系图

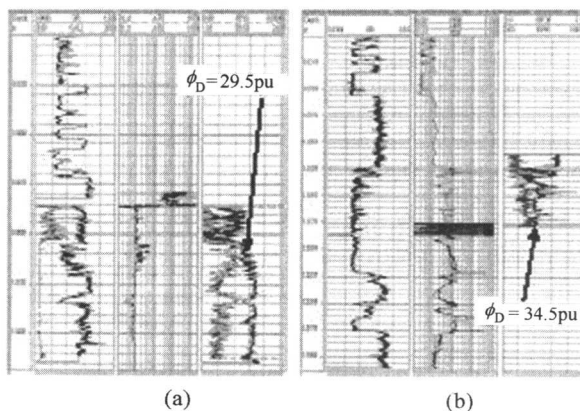


图7 同一油田的两口井的测井曲线图
(a) 直井；(b) 水平井；
同一地层中，水平井的孔隙度要比同一地层中直井的孔隙度大约高 5pu

为了提供出好的密度仪成像图，当 LWD 密度成像仪旋转时，传感器必须与地层连续接触。通常，当探测器旋转时，传感器位于稳定器中保持接触，这样就可获得高质量的密度图像。

如果传感器与地层不是以 360° 接触，那么可将图像用于密度资料质量控制以便以后解释。如果传感器与井眼接触不是很好，那么体积密度通常是异常的低，这通常出现在井眼的很上部。

图 8 中给出的是在井周记录的不同密度值这种情况下的密度成像图。检查这个成像图揭示图像中有个清晰的区域。在图的上部，较高的密度值（假设数据质量更好）出现在井眼的底部。在图的底部，较高的密度值出现在井眼的两边，再次假定仪器与井眼接触越好密度值越高，这种响应与在井的低边存在岩屑层是一致的。

尽管密度数据是沿整个井周采集的，但通常输出单条密度曲线用于后面测井解释，因此，在 HA/HZ 井中，确切知道密度曲线数据是怎样和从哪儿获得的是十分关键的（即从哪个象限或扇区，它能否代表整个井周的平均值）。

3. 中子响应

过去几年的经验表明：中子仪在 HA/HZ 井中的测量值的差异也很大，其中包括电缆中子测井仪和 LWD 中子测井仪。

其具体差异的大小与孔隙空间流体的成分（如含氢指数）有关，也与仪器的设计和刻度有关，这对于大多数 LWD 中子测井仪是特别真实的。由于仪器的设计结构，它们被刻度后在充满水的纯砂岩和碳酸盐岩中能正确读数，而在泥岩中却不能。

在含流体地层中，LWD 中子测井仪测出的孔隙度值太高，这是由于前面提到过的因素引起的，如井眼冲蚀、井底有低密度（高孔隙度）岩屑层、井眼周围仪器平均响应、不正确的探测器偏离和异常侵入。自然地，中子仪没有被充分聚焦。如果探测器指向下，则所有方向的中子产量将对探测器产生影响。

在含气的 HA/HZ 砂岩中，中子仪测得的孔隙度比在直井中测得的值要低。此结果已长期为人

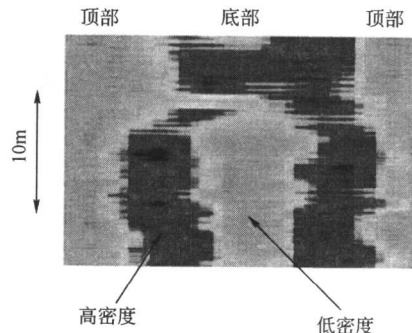


图8 水平井井眼密度成像示意图
其中井底的密度较低，这表明井底可能存在有岩屑层，在这种情况下，在井底区域不可能采集到最好的密度数据

所知，也会对井斜角小到 45° 的井造成许多问题。这种响应是由两个因素引起的。首先，重力分异引起滤液集中在井眼低的一边。第二，对源和探测器的校准（聚焦）和屏蔽是很困难的。中子模拟表明要使发生在井眼高边的中子—气反应不对测量产生影响是很困难的。

埃克森美孚公司已对 HA/HZ 井中的中子反应进行过具体数值模拟研究，但本文没有论述具体的技术细节。这儿只包括一些例子：倾斜的地层界面的研究和岩屑层对中子响应的影响。

图 9 表示的是：对于普通的 LWD 中子测井仪，源和探测器位于砂泥岩边界处，中子响应不是简单的两个地层体积的平均。如图所示的 YZ 平面，大部分信号来自右上象限（砂岩）。在这项研究中，假设砂岩孔隙度为 25pu ，泥岩孔隙度为 30pu ，为 60% （wt）的粘土（主要是伊利石），注意：中子响应在地层界面周围不是对称的——即仪器响应不是邻近砂岩和泥岩特征的简单体积平均。

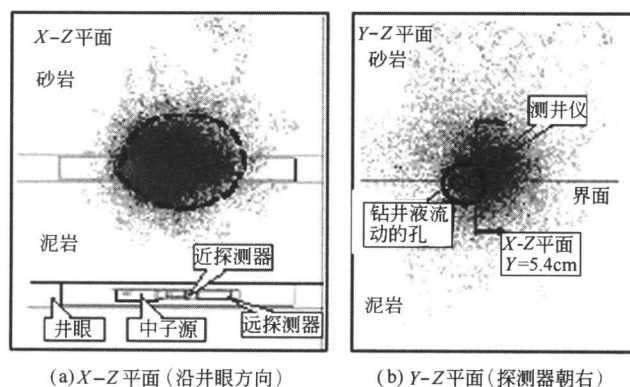


图 9 位于砂岩和泥岩界面的仪器在 X-Z 面和 Y-Z 面的中子散射

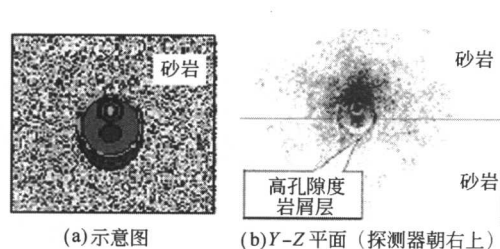


图 10 水平井中的中子散射
其中 4cm 厚的岩屑层位于井底

岩屑常常以像沙丘移动一样的方式运移，并在 HA/HZ 井的低边形成一个岩屑层。这个岩屑层对密度、中子以及电阻率的测量精度有很大的影响。在如图 10 所示的中子散射研究中，假设在椭圆形井底有一个孔隙较大（ 50pu ）的 4cm 厚的岩屑层。椭圆形井眼位于孔隙度为 20pu 的均匀砂岩中。总之，由于井中存在有孔隙较大的岩屑层，结果导致中子孔隙度高了 3pu 。与前面的情况一样（图 9），中子响应不是在探测区域范围内对响应的一个简单的体积平均。

在这项研究中，仪器也以三个方位角（ 0° 、 90° 、 180° ）旋转。总之，岩屑的存在对所有方位角的响应都产生了影响且当源和探测器指向下（ 180° ）时，其影响更显著。

因此，在 HA/HZ 井中，带有大量岩屑的地层的椭圆形井眼将对孔隙度的测量产生干扰，而大孔隙岩屑造成的误差可高达 3pu 。

4. 伽马响应

我们已对水平井和直井中的 LWD 伽马测量和电缆伽马测量进行了多次比较。虽然 LWD 伽马测量和电缆伽马测量不是完全匹配，但两者之间有一个好的相关性。由于伽马曲线常常用于建立关系式和确定泥质含量，而这两种应用都不要求绝对精度，因此伽马测井现有的能力能满足 HA/HZ 井中的大多数应用。

如前面图 4 中所说明的那样，地层界面周围的伽马响应会被抹掉。实际响应是不同的，这与仪器是否是在泥岩进入砂岩或在砂岩进入泥岩和伽马探测器面对的方向有关。