



中国石油大学(北京)学术专著系列

中国复杂油气藏核磁共振测井 理论与方法

肖立志 谢然红 廖广志 著



科学出版社

中国石油大学(北京)学术专著系列

中国复杂油气藏 核磁共振测井理论与方法

肖立志 谢然红 廖广志 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书以作者多年的研究成果为基础,结合国际学科前沿发展动态和国内油气探测需求,系统阐述核磁共振测井在中国复杂油气藏应用的理论与方法。从复杂油气储层流体核磁共振特性入手,介绍核磁共振测井对孔隙度、束缚水、渗透率、孔隙结构以及非均质性的响应特征,二维核磁共振测井数据采集与处理方法,运动对核磁共振测井响应的影响,孔隙尺度下核磁共振的响应机理等重要基础理论问题研究进展。最后,讨论核磁共振测井资料处理方法与软件实现中的反演理论和影响因素等实际问题。

本书可作为油气资源勘探与开发、孔隙介质核磁共振等领域科研工作者的参考书及高等院校相关专业研究生的教材或参考书,也可作为石油技术人员及其他相关人员的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

中国复杂油气藏核磁共振测井理论与方法/肖立志,谢然红,廖广志著.
—北京:科学出版社,2012

(中国石油大学(北京)学术专著系列)

ISBN 978-7-03-032599-0

I. ①中… II. ①肖…②谢…③廖… III. ①复杂地层-油气勘探-核磁
测井 IV. ①TE151

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 215290 号

责任编辑:杨 震 张小娟 韩 赞 / 责任校对:陈玉凤

责任印制:钱玉芬 / 封面设计:王 浩

科 学 出 版 社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012 年 1 月第 一 版 开本:B5 (720 × 1000)

2012 年 1 月第一次印刷 印张:25 3/4

印数:1—1 000 字数:600 000

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

从 书 序

大学是以追求和传播真理为目的,并为社会文明进步和人类素质提高产生重要影响力和推动力的教育机构和学术组织。1953年,为适应国民经济和石油工业发展需求,北京石油学院在清华大学石油系并吸收北京大学、天津大学等院校力量的基础上创立,成为新中国第一所石油高等院校。1960年成为全国重点大学。历经1969年迁校山东改称华东石油学院,1981年又在北京办学,数次搬迁,几易其名。在半个多世纪的历史征程中,几代石大人秉承追求真理、实事求是的科学精神,在曲折中奋进,在奋进中实现了一次次跨越。目前,学校已成为石油特色鲜明,以工为主、多学科协调发展的“211工程”建设的全国重点大学。2006年12月,学校进入“国家优势学科创新平台”高校行列。

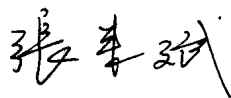
学校在发展历程中,有着深厚的学术记忆。学术记忆是一种历史的责任,也是人类科学技术发展的坐标。许多专家学者把智慧的涓涓细流,汇聚到人类学术发展的历史长河之中。据学校的史料记载:1953年建校之初,在专业课中有90%的课程采用前苏联等国的教材和学术研究成果。广大教师不断消化吸收国外先进技术,并深入石油厂矿进行学术探索。到1956年,编辑整理出学术研究成果和教学用书65种。1956年4月,北京石油学院第一次科学报告会成功召开,活跃了全院的学术气氛。1957~1966年,由于受到全国形势的影响,学校的学术研究在曲折中前进。然而许多教师继续深入石油生产第一线,进行技术革新和科学研究。到1964年,学院的科研物质条件逐渐改善,学术研究成果以及译著得到出版。党的十一届三中全会之后,科学研究被提到应有的中心位置,学术交流活动也日趋活跃,同时社会科学研究成果也在逐年增多。1986年起,学校设立科研基金,学术探索的氛围更加浓厚。学校始终以国家战略需求为使命,进入“十一五”之后,学校科学研究继续走“产学研相结合”的道路,尤其重视基础和应用基础研究。“十五”以来学校的科研实力和学术水平明显提高,成为石油与石化工业的应用基础理论研究和超前储备技术研究以及科技信息和学术交流的主要基地。

在追溯学校学术记忆的过程中,我们感受到了石大学者的学术风采。石大学者不但传道授业解惑,而且以人类进步和民族复兴为己任,做经世济时、关乎国家发展的大学问,写心存天下、裨益民生的大文章。在半个世纪的发展历程中,石大学者历经磨难、不言放弃,发扬了石油人“实事求是、艰苦奋斗”的优良作风,创造了不凡的学术成就。

学术事业的发展有如长江大河,前浪后浪,滔滔不绝,又如薪火传承,代代相继,火焰愈盛。后人做学问,总要了解前人已经做过的工作,继承前人的成就和经验,在此基础上继续前进。为了更好地反映学校科研与学术水平,凸显石油科技特色,弘扬科学精神,积淀学术财富,学校从2007年开始,建立“中国石油大学(北京)学术专著出版基金”,专款资助教师们以科学研究成果为基础的优秀学术专著的出版,形成《中国石油大学(北京)学术专著系列》丛书。受学校资助出版的每一部专著,均经过初审评议、校外同行评议、校学术委员会评审等程序,确保所出版专著的学术水平和学术价值。学术专著的出版覆盖学校所有的研究领域。可以说,学术专著的出版为科学研究的先行者提供了积淀、总结科学发现的平台,也为科学研究的后来者提供了传承科学成果和学术思想的重要文字载体。

石大一代代优秀的专家学者,在人类学术事业发展尤其是石油石化科学技术的发展中确立了一个个坐标,并且在不断产生着引领学术前沿的新军,他们形成了一道道亮丽的风景线。“莫道桑榆晚,为霞尚满天”。我们期待着更多优秀的学术著作,在园丁们灯下伏案或电脑键盘的敲击声中诞生,展现在我们眼前的一定是石大寥廓辽远、星光灿烂的学术天地。

祝愿这套专著系列伴随新世纪的脚步,不断迈向新的高度!



中国石油大学(北京)校长

2008年3月31日

前 言

核磁共振测井已经成为一种十分重要的地球物理探测方法,在复杂油气藏勘探开发中正在发挥不可替代的作用。在复杂岩性、复杂孔隙结构、复杂流体成分、低孔低渗以及低电阻率、低含油气饱和度等情况下,当其他测井大多显得无能为力时,核磁共振测井却是储层评价和流体识别的有效手段,因而具有独特的价值和生命力。但是,在应用中也发现一些问题。例如,在陆相复杂地层,核磁共振确定的孔隙度与地层实际孔隙度时常存在一定的偏差,而束缚水和渗透率模型具有较强的地区依赖性;当地层孔隙中多相流体并存时,油气水在横向弛豫时间 T_2 分布上往往重叠,难以准确识别。深入研究这些问题,可以挖掘核磁共振测井在复杂油气储集层的应用潜力,提高其应用效果,同时,也为发展核磁共振测井新方法提供新的思路。

本书是我与我的学生们在过去八年里对复杂油气藏核磁共振测井应用基础进行系统研究的一个初步总结。我于 2002 年回国到中国石油大学(北京)任教,开始全力研究核磁共振测井,至今大致经历了四个阶段:第一个阶段是核磁共振测井在中国的适应性研究,先后对陆上和海上主力油气田核磁共振测井提供相应的技术支撑,并对应用实例和应用条件进行系统分析;第二个阶段是核磁共振测井的规范化和标准化研究,由于核磁共振测井引进装备的多样化和核磁共振岩心分析实验室的快速发展,建立科学合理的规范 and 标准已经刻不容缓,因此我们用相当大的精力完成了这一基础性工作;第三个阶段是新理论和新方法的研究,主要是针对我国复杂油气藏核磁共振测井应用过程中出现的问题,结合国际上核磁共振测井前沿研究的新动向和新趋势,探索新的数据采集方法、反演方法、解释模型等,形成本书的主体;第四个阶段是核磁共振测井仪器的研制,针对国际上核磁共振测井技术的快速发展和我国对核磁共振测井仪器的迫切需求,我和我的学生们走上了仪器研制的道路,并且坚持至今,关于电缆核磁共振测井仪、随钻核磁共振测井仪、井下核磁共振流体分析实验室等的成果将在另一本专著中介绍。

本书得以完成,首先要感谢我的学生们,特别是谢然红、廖广志、谢庆明、傅少庆、胡法龙、刘双惠、王跃祥、黄科、李洋、张宝磊、李伟、刘家军、田亚、刘天定、赵太平、卢文东、王筱文以及何雨丹、王忠东、刘堂宴、付娟娟、袁俊英等,他们是本书的共同作者,直接参与了本书相关的研究工作,书中介绍的新理论和新方法是与他们一起建立的,他们的博士论文或硕士论文为本书提供了丰富的素材。没有他们的辛勤劳动和卓越努力,就不可能取得这些进步。其次,书中的研究成果得到国家自

然科学基金(项目编号:90510004、40674075、41074102、41130417)、国家“863”项目(项目编号:2006AA06Z215)、国家“973”项目(项目编号:2006CB202306)、科学技术部国际合作项目(项目编号:2009DFA61030)、中国石油天然气集团公司以及各油田测井公司等资助,没有这些项目的支撑,同样不可能取得这些进步。最后,感谢中国石油大学(北京)学术专著出版基金,使本书入选《中国石油大学(北京)学术专著系列》丛书,收进学校发展史上的学术记忆,尽管我们做了很大努力,但深知我们的水平非常有限,书中的不足和疏漏之处在所难免,恳请读者指正。

作 者

目 录

丛书序

前言

1 绪论	1
1.1 核磁共振测井发展回顾	2
1.1.1 核磁共振测井仪器的发展	2
1.1.2 核磁共振测井地层评价的发展	4
1.1.3 我国的核磁共振测井技术	6
1.2 复杂油气藏核磁共振测井应用中存在的问题	7
2 核磁共振测井原理简介	8
2.1 核磁共振测井方法基础	8
2.1.1 极化过程	8
2.1.2 核磁共振及弛豫过程	8
2.1.3 横向弛豫时间的测量	9
2.1.4 自旋回波串的采集过程	10
2.2 核磁共振测井原始数据	10
2.3 流体的核磁共振性质	11
2.3.1 自由流体的核磁共振性质	12
2.3.2 岩石孔隙流体的核磁共振性质	24
2.4 岩石内部磁场梯度对核磁共振特性影响	25
2.4.1 岩石横向弛豫 T_2 分布随 T_E 的变化	26
2.4.2 岩石横向弛豫速率 $1/T_2$ 随 T_E^2 的变化	28
2.4.3 岩石孔隙流体的受限扩散	28
3 中国复杂油气藏核磁共振测井应用基础	31
3.1 核磁共振测井孔隙度确定方法	31
3.1.1 测量模式	31
3.1.2 数据处理方法	32
3.2 核磁共振测井孔隙度影响因素分析	39
3.2.1 仪器采集参数	39
3.2.2 井眼环境	40
3.2.3 孔隙流体性质	41

3.2.4	黏土矿物	42
3.2.5	顺磁物质	44
3.3	核磁共振测井束缚水及其影响因素分析	45
3.3.1	核磁共振测井束缚水确定方法	45
3.3.2	影响因素分析	46
3.4	核磁共振测井渗透率及其影响因素分析	48
3.4.1	核磁共振测井渗透率确定方法	48
3.4.2	影响因素分析	49
3.5	核磁共振测井确定孔隙结构及其影响因素分析	61
3.5.1	核磁共振测井孔隙结构确定方法	61
3.5.2	T_2 分布与毛管压力资料反映岩石孔隙大小的相关性	62
3.5.3	影响因素分析	63
3.6	裂缝性油气储集层 NMR 测井响应特征	66
3.6.1	裂缝性油气储集层 NMR 测井响应模型	68
3.6.2	裂缝发育程度的影响	71
3.6.3	地层条件的影响	80
3.6.4	井眼条件的影响	89
3.6.5	仪器天线长度的影响	90
3.6.6	采集参数的影响	95
4	二维核磁共振测井理论与方法	100
4.1	二维核磁共振波谱学	100
4.2	二维核磁共振测井	102
4.2.1	油气水的核磁共振弛豫和扩散分布特点	102
4.2.2	二维核磁共振测井方法	104
4.2.3	二维核磁共振测井数据测量方法	105
4.2.4	二维核磁共振测井数据反演方法	108
4.3	(T_2, D) 二维核磁共振测井	110
4.3.1	方法原理	110
4.3.2	数值模拟与结果分析	110
4.3.3	实验测量与结果分析	126
4.4	(T_2, T_1) 二维核磁共振测井	127
4.4.1	方法原理	127
4.4.2	数值模拟与结果分析	128
4.4.3	实验测量与结果分析	142
4.5	$(T_2, T_1/T_2)$ 二维核磁共振测井	148

4.5.1	方法原理	148
4.5.2	数值模拟与结果分析	149
4.5.3	实验数据分析	152
4.6	二维核磁共振测井探测岩石内部磁场梯度	154
4.6.1	岩石内部磁场梯度对(T_2, D)的影响	154
4.6.2	岩石内部磁场梯度对($T_2, T_1/T_2$)的影响	154
4.6.3	(T_2, G)二维核磁共振测井探测岩石内部磁场梯度	158
4.6.4	实验测量与数据分析	160
4.6.5	消除岩石内部磁场梯度影响的方法	161
4.7	二维核磁共振测井识别稠油的方法	168
4.7.1	核磁共振测井识别稠油的基本原理	168
4.7.2	多 T_w 单 T_E 数据处理方法	171
4.7.3	油水线定性识别稠油方法	176
4.7.4	多 T_w 多 T_E 数据处理方法	181
4.8	二维核磁共振测井应用实例分析	186
5	运动对核磁共振测井响应的影响	188
5.1	均匀地层中运动对 NMR 测井响应特征的影响	188
5.1.1	相位偏移对 NMR 响应特征的影响	188
5.1.2	速度对磁体极化的影响	191
5.1.3	速度对 CPMG 序列的影响	193
5.1.4	在双 T_w 采集模式下,运动对响应特征的影响	196
5.2	NMR 测井界面模型及响应方程	198
5.2.1	NMR 测井界面模型	198
5.2.2	界面响应方程	199
5.2.3	影响因素分析	200
5.3	运动对 NMR 测井界面响应特征的影响	200
5.3.1	单界面模型及响应特征	202
5.3.2	对称双界面模型及响应特征	204
5.3.3	不对称双界面模型及响应特征	208
5.3.4	累加对响应特征的影响	210
5.3.5	天线长度对响应特征的影响	215
5.4	提高 NMR 测井纵向分辨率方法	217
5.4.1	核磁共振测井纵向分辨率及其影响因素	217
5.4.2	提高 NMR 测井纵向分辨率发展现状	218
5.4.3	改进核磁共振测井仪器提高分辨率	220

5.4.4	改进采集模式及其数据处理方法提高分辨率	222
5.4.5	反演提高纵向分辨率	230
5.5	观测模式与纵向分辨率	238
5.6	高纵向分辨率的观测模式	239
5.6.1	交叉相位对	240
5.6.2	新观测模式	241
5.6.3	交叉相位对与新观测模式对比分析	244
5.7	深度维核磁共振测井反演方法	246
5.7.1	深度维反演方法原理	246
5.7.2	数值模拟	249
5.7.3	模拟数据应用效果分析	252
6	孔隙尺度下核磁共振响应机理	256
6.1	孔隙尺度岩石物理正演模型	256
6.2	CPMG 序列数据采集的数值模拟	258
6.3	孔隙介质中的 NMR 正反演	262
6.3.1	单重孔隙介质中的 NMR 正反演	262
6.3.2	双重孔隙介质中的 NMR 正反演	264
6.3.3	多重孔隙介质中的 NMR 正反演	265
6.3.4	饱和油水两相流体孔隙模型的 NMR 正反演	266
6.4	孔隙尺度下 NMR 的响应特征	267
6.4.1	梯度磁场下 NMR 响应特征	267
6.4.2	不同表面弛豫强度下 NMR 响应特征	268
6.5	基于 SEM 的 NMR 响应特征	270
6.5.1	二维岩石物理模型的构建	270
6.5.2	数字图像 NMR 弛豫响应模拟的实现	273
6.5.3	模拟结果分析	274
6.6	基于 Micro-CT 的 NMR 响应特征	277
6.6.1	Micro-CT 模型建立	277
6.6.2	NMR 弛豫响应模拟原理	278
6.6.3	模拟结果与分析	278
6.7	碎屑岩地层的 NMR 响应特征	287
6.7.1	基于地层侵入带的 NMR 响应特征	287
6.7.2	不同致密程度砂岩模型的 NMR 响应特征	291
6.7.3	不同黏度流体的 NMR 响应特征	295
6.7.4	多 T_E 测井响应分析	297

6.8	2D NMR 在孔隙尺度岩石物理模型中的响应特征	302
7	核磁共振测井资料处理方法与软件实现	307
7.1	核磁共振数据采集	307
7.2	原始数据格式解编与模式识别模块	307
7.3	核磁共振测井数据反演	308
7.3.1	变换反演方法	311
7.3.2	基函数方法	312
7.3.3	奇异值分解方法	313
7.3.4	联合迭代重建方法	314
7.3.5	基于 BG 线性评价理论的反演方法	315
7.4	NMR 数据反演方法影响因素分析	321
7.4.1	Bin 选取的影响	321
7.4.2	回波个数 N_E 的影响	321
7.4.3	回波间隔 T_E 的影响	322
7.4.4	数据压缩的影响	323
7.4.5	噪声影响	324
7.4.6	反演算法对信噪比的敏感性分析	325
7.4.7	低信噪比数据处理方法	328
7.5	双 T_w 方法及其影响因素分析	330
7.6	双 T_E 方法及其影响因素分析	335
7.7	时域分析 TDA 处理方法	338
7.7.1	数据采集	339
7.7.2	数据处理方法	339
7.7.3	单孔地层模型数值模拟	340
7.7.4	多孔地层模型分析	346
7.7.5	时域分析方法识别油气的影响因素分析	357
7.7.6	T_1 与 T_2 的最优搜索和孔隙度计算	365
7.7.7	T_1 与 T_2 的最优搜索与 DPP 处理结果对比	379
	参考文献	385

1 绪 论

核磁共振 (nuclear magnetic resonance, NMR) 测井利用氢原子核与磁场相互作用发生的共振现象来实现井下油气储层信息的观测。20 世纪 90 年代初, 脉冲核磁共振测井仪器开始在石油勘探中应用, 利用 CPMG 脉冲序列观测地层孔隙流体中氢核的核磁共振信号, 得到横向弛豫时间 T_2 分布, 继而获得地层孔隙度、泥质束缚水、毛管束缚水和可动流体体积等岩石物理参数, 在一定条件下得到地层孔径大小分布、渗透率及流体类型和饱和度, 为储层评价和产能预测提供重要信息。核磁共振测井直接探测岩石孔隙流体信息, 能够区分地层中的可动流体和束缚流体, 在束缚水引起的低电阻率储层、低孔低渗储层以及复杂岩性储层的综合评价中已经得到广泛应用, 解决了油气勘探开发中的许多疑难问题。

但是, 随着勘探开发对象的日益复杂, 核磁共振测井在复杂油气藏的应用中也出现一些问题。例如, 它确定的孔隙度与地层实际孔隙度时常存在一定的偏差, 计算束缚水和渗透率的公式具有很强的地区依赖性和使用条件。当地层孔隙中多相流体同时存在时, 油、气、水在 T_2 分布上往往重叠在一起, 目前的流体识别方法得到的答案通常模糊不清, 时常发现核磁共振测井解释结果与试油结果矛盾。深入研究这些问题, 挖掘核磁共振测井在复杂地层的应用潜力, 分析其局限性, 一方面有助于提高核磁共振测井的应用效果, 另一方面可以为发展核磁共振测井新方法提供思路。

本书从研究自由流体和岩石孔隙流体的核磁共振特性入手, 系统分析影响核磁共振测井储层参数评价的各种因素, 从理论上考察流体识别方法的适用条件及其局限性, 找出目前复杂油气藏核磁共振测井应用中存在的问题及其解决办法。然后, 通过数值模拟与岩石物理实验相结合, 探索二维核磁共振测井方法, 并解决二维核磁共振测井数据的测量、反演以及油气水识别和岩石内部磁场梯度探测等关键问题, 最终目的是试图发展我国油气藏流体探测新方法, 解决复杂油气藏评价中流体识别的难题, 开拓核磁共振测井岩石物理研究的新领域。这些工作的开展, 对油气资源勘探开发具有重要意义, 将会推动我国地球物理测井高新技术的发展。

1.1 核磁共振测井发展回顾

1946 年, 斯坦福大学的 Bloch 和哈佛大学的 Purcell 分别独立发现了核磁共振现象。随后核磁共振很快在物理、化学、医学以及食品等行业得到广泛应用, 先后有 6 位科学家因为直接对核磁共振作出重要贡献而分别荣获诺贝尔物理学奖 (Bloch 和 Purcell, 1952 年)、化学奖 (Ernst, 1991 年; Wüthrich, 2002 年) 以及生物医学奖 (Mansfield 和 Lauterbour, 2003 年)。核磁共振在石油勘探中的应用始于 20 世纪 50 年代, 经过近 60 年的发展, 核磁共振测井仪器不断更新换代, 功能逐渐增强, 采集的信息更加丰富。与此同时, 核磁共振测井广泛用于地层评价、储层参数计算以及储层流体的识别和评价。

1.1.1 核磁共振测井仪器的发展

核磁共振测井仪器的构想最早由 Varian 提出, 并进行了可行性研究。20 世纪 60 年代, Chevron 和 Schlumberger 合作研制出利用地磁场的核磁共振测井仪器 (nuclear magnetism logging, NML), 并用于油田测井。但是这种仪器在使用上受到两方面的限制: 第一个限制是仪器不仅测量来自地层流体的信号, 而且还测量来自井眼泥浆的信号。为了消除来自井眼信号的影响, 需要在井中加入磁粉来缩短井眼信号时间。第二个限制是在检测信号之前切断很高的直流电流需要很长的时间, 容易造成仪器“死时间”很长, 小孔隙的信号无法观测到, 测量不到地层的总孔隙度。由于受到仪器“死时间”和井眼中泥浆信号的影响, 地磁场核磁共振测井仪没有被广泛使用。为了克服 NML 仪器带来的局限性, Jackson 等提出了利用永久磁铁在井眼之外的地层中产生一个环形的均匀磁场, 即“inside-out”的概念, 设计了基于反向磁体的核磁共振测井仪的方案。但是这种方案产生的均匀磁场区域太小, 观测信号的信噪比很低。同时在操作过程中, 环形的均匀磁场的位置和磁场强度是随时间变化的, 当射频线圈调到一个固定的频率时, 很难满足共振条件。1987 年, Shtrikman 和 Taicher 提出一种新的磁体与天线结构, 克服了 Jackson 设计中的共振匹配问题, 使核磁共振测井信噪比问题得到解决。Shtrikman 和 Taicher 的设计后来进一步发展为 Numar/Halliburton 公司的磁共振成像仪器 (magnetic resonance imaging logging, MRIL)。

MRIL 以人工梯度磁场和自旋回波脉冲序列为基础, 观测地层孔隙流体中氢核的 NMR 信号, 得到横向弛豫时间 T_2 , 使核磁共振测井进入实用化阶段。MRIL-B 型仪器于 1990 年开始投入油田服务, 并很快得到成功应用。1994 年, Numar 公司开发了 MRIL-C 型双频核磁共振测井仪。至今, 已有 MRIL-B、MRIL-C、MRIL-C/TP 以及 MRIL-Prime 型四代仪器。MRIL-Prime 仪器最多可

以用 9 种不同的频率工作, 做 9 个圆柱壳的观测, 通过改变频率可以在各个圆柱壳间转换。9 个圆柱壳的探测深度总变化为 2.5 cm。多频率工作方式可以测量总孔隙度, 而在每一圆柱壳上使用不同的观测模式可以进行多参数数据采集, 从而对地层流体进行识别和评价。实践证明, 新的仪器提高了测井速度和数据的信噪比。

1992 年, Schlumberger 公司的科学家 Kleinberg 等设计了一种贴井壁测量的偏心型组合式核磁共振测井仪器 (combinable magnetic resonance, CMR)。CMR 仪器的探测深度很浅, 但纵向分辨率较高, 采用贴井壁的测量方式受井眼泥浆矿化度的影响小。到目前为止, Schlumberger 公司先后开发了 CMR-A、CMR-200、CMR-Plus 以及最新一代 MR Scanner 电缆核磁共振测井仪。MR Scanner 是一种具有多个测量频率的偏心型测井仪器, 共有三个天线, 一个主天线和两个高分辨率天线。主天线的测量频率为 0.5~1MHz, 对应的磁场梯度为 38~12 G^①/cm, 纵向分辨率为 18 in^②, 探测深度为 1.5 in、2.3 in、2.7 in 和 4.0 in。两个高分辨率天线操作频率为 1.1MHz, 对应的磁场梯度为 44 G/cm, 探测深度为 1.25 in, 纵向分辨率达到 7.5 in, 可以进行薄层评价。多个探测深度可用于研究泥浆侵入剖面的变化。

Baker Atlas 公司最初使用 Numar/Halliburton 公司的 MRIL 仪器, 2003 年, 该公司自主研制了 MR Explorer (MREx) 仪器。该仪器采用多个测量频率、多磁场梯度、贴井壁测量方式。仪器工作频率为 400~800kHz, 每种频率的带宽为 12kHz, 相邻的两个频率的间隔最小为 25kHz。探测区呈 120° 的圆弧形, 与居中型 MRIL 仪器相比, 虽然探测区较小, 但探测区靠近仪器的天线使得信号较强。仪器的探测深度随工作频率而定, 频率越低, 探测越深, 从井壁算起, 探测深度为 2.5~4.5 in, 这种探测深度可避免井壁不规则对测量结果的影响, 并减少了泥浆侵入的影响。偏心贴井壁测量方式, 不仅不受井眼信号的干扰, 而且可以在斜井或水平井中测量。

前苏联早在 20 世纪 60 年代就开展了核磁共振测井研究, 到了 80 年代, 该国研制出利用地磁场的核磁共振测井仪器, 并投入油田使用。目前, 在俄罗斯的许多油田, 核磁共振测井被列为必测项目, 它已成为重要的勘探测井方法和有效的开发测井手段。

我国从 1996 年开始引进西方的核磁共振测井仪器。原中油测井技术服务有限公司 (CNLC) 和原华北测井公司最早引进了 Numar/Halliburton 公司的 MRIL-C 型核磁共振成像测井仪器。到目前为止, 我国各测井公司陆续从 Halli-

① 1 G=10⁻⁴ T。

② 1 in=0.0254 m。

burton 和 Baker Atlas 引进了约 46 套核磁共振测井仪器, 另外还有 Schlumberger 的 3 套 CMR 和 1 套 MR Scanner 在中国境内服务。“十五”期间国家科学技术部把研制核磁共振测井仪器列入国家重大攻关项目。2006 年, 中国石油天然气集团公司科技发展部将多频核磁共振测井仪研制列为重大仪器专项。这些工作的开展对我国尽早研制出具有自主知识产权的核磁共振测井仪器起到了推动作用。

1.1.2 核磁共振测井地层评价的发展

利用核磁共振测井进行地层评价, 最初是想根据油和水弛豫时间的不同来区分孔隙介质中的流体, 因为与油相比, 自由水的弛豫时间较长。1956 年, Brown 和 Fatt 发现, 亲水岩石中水的核磁共振弛豫时间与自由状态相比显著减小, 且弛豫时间的变化范围很大, 而油在岩石孔隙中的弛豫时间与自由状态基本相同, 由于油的弛豫时间与有些孔隙中水的弛豫时间相同, 因此仅利用弛豫时间的不同区分油和水存在局限性。后续的岩石物理研究表明, 岩石孔隙中水的核磁共振弛豫速率的增加主要是由表面弛豫所引起的, 而表面弛豫与孔隙的表面积与体积的比值有关, 比值的大小又与介质的渗透率密切相关, 表面积与体积比值越小, 渗透率越大, 反之亦然。这表明孔隙介质的核磁共振弛豫性质与渗透率有关, 核磁共振测量结果可以用来预测渗透率。基于地磁场的核磁共振测井仪器 NML 死时间是 30ms, 探测不到小孔隙中的信号, 因此 NML 测量的是可动流体部分, 称为“自由流体指数”(free fluid index, FFI), 得到的核磁共振孔隙度为有效孔隙度。1969 年, Timur 在大量岩心实验的基础上, 通过分析核磁共振孔隙度、自由流体、束缚流体和渗透率之间的关系, 提出了计算渗透率的公式。1974 年, Coates 和 Dumanoir 在此基础上, 建立了目前广泛应用的 Coates 渗透率模型。在此期间, 一些科学家研究了自由流体的核磁共振性质, Brown 研究了不同温度下原油的纵向弛豫时间 T_1 与黏度的关系。Gerritsma 等以及 Rajan 和 Lalita 研究了甲烷气体的 T_1 与温度和密度的关系。Oosting 和 Trappeniers 以及 Harris 研究了甲烷气体的扩散系数与温度和密度的关系。1979 年, Brownstein 和 Tarr 建立了孔隙介质核磁共振弛豫理论, 为岩石核磁共振的应用研究提供了理论依据。该理论认为由于岩石孔隙大小和形状不同, 因此自旋扩散特征值多解, 使得岩石孔隙流体的弛豫表现出多指数衰减的规律。依据该理论, 核磁共振测井采集到的原始自旋回波数据可以用一个多指数函数模型表示。在 1990 年之前, 核磁共振测井在地层评价方面的探索主要集中在研究纵向弛豫时间 T_1 与储层参数(孔隙度、渗透率、自由流体指数等)之间的关系, 给出相应的储层参数计算公式。

20 世纪 90 年代初, 测量横向弛豫时间 T_2 的脉冲核磁共振测井仪器诞生, 核磁共振测井分析家开始研究横向弛豫时间 T_2 与储层参数之间的关系, 经过大

量的岩石物理实验结果表明,砂岩的 T_2 截止值取 33ms、碳酸盐岩的 T_2 截止值取 92ms 时计算束缚水体积比较合适。针对 T_2 分布呈单峰的孔隙大小相对均匀的饱和水岩石,提出了 T_2 谱系数法计算束缚水体积。与纵向弛豫时间相比,岩石孔隙流体的横向弛豫时间除了受体弛豫和表面弛豫的作用外,还受到扩散弛豫的影响。在含绿泥石黏土矿物的地层或岩石中含有顺磁矿物时,岩石骨架颗粒与孔隙流体之间磁化率的差异产生很强的内部磁场梯度,造成横向弛豫衰减很快,导致核磁共振孔隙度偏小, T_2 截止值减小。为了定量研究岩石内部磁场梯度,测井分析家们做了很多尝试,但是由于岩石内部磁场梯度的复杂性,利用现有的基于测量横向弛豫时间 T_2 的核磁共振测井方法无法准确得到岩石内部磁场梯度的分布。

1995 年, Akkurt 和 Prammer 等分别报告了核磁共振测井在探测天然气层中的成功应用实例,认为通过纵向弛豫时间 T_1 或扩散系数 D 的加权,测量两组不同等待时间 T_w 或不同回波间隔 T_E 的自旋回波串,可以探测天然气。人们对核磁共振测井的兴趣开始转移到流体的识别和定量评价方面。随后几年,相继发展了定性识别天然气和轻质油的差谱法 (differential spectrum method, DSM),该方法根据水与轻烃 T_1 的差异,首先对长、短不同等待时间 T_w 得到的两个回波串分别转换为各自对应的 T_2 谱,由于不同等待时间得到的 T_2 谱上,水的信号幅度是一样的,将两组 T_2 谱相减得到差谱,根据差谱特征定性判断轻烃的存在。发展了用于定量评价天然气和轻质油的时间域分析法 (time domain analysis, TDA),该方法在时间域计算两组回波串的差,然后对回波串的差做多指数拟合转换为 T_2 谱。移谱法 (shifted spectrum method, SSM)、增强扩散法 (enhanced diffusion method, EDM) 以及扩散分析法 (diffusion analysis, DIFAN) 都是基于双回波间隔 T_E 测井进行流体的识别和评价。由于不同的流体其扩散系数不同,在不同 T_E 测井得到的 T_2 谱上,向 T_2 减小的方向移动的距离也不同。天然气移动量最大,水和轻质油次之,中等黏度的原油移动较小,稠油基本不动,或常由初始信号的过早消失,造成反演结果反而向相反的方向少许移动。EDM 在采集回波数据时,通过适当地选择长回波间隔 T_E 增强扩散效应,使得水和油信号在 T_2 谱上能够完全分开。实践证明,这些方法在识别储层流体方面有一些成功的应用实例。但是,油气水信号在 T_2 分布上的重叠,为核磁共振测井识别和评价储层流体带来了不可逾越的障碍。

2002 年, Chevron Texaco 石油公司的 Sun 和 Dunn, Schlumberger 公司的 Hürlimann 等以及 Song 等首先分别独立地将核磁共振波谱学中二维核磁共振的概念应用到石油测井,发展二维核磁共振测井方法,解决复杂油气藏流体的识别以及探测岩石内部磁场梯度的分布。Sun 和 Dunn 设计了一种利用两个窗口改进的 CPMG 脉冲序列探测多孔介质的内部磁场梯度 G , 给出了含顺磁物质岩石的