



中国石油大学（北京）学术专著系列

井下极端环境 核磁共振科学仪器

肖立志 著



科学出版社

中国石油大学（北京）学术专著系列

NMR Scientific Instruments
at Downhole Extreme Environments

井下极端环境
核磁共振科学仪器

肖立志 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书首先系统介绍了各种各样的核磁共振仪器,引出井下极端环境核磁共振科学仪器的基本问题及其研究历史和技术现状,然后提出总体设计思想和关键技术问题解决方案。在此基础上,围绕“探头”、“谱仪电子线路”、“软件”、“降噪”四个核心技术内容展开详细而深入的讨论,每个部分都包括理论基础、设计思想、详细方案、研制过程、测试验证以及优化提升等各个关键环节。

本书是作者科研团队多年从事井下核磁共振理论探索和仪器研制工作的总结,可供从事核磁共振,特别是极端环境核磁共振领域中理论、方法、仪器和应用方面的化学工作者、物理工作者、地球科学工作者、石油工程师、井下地球物理探测工程技术人员及其他相关学科的科研人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

井下极端环境核磁共振科学仪器 / 肖立志著. —北京: 科学出版社, 2016. 2

(中国石油大学(北京)学术专著系列)

ISBN 978-7-03-047148-2

I. ①井… II. ①肖… III. ①井下作业-核磁测井-测磁仪器 IV. ①P631.8
②TH762.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 017344 号

责任编辑: 霍志国 / 责任校对: 张小霞

责任印制: 肖 兴 / 封面设计: 东方人华

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

*

2016 年 2 月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2016 年 2 月第一次印刷 印张: 32 3/4

字数: 660 000

定价: 150.00 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。在半个多世纪的发展歷程中，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

序

It is a great pleasure for me to be invited to write this preface for **NMR Scientific Instruments at Downhole Extreme Environments**, written by my friend and colleague Professor Lizhi Xiao of the China University of Petroleum.

NMR is a truly remarkable spectroscopy. Seventy years after the discovery of the basic methodology, scientists and engineers are still exploring new and revolutionary uses and implementations of the technique. NMR is in common use for molecular structure determination of large and small molecules, and it is commonly employed in medical diagnostic imaging. But one of the most intriguing developments in NMR technology in the last few decades has been the creation of downhole NMR Logging instruments for use in the petroleum industry. NMR is usually considered a laboratory technique, requiring high field magnets, stable environmental conditions, low vibration, and isolation from sources of potential RF noise. Downhole NMR logging violates all of these precepts. Most notable are the high pressures and high temperatures, as high as 140 MPa and 175° C, at which downhole logging instruments must function.

Prior to Professor's Xiao's work at the China University of Petroleum, most research and development relating to downhole NMR logging was undertaken by industry with the details of instrument fabrication, and data acquisition, veiled in secrecy. Professor Xiao's research group is the leading academic research laboratory world-wide in the area of down-hole NMR devices and applications. He has a super background for this book through his education in both well logging and NMR Physics, plus his own industry experience, and in addition has a large and very capable laboratory such that they can successfully undertake pulse programming, data processing, magnet design, signal detection and hardware integration for downhole NMR logging.

Professor Xiao's laboratory has successfully cooperated with the three main Chinese petroleum companies to develop down-hole NMR tools and these tools are in use domestically and internationally. The design, use and optimization of down-hole tools have been the subject of more than 50 technical papers and 40 invention patents

of Professor Xiao.

This is not Professor Xiao's first foray into publishing. His first book in English, written while employed by Halliburton, NMR Logging Principles and Applications is the bible of the field and has been translated into Russian, Spanish and Chinese.

His new book, the subject of this preface, is hardware oriented and it will find a ready audience among those who care, as I do, about NMR hardware employed in extreme conditions. It draws heavily on his own practical experience and I trust it will also become a standard in the field.

BruceJ. Balcom
Fredericton, New Brunswick

前 言

Nuclear Magnetic Resonance (NMR) is a physical resonance phenomenon between radio waves and the motion of atomic nuclei in magnetic fields. It finds widespread use in a diverse range of scientific and technological applications. Medical doctors call it magnetic resonance imaging and generate images of the human body, with it to diagnose illness and understand the function of the brain. Chemists call it NMR spectroscopy and analyze the details and function of complex life- sustaining molecules. And engineers employ it to study chemical processes and the properties of materials such as polymers and fluid filled porous media. Most NMR instruments work with strong magnetic fields generated by high currents through superconducting wires cooled down to temperatures a few degrees above absolute zero by liquid helium. These instruments are huge, expensive, and delicate to maintain, and demand the skills of trained experts for operation. On the other hand, materials can be analyzed with very different NMR instruments employing permanent magnets, which can even be operated in the harsh environments of high pressure and high temperature encountered a few kilometers below the earth's surface from where oil and gas can be retrieved to satisfy the energy needs of modern society.

Every few minutes a hole is being drilled into the earth's crust in search for further oil and gas resources. Each drilling operation is accompanied with a range of analytical studies down hole and at the surface to optimize the drilling process. Among the many down-hole analytical techniques in oil and gas exploration, NMR is one of the techniques in great demand, because rock porosity, pore connectivity and the type of fluid contained in the pores of the borehole wall can be determined with NMR instruments residing in the borehole either as part of the drill string or lowered into the hole with wire line after drilling. It is a well-kept secret in the multi-billion dollar oil and gas business how to build such instruments and how to operate them best. Clearly, the principles are the same as MRI, but the details and technological advances that generate the profit are kept proprietary. Yet the advances in NMR methodology and approaches to materials characterization developed in response to the pressing needs of the oil and gas industry leave a growing impact in the multi-faceted landscape of

NMR, which in the past has been primarily determined by the demands defined in medicine and chemistry.

This book on *NMR Scientific Instruments at Downhole Extreme Environments* is written by one of the world's most eminent scientists in the field of downhole NMR and NMR of porous media. I got to know Prof. Lizhi Xiao first through his famous book on NMR Logging Principles and Applications (Halliburton, Houston, 1999) and subsequently on a visit to Beijing following word of mouth about this scientist from China who has worked for quite some years in the oilfield service industry in the United Kingdom and the USA. Professor Xiao has since returned to China and diligently built up a most prominent team of skilled scientists at China University of Petroleum, which moves forward the frontiers of downhole NMR on the international world scale. Evidence of this are his role as the chair of the 11th International Conference on Magnetic Resonance Microscopy in Beijing in 2011 and now this book. It is the first book on downhole NMR instruments. It is structured into four main parts: ① Probe, ② Electronics; ③ Software; ④ Data Processing. More than 450 figures illustrate the text and the list of references covers over 500 citations from the scientific literature. The book is a timely intellectual resource in one of the fastest moving frontiers of NMR today. May it soon become available also in English to enrich the strategies for global solutions to the energy needs of our modern society by advanced NMR instruments and methodologies.

Bernhard Blümich
Aachen

目 录

丛书序

序

前言

绪论	1
0.1 各种各样的 NMR 仪器	1
0.2 井下极端环境 NMR 科学仪器的基本问题	4
0.3 研究历史与技术现状	9
0.3.1 探头	9
0.3.2 谱仪	10
0.3.3 低信噪比 NMR 信号提取	11
0.3.4 脉冲序列	12
0.3.5 反演理论	13
0.4 总体设计思想与关键问题解决方案	14
0.4.1 探头	14
0.4.2 谱仪	15
0.4.3 低信噪比 NMR 信号提取	16
0.4.4 脉冲序列	17
0.4.5 反演理论	18
0.5 本书的结构	18
参考文献	18

第一部分 探 头

第 1 章 探头概述	21
1.1 地磁场井下 NMR 仪器	22
1.2 “Inside-out” 井下 NMR 仪器	25
1.3 MRIL-P	26
1.4 CMR	27
1.5 MRE _x	28

1.6	MR Scanner	28
第2章	探头设计的数值方法	31
2.1	设计原理与数学方法	31
2.1.1	设计原理	31
2.1.2	电磁场反问题求解	33
2.1.3	电磁场正问题求解	35
2.2	探测特性评价	37
2.3	磁性材料	40
2.4	探头特性的数值模拟	42
2.4.1	居中型梯度磁场 NMR 探头	42
2.4.2	贴井壁型均匀磁场 NMR 探头	47
2.4.3	贴井壁型梯度磁场 NMR	51
2.4.4	仪器探测特性	58
第3章	探头设计	60
3.1	结构设计	61
3.1.1	总体方案设计	61
3.1.2	磁体结构、材料选取与磁场特性分析	61
3.1.3	数值模拟过程中的误差分析	72
3.1.4	天线结构与磁场特性分析	76
3.2	探头敏感区域数值模拟、信号强度和信噪比	86
3.2.1	敏感区域形状和范围数值模拟	86
3.2.2	信号强度	87
3.2.3	信噪比	88
3.3	测井速度对仪器结构的影响	89
3.3.1	测井速度与预极化磁体	89
3.3.2	测井速度与天线长度	93
3.4	测井速度对测井响应的影响	95
第4章	探头制作与测试	97
4.1	探头实物	97
4.2	磁场测试结果与数值模拟对比	98
4.2.1	静磁场	98
4.2.2	天线谐振电路结构选取与实测结果分析	100
4.3	联合测试与分析	103
4.3.1	刻度桶测试条件	103

4.3.2 多频测试	104
4.3.3 变 TW 测试	105
4.3.4 变 TE 测试	106
4.4 改进方向	107
第 5 章 简化探头方案设计、架构与测试	109
5.1 总体方案设计	109
5.1.1 磁体结构	109
5.1.2 静磁场数值模拟	110
5.1.3 天线结构与射频磁场数值模拟	113
5.2 敏感区域、信号强度和信噪比	119
5.3 制作与装配	121
5.4 磁场测试与分析	122
5.5 天线参数测试与分析	124
5.6 联合测试与分析	127
第 6 章 振铃噪声的消除方法	131
6.1 振铃噪声的观测	131
6.1.1 测试系统	131
6.1.2 90°脉冲振铃噪声观测	132
6.1.3 180°脉冲振铃噪声观测	133
6.2 NMR 测井振铃噪声的消除	135
6.2.1 PAPS 对 180°脉冲振铃噪声的消除	135
6.2.2 新脉冲序列设计	136
第 7 章 井下 NMR 响应的校正	143
7.1 地层模型的建立与 NMR 影响因素分析	143
7.1.1 钻井液电阻率与地层电阻率对 NMR 测井仪射频场的影响	144
7.1.2 钻井液和地层流体中钠离子对 NMR 孔隙度的影响	145
7.2 数值模拟结果与井下 NMR 响应校正方法	146
7.2.1 居中型 NMR 测井仪	146
7.2.2 贴井壁型 NMR 测井仪	148
7.2.3 钻井液与地层电阻率影响校正方法	150
7.2.4 钠离子影响机理分析与校正方法	151
第 8 章 结论	154
参考文献	155

第二部分 谱仪电子线路

第 9 章 谱仪概述	165
9.1 研发意义	165
9.2 极端环境 NMR 仪器电子成路	165
9.2.1 探测器	165
9.2.2 电子线路	167
第 10 章 现有谱仪电子线路分析	170
10.1 MRIL-P 电子线路	171
10.2 MRE _x 电子线路	175
10.3 CMR 电子线路	179
10.4 MR Scanner 电子线路	183
第 11 章 总体设计	190
11.1 发射电路	192
11.2 <i>Q</i> -转换电路	192
11.3 隔离电路	193
11.4 接收电路	194
11.5 主控电路	194
第 12 章 详细设计	195
12.1 发射电路	195
12.1.1 功率放大电路	195
12.1.2 功率放大驱动电路	201
12.1.3 储能电路	206
12.2 <i>Q</i> -转换电路	207
12.3 隔离电路	213
12.4 接收电路	222
12.4.1 仪用放大电路	225
12.4.2 程控衰减电路	228
12.4.3 带通滤波电路	229
12.5 主控电路	232
12.5.1 主控电路硬件	232
12.5.2 主控电路软件	236
12.6 天线调谐电路	246

12.7 继电器驱动电路	246
12.8 电源电路	247
12.9 小结	248
第13章 制作与测试	249
13.1 发射电路	249
13.1.1 功率放大驱动电路	249
13.1.2 功率放大电路	249
13.1.3 储能电路	254
13.2 Q -转换电路	255
13.3 隔离电路	258
13.4 接收电路	261
13.5 主控电路	264
13.6 天线调谐电路	273
13.7 继电器驱动电路	274
13.8 电源电路	277
13.9 样机测试	278
13.10 天线测试	283
参考文献	285

第三部分 软 件

第14章 软件概述	291
14.1 概述	291
14.2 方法研究进展	292
14.3 研究内容	295
14.4 技术路线	296
第15章 数据处理软件	297
15.1 NMR 数据处理软件基本功能	297
15.1.1 数据输入	297
15.1.2 NMR 数据处理	297
15.1.3 处理成果输出	298
15.1.4 NMR 测井数据处理流程和基本功能	298
15.2 数据输入	299
15.2.1 NMR 测井数据特殊性	299

15.2.2	CLS 格式	300
15.2.3	XTF 格式	301
15.2.4	DLIS 格式	303
15.3	数据处理流程	304
15.3.1	MRIL-Prime 数据处理流程	305
15.3.2	MREx 数据处理流程	306
15.3.3	MR Scanner 数据处理流程	308
15.4	成果输出	309
15.4.1	数据格式转换	309
15.4.2	成果图绘制	309
15.5	二次开发接口	310
第 16 章	数据处理方法	312
16.1	采集模式	312
16.1.1	MRIL-Prime 脉冲序列	312
16.1.2	MREx 脉冲序列	313
16.1.3	MR Scanner 脉冲序列	314
16.2	预处理	315
16.2.1	回波串识别	315
16.2.2	原始回波串数据校正	317
16.2.3	回波串信号和噪声计算	318
16.2.4	时深转换	320
16.3	流体识别	320
16.3.1	油气水在 T_1 - $T_{2\text{int}}$ - D 三维空间中的分布	320
16.3.2	理论基础	320
16.3.3	基于 1 种属性差异的流体识别	325
16.3.4	基于 1.5 种属性差异的流体识别	326
16.3.5	基于多种属性差异的流体识别	327
16.4	岩石物理参数计算	329
16.4.1	孔隙度	329
16.4.2	渗透率	330
16.4.3	伪毛管压力曲线转换	330
第 17 章	软件设计与数值模拟	332
17.1	软件总体框架	332
17.2	数据输入	332

17.2.1	CLS 格式读取	333
17.2.2	XTF 格式读取	333
17.2.3	DLIS 格式读取	335
17.2.4	MAT 格式	335
17.3	井下 NMR 数据处理	336
17.3.1	井下 NMR 数据处理框架	336
17.3.2	预处理	337
17.3.3	数据仪器无关化处理	339
17.3.4	反演处理框架	339
17.3.5	反演处理速度优化	340
17.3.6	流体定性识别和饱和度计算	348
17.3.7	岩石物理参数计算	349
17.4	成果输出	350
17.4.1	成果数据输出	350
17.4.2	成果图输出	350
17.5	二次开发接口	351
第 18 章	处理软件实现与测试	353
18.1	软件开发工具	353
18.2	软件界面及主要功能	354
18.3	数据管理	356
18.4	数据处理	356
18.4.1	预处理	358
18.4.2	反演处理	359
18.4.3	流体饱和度计算	362
18.4.4	岩石物理参数计算	367
18.5	图形绘制	368
18.6	二次开发工具/接口	368
第 19 章	软件应用实例	370
19.1	MRIL-Prime 数据处理	370
19.1.1	数据采集模式	370
19.1.2	数据处理	374
19.1.3	应用实例	374
19.2	MREx 数据处理	377
19.3	MR Scanner 数据处理	378

第 20 章 结论	379
参考文献	380

第四部分 降 噪

第 21 章 降噪概述	391
21.1 NMR 信噪比	391
21.2 相关降噪方法	398
21.3 研究内容及技术路线	402
第 22 章 自适应谱线增强降噪 (回波检测前)	406
22.1 NMR 测井的信号强度	406
22.2 自适应谱线增强原理	412
22.2.1 自适应滤波	412
22.2.2 自适应谱线增强	413
22.2.3 自适应算法	414
22.2.4 自适应滤波器结构	416
22.3 PC-ALE 原理	417
22.3.1 ALE 算法选取	417
22.3.2 相位补偿	419
22.4 PC-ALE 数值模拟	421
22.5 PC-ALE 回波降噪实验	424
22.5.1 流体测量降噪	424
22.5.2 岩心测量降噪	426
22.6 小结	433
第 23 章 基于 DPSD 的降噪 (回波检测中)	435
23.1 微弱信号检测方法	435
23.2 DPSD 原理	436
23.2.1 DPSD 的数学原理	437
23.2.2 数字低通滤波器在 DPSD 方法中的作用	438
23.3 数字低通滤波器设计	439
23.3.1 数字滤波器简介	439
23.3.2 窗函数设计法	440
23.4 数字滤波器窗函数	441
23.5 DPSD 方法数值模拟	444