



电气工程系列丛书

NUMERICAL SIMULATION AND
APPLICATION ON ELECTROMAGNETIC
WAVE RESISTIVITY LOGGING-WHILE-DRILLING
TOOL RESPONSES

李 辉 著

随钻电磁波电阻率
测井仪器响应数值模拟及应用

 江苏大学出版社
JIANGSU UNIVERSITY PRESS

非
外
借



电气工程系列丛书

本书由江苏省高等学校自然科学研究项目 (17KJB416001)、江苏高校品牌专业建设工程资助项目 (TAPP, 项目负责人: 朱锡芳, PPZY2015B129)、常州工学院 - “十三五”江苏省重点学科项目 - 电气工程重点建设学科、2016 年度江苏省高校重点实验室建设项目 - 特种电机研究与应用重点实验室、国家自然科学基金项目 (41074099) 资助出版

李 辉 著

随钻电磁波电阻率 测井仪器响应数值模拟及应用



江苏大学出版社
JIANGSU UNIVERSITY PRESS

镇 江

图书在版编目(CIP)数据

随钻电磁波电阻率测井仪器响应数值模拟及应用 /
李辉著. —镇江: 江苏大学出版社, 2017. 12
ISBN 978-7-5684-0649-9

I. ①随… II. ①李… III. ①随钻测井仪—测井响应—数值模拟 IV. ①TH763.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 271272 号

随钻电磁波电阻率测井仪器响应数值模拟及应用

Suizuan Diancibo Dianzulu Cejing Yiqi Xiangying Shuzhi Moni Ji Yingyong

著 者/李 辉

责任编辑/吕亚楠 吴昌兴

出版发行/江苏大学出版社

地 址/江苏省镇江市梦溪园巷 30 号(邮编: 212003)

电 话/0511-84446464(传真)

网 址/<http://press.ujs.edu.cn>

排 版/镇江华翔票证印务有限公司

印 刷/虎彩印艺股份有限公司

开 本/890 mm×1 240mm 1/32

印 张/5.625

字 数 184 千字

版 次/2017 年 12 月第 1 版 2017 年 12 月第 1 次印刷

书 号/ISBN 978-7-5684-0649-9

定 价/32.00 元

如有印装质量问题请与本社营销部联系(电话:0511-84440882)

前 言

利用导电特性测量地层电阻率是开展地层含油、含气、含水或油水同层定性评价的重要依据,同时也是定量评价储层含油气饱和度的重要参数之一。随钻电磁波电阻率测井具有实时、高效等特点,可有效降低钻井液侵蚀对被测地层电阻率造成的影响,对准确评价储层含油情况具有重要意义。随着油田进入开发后期,被认为没有工业开采价值的小油层、薄油层、断块油层和老油田的剩余油藏被重新开发利用。为了进一步提高采收率并降低钻井成本,大斜度井日益增多,而这些大斜度井的井眼由于井周围岩的电气参数不是轴对称分布,与垂直井眼相比,测井响应发生了巨大的变化,无法直接采用垂直井中的资料处理和解释方法,因此开展大斜度井或水平井中随钻电磁波电阻率测井资料处理与解释方法研究将十分必要。

随着石油和天然气钻井、测井与完井科学技术的不断发展,以及油气工业对石油工程专业人才培养要求的提高,相关石油类院校的地球探测与信息技术专业开设了“地球物理测井”或“矿场地球物理”等专业课程。但是国内目前尚无与随钻电磁波电阻率测井原理及应用相关的教材或专著,因此笔者根据地球探测与信息技术专业的特点,编写了本专著。

本专著共8章:第1章主要介绍了随钻测井技术的研究背景、研究意义及国内外研究现状,同时简要介绍了本专著的研究内容和组织结构;第2章对自适应有限元算法的细化策略和实现过程进行了研究,利用常规自适应 h 有限元算法、自适应 p 有限元算法同自适应 hp 有限元算法的求解精度和收敛速度进行对比,验证了自适应 hp 有限元算法在数值建模中的有效性;第3章对基于C++

语言的自适应 hp 有限元系统 HERMES 进行介绍,依据 HERMES 对各向同性网格和各向异性网格的细化策略和细化过程进行了研究,同时给出了四边形网格和曲边形网格的细化过程;第4章分析了随钻电阻率测井仪器的基本结构和工作原理,依据空间电磁场原理推导了仪器测量信号的响应参数表达式,提出了影响随钻电阻率测井仪器测量结果的内、外因素;第5章介绍了随钻电阻率测井仪器响应数值模拟模型的构造过程,建立了基于自适应 hp 有限元算法的随钻电阻率测井仪器响应数学模型,给出了基于 HERMES 的数学模型 C++ 程序实现方法;第6章分析了各种影响因素对随钻电阻率测井仪器测量结果的影响程度,分析了测井模型的精确性和快速性,同时对基于测井曲线的储层快速油水识别模型进行了探讨;第7章对自适应 hp 有限元算法的应用范围进行了扩展,如过套管电阻率测井仪器响应数值模拟、侧向测井仪器响应数值模拟及井地电位仪器响应数值模拟,对自适应有限元算法的普适性进行了研究;第8章是总结与展望。

本专著在编写过程中,得到中国石油大学(北京)刘得军教授的大力支持。同时,在专著编写过程中,收集和引用了有关专家和学者的相关研究资料,在此一并向他们表示衷心的感谢。由于编者水平有限,书中不妥之处在所难免,诚请广大读者批评指正。

目 录

第1章 绪 论 001

- 1.1 研究背景和意义 001
- 1.2 随钻测井技术发展及研究现状 003
 - 1.2.1 随钻测井技术发展概况 003
 - 1.2.2 随钻电阻率测井技术研究现状 006
- 1.3 随钻电阻率测井仪器响应数值模拟研究现状 009
 - 1.3.1 有限差分法 009
 - 1.3.2 传输线矩阵法 011
 - 1.3.3 有限元素法 012
 - 1.3.4 矢量有限元素法 014
 - 1.3.5 自适应有限元素法 015

第2章 自适应 hp 有限元 017

- 2.1 有限单元及其求解空间 018
 - 2.1.1 有限单元 018
 - 2.1.2 叠层单元 018
 - 2.1.3 有限元求解空间 019
- 2.2 电磁场相关问题 021
 - 2.2.1 Maxwell 方程组 021
 - 2.2.2 边界条件 023
 - 2.2.3 电场矢量波动方程 024
 - 2.2.4 电磁场边值问题 024
 - 2.2.5 伽辽金法 025
- 2.3 自适应有限元单元弱化方程求解 026

2.4	形函数	029
2.4.1	Gauss-Lobatto 形函数	030
2.4.2	标量形函数	031
2.4.3	矢量形函数	031
2.5	有限单元近似解求解器	033
2.5.1	收敛速度及松弛因子	033
2.5.2	网格单元近似解求解	034
2.6	自适应有限元误差估计及网格优化	035
2.6.1	误差估计	035
2.6.2	网格优化	036
2.7	数值算例	037
2.7.1	h 型有限元均匀细化策略	037
2.7.2	p 型有限元均匀升阶策略	038
2.7.3	h 型有限元自适应策略	038
2.7.4	p 型有限元自适应策略	040
2.7.5	hp 型有限元自适应策略	040
2.8	本章小结	042
第3章	基于 HERMES 的自适应 hp 有限元算法实现	044
3.1	HERMES 的结构和特性	044
3.2	自适应 hp 有限元网格细化	046
3.2.1	初始网格设置	046
3.2.2	四边形单元设置	049
3.2.3	曲边单元设置	053
3.2.4	圆形单元设置	055
3.3	自适应 hp 有限元网格细化分类	058
3.4	数值算例	060
3.4.1	三角形和四边形网格细化方法	060
3.4.2	曲边形网格细化方法	061
3.4.3	各向同性网格细化	062

3.4.4	各向异性网格细化	063
3.4.5	各向同性曲边形网格细化	063
3.4.6	各向异性曲边形网格细化	065
3.5	本章小结	066
第4章	随钻电阻率测量理论及仪器工作原理	067
4.1	电磁理论基础	068
4.1.1	Maxwell 方程组及波动方程	068
4.1.2	边界条件	069
4.2	随钻电阻率测量原理	070
4.3	随钻电阻率测井影响因素	074
4.4	数值算例	076
4.5	本章小结	079
第5章	随钻电阻率测井数学模型	080
5.1	随钻电阻率测井数学原理	081
5.1.1	时谐 Maxwell 方程组	081
5.1.2	计算域边界条件	082
5.1.3	变分方程	083
5.2	随钻电阻率测井数学模型	085
5.2.1	线圈天线系数学模型	085
5.2.2	随钻电阻率测井仪器及地层数学模型	087
5.3	基于 HERMES 的数学模型程序实现方法	089
5.4	本章小结	094
第6章	随钻电阻率测井仪器响应数值模拟	096
6.1	源距和间距对仪器测量结果的影响	098
6.1.1	数学模型	098
6.1.2	数值模拟	100
6.1.3	仪器响应	104

- 6.2 发射频率对仪器测量结果的影响 105
 - 6.2.1 数学模型 105
 - 6.2.2 数值模拟 106
 - 6.2.3 仪器响应 108
- 6.3 发射电流强度对仪器测量结果的影响 111
 - 6.3.1 数学模型 111
 - 6.3.2 数值模拟 111
 - 6.3.3 仪器响应 112
- 6.4 地层电导率对比度对仪器测量结果的影响 113
 - 6.4.1 数学模型 113
 - 6.4.2 数值模拟 113
- 6.5 地层倾角对仪器测量结果的影响 114
 - 6.5.1 数学模型 115
 - 6.5.2 数值模拟 117
 - 6.5.3 仪器响应 121
- 6.6 线圈结构对仪器测量结果的影响 124
 - 6.6.1 数学模型 125
 - 6.6.2 数值模拟 126
 - 6.6.3 仪器响应 128
- 6.7 线圈趋肤效应对仪器测量结果的影响 129
 - 6.7.1 数学模型 129
 - 6.7.2 数值模拟 129
 - 6.7.3 仪器响应 132
- 6.8 本章小结 135

第7章 自适应有限元普适性研究 137

- 7.1 过套管电阻率测量理论及工作原理 138
 - 7.1.1 计算域边界条件 139
 - 7.1.2 变分方程 140
- 7.2 数学模型 140

- 7.3 数值模拟 142
 - 7.3.1 电极系结构 142
 - 7.3.2 地层倾斜角 144
 - 7.3.3 泥浆侵入 145
 - 7.3.4 水泥环 146
 - 7.3.5 发射频率 147
 - 7.3.6 电极距 148
- 7.4 仪器响应 149
- 7.5 本章小结 151

第8章 总结与展望 152

- 8.1 总结 152
- 8.2 展望 154

参考文献 157

第1章 绪 论

1.1 研究背景和意义

近几十年来,随钻测井技术作为一种先进的测量技术逐渐引起了相关领域的专家和学者持续关注。随着随钻测井技术地不断发展,随钻电阻率测井技术逐渐引起人们的关注,目前已经成为水平井、垂直井、斜井及微小井眼等的主要测量方法。由于随钻电阻率测井技术是随钻地质导向及随钻地层评价的重要手段,因此它已经成为开发复杂油气藏的关键技术。但是,由于地理位置及气候等客观因素的存在,势必导致对复杂油藏的探测过程十分耗时,油田现场必然对随钻电阻率测井仪器的准确性和快速性提出更高的要求。

随钻测井技术主要有中子孔隙度测井、随钻电阻率测井、随钻伽马测井、光电因子测井、岩性密度测井等,随钻电阻率测井技术在目前各种随钻测井技术中处于十分重要的地位。随钻电阻率测井仪器的工作原理可以简要的概括为:首先,对于不同地层介质,当电磁波在其中传播时,因地层介质的作用而使得电磁波产生不同程度的衰减,随钻电阻率测井仪器在测量过程中主要是对经过地层介质吸收后的电磁波进行测量;然后,再通过对仪器接收线圈所测量到的衰减后的电磁波信号进行处理,进而计算出接收线圈间电磁波信号的幅值比和相位差;最后,利用计算得出的幅值比和相位差来计算出地层视电阻率。目前国内对于随钻电阻率测井仪器的研究和使用还不够完善,因此开展随钻电阻率测量理论及仪

器响应数值模拟研究,对于国内具有自主知识产权的随钻电阻率测井仪器的研发及构建有效的随钻电阻率测量资料解释理论具有十分重要的现实意义。

目前,可应用于随钻电阻率测井仪器响应数值模拟的算法较多,包括有限差分法、积分方程法、数值模式匹配法、逐次逼近法、传输线矩阵法、快速傅立叶-汉克耳变换法及有限元素法等。有限差分法主要用于感应测井的数值模拟计算;积分方程法可应用于感应测井、侧向测井及井间电磁测井的响应计算,如今已取得了实际的计算结果;数值模式匹配法是感应测井响应计算最有效和应用最为普遍的方法,在自然电位和普通电阻率测井响应计算中都得到了应用;逐次逼近法提出电阻率测井的高次几何因子,利用高次几何因子和多重积分方法可进行电阻率测井响应的计算;传输线矩阵法主要用于过套管电阻率测井响应的计算及过套管电阻率测井仪器的研制和解释图版的计算;快速傅立叶-汉克耳变换法用于感应测井响应计算,在分析井斜和围岩等因素对测井响应的影响时具有较高的效率;有限元素法对于含有复杂边界形状的问题进行处理及在分析井眼周围复杂地层结构时具有很大的优势,二维和三维有限元素法在侧向测井、感应测井及随钻电阻率测井仪器响应数值模拟中具有广泛的应用。常规正演数值模拟算法在仪器响应数值模拟方面已取得一定的效果,但因各自算法存在局限性及地层结构具有一定的复杂性,在解决求解精度和计算速度等方面仍存在一定的不足。同时,常规数值算法还存在计算效率不高、无法大面积推广、数值模拟软件少及动态数值模拟难度较大等不足。

自适应 hp 有限元算法可以依据电磁场在地层介质中的不同分布情况,对计算域进行 h 细化或 p 细化;通过 h 细化或 p 细化可以产生若干加密网格,利用该网格可以有效地满足多重网格求解的初始条件,将多重网格求解技术与自适应 hp 有限元算法相结合,可以达到不需要计算出整个计算域内场量的精确值就可以使有效电磁波信号迅速、准确地收敛到真实值周围的目的。与常规数值模

拟算法相比,自适应 hp 有限元算法具有计算精度高、计算速度快及鲁棒性好等优点。

随钻电阻率测量理论及仪器响应数值模拟研究就是基于上述技术背景提出来的。采用自适应 hp 有限元算法并以电磁场理论为指导,对垂直井眼条件下随钻电阻率测井仪器响应进行数值模拟,通过分析环境对随钻测井仪器的影响,综合考虑侵入带、井周围岩、电导率、介电常数、地层倾斜及薄层的作用,进而对井周地层电学特性及仪器探测性能进行考察和分析。由于国内对于随钻电阻率测量理论的研究还停留在对测井资料的反演推导上,尽管已经取得了一定的研究成果,但由于对测井资料的反演求解难度较大,同时反演计算量也非常大,因此大部分研究还处于初级阶段。同时,反演过程中所选用的测量模型不可能完全逼近实际测井过程,再加上油田井场各种干扰因素的存在,这使得反演结果收敛速度低、计算误差大,不能很好地为随钻电阻率测井资料的解释提供理论依据。因此,对随钻电阻率测量理论及仪器响应数值模拟进行深入研究,对于我国具有自主知识产权的高精度随钻电阻率测井仪器的研发及配套反演解释软件的开发具有十分重要的现实意义。

1.2 随钻测井技术发展及研究现状

1.2.1 随钻测井技术发展概况

测井技术的发展史可以归结为4个阶段。第一阶段:半自动测井。利用导线进行简单地层电阻等信息的测量。第二阶段:数字测井。在这一阶段,电子技术和计算机技术得到了较大程度的应用。第三阶段:数控测井。这一阶段主要以计算机为核心,高精度的质量监控和大容量的数据传输及计算机处理技术的应用成为这一阶段的主导思想。第四阶段:高集成和高精度测井。在这一阶段,测井技术逐步向集成化、快速化方向发展。

常规的测井方法,如自然电位测井、普通电阻率测井、侧向测

井、感应测井、声波测井、自然伽马测井和放射性同位素测井、密度测井和岩性密度测井、中子测井、脉冲中子测井、生产动态测井等经过几十年的发展,已经逐步走向成熟。然而伴随着常规测井技术的发展,面对油气田开发的不断深入,对测量精度的要求不断提高的同时测量信息也在不断地增加,因此随钻测井技术迅速发展起来并逐步应用到许多领域之中。例如随钻电法,声波、核磁测井技术。目前,随钻测井技术已经较好的将声波技术、电磁波技术及核磁共振技术等其他相关技术相融合,并有效地将随钻测井设备制造成体系化、成套化的仪器。

钻井过程中井眼周围的岩层会被钻头钻碎,把钻头钻碎岩层时产生的振动信号作为发射源,然后再利用相关仪器配套装置对该地震波进行实时地测量,这就是随钻地震技术。早在 20 世纪 30 年代,Weatherly 就已经开始利用钻井过程中钻头产生的冲击信号来达到对地下介质构造进行成像的目的,并申请了相关专利,但是由于科技水平的限制,Weatherly 的研究成果并没有得到广泛的推广及很好的发展。在 20 世纪 60 年代,地质学家 M. Chapuis 对随钻地震进行了深入研究,他认为,钻头在对岩石进行钻进时所产生的振动信号可以作为发射源,并且岩层越坚硬,钻头所产生的信号就越强烈。20 世纪 70 年代,Elf - Aquitaine 的 Jean Lutz 联合钻井工程、地球物理专家,通过在钻柱顶部安装加速度计来测量通过钻柱传输的振动。20 世纪 90 年代,由于电脑、信号处理技术及弱信号检测技术的不断完善,随钻地震技术也得到了长足的发展。如今,随钻地震技术已经成为随钻测井中的一个重要组成部分,并已被各大油田所采用。

随钻电磁波电阻率测井仪自 1986 年投入商业应用至今已经有 30 年的历史,作为随钻测井技术的重要组成部分之一,早期的电磁波电阻率测井仪器较为简单,其特点是有一个发射天线和一个接收天线,用来测量电磁波信号的相位差并提供一个电阻率值。但初期的仪器在进行电阻率测量时测量深度十分有限,对于井眼校正是无法做到的。随着随钻电磁波电阻率测井技术日益完善,

测井仪器不但具备了可以对不同深度地层进行探测的能力,并且仪器还可以做到更多参数的实时测量。目前,随钻电磁波电阻率测井仪器已经发展为具有九根天线的复杂系统。随钻电磁波电阻率测井仪器不仅可以弥补传统电阻率测井仪器所存在的天线少、长度大及结构复杂等缺陷,还可以利用增加天线数量、缩短仪器长度、改善仪器结构、改变发射频率等方式完成对地质体的测量。随钻电磁波电阻率测井仪器具有探测准确性好,受井周围岩作用小,仪器探测范围广,纵向分辨率高等优点,并增加了薄层电阻率响应能力,但存在难以区分油(气)、水层及测井资料解释较为复杂等不足。目前,随钻电磁波电阻率测井仪器因其短小灵便且精度较高的优势已得到国内各大油田随钻测井仪器研发机构的认可,其电磁测量技术与实现方式已成为电磁波传播类仪器的一种重要测量手段。

声波测井技术自20世纪50年代开始,历经几十年的发展已经成为地球物理测井学科的重要领域,是发展最快和应用最广泛的现代测井方法之一。近十年来,声波测井技术有了很大发展,在钻井实时决策方面也起着举足轻重的作用。目前声波测井技术日益成熟,已经在我国油田勘探开发过程中得到了广泛的应用。通过随钻声波测井技术可以提高实时测量数据的存储力,可以在相当长的时间里对高密度数据进行记录,同时仪器的测量频率范围不断提升,从而使随钻声波测井仪器对地层中的声波信号更加敏感,同时受钻井噪声的影响会更小。但是声波测井技术在应用研究上仍面临一些问题,表现为:在全波列测井过程中,无法有效对波形进行分离并同时提取出有用的信息,另外声波层析成像关键技术还不完备。

目前,随着石油勘探开发难度的加大,核测井技术作为一种尖端测井技术已经快速地发展起来。在俄罗斯,核磁测井已是重要的常规测井手段,在油田勘探及开发测井中发挥举足轻重的作用。在美国,NUMAR公司对于核磁测井技术的研究十分成功,在世界各地成功地完成了很多井场的核磁测井服务。现今,随钻核测井

与电缆核磁测井具有很多相似之处,在流体及渗透率参数信息的提取方面具有自身的优势,但在实时性方面又各不相同。随钻核测井可以提供实时流体数据,如束缚水饱和度、束缚流体体积、自由流体体积、地层孔隙度及孔隙大小、地层渗透率。然而随钻核测井也存在一定的缺陷,如核测井仪的测量精确性有待提高,核测井计算机数值模拟技术有待进一步完善,评价方法与评价目标的匹配问题及测井资料的预处理技术和利用测井资料确定润湿性的问题。

现今,伴随着信息传输技术、信息处理技术及材料技术地不断发展,随钻测井技术的发展步伐进一步加快。随钻测井技术地不断发展,必将促进更多的新方法融入到随钻测井的行列。在未来的发展中,数据实时传输率、测井仪器的可靠性及放射性源等问题将成为人们关注的焦点。如今,越来越多的石油公司对随钻测井技术的认可和使用,使得我们应该抓住当前市场需求的有利条件,积极推进科技创新、研制有自主知识产权的随钻测井仪器。然而,目前随钻测井仪器的性能有待完善,各大油田对于复杂油气藏的开发难度越来越大,对随钻测井仪器的需求越来越明显。因此,深入的认识、了解和掌握随钻测井技术的应用研发现状对研制具有独立自主知识产权的随钻测井设备具有重要的意义。

1.2.2 随钻电阻率测井技术研究现状

Gianzero 和 Su 在 1990 年首次提出了利用多发射线圈和接收线圈来对倾斜地层进行测量。当对多个横向地层进行测量时,在地层交界面处,随钻电阻率测井仪器会测量到曲线上出现一个角状的突起信号,人们一开始以为该角状的突起信号是一种噪音,从而花费了大量的时间进行研究,希望能消除这个噪音信号。1993 年, Martin Luling 指出这些角状的突起信号具有一定的利用价值,即通过这些角状的突起信号可以对定向钻井进行分析和考察。利用这种角状的突起信号虽然能够比较准确地分辨出地层的分界面,但是对于阻值相同的两个地层,无论测井仪器是从高阻地层钻入低阻地层,或是从低阻地层钻入高阻地层,仪器所探测到的角状

突起信号都是相同的,此时若是依据该角状突起信号来分辨高阻地层和低阻地层是不准确的,因此这种情况下无法依据测井曲线来判断有价值的地层。在此之后,Wu 和 Wisler 在 Martin Luling 的研究基础上,使用电磁波传感器成功实现了多层地层分布情况的有效探测。1994 年,Rosthal 提出了利用最小化迭代误差算法来实现对水平井和垂直井的井周地层的电阻率测量,但该算法无法对倾斜井的电阻率进行测量。随后,Bonner 等人提出使用聚焦电极电阻率仪器,并将其应用于定向钻井技术中,但该方法不适合使用于油基钻井液或者处于高侵状态下的地层测量。1996 年,Hagiwara 提出同时使用两个随钻电阻率测井探头来对斜井的水平方向电阻值进行测量,但该方法依然无法对角进行准确测量;同时,Hagiwara 还指出,传统的随钻电阻率检测仪器无法同时检测地层倾斜时地层的水平电导率、垂直电导率和倾斜角。为了实现对斜井的探测,就需要对仪器的结构进行改进。同样在 1996 年,Sato 提出一种新型随钻电阻率测井仪器钻头,通过该钻头可以对斜井中以钻杆为轴心的圆柱形区域进行探测,该钻头的发射线圈和接收线圈沿钻杆依次排列,同时发射线圈和接收线圈还可以分别向两侧呈对称状倾斜一定角度。1998 年,在 Hagiwara 的研究基础上,Wu 提出了可以同时检测地层的水平电导率、垂直电导率和地层倾斜角的测量方法,这种方法假定每个地层的介电常数一定,同时忽略介电常数对相移电阻率的影响,从而可以得到地层介电常数与地层各向异性电导率之间的关系。随后,随钻电阻率测井仪器发射天线的结构就开始采用多个发射线圈和接收线圈。为了实现对倾斜地层的探测,发射线圈和接收线圈不再与钻杆保持垂直姿态,而是可以倾斜并在此基础上对探头进行不断设计。2006 年,Michael S. Bittar 提出通过改变发射线圈和接收线圈的倾斜角来对倾斜地层中的斜井进行探测,此后该技术被哈利伯顿公司用于实际随钻电阻率测井仪器的设计之中。

近年来,国内外针对随钻电阻率测井仪器的测井响应进行了大量的研究,提出了许多切实有效的数值模拟算法。1991 年,Shen