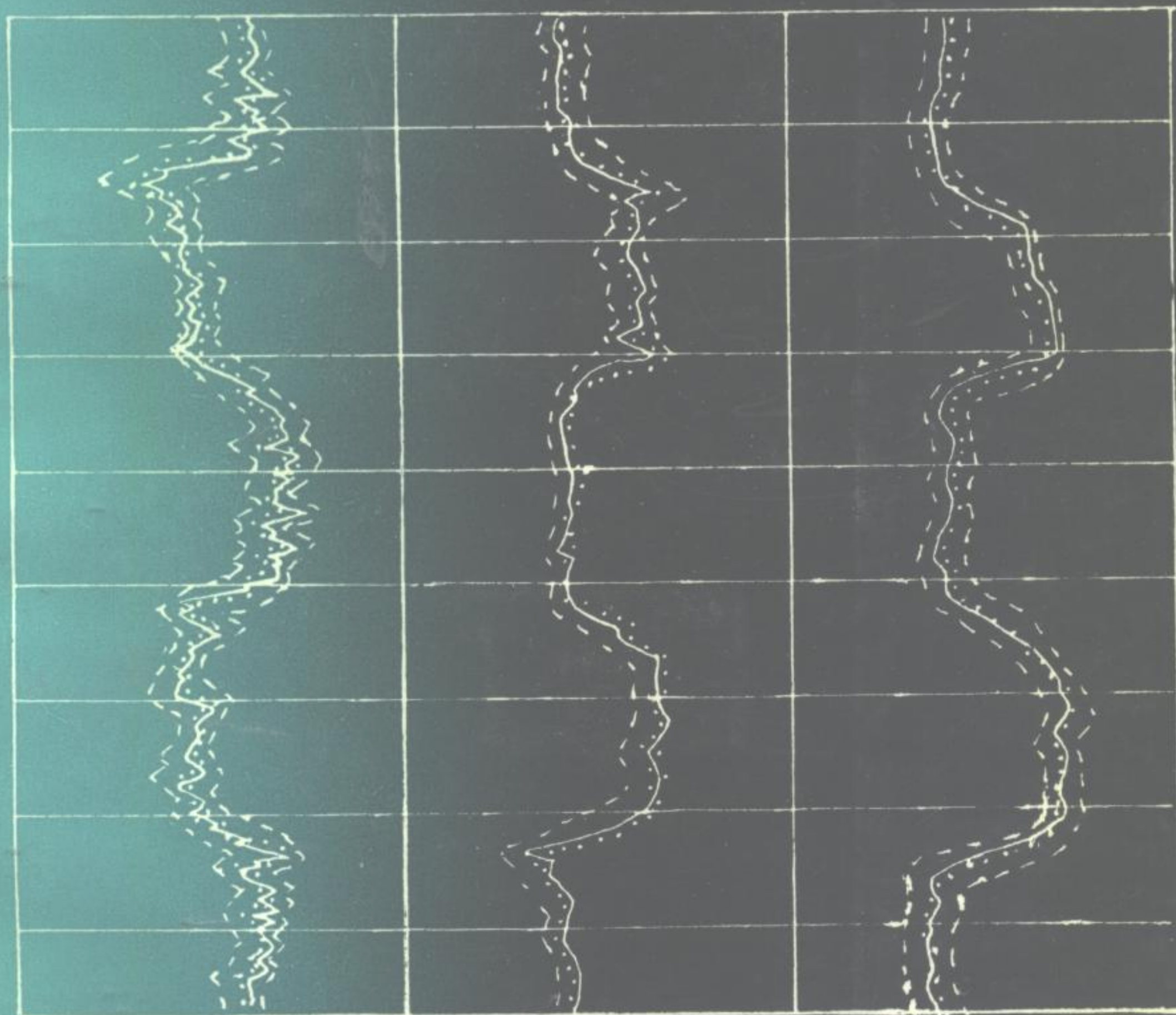


最优化测井解释

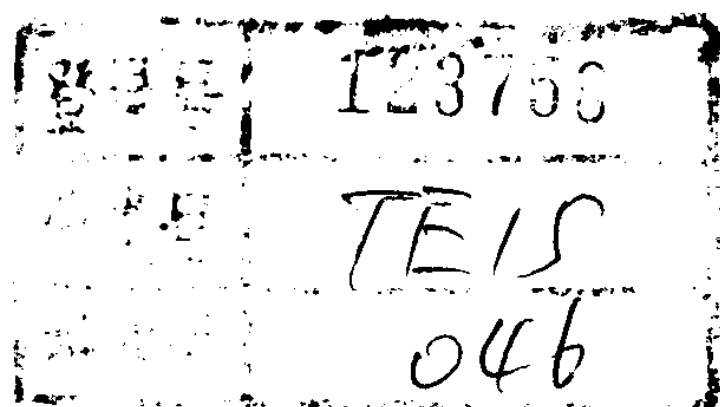
雍世和



(北京)

5
6

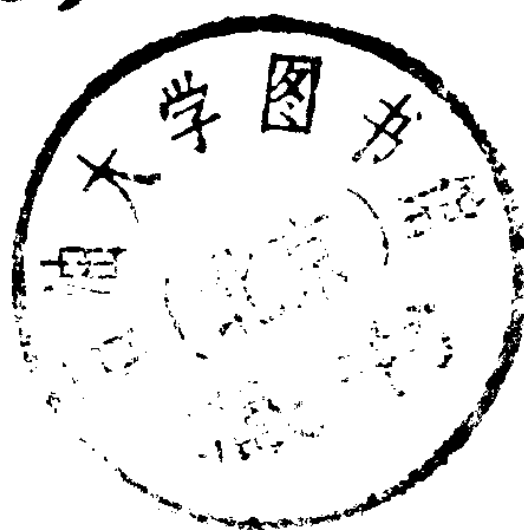
石油大学出版社



最优化测井解释

雍世和

S7474/32



石油大学出版社

鲁新登字 10 号

内 容 提 要

最优化测井解释是 20 世纪 80 年代发展的新技术,具有许多独特的优点,广泛用于对复杂岩性地层进行有效的地层评价与油气、煤炭及有用矿藏的分析。本书作者以近年来的科研成果及其应用为基础,参考了国内外发表的有关文献,从测井资料解释与数字处理全过程出发,比较全面系统地介绍了最优化测井解释的理论原理与最优化数学模型,测井曲线数字滤波与环境影响校正、测井解释模型与响应方程及误差计算、最优化方法及选择、岩性解释模型与解释参数的选择、最优化测井分析软件与处理技术及成果的质量检验与评价,用最优化方法对实际的复杂砂泥岩、碳酸盐岩和火成岩、变质岩储集层的评价及油气分析等等。同时还介绍了近几年国外最优化测井解释技术的新发展,并对这一新技术的发展方向与实际应用提出了看法。

本书内容丰富翔实,可作为石油、煤矿、地质等部门测井解释人员和科研人员参考,也可作为大专院校矿场地球物理专业与有关专业师生的参考书。

最优化测井解释

雍世和

*

石油大学出版社出版

(山东省东营市)

新华书店发行

山东东营新华印刷厂印刷

*

开本 787×1092 1/16 17.25 印张 442 千字

1995 年 5 月第 1 版 1995 年 5 月第 1 次印刷

印数 1—800 册

ISBN 7-5636-0598-3/TE·98

定价: (精) 29.00 元
(平) 19.00 元

前言

最优化测井解释技术自 20 世纪 80 年代初问世以来,就以它不同于传统测井解释方法的逻辑思维 and 解释概念,对各种测井信息及有关地质信息的极高利用率、对复杂岩性油气藏的良好求解能力、灵活方便的模块结构与很强的发展潜力以及有效的自我质量控制技术等多种特点及优点,突破了长期形成的传统测井资料解释模式与框架,显示它的明显优势,具有重要的理论意义与实用价值,从而引起广大测井分析家的极大关注与浓厚兴趣,纷纷投入很大的精力来研究发展和推广应用这一新技术。因此,自 1980 年 Schlumberger 公司首次推出它号称适应于全球的最优化测井分析程序 GLOBAL 不久的短短几年内,美国的 Haliburton、Western-Atlas、Scientific Software 等世界著名的各个测井公司、软件公司乃至石油公司都积极研究开发、相继推出它们各具特色的最优化测井分析软件。这些最优化测井解释技术和分析软件已广泛用于包括我国在内的世界各国的测井资料解释与数字处理,并在评价复杂岩性储集层与油气分析方面取得了明显优于传统测井解释的良好地质效果。我国胜利油田测井公司在 1983 年就开始对最优化测井解释技术进行探索性研究,并获得阶段性研究成果。特别是在“七五”国家重点攻关项目《油藏描述技术研究》中,将“最优化测井解释方法及软件”列为重点研究课题后,经过几年艰苦攻关,石油大学、江汉测井研究所、江汉石油学院、中原油田、大庆油田等单位先后研究开发成功各自的最优化测井分析软件,并在我国各油田迅速推广使用,取得了良好的地质效果,使我国的测井解释与数字处理水平上了一个新台阶,使我国的最优化测井解释技术紧紧跟上了世界同类先进技术的发展步伐。但是,迄今为止,国内外尚无一本公开出版的、全面系统介绍有关测井资料最优化解释的论著,仅有少量公开发表的科研论文。这些论文大多数只从某些侧面重点介绍了作者在最优化测井解释技术的研究中取得的某些成果,未能从测井资料最优化解释与数字处理的整体出发,对最优化测井解释技术的各个方面进行完整系统的阐述。为了进一步推动我国最优化测井解释技术的研究发展与实际应用,更好地将这一技术用于为我国复杂岩性油气藏的勘探开发服务,作者将以近几年来我们研究开发成功、并获 1991 年度中国石油天然气总公司科技进步二等奖的“测井最优化解释方法”及其实际应用事例为基础,同时广泛参考国内外发表的有关文献资料,着眼于最优化测井解释与数字处理的全过程,试图对最优化测井解释的理论原理、计算方法、处理技术、质量控制与实际应用以及相关的数字处理技术作比较全面系统的介绍,同时还介绍了近几年来国外最优化测井解释技术的新发展,并对这一新技术在我国的进一步发展与应用提出一些看法。作者一向把自己看成是一个学生,本书也是自己对这一新领域的学习结果。期望能借此与同行专家们相互交流共同切磋,更希望通过此书能对发展和应用我国的最优化测井解释技术尽微薄之力。但是由于本人的技术经历、理论和专业水平及时间所限,书中定有不少不当之处,恳请各位专家和读者给予指正。

这里,作者特别感谢石油大学(华东)青年教师孙建孟、毕卓新和申辉林等同志以及在 1985 年 3~7 月的毕业设计中曾参加过最优化测井解释工作研究的李洪奇同志与部分测 81、测 82 学生,是他们在近几年艰苦攻关中同作者一道完成了“最优化测井解释方法及软件”和“测井曲线环境影响校正方法及软件”的重点科研任务,为本书的编写提供了基础。感谢胜利油

“测井曲线环境影响校正方法及软件”的重点科研任务,为本书的编写提供了基础。感谢胜利油田测井公司热情地为此项研究提供测井与地质资料,感谢胜利、华北、大港、辽河、冀东、四川、库尔勒、吐哈等油田测井公司在这些科研成果的实际推广应用中提供的热情帮助。作者还要特别感谢我敬爱的老师王曰才教授在他年近古稀的时候,还不辞辛劳地对本书有关章节进行认真审阅和指导,感谢张庚骥教授、潘谨台高级工程师、司徒丽丽副编审对出版本书的关心与帮助,感谢胜利油田副总工程师、有突出贡献的国家级专家曾文冲与石油大学从事最优化数学教学的卢明高教授在此项研究及评审中提供的帮助,感谢本书所引用的文献作者和译者,最后还要特别感谢石油大学出版社耿全喜同志对全书进行了认真严谨的编辑。没有上述同志工作的基础,没有他们热忱的指导、支持和帮助,本书将难以完成和出版。

雍世和

1993. 8

目 录

第一章 最优化测井解释的原理.....	1
第一节 最优化测井解释的基本原理和要求.....	1
一、最优化测井解释的基本原理.....	1
二、对最优化测井解释的基本要求.....	2
第二节 最优化测井解释数学模型.....	2
一、建立最优化解释数学模型的基本思路.....	2
二、测量误差与响应方程误差.....	3
三、约束条件及其处理.....	4
参考文献.....	6
第二章 测井曲线的滤波与校正.....	7
第一节 测井曲线的平滑数字滤波.....	7
一、最小二乘滑动平均法.....	8
二、加权滑动平均法.....	9
三、应用实例.....	10
第二节 岩性-孔隙度测井曲线的环境影响的校正.....	14
一、自然伽马测井曲线的环境影响校正.....	14
二、自然伽马能谱测井曲线的校正.....	17
三、补偿中子测井曲线的岩性与环境校正.....	18
四、密度与 P_{γ} 测井曲线的校正.....	23
五、声波测井曲线的近似校正.....	25
六、应用实例.....	25
七、用频率交会图对岩性-孔隙度测井曲线作综合校正.....	27
第三节 视电阻率曲线的环境影响校正.....	32
一、微电阻率曲线的校正.....	32
二、感应测井曲线的井眼和泥浆侵入校正.....	33
三、侧向测井曲线的井眼和泥浆侵入校正.....	40
四、用经验方法对视电阻率曲线作泥浆侵入校正.....	47
第四节 测井曲线标准化.....	48
一、直方图和交会图法.....	48
二、趋势面分析法.....	50
参考文献.....	52
第三章 测井解释模型与响应方程及误差.....	54
第一节 多矿物解释模型及测井响应方程.....	54
一、多矿物解释模型.....	54
二、测井响应方程及解释误差.....	55

三、多矿物解释模型的约束	62
四、多矿物模型解释未知量初始值的估计	63
第二节 W-S 模型和双水模型及响应方程	64
一、W-S 模型与双水模型	64
二、测井响应方程及响应方程误差	74
三、双水模型与 W-S 模型的约束	79
四、双水模型与 W-S 模型未知量的初始值估计	80
第三节 测井曲线的测量误差估算	81
一、概述	81
二、电法测井曲线的测量误差	82
三、非电法测井曲线的测量误差	82
参考文献	86
第四章 最优化方法	87
第一节 概述	87
一、最优化问题	87
二、最优化问题的类型	87
三、局部和全局最优解	88
四、最优化算法概述	88
五、收敛准则及收敛速率	89
第二节 一维搜索的最优化方法	90
一、黄金分割法	90
二、Fibonacci 法	93
三、进退法	95
四、埃特金(Armijo)插值法	95
五、抛物线插值法	96
第三节 多维搜索最优化方法	97
一、最速下降法	97
二、牛顿法和修正牛顿法	101
三、DFP 与 BFGS 变尺度法	102
四、共轭梯度法	105
五、高斯-牛顿最小二乘法	109
六、鲍威尔(Powell)直接法	111
第四节 最优化方法的选择	112
一、评价最优化的准则	112
二、一维搜索最优化方法的选择	113
三、多维搜索最优化方法的选择	115
第五节 利用填充函数改进最优化计算	118
参考文献	119
第五章 最优化测井解释的质量检验与评价	120
第一节 最优化计算结果的质量检验与控制	120

一、概述	120
二、置信区间法	122
三、拟合系数法	123
四、目标函数最优值	123
五、减小非相关函数 R_{inc}	123
六、相关系数法 R^2	125
第二节 最优化解释结果的评价	126
一、可靠性区间法	126
二、用蒙特卡罗法检验	129
参考文献	130
第六章 最优化方法在曲线校正及参数选择等方面的应用	131
第一节 用最优化方法导出测井曲线校正公式	131
第二节 用最优化方法对视电阻率曲线进行泥浆侵入校正	132
一、最优化数学模型	133
二、视电阻率的理论测井响应	133
三、感应和侧向测井的几何因子表达式	134
四、视电阻率测井的测量误差	138
五、约束 $g_i(x)$ 与约束误差 τ_i 及初始值	140
六、用最优化方法求最优解 x^*	140
七、质量检验	142
第三节 用最优化方法选择解释参数	143
一、最优化数学模型	143
二、处理流程及应用实例	144
参考文献	146
第七章 用最优化方法进行地层评价	147
第一节 最优化测井解释的数据处理流程	147
一、测井资料预处理及测量误差的计算	147
二、选择解释模型、建立目标函数	147
三、选择解释参数、约束和储层参数初始值	148
四、计算目标函数与其梯度值	149
五、最优化计算求得的最优解	149
六、质量控制显示	149
七、输出最优化测井解释结果	150
第二节 确定岩性解释模型	150
一、定性确定岩性	150
二、用交会图技术确定岩性	152
第三节 解释参数的选择	168
一、地层温度	175
二、泥浆和泥浆滤液的电阻率、矿化度、密度及泥饼电阻率	177
三、确定地层水的电阻率、矿化度和密度	180

四、确定 a, b, m, n 参数	189
五、烃的参数确定	195
六、确定声波压实系数 C_p	197
七、泥质(粘土)参数	199
第四节 最优化测井分析软件 OPTLAP	203
一、系统的构成及功能	203
二、最优化测井分析软件系统 OPTLAP 的特点	209
第五节 用最优化方法进行地层评价	213
一、泥质砂岩的最优化解释	213
二、碳酸盐岩储集层的最优化解释	223
三、火成岩、变质岩储集层的最优化测井解释	227
参考文献	233
第八章 最优化测井解释的新发展及特点	234
第一节 GLOBAL	234
一、基本原理	234
二、应用举例	235
第二节 OPTIMA	237
一、基本原理与特点	237
二、优化计算的质量检验与控制	238
三、优化解释结果的质量评价	239
第三节 ULTRA	242
一、ULTRA 系统的构成	242
二、解释模块的功能原理	243
三、储层参数与解释参数同时优化	246
四、应用举例	248
第四节 ELAN	250
一、主要特点	250
二、基本原理	251
三、测井响应方程	252
四、温度与矿化度逻辑	254
五、解释模型的组合	255
六、后处理	257
第五节 一种实用资料统计分析方法	258
一、基本原理	258
二、应用举例	261
第六节 最优化测井解释方法的特点及展望	262
一、最优化测井解释方法的特点	262
二、展望	264
参考文献	265
附录 书中使用的法定计量单位和非法定计量单位换算表	267

第一章 最优化测井解释原理

迄今为止,传统的测井分析方法与程序基本上是按照固定的解释模型,采用有限的几种测井资料分别计算储层参数来进行地层评价及油气分析的。实质上,它们基本上都是用计算机来模拟人工解释过程。虽然这些测井分析方法与程序在过去和现在均起着重要作用,但它们都存在某些重要缺陷。例如,在计算过程中未能充分利用现有的所有测井资料;不能灵活地采用不同的解释模型和解释方法;难以有效地评价含两种以上矿物的复杂岩性地层;对计算结果又缺乏自我质量检验手段等等。它们一方面降低了现有测井信息的利用率,另一方面又限制了新的测井方法与新的解释模型及方法的应用,因而严重地影响了它们评价复杂岩性油气藏的地质效果。目前,测井工作中的一个突出矛盾是在采集信息量与其实利用率之间、投入与产出之间存在着明显的不平衡,其重要表现是:尽管许多油田花了巨额外汇经费引进了不少的 CSU、3700、DDL 等现代数控测井系统及新型测井仪器,测出了大量的全套 CSU、3700 和 DDL 仪器的测井曲线,拥有先进的计算机软硬件设备,但不少油田在实际测井解释中基本上仍是沿用传统测井解释模式,采用以 20 世纪六七十年代开发的单孔隙度测井分析程序 POR 和复杂岩性分析程序 CRA 等为主的常规测井分析程序,只用部分测井曲线来进行计算机处理解释与油气评价,而所测的其它曲线闲置未用,致使这些油田的测井解释水平基本停滞在 20 世纪 70 年代中期水平,同时又面临着不能有效地解决许多复杂油气藏的评价难题。显然,克服当前测井信息利用率低、产出不高的状况,已经到了刻不容缓的地步。摆在我国测井分析家面前的一项迫切任务,是要研究如何综合利用所有测井信息及有关地质信息,采用更先进有效的测井解释与数字处理方法来评价复杂油气藏,从而达到不断提高测井技术的地质-经济效果的目的。

最优化测井解释是 20 世纪 80 年代初发展的新技术,它突破了传统的测井解释模式和逻辑概念,不是直接利用有限的测井资料和响应方程去计算储层参数,而是根据广义的地球物理反演理论,综合利用各种测井信息和有关地质信息,运用最优化数学方法、统计概率与误差理论以及质量控制技术,求解反映地下复杂岩性地层原貌的地质参数,来进行地层评价与油气分析的。自这项新技术问世以来,就在理论和实际应用上显示出它的明显优势,具有许多特点和优点,为综合利用各种测井资料和有关地质信息,评价复杂岩性油气藏开辟了一条新的有效途径。

第一节 最优化测井解释的基本原理和要求

一、最优化测井解释的基本原理

与传统的测井解释方法相反,用最优化方法进行测井解释是根据地球物理学中的广义反演理论,以经过环境影响校正后的、较为真实地反映地层及其孔隙流体特性的测井值 a_i 为基础,以储层参数和矿物相对体积为自变量 x ,采用适当的解释模型和各种测井响应方程,通过合理选择的区域性解释参数 z 与储层参数初始值 x 。反算出相应的理论测井值 $\hat{a}_i = f_i(x, z)$,并

将它们与实际测井值相比较,根据非线性加权最小二乘法原理和误差理论,结合某些地区地质经验来建立最优化测井解释的数学模型,应用最优化技术不断调整未知储层参数 x ,使计算的各理论测井值 $\hat{a}_i$ 不断地逼近相应的实际测井值 a_i 。一旦两者充分逼近,即目标函数值达到了极小值,则此时用以计算各理论测井值 $\hat{a}_i$ 所采用的自变量 x ,就是最充分反映实际地层原貌的储层参数及矿物相对含量值,即最优化测井解释结果。最优化测井解释的基本过程如图 1-1 所示。

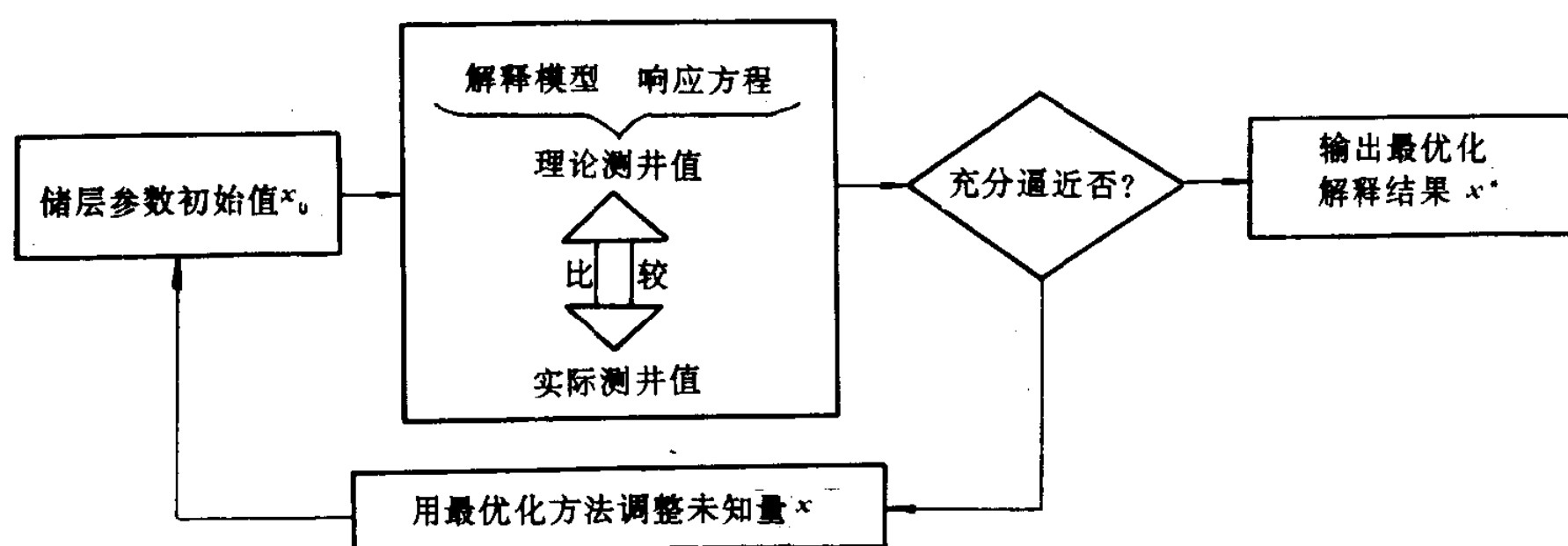


图 1-1 最优化测井解释的基本原理

二、对最优化测井解释的基本要求

1. 能采用所有可用的测井资料与某些地区地质经验,充分发挥各种测井信息的作用。
2. 能尽快地寻找出综合利用这些资料的最佳的、最能反映储层真实情况的测井解释结果。
3. 采用模块化软件结构,而不采用固定的解释模型与测井系列。各种解释模型和测井响应方程均作为独立的插入部件,既能适应不同测井系列和不同地层的评价,又能方便灵活地引入最新的测井资料与新的解释模型,具有很强的适应能力和发展潜力。
4. 能提供一套对最优化测井解释技术及结果进行有效的自我质量控制检验与评价的方法。

一般来说,最优化技术包括两个方面:一是根据生产实际或科研中的问题,建立最优化数学模型;二是选用适当的最优化方法对所建立的优化数学模型进行数学加工,求得最优解。前者是最优化技术的基础,后者是决定用最优化方法解决问题的效果的关键。

第二节 最优化测井解释数学模型

一、建立最优化解释数学模型的基本思路

最优化测井解释是将所有测井信息、测量误差和响应方程误差以及某些地质经验,综合成一个多维信息复合体,应用最优化数学方法综合地进行多维处理,求出该复合体的最优解,从所有可能的解释结果中找出最佳、最合理的解释结果。因此,实现最优化测井解释的基础是建立合适的最优化解释模型,这包括建立目标函数及约束条件的确定与处理。为此,根据非线性加权最小二乘法原理和误差理论来建立最优化测井解释的数学模型。

设有一组经过环境影响校正的实际测井值向量 a ：

$$a = (a_1, a_2, a_3, \dots, a_m)^T$$

例如,当采用自然电位 SP、自然伽马 GR、密度 ρ_b 、中子孔隙度 φ_N 、声波时差 Δt 、地层电阻率 R_t 和冲洗带电阻率 R_{xo} 等实际测井曲线时,则: $a = (SP, GR, \rho_b, \varphi_N, \Delta t, R_t, R_{xo}, \dots)^T$ 。

有一组待求的未知储层参数及矿物相对体积向量 x ：

$$x = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)^T$$

例如,所求储层参数为孔隙度 φ 、地层与冲洗带含水饱和度 S_w 和 S_{xo} 、粘土相对体积含量 V_{cl} 和地层骨架矿物相对体积含量 $V_{ma_1}, V_{ma_2}, \dots, V_{ma_k}$ 时则: $x = (\varphi, S_w, S_{xo}, V_{cl}, V_{ma_1}, V_{ma_2}, \dots, V_{ma_k})^T$ 。

根据所采用的测井解释模型,各种测井响应方程均可抽象地表示为:

$$\hat{a}_i = f_i(x, z), \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (1-1)$$

式中, z 为一组区域性解释参数向量,不同的测井响应方程有不同的解释参数。

显然,各种测井响应方程均是独立的,故对方程组(1-1)求解便可得解释结果 x 。为了获得最能反映地层情况的最优解 x^* ,要求响应方程的数目 m 必须大于或等于未知储层参数的个数 n ,即 $m \geq n$ 。这就是说,要求响应方程组(1-1)必须是超定($m > n$)的或至少是平衡($m = n$)的。否则,如方程组(1-1)是欠定的($m < n$),则它有无穷多个解,如果没有充分理由选择其中一个解的话,就无法进行解释。在方程组(1-1)为平衡的条件下,可得到唯一的解 x ,但它不一定是最优解。在方程组(1-1)为超定的情况下,虽然它没有真解,但可获得最优近似解。这与测井解释的情况是相符的,因为测井解释中所用的响应方程都是对实际地层的一种近似表达式,而且任何实际测井值均不可避免地存在着大小不同的测量误差,所以任何测井解释结果都是对实际地层的近似反映,只不过是不同的解释方法会得出近似程度不同的解释结果而已。

给定一个未知向量 x ,即给定一组储层参数及矿物相对体积,则由响应方程可得相应的理论测井值 $\hat{a}_i$,它与实际测量值 a_i 之间存在一定的误差,称为残差 ϵ_i :

$$\epsilon_i = a_i - \hat{a}_i = a_i - f_i(x, z), \quad (i = 1, 2, \dots, m)$$

残差可大可小,可正可负,可视为随机变量,且均值(数学期望)为零,即 $E(\epsilon_i) = 0$ 。为更好地表示理论测井值 $\hat{a}_i$ 与实际测井值 a_i 之间的差别,常用表达式 $\epsilon_i^2 = (a_i - \hat{a}_i)^2$ 。根据最小二乘法原理,当 ϵ_i^2 趋于极小值时,则可认为理论测井值 $\hat{a}_i$ 充分逼近实际测井值 a_i 了。此时,用于计算理论测井值 $\hat{a}$ 的自变量 x ,即为最充分反映地层原貌的最优解 x^* 。

二、测量误差与响应方程误差

在建立最优化测井解释的目标函数时,还应考虑各种测井方法的测量误差与响应方程误差,并把它们作为目标函数中各种测井方法的加权因子,以突出误差小、质量好的测井资料对目标函数的贡献。

任何测井测量值都有误差,这不仅是因为测井仪器与数据采集系统有一定的测量误差,而且还因为在测量过程中测井仪器不可避免地要受到测量环境与核统计起伏的影响,致使测量值还包含着各种环境因素与核统计起伏等非地层因素所造成的结果。尽管采用各种环境影响校正,但这些校正均是近似的,而且井下实际情况很复杂,各种影响因素均是随机变化的,因此环境影响校正后的实际测井值也必然存在一定的测量误差 σ_i 。通常认为造成测量误差的各种因素都是随机的、互不相关的,因而第 i 种测井值的测量误差 σ_i 应为:

$$\sigma_i^2 = \sum_{k=1}^l \sigma_{ik}^2, \quad (i = 1, 2, \dots, m)$$

式中, σ_{ik} 为第 i 种测井值 a_i 中由第 k 个影响因素造成的测量误差。

任何测井响应方程都是通过对实际地层作一系列数学物理简化后建立的解释模型(如体积模型, 双水模型等)得出的理论公式, 而且响应方程中解释参数的选择也有一定的误差, 因此这些响应方程只是近似反映理论测井值 $\hat{a}_i$ 与未知储层参数向量 $\mathbf{x}$ 之间的关系, 故必然存在一定的测井响应方程误差 τ_i 。在实际计算中

$$\tau_i^2 = \left[\left(\frac{\partial f_i}{\partial z_1} \right) \delta z_1 \right]^2 + \left[\left(\frac{\partial f_i}{\partial z_2} \right) \delta z_2 \right]^2 + \dots$$

式中 $z_1, z_2, \dots$ ——第 i 个响应方程 $f_i(\mathbf{x}, \mathbf{z})$ 中的各个区域性解释参数;

$\delta z_1, \delta z_2$ ——分别为各解释参数的取值误差。

一般是根据区域性解释参数的取值误差来估计某个响应方程的误差 τ_i 。

由误差合成定律知, 残差 ϵ_i 的误差 σ_{ϵ_i} 应为

$$\sigma_{\epsilon_i}^2 = \sigma_i^2 + \tau_i^2, \quad (i = 1, 2, \dots, m)$$

实际上, σ_i 与 τ_i 均可认为是随机误差, 且近似服从于正态分布。由中心极限定理知, σ_{ϵ_i} 服从正态分布的概率, 大于其中任一因素(σ_i 或 τ_i)服从正态分布的概率。因此, σ_{ϵ_i} 应当近似服从正态分布。

各种测井值单位的量纲均不同, 其数值变化范围也相差很大。为了便于计算, 应作数据规格化处理。令

$$r_i = \frac{\epsilon_i}{\sigma_{\epsilon_i}} = \frac{\epsilon_i}{\sqrt{\sigma_i^2 + \tau_i^2}} = \frac{a_i - f_i(\mathbf{x}, \mathbf{z})}{\sqrt{\sigma_i^2 + \tau_i^2}}, \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (1-2)$$

r_i 可称为拟合系数, 它的数学期望值为零, 方差为 1。

为了获得最优解, 应采用尽可能多的测井信息, 而这些测井信息均是相互独立的, 均从某一物理性质上独立地反映了同一地层。显然, 欲使计算的理论测井值 $\hat{a}_i = f_i(\mathbf{x}, \mathbf{z})$ 最佳地逼近实际测井值 a_i , 从而获得最能充分反映实际地层的储层参数向量 $\mathbf{x}$, 则根据非线性加权最小二乘法原理知, 最优解应是使 $\sum_{i=1}^m r_i^2$ 达到最小时的解, 即

$$\min F(\mathbf{x}, \mathbf{a}) = \min \sum_{i=1}^m r_i^2 = \min \sum_{i=1}^m \frac{[a_i - f_i(\mathbf{x}, \mathbf{z})]^2}{\sigma_i^2 + \tau_i^2} \quad (1-3)$$

这样便建立了用最优化方法进行测井解释的目标函数 $F(\mathbf{x}, \mathbf{a})$ 。由此可见, 将总误差($\sigma_i^2 + \tau_i^2$)作分母的另一个重要作用就是对各测井方法起加权作用: 质量好、测量误差小的测井曲线和参数选择合理、响应方程误差小的测井响应方程对目标函数的贡献就大; 反之, 贡献就小。这样, 在寻优过程中可以降低总误差大的测井方法的作用, 有利于更快地寻找出充分反映实际地层原貌的最优解。因此, 从这个意义上说, 我们是采用加权最小二乘法来建立目标函数的, 加权因子是由测量误差与响应误差来确定的。又因为所用的测井响应方程一般均为非线性方程, 故式(1-3)的目标函数 $F(\mathbf{x}, \mathbf{a})$ 实际上是按非线性加权最小二乘法原理来建立的。

三、约束条件及其处理

在寻找最优解的过程中, 为了得到合理的解释结果, 应该对未知量 $\mathbf{x}$ 有一定的限制, 这在最优化理论中称之为约束。如地层孔隙度 ϕ 、地层与冲洗带的含水饱和度 S_w 和 S_{w0} 、各骨架矿物和粘土的相对含量等均应限制在 $[0, 1]$ 范围内。根据地区地质经验, 还可确定其它的约束。在最优化理论中, 约束可表示为一般形式:

$$g_j(x) \geq 0, (j = 1, 2, \dots, p)$$

$$h_k(x) = 0, (k = 1, 2, \dots, q)$$

因此,在用最优化方法使目标函数 $F(x, a)$ 达到最小值,即在理论测井值 $\hat{a}_i = f_i(x, z)$ 充分逼近实际测井值 a_i 的过程中,必须考虑到对未知储层参数的约束条件,即在用最优化方法求解时,必须使未知量 x 满足一定的约束条件才可能得到最优解 x^* ,以保证获得合理的解释结果。

综上所述,应用最优方法进行测井解释的优化数学模型可归结为:

$$\min F(x, a) = \min \sum_{i=1}^m \frac{[a_i - f_i(x, z)]^2}{\sigma_i^2 + \tau_i^2} \quad (1-4)$$

约束条件

$$g_j(x) \geq 0, \quad (j = 1, 2, \dots, p);$$

$$h_k(x) = 0, \quad (k = 1, 2, \dots, q)$$

上述式(1-4)对约束的处理方法是将自变量 x 始终限制在满足约束条件的可行解域内,将寻优空间限制在可行解域内,即寻优过程是在可行解域内寻找目标函数 $F(x, a)$ 的最优解 x^* 。此法的寻优空间与储层地质参数的定义空间基本是一致的。实际处理资料表明,用这种方法处理约束条件是合理可行的,而且还可加快寻优速度。

在 GLOBAL 等最优化测井解释程序中,是采用类似于外部罚函数法来处理约束条件的,其最优化解释数学模型为:

$$\min F(x, a) = \min \sum_{i=1}^m \frac{[a_i - f_i(x, z)]^2}{\sigma_i^2 + \tau_i^2} + \sum_{j=1}^p \frac{g_j^2(x)}{\tau_j^2} \quad (1-5)$$

式中, $g_j(x)$ 与 τ_j 是第 j 个约束及其约束误差, $j = 1, 2, \dots, p$ 。它包括上述等式与不等式约束,其中, $\sum_{j=1}^p g_j^2(x)/\tau_j^2$ 叫惩罚项,而 $1/\tau_j^2$ 叫罚因子。因此,外部罚函数法就是将约束以惩罚项形式加到目标函数中,从而使有约束的最优化问题变为无约束的最优化问题。用此法建立的目标函数叫增广目标函数,又叫非相关函数。显然,在优化过程中,当自变量不满足某个约束时,便在目标函数中增加相应的一个惩罚项,故这时的 $g_j(x)$ 不为零, $g_j^2(x)$ (即使是较小的值)与一个很大的罚因子 $1/\tau_j^2$ 相乘,得出一个数值比较大的惩罚项加到原目标函数中,相当于从外部施加一次“惩罚”,从而使目标函数达不到极小值,也找不到最优解 x^* 。此时只有重新调整自变量 x 值,直到当自变量 x 满足约束条件时, $g_j(x)$ 为零,惩罚项为零,才不给以“惩罚”,才能寻找出满足约束条件的最优化解 x^* 。可采用适当的数学方法将等式和不等式约束变为惩罚项。例如,对于等式约束,可以 $g_j^2(x)/\tau_j^2$ 形式把约束作为约束项加到目标函数中。如有等式约束 $S_{xo} = S_w^*$, 其约束允许误差 τ 为 0.01, 则其约束项可表示为 $(S_{xo} - S_w^*)^2/\tau^2 = 10^4 \times (S_{xo} - S_w^*)^2$ 。此时,只有当 $S_{xo} = S_w^*$ 时,此约束项才为 0; 否则,当 $S_{xo} \neq S_w^*$ 时,则约束项均为 $10^4 \times (S_{xo} - S_w^*)^2$, 这是一个很大的数,把它加到目标函数中时,就相当施加一次“惩罚”,使目标函数不能达到极小值。

类似地,对不等式约束,可以 $[|g_j(x)| - g_j(x)]/\tau_j^2$ 形式把约束变为约束项加到目标函数中。例如,有不等式约束: $0 \leq \varphi \leq 1$, 其允许误差为 0.001, 则约束项可表示为:

$$10^6 \times [|\varphi| - \varphi]^2 + 10^6 \times [1 - \varphi - (1 - \varphi)]^2$$

显然,只有当 $\varphi \geq 0$ 时,上式才等于 0; 否则,如 $\varphi < 0$, 则上式第一项等于 $10^6 \times [2\varphi]^2$, 是一个很大的数。同样,只有当 $\varphi \leq 1$ 时,上式才等于 0; 否则,当 $\varphi > 1$ 时,则上式第二项等于 $10^6 \times [2(1 - \varphi)]^2$, 也是一个很大的数。因此,只要优化计算的 φ 不满足 $0 \leq \varphi \leq 1$ 约束条件,均会在目标函数中加一个数值很大的惩罚项,使目标函数不能达到极小值。

显然,在式(1-5)中,自变量 x 的变化范围为整个实数域 $(-\infty, \infty)$, 远大于储层参数的定

义域,故 x 的寻优范围远大于实际储层参数的定义空间,且惩罚项可能远大于前面的目标函数项,如不作特殊处理,则在寻优中不仅收敛速度慢,而且容易出现溢出,迭代矩阵容易变为病态,形成寻优的“陷阱”。

在建立最优化测井解释的优化数学模型时应注意:为了保证未知量 x 的可解性,必需要求所选择的未知量个数 n 应小于等于测井响应方程的个数 m , 即 $n \leq m$ 。在对储集层进行油气评价时,所选择的未知量必须有 φ 、 S_w 、 S_{xo} 、 V_{cl} 等储层参数以及 k 种矿物骨架成分 $\sum_{i=1}^k V_{mai}$, 即未知量向量为:

$$x = (\varphi, S_w, S_{xo}, V_{cl}, \sum_{i=1}^k V_{mai})$$

而且未知量间存在以下关系:

$$\varphi + V_{cl} + \sum_{i=1}^k V_{mai} = 1$$

故所选的 n 个未知量中,只有 $n-1$ 个是独立的。也就是说,在实际处理时,在 k 种未知矿物的相对体积中,只有 $k-1$ 个是独立的。这在对目标函数 $F(x, a)$ 求偏导数的过程中是必须要注意的。

参考文献

- [1] Mayer C. and Sibbit A.. GLOBAL—A New Approach to Computer Processed Log Interpretation, SPE 9341, 1980.
- [2] Alberty M. and Hashmy K. H.. Application of ULTRA to Log Analysis, SPWLA 25th Annual Logging Symposium, June, 1984.
- [3] Mezzatesta A., Rodrigueg E. and Frost E.. OPTIMA—A Statistical Approach to Well Log Analysis, International Symposium Petroleum Exploration in Carbonate Areas, Nanjing, China, November 12-19, 1986.
- [4] 陈永生译。GLOBAL—一种计算机处理测井解释的新方法,陕西西安,测井技术,1981年第4期。
- [5] 谭廷栋。数字测井最优化解释,地球物理学报,1983年。
- [6] 欧阳健等。最优化方法用于火成岩地层的测井解释,北京,石油与天然气地质,1983年第1期。
- [7] 雍世和、孙建孟、毕卓新。用最优化方法评价复杂岩性储集层,陕西西安,测井技术,1988年第4期。
- [8] 雍世和、孙建孟、毕卓新。用最优化方法与双水模型评价泥质砂岩储集层,北京,石油学报,1989年第4期。

第二章 测井曲线的滤波与校正

由前述最优化测井解释的基本原理可知,最优化解释是以实际测井曲线为准,通过使计算的理论曲线逼近实测曲线的方法来求得地质参数的最优值。因此,必须要求实际测井曲线能真实地反映地层及孔隙流体的性质。但是在实际测井环境中,井径、泥浆的密度、矿化度、电阻率、重晶石和 KCl 含量、泥饼的厚度和电阻率、井壁不规则性、泥浆侵入带、地层温度和压力以及围岩等等环境因素,均不可避免地要对各种测井曲线发生重要影响。特别是在当前我国的现场生产中,由于钻井工艺与测井技术及地质条件等复杂原因,这些非地质因素的影响,常常会使测井曲线发生严重的歪曲。同时,核衰变的随机性质,使所有放射性测井曲线上均出现许多与地层性质无关的统计涨落变化;由于某种原因,有时在某些测井曲线上也会出现许多与地层性质无关的毛刺干扰。显然,直接应用受到各种非地层的环境及其它因素严重影响的测井曲线作最优化计算,是不可能获得反映真实地层的优化解释结果的。因此,在作最优化计算之前,必须对原始测井曲线进行各种环境影响校正,尽可能地消除各种非地层因素的影响,使校正后的曲线尽可能真实地反映地层及孔隙流体的性质。只有这样才有可能通过最优化计算,获得可靠的储层地质参数值。在对一个油田或地区进行多井评价或油藏描述时,还必须进行油田测井资料标准化处理,使所有测井曲线在全油田范围内都有一个统一的刻度标准,达到全油田测井数据的标准化,这样才能有效地消除仪器刻度及各种环境等非地质因素的影响,才能获得在全油田范围内反映地区地质原貌的地质参数。

第一节 测井曲线的平滑数字滤波

核衰变、中子与原子核的作用、伽马量子与核外电子的作用等均具有随机性质,因而导致放射性测井曲线上出现许多与地层性质无关的统计起伏变化。

有时某些测井曲线上由于某些原因也会出现许多与地层性质无关的毛刺干扰。如在碳酸盐岩剖面的声波测井中,由于声波探头与井壁的随机碰撞干扰,或在缝洞孔隙和裂缝发育的地层中声波经过多次反射、折射,使测出的声波曲线上出现许多毛刺干扰。显然,在最优化计算中,这些统计起伏变化与毛刺干扰不可避免地会给计算的地质参数带来一定的误差;统计起伏或毛刺干扰严重的曲线,根本不能直接用作数字处理。因此,在测井资料预处理中,必须设法把这些与地层性质无关的统计起伏和毛刺干扰滤掉,只保留曲线上反映地层特性的有用成分。

不难看出,带有统计起伏与毛刺干扰的测井曲线具有两种成分:短周期的干扰信号,它具有随机性质,与地层性质无关;较长周期的有用信号,它是反映地层性质的趋势成分。我们的目的是要有效地抑制或消除这些干扰信号,同时又能很好地保留和分离出代表地层性质的有用信号。对此,可采用滑动平均数字滤波法。这种方法就是在当前采样点前、后分别连续地取 m 个采样点数据,选用适当的滑动平均法,用 $(2m+1)$ 个采样点值(包括当前采样点值在内),依次计算出全部采样点的滑动平均值,便可消除毛刺干扰,获得一条反映地层性质的光滑曲线。这种平滑滤波法,实质上就是对有干扰的曲线作低通滤波。根据测井曲线上的统计起伏和毛刺

干扰情况,可采用最小二乘滑动平均法和加权滑动平均法。

一、最小二乘滑动平均法

这种方法是根据最小二乘法原理对当前采样点附近几个点作拟合曲线,算出拟合曲线在当前采样点处的滑动平均值,作为该点的采样值。用此方法逐点进行计算,便得到一条光滑的数字量曲线。根据拟合曲线的数学形式,又有如下的计算滑动平均值公式。

1. 线性函数平滑公式

设对测井曲线进行等距采样,得到一系列的测井幅度值 $T_1, T_2, \dots, T_n$ 。当取任意相邻的三个采样点,并设采样值从 T_{i-1} 到 T_{i+1} 之间有线性关系时,则可用一条拟合直线 z_i (图 2-1) 来表示:

$$z_i = a_0 + a_1 t$$

t 为从当前点算起的采样点序号。当 $t=0$ 时,则 $z_0 = a_0$ 。显然, z_0 就是假定采样值为线性变化时,当前采样点 i 所对应的理论值,即所求的滑动平均值 $\bar{T}_i = a_0$ 。用最小二乘法来确定 a_0 与 a_1 ,即应使残差的平方和 Q

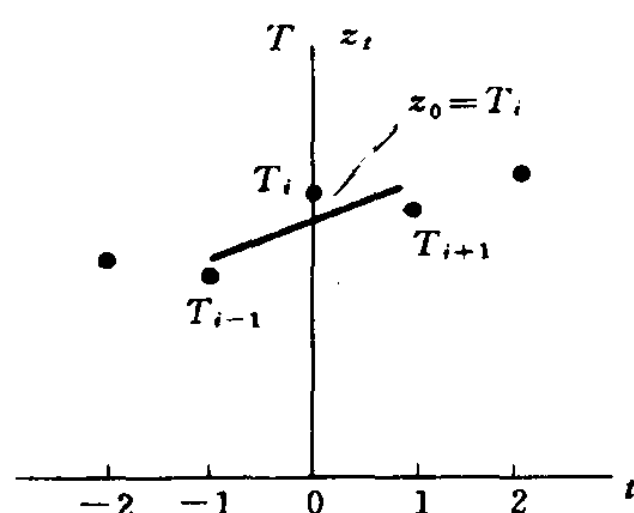


图 2-1 三点线性拟合平滑法

$$Q = \sum_{t=-1}^{+1} (T_{i-t} - a_0 - a_1 t)^2$$

达到最小。 a_0 与 a_1 可从偏微商 $\frac{\partial Q}{\partial a_0} = 0$ 与 $\frac{\partial Q}{\partial a_1} = 0$ 二个方程解出:

$$\frac{\partial Q}{\partial a_0} = \sum_{t=-1}^{+1} 2(T_{i-t} - a_0 - a_1 t) = 0$$

$$\frac{\partial Q}{\partial a_1} = \sum_{t=-1}^{+1} 2(T_{i-t} - a_0 - a_1 t)t = 0$$

将上二式展开后,立即得到

$$\bar{T}_i = a_0 = \frac{1}{3} (T_{i-1} + T_i + T_{i+1}) \quad (2-1)$$

$\bar{T}_i$ 就是假设任意相邻三个采样值间为线性函数时的滑动平均值。其中,采样点序号 i 可从 2 至 $n-1$ 。按式(2-1)顺序地计算出 2 至 $n-1$ 个滑动平均值,构成新的测井采样数据序列。在 $i=1$ 与 $i=n$ 时,用式(2-1)得不到起点值 $\bar{T}_1$ 与终点值 $\bar{T}_n$,这在数据处理中称为边沿损失。但可导出

$$\bar{T}_1 = \frac{1}{6} (5T_1 + 2T_2 - T_3)$$

$$\bar{T}_n = \frac{1}{6} (-T_{n-2} + 2T_{n-1} + 5T_n)$$

类似地,当假定相邻五点间为线性变化时,可得到当前采样点的滑动平均值为

$$\bar{T}_i = \frac{1}{5} (T_{i-2} + T_{i-1} + T_i + T_{i+1} + T_{i+2}) \quad (2-2)$$

此时,最初二点与最末二点的平均值分别为

$$\bar{T}_1 = \frac{1}{5} (3T_1 + 2T_2 + T_3 - T_5)$$

$$\bar{T}_2 = \frac{1}{10} (4T_1 + 3T_2 + 2T_3 + T_4)$$