

测井曲线高分辨率处理技术

牛超群 安丰全 牛华唐 炼 著

地质出版社



测井曲线高分辨率处理技术

牛超群 安丰全 牛华 唐炼 著

地质出版社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本书是根据作者近几年在科研中所取得的成果而编写的,这些成果经过生产实践的检验,应用效果显著。

书中主要介绍有关测井曲线高分辨率处理方法及其在薄层、薄水淹层评价中的应用,其中包括:自然伽马测井曲线高分辨率处理技术;中子、密度测井曲线高分辨率处理技术;电阻率测井高分辨率处理技术和神经网络技术在高分辨率处理中的应用等。对于各种测井曲线的高分辨率处理技术,本书以相应的实例论述了有关方法的实用性。

本书可供有关院校测井专业师生、研究人员和测井科技工作者学习和参考。

图书在版编目(CIP)数据

测井曲线高分辨率处理技术/牛超群等著.-北京:地质出版社,1999.12

ISBN 7-116-02985-0

I. 测… II. 牛… III. 测井曲线-高分辨率-图象处理-技术 N. P631.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 70534 号

地质出版社出版发行

(100083 北京海淀区学院路 29 号)

责任编辑:曹 玉 陈军中

责任校对:黄苏晔

*

北京印刷学院实习工厂印刷 新华书店总店科技发行所经销

开本:787×1092¹/₁₆ 印张:5.75 字数:130 千字

1999 年 12 月北京第一版·1999 年 12 月北京第一次印刷

印数:1—1000 册 定价:15.00 元

ISBN 7-116-02985-0

P·2084

(凡购买地质出版社的图书,如有缺页、倒页、脱页者,本社发行处负责调换)

前 言

测井曲线高分辨率处理是指利用有关数学处理手段提高测井曲线的纵向分辨率和径向分辨率,消除围岩、井眼和泥浆等诸因素的影响,提高测井曲线纵向分层能力,恢复地层测井参数的真值。我国许多大油田已进入高含水采油阶段,主力厚油层已全面见水;许多油田薄层分布很广、含油储量大。因此,薄层(包括已水淹的层)就成为油田增产挖潜的主要对象之一,薄层的勘探开发技术也越来越受到重视。测井曲线的高分辨率处理技术及薄层测井评价方法的研究具有很大的理论价值和应用价值。

作者系统地探讨了有关测井曲线高分辨率处理方法及其在薄层评价、薄水淹层评价中的应用。

首先,作者以自然伽马测井曲线为例,研究了正则化最小乘方反褶积方法。应用该方法,不仅消除了围岩对自然伽马曲线读数的影响,而且消除了测井速度、测井采样间隔和率表电路时间常数的影响;发挥线性平滑滤波和中值滤波的优点,采用双窗滤波技术压制噪音,使压制效果最佳。上述方法可应用于自然伽马能谱测井曲线、声波时差曲线、低电导率地层感应测井曲线和砂泥岩剖面的中子、密度测井曲线的高分辨率处理。

其次,对于中子测井曲线,则采用近探测器计数曲线所提供的高分辨率信息,提高中子测井曲线的纵向分辨率,保持了原始测井曲线的良好统计精度,并引入 β 因子消除由于 α 值差异引起的误差,消除有关环境影响;并采用多参数模拟退火反演算法来确定单一探测器计数率与孔隙度之间的关系。对于密度测井曲线,则采用短源距探测器所提供的高分辨率信息,提高其纵向分辨率;并引入了井眼校正因子和相关校正因子,克服了井眼不规则和曲线“反相”给高分辨率处理所带来的误差。

对于电阻率测井曲线,作者以三侧向测井曲线为例,研究了一种正演混合算法,该算法在径向上采用数值解,纵向上采用解析解;在正演模拟的基础上,提出了一种“遗传算法加对数加权最小乘方反演算法”的三侧向测井混合反演算法,从而克服了常规反演算法的局限性,实现了反演问题的全局寻优;采用有限特殊点代替逐点连续反演技术,以提高解的稳定性;在大量正演模拟研究的基础上,提出了多维电阻率自适应高分辨率处理技术,实现了测井曲线的高纵向分辨率处理和高径向分辨率处理。处理精度较高,处理速度大大高于反演方法的速度。在上述多维电阻率高分辨率处理技术中,引入了基本 α 因子、有效 α 因子和背景电阻率概念,并建立了上述三者之间的关系。利用该关系可以克服电阻率曲线响应严重非线性给高分辨率处理所带来的误差。这种方法已推广应用于双侧向测井曲线、双感应测井曲线和高分辨率三侧向测井曲线的高分辨率处理中。

作者提出利用高阶、同伦BP网络进行测井曲线高分辨率处理,并以自然伽马测井曲线为例,说明上述ANN技术在高分辨率处理中的有效性。其处理效果与现有最佳处理技术相当,而不需要用户选择曲线形态常数等重要参数,降低了人为操作误差。

最后,作者推导出不同分辨率测井参数与地质参数之间的关系,并以高分辨率处理技术

为基础,研究了含钙薄层及薄低电阻率油气层等薄层测井评价技术和薄水淹层测井评价技术,取得了较好的地质效果。

本书共分6章。第1章,第2章2.1、2.3,第3章3.2、3.3,第6章由安丰全编写;第2章2.2,第3章3.1由牛华编写;第4章,第5章由唐炼编写,全书由牛超群和安丰全策划,安丰全统稿,蔡柏林教授主审。在本书的编写过程中,作者得到了中国地质大学蔡柏林教授、管志宁教授、尉中良教授、余钦范教授和黄智辉教授的指导和帮助;大庆石油管理局李振芳高级工程师对作者的研究计划提出了许多有益的建议;也得到了侯俊胜博士、张明华博士、石林珂博士等的大力支持;大庆测井公司常明澈、傅有升、唐永福等总工程师和荆万学、陈永吉等高级工程师给作者提供了帮助;大庆石油学院蔺景龙博士等也给作者提供了一定的指导。在此,作者一并向他们致以诚挚的谢意。

书中不妥之处,恳请读者批评指正。

作 者

1999年5月

目 录

第 1 章 总 论	(1)
1.1 测井曲线高分辨率处理技术及其意义	(1)
1.2 国内外研究现状	(3)
1.3 研究方法和主要研究内容	(5)
第 2 章 自然伽马测井曲线高分辨率处理技术及在其它测井曲线中的应用	(6)
2.1 自然伽马测井曲线高分辨率处理技术	(6)
2.2 正则化最小乘方反褶积方法在其它测井曲线高分辨率处理中的应用	(13)
2.3 2 MHz 相位电阻率测井曲线高分辨率处理技术	(15)
第 3 章 中子密度测井曲线高分辨率处理技术	(27)
3.1 补偿中子测井曲线高分辨率处理技术	(27)
3.2 补偿密度测井曲线高分辨率处理技术	(30)
3.3 补偿密度测井曲线自适应反褶积处理技术	(33)
第 4 章 电阻率测井曲线高分辨率处理技术	(35)
4.1 三侧向测井曲线正演混合模拟技术	(35)
4.2 三侧向测井曲线反演技术	(41)
4.3 双侧向测井曲线反演技术	(46)
4.4 自适应多维电阻率曲线高分辨率处理技术	(50)
第 5 章 神经网络技术在测井曲线高分辨率处理中的应用	(56)
5.1 高阶同伦误差反向传播神经网络	(56)
5.2 利用 ANN 技术提高测井曲线的纵向分辨率	(59)
第 6 章 高分辨率处理技术在薄层勘探开发中的应用	(66)
6.1 高、低分辨率参数之间的关系	(66)
6.2 高分辨率处理技术在探井薄层评价中的应用	(70)
6.3 高分辨率处理技术在薄水淹层测井中的应用	(79)
参考文献	(82)

第1章 总 论

本章主要介绍测井曲线高分辨率处理技术的有关基本概念、研究内容、研究方法及国内外研究现状等等。

1.1 测井曲线高分辨率处理技术及其意义

1.1.1 基本概念

1) 薄层

关于薄层的概念至今尚无统一的定义。J. Suau 等人称 $1 \sim 2\text{in}^{\text{①}}$ 厚的层为薄层。W. R. Robert 等人称 $0.5 \sim 2\text{ft}^{\text{②}}$ 厚的层为薄层。G. W. Allan 等人认为,在通常情况下薄层是指 $5 \sim 15\text{cm}$ 厚的地层。我国大庆油田根据本油田的实际地质情况,规定厚度在 $1 \sim 0.5\text{m}$ 之间的地层叫薄层;而厚度在 $0.5 \sim 0.2\text{m}$ 之间的地层叫超薄层;对于厚度低于 0.2m 的层,认为是岩石的非均质性,不单独进行分层。实际上,“薄层”这一概念应是一相对概念,它受约于所用测井系列的纵向分辨率,它因仪器、时代和地质情况的不同而不同。就某一测井仪器而言,可认为垂直厚度小于仪器纵向分辨率的地层,称之为薄层。在应用测井资料进行地层评价时,可以认为厚度小于所用仪器纵向分辨率加权平均值的地层为薄层。就某一地区和某一测井系列而言,“薄层”应是一固定的概念。对不同地区、不同测井系列而言,“薄层”的概念可以有些量的差别。

2) 纵向几何因子——仪器响应函数

几何因子是一维响应函数,用于描述沿某一方向各部分地层的相对贡献。一个测量系统的纵向响应是用模拟方法确定的。通常把周围地层划分成无穷薄的水平薄片,在每一个薄片面积内对微分几何因子进行积分,得到纵向几何因子

$$G_z(z) = \iint g(r, \theta, z) d\theta dr \quad (1.1.1)$$

式中: $g(r, \theta, z)$ 是几何因子,它是一无限小体积元对测井信号贡献的相对大小。

3) 纵向分辨率

在已知纵向响应函数 $G_z(z)$ 的基础上,可以根据其形状的某些几何特殊性来确定一个“纵向分辨率”参数。目前现场使用的定义通常有两种:①按薄层的划分定义,纵向分辨率是仪器能识别出的两个地层特性变化之间的最小距离。②按薄层的评价来定义,纵向分辨率是指最小层厚,对于这一厚度探测器在该层内测出的参数,与该层某处的真值有关。

这两种定义可给出不同的数值,两者都倾向于主观解释,结果使每个定义所标出的数值变化范围很大。第一种定义对信噪比非常敏感。第二种定义取决于如何“接近”“真值”才算

① $1\text{in} = 0.0254\text{m}$ 。

② $1\text{ft} = 0.3048\text{m}$ 。

足够接近。有些测量,75%可能足够,而有些可能需要99%。笔者比较赞同下述纵向分辨率的定义(C. Flaum,1989):纵向分辨率由三个宽度 w_1, w_2, w_3 定义,使这三个宽度线以上与仪器响应函数曲线所圈定的面积分别对应于这条响应函数曲线所圈出总面积的10%、50%和90%。传统的纵向分辨率值与 w_2 值相对应。在以后的章节里有关仪器纵向分辨率数值都是指 w_2 。

4) 探测深度与径向分辨率

电阻率仪器的探测深度数值可以由径向积分几何因子或径向近似几何因子曲线上得出。通常,当离井轴距离 R 的径向积分几何因子为50%时,该 R 值即为探测深度。对于深侧向仪器,在理想条件下的探测深度为2.5m。

对于核测井仪器,采用同样的定义,但通常使用的是径向积分几何因子为90%相应的数值。不同探测器的径向几何因子可由数值模拟得出,也可直接由实验测量。同样,笔者比较赞成下述定义:探测深度由三个数字描述,它们分别对应的径向积分几何因子为10%、50%和90%。

径向分辨率同探测深度或探测范围的定义有点类似,但它反映了不同的意义。径向分辨率可以定义为

$$R = \int_a^{+\infty} G_r(r) dr = \int_a^{+\infty} \left[\int \int g(r, \theta, z) d\theta dz \right] dr \quad (1.1.2)$$

式中: $G_r(r)$ 是径向微分几何因子, a 是目的层段起始半径, R 值是大于0小于1的实数,它反映了无限厚目的层段对总测量信号的相对贡献。

5) 测井曲线高分辨率处理技术

测井曲线高分辨率处理是指利用有关数学处理手段提高测井曲线的纵向分辨率和径向分辨率,消除围岩、井眼和泥浆等因素的影响,提高测井曲线纵向分层能力,恢复地层测井参数的真值。广义地讲,测井曲线反演技术、测井曲线高纵向分辨率处理技术和测井曲线的环境校正等都属于测井曲线高分辨率处理技术范畴。考虑到实际测井需要,狭义的测井曲线高分辨率处理技术应当具有下述特点:①连续性,即计算机逐点连续处理;②快速性,即处理速度要快,几乎不影响测井评价进程;③准确性,即处理精度要高。在以后的章节里,除特别提出外,所讲测井曲线高分辨率处理技术皆属于狭义范围内的。

1.1.2 科学意义

我国许多大油田已进入高含水采油阶段,主力厚油层已全面见水。许多油田薄层分布很广、含油储量大。据统计仅我国大庆油田萨南杏北地区0.5m以下薄层的地质储量就达3亿多吨。因此,薄层(包括已水淹的层)就成为油田增产挖潜的主要对象之一,薄层的勘探开发技术也越来越受到重视。但是,由于现有测井仪器的纵向分辨率差、薄层测井解释方法落后,导致了薄层解释符合率过低,造成了很大的经济损失。为了解决薄层及薄水淹层的测井评价问题,非常有必要采取“软”“硬”结合、互为补充的方法。“硬”既研究新型薄层测井仪器,而“软”是指测井曲线的高分辨率处理技术及进行薄层测井评价方法的研究。测井曲线高分辨率处理技术无论在理论上还是在实践上都是可行的。它不仅投资少、见效快,而且可为重新评价老井测井资料提供必要的手段,有助于寻找已漏掉的薄油气层。同时,它为判断油层的局部水淹和岩石的非均质性提供了可靠的资料。另外,研究也具有很大的理论价值。

1.2 国内外研究现状

国内外石油公司和有关研究机构进行了一些有关测井曲线的高分辨率处理技术及其应用的研究,取得了一些研究成果。

1.2.1 测井曲线高分辨率处理技术现状

国内外已提出多种测井资料高分辨率处理技术。简单可归结为反褶积技术、纵向分辨率匹配技术和测井反演技术。

1) 反褶积技术

反褶积技术可分为线性反褶积技术和非线性反褶积技术。目前,地球物理测井所用的线性反褶积技术包括空间域反褶积技术、频率域反褶积技术和卡尔曼滤波技术等等。这些方法已应用于自然伽马测井曲线(J. G. Conaway, 1981)、声波测井(G. W. Allan, 1989)和感应测井曲线(牛超群等, 1992; T. D. Barber, 1989)。非线性反褶积技术包括自适应反褶积技术(Q. Zhou, 1992; C. Cosmo. et al., 1991)、贝叶斯反褶积技术和最大熵反褶积技术(C. J. Dyos, 1987; Robert Freedman, 1991)等。例如, J. G. Conaway 在他已发表的论文中,详细探讨了点状探测器自然伽马测井曲线反褶积技术,推导出了三点反褶积公式,提出了形状常数 α 的确定方法,并适当考虑了地层倾斜的影响。T. D. Barber 在他已发表的研究成果中,比较详细地探讨了感应测井曲线的高分辨率处理技术——反褶积技术,指出深感应测井存在“盲频”现象。该“盲频”现象导致相应厚度地层反褶积技术的无效性,且引起测井曲线的振荡。他建议利用中感应测井曲线的高频信息来提高感应测井曲线的纵向分辨率。R. Freedman 和 G. N. Minerbo(1991)等人利用最大熵反褶积方法来提高感应曲线的纵向分辨率,他们分别采用标准 Lagrange 泛函和新的 Lagrange 泛函,在新的泛函表达式中引入了层界面信息,并采用 Born 近似正演模拟,提高正演模拟速度,得出结论。该法结果明显优于广义最小二乘法反演结果。Q. Zhou 等人,在其发表的论文中,从理论上探讨了随钻电阻率测井高分辨率处理的自适应反褶积技术,基本出发点是依据传播效应几何因子,由背景电导率值大小,选定一相应的逆滤波器,克服仪器的非线性影响。C. Cosmo 等人在 1991 年提出了一种双侧向快速反褶积思想。他们首先对测井曲线进行变换,然后对不同 R_t/R_o 值建立不同的逆滤波器,根据实际地层剖面,采用插值法完成双侧向测井曲线的自适应反褶积处理。G. W. Allan (1989)在其研究成果中,对比分析了声波测井高分辨率处理曲线与高分辨率声波曲线,说明了反褶积方法处理声速曲线的有效性。Lyle 等人,引用最佳递归滤波——Kalman 滤波的思想,实现空间域线性响应测井曲线的高分辨率处理,对自然伽马及声波曲线的处理已收到良好的效果。我国安丰全等人对自然伽马测井曲线及自然伽马能谱测井曲线也采用了反褶积处理技术,并取得了明显的地质效果。另外, L. A. Jacobian 及 J. A. Quirein, R. P. Gardner 等人在他们的论文中分别探讨了运用反褶积方法提高密度测井曲线和中子测井曲线分辨率的可行性。P. Shang 等人利用贝叶斯的反褶积技术对自然伽马曲线进行高分辨率处理,取得了与常规反褶积加平滑滤波相同的效果。但是,上述技术没有考虑计算精度和稳定性的平衡问题;应用该技术进行自然伽马曲线处理时,没有系统地考虑探测器形态、测井速度、采样间隔等因素的影响。

2) 纵向分辨率匹配技术

纵向分辨率匹配法要求两条形状相似的测井曲线,其中一条是低分辨率、深探测的测井曲线,一条是高分辨率、浅探测深度的测井曲线。分辨率匹配的基本思想是利用高分辨率的测井曲线提高低分辨率测井曲线的纵向分辨率。例如,pas Elkington 等人(1990)在其研究成果中,探讨了不同测井曲线组合提高测井曲线纵向分辨率的可行性,并在感应测井曲线和中子密度测井曲线中取得一定成效。R. J. Nelson 等人(1990)在其论文中提出了更加完善的分辨率匹配技术,推导出了用于曲线匹配的平滑滤波器的表达式,运用回归技术给出了相应的计算公式,并用于处理有关测井曲线,如中子密度等孔隙度曲线和有关电阻率曲线。C. Flaum(1989)等人提出了中子、密度 α 因子法,这种方法也归结为分辨率匹配法。对于密度测井曲线,他们运用近探测器计数率计算的密度曲线所提供的高分辨率信息来提高常规密度测井曲线的纵向分辨率。对于中子测井曲线,他们引入 α 因子,并假定该 α 因子变化比较缓慢,然后利用近探测器计数率计算高分辨率中子孔隙度曲线,取得了较好的效果。我国安丰全、汪宏年等人(1994)也提出了相应的处理技术,并有所改进,取得了一定的地质应用效果。但是,该方法仅是一维处理,没有考虑井眼和泥浆侵入等因素的影响及曲线“反相”给高分辨率处理所带来的误差。另外,中子 α 因子法没有考虑远近探测器不同 α 值的影响。

3)测井反演技术

广义地讲,测井反演技术属于测井曲线高分辨率处理技术范畴,但不属于狭义的范畴。测井反演技术包括广义(线性和非线性)反演技术和脉冲谱反演技术等。所有这些方法在电阻率和电导率测井中均得到应用。Whitman 等人(1989,1990)在其研究论文中,运用广义线性反演技术中的 Marquart 算法,对普通电阻率测井中的梯度和电位测井曲线进行了自动反演,其中正演模型采用有限差分算法,取得了较好的地质效果。Lin 和 Gianzero 等人(1984)采用最小乘方反演技术对感应测井曲线进行了反演,仍采用了 Marquart 算法。这一算法比较稳定、快速。Gianzero 等人(1989)在其论文中探讨了利用广义测井反演技术进行双侧向测井的反演研究,并且其正演问题采用了混合算法,以提高正演速度,其中径向采用解析解法,轴向采用数值算法。我国刘家琦等人采用了广义脉冲谱反演技术。该技术从泊松方程出发,推导出相应的线性方程组,然后运用迭代法求解。到目前为止,可以反演出侵入带直径和原始地层电阻率等参数,由于方法本身的局限性,至今还未用于连续处理野外资料,主要进行了一些数值模拟验证等。另外,上述方法普遍存在运算速度慢及局部寻优甚至计算发散等缺陷,不适合于快速准确地提高测井曲线的分辨率。

1.2.2 测井曲线高分辨率处理技术应用

目前,薄层测井评价手段大致分为:①利用数字处理手段提高常规测井曲线的纵向分辨率,然后,应用高分辨率处理资料进行薄层评价。②利用常规测井资料,其中包括微电极曲线、微球聚焦电阻率曲线、电磁波传播测井曲线和地层倾角测井曲线进行解释。例如,J. E. Sallee 等人(1984)在其研究中利用地层倾角微电阻率来改进薄砂层评价,应用地层倾角微电阻率曲线划分砂泥岩交互层,求取泥质含量,并采用 GLOBAL 软件处理。他们对印度尼西亚 12 口井评价后,纯产油平均增加 67%。W. R. Robert 等人(1989)应用微球聚焦测井和地层倾角测井对北海油田薄层进行评价。他们所处理的井段由 0.15~0.60m 的纯砂层和泥岩夹层组成,由岩心资料确定微球读数与孔隙度的关系,并由微球求出准确的孔隙度值。使用确定的准确厚度值和孔隙度值可用普通方法完成其它评价。R. P. Schulze 等人(1985)在其论文中探讨了一种薄层评价技术。该套技术应用 EPT 测井资料或地层倾角资料计算地层

的束缚水饱和度 S_{wb} ，利用一种加权平均方法变换深感应测井曲线，确定地层的真电阻率，然后将有关结果输入到计算机分析程序中，计算出薄层的有效孔隙度和含水饱和度。其中，假定泥岩和砂岩的总孔隙度 Φ_T 相同，这样 Φ_T 与分辨率无关，然后按照双水模型，求出高分辨率有效孔隙度。③运用专门的薄层测井仪器，如 TBRT 仪器和高分辨率声波测井仪器进行薄层评价。例如，目前大庆油田正在尝试利用高分辨率三侧向及高分辨率声波等曲线进行薄层评价的可行性。④综合薄层评价，即发挥上述三种方法的优势，进行综合薄层评价。例如 R. A. Bateman 在其研究论文中提出了一种双岩性薄层评价技术。该技术发挥了数字处理手段的优势，运用泥质含量曲线划分薄纯砂岩，利用高、低分辨率泥质含量曲线提高电导率曲线纵向分辨率，应用阿尔奇公式求取高分辨率含水饱和度值。应用表明效果良好。

但是，国内外只是将部分高分辨率处理技术应用于薄层勘探开发之中，没有系统地将上述技术应用于薄层泥质砂岩（包括含钙质、水淹）等薄层的测井评价之中，更没有系统地研究高、低分辨率测井参数与地质参数之间的关系。

1.3 研究方法和主要研究内容

在前人研究工作的基础上，作者采用数值模拟手段，通过理论与实践相结合的方法，比较系统地、全面地研究了测井曲线高分辨率处理技术及其应用。本书主要介绍如下内容：

- (1) 正则化最小乘方反褶积高分辨率处理技术及其在自然伽马测井、自然伽马能谱测井、感应测井、声速测井及中子密度测井等曲线的高分辨率处理中的应用；
- (2) 中子测井、密度测井高分辨率处理技术及其应用效果分析；
- (3) 电阻率测井曲线的快速正演模拟及反演技术的研究；
- (4) 多维电阻率高分辨率处理技术及其在侧向测井和感应测井曲线中的应用；
- (5) 人工神经网络理论(ANN)、遗传算法(GA)及模拟退火算法(SA)在测井曲线高分辨率处理中的应用；
- (6) 测井曲线高分辨率处理技术在薄层勘探开发中的应用研究；
- (7) 高、低分辨率测井参数和地质参数之间关系的研究。

第2章 自然伽马测井曲线高分辨率处理技术及其它测井曲线中的应用

本章探讨具有线性响应和弱线性响应测井曲线的正则化最小乘方反褶积高分辨率处理技术及其在自然伽马(能谱)测井曲线、声波时差测井曲线、中子测井曲线、密度测井曲线以及感应测井曲线中的应用。

2.1 自然伽马测井曲线高分辨率处理技术

像其它测井一样,自然伽马测井曲线的测量值并不是所测量点处真正的测井参数值,而是测量点及其上下附近自然伽马真值的加权平均值。该问题可进一步抽象表示为测井信号是仪器响应函数与地层测井参数的褶积。考虑噪音影响,可写成

$$Y = H * X + n \quad (2.1.1)$$

式中: Y 是测井信号值, X 是地层自然伽马真值, n 是测量噪音信号, H 是仪器响应函数。

那么,反褶积方法就是利用(2.1-1)式反演出地层自然伽马读数,即

$$X = Y * H^{-1} - n * H^{-1} \quad (2.1.2)$$

式中: H^{-1} 为仪器响应函数的反褶积因子。

若噪音信号比较弱,并且采用噪音压制技术,可舍去噪声信号 n ,那么反褶积过程可表示为

$$\tilde{X} = Y * H^{-1} \approx X \quad (2.1.3)$$

式中: $\tilde{X}$ 表示反褶积结果。当采用压制噪音措施后,它应等于地层自然伽马真值。由上式可看出,反褶积技术的关键包括三点:一是仪器响应函数的确定;二是反褶积因子的确定;三是噪音压制技术。

2.1.1 自然伽马测井仪器响应函数

1) 静态有限长探测器响应函数

根据 J. G. Conaway (1980) 研究成果,点状探测器的仪器响应函数可表示为

$$\varphi_0(x) = \frac{\alpha}{2} e^{-\alpha|x|} \quad (2.1.4)$$

式中: α 为曲线形状常数。

对于有限长静态探测器而言,其仪器响应函数 $\varphi_1(x)$ 可表示为

$$\varphi_1(x) = \int_{x-L/2}^{x+L/2} \varphi_0(z) dz \quad (2.1.5)$$

式中: L 为探测器长度。经运算,上式可表示为

$$\varphi_1(x) = \begin{cases} \frac{1}{2} e^{-\alpha|x|} (e^{-\frac{\alpha L}{2}} - e^{\frac{\alpha L}{2}}) & |x| \geq L/2 \\ 1 - \frac{1}{2} e^{-\frac{\alpha L}{2}} (e^{-\alpha x} + e^{\alpha x}) & |x| < L/2 \end{cases} \quad (2.1.6)$$

2) 动态有限长探测器仪器响应函数

实际上,测井过程中探测器以速度 v 在运动,并且数字测井过程中还存在一信号采样间隔 Δ ,这些值对于仪器响应函数都有影响,故应考虑这些因素。此时仪器响应函数 $\varphi_2(x)$ 可写为

$$\varphi_2(x) = \frac{1}{v} \int_{-\frac{\Delta}{2}}^{\frac{\Delta}{2}} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \varphi_0(x - z - w) dw dz \quad (2.1.7)$$

式中: Δ 表示测井采样间隔, v 表示测井速度。

3) 率表电路的响应函数

对于模拟记录的自然伽马测井曲线而言,记录系统率表电路的弛豫现象对于 GR 测井曲线有一定的影响。其响应函数可表示为

$$\varphi_1(x) = \begin{cases} 0 & x < 0 \\ \frac{1}{vT} e^{-\frac{x}{vT}} & x \geq 0 \end{cases} \quad (2.1.8)$$

式中: v 是测井速度, T 是率表电路的时间常数, x 表示探测器的相对位移。

4) 地层倾斜对仪器响应函数的影响

设地层倾角为 θ , 那么仪器响应函数 $\varphi_3(x)$ 应写为

$$\varphi_3(x) = \varphi_2(x) \cos \theta \quad (2.1.9)$$

故对于数字记录的自然伽马测井曲线而言,其仪器响应函数 $\varphi(x)$ 可表示为

$$\varphi(x) = \frac{1}{v} \cos \theta \int_{-\frac{\Delta}{2}}^{\frac{\Delta}{2}} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \varphi_0(x - z - w) dw dz \quad (2.1.10)$$

对于模拟记录的自然伽马测井曲线而言,其仪器响应函数可表示为

$$\varphi(x) = \cos \theta \varphi_1(x) * \int_{x-\frac{L}{2}}^{x+\frac{L}{2}} \varphi_0(z) dz \quad (2.1.11)$$

2.1.2 自然伽马测井曲线反褶积原理

设将仪器响应函数 H 进行离散化,得到离散形式的仪器响应函数 $(\dots h_{-2}, h_{-1}, h_0, h_1, h_2, \dots)$ 。其相应的反褶积因子为

$$A^T = (a_{-m_0}, a_{-m_0+1}, \dots, a_{-m_0+m})$$

$$\text{令} \quad b_{hh} = \sum_{-\infty}^{+\infty} h_{t+\tau} h_t$$

$$y_t = A * H = \sum_{i=-m_0}^{-m_0+m} a_i h_{t-i}$$

$$\delta_t = \begin{cases} 1 & t = 0 \\ 0 & t \neq 0 \end{cases}$$

则反褶积因子 A^T 应使得下式取极小值

$$Q = \sum_{-\infty}^{+\infty} (y_t - \delta_t)^2 \quad (2.1.12)$$

经运算,上述极小值问题等价于下列线性方程组

$$BA = R \quad (2.1.13)$$

式中,

$$R = (h_{m_0}, h_{m_0-1}, \dots, h_{m_0-m})^T$$

$$B = \begin{bmatrix} b_{hh}(0) & b_{hh}(1) & \dots & b_{hh}(m) \\ b_{hh}(1) & b_{hh}(0) & \dots & b_{hh}(m-1) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ b_{hh}(m) & b_{hh}(m-1) & \dots & b_{hh}(0) \end{bmatrix}$$

公式(2.1.13)可采用 Toplitz 递推解法及白噪化处理,消除矩阵 B 的奇异性(程乾生, 1979)。为提高解的精度和稳定性,保证两者平衡,采用正则化方式求解上式,按给定误差 δ 由下式求取正则化因子 α

$$\Phi(\alpha) = \|B(B^T + \alpha)^{-1}B^T - I\|^2 = \delta^2 \quad (2.1.14)$$

对上式采用一维搜索求解。该法定义为正则化最小乘方反褶积方法。

图 2.1.1 是一模拟(数字记录)自然伽马曲线的反褶积结果。图中, G_{RA} 是模拟的自然伽马测井曲线, G_{RR} 是地层的真实自然伽马测井曲线, G_{RD} 是 G_{RA} 反褶积后的曲线。图中采样间隔是 0.10m。显然,反褶积后自然伽马测井曲线的纵向分层能力明显提高,主要表现为两点:一是读值变化,二是分层变化。进一步分析可看出, G_{RA} 自然伽马原始曲线能全部反映出厚度 0.90m 以上的地层,而反褶积后的曲线能读出真值的厚度为 0.30m。

图 2.1.2 是另一模拟地层自然伽马测井(模拟记录)曲线的反褶积成果图。从该图可看出,反褶积效果很好。它不仅能消除率表电路的影响,而且消除了围岩的影响。原始自然伽马测井曲线能全部反映出厚度大约 1.00m 的地层,反褶积曲线全部反映出 0.30m 的地层(读值与真值一样)。

2.1.3 噪音压制技术

1) 线性平滑滤波技术

平滑滤波法就是在当前采样点前、后连续地取 n 个采样数值,选用适当滑动平均值的计算方法消除噪音。为了方便起见,设计一个 $(2n+1)$ 点 m 次的加权平滑滤波器。经推导,可用矩阵表示为

$$\bar{Y} = C \cdot Y \quad (2.1.15)$$

式中, $Y = [y_{-n}, y_{-n+1}, \dots, y_{n-1}, y_n]^T$

$$\bar{Y} = [\bar{y}_{-n}, \bar{y}_{-n+1}, \dots, \bar{y}_{n-1}, \bar{y}_n]^T$$

$$C = T \cdot [XI]^{-1} YI$$

$$XI = [x_{kl}]_{(m+1) \times (m+1)}$$

$$x_{kl} = \sum_{i=-n}^{i=n} i^{k+l-2}$$

$$k=1, 2, \dots, m+1, \quad l=1, 2, \dots, m+1$$

$$T = [t_{kl}]_{(2n+1) \times (m+1)}$$

$$t_{kl} = (k-n-1)^{(l-1)}$$

$$k=1, 2, \dots, 2n+1, \quad l=1, 2, \dots, m+1$$

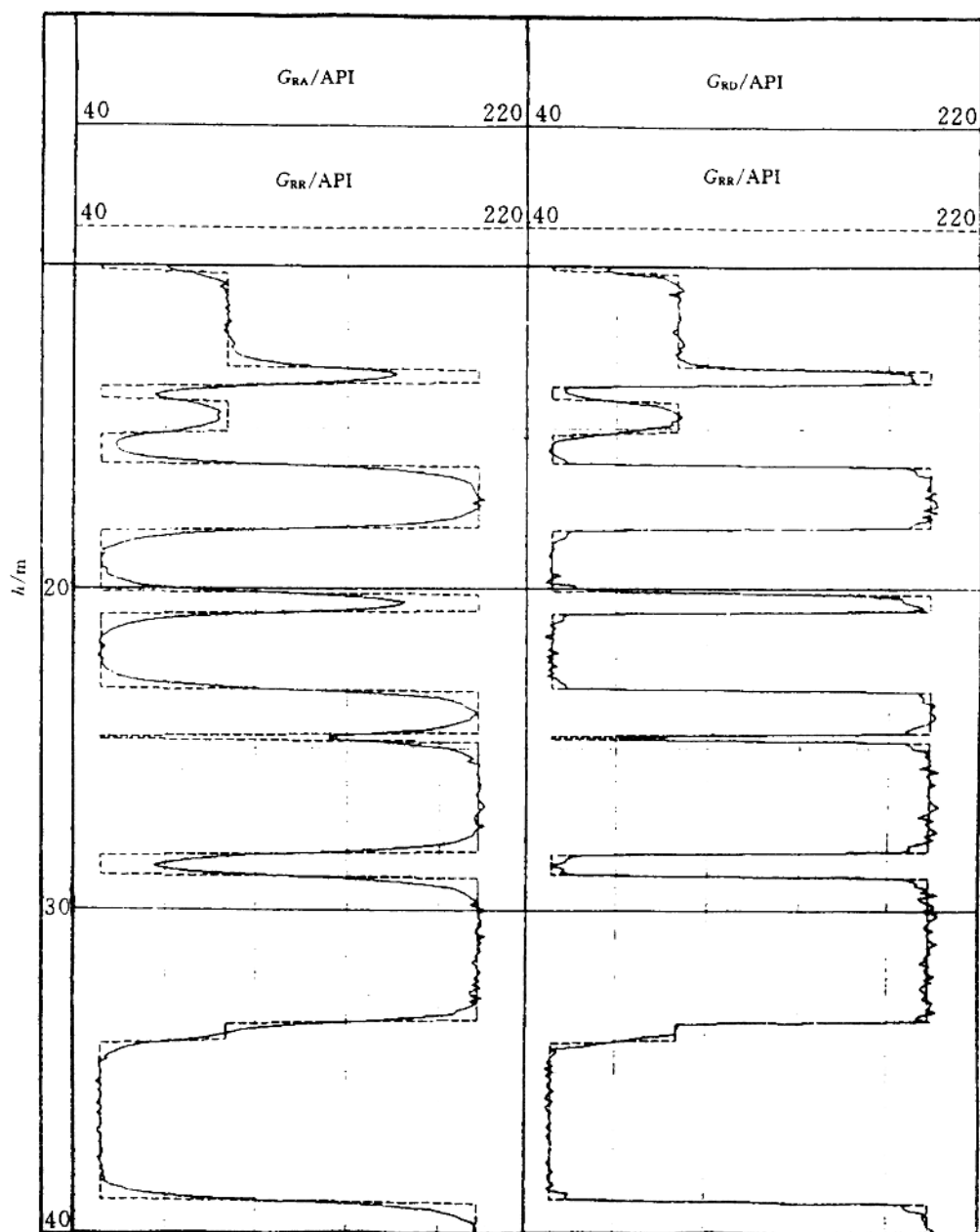


图 2.1.1 数字记录模拟 G_R 曲线高分辨率处理成果图

$$\begin{aligned}
 YI &= [y_H]_{(m+1) \times (2n+1)} \\
 y_H &= (l-n-1)^{(k-1)} \\
 l &= 1, 2, \dots, 2n+1; \quad k = 1, 2, \dots, m+1
 \end{aligned}$$

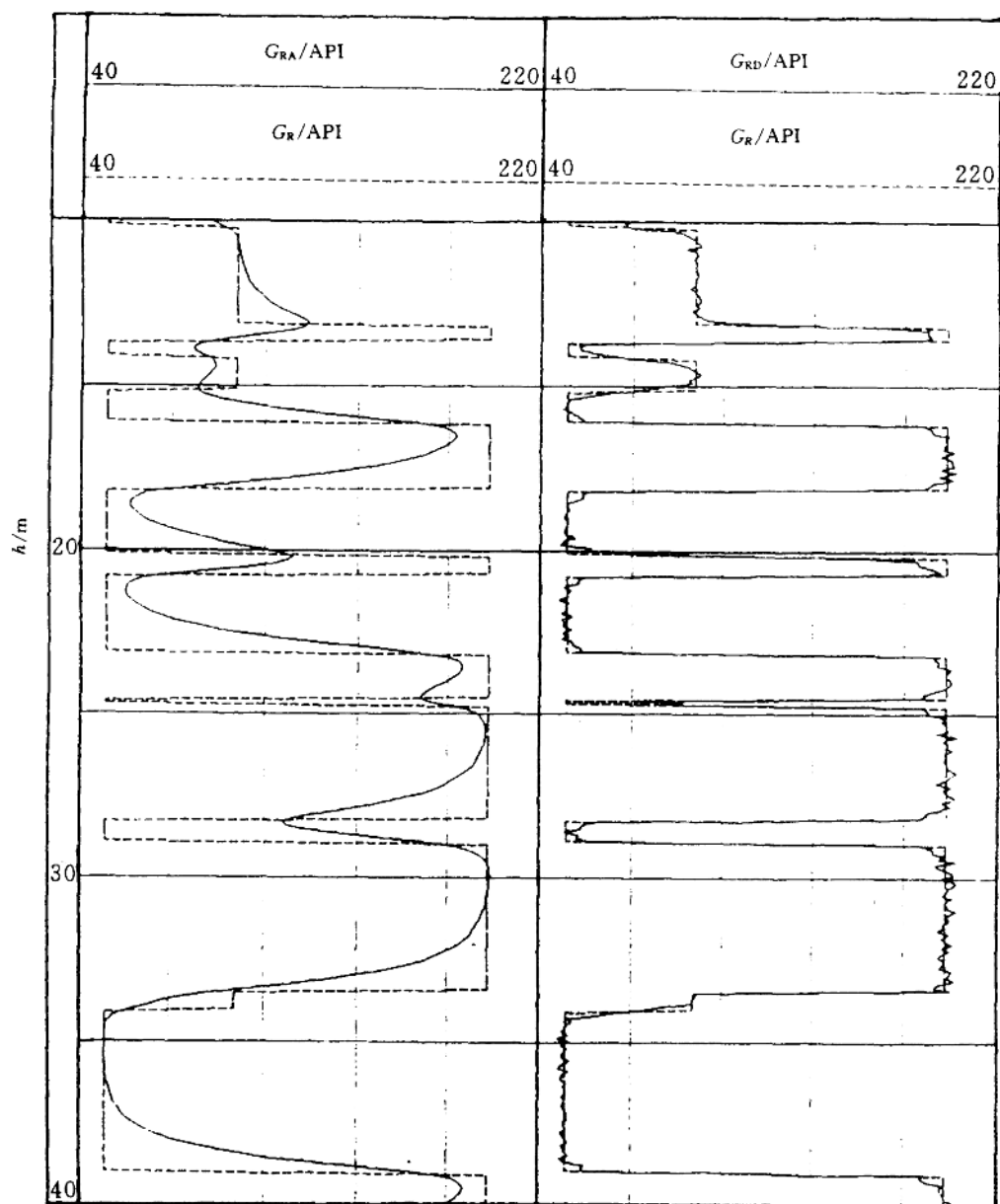


图 2.1.2 模拟记录 G_R 曲线高分辨率处理成果图

采用上述公式可完成任意点、任意次平滑滤波。该方法能将周期小于 $(2n+1)$ 采样间隔的随机干扰有效地抑制或消除掉。但过分平滑,会降低测井信号的纵向分辨率。

2) 中值滤波

中值滤波是一种抑制噪音的非线性处理信号方法。它具有保护边缘及对尖锐噪音平滑处理等特点,使滤波前后测井曲线纵向分辨率不变。

设中值滤波宽度为 $(2N+1)$,则其滤波公式可表示为

$$Y(A) = \text{median} \{X(A-N), \dots, X(A-1), X(A), X(A+1), \dots, X(A+N)\} \quad (2.1.16)$$

式中:中值 median 的意思是序列由小到大排列后,取序列中点的值。

3) 双窗滤波器

线性平滑滤波公式将高频噪音滤掉,使信号边缘平滑,而中值滤波具有保留信号边缘的特点。为了发挥两种滤波器的优势,采用双窗滤波器。其主要特点是选用两个窗,一个外部窗,一个内部窗。根据待估计点及外窗宽度形成外窗,对外窗点按由大到小顺序排列;然后选择一滤波参数 $C(C=3\sigma)$,以待估计点 X_0 为中心,形成内窗 (X_0-C, X_0+C) ;最后,对于内窗点采用线性滑动平均滤波方法求取最终估计值,此值为最佳滤噪值。

双窗滤波技术既能有效地压制噪音,又能保持测井曲线的纵向分辨率。据蒙特卡罗数值模拟计算表明,该方法明显比线性平滑方法及中值滤波方法优越。最佳线性滤波可以将噪音降低 10%,递归中值滤波可降低 30%,而双窗滤波法可将噪音大约降低 50%。其评价公式是

$$\sigma_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [G(k) - Y(k)]^2} \quad (2.1.17)$$

式中: $G(k)$ 为理想曲线, $Y(k)$ 为滤波曲线。

2.1.4 有关参数的选择

1) 曲线形状常数 α

自然伽马测井曲线常数 α 值的大小直接影响到测井仪器响应函数的形状,故 α 对反褶积效果影响很大。故有必要研究选择 α 的方法。

经研究,可采用野外测井曲线来确定 α 值的大小。若将自然伽马读数以自然对数坐标显示,那么 α 值应是厚泥岩层层界面附近曲线的斜率。为准确起见,取多个测量所确定斜率的平均值作为最佳 α 。大庆地区 α 值大约是 5.0 左右。若 α 选择不准,例如加 10% 的干扰,利用数值模拟计算表明,其引入的误差不超过 10% 左右。

2) 反褶积窗长 m 及 m_0

由于自然伽马测井仪器响应函数 H 是偶函数,反褶积因子 H^{-1} 应是偶数,故要求 $m_0 = m - m_0$,即 $m = 2m_0$ 。

原则上选择 m_0 ,应使区间 $[-m_0, m_0]$ 是包括 H^{-1} 因子的绝大部分能量(主要能量)。即 m_0 大小应与曲线的纵向分层能力成正比,分层能力越好, m_0 应越小。对于自然伽马及自然伽马能谱测井曲线而言, m_0 取 4 即可。

2.1.5 应用结果分析

在上面已经应用数值模拟方法说明了正则化最小乘方反褶积方法的可行性和正确性,下面应用实际测井资料进行验证说明。图 2.1.3 是大庆油田大 407 井井段自然伽马测井曲线的高分辨率处理成果图。图中,虚线 G_{RA} 表示原始自然伽马曲线,实线 G_{RD} 表示高分辨率处理后的曲线。对比两条线及微球曲线 R_{MSFL} 发现,处理后曲线纵向分辨率明显提高。表 2.1.1