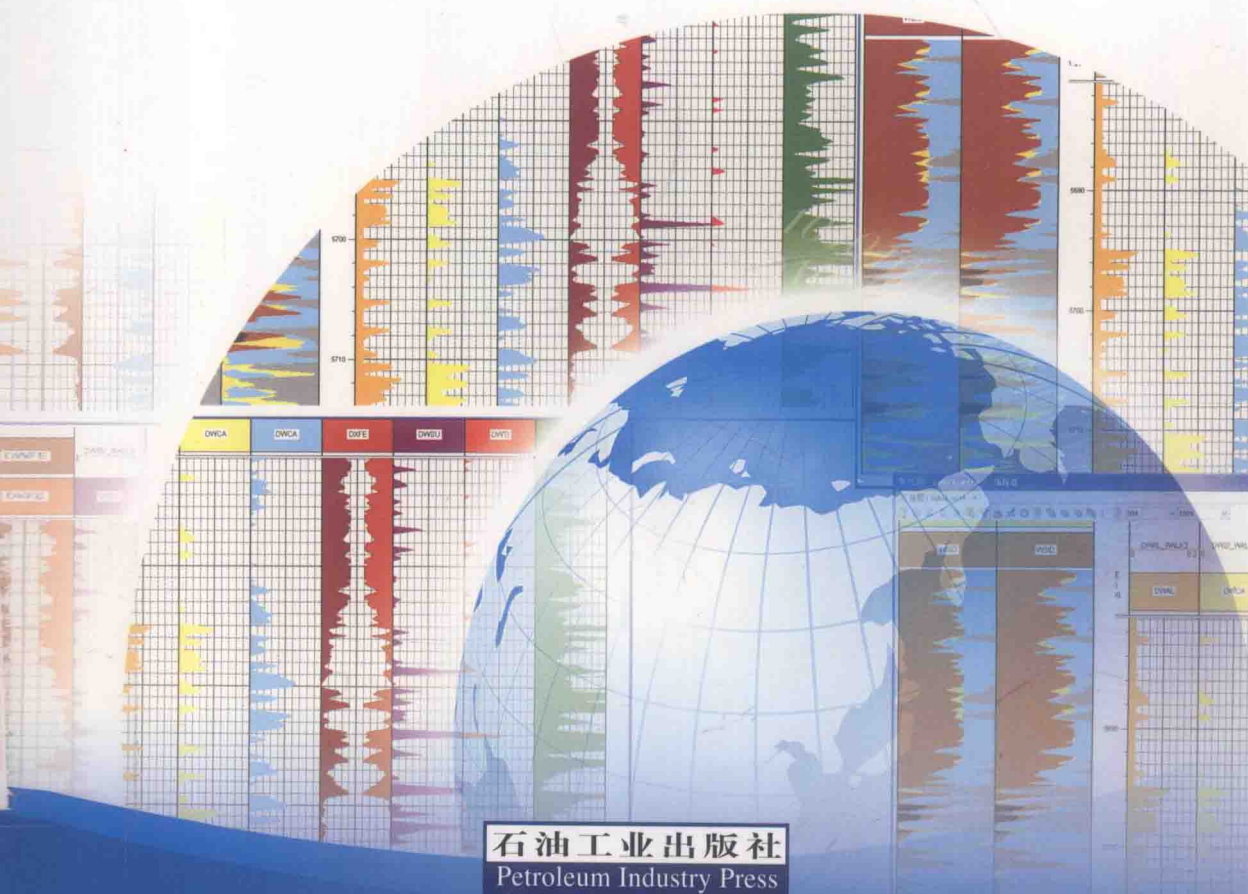




高等院校石油天然气类规划教材

地球物理测井数字处理方法

王向公 王婧慈 陈传仁 © 编著



石油工业出版社
Petroleum Industry Press

高等院校石油天然气类规划教材

地球物理测井数字处理方法

王向公 王婧慈 陈传仁 编著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书详细论述了统计分析方法、最优化理论、模糊数学、神经网络、遗传算法、分形几何、小波理论等数学方法在测井信息预处理、地层划分、岩性分析、油水层识别、地层对比、单井解释与储层评价等方面的应用。

本书可作为石油高等院校有关师生和地球物理测井工程师教学、科研参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

地球物理测井数字处理方法 / 王向公, 王婧慈, 陈传仁编著.
北京: 石油工业出版社, 2013.12

(高等院校石油天然气类规划教材)

ISBN 978-7-5021-9650-9

I. 地…

II. ①王…②王…③陈…

III. 测井数据处理 - 高等学校 - 教材

IV. P631.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 144351 号

出版发行: 石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址: <http://pip.cnpc.com.cn>

编辑部: (010) 64523579 发行部: (010) 64523620

经 销: 全国新华书店

印 刷: 北京中石油彩色印刷有限责任公司

2013 年 12 月第 1 版 2013 年 12 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 11.75

字数: 296 千字

定价: 24.00 元

(如出现印装质量问题, 我社发行部负责调换)

版权所有, 翻印必究

前 言

地球物理测井是应用物理学的一个重要分支学科，它是研究地下岩石物理性质、寻找和评价油气及其矿藏资源的一门应用技术学科，现已广泛地应用于油气、金属矿、煤田及水文地质等许多方面。

地质勘探事业和科学技术的高速发展，促进了应用物理学的发展，使探矿工作不断深化。信息采集数字化，资料整理与解释定量化，成果显示直观、形象，无疑必须依赖于计算机科学及多种数学方法与技术。

当前，地球物理测井技术的发展是以测井信息迅速增加，测井、物探、地质信息间相互精细标定与刻度为特点。但是，由于地下岩体的隐蔽性、复杂性和测井资料的多解性，欲提高测井资料的有效还原能力，必须引入相应的数学方法。其中统计分析方法是引用较早且目前仍普遍应用的一种数学方法。最优化理论在测井解释中的应用，拓宽了测井解释的思路。相继而来，模糊数学、神经网络、分形几何等数学方法亦先后应用于单井解释、储层评价、油藏描述中，并在某些方面已取得了可喜的成果。但由于某些数学方法普及的局限性，其研究成果还未在地球物理测井中被广泛应用，本书试图在理论研究与实际应用的结合上做一些尝试。

本着理论联系实际的原则，本书在介绍有关数学方法的基本原理与算法，结合自身所做的工作及收集有关文献资料的基础上，重点介绍目前测井评价中普遍应用或正在引用的并已见到效果的方法、处理步骤及必要的实例，以期待得到同行、专家们的指导。

本书第一章、第二章、第三章（第二节和第五节）、第七章由长江大学王向公编写；第三章（第一节）、第四章、第五章、第六章（第一节和第二节）由长江大学王婧慈编写；第三章（第三节和第四节）、第六章（第三节至第六节）由长江大学陈传仁编写。全书由王向公统稿。

长江大学地球探测与信息技术专业研究生张清慧、李名、文琼、胥博文、尹玲玲、林盛斓、李晓燕、乔茂坡、林浩、彭建辉、刘琪、况晏、刘智颖、王健颖、王向玖、王杰、王晔等在书稿整理过程中做了大量工作，在此表示衷心的感谢！

本书编写过程中，参考了有关教材、专著、论文及有关文献，特向这些编者、作者、译者谨致以衷心的感谢。此外，感谢张超谟教授于百忙中对本书进行了认真详细的审阅，感谢全国测井界同行的关心与支持。

由于笔者水平有限，书中定有许多不当之处，敬请各位专家和读者批评指正。

编著者

2013.8

目 录

第一章 测井信息预处理	1
第一节 测井曲线的平滑处理.....	1
第二节 深度编辑.....	3
第三节 测井资料的环境影响校正方法.....	13
第四节 测井资料标准化.....	17
思考题.....	18
第二章 地层划分技术	20
第一节 方差分析分层方法.....	20
第二节 极值方差分层方法.....	23
第三节 其他数理统计分层方法.....	26
第四节 利用测井曲线的极值与微商分层.....	31
第五节 应用马尔可夫链转移概率划分地层.....	33
第六节 中值滤波分层.....	34
第七节 活度函数分析法分层.....	35
第八节 层序分析分层.....	37
思考题.....	39
第三章 岩性分析技术	40
第一节 利用概率统计方法判别岩性.....	40
第二节 统计分析在测井相分析中的应用.....	46
第三节 应用神经网络自动识别岩性.....	50
第四节 分数维在岩性分析中的应用.....	52
第五节 测井相分析.....	55
思考题.....	62
第四章 油水层识别技术	63
第一节 利用费歇判别方法判别油水层.....	63
第二节 利用贝叶斯判别方法判别油水层.....	68
第三节 利用几何分析法划分油水层.....	70
第四节 模糊数学评价油水层.....	74
第五节 神经网络在区分油水层中的应用.....	80
思考题.....	83

第五章 地层对比技术	84
第一节 地层对比信息的提取.....	84
第二节 用寻优追踪法提高测井曲线井间对比可靠性.....	86
第三节 应用模糊聚类分析法确定地层对比中的关键层.....	89
第四节 利用相关函数进行地层对比.....	92
第五节 利用功率谱分析进行地层对比.....	94
第六节 利用有序元素最佳匹配法进行地层对比.....	99
思考题.....	102
第六章 储层评价技术	103
第一节 最优化解释方法.....	103
第二节 填充函数在测井优化解释中的应用.....	112
第三节 分形理论在储层描述中的应用.....	116
第四节 分形在油藏模拟中的应用.....	118
第五节 小波变换在测井储层评价中的应用.....	124
第六节 遗传算法在测井储层评价中的应用.....	133
思考题.....	135
第七章 数字处理方法综合应用	137
第一节 低孔低渗储层评价技术.....	137
第二节 水淹层测井解释技术.....	148
第三节 低阻油层测井解释技术.....	157
思考题.....	178
参考文献	179

第一章 测井信息预处理

第一节 测井曲线的平滑处理

任何一种数字化曲线都可视为一个序列，并且视其由反映岩层物理性质的趋势、周期性与随机性的干扰两部分组成。对测井曲线进行平滑处理的目的在于去掉测井信息中与岩石性质无关的部分。

平滑（也称光顺）处理，实际上是一种简单的滤波。常用的曲线平滑处理方法主要有简单平均法、加权平均法和最小平方曲线拟合平滑法。

平滑处理基本思想是将一个长的数字序列分段处理，每段的长度与滑动段相当。例如，先取序列中第 1 项到第 $2N+1$ 项，构成一个 M 阶多项式（其中 $M < 2N$ ），用这个多项式计算 $2N+1$ 项中中心项的值（即趋势值）；然后用第 2 项到 $2N+2$ 项重新构造一个多项式，再用这个多项式计算第 2 到第 $2N+2$ 项的中心项值。这样每次向前滑动一个数据点，便可去掉其中的干扰成分，最后得到一条较光滑的曲线。

一、简单平均法

设 $X(t)$ 为原始测井数据， $Y(t)$ 为光滑处理后的测井数据，简单平均法的公式为：

$$Y(t) = \frac{1}{2N+1} \sum_{n=-N}^N X(t-n) \quad (1-1-1)$$

式 (1-1-1) 又称为 $2N+1$ 点简单平均。

式 (1-1-1) 相当于一个滤波公式，滤波因子 $h(t)$ 为：

$$\begin{aligned} h(t) &= (h(-N), \dots, h(0), \dots, h(N)) \\ &= \left(\frac{1}{2N+1}, \dots, \frac{1}{2N+1}, \dots, \frac{1}{2N+1} \right) \\ &= \frac{1}{2N+1} (1, \dots, 1, \dots, 1) \end{aligned} \quad (1-1-2)$$

用滤波因子 $h(t)$ 对测井值 $X(t)$ 滤波得：

$$Y(t) = h(t) \cdot X(t)$$

简单平均法也可视为等权平均法，它对分离出大的趋势变化的能力较强，但平滑后的数据变化大。

二、加权平均法

若取滤波因子 $h(t) = (h(-N), \dots, h(0), \dots, h(N))$ ，并且要求 $\sum_{n=-N}^N h(n) = 1$ 。用 $h(t)$

对 $X(t)$ 滤波，便得到加权平均的公式：

$$Y(t) = h(t) \cdot X(t) = \sum_{n=-N}^N h(n) X(t-n) \quad (1-1-3)$$

对测井数据做加权平均处理时，一般要求加权平均因子 $h(t)$ 满足： $h(t) \geq 0$ ， $h(-t) = h(t)$ 。

加权平均因子（即滤波因子）的取法是多种多样的，应根据具体的测井曲线的特性和实际处理效果来选取。常用的有下列三个加权平均因子公式：

(1) 三角型 $2N+1$ 点加权平均因子公式。

$$h(n) = P_n / \sum_{n=-N}^N P_n \quad (|n| \leq N) \quad (1-1-4)$$

$$\text{其中：} \quad P_n = a + \frac{b-a}{N} |n| \quad (|n| \leq N) \quad (1-1-5)$$

a, b 为给定参数，并要求 $a > b > 0$ 。

(2) 半余弦型 $2N+1$ 点加权平均因子公式。

将式 (1-1-4) 中的 P_n 取为：

$$P_n = (a-b) \cos \frac{n\pi}{2N} + b \quad (|n| \leq N) \quad (1-1-6)$$

$$\text{则有：} \quad h_n = \frac{(a-b) \cos \frac{n\pi}{2N} + b}{\sum_{n=-N}^N (a-b) \cos \frac{n\pi}{2N} + b} \quad (1-1-7)$$

(3) 余弦型 $2N+1$ 点加权平均因子公式。

取式 (1-1-4) 中 P_n 为：

$$P_n = \frac{a-b}{2} \cos \frac{n\pi}{2N} + \frac{a+b}{2} \quad (|n| \leq N) \quad (1-1-8)$$

经上述加权平均处理的数据与原始数据的逼近程度较高，但不能很好地去掉干扰成分中的周期变化部分。为了较好地分离出趋势部分，通常取 $2N+1$ 的长度大于要去掉的周期成分。

三、最小平方曲线拟合平滑法

在最小平方曲线拟合平滑法中，最常用的一种是五点二次曲线拟合平滑法。设有五个测井值 $X_{-2}, X_{-1}, X_0, X_1, X_2$ ，我们用二次曲线 $Z(t) = a+bt+ct^2$ 对五个测井数据点进行最小平方曲线拟合，即要求 a, b, c 使下式达到最小：

$$Q = \sum_{i=-2}^2 (a+bt+ct^2 - X_i)^2 \quad (1-1-9)$$

系数 a, b, c 可从下式解出：

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial a} = 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial b} = 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial c} = 0 \end{cases}$$

当 $t = 0$ 时, 有:

$$Z_0 = a + \frac{-3}{35}X_{-2} + \frac{12}{35}X_{-1} + \frac{17}{35}X_0 + \frac{12}{35}X_1 + \frac{-3}{35}X_2 \quad (1-1-10)$$

由于 Z_0 是由左、右五个点拟合得到的, 可用 Z_0 代替 X_0 , 作为平滑后的结果。平均因子为:

$$\begin{aligned} h(t) &= (h(-2), h(-1), h(0), h(1), h(2)) \\ &= \frac{1}{35}(-3, 12, 17, 12, -3) \end{aligned} \quad (1-1-11)$$

从上述的各种平滑处理方法可以看出, 对曲线平滑处理就是用平均因子 $h(t)$ 对曲线 $X(t)$ 进行滤波。滤波效果取决于平均因子的频谱特性。对于 $2N+1$ 点的简单平滑相当于低通滤波, 其他平均因子也具有这种特性。曲线 $X(t)$ 不光滑, 表明干扰成分中高频部分较丰富, 因此对测井曲线进行平滑处理, 实质上是对它进行低通滤波。

第二节 深度编辑

深度编辑一般包括测井曲线的深度对齐与深度平差两部分内容。深度校正一般是以某一条测井曲线的深度为准, 其他测井曲线与之对比以确定被对比的曲线深度上是否有错动。用连续曲线进行深度对比是建立在识别两条曲线波形相似的基础之上的, 即从曲线形态上进行深度对比。

一、测井曲线深度校正方法

1. 利用相关函数进行深度校正

1) 基本原理

对于进行深度校正的两条测井曲线, 相当于等长的两个离散序列 X_n, Y_n , 利用他们之间的线性相关程度来确定两曲线同一层位的深度是否相同。

描述两者相关程度可用误差能量的方法, 或者利用均方差的方法, 即下式达到最小值:

$$Q = \frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N (X_n - aY_n)^2 \quad (1-2-1)$$

$$\text{由: } \frac{\partial Q}{\partial a} = \frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N 2(X_n - aY_n)(-Y_n) = -\frac{2}{N-1} \left(\sum_{n=1}^N X_n Y_n - a \sum_{n=1}^N Y_n^2 \right) = 0 \quad (1-2-2)$$

解出 a :

$$a = \frac{\sum_{n=1}^N X_n Y_n}{\sum_{n=1}^N Y_n^2} \quad (1-2-3)$$

将求出的 a 代入式 (1-2-1) 有:

$$\begin{aligned} Q &= \frac{1}{N-1} \left[\sum_{n=1}^N X_n^2 - 2 \frac{\sum_{n=1}^N X_n Y_n}{\sum_{n=1}^N Y_n^2} \cdot \sum_{n=1}^N X_n Y_n + \frac{\left(\sum_{n=1}^N X_n Y_n \right)^2}{\left(\sum_{n=1}^N Y_n^2 \right)^2} \cdot \sum_{n=1}^N Y_n^2 \right] \\ &= \frac{1}{N-1} \left[\sum_{n=1}^N X_n^2 - \frac{\left(\sum_{n=1}^N X_n Y_n \right)^2}{\sum_{n=1}^N Y_n^2} \right] \end{aligned} \quad (1-2-4)$$

相对误差能量为:

$$\frac{Q}{\frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N X_n^2} = 1 - \frac{\left(\sum_{n=1}^N X_n Y_n \right)^2}{\sum_{n=1}^N X_n^2 \cdot \sum_{n=1}^N Y_n^2} = 1 - \gamma_{XY}^2$$

其中:

$$\gamma_{XY} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N X_n Y_n}{\left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N X_n^2 \cdot \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N Y_n^2 \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (1-2-5)$$

当 X_n, Y_n 的能量是有限的時候, γ_{XY} 仅由式 (1-2-5) 中的分子决定, 因而通常定义 $\gamma_{XY}^{(0)}$ 为非标准化相关系数, 则:

$$\gamma_{XY}^{(0)} = \frac{1}{N} X_n Y_n \quad (1-2-6)$$

如果 X_n, Y_n 形状相似, 则 $\gamma_{XY}^{(0)}$ 值大, 反之, $\gamma_{XY}^{(0)}$ 值小。

另外, 也可以定义标准化相关系数为:

$$\rho_{XY} = \frac{\sum_{n=1}^N (X_n - \bar{X})(Y_n - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{n=1}^N (X_n - \bar{X})^2} \cdot \sqrt{\sum_{n=1}^N (Y_n - \bar{Y})^2}} \quad (1-2-7)$$

其中:

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N X_n, \quad \bar{Y} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N Y_n$$

式 (1-2-7) 所定义的相关系数是在一定的深度位移 (对比窗长) 情况下, 以 X_n , Y_n 定长为依据而进行的两条曲线的深度对比, 即在时移中研究两条曲线的相似性。例如, 两个系列 X_n , Y_n 相对错动了 τ 个采样间隔的深度 (τ 可正, 也可负), 相关系数 $\gamma_{XY}(\tau)$ 为:

$$\gamma_{XY}(\tau) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} X_n \cdot Y_{n-\tau} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} X_{n+\tau} \cdot Y_n$$

因为 X_n , Y_n 为有限长, 故:

$$\gamma_{XY}(\tau) = \sum_{n=1}^N X_n \cdot Y_{n-\tau} \tag{1-2-8}$$

通常称 $\gamma_{XY}(\tau)$ 为 X_n 与 Y_n 的相关系数。
如图 1-2-1 所示, X_n , Y_n 移动之前对比它们的相似程度并不大, 但若将 Y_n 向右移动, 使两者相对错开 τ_0 个采样间隔 (即 Y_n 变为 $Y_{n-\tau}$), 则 $\gamma_{XY}(\tau)$ 有极大值。

2) 对比方法

常用的相关对比方法有两种, 一种是固定窗长的相关对比方法, 另一种是可变窗长的相关对比方法。测井曲线的自动深度校正中一般用固定窗长的相关对比法。

(1) 固定窗长的相关对比方法。

固定窗长的相关对比法是以某一条曲线的一些标志层为特征, 将被对比的曲线与之比较, 来寻找相关的层位。

利用相关对比法对测井曲线的深度进行校正, 其对比方法是: 以标准曲线上的一个固定的相关窗长 (如 n 个采样点) 内测井数据的深度为准, 将被对比曲线上相同窗长内的 n 个测井数据在某一个对比活动范围 (探索间隔) 内与之对比, 找出相关系数最大的两个层位, 再确定它们的深度是否一致。每对比一次, 相关窗长移动一个深度间隔 (如一个采样间隔), 这个间隔常称为相关步长。

设相关窗长为 N (采样点个数), $X(i)$ 为基本曲线相关窗长内的第 i 个测井数据, $Y(i)$ 为对比曲线相应长度内的第 i 个测井值。若两者的厚度相当、形状相似, 则它们之间有线形关系:

$$Y(i) = aX(i) + b$$

$Y(i)$ 与 $X(i)$ 线性相关程度可用相关系数来衡量。相关系数可由下式计算:

$$\gamma_{XY} = \frac{\sum_{i=1}^N [X(i) - \bar{X}][Y(i) - \bar{Y}]}{\sqrt{\sum_{i=1}^N [X(i) - \bar{X}]^2 \cdot \sum_{i=1}^N [Y(i) - \bar{Y}]^2}} \tag{1-2-9}$$

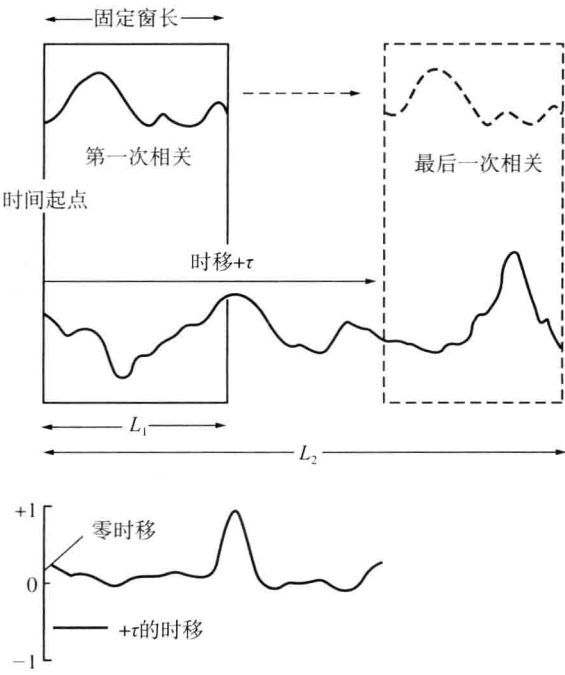


图 1-2-1 固定窗长的相关过程和标准化相关函数

其中：

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X(i), \quad \bar{Y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Y(i)$$

显然 $|\gamma_{XY}| \leq 1$ ，当 $\gamma_{XY} = \pm 1$ 时， $X(i)$ 与 $Y(i)$ 完全相关， $\gamma_{XY} = 0$ 时， $Y(i)$ 与 $X(i)$ 线性无关。同时 $\gamma_{XY} > 0$ 说明 $Y(i)$ 与 $X(i)$ 同向变化， $\gamma_{XY} < 0$ 说明 $Y(i)$ 与 $X(i)$ 反向。

为了提高利用相关对比进行深度校正的可靠程度，应对 γ_{XY} 做一些必要的调整及选择一门槛值。两条曲线同一层位间的深度差由相关系数 γ_{XY} 的局部极大值所对应的位移确定。

除此之外，对测井数据进行必要的校正也是必不可少的。例如，将测井值 Y 限制在 $Y_{\min}$ 与 $Y_{\max}$ 之间，并进行下列刻度：

$$YY(i) = \frac{Y(i) - Y_{\min}}{Y_{\max} - Y_{\min}} \quad (1-2-10)$$

对于不合格的部分曲线，用其均方根代替。

(2) 可变窗长的相关对比方法。

可变窗长相关对比的基本要点是：在基本曲线、对比曲线上截取相同的一段（如 N 个采样点），随着对比的进行，将基本曲线段的相关窗长依次减少 τ 个采样点（ $\tau = 0, 1, \dots, N-1$ ）。

若基本曲线与对比曲线所截取的相同长度的数据分别为：

$$\{X(i), i = 1, 2, \dots, N-\tau\}$$

$$\{Y(i), i = 1, 2, \dots, N-\tau\}$$

其相关系数 $\gamma_{XY}(\tau)$ 为：

$$\gamma_{XY}(\tau) = \frac{\sum_{i=1}^{N-\tau} [X(i) - \bar{X}][Y(i+\tau) - \bar{Y}]}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N-\tau} [X(i) - \bar{X}]^2 \sum_{i=1}^{N-\tau} [Y(i+\tau) - \bar{Y}]^2}} \quad (1-2-11)$$

其中：

$$\bar{X} = \frac{1}{N-\tau} \sum_{i=1}^{N-\tau} X(i), \quad \bar{Y} = \frac{1}{N-\tau} \sum_{i=\tau+1}^N X(i)$$

不难看出对比窗长随着时移 τ 值的增加而减小。 $\tau = 0$ ，对比窗长为 N ； $\tau = 1$ ，对比窗长为 $N-1$ ； $\dots$ ； $\tau = N-1$ ，对比窗长为 1。采用这种变窗长相关对比的优点是，可以在不同的窗长内考虑曲线的相似性，因此可以找出两段曲线中相似最大的部分。图 1-2-2 为两条模型曲线相关对比的示意图。

2. 利用图形识别法进行深度对比

利用图形识别法进行深度对比是点与点间进行对比法中最早出现的一种。测井曲线的某些特征（如曲线的幅度、形态及形态变化、厚度等），在不同的曲线上都可以辨认出来。因此利用某些测井曲线的有关特征，可进行它们之间的深度对比，找出深度上的差异。

图形识别法的基本出发点是尽可能地模拟人眼睛的能力来识别和对比不同曲线上相似部分。基本做法是把每一条对比的曲线分解为按深度排列的不同级别的曲线元，每一个曲线元都视为岩层物理性质变化的反应。对比时首先对比较高级别的曲线元，在后面的较低

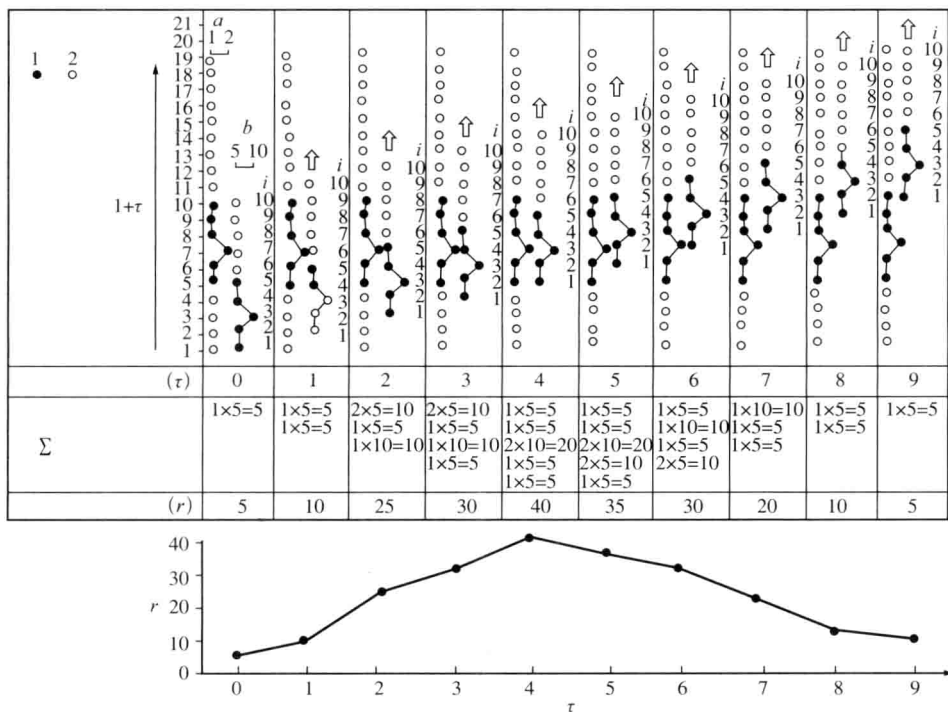


图 1-2-2 两条模型曲线相关对比的示意图

级别的曲线元对比中，不允许与较高级别的曲线元交叉进行。较高级别的对比可以指导探索较低级别对比的特征，直到把所有可能的对比进行完为止。

1) 曲线元的分类

对于一般的测井曲线，其形态可以归纳为波峰、波谷、台阶和平直段等；对于微电阻率曲线，还有正尖峰、负尖峰等。目前主要采用波峰、波谷这两类曲线元进行对比。对其其他的几类曲线元的应用正在研究之中。

波峰曲线幅度随深度增加而增大，并达到最大值，然后随深度增加而减小。波峰的界面是两个拐点，而拐点可由曲线导数的极值点（极大或极小）来确定。但是作为波峰，在其界面内导数的变化足够大时才有意义，这样可以避免在平直的曲线段上选择曲线元。波谷用与波峰相反符号的导数的变化来确定。图 1-2-3 和图 1-2-4 是曲线元类型与波峰、波谷提取示意图。

波峰、波谷的提取方法：

(1) 首先确定计算导数的窗长 N ，并在这一窗长内计算导数，其次是对计算出的导数曲线进行平滑处理，以减小干扰，突出有意义的拐点。

(2) 对提取出来的波峰、波谷进行分类。一般按其导数的变化分为大、中、小三类。如图 1-2-4 所示，有 $s_1 < s_2 < s_3$ 三个反映导数变化的值。小波峰（或小波谷）应有： $s_1 < s_{\text{小}} < s_2$ ；对于中波峰（或波谷）应有 $s_2 < s_{\text{中}} < s_3$ ；而大波峰（或波谷）应有 $s_2 < s_{\text{大}}$ 。

通过上述提取出来的各类波峰（或波谷）的边界，给出了它们各自的深度，从而相当于得到一条由曲线元组成的新曲线。

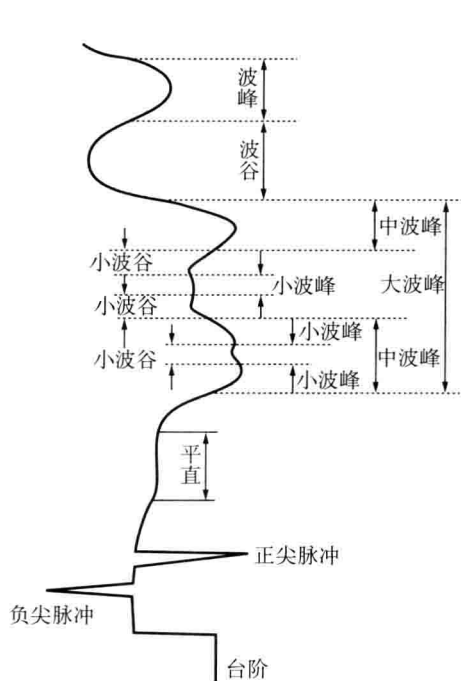


图 1-2-3 曲线元的类型

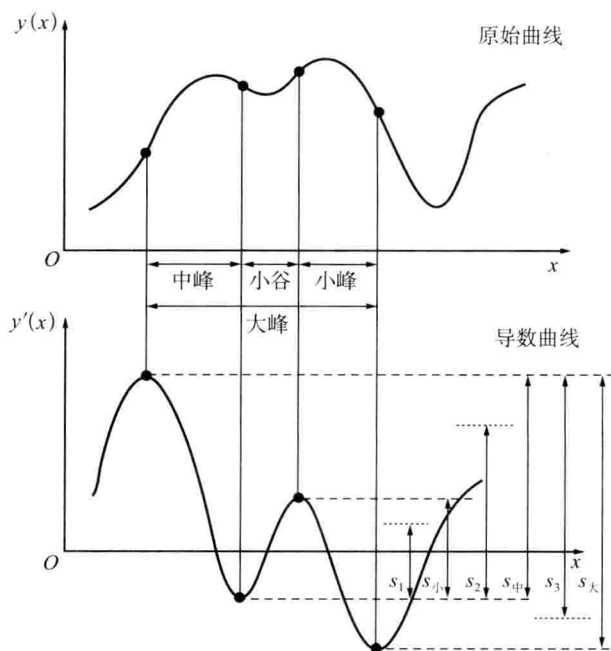


图 1-2-4 波峰和波谷的提取

2) 图形矢量

上文虽然对波峰和波谷进行了分类，但是每一个波峰（或波谷）都有各自的特点，还需用一系列参数来具体描述每个波峰（或波谷）。这些进一步表征曲线元的一系列参数，就是图形矢量。图 1-2-5 是用九个参数来表征一个波峰的图示。

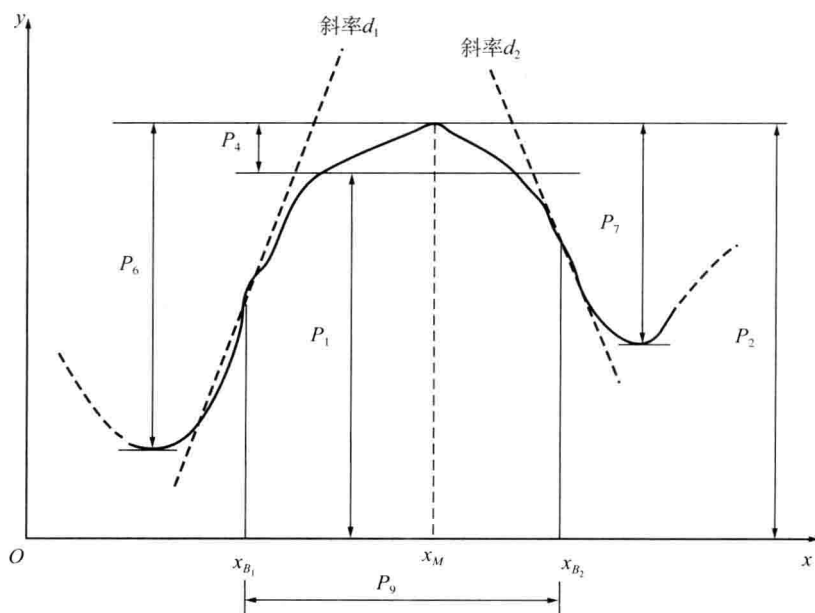


图 1-2-5 描述波峰的几个参数

九个参数的意义如下：

P_1 ——平均幅度值；

P_2 ——最大幅度值；

P_3 ——相对于边界 x_{B_1} 、 x_{B_2} 最大幅度值所出现的位置 X_M ，且 $P_3 = (x_M - x_{B_1}) / (x_{B_2} - x_{B_1})$ ；

P_4 ——最大幅度值与平均幅度值之差， $P_4 = P_2 - P_1$ ；

P_5 ——左、右拐点的平均值，并且 $P_5 = -(d_1/d_2) / (1 + d_1/d_2)$ ，其中 d_1 和 d_2 为光滑导数值；

P_6 ——左跳跃值；

P_7 ——右跳跃值；

P_8 ——左右跳跃值的平衡值， $P_8 = -(P_6/P_7) / (1 + P_6/P_7)$ ；

P_9 ——波峰宽度。

利用上述九个参数来描述一个波峰，并且用它们来比较两个波峰的相似程度，显然比用相关对比法精确，它更接近于人工对比的方法。

其他类型的曲线元也可以用恰当的参数来定义它们的图形矢量。

3) 对比方法

首先，从不同的曲线上找出相同类型的曲线元，当辨别出相同类型的两个曲线元时，便对其相应的上下边界（拐点）作对比，并找出相关边界的深度差。

相关边界常采用相似系数确定。用 e 、 e' 分别表示两曲线中两个相似波峰， $V(e')$ ， $V'(e')_i$ 表示曲线元 e 、 e' 特征的第 i 个参数，则相似系数 K_L 为：

$$K_L = \sum_{i=1}^9 [V(e)_i - V'(e')_i]^2 \quad (1-2-12)$$

K_L 反映了两个曲线元九个特征参数差异的总和。相似系数 K_L 越小，两个曲线元越相似。

由于地层是逐层沉积的，尽管地层有尖灭，但不可能交叉。对比过程中应采用禁止交叉对比的判断，即非交叉对比的原则。如图1-2-6所示，曲线1的曲线元 A 处于曲线元 B 之上，曲线2中的曲线元 A' 处于 B' 之下，则禁止曲线元 A 和曲线元 A' 进行对比。因为在一口井中不可能出现两条曲线上 A 、 B 层的不同层序。

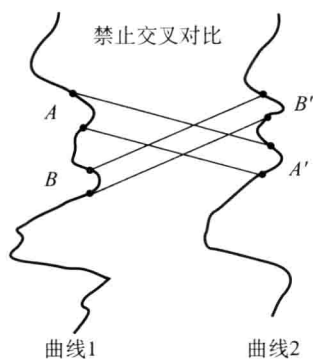


图 1-2-6 禁止交叉对比规则

3. 利用频率分析法进行深度对比

1) 基本原理

利用频率分析法进行测井曲线深度对比，是基于直接找到并确定两曲线的深度差异这种想法而出现的。

实际测井曲线，其中某些频率成分比其他频率成分在对比中来讲具有更多重要的信息，即每一条测井曲线上都有活跃程度不同的区段，同时活跃程度应当是一个层段或一个窗长内的测井值。

假设用 $E(Z)$ 表示曲线的活跃程度， N 表示窗长，则有：

$$E(Z) = \int_{Z-\frac{N}{2}}^{Z+\frac{N}{2}} [X(Z) - \bar{X}(Z)]^2 dZ \quad (1-2-13)$$

其中：

$$\bar{X}(Z) = \frac{1}{N} \int_{Z-\frac{N}{2}}^{Z+\frac{N}{2}} X(Z) dZ$$

对于离散的数字量，有如下的表达式：

$$E(Z) = \sum_{i=Z-\frac{N}{2}}^{Z+\frac{N}{2}} [X(i) - \bar{X}(Z)]^2 \quad (1-2-14)$$

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=Z-\frac{N}{2}}^{Z+\frac{N}{2}} X(i)$$

式 (1-2-14) 中的深度 Z 表示采样点序号 (整数), $X(i)$ 为采样点序号的函数, N 为一个窗长内的采样点数目。

上述表示活跃程度的公式, 可以理解为窗长 N 中测井信号的能量。测井曲线幅度 (即数值) 的平方是功率的量度, 而功率的积分为能量。

由于各种测井曲线均有干扰因素存在, 故还可以从滤波的角度去理解式 (1-2-14)。它相当于一个受控滤波长度为 N 的滤波器, 既考虑了信号的频率又考虑了幅度值, 并且 N 决定了所要分析的频率。从数理统计的角度看, 式 (1-2-14) 代表方差, 或者说代表散乱信号 $i = 1, 2, 3, \dots, 6$ 的分散度乘上一个乘数, 假设 $X(Z)$ 是一些信号 $X(i)$ 即噪声 X 的总和。如果 X_i 和 X_0 无关, 利用独立信号之和的分散度等于两信号分散度之和的原理, 则可将它们分开。例如, $E(X_0)$ 不变, 可将 $E(X_0)$ 视为截止值, 即 $E(X)$ 在 $E(X_0)$ 之下不会有信息。

利用方程式 (1-2-14) 时, 还应注意到 $E(Z)$ 的刻度受采样密度、窗长及测井曲线不同刻度类型的影响。应将 $E(Z)$ 进行规格化或标准化处理。

2) 对比方法

为了对比两条曲线, 应先在基本曲线上找出一些特征, 对比时将这些特征与被对比曲线上的相似特征相联系。测井曲线最基本的特征是所谓单一斜坡, 即曲线一直上升或一直下降。通常用比较稳定的层段 (如砂泥岩剖面中的泥岩段) 分隔的斜坡的相对位置来决定曲线的特征。

为了得到正确的对比, 除考虑每条曲线上有意义的单一特征外, 还应根据单一特征的相对位置, 找出两条曲线上的相匹配的较大特征。然后再利用单一特征进行点与点间的对比。如果两条曲线上两个斜坡满足以下条件, 则认为两个斜坡是相似的:

- (1) 它们有类似的陡度和高度;
- (2) 它们向同一个方向变化。

所谓两个斜坡匹配, 是指两个斜坡相似, 并且它们之间的距离小于探索长度。

两个斜坡相似的第一个条件, 满足活跃程度公式 (1-2-14)。例如, 两个斜坡相差不超过 2 就认为两个斜坡为相似, 由于活度 E 是平方量度, 故两个斜坡的活度不超过 4 就是相似的。第二个条件是在指定的深度上决定曲线增大或减小的方向。为了较准确地确定曲线的方向, 应在滤波窗长 N 的范围内确定曲线占优势的斜坡方向。确定斜坡方向的一种办法是先计算出一个滤波窗长 (N) 内测井曲线的平均值 $\bar{X}_Z$, 并将它与分析深度 Z 之上与之

下一个滤波窗长内测井数据比较。若分析深度之下一个 N 内的测井值多数小于平均值 $\bar{X}_z$ ，分析深度之上一个 N 内的测井值多数大于 $\bar{X}_z$ ，则代表斜坡增加的方向。

依据上述方法可以找出两条曲线上相匹配的单一斜坡，但必须考虑相似的两大特征，即在相似的两大特征（大的斜坡）中相似点越多，就越能比较正确地进行大特征对比，找出两者的位移。

两大特征间的位移（深度差别）只能大体上确定，它可由两大特征中多数相匹配的单一斜坡的位移统计给出。

二、测井曲线深度校正技术

经上述测井曲线间的深度对比，找出对应层位间的深度差后，经深度编辑便可使测井曲线有完全一致的深度对应关系。

1. 深度对齐

经上述曲线间的深度对比，若发现对比曲线的深度有系统误差，或者由于组合测井仪中各仪器的记录点不同及各种井下仪器的零长不同，使得它们的深度不一致，应将各种测井曲线的记录点深度对齐。对于数字记录可采用数字延迟方法，如在存储器中移动若干个单元来达到深度对齐。

设基准曲线的记录点深度为 h_0 ，第 i 条曲线的起始深度为 h_i ，若每米有 8 个采样点，每个采样点的数据占一个单元，则对比曲线在存储器中移动的单元数 M 为：

$$M = (h_0 - h_i) \cdot 8$$

移动之前应作如下判断，若有：

- (1) $h_0 = h_i$ ， $M = 0$ ，这时两条曲线深度一致，不作移动；
- (2) $h_0 > h_i$ ， $M > 0$ ，第 i 条曲线应向前（深度增大）移动 M 个单元；
- (3) $h_0 < h_i$ ， $M < 0$ ，第 i 条曲线应向后（深度减小）移动 M 个单元。

2. 曲线压缩与伸展

对测井曲线的某些层段的深度进行压缩或伸展，就是平常所谓的深度平差。例如，对比曲线的某一些组段的顶、底深度间隔 $d_{22} - d_{11}$ 大于基本曲线同一组段间的深度间隔 $d_{12} - d_{11}$ ，这时就应将 $d_{22} - d_{21}$ 间的测井数据压缩到与 $d_{12} - d_{11}$ 相同的深度间隔内；反之，就应将对比曲线某一组段内的测井数据，通过增大采样间隔的方法，将曲线进行拉长。

下面以深度压缩为例加以说明。如图 1-2-7 所示，曲线 C_1 为基准曲线，曲线 C_2 为对比曲线。经对比，曲线 C_2 深度为 $d_{22} - d_{21}$ 层段的曲线部分与曲线 C_1 深度为 $d_{12} - d_{11}$ 层段相当，但深度之间有 $|d_{22} - d_{21}| > |d_{12} - d_{11}|$ 。应将深度差 $(d_{22} - d_{21}) - (d_{12} - d_{11})$ 在 $d_{22} - d_{21}$ 间经平差去掉。

进行这种深度平差的基本步骤是：

- (1) 首先在 C_2 曲线上找出与 C_1 曲线的采样深度 d_s 相对应的深度 d_y ，因为：

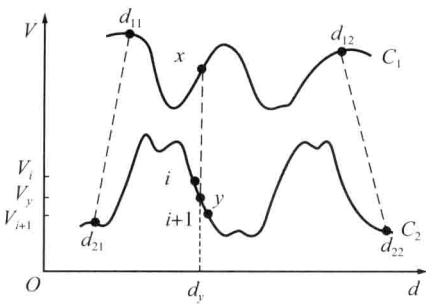


图 1-2-7 测井曲线压缩示意图