

# 应用GM(1,1)模型 分析反射波振幅与频率特征

曹 辉\*

(地矿部石油物探研究所)

## 摘 要

曹辉. 应用GM(1,1)模型分析反射波振幅与频率特征. 石油地球物理勘探, 1995, 30(1): 91~99

GM(1,1)模型的变化趋势不同,建模所用参数反映的物理机制也不同。本文应用这种灰色系统理论中的GM(1,1)模型,分析反射波的振幅与频率特征所反映的地质信息。并介绍了GM(1,1)模型的建模过程,给出了合成与实际数据的建模例子。合成数据试算结果表明:当地层厚度变化而岩性不变时,振幅与频率的GM(1,1)模型的变化趋势较接近;当地层厚度不变而岩性变化时,振幅与频率的GM(1,1)模型的变化趋势差异较大。应用这些特征,对SN地区实际反射波振幅和频率所反映的地质信息进行了分析。该方法具有建模简单、所建模型直观、便于分析的特点。

**主题词** 灰色系统 GM(1,1)模型 反射波 振幅 频率 地层结构 岩性

## ABSTRACT

Cao Hui. Analysing the amplitude and frequency of reflection waves by GM(1,1) model, OGP, 1995, 30(1): 91~99

The different variation tendencies of GM(1,1) models say that their parameters reflect different physical mechanisms. The GM(1,1) model in grey system theory is used to analyse the geological informations indicated by the amplitudes and frequencies of reflection waves. The article describes how to construct GM(1,1) model and shows the model examples of synthetic and actual data. Synthetic data result leads to the conclusion that the GM(1,1) models of amplitude and frequency show similar variation tendencies when formation thickness changes but lithology remains unchanged, and that they exhibit quite different variation tendencies when the thickness remains unchanged but lithology changes. The geological informations indicated by amplitudes and frequencies of reflection waves in SN area are analysed on the basis of the conclusion. This method involves simple model construction, and the constructed model is characterized by good visualization and easy analysis.

**Subject heading:** grey system, GM(1,1) model, reflection wave, amplitude, frequency, stratigraphic structure, lithology

\* Cao Hui, Petroleum Geophysical Research Institute subordinate to Ministry of Geology and Minerals, No. 21 Weigang, Nanjing City, Jiangsu Province, Postcode: 210014

本文于1993年12月7日收到。

## 引言

反射波的振幅与频率特征是地震解释中常用的参数。正确识别振幅与频率所反映的地质信息,是正确解释的前提条件。但是,由于地下地质条件的复杂性和反问题的非唯一性,要弄清振幅与频率所反映的地质信息是很困难的。国内外已有不少学者对此进行过研究,例如:李庆忠(1987)<sup>[1]</sup>用模型记录研究含油气砂层的频率与振幅特征;苏盛甫(1988)<sup>[2]</sup>用模型记录研究薄储集层的反射特征;崔凤林等(1992)<sup>[3]</sup>用时频分析研究薄互层结构等。本文应用灰色系统理论中的 GM(1,1)模型,分析反射波振幅与频率所反映的地质信息。GM(1,1)模型是邓聚龙教授于 80 年代提出的灰色系统理论中最为常用的灰色模型(傅立,1992)<sup>[4]</sup>,其特点是:①建模所需信息较少;②不必知道原始数据分布的先验特征,对无规或服从任何分布的任意光滑离散的原始序列,可通过有限次的生成转化为有规序列;③建模精度较高,可保持原系统的特征,能较好地反映系统的实际状况。

一般认为,在薄互层结构中,振幅既与岩性有关,又与薄互层结构有关;而频率则主要与薄互层结构有关。但对实际反射波的振幅与频率而言,人们很难弄清它们是反映薄互层结构还是反映岩性信息。本文试图通过对不同模型的地震记录振幅与频率的建模,了解振幅与频率的 GM(1,1)模型随地层结构和岩性的变化规律,从而达到应用 GM(1,1)模型判断振幅与频率所包含的地质信息的目的。文章对 SN 地区实际反射波振幅与频率进行建模,分析了它们可能反映的地质信息。应用 GM(1,1)模型不仅能从理论上分析振幅、频率与地下地质因素的关系,而且能在实际资料解释中判别振幅与频率主要是反映地层结构信息还是反映岩性信息。无疑,这种应用反射波特征参数进行岩性与油气预测的方法是有现实意义的。

方法简介<sup>[4],[5]</sup>

## 数据标准化

数据标准化是将数据压缩到[0,1]区间,以便于对不同量级数据所建模型进行比较。设有数列  $X^{(0)} = \{x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n)\}$ , 令

$$\bar{x}^{(0)}(i) = \frac{x^{(0)}(i)}{\max_{1 \leq i \leq n} x^{(0)}(i)} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

则数列

$$\bar{X}^{(0)} = \{\bar{x}^{(0)}(1), \bar{x}^{(0)}(2), \dots, \bar{x}^{(0)}(n)\}$$

为标准化后的数列,简称标准数列。为方便起见,标准化数列仍记为  $X^{(0)}$ 。

## 累加生成

累加生成的目的是弱化原序列的随机性,使生成数据序列变成有规序列,为建模提供中间信息。设有标准数列

$$X^{(0)} = \{x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n)\}$$

对  $X^{(0)}$  作一次累加生成, 令

$$x^{(1)}(i) = \sum_{j=1}^i x^{(0)}(j) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

得到一次累加生成数列

$$X^{(1)} = \{x^{(0)}(1), \sum_{j=1}^2 x^{(0)}(j), \dots, \sum_{j=1}^n x^{(0)}(j)\}$$

### 离散序列光滑性检验

建模所需的离散序列必须是光滑离散函数。因此, 对离散序列进行光滑性检验, 是灰色建模的前提条件。设  $X^{(0)}$  为非负离散函数

$$X^{(0)} = \{x^{(0)}(i) \mid i = 1, 2, \dots, n\}$$

其累加生成成为

$$X^{(1)} = \{x^{(1)}(i) \mid i = 1, 2, \dots, n\}$$

令

$$\epsilon_i = x^{(0)}(i) / x^{(1)}(i-1) \quad (3)$$

当  $i \geq 3$  时,  $\epsilon_i = \{\epsilon_3, \epsilon_4, \dots, \epsilon_n\}$  是递减数列, 且有  $0 \leq \epsilon_i < 1$ ; 当  $n$  足够大时, 该数列收敛于零, 即称  $X^{(0)}$  为光滑离散函数。如果  $X^{(0)}$  为光滑离散函数, 则可按灰色系统建模法建模; 如果  $X^{(0)}$  不是光滑离散函数, 则可进行多次累加生成, 直至  $X^{(r)}$  ( $r$  为累加生成次数) 为光滑离散函数。

### GM(1,1)模型

GM(1,1)模型表示对一个变量用一阶微分方程建立的灰色模型。设有离散序列

$$X^{(0)} = \{x^{(0)}(i) \mid i = 1, 2, \dots, n\}$$

其一次累加生成成为

$$X^{(1)} = \left\{ \sum_{j=1}^i x^{(0)}(j) \mid i = 1, 2, \dots, n \right\}$$

则该离散序列的 GM(1,1)模型为

$$\frac{dX^{(1)}}{dt} + aX^{(1)} = u \quad (4)$$

其中

$$\begin{aligned} \hat{a} &= (a, u)^T = (B^T B)^{-1} B^T Y_N \\ Y_N &= (x^{(0)}(2), x^{(0)}(3), \dots, x^{(0)}(n))^T \\ B &= \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}(x^{(1)}(2) + x^{(1)}(1)) & 1 \\ -\frac{1}{2}(x^{(1)}(3) + x^{(1)}(2)) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -\frac{1}{2}(x^{(1)}(n) + x^{(1)}(n-1)) & 1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$(\cdot)^T$  表示转置矩阵,  $(\cdot)^{-1}$  表示逆矩阵。求出  $\hat{a}$  后, 解方程(4)得到 GM(1,1) 模型的响应函数

$$\hat{x}^{(1)}(i+1) = (x^{(0)}(1) - \frac{u}{a})e^{-ai} + \frac{u}{a} \quad (5)$$

## 应用例子

文中共给出了两个合成例子和一个实际例子。在两个合成例子中, 一个是楔形模型, 另一个是变速模型。这两个模型也许与地下实际地质模型有一定的差异, 但这并不影响本文研究的目的。

### 合成例子

#### 模型 A——楔形模型

设计该模型的目的是研究薄层条件下振幅与频率随地层厚度的变化特征。图 1 是模型, 图 2 是合成地震记录, 图 3 是该模型的振幅和频率曲线, 图 4 是振幅与频率的 GM(1,1) 模型的响应曲线。

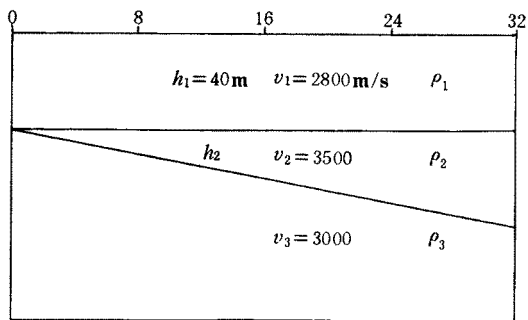


图 1 楔形模型(模型 A)

$$\rho_1 = \rho_2 = \rho_3, h_2(i) = 40i/32 \quad i = 1, 2, \dots, 32$$

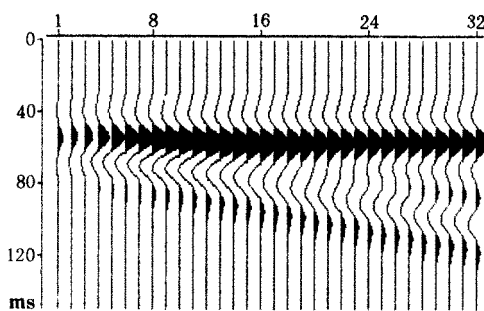


图 2 模型 A 的地震响应

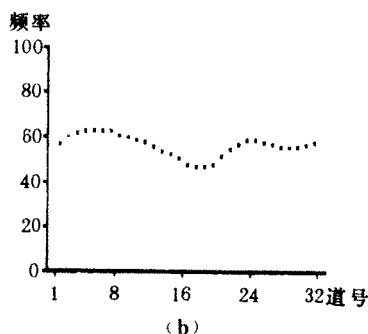
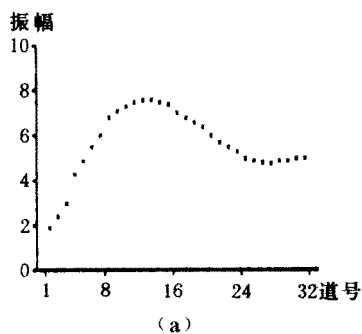


图 3 图 2 中振幅和频率与地层厚度的关系曲线

频率单位为 Hz, 下同

在这种情况下, 振幅和频率的 GM(1,1) 模型方程分别为

$$\frac{dX_a^{(1)}}{dt} + 0.002X_a^{(1)} = 0.776 \quad \frac{dX_f^{(1)}}{dt} + 0.003X_f^{(1)} = 0.944$$

响应函数  $x^{(1)}(k)$  分别为

$$x_a^{(1)}(k+1) = 416.016 - 415.785e^{-0.002k}$$

$$x_f^{(1)}(k+1) = 270.706 - 269.805e^{-0.003k}$$

在薄层条件下,频率随地层厚度的变化关系较为复杂(图3)。随着地层厚度的变化,振幅和频率的 GM(1,1)模型的变化趋势虽然有一定的差异,但差异不大,且两者均近似呈线性趋势变化(图4)。这表明,振幅和频率基本上是反映同一种物理机制——薄层厚度,而且两者反映薄层厚度信息的能力相近。

#### 模型 B——变速模型

设计该模型的目的是研究薄层条件下振幅和频率随地层岩性的变化特征。图5是模型,图6是合成地震记录,图7是该模型的振幅和频率特征曲线,图8是振幅和频率的 GM(1,1)模型响应曲线。

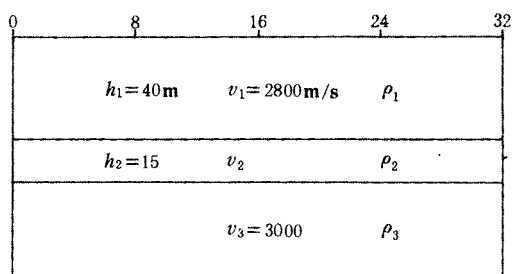


图5 变速模型(模型 B)

$$\rho_1 = \rho_2 = \rho_3, v_2(i) = 2800 + (32 - i) \times 50 \quad i = 1, 2, \dots, 32$$

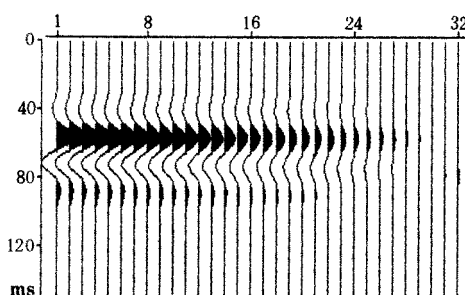
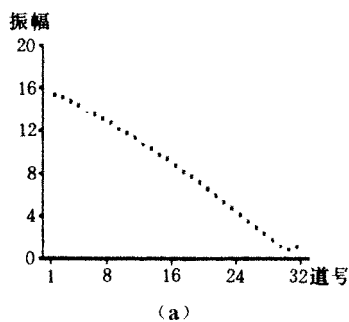
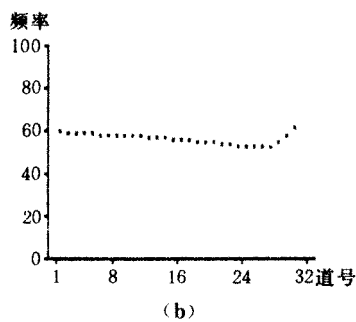


图6 模型 B 的地震响应



(a)



(b)

图7 图6中振幅和频率与地层速度(波阻抗)的关系曲线

振幅和频率的 GM(1,1)模型方程分别为

$$\frac{dX_a^{(1)}}{dt} + 0.061X_a^{(1)} = 1.209$$

$$\frac{dX_f^{(1)}}{dt} + 0.004X_f^{(1)} = 0.963$$

响应函数  $x^{(1)}(k)$  分别为

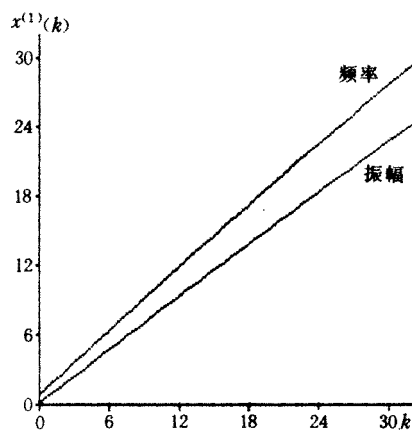


图4 图3中振幅和频率的 GM(1,1)模型的响应曲线

$$x_a^{(1)}(k+1) = 19.953 - 18.953e^{-0.061k}$$
$$x_f^{(1)}(k+1) = 262.944 - 261.979e^{-0.004k}$$

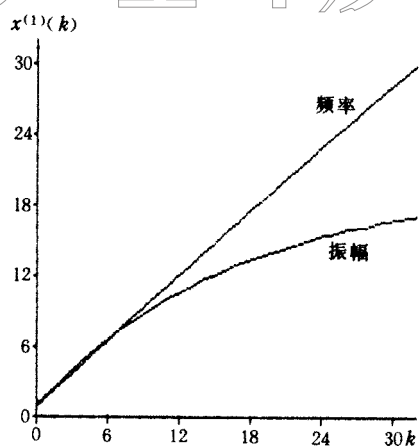


图 8 图 7 中振幅和频率的 GM(1,1)模型的响应曲线

在单薄层条件下,频率曲线基本上不随岩性(波阻抗)的变化而变化(图 7),也就是说,频率反映岩性信息的能力较差。随着地层岩性的变化,振幅和频率的 GM(1,1)模型的变化趋势差异较大(图 8)。这说明,振幅和频率反映的不是同一种物理机制,即它们反映地层岩性信息的能力差异较大。于是可以得出,频率反映岩性信息的能力较差,振幅反映岩性信息的能力较强。

在建模过程中,我们发现多数数据满足光滑离散函数的要求,也有一些数据在个别点上出现振荡,但总趋势仍然基本满足光滑离散函数的要求,因此可以直接建模。以模型 A 为例,其振幅和频率序列的  $\epsilon_i$  分别见表 1 和表 2。由表可见,模型 A 的振幅序列满足光滑离散函数的要求;频率序列除在  $i=19$  处出现振荡外,也基本满足光滑离散函数的要求。

表 1 模型 A 振幅序列光滑性检验结果

$i$	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
$\epsilon_a$	0.380	0.314	0.251	0.215	0.192	0.184	0.166	0.151	0.137	0.126	0.115	0.104	0.095	0.084	0.077
$i$	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
$\epsilon_a$	0.070	0.064	0.056	0.051	0.047	0.043	0.038	0.036	0.034	0.033	0.032	0.031	0.030	0.029	0.029

表 2 模型 A 频率序列光滑性检验结果

$i$	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
$\epsilon_f$	0.533	0.360	0.269	0.214	0.178	0.149	0.128	0.112	0.099	0.087	0.077	0.069	0.062	0.055	0.050
$i$	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
$\epsilon_f$	0.048	0.046	0.048	0.047	0.047	0.046	0.045	0.042	0.040	0.038	0.036	0.035	0.034	0.034	0.033

## 实际例子

图 9 是 SN 地区一段地震剖面。有关资料表明,该区目的层段纵向上薄互层发育,横向上岩相、岩性变化较大,给应用地震反射波振幅和频率参数研究地下地质信息带来很大困难。应用 GM(1,1)模型对该区目的层反射波的振幅和频率参数进行建模,以分析它们与地层结构和岩性的关系。

文中仅给出两套砂层(与上覆泥岩界面)反射同相轴(图 9 中的 AA' 和 BB')振幅和频率的 GM(1,1)模型的例子。图 10 和图 11 分别为同相轴 AA' 和 BB' 的振幅和频率曲线。由图可见,两条同相轴的振幅变化有一定的相关性,但也存在较大差异,特别是同相轴 AA' 的振幅背景值(约 1800)比同相轴 BB' 的振幅背景值(约 1200)大很多。仅从振幅量值来看,很容易认为第一

套砂岩(对应同相轴  $AA'$ )与上覆地层的岩性(波阻抗)差比第二套砂层(对应同相轴  $BB'$ )与上覆地层的岩性差要大。两条同相轴的频率曲线相关性较小,背景值差异也不明显(约 50),但同相轴  $BB'$  的频率变化比同相轴  $AA'$  的频率变化大。

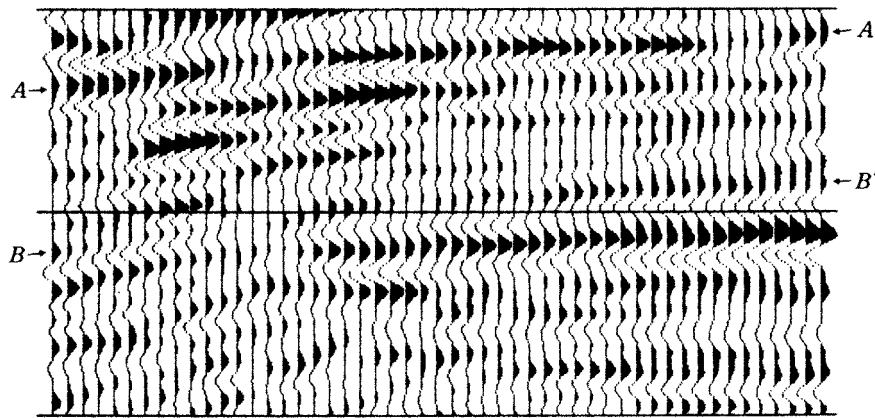


图 9 SN 地区地震时间剖面(部分)  
 $AA'$ 和  $BB'$ 分别表示箭头所指的同相轴

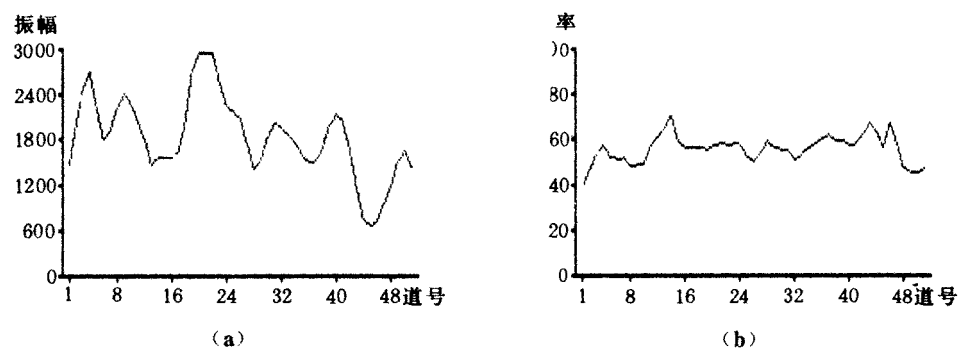


图 10 同相轴  $AA'$  的振幅和频率曲线

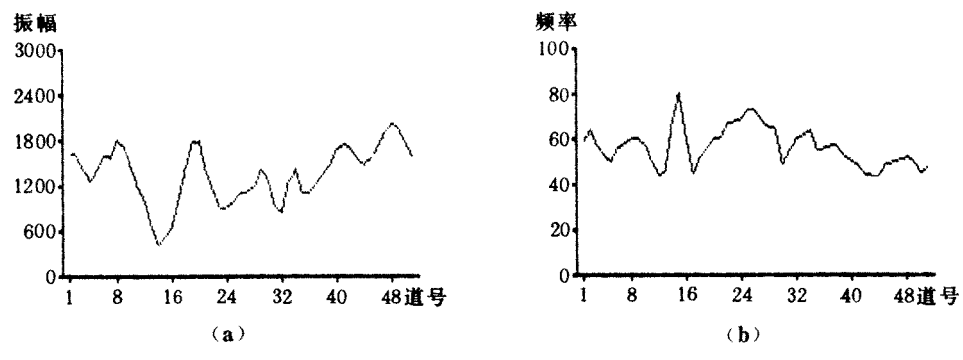


图 11 同相轴  $BB'$  的振幅和频率曲线

下面借助于 GM(1,1)模型,进一步分析引起这两套砂层反射波振幅和频率变化的原因。图 12 和图 13 分别为同相轴  $AA'$  和  $BB'$  的 GM(1,1)模型响应曲线。由图可见,同相轴  $AA'$  的 GM(1,1)模型介于模型 A 与模型 B 的 GM(1,1)之间,但其变化趋势更接近于模型 B。这表明

该反射同相轴的振幅既包含有砂层的成分信息,又包含有砂层的厚度信息。因对应于该砂层的反射频率变化较小(图 10),可以认为砂层的厚度变化也相对较小,所以振幅的变化主要反映的是砂层成分信息的变化。同相轴  $BB'$  的  $GM(1,1)$  模型与模型 A 的  $GM(1,1)$  模型较接近,这表明该反射同相轴的振幅所反映的信息与频率所反映的信息相近,即主要反映砂层的厚度信息;而它所包含的砂层成分变化的信息较少。从频率曲线变化剧烈(图 10)也可以看出,该砂层具有厚度变化较大的这一特点。

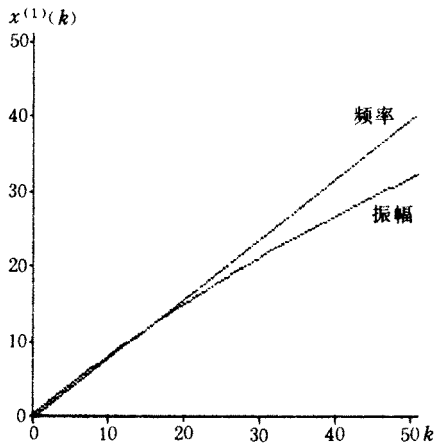


图 12 同相轴  $AA'$  的  $GM(1,1)$  模型响应曲线

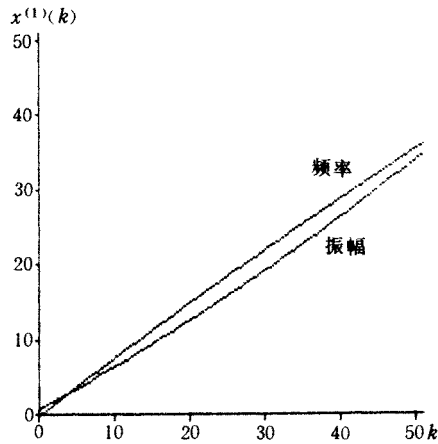


图 13 同相轴  $BB'$  的  $GM(1,1)$  模型响应曲线

综合分析,对这两套砂层有以下初步认识:第一套砂层厚度相对稳定,但成分变化较明显;第二套砂层厚度变化较大,但成分相对稳定。有关砂层成分的认识与实际井中资料相吻合:第一套砂层以泥质粗粉砂岩为主,夹有泥质粉砂岩和粉砂质泥层;第二套砂层成分相对单一,主要为细砂岩。井中资料揭示,第一套砂层较薄约 5 m,第二套砂层稍厚约 9 m。根据第一套砂层反射同相轴频率变化较小这一特征,可断定该砂层厚度变化较稳定,井中资料揭示该砂层厚度较薄约 5 m,这就可以推测第一套砂层反射同相轴振幅背景值较大可能是由薄层调谐效应引起,而不是由真正的岩性差引起。这一推测与井中岩性资料相吻合。因此,尽管第一套砂层的反射波振幅中包含有较多的岩性信息,但由于受薄层调谐的影响,仍不适合于定量岩性解释。

从以上分析可以看出,该区目的层段砂层较薄,且横向变化明显。与之对应的反射波振幅普遍受地层构造(厚度)的影响,有的影响还十分严重(如第二套砂层),在未进行薄层调谐校正之前,不宜直接用于岩性研究,特别是定量岩性研究。

## 结 束 语

本文作了应用灰色系统理论中的  $GM(1,1)$  模型对反射波的振幅和频率特征进行分析的尝试。 $GM(1,1)$  模型的建模过程简单,所建模型的精度较高,并且很直观、便于分析。应用  $GM(1,1)$  模型,可以判断反射波振幅受地层结构影响的程度。当反射波振幅与频率的  $GM(1,1)$  模型的变化趋势相近时,振幅主要反映的是地层结构(厚度)信息;当反射波振幅与频率的  $GM(1,1)$  模型的变化趋势差异较大时,振幅主要反映的是地层岩性(波阻抗)信息。利用这些特征,可以判断反射波振幅参数是否适合于岩性解释。结合钻井和测井资料,应用反射波特征参数的

GM(1,1)模型,能在一定的程度上对目的层的结构和成分进行定性与半定量分析,以达到岩性和油气预测的目的。

### 参 考 文 献

- 1 李庆忠. 含油气砂层的频率特征及振幅特征. 石油地球物理勘探, 1987, 22(1): 1~23
- 2 苏盛甫. 薄储集层的反射特征和定量解释方法. 石油地球物理勘探, 1988, 23(4): 387~402
- 3 崔凤林, 管叶君. 时频分析——薄互层结构研究的新途径. 石油物探, 1992, 31(2): 1~15
- 4 傅立. 灰色系统理论及其应用, 科学技术文献出版社, 1992
- 5 冯德益, 林命周, 顾瑾平, 蒋淳, 虞雪君. 模糊地震学, 地震出版社, 1992

### · 消息 ·

## 沉痛悼念翁文波先生

中国科学院院士、中国科协委员、中国地球物理学会名誉理事长、中国石油天然气总公司石油勘探开发科学研究院总工程师、《石油地球物理勘探》杂志学术顾问翁文波先生, 因病于 1994 年 11 月 18 日在北京逝世, 享年 82 岁。

翁文波先生生于 1912 年, 浙江鄞县(现宁波市)人。1934 年毕业于清华大学物理系, 以“天然地震预报”的论文获学士学位。1936~1939 年在英国伦敦大学皇家学院学习, 专攻应用物理学, 并以自行研制的重力探矿仪获得博士学位。1939 年正值第二次世界大战爆发, 他急于报效祖国, 毅然辗转回国, 虽然随身衣物荡然无存, 但随带的一台重力仪却保护得完整无缺, 并以此创建了我国第一个重力勘探队。1940 年 3 月他辞去中央大学教授职务, 奔赴老君庙油矿, 在十分艰苦条件下, 他研制和改装了磁测、电测仪器, 开创了我国磁法、电法勘探的先河。在此期间, 翁先生还陆续发表了“地球形态的发展”、“纬度和地极的变化”、“地球的化学成因”和“地球科学中的原子核问题”等专著。

建国以后, 翁先生潜心研究中国的油气地质, 发表了“中国按油气藏希望的区域划分”论著, 并与黄汲清、谢家荣先生共同编制了“中国含油气远景区划图”, 将松辽盆地列为最有远景的油气聚集区。翁先生积极参加大庆石油会战, 为大庆油田的发现作出了重大贡献, 为此荣获国家自然科学奖。

1966 年邢台大地震后, 他受周恩来总理的重托, 将自己的后半生奉献给预测论的研究和地震预报事业。经过 28 年的不懈奋斗, 他在这个几乎空白的领域终于取得了突破性的进展。他在预测论的研究领域, 先后发表了“初级数据分布”、“频率信息的保真”、“可公度性”、“预测论基础”、“关于地支纪历与预测”等专著。这些理论应用于地震、洪涝、旱灾等预报, 获得了重大的经济效益和社会效益, 赢得了国内外科学界的广泛关注和赞誉, 称他为“当代预测宗师”。他的这些研究成果, 标志着我国的预测科学已处于世界前沿。

翁先生的一生是为人民、为祖国无私奉献、鞠躬尽瘁的一生, 他的精神、品德和情操, 永远是我们学习的楷模。翁先生的逝世, 使我国失去一位优秀的科学家, 使石油战线失去了一位德高望重的老前辈, 使我们大家失去一位良师益友。

翁文波先生的业绩永存! 翁文波先生永垂不朽!

《石油地球物理勘探》编辑部