

# 核计算技术在核测井中的应用

潘洪进 方映东

(江汉石油管理局测井研究所)

**摘要:** 本文介绍了核计算技术在核测井中的应用概况及其具体应用实例。

## 一、引言

核测井内容十分丰富,它主要包括中子—中子、中子— $\gamma$ 、自然 $\gamma$ 能谱、 $\gamma$ — $\gamma$ 散射密度及岩性密度、脉冲中子激发 $\gamma$ 谱等测井方法。除自然 $\gamma$ 能谱测井仪外,其它核测井仪器都用到 $\gamma$ 源或中子源。当粒子进入地层后,粒子与地层核素发生各种相互作用或核反应后,反映地层性质的散射 $\gamma$ 射线或中子

束被探测器所接收。探测器接收的地层信息经处理后可以反映地层的岩性、孔隙度、密度和矿化度等地层物理特性,这一系列地层物理特性为石油地质勘探、开发和地层评价提供了准确、可靠的评价依据。但是,任何测井仪器的探测响应均受到仪器结构、井眼条件、地层因素、源粒子能量及温度等因素影响。长期以来,仪器响应及环境影响因素校正等问题都是依靠实体物理模型模拟地层条件来解决。但是实体物理模型所模拟的地层条件

有限、建井数量有限,投资较大,建井周期长且还存在一些技术上的困难。另外,所建的有限模型井,只能得到为数不多的几个离散的数据点,这有限的数据库制作的图板,很难得到可信的、准确的连续曲线。现在能否不依靠实体物理模型,而建立数学物理模型,再通过理论计算求仪器响应和环境影响因素校正的图板呢?

随着现代科学技术的发展,特别是核理论、核工程计算及电子计算机应用的发展,核测井数值模拟计算在核测井理论研究中也获得了迅速的发展。因为,核测井数值模拟计算可以方便地设置各种虚拟条件及微扰变化,从而对各种影响因素进行分解研究,这在实体物理模型是难以办到的。核测井数值模拟计算的优点是:成本低,周期快,虚拟条件任意等。一个最优化的核测井数值模拟计算程序可为各种核测井仪器使用。

七十年代末,人们开始注意把原子能工业成就移植到核测井领域中,随之出现了一系列核测井数值模拟计算研究成果。从此,核测井数值模拟计算将逐步地取代或减少依靠实体物理模型解决正演问题。目前,世界上多数测井公司的新仪器设计及研制过程中仪器响应和环境影响因素校正问题都依靠测井数值模拟计算解决。

## 二、核测井数值模拟计算

核地球物理测井学作为应用学科,它研究的对象基本可归纳为两类:正演问题和反演问题。所谓正演问题——是研究给定地质条件下,粒子的空间分布。反演问题——是根据测量仪器所记录的物理场,来研究地质结构及成份。因此,研究仪器响应、环境校正问题是正演,推断地层性质则是反演。引言中所述的实体物理模型和核测井数值模拟计算都属于正演。

核测井数值模拟计算方法,实质上是求

解核测井正演问题,也就是在具体测井条件下求解粒子输运问题的玻尔兹曼方程,从而得到 $\gamma$ 射线或中子通量的空间分布,并将此通量转换成探测器响应值。由于玻尔兹曼方程是一个微分-积分方程,对于实际测井问题而言,无法求得分析解,只能用一些近似的数值方法求解。近十年来,由于核能工程及计算机技术的迅速发展,在反应堆物理和屏蔽计算中发展了一系列求解粒子输运问题的玻尔兹曼方程的有效方法和程序,并且这些方法和程序原则上均可用到核测井问题的正演。另外,近几年来建立了系统的核数据库,例如美国的 ENDF/B 和 ENDL,这些数据库包括 $\gamma$ 射线和中子的连续能量,对于这些数据库略加修改,就可以用于核测井。苏联还专门建立核测井数据库 Б-1, Б-2 及 BHAb。

核测井问题的数值模拟计算有两类不同的方法:一类是所谓确定论方法,其实质是用数值方法求解粒子输运问题的玻尔兹曼方程。该方法对能量采用分群处理,对粒子运动方向角坐标采用坐标离散法处理,并用级数展开,取前面几项就可以达到比较高阶近似。然后用数值方法在计算机上直接求解粒子运动的玻尔兹曼方程,最后得到粒子通量分布。这些方法包括扩散近似, $P_N$ 近似及 $S_N$ 近似。但是它们限于一维和二维。表 1 列出了离散坐标二维和三维 DOT 程序。

表 1 二维、三维离散坐标程序

软件名程	提供单位	几何条件
DOT4.3	ORNL	(R,Z)(R, $\theta$ )(X,Y)
TWODANT	LANL	(R,Z)(R, $\theta$ )(X,Y)
PALLAS-20	JAPAN	(R,Z)
TRIDENT	LANL	三角形状
DIAMANT2	KFK	三角形状(等边)
TWOHEX	LANL	三角形状(等边)
THRETRAN	LANL	(X,Y,Z)
ENSEMBLE	JAPAN	(X,Y,Z)

表 1 列出这类程序计算时间比较短,它

能提供地质学上有关解,但没有多维-时间软件,虽有三维 DOT 程序,但仍不能解决测井大圆柱体的几何条件的核测井问题。英国 J. Wood 等人的多群  $P_N$  近似采用有限元方法的 TRI PAC 程序已成功地用于中子-中子测井问题模拟计算。

核测井问题数值模拟计算的另一类方法称蒙特卡罗(Monte Carlo)方法。这种方法并不直接解粒子运动的玻尔兹曼方程,而是对给定的问题作出相应的随机模型,并用一系列随机数模拟,利用跟踪大量粒子运动的历史方法完成粒子输运问题的正演。用于此目的许多程序早就用于核反应堆物理设计和屏蔽计算,例如美国 LOS ALAMOS NATIONAL LABORATORY(LANL)的 MCNP 程序和英国原子能研究署(AERE)的 MCBEND 程序。近来 R. P. Gardner 等人开发出脉冲中子测井和双源距补偿中子测井专用的蒙特卡罗程序,分别称为 MCNPL 和 MCDSNL 程序。

在上述两类方法中,蒙特卡罗方法原则上讲是一种精确的方法,因为它对复杂的几何条件有很好的适应。因此,对核测井仪器、井眼环境等很多复杂的几何条件特别适用。不足之处是该方法耗时较长、费用高。所以,在许多情况下仍采用确定论方法。例如在中子-中子测井中应用确定论方法十分广泛,在实践中往往是两种方法相互补充。

此外, $\gamma$ - $\gamma$ 及 $\gamma$ 能谱测井中也相应发展一系列专用核测井数值模拟计算程序,如 DINT, GAMERS, ANISN, ENFOLD 等等。

上述两类核测井数值模拟计算程序已为物理模型所证实,并能提供四方面资料:①新仪器的设计,包括放射源类型、尺寸、强度、能量和源距等参数的选择;②确定仪器响应以及岩性、井眼、矿化度等影响因素的校正;③改进目前核测井仪器的设计;④仪器测量结果的解释。通过模拟计算可以进一步了解核

测井的物理过程,这将有助于克服测井过程中遇到的问题及发展新的测井仪器等。

### 三、核测井数值模拟计算的具体应用

目前,世界各测井公司的核测井新仪器设计及环境校正图板都是通过数值模拟计算,使所设计的仪器及资料解释达到最优化程度。

#### 1. 双源距补偿中子 MCDSNL 程序

该程序是 R. P. Gardner 设计的蒙特卡罗程序,它能模拟计算裸眼井和套管井条件下的仪器响应及远、近两个  $^3\text{He}$  计数管的计数率。它与通用的 MCNP 蒙特卡罗程序比较,可节省 CPU 时间一个数量级,表 2 给出各种孔隙度情况下近/远探测器的比值。

表 2 不同孔隙度的理论计算与实验值之比较

6" 井眼				
孔隙度	实验比值	计算比值	误差	CPU(h)
1.80%	2.213	2.355 ± 0.201	-6.41%	8.3
12.30%	4.752	4.659 ± 0.427	1.96%	11.8
25.50%	8.163	7.876 ± 0.723	3.52%	22.5
10" 井眼				
孔隙度	实验比值	计算比值	误差	CPU(h)
1.80%	2.926	3.014 ± 0.176	-3.01%	22.6
12.30%	5.469	5.312 ± 0.375	2.87%	30.3
25.60%	9.424	10.148 ± 0.740	-7.68%	48.5

从表 2 看出,模拟计算与实际仪器测量吻合较好。因此,补偿中子测井的多种复杂环境校正均可用 MCDSNP 程序进行模拟计算。

#### 2. 14MeV 脉冲中子寿命测井模拟计算

称为 MCNPL 的蒙特卡罗程序已用于模拟脉冲中子寿命测井的仪器响应,它能模拟裸眼井、套管井测量条件下双探测器的响应,即脉冲过后任一时间的  $\gamma$  射线响应,表 3

表 3 计算和固有Σ值

井眼条件	地层条件	蒙特卡罗计算		固有值	
		井眼	地层	井眼	地层
淡水	淡水	23.50	23.34	22.20	22.20
套管淡水	灰岩φ=18% 淡水S <sub>w</sub> =78%	28.95	10.59	22.20	9.74
套管淡水	灰岩φ=13% 淡水S <sub>w</sub> =90%	28.95	10.98	22.20	9.37
套管淡水	灰岩φ=26.2% 淡水S <sub>w</sub> =99.6%	29.38	14.20	22.20	11.48
套管淡水	砂岩φ=36.6% 油饱和S <sub>w</sub> =99%	30.16	14.02	22.20	13.18
套管 135 kppm 盐水	砂岩φ=36.6% 油饱和S <sub>w</sub> =99%	80.68	14.95	72.59	13.18
裸眼淡水		23.77	13.30	22.20	13.18
套管淡水	砂岩φ=35.4% 99%, 150kppm	29.99	37.98	22.20	32.64

列出了计算结果。

### 3. 热中子测井地层温度和压力校正

W·A·Gilchrist 等人采用离散坐标和蒙特卡罗两种方法模拟计算了热中子测井地层温度和压力校正,很显然这种条件在实体物理模型中很难实现测量,但利用数值模拟计算却可以完成。数值模拟计算校正结果表示在图 1 中。另外也可以确定温度影响原因一半是密度引起,另一半是由于中子谱的漂移引起的。

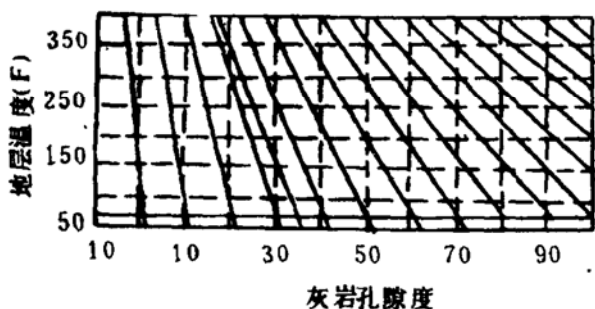


图 1. 热中子孔隙度仪地层温度校正

### 4. 加速器补偿中子孔隙度测井响应的模拟计算

热中子孔隙度测井,过去都采用 <sup>20</sup>Ci Am-Be 中子源,今改用 14MeV 加速器中子源,但孔隙度灵敏度比 Am-Be 中子源低。R·Hoades 等人在设计该仪器时,预先用二维离散坐标 DOTIV 程序进行模拟计算,得到一个稳态玻尔兹曼输运方程解,有关新老仪器孔隙度灵敏度统计误差列在表 4 中。

表 4. 同位素和加速器源的补偿中子测井孔隙度灵敏度统计误差计算结果

孔隙度	孔隙度灵敏度		孔隙度统计误差 [(op)1(pu)]	
	仪器用加速器源	仪器用同位素源	加速器源	同位素源
5	0.0682	0.0583	0.5	0.4
10	0.0393	0.0408	1.0	0.6
15	0.0233	0.0299	1.8	1.0
20	0.0175	0.0272	2.6	1.2
25	0.0144	0.0227	3.3	1.6
30	0.0123	0.0192	4.1	1.9
35	0.0102	0.0160	5.1	2.8
40	0.0083	0.0125	6.3	3.5

由表 4 明显看出,当加速器中子源为  $1 \times 10^8$  n/秒时,在中等到较高孔隙度范围,加速器补偿中子测井仪孔隙度灵敏度约为同位素源补偿中子测井仪的三分之二,在低孔隙度时甚至超过。计数表明,当发生器通量达到  $5 \times 10^8$  n/秒时,加速器源和同位素源补偿中子测井仪的孔隙度灵敏度基本一致。在  $4 \times 10^8$  n/秒通量时,加速器源补偿中子测井仪器孔隙度统计误差比同位素源仪器低。

### 5. 14MeV 中子次生γ能谱测井仪 (IGS) 响应的模拟计算

IGS 次生 γ 能谱测井仪主要测量地层中 14MeV 快中子所引起的非弹性散射和俘获 γ 谱,从分析 γ 谱中得到地层有关参数(如 C/O, Si/Ca 等)。目前,有多种数值模拟计算技术,主要有 H·Dean (LANL) 的三维 γ 谱模拟程

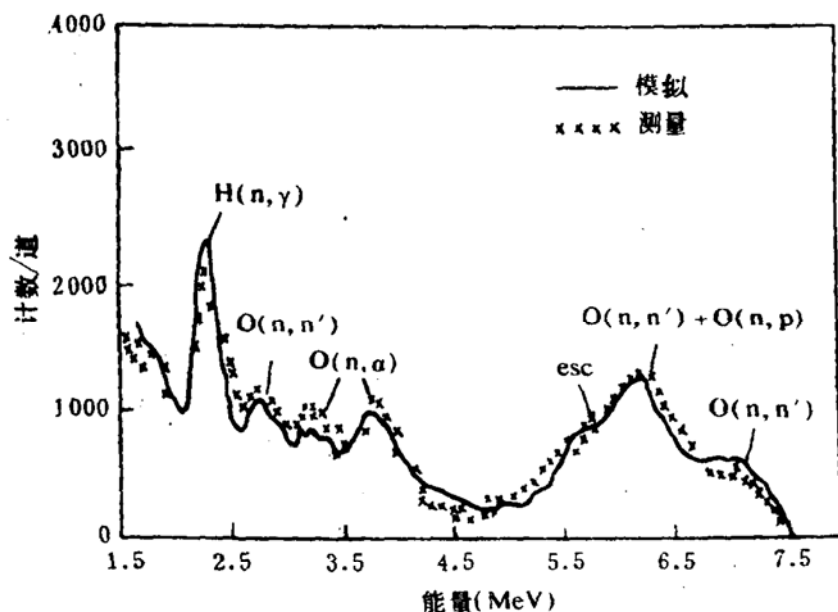


图 2. 在水中 IGS 非弹性散射  $\gamma$  谱

序,它主要包括两部分:即通用的蒙特卡罗 MCNP 程序和 GMRSH 程序。MCNP 程序通过运算得到探测器表面  $\gamma$  射线通量; GMRSH 程序模拟探测器响应,还有用 ENFH 程序把通量积分褶成探测器响应函数。图 2 表示在水中 14MeV 中子的计算和测量  $\gamma$  谱比较。

### 6. 自然伽玛能谱测井系统矩阵系数的模拟计算

自然伽玛能谱测井仪主要测量地层中天然放射性元素 U、Th、K。目前已推广应用到各种同位素示踪元素能谱测量,而测量地层中元素含量的基本方程为

$$CR = [A][X].$$

矩阵 A 与仪器测量系统、地层、井眼环境及同位素有关,过去一般由物理模型确定 A。但是,物理模型有限,不能对复杂的环境进行校正。因此,不少测井公司利用数值模拟计算方法得到各种条件下矩阵 A。主要由下列四个程序计算获得刻度矩阵 A: ① 用 DINT 程序计算模型中所有材料的  $\gamma$  射线吸收截面; ② 采用类似于蒙特卡罗方法的 GAMRES 程序模拟计算  $\gamma$  射线与闪烁探测器相互作用,然后用近似的方法处理电子输运,把电子能量转换成闪烁体的光输出; ③ 一

维离散坐标方法 ANISN 程序计算控制器表面  $\gamma$  射线通量,得到静态玻尔兹曼方程解; ④ 用 ENFOLD 程序和 ANISN 程序模拟探测器响应,得到模拟脉冲高度谱,从而获得刻度矩阵 A。上面的计算已在 Grand Junction 试验装置中得到证实,说明结果是可靠和正确的。

### 7. 岩性密度测井仪响应的数值模拟计算

地层岩性取决于它的化学成份组成,因此测量地层中平均原子序数  $\bar{Z}$ ,用  $\bar{Z}$  就可以表示地层岩性。岩性密度测井仪不仅给出地层密度值,同时还给出地层中岩石光电吸收

因子  $P_1$  值  $[P_1 = \sum_i (\frac{Z_i}{10})^{4.75}]$ 。仪器响应及环境校正目前都采用蒙特卡罗程序计算  $P_1$  值。表 5 是某些计算结果。

表 5 蒙特卡罗法的 MCNP 程序计算的  $P_1$  值

地层	孔隙度	$P_1$	$\rho$
灰岩	0	5.08	2.71
	28	4.44	2.71
	42	4.02	2.00
NaCl	0	4.66	2.17
白云岩	0	3.14	2.85
	46	2.45	2.00
Al/Mg	0	2.79	2.65
Al	0	2.62	2.70
SiO <sub>2</sub>	0	1.81	2.65
	50	1.38	1.83
SCl	0	6.11	2.71
			2.02

#### 四、结束语

核测井数值模拟计算,在国外已普遍应用,它能使仪器设计、环境影响校正达到最优化。同时也可节省大量物理模型的建造费用、人力及物力。我国在这方面几乎是空白,少数研究单位刚刚着手此方面的研究工作。笔者确信核工程计算成果将很快转移到核测井领域里,必将是核测井技术跃上一个飞跃的新起点。

#### 参考文献

1. Patrick · D · Soron, (IEEE Transaction on Nuclear Science)  
Vol . 35 NO . 1 1988. P847 .
2. R · P · Gardner, K · Verghese (IEEE  
Transaction on Nuclear Science)  
Vol . 35 NO . 1 1988. P882
3. H · K Chai, K · Verghese, Nuclear Geophysics  
Vol 1, NO 1, 1987, P71
4. Rhoades, W. A (ORNL - 5851)
5. R. Hoades, M. L. Gartenel, The Log Aualgst ,  
1987. P528 - 537