

1-4-2019

Forward Algorithm of LWD Azimuthal Gamma

Qifeng Sun

1.College of Computer & Communication Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;;

Youxiang Duan

1.College of Computer & Communication Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;;

Yanan Yan

1.College of Computer & Communication Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;;

Hongqiang Li

1.College of Computer & Communication Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;;2.China Petrochemical Group Victory Drilling Technology Research Institute, Dongying 257000, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Forward Algorithm of LWD Azimuthal Gamma

Abstract

Abstract: The study of the LWD (Logging While Drilling) azimuthal gamma imaging mode under different geological structures can provide bases for fast and accurate identification of drilled formation. *The detection model of LWD azimuthal gamma is set up, and physical models of several positions of the formation and gamma detector is established, combining the descartes coordinate with the spherical coordinate, an azimuthal gamma log response algorithm under different position models is derived.* Comparing the simulated results with the measured results of the azimuthal gamma ray logging tool, it is proved that the algorithm can effectively simulate the response characteristics of the azimuthal gamma, and has a high accuracy. It simulates the gamma image and analyzes the characteristics of the image, which provides a theoretical basis for real-time geosteering.

Keywords

LWD azimuthal gamma, gamma ray flux, strata model, forward simulation

Recommended Citation

Sun Qifeng, Duan Youxiang, Yan Yanan, Li Hongqiang. Forward Algorithm of LWD Azimuthal Gamma[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(11): 4268-4276.

随钻方位伽马测井仪器响应数值模拟研究

孙歧峰¹, 段友祥¹, 闫亚男¹, 李洪强^{1,2}

(1. 中国石油大学(华东) 计算机与通信工程学院, 山东 青岛 266580; 2. 中国石化集团胜利钻井工艺研究院, 山东 东营 257000)

摘要: 研究不同地质构造下的随钻方位伽马成像模式能够为快速准确识别钻头穿越地层情况提供基础。建立了随钻方位伽马测井的模拟探测模型, 分析了方位伽马探测范围与地层相交于不同位置的物理模型, 将笛卡尔坐标与球坐标下的模型相结合, 导出了不同位置模型下的方位伽马测井响应模拟算法。将模拟结果与方位伽马测井仪实测结果对比, 证明了该算法可以有效模拟方位伽马响应特征, 具有较高的准确性。模拟了钻头钻遇地层时的图像并分析图像特征, 为实时地质导向提供了理论依据。

关键词: 随钻方位伽马; 伽马射线通量; 地层模型; 正演模拟

中图分类号: P631.6 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2018) 11-4268-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201811027

Forward Algorithm of LWD Azimuthal Gamma

Sun Qifeng¹, Duan Youxiang¹, Yan Yanan¹, Li Hongqiang^{1,2}

(1. College of Computer & Communication Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

2. China Petrochemical Group Victory Drilling Technology Research Institute, Dongying 257000, China)

Abstract: The study of the LWD (Logging While Drilling) azimuthal gamma imaging mode under different geological structures can provide bases for fast and accurate identification of drilled formation. The detection model of LWD azimuthal gamma is set up, and physical models of several positions of the formation and gamma detector is established, combining the descartes coordinate with the spherical coordinate, an azimuthal gamma log response algorithm under different position models is derived. Comparing the simulated results with the measured results of the azimuthal gamma ray logging tool, it is proved that the algorithm can effectively simulate the response characteristics of the azimuthal gamma, and has a high accuracy. It simulates the gamma image and analyzes the characteristics of the image, which provides a theoretical basis for real-time geosteering.

Keywords: LWD azimuthal gamma; gamma ray flux; strata model; forward simulation

引言

地质导向通过将钻井过程中的工程和地质参数进行实时上传, 快速分析得到钻进轨迹和钻遇地

质信息, 在此基础上控制井眼轨迹和优化钻井过程, 进而提高油层钻遇率和油气采收率。自然伽马测井根据不同地层伽马射线强度不同能够划分地质层位、确定砂岩泥质含量和定性判断岩层渗透率, 是地质导向的关键测量参数之一。自然伽马测井数据无法准确分析井筒周围的地层倾向情况, 方位伽马测井以常规自然伽马测井为基础, 仪器不同方向上的多个伽马探测器同时进行测量, 使伽马数



收稿日期: 2018-05-30 修回日期: 2018-06-27;
基金项目: “十三五”重大专项(2017ZX05009-001, 2016ZX05011-002), 中央高校基本科研业务费(18CX02020A);
作者简介: 孙歧峰(1976-), 男, 山东聊城, 博士, 讲师, 研究方向为计算图形图像技术与智能算法。

<http://www.china-simulation.com>

• 4268 •

据具有方位特性,可以更准确地获取钻头钻遇地层的情况,进而更有效地指导地质导向过程。

研究不同地质构造下的伽马仪器响应特征并建立经验识别模型,可帮助地质导向工程师快速确定钻头钻遇地层的情况。袁超^[1]、McKinny K 等^[2]、Jiaxin Wang 等^[3]在研究随钻方位伽马测井中使用了蒙特卡洛方法进行随钻方位伽马正演模拟,但该方法计算量大,效率低,不具有通用性;杨雪等^[4]根据不同地层所占探测范围的面积比例进行了自然伽马正演模拟,但忽略了伽马射线在地层中的衰减问题;邵才瑞等^[5]分析了伽马通量计算过程及原理,建立了自然伽马正演模型,但该模型比较简单,方位伽马中屏蔽层的存在加大了计算难度;Zhen Qin 等^[6]进行了带屏蔽层的两方位水平井随钻方位伽马测井数据正演模拟,只考虑了地层与探测范围相交的两种简单位置关系,没有分析复杂位置模型;Hezhu Yin 等^[7]采用不均匀分块累加代替积分模拟方位伽马探测,但分块累加与积分相比准确性较低。

针对目前随钻方位伽马正演模拟中存在的问题,本文基于方位伽马探测器的探测原理,分析了探测范围与地层相交的不同位置关系,建立了不同位置关系下的计算模型,进行了八方位随钻伽马数据的模拟,并与真实物理模型的随钻方位伽马测井成像结果进行了对比。

1 工具及地层模型

1.1 方位伽马探测仪

在随钻方位伽马测井中通常使用伽马闪烁计数器来检测地层中不同放射性元素(K , Th 和 U)的自然伽马射线。探测器安装在钻铤开槽中,开槽背面增加屏蔽层,探测器只能探测一定角度范围内的伽马射线,开槽角度控制探测器接收辐射光子量的角度范围。方位伽马探测要在钻铤上安装多个探测器,探测器均匀分布在钻铤四周。本文模拟八方位的随钻方位伽马测井数据,钻铤四周均匀分布 3

或 4 个伽马探测器,形成 8 个模拟伽马探测点。随钻方位伽马测井的三维立体模型如图 1 所示,随钻方位伽马探测器的井筒横截面如图 2 所示。

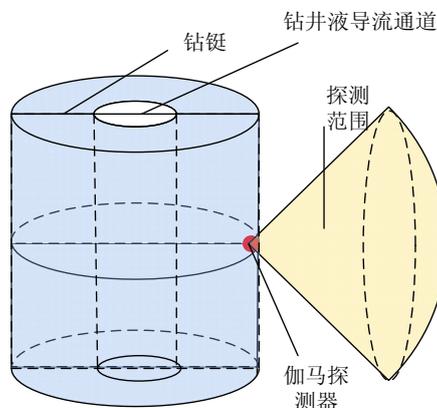


图 1 方位伽马测井三维立体模型图

Fig. 1 Model of gamma-ray logging tool in drilling collar

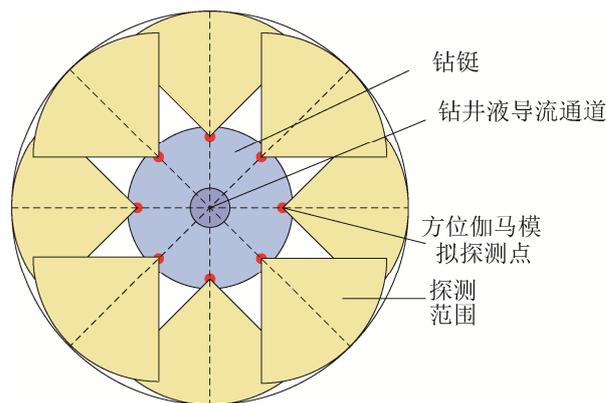


图 2 井筒截面示意图

Fig. 2 Cross-sectional schematic of wellbore

图 1 中灰色圆柱部分为钻铤,图中红色点为安装在钻铤中的伽马探测器,在钻铤四周均匀分布多个探测器,图中仅以其中一个示例,黄色部分为该探测器能够接收伽马射线的范围,该区域是一个顶角为 90 度的锥体和弓形的组合。图 2 为井筒横截面示意图,即为随钻方位伽马模拟模型,中心蓝色小圆柱为钻井液导流通道,浅灰色圆环为钻铤,八个红色点为八方位伽马模拟探测点,黄色扇形部分为每个探测点的测量范围。

1.2 宏观地层模型

为简化计算模型,不同地层相交界面可以看作

一个平面，一般地层模型如图3所示。

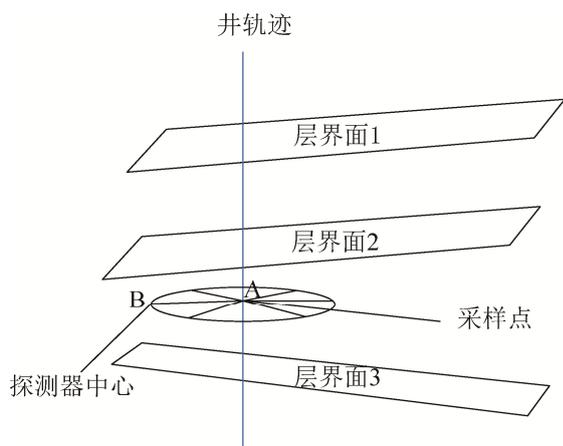


图3 地层模型示例
Fig. 3 Stratigraphic model

伽马正演过程如下：

(1) 定义不相交平面作为地层分界面，定义一条直线作为井轨迹，即钻头行进轨迹，如图中蓝色直线，选取直线上一点为测量起始点，设定一点为终点。在平面之间建立地层，为每个地层赋值相关地层参数：地层密度、放射性物质含量、单位放射性物质的放射性、地层吸收系数等。

(2) 在井轨迹上从当前点移动固定步长为采样点，如图中A点。

(3) 以A点为中心，以井轨迹方向向量为法向量、探测器与钻头中心径向距离为半径做平面圆，计算圆上的八等分点，图中B点即为一个等分点。以每个等分点为探测器中心，即积分计算中心，以等分点与采样点的连线作为该积分区域的中垂线方向，分析积分区域与地层的位置关系，选择对应相对位置的积分计算模型，计算此点接收到的伽马射线通量，即为该方位的随钻方位伽马数据。

(4) 以A点为当前点执行步骤(2)(3)，直至到达终点。

2 方位伽马正演算法

2.1 探测位置物理模型

在随钻方位伽马计算模型中，每个采样点的数

据转换为采样点周围8个测量点的伽马值，8个点相互独立，每个点单独计算不受其他点影响。随钻方位伽马测井正演算法的关键点在于分析伽马探测器与地层处于不同相对位置时的响应方程，本节主要分析伽马探测器与地层的不同相对位置关系。

根据探测器与地层界面的距离可将伽马探测器与地层位置关系分为2种情况：(1) 探测器探测范围内只包含一个地层，伽马数值只与所处地层有关，不受相邻地层影响；(2) 探测器探测范围内包含多个地层，伽马数值受相邻地层影响。对第1种情况，直接对探测范围进行积分，计算模型比较简单，此处不做分析；对第2种情况，根据探测范围与地层界面的具体关系又可细分为3种情况，见图4~6。

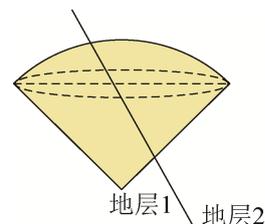


图4 平面与弓形和锥体同时相交
Fig. 4 Plane intersect with both the arch and cone

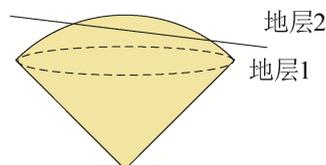


图5 平面仅与弓形相交
Fig. 5 Plane only intersect with the arch

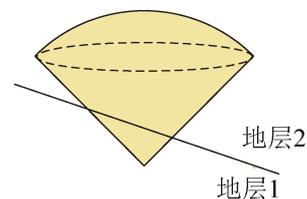


图6 平面仅与锥体相交
Fig. 6 Plane only intersect with the cone

2.2 计算模型

在无限大均质地层中伽马射线通量积分元如式(1)，当跨越地层时伽马射线通量积分元如式(2)。 ρ 为地层体积密度， q 为单位质量岩石中放射性物

质含量, a 为单位质量放射性物质单位时间放射伽马光子量, μ 、 μ_1 、 μ_2 ... 分别为不同地层伽马射线吸收系数, R 为放射源与接收点的距离, r 、 r_1 、 r_2 ... 分别为对应地层中的有效距离。

$$dJ_v = \frac{aq\rho}{4\pi R^2} e^{-\mu r} dv \quad (1)$$

$$dJ_v = \frac{aq\rho}{4\pi R^2} e^{-(\mu_1 r_1 + \mu_2 r_2 + \dots + \mu_i r_i)} dv \quad (2)$$

式(1)和式(2)转换为球坐标下的积分元分别如式(3)和式(4)所示。

$$dJ_v = \frac{aq\rho}{4\pi} \sin\theta e^{-\mu r} dr d\theta d\varphi \quad (3)$$

$$dJ_v = \frac{aq\rho}{4\pi} \sin\theta e^{-(\mu_1 r_1 + \mu_2 r_2 + \dots + \mu_i r_i)} dr d\theta d\varphi \quad (4)$$

伽马探测范围内只包含一个地层时, 伽马射线通量计算方式见式(5)。

$$J = \frac{aq\rho}{4\pi} \int_0^{r_0} e^{-\mu r} dr \int_0^\varphi \sin\theta d\theta \int_0^{2\pi} d\theta \quad (5)$$

式中: r_0 为伽马探测器的探测深度; φ 为锥体最外层的仰角, 根据开槽角度可得, $\varphi = \pi/4$ 。分析图 4~6 中不同区域的几何特点, 可导出不同位置情况下的伽马射线通量计算方式。

2.2.1 平面与弓形和锥体同时相交

平面与弓形和锥体同时相交时, 将图 4 的情况再次细分为地层面穿越中垂线与地层面不穿越中垂线两种情况, 如图 7 所示。

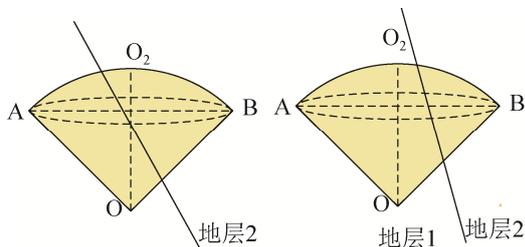


图 7 图 4 中的两种情况
Fig. 7 The two case of Fig.4

(1) 对图 7 第一种情况, 如图 8 所示, 将整个积分区域沿圆锥中垂线从中间切分, 将地层 2 内的部分分为两个部分。图 8 的正视图如图 9 所示, 在

正视图中, 地层面与弧 AB 相交于 D 点, 积分中心 O 在球面上的投影为 O_2 , OO_2 与 AB 相交于 O_1 , 圆 O_1 的俯视图如图 10 所示, OD 与 AB 的交点为 M 点。在圆 O_1 中过 M 点做与 AB 垂直的直线, 与圆分别交于 E、F 两点。探测范围的顶角为 $\pi/2$, 所以角 AOB 的大小为 $\pi/2$, 计算可得 $AB = \sqrt{2}r_0$, 即圆 O_1 的半径为 $\sqrt{2}r_0/2$ 。先计算弧面、地层与切分线围成区域的伽马射线通量。

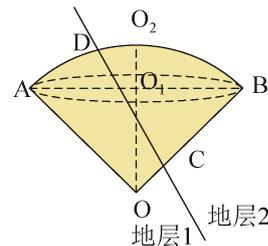


图 8 图 7 情况一的区域分割示意图
Fig. 8 Segmentation of first case of Fig.7

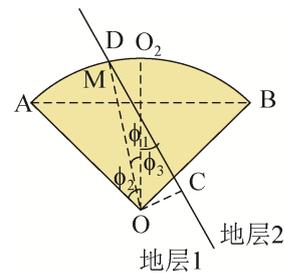


图 9 图 8 的正视图
Fig. 9 Elevation view of Fig.8

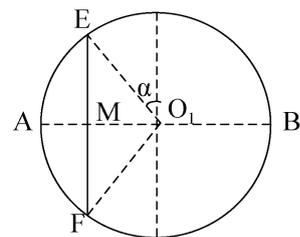


图 10 圆 O_1 俯视图
Fig. 10 Top view of circle O_1

按照图 10 的俯视图, 将该积分区域划分为两个扇形区域和一个三角形区域, 该区域伽马射线通量由式(6)计算。

$$J_{EDFO_2} = \frac{aq\rho}{4\pi} \int_{r_1}^{r_0} e^{-\mu_1 r_1 - \mu_2(r-r_1)} dr \int_0^{\varphi_2} \sin \varphi d\varphi \int_{\pi}^{\pi+\alpha} d\theta \times 2 + \frac{aq\rho}{4\pi} \int_{r_1}^{r_0} e^{-\mu_1 r_1 - \mu_2(r-r_1)} dr \int_0^{\varphi_1} \sin \varphi d\varphi \int_{\pi+\alpha}^{2\pi-\alpha} d\theta \quad (6)$$

式中： r_0 为伽马探测器探测深度，即OA长度； φ_2 为A的仰角； φ_1 为方位角不同时对应的仰角，由公式(8)计算， α 为E点方位角，由公式(7)计算。根据伽马探测器的开槽角度， $\varphi_2 = \pi/4$ 。

$$\alpha = \arcsin \frac{O_1 M}{\sqrt{2} r_0 / 2} \quad (7)$$

$$\varphi_1 = \arctan \frac{O_1 M \sec \theta}{\sqrt{2} r_0 / 2} \quad (8)$$

$$O_1 M = \tan\left(\frac{\pi}{2} - \arcsin \frac{d}{r_0}\right) - \left(\frac{\pi}{2} - \varphi_3\right) \times \frac{\sqrt{2}}{2} r_0 \quad (9)$$

式中： φ_3 为地层平面与圆锥中垂线OG的夹角，平面与直线夹角的计算此处不再赘述， d 为探测中心O与平面的距离，点与平面距离的计算此处不再赘述。若不存在地层分隔，该区域内的伽马射线通量由式(10)计算得到。

$$J_{EDFO_2} = \frac{aq\rho}{4\pi} \int_{r_1}^{r_0} e^{-\mu_1 r} dr \int_0^{\varphi_2} \sin \varphi d\varphi \int_{\pi}^{\pi+\alpha} d\theta \times 2 + \frac{aq\rho}{4\pi} \int_{r_1}^{r_0} e^{-\mu_1 r} dr \int_0^{\varphi_1} \sin \varphi d\varphi \int_{\pi+\alpha}^{2\pi-\alpha} d\theta \quad (10)$$

计算切分余下的位于地层2中右侧半锥体的伽马射线通量，计算公式如下：

$$J_{BCO_2} = \frac{aq\rho}{4\pi} \int_{r_1}^{r_0} e^{-\mu_1 r_1 - \mu_2(r-r_1)} dr \int_0^{\varphi_2} \sin \varphi d\varphi \int_0^{\pi} d\theta \quad (11)$$

φ_2 为点B的仰角，由开槽角度可得 $\varphi_2 = \pi/4$ ，只计算积分半锥体，所以方位角积分范围是0到 π 。 r_1 为图8中积分中心O到地层面的长度，将笛卡尔坐标下的平面方程转换为球坐标下的平面方程即可通过仰角 φ 和方位角 θ 直接计算地层面上任意点的 r 值。笛卡尔坐标下的一般平面方程如式(12)

所示，按照式(13)~(15)转换坐标，即可得到球坐标下的平面方程如式(16)所示。

$$Ax + By + Cz + D = 0 \quad (12)$$

$$x = r \sin \varphi \cos \theta \quad (13)$$

$$y = r \sin \varphi \sin \theta \quad (14)$$

$$z = r \cos \varphi \quad (15)$$

$$Ar \sin \varphi \cos \theta + Br \sin \varphi \sin \theta + Cr \cos \varphi + D = 0 \quad (16)$$

r_1 可通过公式(17)计算得到，当不存在地层分隔时，该区域伽马射线通量由公式(18)计算。

$$r_1 = \frac{-D}{A \sin \varphi \cos \theta + B \sin \varphi \sin \theta + C \cos \varphi} \quad (17)$$

$$J_{BCO_2} = \frac{aq\rho}{4\pi} \int_{r_1}^{r_0} e^{-\mu_1 r} dr \int_0^{\varphi_2} \sin \varphi d\varphi \int_0^{\pi} d\theta \quad (18)$$

综上所述，该条件下整个探测范围内的伽马射线通量计算见式(19)，式中 J_{AOB} 的计算参见式(5)。

$$J = J_{AOB} - J_{EDFO_2} - J_{BCO_2} + J_{EDFO_2} + J_{BCO_2} \quad (19)$$

(2) 对图7中的第二种情况，直接计算地层2中部分的伽马射线通量。

$$J_{BO} = \frac{aq\rho}{4\pi} \int_{r_1}^{r_0} e^{-\mu_1 r_1 - \mu_2(r-r_1)} dr \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \sin \varphi d\varphi \int_{\alpha}^{\pi-\alpha} d\theta \quad (20)$$

r_1 为平面上一点与积分中心O点的距离，计算方法见式(12)~(17)， α 计算参见式(7)， φ_1 计算参见式(8)， $\varphi_2 = \pi/4$ 。当不存在地层分隔时，该区域伽马射线通量由公式(21)计算。该条件下整个探测范围内的伽马射线通量由式(22)计算，式中 J_{AOB} 的计算参见式(5)。

$$J_{BO} = \frac{aq\rho}{4\pi} \int_{r_1}^{r_0} e^{-\mu_1 r} dr \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \sin \varphi d\varphi \int_{\alpha}^{\pi-\alpha} d\theta \quad (21)$$

$$J = J_{AOB} - J_{BO} + J_{BO} \quad (22)$$

2.2.2 平面仅与弓形相交

平面仅与弓形相交时，将图5的探测范围分割，如图11所示。

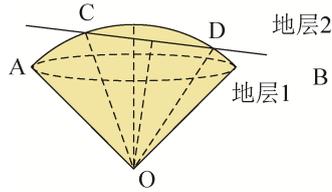


图 11 图 5 分割示意图
Fig. 11 Segmentation of Fig. 5

如图 11 所示, 地层面与弓形面相交, 交线为过点 C、D 的圆, 按照该圆上的点与 O 点连线将图 5 分割, 去除圆锥和弓形的最外层部分, 余下 COD 部分仍为圆锥体与弓形的组合体。将 COD 区域再次分割为 CODE 区域和 CEDF 区域, E 点为 OF 与 CD 的交点, 其正视图如图 12 所示, CEDF 区域的伽马射线通量由式(23)计算。

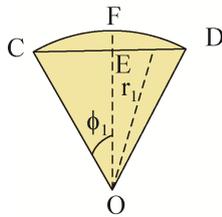


图 12 COD 区域正视图
Fig. 12 Elevation view of COD

$$J_{CEDF} = \frac{aq\rho}{4\pi} \int_{r_1}^{r_0} e^{-\mu_1 r_1 - \mu_2(r-r_1)} dr \int_0^{\phi_1} \sin \phi d\phi \int_0^{2\pi} d\theta \quad (23)$$

$$r_1 = d \sec \phi \quad (24)$$

式中: d 是图中 OE 的长度, 即积分中心与平面的距离; ϕ_1 为 C 和 D 的仰角, 由式(25)计算。当不存在地层分隔时, CEDF 区域的伽马射线通量由式(26)计算。

$$\phi_1 = \arccos \frac{d}{r_0} \quad (25)$$

$$J_{CEDF} = \frac{aq\rho}{4\pi} \int_{r_1}^{r_0} e^{-\mu r} dr \int_0^{\phi_1} \sin \phi d\phi \int_0^{2\pi} d\theta \quad (26)$$

整个探测范围内的积分由式(27)计算。 J_{AOB} 的值由式(5)计算。

$$J = J_{AOB} - J_{CEDF} + J_{CEDF} \quad (27)$$

2.2.3 平面仅与锥体相交

平面仅与锥体相交时, 将图 6 的探测范围分割, 如图 13 所示。

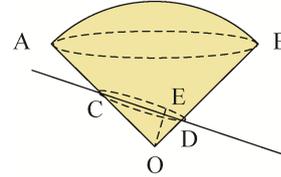


图 13 图 6 分割示意图
Fig. 13 Segmentation of Fig. 6

图 13 中 E 点为地层平面上一点。按照图 13 将探测区域分为 COD 区域和 ACDB 区域两个部分, 两个部分的伽马射线通量计算公式如下:

$$J_{COD} = \frac{aq\rho}{4\pi} \int_0^{r_1} e^{-\mu_1 r} dr \int_0^{\phi_2} \sin \phi d\phi \int_0^{2\pi} d\theta \quad (28)$$

$$J_{ACDB} = \frac{aq\rho}{4\pi} \int_{r_1}^{r_0} e^{-\mu_1 r_1 - \mu_2(r-r_1)} dr \int_0^{\phi_2} \sin \phi d\phi \int_0^{2\pi} d\theta \quad (29)$$

r_1 为图中 OE 长度, 即平面上一点到圆心 O 点的距离, 将笛卡尔坐标下的平面方程转换为球坐标下的平面方程即可通过仰角 ϕ 和方位角 θ 直接计算分割面上任一点的 r 值。具体计算过程见式(12)~(17)。 ϕ_2 为 A 和 B 的仰角, 根据伽马探测器的探测范围, $\phi_2 = \pi/4$ 。整个探测范围的伽马射线通量由式(30)计算得到。

$$J = J_{COD} + J_{ACDB} \quad (30)$$

3 实验与分析

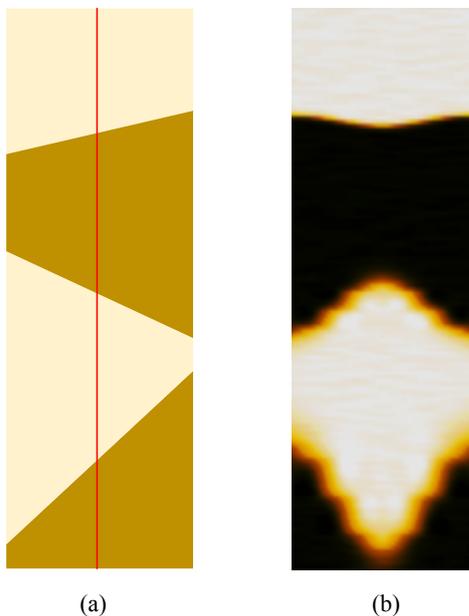
正演模型中地层模型为砂岩和泥岩, 分别代表低放射性地层和高放射性地层, 地层模型放射性含量等相关参数见表 1, K 每秒平均发射光子数为 3.4/gs, Th 每秒平均发射光子数为 10 000/gs, U 每秒平均发射光子数为 28 000/gs^[8-9]。方位伽马探测器探测范围 r_0 根据探测器的性质决定, 本文实验中取值为 $r_0 = 20$ cm。

表1 正演模型相关地层参数
Tab. 1 Related parameters of Gamma simulation

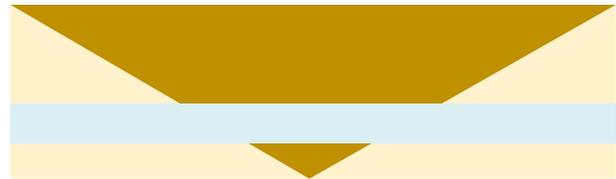
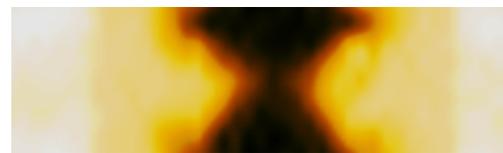
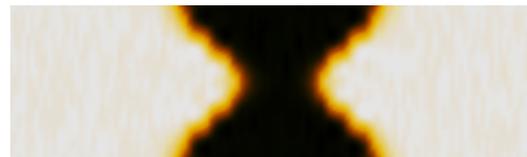
参数	$K/(mg/kg)$	$Th/(mg/kg)$	$U/(mg/kg)$	地层密度/(g/cm^3)	吸收系数/ cm^{-1}
砂岩	1.3	1.7	0.45	1.8	0.1
泥岩	2.7	11	3.2	2.65	0.08

3.1 模拟算法成像结果

为了验证该算法的可行性,建立了多地层模型进行正演模拟,图14(a)为地层模型图,图14(b)为随钻方位伽马模拟数据成像结果。3个地层面的地层倾角分别为 -45° 、 78.7° 、 -84.2° 。层面之间交替设置为低放射性地层和高放射性地层,具体放射性参数见表1。

图14 多地层模拟结果
Fig. 14 Simulation of multi-layer

为了验证该算法的正确性,本文设计了如图15所示实验地层模型,该地层为放射性尖灭地层。图中蓝色部分为水平井,深色部分为高放射性地层,浅色部分为低放射性地层,具体放射性参数见表1,放射性尖灭地层的两个层面夹角分别为 78.7° 、 -78.7° 。图16为该地层模型下的方位伽马测井仪器测井成像结果,图17为该地层模型下本文算法模拟结果成像图。

图15 实验地层模型
Fig. 15 Stratigraphic model of the experiment图16 方位伽马测井仪器成像结果
Fig. 16 Result of azimuthal gamma logging tool图17 本文算法模拟结果
Fig. 17 Simulation results of the algorithm

由图16和图17可看出,本文模拟算法与实验井筒实测结果基本一致。实验证明,本文提出的随钻方位伽马正演模拟算法能够有效模拟不同地层情况的随钻方位伽马数据,并且具有较好的准确性,能够满足随钻方位伽马正演的需求。

3.2 钻遇地层响应特征

随钻方位伽马测井可以探测井周360度方向上的伽马响应数值,当随钻方位伽马探测器从不同方向钻遇地层时,方位伽马的响应顺序有所不同,成像图上不同方位颜色变化顺序不同。当钻头钻遇或钻出放射性地层,显示在伽马图像上的特征为颜色突变。

利用本文算法,模拟不同方向钻遇地层的八方位伽马数据,利用所得数据分析仪器从不同方向钻

遇地层时的随钻方位伽马成像特点。地层模型如图 18 所示, 图中深色部分为高放射性地层, 浅色部分为低放射性地层, 红色线条为水平井轨迹。该地层模型下的方位伽马图像如图 19 所示, 第一次井筒下部首先钻遇放射性地层, 在图像中呈现为中间首先产生颜色突变; 第二次井筒上部首先钻遇放射性地层, 在图像中呈现为两侧首先产生颜色突变。由图可得, 当钻头从不同方向钻遇地层时, 方位伽马图像上不同方位出现颜色变化的顺序不同, 即根据方位伽马图像上颜色变化的特征, 可以分析钻头与地层接触时的不同位置关系。

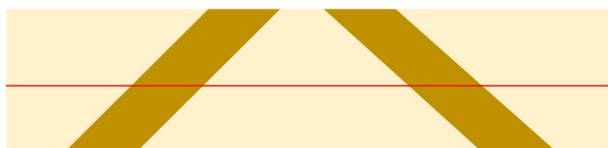


图 18 不同方向钻遇地层模型
Fig. 18 Drilled formation from different directions



图 19 不同方向钻遇地层成像结果
Fig. 19 Simulation result of Fig.18

根据地层构造模型, 对随钻方位伽马图像进行正演模拟, 可以指导钻井过程中钻遇地层的发现, 地层模型如图 20 所示, 模拟八方位的随钻方位伽马数据, 进行方位伽马成像, 成像结果如图 21 所示。

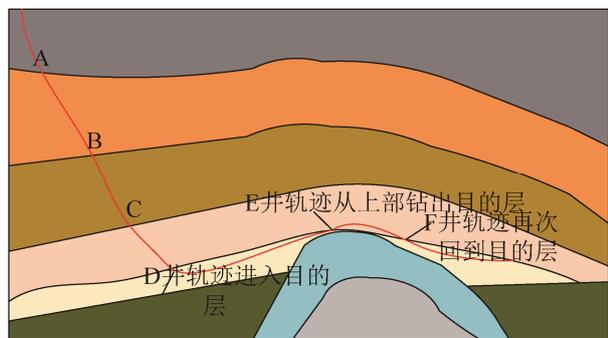


图 20 地层构造模型
Fig. 20 Geological structure model



图 21 图 20 地层模型对应的方位伽马成像图
Fig. 21 Simulation result of Fig.20

在地层模型中井轨迹六次穿过地层面, 图 20 中六个穿层点对应图 21 中六个颜色突变位置。在点 D 处井轨迹首次进入目的层, 在 E 点处井轨迹从目的层上方穿出, 在 F 点处再次进入目的层。在实际钻井中, 可以根据实钻方位伽马图像与正演模拟方位伽马图像比较, 实时判定钻头位置, 指导地质导向钻井。

4 结论

针对随钻方位伽马正演模拟研究存在的问题, 本文从伽马探测器的原理着手, 分析了伽马探测器的物理模型, 以及伽马探测器探测范围与地层的不同位置关系, 建立了不同相对位置下的物理模型, 导出了各种位置模型下的伽马射线通量计算模型, 模拟了八方位的随钻方位伽马数据。通过对比相同地层模型下的仪器实测数据与模拟数据, 证明了本文正演算法的准确性。通过正演模拟分析了不同方向钻遇地层时的方位伽马图像响应特征, 为实时地质导向提供理论依据。

参考文献:

- [1] 袁超. 随钻方位伽马测井方法基础研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2012.
Yuan Chao. Fundamental Study on LWD Azimuthal Gamma Ray Well Logging[D]. Qingdao: China University of Petroleum, 2012.
- [2] Mckinny K, Boonen P, Huiszoon C. Analysis of Density Image Dip Angle Calculations[J]. Atmospheric Chemistry & Physics Discussions (S1680-7316), 2008, 15(4): 2545-2455.
- [3] Wang J X, Huiszoon C, Xu L B. Quantitative Study of Natural Gamma Ray Depth of Image and Dip Angle Calculations[C]// Transactions of the SPWLA Fifty fourth annual logging symposium, New Orleans: PathFinder, 2013: 1-13.