

# 基于数值模拟的X射线密度测井仪器 源距设计

武蕙琳<sup>1</sup> 李雨莲<sup>1</sup> 金亚<sup>2</sup> 张琼<sup>1</sup>

1(电子科技大学 自动化工程学院 成都 610000)

2(中海油田服务股份有限公司 廊坊 065000)

**摘要** 随着环保及安全需求的提高,使用X射线源等可控源代替<sup>137</sup>Cs等化学源的密度测井仪器研发成为新的发展趋势,但大部分适用于井下密度测量的X射线源强度相对 $\gamma$ 源较弱。为克服上述挑战,基于现有的 $\gamma$ 密度测井仪器基本架构研究了X射线密度测井仪器的探测器源距设计,通过蒙特卡罗软件Geant4模拟了偏心放置于井径为215.9 mm的淡水钻孔中的仪器模型,其地层密度变化范围为1.7~3.0 g·cm<sup>-3</sup>。根据密度测量灵敏度、探测效率和探测深度综合分析了探测器响应。最终成功设计了一款三探头X射线密度测井仪器,其中源距稍远的两个探测器主要收集地层信息,源距最短的探测器主要用于探测井壁以内环境。以上研究为X射线可控源在井下密度测量中的应用及相关仪器的设计提供了参考。

**关键词** X射线密度测井, 蒙特卡罗, 仪器设计

**中图分类号** P631.81

**DOI:** 10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.100402

## A design of source spacing of the X-ray density logging tool based on numerical simulation

WU Huilin<sup>1</sup> LI Yulian<sup>1</sup> JIN Ya<sup>2</sup> ZHANG Qiong<sup>1</sup>

1(School of Automation Engineering, University of Electronic Science and Technology, Chengdu 610000, China)

2(China Oilfield Services Limited, Langfang 065000, China)

**Abstract** [Background] In recent years, with increased awareness of environmental protection and safety, the development of nuclear logging tools using non-chemical sources such as X-ray instead of chemical sources like <sup>137</sup>Cs has become a new trend. However, X-ray source usually has a lower energy level compared to chemical source, therefore the measurement accuracy is hardly satisfying the demand of density logging tool. [Purpose] This study aims to investigate the detector spacing design of a X-ray source tool based on an existing multi-detector gamma density tool. [Methods] Based on a 215.9 mm diameter borehole filled with water where the logging tool was eccentrically placed in, Monte Carlo software Geant 4 was employed for the simulation of the X-ray density logging in the formation density range of 1.7~3.0 g·cm<sup>-3</sup>. According to density sensitivity, detection efficiency and depth, a series of models of this logging tool with detector-to-source distance between 135 mm and 430 mm were simulated to analyze the detector responses. Finally, based on above data, the design of source spacing for detectors was determined for the X-ray density tool. [Results] The finalized tool includes three NaI detectors with detector-to-source distances of 160 mm, 270 mm, and 344 mm, respectively. Simulation results show that the maximum wall

国家自然科学基金(No.52171253)资助

第一作者:武蕙琳,女,1999年出生,2020年毕业于成都理工大学,现为硕士研究生,研究领域为X射线密度测井

通信作者:张琼,E-mail:zhanqio@uestc.edu.cn

收稿日期:2022-05-09,修回日期:2022-07-06

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.52171253)

First author: WU Huilin, female, born in 1999, graduated from Chengdu University of Technology in 2020, master student, focusing on X-ray density logging

Corresponding author: ZHANG Qiong, E-mail: zhanqio@uestc.edu.cn

Received date: 2022-05-09, revised date: 2022-07-06

detection depth reaches 120 mm with the vertical resolution of 344 mm, and the density measurement accuracy is  $0.014 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ . **[Conclusions]** The feasibility of developing a potential X-ray density logging tool is validated by this study, providing reference for future design of nonchemical source density logging tool.

**Key words** X-ray density logging, Monte Carlo, Tool design

核测井技术在获取地层物理参数的方法中具有一定的不可替代性。而传统密度测井仪器使用的 $^{137}\text{Cs}$ 等同位素化学源,可能会造成不可控的环境污染,同时威胁操作人员的安全<sup>[1]</sup>。因此,使用可人为控制的X射线进行密度测井仪器的设计已成为趋势<sup>[2]</sup>。King等<sup>[3]</sup>提出一款使用电子直线加速器作为X射线源的偏心测井装置,该仪器可在外壳屏蔽且不牺牲测量精度的情况下,用于裸眼结构的地层密度测量,但功率要求高,因此转换为实际应用时较为困难。Bayless等<sup>[4]</sup>也曾研发设计过实验室版本的X射线测井仪器,并使用其测量地层密度。Badruzzaman等<sup>[5]</sup>对比研究了 $^{137}\text{Cs}$   $\gamma$ 源与X射线源用于密度测量的相似性,进一步说明了X射线密度测井的可行性。随着硬件技术发展,斯伦贝谢的Simon等<sup>[6]</sup>在第59届国际测井分析家(Society of Professional Well Log Analysts, SPWLA)年会上推出了一款四头的X射线密度测井仪器,相比于能量为662 keV的 $^{137}\text{Cs}$   $\gamma$ 源,该X射线管可提供端点能量350 keV的连续X射线,且成功完成了密度的测量。国内张锋等<sup>[7-8]</sup>曾通过数值模拟比较过 $^{137}\text{Cs}$   $\gamma$ 源与X射线密度测井,对比分析了其响应特性。于华伟等<sup>[9-10]</sup>则曾从X射线产生机制与物质反应角度研究过密度测量的应用。但是,目前针对井下密度测量的X射线仪器设计研究仍较少,需进一步扩充完善。

X射线或 $\gamma$ 射线测量地层密度的原理均基于康普顿效应,但由于X射线能量更低,发生光电效应的概率更大,密度测量结果受其影响更大<sup>[7-8]</sup>。因此,若使用X射线管作为源发射装置,则应重新设计仪器的其余参数。作为仪器重要部件的探测器,其数量及源距应根据预设的适用环境综合分析,选择最优搭配。同时,为减小实际中物力与人力资源的消耗,缩短实验周期,可利用Geant4搭建仪器模拟平台,并对设计过程中的参数进行蒙特卡罗模拟计算。综上所述,本文基于已有的四探头 $\gamma$ 仪器<sup>[11]</sup>,综合分析了更换X射线源后的探测器的地层密度灵敏度、探测效率、探测深度,优化设计了探测器数量及对应源距。

## 1 X射线密度测井原理

X射线在地层中的衰减关系如式(1)所示,其中: $x$ 为探测器源距; $N$ 为对应源距下的探测器计数;

$N_0$ 为源强度; $\mu$ 为总衰减系数<sup>[12]</sup>:

$$N = N_0 e^{-\mu x} \quad (1)$$

由于端点为350 keV的连续X射线能量相对较弱<sup>[6]</sup>,因此,在地层中主要发生光电效应与康普顿效应,对应衰减系数表达如式(2)所示<sup>[13]</sup>:

$$\mu = \mu_{\text{ph}} + \mu_{\text{c}} = n_{\text{e}} (\sigma_{\text{ph,e}} + \sigma_{\text{c,e}}) = \frac{N_{\text{A}} \rho_{\text{b}} Z}{A} (\sigma_{\text{ph,e}} + \sigma_{\text{c,e}}) \quad (2)$$

式中: $\mu_{\text{ph}}$ 和 $\mu_{\text{c}}$ 分别为光电效应和康普顿效应下的衰减系数; $\sigma_{\text{ph,e}}$ 和 $\sigma_{\text{c,e}}$ 为每个电子的平均光电吸收截面和康普顿截面; $n_{\text{e}}$ 为岩石电子密度; $\rho_{\text{b}}$ 为地层体积密度; $U$ 为体积光电参数; $N_{\text{A}}$ 为阿伏伽德罗常数; $Z$ 为原子序数; $A$ 代表质量数。因此,由式(2)推得在石油测井中 $\mu_{\text{ph}}$ 和 $\mu_{\text{c}}$ 具体表达分别如式(3)、(4)所示<sup>[12-14]</sup>:

$$\mu_{\text{ph}} = \frac{K}{2} E^{-3.15} Z^{3.6} N_{\text{A}} \rho_{\text{b}} = \frac{1}{2} U N_{\text{A}} \quad (3)$$

$$\mu_{\text{c}} = \frac{1}{2} \sigma_{\text{c,e}} N_{\text{A}} \rho_{\text{b}} \quad (4)$$

而仪器直接获取的密度实际为电子密度指数 $\rho_{\text{e}}$ ,它与地层体积密度 $\rho_{\text{b}}$ 转换关系如式(5)所示,对于构成地层的大多数元素,式(3)括号内数值接近于常数1,则地层体积密度可近似为电子密度指数<sup>[13]</sup>:

$$\rho_{\text{e}} = \frac{2n_{\text{e}}}{N_{\text{A}}} = \left( \frac{2Z}{A} \right) \rho_{\text{b}} \quad (5)$$

根据式(3)、(4)可知,岩性窗计数受原子序数影响较大,密度窗计数受密度影响较大。因此为得到较准确的地层密度,应尽量减少光电效应的影响。探测器计数主要包括高能段的密度窗计数 $N_1$ 和低能段的岩性窗计数 $N_2$ <sup>[15]</sup>:

则可由式(1)~(5)可推得式(6):

$$a_1 U + b_1 \rho_{\text{e}} = c_1 \ln N_1 + d_1 \ln N_0$$

$$a_2 U + b_2 \rho_{\text{e}} = c_2 \ln N_2 + d_2 \ln N_0 \quad (6)$$

由式(6)联立消去体积光电参数 $U$ ,可得式(7)<sup>[16]</sup>, $a_{0-2}$ 、 $b_{0-2}$ 、 $c_{0-2}$ 、 $d_{0-2}$ 均为常数:

$$\rho_{\text{e}} = a_0 \ln N_1 + b_0 \ln N_2 + c_0 \quad (7)$$

在实际测井中,测井速度可能会对计数造成影响。因此,还可将探测器计数比值代入式(1)~(5)计算,同样推导得类似式(7)的表达,如式(8)所示,其中: $R_1$ 为不同探测器的密度窗计数比值; $R_2$ 为不同探测器的岩性窗计数比值; $A$ 、 $B$ 、 $C$ 均为常数:

$$\rho_{\text{e}} = A \ln R_1 + B \ln R_2 + C \quad (8)$$

## 2 模型搭建与优化指标

### 2.1 基本模型

基于一款四探头 $\gamma$ 密度仪器,从数值模拟角度改进设计一款X射线密度仪器。四探头 $\gamma$ 仪器<sup>[11]</sup>示意图如图1所示,其主要由出射角度为 $45^\circ$ 的源区( $^{137}\text{Cs}$ )、晶体尺寸为 $\phi 38\text{ mm}\times 58\text{ mm}$ 的长源距组探测器(MSP<sub>g</sub>、LSP<sub>g</sub>)与 $\phi 38\text{ mm}\times 28.6\text{ mm}$ 的短源距组探测器(SSP<sub>g</sub>、BSP<sub>g</sub>)构成,且晶体材料均为碘化钠(NaI)。裸眼环境下,MSP<sub>g</sub>、LSP<sub>g</sub>主要收集不同径向深度范围的地层信息,SSP<sub>g</sub>、BSP<sub>g</sub>用于探测井壁及其以内环境。

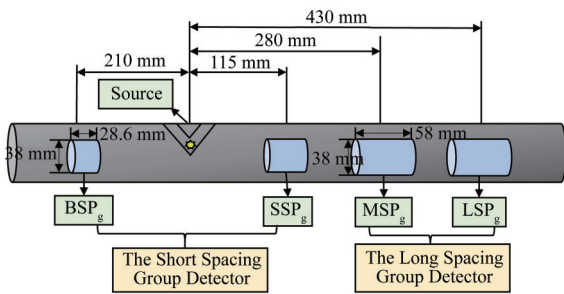


图1 四探头 $\gamma$ 密度测井仪器示意图  
Fig.1 Schematic diagram of a four-probe gamma density logging tool

传统的双探头密度测井仪器存在垂直分辨率差、测量精度不高、受井内环境因素影响较大的缺点<sup>[17]</sup>。为补偿不同的环境因素的影响,应保留多探测器结构以保证密度测量准度。且适用于井下密度测量的X射线能量相对 $\gamma$ 较低<sup>[6]</sup>,基于现有仪器结构限制,为有效探测地层密度,最终设置该X射线密度测井仪器包含三个探测器,其中源距稍远的探测器MSP<sub>x</sub>和BSP<sub>x</sub>主要收集地层信息,源距最短的探测器SSP<sub>x</sub>主要探测井壁以内环境,仪器结构示意图于图2中可见,探测器对应参数如表1所示。

因此,基于Geant4搭建X射线密度仪器基本模型示意图如图2所示,井径215.9 mm,地层密度范围

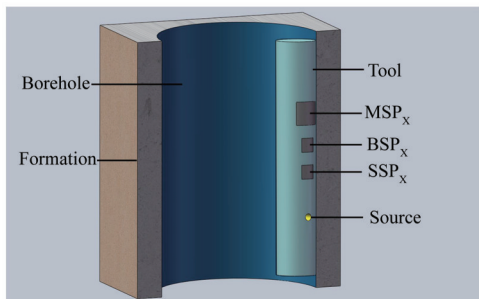


图2 X射线密度测井基本模型示意图  
Fig.2 Diagram of basic model of X-ray density logging

表1 X射线密度测井仪器探测器参数  
Table 1 Detector parameters of X-ray density logging tool

探测器 Detector	尺寸 Size / mm	晶体材料 Crystal material
SSP <sub>x</sub>	$\phi 38\times 28.6$	NaI
BSP <sub>x</sub>	$\phi 38\times 28.6$	NaI
MSP <sub>x</sub>	$\phi 38\times 58$	NaI

为 $1.7\sim 3.0\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,井眼内填充水,仪器偏心贴井壁放置。进行仿真实验时,为满足统计误差要求<sup>[14]</sup>,设置初始发射粒子为 $2\times 10^{10}$ 。

### 2.2 仪器评价指标

针对上述X射线密度测井仪器基础模型,根据探测效率、地层密度灵敏度、探测深度三个指标分别选择与 $\gamma$ 仪器指标相当或更高的仪器参数设计,指标具体表达如下。

#### 2.2.1 探测效率

此处分析使用绝对探测效率评价仪器性能,其包含几何效率、屏蔽衰减、探测器本征效率等多个方面的因素<sup>[18-19]</sup>,定义如式(9)所示,即绝对探测效率 $D_e$ 可表示为探测到的总计数 $N_c$ 与源放出的光子数 $N_s$ 之比:

$$D_e = \frac{N_c}{N_s} \quad (9)$$

同理,根据该指标可选择与 $\gamma$ 仪器探测效率相当或更高的源距。

#### 2.2.2 地层密度灵敏度

由式(1)、(2)式综合可得密度测量的基本公式(10);其中: $C$ 为常数; $K$ 被定义为地层密度灵敏度,如式(11)所示,灵敏度数值越大,探测器测量地层密度的准确度越高<sup>[10,14]</sup>:

$$\rho_b = K \ln N + C \quad (10)$$

$$K = \frac{\partial \ln N}{\partial \rho_b} \quad (11)$$

通过分析不同源距下长源距组与短源距组探测器地层灵敏度,并与 $\gamma$ 仪器各探测器地层灵敏度对比,可获得灵敏度相当或更高的源距范围。

#### 2.2.3 探测深度

不同径向深度对探测器计数贡献不同,而探测深度DOI(Depth of Invasion)通常被定义为向探测器提供90%的总计数时对应的深度<sup>[20]</sup>。测量过程中,井液、泥饼等环境参数对探测器计数影响也不同。探测深度越深,收集到的来自地层的的信息越多。因此,不同的源距可补偿不同环境参数的影响。

### 3 仪器参数设计

#### 3.1 源

基于 Simon 等<sup>[6]</sup>的研究, 端点能量 350 keV、平均能量约为 250 keV 的 X 射线连续谱可替代 <sup>137</sup>Cs 用于井下密度测量。而此 X 射线连续谱可通过 X 射线管获得, 即在真空条件下, 通过对阴极施加高压激发高速电子, 继而撞击阳极靶材料并发生韧致辐射, 再经滤片过滤低能段<sup>[9, 21-22]</sup>。据该原理建立的 X 射线管模型以及得到的能谱分别如图 3、4 所示。

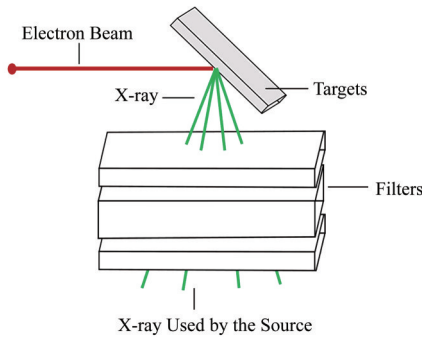


图3 基于 Geant4 的 X 射线管模型

Fig.3 Diagram of X-ray tube model based on Geant4

#### 3.2 源距

探测器源距的设置对探测效率、地层密度灵敏度、探测深度指标均会造成直接影响<sup>[23]</sup>。探测器源

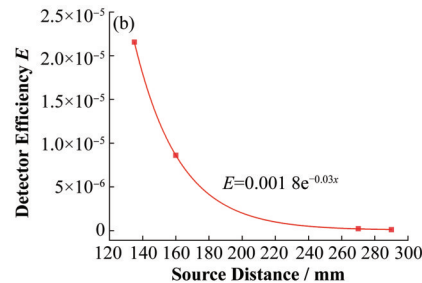
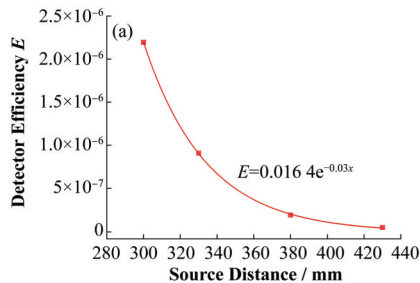


图5 探测效率与源距关系 (a) 长源距组, (b) 短源距组

Fig.5 Relationship between De and source distance (a) Long spacing group, (b) Short spacing group

$\gamma$  四探头仪器对应探测效率如表 2 所示。为获得与  $\gamma$  仪器相同量级的计数, 可根据图 5 分别得到 X 射线仪器目标探测效率对应的源距, 即为换源后可调整的最大源距。为保证探测器计数的可信度, X 射线各探测器探测效率应不小于原  $\gamma$  仪器中源距最远的 LSP<sub>g</sub> 对应的探测效率。

因此, 可得 X 射线仪器探测器源距范围如表 3 所示。

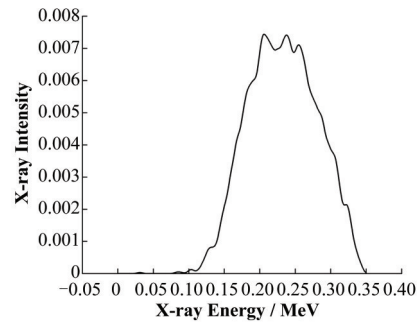


图4 本 X 射线仪器所用源对应能谱图

Fig.4 Energy spectrum of the source used in the X-ray tool of this study

距越大, 探测深度越深, 同时地层灵敏度越高。在仪器结构允许的基础上, 各探测器源距的设置旨在达到使 X 射线仪器达到与  $\gamma$  仪器近似或更高的指标。模拟不同源距范围下, 短源距组 ( $\phi 38 \text{ mm} \times 28.6 \text{ mm}$ ) 和长源距组 ( $\phi 38 \text{ mm} \times 58 \text{ mm}$ ) 两种尺寸的探测器以获取各个探测器的指标范围, 源距仿真模型参数: 长源距组 300~430 mm, 短源距组 135~290 mm。

#### 3.2.1 探测效率

源距越远, 粒子衰减路径越长, 探测效率越低。选择灰岩地层密度为  $2.6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  为标准环境, 绘制探测效率与源距的关系如图 5 所示, 其中探测效率随源距增加而呈指数型下降。

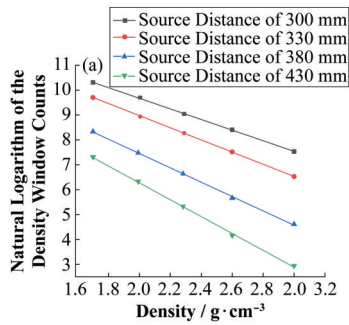
表2  $\gamma$  仪器各探测器探测效率 E  
Table 2 Efficiency of each detector of gamma density tool

组别 Group	短源距组 Short spacing group		长源距组 Long spacing group	
$\gamma$ 密度仪器探测器 Gamma density tool	SSP <sub>g</sub>	BSP <sub>g</sub>	MSP <sub>g</sub>	LSP <sub>g</sub>
探测效率 Detector efficiency	$6.45 \times 10^{-5}$	$1.49 \times 10^{-5}$	$2.03 \times 10^{-5}$	$5.39 \times 10^{-7}$



表3 X射线仪器中满足探测效率E指标的源距范围  
Table 3 Source spacing range satisfying index of detection efficiency in X-ray tool

组别 Group	短源距组 Short spacing group		长源距组 Long spacing group
	SSP <sub>x</sub>	BSP <sub>x</sub>	MSP <sub>x</sub>
X射线密度仪器探测器 Detector of X-ray density tool			
源距范围 Range of source distance / mm	[0, 270]	[0, 270]	[0, 344]



### 3.2.2 地层密度灵敏度

模拟得到的X射线计数与源距关系如图6所示,图6中斜率的绝对值代表其地层密度响应灵敏度K。由图6可知,固定源距,探测器计数随地层密度增加而降低,且随着源距增加,探测器的地层灵敏度不断提高。

根据式(10)可进一步可得到如图7中所示的地层密度灵敏度K与源距关系,该范围内两者呈线性关系。

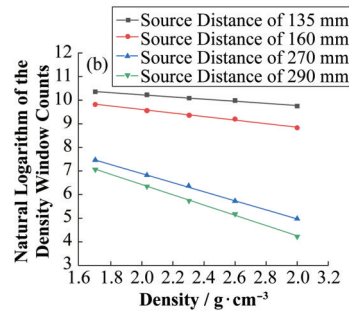


图6 计数与源距关系 (a) 长源距组, (b) 短源距组  
Fig.6 Relationship between counting and source distance (a) Long spacing group, (b) Short spacing group

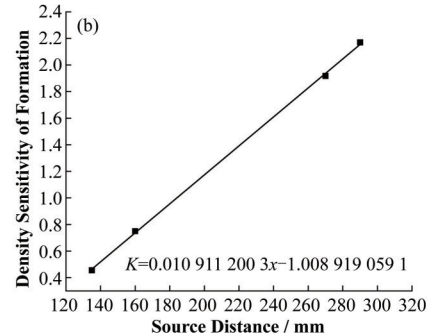
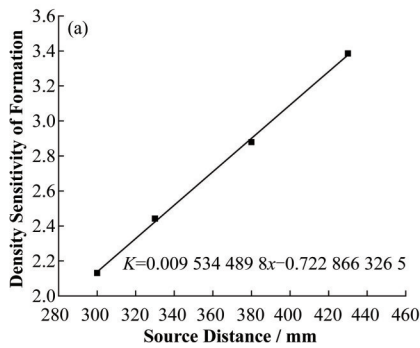


图7 地层灵敏度K与源距关系图 (a) 长源距组, (b) 短源距组  
Fig.7 Relationship between sensitivity K and source distance (a) Long spacing group, (b) Short spacing group

γ仪器各探测器对应灵敏度K如表4所示。若基于地层灵敏度可计算获得的对应X射线仪器最小源距。

MSP<sub>x</sub>和BSP<sub>x</sub>主要收集地层信息,则它们的最小源距应满足γ仪器长源距组中的最低地层灵敏

表4 γ仪器各探测器的地层密度灵敏度K  
Table 4 The formation density sensitive of each detector of gamma density tool

组别 Group	短源距组 Short spacing group		长源距组 Long spacing group	
	SSP <sub>g</sub>	BSP <sub>g</sub>	MSP <sub>g</sub>	LSP <sub>g</sub>
γ密度仪器探测器 Gamma density tool				
地层密度灵敏度 Density sensitive of formation	0.480 2	0.846 8	1.499 8	2.616 9

度。因此,在仪器结构不冲突时,X射线仪器的三个探测器对应可设计源距范围如表5所示。

表5 X射线仪器中满足地层密度灵敏度K指标的源距范围  
Table 5 The source spacing range satisfying index of formation density sensitive in X-ray tool

组别 Group	短源距组 Short spacing group		长源距组 Long spacing group
	SSP <sub>x</sub>	BSP <sub>x</sub>	MSP <sub>x</sub>
X射线密度仪器探测器 Detector of X-ray density tool			
源距范围 Range of source distance / mm	[0, 201]	[230, 386]	[274, 430]

### 3.2.3 探测深度

在地层密度为2.6 g·cm<sup>-3</sup>、岩性为灰岩的环境下,统计地层垂直于仪器方向上对探测器响应的贡

献,绘制结果如图8所示,横轴为地层径向厚度,纵轴为归一化后的计数。其中,90%比例所在点即为地层对密度测量贡献达90%的深度,该点即为探测器对应的探测深度<sup>[20]</sup>。

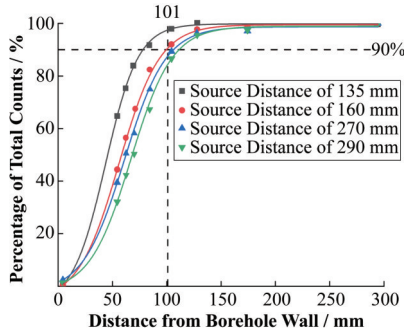


图8 短源距组探测深度DOI与源距的关系  
Fig.8 The relationship between the DOI and the source distance of the short spacing group detector

从探测深度角度考虑,  $MSP_x$  主要探测地层,应在仪器结构不冲与探测效率指标的前提下,尽可能地远,从而有尽量大的探测深度;而短源距组探测器  $SSP_x$  主要用于探测井壁以内环境参数,由图8可知,短源距组探测器源距为160 mm时,则可得到与  $\gamma$  仪器的近源距组近似的最小探测深度101 mm,如表6所示。则在可设置的探测器源距范围内,  $SSP_x$  源距可取范围为[0,160] mm。

表6  $\gamma$  仪器短源距组探测器探测深度 DOI  
Table 6 The DOI of the short source spacing detector in the gamma density tool

组别	短源距组	
Group	Short spacing group	
$\gamma$ 仪器探测器	$SSP_g$	$BSP_g$
探测深度	101	110
Depth of investigation / mm		

### 3.3 分析与讨论

综上所述,设计探测深度不同的  $MSP_x$ 、 $BSP_x$  用于探测地层密度,  $SSP_x$  用于探测井壁以内环境参数,并用于补偿  $MSP_x$  和  $BSP_x$  中受该环境参数影响的计数。因此在保证结构不冲突且满足探测效率指标的情况下,应选取尽可能大的源距以提高对地层密度的灵敏度。即  $SSP_x$  的源距应为表3、5,以及  $SSP_x$  源距范围交集[0,160]的最大值,  $BSP_x$ 、 $MSP_x$  的源距分别取表3、5对应源距范围交集[230,270]、[274,344]的最大值。最终该X射线密度仪器参数设计:  $SSP_x$ 、 $BSP_x$  和  $MSP_x$  的源距依次为160 mm、270 mm、344 mm。

在该结构下, X射线密度测井仪器最终的垂直分辨率为344 mm,且该仪器最远的探测器  $MSP_x$  的探测深度,即该X射线仪器的最大径向探测深度模拟结果如图9所示,为120 mm。

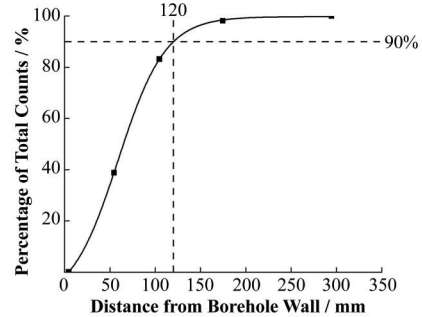


图9 X射线密度测井仪最大径向探测深度 DOI  
Fig.9 The max radius DOI of each detector of X-ray density tool

最终,设计得到的X射线密度测井仪器指标为:探测器数量为3,最大径向探测深度为120 mm,垂直分辨率为344 mm。

## 4 结果验证

基于上述优化设计,选择对光电吸收截面指数变化敏感的岩性窗计数比值  $(N_{MSP_x}/N_{BSP_x})_L$ , 和对地层密度变化敏感的密度窗计数比值  $(N_{SSP_x}/N_{BSP_x})_D$  代入式(8),得到如式(12)所示的X射线密度测井仪器的响应公式,其中:  $A_0$ 、 $B_0$ 、 $C_0$  均为常数:

$$\rho = A_0 \ln(N_{SSP_x}/N_{BSP_x})_D + B_0 \ln(N_{MSP_x}/N_{BSP_x})_L + C_0 \quad (12)$$

且为验证该X射线密度测井仪器能较准确地测量地层密度,模拟地层密度范围为1.7~3.0  $g \cdot cm^{-3}$  的裸眼地层模型,并利用该仪器响应公式(12)预测该地层密度。最终, X射线密度测井仪器测量结果如图10所示, Curve Track1 对应曲线为真实地层密度(仿真模型设置的地层密度), Curve Track2 对应曲线为使用该仪器测量的地层密度; Curve Track3 对应曲线为每个模型具体的预测误差,计算公式如式(13)所示。

$$Error = |Measured Density - Real Density| \quad (13)$$

由图10可知,使用该仪器测量的地层曲线与真实地层曲线基本重合,即该仪器可较为准确地测量地层密度,准度(最大误差)为0.014  $g \cdot cm^{-3}$ ,验证了该X射线密度测井仪器设计的有效性。

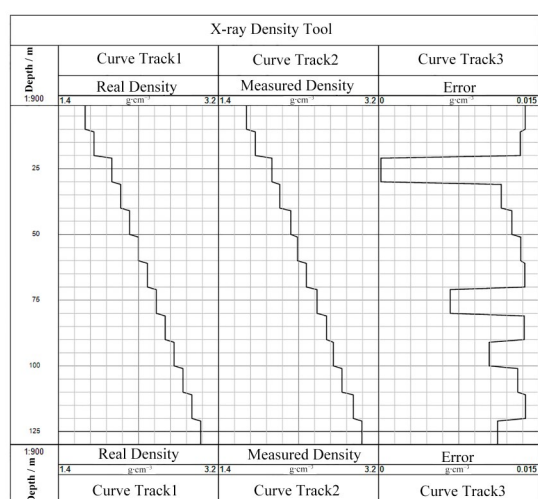


图10 X射线密度测井仪器的密度测量结果  
Fig.10 Density measured results of X-ray density tool

## 5 结语

本研究利用Geant4模拟了不同仪器参数下的X射线密度测井仪器源距设计,达到了利用X射线代替传统 $^{137}\text{Cs}$   $\gamma$ 化学源进行密度测量的目的,具有更高的环保性与安全性。该仪器使用的X射线能量相对 $^{137}\text{Cs}$ 较弱,因此源距更短,但其垂直分辨率更高。且最终设计的X射线密度测井仪器在仿真下的最大径向探测深度可达120 mm,垂直分辨率为344 mm,准度为 $0.014 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,为该类X射线密度测量仪器源距的设计提供了参考。

**作者贡献声明** 武蕙琳:调研文献、实验模拟及数据处理工作、构思并撰写论文;李雨莲:技术指导、审阅与校对;金亚:提供 $\gamma$ 仪器的相关数据;张琼:技术指导,对文章的知识性内容作审阅。

## 参考文献

- 1 过惠平,吕汶辉,吕宁,等.不同能量X和 $\gamma$ 射线剂量等效性影响因素的蒙特卡罗方法研究[J].核技术,2014,37(1):010203. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2014.hjs.37.010203.  
GUO Huiping, LYU Wenhui, LYU Ning, *et al.* Influencing factors of dose equivalence for X and  $\gamma$  rays with different energy based on Monte Carlo[J]. Nuclear Techniques, 2014, 37(1): 010203. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2014.hjs.37.010203.
- 2 Gilchrist A, Inanc F, Roberts L. Nuclear source replacement-promises and pitfalls[C]. SPWLA 52nd Annual Logging Symposium, 2011.
- 3 King G III, Becker A J, Corris G W, *et al.* Density logging

using an electron linear accelerator as the X-ray source[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions With Materials and Atoms, 1987, 24 - 25: 990 - 994. DOI: 10.1016/S0168-583X(87)80295-1.

- 4 Bayless J R, Burkhart C P, Kuthi A. Advances in X-ray and neutron source technologies for logging applications [C]. SPWLA 34th Annual Logging Symposium, 1993.
- 5 Badruzzaman A. An assessment of fundamentals of nuclear-based alternatives to conventional chemical source bulk density measurement[C]. SPWLA 55th Annual Logging Symposium, 2014.
- 6 Simon M, Tkabladze A, Beekman S. A revolutionary X-ray tool for true sourceless density logging with superior performance[C]. SPWLA 59th Annual Logging Symposium, 2018.
- 7 张锋,李亚芬,信毅,等.基于X射线和伽马源的密度测井数值模拟[J].中国石油大学学报(自然科学版),2018,42(1):60 - 66. DOI: 10.3969/j.issn.1673-5005.2018.01.007.  
ZHANG Feng, LI Yafen, XIN Yi, *et al.* Numerical simulation of density logging based on X-ray and gamma ray sources[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2018, 42(1): 60 - 66. DOI: 10.3969/j.issn.1673-5005.2018.01.007.
- 8 范继林,张锋,田立立,等.X射线密度测井能谱分析及响应特性研究[J].测井技术,2021,45(3):246 - 252. DOI: 10.16489/j.issn.1004-1338.2021.03.004.  
FAN Jilin, ZHANG Feng, TIAN Lili, *et al.* Energy spectrum analysis and response characteristics of X-ray density logging[J]. Well Logging Technology, 2021, 45(3): 246 - 252. DOI: 10.16489/j.issn.1004-1338.2021.03.004.
- 9 于华伟,杨争春,刘超卓,等.X射线密度测井中X射线管高压对密度测量精度的影响[J].核技术,2021,44(11):110401. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.110401.  
YU Huawei, YANG Zhengchun, LIU Chaozhuo, *et al.* Effects of X-ray tube high-voltages on the density measurement accuracy in X-ray density logging[J]. Nuclear Techniques, 2021, 44(11): 110401. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.110401.
- 10 周悦,于华伟,陈翔鸿,等.基于X射线源的密度测井近源距研究[J].核技术,2018,41(12):120401. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2018.hjs.41.120401.  
ZHOU Yue, YU Huawei, CHEN Xianghong, *et al.* Study

- on near detector-source spacing of density logging based on X-ray source[J]. *Nuclear Techniques*, 2018, **41**(12): 120401. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2018.hjs.41.120401.
- 11 Zhang Q, Li Y L, Jin Y, *et al.* A new gamma density measurement method for cased-hole formation evaluation [J]. *Applied Radiation and Isotopes*, 2022, **184**: 110178. DOI: 10.1016/j.apradiso.2022.110178.
- 12 Ellis D V, Singer J M. *Well logging for earth scientists* [M]. 2nd Ed. Dordrecht: Springer, 2007.
- 13 黄隆基. 核测井原理[M]. 东营: 石油大学出版社, 2000. HUANG Longji. *Principle of nuclear logging*[M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 2000.
- 14 楚泽涵. 地球物理测井方法与原理[M]. 北京: 石油工业出版社, 2007. CHU Zehan. *Geophysical logging methods and principles* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2007.
- 15 Ellis D, Flaum C, Marienbach E, *et al.* Litho-density tool calibration[J]. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 1985, **25**(4): 515 - 520. DOI: 10.2118/12048-pa.
- 16 Yu H W, Chen X H, Zhou Y, *et al.* Impact of photoelectric effect on X-ray density logging and its correction[J]. *Applied Radiation and Isotopes*, 2020, **156**: 108785. DOI: 10.1016/j.apradiso.2019.06.031.
- 17 吴文圣, 黄隆基. 三探测器密度测井的 Monte Carlo 模拟 [J]. *地球物理学报*, 2004, **47**(1): 164 - 170. DOI: 10.3321/j.issn: 0001-5733.2004.01.025. WU Wensheng, HUANG Longji. Monte Carlo simulation of three-detector density logging[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2004, **47**(1): 164 - 170. DOI: 10.3321/j.issn: 0001-5733.2004.01.025.
- 18 吴祥余. 不同尺寸  $\gamma$  射线探测器响应函数及探测效率的蒙特卡罗模拟[D]. 成都: 成都理工大学, 2009. WU Xiangyu. *The simulation of response function and detection efficiency for  $\gamma$ -ray detector of different sizes by Monte Carlo method*[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2009.
- 19 胡广春, 龚建, 刘晓亚, 等. 体源探测效率计算及修正方法研究[J]. *核电子学与探测技术*, 2005, **25**(6): 798 - 802, 791. HU Guangchun, GONG Jian, LIU Xiaoya, *et al.* Study of calculation and correction method of detection efficiency of the volume source[J]. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2005, **25**(6): 798 - 802, 791.
- 20 吴文圣, 黄隆基. 密度测井探测深度与源距的理论研究 [J]. *核电子学与探测技术*, 2003, **23**(1): 56 - 58. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2003.01.014. WU Wensheng, HUANG Longji. A theoretical study on detecting depth and spacing of density logging[J]. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2003, **23** (1): 56 - 58. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2003.01.014.
- 21 李明生, 欧向明, 赵士安, 等. 应用 Geant4 模拟放疗、诊断和防护线质下的 X 射线能谱[J]. *中国辐射卫生*, 2012, **21**(1): 3 - 5. DOI: 10.13491/j.cnki.issn.1004-714x.2012.01.017. LI Mingsheng, OU Xiangming, ZHAO Shian, *et al.* Simulating the X-ray spectrum under radiotherapy, diagnosis and protection fields with Geant4[J]. *Chinese Journal of Radiological Health*, 2012, **21**(1): 3 - 5. DOI: 10.13491/j.cnki.issn.1004-714x.2012.01.017.
- 22 孔燕, 卓维海, 陈波, 等. 医用诊断 X 射线能谱的 MCNP 模拟[J]. *核技术*, 2019, **42**(11): 110301. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2019.hjs.42.110301. KONG Yan, ZHUO Weihai, CHEN Bo, *et al.* MCNP simulations of medical diagnostic X-ray spectra[J]. *Nuclear Techniques*, 2019, **42**(11): 110301. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2019.hjs.42.110301.
- 23 吴文圣, 肖立志. 三探测器密度测井仪器的源距优化 [J]. *核技术*, 2010, **33**(11): 849 - 853. WU Wensheng, XIAO Lizhi. Spacing optimization for three-detector density logging tool[J]. *Nuclear Techniques*, 2010, **33**(11): 849 - 853.