



移动扫码阅读

蒋必辞,田小超,张 鹏,等.随钻伽马对方位角测量的影响及校正方法研究[J].煤炭科学技术,2020,48(12):175-181. doi:10.13199/j.cnki.cst.2020.12.022  
JIANG Bici, TIAN Xiaochao, ZHANG Peng, et al. Study on influence and correction method of gamma while drilling on azimuth angle measurement [J]. Coal Science and Technology, 2020, 48 (12): 175 - 181. doi: 10.13199/j.cnki.cst.2020.12.022

# 随钻伽马对方位角测量的影响及校正方法研究

蒋必辞<sup>1,2</sup>,田小超<sup>2</sup>,张 鹏<sup>2</sup>,汲方林<sup>2</sup>,丛 琳<sup>2</sup>,王 盼<sup>2,3</sup>

(1.煤炭科学研究总院 北京 100013;2.中煤科工集团西安研究院有限公司 陕西 西安 710077;3.西安科技大学 陕西 西安 710054)

**摘 要:**为实现煤矿井下根据地质条件调整定向钻进的轨迹,设计了地层自然放射性与轨迹测量于一体的矿用随钻伽马测井仪。为消除伽马探测器对轨迹测量方位角的影响,从轨迹测量基本原理出发,利用有限元分析和标准转台测试分析了伽马探测器对方位角测量的影响特征,利用广义回归神经网络(GRNN)建立了方位角的影响校正模型。伽马探测器对测斜传感器周围磁场分布有一定影响,且对磁场 3 个不同方向分量影响不同,仪器倾角、方位角不同时,其磁影响程度也不同,进而影响方位角的测量精度;在测斜传感器后端加入伽马探测器后,方位角的误差最大增加了 0.4°;采用基于 GRNN 建立的方位角影响校正模型后,方位角的误差均方差由 0.677 8°降低到 5.11×10<sup>-29</sup>°。GRNN 校正模型精度较高,较好地消除了伽马探测器对测斜传感器测量方位角的影响。形成了基于理论分析、正演模拟、试验测试、GRNN 校正模型下的伽马探测器对轨迹测量方位角影响的校正方法,为研究增加其他测井传感器时对轨迹测量的影响规律提供了参考。

**关键词:**随钻伽马; 定向钻进; 钻进轨迹; 磁校正; 伽马测井仪

中图分类号:TD15 文献标志码:A 文章编号:0253-2336(2020)12-0175-07

## Study on influence and correction method of gamma while drilling on azimuth angle measurement

JIANG Bici<sup>1,2</sup>, TIAN Xiaochao<sup>2</sup>, ZHANG Peng<sup>2</sup>; JI Fanglin<sup>2</sup>, CONG Lin<sup>2</sup>, WANG Pan<sup>2,3</sup>

(1.China Coal Research Institute,Beijing 100013,China;2.Xi'an Research Institute Co.Ltd.,China Coal Technology and Engineering Group,Xi'an 710077,China;3.Xi'an University of Science and Technology,Xi'an 710054,China)

**Abstract:** In order to adjust the trajectory of directional drilling according to the geological conditions in coal mine, a gamma logging while drilling tool for mining is designed, which integrates the formation natural radioactivity and trajectory measurement. In order to eliminate the influence of gamma detector on the azimuth of trajectory measurement, based on the basic principle of trajectory measurement, the influence characteristics of gamma detector on the azimuth measurement are analyzed by using finite element analysis and standard turntable test, and the influence correction model of azimuth is established by using generalized regression neural network (GRNN). The gamma detector has a certain influence on the magnetic field distribution around the inclinometer, and has different influence on the three components of the magnetic field in different directions. When the inclination angle and azimuth angle of the instrument are different, the degree of magnetic influence is also different, which affects the measurement accuracy of azimuth angle. After adding gamma detector to the back end of inclinometer, the azimuth error increases by 0.4 degree. After using the azimuth influence correction model based on GRNN, the mean square error of azimuth is reduced from 0.678 8 degree to 5.11×10<sup>-29</sup> degree. The accuracy of GRNN correction model is high, which eliminates the influence of gamma detector on the azimuth measurement of inclinometer. Based on theoretical analysis, forward simulation, experimental test and GRNN correction model, the correction method of gamma detector's influence on trajectory measurement azimuth is formed, which provides reference for solving the influence of other logging sensors on trajectory measurement.

**Key words:** gamma logging while drilling; directional drilling; drilling track; magnetic correction; gamma logging tool

收稿日期:2020-07-25;责任编辑:李金松  
基金项目:国家科技重大专项资助项目(2016ZX05045-003-05)  
作者简介:蒋必辞(1990—),女,湖北随州人,助理研究员,博士研究生。Tel:029-81778340,E-mail:jiangbici@cctegxian.com

0 引 言

煤矿井下定向钻进在瓦斯抽采、水害防治及地质勘探等方面具有广泛的应用<sup>[1-3]</sup>。为了在钻进过程中及时获知地层岩性信息以调整钻进轨迹,研发了随钻伽马测井技术与装备,在测量钻孔轨迹的同时,也能探测地层的放射性,根据不同岩石的放射性物质含量不同,进而判断地层的岩性。由于煤矿井下钻孔直径的限制,目前煤矿井下钻孔轨迹仪是基于磁感式测斜传感器<sup>[4]</sup>进行测量,为了达到钻孔轨迹的测量精度,要求磁感式测斜传感器周围的磁场环境不能受到磁物质的干扰。但是伽马探测器为软磁性材质,势必会对测斜传感器的测量精度有影响。如何解决该问题?一是增加测斜传感器与伽马探测器之间的距离,二是对其影响进行校正。RUSSELL 等<sup>[5]</sup>研究发现,当无磁钻铤长度大于 3.05 m 时,钻具磁化产生的径向磁干扰可以忽略不计,由于煤矿井下施工空间小,仪器长度受限,同时测斜传感器和伽马探测器均应安装在钻杆最前端以便及时采集信息,故无法增加测斜传感器与伽马探测器之间的距离,因此,只能通过校正方法校正影响。目前,对于测斜仪的轴向磁影响校正方法有 Russell 法<sup>[6]</sup>、短钻铤测量修正法、矢量法、钻具截面法<sup>[7]</sup>、长钻铤测量法<sup>[8]</sup>,这些算法比较复杂,且钻孔近水平时无法使用,而煤矿井下钻孔多为近水平钻孔。在提高磁感式的测斜传感器的精度有 2 种途径,一是通过建立标定算法来校正,如全空间标定算法、最佳椭圆拟合算法等<sup>[9]</sup>,这些标定算法主要校正测斜传感器的本身误差;二是通过神经网络进行补偿,主要有 BP、RBF、Elman 等方法<sup>[10]</sup>,神经网络补偿法主要是将测量的测斜数据作为网络的输入,将目标数据作为输出,确定样本集之后交由神经网络自主学习,确定模型,然后使用训练的模型进行预测。广义回归神经网络<sup>[12]</sup>(Generalized Regression Neural Network,简称 GRNN)是基于径向基函数神经网络(RBF)的一种改进方法,具有很强的非线性映射能力和柔性网络结构以及高度的容错性和鲁棒性,适用于解决非线性问题,它的网络结构随着样本的确定而确定,因此,网络结构设计简单,避免了类似于 BP 网络的“黑箱问题”。在逼近能力、非线性映射能力、容错能力、稳定性上比 BP 神经网络有更强的优势,在逼近能力和学习速度上比径向基函数神经网络(RBF 网络)有更强的优势,并且在样本数据较少时,预测效果也较好。复杂度上较 Elman 简单,GRNN 在各个行业有较好的应用<sup>[13-16]</sup>。目前 GRNN 尚未用于

提高测斜仪的精度。

笔者结合随钻伽马测井仪结构,从钻孔轨迹测量的基本原理入手,通过正演模拟和实际转台测试分析伽马探测器对测斜传感器的方位角测量的影响,然后利用 GRNN 建立伽马探测器对测斜仪磁影响的校正模型,进行实测数据的验证。

1 随钻伽马测井仪器

1.1 仪器结构

矿用随钻伽马测井仪的整体结构如图 1 所示。主要包括测斜传感器、伽马探测器、数据采集控制板、电池、通信模块和充电接口等部分组成,可以测量钻孔的自然伽马、倾角、方位角、工具面向角 4 个参数。

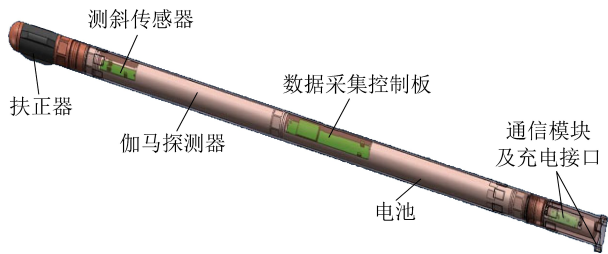


图 1 矿用随钻伽马测井仪整体结构  
Fig.1 Integral structure of LWDG in coal mine

仪器指标参数如下:

|           |               |
|-----------|---------------|
| 仪器长度/m    | 1.25          |
| 仪器直径/mm   | 42.00         |
| 倾角/(°)    | (-90~90)±0.20 |
| 方位角/(°)   | (0~360)±1.50  |
| 工具面向角/(°) | (0~360)±1.50  |
| 伽马/API    | (0~500)±5.00  |

1.2 轨迹测量基本原理

钻孔轨迹由倾角与方位角计算<sup>[17]</sup>。利用测斜传感器测量仪器的倾角、方位角、工具面向角。随钻伽马测井仪器的测斜传感器由 3 个单轴 PNI 磁感式传感器和 2 个双轴加速度传感器组成,其中 PNI 磁感式传感器测量地磁场的 3 个分量  $B_x$ 、 $B_y$ 、 $B_z$ , 2 个双轴加速度传感器组合测量 3 个方向的加速度  $G_x$ 、 $G_y$ 、 $G_z$ <sup>[4]</sup>,其倾角  $\theta$ 、工具面向角  $\varphi$ 、方位角  $\psi$  的计算公式分别为

$$\tan \theta = \frac{-G_y}{(G_x^2 + G_z^2)^{\frac{1}{2}}} \tag{1}$$

$$\tan \varphi = \frac{-G_y}{G_z} \tag{2}$$

$$\tan \psi = \frac{G_0(B_z G_x - B_x G_z)}{B_y(G_x^2 + G_z^2) - G_y(B_z G_z + B_x G_x)} \tag{3}$$

2 伽马探测器对测斜磁影响分析

2.1 理论分析及正演模拟

测斜传感器的误差来源有 2 类:测斜传感器本身误差和罗差<sup>[18]</sup>。①测斜传感器本身误差主要是由于使用了 3 个互相独立的单轴 PNI 磁感传感器和 2 个互相独立的双轴 VTI 加速度传感器,各个传感器之间存在零位误差和灵敏度误差,这 2 者构成了传感器的出厂误差;安装误差包括磁感式传感器及加速度传感器的正交性误差以及电路板与测斜传感器外壳的装配误差,前者是指 3 个传感器之间并非严格相互垂直,后者是指电路板的坐标系与外壳坐标系不重合。②罗差是指周围铁磁物质对电子罗盘的干扰,铁磁物质包括硬磁物质和软磁物质。硬磁物质能够产生干扰磁场,软磁物质虽然不会产生磁场,却会使其邻近磁场的分布发生畸变。

伽马探测器与测斜传感器距离 25 cm,伽马探测器中的光电倍增管<sup>[19]</sup>以及内部的减震弹簧均含有软磁物质,可能对磁传感器邻近磁场的分布有影响;因此,对于磁传感器测量的 3 个方向的磁分量可能会有影响,进而影响测量的方位角精度。

采用 COMSOL 有限元分析的方法建立模型<sup>[20]</sup>,以地磁场为背景,分析在测斜传感器探测的局部区域中加入伽马探测器,对于该区域磁场变化的影响,建模参数如下:

|                |         |
|----------------|---------|
| 模型大小/(m×m×m)   | 3×3×3   |
| 空气的相对磁导率       | 1       |
| 伽马探测器外径/mm     | 11      |
| 伽马探测器内径/mm     | 10      |
| 伽马探测器长度/cm     | 25      |
| 伽马探测器的相对磁导率    | 20      |
| 探测器与测斜传感器距离/cm | 25      |
| 仪器初始方位/(°)     | 0       |
| 仪器初始倾角/(°)     | 0       |
| 地磁场方位/(°)      | 0(正北方向) |

采用精细化的三角网格进行网格剖分,加入伽马探测器之后网格共计 124 792 个,其模型网格剖分如图 2 所示(模型大小为 3 m×3 m×3 m,在坐标系中分布从-1.5 ~1.5 m)。

当仪器倾角  $\theta$ 、方位角  $\psi$  均为 0°时,模拟结果如图 3 所示。

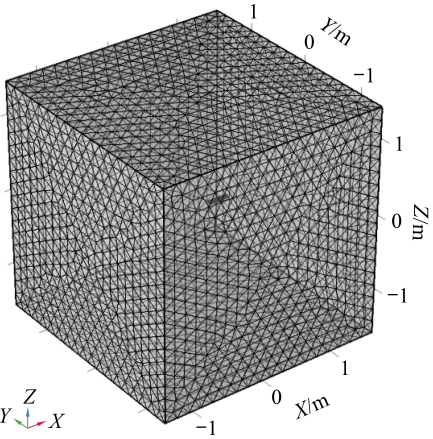


图 2 加入伽马探测器后模型网格剖分  
Fig.2 Model mesh after adding gamma detector

由图 3 可知,在加入伽马探测器之前,测斜传感器周围的磁场分布均匀。在加入伽马探测器之后,在地磁场恒定时,伽马探测器虽然不会产生磁场,但是为软磁物质,会引起其周围的磁场分布发生畸变。测斜传感器周围增加伽马探测器后,越接近伽马探测器的区域,磁场变化越大。在  $\psi=0^\circ, \theta=0^\circ$  时,对磁场  $Z$  方向分量的影响最大,其次是  $X$  方向分量,最后是  $Y$  方向分量。由于伽马探测器后对磁场 3 个分量影响不同,当仪器与磁场呈不同角度时也会有不同,因此又模拟分析了仪器的倾角、方位不同时加上伽马探测器对测斜传感器测点周围的磁场 3 个分量的影响,结果见表 1。

表 1 伽马探测器对测斜测点处的 3 个磁场方向分量的影响

| Table 1 Effect of gamma detector on three directional components of magnetic field at obliquity measuring point |            |             |                               |                        |                        |
|---|------------|-------------|-------------------------------|------------------------|------------------------|
| 项目  | 倾角/<br>(°) | 方位角/<br>(°) | 不同方向磁场强度/(A·m <sup>-1</sup> ) |                        |                        |
|   |            |             | X                             | Y                      | Z                      |
| 无伽马探测器  | 0          | 0           | 6.65×10 <sup>-5</sup>         | 7.31×10 <sup>-5</sup>  | -4.18×10 <sup>-5</sup> |
|   | 0          | 0           | 1.88×10 <sup>-4</sup>         | -6.78×10 <sup>-5</sup> | -39.75                 |
|   | 45         | 0           | -0.48                         | -8.69×10 <sup>-3</sup> | -40.09                 |
|   | -45        | 0           | 0.43                          | -4.12×10 <sup>-3</sup> | -40.04                 |
| 加伽马探测器  | -90        | 0           | 1.05×10 <sup>-3</sup>         | 1.48×10 <sup>-3</sup>  | -39.95                 |
|   | 90         | 0           | 2.65×10 <sup>-3</sup>         | -3.32×10 <sup>-3</sup> | -39.95                 |
|   | 0          | 45          | 1.07×10 <sup>-2</sup>         | -0.46                  | -40.08                 |
|   | 0          | 90          | -2.97×10 <sup>-4</sup>        | -3.04×10 <sup>-4</sup> | -39.76                 |
|   | 0          | 135         | -1.1×10 <sup>-2</sup>         | 0.45                   | -40.08                 |
|   | 0          | 180         | 1.05×10 <sup>-3</sup>         | 1.48×10 <sup>-3</sup>  | -39.95                 |

由表 1 可知,根据目前伽马探测器与测斜传感器的相对位置关系,伽马探测器对测斜传感器周围的磁场有影响,并且对磁场的 3 个分量的影响不同。

在仪器倾角不同、方位角不同时,仪器与磁场的 3 个分量的夹角会不同,对测量的方位角影响也会不同。

在测斜传感器测量方位角时需要将其校正,否则影响方位角测量的精度。

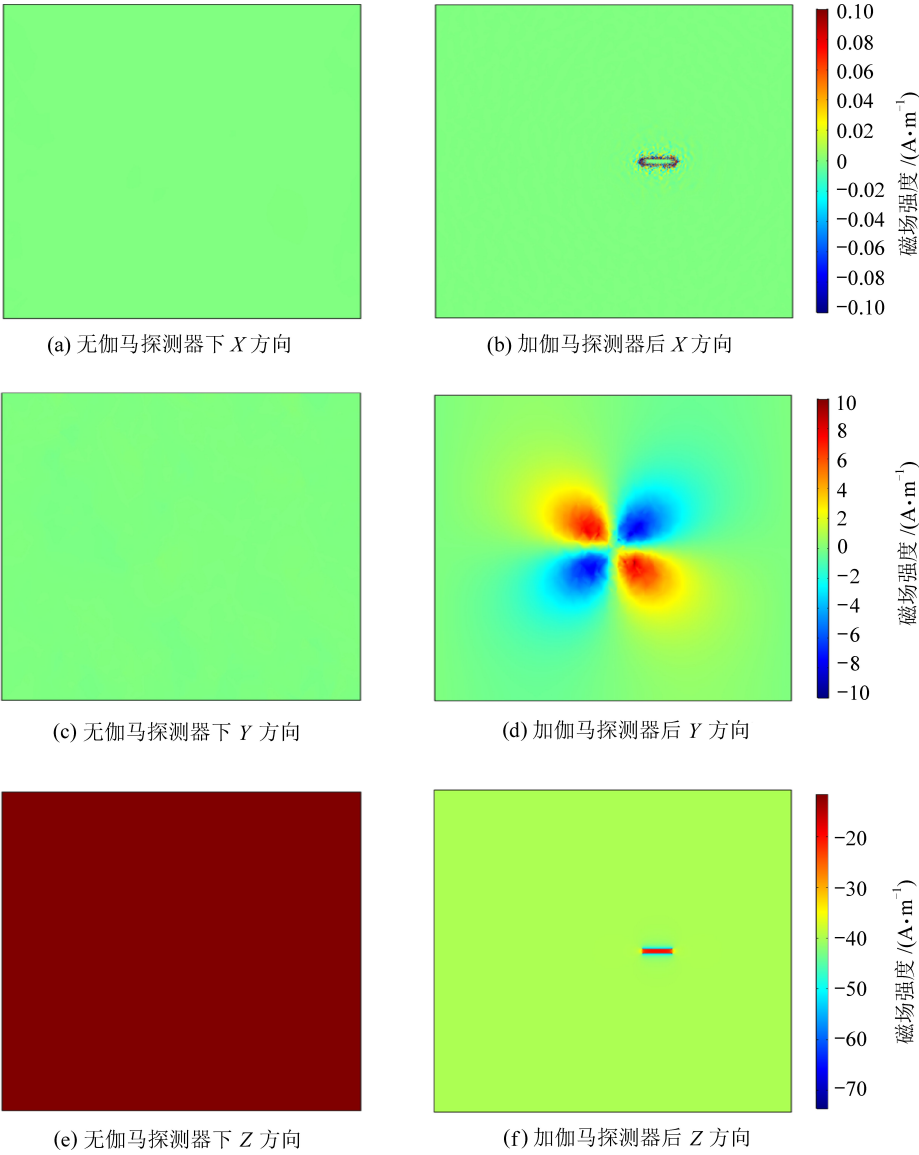


图 3 伽马探测器对测斜周围磁场 X,Y,Z 方向分量影响

Fig.3 Influence of gamma detector on X,Y,Z direction component of magnetic field around the inclinometer

2.2 试验测试

为了验证伽马探测器对测斜传感器周围磁场的影响分析,对实际仪器进行测试,测试伽马探测器对测斜测量的方位角的影响。仪器整体装配完成之后,先在标准测斜仪标定台上进行测斜传感器的标定,按照全空间标定方法进行标定<sup>[9]</sup>。标定完成之后,加上伽马探测器测试伽其对方位角的影响。整个的测试过程如下:①在测斜仪标定台上对测斜传感器进行标定,然后随机选择测点进行测试;②在仪器与标定台相对关系不变的情况下,加入伽马探测器,测试伽马探测器对方位角测量的影响,选择步骤①测试的空间点,进行测试。测试结果见表 2。

表 2 加伽马探测器前后测斜方位角测量(部分)

Table 2 Azimuth before and after adding gamma detector ( section )

| 序号 | 标准角度   |        | 加伽马前   |        | 加伽马后   |        |
|----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|    | 倾角/(°) | 方位/(°) | 方位/(°) | 误差/(°) | 方位/(°) | 误差/(°) |
| 1  | 0      | 120    | 120.07 | 0.07   | 120.13 | 0.13   |
| 2  | 10     | 160    | 160.27 | 0.27   | 160.41 | 0.41   |
| 3  | 60     | 220    | 220.47 | 0.47   | 220.64 | 0.64   |
| 4  | 30     | 100    | 100.68 | 0.68   | 100.76 | 0.76   |
| 5  | 30     | 120    | 120.33 | 0.33   | 120.43 | 0.43   |
| 6  | 30     | 90     | 90.42  | 0.42   | 90.81  | 0.81   |
| 7  | 30     | 230    | 230.20 | 0.20   | 229.87 | -0.13  |
| 8  | 30     | 300    | 301.19 | 1.19   | 301.49 | 1.49   |
| 9  | 30     | 330    | 331.39 | 1.39   | 331.71 | 1.71   |
| 10 | 20     | 0      | 1.33   | 1.33   | 1.58   | 1.58   |



由表 2 可知,在测斜传感器标定后的精度测量中,方位角的测量精度满足仪器的需求(方位角的误差 $\pm 1.5^{\circ}$ ),加入伽马探测器与无伽马探测器相比,其对测斜传感器测量的方位角有影响,10 个测点中有 3 个测点的误差不能满足仪器精度的要求,与无伽马探测器比,方位角误差最大增加了  $0.4^{\circ}$ ;在倾角、方位角不同时,加入伽马探测器后,伽马探测器对测斜传感器测量的方位角的影响不同,并且为非线性的影响,实际测试结果与正演模拟的结论一致。因此,在实际使用中,需要进行伽马探测器对测斜的磁影响校正。

3 GRNN 校正磁影响

3.1 GRNN 拓扑结构

GRNN 拓扑结构<sup>[13]</sup>如图 6 所示,包括输入层、模式层、求和层和输出层等 4 层神经元。

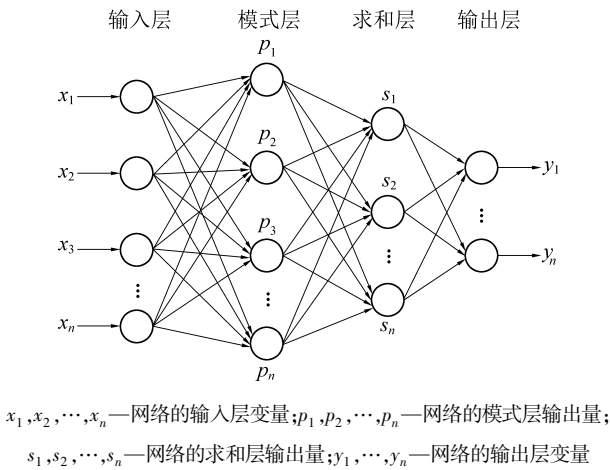


图 6 GRNN 拓扑结构

Fig.6 GRNN topology

GRNN 的拓扑结构由样本来确定,参数就是 1 个扩展常数,即扩展速度。采用交叉验证的方式确定扩展参数最佳的扩展速度<sup>[13]</sup>。

3.2 磁影响校正模型

测斜传感器输出为倾角、方位角、工具面向角,根据式(1)~式(3),可利用测斜传感器输出的倾角、方位角、工具面向角,结合 GRNN 网络,自动进行方位角的预测。建立 GRNN 网络校正磁影响的模型时,先将仪器不带伽马探测器时按照全方位标定法进行标定<sup>[9]</sup>,消除测斜传感器的本身误差后,再加上伽马探测器,采集伽马探测器对测斜传感器的周围磁场影响的数据,获得不同倾角、不同工具面向角、不同方位角下的 58 个点作为 GRNN 训练集,方位角的误差均方差为  $0.798^{\circ}$ 。GRNN 的训练网络输入层为采集的倾角、方位角、工具面向角,输

出层为测斜传感器标定台测试的方位角;再采集 18 个点组成 GRNN 网络的测试集,方位角的误差均方差为  $0.677^{\circ}$ 。训练集的回判结果如图 7 所示,回判误差如图 8 所示,回判的方位角误差均方差为  $1.58 \times 10^{-29}$ 。测试集利用 GRNN 进行预测的结果与校正之前的对比如图 9 所示,测试集利用 GRNN 校正前后误差对比如图 10 所示,GRNN 预测的方位角误差均方差为  $5.11 \times 10^{-29}$ 。

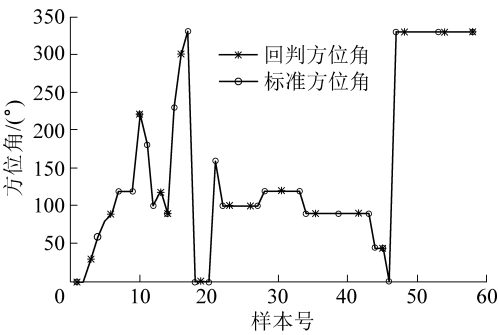


图 7 训练集 GRNN 的回判结果与标准对比  
Fig.7 Comparison of the return results of GRNN and standards of training set

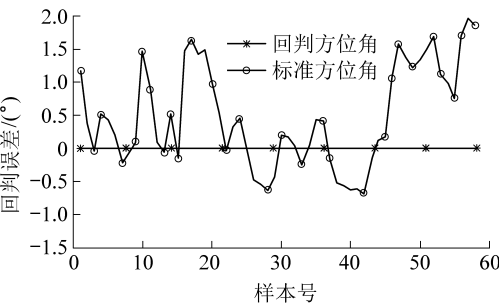


图 8 训练集 GRNN 回判误差  
Fig.8 GRNN back judgment error of training set

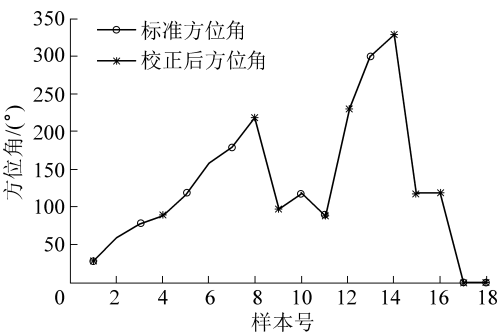


图 9 测试集的 GRNN 预测结果  
Fig.9 GRNN prediction results of test set

由图 7、图 8 可知,用于建立 GRNN 校正磁影响模型训练集的回判精度较高,与原始数据相比,训练集方位角的误差均方差由  $0.798^{\circ}$  降低到  $1.58 \times 10^{-29}$ 。由图 9、图 10 可知,对于测试集,利用训练

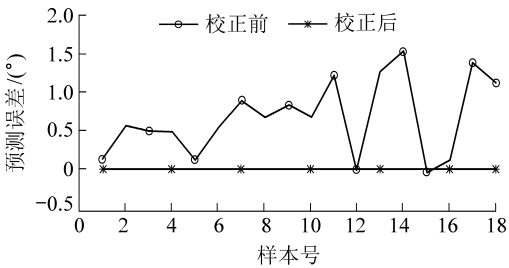


图 10 测试集的 GRNN 校正前后误差对比

Fig.10 Comparison of GRNN errors before and after correction of test set

集建立的模型进行测试集的预测计算,预测的结果精度较高,与测试集原始的方位角的误差均方差  $0.6778^{\circ}$  相比,降低到  $5.11 \times 10^{-29}^{\circ}$ 。因此,利用 GRNN 进行伽马对测斜方位角的磁影响校正能满足相关要求,并且精度较高。

4 结 论

1) 矿用随钻伽马测井仪是集地层放射性测量与轨迹测量功能于一体的仪器,探测地层放射性的伽马探测器对轨迹测量的测斜传感器的测量精度有影响。

2) 矿用随钻伽马测井仪中伽马探测器虽然为软磁物质,不产生磁场,但是在磁场中会使邻近的磁场的分布发生畸变。在测斜传感器附近放入伽马探测器后,测斜传感器周围的磁场分布发生变化,并且伽马探测器对测斜传感器周围磁场的 X 方向分量、Y 方向分量、Z 方向分量的影响不同。因此,在仪器与磁场呈不同的夹角时,其影响会不同。

3) 在仪器实际工作时,仪器倾角、方位角不同,伽马探测器对测斜测量的方位角的精度影响不同,并且影响为非线性。

4) 利用 GRNN,建立伽马探测器的对测斜的方位角测量影响的校正模型,预测精度较高,取得了较好的应用效果。

参考文献 (References):

[1] 石智军,刘建林,李泉新. 我国煤矿区钻进技术装备发展与应用[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(4): 1-6.  
SHI Zhijun, LIU Jianlin, LI Quanxin. Development and application of drilling technique and equipment in coal mining area of China[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(4): 1-6.

[2] 石智军,姚克,田宏亮,等. 煤矿井下随钻测量定向钻进技术与装备现状及展望[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(5): 22-28.  
SHI Zhijun, YAO Ke, TIAN Hongliang, et al. Present situation and prospect of directional drilling technology and equipment while drilling measurement in underground coal mine[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(5): 22-28.

[3] 董洪波. 煤矿井下随钻测量及钻孔数据处理软件开发与应用[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(6): 195-200, 216.  
DONG Hongbo. Development and application of software for measurement while drilling and borehole data processing in coal mine[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(6): 195-200, 216.

[4] 江浩,燕斌. 基于 PNI 磁感式传感器的钻孔测斜仪的研制[J]. 煤田地质与勘探, 2016, 44(4): 132-135, 141.  
JIANG Hao, YAN Bin. Borehole inclinometer based on PNI magnetic induction sensor[J]. Coal Geology & Exploration, 2016, 44(4): 132-135, 141.

[5] RUSSELL M K, RUSSELL A W. Surveying of borehole; America, US4163324[P]. 1979-08-07.

[6] 许吴东,黄根炉,张然,等. 磁力随钻测量磁干扰校正方法研究[J]. 石油钻探技术, 2014, 42(2): 102-106.  
XU Haodong, HUANG Genlu, ZHANG Ran, et al. method of magnetic interference correction in survey with magnetic MWD[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014, 42(2): 102-106.

[7] 范光第,蒲文学,赵国山,等. 磁力随钻测斜仪轴向磁干扰校正方法[J]. 石油钻探技术, 2017, 45(4): 121-126.  
FAN Guangdi, PU Wenxue, ZHAO Guoshan, et al. Correction methods for axial magnetic interference of the magnetic inclinometer while drilling [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2017, 45(4): 121-126.

[8] 王明哲,陆斌,于跃军. Sperry-Sun MWD 轴向磁干扰的解决方法及应用[J]. 石油仪器, 2008, 22(2): 47-49.  
WANG Mingzhe, LU Bin, YU Yuejun. Solution to the axial magnetic interference on Sperry - Sun MWD [J]. Petroleum Instruments, 2008, 22(2): 47-49.

[9] 燕斌. 一种新型全空间钻孔测斜仪标定算法研究[J]. 工业仪表与自动化装置, 2016(6): 113-116.  
YAN Bin. Study of a new type of the calibration algorithm for the full space measurement and the ramp [J]. Industrial Instrumentation and Automation, 2016(6): 113-116.

[10] 王秀芳,句莉莉,齐元俊,等. 遗传神经网络在随钻测斜仪传感器补偿中的应用[J]. 化工自动化及仪表, 2010, 37(10): 70-72.  
WANG Xiufang, GOU Lili, QI Yuanjun, et al. Application of sensor compensation in MWC instrument based on genetic elman neural network [J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 2010, 37(10): 70-72.

[11] 潘保芝,石玉江,蒋必辞,等. 致密砂岩气层压裂产能及等级预测方法[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2015, 45(2): 649-654.  
PAN Baozhi, SHI Yujiang, JIANG Bici, et al. Research on gas yield and level prediction for post-frac tight sandstone reservoirs [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2015, 45(2): 649-654.

[12] 蒋必辞. 苏里格致密砂岩渗流分析及压裂产能预测方法研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2015.  
JIANG Bici. Research on percolation characteristic and post-frac productivity prediction for tight sandstone reservoirs in sulige area [D]. Jilin: Jilin University, 2015.

[13] 蒋必辞,潘保芝,庄华,等. 改进 GRNN 网络预测致密砂岩气

层压裂产能[J].世界地质,2014,33(2):471-476.

JIANG Bici, PAN Baozhi, ZHUANG Hua, *et al.* Gas productivity prediction based on improved GRNN for post-fracture sandstone reservoirs [J]. Global Geology, 2014, 33(2):471-476.

[14] 杜美华,程国建,李中亚.基于广义回归神经网络的油气层识别模型[J].石油矿场机械,2007,36(11):2-3.

DU Meihua, CHENG Guojian, LI Zhongya. Oil-gas layer identification based on general regression neural network[J]. Oil Field Equipment, 2007, 36(11):2-3.

[15] 赵 闯,刘 凯,李电生.基于广义回归神经网络的货运量预测[J].铁道学报,2004,26(1):12-15.

ZHAO Chuang, LIU Kai, LI Diansheng. Freight volume forecast based on GRNN[J]. Journal of the China Railway Society, 2004, 26(1):12-15.

[16] 赵亚鹏,丁以中.基于 GRNN 神经网络的长江干线港口集装箱吞吐量预测[J].中国航海,2006,69(4):90-91.

ZHAO Yapeng, DING Yizhong. Container turnover forecast of link ports along side the Yangtze River based on GRNN[J]. Navigation of China, 2006, 69(4):90-91.

[17] 蒋必辞,汪凯斌,潘保芝,等.煤矿井下电磁波无线随钻测井软件设计与实现[J].煤田地质与勘探,2016,44(6):152-158.

JIANG Bici, WANG Kaibin, PAN Baozhi, *et al.* Design and implementation of LWDEWCM software[J]. Coal Geology and Exploration, 2016, 44(6):152-158.

[18] 刘建强,汪小华,林新华等.三维磁感式电子罗盘的研制与标定[J].仪表技术与传感器,2012(6):19-21.

LIU Jianqiang, WANG Xiaohua, LIN Xinhua *et al.* Development and calibration of three-dimensional magneto-inductive electronic compass [J]. Instrument Technique and Sensor, 2012(6):19-21.

[19] 王小龙.矿用随钻方位伽马测井仪的设计与试验[J].煤炭科学技术,2016,44(8):161-167,20.

WANG Xiaolong. Design and experiment of mine azimuth gamma logging instrument while drilling [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(8):161-167, 20.

[20] 吴子瑕.钢板磁导率变化对船舶感应磁场的影响[J].中国舰船研究,2014,9(6):100-103.

WU Zixia. Effects of steel magnetic properties on induced magnetic fields of a ship[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2014, 9(6):100-103.