质子矢量磁力仪校准规范

（试验报告）

《质子矢量磁力仪》编写组

2024年8月

目 录

[一、试验目的 1](#_Toc135340429)

[二、试验方法 1](#_Toc135340430)

[三、试验所用设备 1](#_Toc135340431)

[四、试验地点及条件 2](#_Toc135340432)

[五、试验结果 2](#_Toc135340433)

[六、试验结论 8](#_Toc135340448)

[七、试验人员 8](#_Toc135340449)

[八、试验时间 8](#_Toc135340450)

质子矢量磁力仪校准规范试验报告

**一、试验目的和对象**

在《质子矢量磁力仪校准规范》（以下简称“校准规范”）制定过程中，为了合理的确定各检查和校准项目的技术要求及方法，我们选取地震地磁观测台网中广泛应用的质子矢量磁力仪作为校准对象，按照校准规范制定的检查和校准方法对各项目进行测试，验证该校准规范的正确性、可行性和可操作性。

由于当前应用的仪器仅有两种分别为FHD-2B型质子矢量磁力仪和FHD-4A型（详见表1），本试验针对这两种型号的仪器开展测试。

表1 FHD-2B型质子矢量磁力仪信息

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 仪器名称 | 型号 | 制造单位 |
| 质子矢量磁力仪 | FHD-2B | 新沂市经纬电子仪器有限公司 |
| 质子矢量磁力仪 | FHD-4A | 南京正源抗震科技有限公司 |

**二、试验方法**

采用校准规范中确定的检查和校准方法对相应项目进行试验，检查和校准项目见表2。

表2 校准规范中各项目与校准、检查方法的条款对应表

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 项目名称 | 计量特性条款 | 校准方法条款 |
| 1 | 总强度示值误差 | 5.1 | 7.2.1 |
| 2 | 总强度温度稳定性 | 5.2 | 7.2.2 |
| 3 | 分量线圈装置转台轴回转误差 | 5.3 | 7.2.3 |
| 4 | 分量线圈装置转台角位置定位误差及重复性 | 5.4 | 7.2.4 |
| 5 | 水平仪分度值误差 | 5.5 | 7.2.5 |
| 6 | 恒定电流源补偿电流温漂相对偏差 | 5.6 | 7.2.6 |
| 7 | 恒定电流源偏置电流正反向电流输出相对偏差 | 5.7 | 7.2.7 |
| 8 | 水平分量（或垂直分量）和相对磁偏角示值误差 | 5.8 | 7.2.8 |
| 9 | 重复性 | 5.9 | 7.2.9 |
| 注: 根据被校质子矢量磁力仪的功能和客户要求选择校准项目和校准方法。 | | | |

**三、试验所用设备**

试验中用到的标准测试设备见表3。

表3 测量标准设备

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 设备名称 | 型号/编号 | 主要技术要求 |
| 1 | 标准磁力仪 | 90F1 | 测量范围：20000-70000nT  最大允许误差：±0.1nT |
| 2 | 零磁空间试验室弱磁感应强度检定系统 | 试验室自制 | 空间尺寸为对角线长度为2.26m的正26面体，内部剩余磁场强度<20nT，噪声～2×10-12T/√Hz，剩余磁场的稳定性<0.3nT/小时，屏蔽系数S=200－4000 |
| 3 | 标准线圈 | 试验室自制 | 圈常数=152.2605 nT/mA，磁场的非均匀度<1.2×10-6（r=60mm的球形区）；<1×10-4（r=200mm，Z=1000mm的圆柱形区），线圈常数的温度系数<1×10-5/℃ |
| 4 | 高低温交变湿热试验箱 | GP/TH150 | 温度范围: -20℃～150℃，控温精度：±0.1℃，温度波动度:≤±0.5℃，温度偏差：±1.0℃，温度均匀度: ≤±2.0℃ |
| 5 | 信号发生器 | 33500B | 全带宽脉冲20MHz |
| 6 | 电子水平仪 | RL-B | 1档分度值0.01 mm/m，2档分度值0.005mm/m |
| 7 | 棱体 | 9018 | 12面，三等 |
| 8 | 光电自准直仪 | 1259 | ±0.10″（-20″~20″），±0.25″（-1000″~1000″） |
| 9 | 数字电流表 | 2450 | 6½ 位分辨率 |

**四、试验地点及条件**

试验地点见表4：

表4 试验地点

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 测试项目 | 试验地点 | 备注 |
|  | 总强度 | 中国地震局地震预测研究所零磁空间试验室 |  |
| 2 | 总强度温度稳定性 | 中国地震局地震预测研究所零磁空间试验室 |  |
| 3 | 分量线圈装置转台轴回转误差 | 江苏省计量科学研究院 |  |
| 4 | 分量线圈装置转台角位置定位误差及重复性 | 江苏省计量科学研究院 |  |
| 5 | 水平仪分度值误差 | 江苏省地震局电磁试验室 | 台站现场校准方法 |
| 6 | 恒定电流源补偿电流温漂相对偏差 | 江苏省地震局电磁试验室 |  |
| 7 | 恒定电流源偏置电流正反向电流输出相对偏差 | 江苏省地震局电磁试验室 |  |
| 8 | 水平分量（或垂直分量）和相对磁偏角示值误差 | 江苏省地震局新沂地震台 |  |
| 9 | 重复性 | 江苏省地震局高邮地震台 |  |

**五、试验结果**

根据校准规范的要求，对新沂市经纬电子仪器有限公司生产的FHD-2B型质子矢量磁力仪（以下简称为FHD-2B型质子矢量磁力仪）和南京正源抗震科技有限公司生产的FHD-4A质子矢量磁力仪（以下简称FHD-4A型质子矢量磁力仪）进行验证试验，结果如下所示。

## 5.1 总强度示值误差

FHD-2B型质子矢量磁力仪试验数据和结果见表5a。

表5a FHD-2B型质子矢量磁力仪总强度校准记录数据和校准结果

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 标准磁场  (平均值)  /nT | 被校质子矢量磁力仪总强度示值  (平均值)  /nT | 示值误差  /nT | 测量不确定度  /nT |
| 20000.82 | 20001.10 | -0.28 | 0.51 |
| 30000.39 | 30000.75 | -0.36 | 0.48 |
| 40000.02 | 39999.66 | 0.28 | 0.46 |
| 49999.83 | 49999.44 | 0.21 | 0.45 |
| 59999.00 | 59998.80 | 0.20 | 0.47 |
| 70001.01 | 70000.49 | 0.52 | 0.49 |

FHD-4A型质子矢量磁力仪试验数据和结果见表5b。

表5b FHD-4A型质子矢量磁力仪总强度校准记录数据和校准结果

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 标准磁场  (平均值)  /nT | 被校质子矢量磁力仪总强度示值  (平均值)  /nT | 示值误差  /nT | 测量不确定度  /nT |
| 20000.68 | 20000.41 | 0.27 | 0.5 |
| 30000.24 | 30000.02 | 0.22 | 0.47 |
| 39999.43 | 39999.22 | 0.21 | 0.46 |
| 49999.23 | 49999.01 | 0.22 | 0.45 |
| 59999.18 | 59998.85 | 0.33 | 0.47 |
| 70000.61 | 70000.04 | 0.57 | 0.5 |

5.2总强度温度稳定性

试验中采用总强度温度稳定性模拟旋进信号频率校准方法，选择信号发生器输出频率为2000Hz作为校准点，温度点分别为0℃、10℃、20℃、30℃、40℃。

FHD-2B型质子矢量磁力仪试验数据和结果见表6a。

表6a FHD-2B型质子矢量磁力仪总强度温度稳定性校准记录数据和校准结果

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 温度  T/℃ | 被校质子矢量磁力仪总强度示值  /nT | 温度稳定性  /nT/℃ | 测量不确定度  /nT/℃ |
| 0℃ | 46974.40 | 0.001 | 0.006 |
| 10℃ | 46974.39 |
| 20℃ | 46974.39 |
| 30℃ | 46974.39 |
| 40℃ | 46974.40 |

FHD-4A型质子矢量磁力仪试验数据和结果见表6b。

表6a FHD-4A型质子矢量磁力仪总强度温度稳定性校准记录数据和校准结果

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 温度  T/℃ | 被校质子矢量磁力仪总强度示值  /nT | 温度稳定性  /nT/℃ | 测量不确定度  /nT/℃ |
| 0℃ | 46974.40 | 0.001 | 0.006 |
| 10℃ | 46974.40 |
| 20℃ | 46974.39 |
| 30℃ | 46974.39 |
| 40℃ | 46974.39 |

5.3分量线圈装置转台轴回转误差

FHD-2B型质子矢量磁力仪试验数据和结果见表7a。

表7a FHD-2B型质子矢量磁力仪轴回转误差校准记录数据和校准结果

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 轴回转误差校准 | | | |
| 被测轴角位置 | 水平仪1读数 | 水平仪2读数 | 轴回转误差 |
| 0 | 0 | 0 | 5.34 |
| 30 | 1 | -3 |
| 60 | 2 | -5 |
| 90 | 3 | -5 |
| 120 | 4 | -5 |
| 150 | 5 | -5 |
| 180 | 6 | -8 |
| 210 | 6 | -7 |
| 240 | 5 | -3 |
| 270 | 4 | 0 |
| 300 | 1 | 2 |
| 330 | -1 | 3 |
| 360 | -3 | 1 |
| 结果 | 分量线圈装置转台轴回转误差小于0.1′ | | |

FHD-4A型质子矢量磁力仪试验数据和结果见表7b。

表7b FHD-4A型质子矢量磁力仪轴回转误差校准记录数据和校准结果

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 轴回转误差校准 | | | |
| 被测轴角位置 | 水平仪1读数 | 水平仪2读数 | 轴回转误差 |
| 0 | 0 | 0 | 1.71 |
| 30 | 1 | -1 |
| 60 | 2 | -2 |
| 90 | 2 | -3 |
| 120 | 3 | -3 |
| 150 | 4 | -5 |
| 180 | 5 | -6 |
| 210 | 4 | -5 |
| 240 | 3 | -4 |
| 270 | 3 | -4 |
| 300 | 1 | -2 |
| 330 | 0 | -1 |
| 360 | -1 | 0 |
| 结果 | 分量线圈装置转台轴回转误差小于0.1′ | | |

### 5.4分量线圈装置转台角位置定位误差及重复性

FHD-2B型质子矢量磁力仪试验数据和结果见表8a。

表8a FHD-2B型质子矢量磁力仪分量线圈装置转台角位置定位及重复性校准记录数据和校准结果

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **正向旋转** | | **反向旋转** | |
| **光管读数** | **转台读数** | **光管读数** | **转台读数** |
| 0″ | 0° | 4.9″ | 0° |
| -3.6″ | 30° | -11.2″ | 30° |
| -16.4″ | 60° | -12.1″ | 60° |
| -2.5″ | 90° | 5.1″ | 90° |
| 3.1″ | 120° | -10.8″ | 120° |
| -7.7″ | 150° | 6.9″ | 150° |
| -19.3″ | 180° | -11.4″ | 180° |
| -32.2″ | 210° | -22.8″ | 210° |
| -2.1″ | 240° | 2.3″ | 240° |
| -28.7″ | 270° | -9.2″ | 270° |
| 2.1″ | 300° | -5.1″ | 300° |
| -9.5″ | 330° | -1.1″ | 330° |
| 结果 | 角位置定位误差小于±1′，角位置定位重复性小于0.3′。 | | |

FHD-4A型质子矢量磁力仪试验数据和结果见表8b。

表8b FHD-4A型质子矢量磁力仪分量线圈装置转台角位置定位及重复性校准记录数据和校准结果

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **正向旋转** | | **反向旋转** | |
| **光管读数** | **转台读数** | **光管读数** | **转台读数** |
| 0 | 0° | -1.7 | 0° |
| -2.6 | 30° | -9.2 | 30° |
| -5.7 | 60° | -11.1 | 60° |
| -13.2 | 90° | -13.1 | 90° |
| -18.9 | 120° | 5.2 | 120° |
| -4.7 | 150° | 9.1 | 150° |
| 2.2 | 180° | 0.5 | 180° |
| 2.9 | 210° | 7.4 | 210° |
| -2.1 | 240° | 5.7 | 240° |
| 9.2 | 270° | -2.8 | 270° |
| 4.2 | 300° | 7.7 | 300° |
| -9.5 | 330° | 7.9 | 330° |
| 结果 | 角位置定位误差小于±1′，角位置定位重复性小于0.3′。 | | |

### 5.5水平仪分度值误差

试验中采用了水平仪分度值误差台站现场校准方法，在地震地磁台站开展水平仪分度值误差校准工作。

FHD-2B型质子矢量磁力仪试验数据和结果见表9a。

表9a FHD-2B型质子矢量磁力仪水平仪分度值误差台站现场校准方法校准记录数据和校准结果

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 校准  序号 | 左边 | | | 右边 | | |
| 电子水平仪的示值 | 水平仪的读数 | 实测分度值 | 电子水平仪的示值 | 水平仪的读数 | 实测分度值 |
| 0 | 0 | 0 |  | 122 | 0 |  |
| 1 | 30 | 1 | 1 | 92 | 1 | 1 |
| 2 | 60 | 1.9 | 0.9 | 62 | 2 | 1 |
| 3 | 90 | 2.9 | 1 | 32 | 3 | 1 |
| 4 | 120 | 3.9 | 1 | 2 | 3.9 | 0.9 |
| 结果 | 被校水平仪的标称分度值与实测平均分度值之差的绝对值未超过标称分度值的10%，任意一个实测分度值误差均在标称分度值的20%范围内。 | | | | | |

FHD-4A型质子矢量磁力仪试验数据和结果见表9b。

表9b FHD-4A型质子矢量磁力仪水平仪分度值误差台站现场校准方法校准记录数据和校准结果

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 校准  序号 | 左边 | | | 右边 | | |
| 电子水平仪的示值 | 水平仪的读数 | 实测分度值 | 电子水平仪的示值 | 水平仪的读数 | 实测分度值 |
| 0 | 0 | 0 |  | 121 | 0 |  |
| 1 | 30 | 1 | 1 | 91 | 1 | 1 |
| 2 | 60 | 2 | 1 | 61 | 2 | 1 |
| 3 | 90 | 3 | 1 | 31 | 2.9 | 0.9 |
| 4 | 120 | 3.9 | 0.9 | 1 | 4 | 1.1 |
| 结果 | 被校水平仪的标称分度值与实测平均分度值之差的绝对值未超过标称分度值的10%，任意一个实测分度值误差均在标称分度值的20%范围内。 | | | | | |

5.6恒定电流源补偿电流温漂相对偏差

试验中恒定电流源补偿电流选择106.4mA校准点。

FHD-2B型质子矢量磁力仪试验数据和结果见表10a。

表10a FHD-2B型质子矢量磁力仪恒定电流源补偿电流温漂相对偏差校准记录数据和校准结果

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 温度  T/℃ | 标准电流表示值的平均值  /mA | 恒定电流源补偿电流温漂相对偏差 | 测量不确度 |
| 0℃ | 106.4332 | -0.002% | 0.002% |
| 10℃ | 106.4339 | -0.001% | 0.002% |
| 20℃ | 106.4350 | -- | -- |
| 30℃ | 106.4362 | 0.001% | 0.002% |
| 40℃ | 106.4374 | 0.002% | 0.002% |

FHD-4A型质子矢量磁力仪试验数据和结果见表10b。

表10b FHD-4A型质子矢量磁力仪恒定电流源补偿电流温漂相对偏差校准

记录数据和校准结果

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 温度  T/℃ | 标准电流表示值的平均值  /mA | 恒定电流源补偿电流温漂相对偏差 | 测量不确度 |
| 0℃ | 106.4519 | -0.0018% | 0.002% |
| 10℃ | 106.4524 | -0.0013% | 0.002% |
| 20℃ | 106.4538 | -- | -- |
| 30℃ | 106.4551 | 0.0012% | 0.002% |
| 40℃ | 106.4554 | 0.0015% | 0.002% |

### 5.6.2 恒定电流源偏置电流正反向电流输出相对偏差

FHD-2B型质子矢量磁力仪试验数据和结果见表11a。

表11a FHD-2B型质子矢量磁力仪恒定电流源偏置电流正反向电流输出相对偏差校准

记录数据和校准结果

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 偏置电流校准点  /mA | 正向偏置时标准电流表示值的平均值  /mA | 反向偏置时标准电流表示值的平均值  /mA | 偏置电流正反向输出相对偏差 | 测量不确度 |
| 120 | 120.4251 | -120.4279 | -0.0023% | 0.002% |
| 100 | 100.4072 | -100.4095 | -0.0023% | 0.002% |
| 80 | 80.3979 | -80.3999 | -0.0025% | 0.003% |
| 60 | 60.3911 | -60.3933 | -0.0036% | 0.004% |

FHD-4A型质子矢量磁力仪试验数据和结果见表11b。

表11b FHD-4A型质子矢量磁力仪恒定电流源偏置电流正反向电流输出相对偏差校准记录数据和校准结果

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 偏置电流校准点  /mA | 正向偏置时标准电流表示值的平均值  /mA | 反向偏置时标准电流表示值的平均值  /mA | 偏置电流正反向输出相对偏差 | 测量不确度 |
| 120 | 120.2732 | -120.2754 | -0.0018% | 0.002% |
| 100 | 100.2664 | -100.2682 | -0.0018% | 0.002% |
| 80 | 80.2577 | -80.2599 | -0.0027% | 0.003% |
| 60 | 60.2352 | -60.2373 | -0.0035% | 0.004% |

5.7水平分量和磁偏角示值误差

根据仪器功能选择水平分量和磁偏角示值误差校准工作。

FHD-2B型质子矢量磁力仪试验数据和结果见表12a。

表12a FHD-2B型质子矢量磁力仪水平分量和磁偏角校准记录数据和校准结果

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 水平分量校准 | 结果 | 磁偏角校准 | 结果 |
| /rad | 0.000015 | /rad | 0.0000225 |
| / nT | 0.62 | / nT | 40660 |
| / nT | 40660 | / nT | 0.91 |
| / nT | 0.61 | / nT | 0.5 |
| / nT | 1.23 | / ′ | 0.15 |
|  | 0.94 |  | 0.43 |

FHD-4A型质子矢量磁力仪试验数据和结果见表12b。

表12b FHD-4A型质子矢量磁力仪水平分量和磁偏角校准记录数据和校准结果

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 水平分量校准 | 结果 | 磁偏角校准 | 结果 |
| /rad | -0.000015 | /rad | 0.000015 |
| / nT | 1.32 | / nT | 40660 |
| / nT | 40660 | / nT | 0.61 |
| / nT | -0.61 | / nT | 0.62 |
| / nT | 0.71 | / ′ | 1.23 |
|  | 0.94 |  | 0.44 |

5.9总强度、水平分量（垂直分量）和磁偏角的重复性

根据仪器功能开展总强度、水平分量和磁偏角的重复性校准工作。

FHD-2B型质子矢量磁力仪试验数据和结果见表13。

表13a FHD-4A型质子矢量磁力仪总强度、水平分量和磁偏角的重复性校准记录数据和校准结果

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 第i时段 | /nT | /nT | /′ |
| 1 | 0.130 | 0.184 | 0.024 |
| 2 | 0.136 | 0.164 | 0.033 |
| 3 | 0.205 | 0.132 | 0.023 |
| 4 | 0.124 | 0.167 | 0.025 |
| 5 | 0.156 | 0.175 | 0.031 |
| 6 | 0.228 | 0.165 | 0.024 |
| 7 | 0.143 | 0.213 | 0.030 |
| 8 | 0.133 | 0.166 | 0.028 |
| 9 | 0.147 | 0.161 | 0.026 |
| 10 | 0.148 | 0.196 | 0.031 |
| 11 | 0.148 | 0.178 | 0.025 |
| 12 | 0.125 | 0.162 | 0.034 |
| 13 | 0.132 | 0.174 | 0.032 |
| 14 | 0.155 | 0.158 | 0.026 |
| 15 | 0.159 | 0.165 | 0.029 |
| 16 | 0.125 | 0.174 | 0.031 |
| 17 | 0.129 | 0.144 | 0.025 |
| 18 | 0.141 | 0.207 | 0.028 |
| 19 | 0.150 | 0.181 | 0.020 |
| 20 | 0.126 | 0.157 | 0.019 |
| 21 | 0.140 | 0.155 | 0.026 |
| 22 | 0.123 | 0.185 | 0.031 |
| 23 | 0.107 | 0.192 | 0.021 |
| 24 | 0.132 | 0.207 | 0.024 |
| 结果 |  | | |

FHD-4A型质子矢量磁力仪试验数据和结果见表13b。

表13b FHD-4A型质子矢量磁力仪总强度、水平分量和磁偏角的重复性校准记录数据和校准结果

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 第i时段 | /nT | /nT | /′ |
| 1 | 0.121 | 0.147 | 0.021 |
| 2 | 0.126 | 0.143 | 0.024 |
| 3 | 0.122 | 0.144 | 0.022 |
| 4 | 0.128 | 0.145 | 0.025 |
| 5 | 0.130 | 0.141 | 0.021 |
| 6 | 0.125 | 0.144 | 0.022 |
| 7 | 0.124 | 0.146 | 0.019 |
| 8 | 0.135 | 0.149 | 0.019 |
| 9 | 0.128 | 0.143 | 0.021 |
| 10 | 0.139 | 0.141 | 0.023 |
| 11 | 0.124 | 0.149 | 0.020 |
| 12 | 0.122 | 0.144 | 0.021 |
| 13 | 0.125 | 0.145 | 0.022 |
| 14 | 0.158 | 0.173 | 0.025 |
| 15 | 0.126 | 0.145 | 0.022 |
| 16 | 0.129 | 0.153 | 0.024 |
| 17 | 0.126 | 0.149 | 0.032 |
| 18 | 0.120 | 0.139 | 0.020 |
| 19 | 0.117 | 0.138 | 0.031 |
| 20 | 0.128 | 0.141 | 0.02 |
| 21 | 0.124 | 0.148 | 0.031 |
| 22 | 0.122 | 0.141 | 0.023 |
| 23 | 0.121 | 0.142 | 0.020 |
| 24 | 0.128 | 0.141 | 0.022 |
| 结果 |  | | |

**六、试验结论**

通过对地震地磁台网中广泛应用的FHD-2B型质子矢量磁力仪和FHD-4A型质子矢量磁力仪的试验验证，证明制定的《质子矢量磁力仪校准规范》中的计量特性和校准方法是科学、合理，能够满足校准需求。

**七、试验人员**

夏忠、居海华、居朱涛、杨杰。

**八、试验时间**

试验验证时间：2023年1月1日~2024年8月11日。