

T/ZGCJM

中关村军民融合信息装备产业促进会团体标准

T/ZGCJM 003—2025

地下空洞超导磁探测系统技术要求和试验 方法

Technical requirements and test methods for superconducting magnetic detection
system of underground cave

2025 - 09 - 22 发布

2025 - 09 - 22 实施

目 次

| | |
|------------------|----|
| 前 言 | II |
| 1 范围 | 1 |
| 2 规范性引用文件 | 1 |
| 3 术语和定义 | 1 |
| 4 系统分类 | 2 |
| 5 系统组成 | 2 |
| 5.1 地面运载式 | 2 |
| 5.2 空中运载式 | 2 |
| 6 技术要求 | 3 |
| 6.1 运载平台 | 3 |
| 6.2 软件和硬件 | 4 |
| 6.3 磁探测性能 | 4 |
| 6.4 环境适应性 | 4 |
| 6.5 电磁兼容性 | 5 |
| 7 测试方法 | 5 |
| 7.1 试验准备 | 5 |
| 7.2 运载平台 | 5 |
| 7.3 硬件试验 | 5 |
| 7.4 软件试验 | 5 |
| 7.5 相对灵敏度 | 5 |
| 7.6 探测动态范围 | 6 |
| 7.7 探测距离 | 6 |
| 7.8 探测精度 | 7 |
| 7.9 环境适应性 | 7 |
| 7.10 电磁兼容性 | 8 |

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本文件由中关村军民融合信息装备产业促进会提出并归口。

本文件起草单位：宁波立极科技有限公司、甬磁（宁波）健康科技有限公司、宁波磁软软件开发有限公司、宁波飞磁生物科技有限公司、宁波鄞磁科技有限公司、宁波明上医疗科技有限公司、北京美尔斯通科技发展股份有限公司、北京斯奎德量子技术有限公司、北京宇航世纪超导技术有限公司、南京苏磁医疗科技有限公司、苏州吴磁医疗科技有限公司、北京石油化工学院、北京复高科技有限公司、北京清颐科技有限公司、北京密磁医疗科技有限公司、磁宝（北京）医疗科技有限公司、北京美尔斯通科技服务有限公司。

本文件主要起草人：余立扬、佟圣勇、王程瑜、师小丽、俞云耀、王晶晶、Muhammad Naeem Shah、DIALLO ELHADJ MOUSTAPHA、刘永锋、刘超、韩磊、陈胜华、米宜铎、苑茜贝、涂颜帅、葛静茹、张文平、赵勇、李治勋、王燕国、赵长元、王庆隆、时亚楠、杨曼、李凯、林胜朋、张阳阳、赵平、董长宝、隋志军、尤伟、赵云龙、王同生、张增浩、陈阳慧、贾明明、邱凯、田二红、武广大、赵凌飞、赵鸿彬、戴尧芹、洪立奇、张帅、田鑫鑫、刘春、李文君、邢启龙、张宇航、张琪、米旺。

地下空洞超导磁探测系统技术要求和试验方法

1 范围

本文件规定了地下空洞超导磁探测系统（以下简称“地下空洞磁探测系统”）的系统分类和组成、技术要求和试验方法等。

本文件适用于基于超导磁力仪，对地下空洞及空洞内的目标及其活动进行探测的磁探测系统的设计和研制。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- GB/T 2423.1—2008 电工电子产品环境试验 第2部分：试验方法 试验A：低温
- GB/T 2423.2—2008 电工电子产品环境试验 第2部分：试验方法 试验B：高温
- GB/T 2423.3—2016 环境试验 第2部分：试验方法 试验Cab：恒定湿热试验
- GB/T 2423.5—2019 环境试验 第2部分：试验方法 试验Ea和导则：冲击
- GB/T 2423.10—2019 环境试验 第2部分：试验方法 试验Fc：振动（正弦）
- GB/T 2423.16—2022 环境试验 第2部分：试验方法 试验J和导则：长霉
- GB/T 2423.17—2024 环境试验 第2部分：试验方法 试验Ka：盐雾
- GB/T 17799.2—2023 电磁兼容 通用标准 第2部分：工业环境中的抗扰度标准
- GJB 10849—2022 超导磁力仪规范

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

地下空洞 underground cave

地表以下人工或自然形成的空洞结构，包括但不限于防空洞、地质塌陷区、管道空洞等。

3.2

极弱磁材料 ultra-weak magnetic material

相对磁导率在0.9999~1.0001之间的材料。

3.3

超导磁力仪 superconducting magnetometer

以超导磁梯度计为磁感知元件，以超导量子干涉器为磁通电压转换器件，由极弱磁低温恒温器、低噪声放大器、控制系统和数据处理单元构成的高灵敏度磁场测量装置，能够测量目标磁场的磁感应强度相对值、磁场梯度和矢量分布。

3.4

超导磁探测系统 superconducting magnetic detection system

利用超导磁力仪的磁探测性能，用以测量被测目标磁感应强度的系统。

3.5

相对灵敏度 relative sensitivity

引起相应示值产生可觉察到变化的被测目标的磁感应强度最小值。

3.6

探测距离 detection distance

能够探测到钢质目标的最大距离，用 m 表示。

4 系统分类

根据地下空洞超导磁探测系统的运载方式，地下空洞磁探测系统分为以下两类：

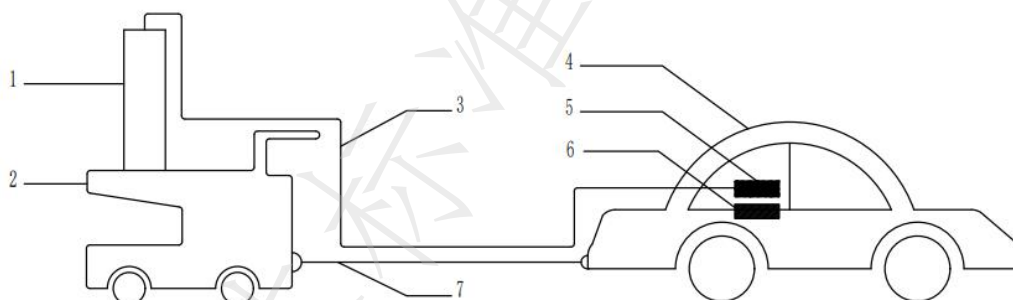
- a) 地面运载式；
- b) 空中运载式。

5 系统组成

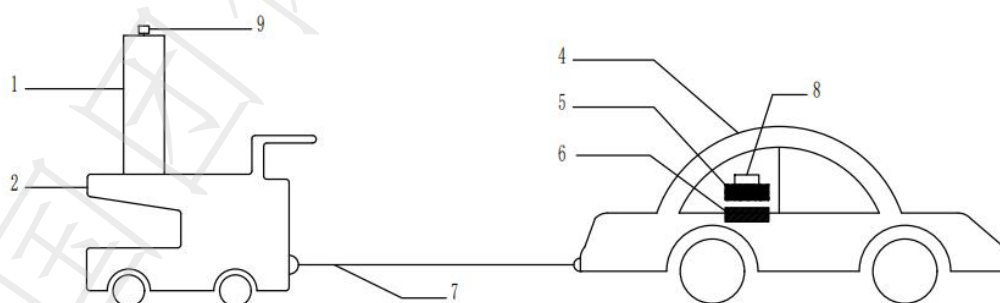
5.1 地面运载式

地面运载式地下空洞磁探测系统由下列六部分组成（见图1）：

- a) 动力牵引车；
- b) 挂车；
- c) 超导磁测量传感器；
- d) 控制器和数据处理系统；
- e) 通信模组，包括有线通信（含通信电缆）和无线通信两种模式，分别见图1 a）和图1 b）；
- f) 连接部件（牵引杆）。



a) 有线通信地面运载式地下空洞磁探测系统



b) 无线通信地面运载式地下空洞磁探测系统

标引序号说明：

- 1—超导磁测量传感器；
- 2—挂车；
- 3—通信电缆；
- 4—动力牵引车；
- 5—控制器；

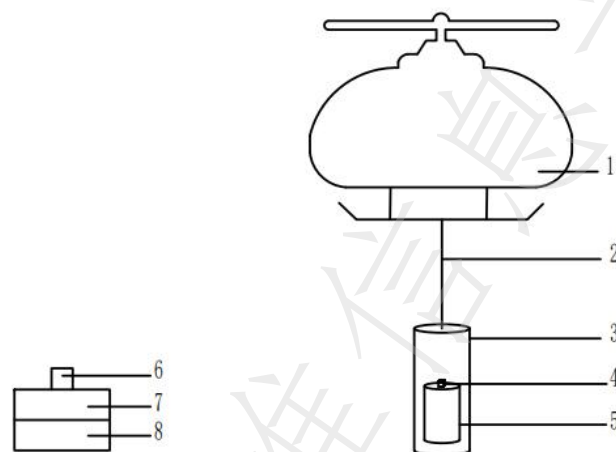
- 6—数据处理系统；
- 7—牵引杆；
- 8—车载端无线通信模组；
- 9—传感器端无线通信模组。

图1 地面运载式地下空洞磁探测系统组成示意图

5.2 空中运载式

空中运载式地下空洞磁探测系统主要由下列六部分组成（见图2）：

- a) 航空器；
- b) 吊舱；
- c) 超导磁测量传感器；
- d) 无线通信模组，包括传感器端和地面端；
- e) 控制器和数据处理系统；
- f) 连接部件（吊绳）。



标引序号说明：

- | | |
|----------------|---------------|
| 1——航空器； | 5——超导磁测量传感器； |
| 2——吊绳； | 6——地面端无线通信模组； |
| 3——吊舱； | 7——控制器； |
| 4——传感器端无线通信模组； | 8——数据处理系统。 |

图 2 空中运载式地下空洞磁探测系统组成示意图

6 技术要求

6.1 运载平台

6.1.1 地面运载式

- 6.1.1.1 动力牵引车应选用动力拖车，并使用刚性的牵引杆通过动力牵引车自带的挂钩与挂车连接。
- 6.1.1.2 挂车应为全挂式挂车，并能在 50 km/h 的行驶速度内正常使用。
- 6.1.1.3 挂车应采用极弱磁材料制造。
- 6.1.1.4 挂车的承载能力应大于传感器系统重量的 2 倍。
- 6.1.1.5 牵引杆应选用极弱磁材料制造，长度应大于 3 m。
- 6.1.1.6 控制器和数据处理系统应置于动力牵引车上或置于地面，可采用无线或有线通信模式，且保持信号畅通。

6.1.2 空中运载式

- 6.1.2.1 航空器平台可选择直升机、无人机、热气球等，其承载能力应大于传感器系统重量的 2 倍，并配置挂钩与吊舱连接。
- 6.1.2.2 吊舱应采用极弱磁材料制造。
- 6.1.2.3 吊舱与航空器之间的吊绳长度应为 12 m~50 m。
- 6.1.2.4 传感器端无线通信模组和控制端无线通信模组应保持信号畅通，其无线通信应符合表 1 的要求。

表 1 无线通信要求

| 序号 | 项目 | 指标要求 |
|----|------|------------------|
| 1 | 传输距离 | >5 km |
| 2 | 波特率 | 961200 bit/s |
| 3 | 传输时延 | <1 ms |
| 4 | 通信接口 | 满足数据传输稳定性要求的接口协议 |

6.2 软件和硬件

6.2.1 硬件要求

超导磁力仪应符合GJB 10849—2022的要求，并根据所选用的运载方式固定在相应的平台上。

6.2.2 软件要求

6.2.2.1 软件包括数据采集、处理和输出等模块。采用模块化结构，便于故障诊断和升级。

6.2.2.2 软件支持的数据文件格式应为ZIP格式。

6.3 磁探测性能

6.3.1 相对灵敏度

地下空洞磁探测系统的相对灵敏度应优于 1×10^{-13} T。

6.3.2 探测动态范围

地下空洞磁探测系统的磁场强度探测动态范围应不小于90 dB。

6.3.3 探测距离

根据被测地下空洞的质量和磁矩，探测距离应不小于按公式（1）计算的数值。

$$d = \sqrt[3]{4\pi \cdot M \cdot m \times 10^{-8} / S} \dots\dots\dots (1)$$

式中：

d ——探测距离，单位为米（m）；

M ——探测目标的磁矩，单位为安每平方米（ $A \cdot m^2$ ），对于钢质材料，每吨钢的磁矩通常取 $250 A \cdot m^2$ ；

m ——地下空洞等效钢质目标的质量，单位为吨（t）；

S ——磁探测系统的探测灵敏度，单位为特斯拉（T）。

示例：对于质量为1 t、磁矩为 $250 A \cdot m^2$ 钢质探测目标，若超导磁力仪的探测灵敏度为 1×10^{-13} T，按公式（1）计算该系统的探测距离应为679 m。

6.3.4 探测精度

地下空洞磁探测系统的探测精度应符合下列要求：

- a) 探测距离偏差不大于被探测目标最大三维尺寸的三分之一。
- b) 探测角度偏差不大于 $\pm 0.2^\circ$ 。

6.4 环境适应性

6.4.1 温度

地下空洞磁探测系统应能在 $-40^\circ\text{C} \sim 55^\circ\text{C}$ 范围内正常工作。

6.4.2 湿热

地下空洞磁探测系统应在 $(40 \pm 2)^\circ\text{C}$ 、相对湿度RH $(40 \pm 2)\%$ 的环境中持续12 h能正常工作。

6.4.3 冲击

地下空洞磁探测系统应在加速度为 250 m/s^2 、冲击力为 25 g_n 、持续时间 6 ms 的冲击环境中能正常工作。

6.4.4 振动

地下空洞磁探测系统应在加速度为 10 m/s^2 、振动频率为 $(10\sim 150)\text{ Hz}$ 的振动环境中能正常工作。

6.4.5 霉菌

地下空洞磁探测系统应按GB/T 2423.16—2022规定的试验程序进行28d霉菌试验后，长霉等级应不超过3级。

6.4.6 盐雾

地下空洞磁探测系统具有在盐雾大气条件下抗盐雾腐蚀的能力。

6.5 电磁兼容性

地下空洞磁探测系统的电磁兼容性应符合GB/T 17799.2—2023中第4章的要求。

7 测试方法

7.1 试验准备

试验用地下空洞磁探测系统应进行下列预处理：

- c) 对超导磁力仪的极弱磁低温恒温器抽真空；
- d) 往超导磁力仪的极弱磁低温恒温器充灌液氮；
- e) 准备好标定线圈和恒流源。

7.2 运载平台

7.2.1 地面运载式

7.2.1.1 查阅租赁或购买动力牵引车时提供的技术文件，证实动力牵引车与系统其他组成部分的匹配性。

7.2.1.2 检查控制器和数据处理系统在动力牵引车上的放置情况，并检查信号连接线是否正确连接。

7.2.1.3 起动力牵引车并进行路试，检查系统运行情况是否正常。

7.2.2 空中运载式

7.2.2.1 查阅航空器平台和吊舱的租赁或购买时提供的技术文件，证实航空器平台和吊舱与系统其他组成部分的匹配性。

7.2.2.2 启动无线通信模组，检查传感器端和控制端信息传输是否正常。

7.2.2.3 启动航空器，检查通信传输是否存在干扰。

7.3 硬件试验

查看超导磁力仪的产品合格证书及相关技术文件，确定产品符合技术要求。检查超导磁力仪在运载平台上的安装情况，确保安装稳固，接插顺畅，通电后系统正常响应。

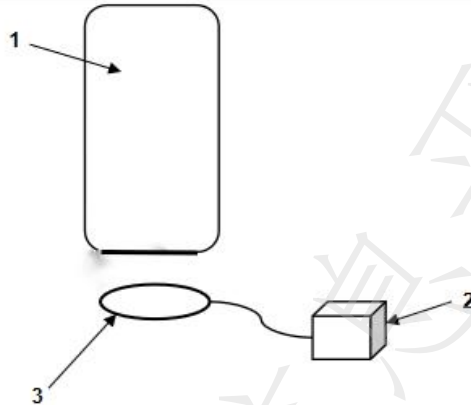
7.4 软件试验

启动系统，观察系统运行是否存在卡顿、跳出或死机；数据文件格式符合6.2.2.2要求。

7.5 相对灵敏度

试验操作步骤如下：

- a) 将标定线圈连接于一个能够产生 0 Hz~300 Hz, 0 A~10 A 的恒流源, 并置于超导磁力仪的正下方。测试连接见图 4。



标引序号说明:

1——超导磁力仪; 2——恒流源; 3——标定线圈。

图 3 测试连接示意图

- b) 以 0.1 mA 为步距逐步增大恒流源电流, 当出现第一个可分辨的读数, 记录该读数;
c) 重复以上步骤 10 次, 记录读数并计算平均值。该平均数即为相对灵敏度。

7.6 探测动态范围

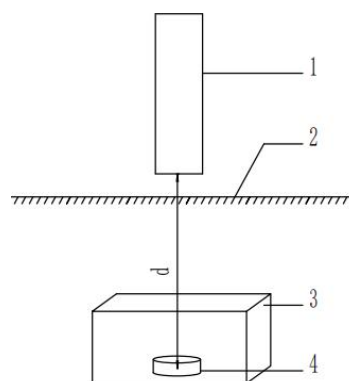
试验操作步骤如下:

- a) 逐渐增加恒流源的电流, 直到数据处理系统的读数出现饱和, 记录此时的数值;
b) 该数值与相对灵敏度比值的对数的 20 倍即为探测动态范围;
c) 重复操作 10 次, 取平均值。

7.7 探测距离

试验操作步骤如下:

- a) 在土质均匀的试验区地下 2 m 处布置一个体积为 1m³ 的空间, 将其作为地下空洞模型的探测对象, 见图 5;



标引序号说明:

1——超导磁力仪; 3——模拟空洞;
2——台面; 4——钢质目标体。

图 4 地下空洞磁探测系统测试连接示意图

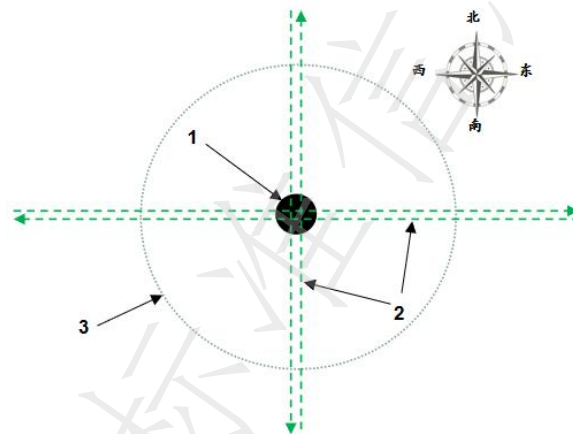
- b) 在地下空洞模型内放置一个钢质目标体 (10kg) 作为探测对象;
c) 按照 6.3.3 的公式 (1) 计算出理论探测距离 d ;

- d) 在大于理论探测距离处布置磁探测系统并进行探测；
- e) 若数据处理系统有读数显示，则该距离即为探测距离；
- f) 在不同位置重复操作 10 次，取最小值。

7.8 探测精度

试验操作步骤如下：

- a) 在测试区域内放置一个已知位置坐标的待测地下空洞模型；
- b) 地下空洞磁探测系统分别沿东、南、西、北四个方向在探测距离内经过待测地下空洞模型上方（如图 6 所示）。依次记录数据处理系统显示的待测地下空洞模型的方位值（包括距离和角度）；
- c) 各记录的方位值与待测地下空洞模型的实际坐标值进行比较，得出相应的探测精度。



标引序号说明：

- 1——待测地下空洞模型；
- 2——地下空洞磁探测系统的移动轨迹；
- 3——探测距离范围。

图 5 地下空洞磁探测系统探测精度测试示意图

7.9 环境适应性

7.9.1 低温

低温试验按GB/T 2423.1—2008规定的方法进行，试验的严酷等级为-40℃持续16h。

7.9.2 高温

高温试验按GB/T 2423.2—2008规定的方法进行，试验的严酷等级为50℃持续16h。

7.9.3 湿热

湿热试验按GB/T 2423.3—2016规定的方法进行，试验的严酷等级为温度 (40 ± 2) ℃、相对湿度RH (40 ± 2) %的环境中持续12h。

7.9.4 冲击

冲击试验按GB/T 2423.5—2019中规定的方法进行，试验的严酷等级为加速度为 250 m/s^2 、冲击力为25 gn、持续时间6 ms，每个方向上的冲击次数为1000次。

7.9.5 振动

振动试验按GB/T 2423.10—2019规定的方法进行，试验的严酷等级为加速度为 10 m/s^2 、振动频率为 $(10 \sim 150)$ Hz、每一轴线方向上的扫描循环次数为20次。

7.9.6 霉菌

霉菌试验按GB/T 2423.16—2022规定的试验方法1进行，严酷等级为28d，长霉程度为3级。

7.9.7 盐雾

盐雾试验按GB/T 2423.17—2024规定的方法进行，试验持续时间为16 h。

7.10 电磁兼容性

电磁兼容性试验应按GB/T 17799.2—2023中第9章规定的方法进行。