等值反磁通瞬变电磁法探测系统
通用技术条件

General specification foropposing-coils transient electromagnetic exploration system

点击此处添加与国际标准一致性程度的标识

|  |
| --- |
| 报审讨论稿 |
| 2021.04 |

XXXX-XX-XX发布

XXXX-XX-XX实施

湖南省市场监督管理局   发布

ICS 点击此处添加ICS号

点击此处添加中国标准文献分类号

|  |
| --- |
|       |

DB43

湖南省地方标准

DB 43/TXXXXX—XXXX

|  |
| --- |
|       |

**目录**

[前  言](#_Toc16272) Ⅱ

[1 范围](#_Toc32233)

[2 规范性引用文件](#_Toc4239)

[3 术语和定义](#_Toc5471)

[3.1 等值反磁通瞬变电磁法](#_Toc8020)

[3.2 等值反磁通天线结构](#_Toc3130)

[3.3 零磁通面](#_Toc26989)

[3.4 零磁通面调零](#_Toc22928)

[3.5 发送波形](#_Toc22431)

[3.6 双极性方波](#_Toc254)

[3.7 发送电流](#_Toc11630)

[3.8 关断时间](#_Toc13538)

[3.9 关断波形](#_Toc9451)

[3.10 衰减曲线](#_Toc31633)

[3.11 二次磁场](#_Toc5522)

[3.12 感应式接收天线的谐振频率](#_Toc30501)

[3.13 接收机的满量程动态范围 5](#_Toc26460)

[4 符号 5](#_Toc11477)

[5 技术要求](#_Toc23357)

[5.1 环境与工作条件](#_Toc20473)

[5.2 一般要求 6](#_Toc27533)

[5.3 天线 6](#_Toc28489)

[5.4 发送机](#_Toc25835)

[5.5 接收机 7](#_Toc18519)

[6 检验方法 7](#_Toc31180)

[6.1 外观与功能性要求的检验 7](#_Toc6194)

[6.2 技术指标检测 7](#_Toc4832)

[6.3 功能测试 9](#_Toc24405)

[6.4 环境测试](#_Toc5852)

[7 检验规则](#_Toc4704)

[8 安装和运行条件](#_Toc30348)

前  言

本标准根据GB/T 1.1-2009给出规则起草。

本标准由湖南省质量技术监督局提出。

本标准由XXXX归口。

本标准主要起草单位：湖南省计量检测研究院、中南大学、湖南五维地质科技有限公司。

本标准主要起草人：徐昱、席振铢、陈兴朋、亓庆新、周胜、龙霞、薛军平、韦洪兰、王威、王亮

**等值反磁通瞬变电磁法探测系统通用技术条件**

1 范围

本标准规定了等值反磁通瞬变电磁法探测系统的通用技术要求、试验方法、检验规则、安装和运行条件、标志、标签、包装等内容。

本标准适用于等值反磁通瞬变电磁法探测系统的制造、检验和质量评价。

2 规范性引用文件

下列文件对于本标准的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本标准。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有修改单）适用于本标准。

GB/T 2423.1 电工电子产品基本环境试验规程试验A：低温试验方法

GB/T 2423.2 电工电子产品基本环境试验规程试验B：高温试验方法

GB/T 2423.3 电工电子产品基本环境试验规程试验Ca：恒定湿热试验方法

GB/T 2423.5 电工电子产品基本环境试验规程试验Ea：冲击试验方法

GB/T 2423.6 电工电子产品基本环境试验规程试验Eb：碰撞试验方法

GB/T 2423.7 电工电子产品基本环境试验规程试验Ec：倾跌与翻倒试验方法

GB/T 2423.8 电工电子产品基本环境试验规程试验Ed：自由跌落试验方法

GB/T 2423.10 电工电子产品基本环境试验规程试验Fe：振动(正弦)试验方法

GB/T 2423.16 电工电子产品基本环境试验规程试验J：长霉试验方法

GB/T 2423.17 电工电子产品基本环境试验规程试验Ka：盐雾试验方法

GB/T 2423.21 电工电子产品基本环境试验规程试验M：低气压试验方法

GB/T 2423.37 电工电子产品基本环境试验规程试验L：沙尘试验方法

DZ 0039.12 地质仪器产品基本环境试验条件及方法淋雨试验

DZ 0039.13 地质仪器产品基本环境试验条件及方法沙尘试验

DZ 0040.2 地质仪器产品运输包装基本环境试验条件及方法运输包装振动试验

DZ 0040.4 地质仪器产品运输包装基本环境试验条件及方法运输包装自由跌落试验

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本标准。

3.1

等值反磁通瞬变电磁法Opposing-coils transient electromagnetics（简写：OCTEM）

采用上下两个相同且平行共轴的反向串联磁性源为发射源，其对地产生的磁场矢量叠加为一次场，接收天线位于上下磁性源等距共轴的水平面上，上下两个磁性源在接收水平面上产生的磁场具有等值反磁通特性，接收天线处于一次场零磁通面。在瞬态脉冲断电瞬间，近地表的磁场最强，感应涡流的极值圆环聚焦于近地表，随着关断间歇的延时，又产生新的涡流极值圆环，并逐渐向远离发射源的方向扩散，扩散速度和极值的衰减幅度与介质电阻率有关，随着衰减时间的增加探测深度增大，这种消除收发天线互感的聚焦瞬变电磁测深方法称为等值反磁通瞬变电磁法。

3.2

等值反磁通天线结构Geometric configuration of the opposing-coils

OCTEM天线结构如图1所示，在发射线圈（TX coil）正上方一定距离（2d）平行再串联一个与发射线圈相同的反向线圈（opposing coil），两串联线圈的电流*I*时间同步、大小相等、方向相反，二者组成双线圈源。接收线圈（RX coil）置于双线圈源的正中间一次场零磁通平面，与双线圈源共轴。



图1 OCTEM天线结构示意图

3.3

零磁通面 Zero magnetic flux plane

根据矢量叠加原理，正负反向磁源产生的一次场始终存在至少一个磁场的垂直分量为零的平面，该平面称为等值反磁通的零磁通面。



图2等值反磁通零磁通面示意图

3.4

零磁通面调零 Zero to the zero magnetic flux plane

通过调节接收天线与发射天线的相对距离和位置，或者改变正向和反向线圈的匝数、半径以及供电电流等参数，实现接收天线处于等值反磁通的零磁通面的过程，称为零磁通面调零。

3.5

发送波形 Transmit waveform

发送机输出到发射天线的电流波形称为瞬变电磁发送波形。

3.6

双极性方波 Bipolar square wave

双极性方波是一种正向供电期、关断间歇期、反向供电期和关断间歇期构成的占空比50%、25%以及12.5%等一定占空比正负电流周期性循环的方波。

3.7

发送电流 Transmit current

在瞬变电磁仪发送双极性方波的正向电流、负向电流周期的平台期的电流称为等值反磁通瞬变电磁发送电流。

3.8

关断时间 Turn-off time

由于电磁感应的作用，完全关断发送电流需要时间，关断后电流减小至1%的时间称为瞬变电磁发送电流的关断时间。

3.9

关断波形 Turn-off waveform

在关断时间内，发送电流随时间变化的波形称为瞬变电磁关断波形。

3.10

衰减曲线 Attenuation curve

在瞬变电磁发送电流的关断间歇期，接收天线接收的地质体感应电磁信号随时间衰减变化的曲线。

3.11

二次磁场 Pure secondary magnetic field

当发射天线通以电流，天线周围的介质（大地和空气）产生磁场（该磁场称为一次磁场），当发送电流关断间歇期，一次磁场瞬态消失，根据法拉第电磁感应定律（Faraday law of electromagnetic induction），周围介质磁场的变化，必然产生感应涡流，涡流产生的磁场通常称为二次磁场，相同电磁条件情况下，介质导电性越强，感应的涡流越大，二次磁场越强。

3.12

感应式接收天线的谐振频率 Resonant frequency of the inductive receiving antenna

感应式接收天线是一种电感线圈，其内阻R、自感L和分布电容C组成了一个振荡电路（等效电路模型如图3所示），当感抗和容抗相互抵消，振荡电路完全是阻性时，接收天线线圈的输出电压$V\_{c}$的相位为0，此时对应的频率为接收天线的谐振频率，也是振荡电路的固有谐振频率。



图3等效电路模型

按照电路原理，线圈的输出电压$Vc\left(jω\right)$为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | $$Vc\left(jω\right)=\frac{e\left(jω\right)}{1+jωCR-ω^{2}LC}=\frac{jωμ\_{0}nS}{1+jωCR-ω^{2}LC}$$ | ………………………………（1） |

式中：

$ω$—角频率，$ω=2πf$；R—内阻；L—自感；C—分布电容；$μ\_{0}$—真空磁导率；$n$：—匝数；$S$：—面积。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | $$Uc\left(jω\right)=\frac{jωμ\_{0}nS}{1+jωCR-ω^{2}LC}$$ | ………………………………（2） |

经过变换可得：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | $$Uc\left(jω\right)=\frac{jωμ\_{0}nS}{\left(1-ω^{2}LC\right)+jωCR}∙\frac{\left(1-ω^{2}LC\right)-jωCR}{\left(1-ω^{2}LC\right)-jωCR}$$ | ………………………………（3） |
|  | $$Uc\left(jω\right)=\frac{j\left(1-ω^{2}LC\right)ωμ\_{0}nS+ω^{2}μ\_{0}nSCR}{\left(1-ω^{2}LC\right)^{2}+\left(ωCR\right)^{2}}$$ | ………………………………（4） |
|  | $$Vc\left(jω\right)=a+bj$$ | ………………………………（5） |

式中：

$a=\frac{ω^{2}μ\_{0}nSCR}{\left(1-ω^{2}LC\right)^{2}+\left(ωCR\right)^{2}}$，$b= \frac{\left(1-ω^{2}LC\right)ωμ\_{0}nS}{\left(1-ω^{2}LC\right)^{2}+\left(ωCR\right)^{2}}$；

当发生谐振时，电路呈阻性。$1-ω^{2}LC=0$，谐振频率为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | $$ω\_{0}=\frac{1}{\sqrt{LC}}$$ | ………………………………（6） |

此时输出电压$Vc$的幅值为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | $$\left|Uc\right|=\left|\frac{μ\_{0}nS}{CR}\right|$$ | ………………………………（7） |

输出电压$Vc$的相位为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | $$φ= arctan\left(\frac{b}{a}\right)=arctan\left(\frac{0}{\frac{μ\_{0}nS}{CR}}\right)=0^{0}$$ | ………………………………（8） |

3.13

接收机的满量程动态范围 Full scale dynamic range of the receiver

接收机的动态范围是接收机满量程时对应的输入幅值与短路输入噪声的有效值（RMS）之比，通用计算公式如下：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | $$dBFS=20lg\left(\frac{U\_{FS}}{U\_{N}}\right)$$ | ………………………（9） |

式中：$U\_{FS}$—接收机最大测量峰值；

$U\_{N}$—接收机的短路输入噪声的有效值。

4符号

电压*U*（Voltage）： V

电流*I*（Current）： A

电阻*R*（Resistance）：$Ω$

电感*L*（Inductance）：H

电容*C*（Capacitance）：F

频率*f*（Frequency）：Hz

角频率$ω$（Angular frequency）：rad/s

增益*G*（Gain）：无量纲

满量程动态范围dBFS（Full scale dynamic range）：dBFS

功率*P*（Power）：W

功率谱密度PSD（Power spectral density）：${V^{2}}/{Hz}$

调零系数*A*（Zeroing factor）：${dB}/{Hz}$

采样率$f\_{s}$（Sampling Rate）：Hz

面积*S*（Area）：m2

温度*T*（Temperature）：℃

时间*t*（Time）：s

扫频速率*v*（Sweep rate）：oct/min

加速度*a*（Acceleration）：m/$s^{2}$

相对湿度*RH*（Relative Humidity）：%

5技术要求

5.1 环境与工作条件

5.1.1 在下列条件下应能正常工作

仪器工作环境温度：A级为：-40～+70℃，B级为：-20～+50℃；

相对湿度：$\leq 100\%$，抗冷凝；

无影响工作的振动、腐蚀性介质、电磁场或其它干扰源。

5.1.2 贮存运输条件

温度：-40～+60℃；

相对湿度：$\leq 100\%$，无凝露。

5.2 一般要求

等值反磁通瞬变电磁法探测系统由发送机、接收机、发射天线、接收天线、天线连接缆、电源，以及应用软件等部分组成。

5.2.1 外观要求

外观应美观、整洁，主机面板、箱体等表面色泽均匀，无明显机械损伤、涂层覆盖损坏现象，经氧化处理的零部件无掉色。

5.2.2 功能要求

要求等值反磁通瞬变电磁法探测系统具备测量瞬态电磁场信号、储存显示数据、系统自检、故障诊断以及质量评价等基本功能，具体要求如下：

1. 测量装置采用多匝小线圈中心回线装置；
2. 测量大地二次磁场的垂直分量或其感应电动势；
3. 电源可用发电机或电瓶供电，至少要求满足8个小时正常工作；
4. 仪器发送机和接收机具有自检功能；
5. 仪器具有基本的监控工作状态和诊断故障功能；
6. 具有记录保存原始数据功能，原始数据记录应含有瞬变电磁衰减信号数据，发送监控数据以及关断监控数据等信息；
7. 具有等值反磁通零磁通面调零功能；
8. 具有显示二次磁场衰减曲线功能。

5.3天线

等值反磁通瞬变电磁法探测系统的天线，分为发射天线和接收天线，要求发射天线发射电磁场聚焦、接收天线频带宽、灵敏度高，具体产品技术指标如下：

1）天线类型：磁性源发送、空芯感应线圈接收、收发一体；

2）接收天线等效面积：$\geq 150m^{2}$；

3）接收天线谐振频率：$\geq 200kHz$。

5.4发送机

等值反磁通瞬变电磁法探测系统要求发送机波形高度一致，高精度宽频发送电流，线性关断，关断时间微秒级别，发送机主要技术指标如下：

1）发送波形：双极性方波、正弦波或梯形波；

2）占空比： 至少含有50%的占空比；

3）发送电压：$\geq 12V$；

4）发送电流准确度：$\leq 0.2A$；

5）发送电流重复性：$\leq 0.1A$；

6）发送基频：基频数$\geq 10$个，低频$\leq $0.1Hz，高频$\geq $200Hz；

7）发送基频准确度：$0.001Hz$；

8）$阻性$关断$时间$：$\leq 5μs$；

9）$阻性$关断$时间准确度$：$\leq 0.5μs$；

10）关断类型：线性关断；

11）ADC采样率：$\geq 2$MHz；

12）ADC分辨率：$\geq 8位$。

5.5接收机

等值反磁通瞬变电磁法探测系统要求接收机低噪声、大动态范围、高分辨率和高精度同步采样，接收机主要技术指标如下：

1）ADC分辨率： $\geq 24位$；

2）ADC采样率：$\geq 500kHz$；

3）满量程动态范围： $\geq $120dB；

4）输入短路噪声：$\leq 20μV$（0.1Hz-250kHz）；

5）时间窗口：可按需求对瞬变电磁接收衰减信号进行时间窗口抽道，时间窗口的设置分为两种情况，一种是针对基频自动计算时间窗口分布，另一种是针对常用基频的固定时间门设置，时间门的分布原则应以对数等距分布；

6）可采用GPS、石英钟、高频无线电磁波和有线连接实现收发同步，收发同步时间精度$\leq 20ns$。

6检验方法

6.1 外观检验

外观以目测法逐项检查，符合本标准5.2.1的要求。

6.2 技术指标检测

6.2.1 发送电流准确度检测

在连接发射天线条件下，采用标准电阻（不大于10 m$Ω$、优于0.1%精度）串联到发送回路，通过示波器观测检流电阻正向与反向供电平台期电压，要求检测1Hz、50Hz、100Hz、150Hz、200Hz、250Hz六个基频，示波器设置叠加平均1024次，计算出仪器在不同基频输出的电流$I\_{t}$，与标准电阻上测得的发送电流$I\_{s}$之间的绝对误差为发送电流准确$度I\_{a}$，测试结果满足5.4要求。

$I\_{t}$按式（10）计算：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | $$I\_{t}=\frac{U\_{p}-U\_{n}}{2R}$$ | ……………………………………………（10） |

发送电流准确度$I\_{a}$按式（11）计算

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | $$I\_{a}=ABS\left(I\_{t}-I\_{s}\right)$$ | ……………………………………………（11） |

式中：$U\_{p}$—正向供电平台期电压，单位V；

$U\_{n}$—反向供电平台期电压，单位V；

$R$—标准检流电阻，单位$Ω$。

6.2.2 发送电流重复性检测

发送电源、发送机、发送电缆和发射天线组成稳压发送回路，在重复性测量条件下，对发送电流进行n次独立重复测量，得到的测量值为$I\_{i}\left(i=1,2,\cdots ,n\right)$，发送电流的重复性$s\left(I\right)$按贝塞尔（Bessel）公式计算：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | $$s\left(I\right)=\sqrt{\frac{\sum\_{i=1}^{n}\left(I\_{i}-\overbar{I}\right)^{2}}{n-1}}$$ | ………………………………………（12） |

式中：$\overbar{I}$：n个发送电流的算术平均值，$\overbar{I}=\frac{\sum\_{i=1}^{n}\left(I\_{i}\right)}{n}$；

n：重复测量次数。

6.2.3 最大发送电流检测

在连接发射天线条件下，调节至厂家仪器指标的最大可供电源电压，使用标准检流电阻（不大于10 m$Ω$、优于0.1%精度）串联到发送回路，通过示波器观察发送波形，示波器波形使用128次叠加平均。示波器观测波形正向供电平台期电压$U\_{p}$、反向供电平台期电压$U\_{n}$计算得到发送电流，根据欧姆定律计算最大发送电流$I\_{max}$，计算公式如下：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | $$I\_{max}=\frac{U\_{p}-U\_{n}}{2R}$$ | …………………………（13） |

式中：*R*：标准检流电阻。

6.2.4 发送基频准确度检测

在连接发射天线条件下，使用标准检流电阻（不大于10 m$Ω$、准确度优于0.1%）组成分压器，对发送机发送的信号进行分压后，再采用频率计测量仪器发送波形的正方波或者负方波的频率。要求至少测量0.1Hz、0.25Hz、0.625Hz、 1Hz、2.5Hz、6.25Hz、12.5Hz、25Hz、50Hz、62.5Hz、237.5Hz及250Hz标准基频的频率。频率计读数$f\_{1}$和发送机发送频率$f\_{2}$的绝对误差称为发送频率准确度A$f$，测试结果应满足5.4技术要求，计算公式如下：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | $$Af=ABS\left(f\_{1}-f\_{2}\right)$$ | ………………………………………（14） |

式中：A$f$—发送频率准确度；$f\_{1}$—频率计读数；$f\_{2}$—发送机发送频率。

6.2.5 阻性关断时间检测

在不连接发射天线条件下，将大功率电阻（1$Ω$，不小于150W）和标准检流电阻（不大于10m$Ω$、优于0.1%精度）串联在发送回路，采用示波器观测仪器主机发送的关断波形，示波器波形设置为高分辨率采集模式。示波器记录发送电流从关断到衰减至1%时的时间差$∆t$，$∆t$为阻性关断时间，测试结果应满足5.4技术要求。

6.2.6 关断时间测量准确度检测

在连接发射天线条件下，将标准检流电阻（不大于10$ mΩ$、优于0.1%精度）串联在发送回路，采用示波器观测仪器主机发送关断波形，示波器波形设置为高分辨率采集模式。示波器记录发送电流从开始到衰减至1%的时间差$T\_{off}^{t}$，仪器设备输出的关断时间$T\_{off}^{s}$与示波器测试关断时间$T\_{off}^{t}$之间的绝对误差$∆T\_{off}$为仪器关断时间精度，测试结果应满足5.4技术要求。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | $$∆T\_{off}=ABS\left(T\_{off}^{t}-T\_{off}^{s}\right)$$ | ………………………………（15） |

6.2.7 接收天线谐振频率检测

用可测不小于1MHz频率的标准磁性元件分析仪测量接收天线的谐振频率，当被检测接收天线的相位响应为零点所对应的频率是接收天线的谐振频率，测试结果应满足5.3要求。

6.2.8 接收机短路输入噪声检测

在电磁屏蔽条件下，设置接收机的增益为1，系统测量的噪声带宽为250kHz，测量的输出噪声幅值为$x\_{i}$，利用标准差公式计算出输出的RMS噪声电压$U\_{out\\_noise}$，以排除系统直流成分的影响，测试结果应满足5.5要求。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | $$U\_{out\\_noise}=\sqrt{\frac{1}{n}\sum\_{n=1}^{n}\left(x\_{i}-\overbar{x}\right)^{2}}$$ | ………………………………（16） |

式中：$\overbar{x}=\frac{1}{n}\sum\_{i=1}^{n}x\_{i}$；

由于增益为1，短路输入噪声有效值$U\_{in\\_noise}=U\_{out\\_noise}$。

6.2.9 接收机满量程动态范围检测

接收机的满量程动态范围$dBFS$按如下公式计算，$U\_{FS}$为系统满量程时对应的输入幅值，$U\_{N}$为短路输入噪声的RMS值，测试结果满足5.5要求。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | $$dBFS=20log\_{10}\left(\frac{U\_{FS}}{U\_{N}}\right)$$ | ………………………………（17） |

式中：$U\_{FS}$：接收机最大测量峰值，$U\_{FS}=10U\_{pk}$；

$U\_{N}$可以根据测量接收机短路输入噪声获得，$U\_{N}=U\_{in\\_noise}$。

6.3 功能测试

6.3.1 等值反磁通零磁通调零测试

仪器应有专用的等值反磁通调零模式，用于等值反磁通零磁通调零。在等值反磁通调零模式发送20kHz双极性方波，使用如下公式对采集的数据进行离散傅里叶变换，计算出0～40kHz带宽的频谱。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | $$X\_{k}=DFT\left[x\_{n}\right]=\sum\_{n=0}^{N-1}x\_{n}e^{-\frac{2π}{N}nk},k=0,1,\cdots N-1$$ | ………………………………（18） |

其中$x\_{n}$为采集的离散时间序列，N是变换区间长度，$k$为谐波序号。

对于信号的平均功率为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | $$P\_{avg}=\frac{\sum\_{n=0}^{N-1}\left|x\_{n}\right|^{2}}{N}$$ | ………………………………（19） |

根据帕塞瓦尔定理（Parseval's theorem）有：（时间域的功率等于频率域的功率）

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | $$\sum\_{n}^{N-1}\left|x\_{n}\right|^{2}=\frac{1}{N}\sum\_{k=0}^{N-1}\left|X\_{k}\right|^{2}$$ | ………………………………（20） |

可以得出：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | $$P\_{avg}=\frac{1}{N^{2}}\sum\_{k=0}^{N-1}\left|X\_{k}\right|^{2}$$ | ………………………………（21） |

考虑到功率谱密度，平均功率有：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | $$P\_{avg}=\sum\_{k=0}^{N-1}PSD\_{k}∆f$$ | ………………………………（22） |

其中$∆f=\frac{f\_{s}}{N}$，因此可得：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | $$PSD\_{k}=\frac{\left|X\_{k}\right|^{2}}{Nf\_{s}}$$ | ………………………………（23） |

式中：PSD的单位为${V^{2}}/{Hz}$。

对PSD取对数，使振幅较低的成分相对高振幅成分得以拉高，以便观察掩盖在低幅噪声中的周期信号。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | $$PSD\_{k}^{dB}=10log\_{10}\frac{\left|X\_{k}\right|^{2}}{Nf\_{s}}$$ | ………………………………（24） |

$PSD\_{k}^{dB}$的单位为${dB}/{Hz}$。取20kHz频点的功率谱密度A，A称为调零系数。调节接收天线正、反磁通大小，当接收天线处于零磁通面时，调零系数最小。具体调节过程分为粗调、细调和微调，要求：

$$A\_{3}\leq A\_{2}\leq A\_{1}$$

粗调系数$A\_{1}$、细调系数$A\_{2}$和微调系数$A\_{3}$使用TEM测量模式采集，同时目测TEM衰减信号数据，应没有明显的过渡过程现象。

6.3.2 发送波形测试

连接仪器发送机内部高精度检流电阻（10$mΩ$，0.1%准确度）到示波器，发送机分别发送高、中、低三种基频，并肉眼观察示波器显示的图像是否为发送机选择发送的波形图像，而且，示波器指示的波形频率应与设置发送频率的误差小于0.001Hz。

6.3.3 线性关断测试

连接仪器发送机内部高精度检流电阻（10$mΩ$）到示波器，发送机分别发送高、中、低三种基频。测试正波形下降沿时，示波器设置成下降沿触发模式，触发电平设置为发送电流的1/2值；测试负波形上升沿，示波器设置成上升沿触发模式，触发电平设置为发送电流的-1/2值。肉眼观察三种基频示波器图像，示波器采集到的波形应为一个从发送电流到衰减至零电流（目测无法识别波形变化）的波形应为斜线。

6.3.4 衰减信号测试

制作边长大于10cm、厚度大于0.5cm的铝板或者直径大于10cm、5匝闭合铜线（铜线的直径大于2.5mm）圈标本。首先，在同一位置测量5～10次室内环境二次场响应，然后把标本置于天线的上顶面中心位置，再测量3～5次标本和室内环境二次场叠加响应；最后移去标本再测量5～10次室内环境二次场响应。把每一次测量二次场响应衰减曲线组合成衰减剖面图，肉眼观察标本的二次场响应有明显的异常。

6.3.5 衰减信号稳定性测试

在室内同一测点上，分别测量高、中、低三个基频的二次场衰减曲线，每一个基频发送至少测量大于一万次衰减曲线，目测没有一次出现信号畸变。

6.4 环境测试

6.4.1 高低温试验

高温试验仪器按照GB/T 2423.2测试方法检测，将连接完毕的室外设备放入高温试验箱，在70±2℃的温度下连续放置16h，其间试验设备连续通电工作。

低温试验仪器按照GB/T 2423.1测试方法检测，将连接完毕的室外设备放入低温试验箱，在-25±3℃的温度下连续放置16h，其间试验设备连续通电工作。

高、低温试验后，仪器各项性能参数应满足产品技术指标的要求；外观应无锈蚀、无裂纹、无剥落等损伤，文字、标识应清晰，调零机构应灵活，紧固部位无松动，密封应完好，塑料件应不起泡、不开裂、不变形及灌注物不软化、无流溢现象。

6.4.2 恒定湿热试验

试验仪器应按照GB/T 2423.3测试方法检测，将连接完毕的室外设备放入试验箱，在温度为40±2℃、相对湿度为90%～96%环境中保持24h后，再接通电源工作24h。湿度试验后，仪器各项性能参数应满足产品技术指标的要求；外观应无锈蚀、无裂纹、无剥落等损伤，文字、标识应清晰，调零机构应灵活，紧固部位无松动；塑料件应不起泡、开裂、变形，密封性不破坏，灌注物应无溢出现象。

6.4.3 振动试验

试验仪器应按照GB/T2423.10-2008测试方法检测，将非工作状态的仪器主机和天线安装在振动试验台上，在上下方向进行扫频振动试验，扫频循环范围为10Hz～150Hz～10Hz，容差10%，扫频速率：1oct /min，振动加速度值19.6m/s2，持续时间为1h。经振动试验后，仪器各项性能参数应满足产品技术指标的要求，外观应无损伤，结构应无损坏，紧固件和元器件应无松脱。

6.4.4 冲击试验

试验仪器应按照GB/T2423.5-1995测试方法检测，将非工作状态的仪器主机和天线安装在试验台上，选取峰值加速度A为 490m/$s^{2}$（50g）、相应的标称脉冲持续时间D为11ms（常用）、选用半正弦波，对应速度的变化量$∆v$为3.4 m/s，具体公式如下；

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | $$∆v=\frac{2}{π}A•D×10^{-3}$$ | ………………………………………（25） |

冲击次数为8次，其中底面冲击3次，其余各面冲击1次。冲击试验后，外观、机械性能、电气性能检测结果应符合产品技术指标的规定。

6.4.5 碰撞试验

试验仪器应按照GB/T2423.6-1995测试方法检测，将非工作状态的仪器主机和天线安装在试验台上，峰值取值加速度为245m/$s^{2}$，脉冲持续时间为6ms，相应的速度变化量为0.955m/s，碰撞次数为工作位置 3000次或三个互相垂直方向、每轴 1000次，10～80次/min。碰撞试验后，外观、机械和性能指标应符合产品技术标准规定要求。

6.4.6 倾跌和自由跌落试验

倾跌试验仪器按照GB/T2423.7-1995测试方法检测，将非工作状态的仪器主机和天线安装在试验台上，倾斜跌落(面倾跌)跌落高度为100mm，或角度为$30^{°}\pm 10\%$，跌落次数为以底面一个边为轴，每边跌落一次，总共四次。

自由跌落试验仪器按照GB/T 2423.8-1995测试方法检测，将非工作状态的仪器主机和天线安装在试验台上，跌落高度为500mm；次数为3次。跌落试验后，外观、机械和性能指标应符合产品技术规定要求。

6.4.7淋雨、沙尘、长霉和盐雾

仪器淋雨试验方法应按照DZ0039.12-92规定进行检测，将非工作状态的仪器主机和天线的被试面与垂直方向成$45^{°}$夹角安装在试验台上，在降水量为$100\pm 20L/m^{3}h$，雨水温度为$5^{°}\~35^{°}$条件下，降雨15min。淋雨测试后，仪器外观无损伤，内部无渗水，仪器各项性能参数满足标准规定。

仪器沙尘试验方法应按照GB/T 2423.37规定进行检测，将未通电的受试设备放入粉尘试验箱，相对湿度为小于25%，试验箱中的滑石粉浓度为2kg/m3，每15min扬尘5s，持续2h后取出。沙尘试验后，仪器内部清洁无尘，仪器各项性能参数满足标准规定。

仪器霉菌生长试验方法应按GB2423.16规定进行检测，在无培养基的情况下霉菌孢子直接在仪器主机和天线上接种，经28d培养霉菌生长试验后，仪器外观无腐化，仪器各项性能参数满足标准规定。

仪器盐雾环境试验方法要按GB2423.17规定进行检测，将非工作状态的仪器主机和天线放置试验箱中，试验箱的温度维持在35±$5℃$，所有的暴露区域都应维持盐雾条件，用面积为$80cm^{2}$的器皿在暴露区域的任何一点连续收集至少16h的雾化沉积溶液，平均每小时收集量应在1.0mL-2.0mL之间，收集的溶液在35±2$℃$测量浓度和pH值，试验周期应到16h。盐雾环境试验后，仪器外观无化学损伤，仪器各项性能参数满足标准规定。

6.4.8运输包装环境试验

仪器运输包装防振性能应按照DZ0040.2-92规定进行检测，振动试验后，目测包装物应无松脱和损伤，仪器外观、机械和性能指标应符合产品技术规定要求。

仪器运输包装自由跌落应按照DZ0040.4-92规定进行检测，试验后目测包装物，不应有明显的变形、开裂和损伤，试验后包装内的产品不应有变形、松脱、涂层脱落等机械损坏，机械性能及仪器性能检测结果应符合产品技术标准的规定。

1. 检验规则

1）产品检验分出厂检验、型式检验和新产品定型试验。

2）所有检验均由各生产厂家检验部门进行(必要时用户可以派代表参加，或经双方协议，还可增加试验项目)，各生产厂家检验部门应对检验结果负责。

3）出厂检验产品要逐台逐项进行检验，凡是每台有一项不符产品技术标准(技术要求)的规定，均判为不合格品，不合格品不能出厂。

1. 安装和运行条件

1）系统设备的外包装应包括中文产品名称、中文型号、制造商名称、详细地址、产品产地、执行标准编号、商标、额定电源电压、电源频率以及额定功率等。

2）出厂产品应有检验合格证，内容包括产品名称、型号、制造商名称、执行产品标准编号、出厂检验结论、检验日期、检验员编号。

3）包装箱应符合防潮、防尘、防震、运输的要求，装箱单内除了仪器及配件清单外，应有使用说明书、保修卡、产品合格证、二维检验码或检验标志。