

团 体 标 准

T/CMSA 0042—2023

雷电电磁场传感器标定

Calibration of Lightning Electromagnetic Field Sensors

2023 - 07 - 17 发布

2023 - 07 - 17 实施

目 次

前言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语、定义、符号和缩略语	1
4 概述	3
5 标定项目及特性参数要求	3
6 标定条件	4
7 标定方法	6
8 不确定度评定	9
9 数据记录及标定结果表达	10
附录 A（资料性） 标定系统组成	11
附录 B（资料性） 测试原始记录表	14
参考文献	17

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。

本文件由中国气象服务协会提出并归口。

本文件起草单位：陆军工程大学野战工程学院、四川中光防雷科技股份有限公司、北京雷电防护装置测试中心、北京中科飞龙传感技术有限责任公司、南京云凯防雷科技股份有限公司、深圳市国家气候观象台、湖南中普技术股份有限公司、浙江润和安全技术有限公司。

本文件主要起草人：邱实、石立华、杨国华、张琪、张建培、张利华、于月东、杨鹏飞、邱宗旭、吴双、陶兴水、殷建军、郑燕、赵静、鲁海洋、徐全模、闻小龙、张峻、黄军、詹家亮、魏新杰、刘爱明、李征。

中国气象服务协会

雷电电磁场传感器标定

1 范围

本文件规定了雷电电磁场传感器的标定项目及特性参数要求、标定条件、标定方法、不确定度评定、数据记录及标定结果表达。

本文件适用于雷电电磁场以及其他瞬变电磁场传感器的标定。

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 18459-2001 传感器主要静态性能指标计算方法

GB/T 27418-2017 测量不确定度评定和表示

3 术语、定义、符号和缩略语

3.1 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1.1

自由空间场传感器 free space field sensor

用于测量自由空间内电磁场的传感器。

注：又称自由场传感器。如偶极子电场传感器，天线通常为对称结构，此类传感器的布设不受空间位置的制约，用于测量电磁场的空间分布。

3.1.2

地面场传感器 ground plane field sensor

用于测量地面附近电磁场的传感器。

注：如单极子电场传感器，此类传感器看作利用导电平面的镜像作用省略了自由空间场传感器的一半，只能用于地面附近的场测量。

3.1.3

待检设备 equipment to be calibrated

参与标定的雷电电磁场传感器整套设备，通常包含传感器、支架、传输线、电源和数据接收机5部分。

3.1.4

被测量 measurand

作为测量对象的特定量。

注：在本文件中，根据被测传感器类型，被测量分为以下四类：电场强度（ E ）、磁感应强度（ B ）、电场变化率（ dE/dt ）、磁感应强度变化率（ dB/dt ）。

3.1.5

雷电电场传感器 lightning electric field sensor

被测量为雷电电场强度的传感器。

注：包含瞬态电场和静电场传感器。

3.1.6

雷电磁场传感器 lightning magnetic field sensor

被测量为雷电瞬态磁场强度或瞬态磁感应强度的传感器。

注：由于空气中磁感应强度（ B ）与磁场强度（ H ）之比为常数（即真空磁导率），因此两者在本文件中统称为磁场传感器。

3.1.7

雷电电场变化率传感器 time derivative sensor of lightning electric field

被测量为雷电电场变化率 (dE/dt) 的传感器。

注：也称为E-Dot或D-Dot传感器。

3.1.8

雷电磁场变化率传感器 time derivative sensor of lightning magnetic field

被测量为雷电磁感应强度变化率 (dB/dt) 的传感器。

注：也称为B-Dot传感器。

3.1.9

输出量 output quantity

由传感器产生的、与被测量成函数关系的可用信号，通常指电压信号。

3.1.10

零点输出 zero-measured output

在规定的条件下，所加被测量为零时传感器的输出。

3.1.11

最小二乘线性度 least-squares linearity

规定幅度范围内，不同幅度被测量与输出量构成的实测曲线相对于最小二乘拟合直线的最大偏差，通常用满量程输出的百分比表示。

3.1.12

测量范围 measuring range

以传感器能响应的被测量的最低值和最高值表示的区间。

注：被测量的最高、最低值分别称为测量范围的“上限值”和“下限值”，下限值通常为负数。

3.1.13

满量程输出 full-span output

在规定的条件下，传感器的测量范围的上限和下限输出值之间的代数差。

注：测量范围的上限和下限输出值分别称为满量程输出“上限值”和“下限值”，下限值通常为负数。

3.1.14

零位分辨力 null output resolution

在输出量为零时，改变被测量的大小，使得能产生可观测的输出量变化的最小被测量变化。

注：在本文件中简称分辨力。

3.1.15

量程 span

测量范围的上限值与下限值之间的代数差。

3.1.16

动态范围 dynamic range

量程与零位分辨力的比值，常用以10为底的对数（分贝）表示。

3.1.17

幅频响应 amplitude-frequency response

在规定的被测量频率范围内，对于加在传感器上不同频率正弦变化的电场或磁场，输出量与被测量的振幅比随频率的变化。

3.1.18

谐振频率 resonant frequency

响应幅度随频率快速增大而后快速减小的峰值点对应的频率，在幅频响应曲线中通常表现为若干尖峰对应的频率。

3.1.19

归一化幅频响应 normalized amplitude-frequency response

将幅频响应按照其平坦段的平均幅值归一化，得到的归一化输出量与被测量的振幅比随频率的变化。

注：在规定的被测量频率范围内幅频响应不存在平坦段时，采用规定频段内幅频响应的最大值归一化。

3.1.20

灵敏度 sensitivity

传感器输出量的变化值与相应的被测量的变化值之间的比值。

3.1.21

下限截止频率 lower-cut-off frequency

从归一化幅频响应的平坦段开始向低频方向下降3dB（或下降到70.7%）对应的频率。

3.1.22

上限截止频率 upper-cut-off frequency

从归一化幅频响应的平坦段开始向高频方向下降3dB（或下降到70.7%）对应的频率。

3.1.23

信噪比 signal-to-noise ratio; SNR

信号和噪声的有效功率的比值，常用对数表示：

$$\text{SNR}=10\log_{10}(P_s/P_n) \quad (\text{dB})$$

其中： P_s 为信号有效功率； P_n 为噪声功率。

3.2 符号

下列符号适用于本文件。

B ：磁通密度（以下磁场），单位：T。

$B\text{-Dot}$ 或 dB/dt ：磁感应强度随时间变化率（以下磁场变化率），单位： $\text{T}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

E ：电场，单位： $\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$ 。

$E\text{-Dot}$ 或 dE/dt ：电场随时间变化率（以下电场变化率），单位： $\text{V}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

f ：频率，单位：Hz。

S_E ：电场传感器灵敏度，单位： $\text{V}/(\text{V}\cdot\text{m}^{-1})$ 。

$S_{E\text{-dot}}$ ：电场变化率传感器灵敏度，单位： $\text{V}/(\text{V}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1})$ 。

S_B ：磁场传感器灵敏度，单位：V/T。

$S_{B\text{-dot}}$ ：磁场变化率传感器灵敏度，单位： $\text{V}/(\text{T}\cdot\text{s}^{-1})$ 。

μ_0 ：真空磁导率， 1.257×10^{-6} 。

η_0 ：真空中的波阻抗， 377Ω 。

3.3 缩略语

下列缩略语适用于本文件。

TEM：横电磁波（Transverse Electromagnetic）

GTEM：吉赫兹横电磁波（Gigahertz Transverse Electromagnetic）

4 概述

雷电电磁场传感器量程范围广、频率跨度大，低频可延伸至1Hz以下甚至直流。雷电电磁场传感器包括并不限于雷电电场传感器、雷电磁场传感器、雷电电场变化率传感器、雷电磁场变化率传感器四类。大气电场仪作为雷电静电场的测量仪器，可看作雷电电场传感器频率为零时的特例，其灵敏度、分辨力和动态范围的标定见本文件中7.4雷电电场传感器的标定方法执行。

5 标定项目及特性参数要求

5.1 标定项目

标定项目包含幅度响应和频率响应二类，幅度响应具体包含灵敏度、分辨力、最小二乘线性度、测量范围、量程、动态范围六项，频率响应具体包含上、下限截止频率、归一化幅频响应和-3dB带宽四项。根据被测传感器类型的不同，每一项对应四种传感器的标定：电场强度（ E ）、磁感应强度（ B ）、电场变化率（ dE/dt 或 $E\text{-Dot}$ ）、磁感应强度变化率（ dB/dt 或 $B\text{-Dot}$ ）。

5.2 典型特性参数

5.2.1 量程

电场传感器量程通常介于（ $10\sim 10^3$ ）V/m之间，磁场传感器量程通常介于（ $10\sim 10^3$ ）nT之间。受限于连续波信号源的信号幅度，强电磁场测量传感器标定不在本文件范围内。

5.2.2 灵敏度

电场测量灵敏度通常介于 $(10^{-3}\sim 10^{-1})\text{ V}/(\text{V}\cdot\text{m}^{-1})$ 之间，磁场测量灵敏度通常介于 $(10^{-8}\sim 10^{-6})\text{ V}/\text{nT}$ 之间。

5.2.3 分辨力

瞬变电场测量分辨力通常介于 $(0.1\sim 10)\text{ V}/\text{m}$ 之间，瞬变磁场测量分辨力通常介于 $(0.1\sim 10)\text{ nT}$ 之间。

5.2.4 动态范围

一般在40dB以上。

5.2.5 归一化幅频响应

典型的雷电电磁场传感器归一化幅频响应曲线包括上升段、平坦段和下降段三部分。在上升段，响应幅度随频率增大而增大，下降段反之；在平坦段，响应幅度相对变化较小。

注：在平坦段向下降段的过渡段，可能会出现响应幅度突然增强的谐振点。

5.2.6 下限截止频率

典型电场慢变化测量传感器下限截止频率在0.16Hz以下，电场快变化测量传感器和瞬变磁场传感器下限截止频率通常介于160Hz~1.6kHz之间。

5.2.7 -3dB 带宽

通常介于100kHz~10MHz之间。

6 标定条件

6.1 环境条件

标定试验期间，应监测环境条件，并在试验记录中注明，要求如下：

- 环境温度： $10^{\circ}\text{C}\sim 40^{\circ}\text{C}$ ，测试期间温度变化不应超过 20°C ；
- 相对湿度：不大于80%；
- 电磁环境：在标定频段内无明显电磁干扰，在测试频点处环境电磁辐射强度小于标定场20dB以上。对于非封闭的场产生装置，如亥姆霍兹线圈和平行板，宜置于屏蔽室内。

6.2 待检设备要求

待检设备应工作正常，并根据标定环境要求做适应性调整，便于在标定环境中开展测试。具体要求如下。

——外观和附录。待检设备的外观应完好，无影响其正常工作的机械损伤和变形，附录应齐全有效。送检方应准确提供待检设备的尺寸以及相关技术文档。

——功能正常性。待检设备的各开关和指示灯功能正常，通电后应能正常工作，各种指示应正确。送检方应提供待检设备的工作状态参数，包括传感器类型、极化方式、输入信号安全范围等。

——响应信号读出。待检设备应能够响应被测频段的连续波辐射，并且其数据接收机能够记录和存储信号的幅度。对于待检设备数据接收机无法记录和存储连续波辐射信号的情况，例如由于待检设备设置了波形鉴别电路而不能采集连续波信号的，应采用外接数据接收机的方式，由送检方提供信号输出接口、 50Ω 的阻抗匹配电路和信号输出线缆，用于还原设备正常工作时的模拟信号输出，并且在标定报告中注明数据采集设备的设置。

——辅助装置。送检方应当提供设备所需的辅助装置，包括：与标定仪器相连的接头和线缆；需要外接电源的线缆；接地线缆及搭接装置。

6.3 标定场产生装置

标定场产生装置包括TEM小室、GTEM室、亥姆霍兹线圈和平行板四类，对应的标定项目见表1，具体装置工作方式和场强计算方法见附录A。

表1 标定场产生装置及推荐标定项目

序号	场产生装置	产生标定场类型	幅度响应	频率响应
1	TEM小室 ^a	电场和磁场	√	√
2	GTEM室 ^a	电场和磁场	√	√
3	亥姆霍兹线圈 ^b	磁场	√	—
4	平行板 ^c	电场	√	—

^a受标定场产生装置尺寸限制，传感器尺寸不宜过大。

b) 适用于大尺寸、强磁场传感器的标定。
 c) 适用于大尺寸低频电场传感器的标定。
 √ 表示对应的场产生装置可用于对应电场、磁场的幅度或频谱响应标定。

标定场产生装置的选择和使用遵循以下原则：

a) 对于TEM小室、GTEM室和平行板三类装置，待检设备尺寸应满足以下要求：对于表1中幅度响应标定，要求待检设备最大尺寸不超过工作空间高度的1/3，对于表1中频率响应标定，可适当放宽对待检设备最大尺寸的要求，但是不宜超过工作空间高度的1/2。在满足上述尺寸要求条件下，优先选用TEM小室。

b) TEM小室和GTEM室的电压驻波比要求在1.2以下，特征阻抗宜设计为 $(50 \pm 1) \Omega$ ，外导体接地，接地电阻小于 1Ω 。

c) 平行板主要用于大尺寸、低频（通常小于300kHz）电场传感器的幅度响应标定，要求待检设备最大尺寸不能超过工作空间高度的1/3；为产生均匀电场，要求平行极板的水平尺度是垂直间隔的2倍以上；平行板下极板接地，接地电阻小于 1Ω 。

d) 亥姆霍兹线圈主要用于产生低频强磁场，要求待检设备最大尺寸不能超过线圈半径的3/5，工作频率通常在1MHz以下。

e) 采用亥姆霍兹线圈和平行板作为场产生装置时，线圈和平行板上极板周围不能有标定无关的大尺寸金属结构，通常要求亥姆霍兹线圈与周边金属结构最小距离为线圈半径的4倍，平行板上极板与周边金属结构与最小距离为板垂直间距的1倍。

6.4 标定用仪器与器件

6.4.1 一般规定

标定所用仪器应经过计量技术机构检定（或校准），满足标定使用要求，并在有效期内。所选择的标定设备应至少符合被标定传感器的频率范围要求，并满足 50Ω 输入/输出阻抗要求，在标定频率上应能够提供所需的动态范围。网络分析仪可用于代替信号源和示波器的组合。标定开始前，所有设备应按照使用说明书要求预热。

6.4.2 连续波信号源

输出振幅误差应小于2%。

6.4.3 功率放大器

谐波或杂散信号抑制不低于20dB，信噪比不低于60dB，输出电压误差不大于3%。

6.4.4 衰减器

衰减精度优于0.5dB，电压驻波比小于1.2。

6.4.5 双向定向耦合器

方向性大于20dB，电压驻波比小于1.2。

6.4.6 示波器或数字化仪

带宽不低于10MHz，采样率不低于25MHz，硬件垂直分辨率不低于12bit，测量精度优于2%。

6.4.7 取样电阻

电阻值最大允许误差不大于1%。

6.4.8 频谱仪

电压幅度测量误差应优于 $\pm 0.4 \text{dB}$ 。

6.4.9 网络分析仪

可用于替代连续波信号源和频谱仪，相关要求见6.4.2和6.4.8。

6.5 标定频率范围和频点的选择

标定系统的标定范围应当包含0.1Hz~10MHz，具体标定频率范围应该由送检方和标定机构协商决定，一般而言，标定的频率范围应当包含待测传感器在真实使用条件下的频率范围。标定频点的选择宜遵循以下原则：

a) 在标定频率范围内，每10倍频程内等间隔标定10个频点，如100Hz~1kHz频程内，频点分别为：100Hz, 200Hz, 300Hz, ..., 1kHz；

b) 包含25kHz和1MHz两个固定频点；

c) 在谐振点附近, 加密标定频点数量, 使得高出周围平坦区域的谐振部分至少包含5个频率点, 其中应包含一个最大响应点。

7 标定方法

7.1 总则

本文件采用标准场法标定, 在频域实施。

本文件中, 除特殊说明, 所有正弦波动的电压、电场和磁场量默认均为有效值, 功率为平均功率。

标定前, 由送检方将标定项目、被测量类型、传感器尺寸等信息填写送检信息登记表(见附录A中表A.1)。标定机构根据待检设备信息与送检方协商后制定标定试验方案。

标定试验遵循以下两条原则:

a) 一致性原则。待检设备的状态应该与正常使用状态一致, 包含极化方向、负载阻抗、接地条件等。标定过程中, 不允许改变传感器位置及工作状态。

b) 最小扰动原则。进出场产生装置的电缆应按照感应电流或电压最小的方式敷设, 电缆敷设方向应与电场矢量垂直, 与磁场矢量垂直的环路面积尽量小。对于地平面场传感器的信号引出电缆, 应尽量沿接地平板敷设。试验前需要清除标定场产生装置内无关的金属物品与装置, 固定传感器所需的支撑或夹具宜选用木制或塑料材质, 一般要求相对介电常数小于1.2, 介质损耗因数小于0.005。

7.2 标定系统组成

标定系统由激励源、标定场产生装置和场监测设备组成。

激励源采用连续波信号源, 场监测设备采用时域波形测量设备, 如示波器、数字化仪等, 也可采用频域接收设备, 如频谱仪。待测传感器的输出电平应小于场监测设备的安全输入电平。若频谱仪具备跟踪源或者采用网络分析仪, 可替代连续波信号源和频域接收设备。根据传感器响应的幅度要求和场监测设备的输入范围, 选择使用功率放大器和衰减器。

根据标定场产生装置的不同, 分为TEM波导、亥姆霍兹线圈和平行板标定系统三类, 见附录A。

7.3 频率响应标定方法

7.3.1 标定步骤

根据6.3所述, 传感器频率响应的标定在TEM小室或GTEM室内进行, 标定系统组成如7.2.1所述, 标定步骤如下:

a) 检查待检设备尺寸是否满足6.3规定的要求, 对于因待检设备支架尺寸较大而不满足该尺寸要求的, 可将支架拆除后单独标定传感器部分;

b) 将待检设备放置于图 A.1或图 A.2所示TEM小室或GTEM室内, 连接电源和信号电缆, 根据附录A中的要求调整传感器在标定环境中的空间位置;

c) 调整传感器的朝向, 使得标定场与传感器极化方向一致;

d) 开机预热至各设备的规定时间, 按照6.5所述的频点调整连续波信号源的频率, 调整信号源的幅度, 使得传感器接收机的读数远大于接收机背景噪声水平, 待读数稳定后, 在每个频点*i*处记录传感器接收机收到的电压 $U_s(i)$ 、场监测设备监测功率 $PM(i)$ 、功率计1和2的读数 $PM_1(i)$ 和 $PM_2(i)$ 。

7.3.2 数据处理

完成7.3.1所述标定步骤后, 对记录的数据需进行处理, 步骤如下:

a) 根据式(A.1)~(A.2), 计算TEM小室或GTEM室的净输入功率, 根据式(A.3)~(A.4), 计算第*i*个频点处的被测标准电场 $E(i)$ 或磁感应强度 $B(i)$;

b) 根据待检设备类型, 对每个频点*i*按照公式(1)~公式(4)计算幅频响应:

$$|H_E(i)| = \frac{U_s(i)}{E(i)} \quad (1)$$

$$|H_B(i)| = \frac{U_s(i)}{B(i)} \quad (2)$$

$$|H_{E\text{-Dot}}(i)| = \frac{U_s(i)}{2\pi \cdot f(i) \cdot E(i)} \quad (3)$$

$$|H_{B\text{-Dot}}(i)| = \frac{U_s(i)}{2\pi \cdot f(i) \cdot B(i)} \quad (4)$$

式中：

- $f(i)$ ——频点*i*对应的频率，单位为赫兹（Hz）；
- $U_s(i)$ ——传感器接收机收到的电压；
- $B(i)$ ——第*i*个频点处的被测标准磁感应强度；
- $E(i)$ ——第*i*个频点处的被测标准电场*E*(*i*)。

c) 按照公式（5）所示选择幅频响应的平坦响应频段 $[f(M), f(N)]$ ，按照公式（6）求该频段内幅频响应的算术平均值 \bar{H} 作为归一化幅度：

$$\begin{aligned} & \max(M - N), \\ \text{s.t.} \quad & \frac{\max_{i \in [M, N]} |H(i)| - \min_{i \in [M, N]} |H(i)|}{\frac{1}{N - M} \sum_{i=M}^N |H(i)|} < 5\% \end{aligned} \quad (5)$$

$$\bar{H} = \frac{1}{N - M} \sum_{i=M}^N |H(i)| \quad (6)$$

- d) 将步骤b)得到的幅频响应除以步骤c)得到的归一化幅度，即得到归一化幅频响应；
- e) 归一化幅频响应向高、低频率方向下降3dB（或下降到归一化幅度的70.7%）对应的频率记为上、下限截止频率，上、下限截止频率的差为-3dB带宽。

7.4 幅度响应标定方法

7.4.1 标定步骤

标定步骤如下：

- a) 检查待检测设备尺寸，对于地平面待检测设备应包含真实架设时的支架；
- b) 在满足 6.3 尺寸要求的条件下，优先选择附录 A.1 所述的 TEM 小室标定系统；若不满足 TEM 小室标定尺寸要求，可选择附录 A.2 或附录 A.3 所述的平行板或亥姆霍兹线圈标定系统；
- c) 将待检测设备放置于附录 A 所述的标定场产生装置内，连接电源和信号电缆，根据附录 A 中的要求调整传感器在标定环境中的空间位置；
- d) 调整传感器的朝向，使得标定场与传感器极化方向一致；
- e) 开机预热至各设备的规定时间，选择传感器幅频响应平坦响应频段的中值频率，或是选择送检方与标定单位共同协商确定的其它频点，设置为连续波信号源的工作频率，记为 f_c ；
- f) 将信号源幅度置零，记录传感器的零点输出 U_{offset} ；
- g) 从 0 开始逐渐增大连续波信号源的输出信号幅度，在传感器输出信噪比为 2 时，记录待检测设备输出信号幅度为最小可分辨电压 U_{thr} ，根据附录 A 所述的场强计算方法求取待测标准场强，记为 E_{thr} 或 B_{thr} ；
- h) 逐渐增大连续波信号源的输出信号幅度，记录传感器输出饱和时的正负电压峰值，分别对应满量程输出上限值 $U_{+\text{FS}}$ 和下限值 $U_{-\text{FS}}$ ；

注：步骤（h）中由于运放电路正负极性饱和电压的不同，通常 $-U_{-\text{FS}} \neq U_{+\text{FS}}$ ，此外，传感器输出饱和的判定标准可以通过时域波形失真分析或频谱失真分析判别。

- i) 令 $U_M = \text{Min}(U_{+\text{FS}}, -U_{-\text{FS}})$ ，在传感器输出电压峰值 $[0.05 \cdot U_M, 0.95 \cdot U_M]$ 之间均匀取至少 11 个点（包含该起点和终点），待读数稳定后，记录传感器输出电压 $U(i)$ ，根据附录 A 所述的场强计算方法求取对应的待测标准场强 $E(i)$ 或 $B(i)$ 。

7.4.2 数据处理

7.4.2.1 分辨力

对于电场和磁场传感器，7.4.1步骤（g）记录的 E_{thr} 或 B_{thr} 即为传感器的分辨力。

电场变化率和磁场变化率传感器，传感器的分辨力为 E_{thr} 或 B_{thr} 与 $2\pi f_c$ 的乘积。

7.4.2.2 灵敏度

7.4.2.2.1 电场和磁场传感器

电场和磁场传感器的最小二乘拟合直线方程为公式（7）：

$$U = S_E \cdot E + U_{\text{offset}}$$

或

$$U = S_B \cdot B + U_{\text{offset}} \quad (7)$$

式中：

U ——传感器输出电压；

S_E ——电场传感器灵敏度；

S_B ——磁场传感器灵敏度；

E ——待测标准电场场强；

B ——待测标准磁场场强；

U_{offset} ——零点输出。

电磁场传感器灵敏度的最小二乘拟合类似，以电场为例，计算公式如（8）式：

$$S_E = \frac{m \sum_i^m (E_i \cdot U_i) - \sum_i^m E_i \cdot \sum_i^m U_i}{m \sum_i^m E_i^2 - \left(\sum_i^m E_i \right)^2} \quad (8)$$

式中：

m ——标定点数。

7.4.2.2.2 电场和磁场变化率传感器

电场和磁场变化率传感器的最小二乘拟合直线方程为公式（9）：

$$U = S_{E\text{-Dot}} \cdot \frac{dE}{dt} + U_{\text{offset}}$$

或

$$U = S_{B\text{-Dot}} \cdot \frac{dB}{dt} + U_{\text{offset}} \quad (9)$$

式中：

U ——传感器输出电压；

$S_{E\text{-Dot}}$ ——电场变化率传感器的灵敏度；

$S_{B\text{-Dot}}$ ——磁场变化率传感器的灵敏度。

电磁场变化率传感器灵敏度的最小二乘拟合类似，以电场变化率为例，计算公式如（10）式：

$$S_{E\text{-Dot}} = \frac{1}{2\pi f_c} \cdot \frac{m \sum_i^m (E_i \cdot U_i) - \sum_i^m E_i \cdot \sum_i^m U_i}{m \sum_i^m E_i^2 - \left(\sum_i^m E_i \right)^2} \quad (10)$$

式中：

m ——标定点数。

a) 最小二乘线性度

最小二乘线性度的计算按照GB/T 18459—2001中的3.8计算。

b) 测量范围、量程和动态范围

步骤如下：

1) 将7.4.1步骤(h)记录的 U_{+FS} 和 U_{-FS} 分别代入公式(7)或公式(9), 分别得到测量范围的上限值和下限值, 其中零点输出 U_{offset} 由7.4.1步骤(f)中记录, 传感器灵敏度 S_E 或 S_B 或 S_{E-Dot} 或 S_{B-Dot} 根据7.4.2.2计算得到;

2) 求测量范围的上限值和下限值的代数差, 得到传感器的量程;

3) 将量程除以分辨力(由7.4.2.1计算得到)后取以10为底的对数, 结果乘以20得到动态范围。

8 不确定度评定

8.1 基本要求

标准电场或磁场值的不确定度评定依据GB/T 27418-2017执行, 应根据标定系统具体设置, 对影响产生标准电磁场的各个不确定度分量分别评估, 最后给出扩展不确定度结果。

以下分别针对两类标定系统给出了可能的不确定度影响因素, 在标定报告中, 应该根据实际标定系统设置, 给出具体的不确定度来源和评估结果。

8.2 TEM波导和平行板标定系统

根据标准电场和磁场的计算公式(A.3)~(A.4), 不确定度的产生来源于静输入功率、特征阻抗以及传感器所在位置处的芯板与外导体的垂直距离的测量。此外, 还有其他影响因素, 包括: 阻抗失配引起的场沿着TEM室径向变化、插入传感器造成的场扰动等。

表2给出了不确定度的影响因素。

表2 TEM波导和平行板标定系统的标准场不确定度来源

序号	不确定度影响因素
1	传感器的摆放位置
2	插入传感器造成的场扰动
3	功率计、接收机的幅度测量精度
4	特征阻抗实部测量偏离
5	衰减器衰减倍数
6	双定向耦合器的耦合度
7	场分布的不均匀性
8	由于端口阻抗失配引起的驻波
9	芯板与外导体的垂直距离测量
10	测量重复性
11	传感器夹具的影响
12	信号源的频谱纯度

8.3 亥姆霍兹线圈标定系统

根据亥姆霍兹线圈中心标准磁场的计算公式(A.5), 不确定度的产生来源于线圈电流、特征阻抗以及传感器所在位置处的芯板与外导体的垂直距离的测量。此外, 还有其他影响因素, 包括: 阻抗失配引起的场径向变化、插入传感器造成的场扰动等。

表3给出了不确定度的影响因素。

表3 亥姆霍兹线圈标定系统的标准磁场不确定度来源

序号	不确定度影响因素
1	传感器的摆放位置
2	场分布的不均匀性
3	线圈几何尺寸
4	功率计、接收机的幅度测量精度
5	采样电阻阻值误差
6	芯板与外导体的垂直距离测量
7	测量重复性
8	环境金属结构的影响

9 数据记录及标定结果表达

9.1 数据记录

测试原始记录格式见附录B中表B.1~B.3。

9.2 标定报告

标定单位应当出具标定报告，标定报告至少包含以下5部分内容：

- 1) 标定单位信息，包括：名称、地点和标定日期；
- 2) 送检信息，包括：待检设备的被测量类型、传感器类型（自由场或地面场）和标定项目信息；待检设备的品牌、型号、序列号、附录，对于有多个输出档位的，需要明确标定档位的具体情况；
- 3) 标定系统组成与参数设置，包括：标定所用的仪器和装置的连接情况和参数设置，待检设备在标定场产生装置中的放置位置关系；
- 4) 标定测试数据，包括：标定每个测试点的频率、幅度以及传感器响应数据，标定温度和湿度；
- 5) 标定结果及说明，包括：幅度响应标定结果的标定频率；标定结果是否包含支架和数据接收机的影响；灵敏度的标定结果应该给出扩展不确定度和包含因子，以及用于评估计算的不确定度影响因素。

中国气象服务协会

附录 A
(资料性)
标定系统组成

A.1 TEM 波导标定系统

TEM波导包括TEM小室和GTEM室。

采用TEM小室和GTEM室的系统连接分别如图 A.1和图 A.2所示。

传感器在小室内摆放的空间位置与传感器类型有关：对于自由场传感器，将传感器置于小室的芯板和外导体的中间位置，对于地面场传感器，将传感器置于小室内的外导体表面。

图 A.1和图 A.2中，各组成部分通过同轴电缆或光纤与传感器连接，同轴线的芯线与TEM波导的芯板连接，皮线与外导体连接。传感器接收机用于采集和读出传感器对正弦电磁场激励的响应，通常由送检方提供，采用实际使用条件下的接收设备，并置于TEM小室或GTEM室内；对于待检设备不具备接收机或者接收机不能记录连续波激励的情况，也可选用示波器、频谱仪或者网络分析仪，置于TEM小室或GTEM室外。控制计算机用于自动控制信号源的频率和幅度，同时记录接收机的响应，也可通过人工设置和读取。

图 A.1中，场监测设备提供对TEM小室内标准场的监测，通常采用50Ω输入阻抗以实现TEM小室特征阻抗的匹配。将场监测设备测量到的信号功率乘以衰减器的衰减倍数，可得到TEM小室的净输入功率 P_{net} 或净输入电压 V_{net} ，见公式 (A.1)：

$$\begin{aligned} P_{\text{net}} &= PM \cdot k_p \\ \text{或} \quad V_{\text{net}} &= VM \cdot k_v \end{aligned} \quad (\text{A.1})$$

式中：

PM ——场监测设备测量到的信号功率；

VM ——场监测设备测量到的信号电压；

k_p 和 k_v 分别为衰减器的功率衰减倍数和电压衰减倍数，线性单位。

图 A.2中，GTEM室的净输入功率通过双定向耦合器和功率计读数获得，功率计算方法见公式(A.2)。

$$P_{\text{net}} = \frac{PM_1}{c_{\text{fwd}}} - \frac{PM_2}{c_{\text{rev}}} \quad (\text{A.2})$$

式中：

PM_1 ——功率计1的读数，单位：W；

PM_2 ——功率计2的读数，单位：W；

c_{fwd} ——双定向耦合器前向耦合度，线性单位；

c_{rev} ——双定向耦合器反向耦合度，线性单位。

根据输入功率计算被测标准电磁场强度的方法见公式 (A.3) ~ (A.4)。

$$E = \frac{V_{\text{net}}}{b} = \frac{\sqrt{P_{\text{net}} Z_0}}{b} \quad (\text{A.3})$$

$$B = \mu_0 \cdot \frac{E}{\eta_0} \quad (\text{A.4})$$

式中：

V_{net} ——TEM小室或GTEM室的输入电压，单位：V；

P_{net} ——TEM小室或GTEM室的输入功率，单位：W；

Z_0 ——TEM小室或GTEM室的特征阻抗实部，通常为50Ω；

b ——传感器所在位置处的芯板与外导体的垂直距离，单位：m。

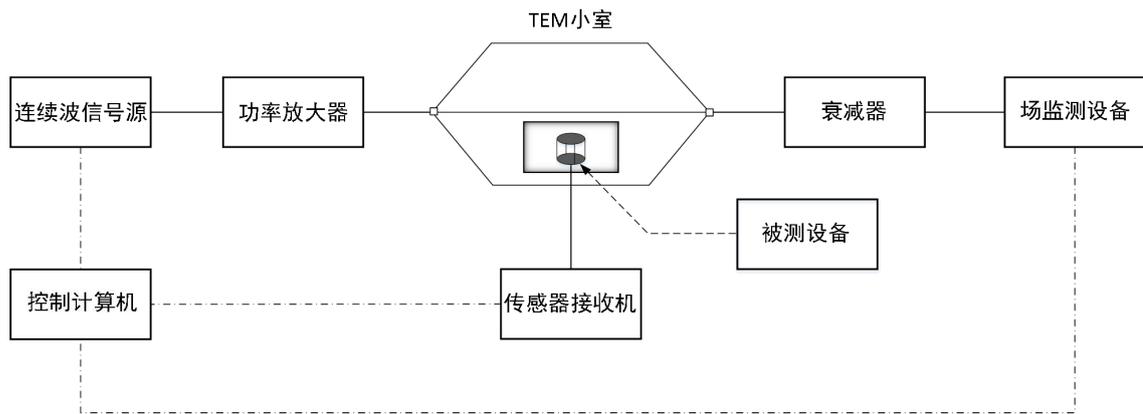


图 A.1 TEM 小室标定系统

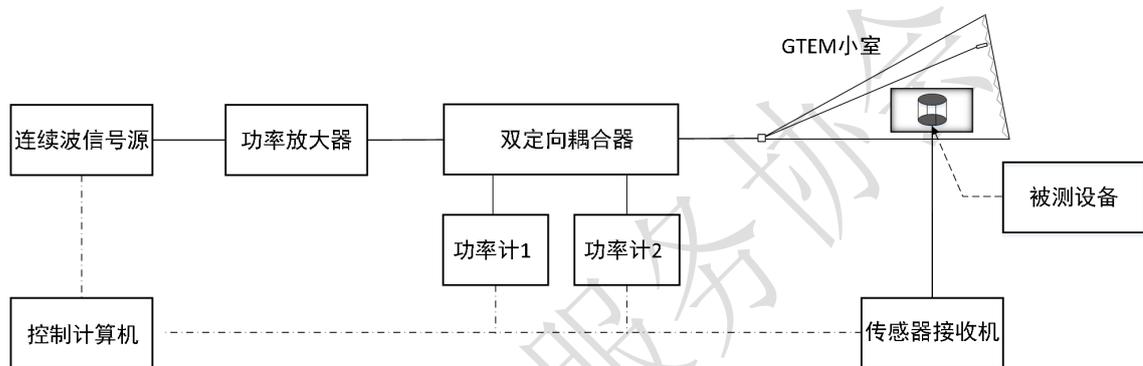


图 A.2 GTEM 室标定系统

A.2 平行板标定系统

本系统主要用于大尺寸、频率较低（通常小于300kHz）时电场传感器的幅度响应标定，当选用直流信号源时，也可用于大气电场仪的幅度响应标定。

标定系统连接如图 A.3所示。传感器置于上下平行板间的中心轴线上，在平行板间的垂直摆放位置与传感器类型有关：对于自由场传感器，将传感器置于上下平板的中间位置，对于地面场传感器，将传感器靠近下平板表面。

图 A.3 中场监测设备输入阻抗选择为高阻。通过公式 (A.1) 可计算平行板的净输入电压 V_{net} ，代入公式 (A.3) 可得到平行板内的标准电场。

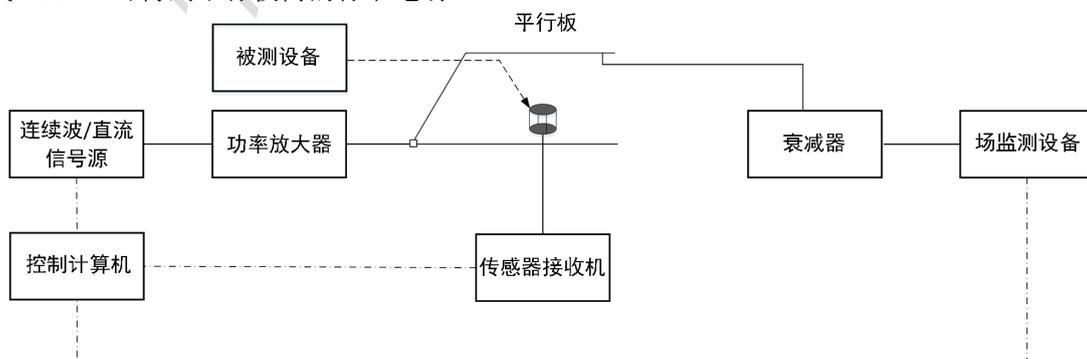


图 A.3 平行板标定系统

A.3 亥姆霍兹线圈标定系统

亥姆霍兹线圈标定系统用于磁场标定，系统连接如图 A.4所示，传感器置于线圈间的中心轴线上。图 A.4中场监测设备输入阻抗选择为高阻。亥姆霍兹线圈由两个完全相同的多匝线圈平行共轴放置，线圈水平间隔与线圈半径相同。在两线圈中心区域，能够产生均匀磁场，磁感应强度计算见公式 (A.5)：

$$B = \frac{\mu_0 \cdot N \cdot I}{r \cdot (1.25)^{3/2}} \approx \frac{0.7155 \mu_0 N I}{r} \quad (\text{A.5})$$

式中：

μ_0 ——真空磁导率， 1.257×10^{-6} 。

N ——单个线圈的圈数；

r ——线圈的半径，单位：m；

I ——线圈中的电流，单位：A，可通过采样电阻的电压监测求出。

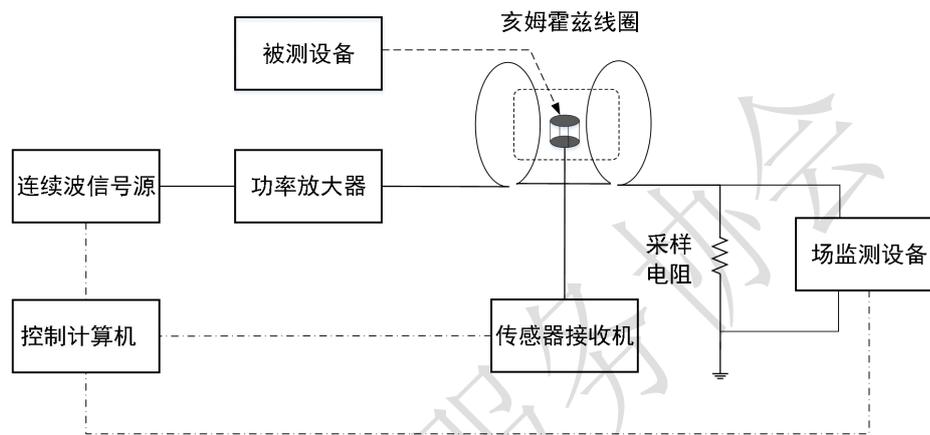


图 A.4 亥姆霍兹线圈标定系统

附录 B
(资料性)
测试原始记录表

表 B.1~B.3 给出了测试原始记录表。

表 B.1 送检信息登记表

待检设备信息				
送检单位名称				
检测单位名称				
检测地点		待检设备型号		
送检日期		检测完成日期		
被测量类型	<input type="checkbox"/> E <input type="checkbox"/> B <input type="checkbox"/> E-Dot <input type="checkbox"/> B-Dot			
传感器尺寸		支架尺寸		
是否包含读出设备	<input type="checkbox"/> Y/ <input type="checkbox"/> N	传感器类型	<input type="checkbox"/> 自由场	<input type="checkbox"/> 地面场
标定项目信息				
频率响应	<input type="checkbox"/> 归一化幅频响应 <input type="checkbox"/> -3dB 带宽 <input type="checkbox"/> 上限截止频率 <input type="checkbox"/> 下限截止频率			
	标定频率范围	上限		
		下限		
幅度响应	<input type="checkbox"/> 灵敏度 <input type="checkbox"/> 分辨力 <input type="checkbox"/> 最小二乘线性度 <input type="checkbox"/> 测量范围 <input type="checkbox"/> 量程 <input type="checkbox"/> 动态范围			

送检人：

联系方式：

表 B.2 频率响应标定原始记录表

标定时间		标定人员				
温度		相对湿度				
待检设备 型号或编号						
标定项目	<input type="checkbox"/> 归一化幅频响应 <input type="checkbox"/> -3dB 带宽 <input type="checkbox"/> 上限截止频率 <input type="checkbox"/> 下限截止频率					
标定场 产生装置	<input type="checkbox"/> TEM 小室 <input type="checkbox"/> GTEM 室					
标定系统 布局						
标定系统参数						
标定位置处芯板-外导体垂直距离 b						
衰减器衰减倍数		功放增益				
双定向耦合器耦合度	前向 C_{fwd}					
	反向 C_{rev}					
外接数据接收机参数设置 (选填)						
示波器或数字化仪	采样率		带宽			
	阻抗		垂直分辨率			
频谱分析仪	灵敏度		分辨带宽			
	动态范围		安全输入电平			
标定数据记录						
序号	频率	$U_s(i)$	$PM(i)$	$PM_1(i)$	$PM_2(i)$	$E(i)$ 或 $B(i)$

记录:

校核:

表 B.3 幅度响应标定原始记录表

标定时间		标定人员			
温度		相对湿度			
待检设备 型号或编号					
标定场 产生装置	<input type="checkbox"/> TEM 小室 <input type="checkbox"/> GTEM 室 <input type="checkbox"/> 亥姆霍兹线圈 <input type="checkbox"/> 平行板				
标定项目 标定系统 布局					
标定系统参数					
标定位置处 TEM/GTEM/平行板 芯板-外导体垂直距离 b					
亥姆霍兹线圈半径 r			线圈匝数 N		
衰减器衰减倍数			功放增益		
双定向耦合 器耦合度	前向 C_{fwd}		传感器满量程 输出电压	上限值 U_{+FS}	
	反向 C_{rev}			下限值 U_{-FS}	
最小可分辨电压 U_{thr}			分辨力 E_{thr} 或 B_{thr}		
标定频率 f_c			环境噪声		
外接数据接收机参数设置 (选填)					
示波器或数字化仪	采样率		带宽		
	阻抗		垂直分辨率		
频谱分析仪	灵敏度		分辨带宽		
	动态范围		安全输入电平		
标定数据记录					
序号	$U(i)$	$PM(i)$	$PM_1(i)$	$PM_2(i)$	$E(i)$ 或 $B(i)$

记录:

校核:

参 考 文 献

- [1] GB/T 7665-2005 传感器通用术语.
 - [2] GJB 8218-2014 高功率超宽谱脉冲辐射场测量方法.
 - [3] GJB 8815-2015 电磁兼容测量天线的天线系数校准规范.
 - [4] JJF 27.12-2018 电磁发射和敏感度测量设备校准规范 第13部分 电磁脉冲电场探头.
 - [5] JJF 1884-2020 10 kHz~100 MHz电磁场探头校准规范.
 - [6] JJF 1886-2020 电场探头校准规范.
 - [7] GB/T 33678-2017 VLF-LF三维闪电定位网技术规范.
 - [8] IEEE Std 1309™-2013 Calibration of Electromagnetic Field Sensors and Probes (Excluding Antennas) from 9 kHz to 40 GHz.
-

中国气象服务协会