

GTEM 室频域校准系统及其不确定度评定

严雪飞^{1,4}, 刘卫东², 王佳³, 欧渊⁴, 石根柱⁴

(1. 陆军工程大学石家庄校区 强电磁场环境模拟与防护技术国防科技重点实验室, 河北, 石家庄 050003;

2. 石家庄铁道大学 信息科学与技术学院, 河北, 石家庄 050003; 3. 陆军装甲兵学院, 北京 100071;

4. 军事科学院系统工程研究院, 北京 100082)

摘要: 研究了脉冲电场的频域校准方法并对其不确定度进行了评定, 针对脉冲电场的校准需求, 以三维脉冲传感器为例, 建立了一套基于 GTEM 室的频域校准系统, 通过仿真和实验, 对 GTEM 室产生标准电场的不确定度以及传感器和标准电场之间相互影响的不确定度进行了分析, 通过不确定度合成, 得出了在置信概率 $>95\%$ 时, 校准的总不确定度为 4.45% 。在此基础上对三维脉冲电场进行了频域校准, 校准结果表明, 传感器在 $10\text{ MHz}\sim 1\text{ GHz}$ 内有着比较平坦的幅频响应。本文的研究对于分析电场传感器的频域校准有一定的参考意义。

关键词: 脉冲电场; 三维传感器; 频域校准; 不确定度

中图分类号: TP391

文献标志码: A

文章编号: 1001-0645(2020)07-0771-07

DOI: 10.15918/j.tbit.1001-0645.2018.333

Frequency Domain Calibration and Uncertainty Evaluation in GTEM Cell

YAN Xue-fei^{1,4}, LIU Wei-dong², WANG Jia³, OU Yuan⁴, SHI Gen-zhu⁴

(1. National Key Laboratory of Science and Technology on Strong Electromagnetic Environment Simulation and Protection, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang, Hebei 050003, China;

2. College of Information Science and Technology, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050003, China; 3. Army Armored Force Academy, Beijing 100071, China;

4. Institute of Systems Engineering, Academy of Military Sciences, Beijing 100082, China)

Abstract: The frequency domain calibration method of pulsed electric field was studied and its uncertainty was evaluated. According to the calibration requirement of pulsed electric field, a frequency domain calibration system based on GTEM cell was established. Through simulation and experiment, the uncertainty of standard electric field produced in GTEM cell and the uncertainty of interaction between sensor and standard electric field were analyzed. Synthesizing the uncertainties, the total uncertainty of the calibration was 4.45% when the confidence probability is more than 95% . Based on this, a three-dimensional pulsed electric field was calibrated in frequency domain. The calibration results show that the sensor has a relatively flat amplitude frequency response in $10\text{ MHz}\sim 1\text{ GHz}$. The research in this paper can provide a certain reference value for analyzing the frequency domain calibration of electric field sensors.

Key words: pulsed electric field; three dimensional sensor; frequency domain; uncertainty of calibration

收稿日期: 2018-08-18

基金项目: 国家部委预研项目(9140C87102014C87363)

作者简介: 严雪飞(1990—), 男, 博士, E-mail: jasonyan9023@163.com.

通信作者: 刘卫东(1983—), 男, 博士, 硕士生导师, E-mail: liuwd_83@163.com.

脉冲电场的测试对于电磁防护和电磁兼容等领域有着重要的意义,清华大学、西北核技术研究所、电子科技大学、军械工程学院等单位针对脉冲电场测试进行了一系列的研究,并研制了如:光纤传感器等,用来进行脉冲电场的测试^[1-4]. 对于传感器而言,对其进行校准是应用的先决条件,而校准系统的不确定度则反映了校准结果的准确^[5].

目前,对于传感器的校准,可供参考的标准主要是 IEEE Std 1309-1996《90 kHz~40 GHz 电磁场传感器或探头的校准(不包括天线)》^[6],在该标准中,主要提到了3种校准方法,但并没有推荐哪种方法为最优选择,却规定无论用哪种方法校准,其结果都要附带校准方法的描述和不确定度评定. 而国内外对于脉冲电场传感器的校准一般以校准方法的研究居多,Shinobu Ishigami^[7]提出了一种基于 TEM 室的校准方法,用来对 1 GHz 以下的传感器进行校准,但未对校准结果的准确度进行评定. 张龙等^[8]提出了一种基于弱场环境校准电场传感器的方法,并在 GTEM 室和开阔场中对脉冲电场传感器进行了时频域的校准,同样没有对校准系统的不确定度进行评定. Matloubi^[9]在 TEM 室中对 100 MHz~1 GHz 的电场传感器进行了校准,并指出在设备运行状况良好时,校准系统产生标准电场的准确度为 ± 0.5 dB,但并未给出上述结果的分析过程和计算方法,曾嵘等^[10]对一套光电集成传感器进行了校准并分析了校准的不确定度,但也仅限于校准系统产生标准电场的准确度,并没有给出传感器和标准电场之间相互作用时的不确定度. 因此,脉冲电场传感器的校准和不确定度评定对于脉冲电场的精确测试有着重要意义.

针对上述问题,本文构建了一套以 GTEM 室为场产生装置的频域校准系统,并以三维脉冲电场传感器为校准对象,对其进行了频域校准及不确定性评定. 该评定结果中除了对传统脉冲电场校准中 GTEM 室产生标准电场的准确度进行分析外,还对传感器和标准电场相互作用的不确定度进行了测量,并通过 GUM 评定法,得出脉冲电场传感器频域校准时总的不确定度,为传感器的频域特性研究和实际应用提供了参考.

1 GTEM 室频域校准系统

频域校准主要是采用连续波信号通过扫频的方式作用于三维脉冲电场测试系统,通过记录各个频

点下的幅值响应,来实现传感器的校准^[11]. 本文在进行频域校准时,根据传感器的特点和实验室的现有条件,采用传递标准法对其进行了校准. GTEM 室校准系统配置如图 1 所示.

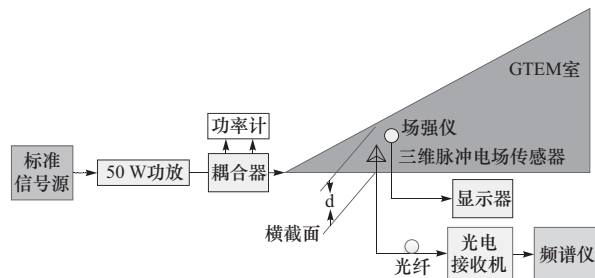


图1 GTEM室频域校准系统

Fig. 1 Frequency domain calibration system in GTEM

所用到的设备主要包括:标准信号源、功率放大器、双向耦合器、标准场强仪、频谱仪等.

标准信号源输出的信号经 50W 功放进行放大后通过耦合器馈入 GTEM 室产生标准电场,场强仪和三维脉冲电场传感器放置于 GTEM 室同一水平位置以保证所接收到的电场强度大小相等;两者之间有一定的距离,以保证测试结果不存在相互干扰. 三维脉冲电场传感器的测试结果经光纤连接至光电接收机,再通过同轴电缆输出至频谱仪进行显示;标准场强仪通过光纤连接至外部电脑来记录测试结果. 通过对比各个频点处场强仪和传感器的测试结果,来实现校准传感器的目的.

2 不确定度评定

对于频域校准系统的不确定度评定,可以从下面两个方面分析.

① GTEM 室产生标准电场引入的不确定度 μ_E . 在频域校准时,GTEM 室产生的标准电场可以通过式(1)得到

$$E = \lambda \frac{\sqrt{P_c Z_c}}{d} = \lambda P_c^{1/2} Z_c^{1/2} d^{-1}. \quad (1)$$

式中: P_c 为馈入 GTEM 室的净功率,可由功率计测量得到的输入功率 P_{in} 和反射功率 P_{ref} 相减得到; Z_c 为 GTEM 室的特性阻抗; λ 为均匀性系数; d 为芯板距底板的高度.

由式(1)可知,由 GTEM 室产生标准电场的标准不确定度主要由 4 个因素组成:①电场均匀性产生的标准不确定度 μ_λ ;②GTEM 室馈入净功率产生的标准不确定度 μ_P ;③由 GTEM 特性阻抗产生的标准不确定度 μ_Z ;④测量距离引入的标准不确定度 μ_d .

假设上述4个不确定度因素是相互独立的,根据GUM评定法^[12-13],可以得到由GTEM室产生标准电场的标准不确定度 μ_E 为

$$\mu_E = \sqrt{\mu_\lambda^2 + \left(\frac{1}{2}\mu_P\right)^2 + \left(\frac{1}{2}\mu_Z\right)^2 + \mu_d^2}. \quad (2)$$

② 三维脉冲电场传感器和GTEM室相互作用引入的标准不确定度 μ_r .

综上,假设 μ_E 、 μ_r 两者之间相互独立,则传感器频域校准的总不确定度 μ_t 可用式(3)表示为

$$\mu_t = \sqrt{\mu_E^2 + \mu_r^2}. \quad (3)$$

2.1 GTEM室产生标准电场的标准不确定度 μ_E

2.1.1 电场均匀性产生的标准不确定度 μ_λ

对于场均匀性引入的标准不确定度 μ_λ ,首先通过模拟仿真得到了GTEM室的电场分布情况.图2给出了在ANSYS软件中的得到的GTEM室芯板距底板1 m的横截面电场分布图.

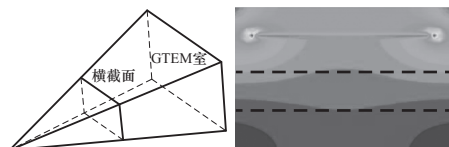


图2 GTEM室电场分布图

Fig. 2 Electric field distribution in GTEM

从图2中可以看出,在同一横截面上,GTEM室的电场分布是不均匀的,具体表现为:越靠近芯板,场强值越大,但在同一水平位置,其场强分布近似均匀.因此,为了保证测试电场的均匀性,在图2虚线区域内,选择场强仪为测试设备,将场强仪放置于三维脉冲电场传感器所在的位置(芯板距底板1 m的横截面,水平高度为0.5 m),通过测量不同频点的场强大小,来得到电场的均匀度,测量结果见表1.

表1 场均匀性产生的标准不确定度 μ_λ

Tab. 1 Standard uncertainty arising from field uniformity

频率 /MHz	电场不均匀度 /%	分布	包含因子	标准不确定度 /%
10	1.02	均匀	$\sqrt{3}$	0.59
100	0.92	均匀	$\sqrt{3}$	0.53
300	1.16	均匀	$\sqrt{3}$	0.67
500	1.78	均匀	$\sqrt{3}$	1.03
1 000	2.57	均匀	$\sqrt{3}$	1.49

通过表1可知,在频域校准时,由电场均匀度引起的标准不确定度较小,而且场强仪作为一个全向天线,高阶模对其影响很小,故测量的结果也更为准确,因此得到的电场均匀度更为合理.按照电场不均匀

度为2.57%取值,假设其服从均匀分布,包含因子取 $\sqrt{3}$,由此得到场均匀性产生的标准不确定度 μ_λ 为

$$\mu_\lambda = \frac{2.57\%}{\sqrt{3}} = 1.49\%. \quad (4)$$

2.1.2 馈入净功率产生的标准不确定度 μ_P

在计算馈入GTEM室净功率时,一般由输入功率 P_{in} 和反射功率 P_{ref} 做差得到,在测量 P_{in} 和 P_{ref} 时,所涉及到的设备较多.在综合考虑影响净功率产生的各个因素,略去其中的次要因素后,将影响馈入GTEM室净功率产生不确定度的因素分为3个方面:①由双向耦合器校准误差引入的标准不确定度 μ_{P1} ;②由功率计测量引入的标准不确定度 μ_{P2} ;③由阻抗失配引入的标准不确定度 μ_{P3} .

① 双向耦合器校准误差引入的标准不确定度 μ_{P1} .

虽然耦合器在出厂时会给定一个耦合度,但这个耦合度只能在一定频率范围内为定值.为了提高测试精度,耦合器校准时所用设备和测试环境与传感器校准时的相同.校准方案为:标准信号源输出恒为-1 dBm,耦合器前向功率输出与频谱仪相连,后向功率输出与50 Ω 负载相连,输出端连接至GTEM室.通过测量不同频率下标准信号源的输出与频谱仪读数的差值,就可以得到耦合器的耦合度.测量结果如图3所示.

本文所用的DC3002耦合器的耦合度为40 dB,但从图3可以看出,随着频率的升高,耦合器的耦合度偏离标称值越来越大.因此,在测试之前进行耦合器的校准是必要的.通过耦合器的校准可以提高测试精度,但耦合器校准结果不能作为不确定度评定的依据.根据IEEE Std 1309—1996中的相关标准,通过测量耦合器输入和反射功率得到净功率的方法可以确保场强的测试精度和耦合器的校准相关,而耦合器校准的不确定度通常 $<1\%$.

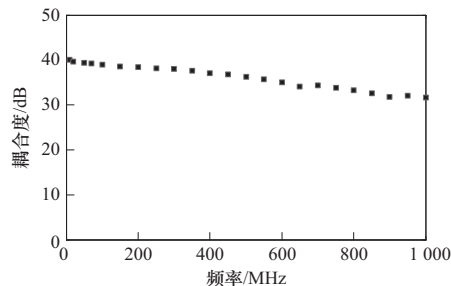


图3 耦合器校准结果

Fig. 3 Calibration results of coupler

这里,按不确定度为1%取值,假设其服从均匀分布,包含因子取 $\sqrt{3}$,则由双向耦合器校准误差引入的标准不确定度 μ_{P1} 为

$$\mu_{P1} = 1\% / \sqrt{3} = 0.58\%. \quad (5)$$

② 由功率计测量引入的标准不确定度 μ_{P2} .

在进行功率测量时,主要涉及的装置有功率计探头、连接电缆、主机3部分,因此在考虑由功率计测量引入的标准不确定度时,也主要从以下这3方面来考虑.

i) 由功率计探头引入的标准不确定度 μ_{P21} .

本文所使用的功率计探头已由中国航天科工集团二院203所进行校准,根据校准证书中的报告,功率计探头误差为 ± 0.12 dB(1.39%),服从均匀分布,包含因子取 $\sqrt{3}$,则由功率计探头引入的标准不确定度 μ_{P21} 为

$$\mu_{P21} = 1.39\% / \sqrt{3} = 0.80\%. \quad (6)$$

ii) 由连接电缆引入的标准不确定度 μ_{P22} .

功率计探头由两根1.5m的电缆和功率计主机相连,电缆所引起的误差主要由两部分构成,分别是热量误差 μ_h 和挠曲误差 μ_f ,且这两者引入的不确定度都可按照 ± 0.15 dB给出,假设满足均匀分布,则由连接电缆引入的标准不确定度 μ_{P22} 为

$$\mu_{P22} = \sqrt{\mu_h^2 + \mu_f^2} = \sqrt{\left(\frac{0.15}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{0.15}{\sqrt{3}}\right)^2} = 0.122 \text{ dB}(1.42\%). \quad (7)$$

iii) 由功率计主机引入的标准不确定度 μ_{P23} .

本文所使用的功率计主机按照其说明书中的技术指标,在50 MHz时校准源功率误差为 $\pm 1.2\%$ (25℃ ± 3 ℃),在1 GHz时校准源功率误差为 $\pm 2.0\%$ (25℃ ± 3 ℃).假设服从均匀分布,取误差为2%,则由功率计主机引入的标准不确定度 μ_{P23} 为

$$\mu_{P23} = 2\% / \sqrt{3} = 1.16\%. \quad (8)$$

综上,由功率计测量引入的标准不确定度 μ_{P2} 为

$$\mu_{P2} = \sqrt{\mu_{P21}^2 + \mu_{P22}^2 + \mu_{P23}^2} = \sqrt{(0.80\%)^2 + (1.42\%)^2 + (1.16\%)^2} = 2.00\%. \quad (9)$$

③ 由阻抗失配引入的标准不确定度 μ_{P3} .

阻抗失配是高频电路设计时都要考虑的一个问题,电压驻波比 R_{VSW} 和反射系数 ρ 之间的关系可以用式(10)表示.

$$R_{VSW} = \frac{1+\rho}{1-\rho}. \quad (10)$$

根据频域校准的配置图可知,可能存在阻抗失配的环节有:①50 W功放与耦合器之间的阻抗失配;②耦合器与前向功率计之间的阻抗失配;③耦合器与后向功率计之间的阻抗失配;④耦合器与GTEM室之间的阻抗失配.

取50 W功放的电压驻波比 $R_{VSW} \leq 1.2$,根据式(10)得反射系数 $\rho = 0.09$,取耦合器电压驻波比 $R_{VSW} \leq 1.5$ ^[14],则反射系数 $\rho = 0.2$,取GTEM室电压驻波比 $R_{VSW} \leq 1.2$,则反射系数 $\rho = 0.09$,取功率计电压驻波比 $R_{VSW} \leq 1.2$,则反射系数 $\rho = 0.09$.则每个环节阻抗失配误差的不确定度范围 E_i ($i=1, 2, 3, 4$)为

$$\begin{cases} E_1 = 20\lg(1 + 0.09 \times 0.2) = 0.155 \text{ dB}(1.80\%) \\ E_2 = 20\lg(1 + 0.2 \times 0.09) = 0.155 \text{ dB}(1.80\%) \\ E_3 = 20\lg(1 + 0.2 \times 0.09) = 0.155 \text{ dB}(1.80\%) \\ E_4 = 20\lg(1 + 0.2 \times 0.09) = 0.155 \text{ dB}(1.80\%) \end{cases} \quad (11)$$

式中 $E_1 \sim E_4$ 分别表示功放与耦合器失配误差、耦合器与前向功率计失配误差、耦合器与后向功率计失配误差以及耦合器与GTEM室失配误差.

根据IEEE中的规定^[15],由失配引起的不确定度一般服从U形分布,包含因子取 $\sqrt{2}$,则由阻抗失配引入的标准不确定度 μ_{P3} 为

$$\mu_{P3} = \sqrt{\left(\frac{E_1}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{E_2}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{E_3}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{E_4}{\sqrt{2}}\right)^2} = 2.54\%. \quad (12)$$

综合式(1)(2)(3)可得,由馈入净功率产生的标准不确定度 μ_P 为

$$\mu_P = \sqrt{\mu_{P1}^2 + \mu_{P2}^2 + \mu_{P3}^2} = \sqrt{0.58\%^2 + 2.00\%^2 + 2.54\%^2} = 3.28\%. \quad (13)$$

2.1.3 GTEM特性阻抗产生的标准不确定度 μ_Z

对于GTEM室的特性阻抗,笔者所在实验室中有人利用有限元分析法计算了提供被测物(equipment under test, EUT)与特性阻抗之间的关系曲线^[16],根据计算结果,GTEM室的特性阻抗会随着EUT体积的增大而减小,但当EUT体积不超过被测区域1/6时,特性阻抗的较小一般不超过1Ω.本文所校准的传感器是一个直角边为70 mm的三棱锥,其体积远远小于测试区域的1/6.故在此,取特性阻抗的变化为1Ω,特性阻抗为50Ω,则其误差率为2%.假设其服从正态分布,包含因子为2,则由

GTEM 特性阻抗产生的标准不确定度 μ_z 为

$$\mu_z = 2\%/2 = 1\%. \quad (14)$$

2.1.4 测量距离引入的标准不确定度 μ_d

本文选用卷尺对 d 进行测量,采取重复 8 次的测试方式,测量数据见表 2.

表 2 卷尺测量数据

Tab. 2 Measuring data of the ruler

次数	1	2	3	4	5	6	7	8
测量值/mm	99.7	99.7	99.8	99.6	99.5	99.7	99.8	99.6

按照贝塞尔公式法,对表 2 数据进行处理,得到标准偏差为

$$s(x_k) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2}{n-1}} = 0.11. \quad (15)$$

则由测量重复性引入的标准不确定度 μ_{dA} 为

$$\mu_{dA} = \frac{0.11}{99.675 \times \sqrt{8}} = 0.04\%. \quad (16)$$

对于卷尺而言,其本身的精度为 1 mm,服从均匀分布,覆盖因子 $k=\sqrt{3}$,按照 B 类不确定度评定:

$$\mu_{dB} = \frac{0.5}{100 \times \sqrt{3}} = 0.3\%. \quad (17)$$

根据式(16)(17)得到芯板距底板测量距离 d 引入的标准不确定度 μ_d 为

$$\mu_d = \sqrt{(0.04\%)^2 + (0.3\%)^2} = 0.303\%. \quad (18)$$

综上,根据式(2)可以得到由 GTEM 室引入的标准电场不确定度 μ_E 为

$$\mu_E = \sqrt{\mu_{\lambda}^2 + \left(\frac{1}{2}\mu_P\right)^2 + \left(\frac{1}{2}\mu_z\right)^2 + \mu_d^2} = \sqrt{1.49\%^2 + \left(\frac{1}{2} \times 3.28\%\right)^2 + \left(\frac{1}{2} \times 1\%\right)^2 + 0.303\%^2} = 2.29\%. \quad (19)$$

2.2 电场传感器和 GTEM 室相互作用引入的标准不确定度 μ_r

本文所校准的对象是三维脉冲电场传感器. 由于其金属结构的屏蔽外壳,将其放置于被测电场时,势必会对被测电场产生扰动,为了探究 GTEM 室内电场中的扰动情况,选用场强仪对有、无传感器时 GTEM 室的场强进行了测量,通过比较前后两侧测量的差值,来得到不同频点下传感器对被测电场的干扰情况. 信号源输出恒为 -1 dBm,传感器和场强仪摆放距离相隔 0.1 m,芯板距底板高度为 1 m. 测试结果见表 3.

表 3 传感器与 GTEM 室相互作用引入的标准不确定度 μ_r

Tab. 3 Standard uncertainty introduced by interaction between sensors and GTEM cell

频率 /MHz	有传感器时场强仪 读数/(V·m ⁻¹)	无传感器时场强仪 读数/(V·m ⁻¹)	变化率 /%
10	52.16	50.51	3.27
50	52.86	50.94	3.76
100	52.63	50.46	4.13
200	51.01	49.26	3.55
300	53.04	50.58	4.87
500	51.73	49.11	5.33
700	52.39	49.67	5.48
1 000	54.68		6.61

从表 3 可以看出,传感器对被测电场的扰动情况随着频率的升高呈上升趋势. 这是由于随着频率的升高,GTEM 室内的高阶模也越来越多,对测试的精确度也产生了一定的影响. 按照最大的扰动为 6.61%取值,假设该不确定度服从均匀分布,覆盖因子 $k=\sqrt{3}$,则由传感器和 GTEM 室相互作用引入的标准不确定度 μ_r 为

$$\mu_r = 6.61\% / \sqrt{3} = 3.82\%. \quad (20)$$

3 不确定度评定结果与讨论

文中详细分析了影响校准总不确定度的 5 个因素,对其数值进行整理,得表 4.

表 4 影响校准不确定度的因素

Tab. 4 Uncertainty factors affecting calibration

参数	灵敏度系数	标准不确定度/%
μ_{λ}	1.0	1.49
μ_P	0.5	3.28
μ_z	0.5	1.00
μ_d	1.0	0.30
μ_r	1.0	3.82

表 4 中前 4 项为 GTEM 室标准场产生的不确定度 μ_E ,第 5 项为标准场与被校准的传感器之间相互影响产生的不确定度 μ_r . 根据式(3)可得,频域校准时的总不确定度 μ_t 为

$$\mu_t = \sqrt{\mu_E^2 + \mu_r^2} = \sqrt{2.29\%^2 + 3.82\%^2} = 4.45\%. \quad (21)$$

测量误差服从正态分布,覆盖因子 $k=2$,置信概率 $>95\%$. 扩展不确定度 $U_z = \mu_z k = 8.90\%$.

在表 4 中,净功率和特性阻抗的灵敏度系数为

0.5,而场均匀性、测量距离和相互作用的灵敏度系数为 1. 由此可知,在频域校准的总不确定度上,传感器和被测电场相互作用的贡献最大,场均匀性的贡献次之,再次是净功率的影响,而特性阻抗和测量距离带来的影响很小,可以不去考虑.

因此,在后续校准中,可以从改善 GTEM 室产生电场的均匀性方面来减小校准的不确定度. 对于传感器而言,应该通过优化其外部设计来减小其对被测电场的干扰,从而降低校准的不确定度.

文中对于影响校准 5 个不确定度因素估值都是比较保守的,因此,最后计算出来的校准的总不确定度因素也应该是比较保守、可靠的,可以按照其置信概率 $>95\%$ 给出,校准的总不确定度为 4.45%,扩展不确定度为 8.90%.

4 脉冲电场测试系统的频域校准

在频域校准时,通常会考察测试系统的幅频特性. 即在保证 GTEM 室输入功率恒定的情况下,频谱仪读数随着频率升高在 ± 3 dB 内的变化情况. 同时,本文还对三维电场传感器和一维电场传感器在 GTEM 室内的幅频特性进行了对比. 一维电场传感器在 GTEM 室内的频域校准方法与三维电场传感器相同,只是将传感器进行了更换. 测试结果如表 5 所示.

表 5 一维和三维传感器频域校准结果
Tab. 5 Calibration results of 1-D and 3-D sensors in frequency domain

频率 /MHz	信号源 输出功率/ dBm	三维时频 谱仪读数 /(dBm·V)	三维时场 强计读数 /(V·m ⁻¹)	一维时频 谱仪读数 /(dBm·V)	一维时场 强计读数 /(V·m ⁻¹)
0.5	10	-23.30	52.38	-25.20	51.08
1	10	-19.34	51.29	-22.28	49.81
10	10	9.35	52.16	6.18	51.35
50	10	9.41	52.86	5.91	52.58
100	10	8.10	52.63	5.23	52.13
300	10	7.26	53.04	3.95	51.29
500	10	7.80	51.73	2.07	49.15
700	10	10.22	52.39	1.54	52.38
900	10	5.49	52.47	-2.83	51.60
1 000	10	4.11	54.68	-7.51	48.52

从表 5 中可以看出,在信号源恒定的情况下,GTEM 室内场强幅值在 50 V/m 左右(因测量时的重复性可能有些许误差),保证了测试时传感器所处位置的场强恒定. 图 4 为一维和三维电场传感器测试时,频谱仪读数随频率变化曲线.

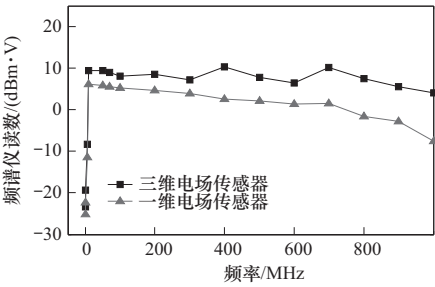


图 4 一维和三维电场传感器幅频特性
Fig. 4 Amplitude frequency characteristic of 1-D and 3-D electric field sensors

由于本文所使用的一维电场传感器已经由中国船舶重工集团公司第 701 研究所进行校准,其测试的带宽为 100 kHz~1 GHz. 而在 GTEM 室内进行频域校准时,其带宽仅为 600 MHz 左右,在高于 600 MHz 时,其幅频特性曲线波动较大. 其原因为:在高频测试时,GTEM 室内会出现高阶模,随着频率的增高,高阶模的阶数也越来越高,由于一维电场传感器对垂直极化的电场比较敏感,因此,高阶模对其测试结果影响较大,造成校准结果的不准确. 这也与前文中的推论相符.

而三维电场传感器是一个全向天线,高阶模对其影响很小. 因此,采用 GTEM 室对三维脉冲电场传感器进行校准是比较合理可行的. 从图 4 中可以看出,三维脉冲电场传感器在 10 MHz~1 GHz 内的有着比较平坦的幅频响应.

5 结 论

① 建立了基于 GTEM 室的脉冲电场频域校准系统,从 GTEM 室产生标准电场的总不确定度以及传感器和标准电场相互作用的不确定度两方面分析了校准的总不确定度.

② 通过分析发现,传感器和被测电场相互作用的贡献最大,场均匀性的贡献次之,因此,在设计和完善校准系统时,可以从改善电场的均匀性以及减小传感器对被测电场的干扰等方面进行优化,以降低校准的不确定度.

③ 通过计算,得出在置信概率 $>95\%$ 时,校准的总不确定度为 4.45%,满足脉冲电场传感器的校准需求.

④ 在此基础上,对三维脉冲的电场传感器进行了时域校准,结果表明:三维脉冲的电场传感器在 10 MHz~1 GHz 内有着比较平坦的幅频响应.

参考文献:

- [1] 朱长青. 脉冲电磁场测试理论与技术研究[D]. 石家庄: 军械工程学院, 2005.
Zhu Changqing. A research on test and measurement theory and technology of pulsed electromagnetic fields [D]. Shijiazhuang: Ordnance Engineering College, 2005. (in Chinese)
- [2] 张家洪. 集成光波导三维脉冲电场传感系统研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2012.
Zhang Jiahong. Research on integrated optical waveguide three-dimensional pulsed electric field sensing system [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2012. (in Chinese)
- [3] 严雪飞, 朱长青. 三维脉冲电场传感器的建模仿真与设计[J]. 高电压技术, 2018, 44(1): 1-7.
Yan Xuefei, Zhu Changqing. Simulation and design of three-dimensional pulsed electric field sensor [J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(1): 1-7. (in Chinese)
- [4] 孔旭, 谢彦召. 基于光纤技术的电磁脉冲3维电、磁场测量系统[J]. 高电压技术, 2015, 41(1): 339-345.
Kong Xu, Xie Yanzhao. Electric field and magnetic field measuring system for EMP measurement based on fiber technology[J]. High Voltage Technology, 2015, 41(1): 339-345. (in Chinese)
- [5] 伍月千, 鲍献丰, 周海京. 非嵌入式多项式混沌方法在电磁模型验证与确认中的应用[J]. 北京理工大学学报, 2018, 38(9): 946-952.
Wu Yueqian, Bao Xianfeng, Zhou Haijing. Non-intrusive polynomial Chaos methods and its application in verification and validation of electromagnetic models[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2018, 38(9): 946-952. (in Chinese)
- [6] IEEE Std. IEEE standard for calibration of electromagnetic field sensors and probes, excluding antennas, from 9kHz to 40 GHz[S]. [S. l.]: IEEE, 2005.
- [7] Shinobu Ishigami, Masayuki Hirata. A new calibration method for an electric-field probe using TEM waveguides [C]// International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility. Zurich: [s. n.], 2009: 425-428.
- [8] 张龙, 魏光辉, 潘晓东, 等. 脉冲电场测试系统标定方法[J]. 高电压技术, 2014, 40(3): 930-936.
Zhang Long, Wei Guanghui, Pan Xiaodong, et al. Calibration method of pulse electric field test system[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(3): 930-936. (in Chinese)
- [9] Matloubi K. A method for calibration of isotropic E-field probes [C]// IEEE 1991 International Symposium Record on Electromagnetic Compatibility. New Jersey, USA: IEEE, 1991: 277-278.
- [10] 曾嵘, 沈晓丽, 陈未远. 横电磁波小室校准系统产生标准电场的不确定度评定[J]. 高电压技术, 2012, 38(11): 2781-2788.
Zeng Rong, Shen Xiaoli, Chen Weiyuan. Uncertainty evaluation of the reference electric field generated by the transverse electromagnetic cell calibration system [J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(11): 2781-2788. (in Chinese)
- [11] Stratakis D, Miaoudakis A, Katsidis C, et al. On the uncertainty estimation of electromagnetic field measurements using field sensors: a general approach[J]. Radiation Protection Dosimetry, 2009, 133(4): 240-247.
- [12] 刘潇, 李渤, 谢鸣. 基于TEM小室的探头校准系统不确定度评定[J]. 计量学报, 2015, 36(3): 318-322.
Liu Xiao, Li Bo, Xie Ming. The uncertainty estimation for the probe calibration results employing a TEM cell [J]. Acta Metrologica Sinica, 2015, 36(3): 318-322. (in Chinese)
- [13] JJF 1059—1999. 测量不确定度的评定与表示[S]. [S. l.]: 中华人民共和国国家计量技术规范, 1999.
JJF 1059—1999. Evaluation and expression of measurement uncertainty[S]. [S. l.]: Technical Specifications of the National Measurement of the People's Republic of China, 1999. (in Chinese)
- [14] Zilberti L, Bottauscio O, Chiampi M, et al. On the use of TEM cells for the calibration of power frequency electric field meters[J]. Measurement, 2010, 43(9): 1282-1290.
- [15] 陈竞, 石立华, 李炎新, 等. 光纤传输脉冲电场传感器的时域校准[J]. 安全与电磁兼容, 2006(6): 86-88, 104.
Chen Jing, Shi Lihua, Li Yanxin, et al. Time domain calibration of pulsed electric field sensors with fiber optical transmission system[J]. Safety & EMC, 2006(6): 86-88, 104. (in Chinese)
- [16] 范丽思, 李金鑫, 刘丽珍, 等. EUT对GTEM室特性阻抗的影响[J]. 军械工程学院学报, 2004, 16(4): 31-34, 40.
Fan Lisi, Li Jinxin, Liu Lizhen, et al. EUT influence on characteristic impedance in GTEM cell[J]. Journal of Ordnance Engineering College, 2004, 16(4): 31-34, 40. (in Chinese)

(责任编辑: 刘芳)