



·高功率微波技术·

基于开放式 TEM 小室的电场探头校准及改进方法

王皓琰, 李俊娜, 龚渝涵, 刘 建

(西安交通大学 电气工程学院, 西安 710049)

摘 要: 目前的电场探头标定实验大多只考虑 TEM 小室结构和性能的影响, 在校准实验中, 探头的放入使得标定结果产生了很大的偏差, 相较于 TEM 小室, 电场探头的尺寸是产生误差的主要原因。以开放式 TEM 小室为基础, 考虑了实际模型和电场探头的影响, 利用三维电磁仿真软件, 从时域角度研究了不同结构和尺寸 TEM 小室的辐射场分布, 并从频域角度对 TEM 小室的 S 参数进行分析。比较了探头放入小室前后的误差, 并根据计算结果引入了电场的校准公式。为改善探头对电场的影响, 设计了一种新型结构, 结果表明, 新结构在保证带宽的同时, 提高了电场的均匀性和探头标定的准确度。

关键词: TEM 小室; 电场探头; 探头扰动; 电场均匀性; 校准公式

中图分类号: O441

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.210461

Electric field probe calibration and improvement method based on open TEM cell

Wang Haoyan, Li Junna, Gong Yuhan, Liu Jian

(Xi'an Jiaotong University, School of Electrical Engineering, Xi'an 710049)

Abstract: Most of the calibration experiments of the electric field probe only consider the influence of the structure and performance of the TEM cell. In the calibration experiment, the placement of the probe makes the calibration result produce a large deviation. Therefore, the main reason for the error is the size of the probe, rather than the TEM cell. Taking the actual model and electric field probe into account, in this paper, the radiation field distribution of TEM cells with different structures and sizes is studied from the time domain perspective based on open TEM cells, while the S -parameters of TEM are analyzed from the frequency domain perspective using 3D electromagnetic simulation software. In addition, this paper compares the errors before and after the probe is placed in the chamber, and introduces the electric field calibration formula based on the calculation results. In order to improve the influence of the probe on the electric field, a new structure was designed. The results show that the new structure not only guarantees the bandwidth, but also improves the uniformity of the electric field and the accuracy of the probe calibration, which provides a new idea for the design of the TEM cell and the calibration of the probe.

Key words: TEM cell, electric field probe, probe disturbance, electric field uniformity, calibration formula

核爆电磁脉冲探测是探测核爆的重要手段, 其探测相关的电场探头都需要校准和标定^[1]。现有的校准方法都是对实际电压测量误差、特性阻抗误差、TEM 小室尺寸测量误差和端口失配误差引入的不确定度进行分析^[2-6], 并在此基础上对探头进行校准。这些校准方法前提是电场探头的尺寸结构对电场不构成影响, 但用于电磁脉冲测量的电场探头由于其外壳结构为金属^[7-9], 探头相对于 TEM 小室的尺寸越大, 内部电场的改变越大, 其中探头附近的电场扰动最为明显, 由此带来的误差远大于测量误差^[10-11]。所以, 目前采用的校准方法并不适用于电磁脉冲探头的标定, 考察金属探头的影响十分必要。

现有的电磁脉冲探头校准装置大多采用封闭式 TEM 小室, 优点是可以隔离小室内外的电磁环境^[12-13], 但在实际使用中, 相对开放式 TEM 小室, 结构更复杂, 探头入口和支撑材料等对带宽和场均匀性都有影响。本文以开放

* 收稿日期: 2021-11-02; 修订日期: 2021-12-20

基金项目: 装备发展共用技术预研项目 (80924010203)

联系方式: 王皓琰, why_xjtu@163.com。

通信作者: 李俊娜, uvlina@126.com。

式 TEM 小室模型为基础,从时域和频域角度研究了用于电磁脉冲探头标定的小室内部电场和探头放置对电场的影响。本文采用 IEEE std 1309-2013 中使用实际计算场强进行校准的方法^[14],为保证标定的准确度,对开放式 TEM 小室的电场进行了误差校准,并根据放入探头后的电场扰动提供了新的误差校准公式。由于放入探头使校准误差增加,且需要根据不同尺寸采用不同的校准公式,因此设计了一种新型开放式结构以降低误差和简化校准程序,并对该结构的场均匀性和频域响应进行了计算。

1 开放式 TEM 小室结构及原理

开放式 TEM 小室如图 1 所示,其结构完全对称,上下极板和芯板的中段长度均为 $L=400$ mm,上下极板宽度 $w=600$ mm,芯板两侧收锥部分长 $m=183$ mm,宽 $n=400$ mm,极板厚度 $s=2$ mm,芯板和上下极板的间距 $d=149$ mm,以芯板下表面的中心为坐标原点设置坐标系,文中电场测量位置均在芯板和下极板中心连线上,距离芯板 1 mm 和距离下极板 1 mm 的电场位置分别表示为 $(0,0,1)$ 和 $(0,0,d-1)$ 。TEM 小室主段及两端的过渡段均具有标准的 50Ω 阻抗特性,在小室的一端加上激励源,另一端接入匹配负载,激励信号采用幅值 10 kV、上升沿和下降沿均为 2 ns、脉宽为 100 ns 的方波信号。

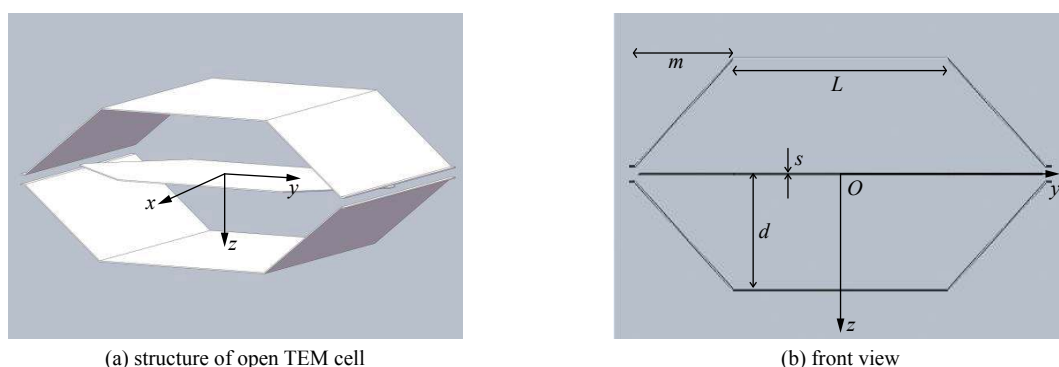


Fig. 1 Open TEM cell

图 1 开放式 TEM 小室

高频电磁能量的馈入,会在 TEM 小室内部建立一个类似平面波的横电磁场,电场方向垂直于芯板,用于标定探头的激励为电压源,则小室内的电场可表示为

$$E = \frac{U}{d} \quad (1)$$

式中:电场 E 的单位为 V/m; d 为 TEM 小室芯板与下极板间的垂直距离,单位为 m。

2 场均匀性和带宽分析

2.1 场均匀性校正及尺寸选择

在 TEM 小室内部,芯板和上下极板之间不同高度的电场幅值都不相等,电场不均匀性使得位置高度参数必须考虑,因此引入位置高度参数 h ,表示与芯板的距离。以 TEM 小室的极板间距 d 为基准,对小室进行放大,考虑极板厚度,分别取 $d=199$ mm、 249 mm、 299 mm,即小室尺寸分别扩大 1.33、1.67、2 倍,并分别对 $d=149$ mm、 199 mm、 249 mm、 299 mm 的四种不同尺寸 TEM 小室内部电场进行分析。在小室中心,从距芯板 1 mm 位置开始,每隔 20 mm 增加一测点,直至距离上或下极板 1 mm 处,图 2 给出了 $d=149$ mm 时距离芯板 1 mm 和距离下极板 1 mm 的电场波形。

其它结构和位置的电场波形特征相同,仅幅值有所区别,表 1 给出了其余测点的电场幅值,并根据公式(1)算出的理论值计算了不同位置处的误差。从表 1 可以看出,不同尺寸的 TEM 小室内部辐射场与理论值的最大差值在 2.5% 左

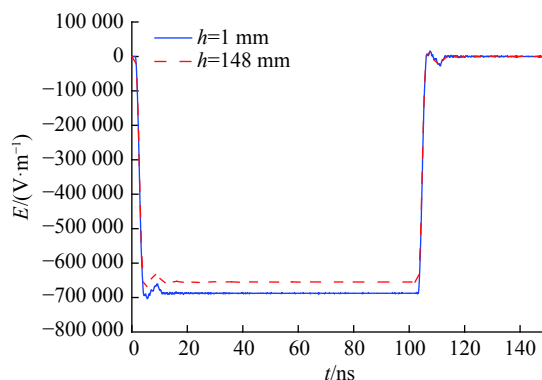


Fig. 2 Electric field waveforms at $h=1$ mm and $h=148$ mm when $d=149$ mm

图 2 $d=149$ mm 结构中分别距离芯板和下极板 1 mm 的电场波形

表 1 电场分布及误差
Table 1 Electric field distribution and error

measuring point/mm	amplitude/(V·m ⁻¹)	error/%	amplitude/(V·m ⁻¹)	error/%	amplitude/(V·m ⁻¹)	error/%	amplitude/(V·m ⁻¹)	error/%
	d=149 mm		d=199 mm		d=249 mm		d=299 mm	
(0,0, 1)	68 843	2.56	51 550	2.59	41 207	2.60	34 334	2.66
(0,0, 40)	68 197	1.61	51 313	2.11	41 065	2.25	34 184	2.21
(0,0, 80)	66 901	0.32	50 671	0.84	40 887	1.81	34 032	1.76
(0,0, 120)	65 741	1.77	49 910	0.46	40 223	0.15	33 775	0.99
(0,0, 160)	—	—	49 318	1.86	39 891	0.67	33 401	0.12
(0,0, 200)	—	—	—	—	39 573	1.46	33 063	1.14
(0,0, d-1)	65 501	2.40	49 106	2.28	39 199	2.40	32 623	2.45

右,且辐射场幅值随着与芯板距离的增加呈正比例形式越来越低。

由于 TEM 小室的对称结构,只需要考虑芯板和下极板之间的电场,为了降低实际探头结果与理论值相比带来的误差,令辐射场幅值与理论值的相对误差为 α 。由于频域响应的限制,TEM 小室的尺寸结构不会很大,可以根据仿真结果令 $\alpha=2.5\%$,那么某一位置的电场校准公式可表示为

$$E(h) = \frac{U}{d} + k \left(\frac{d}{2} - h \right) \quad (2)$$

式中: $k = \frac{U}{d} \frac{2\alpha}{d-0.002}$, $\alpha=2.5\%$ 。通过公式(2)校准后,任意位置的电场与实际电场强度的误差小于 0.8%,探头标定的精确度得到提升。

受限于 TEM 小室的工作频率,一旦工作频率高于高次模最低模式的截止频率,小室内就会产生高次模,从而破坏小室内场分布的均匀性。图 3 给出了通过 CST 仿真得到的四种不同尺寸 S_{21} 和 S_{11} 参数:

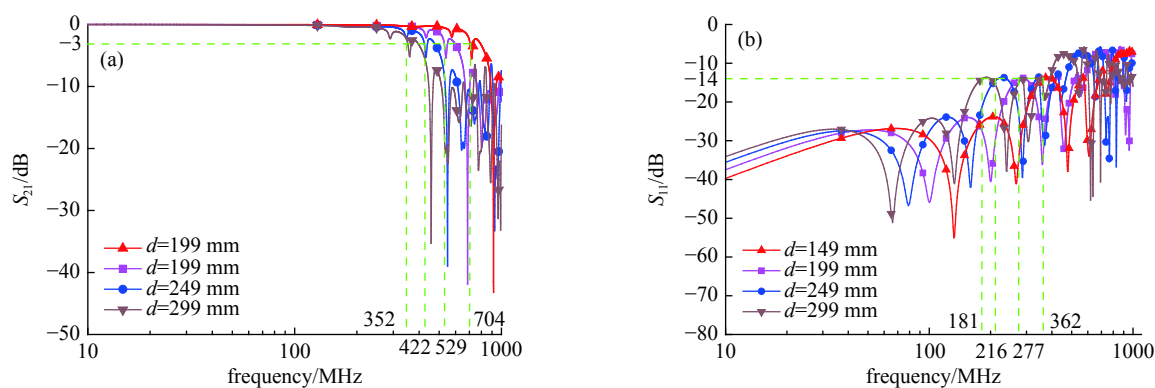


Fig. 3 S_{21} parameters and S_{11} parameters

图 3 S_{21} 和 S_{11} 参数

S_{21} 越大,传输效率越高,通常需要 $S_{21} > 0.7$,即 -3 dB,而 S_{11} 则越小越好,在 IEEE Std 1309 标准中规定了 TEM 小室的 VSWR 通常需要小于 1.5:1,根据 VSWR 的值可以算出 S_{11} 应小于 -14 dB,校准所用的带宽应低于该基线。根据频域仿真结果, $d=149$ mm 的截止频率为 704 MHz, $S_{11} < -14$ dB 的频率上限为 362 MHz, $d=199$ mm 的截止频率为 528 MHz, $S_{11} < -14$ dB 的频率上限为 277 MHz。这两种尺寸基本可以满足目前的电磁脉冲探头标定要求,而其余两种尺寸的截止频率过低, S_{11} 也过小,不适合用于该探头的标定。

2.2 探头对电场扰动的影响

用于电磁脉冲探测的电场探头其直径和厚度相比于小室的尺寸不可忽略。为了分析探头引进的误差,仍选择四种结构尺寸的 TEM 小室,其芯板和下极板间距 d 分别取 149 mm、199 mm、249 mm、299 mm,仅改变结构比例,阻抗等因素均不变。在下极板上放置一绝缘结构,该绝缘结构由长方体和四个圆柱体支撑柱组成,长方体边长为 130 mm \times 130 mm,厚度 $l_1=2$ mm,圆柱支撑直径为 10 mm,长度 $l_2=18$ mm,绝缘支撑上放置一直径为 120 mm、厚度为 30 mm 的探头,探头和绝缘结构均位于下极板的中心,放入绝缘结构和探头后的模型如图 4 所示。

考虑到探针的位置,对芯板和探头上表面之间的电场进行测量,测点位置从距离芯板 1 mm 开始到距离探头上表面 1 mm。探头的放入使电场不均匀性增加,绝缘结构中长方体板的厚度对电场也存在一定影响,改变长方体厚度为 10 mm、圆柱体支撑长度 10 mm,保证探头的空间位置并不发生改变,绝缘厚度增加,仍以 2.1 中的理论值来计算误差,电场分布及误差如表 2 所示。

通过表 2 中数据可以看出,对于任意尺寸的 TEM 小室,探头附近的电场值误差最大,并且随着小室尺寸的增大,误差将会不断缩小,但是尺寸的增加会使得高频响应变差。同时,绝缘结构的厚度对电场同样存在影响,绝缘厚度的增加使得小室内的电场幅值变高,从而误差增大,因此,绝缘结构的厚度要尽量小。在考虑两者因素后,本文对绝缘结构 $l_1=2$ mm、 $l_2=18$ mm、TEM 小室尺寸 $d=199$ mm 的模型进行误差校准。由于此时电场随位置的变化不再接近线性变化,电场校正则不能采用公式(2),通过数据拟合,误差 α 随 h 的变化曲线如图 5 所示,其曲线可用高斯波形拟合,则误差 α 随位置 h 的变化可由公式(3)给出

$$\alpha = 0.085 + 0.19e^{-0.5\left(\frac{h-152}{43}\right)^2}, 0 < h < 148 \text{ mm} \quad (3)$$

式中: h 的单位为 mm,那么 $d=199$ mm 的小室内电场为

$$E(h) = (1 + \alpha)\frac{U}{d} \quad (4)$$

根据公式(4)对绝缘结构 $l_1=2$ mm、 $l_2=18$ mm、TEM 小室尺寸 $d=199$ mm 的小室内电场进行校准后,探头标定的电场值与内部电场实际值误差小于 1%。

表 2 放入探头的电场分布及误差

Table 2 Electric field distribution and error after the probe is placed

insulation size	measuring point/mm	amplitude/(V·m ⁻¹)	error/%	amplitude/(V·m ⁻¹)	error/%	amplitude/(V·m ⁻¹)	error/%	amplitude/(V·m ⁻¹)	error/%
		$d=149$ mm		$d=199$ mm		$d=249$ mm		$d=299$ mm	
$l_1=2$ mm $l_2=18$ mm	(0,0, 1)	78 275	16.63	54 525	8.51	42 449	5.70	34 973	4.57
	(0,0, 40)	80 811	20.41	54 913	9.28	42 541	5.93	35 071	4.86
	(0,0, 80)	88 251	31.49	56 975	13.38	42 817	6.61	35 121	5.01
	(0,0, 120)	—	—	62 002	23.38	44 270	10.23	35 275	5.47
	(0,0, 160)	—	—	—	—	47 509	18.30	36 282	8.48
	(0,0, 200)	—	—	—	—	—	—	39 134	17.01
	(0,0, $d-51$)	89 744	33.72	64 210	27.78	51 174	27.42	43 536	30.17
$l_1=10$ mm $l_2=10$ mm	(0,0, 1)	81 041	20.75	55 809	11.06	43 097	7.31	35 154	5.11
	(0,0, 40)	84 301	25.61	56 469	12.37	43 213	7.60	35 284	5.50
	(0,0, 80)	93 231	38.91	59 454	18.31	43 772	8.99	35 418	5.90
	(0,0, 120)	—	—	66 239	31.82	45 946	14.40	35 702	6.75
	(0,0, 160)	—	—	—	—	51 000	26.99	37 055	10.79
	(0,0, 200)	—	—	—	—	—	—	40 062	19.78
	(0,0, $d-51$)	95 022	41.58	69 146	37.60	55 534	38.28	45 989	37.51

3 TEM 小室结构改进

上述分析表明,探头的放入使得校准公式并不能统一,为了降低探头对电场的扰动,并且保证 TEM 小室的高频响应,可以对 TEM 小室的结构进行改进。TEM 小室的尺寸结构保持不变, $d=149$ mm,在下极板正中心切割出一个圆孔,使探头可以完全填补这个圆孔,如图 6 所示,只需选择绝缘支撑材料使探头的上表面与下极板的上表面在同一平面,探头与圆孔间不会完全无缝,令其缝隙为 1 mm。该结构的主要影响是探头与极板的缝隙,如果缝隙对辐射场和高频响应影响不大,那么就解决了电场扰动的问题。

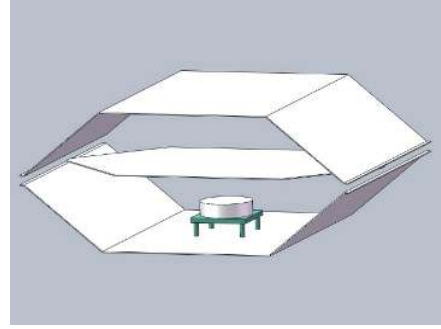


Fig. 4 Model with the probe

图 4 放入探头的模型

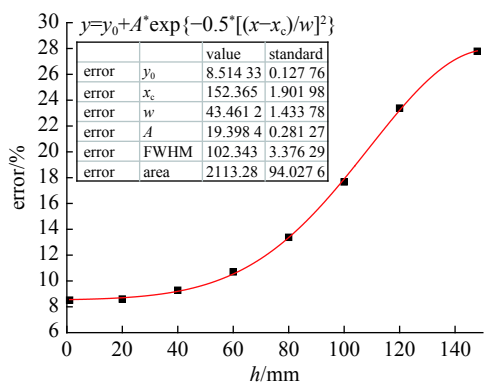


Fig. 5 Fitting curve of error with h

图 5 误差 α 随 h 的拟合曲线

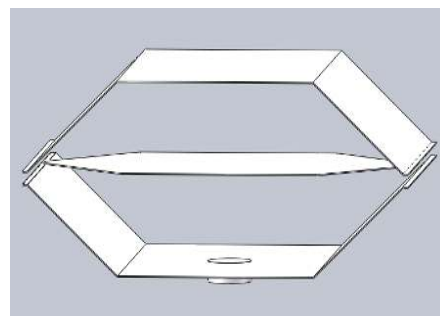


Fig. 6 TEM cell with improved structure

图 6 改进结构的 TEM 小室

表 3 给出了 TEM 小室内电场及与理论值的误差。从表中数据可以看出，开孔的缝隙对辐射场幅值几乎无影响，同位置电场幅值几乎相等，再引入公式(1)进行校正，那么标定的误差将降低到 1% 以下。 $d=149\text{ mm}$ 时仿真得到的频域响应如图 7 所示。可以看出，-3 dB 的截止频率为 702.5 MHz，相比无缝隙的情况仅下降了 1.6 MHz， S_{11} 的 -14 dB 频率为 370 MHz，其高频响应基本不受影响，该结构消除了探头带来的巨大扰动。放入探头后的校准与探头尺寸、放置位置和绝缘结构等密切相关，所以其校准公式需要按实际情况计算，改进的 TEM 小室设计也与探头尺寸有关，所以，本文的校准公式并不具有普适性，但校准方法可以普遍适用。

表 3 改进结构的电场分布及误差

Table 3 Electric field distribution and error of improved structure

measuring point/mm	amplitude/($\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$)		error/(%)		amplitude/($\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$)		error/(%)		amplitude/($\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$)		error/(%)	
	$d=149\text{ mm}$		$d=199\text{ mm}$		$d=249\text{ mm}$		$d=299\text{ mm}$		$d=299\text{ mm}$		$d=299\text{ mm}$	
(0,0, 1)	68 829	2.56	51 688	2.85	41 286	2.80	34 512	3.19	34 512	3.19	3.19	
(0,0, 40)	68 313	1.79	51 361	2.21	41 127	2.41	34 213	2.30	34 213	2.30	2.30	
(0,0, 80)	67 034	0.12	50 797	1.09	40 824	1.65	34 019	1.72	34 019	1.72	1.72	
(0,0, 120)	65 880	1.84	50 065	0.37	40 345	0.46	33 720	0.83	33 720	0.83	0.83	
(0,0, 160)	—	—	49 405	1.68	39 871	0.72	33 438	0.02	33 438	0.02	0.02	
(0,0, 200)	—	—	—	—	39 514	1.61	33 120	0.97	33 120	0.97	0.97	
(0,0, $d-1$)	65 598	2.26	49 214	2.06	39 332	2.06	32 738	2.11	32 738	2.11	2.11	

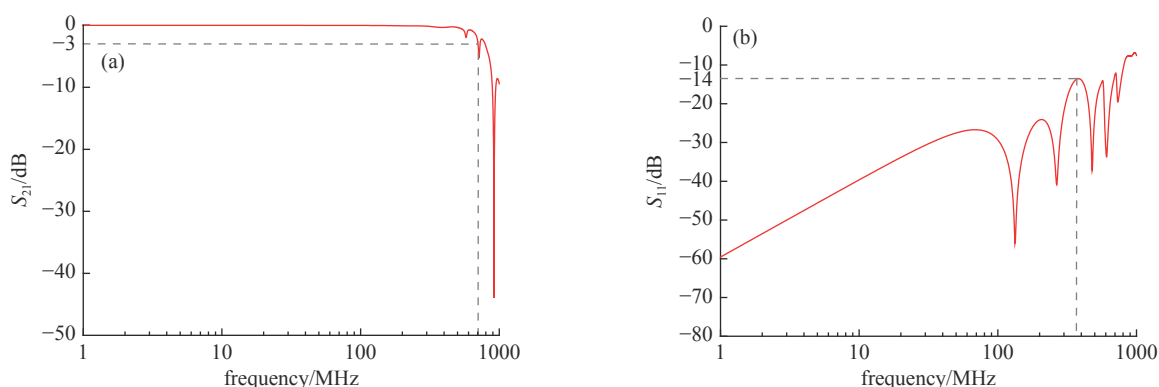


Fig. 7 S_{21} and S_{11} parameters of improved structure

图 7 改进结构的 S_{21} 和 S_{11} 参数

4 结论

本文采用了开放式 TEM 小室的结构对电场探头进行标定，结果表明，增大开放式 TEM 小室的尺寸对辐射场的均匀性不会有太大影响，电场校准公式的引入使误差能够降低到 1% 以下；放入电场探头降低了电场均匀性并

大大增加了误差,绝缘厚度也会一定程度增加误差。同时,在考虑场均匀性和高频响应的基础上,设计了一种新型结构,解决了探头放入造成的误差过大问题。下一步将结合封闭式 TEM 小室的结构进行进一步对比分析。

参考文献:

- [1] 李欣,张雪芹,曹保锋,等. 电磁脉冲电场探头校准装置及不确定度评定[J]. *核电子学与探测技术*, 2014, 34(8): 1007-1010,1023. (Li Xin, Zhang Xueqin, Cao Baofeng, et al. Standard device of nuclear explosion electromagnetic pulse and evaluation of uncertainty[J]. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2014, 34(8): 1007-1010,1023)
- [2] 郭启勇,梁琼崇,骆德汉,等. 基于TEM小室的电场探头校准及其不确定度评定[J]. *广东工业大学学报*, 2016, 33(3): 19-25. (Guo Qiyong, Liang Qionghong, Luo Dehan, et al. An electric field probe calibration based on TEM cell and evaluation of its uncertainty[J]. *Journal of Guangdong University of Technology*, 2016, 33(3): 19-25)
- [3] 李丹. 20Hz-100MHz电场探头校准系统的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016. (Li Dan. Research on electric-field probe calibration system for 20Hz-100MHz[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016)
- [4] 张骏驰. 磁场探头校准系统的研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2008. (Zhang Junchi. Research on the calibration system of magnetic field probe[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2008)
- [5] 谢鸣,王维龙,黄攀,等. 10MHz~1GHz电场探头校准系统[J]. *安全与电磁兼容*, 2007(5): 23-27. (Xie Ming, Wang Weilong, Huang Pan, et al. Calibration system for electric field probe in the range of 10 MHz to 1 GHz[J]. *Safety & EMC*, 2007(5): 23-27)
- [6] 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): 318-323. (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): 318-323)
- [7] 刘逸飞,马良,程引会,等. 基于光纤传输的灵敏度自校准脉冲电场测量系统[J]. *高电压技术*, 2021, 47(4): 1478-1484. (Liu Yifei, Ma Liang, Cheng Yinwei, et al. Pulse electric field measurement system with sensitivity self-calibration based on optical fiber transmission[J]. *High Voltage Engineering*, 2021, 47(4): 1478-1484)
- [8] 王启武,石立华,李炎新,等. HEMP模拟器的改进及测量探头的设计[J]. *安全与电磁兼容*, 2011(2): 61-64. (Wang Qiwu, Shi Lihua, Li Yanxin, et al. Development of HEMP simulator and design of D-dot probe for HEMP measurement[J]. *Safety & EMC*, 2011(2): 61-64)
- [9] 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 optic transmission system[J]. *Safety & EMC*, 2006(6): 86-88,104)
- [10] Jiang Yunsheng, Meng Cui, Jin Hanbing, et al. Determining the effect of relative size of sensor on calibration accuracy of TEM cells[J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2019, 30(6): 78-87.
- [11] Lu Xinhua. Characteristic impedance variation of the TEM cell caused by the introduction of the equipment under test[C]//Proceedings of 1999 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. 1999: 596-599.
- [12] 任翔,马帅帅,李静,等. 基于TEM室的微波功率器件电磁兼容测试技术[J]. *舰船电子工程*, 2019, 39(8): 166-168,189. (Ren Xiang, Ma Shuaishuai, Li Jing, et al. Electromagnetic compatibility testing technology of microwave power device based on TEM room[J]. *Ship Electronic Engineering*, 2019, 39(8): 166-168,189)
- [13] 陈军,万发雨,范盼. 新型宽带横电磁波小室的设计[J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 2016, 39(7): 938-942. (Chen Jun, Wan Fayu, Fan Pan. Design of novel broadband TEM cell[J]. *Journal of Hefei University of Technology (Natural Science)*, 2016, 39(7): 938-942)
- [14] STD 1309-2013, IEEE standard for calibration of electromagnetic field sensors and probes, excluding antennas, from 9 kHz to 40 GHz[S].