

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.11.013

基于吉赫兹横电磁波室的特高频传感器性能评价方法研究

杨 圆¹, 毕建刚¹, 吴旭涛², 袁 帅¹, 黄智伟³

(1. 中国电力科学研究院, 北京 100192; 2. 国网宁夏电力公司电力科学研究院, 银川 750001;
3. 国网福建省电力有限公司福州供电公司, 福州 350009)

摘要: 特高频局部放电检测法在GIS设备现场状态检测中得到了广泛应用,但传感器性能良莠不齐制约了现场应用效果。为研究特高频传感器对局部放电引发的电磁波信号的响应特征,基于吉赫兹横电磁波室开展了传感器扫频试验研究,在传感器有效检测频段内将一恒定电场强度扫频信号注入横电波室,检测传感器电压信号输出强度,用输出与输入信号强度比值的方式来表征传感器的响应特征,并与传统的脉冲分解法和驻波比法进行了比较分析,证明了该方法得到的结果是准确的。文中还比较了不同输入强度信号情况下传感器响应特征曲线,分析表明,该方法还可以获得更多传感器检测能力细节,如各频点的响应能力和传感器的检测灵敏度及饱和区间等,该方法为进一步深入研究特高频传感器性能评价方法提供了理论和实践依据。

关键词: 特高频传感器; 扫频法; 响应特征; 评价方法; GTEM小室

Research on Performance Evaluation Method of Ultra High Frequency Sensors Based on Gigahertz Transverse Electromagnetic Cell

YANG Yuan¹, BI Jiangang¹, WU Xutao², YUAN Shuai¹, HUANG Zhiwei³

(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China; 2. State Grid Ningxia Electric Power Company Electric Power Research Institute, Yinchuan 750001, China; 3. State Grid Fujian Electric Power Company, Fuzhou 350009, China)

Abstract: Ultra high frequency (UHF) partial discharge detection technology has been widely used in state detection of GIS equipment, but the performance of the sensor for detection varies to restrict field application effect of this technology. To investigate the UHF sensor's response characteristics to electromagnetic wave signal caused by partial discharge, the frequency sweeping test for the sensor was conducted based on gigahertz transverse electromagnetic cell. By injecting continuous sweeping frequency sine wave signal with constant intensity into the transverse electromagnetic cell, the UHF sensor's output was obtained within effective detection band, and the intensity ratio of output signal to input signal is adopted to characterize the response characteristics of the sensor. Compared with traditional pulse decomposition method and standing wave ratio method, the present method is accurate. The sensor's response characteristic curves to the signals with different input intensity were also compared, and the result showed that this method could get more information about sensor's detection capability, such as response ability for every frequency point, detection sensitivity, and saturation interval. This method may provide theoretical basis for further study on UHF sensor performance evaluation method.

Key words: UHF sensors; frequency sweeping method; response characteristics; evaluation method; GTEM cell

收稿日期:2016-05-17; 修回日期:2016-06-28

基金项目:国家电网公司科技项目(GY71-15-039)。

Project Supported by the State Grid Corporation of China(GY71-15-039).

0 引言

近年来,随着局部放电特高频在线监测和带电检测技术的深入研究,该技术已经在各电压等级变电站得到了广泛应用,并积累了大量的现场检测数据^[1-4]。目前现场应用的特高频传感器种类繁多,按照原理来分类主要有等角螺旋型、阿基米德型等,按照使用对象来分类主要有变压器、GIS 等,按照安装位置有内置式和外置式^[5-10]。

对于实验室条件下的特高频传感器性能评价,目前国内外尚没有统一的评价标准,也没有一种广泛认可的性能测试方法^[10-12]。目前应用较多的是将传感器直接放置在安装了各类局部放电缺陷的变压器或者 GIS 模型上进行检测有效性评价,包括信噪比,灵敏度和增益等,但局部放电缺陷模型自身固有的差异化导致测试结果分散性较大。英国 DMS 公司通过向 GTEM 小室注入标准脉冲信号,并将传感器接收到的脉冲信号进行傅里叶分解的方法来测试传感器的等效高度^[13-15],但由于脉冲信号经过傅里叶分解后特高频信号频段能量较弱,特别在 500 MHz 以上的信号强度不足,在背景噪声的影响下会导致输出/输入系统传递函数自身引起的测量误差偏大,难以满足试验检测对准确性和可复现性的要求。

吉赫兹横电磁波小室(GTEM 小室)作为一种电磁兼容测试场地,工作频带宽、测试效率高、对环境要求低,随着近年来相关的基础理论及应用研究的逐渐深入,GTEM 小室的应用领域已经从原有的电磁兼容测试,逐渐扩展到天线测试、RFID 测试、RCS 测试等领域^[16-18]。

文中利用信号发生器和信号放大器向 GTEM 小室内注入一定频率和场强的正弦信号,设置扫描频率范围覆盖 300~1 500 MHz,来考察传感器对特高频频段信号的响应能力。

1 特高频传感器校验技术

1.1 检测原理

特高频传感器的实现原理源自天线,在天线领域用于描述天线检测性能的参数为天线的有效高度 h_e 。 h_e 是一个与口径有关的参量^[19]。 h_e 与电场 E 的乘积即为感应电压 U ,即

$$U=h_e E. \quad (1)$$

国内外研究对象较多的为天线系数 AF 。根据 IEEE 定义, AF 是天线极化方向上输入电场信号强度与天线感应电压之比。天线系数的量纲单位是

1/m,其定义见式(2)。

$$AF_{\text{电场}}=\left|\frac{E_{\text{入射}}}{U_{\text{接收}}}\right|(1/\text{m}). \quad (2)$$

式(2)中:电场 AF 为电场天线系数;入射 E 为被测电场强度,V/m;接收 U 为天线电压输出幅值,V。

对比等效高度 h_e 和天线系数 AF 可知二者互为倒数的关系,文中借鉴测量天线系数的方法来测量等效高度,从式(1)可知,输入电场强度一定时,传感器输出电压幅值越大,传感器的等效高度越大,其灵敏度也就越高;反之等效高度低则其灵敏度低。文中采用等效高度作为衡量特高频传感器性能优劣的主要指标。

1.2 GTEM 小室模型介绍

GTEM 小室结构见图 1。输入信号端口与内导体相连,其特殊的结构和终端阻抗匹配系统可形成无反射终端,小室尾部的电磁波吸收材料可减少多重的电磁波折反射^[16-20]。

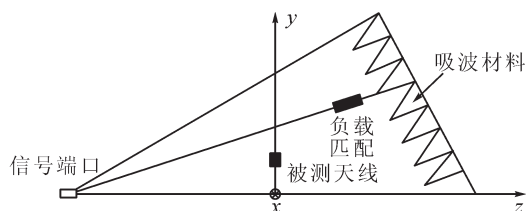


图 1 GTEM 小室原理图

Fig. 1 The schematic diagram of GTEM cell

为了更准确测试传感器等效高度,作用于待检特高频传感器上的已知强度和频率的电场信号应保持稳定,GTEM 小室满足以上测试要求,因为其主要技术特征如下^[21-23]:

1)与普通天线相比,小室激发电场的能力更强,用较小功放便可激发很强的测试电场,信噪比高。

2)注入经放大后的信号,就能在内部某区域形成均匀电场,在该区域放置待测传感器和场强探头,场强探头将检测到的电场信号强度反馈至信号输出控制单元,信号强度反馈控制系统保证了该区域场强的稳定。

3)工作频段覆盖待测传感器有效检测频段,自身结构也避免了外部电磁干扰信号对测试的影响。

2 检测装置和检测方法

2.1 检测设备

用于检测传感器的小室为 6 m 长 GTEM-1500 小室,实物图见图 2。注入信号源能稳定产生频率范围 1~3 000 MHz,场强幅值可调的正弦信号。测试时输出信号频段 300~1 500 MHz,场强在 1~20 V/m

之间。



图2 GTEM小室实物图

Fig. 2 The GTEM cell

试验前对小室进行校准,校准分两部分,首先对小室内场均匀域进行校准,其次对电场强度进行校准。根据待测特高频传感器的接收面积,假设在被测位置上存在一个 $0.6\text{ m} \times 0.6\text{ m}$ 的垂直平面,其上各点场强一致,首先在选定的垂直平面内均匀分出9个点,见图3。

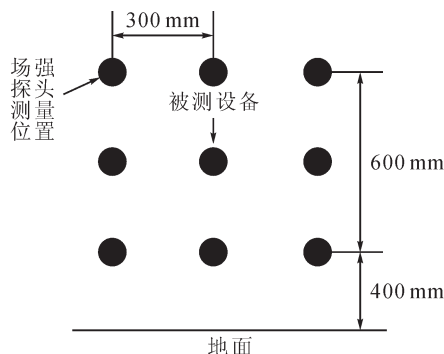


图3 GTEM小室内场强校准位置

Fig. 3 Location of field strength calibration in GTEM cell

利用场强探头依次测量各测试点,型号输出系统会自动根据场强探头接收到的反馈信号调整输出,直至各测试点场强值一致,完成场均匀性校准。

电场强度校准时,以输出 20 V/m 电场为例,允许误差为3%,扫频频率 $300 \sim 1\,500\text{ MHz}$,步长1%。可以得到如表1所示的场强—频率数值,可知输出的电场强度可保证在一定的允许误差范围内。

表1 GTEM小室中部分频率下的场强

Table 1 The electric field intensity under some frequencies in GTEM cell

频率/MHz	300	600	900	1 200	1 500
场强/($\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$)	20.02	20.23	20.49	20.48	20.05

2.2 检测方法

试验时将待测传感器放置在已校准的均匀场强内,传感器的输出端经信号传输线从小室中引出

至示波器(带宽 6 GHz ,采样率 40 Gs/s),试验接线图见图4。

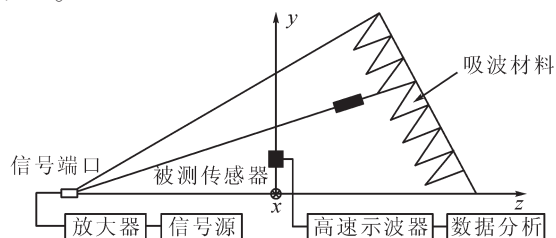


图4 试验连接图

Fig. 4 Test wiring diagram

打开信号源控制软件,设置扫描频率范围、扫频步长、输出场强值,软件读取场强校准文件,便可以控制信号源按预设幅值依次输出,在扫频过程中可选择将频率固定在某频点,也可选择特定的某些频率来输出。输出过程中记录传感器的输出幅值,便可以根据式(1)计算出传感器的等效高度。

3 测试试验

3.1 等效高度的测试

对某传感器进行扫描试验,设置小室输出场强值 20 V/m ,扫描频率 $300 \sim 1\,500\text{ MHz}$ 。按照式(1)计算得到的等效高度曲线见图5。

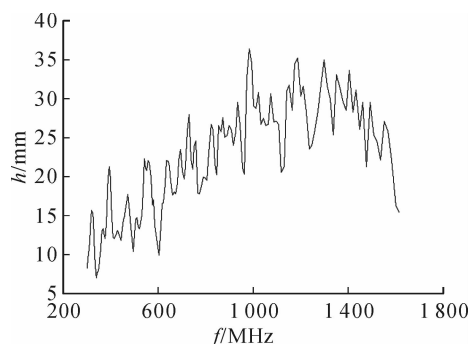


图5 被测 UHF 传感器等效高度

Fig. 5 Equivalent height of UHF sensor under test

从曲线上看,该传感器频率响应特性并不平滑,为了验证结果的合理性,使用型号 E5061B 的安捷伦网络分析仪测试该传感器驻波比,得到的驻波比曲线见图6。

两曲线有很强相关性,为更直观观测将两曲线绘制在同一个坐标系内,见图7。

图7中:曲线1为被测传感器等效高度曲线;曲线2表示被测传感器驻波比曲线,对于驻波比曲线的坐标采用逆序表示,从图7中可以看出,两者变化趋势基本一致。从驻波比的定义上看系统阻抗匹配的越好,驻波比值越小,信号传输损耗也越低。从图7中可知,驻波比小的频点信号响应能力就

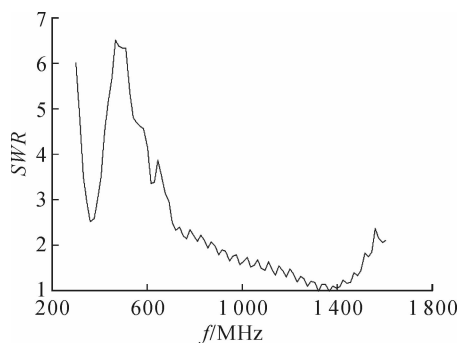


图 6 被测 UHF 传感器的驻波比曲线

Fig. 6 Standing-wave ratio (SWR) of UHF sensor under test

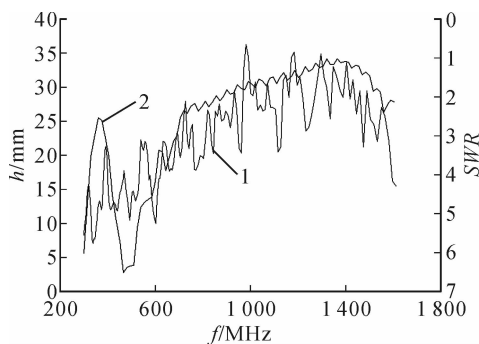


图 7 等效高度和驻波比曲线

Fig. 7 Equivalent height and SWR

强,输出幅值就大,相反驻波比大的频点信号响应能力就弱,输出幅值就小。与传感器驻波比测试对比可知该检测方法与传感器本身固有特性相符合。

在电场均匀区域内改变特高频传感器的位置重新试验,检测结果相差不超过 5%,证明了该测试方法具有较强的可重复性。

3.2 不同场强幅值下的等效高度

降低信号源输出场强,分别设置 1、3、5、8、13、15、20 V/m 将传感器输出幅值曲线绘制在图 8 中。

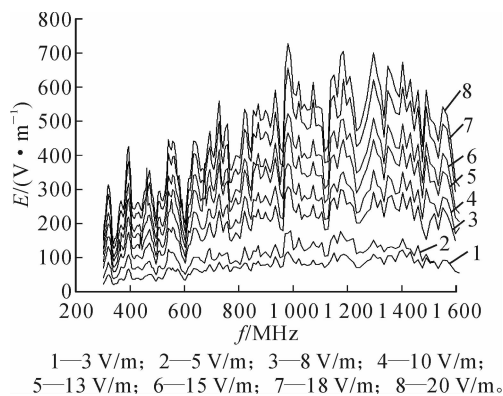


图 8 不同电场强度下的输出幅值

Fig. 8 The output amplitude under different electric field intensity

随着输入信号场强不断增大,输出信号幅值也

不断增强。幅值最低的曲线表示输入信号为 1 V/m 强度信号下的输出幅值,幅值最高的曲线则表示输入 20 V/m 射频信号下的输出幅值。

从图 8 中可以看出,传感器输出值与场强大小成正比,8~20 V/m 之间变化趋势基本一致,说明被测传感器在此范围内检测能力线性度较高。3 V/m 和 5 V/m 条件下的输出幅值明显小于其他曲线,1 V/m 的条件下传感器没有输出,说明传感器的测试灵敏度不低于 1 V/m,且响应能力线性区在 5 V/m 以上。

按照定义换算为等效高度,其频率响应曲线见图 9。

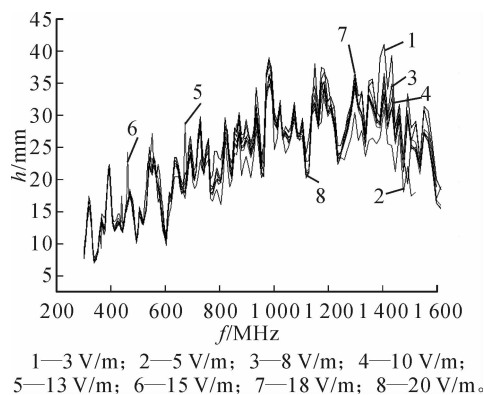


图 9 不同输出电场下的等效高度

Fig. 9 The equivalent height under different electric field intensity output

等效高度曲线基本重合,说明在该场强范围内传感器的响应是呈线性变化的。曲线中在电场强度在 5 V/m 和 3 V/m 时等效高度也较低,说明该传感器响应能力在 5 V/m 以下较弱。

3.3 检测结果重复性验证

作为一种评价特高频传感器的方法,还应保证测试结果一致性和可重复性。为验证测试平台和测试方法的重复性,对与上述被测传感器同一型号但不同批次的另一支传感器进行测试。分别标记 1 号传感器和 2 号传感器,等效高度测试结果见表 2。

表 2 1、2 号传感器部分频率下的测试结果

Table 2 Test results under some frequencies

of No.1 ,No.2 sensor						mm
传感器	频率/MHz					
	300	400	498	602	698	803
1号	8.35	16.60	12.65	10.00	20.75	19.60
2号	7.10	13.80	12.50	8.00	21.60	22.60
传感器	频率/MHz					
	1 000	1 104	1 208	1 308	1 402	1 503
1号	29.15	26.80	31.60	31.70	33.65	25.35
2号	29.10	30.00	31.60	30.00	30.45	21.00

从表2中数据可知,两支传感器检测结果差别较小,1 503 MHz频点下出现最大差值4.35 mm,可能原因是传感器在设计检测频段上限处检测能力分散性较大。

3.4 与其他测试方法对比

脉冲分解法和扫频法均使用GTEM小室作为信号传输的介质,不同之处在于脉冲分解法将被测传感器放置在小室顶部开口的外侧,扫频法则将传感器置于小室内部均匀电场处。另一个不同之处在于脉冲分解法注入GTEM小室的是脉冲信号,通过频域分解得到等效高度曲线,而扫频法注入的信号为场强幅值不变、频率可调的正弦信号,从扫频原理上看扫频法结果更加准确直观。

扫频法和脉冲分解法的对比测试结果见图10。

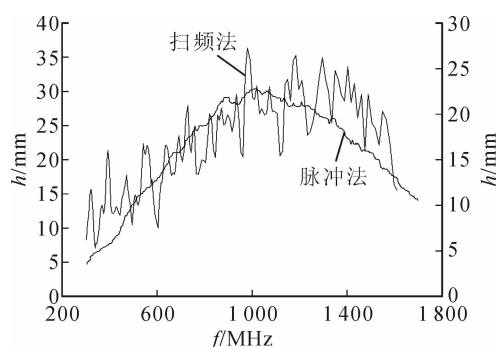


图10 扫频法和脉冲分解法测试结果

Fig. 10 Test results of frequency sweeping method and pulse decomposition method

图10中较平滑的曲线为脉冲分解法等效高度曲线,对应右边纵坐标;较曲折曲线是扫频法等效高度曲线,对应左边纵坐标。对比两条曲线可发现以下特点:

1)两种方法测得的传感器等效高度变化趋势一致,均能在一定程度上反映传感器频率响应特性,如传感器在1 000 MHz附近的响应能力最强,而在500 MHz以下和1 400 MHz以上的响应能力均较弱。

2)等效高度绝对数值不同。扫频法测试结果范围在8~40 mm之间,而脉冲分解法在5~25 mm之间。脉冲分解法测试结果是与标准探针比对得到,而扫频法是直接测试值。绝对数值有差异,但数值归一化处理后两者检测结果保持一致。

3)扫频法能反映出传感器更多的检测能力细节。比如在低频段内400 MHz和540 MHz附近是一个尖峰,如果为了抑制干扰而在检测系统中设置滤除此频段,则传感器检测灵敏度可能会受影响;在1 000~1 400 MHz高频段内传感器的响应能力都

较强,可以充分利用此频段保证传感器的检测能力。利用扫频法得到的传感器频响特性细节特征,可完成兼顾现场抗干扰和检测灵敏度要求的系统检测频带设计。

4 结语

文中提出了一种基于吉赫兹横电磁波室的特高频传感器响应能力扫频校验方法,得到传感器等效高度评价指标,通过与传感器驻波比测试结果与基于脉冲分解法的传感器等效高度测试值比较,证明了该方法的可行性与有效性。不同强度输入信号条件测试结果和多传感器比对测试结果证明了该方法具有良好的一致性。通过选取更多的扫频点可以得到更多传感器响应特征细节,对于特高频传感器的性能评价具有重要的指导意义,可以根据现场对检测频带与抗干扰要求对传感器进行优化设计。

参考文献:

- [1] 赵晓辉,路秀丽,杨景刚,等. 超高频方法在变压器局部放电检测中的应用[J]. 高电压技术,2007,33(8):111-114. ZHAO Xiaohui, LU Xiuli, YANG Jinggang, et al. Application of ultra-high-frequency partial discharge detection in power transformers[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(8):111-114.
- [2] 陈贤熙,王俊波,谭笑,等. 基于宽带脉冲电流法的避雷器局部放电图谱分析及应用[J]. 电瓷避雷器,2014(3):132-137. CHEN Xianxi, WANG Junbo, TAN Xiao, et al. Analysis and application on partial discharge map of the arrester based on wide-band pulse current method[J]. Insulators and Surge Arresters, 2015(3):132-137.
- [3] 欧阳旭东,陈杰华,林睿耀,等. 基于超高频法的电力变压器局部放电检测技术的研究与应用[J]. 变压器,2007,44(2):38-44. OUYANG Xudong, CHEN Jiehua, LIN Ruiyao, et al. Research and application of PD test technology for power transformer based on UHF method[J]. Transformers, 2007, 44(2):38-44.
- [4] 王国利. 油浸式电力变压器局部放电特高频检测技术研究[D]. 西安:西安交通大学,2003. WANG Guoli. Study on ultra-high frequency partial discharge detection technique for oil-immersed power transformers [D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2003.
- [5] 王国利,袁鹏,单平,等. 变压器典型局放模型信号分析[J]. 高电压技术,2002,28(11):28-31. WANG Guoli, YUAN Peng, SHAN Ping, et al. UHF discharge signals of typical PD models in transformers[J]. High Voltage Engineering, 2002, 28(11):28-31.

- [6] 李娟绒,吴经锋,毛辰,等. 安装质量不良导致变压器现场局放试验击穿故障分析[J]. 陕西电力,2007,35(2): 48-50.
LI Juanrong, WU Jingfeng, MAO Chen, et al. Analysis of breakdown fault caused by bad installation quality during partial discharge test of transformer in the field[J]. Shaanxi Electric Power, 2007, 35(2): 48-50.
- [7] 王伟,唐志国,李成榕,等. 用 UHF 法检测电力变压器局部放电的研究[J]. 高电压技术,2003,29(10):32-34.
WANG Wei, TANG Zhiguo, LI Chengrong, et al. Research on PD detection in power transformers using UHF[J]. High Voltage Engineering, 2003, 29(10): 32-34.
- [8] 王颂,李香龙,李军浩,等. 变压器局部放电超高频信号外传播特性的试验研究[J]. 高压电器,2007,43(2): 100-101.
WANG Song, LI Xianglong, LI Junhao, et al. Experimental study for outside propagation characteristic of the UHF signal emitted by partial discharge in transformers[J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(2): 100-101.
- [9] 王国利,郝艳捧,刘味果,等. 电力变压器超高频局部放电测量系统[J]. 高电压技术,2001,27(4):23-25.
WANG Guoli, HAO Yanpeng, LIU Weiguo, et al. Ultra-high-frequency (UHF) PD measuring system for power transformer [J]. High Voltage Engineering, 2001, 27(4): 23-25.
- [10] 李辉,陈江波,张曦,等. 变压器局放用 UHF 传感器的校准方法研究[J]. 高压电器,2014,50(1):7-13.
LI Hui, CHEN Jiangbo, ZHANG Xi, et al. Calibration of UHF sensor for detection of partial discharge in transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(1): 7-13.
- [11] 王国利,吕建玉,郝艳捧,等. 变压器局部放电超高频检测中校正技术的初步研究[J]. 变压器,2004,41(11):29-33.
WANG Guoli, LYU Jianyu, HAO Yanpeng, et al. Research on calibration technique of UHF PD detection in transformer[J]. Transformer, 2004, 41(11): 29-33.
- [12] 王颂,吴晓辉,袁鹏,等. 局部放电超高频检测系统标定方法的研究现状及发展[J]. 高压电器,2007,43(1): 59-61.
WANG Song, WU Xiaohui, YUAN Peng, et al. Current situation and development of calibration for UHF-PD (partial discharge) detection system[J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(1): 59-61.
- [13] HAMPTON B. UHF diagnostics for gas insulated substations [C]//Eleventh International Symposium on High Voltage Engineering. [S.l.]: IET, 1999: 6-16.
- [14] JUDD M D, FARISH O, PEARSON J S, et al. Power transformer monitoring using UHF sensors; Installation and testing [C]//Conference Record of the 2000 IEEE International Symposium on Electrical Insulation. [S.l.]: IEEE, 2000: 373-376.
- [15] JUDD M D, FARISH O, COVENTRY P F. UHF couplers for GIS-sensitivity and specification [C]//Proc. 10th Int. Symp. on High Voltage Engineering. Montreal: [s.n.], 1997: 6.
- [16] 李吉. 基于 GTEM 小室辐射发射测试的若干关键技术研究[D]. 北京:北京邮电大学,2010.
LI Ji. Research on several key technologies on radiated emission test in GTEM cell [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2010.
- [17] 舒志强,吴淑忠. GTEM 小室性能测试方法[J]. 电子质量, 2008(10): 65-67.
SHU Zhiqiang, WU Shuzhong. The testing methods of GTEM cell performance [J]. Electronics Quality, 2008(10): 65-67.
- [18] 刘晓阳,李书芳,邢曙光,等. 在 GTEM 小室中测试 UHF RFID 标签的 Delta RCS [J]. 电子与信息学报,2012,34 (5): 1268-1270.
LIU Xiaoyang, LI Shufang, XING Shuguang, et al. Using GTEM cell to measure Delta RCS of UHF RFID tag [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2012, 34 (5): 1268-1270.
- [19] 陈志雨. 用 GTEM 小室做天线测量 [C]//2009 年全国天线年会论文集. 北京:电子工业出版社,2009: 1339-1342.
CHEN Zhiyu. Antenna measurements using GTEM cell [C]// The Antenna Annual Meeting Proceedings of 2009. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009: 1339-1342.
- [20] 钱振宇. 3C 认证中的电磁兼容测试与对策 [M]. 北京:电子工业出版社,2004.
QIAN Zhenyu. Electromagnetic compatibility test and countermeasures in 3C certification [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004.
- [21] 邢曙光. GTEM 室对 EUT 辐射特性的影响及其新应用的研究 [D]. 北京:北京邮电大学,2012.
XING Shuguang. Research on the impact of GTEM cell on EUT's radiation characteristics and new applications of GTEM cell [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2012.
- [22] NOTHOFFER A, ALEXANDER M J, BOZEC D, et al. A GTEM good practice guide-the use of GTEM cells for EMC measurements applying IEC 61000-4-20 [C]//2004 International Symposium on Electromagnetic Compatibility. [S.l.]: IEEE, 2013: 1-6.
- [23] 荒木庸夫. 电子设备的屏蔽设计 [M]. 赵清,译. 北京:国防工业出版社,1975: 113-145.
YASUO A. Shielding design for electronic equipment [M]. ZHAO Qing, Translate. Beijing: National Defense University Press, 1975: 113-145.

杨 圆(1986—),男,硕士研究生,工程师,从事输变电设备状态检测技术研究。

毕建刚(1977—),男,硕士研究生,高级工程师,从事状态检修策略研究。

吴旭涛(1971—),男,硕士研究生,高级工程师,从事电力设备高压绝缘技术研究。

袁 帅(1980—),男,博士研究生,高级工程师,从事状态检修研究。

黄智伟(1990—),男,硕士研究生,工程师,从事状态检修技术研究。