

一种新型变压器局部放电检测用特高频传感器

在放油阀中安装特高频传感器可有效检测变压器内部局部放电,放油阀的尺寸是限制传感器使用的主要因素,为减小传感器的尺寸,同时获取较高的检测灵敏度和全向的性能,基于单极天线原理和曲流技术设计了一款新型特高频传感器。通过仿真及试验检测,对该传感器的性能进行了系统的研究,并对影响传感器各项性能的因素进行了探讨。实验室搭建的局部放电检测定位平台对传感器阵列的空间定位性能进行了验证。实验结果表明:曲流技术的应用可实现传感器的小型化,研制的传感器在950~2 000 MHz带宽内具有驻波比低、全向且高灵敏度等特点,能满足变压器局部放电检测需要。

叶海峰 王红斌 朱文俊 高雅 吴昊/广东电网公司电力科学研究院



叶海峰/工程师

关键词/Keywords

变压器·
局部放电·
特高频传感器·
曲流·
灵敏度·

局部放电是绝缘劣化的表征,其积累发展会导致高压设备绝缘的击穿。特高频(Ultra High Frequency, UHF)法以其高灵敏度、高可靠性和能够识别并定位放电源等优点,成为近20年来国内外局部放电检测领域的研究重点和热点^[1-3]。

由于变压器箱体对局部放电电磁波的屏蔽效应。国内外一般采用将UHF传感器通过油阀、法兰盘和标准化介质窗伸进变压器内部进行信号检测,优点是检测灵敏度高、抗干扰能力强^[4]。在手孔中安装传感器,需在变压器上开孔,故该方式多用于即将投运的变压器,即在变压器设计、制作过程中设计手孔、预埋传感器;对于运行中的变压器,该方式则难以实施,而通过在变压器的充油(放油)阀中安装传感器,则可以在不改变变压器结构的前提下,实现传感器的安装与维护,是一种比较理想的安

装方式。

文献[5]对比研究了油阀传感器采用直线形、梯形、螺旋形、锥形和圆盘形天线时的局部放电检测灵敏度。结果表明,采用锥形单极子结构时,传感器具有最高的灵敏度和最宽的工作频带。

本文依据变压器局部放电检测对传感器灵敏度的要求及放油阀的结构特点,采用锥形单极作为研制传感器的信号接收单元。

宽带多频点特高频传感器的设计

1. 局部放电检测用特高频传感器的性能要求

传感器是电力设备局部放电UHF信号检测的关键,由于局部放电信号频率成份高达数GHz,且根据缺陷类型的不同,局部放电信号的主要频率成份相差较大,同时由于放电源方位是未知的,故UHF传感器在设计时需要考虑如下几个方面的要求。

(1) 工作频段

传感器的工作频段可通过阻抗带宽来定义,一般将传感器电压驻波比小于2的频率范围定义为其阻抗带宽^[6],也即传感器的工作频段。电力设备局部放电检测用传感器的工作频段应覆盖放电信号能量分布的主要频率范围。

(2) 方向性

方向性描述了天线对能量辐射和接收的空间分布情况^[7]。当仅用于局部放电检测时,通常采用的天线具有明显的方向性,但是当需要对放电源进行定位

时,由于放电源位置的不确定性,要求采用的天线具有全向或近似全向的方向性。

(3) 灵敏度

灵敏度 H_e (Effective Height) 即有效高度是UHF传感器一个重要指标,反映传感器将入射电场转化为电压输出的能力^[8]

$$H_e = \frac{|E_{inc}|}{V_{res}} \quad (1)$$

式中, E_{inc} 为入射电场强度; V_{res} 为传感器感应电动势。

英国国家电网公司对局部放电UHF传感器在500~1 500 MHz的灵敏度作了明确规定,超过80%频率范围的最小有效高度为2 mm,全频率范围的平均有效高度大于6 mm^[9]。

2. 变压器油阀传感器的设计

本文设计的UHF传感器基于锥形单极天线,由金属圆锥、馈电极、金属接地圆盘和50 Ω N型接头组成,结构如图1所示。

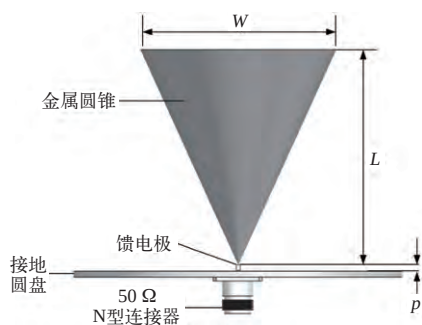


图1 锥形单极天线

锥形单极天线是宽频天线,其下限频率 f_L (对应于天线驻波比VSWR ≤ 2) 可通过下式进行计算^[10-11]

$$f_L = \frac{7.2 \times 10^3}{L+r+p} \quad (2)$$

其中

$$r = W / 4\pi \quad (3)$$

式中, L 为圆锥高度,cm; W 为圆锥底面直径,cm; p 为圆锥顶点到接地圆盘距离,cm。 r 的单位为cm, f_L 单位为MHz。

针对通径为80 mm的放油阀,将天线的尺寸设置为: $W=6$ cm, $L=4$ cm, $p=0.5$ cm。由式(2)计算可得传感器工作频段下限为1 450 MHz,此工作频段相对于变压器中局部放电信号频谱而言显

得较高^[5],为降低传感器工作频点,可通过传感器尺寸增加或小型化技术来实现。

(1) 曲流技术的应用

目前天线研究领域减小天线尺寸的主要是曲流技术,即增加天线中电流从馈电点到辐射区域的路径。实现曲流有添加短接柱(壁)、开槽和弯折等几种方法^[12-13]。对照锥形单极天线模型,本文选用的是添加短接柱的方法。

选择在圆锥体与接地圆盘之间跨接金属短路针,短路针到圆锥中心轴线的距离为 d 。图2为数目 n 为1~4时短路针的典型分布方式,利用HFSS软件仿真分析了短路针分布方式对天线性能影响。



图2 短路针的不同分布方式

如图2所示,短路针沿着圆锥底面外边缘均匀分布,短路针直径为0.4 cm。仿真计算了四种条件下天线的驻波比,并与不含短路针时对比,如图3所示。

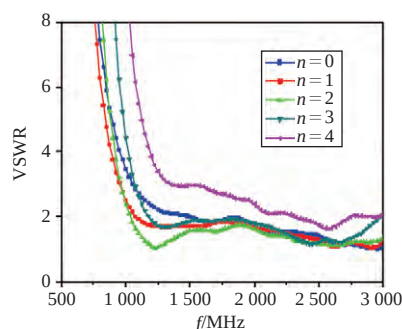


图3 不同短接柱分布时天线驻波比曲线

从图3中可看出,短路针的加载对天线的谐振频率有较大影响。 n 增加时, f_L 先减小后增加;当 n 为2时, f_L 最小,为1 025 MHz,与未加载短路针相比,数值降低了30.3%。因此,本文中短路针的加载选取图2中第二种方式。

改变 d ,使 d 从1.0 cm递增至3.0 cm,步长为0.5 cm。仿真计算的天线的驻波比曲线如图4所示。

从图4中可看出,随着 d 的增加,驻波比曲线有“向下移动”趋势。当 d 为2.5 cm和3.0 cm时,天线有较宽的阻抗带宽(对应于VSWR小于2), $d=$

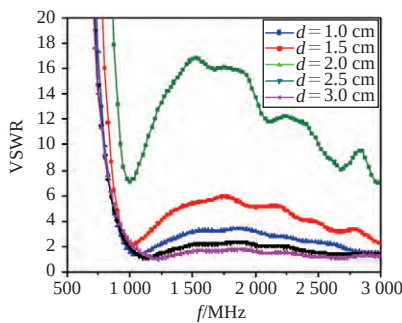


图4 d改变时天线驻波比曲线

2.5 cm时对应的 f_L 略小于 $d=3.0$ cm时, 综合考虑天线的阻抗带宽和各频率点的谐振深度, 将 d 设置为3.0 cm。

综合以上分析, 最终选择在圆锥底面边缘和接地圆盘之间对称跨接两根短路针, 改进后的天线如图5所示。

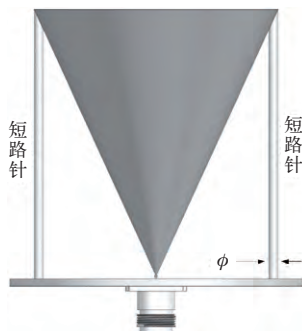


图5 加载两根短路针的锥形单极天线

(2) 密封方式对传感器性能的影响

传感器安装于变压器油阀中时, 信号接收单元将不可避免地浸在绝缘油中。为防止绝缘油经传感器泄漏及避免安装过程中天线因磕碰而受损, 必须对天线采取密封和保护措施, 即将天线埋藏于耐油的介质圆柱体中。下面对天线的密封进行仿真研究。

1) 密封方式对天线性能的影响。图6为两种较为常见的天线密封方式: 图6a为使用厚度为 δ 的绝缘外壳对天线进行包裹; 图6b为使用绝缘材料对天线进行整体浇注。

为研究密封方式对天线性能的影响, 建立图6两种天线的模型。仿真中密封材料的相对介电常数 ϵ_r 为3.0, δ 为2 mm, 两种模型的外径相等。仿真计算两天线模型的驻波比, 并与不密封时对比,

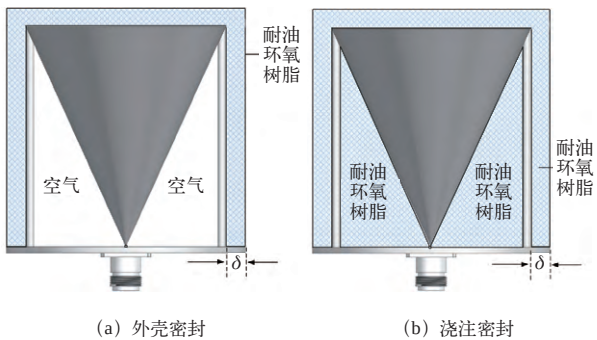


图6 天线的两种密封方式

如图7所示。

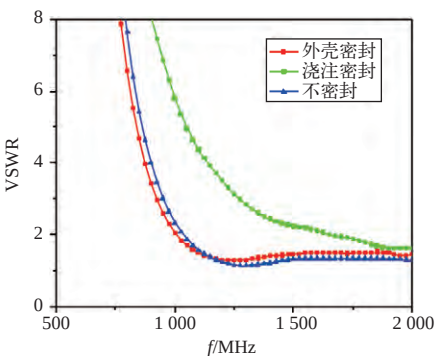


图7 不同密封方式的天线驻波比曲线

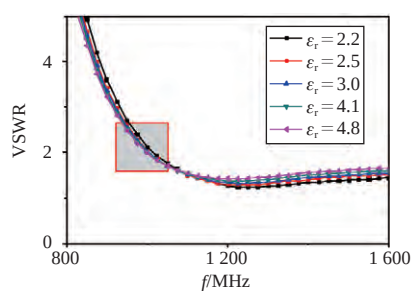
由图7可见, 密封方式对天线阻抗特性有一定影响。其中, 外壳密封对天线性能影响较小, 与不密封相比, f_L 下降了约50 MHz。而采用浇注密封时, 天线 f_L 上升至1 650 MHz, 天线阻抗特性有明显劣化。故本文采取外壳密封方式。

2) 密封材料对天线性能影响。为研究密封材料对天线性能的影响, 选用如表1所示的材料对天线进行密封, 并仿真计算相应的天线驻波比曲线, 如图8所示。

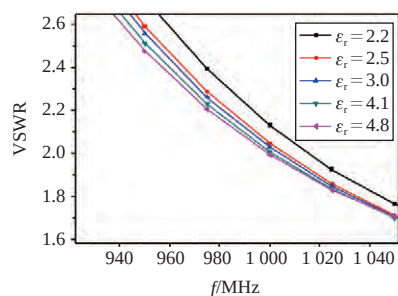
表1 密封材料

序号	材料名称	相对介电常数 ϵ_r
1	Polyethylene	2.2
2	Neltec NY9250	2.5
3	Taconic RF-30	3.0
4	Arlon AD410	4.1
5	Bakelite	4.8

从图8可看出, 改变密封材料的 ϵ_r 对天线阻抗特性有一定影响: 当 ϵ_r 增加时, 天线 f_L 减小, 高频部分的驻波比数值变大。但当 ϵ_r 从2.2变化到4.8,



(a) 驻波比曲线



(b) 驻波比曲线局部放大图

图8 不同密封材料时天线驻波比曲线

天线阻抗特性的改变相对有限。综合考虑密封材料 ϵ_r 的影响及材料结构特性,选择耐绝缘油,硬度高的Polyethylene材料对天线进行密封。

图9为将密封材料设为Polyethylene,且改变其厚度 δ 时,仿真计算的天线驻波比曲线。

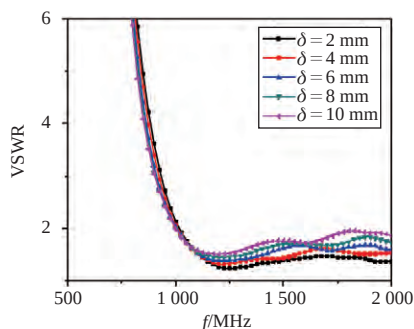


图9 密封材料厚度不同时天线驻波比曲线

从图9可知, δ 变化时,天线驻波比曲线有所变化。当 δ 从2 mm增至10 mm, f_L 略有减小。故为了增大天线工作带宽, δ 理应减小,但考虑到传感器在安装过程中,可能会受到磕碰、跌落等物理作用,较厚的密封材料能对天线起到较好保护,因此综合传感器性能及其使用方式,并结合放油阀尺寸,将 δ 设为5 mm。

基于以上的分析,本文设计的传感器在单极天线底部边缘增加了两个对称的短路针,并通过

仿真优化,将传感器最终尺寸定为: $W=6$ cm, $L=4$ cm, $p=0.5$ cm, $\delta=0.5$ cm, $d=3.0$ cm, $\phi=0.3$ cm。

(3) 传感器性能分析

根据变压器放油阀的结构和传感器的安装特点,除传感单元外,为传感器设计了安装法兰、金属导杆和排气螺丝,50 Ω N型连接器和手柄等部件,组装完成的传感器如图10所示。

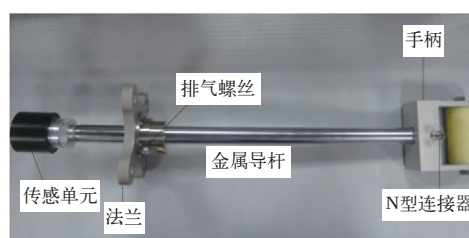


图10 变压器油阀式UHF传感器

图11为传感器的驻波比曲线,其中虚线为HFSS仿真值,实线为网络分析仪测量值。

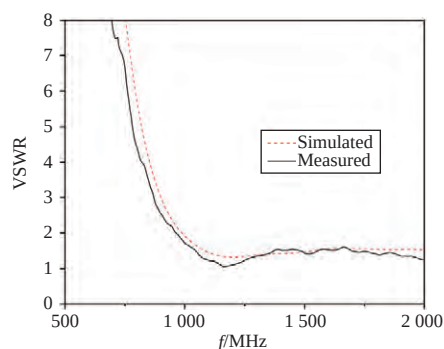


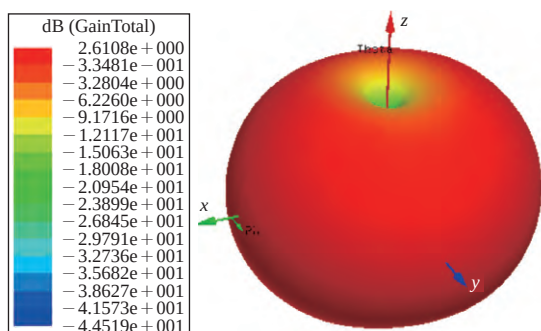
图11 驻波比曲线

从图11中可以看出,传感器驻波比的实测和仿真结果基本一致。实测结果表明:传感器在950~2 000 MHz频段内驻波比小于2;在870~2 000 MHz频段内驻波比小于3,因此传感器具有较宽的工作频段。

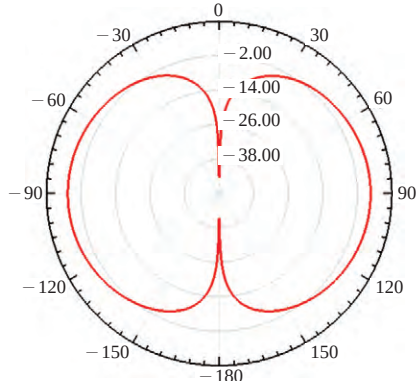
图12为传感器在950 MHz时方向图,其中图12a为3D方向图;图12b为xOz平面(E面)上的方向图;图12c为xOy平面(H面)上的方向图。

从图12可看出,传感器在E面以及H面上具有近似全向的方向特性,因此能检测变压器内部来自各个方向的局部放电电磁波信号。

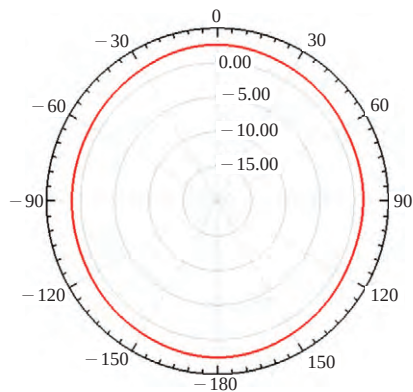
图13为传感器的灵敏度曲线,从图13中可以看出,在500~2 000 MHz频率范围内传感器的 H_{10}



(a) 3D



(b) xOz平面



(c) xOy平面

图12 传感器在950 MHz的方向图

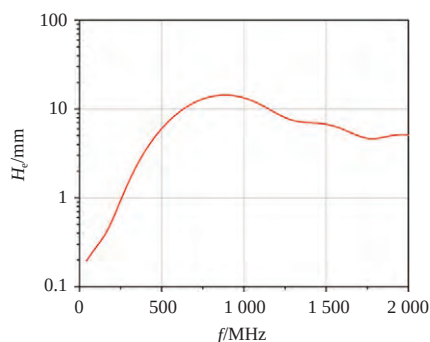


图13 灵敏度曲线

平均值为10.21 mm，超过80%的频率范围 H_e 大于2 mm，满足英国国家电网公司对UHF传感器灵敏度的规定。

实际应用中，传感器的安装不能影响变压器的正常运行。因此，除了需满足电气安全方面的要求外，传感器还应满足密封性要求。

图14为传感器在实验室油浸式变压器（型号：S11-100kV·A/35kV/0.4kV）上安装的效果图。为了检验传感器的密封性能，在实验室进行了密封性实验：将传感器安装在变压器上，往变压器中注入绝缘油至油面浸过传感器，观察0.5 h，未发现漏油后，将变压器油箱注满并静置720 h。整个实验中未发现有漏油现象，这说明研制的传感器具有较好的密封性能，可长期在变压器上安装运行。



图14 传感器安装图

实验室局部放电实验

为验证传感器检测局部放电信号的能力，搭建如图15所示的局部放电实验系统，系统主要由无局部放电高压试验电源，局部放电缺陷模型，JFD-2010型数字式局部放电检测仪和高速数字示波器等组成。

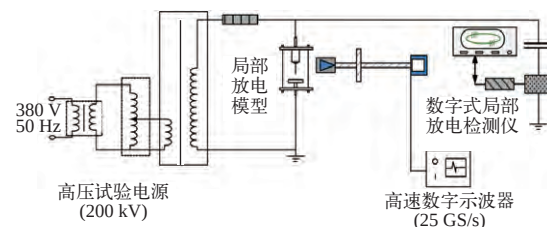


图15 实验室局部放电实验系统

如图16所示，实验中模拟了变压器中三种典型局部放电缺陷。其中，电晕放电模型：钢针直

径0.1 mm，针尖距离接地金属圆盘为5 mm；自由金属微粒放电模型：该模型在高低压圆盘中间放置一个直径2 mm的铜珠；沿面放电模型：圆形环氧树脂块直径为30 mm，高度40 mm。三种缺陷模型均浸在变压器绝缘油中。

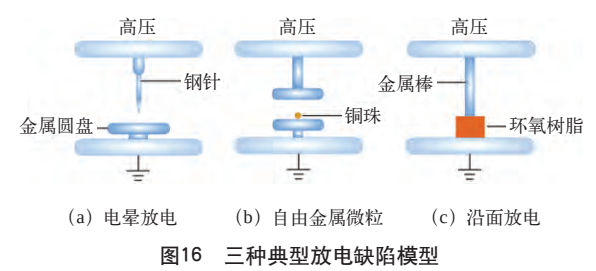


图16 三种典型放电缺陷模型

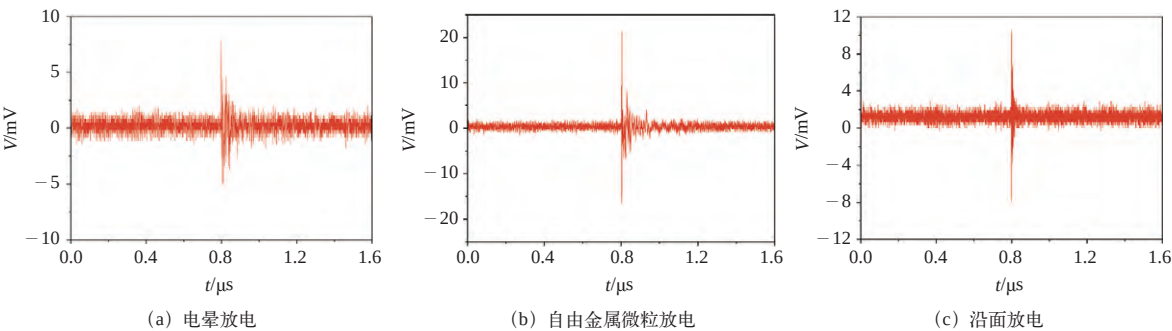


图17 实验室背景噪声

图18为本文设计的UHF传感器检测到的三种局部放电脉冲的时域波形，其中，图18a为电晕放电；图18b为自由金属微粒放电；图18c为沿面放电。

三种局部放电缺陷实验的起始放电电压和放电电量如表2所示。

图18 三种缺陷局部放电UHF时域波形

表2 三种放电实验的起始电压和放电电量

放电类型	绝缘介质	起始放电电压 /kV	信号峰峰值 /mV	放电电量 /pC
电晕放电	绝缘油	0.67	12.8	34
自由金属微粒	绝缘油	12.5	37.7	19
沿面放电	绝缘油	11.0	18.6	11

由表2可得，三种缺陷对应的放电电量分别为34 pC、19 pC和11 pC，UHF传感器检测的信噪比分别为3.6、10.7和5.3，传感器的最小可测放电电量可达到3.5 pC，说明设计的传感器对这三种典型的油中绝缘缺陷有良好的响应特性和较高的检测灵敏度，可以满足实际检测的需要。

结束语

基于锥形单极天线研制了一款油阀内置传感器。利用短路加载技术对传感器进行了小型化处理，改进后传感器尺寸缩小了34.5%。最终研制的

传感器具有以下特点：①工作频段宽，为950～2 000 MHz；②近似全向的方向性；③灵敏度高，500～1 500 MHz范围内的平均值为10.21 mm；④密封性能好。

实验室局部放电实验表明该传感器达到了变压器局部放电检测的实际要求。

参考文献

[1] Tenbohlen S, Denissov D, Hoek S M, et al. Partial discharge measurement in the ultra high frequency (UHF) range [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15 (6) : 1544-1552.

[2] 钱勇, 黄成军, 江秀臣, 等. 基于超高频法的GIS局部放电在线监测研究现状及展望 [J]. 电网技术, 2005, 29 (1) : 40-43, 55.

[3] 陈庆国, 蒲金雨, 丁继媛, 等. 电力电缆局部放

- 电的高频与特高频联合检测 [J]. 电机与控制学报, 2013, 17 (4): 39-44.
- [4] Agoris P, Meijer S, Smit J J. Sensitivity check of an internal VHF/UHF sensor for transformer partial discharge measurements [C]. Power Tech, 2007 IEEE Lausanne; 2007.
- [5] 赵振兴. 电力变压器局部放电蝶阀式特高频传感器的研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2008.
- [6] 宋铮, 张建华, 黄治. 天线与电波传播 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2011.
- [7] 钟时顺. 天线理论与技术 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2011.
- [8] 叶海峰, 钱勇, 王江, 等. 用于变电站放电源空间定位的特高频传感器研究 [J]. 电力系统保护与控制, 41 (19): 54-60.
- [9] The National Grid Company plc. TGN (T) 121-1—1997 Capacitive couplers for UHF partial discharge monitoring [S]. London: The National Grid Company, 1997.
- [10] Valderas D, Sancho J I, Puente D, et al. Ultrawideband antennas: design and applications [M]. London: Imperial College Press, 2011.
- [11] Soheil S, Dastran A A, Mahzoon M, et al. Design and optimization of a cone shaped monopole antenna [J]. Journal of Basic and Applied Scientific Research, 2013, 3 (2): 375-380.
- [12] Mok W C, Chair R, Luk K M, et al. Wideband quarter-wave patch antenna with shorting pin [J]. IEE Proceedings-Microwaves, Antennas and Propagation, 2003, 150 (1): 56-60.
- [13] Rebekka Porath. Theory of miniaturized shorting-post microstrip antennas [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2000, 48 (1): 41-47.

(收稿日期: 2014-09-17) EA

信息动态

伊顿持续捐赠“联合之路”中国教育项目 关注弱势儿童教育与成长

全球领先的动力管理公司伊顿近日向“上海市慈善基金会—联合之路专项基金”捐赠10万元人民币,以推动萌芽计划暨“关爱进城务工者子女学龄前教育项目”的绘本阅读项目,支持民工子女幼儿园添置绘本、建立阅读角,并组织相关教师培训。

活动当天,伊顿员工志愿者再次来到其“萌芽计划”结对的民工子女幼儿园,通过绘本阅读及涂色游戏,为近40名孩子普及爱牙护牙知识,帮助孩子们在游戏中养成正确的生活习惯。“萌芽计划”是联合之路与上海市慈善基金会在2014年发起的教育项目,旨在提升3万名进城务工人员学龄前子女的学前教育质量。伊顿是首批捐赠并支持该项活动展开的企业之一。

伊顿中国区总裁周涛表示:“伊顿参与公益活动不仅是以公司捐赠的形式,员工志愿者对公益事业的支持和参与也是我们实施企业社会责任的核心要素。孩子是社会的未来与希望,伊顿一直将弱势儿童的教育保障作为专注的公益事业,通过形式多样的公益活动支持弱势儿童的教育与成长项目。”

育与成长项目。”

从2006年至今,伊顿慈善基金持续向“上师大—伊顿联合支持中西部教育项目”捐赠善款及实物,用于支持上师大师生赴贫困地区参加中短期支教项目,资助中西部地区中小学教师的培训进修,对前往中西部地区从事中小学教学工作的师大毕业生提供生活补助以及西部地区学生奖学金资助等,帮助中西部地区改善办学条件,提升教育水平。2015年,伊顿继续捐助18.7万元用于该项目。

“为中国而教项目”是伊顿参与的另一个支持贫困地区支教活动及青年教育人才培养项目,2015年伊顿向该项目捐赠9.3万元。“为中国而教项目”成立于2008年,隶属于联合国教科文组织国际农村教育研究与培训中心,项目输送优秀大学毕业生到农村学校或城市打工子弟学校任教两年,实践创新的教育方法,帮助改善农村儿童的教育状况,并为青年支教老师提供持续而系统的培训,培养和集结关心教育的优秀人才,以此促进中国社会的进步。