

基于曲流技术的超宽带单极子局部放电检测天线设计

张 安¹, 许万涛¹, 邢东方², 张作钦¹, 辛东立², 高国强²

(1. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 山东 青岛 266111;

2. 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 611756)

摘要: 电气设备局部放电是衡量电气设备绝缘性能的重要指标, 电气设备发生局部放电过程中会产生超高频 (UHF) 电磁波信号 (频率范围 0.3 ~ 3 GHz), 而该 UHF 信号能量集中于 0.5 ~ 1.5 GHz 频段。为检测该信号, 受到通信上 UWB 天线广泛使用的单极子贴片天线启发, 研发了超宽带单极子贴片天线。该天线主要使用了曲流技术, 从而获得了超宽带特性。使用 HFSS 软件对天线的几何形状参数进行优化仿真。仿真结果表明: 该单极子贴片天线的回波损耗 $S_{11} < -10$ dB 的频带范围为 0.5 ~ 1.57 GHz, 在频带内具有良好的方向性; 天线具有良好的增益, 在 0.5 ~ 1.57 GHz 范围内的增益能够达到 1.5 ~ 2 dB; 天线的制作工艺简单, 空间占用小, 不需要使用额外的阻抗变换器进行阻抗匹配。搭建了模拟电气设备局部放电国产的实验平台, 对天线的实际使用效果进行测试, 结果表明天线能够有效检测到电气设备局部放电伴随产生的超高频信号。

关键词: 单极子贴片天线; 超高频; 超宽带; 曲流技术; 微带馈电; 局部放电检测

Design of ultra wideband monopole partial discharge detection antenna based on meander technology

ZHANG An¹, XU Wantao¹, XING Dongfang², ZHANG Zuoqin¹, XIN Dongli², GAO Guoqiang²

(1. CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd., Qingdao 266111, China;

2. College of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China)

Abstract: Partial discharge of electrical equipment is an important index to measure the insulation performance of electrical equipment. During partial discharge of electrical equipment, ultra-high frequency (UHF) electromagnetic wave signals (frequency range 0.3~3 GHz) will be generated, and the frequency band of UHF signal energy concentration is concentrated in 0.5~1.5 GHz. In order to detect the signal, a new type of ultra-broadband monopole patch antenna is designed, inspired by the UWB antenna in communication engineering. The antenna uses meandering technology to obtain the wide band. HFSS software is used to simulate and optimize the antenna. The simulation results show that: the return loss of the monopole patch antenna $S_{11} < -10$ dB has a frequency band range of 0.5~1.57 GHz, and has good directivity within the frequency band. The antenna has a good gain in the range of 0.5~1.57 GHz, which can reach 1.5~2 dB. The antenna is simple to manufacture and occupies little space, so it does not need to use additional impedance converter for impedance matching. An experimental platform is built to simulate partial discharge of electrical equipment. The results show that the antenna can effectively detect uhf signals generated by partial discharge of electrical equipment.

Key words: monopole patch antenna; UHF; ultra wide band; meandering technology; microstrip feeding; partial discharge detection

国家自然科学基金项目 (51907167)

0 引言

局部放电由于放电能量较小，在其起始阶段不会对设备绝缘性能造成致命影响，但是长时间局部放电将导致其周围材料发生老化和放电现象，最终导致绝缘失效。

局部放电往往伴随有电脉冲产生、介损变化和电磁波产生，也有非电现象产生，即光、热、噪声和化学变化。这些现象可以用于检测局部放电，因此检测方法可分为电和非电两类。检测局部放电的方法有很多，如脉冲电流法、超声波法和超高频法等^[1-2]。

脉冲电流法容易受到运行环境的影响，多用于非在线检测。超声波信号在复合电介质中衰减严重，因此采集的声信号微弱，灵敏度较低。电气设备发生局部放电过程中会产生超高频（UHF）电磁波信号（频率范围0.3~3 GHz），而该UHF信号能量集中的频段为0.5~1.5 GHz。超高频法具有较高的灵敏度，且检测过程中可能会产生的电磁干扰信号频率都在400 MHz以下，因此超高频法具有良好的抗干扰能力。

使用超高频法检测局部放电信号的关键在于接收电磁波信号，而电磁波信号则需要研制出合适的天线。相关研究者设计了一种盘锥天线，天线带宽范围0.24~2 GHz，但天线体积较大，且天线工作范围内存在噪声干扰。西安交通大学王小华教授团队研发了一种等角螺旋天线^[2]，天线带宽范围0.56~3 GHz，但该天线需要设计渐变线阻抗变换器进行阻抗匹配。重庆大学姚陈果教授团队设计了一种共面波导馈电的分型天线^[3]，带宽范围0.4~1 GHz，天线在工作频率内方向性和增益特性较好，但是天线工作频率范围未能覆盖1~1.5 GHz。

受到通信中为实现超宽带而广泛采用的单极子贴片天线的启发^[4-5]，本文设计了一种平面单极子贴片天线。为了实现天线超宽带的特性，采用曲流技术对单极子贴片天线进行结构优化。为了快速、便捷地实现阻抗匹配选用微带线对天线

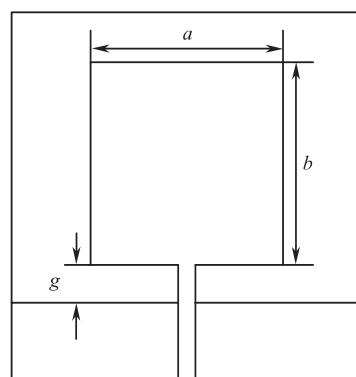
馈电，使用仿真HFSS对天线设计参数进行仿真和优化，使得天线工作带宽达到了0.5~1.57 GHz，所设计制作的天线可成功检测到电气设备局部放电所产生的超高频电磁波。

1 天线设计原理

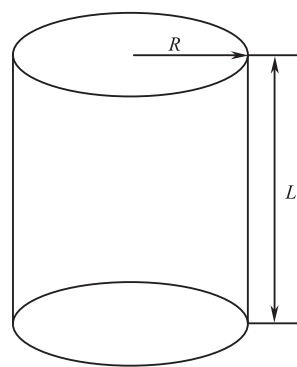
1.1 单极子贴片天线

单极子贴片天线是在薄介质基片上，以底面覆铜作为地板，顶部采用蚀刻等方式做出一定形状结构的金属贴片，用以接收空间中传播的电磁信号，通过同轴探针、微带或共面波导进行馈电^[6]。

可将平面单极子贴片天线等效为相同高度 L 的圆柱结构进行估算^[7]，天线贴片规格如图1所示。



(a) 天线原型



(b) 圆柱结构

图1 天线原型及圆柱结构

Fig. 1 Antenna prototype and cylindrical structure

天线贴片的规格参数直接决定天线的谐振频率^[8]。将圆柱结构沿其母线剪开后再展开，从

该圆柱结构得到的矩形即为所估算的矩形辐射贴片。

$$2\pi RL = ab \quad (1)$$

单极子天线输入阻抗为 $36.5 + j21.25 \Omega$ 。输入阻抗的实部可略小于 $1/4$ 波长单极子长度，有

$$L = 0.24\lambda F \quad (2)$$

其中

$$F = L / (L + R) \quad (3)$$

由此可得

$$\lambda = (L + R) / 0.24 \quad (4)$$

天线的最低频率 f_L 为

$$f_L = c / \lambda = 72 / (L + R) \quad (5)$$

考虑间隙 g 的影响，将式(5)修正为

$$f_L = c / \lambda = 72 / (L + R + g) \quad (6)$$

考虑基板对天线谐振频率的影响，对式

(6) 进行修正，即

$$f_L = c / \lambda = \frac{72}{(L + R + g)\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}} \quad (7)$$

式中， ϵ_{eff} 为等效介电常数。

设基板的相对介电常数为 ϵ_r ，可粗略估算为

$$\epsilon_{\text{eff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} \quad (8)$$

根据上述理论可粗略估算出单极子贴片天线初始尺寸，在后续设计优化过程中，可在估算出单极子贴片天线初始尺寸基础上使用相关技术对天线进行优化，以获得所需天线性能。

1.2 微带馈电

传输线阻抗的计算和选取是高频电路设计过程中必不可少的一环，微带线是最受欢迎的传输线形式，给定微带线线宽 w ，微带线厚度 t ，基板厚度 h ，PCB 板材的相对介电常数 ϵ_r ，便可以快速地计算出微带线的特征阻抗 50Ω ，微带线结构示意图如图2所示。

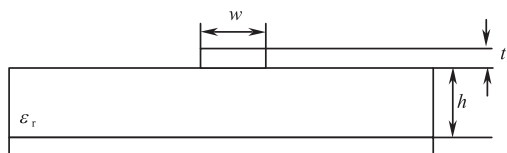


图2 微带线结构

Fig. 2 Microstrip structure

微带线特征阻抗可用下式计算

$$Z_0 = \frac{120\pi}{2\sqrt{2}\pi\sqrt{\epsilon_r}+1} \ln \left\{ 1 + \frac{4h}{w'} \left[\frac{14+8/\epsilon_r}{11} \times \frac{4h}{w'} + \sqrt{\left(\frac{14+8/\epsilon_r}{11} \right)^2 \left(\frac{4h}{w'} \right)^2 + \frac{1+1/\epsilon_r}{2} \pi^2} \right] \right\} \quad (9)$$

$$w' = w + \Delta w' \quad (10)$$

$$\Delta w' = \Delta w \left(\frac{1+1/\epsilon_r}{2} \right) \quad (11)$$

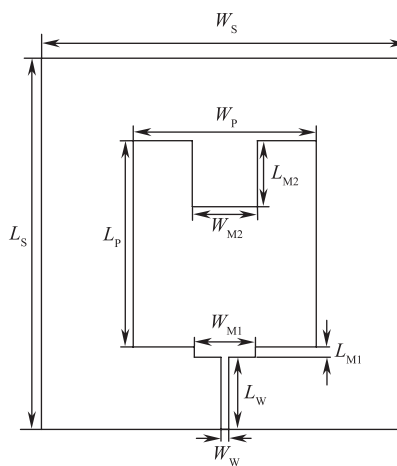
$$\frac{\Delta w}{t} = \frac{1}{\pi} \ln \left\{ 4e / \left[(t/h)^2 + \left(\frac{1/\pi}{w/t+1.1} \right)^2 \right] \right\} \quad (12)$$

将所需要的阻抗 50Ω 铜厚 $t = 0.017 \text{ mm}$ 代入式中，以及相应的基板厚度和相对介电常数代入式中，即可计算出微带线宽度，可实现良好的阻抗匹配。

2 天线设计

2.1 基于曲流技术的单极子贴片天线

普通的单极子贴片天线的相对带宽往往达到40%左右，其工作频率无法覆盖局部放电检测所需要的 $0.5 \sim 1.5 \text{ GHz}$ 范围，需要对单极子贴片天线进行优化，使其相对带宽达到100%，工作频率范围覆盖 $0.5 \sim 1.5 \text{ GHz}$ 。本文利用曲流技术，采用 Ansoft HFSS 软件进行仿真优化，对单极子贴片天线的贴片进行开槽并添加阶梯状结构，构建了的单极子贴片天线如图3所示。



(a) 天线正面

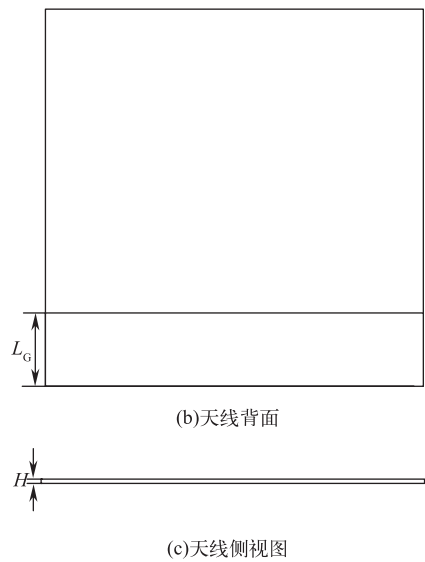


图3 基于曲流技术的单极子贴片天线示意图
Fig. 3 Schematic diagram of monopole patch antenna based on meandering technique

单极子贴片天线各参数如表1所示。本文设计的天线选用FR4基板，基板介电常数 $\epsilon_r=4.4$ ，介质损耗角正切 $\tan\delta=0.030$ ，其中地板宽度与基板宽度一致，微带线设计阻抗为 $50\ \Omega$ 。

表 基于曲流技术的单极子贴片天线参数
Tab. Parameters of the monopole patch antenna based on meandering technology
(单位: mm)

参数	数值
基板长度 L_S	241.2
基板宽度 W_S	241.2
贴片长度 L_P	134
贴片宽度 W_P	120.6
微带线长度 L_W	53.6
微带线宽度 W_W	5.1
地板长度 L_G	46.9
基板厚度 H	2.7
阶梯状结构长度 L_{M1}	6.7
阶梯状结构宽度 W_{M1}	40.2
矩形槽长度 L_{M2}	42.9
矩形槽宽度 W_{M2}	42.9

2.2 天线的性能参数

采用HFSS软件对以上参数和结构的天线进

行仿真分析，得到频率与回波损耗关系如图4所示。从图4中曲线可以看出，天线 $S_{11}<-10\text{ dB}$ 的频率范围为 $0.5\sim1.57\text{ GHz}$ ，天线绝对带宽已经达到 1 GHz 以上，相对带宽达到 100% 以上。天线的工作频率范围已经覆盖UHF信号能量集中的频段 $0.5\sim1.5\text{ GHz}$ 。图5a~f分别为天线在 0.5 GHz 、 0.7 GHz 、 0.9 GHz 、 1.1 GHz 、 1.3 GHz 和 1.5 GHz 的增益方向图，从方向图可知天线具有良好的辐射特性和增益特性，增益最高可达 2 dB ，但是随着频率的升高，天线辐射特性有所降低，其原因可能是随着频率的升高，更高次的电磁波模会被激发，从而造成了方向图的畸变。

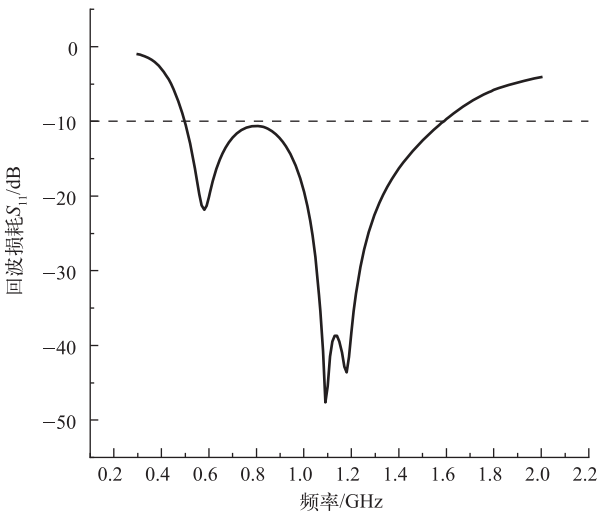
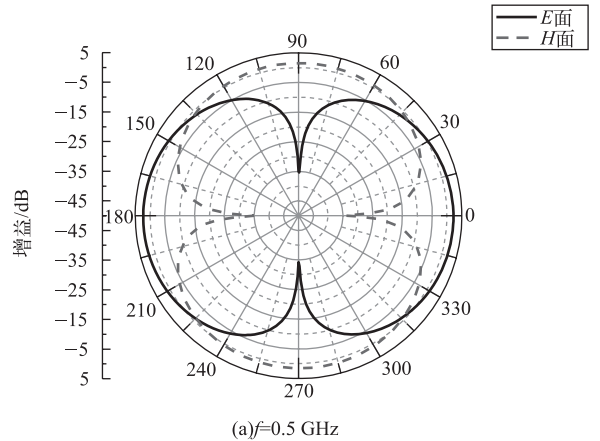
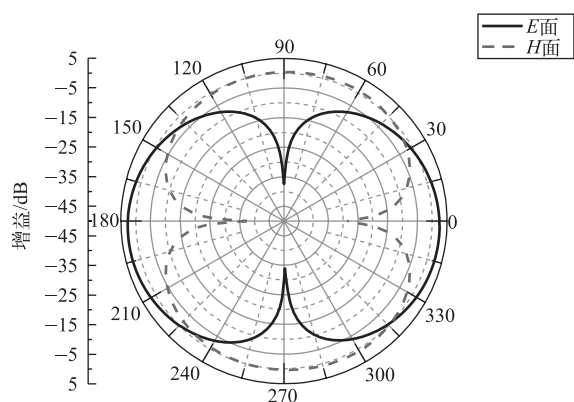
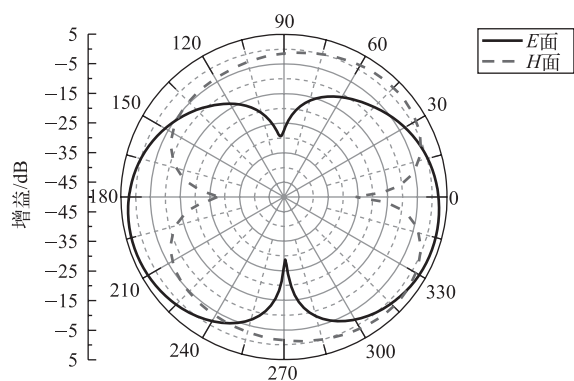


图4 天线回波损耗
Fig. 4 The return loss of the antenna

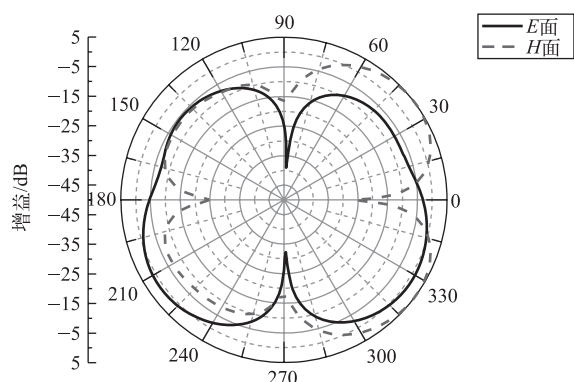




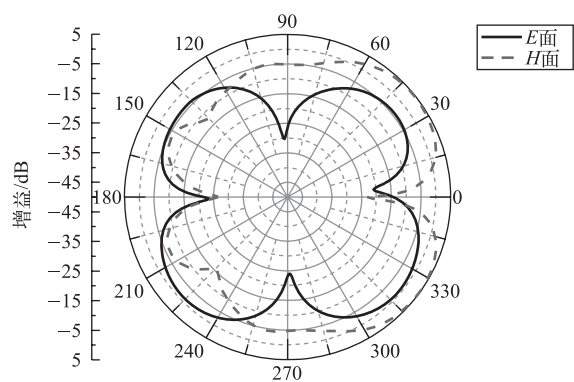
(b) $f=0.7$ GHz



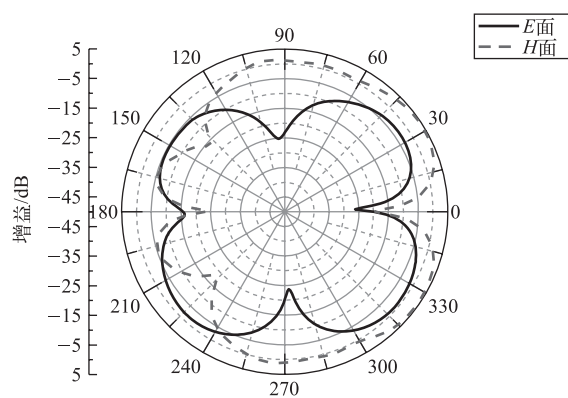
(c) $f=0.9$ GHz



(d) $f=1.1$ GHz



(e) $f=1.3$ GHz



(f) $f=1.5$ GHz

图5 天线在XZ、YZ平面上的方向图

Fig. 5 The direction diagram of the antenna in the XZ and YZ plane

3 模拟局部放电测试

为验证天线检测的有效性, 本文根据仿真模型制作天线如图6所示, 并搭建了局部放电测试平台, 如图7所示。

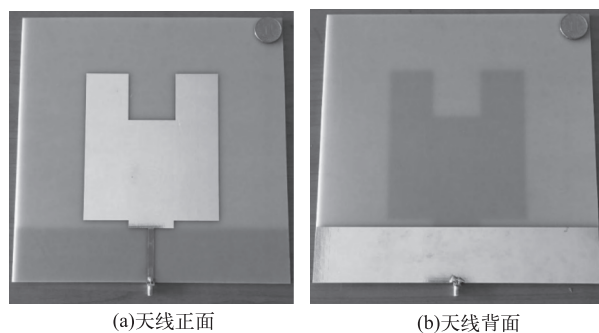


图6 天线实物图

Fig. 6 Photo of the antenna

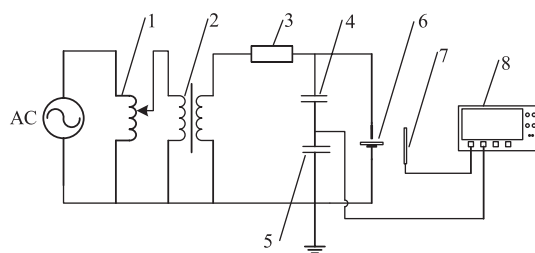


图7 局部放电测试平台

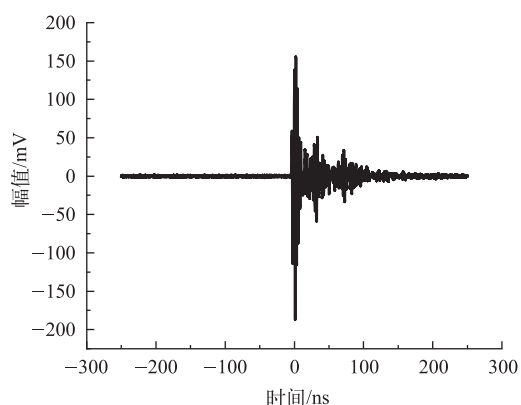
Fig. 7 Testing platform

1—调压器 2—变压器 3—保护电阻 4—分压电容1
5—分压电容2 6—局部放电试样 7—天线 8—高频示波器

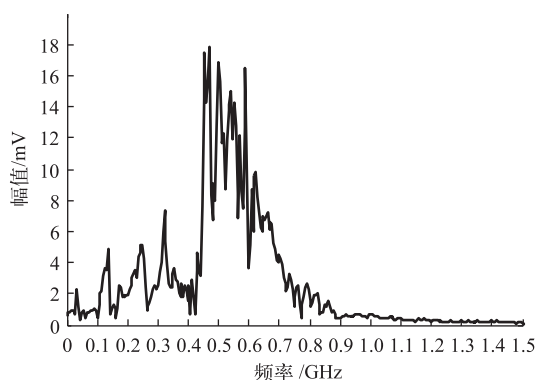
通过针-板放电模型产生局部放电, 交流

电源为AC 380 V，放电模型上施加的电压为10 kV，采用的示波器型号为Lecroy WavePro 404HD，该型示波器带宽为4 GHz，最大采样率为20 GS/s，垂直本底噪声不超过1 mV。

图8a为测试所得电磁波波形，图8b为测试型号相应傅里叶分析频谱。从该实验结果可以看出，天线所测到的信号幅值可达150 mV，信噪比良好，可有效地区分放电信号与噪声干扰。此外，天线在所设计的工作频带内具有良好的响应。



(a)局部放电信号时域波形



(b)局部放电信号频域波形

图8 局部放电实验测试结果

Fig. 8 Results of the PD test

4 结束语

本文从实际应用出发，受到通信中实现天线UWB特性常用的单极子贴片天线启发，采用曲流技术，设计了一种可以用于局部放电检测的超宽带单极子贴片天线。天线 $S_{11} < -10$ dB的频率范围为0.5~1.57 GHz，天线绝对带宽已经达到

1 GHz以上，相对带宽达到100%以上。天线在工作频率范围内具有良好的方向性，最高增益可达2 dB。天线尺寸为241.2 mm×241.2 mm×2.7 mm。天线易于实现阻抗匹配，无须额外的阻抗匹配装置，且制作工艺简单。

本文搭建了局部放电实验平台，采用高性能的高频示波器对天线性能进行验证，实验结果表明，本文所研制的天线在无外加放大器情况下能够接收幅值达150 mV的超高频信号，天线具有较高的信噪比，在所设计的工作频带内具有良好的响应。本文设计的天线在电气设备局部放电检测中具有一定的应用前景。

参考文献

- [1] 吴思扬. GIS沿面放电模型和外置UHF传感器的研制[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015: 37-40.
- [2] 李天辉, 荣命哲, 王小华, 等. GIS内置式局部放电特高频传感器的设计、优化及测试研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(18): 5483-5493, 5548.
- [3] 姚陈果, 乔盼盼, 陈攀, 等. 用于电气设备局部放电超高频信号监测的0.4~1 GHz分形天线[J]. 高电压技术, 2014, 40(8): 2285-2291.
- [4] 晏峰, 姜兴, 黄朝晖. 共面波导馈电的带阻UWB天线设计[J]. 电子器件, 2011, 34(3): 255-257.
- [5] 杨子贤. 无线通信系统中小型化MIMO天线的研究与设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
- [6] 钟顺时. 微带天线理论与应用[M]. 1版. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1991.
- [7] 瞿荣, 张弘, 何培宇, 等. 一种新型超宽带平面单极子天线的设计[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2008(3): 553-557.
- [8] 钟顺时. 天线理论与技术[M]. 2版. 北京: 电子工业出版社, 2015.

作者简介

张安(1971—), 男, 教授级高工, 主要研究方向为轨道交通车辆电气系统的研究及设计。

(收稿日期: 2020-07-07)