

电磁脉冲 D-dot 电场传感器的设计与优化

齐 路, 张国钢, 刘竞存, 秦 铮, 宋政湘, 王建华

(西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 西安 710049)

摘要:瞬态电场测量对于研究智能电器在强电磁脉冲环境下的可靠性具有重要意义。文中基于 D-dot 原理利用等效电势法确定了电磁脉冲电场探头的基本参数,通过结构优化,设计了4种不同结构的电场探头,分析其电场分布的特征,设计了引线屏蔽壳,分析了不同频率下的输出响应。采用 GTEM 小室和 RS105 系统分别对电场传感器进行频域、时域瞬态响应的测试,通过实验,验证了该优化的设计方案可以满足 ns 级脉冲电场的测试需求,同时有利于天线的加工制造和安装,稳固性好。

关键词:电场传感器;电磁脉冲;D-dot;GTEM 小室;RS105 系统

Design and Optimization of D-dot E-field Sensor for Electromagnetic Pulse Detection

QI Lu, ZHANG Guogang, LIU Jingcun, QIN Zheng, SONG Zhengxiang, WANG Jianhua

(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The transient electric field measurement is of great significance for the research of intelligent electrical apparatus reliability under high electromagnetic pulse environment. Based on the D-dot principle, the basic parameters of the electromagnetic pulse electric field probe are determined by the equivalent potential method, through structural optimization, 4 kinds of electric field probes with different structures are designed. The characteristics of E-field distribution are analyzed and shield for leads is also designed. The frequency domain characteristic is simulated and discussed. GTEM cell and RS105 test system are utilized to test the E-field sensors infrequency domain and time domain respectively. Experimental results show that these optimized probes can meet the measurement requirements for pulsed electric field with nanosecond rise time, at the same time, it is beneficial to the fabrication and installation of the antenna, and the stability is good.

Key words: E-field sensor; electromagnetic pulse; D-dot; GTEM cell; RS105 test system

0 引言

核爆、雷电、大功率开关动作和静电放电过程中会产生一种具有场强大、前沿快、频带宽、作用范围广等特点的电磁脉冲,容易对电力系统和电气设备的工作造成严重的破坏与干扰^[1-3]。因此,在电磁脉冲环境特性研究、电磁防护性能的评价以及电磁防护方法等研究领域内,电磁脉冲电场的测量技术受到广泛关注与深入研究^[4-8]。

脉冲电场的测量要求传感器响应频带宽、动态范围大,其测量方法主要分为两种^[7]:一是天线直接

感应法,通过宽带天线直接获取瞬态电场信号,再经过电缆及积分等处理以得到波形数据;二是基于电光效应传感器及光纤传输的方法将电信号转化为光信号,再还原为电信号。传感器探头主要分为线状探头^[2]和 D-dot 探头^[9-15],由于 D-dot 探头的响应频带相对更宽,因此,文中设计了一种倒渐进圆锥形的偶极子探头,并针对其形状进行改进,同时设计了引线屏蔽壳以改善传感器传输信号,并实现探头的稳固安装和线路屏蔽。该探头具有频带宽、线性度高及稳定性好的优点,能够用于 ns 级前沿脉冲电场的测量,更易于制造安装。

收稿日期:2017-12-23; 修回日期:2018-02-23

基金项目:装备预先研究项目。

Project Supported by Equipment Pre-research Project of China.

1 传感器探头的设计与优化

基于美国的 C E Baum 提出的等效电势法^[12], G D Sower 提出假设更为复杂的线电荷分布情况下的等效电势法推导计算方法,可获得性能更好的探头形状^[13]。传感器探头的形状见图 1(P₁为标准结构,P₂~P₃为优化结构)。根据假设的线电荷分布来计算其等势面,再用良导体替代等势面即可确定 D-dot 倒渐进圆锥形偶极子探头的标准形状,其形状类似水滴,如图 1 中 P₁ 所示。

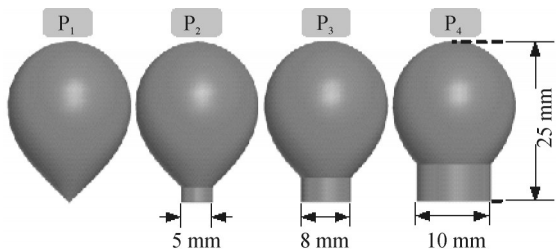


图 1 传感器探头的形状

Fig. 1 Shapes of four probes

标准形状探头的等效面积为

$$A_e = \frac{C_a h_a}{\varepsilon_0} \quad (1)$$

式(1)中: C_a 为等效电容; h_a 为平均电荷分离距离; ε_0 为真空介电常数。探头的高度与其特性阻抗(50 Ω)及线电荷长度有关。

文中设计的电磁脉冲电场传感器的电场信号由偶极子电场探头接收,可把探头当作一个电流源,则其等效电路见图 2。

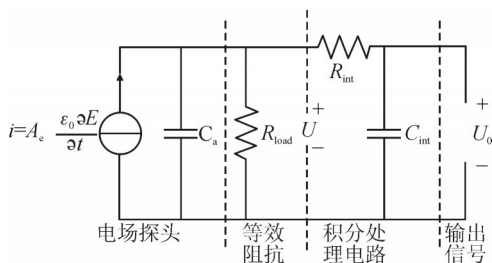


图 2 D-dot 传感器等效电路图

Fig. 2 Equivalent circuit of D-dot sensor

所测电流大小 i 与被测电场的电通量密度 $\varepsilon_0 \partial E / \partial t$ 成正比,比例系数为 A_e ,即

$$i = A_e \varepsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} \quad (2)$$

式(2)中, E 为所测电场强度。则该电路中 $U(s)$ 关于 $E(s)$ 的传递函数为

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{s \varepsilon_0 A_e R_{load}}{1 + s R_{load} C_a} \quad (3)$$

式(3)中: U 为积分前电压; R_{load} 为信号传输匹配

阻抗。

依据式(3)可知,该探头的上限截止频率(-3 dB 频率)为

$$\omega_c = \frac{1}{(R_{load} C_a)} \quad (4)$$

即当电场频率小于 ω_c 时,传感器输出电压与电场微分成线性关系,即该传感器可对该电场进行测量。由式(1)-(4)可知,截止频率与高度相关,见图 3。综合考虑测量需求和体积小型化,文中设计的探头单极高度为 25 mm,理论上其截止频率约为 10 GHz。但由于标准探头极子端部尖头加工难度大,且安装难,易松动导致不稳定等问题,文中对极子端部进行圆柱化,从而优化改进其倒渐进圆锥形结构,并设置不同的底径 d_{bottom} (5、8、10 mm) 作为研究对照,见图 1 中 P₂、P₃、P₄,分析优化后探头的性能表现,并设计实验进行验证。

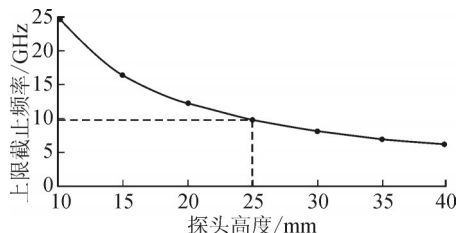


图 3 上限截止频率与探头高度的关系

Fig. 3 Relation between cut-off frequency and the height of probe

2 电场分布的仿真分析

2.1 屏蔽壳的设计

利用电磁场有限元分析软件建立探头的三维仿真模型,在给定空间施加双指数脉冲激励电场,以得到某一时刻下的电场云图。标准探头的电场云图见图 4。

由于偶极子探头的对称结构,理论上偶极子两极以底端为中心镜像对称,则可输出理想信号,图 4(a) 中即为双极间无间隙时的电场云图。而在实际应用中考虑探头底端接线,则双极之间会留有一定间隙,由图 4(b) 可看出,同一时刻下电场分布已产生较大变化,会间接对输出信号造成影响。因此,需要对间隙处的引线设计屏蔽结构避免外部信号干扰,同时起到优化电场分布的作用。

2.2 不同形状探头的电场扰动对比

加屏蔽壳后各探头的电场云图见图 5。针对上文中提出的探头结构设计一种圆柱形金属屏蔽壳,见图 5(a),从而获得了较为理想的电场分布,同时保证了其安装固定的稳定性,实现了对接线处的有效屏蔽。

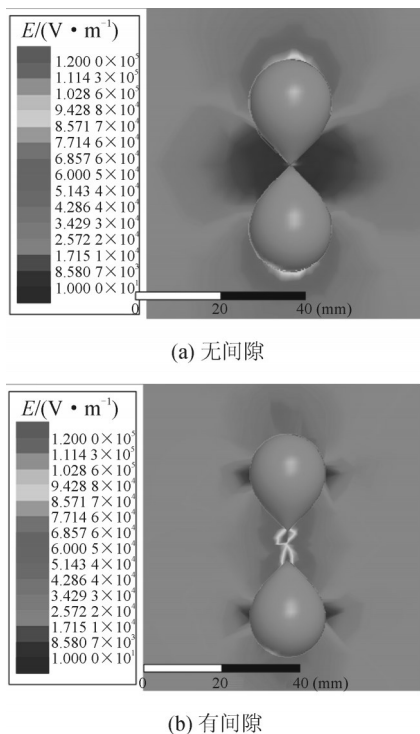


图4 标准探头的电场云图

Fig. 4 E-field distribution of standard probe

对上述4种不同形状探头的仿真结果见图5。从图5(a)、(b)、(c)、(d)子图中可以看出,4种结构下的电场分布基本一致,有效验证文中提出的改进方案对所测电场的影响较小。

3 电场传感器的频域特性分析

3.1 频域特性的仿真

为分析优化后的D-dot探头的频域特性,在仿真模型中模拟恒定电场激励,场强幅值为10 V/m,设置扫频范围400 MHz~2 GHz,步长为50 MHz,扫频结果见图6。

从图6可看出,随着探头底径尺寸的增大,探头的输出电压依次降低。4种探头约在频段400 MHz~1 300 Hz范围内输出幅值呈先减后增趋势,出现失真现象。4种探头在整个频段的性能表现基本一致,可进一步通过实验验证该频段特性。

3.2 频域特性的实验

为测试改进设计的探头在不同频率下的性能表现,文中利用GTEM小室内部产生的标准电场对组装后的电场传感器进行频域测试。GTEM小室是锥形的同轴线结构,可激励出横电磁波,能够在给定空间区域内产生指定频率的均匀电场^[16-17]。

GTEM小室实验平台见图7,将电场传感器置于小室中,通过50 Ω同轴电缆与EMI接收机连接。GTEM小室可由信号发生器调制产生指定频率和场

强的标准电磁场。设置频率范围为400 MHz~2 GHz,步长为100 MHz,标准电场强度大小为10 V/m。

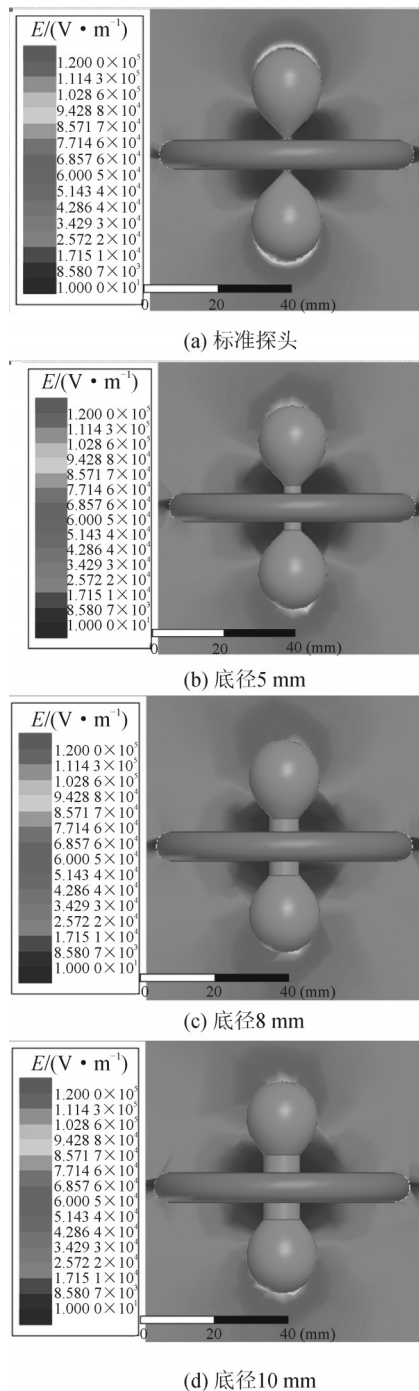


图5 加屏蔽壳后各探头的电场云图

Fig. 5 E-field distribution of four probes with shield

扫频测试中每一频点在场强为10 V/m时,通过EMI接收机记录的探头输出信号见图8。对比4种结构的探头,在该频段的表现基本符合仿真结果。4种探头在较低频段400~1 300 MHz间波动较大,在1 300 MHz~2 GHz间均有稳定的输出信号,幅值约为55 mV,波动较小,保持稳定,说明优化后的探头在频域性能上相对于标准探头的表现较为一致,可

以满足该频段的测试需求。

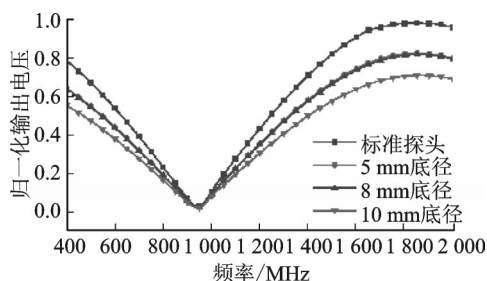


图6 扫频仿真结果

Fig. 6 Frequency sweep results from simulation



图7 GTEM小室实验平台

Fig. 7 Experimental setup with GTEM cell

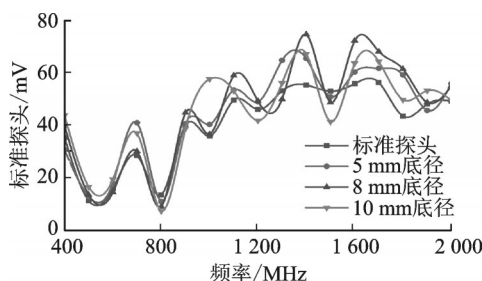


图8 GTEM小室扫频实验结果

Fig. 8 Frequency sweep results from testing in GTEM cell

4 电场传感器的时域特性分析

4.1 时域特性的实验

时域特性测试实验装置的结构示意图和实物图分别见图9、10,主要由电磁脉冲发生装置、实验用D-dot探头、巴伦、无源积分器和高频示波器组成。其中电磁脉冲发生器为RS105测试系统,可产生满足IEC标准^[18]规定的核电磁脉冲(上升沿2.3 ns,半宽23 ns,峰值场强50 kV/m的双指数脉冲),其电场方向垂直向下。由于偶极子结构探头属于平衡性天线,而同轴电缆为不平衡传输线,因此需要宽频带巴伦来扼制电缆屏蔽层外部高频电流。根据上文分析及图2已知,D-dot探头接收的信号为电流微分信号,实验中采用无源积分器将微分信号还原为电压信号。由于示波器易受电磁环境干扰,因此通过金属屏蔽箱隔离外界干扰,获取更为理想的波形信号。此外,为避免电流信号传输过程中发生反射

畸变,每个输入输出环节按照50 Ω阻抗进行匹配。

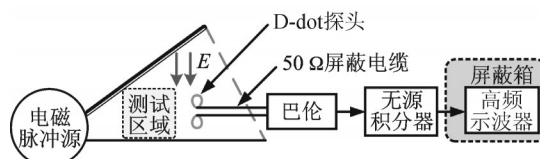


图9 电磁脉冲电场传感器测试系统结构

Fig. 9 Test system of EMP E-field sensor

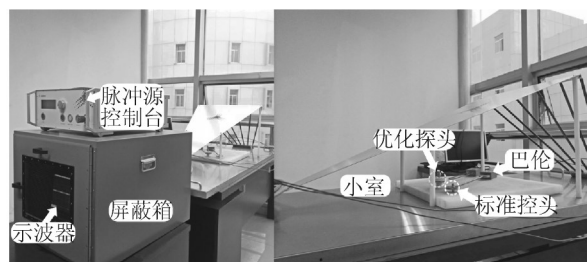
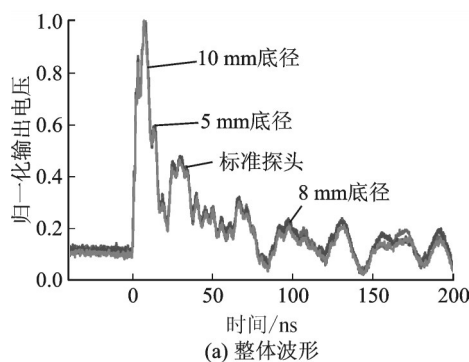


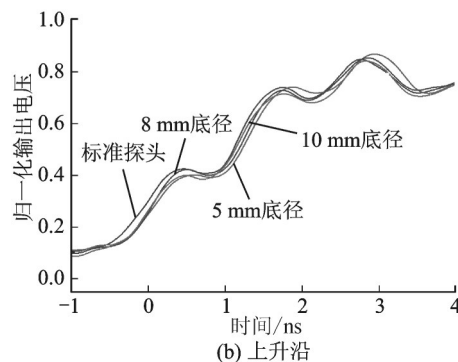
图10 RS105实验平台

Fig. 10 RS105 test system

通过将3种改进方案的探头分别与标准探头同时放在小室内,输入电磁脉冲(上升沿2.3 ns,半宽23 ns),将在不同底径下的优化探头所测的输出电压波形分别与标准探头所测结果对照分析。测试结果,输出波形均为电压积分波形见图11,可发现优化后探头所测脉冲电场波形基本与标准探头一致,其上升沿(10%~90%)时间约为2.3 ns。



(a) 整体波形



(b) 上升沿

图11 输出电压波形对比

Fig. 11 Comparison of waveforms of output voltage

4.2 线性标定实验

为检验优化后探头的线性度,通过调整脉冲激

励源的电压幅值等级,测量7组不同场强下的传感器响应结果。此外,为进一步描述探头的接收性能,计算了天线系数 AF 。

天线系数 AF 是入射电磁波在天线极化方向上输入电场场强与天线输出电压之比^[17-18]。其量纲单位是1/m,定义式为

$$AF_{\text{probe}} = \frac{|E_{\text{emp}}|}{|U_{\text{out}}|} \quad (5)$$

式(5)中: AF_{probe} 为探头系数; E_{emp} 为实测场强大小,V/m; U_{out} 为传感器输出电压,V。

实验对10 mm底径探头进行系数标定。优化探头的线性度拟合曲线见图12。观察图12中的采样离散点及线性拟合后的曲线,可知,优化后的电场探头在不同电场强度下均有很高的线性度。将所得拟合曲线的斜率进行单位换算即为该探头的 AF 系数: $AF_{\text{probe}}=6.528 \times 10^5(1/\text{m})$ 。

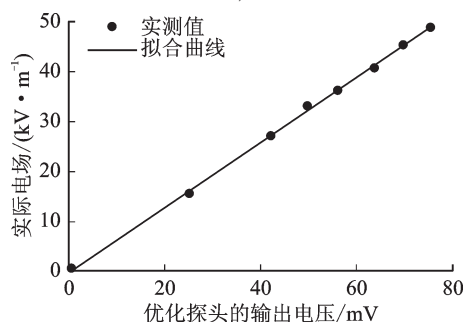


图12 优化探头的线性度拟合曲线

Fig. 12 Linearity fitting curve of the optimized probe

5 结语

文中设计了一种用于ns级电磁脉冲电场测量的D-dot电场传感器,通过等效电势法确定其基本结构,针对工程应用对探头结构提出优化改进方案;通过屏蔽壳结构改善电场分布,提高探头安装的稳固性,实现接线电路的屏蔽。通过仿真和GTEM小室实验进行扫频测试,验证了优化后的探头均有良好的频域性能表现;采用RS105测试系统对优化探头进行时域特性测试和探头系数的标定。通过与标准探头输出响应的对比分析,优化后的探头结构的输出响应快,频带宽,线性度好,可满足ns级电磁脉冲电场的测量要求。此外,工程应用角度上,优化后探头的加工难度较低,利于安装,稳固性好。

参考文献:

[1] 谢彦召,王赞基,王群书,等. 高空核爆电磁脉冲波形标

准及特征分析[J]. 强激光与粒子束, 2003, 15(8): 781-787.

XIE Yanzhao, WANG Zhanji, WANG Qunshu, et al. High altitude nuclear electromagnetic pulse waveform standards: A review[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2003, 15(8): 781-787.

[2] 张晓明,孟 萃,魏 明,等. 宽频带电磁脉冲电场传感器的研制与测试[J]. 核技术, 2011, 34(4): 299-303.

ZHANG Xiaoming, MENG Cui, WEI Ming, et al. Development of a wideband transient electric field sensor[J]. Nuclear Techniques, 2011, 34(4): 299-303.

[3] 王阳阳,毕军建,陈 翔. 高功率瞬态电场传感器的设计与分析[J]. 高压电器, 2013, 49(1): 24-28.

WANG Yangyang, BI Junjian, CHEN Xiang. Design and analysis of sensor for high power transient electric field[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(1): 24-28.

[4] 谭坚文,石立华,李炎新,等. 快前沿纳秒高压脉冲源的开发及实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2004, 16(11): 1434-1436.

TAN Jianwen, SHI Lihua, LI Yanxin, et al. Development and experimental research on the fast rise time EMP generator[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2004, 16(11): 1434-1436.

[5] 刘卫东,胡小锋. 瞬态电场时域测试技术的研究现状与展望[J]. 高压电器, 2014, 50(7): 132-138.

LIU Weidong, HU Xiaofeng. Review of transient electric field measurement in time domain[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(7): 132-138.

[6] 曾 嵘,俞俊杰,牛犇虢,等. 用于宽频带时域电场测量的光电集成电场传感器[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5234-5243.

ZENG Rong, YU Junjie, NIU Benxiao, et al. Integrated optical sensors for wide band time domain electric field measurement[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5234-5243.

[7] 刘卫东,刘尚合,万 博,等. 球形偶极子电场传感器的仿真建模与分析[J]. 高压电器, 2011, 47(3): 100-104.

LIU Weidong, LIU Shanghe, WAN Bo, et al. Simulation and analysis of spherical dipole electric field sensor[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(3): 100-104.

[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 锦,刘小龙,燕有杰,等. 小型短电磁脉冲传感器[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(12): 2797-2801.

CHEN Jin, LIU Xiaolong, YAN Youjie, et al. Compact short electromagnetic pulse sensor[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(12): 2797-2801.

[10] 郭 飞,王绍飞,李秀广,等. 基于渐进圆锥天线的ns前沿电磁脉冲电场传感器[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27

(下转第247页)

- HE Baina. The investigation of high speed grounding switches on secondary arc in 800 kV GIS[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2006.
- [11] 林 莘, 何柏娜, 徐建源. 潜供电弧的仿真分析[J]. 高压电器, 2007, 43(1): 8-10.
LIN Xin, HE Baina, XU Jianyuan. Simulation and analysis of secondary arc[J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(1): 8-10.
- [12] 林 莘, 何柏娜, 徐建源. 超高压线路上潜供电弧熄灭特性的分析[J]. 高电压技术, 2006, 32(3): 7-9.
LIN Xin, HE Baina, XU Jianyuan. Analysis of secondary arc extinction characteristics on UHV line[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(3): 7-9.
- [13] 娄 颖, 戴 敏, 何慧雯, 等. 1 000 kV 交流紧凑型输电线路潜供电流和恢复电压计算分析[J]. 高电压技术, 2011, 37(8): 1882-1887.
LOU Ying, DAI Min, HE Huiwen, et al. Secondary arc current and recovery voltage of 1 000 kV AC compact transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2011 37(8): 1882-1887.
- [14] 高压交流隔离开关和接地开关: GB 1985—2004[S]. 2004.
High voltage alternating-current disconnectors and earthing switches: GB 1985—2004[S]. 2004.
- [15] 高压交流隔离开关和接地开关: DL/T 486—2010[S]. 2010.
High voltage alternating-current disconnectors and earthing switches: DL/T 486—2010[S]. 2010.
- [16] 商立群, 施 围. 快速接地开关在同杆双回输电线路中的应用[J]. 高电压技术, 2004, 30(8): 14-16.
SHANG Liqun, SHI Wei. Application of high speed grounding switches in double-circuit transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(8): 14-16.
- [17] TRELLES J P, CHAZELAS C, VARDELLE A, et al. Arc plasma torch modeling[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2009, 5(18): 728-752.
- [18] 张 权, 杨 芳, 祁海洋, 等. 直流条件下空气与SF₆喷嘴电弧换热机理分析[J]. 高压电器, 2016, 52(12): 41-47.
ZHANG Quan, YANG Fang, QI Haiyang, et al. Analysis of the energy transport processes in DC air and SF₆ nozzle arcs[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(12): 41-47.
- [19] 王飞鸣. 高压SF₆断路器非平衡态电弧机理及开断特性研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2016.
WANG Feiming. Research on mechanism of non-equilibrium plasma arc and breaking characteristics in high-voltage SF₆ circuit breaker[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2016.

刘振祥(1993—) 男, 硕士研究生, 研究方向为超B类感应电流快速释放装置气室内气流场及电场计算(通信作者)。

(上接第 241 页)

- (4): 146-150.
GUO Fei, WANG Shaofei, LI Xiuguang, et al. Development of nanosecond rise time E-field sensor based on asymptotic conical antenna[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015, 27(4): 146-150.
- [11] 秦冰阳, 司 雯, 李斯盟, 等. 局部放电检测用D-dot探头的可行性研究[J]. 电测与仪表, 2016, 53(6): 108-112.
QIN Bingyang, SI Wen, LI Simeng, et al. Feasibility study of d-dot probe used for the detection of partial discharge[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016, 53(6): 108-112.
- [12] BAUM C E. An equivalent-charge method for defining geometries of dipole antennas[R]. AFWL: Sensor and Simulation Note 72, 1969.
- [13] SOWER G D. Optimization of the asymptotic conical dipole EMP sensors[Z/OL]. [1986-10-30]. <http://www.ece.unm.edu/summa/notes/SSN/note295.pdf>.
- [14] BAUM C E. From the electromagnetic pulse to high-power electromagnetics[J]. Proceedings of the IEEE, 1992, 80(6): 789-817.
- [15] CUI Zhitong, MAO Congguang, NIE Xin, et al. E-field sensor design for subnanosecond fast transient[C]//2012 6th Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetics. [S.l.]: IEEE, 2012: 108-110.
- [16] 贾勇勇, 杨景刚, 高 山, 等. 开关柜内部局部放电检测用PCB偶极子天线的设计[J]. 高压电器, 2016, 52(4): 132-138.
JIA Yongyong, YANG Jinggang, GAO Shan, et al. Design of PCB dipole antenna for partial discharge detection in switchgear cabine[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(4): 132-138.
- [17] 杨 圆, 毕建刚, 吴旭涛, 等. 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[J]. 高压电器, 2016, 52(11): 75-80.
YANG Yuan, BI Jiangang, WU Xutao, et al. Research on performance evaluation method of ultra high frequency sensors based on gigahertz transverse electromagnetic cell[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(11): 75-80.
- [18] ZHANG H, ZHOU Y, SHI L, et al. Design of electric field sensors for measurement of electromagnetic pulse[J]. Sensors & Transducers, 2014, 162(1): 131-135.
- 齐 路(1994—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电磁脉冲场测量技术和直流开断技术。
- 张国钢(1976—), 男, 工学博士, 副教授, 博士生导师, 主要从事智能电器理论与工程、电弧等离子体与电接触、新能源电力装备方向的研究(通讯作者)。