

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2019.01.032

MEMS非接触式特高压直流验电器报警阈值设定与实测

潘巍巍¹, 方玉群¹, 吴田², 张宇娇³

(1. 国网金华供电公司, 浙江 金华 321001; 2. 中国电力科学研究院, 武汉 430074;
3. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 目前中国已建成多条 ± 800 kV的特高压直流线路,检修作业是确保线路运行可靠性的重要手段,而直流线路验电是确保人员和设备安全的重要技术措施,但其验电缺乏通用设备和相关标准。文中通过仿真得到直流输电线路双极运行、单正极运行和单负极运行等不同运行方式下测量位置附近的电场分布情况;基于MEMS电场传感器进行了测试和标定;基于仿真计算结果和现场实测选择检修时验电器的测量位置并进行验电器报警阈值的分析与设定;在此基础上研制了非接触式特高压直流验电器并进行了现场测试,验证了验电器的有效性。

关键词: 特高压直流线路; 验电器; 非接触; 阈值设定

Alarm Threshold Settings and Field Test of the Non-contact MEMS UHVDC Electroscop

PAN Weiwei¹, FANG Yuqun¹, WU Tian², ZHANG Yujiao³

(1. State Grid Jinhua Power Supply Company, Zhejiang Jinhua 321001, China; 2. China Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China; 3. College of Electrical Engineering and New Energy, China Three Gorges University, Hubei Yichang 443002, China)

Abstract: Although a number of 800 kV UHVDC lines has been built, there is lack of general UHVDC electroscop equipment and relevant standards. Therefore, a non-contact electroscop based on MEMS (micro-electro-mechanical system) is proposed in this paper. The reasonable measuring position of the electroscop is selected. The distribution of electric field of UHVDC transmission lines in different operating modes, such as double-pole operation and single pole operation, are obtained through simulation and analysis. The alarm threshold of electroscop is set and the field test is carried out. The effectiveness of the electroscop is verified.

Key words: UHVDC transmission line; electroscop; non-contact; threshold setting

0 引言

在进行特高压输电线路检修时,为防止发生意外,必须对线路的带电状况进行验证^[1-4]。对于特高压交流输电线路,已有1 000 kV非接触式验电器的行业标准^[5]。但对于超特高压直流输电线路,目前还没有相关标准和通用的验电设备。目前运行检修人员多采用一些替代的验电措施,例如采用绝缘绳悬吊金属物件靠近导线,通过放电声来判断是否带电。这类方法受外界影响较大,在较为嘈杂或者外界强光条件下容易造成误判。

特高压直流输电线路与交流线路的电磁环境有较大区别,主要由于输电线路电晕放电产生的

带电离子在直流电场作用下形成空间离子流会显著的增强空间电场^[6]。随着特高压直流输电线路的大量建设,国内外学者对离子流场进行了大量研究^[7-11],部分学者也进行了现场实测与对比分析^[12-14],研究表明,直流输电线路下方的合成电场可达标称电场的数倍,计算的准确度可满足工程要求^[15],上述研究结果可为验电器的阈值设置提供参考。

目前直流电场的测量主要采用机械式场磨和光学式电场传感器,场磨主要导体在电场中感应产生的电荷,这些感应电荷在旋转式屏蔽电极的周期性改变感应电荷而获得电流。一般用于地面电磁环境的测量,而在强电场环境下容易出现故障或测量错误。光学式电场传感器主要有基于Pockels效

应和 Kerr 效应的电场传感器^[15-17],这类传感器价格高昂并且操作要求高,并且灵敏度受频率影响较大,无法用于直流电场的测量。目前中国科学院电子所研制一种基于 MEMS 的电子式场磨^[18-21],测量灵敏度高、测量范围广、集成化水平高并且体积小,为便携式超特高压直流验电器的研制提供了一种电场测量模块。

文中设计一种基于电荷感应原理的 MEMS(微机电系统)非接触式特高压直流验电器,根据检修作业需求选择测量位置,通过仿真得到直流输电线路双极运行、单极运行等不同方式下的电场分布,并结合高压直流输电离子流场的计算与实测的相关研究成果,进行验电器报警阈值的分析与设定,并进行现场测试。

1 MEMS 非接触式验电器基本原理

MEMS 非接触式高压直流验电器主要由 MEMS 直流电场检测探头、信号采集与处理控制模块、声光报警模块、电源模块、串口通讯单元等组成,主要结构见图 1。MEMS 电场敏感元件基于电荷感应原理实现电场检测主要包括激励电极、屏蔽电极和感应电极 3 部分,采用静电激励等方式,使得激励电极带动屏蔽电极以频率 ω 水平振动,周期性遮挡感应电极,在被测电场 E 作用下,感应电极的感应电荷量发生变化,产生感应电流,此电流幅值与被测电场幅值成正比,通过测量该电流可计算出被测电场大小。验电器同时采用直接合成技术(DDS)和高速数字信号处理方式实现了电场敏感元件的精准激励和高精度电场检测,转换成能反映电场强度和极性的数据,原理图见图 2。

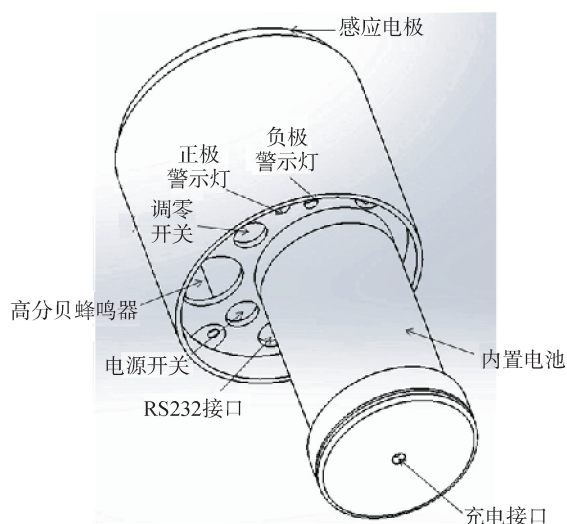


图1 MEMS非接触式验电器结构

Fig. 1 The structure of non-contact MEMS electroscope

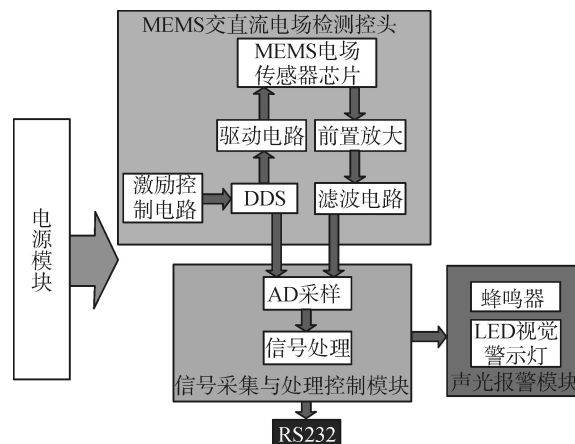


图2 MEMS非接触式验电器功能框图

Fig. 2 The ctional diagram blocks of non-contact MEMS electroscope

当验电器处于直流电场 E 中时,当屏蔽电极在正极性感应电极和负极性感应电极之间周期性水平左右振动时,调节感应电极周围电场发生变化,引起其表面的感应电荷量发生周期性改变,产生交变感应电流 i_s ,表示为

$$i_s = \epsilon_0 A d E / dt \quad (1)$$

式(1)中: ϵ_0 为真空介电常数; E 为感应电极周围的电场; A 为感应电极的感应面积。 i_s 经过差分放大转化成电压 U_{out} ,通过测量电压反演出被测电场大小。传感器芯片的屏蔽电极与驱动电极的可动部分刚性连接在一起,在激励电压 $U_d \pm U_a \sin(\omega t)$ 驱动下,以频率 ω 周期振动。

微型电场传感器芯片输出的交变感应电流可表示为

$$i_s = k_q X_s \omega E_n \sin(\omega t + \theta) \quad (2)$$

式(2)中: k_q 为施加1 kV/m电场时,屏蔽电极在单位振幅状态下感应电极表面的电荷变化量; X_s 为敏感结构在谐振态时屏蔽电极的振幅; θ 为激励信号与传感器输出信号之间的相位差,一般为 90° 。当屏蔽电极在一定周期 ω 振动时,即可通过测量 $i(t)$ 得到对应的电场强度值 E 。

基于MEMS的电场传感器的校准测试和线性度标定在中国科学院电子学研究所标准的电场箱中进行,测得其灵敏度为0.649 2 kV/m,线性度为1.73%,表明利用电场传感器满足验电器的测量需求。同时对报警功能进行了初步测试,当所测电场为正极性时,红灯亮,蜂鸣器响;当所测电场为负极性时,绿灯亮,蜂鸣器响。为进行直流输电线路双极运行、单极运行、双极停运等不同运行方式下的验电,需要进行不同运行方式下的直流线路电场仿真分析,设定各种运行方式下的报警阈值。

2 不同运行方式下的电场仿真分析

2.1 杆塔参数及测量位置

选择典型特高压直流输电线路的直线塔,塔型、参数及测量位置见图3。选择两个典型地电位作业位置进行测量,位置1是导线正上方的横担外1 m处,位置2是与导线处于同一水平的塔身向外1 m处。选择在塔身和横担外1 m是由于塔身有屏蔽电场的作用,进行现场试验测量表明,当采用场磨原理的直流电场测量仪在塔身内进行测量时,测量结果为4 kV/m,在塔身外为26 kV/m,横担内为6 kV/m,横担外为48.4 kV/m。

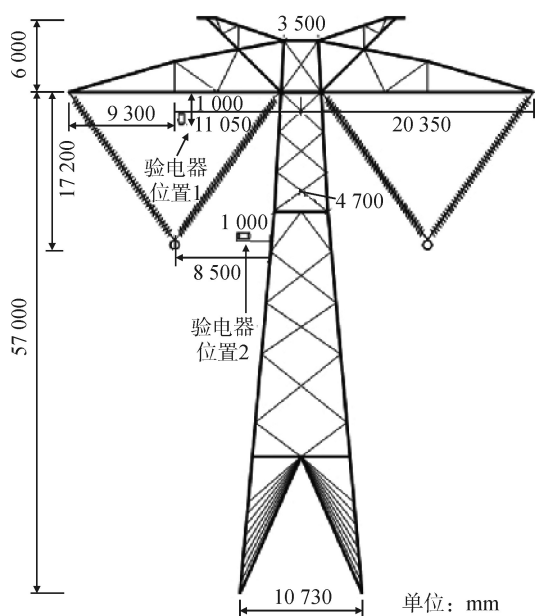


图3 杆塔参数及测量位置

Fig. 3 Tower parameters and measuring position

2.2 电场仿真分析

±800 kV 直流输电线路主要运行方式有:双极全压、双极半压、双极一极全压一极半压、单极全压金属回线、单极全压大地回线、单极半压金属回线和单极大地回线。考虑电压的对称性,主要考虑5种工况,见表1。中国电科院对800 kV线路在不同导线和对地高度下的标称电场和合成电场进行了计算^[6],例如导线对地高度16 m、相间距离22 m的部分计算结果见表2,可看到合成场一般为标称电场的两倍以上。目前多种导线的标称电场和对应的合成电场以及有相关的计算结果,为简化计算,文中在分析验电器所处位置的场强时,采用静电场简化计算标称电场,然后结合现有的计算结果,利用修正系数进行修正得到合成电场。

以工况4正极性导线运行、负极线导线停运为例介绍仿真计算方法。首先结合图2的杆塔结构参数,选择6×LGJ-900型号的导线,建立包括杆塔、绝缘

表1 5种仿真工况

Table 1 5 simulation conditions kV

试验电压	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 5
正极性	800	400	800	800	400
负极性	800	400	400	0	0

表2 合成场强与标称场强对比

Table 2 Comparison of total electric field and

		nominal electric field			kV/m
导线型号	类别	最大值	极导线 外 5 m	极导线 外 15 m	极导线 外 20 m
5×LGJ—	标称场强	16.24	15.51	8.55	5.64
630/45(正)	合成场强	32.64	32.54	23.67	17.96
5×LGJ—	标称场强	16.17	15.49	8.47	5.64
630/45(反)	合成场强	32.57	32.47	23.52	17.96
6×LGJ—	标称场强	17.13	16.51	8.93	5.93
630/45	合成场强	31.30	30.84	21.99	16.61

子串,地线和导线和外包空气的三维模型,见图4。然后进行剖分处理,剖分四面体单元数为2 835 221个,左侧导线施加电压800 kV,铁塔、右侧导线、地面等施加0电位,利用有限元计算整体电场分布。见图5,根据测量位置1和2,分别选取极导线与上方横担间的路径1、与导线等高处的路径2,分析两条路径上的电场分布规律。路径1上各处的电场强度见图6,从图6可见,在导线附近电场强度较大,约为500 kV/m,沿路径1向横担处迅速下降,在离导线6 m以后逐渐趋于平稳,横担处的测量点距离导线约16 m,场强约为26 kV/m,而另一侧的横担外1 m处仅约为4 kV/m;杆塔中心线横坐标设为0,以左侧为正值,路径2上各处的电场强度见图7,同样导线附近电场较大,而靠近塔身,在塔身1 m处左右幅值已降低到10 kV/m左右,而且在右侧也会有感应的电场值,且有一定对称性,两者幅值相差并不大。由以上分析可知,在单极运行的情况下,若在导线等高线的塔身处进行验电,由于两侧电场差别不大,可能造成误判。

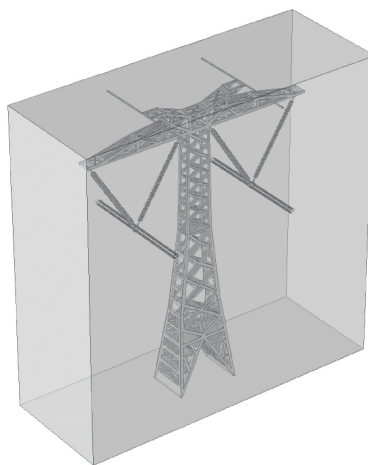


图4 杆塔与线路的三维模型

Fig. 4 3D model of tower and lines

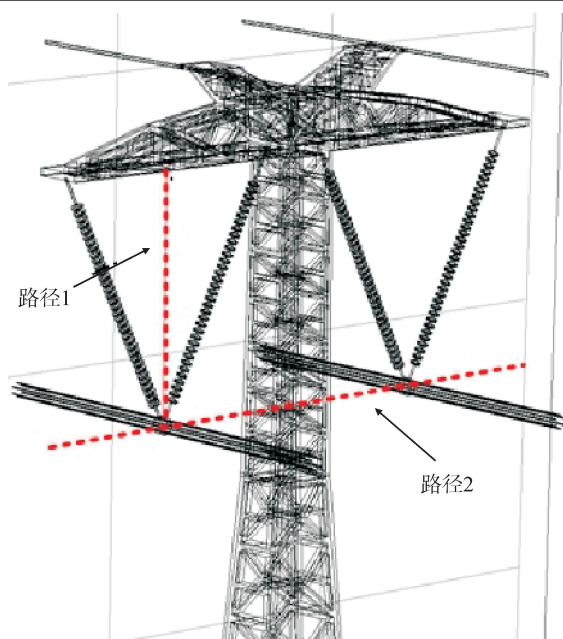


图5 电场分析选择的两条路径

Fig. 5 Two paths selected for electric field analysis

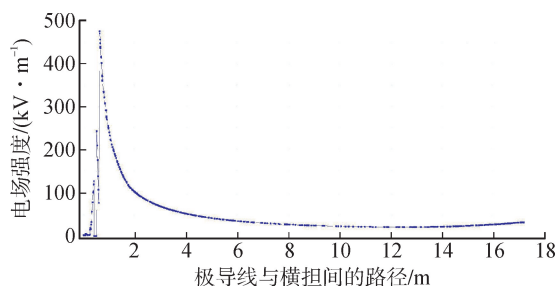


图6 极导线与上方横担间电场分布

Fig. 6 The electric field distribution between polar conductors and upper cross arm

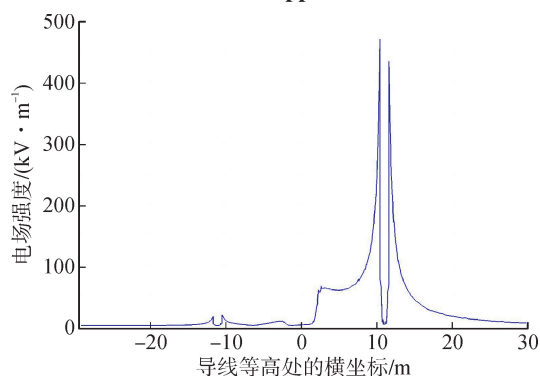


图7 导线等高处的电场分布

Fig. 7 The electric field distribution at the same height as the polar conductors

为进一步验证,结合场磨直流电场测量仪MEMS非接触式验电器的测量结果进行分析,等高线塔身外的测量结果为26 kV/m,而导线上方横担外1 m处测得的电场值为48.4 kV/m,而计算值为11.56 kV/m和22.50 kV/m,两者均相差约2倍,测量结果表明横担处测量场强更大,有利于检测验电。

综上所述,当单极运行时,选择的导线上方横担处进行验电更为合理。

按相同步骤计算得到不同工况下在导线上方横担处验电时,横担下方1 m处的电场强度见表3,单极运行时测量处的电场值比双极运行时电场值稍大。然后结合中国电科院的计算结果按不同导线型号分别乘以对应修正系数作为修正值^[14],基于修正系数确定直流验电器的启动阈值。

表3 横担上验电时验电器处的电场强度

Table 3 The electric field intensity on the location of the electroscope out of the cross arm kV/m

类型	X轴方向	Y轴方向	Z轴方向	总电场强度
工况1	1.45	0.20	22.46	22.50
工况2	0.72	0.10	11.23	11.25
工况3	1.38	0.21	24.26	24.30
工况4	1.31	0.23	26.07	26.10
工况5	0.66	0.11	13.04	13.05

3 验电器报警阈值设定与实测

考虑直流电压的调整范围,结合1 000 kV非接触式验电器的行业标准,选择修正值的70%(1±5%)作为启动阈值,未达到启动阈值时,验电器仅有正常工作指示,而大于启动阈值时,验电器对应指示灯会亮起,并伴有蜂鸣声。

在金华某±800 kV停电检修时对验电器进行了现场测试。未停电前双极正常运行时,设置对应阈值,验电器准确报警,且分别在正极性侧和负极性侧进行测量时,验电器指示灯能正确指示正负极性;当单极运行时,对导线等高处的测量点也进行了测试,见图8,结果表明,当设置对应阈值时,在杆塔两边进行测试,出现在了在未带电侧发生误报的情况,与前文仿真结果分析相符;单极运行时,分别在带电和不带电的导线上方横担处进行测量,验电器均能准确验电。现场测试表明,采用文中设计的验电器及阈值设置可以有效地进行直流输电线路的验电。



图8 现场验电图片

Fig. 8 The picture of field test

4 结语

文中设计了一种MEMS非接触式特高压直流验电器,对验电器的验电位置和电场强度进行了仿真分析,研究表明,在导线上方的横担处验电更为合理,并计算了横担外1 m处的电场强度,结合离子流场和标称电场的计算结果对比进行了修正,设定了不同运行方式下验电器的预警阈值。并通过现场测试验证了验电器的有效性,该次测试对象为所研究的直线塔型,运行方式为双极全压运行和单极全压运行的情况,对于其他塔型和运行方式还需进一步研究分析与测试。

志谢:

本文的研究得到了中国科学院电子学研究所传感器技术国家重点实验室杨鹏飞博士的大力协助,在此表示感谢!

参考文献:

- [1] 胡毅,刘凯,胡建勋,等. ± 800 kV特高压直流线路带电作业安全防护用具的分析[J]. 高电压技术, 2010, 36(10): 2357-2361.
HU Yi, LIU Kai, HU Jianxun, et al. Analysis on safety protective equipments for live working on ± 800 kV UHVDC transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(10): 2357-2361.
- [2] 肖勇,樊灵孟. 云广 ± 800 kV特高压直流线路带电作业分析[J]. 高电压技术, 2010, 36(9): 2206-2211.
XIAO Yong, FAN Lingmeng. Analysis of live working on Yun-Guang ± 800 kV DC transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(9): 2206-2211.
- [3] 张大堃,张文胜. 强电磁场对1 000 kV等电位在线验电器的影响和防护措施[J]. 四川电力技术, 2015, 38(6): 38-42.
ZHANG Dakun, ZHANG Wensheng. The effect of electromagnetic field on 1 000 kV potential to online electro-scope and protective measures[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2015, 38(6): 38-42.
- [4] 高桂华. 基于场强分布的非接触式超高压验电器设计[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.
GAO Guihua. The design of non-contact electro-scope of ultra-high voltage based on field intensity distribution[D]. Xi'an: Xidian University, 2014.
- [5] 1 000 kV非接触式验电器: DL/T 1183—2012[S]. 2012.
1 000 kV non-contact electro-scope: DL/T 1183—2012[S]. 2012.
- [6] 刘振亚. 特高压直流输电工程电磁环境[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
LIU Zhenya. Electromagnetic environment of UHVDC transmission project[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2009.
- [7] 崔翔,周象贤,卢铁兵. 高压直流输电线路离子流场计算方法研究进展[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(36): 130-141.
CUI Xiang, ZHOU Xiangxian, LU Tiebing. Recent progress in the calculation methods of ion flow field of HVDC transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(36): 130-141.
- [8] 汪汛,范竞敏,李敏,等. 高精度上流有限元法在特高压直流输电线路离子流场计算中的应用[J]. 高电压技术, 2016, 42(4): 1061-1067.
WANG Feng, FAN Jingmin, LI Min, et al. Application of the high precision upstream FEM to calculation of the ionized field of HVDC transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(4): 1061-1067.
- [9] 乔骥,邹军,袁建生,等. 采用有限差分求解高压直流输电线路空间离子流场的新方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(6): 85-91.
QIAO Ji, ZOU Jun, YUAN Jiansheng, et al. A new finite difference based approach for calculating ion flow field of HVDC transmission lines[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(6): 85-91.
- [10] 黄国栋,阮江军,杜志叶,等. 改进三维上流元法计算特高压直流线路离子流场[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(33): 152-159.
HUANG Guodong, RUAN Jiangjun, DU Zhiye, et al. Improved 3-D upwind FEM for solving ionized field of HVDC transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(33): 152-159.
- [11] 杨勇. ± 800 kV直流线路负极性悬空时的地面合成电场计算和分析[J]. 电网技术, 2013, 37(6): 1531-1535.
YANG Yong. Calculation and analysis of total electric field at ground level beneath ± 800 kV DC Transmission lines with out-of-operational negative pole line[J]. Power System Technology, 2013, 37(6): 1531-1535.
- [12] 李敏,余占清,曾嵘,等. 高海拔 ± 800 kV直流输电线路电磁环境测量[J]. 南方电网技术, 2011, 5(1): 42-45.
LI Min, YU Zhanqing, ZENG Rong, et al. Electromagnetic environment measurement of ± 800 kV DC transmission lines at high altitude[J]. Southern Power System Technology, 2011, 5(1): 42-45.
- [13] 邓军,肖遥,楚金伟,等. ± 800 kV云广特高压直流线路合成电场仿真计算与分析测试[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(2): 138-144.
DENG Jun, XIAO Yao, CHU Jinwei, et al. Simulative calculation and measurement analysis of total electric field for ± 800 kV Yunnan-Guangzhou UHVDC transmission lines[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(2): 138-144.

- [14] 傅宾兰. 高压直流输电线路地面合成场强与离子流密度的计算[J]. 中国电机工程学报, 1987, 7(5): 56-64.
FU Binlan. Calculation of electric field and ion current density for bipolar HVDC line[J]. Proceedings of the CSEE, 1987, 7(5): 56-64.
- [15] 李清泉, 刘健, 李彦明. 基于光纤的测量瞬态电场的球形传感器[J]. 传感器技术, 2002, 12(3): 14-16.
LI Qingquan, LIU Jian, LI Yanming. Spherical sensor for the measuring transient electric fields based on optical fibre[J]. Journal of Transducer Technology, 2002, 12(3): 14-16.
- [16] RAO Y J, GNEWUCH H, PANNELL C N, et al. Electro-optic electric field sensor based on periodically poled LiNbO₃[J]. Electronics Letters, 1999, 35(7): 596-597.
- [17] TAKASHI M, YASUHIDEN, TATSUO T. Determination of electric field distribution in oil using the kerr-effect technique after application of dc voltage[J]. IEEE Transactions E I, 1990, 25(3): 475.
- [18] 杨鹏飞, 陈博, 闻小龙, 等. 一种基于MEMS芯片的新型地面大气电场传感器[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(6): 1536-1540.
YANG Pengfei, CHEN Bo, WEN Xiaolong, et al. A novel MEMS chip-based ground atmospheric electric field sensor[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2016, 38(6): 1536-1540.
- [19] 顾植彬, 杨鹏飞, 彭春荣, 等. MEMS结构的带电作业电场测量预警系统[J]. 传感器与微系统, 2017, 36(4): 111-113.
GU Zhibin, YANG Pengfei, PENG Chunrong, et al. Electric field measurement safety warning system of live working based on MEMS structure[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2017, 36(4): 111-113.
- [20] 闻小龙, 任天令, 夏善红. 一种电极型MEMS电场传感器封装结构[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(11): 2960-2964.
WEN Xiaolong, REN Tianling, XIA Shanhong. Electrode package for electric field micro sensor[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2016, 38(11): 2960-2964.
- [21] YANG Pengfei, CHEN Bo, WEN Xiaolong, et al. A novel MEMS chip-based atmospheric electric field sensor for lightning hazard warning applications[C]//IEEE Sensors. Busan: IEEE, 2015: 978-981.

潘巍巍(1970—), 男, 高级工程师, 长期从事输电线路运行、检修、技术管理工作。

(上接第208页)

- defects and its countermeasures[J]. Telecom Power Technologies, 2013, 30(2): 79-80.
- [14] 马雷, 白家琨. 27.5 kV 电容型高压验电器验电死区问题探讨[J]. 电气化铁道, 2013(4): 14-15.
MA Lei, BAI Jiakun. Investigation of the dead zone problem of 27.5 kV high voltage electroscopel[J]. Electric Railway, 2013(4): 14-15.
- [15] 武文吉, 吕泽鹏. 特殊条件下高压验电器强度不够的解决方案[J]. 中国新技术新产品, 2014(24): 34-34.
WU Wenji, LYU Zepeng. Solutions of high voltage electroscopel strength under special conditions[J]. China New Technologies and New Products, 2014(24): 34-34.
- [16] 梁海军. 验电时的要求及技巧[J]. 农村电工, 2006(7): 37.
LIANG Haijun. Requirements and skills of electrical inspection[J]. Rural Electrician, 2006(7): 37.
- [17] 戴克铭. 验电器的正确使用[J]. 电力安全技术, 2010, 12(9): 63-66.
DAI Keming. The correct use of electroscopel[J]. Electric Safety Technology, 2010, 12(9): 63-66.
- [18] 盛剑霓. 电磁场数值分析[M]. 北京: 科学出版社, 1984.
SHENG Jianni. Numerical analysis of electromagnetic fields[M]. Beijing: Science Press, 1984.
- [19] 王勖成. 有限单元法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
WANG Xucheng. Finite element method[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.
- [20] 电容型验电器: DL/T 740—2014[M]. 北京: 中国电力出版社, 2014.
Capacitive type voltage detectors: DL/T 740—2014[M]. Beijing: China Power Press, 2014.

雷兴列(1987—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事输电线路带电作业技术研究。