

无人机与架空导线感应放电距离分析

董选昌¹, 吴志坤², 陈泽铭², 曲烽瑞¹, 李艳飞¹, 刘刚², 朱宁西²

(1. 中国南方电网广州供电局有限公司, 广东 广州 510310;
2. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

摘要:随着无人机巡线的发展,无人机距离架空导线过近会发生感应放电,进而影响无人机数据传输系统的稳定性,因此研究无人机与架空导线之间的放电距离尤为重要。本文首先建立电容模型来阐述二者感应放电的机理,然后选取不同悬浮导体模型和两种型号无人机,分别进行与架空导线之间的电场仿真,分析形状因素对各模型和导线之间场强的影响,结合气体放电理论,得到无人机各形状因素对无人机与导线之间放电距离的影响程度。最后实验测量不同悬浮导体和无人机与导线的感应放电距离,验证了仿真,并得到典型无人机与110kV线路导线的感应放电距离参考值。

关键词:无人机; 架空导线; 形状因素; 电场仿真; 感应放电距离

DOI: 10.12067/ATEEE1710040 **文章编号:** 1003-3076(2018)08-0075-07 **中图分类号:** TM72

1 引言

由于以往架空导线巡检方式的单一和低效(主要为人工顺着线路目视或通过望远镜观察,少数情况下通过直升机巡检),多样化及高效的巡检方式是今后发展的方向。无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)技术在民用方面已有诸多应用,例如天气预报和全球变暖的研究、森林火警监控及重大灾难的抢险、航空摄影测量^[1]。由于无人机具有安全稳定、灵活、造价低、人员伤害小等优点,利用无人机进行架空导线的巡检成为我国目前研究的热点。多数学者着重图像识别与跟踪、巡线策略、巡检路径的获取和优化等研究^[2-4],对无人机这种悬浮导体在强电场下的安全稳定性研究较少,对于有悬浮导体的情况主要进行感应电压和静电能量的计算^[5]。本文针对一种通过绝缘杆悬挂在架空导线上进行绝缘带电巡检作业的无人机系统^[6]进行研究,当无人机靠近架空导线时,二者之间场强畸变严重并发生感应放电。通过采用绝缘屏障的方式可以有效提高输电线路空气间隙的绝缘强度^[7],但无法影响输电导线与悬浮导体之间的放电。为了防止无人机与架空导线之间发生感应放电时产生的电磁脉冲对无人

机的通信控制、电路和定位造成干扰,需要设置合适的绝缘杆长度,既要考虑风速的影响不能使绝缘杆长度太长,也要避免发生感应放电,因此研究无人机与架空导线之间的放电距离显得尤为重要。

实际上电力巡线的无人机型号多种多样,考虑到无人机不同型号不同部位形状因素的差异,无人机与架空导线之间的放电距离必定受这些形状因素的共同影响。本文首先单独研究悬浮导体的体积、表面积、曲率半径和距地高度等因素对放电距离的影响,然后对无人机与高压导线构成的模型分别进行三维有限元电场仿真及放电距离测量实验。得到诸多形状因素的共同作用下,无人机与导线之间电场强度分布情况及临界感应放电距离。

2 无人机与导线的感应放电分析

采用模拟电荷法可计算简单模型的空间电场^[8],对于本文中的复杂模型,模拟电荷的设置较难,采用有限元仿真软件 ANSYS 能够较为精确地进行空间场强的计算^[9,10]。

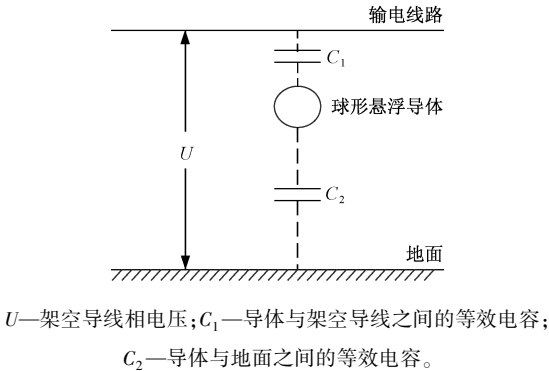
2.1 无人机与架空导线之间放电机理分析

研究无人机与架空导线之间的放电,实际就是分析具有特定形状因素的悬浮导体与架空导线之间

收稿日期: 2017-10-26
基金项目: 广州供电局有限公司科技项目(GZHKJXM20160045)
作者简介: 董选昌(1971-),男,陕西籍,高级工程师,硕士,研究方向为输电线路巡检;
吴志坤(1992-),男,河南籍,硕士研究生,研究方向为无人机巡检与电磁兼容。

的放电,现采用特殊的球形悬浮导体分析其与架空导线之间的放电机理。

当任何一个导体处在电场中时,导体上的电荷也会产生电场,这个电场会叠加在原来的电场之上,改变导体附近的电场分布,形成“畸变场”^[11]。因而在架空导线上通以工频电压时,架空导线在悬浮导体周围产生工频电场,电场方向周期性地变化,引起处于电场中的球形导体内部正、负电荷的往复运动^[12]。例如在正半周期时,悬浮导体靠近导线,导体上方感应出的负电荷便会大大改变导线和导体之间的场强。当二者之间场强足够大时,架空导线与导体之间便会发生放电。悬浮导体与架空导线及地面之间都存在分布电容,形成一个电容串联电路,其等效电路如图 1 所示。



U —架空导线相电压; C_1 —导体与架空导线之间的等效电容;
 C_2 —导体与地面之间的等效电容。

图 1 球形悬浮导体与架空导线的等效电路图

Fig. 1 Equivalent circuit diagram of spherical suspension conductor and overhead conductor

首先理论分析悬浮金属球与导线之间发生感应放电的可能性。本研究中悬浮导体金属球与导线距离较近,故可将金属球与导线之间阻抗表示为:

$$Z_1 = kd \tag{1}$$

式中, k 为阻抗变化率,仅与实验条件温度、湿度等有关; d 为金属球与导线距离。

考虑金属球与地面距离较远,微小的距离移动对本身电容影响不大,故两者之间阻抗 Z_2 近似看作恒定值。由电路定理即可得到金属球与导线之间场强为:

$$E_1 = \frac{Uk}{kd + Z_2} \tag{2}$$

式中, U 为导线对地相电压。

显然,保持相电压 U 不变,随着距离 d 的减小场强增大;或保持距离 d 不变,随着相电压 U 的升高场强增大。直到场强达到空气击穿场强时,悬浮金属球与导线之间便可能发生感应放电。

2.2 电场分布

建立半径为 5m、厚度 2m 的半圆柱体作为模型域,如图 2 所示。仿真模型中导线参数与实验相同,采用的架空导线型号为 LGJ-240/30,导线外径为 21.6mm。通过仿真分析可知,导线架设高度分别为 2m、3m、4m 情况下,悬浮导体与导线之间的场强曲线趋近重合,故可在仿真和实验中采用导线架设高度为 3m 进行研究,这样在保证准确度的条件下有利于模型的建立以及放电距离的测量。由于导体模型的物理尺寸远小于空气(真空)中的电磁波长(真空中电磁波长约为 6000km),因此相关电场计算可以简化为准静态场(静电场)的计算^[13]。在导线上加载 63.5kV 电压,模型域半圆柱底边设置零电位。分别设置空气、导线、悬浮金属球和无人机的电导率为 0、 $3.774 \times 10^7 \text{S/m}$ 、 $4.032 \times 10^6 \text{S/m}$ 和 $1.2 \times 10^5 \text{S/m}$ 。选择智能网格自由划分,精细程度可满足场强值的比较。

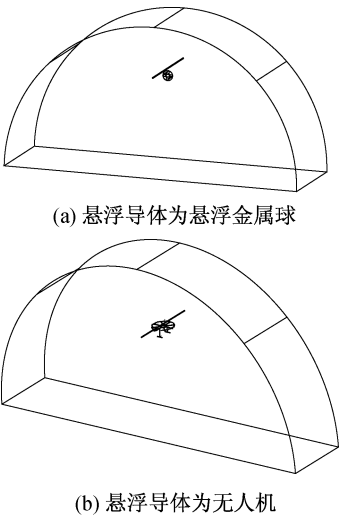


图 2 仿真模型域示意图

Fig. 2 Schematic diagram of domain in each simulation model

2.2.1 不同形状因素的悬浮导体模型与架空导线之间的电场分布

模型域如图 2(a) 所示,各悬浮导体模型条件设置参数和导体示意图分别如表 1 和图 3 所示。其中每个空心金属小球的直径为 20cm,球壳厚度为 0.5mm,导体顶端与导线底端距离均为 2.1cm。

表 1 仿真模型条件设置参数表

Tab. 1 Simulation model condition setting parameters	
模型序号	导体类型
1	单金属小球
2	双金属小球水平连接
3	双金属小球竖直连接
4	双金属小球通过长 40cm 细导线连接

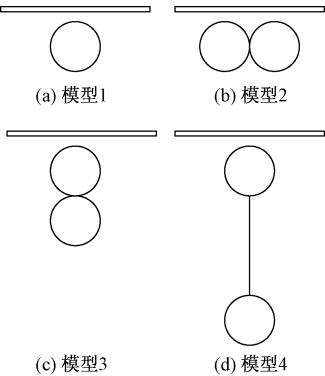


图3 各模型中导体示意图

Fig.3 Schematic diagram of conductors in each model

将各模型导体与导线底端最短距离上的场强值输出,得到对比曲线如图4所示。模型1~模型3三者体积相同,模型2和模型3的表面积是模型1的两倍,但模型2和模型3之间相对的空间位置不同。由图4(a)可知,无论是水平还是竖直方向上导体表面积的增加,都会加剧导体与导线之间的场强畸变程度,但模型3在靠近导线下方处的场强略高于模型2,可知表面积增加倍数相同的情况下,竖直方向的增加对场强的影响略大。

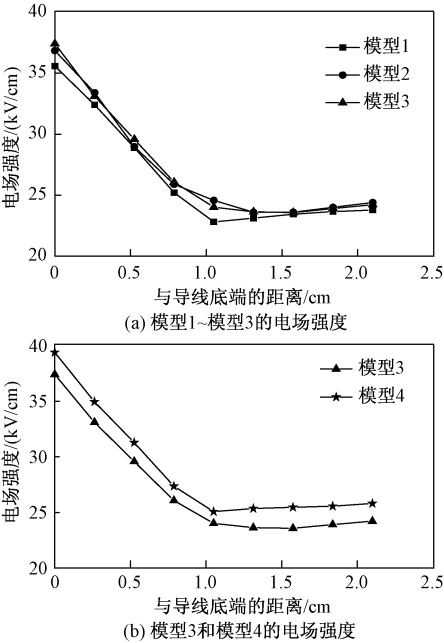


图4 各模型最短路径下场强曲线对比图

Fig.4 Comparison of field curves of shortest path of each model

模型4中细导线的体积和表面积相对于金属球可忽略不计,即模型3和模型4中导体的体积、表面

积均相同,而模型4所占空间高度是模型3的两倍。由图4(b)可以看出,导体本身所占空间的高度越高,导线与导体之间场强的畸变越为严重,更容易发生放电。

另外由电场理论可知,随着悬浮导体靠近高压导线,二者之间气隙的场强会逐渐增强;单纯导体体积的变化并不会影响其与导线之间的场强;其他条件相同时,导体曲率半径越小,场强畸变越严重。

2.2.2 两种无人机与架空导线之间的场强仿真

模型域如图2(b)所示,本文采用大型无人机和小型无人机,主要形状参数如表2所示。

表2 两种无人机的主要近似尺寸参数表			
Tab.2 Main approximate size parameter tables of two UAVs			
机型	机身中心近似圆盘直径/cm	机身中心厚度/cm	旋翼长度/cm
大型无人机	22	3.2	38
小型无人机	18	2.8	23

构建三维仿真模型,如图5所示。旋翼厚度设置为0.1cm,旋翼与机身中心位于同一水平面上,距导线底端的距离均为4cm。仿真得到两种机型的场强云图,分别如图6和图7所示。

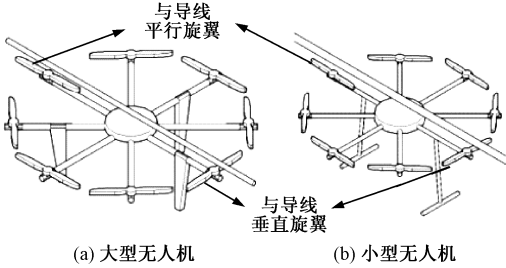


图5 两种无人机三维模型

Fig.5 Three-dimensional model of two UAVs

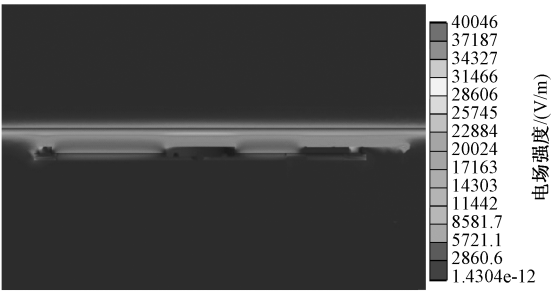


图6 大型无人机与导线之间场强云图

Fig.6 Cloud map of electric field intensity between large unmanned aerial vehicle and wires

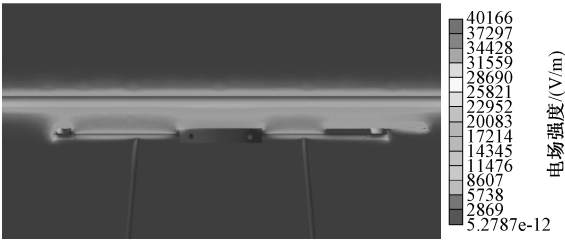


图7 小型无人机与导线之间场强云图
Fig. 7 Cloud map of electric field intensity between small unmanned aerial vehicle and wires

由于无人机结构的特点,使得其接近导线时,机身中心和旋翼处离导线最近,故只需考虑机身中心和旋翼处与导线之间的场强分布。对两种无人机进行仿真时路径分别选取导线底端至机身中心最短距离(路径1)、导线底端至导线平行旋翼尖端处最短距离(路径2)、导线底端至垂直旋翼处最短距离(路径3),如图8所示。对比两种无人机各个路径的场强值,结果如图9所示。

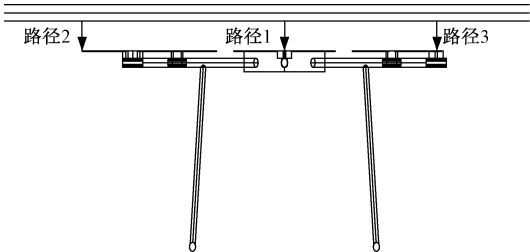


图8 选取的路径示意图
Fig. 8 Schematic diagram of selected paths

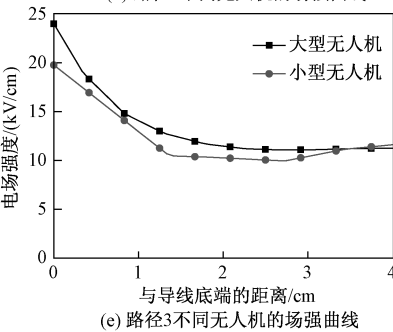
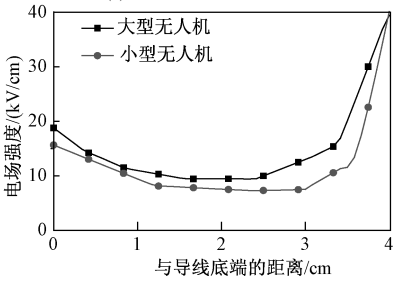
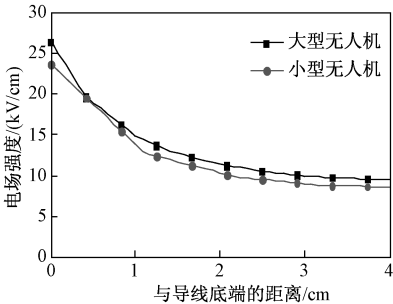
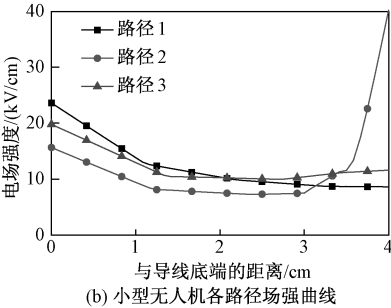
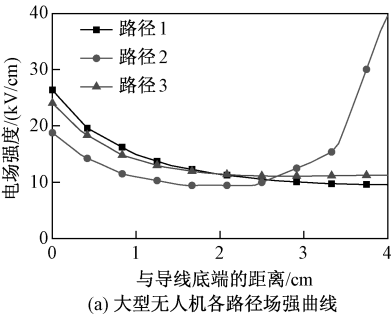


图9 两种无人机各部位与导线之间场强曲线对比图
Fig. 9 Comparison of field strength curves between various parts of two unmanned aerial vehicles and wires

由图6、图7以及图9(a)、图9(b)可知,无论哪种无人机,路径2的场强曲线先下降后在靠近旋翼尖端处上升很快,这主要是因为旋翼处曲率半径很小,容易使场强畸变。路径1和路径3的场强曲线变化趋势近似相同,但路径1的场强变化要强于路径3,因为机身中心处表面积较大,表面感应的电荷使导线底端场强畸变较大,而在靠近机身中心处场强近似匀强电场。因为无人机各处等电位且各路径长度相同,场强畸变严重的路径2最容易发生放电。

从图9(c)、图9(d)和图9(e)对比得到,大型无人机各个路径的场强均大于小型无人机,这是因为大型无人机表面积、所占空间体积等因素均较大,该结论与2.2.1节中仿真结果相符。

因而根据图9中场强曲线,大型无人机的各部位比小型无人机更容易放电,而各无人机的旋翼尖

端比机身中心更容易放电。

2.3 实验验证

2.3.1 实验方案

实验电路图如图 10 所示。搭建如图 11 所示的绝缘升降平台,将悬浮导体放置在支撑平台上,通过底部升降装置缓慢控制支撑平台的稳定上升与下降,保证测量放电距离实验过程中悬浮导体的平稳。

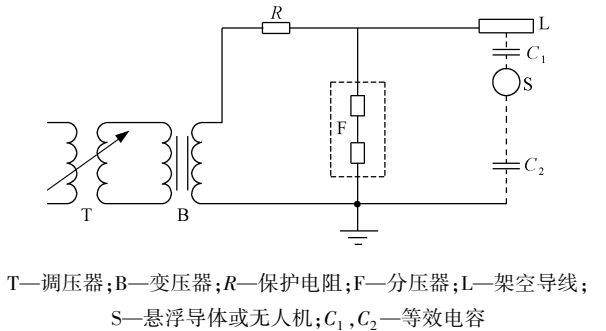


图 10 实验电路图
Fig. 10 Experimental circuit diagram

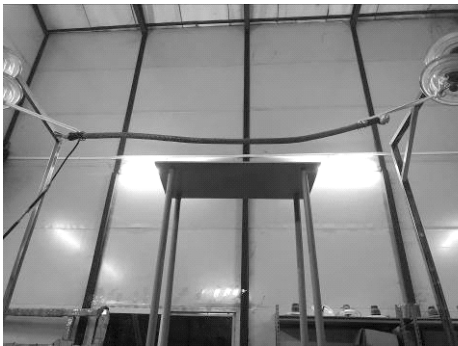


图 11 实验装置图
Fig. 11 Experiment platform

每次实验均测量放电时室内温湿度情况,对于同一次测量,放电实验应在一定时段内完成,以减少气象条件参数变化的影响和放电分散性。为防止放电时形成的粒子对下次放电的影响,每两次放电之间的间隔为 5min,使空间离子充分扩散。进行多次实验并剔除偶然误差情况^[14,15]。

2.3.2 实验数据

对表 1 模型 1~模型 4 中的 4 种导体分别进行测量感应放电距离实验。在温度 17.5℃~18.9℃和湿度 69%~71% 范围的环境条件下,可忽略温湿度对放电距离的影响,得到各种模型导体的放电距离曲线,如图 12 所示。

采用两种旋翼式无人机进行放电实验,图 13(a)、图 13(b)分别为实验用小型无人机和大

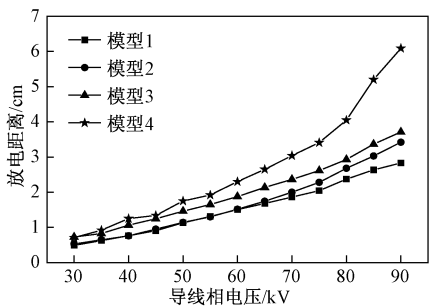


图 12 各种模型导体的放电距离曲线图
Fig. 12 Discharge distance curves of various model conductors

型无人机,机架均为碳纤维复合材料。在导线上加载 63.5kV 相电压,测量放电距离。图 13(c)、图 13(d)为两种无人机正在发生放电。

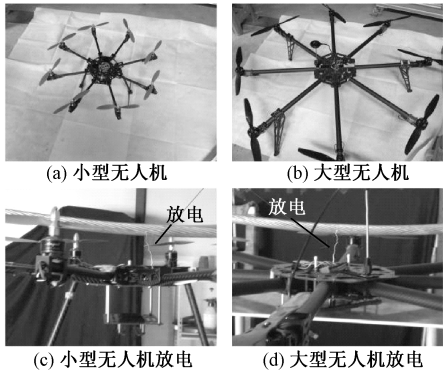


图 13 无人机与架空导线放电图

Fig. 13 Discharge diagram of UAVs and overhead wire

因为小型无人机旋翼材料为塑料,高压导线与旋翼中心电机处较旋翼处更容易发生放电。故仅对小型无人机机体、大型无人机机体和机翼做放电距离测量实验。整个测量过程温度变化范围为 22.3℃~23.7℃,湿度变化范围为 44%~48%,得到数据如表 3 所示。

表 3 无人机与架空导线放电距离

Tab. 3 Discharge distance of UAVs and overhead wire		
机型	放电距离/cm	
	机身处	旋翼处
大型无人机	6.4	7.2
小型无人机	5.8	—

2.3.3 实验结果分析

从图 12 中模型 1~模型 3 导体的放电距离曲线对比可知,相同导线相电压下,导体的表面积增大,其与架空导线感应放电距离增大,即更容易发生放电,而导体表面积在竖直方向上的增加比在水平

方向上的增加更容易发生放电;由模型3和模型4导体的放电距离曲线对比可知,在相同体积和表面积的情况下,导体所占空间的高度越高,其与架空导线越容易放电。

从表3中大型无人机与小型无人机放电距离数据可知,在各种形状因素共同作用下,大型无人机相对容易发生感应放电,而旋翼比机身中心更容易发生放电。

定义为避免无人机各部位与架空导线发生感应放电所保持的最短距离为安全距离。针对110kV输电线路,实验中得到了大型无人机在靠近导线7.2cm时旋翼处可能与导线发生放电的结论。综合考虑大气条件及其他因素的影响,取一定的裕度,选定翼展为1.2m的大型旋翼无人机巡检110kV线路的安全距离为10cm。

3 结论

本文主要进行了各种悬浮导体和两种无人机与架空导线之间的电场分布仿真及感应放电距离测量实验。得到如下结论:

(1) 无人机表面积的增大使其更容易与架空导线发生放电,而竖直方向上表面积的增大影响程度要大于水平方向。另外无人机所占的空间高度越高,与架空导线越容易放电。

(2) 无人机在多种形状因素的共同作用下,放电部位主要受导体表面积和规则程度的影响。大型无人机比小型无人机更容易与导线发生放电,无人机的旋翼比机身容易放电。

(3) 在本文实验条件下,测得大型无人机旋翼和机身分别与110kV线路架空导线的放电距离。最后选定典型无人机巡检110kV线路时的安全距离,给电力人员进行无人机巡检提供了数据参考。

参考文献 (References):

[1] 李磊,熊涛,胡湘阳,等 (Li Lei, Xiong Tao, Hu Xiangyang, et al.). 浅论无人机应用领域及前景 (Application areas and future of UAV) [J]. 地理空间信息 (Geospatial Information), 2010, 8 (5): 7-9.

[2] 汤明文,戴礼豪,林朝辉,等 (Tang Mingwen, Dai Lihao, Lin Chaohui, et al.). 无人机在电力线路巡视中的应用 (Application of unmanned aerial vehicle in inspecting transmission lines) [J]. 中国电力 (Electric Power), 2013, 46 (3): 35-38.

[3] 郑武略,张富春,焦炯,等 (Zheng Wulue, Zhang

Fuchun, Jiao Jiong, et al.). 多旋翼无人机在输电线路巡检中的应用 (Application of multi-totor UAV in transmission line inspection) [J]. 中国电力 (China Electric Power (Technology Edition)), 2016, (4): 70-73.

[4] Tian F, Wang Y, Zhu L. Power line recognition and tracking method for UAVs inspection [A]. 2015 IEEE International Conference on Information and Automation [C]. 2015. 2136-2141.

[5] 甘艳,李慧慧,周涛涛,等 (Gan Yan, Li Huihui, Zhou Taotao, et al.). 基于ATP的输电线路下方长导体感应电压研究 (Study on long line induction voltage under transmission lines based on ATP) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2015, 34 (12): 43-48.

[6] 广州供电局有限公司 (Guangzhou Power Supply Bureau Co. Ltd.). 无人机及其巡检方法 (UAV and its inspection methods) [P]. 中国专利 (Chinese Patent): 106125756A, 2016-11-16.

[7] 霍锋,李晓彬,张虎,等 (Huo Feng, Li Xiaobin, Zhang Hu, et al.). 一种提高输电线路空气间隙绝缘强度方法的研究 (Method study on improving dielectric strength of air gap of transmission lines) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2015, 34 (12): 65-70.

[8] 徐禄文,罗鹏,邹岸新,等 (Xu Luwen, Luo Peng, Zou Anxin, et al.). 基于模拟电荷法的变电站工频电场仿真分析 (Simulation and analysis of power frequency electric field in substation based on charge simulation method) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2015, 34 (7): 27-31.

[9] 魏梦婷,霍锋,阮江军,等 (Wei Mengting, Huo Feng, Ruan Jiangjun, et al.). 特高压交流输电线路倒V型绝缘子串电场分布计算和均压环参数优化设计 (Study on electric field distribution and grading ring's parameters design of backward V-type insulator string on UHV AC transmission line) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2016, 35 (10): 23-28.

[10] 李慧慧,杜志叶,甘艳,等 (Li Huihui, Du Zhiye, Gan Yan, et al.). 超高压线路下方畸变电场测量与计算研究 (Study on measurement and calculation of distorted electric field under EHV transmission lines) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2015, 34 (8): 75-80.

[11] 邬雄,万保全 (Wu Xiong, Wan Baoquan). 输变电工程的电磁环境 (Electromagnetic environment in power transmission and transformation project) [M]. 北京:

- 中国电力出版社 (Beijing: China Electric Power Press), 2009.
- [12] 严璋, 朱德恒 (Yan Zhang, Zhu Deheng). 高电压绝缘技术 (第2版) (High-voltage insulation technology (2th Edition)) [M]. 北京: 中国电力出版社 (Beijing: China Electric Power Press), 2007.
- [13] 刘洋, 黄国强, 吴经锋, 等 (Liu Yang, Huang Guoqiang, Wu Jingfeng, et al.). 变电站高压设备感应放电电能损耗的场路结合分析 (Field-circuit combined analysis of power loss from high-voltage apparatus inductive discharge in substation) [J]. 高压电器 (High Voltage Apparatus), 2015, 51 (12): 1-2.
- [14] 白江, 阮江军, 杜志叶, 等 (Bai Jiang, Ruan Jiangjun, Du Zhiye, et al.). 负直流电压下棒板间隙起晕电压计算方法 (Calculation method for negative DC onset corona voltage in rod-plane gaps) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2016, 36 (8): 2305-2312.
- [15] 王国利, 张福增, 关志成, 等 (Wang Guoli, Zhang Fuzeng, Guan Zhicheng, et al.). 高海拔直流外绝缘试验研究 (Experiment research of DC external insulation in high attitude area) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2016, 42 (4): 1109-1123.

Analysis of induction discharge distance between UAV and overhead lines

DONG Xuan-chang¹, WU Zhi-kun², CHEN Ze-ming², QU Feng-rui¹, LI Yan-fei¹,
LIU Gang², ZHU Ning-xi²

- (1. Guangzhou Power Supply Bureau Co. Ltd., China Southern Power Grid, Guangzhou 510310, China;
2. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The induced discharges occur when the unmanned aerial vehicles (UAVs) are near the overhead lines, which will affect the stability of data transmission system of UAVs. With the development of inspection on line by using UAVs, it is particularly important to study the discharge distance between UAV and overhead lines. In this paper, the capacitive model was established to explain the mechanism of induced discharges. Then, different suspension conductor models and two types of UAVs are selected to simulate the electric field with the overhead conductor respectively, so that we could study the influence of the shape factor on the electric field. Combined with the theory of gas discharge, the impact of the induced discharge distance between UAVs and conductor is obtained. Finally, the experiment of measuring the induced discharge distance of different suspended conductors and UAVs with overhead lines is carried out, which verifies the simulation and obtains the induced discharge distance of typical UAVs and 110kV overhead lines.

Key words: UAV; overhead line; shape factor; electric field simulation; induced discharge distance