

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2024.12.020

500 kV 单回输电线路无人机作业电场影响仿真研究

刘平原^{1,2}, 姚隽雯², 吴焱松³, 梅红伟³, 王黎明³

(1. 南方电网通用航空有限公司, 广州 510600; 2. 广东电网有限责任公司, 广州 510663; 3. 清华大学深圳国际研究生院, 广东 深圳 518055)

摘要: 随着无人机以及各种控制技术的发展,无人机巡检技术被广泛地应用于电网。目前,无人机在电磁场环境下的避障还存在一些缺陷。为了探讨无人机在巡检时,现场运行输电线路对无人机表面电场的影响,文中通过SolidWorks建立了铁塔、导线、大疆M300RTK无人机、电场传感器等设备的模型,导入有限元仿真计算软件Ansoft Maxwell中开展了整体的电场计算。通过改变电压角度获得了一个最合适电压值作为静电场仿真的运行输电线路设置电压,仿真研究了不同距离条件下,无人机、机翼、传感器位置等对无人机表面电场的影响。获得了不同条件下输电线路对无人机表面场强的影响,仿真研究结果可为现场无人机的巡检策略提供数据参考和理论依据。

关键词: 无人机; 旋翼; 电场仿真; 模型; 输电线路

Simulation Study on the Influence of Electric Field of 500 kV Single Circuit Transmission Line on UAV

LIU Pingyuan^{1,2}, YAO Junwen², WU Yansong³, MEI Hongwei³, WANG Liming³

(1. China Southern Power Grid General Aviation Co., Ltd., Guangzhou 510600, China; 2. Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510663, China; 3. Tsinghua Shenzhen International Graduate School, Guangdong Shenzhen 518055, China)

Abstract: With the development of unmanned aerial vehicle (UAV) and various control technologies, UAV patrol technology is widely used in the power grid. At present, there are still some shortcomings in the obstacle avoidance of UAV operating in electromagnetic field environment. For studying the influence of the operating transmission line on the surface electric field strength of UAV during patrol inspection, the models of tower, wire, DJI M300RTK UAV, electric field sensor are set up by SolidWorks software, then imported into the finite element simulation calculation software Ansoft Maxwell to perform overall electric field calculation. One most suitable voltage is obtained by changing the voltage angle as the power transmission line setting voltage of electrostatic field simulation. And the influence on surface electric field of the UAV from such positions as UAV shape, wing, sensor location is simulated and studied in different distance conditions. The influence of power transmission line on UAV surface field strength under different conditions is obtained by simulation and the research results in this paper can provide data reference and theoretical basis for the patrol strategy of UAV at site.

Key words: UAV; rotor; electric field simulation; model; transmission line

0 引言

近些年来中国经济飞速发展,全社会对电量的

需求激增,社会各种层次用电客户对电量的要求也随之提高,这对电力的可靠性与质量提出了比较高的要求。随着各种高压输电线路的投入运行,提高

收稿日期:2024-07-09; 修回日期:2024-09-20

基金项目:南方电网公司科技项目资助(GDKJXM20190010(031000KK52190001))。

Project Supported by Science and Technology Project of China Southern Power Grid Company Limited(GDKJXM20190010(031000KK52190001))。

线路的巡检能力,保障其安全运行对于保障国民经济的平稳发展具有很重要的意义^[1]。

目前我国输电线路的巡检主要是人工巡检、机器人巡检以及直升机巡检,但这些方法在不同的条件下有其适用性,或多或少存在一些缺点,如操作不方便,使用的成本高,巡检效率达不到指定要求,巡检存在盲区无法全面的检测等,使得其难以在国内进行大范围的推广^[2-7]。随着智能技术以及无人机技术的快速发展,多旋翼无人机在一些诸如野外探险、军事、摄影等方面取得了很广泛的应用。其优点非常明显,比如体积小,易于携带,操作方便,飞行范围大等^[8-11]。

相关学者研究了激光雷达、遥感等技术在无人机避障中的应用,取得了一定的成果^[12-15],但是这些都没有深入考虑电场强度作为约束量来进行避障。在无人机进行输电巡线时,由于输电线路周围存在强大的电磁场,因此深入研究无人机在巡检过程中的相关电场特征,具有重要的理论意义和工程价值。胡毅等人分析了作业人员进入等电位过程中的电场和电位分布特性^[16]。王黎明等人研究了直升机对 500 kV 交流输电线路周围的影响,发现场强与距离成反比例关系^[17]。刘壮等人对±500 kV 输电线路直线塔进行空间电磁场仿真,发现无人机在杆塔周围时会对原有的电场分布产生比较明显的影响^[18]。杜勇等人研究了直升机对 1 000 kV 特高压输电线路电场的影响,包括旋翼角度、求解域等等^[19]。万能等人建立交流架空线路模型,以四旋翼无人机为例,分析其离带电导线不同距离下表面承受的电磁场信息^[20]。董灵鹏等人提出利用电场有效值以及无人机高度的方法确定无人机飞行安全距离范围,并且研究了相关的矫正手段^[21]。

综上,为了深入研究无人机巡检时输电线路对无人机的影响。文中建立了 500 kV 单回输电线路以及 M300RTK 无人机模型,在获得最佳电压角度条件下,探讨了无人机旋翼角度以及电场传感器安置位置对其表面电场的影响,同时研究了距离导线不同距离情况下无人机所测量电场强度的变化特征。

1 仿真建模与激励

本次研究无人机在输电线路附近飞行时表面电场情况。由于不考虑近塔飞行,因此忽略掉绝缘子、线路金具等对无人机电场影响较小但模型较为复杂的元件,只关注铁塔、输电线路以及无人机 3 个主要设备的作用。用 SolidWorks 建立相关模型,利用 Ansoft Maxwell 软件开展仿真计算。

1.1 输电线路铁塔与导线模型

在本次计算中,采用南方电网某 500 kV 单回输电线路中较为常见的酒杯铁塔作为仿真计算模型,具体铁塔模型及参数见图 1。

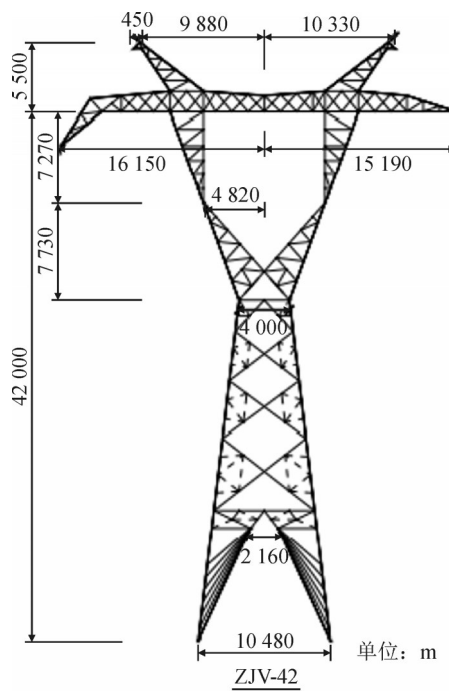


图 1 500 kV 铁塔模型

Fig. 1 500 kV tower model

选取的铁塔为典型的 500 kV 酒杯塔 ZJV-42,塔高 44 m,呼高 36 m,档距设置为 400 m。铁塔一般是用角钢进行搭建,其中最大尺寸与最小尺寸的比值较大,这为剖分带来很大难度,考虑到铁塔基本上为网状结构,其内部电场也不是所关注的区域,故在用 Ansoft Maxwell 建模时,只通过铁塔的外部尺寸建立一个实心的模型。

在用有限元软件 Ansoft Maxwell 进行计算时,当模型中的最大尺寸与最小尺寸比例较大时,会使得剖分的单元数较大,不仅对计算机硬件有很高的要求,而且会使得计算速度和计算精度都严重降低,所以在进行有限元分析时希望能够在满足计算精度的情况下对尺寸较小的地方进行处理,用一个较大尺寸的物体进行等效。

在高压输电线路中为了减小导线上的场强,增大输电线路中的容性阻抗,减小无功损耗,常常需要用分裂导线进行输电。等效计算公式为

$$r_{eq} = r \sqrt{\frac{m r_1}{R}} \quad (1)$$

式(1)中: r_{eq} 为等效半径; r 为分裂外接圆半径; m 为分裂数; r_1 为子导线半径。文中导线型号选取四分裂导线 LGJ-400/35,其参数见表 1。

表1 导线参数

Table 1 Parameters of the conductor

参数	数值
直径/mm	33.6
分裂间距/mm	450.0
分裂数	4.0

把直径 33.6 mm、分裂间距 450 mm 等代入式(1),经过计算可得其等值半径为 167 mm,最后设计的铁塔以及导线计算模型见图2。

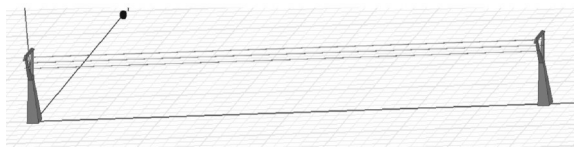


图2 铁塔与导线仿真模型

Fig. 2 Simulation model of tower and conductor

1.2 大疆无人机模型

本次仿真研究中选取了大疆 M300RTK 无人机,该型号无人机重量轻便于携带,续航能力强性能优越,具有良好的野外性能,已经在其他领域得到了广泛的使用^[20]。该无人机的具体参数见表2。

表2 M300RTK无人机相关参数

Table 2 Relevant parameters of M300RTK UAV

参数	数值
尺寸(展开)/mm	810×670×430
最大载重/kg	2.7
空机自重(不含电池)/kg	3.6
机翼旋转频率/(r·min ⁻¹)	4 000.0
材料	碳纤维

在 SolidWorks 中按照 1:1 的比例构建的模型见图3。在该模型中对无人机的一些凹凸处做了一些简化处理,但仍保留了无人机的主要外观参数与支架,参考实物机身对一些尖锐处做了圆角平滑处理。其模型的截面图见图4。

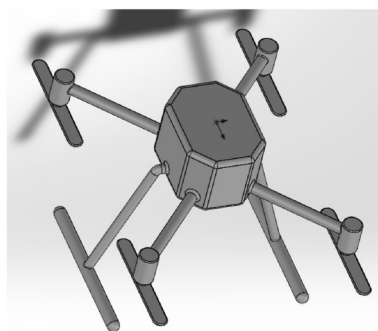
1.3 激励与边界条件

求解时对其设置了一个(600×200×120) m³的长方体求解域,地面与杆塔电位设置为0。无人机材料选为碳纤维,其参数参考文[19],铁塔材料以及导线选取为铝,求解区域内部设置为空气。前文所述各种材料的相对介电常数及其电导率的设置见表3。

由于三相输电线路空间以及电压的对称性,无人机在巡检时主要在边相导线的外侧进行巡检工作,因此在主要对其在边相导线外侧进行研究。工频输电线路的频率为 50 Hz,其波长为 6 000 km 远远大于要研究区域的尺寸大小,可以将其作为静电场来研究^[22]。取 A 相外侧分析,三相施加电压见



(a) 无人机



(b) 无人机仿真模型

图3 M300RTK实物与仿真模型

Fig. 3 Object and simulation model of M300RTK UAV

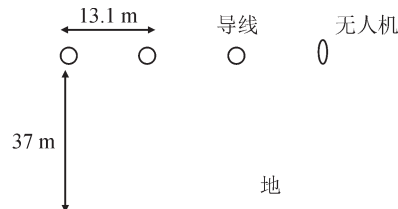


图4 模型截面图

Fig. 4 Section of the model

表3 材料参数设置

Table 3 Material parameters

材料	相对介电常数	电导率/(S·m ⁻¹)
铝	1	38 000 000
空气	1	7
碳纤维	7	100

式(2),仿真时输电线路导线按照式(2)施加电压。

$$\begin{cases} U_A = \frac{500}{\sqrt{3}} \times \sqrt{2} \sin(\omega t) \\ U_B = \frac{500}{\sqrt{3}} \times \sqrt{2} \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ U_C = \frac{500}{\sqrt{3}} \times \sqrt{2} \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (2)$$

2 输电线路电场特征与无人机的影响

2.1 电压的选取

为了对输电线路的电场特征进行详细的研究,首先应该确定哪个电压角度在该方向上产生的静电场强最大。通过改变式(2)中的角度,得出了距离 A 相导线水平 5 m 处不同电压角度(ωt)下电场强度特

征,具体见图5。

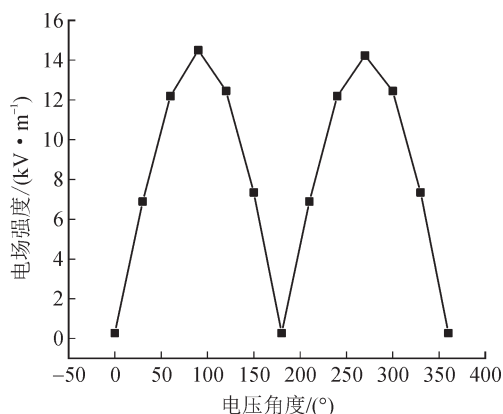
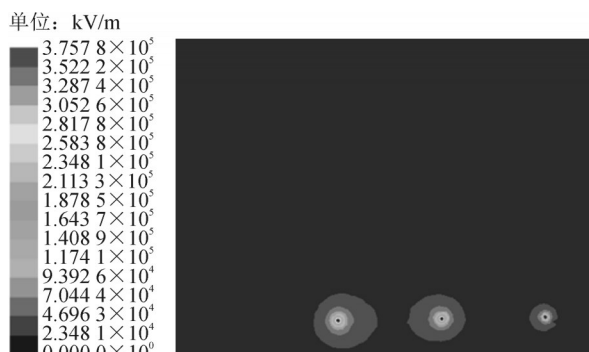


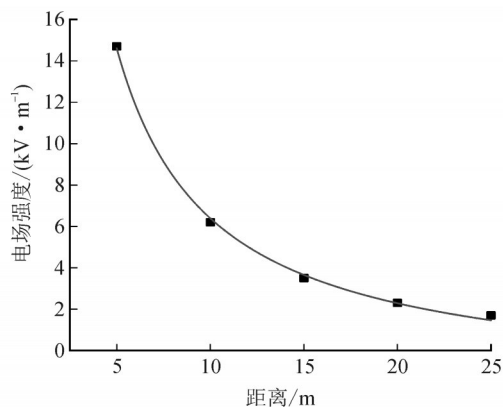
图5 A相水平外侧5 m处电场分布情况

Fig. 5 Electric field distribution at 5 m at the level of Phase A

由图5可知在 $\omega t = 90^\circ$ 与 270° 时,也就是A相导线上施加的电压有效值达到最大的时候,此时A相导线水平5 m处的电场强度达到了最大值15 kV/m。因此,当A相上电压最大时,A导线对外侧水平电场的也是最大。取 $\omega t = 90^\circ$ 对应时刻进行研究,此时B相与C相电压幅值都是-204.124 kV,在软件中获得其电场云图以及外侧场强水平方向分布的特征,具体见图6。



(a) 电场云图



(b) 水平方向不同距离对应的电强强度值

图6 线路周围电场分布

Fig. 6 Electric field distribution of transmission line

从电场云图中可以发现线路电场强度的最大值出现在A相(图6(a)中最左侧圆圈导线)导线附近,最大值为375 kV/m,离输电线路越远,电场越小。将其外侧电场数据提取出来,从图6中可以发现,在没有无人机介入时,A相导线外侧距离从5~30 m变化的过程中,边相导线外侧电场以反比例函数的形式从15 kV/m逐渐降低到1 kV/m,而且离输电线路越近,衰减的越快;在距离线路20 m之后,电场的衰减开始变得很缓慢。

2.2 无人机对电场的影响

在前文所叙述基础上,将无人机模型加入到原有杆塔、输电线路的仿真模型中,研究无人机介入后对电场分布的影响规律,见图7。其为A相外侧无人机上最大电场强度与导线距离的变化曲线。

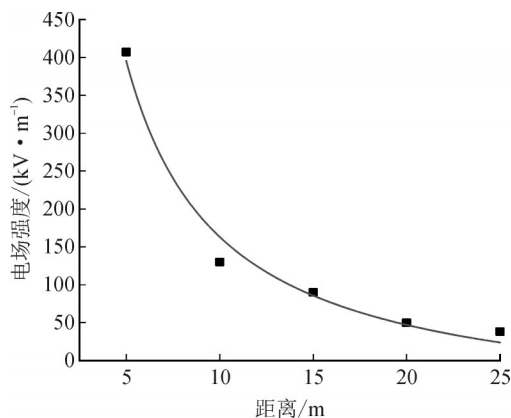


图7 不同距离无人机上最大场强分布

Fig. 7 Distribution of maximum field strength on UAV at different distances

从图7中可以看出,在水平方向上到C相的距离从5 m到30 m时,无人机上最大电场强度从400 kV/m至30 kV/m呈与距离反比例关系变化。在10 m以内时,场强衰减速度比较快,从5 m到10 m最大场强减少了一半。超过20 m之后,衰减速度变缓慢。对比分析文[18-20],文中的模型由于考虑了旋翼,同时其机身模型也比较小,机身长度的数量级为分米,因此其旋翼以及脚架或者其他地方的曲率半径会比较小,从而使得电场强度畸变变大,因此文中仿真结果数据具有合理性。显然,在无人机介入之后,由于无人机对电场的畸变使得空间原本存在的最大电场强度值发生了很大程度的提升。

2.3 无人机旋翼的影响

M300RTK无人机的旋翼采用了轻质高强度复合材料,由金属旋转切割磁力线对周围空间电磁场

产生的影响可以不用考虑^[19],而且M300RTK型号无人机的机翼旋转速度为4 000 r/min,亦即66 r/s,这种转速也与工频电场的频率相近,频率比较低,因此不需考虑相关高频电磁场的影响^[23],因此只需要考虑其在不同角度时,无人机表面电场分布情况。由于该无人机的机翼对称分布,选取了4条机翼的旋转角度分为0°、30°、60°、90°。每条机翼的旋转方向以及30°对应的示意图见图8。

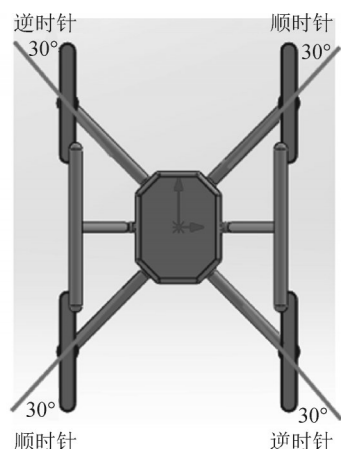


图8 旋转方向及角度示意图

Fig. 8 Schematic diagram of rotation direction and angle

将不同角度的无人机在不同距离上进行仿真,得到的结果见图9。

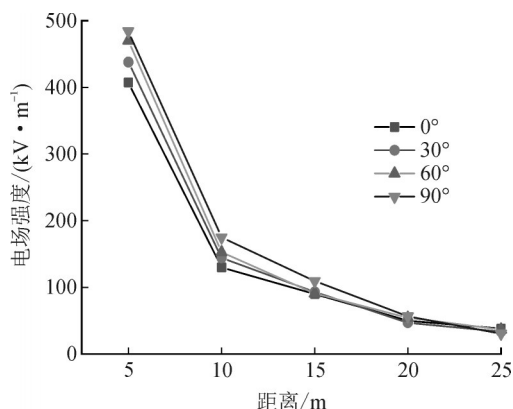


图9 旋翼对电场场强的影响

Fig. 9 Influence of rotor on electric field strength

由图9可知,旋翼在转向不同角度时,会使得无人机表面的场强有细微差别。这种差距在离输电线路比较近,如10 m之内的时候比较明显;无人机离输电线路的距离越大这种影响差距就越小。

在10 m以内,与无人机旋翼平行(对应角度为0°)于导线相比,其他3种角度的最大场强都比该条件下的最大场强要大。在角度为90°的时候也就是当机翼垂直指向输电线路时候,无人机表面的电场强度最大,在离导线5 m处时其最大场强为484 kV/m。而角度为0°条件下其最大场强为408 kV/m。前者

与后者相比,最大场强提升了19%。

从图9中可以看出,在无人机离导线10 m之后,4条场强曲线逐渐重合,说明在远距离的时候这4种角度旋翼下,无人机表面的最大场强几乎都是一样的。当距离达到25 m时,4个角度下所对应的最大场强分别为38.2、36.7、33.4 kV/m和32.5 kV/m,相差很小。因此从以上可以看出,如果某处原本的场强比较小,那么无人机旋翼旋转对无人机飞行的影响可以不用考虑。在近距离高场强处,这种影响还需要进一步的实地飞行进行验证。

2.4 传感器位置的影响

为了确保无人机在输电线路周围巡检过程中的安全飞行,无人机一般都会融合GPS、电场传感器等,那么这些设备的搭载分布对无人机表面场强是一个什么样的影响,合理的搭配是否可以减小其表面场强,以便让其能更近距离的接触线路?基于这些设想,本节主要探讨电场传感器在无人机上下两个位置安装对无人机表面电场分布的影响。

参照UAV-LF-04型传感器^[24],其垂直长度为350 mm,外壳材质为有机聚合材料,建立搭载传感器无人机的模型见图10。

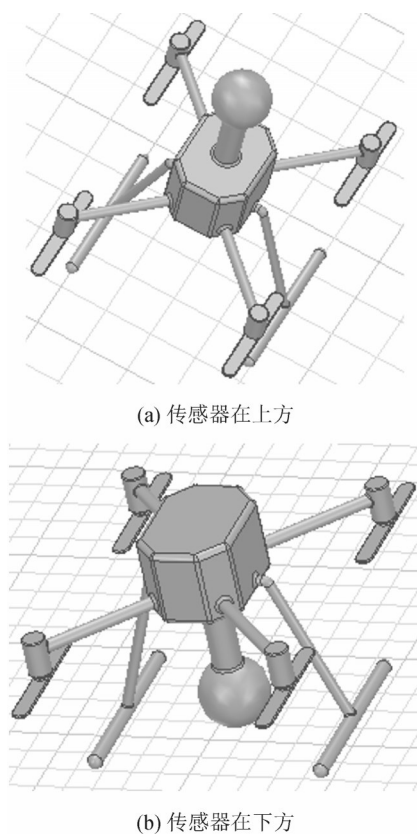


图10 搭载传感器的仿真模型

Fig. 10 Simulation model with sensors

文[17]给出直升机在电场中时,其表面悬浮电势能到几十甚至几百kV。文中也对其表面悬浮电

势进行仿真,无人机的悬浮电势与距离的关系见图 11。在 25 m 处无人机表面悬浮电势仍有 80 kV。而传感器这种设备其内置电源电压只有几十 V,因此仿真时忽略其内部对表面电场产生的影响。需要说明的是,不同型号、不同产品的电场传感器有差异,具体到某种特定装备对其表面电场产生的影响需要特定分析。在前面仿真研究结果的基础上,此处不对近距离范围进行仿真研究,只对无人机离边相导线 24 m 与 25 m 两处进行仿真研究,获得相关结论。无人机表面最大场强(单位为 kV/m)仿真结果见表 4。

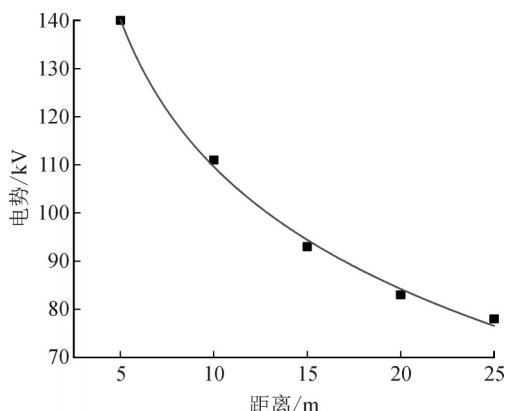


图 11 无人机悬浮电位

Fig. 11 UAV suspension potential

表 4 仿真结果

Table 4 Simulation results

距离	最大场强/(kV·m ⁻¹)	
	上方安装	下方安装
24 m 处	48.4	38.3
25 m 处	41.6	34.9

从表 3 中可以看出,无人机搭载的设备如电场传感器等,其安置位置对无人机表面电场分布有一定的影响。对于本次实验设计的模型,相同距离处,传感器在无人机上方时,无人机表面的最大场强要比传感器在无人机下方时的最大场强要大。此外这种影响随着无人机与输电线路的距离的增大会减少,如在 24 m 处时,传感器在上方是下方的 1.26 倍,而在 25 m 处为 1.19 倍。不过这种差异对于无人机的飞行能产生多大影响,还有待进一步的现场试验。

3 结论

文中通过对 500 kV 单回输电线路以及无人机进行了建模仿真,研究了其表面电场分布特征以及

无人机、机翼等对电场的影响,得到了如下结论:

1)工频输电线路电场仿真可将其简化为静电场处理,对于 500 kV 单回输电线路,边相电压最大时,其对外侧水平方向电场影响最大。该方法可以推广到其他双回或者四回线路来选取仿真电压。

2)无人机介入输电线路周围领域,会导致原有电场发生畸变,使得该处电场强度成倍的增大;无人机搭载的设备及其分布会对无人机上表面最大场强产生一定影响,这种影响会随着无人机与输电线路的距离增加而减小。

3)通过改变机翼的角度发现,无人机表面的最大场强在其机翼垂直指向导线时达到最大;但是随着无人机离输电线路距离的增加,这种影响会被逐渐削弱,在一定距离之后可以忽略机翼对电场的影响。此结果还需要实际飞行进行进一步验证。

4 后续工作及展望

1)通过进一步的现场飞行试验,对仿真结果进行验证,并选取其合适的飞行距离,保证无人机的安全作业。

2)随着各种先进的导航设备融合在无人机上,需要现场研究这些设备对无人机表面场强影响,从而优化位置的分配。

参考文献:

- [1] 刘振亚. 特高压交直流电网[M]. 北京: 中国电力出版社, 2013.
LIU Zhenya. Ultra-high voltage AC & DC grid[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2013.
- [2] 张 虎. 飞滑式输电线路巡线机器人控制系统研究与实现[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
ZHANG Hu. The research and implementation on control system of the flight-sliding type transmission line inspection robot[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014.
- [3] 张运楚, 梁自泽, 谭 民. 架空电力线路巡线机器人的研究综述[J]. 机器人, 2004(5): 467-473.
ZHANG Yunchu, LIANG Zize, TAN Min, et al. Mobile robot for overhead powerline inspection - a review[J]. Robot, 2004(5): 467-473.
- [4] 胡明辉. 基于双 CT 结构磁耦合技术的无人机无线充电设计[J]. 变压器, 2022, 59(6): 7-12.
HU Minghui. Design of UAV wireless charging based on du-

- al CT structure magnetic coupling technology[J]. Transformer, 2022, 59(6): 7-12.
- [5] 张柯, 李海峰, 王伟. 浅议直升机作业在我国特高压电网中的应用[J]. 高电压技术, 2006, 32(6): 45-46.
ZHANG Ke, LI Haifeng, WANG Wei. Analysis of helicopter patrol application prospect in China's UHV grid[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(6): 45-46.
- [6] 邵校嘉, 屈勇, 陈铸成, 等. 基于无人机云端控制的智慧输电业务巡检方法[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(4): 54-60.
SHAO Xiaojia, QU Yong, CHEN Zhucheng, et al. An intelligent transmission service inspection method based on UAV cloud control[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(4): 54-60.
- [7] 秦红霞, 武芳瑛, 彭世宽, 等. 智能电网二次设备运维新技术研讨[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 35-40.
QIN Hongxia, WU Fangying, PENG Shikuan, et al. New technology research on secondary equipment operation maintenance for smart grid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 35-40.
- [8] 吴宇. 分析旋翼无人机应用于高压输电线路的巡检[J]. 通讯世界, 2018(11): 169-170.
WU Yu. Analysis of rotor UAV used in high voltage transmission line inspection[J]. Telecom World, 2018(11): 169-170.
- [9] 隋宇, 宁平凡, 牛萍娟, 等. 面向架空输电线路的挂载无人机电力巡检技术研究综述[J]. 电网技术, 2020(9): 3636-3648.
SUI Yu, NING Pingfan, NIU Pingjuan, et al. Review on mounted UAV for transmission line inspection[J]. Power System Technology, 2020(9): 3636-3648.
- [10] 冯智慧, 张雪峰, 方书博, 等. 基于三维GIS的无人机巡检航迹规划研究[J]. 高压电器, 2017, 53(8): 81-86.
FENG Zhihui, ZHANG Xuefeng, FANG Shubo, et al. Three-dimensional GIS - based trajectory planning for UAV[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(8): 81-86.
- [11] 陈蕾, 徐重西, 高文婷, 等. 基于激光SLAM技术的电缆沟道无人机巡检避障技术研究[J]. 高压电器, 2018, 54(9): 209-213.
CHEN Lei, XU Zhongxi, GAO Wenting, et al. Laser SLAM based obstacle avoidance technology of UAV for cable trench inspection[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(9): 209-213.
- [12] 黎炎, 李哲, 胡丹晖, 等. 基于雷达监测信号的输电线路安全预警系统[J]. 电测与仪表, 2019, 56(4): 70-74.
LI Yan, LI Zhe, HU Danhui, et al. Transmission line safety early warning system based on radar monitoring signal[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(4): 70-74.
- [13] 彭向阳, 陈驰, 饶章权, 等. 基于无人机多传感器数据采集的电力线路安全巡检及智能诊断[J]. 高电压技术, 2015, 41(1): 159-166.
PENG Xiangyang, CHEN Chi, RAO Zhangquan, et al. Safety inspection and intelligent diagnosis of transmission line based on unmanned helicopter of multi sensor data acquisition[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(1): 159-166.
- [14] 付红安, 王学平, 田帅, 等. 基于无人机激光雷达技术的输电线路走廊清理方法[J]. 电测与仪表, 2019, 56(23): 146-152.
FU Hong'an, WANG Xueping, TIAN Shuai, et al. Corridor cleaning method for power transmission line based on UAV LiDAR technique[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(23): 146-152.
- [15] 张涛, 陈亚洲, 田庆民, 等. 某型无人机数据链系统超宽带辐照效应[J]. 高压电器, 2013, 49(8): 21-25.
ZHANG Tao, CHEN Yazhou, TIAN Qingmin, et al. UWB radiation effects on UAV data link system[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(8): 21-25.
- [16] 王力农, 胡毅, 刘凯, 等. 特高压输电线路带电作业组间间隙的放电机理[J]. 高电压技术, 2011, 37(5): 1224-1231.
WANG Linong, HU Yi, LIU Kai, et al. Complex gap discharge mechanism of live working on ultra high voltage transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(5): 1224-1231.
- [17] 王黎明, 于德明, 陈方东, 等. 巡线直升机对500 kV交流输电线路电场影响的仿真[J]. 高电压技术, 2013, 39(1): 201-209.
WANG Liming, YU Deming, CHEN Fangdong, et al. Simulation of effect on 500 kV AC transmission line electric field of patrol helicopters[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(1): 201-209.
- [18] 刘壮, 杜勇, 陈怡, 等. ± 500 kV直流输电线路直线塔无人机巡检安全距离仿真与试验[J]. 高电压技术, 2019, 45(2): 426-432.
LIU Zhuang, DU Yong, CHEN Yi, et al. Simulation and experiment on the safety distance of typical ± 500 kV DC transmission lines and towers for UAV inspection[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(2): 426-432.
- [19] 杜勇, 汪涛, 彭勇, 等. 1 000 kV特高压输电线路直升机平台法带电作业电场仿真研究[J]. 水电能源科学, 2019, 37(3): 181-185.
DU Yong, WANG Tao, PENG Yong, et al. Electric field simulation of helicopter live working with platform method

- for 1 000 kV UHV transmission lines[J]. Water Resources and Power, 2019, 37(3): 181-185.
- [20] 万 能, 宋执权, 汪 晓, 等. 基于电磁场信息的输电线路无人机巡检安全距离仿真分析[J]. 安徽电气工程职业技术学院学报, 2019, 24(3): 33-37.
- WAN Neng, SONG Zhiqian, WANG Xiao, et al. Simulation analysis and research on safety distance of unmanned aerial vehicle patrol for transmission line based on electromagnetic field information[J]. Journal of Anhui Electrical Engineering Professional Technique College, 2019, 24(3): 33-37.
- [21] 董灵鹏, 邹国平, 杨仕友. 电力巡检无人机电磁场测距及校准技术研究[J]. 电测与仪表, 2023, 60(9): 1-6.
- DONG Lingpeng, ZOU Guoping, YANG Shiyu. Research on electromagnetic field ranging and calibration technology of electric patrol UAV[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(9): 1-6.
- [22] 杨 文, 张林辉, 李念容. 大疆无人机在大型市政工程建设中的应用[J]. 科学技术创新, 2021(16): 150-152.
- YANG Wen, ZHANG Linhui, LI Nianrong. Application of Dajiang UAV in large - scale municipal engineering construction[J]. Scientific and Technological Innovation, 2021 (16): 150-152.
- [23] HOFFMANN J, PULINO P. New developments on the combined application of charge simulation and numerical-methods for the computation of electric-fields[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1995, 10(2): 1105-1111.
- [24] 孙治谦, 金有海, 王 磊, 等. 高频脉冲电场参数对水滴极化变形的影响[J]. 化工学报, 2012, 63(10): 3112-3118.
- SUN Zhiqian, JIN Youhai, WANG Lei, et al. Impact of high-frequency pulse electric field parameters on polarization and deformation of water droplet[J]. CIESC Journal, 2012, 63(10): 3112-3118.
- 刘平原(1978—), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事高压外绝缘、智能电网运维等方面的研究工作(E-mail: 6180109@qq.com)。

《高压电器》2024 年 12 期广告单位

彩色广告

封一: 上海南华兰陵电气有限公司

封二: 莱茵技术(上海)有限公司

封三: 西安高压电器研究院股份有限公司(认证)

封四: 西安高压电器研究院股份有限公司(业务)

前彩 1: 北京京东方真空电器有限责任公司

前彩 2: 浙江弘企电力科技有限公司

前彩 3: 南平德赛技术装备有限公司

前彩 4: 浙江途远电气有限公司

前彩 5: 厦门宏发电气有限公司

前彩 6: 陕西斯瑞新材料股份有限公司

前彩 7: 上海新远仪表厂有限公司

前彩 8: 上海乐研电气有限公司

中彩 1: 湖南电科院检测集团有限公司

中彩 2: 珠海康晋电气股份有限公司

中彩 3: 山东电工电气日立高压开关有限公司

中彩 4: 山东泰开真空开关有限公司

后彩 1: 台州昱峰智能装备有限公司

后彩 2: 西电电工材料有限责任公司

后彩 3: 西安西电高压开关操动机构有限责任公司

后彩 4: 杭州欣美成套电器制造有限公司