

[无人机]

无人机在500 kV输电线路强电场中的安全距离仿真分析

文/郭凯¹ 何龙飞² 邓志鹏² 黄静²

1. 国网湖南省电力有限公司岳阳供电分公司; 2. 国网湖南省电力有限公司超高压输电公司

多旋翼无人机在输电线路运维工作中的应用率越来越高, 通过无人机代替人工对架空线路进行巡视是不可避免的输电运检发展趋势。高压输电线路架空导线附近存在高压电场, 无人机巡视时需要靠近架空导线, 当接近的距离过近, 无人机与高压输电线的电势差过大, 可能会击穿空气产生极大的电流从而导致无人机的损坏。通过Ansys Electronics Desktop软件进行仿真分析, 分析多旋翼无人机在500 kV输电线路强电场空间中的安全距离, 为无人机在开展输电线路巡视和检修作业时的安全距离提供参考依据。

近年, 多旋翼无人机在输电线路运维中的应用越来越多, 通过无人机代替人工对架空线路进行巡视是不可避免的输电运检发展趋势。但高压输电线路架空导线附近存在高压电场, 无人机巡视时需要靠近架空导线, 当接近的距离过近, 无人机与高压输电线的电势差过大, 可能会击穿空气产生极大的电流从而导致无人机的损坏。我国高压输电线一般采用50 Hz的交流电, 电压等级有110 kV、220 kV、330 kV和500 kV等, 不同的电压等级对无人机产生的影响程度不同, 但其影响因素是基本上相同的。因此本文对无人机在500 kV电压等级输电线路强电场中的安全距离进行仿真分析, 为输电线路无人机巡视中无人机需与电场保持的安全距离提供参考。

高压输电线仿真模型方案简述

根据高压输电线路对无人机的干扰可以得出强电场会对无人机的正常运行产生一定的影响, 面对该影响, 需对高压输电线进行电场仿真, 根据其电场分布情况进行分析, 从而得出无人机运行的安全距离。该仿真采用的是Ansys Electronics Desktop

软件进行仿真实验。对高压输电线进行电场和磁场的建模分析, 根据实际情况得出结论后进行实验验证。高压输电线的参数由于存在多种情况, 因此在实际仿真的时候会对参考数据进行一定的梯度数据变化, 通过多组数据的仿真实验进行对比, 从而得出结论。

在我国高压输电线一般采用的是钢芯铝绞线作为高压输电线的导线, 其具体尺寸一般遵循高压架空输电导线的设计标准, 故可根据该设计标准进行仿真模型的建立, 500 kV架空输电导线除个别大跨越外大多采用4分裂线, 分裂间距为450 mm。

高压输电线路电场仿真实验

1. 电场仿真实验目的

由于无人机在接近高压输电线时在无人机的金属部件边缘处将引起高电场强度分布。当无人机与输电线路之间的距离小于一定距离时, 会发生电晕放电, 也可能发生电弧, 这可能会导致电力系统故障。在温度20℃, 压力为101 325 Pa和绝对湿度为11 g/m³的标准大气压下, 通常认为均匀电场空气间隙击穿场强为30 kV/cm, 也就是1 cm的距离需要

30 kV电压才能击穿，1 mm的距离需要3 kV电压才能击穿。在以上的环境中，距离10 cm需要300 kV的电势差才能击穿空气导致尖端放电。但是环境的变化会导致击穿空气的击穿强度变化，对于小间隙的均匀场和稍不均匀场由于间隙击穿放电的分散性很小，直流及工频以及50%冲击击穿电压实际上都相同，所以可以直接利用经验公式计算间隙的击穿电压和击穿场强。

击穿电压计算公式为

$$U_b = 24.22\delta d + 6.08\sqrt{\delta d} \quad (1)$$

式中， d 为间隙距离，cm； δ 为空气相对密度，即

$$\delta = \frac{p_{273} + t_0}{p_0 273 + t} \quad (2)$$

式中， p_0 为标准气压，101.03 kPa； p 为实际气压，kPa； t_0 为标准气温，20℃； t 为实际气温，℃。

根据上述的经验公式作为参考，实际温度与击穿电压成反比，气压与击穿电压成正比。在考虑到实际环境中湿度以及空气环境变化等因素，在温度 $\leq 50^\circ\text{C}$ ，实际气压 ≥ 0.9 个大气压时，空气的击穿电压也一般 $< 20\text{ kV/cm}$ ，可将此作为计算安全距离的参考值。

在仿真中需要确定无人机在各个等级的高压输电线的强电场中不发生电晕放电的安全距离。

2. 电场仿真结果

电场仿真应用电磁仿真软件ANSYS Electronics Desktop，建立符合现场实验条件的仿真模型，并尽可能设置仿真参数，在最大程度上还原现场实验的真实场强分布。

(1) 忽略钢芯铝绞线中的空气间隙

由于在实际加工和使用钢芯铝绞线中会有一些的压缩挤压的情形，因此绞线中间不是规则的圆形截面，每根绞线会有一些的形变程度。因此实际的空气间隙会小于绞线的圆形截面示意图，而且仿真结果不关心线路内部的电场分布，而线路内部的空气间隙对外部的电场分布影响不大，可以将其视为一个实心的圆形截面，中间部分是钢制材料，外圈部分是铝制材料。

(2) 暂不考虑杆塔对电场分布的影响

在实际使用情况中，杆塔和电线之间存在绝缘子连接，塔杆本身几乎是不带电，其对于高压输电线的电场分布存在一定的影响，但绝缘子和塔杆存在很好

的绝缘防护手段，在该部分发生尖端放电的距离远小于其他裸露部分的高压输电线。考虑到无人机挂线的实际使用情况，在计算该安全距离时可不考虑该部分情况。杆塔存在对高压输电线电场分布的影响情况可在后续仿真中进行对比，从而得出结果。

在考虑上述因素后，对110 kV的高压输电线进行建模仿真实验。由于10 kV~750 kV架空输电线路的频率低（50 Hz），电场分布的问题可以视为准静电场问题。静电场是一个分散和非旋转场。在高压输电线周围的空气中，电位 φ 的值满足拉普拉斯方程

$$\nabla^2 \varphi = 0 \quad (3)$$

当边界条件满足

$$\varphi_{\text{line}} = V_{\text{line}} \quad (4)$$

$$\varphi_{\infty} = \varphi_{\text{Earth}} = \varphi_{\text{Tower}} = 0 \quad (5)$$

可以通过解决上述边界问题来计算电位分布，然后可以根据功能获得电场强度 E ，计算公式为

$$E = -\nabla \varphi \quad (6)$$

考虑到无人机和输电线复杂的实际情况，上述问题可以通过有限元法解决，而不是分析方法。现选择500 kV的高压输电线作为仿真模型。

500 kV的高压输电线采用是四分裂线，但其线路粗细不同，根据这三种不同情况只需对输电导线外径最大的情况进行仿真，从而得出一个最佳安全距离。现根据表1参数进行仿真，铝钢截面比取8.01，其仿真结果如图1和图2所示。

表1 500 kV四分裂线仿真参数

导线型号	铝钢截面比	导线参数	经济电流密度/(A/mm ²)
LGJQ型	8.01~8.07	4×36.24	1.65

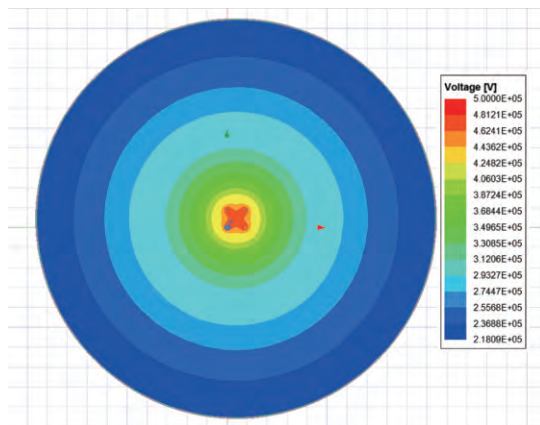


图1 500 kV高压输电线周围电场分布情况（表1参数）

从图1从可以看出,四分裂线的500 kV高压输电线的电场分布情况是关于中心对称的,因此需要查看该每根导线到仿真边缘区域的电场分布。根据其电场强度分布可以计算出安全距离,而该距离适用于对于输电线的距离,从而计算得出安全距离。中垂线上的电场分布情况如图2所示。

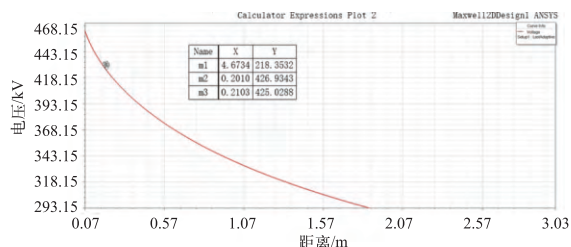


图2 500 kV四分裂线电场分布情况(表1参数)

在图2中可以看出, M_1 是距离500 kV四分裂线的中心点5 m远时的电场强度, M_2 和 M_3 分别是距输电线的中心点0.20 m和0.21 m处的电场强度,可以计算出

$$U_2 = V_2 / d_2 = \frac{426.9343}{20.1} = 21.24 \frac{\text{kV}}{\text{cm}} < \frac{20 \text{ kV}}{\text{cm}} \quad (7)$$

$$U_3 = V_3 / d_3 = \frac{425.0288}{21.03} = \frac{20.21 \text{ kV}}{\text{cm}} > \frac{20 \text{ kV}}{\text{cm}} \quad (8)$$

根据上述的计算结果可以得出无人机在500 kV的高压输电线不发生尖端放电的安全距离为22 cm,考虑到无人机的外形和实际的使用情况,在正常情况下,无人机在输电线0.3 m的距离之外工作不会发生尖端放电现象。

无人机在强电场中的仿真试验

现为考虑到无人机在高压输电线附近的电场分布情况,现在可将无人机模型进行合理简化后导入仿真模型,从而得出仿真结果。导入的简化无人机模型如图3所示。

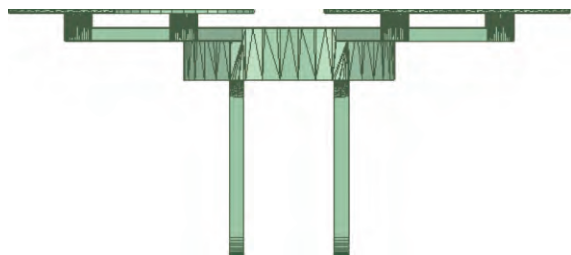


图3 无人机仿真模型简化图

该模型的整体尺寸为1 600 mm × 1 440 mm × 650 mm,模型简化是基于六旋翼无人机的模型。该

模型简化条件如下:

- 1) 无人机整体处于静止状态。
- 2) 无人机旋翼的桨叶一般采用高性能的工程塑料或复合材料制成,视为绝缘材料。
- 3) 无人机外部采用了高聚合材料作为绝缘防护,现仿真中是采用了一般的聚酯纤维,该介电常数为3.0~5.0之间,现取其为3.2。
- 4) 无人机的绝缘防护手段基本将机身整体包围,在仿真中忽略存在的缝隙造成的影响。
- 5) 由于绝缘层将无人机的机身整体都包围,因此在仿真时忽略无人机背内部的硬件电子设备,将无人机整体视为绝缘体。

当该无人机模型处于500 kV高压输电线周围时,其电场分布情况如图4所示。

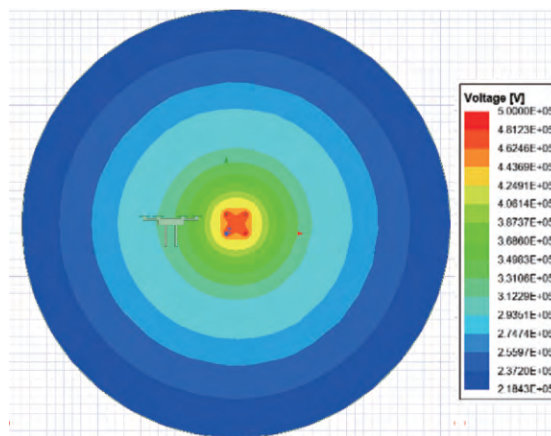


图4 绝缘无人机电场分布示意图

此时无人机本身基本不影响电场的分布情况,这是由于无人机外部为绝缘材料,材料本身对于电子的约束能力较强。当无人机进入高压输电线的电场中时,无人机的自身电子不会因受到强电场的影响而有所转移,对于外部的强电场分布影响极小。因此其电场的安全距离可以参考上述计算所得出的安全距离,无人机需保持0.3 m以上的安全距离,经过换算后可以得出无人机中心需与四分裂线中心保持1.3 m以上的安全距离。

为得出更好的结论,将对比实验仿真,从而进一步的验证结论,现改变模型材料,将无人机外壳的材料改为碳纤维,电导率为2.5 S/cm,此时的仿真情况如图5所示。

此时可明显观察出无人机对于电场分布产生较大的影响,相同点与高压输电线之间的电势差增

大，因此安全距离要大于无绝缘时的情况。

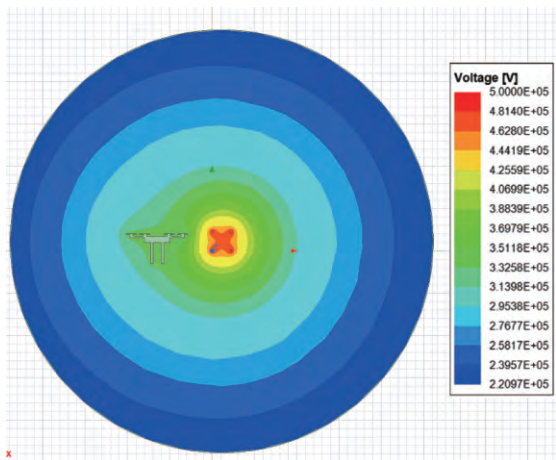


图5 无绝缘无人机电场分布示意图

现将两种情况做进一步的对比，取无人机与高压输电线最近距离下电场的分布情况，得出具体的电势差，做出数据上的对比。

图6为无绝缘防护的无人机电场分布情况。

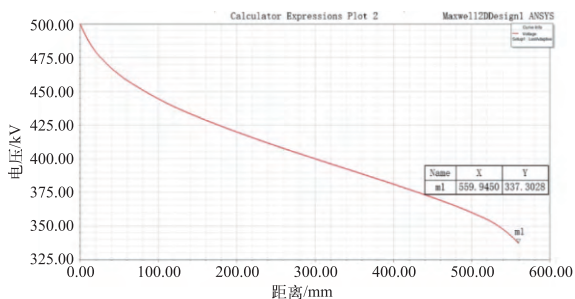


图6 无绝缘无人机电场分布直方图

此时无人机与高压输电线最近点的电势为337.30 kV，则无人机和高压输电线的电势差为162.70 kV。

图7为存在绝缘的无人机电场的分布情况。

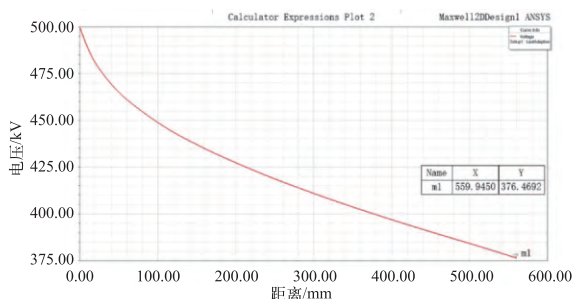


图7 绝缘无人机电场分布直方图

此时无人机与高压输电线最近点的电势为

376.47 kV，则无人机和高压输电线的电势差为123.53 kV。

从该数据可以明显得出在没有绝缘防护时，无人机本身的安全距离将明显变大。在无人机无防护的情况时，可将计算出的一个安全距离作为参考。由于无人机本身的形状不是对称的规则形状，在高压输电线的不同位置对电场的分布的影响情况不同，因此计算该安全距离时以无人机平台的中心和高压输电线的距离作为安全距离，而计算电势差则为无人机表面电势差最大的地方。

当无人机平台中心距高压输电线0.8 m时，无人机最近点与高压输电线的电势为473.67 kV，最近点的电场强度为

$$U_1 = \frac{473.67}{24.27} = 19.52 \text{ kV/cm} \quad (9)$$

此时无人机最近点距离高压输电线0.8 m的时候，不考虑尖端放电情况下，不会发生击穿现象。考虑到实际的环境情况变化以及无人机尺寸形状的不规则性，该距离需有一定的安全裕量，该裕量一般取20%，则安全距离在0.96 m以上。故该无人机边缘处与500 kV四分裂线任意一根分裂导线保持0.96 m以上的距离即可。将该数据换算成无人机中心质点与四分裂线中心点的距离为1.96 m。

3D仿真验证

由于实际情况相较于2D的仿真实际的情况更复杂，得出的结果可能会有所不同，未尽可能验证上述的结果，因此对实际的500 kV输电塔进行建模仿真。由于在2D的磁场仿真中磁场分布强度几乎是十倍百倍，对于电子罗盘来说，其既不能受到外界过于强大的磁场干扰，但是在屏蔽外界磁场的干扰的同时也不能把地磁场同时屏蔽。因此，在强磁场方面需要对无人机进行电磁屏蔽，将强磁场对无人机硬件设备的干扰去除，并且需要使用其他传感器代替无人机的电子罗盘，才能比较好地解决无人机受到强磁场的干扰问题，故在强磁场面前无法给出一个安全距离。因此在3D仿真中，只需要对电场进行进一步的仿真验证，从而验证得出电场的安全距离。仿真模型如图8所示。

在图8中可以看出，该塔分为三层，每一层四分裂线的距离都超过5 m，塔顶处有接地线存在，塔

底由混凝土固定，每个四分裂线的仿真参数参考原来2D模型中的500 kV的仿真数据。由于无人机是从外部靠近输电线，因此只需要查看高压输电线在外部的电场分布，无需考虑六根四分裂线内部的电场分布。其仿真结果如图9所示。

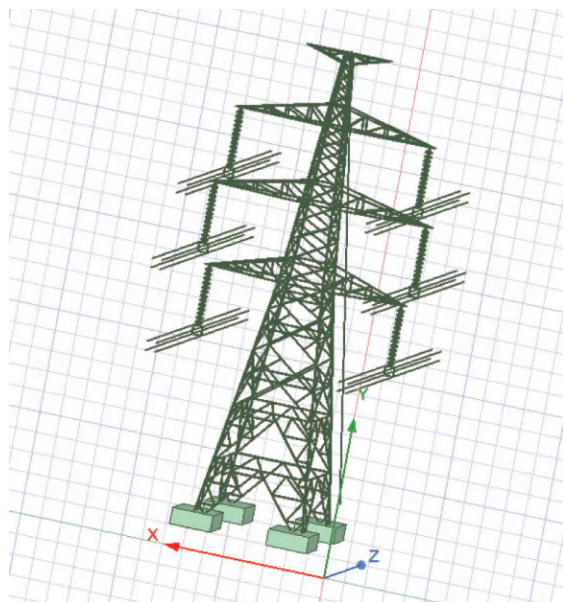


图8 500 kV高压输电塔仿真模型

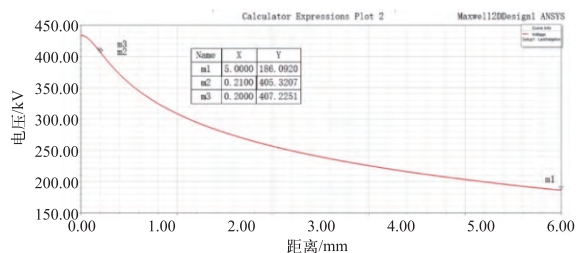


图9 500 kV高压输电线电场分布

图9是电场的分布情况统计图，横坐标为与高压输电线的最短距离，纵坐标为电场强度，与2D的电场分布图对比可以发现，结果略有变化。当高压输电塔附近时，相同距离下，其电场强度略大于不在塔附近的输电线，但经过计算可以得出其安全距离基本不变，因此2D的电场仿真结果可用。

结束语

根据目前仿真的结果来看，无人机在500 kV高压输电线下产生的强电场的安全距离约为0.96 cm，考虑到电线老化，环境变化，湿度变化，可将该安全距离确定在110~120 cm之间。磁场仿真情况可以得出其磁场分布情况，电子罗盘在强磁场中几乎无法使用，其在强磁场中的具体使用情况可以做实验进一步验证确认，若在该种强磁场中无法使用则需要使用其他传感器代替无人机中电子罗盘的作用。经查阅资料，搭载RTK传感器的无人机具有较强抗干扰能力，可以尝试采用此方案进行实验。由于在强磁场中，电子设备的正常使用也会受到一定的影响，因此需要对无人机进行电磁屏蔽处理。EA

(收稿日期：2024-12-01)

参考文献

- [1] 徐梁，卜京．基于无人机低空遥感的输变电路路定时巡检系统[J]．电子设计工程，2022(5)：90-94．
- [2] 裴慧坤，杨兴，陈城，等．架空输电线路无人机巡检视频中避雷器计数器目标检测[J]．武汉大学学报(工学版)，2022(10)：1072-1080．
- [3] 王金会．架空输电线路无人机巡检技术研究进展[J]．冶金与材料，2022(4)：54-55，58．
- [4] 陈海峰，冯春霖，应国德，等．基于无线输电的小型无人机位置控制研究[J]．控制工程，2021(7)：1398-1408．
- [5] 刘志军，吕强，王东来．小型四旋翼直升机的建模与仿真控制[J]．计算机仿真，2010(7)：18-20，69．
- [6] 陈晓兵，马玉林，徐祖舰．无人飞机输电线路巡线技术探讨[J]．南方电网技术，2008(6)：59-61．
- [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，2021(9)：3636-3648．