

# 输电线路上方无人机巡检避障策略

无人机巡检技术由于其优越性已经成为各大公司巡检优先考虑的技术手段,无人机巡检能否有效开展很重要的一部分就是安全问题,为了便于输电线路和杆塔上故障分析诊断,无人机巡检时要求拍摄高清晰度的线路和杆塔照片,为此,巡检时要求无人机要尽可能的靠近输电线路或杆塔,但是和输电线路或杆塔越近,必然存在另一方面的安全隐患,如果不对速度和飞行方向加以控制,就有可能撞上输电线路或杆塔,所以研究巡检无人机的避障策略具有现实工程应用意义。通过对输电线路上的电场强度计算,对电场强度进行数学分析处理,使之成为无人机巡检避障参量的新判据。

黄俊璞<sup>1</sup> 林 韩<sup>2</sup> 宋福根<sup>1</sup> 蔡金锭<sup>1</sup>/1.福州大学电气工程与自动化学院  
2.国网福建省电力有限公司



黄俊璞/硕士研究生

## 关键词/Keywords

输电线路 ·  
电场 ·  
无人机巡检 ·  
避障 ·  
镜像法 ·

为了适应电网的高速发展,提高巡检效率、降低员工的劳动强度和生产成本,无人机巡检技术进入了大众的视野,无人机巡检技术要求自动化程度高、巡视半径大,并且具有更远的航程、更准确的故障识别技术和更安全的避障技术。无人机巡检技术很重要的一方面就是安全问题,现有的无人机避障系统或多或少有判断不准和周围环境的干扰太大等问题<sup>[1]</sup>。本文通过对输电线路周围电场计算,应用电场强度二次倒数来进行无人机避障判别,总结分析出在输电线路上方基于输电线路电场强度的无人机巡检避障策略,使之成为现有无人机避障系统新的判据,提高避障的准确度。

## 高压输电线路工频电场计算

由于工频信号的波长为6 000 km,一般输电线路的长度比工频波长要小得多。在电磁环境计算中讨论的空间范围要比输电线长度小得多,所以可以把工

频交流变压器电场近似成准静态场。设输电线路为平行于地面的无限长直导线,对导线而言,地面可视为良导体,在计算电场分布时取大地电位为零。在已知导体表面电位的情况下,利用镜像法,根据无限长直导线产生的电位公式和叠加原理,可应用下列矩阵方程计算多导线线路中导线的线电荷密度 $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$ , 即

$$\begin{pmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \vdots \\ \varphi_n \end{pmatrix} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \begin{pmatrix} \lambda_{11} & \lambda_{12} & \cdots & \lambda_{1n} \\ \lambda_{21} & \lambda_{22} & \cdots & \lambda_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \lambda_{n1} & \lambda_{n2} & \cdots & \lambda_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \vdots \\ \tau_n \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} \varphi_A \\ \varphi_B \\ \varphi_C \\ \varphi_{D1} \\ \varphi_{D2} \end{pmatrix} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \begin{pmatrix} \ln \frac{D_{11}}{R} & \ln \frac{D_{12}}{d_{12}} & \ln \frac{D_{13}}{d_{13}} & \ln \frac{D_{14}}{d_{14}} & \ln \frac{D_{15}}{d_{15}} \\ \ln \frac{D_{21}}{d_{21}} & \ln \frac{D_{22}}{R} & \ln \frac{D_{23}}{d_{23}} & \ln \frac{D_{24}}{d_{24}} & \ln \frac{D_{25}}{d_{25}} \\ \ln \frac{D_{31}}{d_{31}} & \ln \frac{D_{32}}{d_{32}} & \ln \frac{D_{33}}{R} & \ln \frac{D_{34}}{d_{34}} & \ln \frac{D_{35}}{d_{35}} \\ \ln \frac{D_{41}}{d_{41}} & \ln \frac{D_{42}}{d_{42}} & \ln \frac{D_{43}}{d_{43}} & \ln \frac{D_{44}}{w} & \ln \frac{D_{45}}{d_{45}} \\ \ln \frac{D_{51}}{d_{51}} & \ln \frac{D_{52}}{d_{52}} & \ln \frac{D_{53}}{d_{53}} & \ln \frac{D_{54}}{d_{54}} & \ln \frac{D_{55}}{w} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tau_A \\ \tau_B \\ \tau_C \\ \tau_{D1} \\ \tau_{D2} \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中, $D$ 为各相导线、避雷线与镜像之间的距离; $d$ 为各相导线和避雷线相互之间的距离; $R$ 为各相导线的等效半径; $w$ 为避雷线的半径。如图1所示,在 $(x,y)$ 点的电场强度的水平和垂直分量 $E_x$ 和 $E_y$ 可表示为<sup>[2]</sup>

$$E_x = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^n \tau_i \left( \frac{x-x_i}{r_i^2} - \frac{x-x_i}{r_i'^2} \right) \quad (3)$$

$$E_y = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^n \tau_i \left( \frac{y-y_i}{r_i^2} - \frac{y-y_i}{r_i'^2} \right)$$

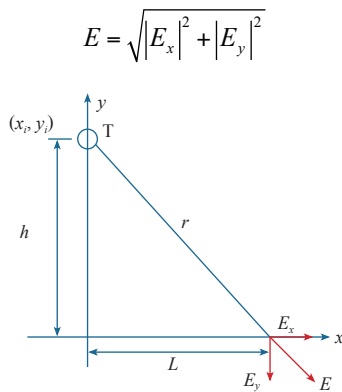


图1 线电荷在某点处电场强度大小

输电线路水平方向为 $x$ 轴，垂直方向为 $y$ 轴，本文仿真计算是以500 kV输电线路为基础，采用典型500 kV超高压架空线路四分裂钢芯铝绞线，每根分裂子导线半径为13.41 mm，分裂间距为450 mm，三根导线呈现正三角排列，下AB两相导线距离地面高度36 m，水平距离19.08 m，C相距离AB两相距离7.5 m。地线半径取70 mm，双地线排列，地线距离地面51 m，如图2所示。500 kV四分裂导线的等效半径计算公式为

$$R_{eq} = \sqrt[n]{rd_m^{(n-1)}} = \sqrt[n]{r(d_{12}d_{13} \cdots d_{1n})} \quad (4)$$

式中， $r$ 为每根导体的半径； $d_{12}$ ， $d_{13}$ ， $\cdots$ ， $d_{1n}$ 为某根导体与其余 $n-1$ 根导体间的距离； $d_m$ 为各根导体之间的几何均距。

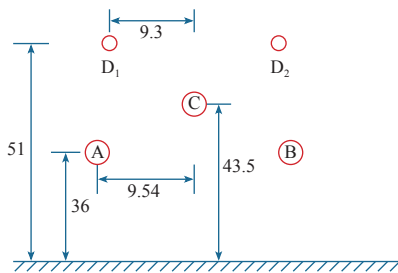


图2 架空线路模型及其导体镜像

应用Mathcad软件计算输电线路上方电场分布情况，观察线取距离地面55 m、60 m、65 m及70 m的电场强度分布情况，如图3所示。

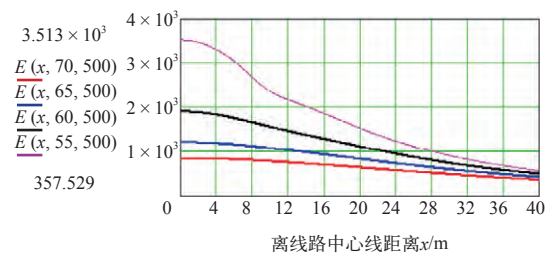


图3 输电线路上方电场强度 $E$

由图可以看出输电线路上方电场分布呈现中间大两边小的趋势。

对电场强度进行求对 $x$ 的一次导数 $E_1 = \frac{dE}{dx}$ ，如图4所示。

图4所示。

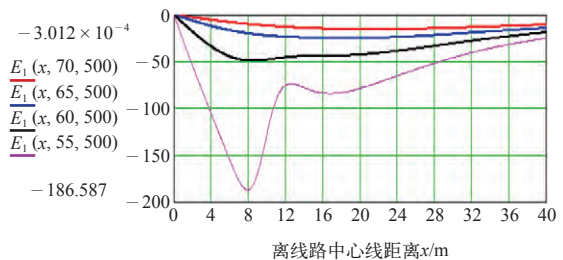


图4 输电线路上方电场强度 $E$ 求一次导数 $E_1$

假设巡线无人机为一个半径为5 m的球体，再考虑安全裕度5 m。

对 $E_1$ 再求一次导数 $E_2 = \frac{dE_1}{dx}$ ，如图5所示。

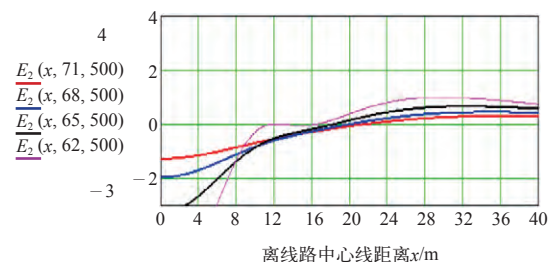


图5 输电线路上方电场强度 $E$ 求二次导数 $E_2$

由上图可以看出在 $0 \leq x \leq 16$ 时 $E_2 \leq 0$ ，而在 $x > 16$ 时 $E_2 > 0$ ，由此可以制定巡检无人机在输电线路上方避障策略。

由于在无人机上会安装有海拔测量系统，可以对无人机飞行高度进行测量，在无人机上进行电场测量再通过数学运算计算出电场强度二次导数。再根据电场强度二次导数是否大于0来进行避障，大于0时，说明无人机在距离线路中心16 m以外，无人机安全；小于0时，无人机在距离线路中

心16 m以内, 需要采取避障措施使之远离, 避免撞上输电线路造成安全事故。

## Ansoft仿真软件验证

应用Ansoft软件<sup>[3]</sup>进行二维仿真验证, 仿真模

型如图6所示, 同样画出观察线距离地面55 m、60 m、65 m和70 m处的电场强度分布<sup>[4-5]</sup>。

可以看出仿真结果与数值计算结果的最大值相差1 000 V/m左右, 考虑到误差因素和变化趋势同数值计算一致, 仿真与数值计算结果相吻合。

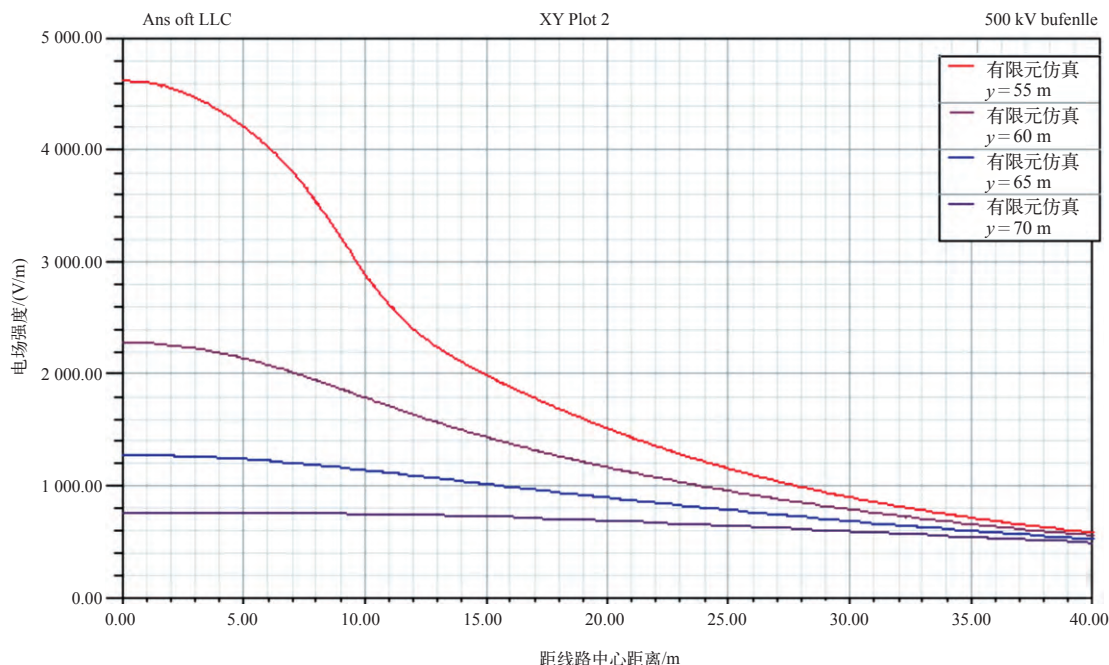


图6 使用Ansoft软件仿真输电线路上方电场强度

## 结束语

本文应用镜像法对500 kV输电线路上方电场进行计算, 提出采用电场强度二次导数为零时来进行巡检无人机的避障判别, 大于0, 则巡检无人机在距离输电线路中心16 m以外, 无人机完全; 小于等于0, 则巡检无人机在距离输电线路中心16 m之内, 无人机需要进行避障, 否则会撞上输电线路造成安全事故, 再采用Ansoft电磁场仿真软件验证数值分析方法的正确性。采用输电线路电场强度进行数学计算分析处理, 可以很好地同雷达避碰、红外避碰、超声波避碰和激光避碰<sup>[4]</sup>等相结合, 更好地选择避障系统的搭配使无人机的载重量和照片成像准确度得到合理的平衡, 并且能更准确实时地进行避障动作, 实现无人机自主起降、超视距测控、自主避障飞行和自主完成巡视, 提高工作效率和故障的识别度, 是电网监

控、巡检手段上的一次重大革新。

## 参考文献

- [1] 林韩, 林朝辉, 汤明文, 等. 电力输电线路无人直升机巡视的应用 [J]. 华东电力, 2011, 39 (10): 1657-1660.
- [2] 王泽忠, 全玉生, 卢斌先. 工程电磁场 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2011.
- [3] 赵博, 张洪亮, 等. Ansoft 12在工程电磁场中的应用 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.
- [4] 郑天茹, 王滨海, 刘浪, 等. 电力巡线无人直升机障碍规避系统 [J]. 山东电力技术, 2012 (1): 14-17.
- [5] 李旭, 宋珺. 1 000 kV交流特高压输电线路电场仿真分析 [J]. 南京工程学院学报: 自然科学版, 2011, 9 (2): 17-21.

(收稿日期: 2015-02-01) EA