

特高压直流输电电场对高海拔无人机的影响及屏蔽技术

杨 扬 马 创

(中国南方电网有限责任公司超高压输电公司大理局, 云南大理 671000)

摘 要 综合利用仿真分析法和现场试飞法, 设计一种适用于高海拔地区特高压直流输电线路巡检无人机的电场屏蔽技术。该研究比较 9 种网状屏蔽层方案, 对其屏蔽能力和重量等因素进行综合比较, 设计试飞试验并比较分析无人机的留空时间等性能, 发现网丝间距 5mm 网丝直径 1.2mm 的屏蔽层适用于该设计需求。且可以确保无人机在低温低气压的高海拔巡航需求下, 巡航能力得到基本保障。

关键词 特高压直流输电; 电场屏蔽; 无人机; 输电巡检; 巡航能力;

中图分类号 TM425 文章标识码 A

Influence of UHVDC Electric Field on High Altitude UAV and Shielding Technology

Yang Yang¹; Ma Chuang¹

(Dali Bureau, CSG EHV Power Transmission Company, Yunnan Dali, 671000)

Abstract An electric field shielding technology for UHVDC transmission line inspection UAV in high altitude area is designed by using simulation analysis method and field flight test method. In this study, nine kinds of mesh shielding schemes are compared, and the shielding capacity and weight are comprehensively compared. The flight test is designed and the performance of UAV, such as the space time, is compared and analyzed. It is found that the mesh spacing of 5mm and the mesh diameter of 1.2mm is suitable for the design requirements. And it can ensure that the cruise capability of UAV is basically guaranteed under the high altitude cruise demand of low temperature and low pressure.

Key words UHVDC Transmission; Electric Field Shielding; UAV; Transmission Inspection; Cruise Capability;

我国西电东输工程的电源地中, 大部分位于第二阶梯的云贵高原、黄土高原等地区, 少部分位于第三阶梯的青藏高原及昆仑山地区, 所以, 罗志勇(2021)等发现, 大部分线路的初期布设面临着在 3000 米以上(少量在 4500 米以上)高原地区的地理环境, 低气压和低气温对无人机性能带来消极影响^[1]。刘占双(2021)等认为, 在此地区巡线无人机的运行环境较为恶劣, 超高压直流输电电场对其干扰作用表现更为剧烈^[2]。

高健(2020)等采用起飞重量更大的无人机系统携带更多屏蔽设备以平衡电场干扰带来的不良影响, 但也造成了一定程度资源浪费^[3]。涂苏格(2020)等对高海拔无人机进行集约化设计, 研究无人机在高海

拔地区条件下的最小起飞重量, 合理分配其有效载荷, 是当前相关研究的重点方向^[4]。

刘建冰(2020)等通过数据仿真方式对特高压直流输电电场在高海拔地区对无人机的影响进行研究, 以发现其作用机理并研究相关屏蔽技术, 该研究实现高海拔无人机应用设计中的量化分析^[5]。所以, 本文研究较之前研究采用了更多仿真过程, 更注重相关数据表现, 并在最小增重条件下实现足够满足电场屏蔽需求的屏蔽效果。

1 特高压直流输电电场的仿真表达

海平面的气压约为 101.3kPa, 海拔 4000 米的高原气压数值约为 56.04kPa。高海拔地区的气压较低,

大气密度较低,无人机旋翼的气动性能下降。因为高海拔产生的气动性能变化和滞空能力变化将在后续章节分析,该章节重点分析无人机在强电场中运行可靠性诱因,即高海拔地区的低气压状态对电场梯度的影响^[6]。

在电力 CAE 环境下加载 SimuLink 仿真组件,对某双回路共塔 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电线路的周围激发电场分布情况进行分析,得到图 1。

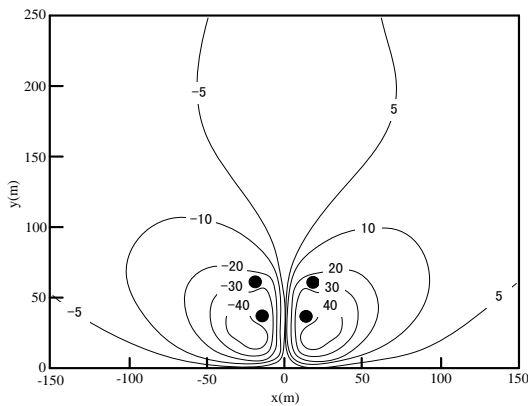


图 1 常规状态下双回路共塔 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电线路周围电场仿真结果

图 1 中,高压线塔以下部分场强梯度变化较为剧烈,其两侧及上部场强梯度变化略显平缓。场强电压方面,距离线塔两侧 100m 范围内,可能存在 $\pm 10\text{kV}$ 的静态电场,而其上空 250m 范围内及两侧 $\pm 150\text{m}$ 范围内,均可能存在超过 $\pm 5\text{kV}$ 静态电场。所以,无人机巡航抵近至上空 250m 高度范围内且两侧接近 $\pm 150\text{m}$ 范围内,需要具有抵抗 $\pm 5\text{kV}$ 静态电场的的能力,最大耐受场强梯度为 1.6kV/m 。

极端气象状态下,当出现高湿低压条件或存在雷雨条件时,无人机的高海拔飞行过程不但遇到常规条件下的低气温低气压影响,且雷雨天气本身的短时低气压表现及静电场扰动也会该来更消极影响。该静电场可能被严重扰动,导致大气电阻率下降,电场强度影响范围扩大^[7]。在上述仿真环境下对上述一般架构的 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电线路进行极端气象条件下的仿真分析,选取较为极端条件下的电场分布情况,得到图 2。

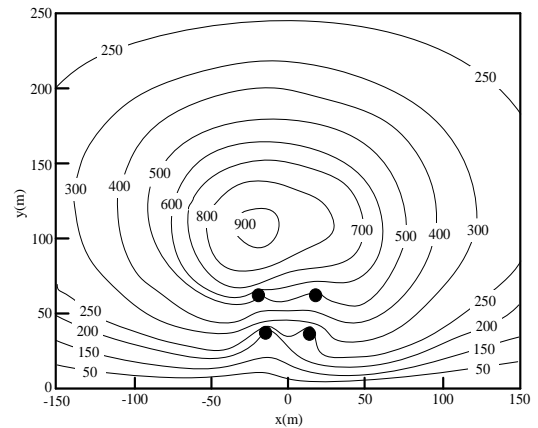


图 2 极端状态下双回路共塔 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电线路周围电场仿真结果

图 2 中,发电大气静电场在特高压输电线路上方形成汇集,且因为其中央场强大于线路电压,导致线路周边静电场分布情况转化为以大气静电场为主,以输电线路静电场为辅的分布情况。此处有两个统计学表现:①特高压输电线路在大气静电场基础上形成导体效应,改变了大气静电场的分布条件;②特高压输电线路对大气静电场的作用能力低于特定环境下大气自身静电场,此时电场场强梯度约为 $5\sim 7\text{kV/m}$ 。因为此时气象天候较为复杂,可能受到雷击、降水等影响,所以常规巡线过程中不在此时安排无人机飞行,但考虑到无人机巡线过程中可能遇到突发恶劣天候,所以无人机短时场强梯度抵抗能力应超过 $5\sim 7\text{kV/m}$ 。

2 无人机屏蔽模式设计

该研究选择的无人机机型为某品牌重载四旋翼电动无人机,对阵 4 主旋翼轴间距为 2.2 米,最大载重 60kg,平原地区经济巡航高度最大 800m,4000m 海拔经济巡航高度最大 200m,4000m 海拔持续巡航时间为 45min,最大平飞速度为 12m/s ^[8]。该机型主控舱(含电池舱)为近圆柱体,直径 450mm,高度 320mm,下部起落架之间挂载仪器舱,为 $220 \times 280 \times 320\text{mm}$ 立方体吊舱最大空间,吊舱最大容积 19000cc,最大载重需控制在 60kg 以内^[9]。

该屏蔽层设计中,考察主控舱屏蔽罩和仪器舱屏蔽罩的设计,采用网格状高导电率铜合金屏蔽网,材料密度 6.37g/cm^3 ,测试不同网格密度和不同网丝直径对屏蔽效果的影响^[10-11]。网格密度和网丝直径对屏

蔽效果均有相对独立的影响, 网格密度降低会降低屏蔽网对电磁能的吸收能力, 网丝直径减小会减少屏蔽网的储能能力, 但增大网格密度和网丝直径会增加屏蔽层重量, 降低无人机的续航能力, 所以需要设立不同的屏蔽层选型方案, 在实际试飞中进行比较分析^[12-14]。

该设计在网格密度方面选择 8mm、5mm、3mm 三种选型, 在网丝直径方面选择 1.8mm、1.2mm、0.6mm 三种选型, 共同组成 9 种屏蔽层选型, 此时因为上述 2 个屏蔽区总表面积为 0.813 平方米, 所以可以计算其总重量, 得到表 1。

表 1 不同选型条件下的屏蔽层重量试算结果表 (单位: kg)

网格密度 \ 网丝直径	1.8mm	1.2mm	0.6mm
3mm	8.781	3.903	0.976
5mm	5.269	2.342	0.585
8mm	3.345	1.464	0.366

表 1 中, 网丝直径 1.8mm 且网格密度为 3mm 条件下, 平均每平方米含网丝长度为 666.67m, 屏蔽层重量为 8.781kg, 为上述网格密度和网丝直径各 3 种选型得到 9 种屏蔽方案中最重屏蔽层重量, 网丝直径 0.6mm 且网格密度为 8mm 条件下, 平均每平方米含网丝长度为 250.00m, 屏蔽层重量为 0.366kg, 为上述网格密度和网丝直径各 3 种选型得到 9 种屏蔽方案中最轻屏蔽层重量。

该型无人机最大起飞重量为 2070kg, 设计最大有效载重为 60kg, 因为该屏蔽层为加装系统, 所以其占用设计最大有效载重资源。同时, 最大屏蔽层重量为最小屏蔽层重量的 23.99 倍。在最大屏蔽层重量条件下, 屏蔽层重量在最大起飞重量中占比为 0.43%, 在最大有效载重中占比为 14.64%; 在最小屏蔽层重量条件下, 屏蔽层重量在最大起飞重量中占比为 0.02%, 在最大有效载重中占比为 0.61%。考虑到加装机载系统 (包括倾斜摄影 4 通道摄像头和激光点云探头) 的总重量在 50kg 以内, 上述 9 套方案均可满足该型无人机的改装需求。

3 各型屏蔽层的实际屏蔽效果仿真分析

屏蔽层采用导体空腔屏蔽原理, 即利用导体外壳

提供的导电层使处于电场梯度内的导体空腔两侧电场强度得到有效平衡, 最终确保空腔内电场强度被有效控制。因为前文图 1 及图 2 中仿真分析得到, 该系统常规运行状态最大场强梯度为 1.6kV/m, 极端环境下短时处于 5~7kV/m 复杂场强梯度环境中, 所以, 研究 9 套方案在 1~7kV/m 场强梯度环境中的屏蔽效果, 仿真环境同样采用电力 CAE 软件平台下加载的 SimuLink 仿真组件环境^[15-17]。该仿真结果如图 3。

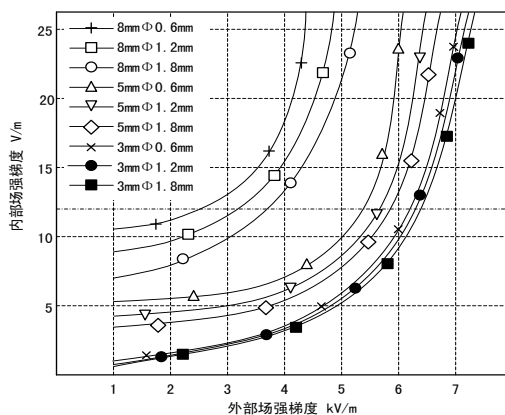


图 3 各型屏蔽层的实际屏蔽效果仿真分析结果图

图 3 中, 9 个方案的实际仿真曲线并无交叉, 自上而下分别为 8mmΦ0.6mm 方案、8mmΦ1.2mm 方案、8mmΦ1.8mm 方案、5mmΦ0.6mm 方案、5mmΦ1.2mm 方案、5mmΦ1.8mm 方案、3mmΦ0.6mm 方案、3mmΦ1.2mm 方案、3mmΦ1.8mm 方案, 9 条曲线共形成 3 个聚类群, 分别沿网格密度的 8mm、5mm、3mm 形成数据聚类, 且网格密度越稀疏, 网丝直径对其屏蔽能力影响越大, 网格密度越紧凑, 网丝直径对其屏蔽能力影响越小。同时, 可以发现上述曲线分布情况, 屏蔽能力较强的屏蔽层设计方案屏蔽效果更好, 该网格状屏蔽层设计思路中, 屏蔽层屏蔽能力与其重量呈正比关系。

拆解分析无人机中线路板结构, 其中最大线路板尺寸为 200mm, 因为其供电 VCC 至信号地 GND 之间的设计电势差为 12V, 认为其内部电场梯度对线路板干扰达到 2.4V 时, 信噪比达到 25%, 系统运行将进入到不稳定状态, 所以, 其内部场强梯度不能超过 12V (在图 3 中使用点划线表示), 所以, 在重量最轻的 8mmΦ0.6mm 方案下, 当无人机飞行到外部场强梯度 2.45kV/m 环境下时, 无人机将受到较严重干

扰,而重量最重的 $3\text{mm}\Phi 1.8\text{mm}$ 方案下,当无人机飞行到外部场强梯度 6.42kV/m 环境下时,无人机将受到较严重干扰。考虑到无人机将面临的最大的外部场强梯度应达到 5kV/m 以上,只有 $5\text{mm}\Phi 1.2\text{mm}$ 方案、 $5\text{mm}\Phi 1.8\text{mm}$ 方案、 $3\text{mm}\Phi 0.6\text{mm}$ 方案、 $3\text{mm}\Phi 1.2\text{mm}$ 方案、 $3\text{mm}\Phi 1.8\text{mm}$ 方案等5套方案可以满足该电场屏蔽需求。而晴天条件下,其外部电场环境最大场强梯度为 1.6kV/m ,此时除 $8\text{mm}\Phi 0.6\text{mm}$ 方案外,其他8套方案均可满足电场屏蔽需求。所以,选择可以适应场强屏蔽外部环境的最轻屏蔽层设计方案,即 $5\text{mm}\Phi 1.2\text{mm}$ 方案。

$5\text{mm}\Phi 1.2\text{mm}$ 方案中,屏蔽网网丝间距为 5mm ,网丝直径为 1.2mm ,屏蔽层总重量为 2.342kg ,屏蔽层重量占改型无人机最大起飞重量的 0.11% ,占最大有效载重重量的 3.90% 。

4 经优选屏蔽层在不同高原环境下的适应性结果

高海拔高原环境与低海拔平原环境的最大区别在于低气温和低气压。根据该研究所在地区气象局历史数据,该地区最低气温常年稳定在 $-22\text{℃}\sim-26\text{℃}$ 之间,最高气温稳定在 $8\text{℃}\sim 12\text{℃}$ 之间。冬季日平均气温低于 -10℃ 时间为平均每年 67.2 天,日平均气温低于 0℃ 时间为平均每年 99.6 天,而区域晴天天气平均气压为 994.7hPa ,为海平面理论气压 1013hPa 的 98.12% 。

低气压导致旋翼动力性能下降,无人机巡航时平均能耗增加,低气温导致电池工作效率下降,无人机可用电力和电池最大输出功率下降,二者均可导致无人机巡航能力显著低于设计巡航能力。本次实地悬停能力试验的现场实测气压为 56.8kPa ,试验场海拔为 4103m ,该气压为该试验场常见气压。

使用该型无人机进行实地程序悬停飞行试验,悬停高度为 6.0m ,无人机采用程序控制GPS定点悬停技术,悬停过程无人操作,实验中挂载电力线路巡检时使用的4通道倾斜摄影探头和单通道激光点云探头,探头重量 43.1kg 。试验场常年日平均气温约为 $-25\text{℃}\sim 10\text{℃}$,考察该区间不同温度条件和不同气压条件下无人机最大悬停时间,得到表2。

表2 不同气温条件下无人机悬停能力结果(单位: min)

气温	未加装屏蔽	已加装屏蔽	设计参数
10℃	58.4 ± 6.7	55.3 ± 6.2	60
0℃	52.8 ± 6.3	50.8 ± 5.9	55
-10℃	47.2 ± 5.6	42.7 ± 5.1	50
-20℃	37.7 ± 4.8	31.3 ± 4.2	40
-25℃	16.2 ± 2.9	12.4 ± 2.4	20

表2中,未加装屏蔽客体时,无人机的实际悬停时间较设计参数已经有一定程度下降,分析其主要原因,应是高原低气压环境导致的无人机实际运行功率大于设计功率,而加装屏蔽层($5\text{mm}\Phi 1.2\text{mm}$ 方案)导致系统重量较未加装屏蔽层增加 2.342kg ,因为该试验中探头载荷重量为 43.1kg ,所以,未加装屏蔽层和已加装屏蔽层的重量偏差为 5.43% ,而加装屏蔽层后,考察的5种温度环境下,无人机的实际悬停时间分别减少 5.31% 、 3.79% 、 9.53% 、 16.98% 、 23.46% ,可见,更低温度下,增重 2.342kg 对无人机悬停时间的影响呈现持续放大关系。且加装屏蔽层对无人机高原环境运行的影响除增重外,还有以下2点影响:

1) 加装屏蔽层对无人机气动外形产生影响

因为该型无人机的主控舱设计了碳纤维外壳,且主控舱屏蔽层安装在碳纤维外壳内侧,所以该部分屏蔽层对无人机的气动外形产生的影响可忽略,但载荷部分悬挂于起落架之间,安装屏蔽层后,会影响到该部分挂载设备的气动外形,且其网状结构容易形成湍流,降低无人机下部气流的辅助升力效应。该影响模式导致无人机旋翼的实际运行功率进一步增加,缩短了其悬停时间。

2) 加装屏蔽层对无人机配重结构产生影响

该方案屏蔽层总重量为 2.342kg ,其中主控舱部分重量占总屏蔽层重量的 92.77% ,安装屏蔽层后,无人机整体重心略有上升,导致无人机主控软件在进行无人机姿态平衡时,效率略有下降,从而导致无人机在程序控制自动定位和自动姿态保持过程中的用能效率有所下降,导致能耗略有增加,缩短了其悬停时间。

所以,加装屏蔽层不可避免导致无人机的重量增加,进而导致能耗增加。在无法升级电池系统的前提下,后续研究可通过适当升级其软件算法,可在一定

程度上缓解加装屏蔽层对无人机悬停能力和续航能力的影响。缩小内部元件尺寸也可以减少无人机受到的静态电场干扰。

5 总结

该研究对无人机在 4000 米海拔的高海拔强电场运行环境的屏蔽层进行了集约化设计,在 9 套备选屏蔽层方案中,选择网格网丝间距 5mm、网丝直径 1.2mm 的网状屏蔽层,使无人机在 1.6kV/m 常规巡航条件下,极端气象天候条件下,该屏蔽层可确保无人机在 5kV/m 外部场强环境下安全飞行且保证其最大尺寸线路板受到的最大场强干扰小于 2.4V。后续研究中,缩小内部元件尺寸、优化无人机控制软件算法,均可使无人机的电磁屏蔽能力和强电磁屏蔽需求下的悬停能力、留空能力得到提升。

参考文献

- [1] 罗志勇,熊勇良,叶涛,李华春,陈宁.适用于高海拔地区输电线路巡检的无人机测试分析[J].中国设备工程,2021(02):148-149.
- [2] 刘占双,赵云龙.高海拔地区无人机巡线与紧急情况应对技能强化模拟系统研究[J].电子元器件与信息技术,2021,5(01):85-86.
- [3] 高健,唐占元,安之焕,殷万玲,卢志超,陈杰,范庆虎.无人机摄影测量用于高海拔电力工程的探索与设想[J].青海电力,2020,39(04):52-55.
- [4] 涂苏格,陈洁,余艺娟,陈晨.高海拔地区无人机巡检系统技术条件研究[J].湖北电力,2020,44(06):75-80.
- [5] 刘建冰,杨洪,翁小又.无人机安全巡检和大数据建模分析在移民代建工程安全管理的应用研究[J].水电站设计,2020,36(04):74-78.
- [6] Aviation - Unmanned Aerial Vehicle; Reports Outline Unmanned Aerial Vehicle Findings from Zhejiang University of Technology (Resource Optimization In Anti-interference Uav Powered Cooperative Mobile Edge Computing Network)[J].Defense & Aerospace Week,2020.
- [7] Sensor Research; Studies from Northwestern Polytechnic University Yield New Information about Sensor Research (An Anti-Interference Scheme for UAV Data Links in Air-Ground Integrated Vehicular Networks)[J]. Technology News Focus,2020.
- [8] 徐兹正,张金良,杨风学,王潇.在高海拔地区实施航空摄影测量的关键技术[A].中国石油学会石油工程专业委员会地面工程工作部石油天然气勘察技术中心站.石油天然气勘察技术中心站第二十八次技术交流研讨会论文集[C].中国石油学会石油工程专业委员会地面工程工作部石油天然气勘察技术中心站:中国建筑学会工程勘察分会,2020:5.
- [9] Sensor Research; Researchers at Northwestern Polytechnical University Detail Findings in Sensor Research (An Anti-Interference Scheme for UAV Data Links in Air-Ground Integrated Vehicular Networks)[J]. Journal of Technology,2020.
- [10] Weidang Lu, Xiaohan Xu, Fangwei Lu, Hong Peng, Bo Li, Gongliang Liu, Yi Gong. Resource optimization in anti-interference UAV powered cooperative mobile edge computing network[J]. Physical Communication,2020,42.
- [11] Yixin He, Daosen Zhai, Ruonan Zhang, Xiaojiang Du, Mohsen Guizani. An Anti-Interference Scheme for UAV Data Links in Air - Ground Integrated Vehicular Networks [J]. Sensors,2019,19(21).
- [12] 陈思思,赵桢,周云波,沈富强.航摄固定翼无人机性能提升改造研究及实现[J].测绘与空间地理信息,2020,43(10):28-32.
- [13] 邝磊.低空微型智能一体化无人机的安全航拍实测分析[J].科技传播,2020,12(18):167-170.
- [14] Jia Yinsen, Tu Xinqi, Yan Wei, Wang Enrong, Zhao Yang, Ding Shuqing. Study on the Influence of Electromagnetic Pulse on UAV Communication Link[J]. American Journal of Electrical and Electronic Engineering, 2019,7(2).
- [15] 李磊,张涛,王玉红,赵亮,李鹏飞,吴春伟,葛浩,陈德本.不同类型无人机在新疆南疆地区进行自然资源调查效果的对比研究[J].新疆有色金属,2020,43(04):34-35.
- [16] 刘铭扬,李红梅,孙炜.倾斜摄影测量技术在高海拔公路测量中的应用[J].路基工程,2020(03):185-189.
- [17] 刘娟,丑一帆.无人机技术在第三次全国国土调查外业举证中的应用研究[J].甘肃科技,2020,36(09):27-28+6.
- [18] Qibao Shu, Pu Yang, Yuxia Wang, Ben Ma. Fault Tolerant Predictive Control Based on Discrete-Time Sliding Mode Observer for Quadrotor UAV[J]. Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics, 2018,22(4).