

DOI: 10.13382/j.jemi.B2003104

无人机天线在雷电效应中的响应研究及性能检测^{*}

陈 旸¹ 何 征² 吕 弘¹ 康 华²
(1. 南京模拟技术研究所 南京 210016; 2. 西安爱邦电磁技术有限责任公司 西安 710077)

摘 要:机载天线安装在无人机表面,容易成为雷电附着点,对无人机的飞行安全会产生严重威胁。为开展相关设计,并验证设计的有效性,针对 UHF 机载天线为研究对象,设计了片段式导流条和端口射频雷电抑制器的防护方案。先后进行了初始先导附着试验、外部部件瞬态感应试验、电性能测试和系统评估计算。试验结果表明,天线损伤程度降低,片段式导流条对天线的电性能影响不超过 0.3 dB,射频雷电抑制器不影响驻波比、增益。最终链路余量满足大于 3 dB 的要求,证明了设计的有效性。
关键词:无人机;雷电效应;天线;片段式导流条;射频雷电抑制器
中图分类号: TN99 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 590.50

Research on response and performance test of UAV antenna in lightning effect

Chen Yang¹ He Zheng² Lyu Hong¹ Kang Hua²
(1. Nanjing Research Institute on Simulation Technique, Nanjing 210016, China;
2. Xi'an Airborne Electromagnetic Technology Co., Ltd., Xi'an 710077, China)

Abstract: Airborne antenna installed on the surface of UAV is easy to become a lightning attachment point. Lightning will pose a serious threat to the flight safety of the UAV. The purpose is to carry out the relevant design and verify the effectiveness of the design. A UHF airborne antenna is against to the research object. The segmented lighting diverter strips and RF port lightning suppressor were designed for protection. The initial leader attachment test, the induced transients in external mounted hardware test, the electrical performance test and the system evaluation calculation were successively carried out on the antenna to study the effect response of the antenna in different lightning environments. The test results show that damage is reduced. In addition, the influence of the installation of the segmented lighting diverter strips on the electrical performance of the antenna was 0.3 dB at most, and the RF lightning suppressor will hardly affect the SWR and gain. Finally, the link margin meets the requirement of more than 3 dB. The effectiveness of the design was proved.
Keywords: UAV; lightning effect; antenna; segmented lighting diverter strips; RF lightning suppressor

0 引 言

随着装备面临的电磁环境效应日趋复杂,无人机这一新的作战平台也必须解决诸如雷电等强电磁环境引起飞行安全和性能下降等问题^[1-3]。雷电是一种破坏力巨大的自然现象,所产生的效应也是直接威胁无人机飞行安全的主要自然因素之一。雷电对机载

天线的直接效应,以及对机载设备各层级的间接效应亦会通过电磁环境耦合并干扰。若能解决无人机天线遭受雷电直接打击和间接感应干扰的问题,将可以提升无人机对复杂自然环境和电磁环境的适应能力,降低飞行风险,拓宽任务剖面,具有十分重要的工程实践意义。
文献[4]研究了雷电对无人机产生的损伤形式,并对我国无人机雷电防护工作提出了建议。文献[5]通过

高峰值雷电脉冲试验检验了无人机系统的安全可靠性,证明磁场效应会导致无人机出现敏感现象。文献[6]以某型甚高频(VHF)通信电台为试验对象开展了雷电效应试验及失效分析。文献[7]使用 COMSOL 软件获得了纽扣式分流条布局对天线罩雷电防护能力的影响规律,为机载天线罩防雷设计和优化提供参考。文献[8-10]是国外学者对航空器雷电附着点分布和雷电流通路计算的研究。文献[11]使用了 CST 软件对飞机雷电分区做了仿真和防护策略分。文献[12-14]是美国有关航空器雷电试验要求和方法。以上国内外研究成果从系统论证、仿真计算和设计验证等角度提供了技术参考,为本文的分析设计和性能验证提供了思路和借鉴。但缺少系统地分析和阐述验证无人机测控系统在防护加固设计后测控系统,特别是天线有何性能变化,如何证明功能未受影响。

为了兼顾雷电防护效果和工程应用实际,并通过试验和计算,分析验证雷电防护措施对功能性的影响程度。本文选择某型无人机测控系统为研究对象,对其天线采取防护措施,并开展系列验证试验,最终结合整机的仿真和测试结果证明防护设计的有效性和可操作性。

1 雷电效应影响分析及措施

1.1 效应分析

研究对象所处位置和系统组成决定了直接遭受或间接感应雷电效应的严酷等级、失效机理和验证方法。本文设计和性能验证的研究对象为某型无人机 UHF 天线及其所属的测控系统。

图 1 所示为 UHF 天线及其周边蒙皮遭受雷电击中后存在的失效机理传递图。外露天线直接遭受雷电击中,天线结构会因此受损。天线周围蒙皮将直接遭受雷电击中,雷电流通过射频馈线与机载电台相关联的射频端口间接耦合,干扰电流超过端口防护阈值,则影响测控系统正常工作,严重的会造成相关回路的设备永久损坏。基于该失效机理传递关系,本文重点就天线外表面,及其馈线引入雷电流采取防护措施,并通过系列试验验证性能。

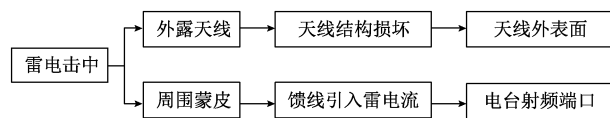


图 1 失效机理传递图

Fig. 1 Failure mechanism flow chat

1.2 天线表面防护设计

天线防护因遵循以下原则:不能影响无人机气动外形;不能影响天线原本电性能指标,如天线方向性图、增益等;重量轻且安装方便、可靠,具有良好维修性;能多次承受最大 200 kA 雷电流冲击。本文研究的 UHF 天线位于整机雷电分区的 1 A 区,为保证天线遭受雷电直接击中后不损坏,选取了 ABLDS-02-A01 型片段式导流条安装在天线表面。导流条由天线顶端延伸至底部,与固定螺钉连接,形成雷电传导通道如图 2 所示^[15-16]。

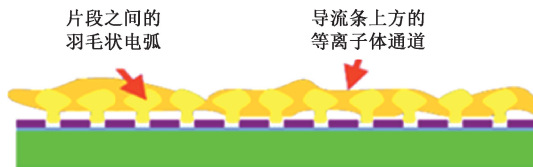


图 2 导流条原理

Fig. 2 Diverter strips schematic diagram

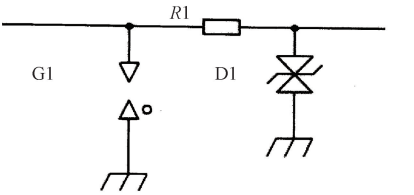
1.3 馈线端口防护设计

天线馈线与机载电台的射频端口相连接,为了降低馈线引入雷电流干扰的幅值,防护设计采用了图 3(a)所示的电路,其中 G_1 是 PT640TA 型半导体放电管, R_1 是抗浪涌磁珠, D_1 是 SMCJ7.5CA 型瞬态抑制二极管。由于半导体放电管的响应时间比瞬态二极管慢,当有雷电流耦合进天线端口时, D_1 最先导通,帮助雷电流泄放至接地端。若雷电流过大, D_1 不足以泄放电流时, G_1 因为 R_1 的限流作用而早于 D_1 的导通,提升了抑制电路的雷电流泄放能力和残压抑制能力^[17-19]。同时如图 3(b)和(c)所示,该抑制器在 500 MHz~1 GHz 频率范围内驻波比小于 1.5:1,插入损耗小于 0.5 dB,最大耐受超过 200 W 功率,雷电流通流容量 10 kA。

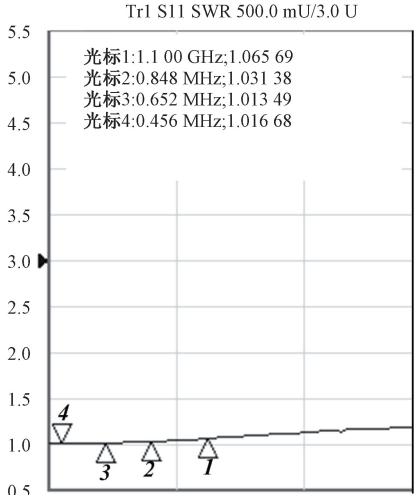
2 初始先导附着试验

初始先导附着试验用于验证天线防护前后的外表面的响应效果。试验布置如图 4 所示,将天线安装到模拟蒙皮上,确保天线与蒙皮可靠搭接,模拟蒙皮固定在绝缘台上。雷电注入采用平板电极,电极距离天线距离 1 m,平板电极要足够大,避免发生边缘放电。试验波形如图 5 所示,选取 SAE ARP 5412B 中规定的电压波形 A,该波形平均上升率为 1 000 kV/ μ s $\pm$ 50%,直到试验件击穿或闪络时电压跌到 0。

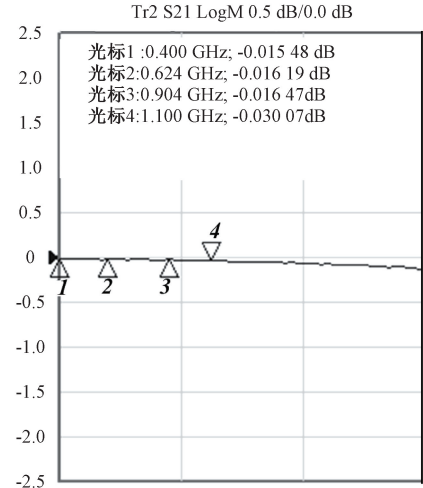
安装了片段式导流条的试验放电瞬间和试验后天线情况如图 6 所示。导流条由天线顶端延伸至底部,并与固定螺钉连接,形成雷电传导通道,发生雷击时,相邻金属片段两端开始聚集大量电荷,并产生羽毛状的电弧,片段便会击穿上方空气,形成等离子体通道,雷电流可以经



(a) 原理电路
(a) Schematic circuit diagram



(b) 驻波比测量结果
(b) SWR result



(c) 插入损耗测量结果
(c) IL result

图 3 端口防护设计

Fig. 3 Port protection designed

过此通道,传导到安全的地方,防止天线损伤。试验后检查 UHF 天线未出现明显损伤情况。

对比试验的放电瞬间和试验后天线情况如图 7 所示。由于缺少导流条的引流,天线直接成为雷电附着点,雷电电弧附着于天线顶端,之后击穿天线表面,通过内部天线到达模拟蒙皮。雷电对天线外蒙皮造成了严重的损伤,附着位置出现穿孔,并且天线罩开裂。初始先导附着

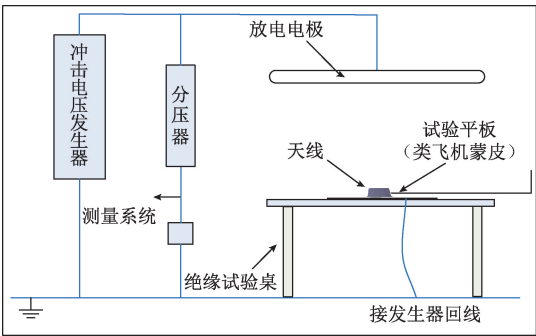


图 4 初始先导附着试验

Fig. 4 The initial leader attachment test

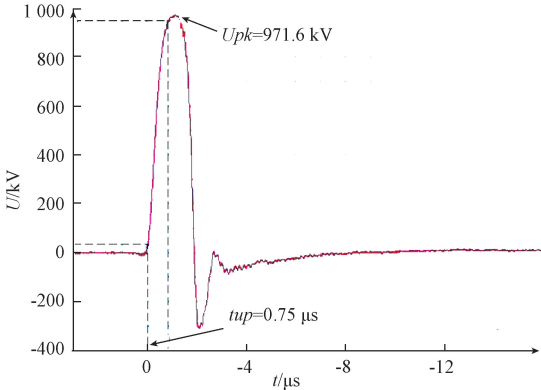


图 5 A 波注入波形

Fig. 5 Injection wave A

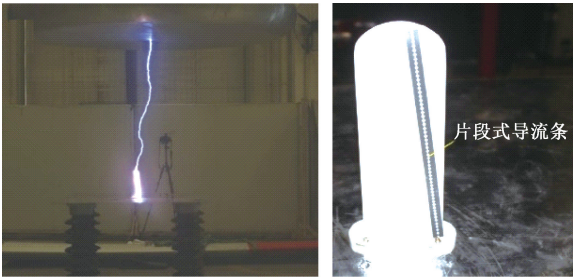


图 6 安装导流条的结果

Fig. 6 The result of the segmented lighting diverter strips

试验为高电压试验,试验过程中电流较小,如果是在真实条件下,天线产生的破坏会远远超过该损伤。由此验证了天线表面防护设计有效。

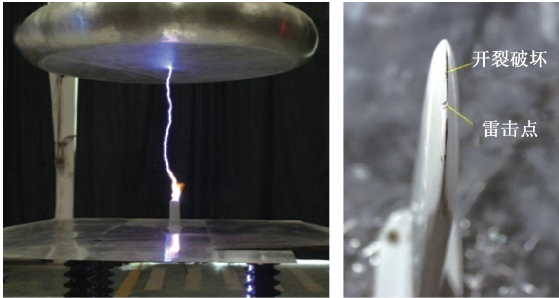


图 7 对比试验后天线损伤情况

Fig. 7 The damage result after contrast test

3 外部部件瞬态感应试验

本试验用于测量馈线端口感应电压,并通过对比感应电压和射频雷电抑制器标称能力,来验证馈线端口防护设计有效性。

试验布置如图 8 所示,试验时将天线固定在模拟蒙皮上,确保天线与蒙皮可靠搭接,蒙皮置于屏蔽箱上,天线电缆由屏蔽箱上方孔进入屏蔽箱,测量探头、示波器及电源均放置于屏蔽箱内,同时将电缆芯线与绝缘层剥离开,用来测量感应电压。

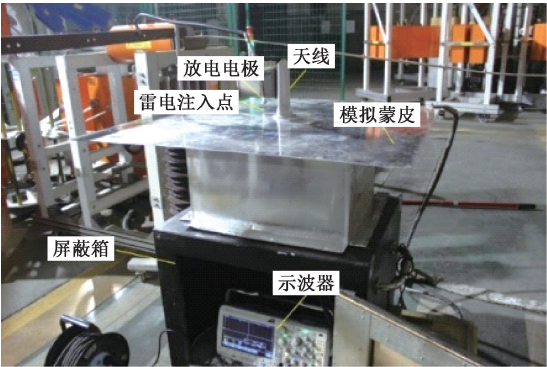


图 8 外部瞬态感应试验

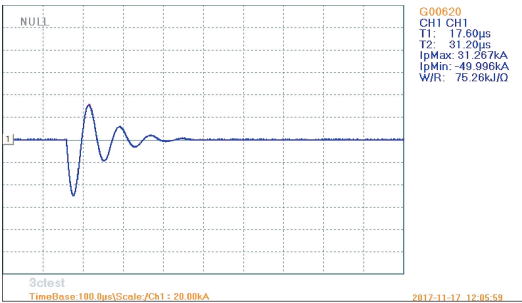
Fig. 8 The induced transients in external mounted hardware test

雷电注入点选择模拟蒙皮上方,注入电流为雷电分量 D ,第 1 次注入和监测电流波形如图 9 所示。注入波形呈现正弦振荡,第 1 个波峰电流最大值,数值为 -49.996 kA ,之后逐渐减小,在第 8 个振荡后衰减至 0,电流能量为 $75.26\text{ kJ}/\Omega$,感应电压波形与注入电流波形的振荡关系一致,并且在第 2 个振荡处感应电最大,感应电压为 10.10 V 。

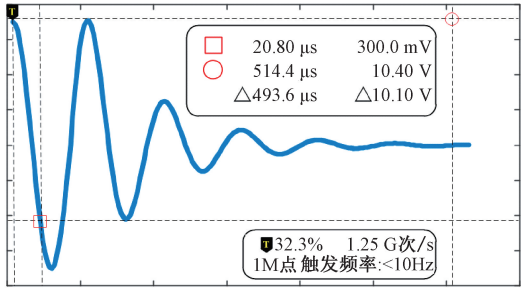
先后一共进行 6 次放电,示波器监测到感应电压值如表 1 所示。可以看出,注入电流强度越大,电压的感应值也越大。由于感应电压与电流峰值呈正线性关系,本次试验电流峰值为 50 kA 时,感应电压为 10 V ,对后端设备影响较小,但是当电流峰值增加至 200 kA 时,感应电压极有可能增加至 40 V 。由文献[17]可知,设计选用的射频雷电抑制器该器件对正弦振荡形态的雷电流波形残压抑制比为 $86:1$,可以对雷电流有效泄放,同时保证有用射频信号顺利通过。

4 天线电性能测量

本文在微波暗室中对 UHF 天线的驻波比、增益和 3 dB 波束宽度进行测量,比较防护措施前后的数值差别,以验证防护措施对天线电性能的影响程度。试验选



(a) 注入电流波形
(a) Injection current wave



(b) 感应电压波形
(b) Induced voltage wave

图 9 第 1 次波形

Fig. 9 The first time wave

表 1 外部部件瞬态感应试验结果

Table 1 The induced transients in external mounted hardware test result

次数	电流峰值/kA	作用积分/($\text{kJ} \cdot \Omega^{-1}$)	感应电压/V
1	-49.996	75.26	10.1
2	-49.809	75.31	9.7
3	-49.809	75.47	9.8
4	50.241	75.60	-10.3
5	50.710	75.24	-11.3
6	50.502	75.12	-10.5

择了 590、600 和 610 MHz 这 3 个无人机使用的典型频点。

图 10 所示为 H 面测试方向,表 2 为驻波比的测量结果,表 3 为增益的测量结果,表 4~6 为 3 dB 波束宽度测量结果。

表 2 驻波比测量结果

Table 2 SWR result

频率/MHz	未安装抑制器	安装抑制器
590	1.300 9	1.675 9
600	1.438 6	1.403 0
610	1.839 6	1.088 7

表 3 增益测量结果

Table 3 The gain result

频率/MHz	增益/dB	
	未安装导流条	安装导流条
590	3.94	3.69
600	3.52	3.33
610	4.06	3.77

表 4 水平面 $\theta=90^\circ$ 波束宽度测量结果

Table 4 BW ($\theta=90^\circ$) result

频率/MHz	波束宽度/($^\circ$)	
	未安装导流条	安装导流条
590	360	360
600	360	360
610	360	360

表 5 垂直面 $\varphi=0^\circ$ 波束宽度测量结果

Table 5 BW ($\varphi=0^\circ$) result

频率/MHz	波束宽度/($^\circ$)	
	未安装导流条	安装导流条
590	72.83	74.88
600	62.27	62.50
610	48.13	47.55

表 6 垂直面 $\phi=90^\circ$ 波束宽度测量结果

Table 6 BW ($\phi=90^\circ$) result

频率/MHz	波束宽度/($^\circ$)	
	未安装导流条	安装导流条
590	57.96	56.71
600	51.89	47.45
610	47.79	46.2

测量结果对比可知,安装抑制器后,天线驻波比发生了变化,但均符合驻波比 ≤ 2 的指标要求。安装导流条以后,天线增益略有降低,最大的降幅为 0.29 dB;从方向图上观察,大多数的角度二者曲线十分接近,甚至重合;水平面波束宽度未受导流条安装的影响,无差别;出现两个垂直面波瓣宽度出现不在 $42.5^\circ\pm 5^\circ$ 范围内的情况,是

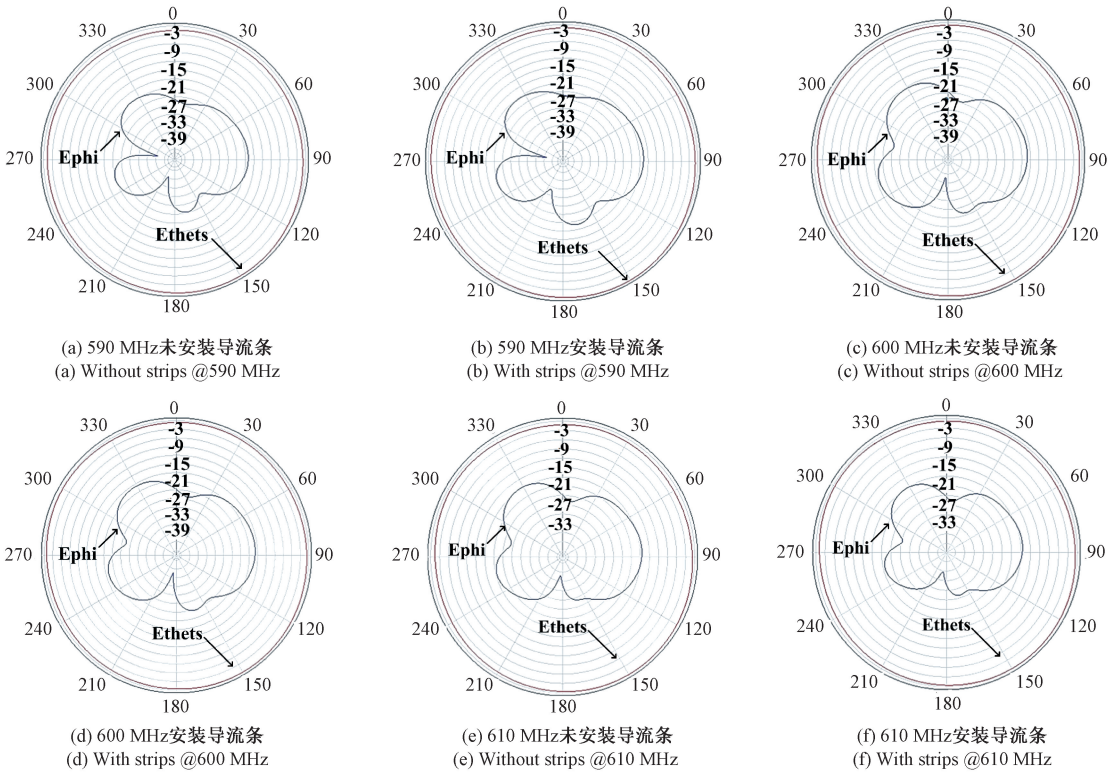


图 10 各频点 H 面方向

Fig. 10 H horizontal directional diagram in such frequency

受测暗室试环境的影响,由于摆放的位置不同,会导致波瓣宽度受到不同程度的影响,并且由于波瓣宽度的计算是一个绝对值,测试环境的变化对其数值影响较大,因此波瓣宽度的实测数值会与仿真以及指标要求有一定的差距属于正常的测试误差,仍然能够满足实际使用的需求。

由以上分析可知,片段式导流条几乎不会影响天线的电性能,最大影响不超过 0.3 dB,这是由于片段式导流条上金属片段之间存在间隙,导电通道处于断开状态,整个导流条属于绝缘体,独立的金属片段不会形成连续的

电流,同时金属片段的尺寸和形状也进行专门的设计,能最大限度适应天线的工作要求,因此对天线信号的干扰非常小。

5 系统联调评估

测控系统的链路余量是评估无人机和地面站通信性能的重要指标之一,它取决于收发天线的参数、自由空间损耗、波导损耗和天线适配损耗^[20-21]。

假设自由空间损耗为 L , 天线极化适配损耗为 L_{AP} , 发射机和接收机波导损耗为 L_{WG} , 定义 G_T 和 G_R 分别代表发射天线和接收天线的增益, S_R 为接收机灵敏度, P_T 为发射机全向功率, M 为测控系统的链路余量, 则该余量可表达如下:

$$M = P_T + G_T + GR - SR - L - LAP - LWG \tag{1}$$

式中: 自由空间损耗 L 与发射机和接收机的距离为 d , 工作频率为 f 有关, 具体为:

$$L = 32.44 + 20\lg f(\text{MHz}) + 20\lg d \text{ km} \tag{2}$$

当测控系统上行接收地面站通信数据时, 地面站为发射机, 机载电台为接收机; 当测控系统下行发送数据给地面站时, 机载电台为发射机, 地面站为接收机。表 7 为测控系统链路余量评估结果, 其汇总了前文各项测试数据、仿真数据和指标参数, 计算得出测控系统处于上行和下行工作状态时的链路余量均满足 $>3 \text{ dB}$ 的要求。

表 7 系统评估结果

Table 7 System assessment result

测控系统工作状态	上行	下行
发射机全向功率 P_T/dBm	43	30
发射天线增益 G_T/dBi	4	4.06
接收天线增益 G_R/dBi	3.52	4
接收机灵敏度 S_R/dBm	-106	-106
波导损耗 L_{WG}/dB	3	3
适配损耗 L_{AP}/dB	3.5	3.5
空间损耗 ^{a)} L/dB	134.02	134.02
余量 M/dB	16	3.54

注: a) 无人机和地面站最大距离 200 km

6 结 论

本文对某型无人机 UHF 天线及其周边蒙皮遭受雷电击中后存在的失效机理, 针对性的采取了设计措施, 分别进行了初始先导附着试验、外部部件瞬态感应试验、电性能测试和系统评估计算初始先导附着试验, 采样到雷电附着点在天线周围蒙皮时在射频馈线上产生的感应电压波形, 验证了天线罩表面安装片段式雷电导流条, 可以有效降保护天线, 防止其遭受雷击损伤。

同时, 并且通过测试结果证明本文选取的分片段式导流条对天线增益和方向性影响有限, 满足测控系统链路余量的要求。为更多的天线防雷设计和性能验证提供了实践借鉴。

参考文献

[1] 刘尚合, 刘卫东. 电磁兼容与电磁防护相关研究进展[J]. 高电压技术, 2014, 40(6): 1605-1613.
LIU SH H, LIU W D. progress of relevant research on electromagnetic compatibility and electromagnetic

protection[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(6): 1605-1613.
[2] 吴辉喜, 刘志培, 吴建波, 等. 战场复杂电磁环境下的无人机作战应用探讨[J]. 航空电子技术, 2013, 44(2): 1-3.
WU H X, LIU ZH P, WU J B, et al. Research on campaign application of UAV in complex electromagnetic environment[J]. Aeronautical Science and Technology, 2013, 44(2): 1-3.
[3] 彭宇, 史书慧, 郭凯, 等. 无人机飞控系统故障仿真及数据生成[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(7): 13-21.
PENG Y, SHI SH H, GUO K, et al. Fault simulation and data generation of UAV flight control system[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(7): 13-21.
[4] 何征, 谢冲, 熊秀, 等. 无人机雷电防护研究[J]. 飞机设计, 2018, 38(3): 42-47.
HE ZH, XIE CH, XIONG X, et al. Research of unmanned aerial vehicle lightning protection[J]. Aircraft Design, 2018, 38(3): 42-47.
[5] 张冬晓, 陈亚, 田庆民, 等. 某型无人机系统雷电脉冲磁场效应[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27(10): 103236-1-103236-6.
ZHANG D X, CHEN Y, TIAN Q M, et al. Lightning pulse magnetic field effects on UAV system[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015, 27(10): 103236-1-103236-6.
[6] 于新海, 马振洋, 史春蕾, 等. 机载 VHF 通信电台闪电间接效应试验与失效分析[J]. 电讯技术, 2018, 58(10): 1152-1157.
YU X H, MA ZH Y, SHI CH L, et al. Experiment study and failure analysis of lightning indirect effect of an airborne VHF communication station [J]. Telecommunication Engineering, 2018, 58(10): 1152-1157.
[7] 程凌云, 段泽民, 赵玉顺, 等. 纽扣式分流条布局对天线罩内雷电感应电场影响[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2019, 42(10): 1346-1352.
CHEN L Y, DUAN Z M, ZHAO Y SH, et al. Influence of button lightning diverter strips layout on lightning induced electric field in radome [J]. Journal of Hefei University of Technology (Nature Science), 2019, 42(10): 1346-1352.
[8] HEMA K S, A, DASGUPTA S. Non-destructive evaluation of lightning strike induced damages in sandwich composites for unmanned air vehicle structures[J]. The e-Journal of Nondestructive Testing, 2015, 20(6): 1435-4934.
[9] UMAN M A, LIN Y T, KRIDER E P. Errors in magnetic direction finding due to nonvertical lightning

- channels[J]. Radio Science, 2016, 15(1):35-39.
- [10] ABDELAL G F, MURPHY A. A multiphysics simulation approach for efficient modeling of lightning strike tests on aircraft structures [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2017, 45 (4): 725-735.
- [11] SONG S, GAO C, GUO Y, et al. Study of numerical simulation of aircraft lightning zoning based on CST software [C]. Second International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering, IEEE, 2011:4428-4431.
- [12] SAE ARP 5416A-2013 aircraft lightning test methods[S]. USA: SAE International, 2016.
- [13] SAE ARP 5412B-2013 aircraft lightning environment and related test waveforms [S]. USA: SAE International, 2013.
- [14] 陈奇平,方金鹏,王万富. 整机雷电间接效应防护试验的若干技术探讨[J]. 微波学报, 2012, 28(S3): 305-308.
- CHEN Q P, FANG J P, WANG W F. Discussion on aircraft lightning indirect effect test [J]. Journal of Microwaves, 2012, 28(S3):305-308.
- [15] 王铮勐,饶浩,梁显锋. 一种低成本高可靠无人机机载数据通信系统设计[J]. 电讯技术, 2018, 58(8): 970-975.
- WANG ZH M, RAO H, LIANG X F. Design of a low-cost high-reliability airborne data communication system for unmanned aerial vehicles [J]. Telecommunication Engineering, 2018, 58(8):970-975.
- [16] 刘涛,段雁超. 基于片段式导流条的机载天线防雷研究[J]. 无线互联科技, 2016(9):14-16.
- LIU T, DUAN Y CH. Research on lighting protection to the airborne antenna based on segmented lighting diverter strips [J]. Wireless Internet Technology, 2016(9): 14-16.
- [17] 翟毅,康华,熊秀,等. 机载设备射频雷电抑制器的小型化设计[J]. 电瓷避雷器, 2019(5):69-74.
- ZHAI Y, KANG H, XIONG X, et al. Miniaturization design of RF lightning suppressors for airborne equipment[J]. Insulators and Surge Attesters, 2019(5): 69-74.
- [18] 宋占海,王一芳. 对宽频同轴避雷器的设计方法研究[J]. 高压电器, 2011, 47(7):35-39.
- SONG ZH H, WANG Y F. Study on design method of broadband coaxial arrester [J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(7):35-39.
- [19] 高翔,颜伟. 某伺服系统传导噪声分析和处理[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(3):177-183.
- GAO X, YAN W. Investigation and reduction on conducted emi noise from one servo system [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2018, 32(3):177-183.
- [20] 李祥超,张其林,陈良英,等. 接收机耦合雷电电磁脉冲抑制方法的研究[J]. 电瓷避雷器, 2018(5): 39-49.
- LI X CH, ZHANG Q L, CHEN L Y, et al. Research on the suppression method of lightning electromagnetic pulse coupled by receiver [J]. Insulators and Surge Attesters, 2018(5):39-49.
- [21] 刘焱,苏东林,张恺,等. 系统级链路预算方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2013, 39(1):47-51.
- LIU Y, SU D L, ZHANG K, et al. System level link budget method [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2013, 39(1):47-51.

作者简介



陈旻, 2014 年于南京师范大学获得硕士学位, 现为南京模拟技术研究所工程师, 主要研究方向为无人机设计和电磁环境效应研究。

E-mail:15077867728@139.com

Chen Yang received his M. Sc. degree from Nanjing Normal University in 2014. Now he is an engineer in Nanjing Research Institute on Simulation Technique. His main research interests include UAV design and research on electromagnetic environment effect.