

文章编号: 1674-8190(2021)01-136-07

# 基于数值仿真的飞机雷电流传导通路评估方法

甄国帅, 臧家左, 祁雪峰

(沈阳飞机设计研究所 电磁环境效应航空科技重点实验室, 沈阳 110000)

**摘要:** 飞行器的雷电防护设计和验证是保障飞行员及飞机安全的必要措施, 尤其是随着雷电防护能力较差的复合材料广泛应用。复合材料对雷电流的传导能力远弱于金属, 需要为雷电流传导提供额外的通路。本文从国内相关研究极少提及的飞机内部结构电磁建模出发, 提出一套飞机内部结构的电磁建模及精度控制方法; 构建 F22 飞机左机翼到右机翼的内部金属结构作为雷电流传导通路, 基于通用电磁仿真软件进行飞机雷电间接效应仿真; 对复合材料蒙皮、金属网蒙皮、金属网蒙皮加内部金属结构三种情况下飞机内部的电磁场及线缆耦合仿真结果进行对比。结果表明: 合理的雷电流传导通路设计能够使飞机内部线缆感应的电流强度减半, 起到良好的雷电防护效果; 该评估方法适用于固定翼飞机的雷电流传导通路设计, 能够作为飞机机载设备雷电间接效应试验指标分配的参考依据, 便于定位飞机雷电间接效应防护的薄弱环节。

**关键词:** 雷电防护; 数值仿真; 传导通路设计

中图分类号: V244.1

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2021.01.018

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Evaluation Method of Aircraft Lightning Current Conduction Path Based on Numerical Simulation

ZHEN Guoshuai, ZANG Jiazuo, QI Xuefeng

(Aeronautic Science Key Laboratory Electromagnetic Environment Effects, Shenyang Aircraft Design & Research Institute, Shenyang 110000, China)

**Abstract:** The lightning protection design and verification of aircraft are necessary measures to ensure the safety of pilots and aircraft, especially with the poor lightning protection ability of composite materials. The conductivity of the composite is weaker than that of the metal, which needs to provide additional pathways for the lightning current conduction. Based on the electromagnetic modeling of aircraft internal structure rarely mentioned in domestic related research, a set of electromagnetic modeling and precision control method for aircraft internal structure is proposed, and the internal metal structure from left wing to right wing of F22 aircraft is constructed as lightning current conduction path. The indirect effect of aircraft lightning is simulated based on general electromagnetic simulation software. The simulation results of electromagnetic field and cable coupling in aircraft interior under three conditions of composite skin, metal mesh skin, and metal mesh skin with internal metal structure are compared. The results show that the reasonable lightning current conduction path design can reduce the current intensity induced by the cable inside the aircraft by half, and play a good lightning protection effect. The proposed evaluation method is suitable for the lightning current conduction path design of fixed wing aircraft, can be taken as the indexes distribution reference frame of aircraft airborne equipment lightning indirect effect test, and is convenient for locating the weak links of aircraft lightning indirect effect protection.

**Key words:** lightning protection; numerical simulation; conduction path design

收稿日期: 2020-10-04; 修回日期: 2020-12-23

通信作者: 甄国帅, lanyun0@163.com

引用格式: 甄国帅, 臧家左, 祁雪峰. 基于数值仿真的飞机雷电流传导通路评估方法[J]. 航空工程进展, 2021, 12(1): 136-142, 151.

ZHEN Guoshuai, ZANG Jiazuo, QI Xuefeng. Evaluation method of aircraft lightning current conduction path based on numerical simulation[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2021, 12(1): 136-142, 151. (in Chinese)

## 0 引言

飞行器不可避免的会遭遇雷击,巨大的雷电及电磁辐射能量使得飞行事故时有发生<sup>[1]</sup>,民航飞机的雷电防护有着严格的适航要求。雷电对飞行器的危害一般分为直接效应危害和间接效应危害。雷电直接效应危害可以根据 SAE ARP5416A 和 RTCA/DO-160G 通过部件级试验进行验证评估。雷电间接效应危害情形复杂,一般需要进行整机试验,确认机载系统与设备的防护指标,指标过低,飞行器的雷电防护设计存在安全隐患,指标过高,则要付出重量、体积和成本的代价。

为降低雷电间接效应危害,研究者开展了大量研究,一方面通过理论计算或整机试验,揭示飞机雷电电磁耦合的主要机制有开口耦合、扩散耦合及电流重分布等<sup>[2]</sup>;另一方面,研究者提出了飞机雷电耦合的主要波形类型、参量范围和防护手段等<sup>[3]</sup>。随着电磁仿真技术的发展,研究机构逐步具备模拟飞机雷电耦合、扩散和重新分布过程的能力<sup>[4]</sup>,依靠飞行器整机数字模型也可以进行雷电间接效应仿真及防护设计,既可以节约大量试验经费又避免了机载设备在试验中毁伤的风险。

国外,雷电间接效应仿真软件主要以 EMA3D 软件为主,基于该软件相关飞机设计公司及研究机构在 20 世纪末进行了大量的雷电间接效应仿真与试验验证工作<sup>[5-7]</sup>,提升了仿真结果的可信度。国内,中国商用飞机有限责任公司、中国民航大学以及合肥航太电物理技术有限公司等也基于 EMA3D 进行了燃油箱、液压系统、设备舱等相关雷电防护研究<sup>[8-10]</sup>。国内大多数高校及研究机构出于 EMA3D 软件成本或采购限制等方面的原因,主要基于另一款电磁仿真软件 CST 进行地面目标和飞行器的雷电间接效应仿真研究工作<sup>[11-13]</sup>。

在国内已经完成的飞行器雷电间接效应研究中,雷电流在飞行器的传导通路主要为金属蒙皮,既不符合新型飞机大量使用轻质化复合材料机体蒙皮的发展现状,又不符合复合材料占比提升后主要依靠飞机内部金属结构传导雷电流的实际情况。尤其在飞机内部结构建模方面很少有人提及,严重制约着国内飞行器雷电间接效应仿真及评估技术的发展与工程应用。单纯依赖雷电间接效应试验

进行飞机雷电防护设计,既不经济又要承担很大的设计风险,国内亟需针对复合材料飞机进行内部结构建模研究,并在飞机内部结构模型的基础上进行雷电流传导通路仿真评估研究。

本文提出基于飞机内部结构建模技术的飞机雷电流传导通路评估方法,构建部分 F22 飞机内部金属结构的电磁仿真模型,搭建从左机翼到右机翼的雷电流传导通路,根据飞机内部的磁场分布和机载线缆感应的短路电流对传导通路的防护效果进行评估。

## 1 机体内部结构电磁建模

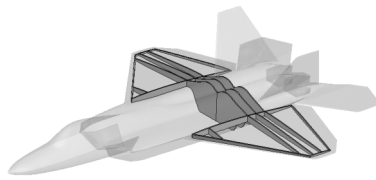
飞行器内部结构复杂,各种机载系统、设备、线缆线束、油箱、发动机以及弹舱等占据了绝大部分的空间,如果不能根据雷电流的传导特性进行裁剪,飞机内部结构的电磁建模几乎不可能实现。

飞机内部结构的建模需要从电磁学出发抓住重点进行等效建模。从雷电流沿飞机内部金属结构的传导来看,内部结构的传导电阻是最为重要的。结合飞机内部结构的安装特点,飞机内部结构表面一般涂覆有防腐蚀层,内部结构之间一般是绝缘的,主要通过螺钉实现紧固并保持电连续性。因此飞机内部结构的建模既要考虑自身的传导电阻又要兼顾结构之间的搭接电阻。

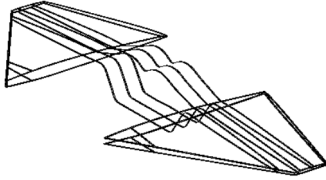
从内部结构的传导电抗来看,包含电容和电感控制两个方面。内部结构之间的相对位置应与实际情况保持一致,保证内部结构之间电容的一致性;电感主要产生在内部结构表面,需要保证内部结构表面积的一致性。

出于减重等目的,飞机内部结构大量采用“工”字型,为了表面积的一致性可以简化为“口”字型,同时可以保证内部结构与机体蒙皮搭接面积的一致性。

从上述限制因素出发,构建的 F22 飞机机翼段内部结构模型如图 1 所示。该模型主要有三个部分:一是飞机机体蒙皮,主要参照结构专业的数字模型进行修复建模;二是机体内部结构,机体内部结构的建模主要基于上述限制,在保证内部结构外形、相对位置一致性的同时,对其电导率进行等效替代;三是机体内部金属结构与机体蒙皮的搭接面,搭接面一般为密集的铆钉紧固件。



(a) 飞机及内部结构示意图



(b) 机体蒙皮与内部结构搭接面示意图

图 1 飞机左机翼到右机翼的雷电流传导通路示意图

Fig. 1 Lightning current conduction path from left wing to right wing of aircraft

F22 飞机机体内部的金属结构如图 1(a) 所示,根据直流情况下的电导率匹配结果,机体内部金属结构的电导率大致为  $4 \times 10^5$  S/m,厚度为 5 mm;机体蒙皮与飞机内部结构的搭接面如图 1(b)所示,搭接面的电导率设置为  $1 \times 10^5$  S/m,厚度为 1 mm;非搭接区域的机体蒙皮假定为电导率为  $1 \times 10^4$  S/m 的复合材料,厚度为 1 mm,并可能铺设电导率为  $1 \times 10^7$  S/m 的金属网,金属网厚度为 0.075 mm。上述材料的相对介电常数和相对磁导率均设置为 1,不同材料的差异主要体现在电导率方面。

## 2 仿真场景的布置

考虑雷电流从左机翼进入和右机翼流出的场景,如图 2 所示。

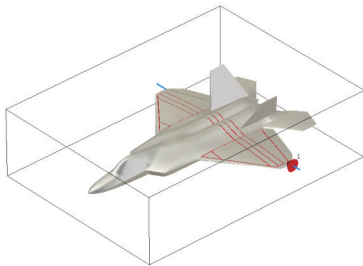


图 2 飞机雷电间接效应仿真场景示意图

Fig. 2 Simulation scene of indirect lightning effect of aircraft

在机体内部传导通路附近区域布置电磁场探测器如图 3 所示。在机体内部传导通路附近区域

布置 1 m 长的线缆如图 4 所示,线缆分为两部分,一部分监测短路电流,一份监测开路电压。雷电流激励波形参照 SAE ARP5412-2013 的雷电流 A 分量设置。

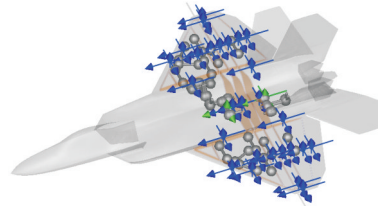


图 3 电磁场探针布置示意图

Fig. 3 Probe distribution of electromagnetic field

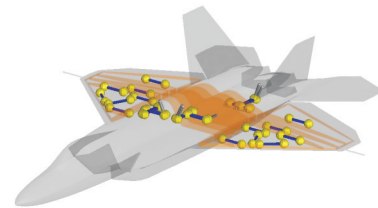


图 4 线缆布置示意图

Fig. 4 Airborne cable distribution

三种仿真场景类型说明如表 1 所示,场景 1 和场景 2 用于对比 1 mm 厚复合材料和 0.075 mm 厚金属网的防护效果,场景 2 和场景 3 用于对比机体内部结构对雷电流传导的影响。场景 3 中由于存在机体内部金属结构,机体蒙皮与内部结构之间存在搭接面。

表 1 仿真场景类型说明

Table 1 Description of simulation scene types

仿真场景	复合材料蒙皮	金属网蒙皮	机体内部金属结构
场景 1	●	—	—
场景 2	—	●	—
场景 3	—	●	●

## 3 磁场强度分布分析

### 3.1 扩散耦合和电流重分配机制

通过机翼三个不同位置的磁场探针分布(如图 5 所示),观察飞机雷电耦合时的扩散耦合机制。场景 1 和场景 2 磁场强度仿真结果如图 6 所示,可以看出:距机翼后缘位置越近曲率半径越小,磁场越快达到最大值,表明扩散耦合机制越快;场景 1 中三个探针的磁场强度更快达到最大值,表明复合

材料机体蒙皮的扩散耦合机制更快。

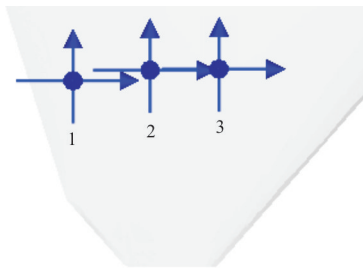
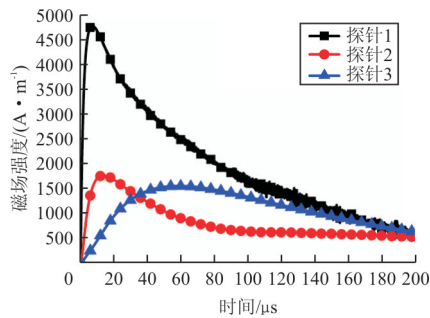
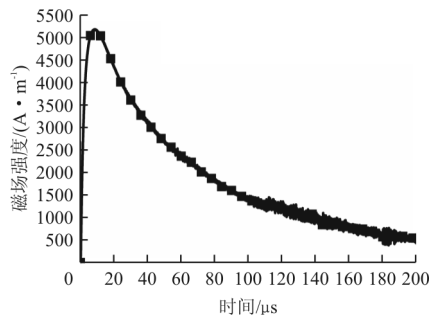


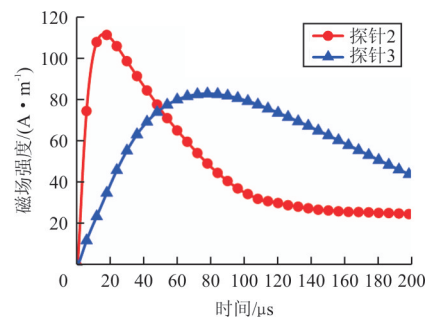
图 5 机翼三个不同位置的磁场探针布置示意图  
 Fig. 5 Distribution of magnetic field probes in three different positions of wing



(a) 场景 1



(b) 场景 2(探针 1)

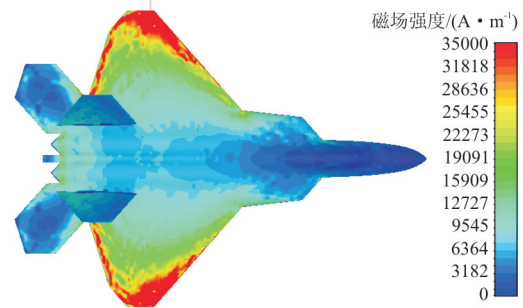


(c) 场景 2(探针 2、3)

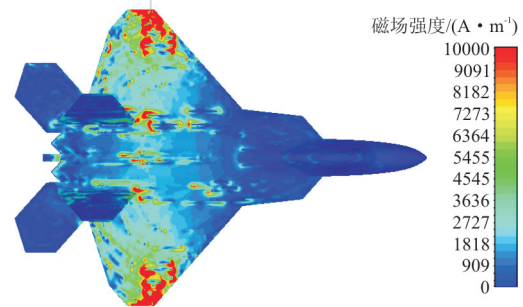
图 6 机翼后缘三个不同位置处的磁场强度  
 Fig. 6 Magnetic field strength at three different positions on trailing edge of wing

在图 5 中,探针 1 接近机翼后缘,场景 1 和场景 2 中的磁场强度基本一致,这种现象还可以在接近机翼前缘的探针位置观察到,代表着在曲率半径过小的区域几何结构对雷电屏蔽效果的影响强于材料的影响。

通过对比不同时刻的雷电流分布,可以观察雷电流耦合时的电流重分配机制。场景 1 的雷电流再分配机制如图 7 所示,可以看出:场景 1 下,8  $\mu\text{s}$  时刻雷电流的能量以高频分量为主,雷电流沿机体边缘(机翼外缘)传导,但到了 180  $\mu\text{s}$  时刻,雷电流能量以低频分量为主,雷电流沿最短传播路径传导。



(a) 8  $\mu\text{s}$



(b) 180  $\mu\text{s}$

图 7 场景 1 的雷电流再分配机制  
 Fig. 7 Lightning current redistribution mechanism in scenario 1

场景 3 的雷电流再分配机制如图 8 所示,场景 3 中存在机体内部金属结构,可以看出:雷电在 180  $\mu\text{s}$  时刻主要沿机体内部金属结构传导,因为机体内部金属结构的传导能力远强于金属蒙皮。



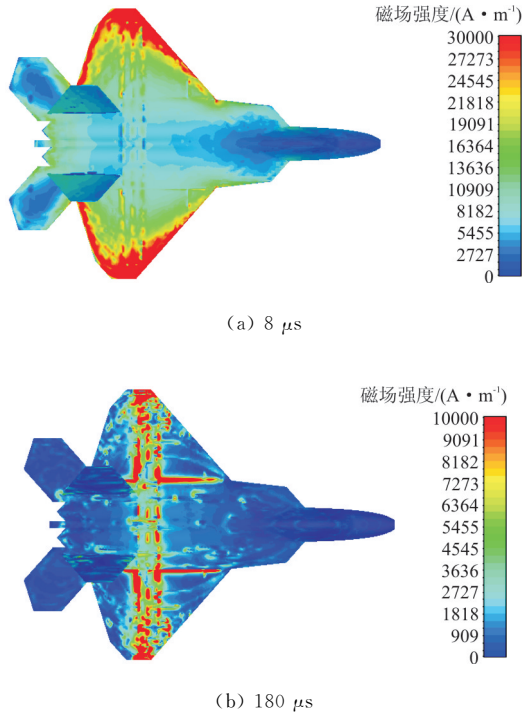


图 8 场景 3 的雷电流再分配机制  
Fig. 8 Lightning current redistribution mechanism in scenario 3

### 3.2 机体内部结构对磁场强度分布的影响

机体截面选取前视图及俯视图如图 9 所示,图中红色横线所示即为选取的水平截面,通过该截面对比场景 2 和场景 3 中的机体内部感应的磁场分布。

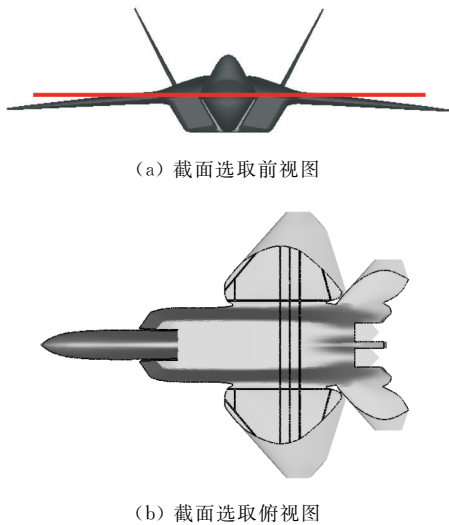


图 9 截面选取前视图及俯视图  
Fig. 9 Section selection front view and top view

场景 2 和场景 3 中从  $2 \mu\text{s}$  到  $200 \mu\text{s}$  选取 100 个时刻的磁场分布情况分别如图 10~图 11 所示,可以看出:场景 2 和场景 3 中磁场的差别主要集中在机体内部金属结构所在区域,雷电流沿机体内部金属结构传导,增强了金属结构周围区域的磁场。

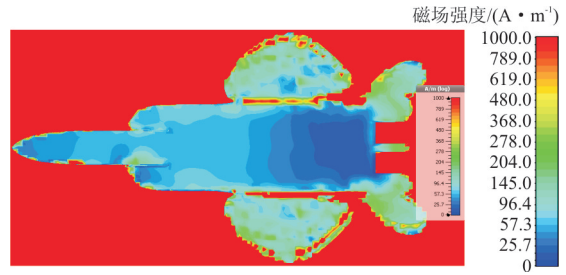


图 10 场景 2 中选取截面的机体内部磁场强度  
Fig. 10 The internal magnetic field intensity of the selected section in scenario 2

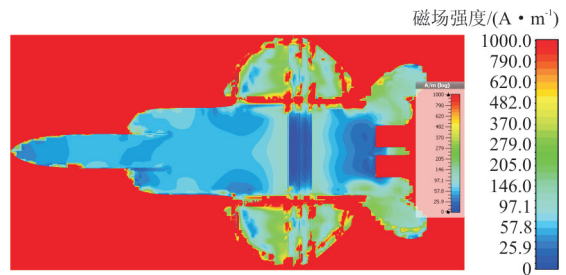


图 11 场景 3 中选取截面的机体内部磁场强度  
Fig. 11 The internal magnetic field intensity of the selected section in scenario 3

在图 3 所示的 34 个磁场探针中,场景 2 和场景 3 中的探针磁场强度对比如图 12 所示,根据对比结果可以将机体划分为四个区域,四个区域对应的磁场探针位置布局如图 13 所示。

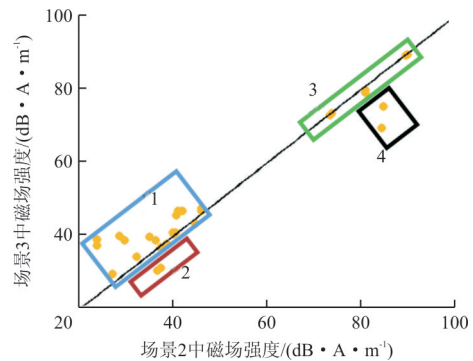


图 12 场景 2 和场景 3 探针磁场强度对比  
Fig. 12 Comparison of probe magnetic field strength in scenario 2 and scenario 3

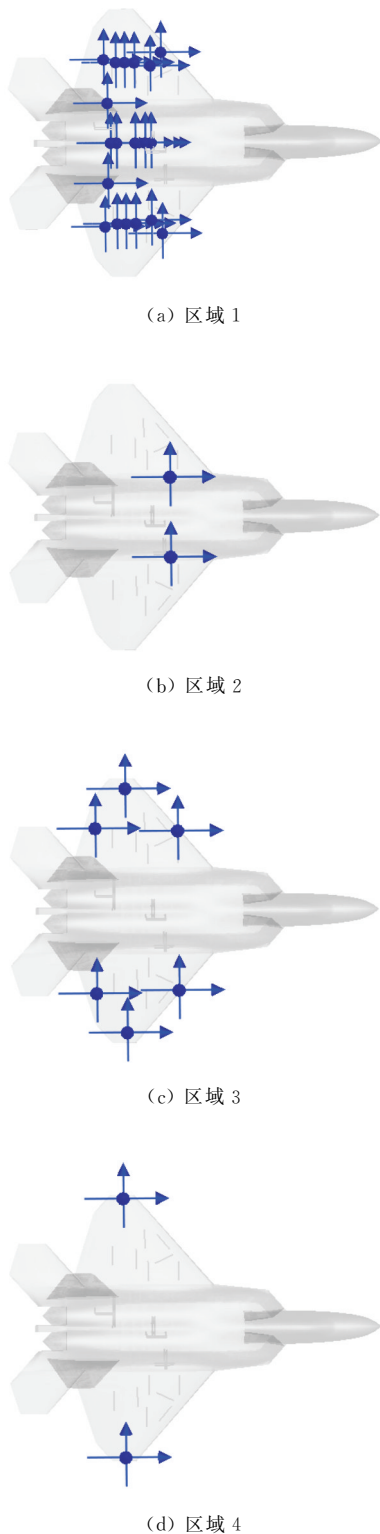


图 13 四个区域的探针布局示意图  
Fig. 13 Probe layout of four areas

从图 12~图 13 可以看出:在内部金属结构附近区域,受内部金属结构传导雷电流影响,场景 3 的磁场大于场景 2 的磁场,例如区域 1;相反的,远

离内部金属结构的区域,则是场景 2 的磁场大于场景 3 的磁场,例如区域 2 和区域 4;区域 3 受所处位置曲率半径过小的影响,雷电能量很容易进入机体内部,内部金属结构的有无对该区域无影响。

### 4 线缆感应电流强度分析

飞机内部的线缆布置如图 4 所示,共计 26 根线缆,13 根用于监测短路电流,13 根用于监测开路电压。三种场景监测到的短路电流形式均如图 14 所示,电流强度的差别如表 2 所示。监测到的开路电压如图 15 所示,开路电压在 15 V 以内,部分开路电压过小未显示。

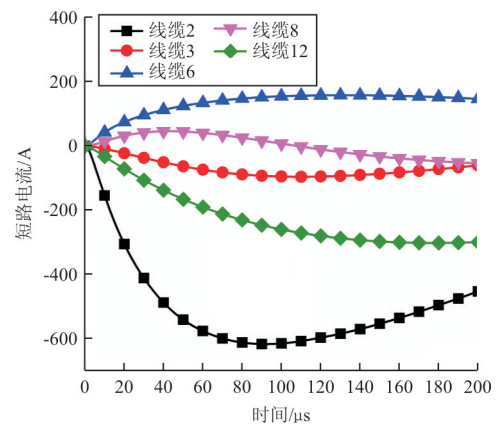


图 14 场景 3 中线缆监测到的短路电流

Fig. 14 Short circuit current detected by cable in scenario 3

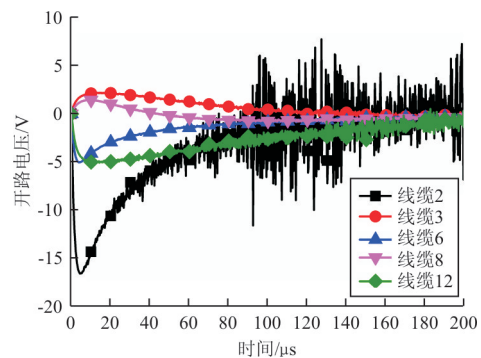


图 15 场景 3 中线缆监测到的开路电压

Fig. 15 Open circuit voltage detected by cable in scenario 3

在表 2 中,场景 1 比场景 2 中线缆感应的短路电流最大值高 25 倍左右,表明复合材料对雷电的屏蔽效果远弱于金属网,而且场景 1 中的线缆短路电流普遍大于 SAE ARP5412B 中电流波形 5A 和 5B 最高防护等级 5 000 A 短路电流。对比场景 2

和场景 3,除线缆 3、9 和 12 以外,场景 3 的线缆短路电流强度均小于场景 2 的短路电流强度,其中一半线缆的短路电流最大值下降了 1/2。

表 2 三种场景的线缆短路电流最大值  
Table 2 Maximum values of cable short circuit current in three scenarios

线缆编号	短路电流/A		
	场景 1	场景 2	场景 3
1	13 444	529	259
2	26 741	1 033	617
3	548	28	95
4	23 610	880	420
5	11 254	426	389
6	24 111	903	158
7	26 024	963	470
8	5 885	230	46
9	312	16	105
10	1 311	59	66
11	10 116	363	293
12	3 949	147	301
13	18 879	725	288

结合机体内部的磁场强度分布,虽然机体内部金属结构将雷电流引入到机体内部导致机体内部的磁场增强,但是由于内部金属结构的雷电流传导能力远强于金属网,更多的雷电能量以电流的形式沿着内部金属结构传导,向外辐射的电磁能量反而较弱,线缆感应到的电流也更弱。对于机载系统和设备雷电防护而言,由内部金属结构组成的雷电流传导通路起到了很好的防护效果。

## 5 结 论

(1) 飞机机体复合材料的雷电防护效果极差,在不对复合材料进行金属化处理的情形下,机载线缆感应短路电流最大值远高于最高级 5 级的指标。

(2) 飞机机体复合材料采取敷设金属网等防护措施后,雷电防护效果显著提升,与复合材料机体相比,机载线缆感应短路电流最大值下降 25 倍。

(3) 飞机内部的金属结构对雷电流传导起到了很好的分流作用,雷电流通过重分配机制,主要沿内部金属结构从左机翼传导至右机翼,与内部金属结构缺失的情形相比,一半机载线缆的感应电流

最大值下降 1/2。

## 参考文献

- [1] 段泽民. 航空器雷电防护技术[M]. 北京: 航空工业出版社, 2013.  
DUAN Zemin. Lightning protection technology for aircraft [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2013. (in Chinese)
- [2] DUAN Zemin, SI Xiaoliang, FENG Jie, et al. Direct and indirect lightning tests to the Z11 helicopter radome in China[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013, 20(4): 1112-1116.
- [3] PLUMER J A. Lighting effects on the NASA F-8 digital-fly-by-wire airplane: NASA CR-2524[R]. Pittsfield, USA: Lighting Technologies Inc., 1975.
- [4] SATAKE K, YAMAMOTO S, YAMAKOSHI H, et al. Development of electromagnetic simulation supporting lightning protection design of Mitsubishi regional jet [J]. Mitsubishi Heavy Industries Technical Review, 2012, 49(4): 113-118.
- [5] PERALA R A, RUDOLPH T H, MCKENNA P M, et al. Application of numerical analysis to the electromagnetic effects validation of aircraft[C]// 1993 IEEE Digital Avionics Systems Conference. Fort Worth: IEEE, 1993: 1-8.
- [6] HOLLOWAY C L, MCKENNA P M, DALKE R A, et al. Time-domain modeling, characterization, and measurements of anechoic and semi-anechoic electromagnetic test chambers[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2002, 44(1): 102-118.
- [7] PERALA R A, RUDOLPH T H, MCKENNA P M. Application of the time domain three dimensional finite difference method to a wide variety of EMC problems[C]// Proceedings of 1992 Regional Symposium on Electromagnetic Compatibility. Tel-Aviv, Israel: IEEE, 1992: 257596.
- [8] 赵毅. 大型客机油箱结构雷电点火源防护验证[J]. 高电压技术, 2017, 43(5): 46-51.  
ZHAO Yi. Verification of lightning ignition source protection for fuel tank structure of large passenger aircraft[J]. High Voltage Technology, 2017, 43(5): 46-51. (in Chinese)
- [9] 张铁纯, 吴金香, 齐亮. 基于 EMA3D 的机载设备闪电电磁环境分析[J]. 系统仿真学报, 2014, 26(6): 1350-1354.  
ZHANG Tiechun, WU Jinxiang, QI Liang. Lightning electromagnetic environment analysis of airborne equipment based on EMA3D[J]. Journal of System Simulation, 2014, 26(6): 1350-1354. (in Chinese)
- [10] 汤振宇, 孙晓, 李信良. 民用飞机机翼区域液压系统闪电防护设计研究[J]. 科技视界, 2017(4): 307.  
TANG Zhenyu, SUN Xiao, LI Xinliang. Research on lightning protection design of wing area hydraulic system of civil aircraft[J]. Science and Technology Perspective, 2017(4): 307. (in Chinese)

- ndards: normal, utility, acrobatic, and commuter category airplanes[S]. US: Federal Aviation Administration, 2012: 325-326.
- [7] 钟龙权, 赵刚, 马弘炯, 等. 整机级 HIRF 仿真验证测试方案及测试自动化[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018, 16(6): 1033-1038.  
ZHONG Longquan, ZHAO Gang, MA Hongge, et al. Verification test planning and test automation to HIRF simulation of aircraft-level[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018, 16(6): 1033-1038. (in Chinese)
- [8] SAE. Guide to certification of aircraft in a high-intensity radiated field (HIRF) environment: ARP5583A[S]. US: SAE, 2010.
- [9] 刘阳. CCAR-25.1317 高强辐射场防护适航条款研究[J]. 民航学报, 2020, 4(2): 70-73,100.  
LIU Yang. Study on CCAR-25.1317 airworthiness clause on high-intensity radiated fields protection[J]. Journal of Civil Aviation, 2020, 4(2): 70-73,100. (in Chinese)
- [10] Federal Aviation Administration. THE certification of aircraft electrical and electronic systems for operation in the high-intensity radiated fields (HIRF) environment: AC20-158A[S]. US: Federal Register, 2014.
- [11] RTCA. Environmental conditions and test procedures for airborne equipment: DO-160G[S]. US: RTCA, 2010.
- [12] 付海峰, 戴曙君, 雷迅. 军用飞机 HIRF 防护设计及验证分析[J]. 微波学报, 2014, 30(s2): 116-118.  
FU Haifeng, DAI Shujun, LEI Xun. Analysis of HIRF protecting design & validation for military aircraft[J]. Journal of Microwave, 2014, 30(s2): 116-118. (in Chinese)
- [13] 吴一超. 高强辐射场电磁兼容设计及测试技术[J]. 光电技术应用, 2018, 33(3): 62-64,73.  
WU Yichao. Electromagnetic compatibility (EMC) design and testing technology of high intensity radiation field[J]. Electro-Optic Technology Application, 2018, 33(3): 62-64,73. (in Chinese)
- [14] 梁红云. 轻型通用飞机高强辐射场(HIRF)防护设计浅析[J]. 科技创新导报, 2013(17): 76,78.  
LIANG Hongyun. Light general aviation aircraft high radiation field (HIRF) protection design of[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2013(17): 76,78. (in Chinese)
- [15] 段泽民, 司晓亮, 李志宝. 航空发动机的雷电与 HIRF 适航测试试验[J]. 航空动力, 2019(5): 45-47.  
DUAN Zemin, SI Xiaoliang, LI Zhibao. Airworthiness tests of lightning and HIRF for aero engine[J]. Aerospace Power, 2019(5): 45-47. (in Chinese)
- 作者简介:**  
李明巧(1980—),女,学士,高级工程师。主要研究方向:航空无线电。  
付畅(1994—),女,硕士,助理工程师。主要研究方向:航空无线电。  
闫冰(1976—),男,硕士,高级工程师。主要研究方向:机电控制。
- (编辑:丛艳娟)

~~~~~

(上接第 142 页)

- [11] 周萍. 地面移动目标雷电效应分析与防护研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2019.  
ZHOU Ping. Lightning effect analysis and protection of ground moving targets[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2019. (in Chinese)
- [12] 黄瑞涛, 段艳涛, 石立华, 等. 金属柱体雷电间接效应的回路导体仿真分析[J]. 中国舰船研究, 2018, 13(s1): 69-73,94.  
HUANG Ruitao, DUAN Yantao, SHI Lihua, et al. Simulation analysis of loop conductor of lightning indirect effect of metal cylinder[J]. China Ship Research, 2018, 13(s1): 69-73,94. (in Chinese)
- [13] 黄军玲, 周利军, 谢家雨, 等. 飞机雷电间接效应仿真与研究[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(7): 104-110.  
HUANG Junling, ZHOU Lijun, XIE Jiayu, et al. Simulation and research of lightning indirect effects on the aircraft [J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(7): 104-110. (in Chinese)
- 作者简介:**  
甄国帅(1991—),男,硕士,工程师。主要研究方向:电磁兼容设计。  
臧家左(1986—),男,学士,高级工程师。主要研究方向:电磁兼容设计。  
祁雪峰(1989—),男,硕士,工程师。主要研究方向:电磁兼容设计。
- (编辑:丛艳娟)