

11-20-2019

Influence of Composite Materials Surface Metal Mesh on Helicopter Lightning Stroke Effects

Junling Huang

Aviation Engineering Institute, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China;

Jiayu Xie

Aviation Engineering Institute, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Influence of Composite Materials Surface Metal Mesh on Helicopter Lightning Stroke Effects

Abstract

Abstract: The metal wire mesh is usually adopted to prevent the lightning stroke on composite materials. *The effects of different materials and different thickness of metal mesh on helicopter lightning electromagnetic effect are compared.* According to the method recommended by SAE-ARP5416, a numerical simulation software is used for carrying out the high current injection simulation. The results show that the surface mount metal mesh can effectively reduce the harm of lightning electromagnetic coupling effect; the difference between aluminum and copper on anti-lightning stroke effect is not obvious; when the thickness of aluminum grid is less than 0.15 mm, the aluminum on anti-lightning stroke effect is enhanced with thickness increasing; when the thickness is more than 0.15 mm, the value tends to smooth. It is recommended to select aluminum mesh as a helicopter composite conductive layer, and the thickness is at 0.15 mm.

Keywords

lightning indirect effects, composite materials, metal wire mesh, surface current distribution, EM field distribution, induced current

Recommended Citation

Huang Junling, Xie Jiayu. Influence of Composite Materials Surface Metal Mesh on Helicopter Lightning Stroke Effects[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(5): 992-1001.

复合材料表面金属网对直升机雷击效应的影响

黄军玲, 谢家雨

(中国民用航空飞行学院航空工程学院, 四川 广汉 618307)

摘要: 直升机的复合材料构件上通常采取贴金属网的方法防止雷击。针对不同材质和不同厚度金属网对直升机雷击效应的作用效果进行了对比研究: 采用 SAE-ARP5416 推荐的方法, 用数值仿真软件对直升机模型进行大电流注入仿真。结果表明: 复合材料表面金属网可以有效防护雷击效应, 且铜网和铝网防雷击效果差异不明显; 铝网厚度小于 0.15 mm 时, 其防雷击效果随着厚度增加而增强, 当厚度超过 0.15 mm 时, 效果无太大变化。建议选择铝网作为直升机复合材料导电层, 且厚度宜约为 0.15 mm。

关键词: 雷电间接效应; 复合材料; 金属网; 表面电流分布; 电磁场分布; 感应电流

中图分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2019) 05-0992-10

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.17-0159

Influence of Composite Materials Surface Metal Mesh on Helicopter Lightning Stroke Effects

Huang Junling, Xie Jiayu

(Aviation Engineering Institute, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China)

Abstract: The metal wire mesh is usually adopted to prevent the lightning stroke on composite materials. The effects of different materials and different thickness of metal mesh on helicopter lightning electromagnetic effect are compared. According to the method recommended by SAE-ARP5416, a numerical simulation software is used for carrying out the high current injection simulation. The results show that the surface mount metal mesh can effectively reduce the harm of lightning electromagnetic coupling effect; the difference between aluminum and copper on anti-lightning stroke effect is not obvious; when the thickness of aluminum grid is less than 0.15 mm, the aluminum on anti-lightning stroke effect is enhanced with thickness increasing; when the thickness is more than 0.15 mm, the value tends to smooth. It is recommended to select aluminum mesh as a helicopter composite conductive layer, and the thickness is at 0.15 mm.

Keywords: lightning indirect effects; composite materials; metal wire mesh; surface current distribution; EM field distribution; induced current

引言

复合材料的使用可以减轻飞机重量, 增大飞机

结构强度, 因此, 复合材料逐步代替铝材料成为直升飞机机体的主要材料。复合材料在航空工程中的应用是目前广为关注与研究的热点之一。

近年来, 直升机已被允许在各种复杂气象条件下进行“仪表飞行规则”飞行, 2002 年修订的适航条例增加了旋翼飞机雷电防护的条款, 要求旋翼飞机必须具有雷电防护措施^[1-2]。当飞机遭受雷击时,



收稿日期: 2017-04-19 修回日期: 2017-08-21;
基金项目: 民航科技创新引导基金(FDST0251512);
作者简介: 黄军玲(1985-), 女, 江西, 硕士, 高级实验师, 研究方向为飞机雷击间接效应仿真分析;
谢家雨(1983-), 男, 四川, 硕士, 副教授, 研究方向为复合材料雷击效应。

<http://www.china-simulation.com>

• 992 •

雷电在放电过程中产生的大电流脉冲和瞬态强电磁场会通过阻性耦合、磁场耦合和电场耦合等方式进入飞机内部, 在线路中产生感应电压和电流浪涌, 从而对飞机系统造成扰动或损坏, 称之为雷电间接效应^[3]。直升机为取得适航证必须开展整机雷电间接效应防护试验, 但是由于整机的雷电间接效应防护试验需要耗费大量人力物力财力, 且飞机部件在进行雷击试验后多以损伤形式出现, 因此工程上通常采用数值仿真的方法对整机雷电流时域全过程进行模拟^[4-5]。如高成等采用数值仿真软件对不同材质飞机的缩比或等比模型进行了雷击附着点试验研究, 并由此确定了飞机雷击附着区域划分^[6-12]。针对复合材料飞机的雷电间接效应问题, Marc Meyer 等就雷电间接效应对碳纤维增强复合材料 (Carbon Fiber Reinforced Polymer/Plastic, CFRP) 飞机的影响进行建模, 通过分析飞机不同部位的线缆终端电压, 分析了复合材料覆盖区域添加线缆屏蔽保护材料的形式, 提出 CFRP 飞机设计雷击保护时应兼顾考虑重量和保护装置安装限制的影响^[13-14]。中国人民解放军理工大学学者和北航学者则利用仿真软件分析了 CFRP 飞机遭受雷击后飞机表面电流分布、空间磁场分布、飞机内部电场分布以及舱内不同位置线缆耦合情况, 进一步验证了数值仿真方法的有效性^[15-17]。文献[18]提出, 大型飞机上通常采用将金属网贴在复合材料构件表面或埋在最外层的方法进行雷击防护, 但是, 在复合材料表面选择何种材质、何种厚度的金属网对直升机雷击电磁耦合效应的作用效果更佳尚无明确结论, 因此, 有必要针对该问题进行进一步的研究。

本文将机体材质分别设置为纯金属、纯复合材料、复合材料贴铜格网和复合材料贴不同厚度铝格网, 针对机体材质对直升机雷击电磁耦合效应的作用效果进行了对比研究: 采用基于传输线矩阵法的 CST 电磁仿真软件进行大电流脉冲注入的方法, 根据有关标准设置了 3 种典型的雷击路径, 模拟仿真了不同机体材质时, 飞行中的直升机遭受雷击后飞机表面电流分布、外部电磁场分布、典型区域瞬态

磁场强度及内部线缆感应电流。同时还对比了金属网不同厚度时, 直升机的雷击电磁耦合效应表现。最后, 通过分析仿真结果提出了直升机机体材质设计建议。

1 仿真环境建立

1.1 模型建立

建立如图 1 所示的欧洲直升机公司 AS350B3 型直升机的 3D 仿真模型, 模型长 10.93 m, 高 3.14 m, 主旋翼直径 10.69 m, 尾桨直径 1.86 m。因机体内部结构对仿真结果影响较小, 为降低仿真复杂度, 仿真中忽略内部结构, 只保留关键结构。模型主要由机体、窗户、门、主旋翼、尾桨、起落橇及部分设备连接线缆组成, 缝隙处采用精简模型进行转化处理。为了考察直升机雷击附着点区域、雷电流通道区域以及形状不规则区域的电磁场分布情况, 在机头、前挡玻璃、驾驶舱内部、尾舱内部、尾舱外部、整流罩、主旋翼、尾桨等 8 个典型区域设置电磁场监控探针。同时, 为了监控直升机内部线缆的雷击感应电流, 在驾驶舱和尾舱内各设置一个金属机箱, 并设置 2 根连接导线: 1 根线芯截面积为 0.01 mm^2 的单芯线和 1 根型号为 RG58 的同轴线, 如图 2 所示。

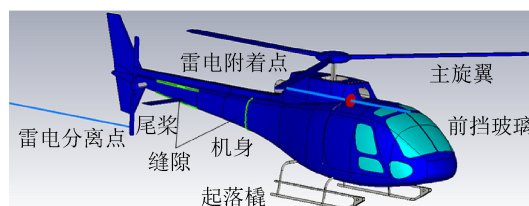


图 1 直升机 3D 模型

Fig. 1 Helicopter 3-D model

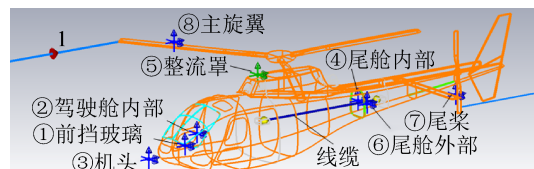


图 2 探针和线缆的位置

Fig. 2 Location of EM probes and wires

模型所有材料类型设置为 thin panel (薄片),

窗户及前挡玻璃为普通玻璃材料,起落撬、轮轴和发动机排气口为理想导体,主要材料电参数设置如表 1 所示。为了对比机体材质对雷击电磁耦合效应的影响,机身和旋翼材料设置 4 种情况:(1)理想导体(纯金属);(2)碳纤维增强型复合材料(纯 CFRP);(3)CFRP 贴铜格网;(4)CFRP 贴不同厚度铝格网。为了对比金属网厚度对雷击电磁耦合效应的影响,将铝格网厚度分别设置为 0.05 mm, 0.10 mm, 0.15 mm, 0.20 mm, 0.25 mm, 0.3 mm。

表 1 机体材料属性
Tab. 1 Materials aboard the helicopter

项次	材料	介电常数	电导率/(S·m ⁻¹)
1	普通玻璃	4.82	--
2	CFRP	6.40	1.50×10 ⁴
3	铜格网	--	5.96×10 ⁷
4	铝格网	--	3.56×10 ⁷

1.2 激励源设置

根据 SAE-ARP5412^[19]和 SAE-ARP5416^[20]要求,采用向飞机雷击附着点注入电流波形 A 的方法进行仿真。A 波为双指数波,其数学表达式定义为:

$$I(t) = I_0[e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}] \quad (1)$$

式中: $I_0=218\ 810\text{ A}$, 为电流幅值; $\alpha=1/T_{\text{fall}}=11\ 354\text{ s}^{-1}$, T_{fall} 为下降时间; $\beta=1/T_{\text{rise}}=647\ 265\text{ s}^{-1}$, T_{rise} 为上升时间。

为模拟脉冲电流注入试验条件,仿真中在雷击附着点处设置一个电流源型离散端口,分离点则设置为一根 PEC(理想导体)材质的导线。为避免静电荷的累积效应,有效降低静电场的影响,建模时可将端口长度延长至吸收边界,从而构成回路以消除充电效应^[15]。

由标准 SAE-ARP5414A^[21]可知,直升机的雷电附着点和分离点通常为主旋翼、尾桨、起落撬和机头,因此仿真中设置表 2 所示的 3 种雷击路径。

假设飞机机头被击中,雷电流流经机身最后到达机尾的时间为^[15,17]

$$t_1 = L/c \quad (2)$$

式中: L 为机身长度,单位为 m; c 为光速,单位

为 m/s,通过计算得出 $t_1 \approx 36.4\text{ ns}$ 。为使 A 波完整流至机尾,所需时间至少为 A 波的半宽度时间 $t_2 = 69\ \mu\text{s}$ 。仿真时间 t 必须满足 $t \geq t_1 + t_2$,即至少为 $70\ \mu\text{s}$,所以仿真中时间设置为 0~100 μs 。因为 A 波的频谱能量主要集中在 10 MHz 以下,仿真频率范围设置为 0~30 MHz。

表 2 3 种雷击路径

雷击路径	雷电附着点	雷电分离点
1	主旋翼	尾桨
2	主旋翼	起落撬
3	尾桨	机头

仿真中采用 TLM (Transmission-line Matrix, 传输线矩阵法)求解器进行求解,这是因为 TLM 网络可以把电磁场、边界及其材料介电特性合并在一块,不需要为新的结构重新列式,边界、损耗、电导率、磁导率和场的激励参数可简单地进入到程序中,适合处理像飞机这样复杂且庞大的结构。

1.3 其他仿真参数设置

CST 仿真中网格的设置决定了仿真的质量与速度。网格设置能够识别的结构越小,网格越多,越复杂,仿真精度越高,但同时计算所需的时间越长。因此网格的设置需要在精度与速度之间找到平衡,这样才能更加快速有效地完成仿真,同时网格的设置应保证能够覆盖仿真的物体模型。本文选择六面体 TLM 网格,最小网格步长为 0.049 954 m,最大网格步长为 0.822 603 m,网格数量为 2 972 160。

本文主要研究直升机在飞行过程中遭受雷击时的情形,因此将边界条件设置为开放边界,另外为防止飞机仿真的辐射经过边界的其他作用后再次对飞机仿真产生干扰,同时兼顾仿真效率,将模型计算空间扩充 2 m。背景材料设为 Normal(空气/真空)。需要注意的是,CST 中网格设置可能会存在一定误差,导致坐标定位不准确,进而造成电气连接不成功的情况,这种情况下可以适当加密网格或延长连接线。

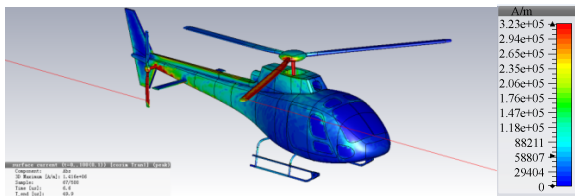
2 仿真结果分析

2.1 复合材料金属网材质对直升机雷击电磁耦合效应的影响

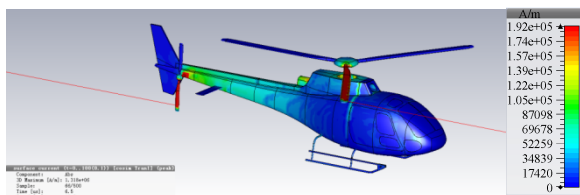
当直升机遭受雷击时,雷电在放电过程中产生的大电流脉冲和瞬态强电磁场会流经机体表面,同时也会通过阻性耦合、磁场耦合和电场耦合等方式进入飞机内部,在内部线路上产生感应电流。

2.1.1 金属网对表面电流分布的影响

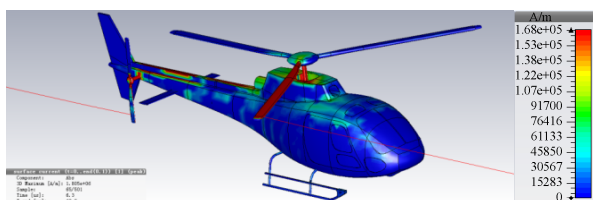
当 $t=6.4 \mu\text{s}$ 时,雷电流 A 波到达峰值 200 kA,与此同时直升机机体的表面电流值达到最大。图 3 所示为当雷击附着点位于主旋翼,分离点位于尾桨时,在 $6.4 \mu\text{s}$ 时刻 4 种机体材质的直升机机体表面电流分布情况。从图 3 中可以看出,4 种情况下直升机表面电流分布特征一致:在雷电附着点和分离点区域表面电流密度最大^[22],如主旋翼和尾桨区域,达到 10^5 A/m 量级;在雷电流流经的区域,如发动机整流罩和尾舱区域,电流密度相对前者较小;在远离雷电流通道的区域,如机头、起落撬和驾驶舱区域,表面电流密度最小。



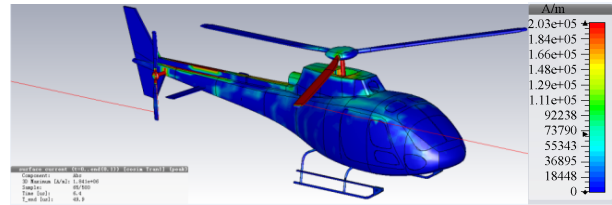
(a) PEC



(b) CFRP



(c) CFRP 加 Cu wire mesh



(d) CFRP 加 Al wire mesh

图 3 4 种机体材质的直升机表面电流分布(路径 1)
Fig. 3 Surface current distribution of four materials (path 1)

图 4 所示为直升机上 8 个典型区域在 4 种机体材质时的表面电流密度峰值。由图 4 可知,机体材质不同,直升机同一区域的表面电流密度值不同,且在 CFRP 机体表面贴金属网后各区域的表面电流密度值较不贴金属网时明显降低,但在 CFRP 机体表面上铜格网和铝格网时各区域的表面电流密度值差异不明显。

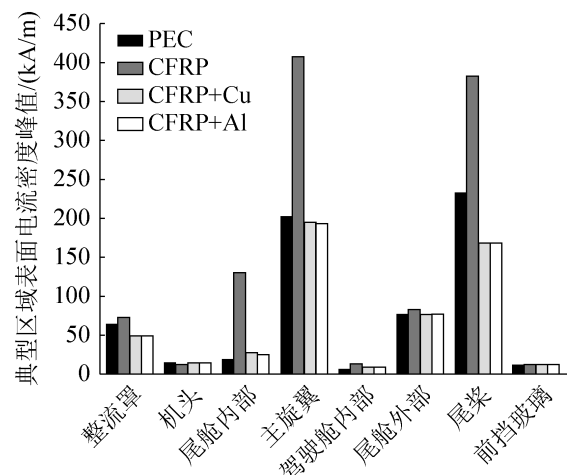


图 4 4 种机体材质的直升机各区域表面电流密度峰值(路径 1)
Fig. 4 Surface current on crucial positions of four materials (path 1)

图 5 所示为表 2 所述的 3 种雷击路径下, $6.4 \mu\text{s}$ 时刻机体材质为纯 PEC 时直升机表面电流分布情况。由图 5 可以看出,当雷击路径改变时,直升机表面电流分布情况随之发生明显改变。如路径 2 时表面电流密度最大区域变成主旋翼区域和起落撬区域,路径 3 时表面电流密度最大区域则变成尾桨区域和机头区域。

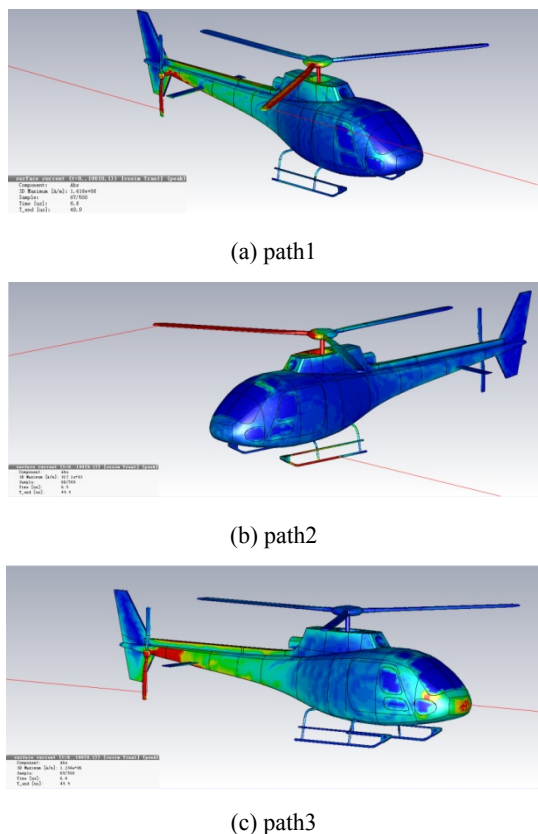


图 5 3 种雷击路径下直升机表面电流分布情况(PEC)
Fig. 5 Surface current distribution of three lightning stroke paths (PEC)

综上所述, 机体材质对直升机表面电流分布特征影响较小, 雷击路径对直升机表面电流分布特征影响较大; 在 CFRP 机体表面贴金属网可有效降低直升机表面电流密度; 在 CFRP 机体表面贴铜网和铝网效果差异较小, 这是因为仿真中铜网和铝网的差异在于电导率不同, 而导体的电导率对直升机雷电感应表面电流影响较小。

2.1.2 金属网对电磁场分布的影响

图 6 所示为当雷击附着点位于主旋翼, 分离点位于尾桨时, 在 6.4 μs 时刻 4 种机体材质的直升机外部电场分布图。如图 6 所示, 瞬态电场密度最大值出现在机头、主旋翼翼尖、尾桨尖端、尾翼、起落撬等端部和形状不规则区域, 数值达到 10⁸ V/m 量级; 不同机体材质的电场分布特征差异不大。

图 7 所示为表 2 所述的 3 种雷击路径下, 6.4 μs 时刻机体材质为 PEC 时直升机外部电场分布情况。

对比 3 种路径的电场分布图可以看出, 不同路径的电场分布特征类似, 仅有微小的差异。瞬态电场密度最大值仍然出现在机头、主旋翼翼尖、尾桨尖端、尾翼、起落撬等端部和形状不规则区域, 并没有随着雷击路径的改变而改变。

由此可见, 机体材质和雷击路径对直升机外部电场分布特征影响均不明显, 直升机外部电场分布特征主要与直升机结构的不规则度有关。这是因为电场密度主要与电荷分布有关, 电荷一般容易聚集在尖端和形状不规则区域, 所以这些区域的电场密度值比较大, 而 3 种路径时电场分布的微小差异也是由于不同路径时电荷分布路径的变化造成的。

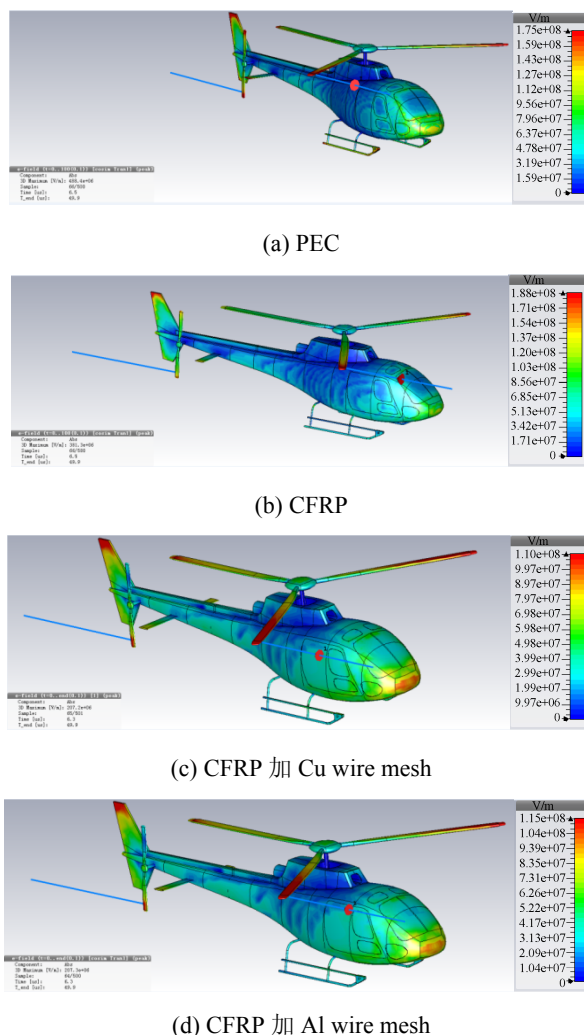
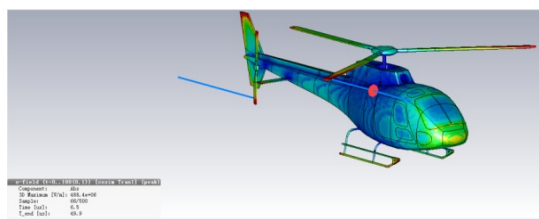
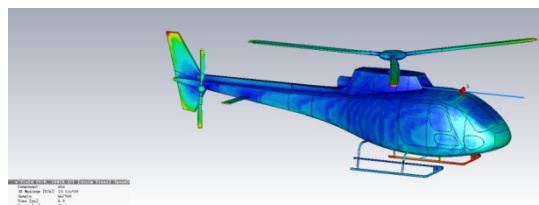


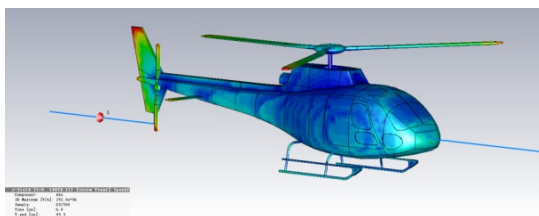
图 6 4 种机体材质的直升机外部电场分布(路径 1)
Fig. 6 Electrical field distribution outside fuselage of four materials (path 1)



(a) path1



(b) path2



(c) path3

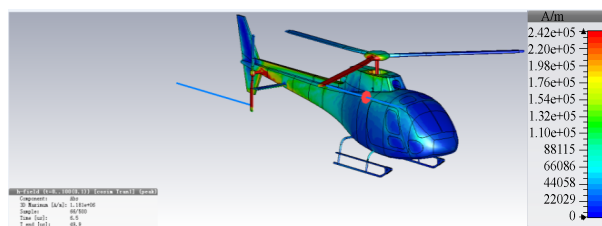
图 7 3 种路径下的直升机外部电场分布(PEC)

Fig. 7 Electrical field distribution outside fuselage of 3 paths (PEC)

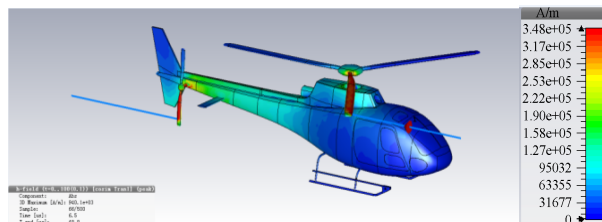
图 8 所示为 $6.4 \mu\text{s}$ 时刻直升机外部的瞬态磁场分布图。通过对比图 3、图 5、图 8 的结果可以发现, 磁场分布特征与表面电流分布特征基本一致, 这是因为磁场是由机体上的表面电流产生的, 它与表面电流直接相关。因此, 同理可知机体材质对直升机磁场分布特征影响较小。

2.1.3 金属网对机体屏蔽效果的影响

图 9 所示为 4 种机体材质时直升机尾舱外部和内部磁场强度对比图。由图 9 可知, 当机体材质为纯金属(PEC)时, 直升机尾舱内部磁场强度比外部低约 11 dB; 当机体材质为 CFRP 时, 直升机尾舱内部磁场强度比外部低约 5 dB; 当机体材质为 CFRP 贴铜格网时, 直升机尾舱内部磁场强度比外部低约 9.4 dB; 当机体材质为 CFRP 贴铝格网时, 直升机尾舱内部磁场强度比外部低约 10.6 dB。由此可见, 在 CFRP 材料表面贴金属网可以有效提高机体的屏蔽效能, 且铝格网效果略优于铜格网。



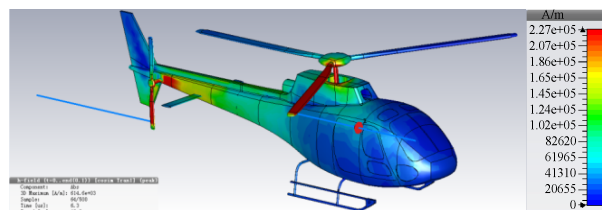
(a) PEC(path1)



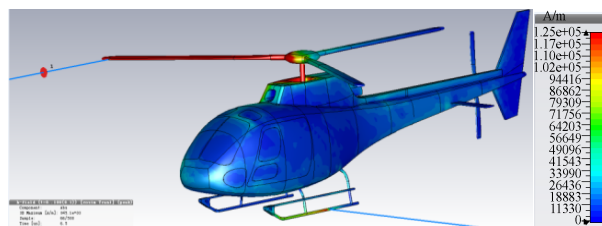
(b) CFRP(path1)



(c) CFRP 加 Cu wire mesh(path1)



(d) CFRP 加 Al wire mesh(path1)



(e) PEC(path2)



(f) PEC(path3)

图 8 直升机外部磁场分布

Fig. 8 Magnetic field distribution outside fuselage of helicopter

2.1.4 金属网对内部线缆感应电流的影响

当飞机遭受雷击时,雷电在放电过程中产生的大电流脉冲和瞬态强电磁场会通过阻性耦合、磁场耦合和电场耦合等方式进入飞机内部,在线路中产生瞬态感应电流。在驾驶舱和尾舱内各设置一个金属机箱,并设置 2 根连接导线:1 根线芯截面积为 0.01 mm^2 的单芯线和 1 根 RG58 的同轴线。芯线分别加上 $50 \ \Omega$ 的匹配负载,同轴线的屏蔽层直接接地。在单芯线和同轴线上加探针以分析雷击瞬态感应电流,SPICE 模型如图 10 所示。

随着雷电流 A 波到达峰值,直升机内部线缆

的雷击感应电流达到峰值,然后随着雷电流的衰减而衰减。如表 3 所示为 4 种机体材质下线缆的瞬态感应电流峰值。由表 3 可知,同轴线屏蔽层起着非常好的屏蔽作用,屏蔽层的感应电流远远大于线芯上的电流;与单芯线相比,同轴线线芯的感应电流也大大降低;机体材质为 CFRP 不加金属网时,线缆上的感应电流非常大;在 CFRP 上加金属网后线缆上的感应电流大大降低,与纯金属材料相比差异较小;在 CFRP 上加铜格网和铝格网,线缆上的感应电流差异不明显。

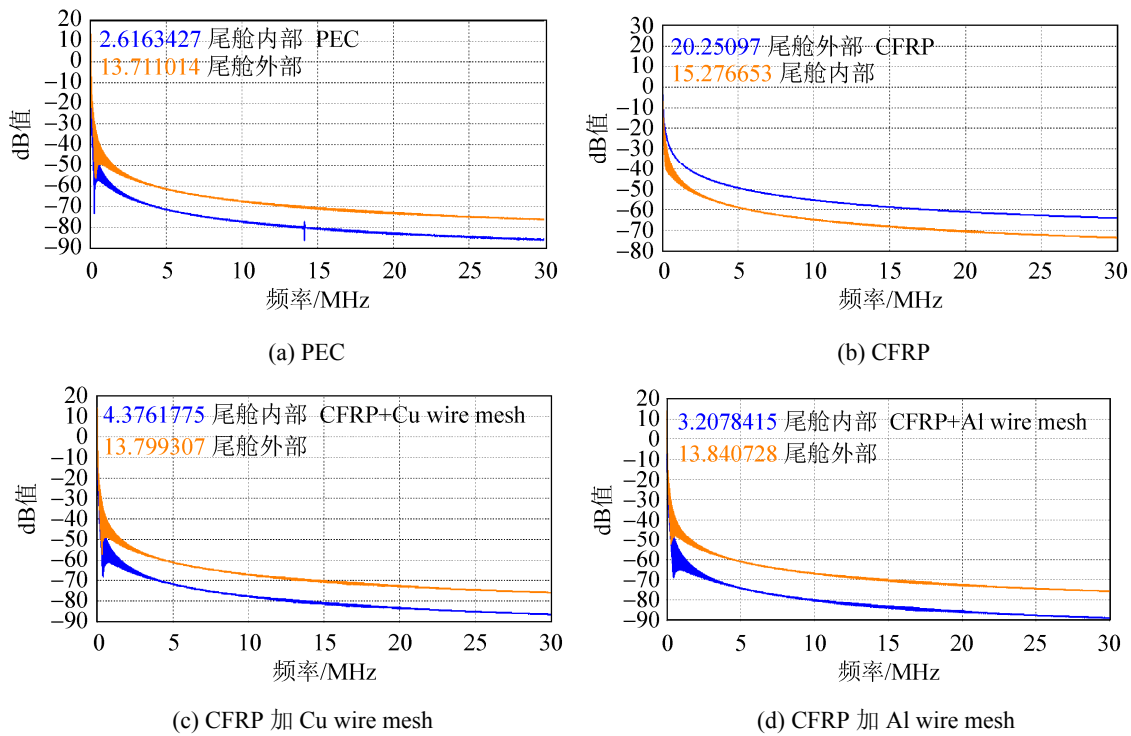


图 9 直升机尾舱内外磁场强度对比

Fig. 9 Magnetic field strength contrast on inside and outside of tail tank

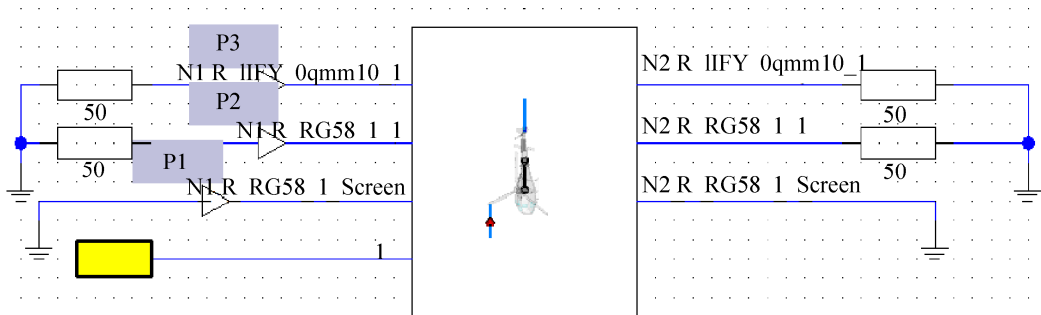


图 10 线缆 SPICE 模型图

Fig. 10 SPICE model of wires

<http://www.china-simulation.com>

表 3 不同机体材质时线缆感应电流峰值

导线类型	PEC	CFRP	CFRP+Cu	CFRP+Al
同轴线屏蔽层	1171.86	56500.42	1308.92	1335.84
同轴线线芯	0.42	21.96	0.48	0.49
单芯线	2.85	26.70	2.90	2.90

2.2 金属网厚度对直升机雷击电磁耦合效应的影响

根据前文 2.1 的仿真结果, 在 CFRP 表面贴铜格网与铝格网的防雷击效果差异不大, 但是兼顾材料质量与效益因素, 建议选择铝格网作为复合材料的导电材料。因此, 下面以铝格网为例讨论金属网厚度对雷击防护的影响。

2.2.1 金属网厚度对典型区域磁场强度的影响

图 11 为雷击路径 1, 金属网厚度为 0.05 mm, 0.10 mm, 0.15 mm, 0.20 mm, 0.25 mm 0.30 mm 时, 直升机 8 个典型区域的磁场强度峰值。由图 11 可知, 金属网厚度对机头、前挡玻璃及驾驶舱等非雷电流通道区域的磁场强度影响不明显, 但是在主旋翼、尾桨、整流罩和尾舱等雷电附着点、雷击分离点或雷电流通道区域, 金属网厚度对磁场强度影响明显。厚度达到 0.15 mm 时, 这些区域磁场强度明显降低, 然后随着厚度的增加数值趋于平稳。

表 4 金属网不同厚度时线缆感应电流峰值

导线类型	0.05 mm	0.10 mm	0.15 mm	0.20 mm	0.25 mm	0.3 mm
屏蔽层	1575.39	1404.26	1335.84	1318.91	1310.38	1304.99
同轴线线芯	0.61	0.51	0.49	0.48	0.48	0.47
单芯线	3.17	3.17	2.90	2.89	2.89	2.89

3 结论

(1) CFRP 机体表面贴铜格网或铝格网可有效降低直升机表面电流密度和内部线缆上的感应电流, 但两者效果差异不明显。

(2) 在 CFRP 机体表面贴铜格网或铝格网可以

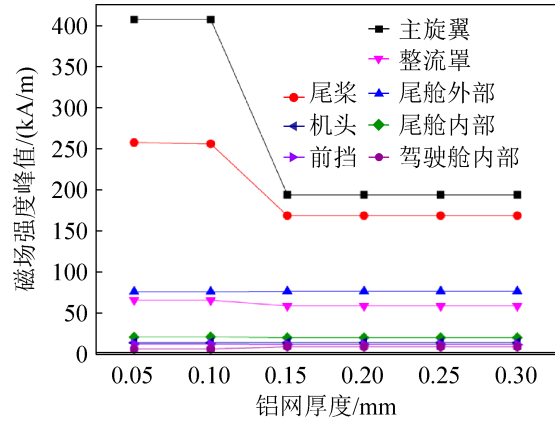


图 11 金属网不同厚度时磁场强度峰值(路径 1)
Fig. 11 Magnetic field strength on different thickness of mesh (Path 1)

2.2.2 金属网厚度对内部线缆感应电流的影响

表 4 为金属网厚度分别为 0.05 mm, 0.10 mm, 0.15 mm, 0.20 mm, 0.25 mm, 0.30 mm 时线缆的瞬态感应电流峰值。线缆的瞬态感应电流值随金属网厚度增大而减小, 厚度达到 0.15 mm 以后, 线缆的瞬态感应电流值趋于平稳。

飞机复合材料遭受雷击后, 其温度随导电层厚度的增加而递减, 且导电层厚度越大其温度升高的速率越小, 在 0.10~0.15 mm 区间温度开始明显降低, 当厚度达到 0.15 mm 时出现拐点, 然后大幅度降低, 当达到 0.20 mm 时, 温度降到最低^[23-25]。所以, 综合考虑材料温度、线缆感应电流和磁场强度的因素, 金属网厚度选择 0.15~0.20 mm 为宜。

有效提高机体的屏蔽效能, 且铝格网效果略优于铜格网。

(3) 随着 CFRP 机体表面金属网厚度增大, 直升机典型区域的磁场强度和内部线缆的瞬态感应电流值减小, 厚度达到 0.15 mm 以后, 磁场强度和

线缆的瞬态感应电流值趋于平稳。

(4) 综合考虑材料质量、线缆感应电流和磁场强度的因素, 建议选择铝格网作为雷击防护金属网, 且金属网厚度选择 0.15~0.20 mm 为宜。

参考文献:

- [1] CCAR-27 部. 正常类旋翼航空器适航规定 [S]. 北京: 中国民航总局, 1988 (2002 年修订).
China Civil Aviation Regulations-Part 27. Airworthiness Standards: normal category rotorcraft [S]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 1988 (revision 2002).
- [2] CCAR-29 部. 运输类旋翼航空器适航规定 [S]. 北京: 中国民航总局, 1988 (2002 年修订).
China Civil Aviation Regulation-Part29. Airworthiness Standards: transport category rotorcraft [S]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 1988 (revision 2002).
- [3] 合肥航太电物理技术有限公司. 航空器雷电防护技术 [M]. 北京: 航空工业出版社, 2013: 162-167.
Hefei Hang tai Electrophysics Co., Ltd. Aircraft lightning protection technology [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2013: 162-167.
- [4] 曾嵘, 周旋, 王泽众, 等. 国际防雷研究进展及前沿述评 [J]. 高电压技术, 2015, 41(1): 1-13.
Zeng Rong, Zhou Xuan, Wang Zezhong, et al. Review of research advances and fronts on international lightning and protection [J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(1): 1-13.
- [5] 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(4): 305-308.
Chen Qiping, Fang Jinpeng, Wang Wanfu. Discussion on aircraft lightning indirect effects test [J]. Journal of Microwaves, 2012, 28(4): 305-308.
- [6] 温浩, 侯新宇, 王宏. 飞机模型雷击附着点试验研究 [J]. 高电压技术, 2006, 32(7): 90-92.
Wen Hao, Hou Xinyu, Wang Hong. Research on lightning attachment points test on airplane model [J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(7): 90-92.
- [7] 赵玉龙, 刘光斌, 余志勇. 飞行器雷击附着点数值仿真研究 [J]. 微波学报, 2012, 28(4): 39-42.
Zhao Yulong, Liu Guangbin, Yu Zhiyong. Research on lightning attachment points simulation for aircraft [J]. Journal of Microwaves, 2012, 28(4): 39-42.
- [8] 高成, 宋双, 郭永超, 等. 飞机雷击附着区域的划分仿真研究 [J]. 电波科学学报, 2012, 27(6): 1238-1243.
Gao Cheng, Song Shuang, Guo Yongchao, et al. Study of numerical simulation of aircraft attachment points and lightning zoning [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2012, 27(6): 1238-1243.
- [9] 高成, 宋双, 史振华, 等. 飞机复合材料结构对雷击附着点的影响 [J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2013, 14(2): 227-231.
Gao Cheng, Song Shuang, Shi Zhenhua, et al. Impact of composite structure of aircraft on lightning attachment points [J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2013, 14(2): 227-231.
- [10] 陈晓宁, 黄立洋, 郭飞, 等. 直升机初始雷击附着区域划分仿真研究 [J]. 电波科学学报, 2015, 30(5): 910-916.
Chen Xiaoning, Huang Liyang, Guo Fei, et al. Numerical simulation of lightning initial attachment zones on helicopter [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2015, 30(5): 910-916.
- [11] 王冰, 乔新, 傅正财. 飞机闪电附着点试验设计与初步实现 [J]. 电磁避雷器, 2015 (1): 106-114.
Wang Bing, Qiao Xin, Fu Zhengcai. Design and preliminary implementation of aircraft lightning attachment experiment [J]. Insulators and Surge Arresters, 2015 (1): 106-114.
- [12] 孙柯岩, 赵小莹, 张功磊, 等. 基于分形理论的飞机雷击初始附着点的数值模拟 [J]. 物理学报, 2014, 63(2): 1-7.
Sun Keyan, Zhao Xiaoying, Zhang Gonglei, et al. Numerical simulations of the lightning attachment points on airplane based on the fractal theory [J]. Acta Phys. Sin., 2014, 63(2): 1-7.
- [13] Perrin E, Guiffaut C. Using a Design-of-Experiment technique to consider the wire harness load impedances in the FDTD Model of an aircraft struck by lightning [J]. IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility (S0018-9375), 2013, 55(4): 747-753.
- [14] Marc Meyer, Franck Flourens, Jean Alain Rouquette, et al. Modeling of lightning indirect effects in CFRP aircraft [C]. EMC Europe, 2008 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 2008: 1-5.
- [15] 郭飞, 周璧华, 高成. 飞机闪电间接效应数值仿真分析 [J]. 电波科学学报, 2012, 27(6): 1129-1135.
Guo Fei, Zhou Bihua, Gao Cheng. Analysis for lightning indirect effects of the aircraft by numerical simulation [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2012, 27(6): 1129-1135.

- 1129-1135.
- [16] 黄立洋, 陈晓宁, 郭飞, 等. 直升机雷电间接效应数值仿真 [J]. 强激光与粒子束, 2015, 27(8): 1-5.
Huang Liyang, Chen Xiaoning, Guo Fei, et al. Numerical simulation of lightning indirect effects on helicopter [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015, 27(8): 1-5.
- [17] Wu Liang, JiaYunfeng, Hu Xiu, et al. Numerical simulation and analysis of lightning indirect effects on helicopter [C]. TENCON-2013 IEEE Region 10 Conference. Xi'an, China: [s.n.], 2013: 1-5.
- [18] 吴志恩. 飞机复合材料构件的防雷击保护 [J]. 航空制造技术, 2011 (15): 96-99.
Wu Zhi'en. Protection Against lightning of aircraft composite components [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2011 (15): 96-99.
- [19] SAE. ARP5412B(R) Aircraft Lightning Environment and Related Test Waveforms [S]. Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers, 2013.
- [20] SAE. ARP5416A Aircraft Lightning Test Methods [S]. Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers, 2013.
- [21] SAE. ARP5414A Aircraft Lightning Zone [S]. Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers, 2012.
- [22] 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.
- [23] 纪朝辉, 马倩倩, 王志平, 等. 飞机复合材料雷击防护层设计与应用 [J]. 宇航材料工艺, 2011 (5): 50-54.
Ji Chaohui, Ma Qianqian, Wang Zhiping, et al. Design and application of lightning protection layer of airplane composite materials [J]. Aerospace Materials & Technology, 2011 (5): 50-54.
- [24] 王志平, 于鸽, 胡玉良, 等. 飞机复合材料表面导电层的雷击仿真研究 [J]. 中国民航大学学报, 2011, 29(6): 22-26.
Wang Zhiping, Yu Ge, Hu Yuliang, et al. Studies on lightning simulation of surface conductive layer of aircraft composite material [J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2011, 29(6): 22-26.
- [25] 朱健健, 李梦. 航空复合材料结构损伤与雷击防护的研究进展 [J]. 材料导报 A: 综述篇, 2015, 29(9): 37-42.
Zhu Jianjian, Li Meng. Research progress on lightning strike damage and protection of aviation composites structure [J]. Materials Review, 2015, 29(9): 37-42.