

## 直升机平台孔缝耦合仿真分析

刘英, 黄军玲, 谢家雨

(中国民航飞行学院航空工程学院, 四川 广汉 618307)

**摘要:** 在切向矢量有限元软件 HFSS 中, 对某直升机在电磁辐射环境下进行了孔缝耦合的仿真。模拟了飞机由于外部加装所需开孔的大小和数量, 并对直升机外加发射源干扰, 来反映机内电磁环境对飞机机载电子设备的影响。对孔缝耦合进行仿真, 将仿真结果与 DO-160F 标准进行比对分析。同时, 研究了机内辐射能量与频率、相位的关系, 以及机身不同位置下的辐射能量。通过数值分析和仿真结果得出规律性结论, 为直升机加装设备开孔提供理论依据。说明孔缝耦合的电磁仿真分析在航电系统电磁防护的工作中具有重要的指导意义。

**关键词:** 直升机; 机载电子设备; 孔缝耦合; 电磁环境; HFSS

中图分类号: V243

文献标志码: A

文章编号: 1671-637X(2016)04-0101-04

## Aperture Coupling Simulation Analysis for Helicopter Platform

LIU Ying, HUANG Jun-ling, XIE Jia-yu

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

**Abstract:** Aperture coupling was simulated under electromagnetic radiation environment for a helicopter with tangential vector finite element software HFSS. In software HFSS, the size and quantity of the openings needed for external retrofit to the helicopter was simulated, and an emission source interference was used outside the aircraft. Thus it could reflect the impact of electromagnetic radiation to the airborne electronic equipment. Simulation was made to aperture coupling, and the result was compared with the DO-160F standard. The relationship of the radiation energy with frequency and phase, and the radiation energy at different locations, were also studied. Conclusion was obtained through numerical analysis and simulation results, which can be used as a theoretical basis for making openings in helicopter in retrofit.

**Key words:** helicopter; airborne electronic equipment; aperture coupling; electromagnetic environment; HFSS

### 0 引言

由于直升机工作的特殊性, 往往需要对飞机进行加装专用设备以满足作业需要<sup>[1]</sup>。然而, 机载电子系统要在复杂的电磁环境中正常工作, 需要满足日益严格的电磁兼容标准。因为通风、散热通信、供电、加装等需要, 飞机机箱上不可避免会有孔缝。高强度的电磁波易通过孔缝进入屏蔽机箱内, 从而对机箱内的器件造成干扰或使系统不能正常工作。因此, 在进行这类问题分析时, 通常可以看作电磁的孔缝耦合问题。

目前国际上存在较多优秀的电磁兼容仿真软件, 例如美国 DEMACO 公司的 XPATC, 欧洲航天局的 TDAS-EMC<sup>[2]</sup>, ANSYS 公司的 FEKO, 德国 CST 公司的工作室套装, 法国 ONERA 的 CRIPTTE<sup>[3]</sup>等, 这些软件已经成功应用于航天、航空、航海及其他军工产品的设计开发。其中: 文献[4]在 CST 中仿真了船舶应用中的金属腔体类电磁环境的影响; 文献[5]通过综合应用仿真软件对复杂系统的电磁干扰问题进行了仿真分析; 同时, 文献[6]提出基于全域基函数来分析孔缝对矩形屏蔽体的屏蔽效能影响; 文献[7]提出飞机设计时利用 ADS 和 FEKO 相结合仿真场路协同下的电磁兼容问题。

本文提出一种基于矢量有限元软件 HFSS 模拟直升机构型, 对由于机体外部电磁辐射源所产生的电磁在不同环境下通过孔缝耦合产生的干扰对机载电子设备的影响进行仿真。

收稿日期: 2016-01-13

修回日期: 2016-03-23

基金项目: 民航科技创新引导基金(FDST0251512)

作者简介: 刘英(1982—), 女, 湖北随州人, 硕士, 研究方向为航空器机载电子设备故障诊断, 机载电子设备电磁仿真。

## 1 电磁理论基础及仿真首要问题

电磁兼容(EMC)一般指电气及电子设备在共同的电磁环境中执行各自功能的共存状态,即要求在同一电磁环境中的上述各种设备都能正常工作又互不干扰,达到“兼容”状态<sup>[8]</sup>。

通常电磁干扰耦合途径包括传导耦合和辐射耦合。传导传输必须在干扰源和敏感设备之间有完整的电气连接,干扰信号沿着这个链接电路传递到敏感设备,发生干扰现象。辐射耦合则是电磁波通过介质的形式传播,向周围空间发射干扰能量,常见的有天线耦合、场线耦合和孔缝耦合。本文将从孔缝耦合方面的仿真研究来论证直升机上改装设备时所开孔位置和开孔大小对飞机机载设备的影响。

数值仿真虽然已经广泛应用于电磁仿真,但针对直升机等复杂系统的电磁兼容仿真仍是一个极大的难题<sup>[9]</sup>。这不仅与直升机的尺寸有关,而且对飞机电磁环境的复杂化模拟也是一个关键性的挑战,因此,直升机电磁兼容仿真的首要问题是模型的建立。直升机机壳上既有用于散热、观察、过电缆等的功能性孔阵,也存在被动形成的孔缝,例如直升机加装外部光电设备时需要在机壳上开孔,因此研究有孔阵腔体的辐射干扰问题具有重要的理论意义和应用价值<sup>[10]</sup>。为此,主要模拟了开孔数量、辐射源位置和被辐射位置等不同情况,来反映电子辐射对直升机机载设备的电磁影响。

## 2 直升机电磁兼容仿真

### 2.1 直升机模型建立

由于HFSS软件本身存在难以处理大尺寸模型的局限性,所以在进行仿真时只把主机身作为模型,并且进行同比例缩小10倍的处理。最终直升机结构模拟尺寸为:机身长度1056 mm,机身高度304 mm,旋翼直径1128 mm,机身宽度233 mm。仿真如图1所示。

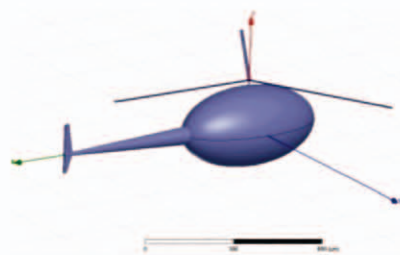


图1 直升机仿真模型

Fig. 1 Helicopter simulation model

#### 2.1.1 单孔模型

设计在单孔状态,辐射源为5 V/m时,对机载电子设备的影响。模型主要包括两个椭球体(两椭球体的

间距视为机壳厚度,尺寸为0.5 mm)和一个孔缝(开孔直径为0.6 mm),其中外面的大椭球为空间辐射边界,里面的椭球体模拟主机身,机身底部开有一个孔,如图2所示。

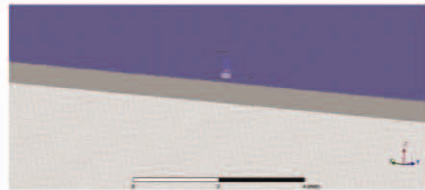


图2 直升机底部单孔模型

Fig. 2 Single aperture at the bottom of helicopter

在模型中设置好直升机外壳材质和边界条件,这是求解麦克斯韦方程的基础,也是为了有效简化模型的复杂性。设置平面波激励,位置 $Z=200$  mm,平面波波矢沿 $+Z$ 方向,假设场强大小为5 V/m。

HFSS的仿真频率与仿真模型的尺寸和模型的周围介质(介电常数、电导率和磁导率)相关。由于直升机主要机载设备的工作频率在1 GHz以内,且仿真时将模型包括耦合孔等比缩小10倍,所以最终设置的扫描频率范围为0~10 GHz。

平面波的场显示有3种方式,分别是“Incident Fields(注入场)”、“Scattered Fields(散射场)”和“Total Fields(总场)”<sup>[11]</sup>。注入场是整个空间5 V/m的激励平面波,散射场是平面波被模型散射后得到的场,总场是前两者的叠加,这里选择总场。

耦合进机体内的场每个点每个时刻都是不同的,要让数据不超出标准限值需要取一个最大值,就需要先画一条辅助线,辅助线沿 $Z$ 轴方向(这里是对机体内部中心线上的场强),求解函数为 $\max(\text{dB}(\text{Mag}_E))$ ,以将电场强度转化为与标准相同的单位形式,最终经过处理后的数据如图3所示。

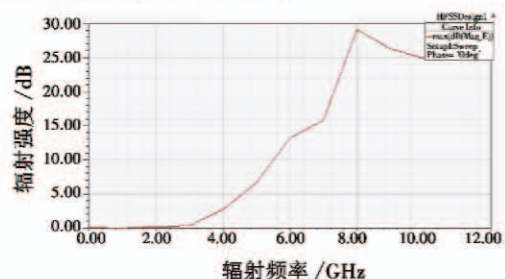


图3 单孔辐射干扰

Fig. 3 Radiation interference of single aperture

#### 2.1.2 双孔模型

开双孔的模型建立过程与开单孔是相同的,参数设置也相同,参见2.1.1节方式,建立直升机的双孔开口模型。经过数据处理之后,同时将频率缩小10倍,最终产生的辐射干扰计算结果如图4所示。

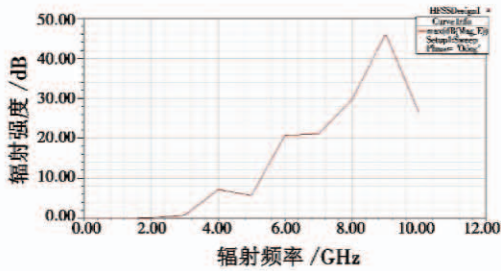


图4 双孔辐射干扰

Fig.4 Radiation interference of dual apertures

### 2.2 仿真分析与数值比对

DO-160F 标准中规定的 H 类安装设备,其辐射射频干扰的最高等级在 0 ~ 1000 MHz 范围内的辐射干扰限制均在 35 dB 以上。

结合上述限值与图 3、图 4 进行对比,当外加干扰的电场强度为 5 V/m 时,无论是通过直径为 0.6 mm 的单孔,还是直径为 0.6 mm 的双孔,所产生的辐射干扰都在规定范围内,说明在此条件下产生的干扰不会影响机载设备的正常工作,满足电磁兼容条件。为此,针对飞机加装时需要在机体上开孔,要保证开孔尺寸尽量小,一方面是为了使飞机结构受力影响尽量减小,另一方面保证飞机机载电子设备正常工作不受影响。

## 3 不同辐射形式电磁仿真

此外,还仿真了模型内部的电磁场分布图,不仅可以直观地查看关注位置的电磁场分布情况,还可以进行动态显示以展示模型工作时的电磁性能。可以选择用标量或矢量形式来显示场分布,其中,标量形式采用阴影线条来绘制模型电磁场的大小和分布,矢量形式采用带箭头的有向线段来表示电磁场的大小和分布辐射干扰的能量变化与多种因素相关,下面是分析结果。

### 3.1 单孔辐射干扰仿真研究

#### 3.1.1 辐射能量与频率、相位的关系

为了验证辐射能量与频率、相位也有一定关系,在此,仿真了单孔时在不同频率和相位下的辐射能量大小,如图 5 所示。

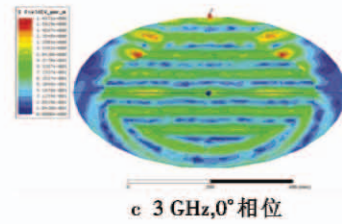
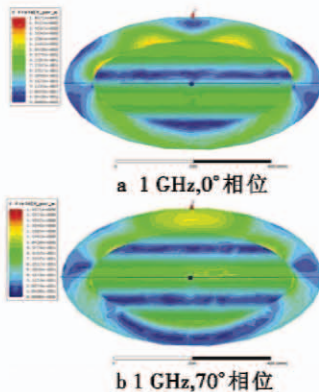


图5 单孔时辐射能量与频率、相位关系图

Fig.5 Radiation energy vs frequency and phase of single aperture

#### 3.1.2 辐射能量与位置的关系

辐射干扰对安装在不同位置的机载设备造成影响会有一些的差异,所以研究不同位置处的电场能量的变化是非常必要的。在此,仿真了单孔时机身 1 m 和 2.6 m 辐射场强大小,如图 6 所示。

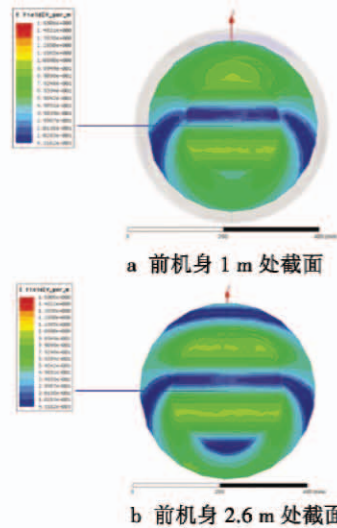


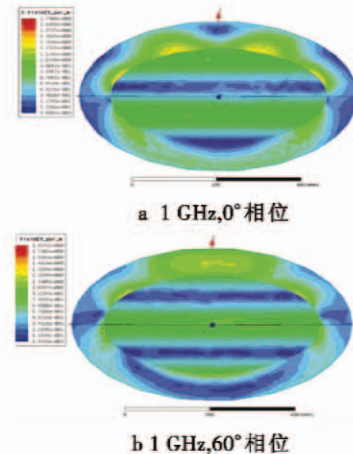
图6 单孔时辐射能量与位置关系图

Fig.6 Radiation energy vs position of single aperture

### 3.2 双孔辐射干扰仿真研究

#### 3.2.1 辐射能量与频率、相位的关系

参照 3.1.1 节方式,仿真了双孔时在不同频率和相位下的辐射能量大小,如图 7 所示。



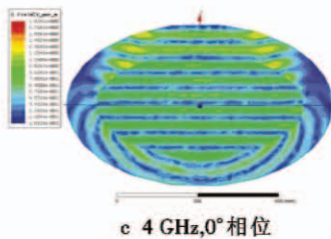


图7 双孔时辐射能量与频率、相位关系图

Fig.7 Radiation energy vs frequency and phase of dual apertures

### 3.2.2 辐射能量与位置的关系

参见3.1.2节方式,仿真了双孔状态下,机身不同位置的辐射能力大小,如图8所示。

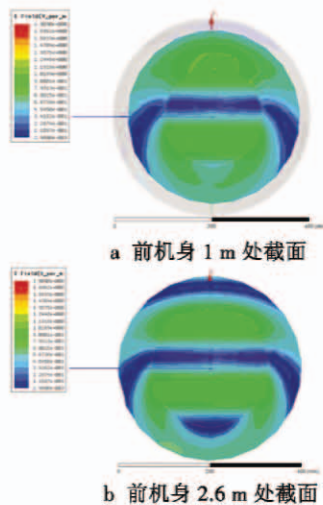


图8 双孔时辐射能量与位置关系图

Fig.8 Radiation energy vs position of dual apertures

### 3.3 仿真结果分析

结合图5~图8,无论是在单孔缝还是双孔缝状态下,机体内部场强的强弱均与频率、相位有关。在一定范围内,随着频率增大,耦合场也增大;同频率下,场能量随相位往复变化;不同位置,耦合场的大小也会存在不同,对机载设备的影响也会不同。

## 4 总结

本文主要利用 HFSS 软件对直升机机壳通过孔缝的辐射干扰做了研究,对机壳底部开单孔和双孔的机体内部能量的变化进行了仿真,并与 RTCA DO-160F 规定的辐射干扰标准限值做了对比分析。同时,模拟了直升机所受干扰在其他几种不同状态下,机内位置选择不同,对机载设备的影响。为直升机加改装提供理论依据,减少电磁兼容测试和修改时间,缩短研制周期,节省研制成本,提高费效比,保证飞机电磁兼容的可靠性和稳定性。

### 参考文献

[1] 文裕武,温清澄. 现代直升机应用及发展[M]. 北京:

航空工业出版社,2000. (WEN Y W, WEN Q C. Application and development of modern helicopter[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2000.)

- [2] FRAGNOL N, LNZOLI L, GRANGER J P, et al. Advanced electromagnetic prediction tools for satellite EMC analysis[J]. IEEE Colloquium on Circuit Design and Tools for EMC, 1995;3/1-310. 1-6.
- [3] PARMANTIER J P. First realistic simulation of effects of EM coupling in commercial aircraft wiring[J]. Computing & Control Engineering Journal, 1998, 9(2):52-56.
- [4] 瞿丹,陈瑜,樊友文. 基于 CST 的金属腔体电磁环境仿真分析[J]. 船电技术, 2014, 34(10):66-69. (QU D, CHEN Y, FAN Y W. Electromagnetic environment simulation for the cabin based on CST software[J]. Marine Electric & Electronic Engineering, 2014, 34(10):66-69.)
- [5] TANG M, LU J, MAO J, et al. A systematic electromagnetic-circuit method for EMI analysis of coupled interconnects on dispersive dielectrics[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2013, 61(1):1-13.
- [6] 周超,彭卫东,何建,等. 孔缝对航空器电子设备舱屏蔽效能的影响[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(24):6107-6112. (ZHOU C, PENG W D, HE J, et al. Influence of apertures in the avionics cabin on electromagnetic shielding effectiveness[J]. Science Technology and Engineering, 2012, 12(24):6107-6112.)
- [7] 刘焱,汤海燕,唐东,等. 基于场路协同仿真的机载设备电磁干扰分析[J]. 火控雷达技术, 2013, 42(3):82-86. (LIU Y, TANG H Y, TANG D, et al. Airborne equipment EMI analysis based on field-circuit cooperated simulation[J]. Fire Control Radar Technology, 2013, 42(3):82-86.)
- [8] 闫晓春,刘波. 飞机改装中的电磁兼容控制[J]. 科技资讯, 2013, 1(7):86. (YAN X C, LIU B. Aircraft modification electromagnetic compatibility control[J]. Science & Technology Information, 2013, 1(7):86.)
- [9] 田建学. 机载设备电磁兼容设计与实施[M]. 北京:国防工业出版社, 2010. (TIAN J X. Airborne equipment EMC design and implementation[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010.)
- [10] 陈新平,杨显清. 基于 HFSS 的有孔屏蔽体的屏蔽效能分析[J]. 信息技术, 2012(10):140-143. (CHEN X P, YANG X Q. Analysis of shielding effectiveness for rectangle cavity with apertures based on HFSS[J]. Information Technology, 2012(10):140-143.)
- [11] 何林涛. 基于 HFSS 的孔阵机壳近场屏蔽效能分析[J]. 工程设计学报, 2011, 18(4):255-259. (HE L T. Analysis of near-field shielding properties for aperture arrays based on HFSS[J]. Journal of Engineering Design, 2011, 18(4):255-259.)