

文章编号: 1674-8190(2023)05-019-10

## 飞机结构的电磁防护特性综述

王洪迅<sup>1</sup>, 邓靖<sup>1</sup>, 赵磊<sup>2</sup>, 向新<sup>1</sup>

(1. 空军工程大学 航空工程学院, 西安 710038)

(2. 西安比亚迪半导体有限公司, 西安 710119)

**摘要:** 机载电子设备承载于特定的飞机结构中, 特定的飞机结构就构成了机载电子设备特定的电磁防护特性; 飞机结构的电磁防护/电磁硬化特性对机载电子设备影响巨大, 军用飞机的电磁防护/电磁硬化特性是其作战完整性的重要内容之一。首先, 对电磁防护/电磁硬化的概念从电磁兼容和电磁战两个角度进行了阐述, 介绍了电磁加固/硬化的概念, 指出飞机结构的电磁防护需要兼顾工程技术和作战任务两个视角; 然后为了提升机载电子设备的作战完整性, 在对典型电磁威胁进行分析的基础上, 从飞机结构的角度出发分析了飞机结构的电磁防护特性以及电磁损伤机理; 最后从电磁防护、电磁硬化两个角度对飞机结构提出了几种典型的电磁防护措施。

**关键词:** 作战完整性; 飞机结构; 电磁威胁; 电磁防护; 机载电子设备

**中图分类号:** V271.4

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.16615/j.cnki.1674-8190.2023.05.03

## Overview of electromagnetic protection characteristics of aircraft structures

WANG Hongxun<sup>1</sup>, DENG Jing<sup>1</sup>, ZHAO Lei<sup>2</sup>, XIANG Xin<sup>1</sup>

(1. Aviation Engineering School, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

(2. Xi'an BYD Semiconductor Co., Ltd., Xi'an 710119, China)

**Abstract:** AES (Airborne Electronic Suits) are carried within specific structures of military aircrafts, which constitute the relevant EMP/EMH (Electromagnetic Protection/Electromagnetic Hardening) characteristics for the AES. For military aircrafts, the EMP/EMH characteristics of aircraft structures have a great impact on the AES, so the EMP/EMH characteristics of aircraft structures is one of the important parts of its operational integrity. The concept of EMP/EMH is elaborated from perspectives of both the EMC (Electromagnetic Compatibility) and the EW (Electromagnetic Warfare), and the concept of electromagnetic reinforcement/hardening is introduced. It is pointed out that the EMP/EMH of aircraft structures needs to consider both engineering technology and military operations. Then, in order to improve the operational integrity of airborne electronic equipment, based on the analysis of typical electromagnetic threats, the EMP/EMH characteristics and electromagnetic damage mechanisms of aircraft structures are analyzed from the perspective of aircraft structures. Several typical electromagnetic protection measures are proposed for aircraft structures from the perspectives of electromagnetic protection and electromagnetic hardening.

**Key words:** operational integrity; aircraft structure; electromagnetic threats; electromagnetic protection; airborne electronic suits

收稿日期: 2023-07-16; 修回日期: 2023-10-12

通信作者: 邓靖, 2512300631@qq.com

引用格式: 王洪迅, 邓靖, 赵磊, 等. 飞机结构的电磁防护特性综述[J]. 航空工程进展, 2023, 14(5): 19-28.

WANG Hongxun, DENG Jing, ZHAO Lei, et al. Overview of electromagnetic protection characteristics of aircraft structures[J].

Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2023, 14(5): 19-28. (in Chinese)

## 0 引言

机载电子设备(Airborne Electric Suits, 简称 AES)是现代军用飞机重要的构成要素,其电磁完整性(Electromagnetic Integrity)是飞机作战完整性(Aircraft Operational Integrity, 简称 AOI)的重要内容之一<sup>[1]</sup>,是固有的具有较强综合性的通用质量特性之一。现代战场环境中 AES 的电磁完整性主要体现为电磁防护(Electromagnetic Protection, 简称 EP/EMP)特性<sup>[2]</sup>:即遭遇强功率电磁干扰(Electro Magnetic Interference, 简称 EMI)或强功率电磁攻击(High-power Electromagnetic Attack, 简称 HPEA)过程中及以后, AES 仍能保持相当功能、性能的特性。

AES 承载于特定的飞机结构之中,特定的飞机结构就形成了特定的电磁耦合结构。现代军用飞机的 AES 通常与特定的飞机系统/功能关联,其就成为影响飞机整体 AOI 特性的重要因素<sup>[2]</sup>。因此对于 AES 而言,在其遭遇特定的 HPEA 过程中,良好的飞机结构可以赋予 AES 良好的电磁防护特性,进而形成良好的固有 AOI 特性。反之,若飞机结构设计在 EP 方面考虑不周,则可能导致较差的固有 AOI 特性。以往有关 AES 的 EP 特性的研究,通常多从其本身出发进行分析,研究对象包括 VPX 机箱<sup>[3]</sup>、机载综合射频系统<sup>[4]</sup>、航空发动机电子控制器<sup>[5]</sup>、高功率脉冲电源<sup>[6]</sup>、飞机液压系统<sup>[7]</sup>等。吴斌等<sup>[8]</sup>重点分析了变体飞机结构的关键技术;张羽等<sup>[9]</sup>着重研究飞机结构材料设计值,讨论了飞机复合材料的应力集中冲击损伤、材料工艺等;王安东等<sup>[10]</sup>研究了铝合金腐蚀疲劳重点难点问题。上述研究都不涉及飞机结构整体性的电磁防护特性。庄宇<sup>[11]</sup>专注于飞机发动机控制系统,涉及部分相关的 EMI 特性;张琦等<sup>[12]</sup>阐述了飞机机体内部设备常规的电磁干扰与抑制策略,主要针对 AES 的 EMI 特性,未提及飞机结构的 EMI 特性;魏宇宏等<sup>[13]</sup>阐述了飞机结构的强电磁脉冲综合屏蔽效能评定方法,也没有涉及到飞机结构的电磁防护特性。综上所述,传统飞机结构的研究重点多在于飞机的机械、材料相关特性,研究飞机结构电磁防护特性的较少。

实际上在特定的战场电磁环境中,军用飞机的结构对 AES 的电磁防护具有整体性、全局性的影响。为了提高飞机的 AOI 特性,本文首先从工

程技术和军事行动两个视角辨析电磁防护的概念;然后针对几种典型电磁威胁,阐述飞机结构的电磁防护特性以及电磁损伤机理;最后从工程技术和作战任务两个方面对飞机结构提出了几种电磁防护措施。

## 1 电磁防护概述

AES“电磁防护”概念与两个学科有关:一个是工程技术中的电磁兼容(Electromagnetic Compatibility, 简称 EMC),另一个是军事作战中的电子战(现称为“电磁战”)(Electromagnetic Warfare, 简称 EW);后者概念中还有一个术语“电磁硬化”(Electromagnetic Hardening, 简称 EMH)与本文研究的电磁防护相似。

### 1.1 电磁兼容中的电磁防护

电磁防护(EMP)首先与工程技术领域中的电磁兼容(EMC)、电磁干扰(EMI)有关;此处“电磁防护”英文通常简写为“EMP”<sup>[14-17]</sup>。

工程技术领域中的电磁兼容、电磁干扰的研究对象是特定电磁环境中的电子器件/部件、设备、分系统/系统。电磁干扰是指它们在自身工作过程中产生电磁能量对外辐射,并对自身其他部分或外部其他对象构成干扰的现象。电磁兼容是指它们在其共同的电磁环境中能正常遂行各自功能工作且不对环境中自身其他部分或外部其他对象构成不能承受的电磁干扰的能力<sup>[18]</sup>。EMC 主要包括两个方面:一是 EMC 对象在预定的电磁环境中运行过程中,可按规定的安全裕度实现预定的工作效能、且不因 EMI 而受损或产生不可接受的降级;二是 EMC 对象在预定的电磁环境中正常工作,不会给环境(或其他设备)带来不可接受的 EMI。这里与之相关的电磁防护是指在设计、研制和生产过程中为使设备具有抗电磁干扰或电磁毁伤能力而采取的技术措施,也包括为消除电磁环境对电磁敏感装置的影响,所采取的相应技术措施和对策。

这里 EMC 与 EMP 在内涵和外延上是一个关联的概念整体,其研究重点都是消除导致 EMI 的电磁环境效应;目的都是为了保障 EMP 对象在预

定电磁环境中的生存和运行能力。

## 1.2 电磁战中的电磁防护

电磁防护还与电磁战(EW)有关<sup>[19-23]</sup>。此处“电磁防护”英文简称为“EP”。

文献[19]定义了EW:“指使用电磁和定向能来控制电磁频谱或攻击敌方的军事行动”。EW分三种类型:电磁攻击(Electromagnetic Attack,简称EA)、电磁支援(Electromagnetic Support,简称ES)和电磁防护(Electromagnetic Protection,简称EP)。其中EP是指为保护人员、设施和装备免受己方、友方、中立方、对手或敌方使用电磁频谱及自然现象的影响,而导致己方战斗力受到削弱、压制或破坏而采取的军事行动<sup>[19]</sup>。

EW中的EP是一种军事任务,重点在于通过军事行动,消除或缓解电磁进攻影响的系统或流程属性或能力。将固有的硬件、流程、专用战术、方法和程序结合起来,使己方部队各项能力在拥堵或竞争激烈的电磁作战环境中发挥既定功能。

EW的EP中定义“电磁硬化(EMH)”<sup>[19]</sup>:“通过消隐、过滤、衰减、接地、粘接和/或屏蔽电磁能量的不良影响来保护人员、设施和/或设备的行动”。该词条是前述EW的EP中典型军事行动任务类型之一,并作为词源定义被文献[20-21]采纳和收录。国内该概念通常被称为“电磁加固(Electromagnetic Reinforcement,简称EMR)”<sup>[11,22-23]</sup>,强调针对特定的电磁威胁,对特定对象实施各种改善的防护措施。

这里EMH/EMR目的是保护己方频谱相关设备免受EMI或EA(如激光、高功率微波(High-Power Microwave,简称HPM)、电磁脉冲(Electromagnetic Pulse,简称EMP))威胁的影响。

## 1.3 飞机结构的电磁防护特性

首先,飞机结构的电磁防护特性非常重要。飞机的结构材料大部分为金属,机载电子设备作为其载荷(也可能是飞机结构的构成部分)承载在特定的飞机结构之中。传统飞机结构极少考虑对其中机载设备的电磁防护,导致某些固有电磁防护特性缺失<sup>[10-11]</sup>;传统机载电子设备的电磁防护多从个体局部出发导致冗余设计和过设计(包括结构过设计),致使飞机结构重量或体积的额外增加<sup>[3-7]</sup>。因此从飞机结构的角度综合考虑飞机整体的EP特性非常重要。

再者,对于飞机结构电磁防护的视角有两个,一个是工程技术视角(如EMC的EMP),一个是军事任务视角(如EW中EP的EMH),两者不可偏颇。实际上考虑到军用飞机的实际作战电磁环境,必然面临一些典型的电磁威胁;这种情况下两者之间的辩证关系可描述为:军事任务的EMH需求牵引工程技术中的EMP发展;工程技术的EMP为军事任务中的EMH提供技术支撑。飞机结构的电磁防护特性,必然需要兼顾这两个视角。

## 2 典型电磁威胁

考虑到常规EMI已经被常规的EMC措施处理,因此本文更加强调的是HPEA条件下飞机结构的电磁防护特性。现代战场环境中的HPEA威胁主要是指强电磁脉冲(EMP),其特点为:持续时间短,覆盖频谱宽,辐射功率通常为G瓦级。典型的HPEA威胁主要有三种:雷电电磁脉冲(Lightning Electromagnetic Pulse,简称LEMP)、核电磁脉冲(Nuclear Electromagnetic Pulse,简称NEMP)、射频武器(Radio Frequency Weapon,简称RFW)。

### 2.1 雷电电磁脉冲

LEMP是与雷电放电相关的电磁辐射,其产生的电场和磁场耦合到飞机电气或电子系统中,产生浪涌电磁能量<sup>[24-28]</sup>。无论是飞机空中飞行,还是地面滑行、停放,都需要考虑LEMP的影响。常规飞机外壳多数为轻质金属合金,且机身外部安装放电刷,雷击瞬间电磁能量从飞机外壳流过,通常不会伤害飞机内部。然而特定条件下的直接雷击亦会造成伤害,常见为飞机外壳上雷击点的融化烧穿。

现代飞机蒙皮多用复合材料,实际中复合材料的雷击损伤机理非常复杂,通常是传统复合材料导电性差而无法有效传导电流,在雷击点附近会发生大量电荷聚集并转化为热能,进而造成复合材料击穿,发生燃烧、熔融、爆炸和畸形;同时在雷击点附近伴随很强的电磁场能量释放,使其内部电子系统或部件受到强干扰或损伤。公共媒体常报道飞机遭受雷击的新闻,如日本两架美军F-35B战斗机、三架EA-18G战斗机被雷击的A级事故;科威特FA-18E遭遇雷击造成座舱盖、飞机蒙

皮损坏的报道,如图 1 所示。



图 1 科威特 FA-18E 遭遇雷击座舱盖<sup>[29]</sup>  
Fig. 1 Kuwait FA-18E encountered lightning strike on seat cover<sup>[29]</sup>

## 2.2 核电磁脉冲

NEMP 是核武器爆炸的产物<sup>[4]</sup>。核爆分为地下、地面、中空、高空核爆 4 种类型;其中高空核爆炸产生的 NEMP 破坏最显著。核爆炸过程中除了产生光辐射、热辐射、核辐射以外,还产生高峰值的核电磁辐射。几十千米以上高度的核爆,会因康普顿效应(伽马( $\gamma$ )射线冲击大气分子,把电子从空气分子中挤出来的现象)而产生 EMP。

NEMP 作用范围随爆炸高度而异,NEMP 最大特点是上升时间快、强度大。数纳秒时间功率即可达到最大值,频谱覆盖从数万赫兹到超过数亿赫兹;瞬间电场强度可达  $10^5$  V/m 量级,比常规 EMI 强度高几十至上百分贝<sup>[4]</sup>。

## 2.3 射频武器

RFW 是指以射频能量杀伤有生力量或破坏电子设备的武器。包括两种类型:高功率微波(High-power Microwave,简称 HPM)和非核电磁脉冲(Non-NEMP)。HPM 电磁能量集中在微波波段(300 MHz~300 GHz);Non-NEMP 电磁能量的频段分布更宽。

Non-NEMP 射频武器通常由高能炸药驱使,弹头中高能炸药爆炸使磁性电枢膨胀,使与缠绕其上的线圈感应电流达到几千万安,进而激发微波谐振器响应产生高功率微波并辐射。理论上每千克炸药能够产生 500 万焦的微波能量密度,但实际取决于转化的效率。

牛卉等<sup>[30]</sup>介绍了当前 HPM 武器发展的情况,冯奇等<sup>[31]</sup>对 HPM 武器典型场景进行了分析。

## 3 飞机结构的电磁损伤机理

与常规 EMI 类似,飞机结构电磁防护特性的传统分析也需要从三个因素出发:电磁干扰源、敏感设备、耦合途径。某些条件下其作用效果也可以通过各种专用仪器测试或仿真。本节从军用飞机的结构特性角度出发,着重从理论方面阐述其导致的电磁损伤机理。

### 3.1 导电媒质的电磁泄漏

飞机结构材料多数为金属、合金或其他导电媒质,通常认为金属是理想导体,可对电磁波起到完全电磁屏蔽的作用。然而实际的金属材料并非理想导体而是良导体,电磁波在导电媒质中的传播方程<sup>[32]</sup>为

$$\begin{cases} E(t) = \hat{x}\sqrt{2}|E_0|e^{-k''z}\cos(\omega t - k'z + \varphi_0) \\ H(t) = \hat{y}\sqrt{2}\left|\frac{E_0}{Z_c}\right|e^{-k''z}\cos(\omega t - k'z + \varphi_0 - \alpha) \end{cases} \quad (1)$$

$$S_c = \hat{z}\frac{|E_0|^2}{Z_c^*}e^{-2k''z}(\cos\alpha + j\sin\alpha) \quad (2)$$

式(1)~式(2)表明在导电媒质中,电磁波在其传播方向( $z$ 轴)上传播,其电磁分量  $E(t)$  和磁场分量  $H(t)$  幅度按指数  $e^{-k''z}$  衰减,表征电磁波能量密度的坡印廷矢量  $S_c$  按指数  $e^{-2k''z}$  衰减,其中  $k''$  为衰减系数。对于良导体而言

$$k'' \approx \sqrt{\pi f \mu \sigma} \quad (3)$$

式中: $f$ 为电磁波频率; $\mu$ 为磁导率; $\sigma$ 为电导率。

式(3)表明  $f, \sigma$  在很大的情况下电磁波在良导体中衰减很快,穿透深度很小,电磁场能量仅集中在良导体表面。为衡量电磁波在良导体中衰减/穿透深度,定义  $\delta$  为集肤深度,其定义如式(4)所示。典型金属材料的  $\delta$  值如表 1 所示。

表 1 铜和铁在不同频率下的集肤深度<sup>[31]</sup>  
Table 1 Skin depth of Cu and Fe at different frequencies<sup>[31]</sup>

材料	集肤深度/mm		
	10 kHz	1 MHz	10 GHz
铜	0.6	0.06	0.6
铁	3.56	0.356	0.003

$\delta$  仅作为高频电磁场在导体内部分布的一个参照量,经常用于镀金等导电涂覆以增加导体表面导电性的参考,但镀层厚度未必与  $\delta$  等同,镀层经常会更厚一些以进一步增加其表面导电性。

$$\delta = \frac{1}{k''} = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (4)$$

从式(4)和表1可以看出:频率越高集肤深度越小,越与传统认知符合。然而频率越低,集肤深度数值越大。这意味着在特定条件下电磁波能透过飞机结构的导电媒质传入其中。因此飞机结构中特定的导电媒质,未必能完全隔绝外来特定频段 HPEA 的影响。飞机上很多机载电子模块,尽管采用了几乎完全屏蔽的金属外壳(如图2所示),固然可以规避外来高频信号的影响,但是难以规避低频段的干扰。

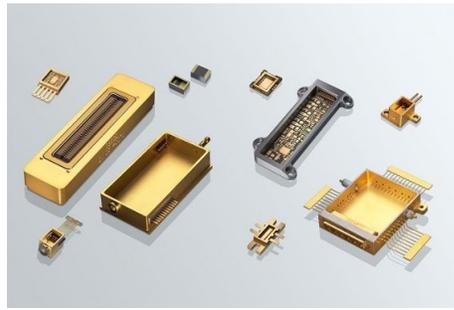


图2 机载电子模块、部件的金属外壳  
Fig. 2 Metal casing of airborne electronic modules and components

### 3.2 波导效应

飞机结构中很多区域都需要开窗(进气道、交叉梁构造、发动机尾喷等),或大部件连接(机身与机翼之间连接),这就形成了窗式结构或连接处存在缝隙(如图3所示),这类构造导致了波导效应。

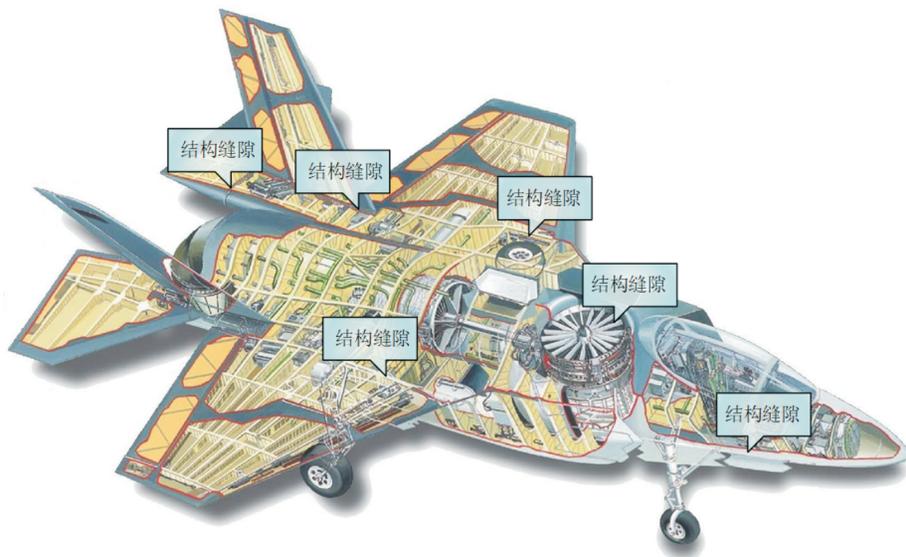


图3 飞机结构上的开窗和缝隙<sup>[33]</sup>  
Fig. 3 Windows and gaps in aircraft structure<sup>[33]</sup>

由文献[32]可知,对于矩形波导,若设波导横截面矩形窗的长边边长为  $a$ ,电磁波波长为  $\lambda$ ,则矩形波导可以有3种导波模式:

1) 截止模式:发生条件为  $\lambda > 2a$ 。

电磁波无法在波导中传导,该波长对应的范围为截止区。

2) 单模模式:发生条件为  $a < \lambda < 2a$ 。

波导中仅有  $TE_{10}$  是传播模,其他高次模截止。这意味着外来特定频段的电磁波能量,可通过相应尺寸的飞机结构矩形窗口向飞机内部传输;也

就是发生电磁波衍射。

3) 多模模式:发生条件为  $\lambda < a$ 。

波导中可有不少于1个的传导模式。 $\lambda$  越小,传导模式越多;若频率有限,则传导模的数量也有限。

综上,特定尺寸的飞机开窗和缝隙结构,和战场电磁环境中高于某一特定频点的外来电磁能量,若满足波导单模或多模的条件,就可能经由该窗型结构或缝隙进入飞机结构内部,影响其中 AES。

### 3.3 同轴线效应

很多飞机结构不仅开窗,还有金属部件(例如金属油管、气管,电缆等)从该窗中穿过(如图4所示),并且两者之间绝缘。这样就容易构成同轴传输线效应的条件。

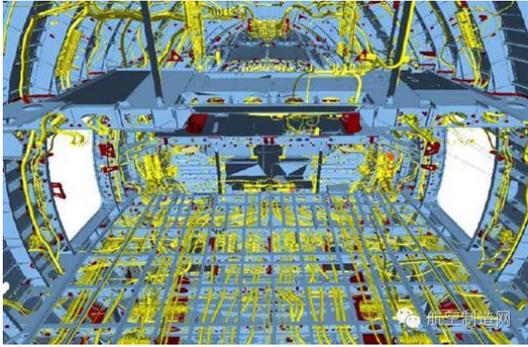


图4 某大型飞机结构的开窗和孔洞<sup>[34]</sup>

Fig. 4 Windows and holes in a large aircraft structure<sup>[34]</sup>

同轴线内部的电磁场方程<sup>[31]</sup>如式(5)或式(6)所示:

$$\begin{cases} \nabla_i^2 E_0(x, y) = 0 \\ \nabla_i^2 H_0(x, y) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} V(z) = V_0 e^{-jkz} \\ I(z) = I_0 e^{-jkz} \end{cases} \quad (6)$$

这种结构中传输的是TEM电磁波,频段覆盖范围很广。飞机上有很多地方开窗或者通孔,且有金属线经由其中,两者之间相互绝缘,虽然内部金属与外部金属未必完全同轴,但其电磁场方程类似于式(5)或式(6)。对于低频段电磁场而言,这种同轴线效应改变了电磁场的耦合模式,增强耦合效应,破坏防护效果。对于高频段电磁波而言,波导效应更突出,这里不再赘述。

与波导效应不同,同轴线效应重点关注耦合低于某一特定频点的外来电磁能量,影响其中AES。

### 3.4 环形天线效应

很多飞机结构都可构成一个金属环<sup>[35-36]</sup>,如连翼飞机中的金属结构,如图5所示。从电磁效应来看,这些环状结构就可构成另外一种电磁部件:环形天线<sup>[37-39]</sup>。按照其相对电磁波波长的尺寸通常分成两类。

其一,电小环或小环天线,对应条件为天线周

长 $C \ll \lambda$ 或 $C < 0.1\lambda$ 。环的轴线为零辐射方向,最大辐射方向位于环面。小环上的电流分布均匀。小环主要与磁场响应。

其二,大环天线。对应条件为天线周长 $C \leq \lambda$ ,其最大辐射方向垂直环面。大环上的电流则随长度变化,电流波节点和波腹点取决于馈电点的位置。大环主要与电场响应。

特定的飞机结构若形成环形天线(不论圆形、矩形、三角形、或其他),就提高了特定飞机结构对特定频段电磁能量的敏感程度,改变并影响飞机周围的电磁场特性,从而使得这种特定结构对特性频段电磁敏感。若附近有相关的信号线或者飞机电子设备,且措施不当就会受到外来电磁的影响。



(a) 环形机翼示例1<sup>[35]</sup>



(b) 连翼飞机示例2<sup>[36]</sup>

图5 连翼飞机示意图

Fig. 5 Schematic diagram of a connected wing aircraft

## 4 飞机结构的电磁防护与加固

由上述分析可知,特定频段的电磁能量,特定的飞机结构,有特定的电磁耦合模式;进而有特定的飞机结构电磁防护特性。同理,对这些结构进行有针对性的调整优化,可改变、改善飞机结构的EMP/EMH特性。

### 4.1 典型EMP措施

从EMP角度考虑飞机的结构特性,典型的措施包括:整机形成法拉第笼、复合材料蒙皮增强导电性、座舱盖镀膜、雷达罩设置防雷条等。

#### 4.1.1 整机形成法拉第笼

对于 AES 而言,首先尽量使其周边的飞机结构形成法拉第笼结构<sup>[24]</sup>。虽然“法拉第笼”概念非常普通,然而在工程实践中仍然是绕不开的概念和措施。法拉第笼强调飞机结构由金属或良导体形成无破损、完美的金属外壳,可有效地隔绝 EMI,但其不能屏蔽低频变化的电场、磁场。飞机整体作为 AES 外壳形成法拉第笼效应,其 EMP 特性非常明显。影响飞机结构“法拉第笼”EMP 效果的因素主要有三个:金属笼厚度、孔洞尺寸以及穿洞金属结构。笼厚度由导电媒质特性决定,孔洞尺寸由波导效应决定,穿洞金属结构由同轴线效应决定,需要综合考量和权衡。

在飞机设计与生产阶段尽可能提高金属笼厚度,减少金属孔洞、穿洞金属结构的数量,缩小金属孔洞、金属结构穿洞的尺寸。不得不开孔洞的结构则尽量开圆形孔洞,少开长方形孔洞。

#### 4.1.2 复合材料蒙皮增强导电性

现代飞机蒙皮大量采用复合材料,以达到增强强度减少重量的效果,但常规的复合材料导电性极差,其电磁防护特性较差。

为了增强其防护特性,可提高复合材料整体电导率。例如为其铺设金属保护层、金属网,制作过程中在内部添加碳纳米管等导电性物质等。787 飞机采用了铜网“全屏蔽方案”<sup>[24]</sup>;公开媒体宣称其铜制导电网长度超过 91 km,重达 1 t。A320、A350 复合材料结构中嵌入金属箔增强导电性。复合材料采取 EMP 措施之后的防雷效能明显改善<sup>[25-28]</sup>。

#### 4.1.3 座舱盖镀膜

军用飞机的座舱是不得不对“电磁”开放的飞机结构之一。座舱盖是飞机中十分重要的部件,飞行员的视野、安全等保证都需要座舱盖来提供。传统座舱盖材料为绝缘体,其内部主要为飞机操作人员以及相关的电子设备。若受 HPEA 影响,可能会导致人员伤亡、飞机失控的危险。现代飞机座舱盖镀膜或增强导电性多从隐身、电磁屏蔽<sup>[40]</sup>角度考虑,实际这种措施也有 EMP 效果,当然需要座舱盖导电层与飞机金属外壳完美连接。

#### 4.1.4 雷达罩设置防雷条

军用飞机的机头部位通常设置多功能雷达,其雷达舱是另外一个不得不对“电磁”开放的飞机

结构。军用飞机的机头部位通常是雷达罩,雷达罩多用透波的玻璃纤维等复合材料制作,可透过 99% 以上的电磁波能量,传统的飞机结构要求尽量减少在相控阵雷达前面出现比较大的金属物体。然而对于绝缘雷达罩而言,若遭遇 HPEA 威胁,可能会影响雷达性能、损坏雷达甚至通过雷达对其他机载电子设备产生威胁,影响飞机的整体安全性能。

对飞机雷达罩采取 EMP 措施非常必要<sup>[41]</sup>。常见措施是在其外部镶嵌金属质地的防雷条(如图 6 所示),然后和机体金属外壳良好连接,飞机的机翼尖端又有很多放电探针,这样就让整个机体包括机头雷达天线在内,形成了一个等电位的隐形法拉第笼。防雷条的结构和缝隙需要设计合理,太稀疏则防雷效果差,太稠密则可能影响雷达的正常工作。

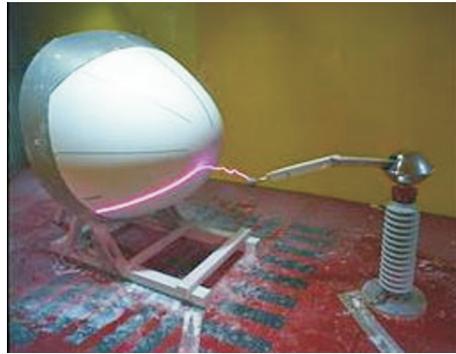


图6 飞机防雷条示意图<sup>[42]</sup>

Fig. 6 Schematic diagram of aircraft lightning protection strip<sup>[42]</sup>

## 4.2 典型 EMH 措施

从 EMH 角度而言,由于飞机结构已经固定,不能再像设计与生产阶段一样采取上述措施。但可以根据作战实际情况需要,通过以下措施视情实施电磁加固。

#### 4.2.1 增强法拉第笼效应

可以有多种措施增强法拉第笼效应。例如:

1) 涂覆金属漆。为飞机涂覆一层金属漆是一种简单有效的 EMH 措施,金属漆可在飞机表面形成导电层,即适用于常规飞机需要增强特定结构表面金属厚度,也适用于复合材料表面。

2) 金属箔胶带黏附。金属箔胶带可以迅速黏附于特定的结构上,例如长的结构缝隙;小的孔洞覆盖等,也可用于复合材料上临时改善其电磁防

护特性。

3) 金属网、金属皮填补孔洞。对于某些孔洞,可以采用特定形状的金属网、金属皮进行填补。例如对于飞机雷达舱,雷达罩采取加固措施很难;但是考虑到飞机雷达舱金属结构上很多孔洞,因此可对这些孔洞通过固定金属网、金属皮进行电磁加固。

#### 4.2.2 设置特定电磁加固构造

根据飞机结构实际,采取某些电磁加固措施。例如:

1) 对于飞机座舱,考虑到座舱结构实际,在座舱内部设置可收放遮光罩,罩上涂覆金属层;或采用金属遮光罩,可以明显改善电磁防护效果,并且不至于影响飞行效能。

2) 粘贴吸波材料。对于某些机载雷达舱,在舱内部的孔洞附近粘贴吸波材料,对于泄漏进来的电磁波能量进行吸收。

3) 形成电磁波阻断结构。在电磁耦合路径上,设置某些结构,改变电磁场能量传递方式和路径。

## 5 结束语

面对现代战场上各种电磁威胁,作战飞机的飞机结构电磁防护特性对其机载电子设备有全局性、整体性的影响。良好的飞机结构具有更好的EMP特性,或者采取合适的EMH措施,以增强电磁威胁下的飞机作战完整性。当然就军用飞机的作战完整性而言,飞机结构电磁防护特性并非其需要考量的唯一因素,还涉及很多其他方面的因素,如结构构型、材料、强度等;各种因素需要进行细致的综合考量和权衡,并进行测试和验证;现代电磁仿真工具可以为此提供极大的便利条件。尤其是各种EMH措施,很多具有附加效应(例如增重、增加操作等),需要根据作战实际需要权衡采用。

### 参考文献

- [1] 何宇廷. 飞行器服役(作战)完整性的提出与发展[J]. 航空工程进展, 2022, 13(3): 1-11.  
HE Yuting. Presentation and development of aircraft operational integrity[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2022, 13(3): 1-11. (in Chinese)
- [2] 魏宇宏, 王俊, 罗旭东, 等. 飞机结构强电磁脉冲综合屏蔽效能评定方法[J]. 工程与试验, 2021, 61(4): 35-37, 72.  
WEI Yuhong, WANG Jun, LUO Xudong, et al. Research on electromagnetic interference suppression and susceptible defending for aircraft hydraulic system[J]. Engineering & Test, 2021, 61(4): 35-37, 72. (in Chinese)
- [3] 尤贵, 魏露露, 周思远. VPX机箱的电磁防护设计及测试整改[J]. 安全与电磁兼容, 2020(6): 55-59.  
YOU Gui, WEI Lulu, ZHOU Siyuan. Electromagnetic protection design and test rectification of VPX chassis[J]. Safety & EMC, 2020(6): 55-59. (in Chinese)
- [4] 王晓明. 机载综合射频系统高空核电磁脉冲耦合分析与验证[J]. 电波科学学报, 2020, 35(3): 325-331.  
WANG Xiaoming. Analysis and verification of HEMP coupling of airborne integrated radio frequency system[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2020, 35(3): 325-331. (in Chinese)
- [5] 何锦涛. 航空发动机电子控制器电磁防护设计研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.  
HE Jintao. Research on electromagnetic protection design of aeroengine digital electric controller[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019. (in Chinese)
- [6] 杨丹, 康强, 金晖, 等. 高功率脉冲电源的强电磁脉冲干扰防护技术研究[J]. 科技与创新, 2020(21): 36-37.  
YANG Dan, KANG Qiang, JIN Hui, et al. Research on strong EMP interference protection technology for high power pulse power supply[J]. Science and Technology & Innovation, 2020(21): 36-37. (in Chinese)
- [7] 杨顺, 孙宏涛, 林贇, 等. 飞机液压系统电磁干扰抑制与敏感防护研究[C]// 第五届中国航空科学技术大会. 青岛: 中国航空学会, 2021: 293-299.  
YANG Shun, SUN Hongtao, LIN Yun, et al. Research on electro-magnetic interference suppression and susceptible defending for aircraft hydraulic system[C]// The 5th China Aerospace Science and Technology Conference. Qingdao: Chinese Society of Aeronautics and Astronautics, 2021: 293-299. (in Chinese)
- [8] 吴斌, 杜旭朕, 汪嘉兴. 变体飞机智能结构技术进展[J]. 航空科学技术, 2022, 33(12): 13-30.  
WU Bin, DU Xuzhen, WANG Jiaying. Advances in smart structure technology for variant aircraft[J]. Aeronautical Science & Technology, 2022, 33(12): 13-30. (in Chinese)
- [9] 张羽, 王召娣, 但春明, 等. 飞机结构复合材料设计值研究进展[J]. 高科技纤维与应用, 2017, 42(5): 8-15, 23.  
ZHANG Yu, WANG Zhaodi, DAN Chunming, et al. Research progress of aircraft composite structural design values[J]. Hi-Tech Fiber and Application, 2017, 42(5): 8-15, 23. (in Chinese)
- [10] 王安东, 陈跃良, 卞贵学, 等. 飞机用高强度铝合金腐蚀疲劳研究进展[J]. 航空制造技术, 2017(20): 95-103.  
WANG Andong, CHEN Yueliang, BIAN Guixue, et al. Research progress on corrosion fatigue of high strength alumi-

- num alloy of aircraft[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2017(20): 95-103. (in Chinese)
- [11] 庄宇. 飞机EMP加固技术[J]. *智库时代*, 2018(44): 189, 191.  
ZHUANG Yu. EMP reinforcement technology of aircraft[J]. *Think Tank Era*, 2018(44): 189, 191. (in Chinese)
- [12] 张琦, 白欣鹏, 李凌. 飞机的电磁干扰与抑制策略分析[J]. *集成电路应用*, 2023, 40(1): 234-235.  
ZHANG Qi, BAI Xinpeng, LI Ling. Analysis of aircraft electromagnetic interference and suppression strategy[J]. *Application of IC*, 2023, 40(1): 234-235. (in Chinese)
- [13] 魏宇宏, 王俊, 罗旭东, 等. 飞机结构强电磁脉冲综合屏蔽效能评定方法[J]. *工程与试验*, 2021, 61(4): 35-37, 72.  
WEI Hongyu, WANG Jun, LUO Xudong, et al. Research on electromagnetic interference suppression and susceptible defending for aircraft hydraulic system[J]. *Engineering & Test*, 2021, 61(4): 35-37, 72. (in Chinese)
- [14] 赵晓凡. 基于功能安全的电磁兼容及防护技术[J]. *微波学报*, 2018, 34(s2): 406-409.  
ZHAO Xiaofan. Electromagnetic compatibility and protection technology based on functional safety[J]. *Journal of Microwave*, 2018, 34(s2): 406-409. (in Chinese)
- [15] 刘尚合, 孙国至. 复杂电磁环境内涵及效应分析[J]. *装备指挥技术学院学报*, 2008(1): 1-5.  
LIU Shanghe, SUN Guozhi. Analysis of the concept and effects of complex electromagnetic environment[J]. *Journal of Equipment Academy*, 2008(1): 1-5. (in Chinese)
- [16] 刘鑫. 电磁兼容与电磁防护相关研究进展[J]. *中国高新技术*, 2018(18): 11-13.  
LIU Xin. Research progress of electromagnetic compatibility and electromagnetic protection[J]. *High and New Technology of China*, 2018(18): 11-13. (in Chinese)
- [17] 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 Shanghe, LIU Weidong. Progress of relevant research on electromagnetic compatibility and electromagnetic protection[J]. *High Voltage Engineering*, 2014, 40(6): 1605-1613. (in Chinese)
- [18] 蒋玉妹. 电磁兼容(EMC)最新发展研究[J]. *工业设计*, 2016(7): 180-181.  
JIANG Yumei. Research on the latest development of electromagnetic compatibility (EMC) [J]. *Industrial Design*, 2016(7): 180-181. (in Chinese)
- [19] U. S. Department of Defense. Joint electromagnetic spectrum operations: JP 3-85[S]. US: U. S. Department of Defense, 2020.
- [20] U. S. Department of Defense, NATO. DOD dictionary of military and associated terms-2021[M]. US: U. S. Department of Defense, NATO, 2021.
- [21] Head-quarters Department of the Army, US. Cyberspace and electronic warfare operations: FM 3-12 [R]. US: Head-quarters Department of the Army, 2017.
- [22] 李强, 余祥, 安梦凡. 美军电子战与电磁频谱战的发展及启示[C]// 第十届中国指挥控制大会. 北京: 中国指挥与控制学会, 2022: 272-279.  
LI Qiang, YU Xiang, AN Mengfan. The development and enlightenment of US electronic warfare and electromagnetic spectrum warfare[C]// The 10th China Conference on Command and Control. Beijing: Chinese Institute of Command and Control, 2022: 272-279. (in Chinese)
- [23] 金宁. 美军电磁频谱战理念发展及能力建设现状探析[J]. *军事文摘*, 2022(17): 7-10.  
JIN Ning. U. S. exploration of current situation of concept development and capacity building of electromagnetic spectrum warfare in the US military[J]. *Military Digest*, 2022(17): 7-10. (in Chinese)
- [24] 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. (in Chinese)
- [25] 钱宇琛, 卢翔, 周显达. 雷击环境下延展金属箔电磁屏蔽特性[J]. *高电压技术*, 2022, 48(10): 4189-4195.  
QIAN Yuchen, LU Xiang, ZHOU Xianda. Electromagnetic shielding characteristics of expanded metal mesh under lightning strike environment[J]. *High Voltage Engineering*, 2022, 48(10): 4189-4195. (in Chinese)
- [26] 何征, 杨有为, 熊秀, 等. 飞机新型抗雷击复合材料研究进展[J]. *飞机设计*, 2021, 41(1): 31-35.  
HE Zheng, YANG Youwei, XIONG Xiu, et al. Research progress on new lightning protection composites for aircraft[J]. *Aircraft Design*, 2021, 41(1): 31-35. (in Chinese)
- [27] 赵毅. 飞机复合材料蒙皮结构闪电直接防护分析[J]. *科技信息*, 2013(17): 62-63.  
ZHAO Yi. Analysis on direct lightning protection for aircraft composite skin structure[J]. *Science & Technology Information*, 2013(17): 62-63. (in Chinese)
- [28] 朱雪蒙, 常新龙, 胡宽, 等. 碳纤维增强聚合物基复合材料雷击损伤研究进展[J]. *化工新型材料*, 2023, 51(3): 14-19.  
ZHU Xuemeng, CHANG Xinlong, HU Kuan, et al. Research progress on lightning strike damage to carbon fiber reinforced polymer[J]. *New Chemical Materials*, 2023, 51(3): 14-19. (in Chinese)
- [29] DAVID C. Watch: lightning bolt strikes an F/A-18C Hornet flying through the clouds [EB/OL]. (2018-12-28) [2023-07-16]. [https://the-aviationist.com/2018/12/28/watch-lightning-bolt-strikes-an-f/a-18c-hornet-flying-through-the-clouds/#google\\_vignette](https://the-aviationist.com/2018/12/28/watch-lightning-bolt-strikes-an-f/a-18c-hornet-flying-through-the-clouds/#google_vignette).
- [30] 牛卉, 伍洋, 李明. 国外高功率微波武器发展情况研究[J]. *飞航导弹*, 2021(8): 12-16.  
NIU Hui, WU Yang, LI Ming. Foreign high-powered mi-

- crowave weapons development study[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2021(8): 12-16. (in Chinese)
- [31] 冯奇, 傅镇波. 高功率微波武器典型场景应用分析[J]. 中国电子科学研究院学报, 2021, 16(9): 916-920.  
FENG Qi, FU Zhenbo. Application analysis of HPM weapon in typical scenarios [J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2021, 16(9): 916-920. (in Chinese)
- [32] 冯恩信. 电磁场与电磁波[M]. 4版. 西安: 西安交通大学出版社, 2019: 204, 268.  
FENG Enxin. Electromagnetic fields and waves [M]. 4th ed. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2019: 204, 268. (in Chinese)
- [33] JOHN B. Setting the standard for JSF software testing[EB/OL]. (2002-05-10)[2023-07-16]. [http://www.gensoft-tr.com/ldra-images/referanslar/F-35\\_Lightning\\_II\\_Cutaway.jpg](http://www.gensoft-tr.com/ldra-images/referanslar/F-35_Lightning_II_Cutaway.jpg).
- [34] 大连义邦科技. 航空线束和线缆电缆组件减重方案[EB/OL]. (2019-04-11)[2023-07-16]. [http://www.dlybkj.cn/show\\_261.html](http://www.dlybkj.cn/show_261.html).  
Dalian Yibang Technology. Weight reduction scheme of aviation wiring harness and cable and cable assembly[EB/OL]. (2019-04-11)[2023-07-16]. [http://www.dlybkj.cn/show\\_261.html](http://www.dlybkj.cn/show_261.html). (in Chinese)
- [35] FLY-R. FLY-R2-HSTD\_web.pdf[EB/OL]. (2020-12-08)[2023-07-16]. <https://www.flyr-uas.com/en/r2-hstd>.
- [36] 峰飞航空. 长航时大载荷智能化V400信天翁全球首发[EB/OL]. (2020-09-13)[2023-07-16]. <https://x-droners.com/uav/info/2009210009>.  
Fengfei Aviation. Long flight time large payload intelligent V400 Albatross world premiere [EB/OL]. (2020-09-13)[2023-07-16]. <https://x-droners.com/uav/info/2009210009>. (in Chinese)
- [37] 朱诚. 基于无线胶囊内窥镜系统的环形天线的设计与研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2019.  
ZHU Cheng. Design of loop antenna for wireless capsule endoscope system [D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2019. (in Chinese)
- [38] 林昌禄. 天线工程手册[M]. 北京: 电子工业出版社, 2002: 239-254.  
LIN Changlu. Antenna engineering manual [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002: 239-254. (in Chinese)
- [39] KRAUS J D, MARHEFKA R J. Antennas: for all application [M]. 3rd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008.
- [40] 陈学儒. 聚合物表面紫外臭氧改性研究及座舱盖电磁屏蔽膜层的制备[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.  
CHEN Xueru. Study on UV ozone modification of polymer surface and preparation of electro-magnetic shielding film for cockpit cover [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019. (in Chinese)
- [41] 张毅, 司晓亮, 李亚美, 等. 飞机雷达罩雷电防护设计仿真研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2019, 42(9): 1222-1226, 1291.  
ZHANG Yi, SI Xiaoliang, LI Yamei, et al. Simulation research on lightning protection design of aircraft radomes [J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2019, 42(9): 1222-1226, 1291. (in Chinese)
- [42] NASA. Virtual tour of the icing research tunnel [EB/OL]. (2000-05-18)[2023-07-16]. <https://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/IRT/research.htm>.

#### 作者简介:

王洪迅(1977—),男,博士,副教授、硕导。主要研究方向:电磁场与电磁波,通信与信息系统,航空电子系统等。

邓靖(2000—),女,硕士研究生。主要研究方向:信息与通信工程。

赵磊(1997—),男,硕士,高级工程师。主要研究方向:汽车电子。

向新(1971—),男,博士,教授、博导。主要研究方向:通信与信息系统,航空电子系统等。

(编辑:马文静)