

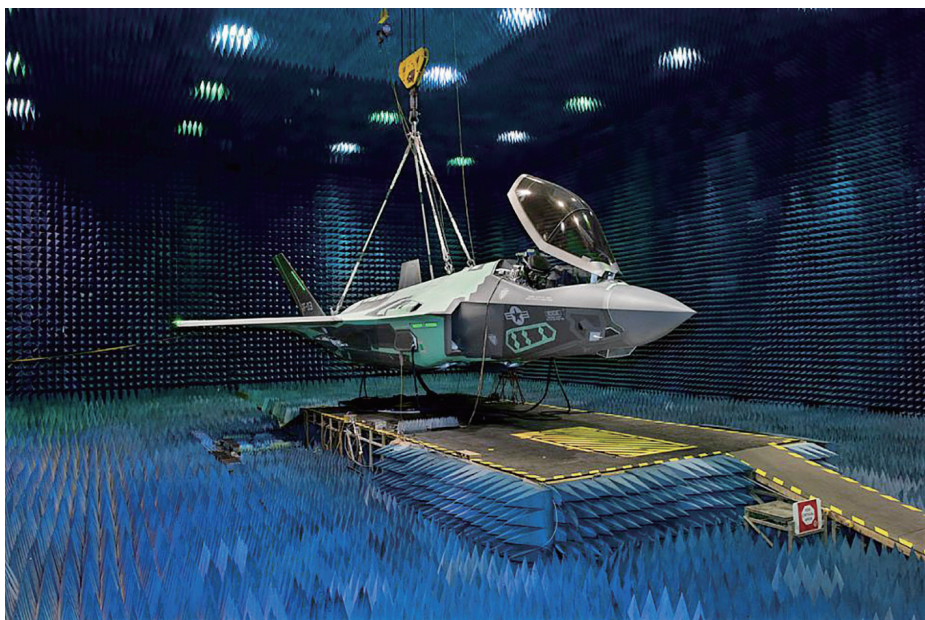
舰载机发动机电磁兼容优化设计

Optimization Design of Electromagnetic Compatibility of Carrier Aircraft Engine

徐鸣 / 海军装备部重大专项装备项目管理中心 尹珑翔 刘子龙 / 中国航发贵阳所

电磁兼容性设计的目的就是使电子设备或系统在预期的电磁环境中实现电磁兼容,是电子设备或系统的规定功能得以实现、效能得以充分发挥的重要保证。而对处于复杂电磁环境的舰载机发动机来说,电磁兼容优化设计显得尤为重要。

随着航空发动机检测参数的增多和控制功能的不断提高,使得航空发动机控制系统尤其是数字电子控制器电路结构日益复杂。舰载机发动机随飞机停放在舰船上,周边存在许多大功率、高频率电子设备和电缆,电磁环境复杂、电磁场强度高,发动机工作会遭遇强电磁干扰。另外,为适应任务的发展需要,飞机的数字化、自动化、智能化水平不断提高,导航系统、武器系统、电源系统、控制系统等配置的电子、电气设备不断增多,功率不断增大,频率逐渐升高,同时出于轻量化的目的,飞机采用大量的复合材料,导致机体屏蔽性能降低,这对飞机及发动机系统电磁兼容性提出了新的、严峻的挑战。舰载机发动机所有电气/电子系统和附件的电磁兼容性应符合GJB 151B—2013《军用设备和分系统电磁发射和敏感度要求与测量》和HJB 34A—2007《舰船电磁兼容性要求》的规定。发动机附件雷电防护设计应满足GJB 2639—1996《军用飞机雷电防护》的要求。相比其他发动机,舰载机发动机电磁兼容要求增加了静电放电敏感度(CS112)、25Hz ~ 100kHz磁场辐射发射(RE101)和雷电试验等项目,并在25Hz ~ 150kHz



美国F-35战斗机进行电磁环境测试

电源线传导敏感度(CS101)、电源线尖峰信号传导敏感度(CS106)、4kHz ~ 400MHz电缆束注入传导敏感度(CS114)、10kHz ~ 100MHz电缆与电源线阻尼正弦瞬态传导敏感度(CS116)、10kHz ~ 40GHz电场辐射敏感度(RS103)等项目提出了更高的要求。因此,舰载机发动机须在其他发动机电磁兼容设计的基础上,在电气接线方式、电子控制器、点火系统、传感器等方面进行改进优化,才能满足相关要求。

电气接线方式优化

为兼顾舰载机发动机的推力指标要求,需要对控制系统零组件进行轻量化设计,往往会导致发动机上控制系统布局紧凑,密布接线。相比于其他发动机,舰载机发动机外界所处的电磁环境还包括海域的自然干扰源、接收机、发射机、天线等,有意的威胁类电磁环境和无意的背景类电磁环境综合作用。舰载机发动机的电气接线设计需要兼顾低频、

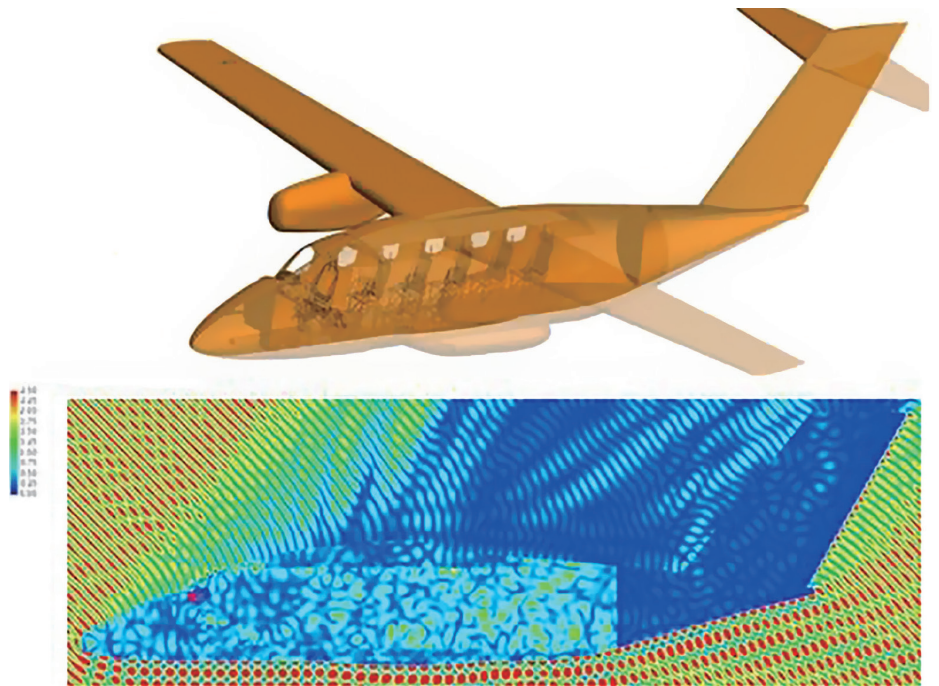
高频电缆的耦合抑制，控制共模电流。为确保舰载机发动机电气接线符合电磁兼容性设计要求，在开展电气系统设计时，应遵循以下原则：除开关量外，其余导线选择双绞或三绞屏蔽导线；导线屏蔽层通过防波套与屏蔽式尾附保证360°屏蔽连续；发动机电缆屏蔽层采用单端接地；高压导线采用内、外双层屏蔽方式，采用双端接地；发动机电缆主插头和附件端插头选用耐海洋系列连接器，尾附选用屏蔽式尾附保证360°屏蔽连续；导线成束后，外边选用轻型防波套进行防护；发动机电缆的分叉点，采用防波套与耐高温编制护套搭接，并选择一体编织防波套技术，保证分叉处的屏蔽连续性；导线屏蔽通过一段防波套接到连接器壳体，将屏蔽层的感应电流通过接地安全释放，通过连接器与发动机连接的支架引到发动机壳体上，提高电缆抗电磁干扰能力。

电子控制器优化设计

由于分布式架构的控制系统目前成熟度较低，可靠性不能满足航空发动机的指标要求，目前我国航空发动机全权限数字式电子控制(FADEC)系统大多是典型的集中式控制系统。由于舰载机的电子控制器采集信号数量较多、种类繁多，在电子控制器端的信号极易互相耦合、引入干扰，因此需要对电子控制器电磁兼容量级进行提升。对电子控制器的优化设计主要分为接地、滤波、雷电防护、屏蔽防护和其他几个方面。

电子控制器接地

机箱面板上设计了专门的接地组件用于接地搭接，电子控制器



飞机的电磁兼容仿真

+28V地和壳体地在接地柱处短接；电子控制器内所有二次电源均单点接地；数字地和模拟地在A/D转换器处单点相连，能有效避免数字电路噪声干扰模拟电路，并泄露至线缆；外壳需接地的元器件紧贴导热板，并使导热板与机壳保持良好的电接触，可减小电磁辐射。

电子控制器滤波

选用高性能电磁干扰(EMI)滤波器以消除电源的干扰，安装靠近电源插座入口，紧贴机箱壁安装，保证良好的接地效果；在航插接口设计滤波电路，保证良好的抗干扰及自身干扰滤除能力。

电子控制器屏蔽防护

箱体、面板、后盖等铝合金材料的零件表面采用导电氧化处理，使得表面处理层具有良好的导电效果，机箱各零件之间具有较低的连接电阻；机箱壳体选用抗电磁辐射效果好的材料，面板、盖板与箱体

结合面采取凹槽平面配合结构；选用具有高屏蔽效果可压缩的密封材料密封，如插座密封垫、机箱屏蔽条的使用以达到良好的电磁屏蔽效果；在电子控制器的敏感电路之间增加瞬变抑制器，降低到电路能够承受的水平；提高抗损伤水平的电路设计，选用具有一定防护的器件，增加过压过流保护；提高功能电路承受失常能力的硬件设计，采用一定的功能冗余设计和故障隔离技术，以防故障传播，避免对其他功能电路的不利影响。

电子控制器雷电防护

电子控制器箱体为全金属屏蔽结构，理论上形成完全的电屏蔽，并与飞机结构有良好的搭接，搭接电阻不大于5mΩ，能迅速将雷电的电流导出；对信号电缆线进行屏蔽，且屏蔽层与飞机结构具有良好的搭接；除搭接终端外，任何位置上的带电零件与飞机基本结构保持绝缘；

通过提高电路的损伤和功能失常门限值来减小它们的易损性。使进入电子控制器电流的瞬变不至于损伤电路或使电路功能失效；对输入/输出信号进行了防雷电设计，在电子控制器的输入/输出信号与壳体地之间增加瞬变抑制器，降低到电路能够承受的水平；提高抗损伤水平的电路设计，选用具有一定防护的器件，增加过压过流保护；提高功能电路承受失常能力的硬件设计，采用一定的功能冗余设计和故障隔离技术，以防故障传播，免除对其他功能电路的不利影响。

其他设计

航空插座与母板间的弱、小信号与强、大信号线分开走线；模块上元器件布置尽可能紧凑，减少布线尤其是高频总线的长度；采用高可靠性的针形印制电路板插座；进行印制电路板（PCB）设计时，设置镜像地和电源，减小地环流；高速时钟信号尽量在同一印制板层走线；尽量减小印制板的过孔；相邻两信号层尽量避免平行走线；对于开关量输入和输出电路进行必要的处理，开关量输入和输出电路的地线分开布置；电子控制器内部各个电路的电源采用隔离的DC/DC变换器，内部电路走线在进行PCB设计工作时采用各个功能电路分区进行走线。

点火系统优化设计

相较于其他发动机，舰载机发动机的点火装置输出电压较大、频率较高，电源输入按GJB181B要求，高压输出端口与电源输入端口重叠会发生电磁耦合，影响供电品质，增加了电子控制器的防浪涌设计难度。

为最大限度地减少高压放电信

号对电源的干扰，避免发生电磁耦合现象，将点火装置电源输入与高压输出分布在产品壳体对应两侧，通电时工作电流呈正向传递，不迂回重叠；另外也使输入、输出插座距离最大化，最大限度地减少高压放电信号对电源的干扰，有利于产品电磁兼容性的设计。

从提升供电品质的角度看，需要重新设计滤波电路，在靠近点火装置的电源输入端上增加滤波电路，选用稳压器件，提升电源品质。同时，采用屏蔽性能更好的连接器，输入输出线缆采用屏蔽防护。此外，还须考虑防雷设计。

传感器优化设计

根据工作原理不同，舰载机发动机的传感器分为铂电阻温度类传感器、压力类传感器、热电偶（集电环）、转速传感器、振动传感器、角位移传感器、离子火焰探测器、信号器类传感器等，不同类型传感器相应的优化设计也有所区别。

铂电阻温度类、转速传感器、振动传感器、角位移传感器、离子火焰探测器等传感器自身工作电流为毫安级直流电流，电磁发射量微小。此类传感器采用全金属外壳，将内部环境与外界环境隔离，传感器直接接触外界环境的不同零件壳体间采用熔焊焊接，可尽可能地降低表面接触电阻。选用屏蔽性能好的导线、连接器和尾部附件，根据以往的试验结果，传感器能满足舰载机发动机电磁兼容性要求。

压力类传感器采用金属外壳密封设计，将内部环境与外界环境隔离，传感器直接接触外界环境的不同零件壳体间的焊接应尽可能地降

低表面接触电阻。

热电偶（集电环）采用金属外壳密封设计，将内部环境与外界环境隔离，热电偶直接接触外界环境的不同零件壳体间采用熔焊焊接，能尽可能地降低表面接触电阻，具有较好的电磁屏蔽作用。集电环用于信号传输的补偿导线外无电磁屏蔽结构，本身的电磁屏蔽能力较差。热电偶选用接线柱作为信号输出方式，集电环选用接线片的信号输入方式，接线柱和接线片金属本体完全暴露在电磁环境下，在进行电磁考核时，会存在信号波动的风险。需考虑对热电偶和集电环的连接方式做屏蔽处理，同时对集电环进行屏蔽防护。

信号器类传感器都是开关量，产品内部无电子元器件，产品内部无受电子干扰的元器件，也没有向外发射电磁的元器件，根据以往的经验 and 摸底试验结果，信号器类能满足舰载机发动机电磁兼容性要求。

结束语

为满足舰载机发动机电磁兼容性要求，提高控制系统的电磁兼容能力和复杂电磁环境条件下的工作可靠性，除了上述优化改进措施，还需要进一步深化飞发控协调，统筹采取电磁兼容措施。根据舰载机发动机电磁环境效应设计要求，针对其他发动机曝露的问题和更加严酷的电磁兼容设计要求，应按信号回路进行分析，分层分级分类实现更加系统化的电磁兼容性优化设计。 **航空动力**

（徐鸣，海军装备部重大专项装备项目管理中心，工程师，主要从事航空装备项目管理）