



·电磁防护与应用·

航空发动机电子控制器的高强辐射场干扰及防护

肖国松², 刘家豪^{1,2}, 马振洋², 史春蕾^{1,2}

(1. 中国民航大学 安全科学与工程学院, 天津 300300; 2. 中国民航大学 民航航空器适航审定技术重点实验室, 天津 300300)

摘 要: 针对航空发动机电子控制器(EEC)易受高强辐射场(HIRF)干扰问题,以 ZF-M600 型 EEC 为研究对象,通过三维电磁仿真软件 CST 对 EEC 建模并进行平面波辐照仿真,模拟 HIRF 对 EEC 的干扰效应,仿真结果表明,HIRF 可以通过孔缝耦合进入 EEC 内部并在腔体内部产生谐振,谐振频率处电场强度显著增加。依据 RTCA DO-160G 在 400 MHz~4 GHz 开展 EEC 辐射敏感度试验,试验结果表明:EEC 失效频点为 2.40 GHz 和 3.48 GHz,敏感模块为模拟量输入输出模块,敏感现象为模拟量数据丢失。EEC 失效频点与谐振频率接近,说明 EEC 失效与腔体谐振有关,在 EEC 内部贴装吸波材料并进行仿真,分析吸波材料的放置方式和厚度对 EEC 谐振电磁干扰强度的影响,仿真结果表明,贴装吸波材料可以有效抑制谐振电磁干扰。

关键词: 发动机电子控制器;高强辐射场;辐射敏感度;谐振频率;电磁防护

中图分类号: V216.5

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202436.230320

HIRF interference research and protection of aircraft engine electronic controller

Xiao Guosong², Liu Jiahao^{1,2}, Ma Zhenyang², Shi Chunlei^{1,2}

(1. College of Safety Science and Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

2. Key Laboratory of Civil Aircraft Airworthiness Technology, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: To solve the problem that the aviation Engine Electronic Controller (EEC) is easily disturbed by high-intensity radiation field (HIRF) interference, the plane wave irradiation simulation is performed to simulate the interference effect of HIRF on the EEC through the software CST for the modeling of the EEC. The simulation results show that HIRF can be coupled into the EEC and the electric field strength increases significantly at the resonance frequency. Conducting EEC radiated susceptibility tests at 400 MHz-4 GHz, the test results show that the EEC failure frequency points are 2.40 GHz and 3.84 GHz, the susceptible module is the analog input and output module, The EEC failure frequency is close to the resonance frequency, and the EEC failure is related to the cavity resonance. The wave-absorbing material is mounted inside the EEC and simulation is carried out, and the simulation results show that the wave-absorbing material can effectively suppress the resonance electromagnetic interference, and the results of the study can provide a theoretical basis and reference for the HIRF protection of the EEC.

Key words: engine electronic controller, high-intensity radiation field, radiation sensitivity, resonant frequency, electromagnetic protection

飞机蒙皮复合材料的使用和机载电子设备的增多使机内电磁环境的强度和复杂度提高,机载电子设备更容易受到外界电磁环境的影响^[1]。高强辐射场(HIRF)是由地面、舰船或航空器雷达、无线电台、电视广播等人类活动造成的电磁环境^[2-4],其覆盖的频率范围广、电磁场强度高,已经成为影响飞机飞行安全的重要因素^[5-7]。HIRF 耦合进入机载电子设备会对内部电路造成干扰,严重时甚至会造成永久性损坏^[8-10]。发动机电子控制器(EEC)作为全权限数字发动机控制(FADEC)系统的核心组成部分,主要功能是处理传感器收集到的数据,并传输至执行机构,生成相应指令,在保障飞行安全与信息可靠性方面发挥着重要的作用^[11-13]。

* 收稿日期:2023-09-18; 修订日期:2023-12-13

基金项目:天津市科技局自然科学基金多元基金项目重点项目(21JCZDJC00860)

联系方式:肖国松, xiaoguosong@sina.cn。

通信作者:马振洋, zyma@cauc.edu.cn。

外界电磁环境对电子设备的耦合能力与场的强度和极化方向有较大的关系,只有当设备的敏感接收方向与电磁场极化方向平行时,设备的电磁敏感度最高^[14]。文献[15]基于最大场强统计特性和不同搅拌状态下被测场强的概率分布两种方法进行了场均匀性的评定和分析,并对比了两种评价方法所得结果的一致性和差异性。文献[16]利用混响室法对设备的屏蔽效能进行测试,并考虑了孔缝、腔体尺寸和负载对屏蔽效能的影响。文献[17-19]采用数值模拟方法,研究了设备腔体孔缝的形状和尺寸对电磁场耦合规律的影响。文献[20-22]基于拓扑理论和BLT方程研究了嵌入的介质板对腔体屏蔽效能的影响,并得到介质板可以有效抑制谐振的结论。

以上研究成果主要针对电子设备电磁敏感度测试方法以及设备壳体屏蔽效能,本文将机载电子设备所处的电磁环境以及设备结构特点考虑在内,开展了HIRF对EEC的干扰效应研究。对EEC外壳和内部电路板结构建模并进行平面波辐射仿真,监测模拟量输入输出模块所在位置的场强和谐振频率。依据《RTCA DO-160G机载设备环境条件和试验程序》^[23]开展了HIRF环境下的辐射敏感度试验并进行失效分析,得到了EEC的失效频点,分析了EEC内部吸波材料贴装方式和厚度对谐振电磁干扰的抑制效果。

1 理论基础

1.1 孔缝耦合特性

设备外壳表面存在的缝隙、孔洞会破坏金属表面的连续性和吸收损耗条件,使腔体对电磁波的屏蔽作用降低,导致电磁波耦合进入腔体内部^[24]。在电磁脉冲的激励下,短时间内会有大量的电荷累积到EEC壳体表面缝隙边沿和非金属结构处,此时缝隙可以等效为偶极子天线向腔体内部发射电磁能量,在腔体内形成复杂的电磁环境^[25]。使用解析法对EEC的场分布进行分析比较困难,工程常使用简化的近似理论进行分析,可以使用衍射原理对设备外壳上孔洞的泄露场进行分析^[26],若外壳上存在圆形孔洞,设孔洞的半径为 a ,面积为 S ,则泄漏进入腔体内某点的场强 E 为

$$E = -j \frac{ke^{-ikR}}{4\pi R} E_0 S (1 + \cos\theta) \frac{2J_1(ka \sin\theta)}{ka \sin\theta} \quad (1)$$

式中: R 为腔体内某点到坐标原点的距离; E_0 为孔洞平面处的入射场强; θ 为入射方向与 z 轴之间的角度; k 为传输常数; J_1 为一阶贝塞尔函数。

1.2 腔体谐振特性

电磁脉冲耦合进入腔体内部后,由于金属的反射会产生谐振效应,在某些频点会形成驻波,从而发生电磁谐振现象,在谐振频率处场强显著增大^[27]。如果EEC内部电路工作频率与谐振频率接近,容易导致腔体屏蔽效能下降。腔体的谐振特性由腔体的本征特性决定,谐振腔的谐振频率公式为

$$f_{mnp} = \frac{1}{2\sqrt{\epsilon_0\mu_0}} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{p}{l}\right)^2} \quad (2)$$

式中: μ_0 为磁导率, ϵ_0 为介电常数; a 、 b 、 l 分别表示腔体的长、宽、高; m 、 n 、 p 为腔体的谐振模式,分别表示电场在 x 、 y 、 z 轴上分布的半波数量, m 、 n 、 p 均为整数且至少两个不同时为零。

2 EEC建模和仿真

2.1 试验对象

EEC外壳如图1(a)所示,采用铝制金属薄壁腔体结构,机箱外壳有6个线缆接口、一个电源开关以及一个状态指示灯。EEC内部电路板结构如图1(b)所示,搭载3块PCB电路板,分别为监视与控制板、数据终端控制板和信号转接板,使用铜柱固定到EEC外壳。EEC组成框图如图1(c)所示,包括两个串口通信模块COM1和COM2、EEC监测与控制模块、数字量输入输出模块、模拟量输入输出模块和两个电源模块。COM1固定输出二进制数据;COM2输出采集到的数字量信息;模拟量输入输出模块和数字量输入输出模块采集发动机状态信息,并将数据传输至监测与控制模块;监测与控制模块将控制指令传输至执行机构;电源模块1和电源模块2为其余模块供电。

2.2 EEC建模与模型精简

对EEC外壳进行1:1等比例建模,如图2(a)所示。EEC外壳长、宽、高分别为158 mm、118 mm和71.5 mm,壳体厚度为2 mm。EEC壳体正面具有6个航空插座、1个状态指示灯、1个电源开关,顶面具有盖板和12颗紧固螺钉。壳体表面的孔缝结构包括盖板与结构体之间的缝隙、紧固螺钉与盖板之间的缝隙、航空插头与结构体之间的

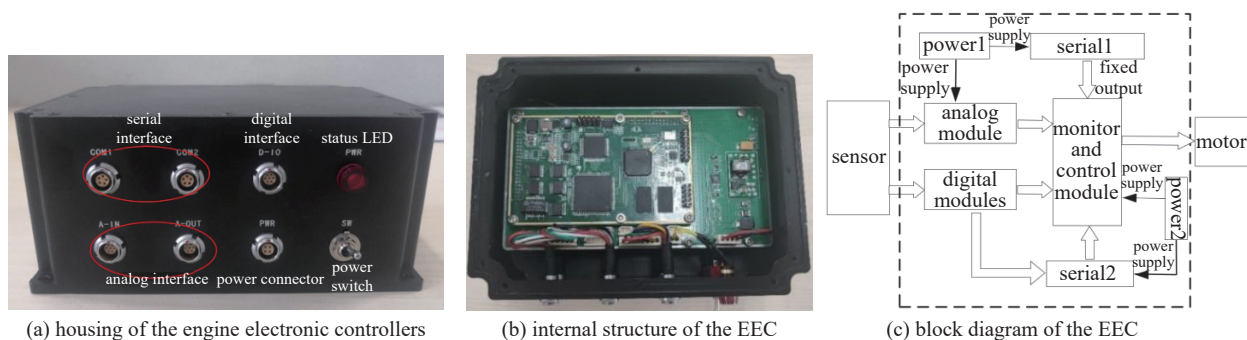


Fig. 1 Aircraft Electronic Engine Controller
图 1 发动机电子控制器

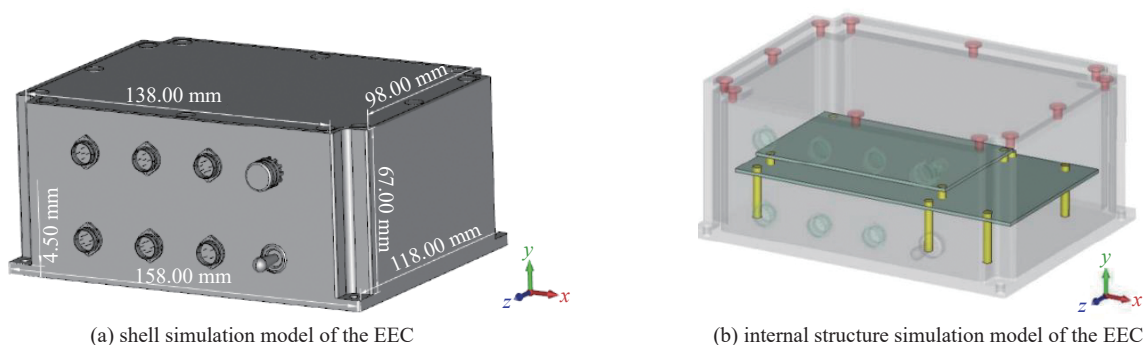


Fig. 2 Simulation model of the EEC
图 2 EEC 仿真模型

缝隙、电源开关按钮处缝隙和航空插头基座与插针间的缝隙, 缝隙宽度设置为 0.01 mm。

使用 HIRF 频率四分之一波长的导线模拟互连电缆, 计算得到频率为 4 GHz 时电缆长度为 18.75 mm。EEC 内部结构模型如图 2(b) 所示, 为了便于仿真进行和缩短仿真时间, 对 EEC 内部电路板结构进行简化处理, 将 EEC 内部三块 PCB 电路板简化为金属铜板紧贴有耗介质模型, PCB 板整体厚度为 1.6 mm, 其中金属铜板厚度为 0.07 mm。有耗介质材料设置为 FR4 材料, 介电常数为 4.3, 损耗正切角为 0.025。PCB 电路板使用铜柱进行支撑固定并与 EEC 壳体连接, EEC 外壳的组成结构及材料参数如表 1 所示。

表 1 EEC 外壳结构及材料参数
Table 1 Shell structure and material of the EEC

structure	material	electrical conductivity/($s \cdot m^{-1}$)	relative permeability/($h \cdot m^{-1}$)	relative permittivity
housings	aluminium	3.56	1	1.5
power switch	aluminium	3.56	1	1.5
aviation plug housings	aluminum alloy	3.45	1	1.0
aviation plug pins	brass	1.59	1	1.0
status indicator	air	-	-	1.0
screws	iron	1.04	1	10.0
copper of pcbs	copper	5.80	1	1.5
medium of pcbs	FR4	5.96	1	5.0

2.3 仿真条件设置

使用 CST 对 EEC 及其互连电缆进行平面波辐照仿真, 模拟 HIRF 环境对 EEC 的干扰, 仿真得到 EEC 表面电场分布、腔体内部电场强度及谐振频率。仿真边界条件设置为开放边界, 背景材料设置为真空, 平面波入射方向如图 3(a) 所示, 为模拟电磁环境最为恶劣的情况将壳体表面接口较多的一面作为入射面。由于高斯脉冲包含丰富的频谱, 将激励波形设置为高斯脉冲, 高斯脉冲的时域波形如图 3(b) 所示, 高斯脉冲表达式为

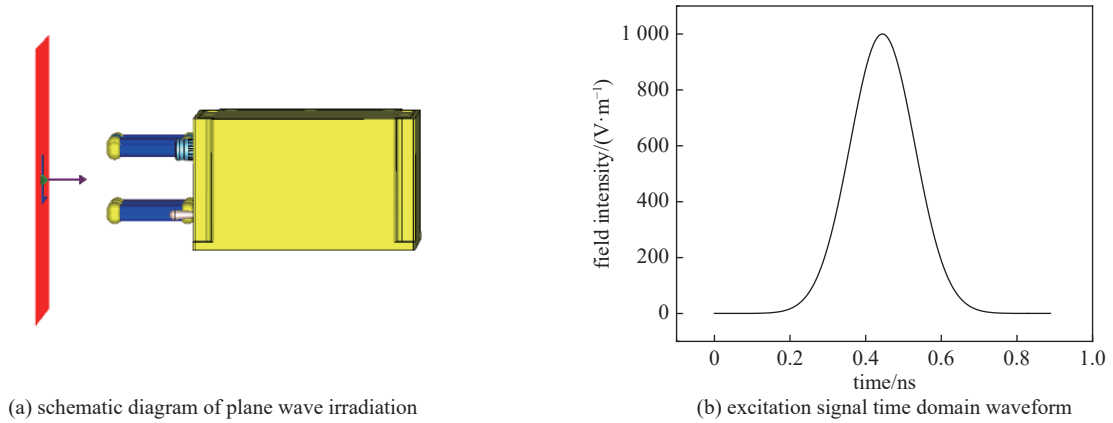


Fig. 3 Plane wave irradiation simulation
图 3 平面波辐照仿真

$$E(t) = E_p(t - t_0) \exp\left[-\frac{4\pi(t - t_0)^2}{\tau^2}\right] \quad (3)$$

式中: E_p 为高斯脉冲的峰值, t_0 为脉冲延时, τ 为脉冲宽度。本文选取 $\tau=5 \times 10^{-10}$, $t_0=2 \times 10^{-10}$ 。

2.4 仿真结果

EEC 表面电场分布如图 4(a) 和图 4(b) 所示, EEC 线缆接口以及缝隙、孔洞处电场强度明显高于其他区域, EEC 表面电场强度以孔洞和缝隙边缘为中心向周围扩散。这是由于孔缝破坏了金属壳体的吸收损耗条件, 导致电磁波反射或透射, 并且在缝隙边沿积累大量电荷, 使得孔缝处电场强度高于其他位置, 外部电磁环境通过孔缝耦合进入 EEC 内部。将仿真频率设置为 400 MHz~4 GHz 进行 EEC 的平面波辐照仿真, 辐射场强设置为 1000 V/m, 在模拟量输入输出模块位置和其余 PCB 中心位置设置电场探针, 以 EEC 中心位置为坐标原点, 电场探针的坐标依次是 (-3.5 mm, 6.5 mm, 160 mm)、(-19.5 mm, -1.5 mm, 157.5 mm) 和 (-19.5 mm, -8.5 mm, 157.5 mm)。电场探针所在位置的电场强度如图 4(c) 所示。仿真结果表明, HIRF 可以通过设备表面的孔缝耦合到腔体内部, 并且会在腔体内

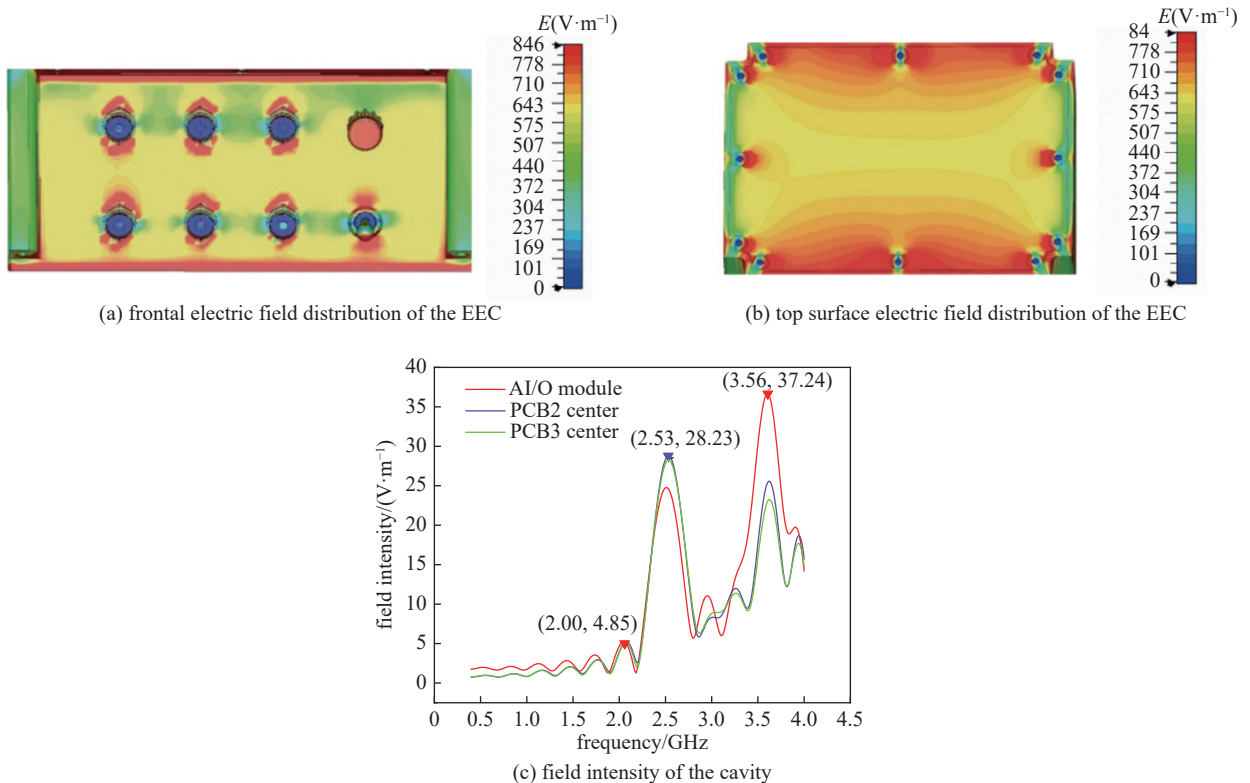


Fig. 4 Plane wave irradiation simulation results of the EEC
图 4 EEC 平面波辐照仿真结果

部产生谐振, 谐振频率处场强会显著升高。400 MHz~2 GHz 耦合进入 EEC 内部的高强辐射场能量较小, 此时进入 EEC 内部的能量主要由 EEC 壳体的材料和厚度决定。随频率增大耦合进入 EEC 内部的能量增加, 在 2.62 GHz 和 3.55 GHz 处产生谐振且电场强度明显增大, 此时外界电磁场泄漏进 EEC 内部的能量最多, 容易对设备内部电子模块造成干扰, 外部电磁能量主要通过孔缝耦合进入 EEC 内部^[28]。

3 EEC 辐射敏感度试验

3.1 试验环境与方法

3.1.1 试验环境布置

依据 RTCA DO-160G 在 400 MHz~4 GHz 开展 EEC 辐射敏感度试验, 该试验用于判断 EEC 暴露在某一等级的射频调制功率下, 能否在性能规范内正常运转^[23]。EEC 辐射敏感度的试验环境和设备布置如图 5 所示, 图 5(a) 为混响室试验环境, 其中天线用于产生电磁波, 搅拌器用于维持试验区域内的场均匀一致性要求^[29]。图 5(b) 为待测设备和线缆的布置, 将电子控制器放置于混响室内高度为 1 m 的试验台上, 在控制室内监测设备的运行情况。图 5(c) 为测试设备的布置, 其型号和功能如表 2 所示。

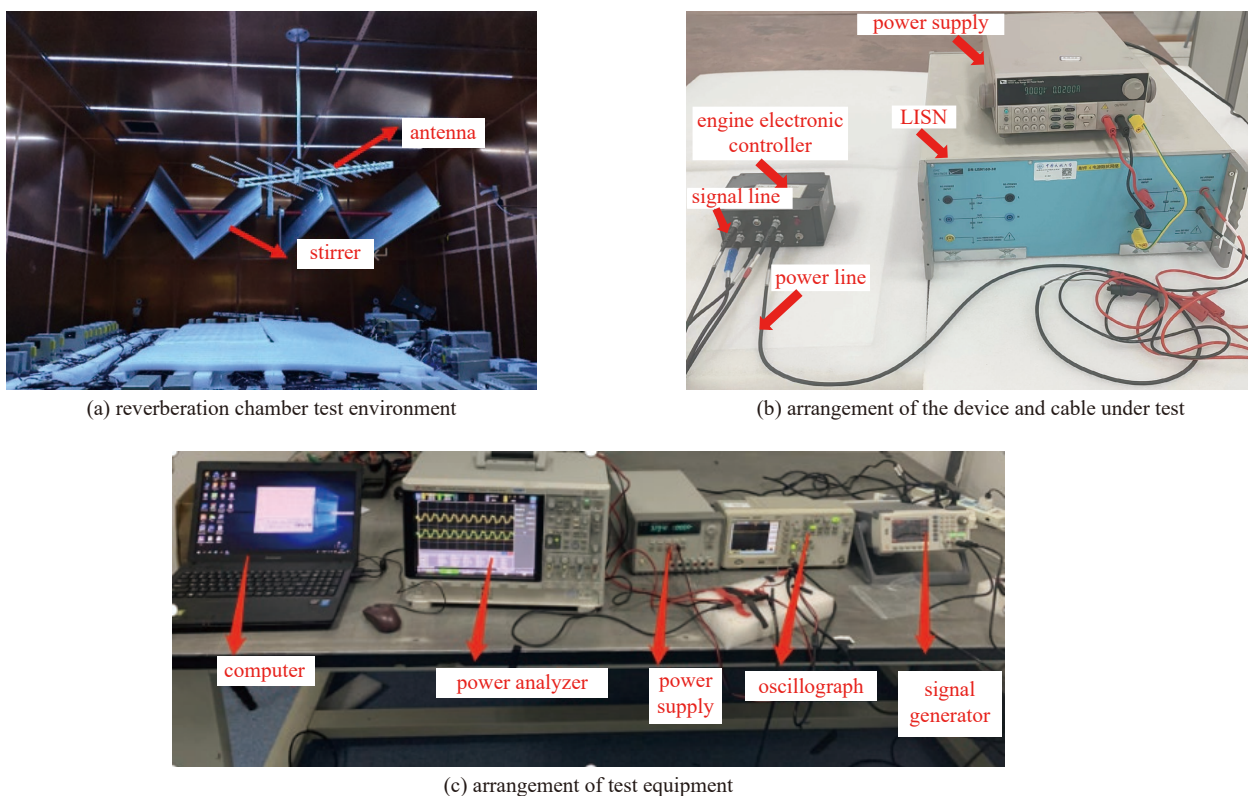


Fig. 5 Radiation sensitivity test environment

图 5 试验环境及设备布置

表 2 测试设备型号及功能

Table 2 Test equipment type

test equipment	model	function
oscilloscope	DSO1022A	monitor digital output
power analyzer	PA2203A	monitor analogue output
computer	G510	monitor serial output
signal generator	UTG2062A	provide input signal
power supply	E3631A	power supply
impedance stabilized network	DN-LISN160	prevent interference

3.1.2 试验方法

图 6(a) 为 EEC 辐射敏感度试验原理图(其中 p_{RF} 为脉冲间隔), 射频信号源产生功率信号, 经功率放大器放大

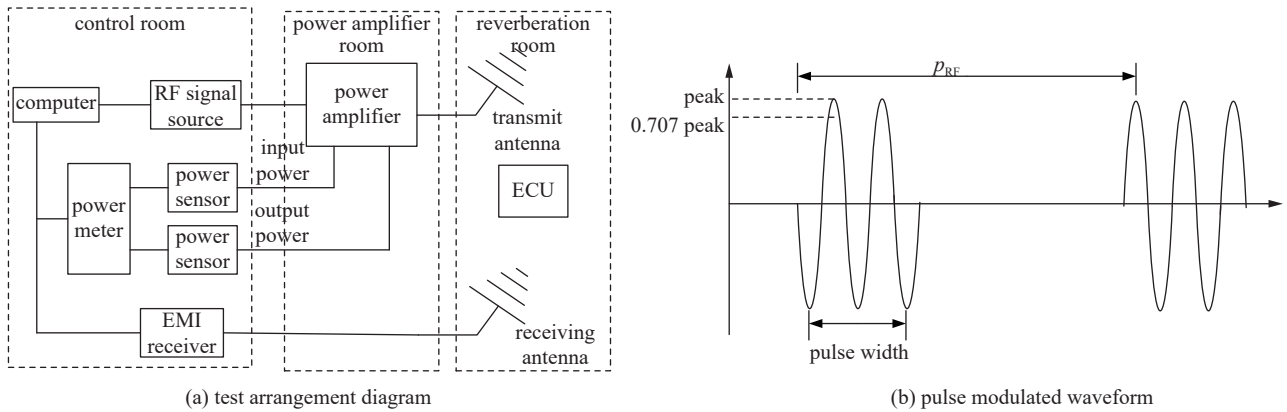


Fig. 6 Schematic diagram of EEC radiation sensitivity

图 6 EEC 辐射敏感度试验原理图

之后将功率信号注入到发射天线，发射天线辐射的电磁场经混响室金属内壁反射形成HIRF环境；功率传感器用于监测功率放大器的输入功率和输出功率；EMI接收机用于监测混响室内接收天线处电场强度。发射天线的输入采用脉冲宽度为4 μs、重复频率为1 kHz的脉冲调制试验电平，脉冲调制波形如图6(b)所示。通过射频信号源的输入功率调节混响室内部电场强度，发射天线输入功率的计算公式为

$$P_{\text{target}} = 20 \lg \frac{E_{\text{desire}}}{E_{\text{max}}} + P_{\text{Fwd}} \quad (4)$$

式中： P_{target} 为目标输入功率， E_{desire} 为混响室期望场强， E_{max} 为校准场强， P_{Fwd} 为校准输入功率。

3.2 试验内容及结果

3.2.1 试验内容

进行辐射敏感度试验之前对EEC进行调试，给EEC供电并使用信号发生器为EEC的模拟量输入输出模块提供幅值为1 V、频率为100 Hz的正弦连续信号。EEC模拟量输入和输出信号如图7(a)所示；数字量输出为3.3 V电平；COM1以二进制方式固定输出数据，输出满足EEC技术手册规定中串口输出协议的规定^[30]，如表3所示。输出语句包括语句头、语句体、校验位等。语句头固定输出；语句体从0x01累加计数；校验采用累加和校验的方式，

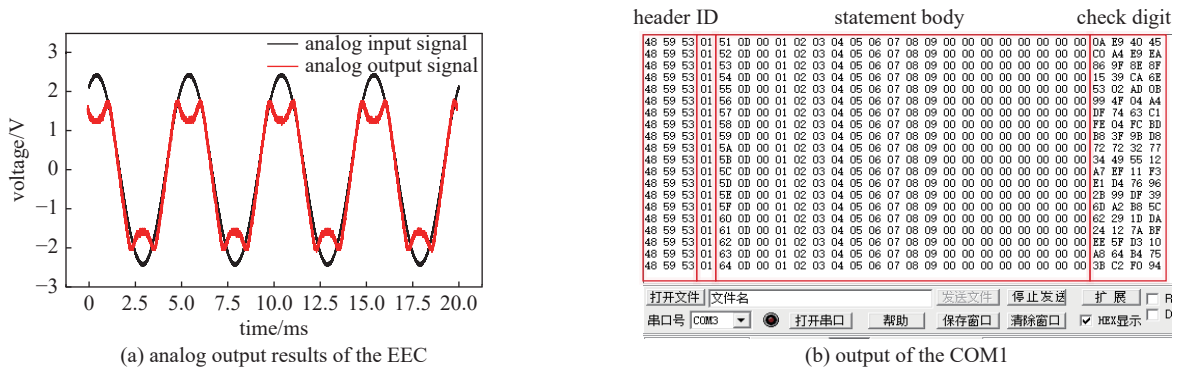


Fig. 7 Debugging before EEC test

图 7 EEC 试验前调试

表 3 COM1 数据输出协议

Table 3 COM1 data output protocol

statement structure	output data	byte	offset
statement header	0×48	1	0
statement header	0×59	1	1
statement header	0×53	1	2
statement id number	0×02	1	3
sentence body	cycle count	2	4
checksum	—	4	32

在每次发送数据的最后一位加一个字节的校验数据, COM1 输出结果如图 7(b)所示。

参考标准 RTCA DO-160G, 结合 EEC 的安装位置、互连线缆预期的安装位置、暴露情况和飞机大小及结构确定 EEC 的设备类别为 F 类, 依据设备类别确定 EEC 的试验场强。将 EEC 辐射敏感度试验分为三个子频段进行, 三个频段 EEC 辐射敏感度的试验场强及测试要求如表 4 所示。调节发射天线的输入功率使试验场强满足要求, 每组试验至少进行 3 次复现, 以保证试验结果的准确性。

表 4 F 类设备辐射敏感度试验场强
Table 4 Class F equipment radiation sensitivity test field

frequency/GHz	field strength/(V·m ⁻¹)	sampling rate	sampling interval/MHz	stirring speed/(r·min ⁻¹)
0.4~1.0	350	60	10	4
1.0~2.0	1000	100	10	2
2.0~4.0	1500	200	10	2

3.2.2 试验结果

分别在 0.4~1 GHz 和 1~2 GHz 进行 EEC 的辐射敏感度试验, 这两个频段内 EEC 的模拟量、数字量输出结果和 COM1 输出结果均与实验前调试结果相同, 此时模拟量和数字量输出结果均满足输出要求, COM1 输出满足串行输出协议, EEC 处于正常工作状态。在 2~4 GHz 进行扫频试验, 该频段数字量输出未发生明显变化, COM1 的输出结果满足串行输出协议。模拟量信号在 2.40 GHz 和 3.48 GHz 输出异常, 输出结果如图 8 所示, EEC 模拟量输出波形失真, 数据传输受到干扰。EEC 辐射敏感度试验结果表明 EEC 的敏感频点为 2.40 GHz 和 3.48 GHz, 且在 3.48 GHz 频点受到的干扰更严重, 敏感现象为模拟量信号传输受到干扰, EEC 模拟量输入输出模块无法正常工作。在试验过程中, 数字量输出并未受到明显影响, 串口输出也满足通信协议, 但是模拟量信号传输受到干扰。说明 EEC 的模拟量输入输出模块对 HIRF 的敏感度较低。

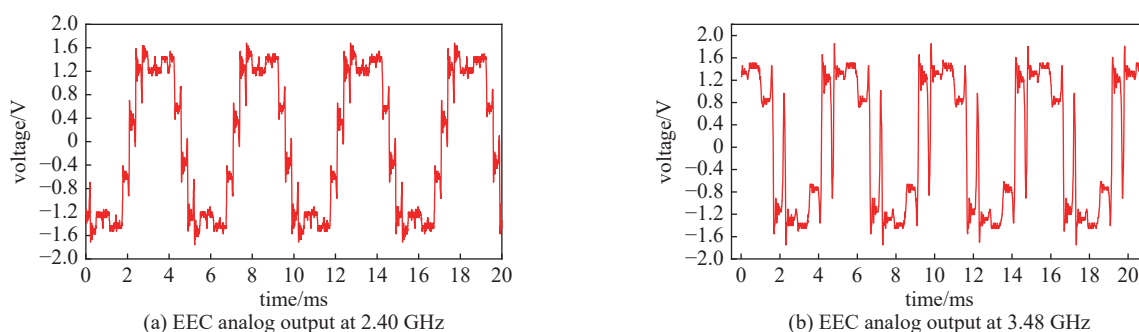


Fig. 8 Analog output module test results
图 8 模拟量信号试验结果

对比仿真和试验结果, 得到 EEC 的谐振频率和失效频点如表 5 所示, EEC 失效频点与仿真结果和理论计算结果均接近。EEC 的失效频点略小于仿真得到的谐振峰值频率, 因为仿真过程中对 EEC 内部结构进行简化时忽略了 PCB 电路板上的线路和金属器件, 使得电场在 EEC 腔体内部震荡时间减少, 谐振频率升高。EEC 仿真结果与理论计算的 f_{110} 模式和 f_{021} 模式的谐振频率接近, 但是仿真结果略小于理论计算结果。这是因为理论计算时将 EEC 简化为矩形腔体, 改变了 EEC 内部的电场分布, 使机箱的固有谐振频率升高, 且由于 PCB 板的反射作用, 在腔内激发出高次模。

表 5 EEC 谐振频率与失效频点
Table 5 EEC resonant frequency and failure frequency

mode	calculated resonant frequency/GHz	simulation results/GHz	cutoff frequency/GHz
f_{110}	2.72	2.62	2.40
f_{021}	3.68	3.55	3.48

4 EEC 电磁防护

吸波材料可以吸收投射到表面的电磁波并通过材料的介质损耗将电磁能量转化为热能或其他形式的能量, 所

以在 EEC 内部贴装吸波材料抑制谐振电磁干扰, 减弱外部电磁环境对 EEC 的影响。材料的损耗正切角 $\tan\delta$ 用于表征吸波材料吸收电磁辐射的能力, 其计算公式为

$$\tan\delta = \tan\delta_e + \tan\delta_m = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} + \frac{\mu_1}{\mu_2} \quad (5)$$

式中: $\tan\delta_e$ 为电损耗正切角, $\tan\delta_m$ 为磁损耗正切角, ε_2 为复介电常数的实部, ε_1 为复介电常数的虚部, μ_2 为复磁导率的实部, μ_1 为复磁导率的虚部。

根据 EEC 内部电路板的实际布置情况贴装吸波材料, 选取电损耗型吸波材料 ECCOSORB, 设置材料的相对介电常数 $\varepsilon=1$, 相对磁导率 $\mu=1$, 电损耗正切角 $\tan\delta_e=3$, 尺寸为 $20\text{ mm}\times 20\text{ mm}$, 厚度为 2 mm 。在 $X=30、60、90\text{ mm}$ 三个位置贴装吸波材料, 分别将吸波材料表面与开孔面平行和垂直放置进行平面波辐照仿真, 贴装位置如图 9 所示。

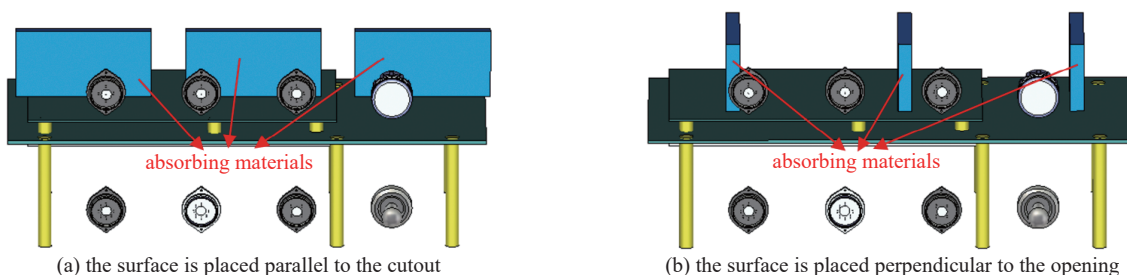


Fig. 9 Placement position of absorbing material

图 9 吸波材料的贴装位置

根据 EEC 内部 PCB 电路板与前面板的间距及线路布置情况, 将吸波材料放置在距电子控制器前面板 15 mm 处, 吸波材料表面与模拟量输入输出模块距离为 5 mm 。吸波材料分别水平和垂直放置并进行平面波辐照仿真, 模拟量输入输出模块位置的电场强度如图 10(a) 所示, 仿真结果表明吸波材料表面与前面板平行时对谐振电磁干扰的抑制效果较好。所以将选择吸波材料与前面板平行放置, 研究吸波材料厚度对谐振抑制效果的影响, 吸波材料厚度变化时模拟量输入输出模块位置的电场强度如图 10(b) 所示, 对于 f_{110} 模谐振干扰, 贴装吸波材料可以有效降低谐振电磁干扰强度, 且随着吸波材料厚度的增加谐振频率降低, 当吸波材料厚度大于 3 mm 时, 谐振抑制效果随厚度增大变化不明显。对于 f_{021} 模谐振干扰, 贴装吸波材料同样可以有效降低谐振电磁干扰强度, 但随着吸波材料厚度的增加谐振频率升高, 当吸波材料厚度大于 1 mm 时, 谐振抑制效果随厚度增大变化不明显。吸波材料抑制电磁干扰的机理为: 当电磁波进入腔体内部时, 吸波材料会吸收部分能量, 将其转化为热能或其他形式的能量耗散。这样可以减少能量在腔体内部的反射和传播, 从而抑制谐振的发生。同时吸波材料的存在可以导致波在腔体内部多次反射和传播。在每次反射过程中, 能量会不断衰减, 部分能量会被吸波材料吸收或散射。通过多次反射和衰减, 能量在腔体内部得到分散和衰减, 使谐振电磁干扰强度降低^[31]。所以综合考虑耗材和电磁谐振抑制效果等因素, 选择将吸波材料平行放置在距电子控制器前面板 15 mm 处, 厚度选择为 3 mm 。

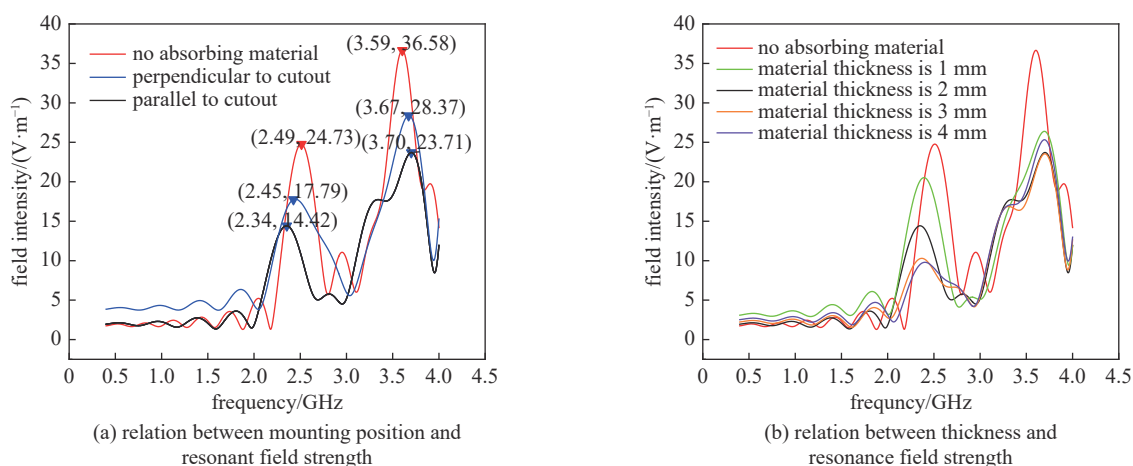


Fig. 10 Protective effect of the absorbing material

图 10 吸波材料防护效果

5 结 论

本文对 EEC 进行建模并模拟 HIRF 环境进行了平面波辐照仿真, 得到了 EEC 腔体内部的电场分布和谐振频率。在混响室环境下开展了 EEC 辐射敏感度试验, 得到了 EEC 的失效频点和敏感模块, 分析了 HIRF 对 EEC 的干扰效应。提出在 EEC 内部贴装吸波材料进行 HIRF 防护, 选择吸波材料的厚度为 3 mm, 平行放置在距电子控制器前面板 15 mm 处。得到了如下结论: (1) HIRF 会通过 EEC 表面孔缝耦合进入 EEC 内部, 且会在腔体产生谐振, 谐振频率处场强明显增大且容易对 EEC 产生干扰; (2) EEC 的失效频点为 2.40 GHz 和 3.48 GHz, 敏感现象为模拟量数据丢失, 敏感模块为模拟量输入输出模块, EEC 失效与腔体发生谐振有关; (3) 在 EEC 内部贴装吸波材料可以有效降低谐振电磁干扰强度, 通过调整吸波材料的安装位置和厚度可以改变谐振频率。后续将继续对 EEC 的 HIRF 防护进行研究, 研究 EEC 的尺寸、材料变化以及 PCB 布局对 EEC 内部场强的影响。

参考文献:

- [1] 潘晓东, 魏光辉, 万浩江, 等. 电子设备电磁辐射敏感度测试相关问题研究[J]. *强激光与粒子束*, 2020, 32: 073002. (Pan Xiaodong, Wei Guanghui, Wan Haojiang, et al. Research on several test issues of electromagnetic radiationsusceptibility for electronic equipment[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2020, 32: 073002)
- [2] 马振洋, 左晶, 史春蕾, 等. 机载电子设备屏蔽效能测试与优化[J]. *航空学报*, 2020, 41: 323538. (Ma Zhenyang, Zuo Jing, Shi Chunlei, et al. Test and optimizati on of shield effectiveness for airborne electronic equipment[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2020, 41: 323538)
- [3] Somolinos D R, Gallardo B P, Estevez J C, et al. Shielding effectiveness measurement of an UAV simplified demonstrator through low-level swept field (LLSF) test[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2022, 64(5): 1665-1673.
- [4] Tortorich R P, Morell W, Reiner E, et al. A study on the radiated susceptibility of printed circuit boards and the effects of via fencing[J]. *Electronics*, 2021, 10: 539.
- [5] Tang Shiping, Mao Junfa. A quantification control method of electromagnetic environmental effects for complex systems[J]. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 2021, 35(2): 245-261.
- [6] 赵治国, 郑浩月. 典型电子设备强电磁安全效应试验研究[J]. *通信技术*, 2019, 52(8): 2008-2013. (Zhao Zhiguo, Zheng Haoyue. Experimental exploration on high EM safety effect of typical electronic equipment[J]. *Communications Technology*, 2019, 52(8): 2008-2013)
- [7] Dunkin E L, Duggan T J, Noyce R P. Hazards of electromagnetic radiation to ordnance (HERO) instrumentation developments for high intensity radiated field (HIRF) testing of aircraft[C]//Proceedings of 2019 ESA Workshop on Aerospace EMC. 2019: 1-6.
- [8] 刘勇, 马跃进, 司晓亮, 等. 基于高强度辐射场的低电平扫频场试验方法研究[J]. *微波学报*, 2020, 36(3): 20-25. (Liu Yong, Ma Yuejin, Si Xiaoliang, et al. Research on low level swept field test method based on high intensity radiation field[J]. *Journal of Microwaves*, 2020, 36(3): 20-25)
- [9] Ückerseifer J, Gronwald F. Numerical and experimental analysis of non-coaxial DCI-excitations as HIRF-replacement in automotive immunity testing[C]//Proceedings of 2020 International Symposium on Electromagnetic Compatibility-EMC EUROPE. 2020: 1-6.
- [10] Sun Jiangning, Pan Xiaodong, Lu Xinfu, et al. Unshielded two-wire circuit systems under weak unbalance for high-intensity radiated field radiated susceptibility by double bulk current injection[J]. *Electronics*, 2022, 11: 2175.
- [11] 李琛, 文彬鹤, 左伟, 等. 带数字电子备份的发动机控制系统设计与验证[J/OL]. *航空动力学报*, (2023-01-04)[2023-02-10].<https://doi.org/10.13224/j.cnki.jasp.20220602>. (Li Chen, Wen Binhe, Zuo Wei, et al. Design and verification of engine control system with digital electronic backup[J/OL]. *Journal of Aerospace Power*, (2023-01-04)[2023-02-10].<https://doi.org/10.13224/j.cnki.jasp.20220602>)
- [12] Montazeri-Gh M, Abyaneh S. Real-time simulation of a turbo-shaft engine's electronic control unit[J]. *Mechanics & Industry*, 2017, 18: 503.
- [13] 何锋, 周璇, 赵长啸, 等. 航空电子系统机载网络实时性能评价技术[J]. *北京航空航天大学学报*, 2020, 46(4): 651-665. (He Feng, Zhou Xuan, Zhao Changxiao, et al. Real-time performance evaluation technology of airborne network for avionics system[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2020, 46(4): 651-665)
- [14] Liang Tao, Xie Yanzhao. Determining incidence and polarization of electromagnetic field for maximal/minimal coupling to transmission line system[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2020, 30(11): 1021-1024.
- [15] 郭晓涛, 何昭, 王少华, 等. 电磁混响室场均匀性评定方法的实验研究[J]. *北京邮电大学学报*, 2017, 40(4): 86-90. (Guo Xiaotao, He Zhao, Wang Shaohua, et al. Experiment on the field uniformity validation methods of reverberation chamber[J]. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, 2017, 40(4): 86-90)
- [16] Gifuni A, Gradoni G, Serra R, et al. On the improvement of shielding effectiveness measurements of materials and gaskets in reverberation chambers[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2022, 64(5): 1653-1664.
- [17] 肖培, 李佳维, 张超, 等. 双层屏蔽腔内线缆负载电磁耦合的 EMT 分析方法[J]. *微波学报*, 2021, 37(5): 52-57. (Xiao Pei, Li Jiawei, Zhang Chao, et al. An EMT analysis method for calculating the electromagnetic coupling of transmission line inside a double-layer cavity-time performance evaluation technology of airborne network for avionics system[J]. *Journal of Microwaves*, 2021, 37(5): 52-57)
- [18] Zhou Jincheng, Wang Xuétian. Fast prediction of the shielding effectiveness of heterotypic enclosures based on EMT theory[J]. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 2022, 32: e23463.

- [19] 郝建红, 蒋璐行, 范杰清, 等. 内置介质板的开孔箱体屏蔽效能电磁拓扑模型[J]. 电工技术学报, 2017, 32(9): 101-111. (Hao Jianhong, Jiang Luxing, Fan Jieqing, et al. Electromagnetic topology model for the shielding effectiveness of an apertured enclosure with a lossy dielectric layer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(9): 101-111)
- [20] Sun Jian, Gong Yanfei, Jiang Luhang. An improved model for the analysis of the shielding performance of an apertured enclosure based on EMT theory and BLT equation[J]. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 2022, 36(2): 246-260.
- [21] Yan Liping, Zhang Xindan, Zhao Xiang, et al. A fast and efficient analytical modeling approach for external electromagnetic field coupling to transmission lines in a metallic enclosure[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 50272-50277.
- [22] Ye Zhihong, Lu Changchang, Zhang Yu. Coupling analysis of penetrated wire connecting two electronic devices using a time domain hybrid method[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2021, 63(9): 2359-2363.
- [23] RTCA Inc. Environmental conditions and test procedures for airborne equipment[R]. RTCA/DO-160G, Washing: RTCA Inc, 2010.
- [24] Basyigit I B, Dogan H, Helhel S. The effect of aperture shape, angle of incidence and polarization on shielding effectiveness of metallic enclosures[J]. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 2019, 53(2): 115-127.
- [25] Xie Penghao, Yuan Jiansheng. Simulation analysis of electromagnetic coupling law of one typical electronic circuit box body[J]. *The Journal of Engineering*, 2017, 2017(14): 2695-2698.
- [26] 谭志良, 胡小锋, 毕军建, 等. 电磁脉冲防护理论与技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013: 54-60. (Tan Zhiliang, Hu Xiaofeng, Bi Junjian, et al. Electromagnetic pulse protection theory and technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013: 54-60)
- [27] 邹澍, 周晓萍. 电磁兼容原理、技术和应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007: 176-177. (Zou Shu, Zhou Xiaoping. Principle technology and application of electromagnetic compatibility[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007: 176-177)
- [28] 曾美玲, 蔡金良, 易早, 等. 孔缝对金属腔体强电磁脉冲耦合特性影响研究[J]. *强激光与粒子束*, 2021, 33: 043004. (Zeng Meiling, Cai Jinliang, Yi Zao, et al. Effect of aperture on shielding performance of metal cavity under excitation of high-intensity electromagnetic pulse[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2021, 33: 043004)
- [29] 赵翔, 茹梦圆, 闫丽萍, 等. 电磁混响室搅拌方式研究综述[J]. *强激光与粒子束*, 2020, 32: 063001. (Zhao Xiang, Ru Mengyuan, Yan Liping, et al. A review of research on stirring methods of electromagnetic reverberation chamber[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2020, 32: 063001)
- [30] 李小沙. 发动机电子控制器 EEC 技术手册[EB/OL]. 北京: 北京卓枫科技有限公司, 2019. [2023-11-06]. (Li Xiaoshao. Engine electronic controller EEC use and maintenance manual[EB/OL]. Beijing: Beijing Zhuofeng Technology, 2019. [2023-11-06])
- [31] 陈生. 吸波材料抑制孔腔谐振研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2008. (Chen Sheng. Study on suppression of aperture-cavity resonance by means of absorbing materials[D]. Xi'an: Xidian University, 2008)