

文章编号: 1673-1522 (2011) 01-0005-06

# 电磁脉冲武器对 军机座舱后门耦合效应及软杀伤分析

黄隽<sup>1a</sup>, 费奇志<sup>2</sup>, 张浩然<sup>2, 1b</sup>, 胡云安<sup>1b</sup>, 金焱<sup>1a</sup>

(1. 海军航空工程学院 a. 研究生管理大队;

b. 控制工程系, 山东烟台 264001; 2. 海军装备部, 北京 100071)

**摘要:** 针对飞机电磁脉冲武器软杀伤和座舱耦合效应缺乏定量研究的问题, 文章基于时域有限差分方法 (FDTD) 建立了一套电磁脉冲后门耦合效应建模与软杀伤分析流程, 并以某作战飞机为例, 开展了低频 (0~100 MHz) 电磁脉冲武器的座舱耦合效应仿真试验, 获取和分析了软杀伤数据, 从而提出了一种采用座舱玻璃导电膜的低频电磁脉冲武器软杀伤防护方法。软杀伤分析结果表明, 基于功率密度的软杀伤易损性分析具有良好的工程适用性, 而且防护方法对低频电磁脉冲武器具有较好的屏蔽效能。

**关键词:** 电磁脉冲武器; 作战飞机; 软杀伤; FDTD

**中图分类号:** E924.99; TN015

**文献标志码:** A

电磁脉冲武器是一种利用定向发射的高功率在与物体或系统相互作用所产生的电效应、热效应和生物效应能对目标造成软杀伤破坏的新型武器, 包括低频电磁脉冲武器和高功率微波武器 (高功率微波弹与高功率微波炮)。目前尚无确切的软杀伤概念, 本文所研究的软杀伤起源于软毁伤学科<sup>[1]</sup>, 来源于新概念武器作战理论, 形成于装备战伤理论<sup>[2]</sup>, 指一切在广义战场上发生的装备设施的外部机体结构未曾或难以看出遭到破坏, 而电子设备、武器系统暂时或永久出现功能降低、紊乱、故障、失效等现象的事件; 人员的生理结构未曾或难以看出遭到杀伤, 而暂时或永久降低、丧失某种能力的事件, 俗称“内伤”。软杀伤概念既可以从造成杀伤的主动角度, 亦可以从遭到杀伤的被动角度提出。

国外非常重视飞机的电磁脉冲软杀伤分析研究, 但定量分析的结果难以获取。美国国防部曾经用高功率微波武器对陆军的眼镜蛇直升机进行了试验<sup>[3]</sup>, 并确定了适用于飞机的 HPM 辐射效应评估流程; 美国空军建立了射频效应实验室, 对 F-16 进行 HPM 效应测试; 美国空军大学评估了舰艇的高功率微波和超宽带微波防空武器抵抗各种来袭飞机 (包

括战术飞机、轻型机、超轻型机、直升机等) 的有效性和可能性, 并分析了打击部位与策略<sup>[2]</sup>; 瑞典开发了飞机的微波测试设备<sup>[4]</sup>。国内针对飞机的电磁脉冲软杀伤研究较少, 对电磁脉冲耦合效应的定量分析多以半导体器件、引信、集成电路和计算机设备等为研究对象。文献[5]把软损伤作为飞机战伤的一种基本形式, 并阐述了高功率微波武器对飞机的杀伤机理。文献[6]通过集成电路器件微波损伤实验分析频率、电压、重复频率和脉宽对损伤功率阈值的影响; 文献[7]给出了利用人工神经网络建立集成电路高功率微波易损性预测评估模型的基本步骤; 文献[8]利用电磁脉冲模拟器对计算机的干扰和损伤效应进行了实验研究, 并应用 FDTD 方法研究了金属箱孔缝和导线耦合效应; 文献[9]通过 FDTD 方法模拟在不同频率和入射角度的时谐平面电磁波作用下, 计算机主板上耦合的电磁场分布, 给出一种电磁辐射效应评估的基本方法。对飞机座舱耦合效应的研究据笔者所知未见报道。针对国内外强电磁脉冲对作战飞机耦合效应及软杀伤分析现状, 鉴于 FDTD 方法在处理电特大尺寸复杂物体电磁问题的优势<sup>[10]</sup>, 特别是网格划分的要求比矩量法、多层

**收稿日期:** 2010-09-08

**基金项目:** 军队科研基金资助项目

**作者简介:** 黄隽 (1975-), 男, 博士生; 胡云安 (1966-), 男, 教授, 博导, 博士。

快速多极子等方法更宽松的特点,本文基于 FDTD 方法提出了一种作战飞机后门耦合效应建模和软杀伤分析流程,以某作战飞机为例,建立了在低频(0~100 MHz)电磁脉冲武器作用下的耦合模型,并通过仿真分析,提出了一种软杀伤防护方法。

## 1 后门耦合效应建模与软杀伤分析流程及其实现方法

### 1.1 分析流程

通常的耦合类型有辐射与传导耦合,两者往往交织在一起。主要通过前门和后门耦合到目标。前

门耦合模式通常指电磁脉冲武器所产生的电磁场能量,耦合进入雷达或通讯装备系统的天线,并造成电子设备和人员的破坏和伤害。后门耦合模式指电磁脉冲武器产生的短暂电流或驻波,通过孔、缝、窗口和固定电线(缆)对连接的电子设备间接伤害。座舱耦合指电磁脉冲能量直接在座舱产生的高强度和高功率密度驻波,对人员和电子设备造成的破坏和伤害的方式,属于后门耦合模式。文献[4]介绍了通用装备的 HPM 辐射效应一般评估流程,本文提出基于 FDTD 方法的后门耦合效应建模仿真及软杀伤分析流程如图 1 所示。

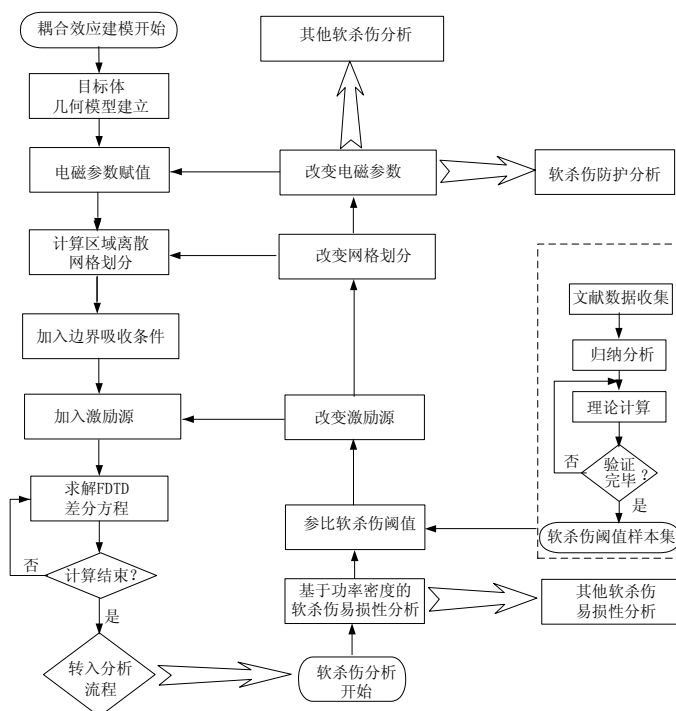


图 1 分析流程图

### 1.2 实现方法分析

#### 1.2.1 飞机机体与飞行员几何模型

以某作战飞机为研究对象,该飞机采用双座、双发、双垂尾、机腹进气、顶部辅助进气、带边条的中等展弦比后掠下单翼、翼身融合的正常气动布局。参考资料数据图片,获取特征点数据,构建该飞机的三维几何模型。文献[11]采用 1:12 缩比模型,由于缩比模型不能改变激励频率和飞机尺寸对应关系,本文选择了 1:1 的建模方式。座舱内设置了显示器、仪表盘、控制面板等装置。为了开展强电磁脉冲对人体的软杀伤研究,还建立了两个飞行员模

型。建立直角坐标系如下,设飞机平飞状态,机头纵轴为 Z 方向,原点为机身纵向对称面内座舱前端底部中心点,左机翼为 X 方向,机身垂直向上为 Y 轴。建立的几何模型和坐标系如图 2 所示。

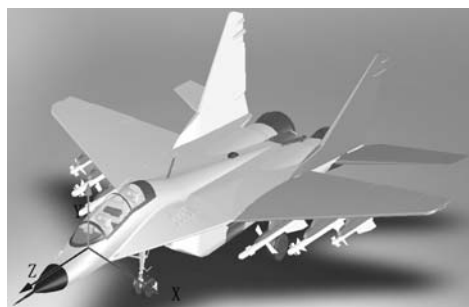


图 2 座舱及飞行员几何模型

### 1.2.2 激励波源

核电磁脉冲有相关标准的模型进行模拟<sup>[8]</sup>, 而强电磁脉冲武器的模型尚未有相关标准, 文献[9]用时谐平面波与高斯脉冲平面波模型模拟对计算机主板的电磁脉冲辐射源, 文献[11]用双高斯脉冲仿真无载波雷达信号。

本文用高斯脉冲平面波模型, 模拟未加载频、辐射的峰值功率为 10 GW、约 300 m 处起爆的低频电磁脉冲武器(文献[12]分析了该武器的杀伤机理)波形, 并通过试验优化电磁参数。不考虑其在有效作用距离内传输的衰减, 入射方向为迎着 Z 轴方向(飞机正前方), 电场极化方向为沿着 Y 轴方向。脉冲持续时间  $\tau$  亦决定频谱宽度, 需要反复试验权衡选择, 才能增强损伤的效果; 选择脉冲峰值时间  $t_0$  和  $\tau$  相近, 可使脉冲在起始时刻近似为零。本文取峰值振幅  $E_0 = 9.962\ 664\ \text{kV/m}$ ,  $t_0 = 64.845\ 49\ \text{ns}$ ,  $\tau = 64.74\ \text{ns}$ , 其绝大部分功率分布在 0~100 MHz 范围内。

$$E_i = E_0 \exp\left(-\frac{4\pi(t-t_0)^2}{\tau^2}\right) \quad (1)$$

### 1.2.3 计算区域的 FDTD 网格划分

文献[8-9]采用均匀网格划分, 为提高计算精度, 利用亚网格技术<sup>[10]</sup>对包含飞机机体和空勤人体的计算空间进行 FDTD 自适应划分, 对指定区域部分(薄层结构)采用比最大网格尺寸小 1/2 的尺寸,  $\Delta x \times \Delta y \times \Delta z$  为  $0.010\ 53\ \text{m} \times 0.010\ 53\ \text{m} \times 0.010\ 53\ \text{m}$ 。

在保证差分近似带来的色散在允许的前提下, 其稳定性条件较文献[10]放宽为:

$$E_x^{n+1}\left(i+\frac{1}{2}, j, k\right) = \frac{1 - \frac{\sigma(m)\Delta t}{2\varepsilon(m)}}{1 + \frac{\sigma(m)\Delta t}{2\varepsilon(m)}} E_x^n\left(i+\frac{1}{2}, j, k\right) + \frac{\frac{\Delta t}{\varepsilon(m)}}{1 + \frac{\sigma(m)\Delta t}{2\varepsilon(m)}} \left[ \frac{H_z^{n+\frac{1}{2}}\left(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k\right) - H_z^{n+\frac{1}{2}}\left(i+\frac{1}{2}, j-\frac{1}{2}, k\right)}{\Delta y} - \frac{H_y^{n+\frac{1}{2}}\left(i+\frac{1}{2}, j, k+\frac{1}{2}\right) - H_y^{n+\frac{1}{2}}\left(i+\frac{1}{2}, j, k-\frac{1}{2}\right)}{\Delta z} \right] \quad (3)$$

$$H_x^{n+1}\left(i, j+\frac{1}{2}, k+\frac{1}{2}\right) = \frac{1 - \frac{\sigma_m(m)\Delta t}{2\mu(m)}}{1 + \frac{\sigma_m(m)\Delta t}{2\mu(m)}} H_x^{n-\frac{1}{2}}\left(i, j+\frac{1}{2}, k+\frac{1}{2}\right) - \frac{\frac{\Delta t}{\mu(m)}}{1 + \frac{\sigma_m(m)\Delta t}{2\mu(m)}} \left[ \frac{E_z^n\left(i, j+1, k+\frac{1}{2}\right) - E_z^n\left(i, j, k+\frac{1}{2}\right)}{\Delta y} - \frac{E_y^n\left(i, j+\frac{1}{2}, k+1\right) - E_y^n\left(i, j+\frac{1}{2}, k\right)}{\Delta z} \right] \quad (4)$$

$$f \leq \frac{1}{10\Delta t\sqrt{3}} = \frac{c}{10\Delta x} = \frac{c}{10\Delta y} = \frac{c}{10\Delta z} \quad (2)$$

可得仿真时间步长  $\Delta t$  为  $20.27 \times 10^{-12}\ \text{s}$ , 最高频率  $f$  为  $2.85 \times 10^9\ \text{Hz}$ 。

### 1.2.4 飞机和人体的电磁参数

参考文献[11, 13]设定电磁参数, 飞机机体: 电导率  $\sigma$  为  $3.82 \times 10^7\ \text{S/m}$ , 相对介电常数  $\varepsilon_r$  为 1; 座舱玻璃: 相对介电常数  $\varepsilon_r$  为  $3.8-0.002\ 85j$ ; 人脑: 电导率  $\sigma$  为  $1.1\ \text{S/m}$ , 相对介电常数  $\varepsilon_r$  为 49,  $\rho$  为  $1000\ \text{kg/m}^3$ ; 肌肉: 电导率  $\sigma$  为  $1.21\ \text{S/m}$ , 相对介电常数  $\varepsilon_r$  为 58,  $\rho$  为  $1\ 000\ \text{kg/m}^3$ 。

### 1.2.5 吸收边界条件

采用吸收边界条件实现对 FDTD 计算区域的截断, 有效吸收截断边界处的外向行波, 从而用有限 FDTD 区域模拟开放空间的电磁耦合过程。文献[9]采用的四阶 Liao 氏吸收边界条件实现起来较为繁琐, 本文在保证吸收效果的前提下, 为了减少内存占用、加快计算速度, 采用了更简洁的二阶 Liao 氏吸收边界条件。

### 1.2.6 耦合电磁场求解

文献[9]为了处理远小于网格尺寸的金属覆层, 需要修正差分计算公式。本文避免了此类修正, 将以上电磁参数、吸收边界条件、激励波源, 应用于麦克斯韦有限差分方程组, 即可按照式(3)、(4)对以上剖分的每一个网格中各个时刻的耦合电场  $E_x$  和磁场分量  $H_x$  进行计算, 选择最大计算为 10 000 步, 可保证电场和磁场强度基本趋近于零。

式中： $\sigma$ 为电导率； $\varepsilon$ 为介电常数； $\sigma_m$ 为导磁率； $\mu$ 为磁导系数； $\Delta t$ 为时间步长； $n$ 表示时间步长的个数； $\Delta x$ 、 $\Delta y$ 和 $\Delta z$ 为网格尺寸； $i$ 、 $j$ 、 $k$ 为网格位置。

## 2 软杀伤分析

### 2.1 基于功率密度的软杀伤易损性分析

软杀伤易损性主要研究目标遭受电磁脉冲武器软杀伤后的损伤程度。文献[6-7]给出的损伤功率阈值拟合分布曲线把损伤功率阈值近似成正态分布，易损性概率则近似为 0-1 分布，实际上损伤功率阈

值曲线呈阶梯形，是一种所谓“分段均匀分布”。因此，本文基于功率密度提出一种适宜工程操作的易损性概率  $P$  定义：

$$P = \begin{cases} \frac{S}{S_{\text{threshold}}}, & 0 \leq \frac{S}{S_{\text{threshold}}} \leq 1 \\ 1, & \frac{S}{S_{\text{threshold}}} > 1 \end{cases}, \quad (5)$$

式中： $S$ 指观察点（波源）的功率密度峰值； $S_{\text{threshold}}$ 指功率密度阈值。

电子设备、常见电子元器件和人体的损伤事件、损伤阈值<sup>[14]</sup>和仿真计算的易损性概率见表 1。

表 1 强电磁脉冲的功率密度损伤阈值和易损性概率

研究对象	功率阈值/(W/m <sup>2</sup> )	损伤事件	波源易损性概率/%	观察点易损性概率/%
电子设备	10 <sup>-4</sup> ~ 10 <sup>-2</sup>	干扰 (interfere)	100	100
电子设备	10 <sup>2</sup> ~ 10 <sup>4</sup>	拒止 <sup>2</sup> (deny)	100	100
电子设备	10 <sup>4</sup> ~ 10 <sup>5</sup>	削弱 <sup>2</sup> (degrade)	100	100
电子设备	10 <sup>5</sup> ~ 10 <sup>6</sup>	损坏 (damage)	26.58~100	19.85~100
整流管和齐纳二极管	4×10 <sup>6</sup> ~ 4×10 <sup>7</sup>	损坏	0.66~6.65	0.50~4.96
大功率晶体管	2×10 <sup>6</sup> ~ 2×10 <sup>7</sup>	损坏	1.33~13.29	0.99~9.92
小功率晶体管	10 <sup>5</sup> ~ 8×10 <sup>6</sup>	损坏	3.32~100	2.48~100
微波二极管	4×10 <sup>4</sup> ~ 10 <sup>6</sup>	损坏	26.58~100	19.85~100
检波二极管	10 <sup>6</sup> ~ 10 <sup>7</sup>	损坏	2.66~26.58	1.99~19.85
开关晶体管	3×10 <sup>5</sup> ~ 3×10 <sup>6</sup>	损坏	8.86~88.60	6.62~66.18
双极型晶体管	7×10 <sup>4</sup> ~ 8×10 <sup>6</sup>	损坏	3.32~100	2.48~100
CMOSRAM	10 <sup>5</sup> ~ 10 <sup>6</sup>	损坏	26.58~100	19.85~100
运算放大器	3×10 <sup>5</sup> ~ 3×10 <sup>6</sup>	损坏	8.86~88.60	6.62~66.18
人	10 <sup>2</sup> ~5×10 <sup>2</sup>	痉挛或失去知觉	100	100
人	10 <sup>3</sup>	心肺功能将会衰弱	100	100
人	5×10 <sup>3</sup>	烧伤皮肤	100	100
人	2×10 <sup>5</sup>	三度烧伤 (2s)	100	99.28
人	8×10 <sup>5</sup>	烧死 (1s)	33.23	24.82

迎着 Z 方向来的高斯脉冲激励下观察点（设在座舱内驾驶员身前一个网格处，且在机身纵向对称面内，该点达到座舱内能量密度的最值）时域、功率密度波形和第 4 431 时间步（该时间步能量密度幅值达到整个计算时间内的峰值 4.449 MW/m<sup>2</sup>）Z 方向能量密度幅值（包含观察点的 XZ 平面）分布，表明现有座舱盖对高斯脉冲有一定衰减作用。

图 3 为第 4 431 时间步功率密度幅值（仿真观

察图片用红橙黄绿青蓝紫七色和机体颜色表示功率密度幅值的分贝值 -70~0 dB，其中 0 dB=4.449 MW/m<sup>2</sup>，本文用灰度片表示）分布表明：座舱内屏蔽效果很强（耦合电场幅值低于 -70 dB），前部是圆弧风挡的固定段，中间是前固定段，后部是后设备舱口盖。空勤身前方几乎没有屏蔽，空勤身后方有铝框架的座椅屏蔽。

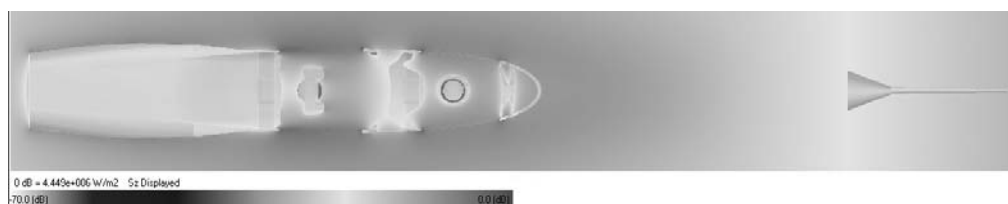


图 3 第 4431 时间步功率密度幅值分布

图 4 显示在 89.798 54 ns 时刻电场强度达到峰值  $-5.826 63 \text{ kV/m}$ ，在 89.798 54 ns 时刻功率密度达到峰值  $198.549 52 \text{ kW/m}^2$ ，耦合电场强度和功率密度波形与入射波形方向相反，说明耦合进入座舱的电磁脉冲对外辐射很强，辐射的电场强度和功率密度大大超过了入射电场。

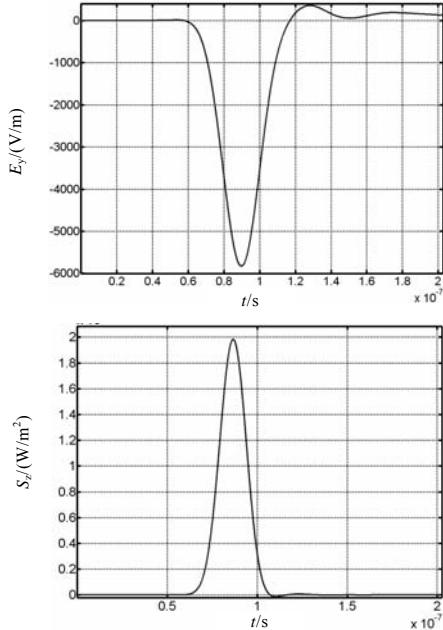


图 4 观察点耦合电场时域波形和功率密度波形

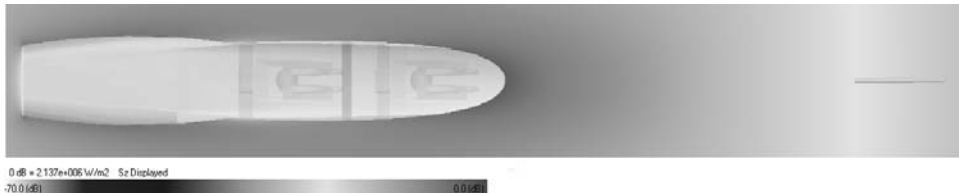


图 5 第 441 时间步功率密度幅值分布图

迎着 Z 方向来的高斯脉冲激励下观察点的时域和功率密度波形见图 6，在 85.683 62 ns 时刻电场强度达到峰值  $-3.138 542 \times 10^{-2} \text{ V/m}$ ，在 85.683 62 ns 时刻功率密度达到峰值  $7 \times 10^{-4} \text{ W/m}^2$ ，虽然耦合电场强度和功率密度都震荡得比较厉害，但幅值已经衰减到很小的范围内。

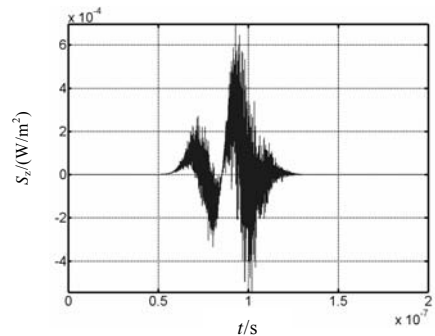
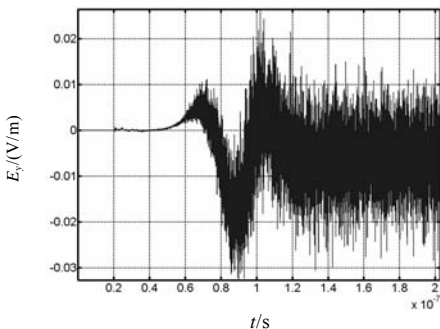


图 6 观察点耦合电场时域波形和功率密度波形

仿真结果如表 1 所示，现有座舱盖对人员和设备的屏蔽效能有限。电磁脉冲弹对飞机座舱耦合过程中，对人体的烧伤概率 100%，烧死概率 24.819%。对电子设备的损坏概率较小，干扰、拒止和削弱概率达到 100%。

### 2.2 基于座舱玻璃导电膜的软杀伤防护分析

软杀伤防护分析主要研究某种防护手段在各种参数电磁脉冲武器攻击下的效果与影响。本文提出用座舱玻璃导电膜防护电磁脉冲软杀伤。透明导电膜 (Transparent Conductive Oxide, TCO) 是在平板玻璃表面通过物理或者化学镀膜的方法均匀地镀上一层透明的导电氧化物薄膜。TCO 有两个主要指标：一是对可见光的高透过率 ( $T_{\text{avg}} > 80\%$ )；另一个是高的电导率 ( $\sigma \geq 10^5 \text{ S/m}$ )。本文选取导电膜电导率  $\sigma$  为  $10^5 \text{ S/m}$ ，相对介电常数为 3.8。<sup>[11]</sup>

第 4 441 时间步 (该时间步功率密度幅值达到整个计算时间内的峰值  $2.137 \text{ MW/m}^2$ ) 功率密度幅值分布图 ( $0 \text{ dB} = 2.137 \text{ MW/m}^2$ ) 如图 5 所示，导电膜对能量集中在 100 MHz 以下的高斯脉冲防护效果很好，对电子设备和人体的易损性概率降至 0。

### 3 结论

本文首先建立了一套座舱电磁脉冲耦合效应建

模仿真及软杀伤分析流程,然后针对某作战飞机开展了低频电磁武器的座舱耦合效应仿真,对具体实现方法上进行了深入分析,提出了一种适宜工程操作的软杀伤易损性定义,计算了易损性概率,最后对导电膜的防护效果进行了评估。

通过仿真优化电磁参数可作为电磁脉冲武器研制和升级的参考依据,其上升沿越陡峭,峰值越高,脉宽越宽对目标的毁伤效果越好。

### 参考文献:

- [1] 甄涛,邱成龙. 软毁伤[M]. 北京:国防工业出版社, 2002:1-5.
- [2] 石全,米双山,王广彦,等. 装备战伤理论与技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2007:44-46.
- [3] PHILIP E NIELSEN. Effects of directed-energy weapons[R]. ADA476195, 1994:32-45.
- [4] 焦晓静. 飞机的高功率微波易损性评估[J]. 抗核加固, 2007,24(1):66-73.
- [5] 姚武文. 飞机战伤模式与机理[M]. 北京:航空工业出版社, 2006:68-69.
- [6] 方进勇,申菊爱,杨志强,等. 集成电路器件微波损伤效应实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2003,15(6): 591-594.
- [7] 方进勇,张志强,黄文华,等. 集成电路高功率微波易损性预测评估模型[J]. 强激光与粒子束, 2009,21(4):565-568.
- [8] 周璧华,陈彬,石立华. 电磁脉冲及其工程防护[M]. 北京:国防工业出版社, 2003:78-129.
- [9] 刘长军,黄卡玛,阎丽萍,等. 电磁辐射作用于计算机主板的模拟及其效应评估[J]. 强激光与粒子束, 2006,18(5):847-851.
- [10] 葛德彪,阎玉波. 电磁波时域有限差分方法[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2002:35-39, 173-204.
- [11] 李毅,梁步阁,张光甫,等. 强电磁脉冲信号激励下复杂目标的散射[J]. 强激光与粒子束, 2006,18(7): 1149-1153.
- [12] 田锦昌,袁健全,陈旭情. 电磁炸弹——一种大规模电磁毁伤武器[J]. 飞航导弹, 2007(3):23-30.
- [13] 齐红星. 电磁脉冲对人体的作用和数值方法研究[D]. 上海:华东师范大学, 2004:103-108.
- [14] 王聪敏,张博. 高功率微波对电子设备的影响分析[J]. 航天电子对抗, 2007,23(5):26-28.

## Research on Back-Door Coupling Effect of Low-Frequency Mononuclear EMP Weapon on Cockpit and Analysis on Soft Kill to Military Aircraft

HUANG Juan<sup>1a</sup>, FEI Qi-zhi<sup>2</sup>, ZHANG Hao-ran<sup>2, 1b</sup>, HU Yun-an<sup>1b</sup>, JIN Yan<sup>1a</sup>

(1. Naval Aeronautical and Astronautical University a. Graduate Students' Brigade;

b. Department of Control Engineering, Yantai Shandong 264001, China;

2. Naval Equipment Department, Beijing 100071, China)

**Abstract:** The problem of research on coupling computation of low-frequency mononuclear EMP weapon and soft kill to aircraft was analyzed. Based on FDTD method, a flow chart of modeling and analysis for back-door coupling effect of low-frequency mononuclear EMP weapon and soft kill was constructed. A simulation experiment of low-frequency mononuclear EMP weapon was carried out on a fighter, the soft kill data was acquired and analyzed, and a guard method were proposed. The simulation tests showed the shielding efficiency of electric film to soft damage.

**Key words:** electromagnetic pulse weapon; military aircraft; soft kill; FDTD