机载天线电磁脉冲耦合特性及其防护试验研究

为了进行机载天线电磁脉冲耦合特性及其防护试验研究，以超短波天线为研究对象，试验研究机载天线的电磁脉冲耦合特性，并针对耦合特性设计出电磁脉冲防护电路，最后对防护电路的电路性能及防护效果进行试验研究。试验结果表明：天线轴向与电场极化方向相同时，超短波天线的电磁脉冲耦合电压最高，能量最大，对机载天线的干扰最为严重；设计出的电磁脉冲防护电路的电路性能满足设计要求；天线端口接入防护电路后，能有效地降低天线耦合的电压和能量，增加屏蔽层的防护，电路防护效果更佳。

郝凤柱[1] 段泽民[2,3,4] 朱 博[2] 张 松[3,4] 姚志成[2]/1.贵阳供电局 2.合肥工业大学电气与自动化工程学院 3.安徽省飞机雷电防护省级实验室 4.合肥工业大学强电磁环境防护技术航空科技重点实验室

郝凤柱/助理工程师

关键词/Keywords
机载天线·
电磁脉冲·
耦合机理·
防护电路·

0 引言

电磁脉冲是一种瞬态电磁现象，主要包括雷电电磁脉冲、高空核爆电磁脉冲（High Electromagnetic Pulse，HEMP）和静电电磁脉冲等。特别是核爆炸产生的电磁脉冲，峰值场强极高，上升时间极短，其能量之大，作用范围之广，是其他任何电磁脉冲无法相比的，因而对各种军用和民用的电子、电气设备与系统构成的威胁最为严重[1-3]。

机载天线是飞机外置的电磁波接收或发射设备，对飞机的安全飞行起着至关重要的作用，当飞机处于强电磁脉冲环境时，天线会受到很强的电磁干扰[4]。许多关于天线电磁脉冲耦合的研究[4-8]表明，随着电子设备的小型化和集成化，天线系统后置对电磁脉冲干扰的敏感度越来越高。当天线系统处在强电磁脉冲环境中，耦合出的过电压或大电流会干扰天线接收和发射信号，如果超过天线后置设备的电压或电流阈值，甚至可能损坏天线系统，如造成线路和电子器件的烧毁。由于机载天线系统的重要性与易损性，必须对机载天线系统进行电磁脉冲防护，国内外已对天线的电磁脉冲防护有了一定的研究，但是设计的防护电路主要针对低频信号的电磁脉冲防护[9-11]。

从电磁环境的最不利情况出发，以HEMP为干扰环境，利用建立的核电磁脉冲模拟器，试验研究超短波天线的电磁脉冲耦合特性，分析研究耦合试验结果，并依据天线电磁脉冲耦合特性试验结果分析，对超短波天线的电磁脉冲耦合干扰进行防护电路设计及防护试验研究。

1 试验环境分析

1.1 试验波形分析

HEMP用双指数波形来进行描述，波形如图1所示。GJB 151B－RS105中标准规定的HEMP时域表达式[12]为

$$E_{\mathrm{inc}}(t)=\begin{cases}0 & t\leqslant 0\\ kE_0(\mathrm{e}^{-\alpha t}-\mathrm{e}^{-\beta t}) & t>0\end{cases} \quad (1)$$

式中，E_0为脉冲峰值；k为峰值修正系数；β、α分别为脉冲前、后沿参数。其波形参数为：$k=1.3$，$E_0=50$ kV/m，$\alpha=4\times10^7 s^{-1}$，$\beta=6\times10^8 s^{-1}$。

为了实现上述双指数电磁脉冲波

装备预研中航工业联合基金（6141B05100303），国防基础科研（JCKY2016205B007）。

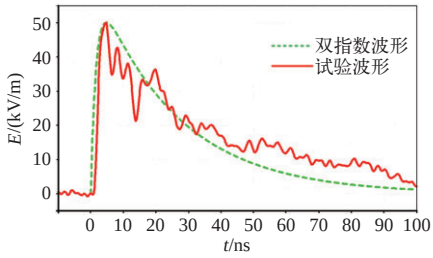
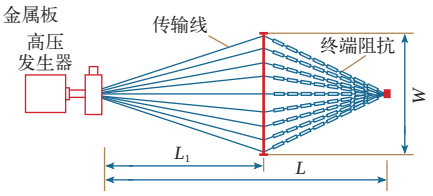
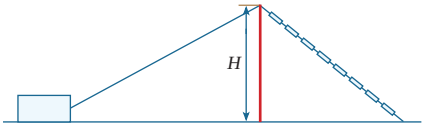


图1　电场的双指数波形和试验波形对比

形，建立了一套传输线型有界波电磁脉冲模拟器，主要由MARX高压脉冲源、传输线和终端匹配负载等组成，图2为其结构示意图。模拟器的最大高度为$H=1.8$ m，最大长度为$L=6$ m，最大宽度为$W=2.5$ m，源端到最高点的水平距离为$L_1=3.6$ m。上传输线采用9根直径为6 mm的细导线，下传输线采用厚度为5 mm的金属板，终端匹配阻抗为115 Ω。



（a）模拟器俯视结构示意图



（b）模拟器侧视结构示意图

图2　模拟器结构示意图

本电磁脉冲模拟器可以产生均匀的垂直于接地金属板的电场脉冲，当激励源充电电压为80 kV时，使用瞬态电磁场辐射敏感度测试方法测试试验波形[12-13]，测量的试验电场脉冲波形见图1，波形满足上升时间(2.3±0.5) ns，半波宽度(23±5) ns。试验脉冲波形与标准双指数波形的上升时间、半宽、下降时间以及幅值都较吻合，说明本试验装置满足标准GJB 151B－RS105中的波形要求。

1.2　试验布置介绍

超短波天线是工作于超短波波段的接收或发射天线，工作频段在30～300 MHz，本文采用的超短波天线模型如图3所示。作为机载天线的超短波天线与地面天线有所不同，机载天线脱离了大地的影响，但是对机载天线来说，飞机的金属蒙皮就是天线的“地”，在试验过程中制作一个有一定弧度的金属板模拟飞机蒙皮，并对其进行接地处理，如图4所示。

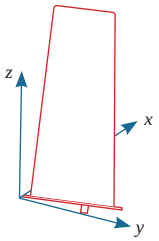


图3　超短波天线模型

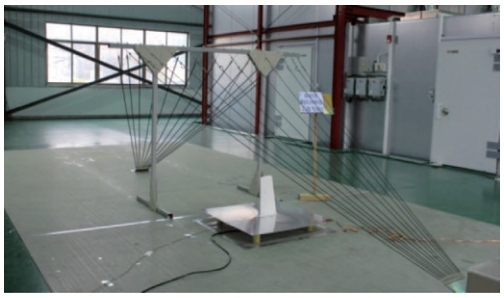


图4　天线布置图

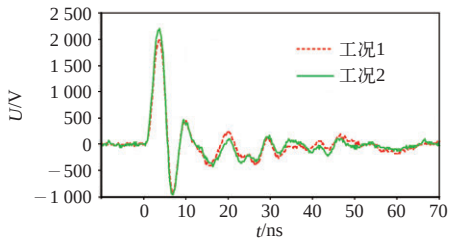
试验现场布置见图4，试验中超短波天线置于测试区域，试验过程中使用电容分压器测量系统对电磁脉冲下超短波天线的耦合电压进行测量，测量过程中为了减小电磁脉冲对测量信号的影响，应使用光纤进行信号传输[14]。为了研究不同位置天线受电磁脉冲影响的情况，定义一个随天线旋转的直角坐标轴（见图3），电磁脉冲入射与极化方向如表1所示。天线端口经屏蔽电缆接入匹配50 Ω负载，并将耦合电压传送至数字存储示波器。

表1　天线方位

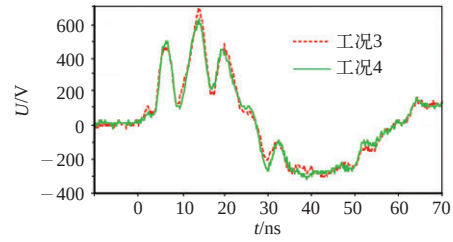
工况号	电磁波入射方向	电场极化方向
1	x方向入射	$-z$方向极化
2	y方向入射	$-z$方向极化
3	x方向入射	$-y$方向极化
4	$-y$方向入射	x方向极化
5	$-z$方向入射	x方向极化
6	$-z$方向入射	y方向极化

2 天线电磁脉冲耦合试验结果与分析

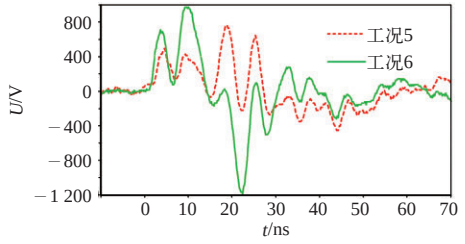
天线在不同工况下的电磁脉冲耦合试验电压波形如图5所示。



（a）工况1与工况2耦合电压波形对比



（b）工况3与工况4耦合电压波形对比



（c）工况5与工况6耦合电压波形对比

图5 超短波天线耦合电压波形

为了试验更加可靠准确，对天线同一工况进行五次试验，并对耦合电压峰值和中心频率求平均值。天线处在不同工况时，天线耦合的平均电压峰值和平均中心频率如表2所示。

表2 天线耦合电压峰值和中心频率

工况号	试验耦合平均峰值电压/V	试验耦合平均频率/MHz
1	2 062	164
2	2 168	162
3	661	133
4	634	131
5	777	152
6	1 180	165

由图5和表2可得：各种工况耦合电压均大于500 V，已经严重干扰天线后置设备的正常工作；当天线位于工况1和工况2时，即天线轴向与电场极化方向相同时，天线在电磁脉冲辐照下的耦合电压波形为衰减的正弦波，两种入射方向的耦合电压波形变化不大，电压峰值都在2 000 V以上且变化很小，说明这种情况下耦合电压受电磁脉冲入射方向影响很小；天线轴向与电场极化方向相同时，天线电磁脉冲耦合电压峰值最大，耦合峰值可达2 000 V以上，天线工作受电磁脉冲干扰最为严重。

由表2可得：超短波天线的电磁脉冲耦合电压波形中心频率在130～170 MHz之间。试验用的超短波天线的工作频率在30～300 MHz，中心频率为165 MHz，试验用超短波天线电磁脉冲耦合波形中心频率主要集中在天线中心频率165 MHz附近，直接影响天线的正常工作。

对天线接收或发射系统内部电子元器件的影响因素除了耦合电压和频率外，还有瞬时功率和沉积能量，这些都会导致电子元器件的损坏，从而影响系统的正常工作。超短波天线端接负载上的瞬时功率表达式为

$$P_{\mathrm{L}}(t)=\frac{U_{\mathrm{L}}(t)\cdot U_{\mathrm{L}}^{*}(t)}{R_{\mathrm{L}}} \tag{2}$$

端口负载沉积耦合能量时域积分表达式为

$$W_{\mathrm{L}}(t)=\int_{t_1}^{t_2}P_{\mathrm{L}}(t)\mathrm{d}t=\frac{1}{R_{\mathrm{L}}}\int_{t_1}^{t_2}U_{\mathrm{L}}(t)\cdot U_{\mathrm{L}}^{*}(t)\mathrm{d}t \tag{3}$$

式中，R_{L}为负载电阻阻值；$U_{\mathrm{L}}(t)$为随时间变化的电压函数；“*”为共轭符号。

由式（2）可得，当终端负载为50 Ω时，天线耦合的最大功率在75 kW以上。由式（3）可得，当终端负载为50 Ω时，沉积能量可高达0.223 mJ，远高于典型电子元器件损伤阈值，这将严重影响天线后置设备的正常工作状态，甚至使设备瘫痪。

3 天线系统的电磁脉冲防护设计试验研究

3.1 天线电磁脉冲防护设计研究

超短波天线防护电路设计要求能对电磁脉冲的天线耦合有很好的防护作用，将耦合进入的能量限制在接收设备能承受的范围以内。电路设计

要满足插入损耗小于0.3 dB，回波损耗的绝对值大于20 dB，驻波比小于1.2，同时要求接口阻抗匹配（50 Ω阻抗匹配）较好，从而使天线系统接收或发射正常信号时不受防护电路影响。

设计的防护电路应该满足：既能泄放雷电和长时间重复脉冲耦合的能量，也应该保证有极快的响应速度和较小的过冲电压，同时又能保证设备的使用寿命。常用的防护器件有气体放电管、半导体放电管、压敏电阻和TVS管等[15-16]。在设计超短波天线电磁防护时，由于超短波天线接收或发射信号的频率较高，压敏电阻的寄生电容较大，会使正常信号产生较大的损耗和波形畸变，影响正常的信号接收或发射，一般不使用压敏电阻。设计电磁脉冲防护电路时，一般使用气体放电管、半导体放电管和TVS管，气体放电管的通流能力最大，半导体放电管其次，TVS管的通流能力最小，但是气体放电管响应时间最长，半导体放电管和TVS管响应时间都为纳秒或皮秒数量级。

设计防护电路时，第一级防护使用气体放电管，能泄放耦合的大电流；第二级防护使用半导体放电管，能针对核电磁脉冲、高功率微波及静电等快上升沿的电磁脉冲防护，泄放第一级无法响应而残留的能量；第三级防护电路使用TVS管，能将电压钳位到一个较低的水平，做到对敏感器件的精密防护。

根据超短波天线的电磁脉冲耦合电压波形分析和电路设计要求设计的电路原理如图6所示。

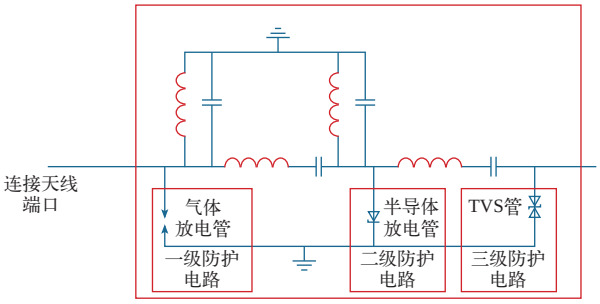
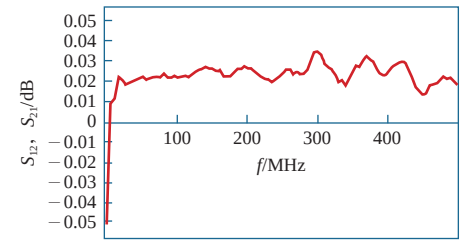


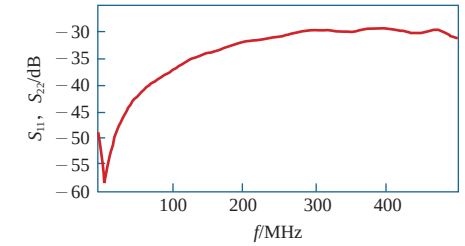
图6　防护电路原理

3.2　防护电路性能测试

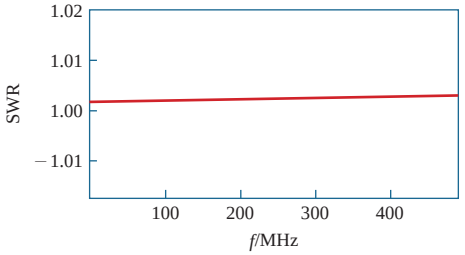
为了了解在接收正常信号时，防护电路对信号的影响情况是否符合要求，应该对防护电路的S参数，驻波比和阻抗Z进行测试，测试结果如图7所示，测试结果的主要数据如表3所示。



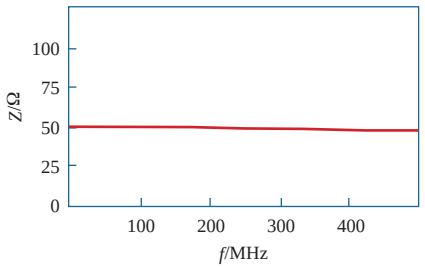
（a）S_{12}和S_{21}参数



（b）S_{11}和S_{22}参数



（c）驻波比



（d）阻抗Z值

图7　电路性能参数测试图

表3　电路参数测试数据

测试参数（频段30～300 MHz）	测试数据
S_{12}和S_{21}（插入损耗）最大值/dB	0.03
S_{11}和S_{22}（回波损耗）最大值/dB	−29.8
阻抗平均值/Ω	48.75
驻波比平均值	1.003

由表3和图7可知，测量结果完全满足防护电路的要求，在天线工作频段30～300 MHz内S_{12}和S_{21}（即插入损耗）＜0.3 dB；S_{11}和S_{22}（即回波损

耗）绝对值＞20 dB；阻抗为48.75 Ω，很接近匹配阻抗50 Ω，满足误差要求；驻波比平均值为1.003，小于1.2的要求值。

3.3 防护电路效果试验研究

由超短波天线的电磁脉冲耦合试验研究可知，天线轴向与电场极化方向相同时，耦合电压受电磁脉冲入射方向影响很小，此时耦合的电压和能量变化不大，在防护电路效果试验时，可任意选择其中一个工况进行试验研究。对电磁脉冲防护电路效果进行试验研究时，只需针对工况1时天线耦合电压波形进行防护效果试验研究，将防护电路接入工况1下的天线端口，进行超短波天线电磁脉冲耦合防护试验。同时为了减小电磁脉冲对防护电路的电磁干扰，需要对防护电路进行电磁屏蔽。分别将没有屏蔽层的防护电路和增加屏蔽层的防护电路接入工况1下的天线端口进行超短波天线电磁脉冲耦合防护试验。防护效应试验结果对比如图8和表4所示。

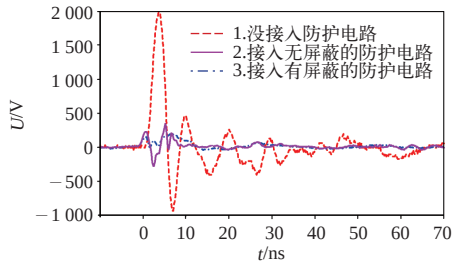


图8 工况1防护前后耦合电压波形对比

表4 工况1防护前后耦合电压峰值

工况1 所处的状态	五次测量的平均值峰值大小/V
没接入防护电路	2 062
接入无屏蔽的防护电路	312
接入有防护的屏蔽电路	196

由图8中的曲线1和曲线2可知，接入防护电路后耦合电压快速下降，且电压衰减加快；由表4可得，接入防护电路后耦合电压峰值312 V远小于接入防护电路前的耦合电压2 062 V，防护效果明显。

由图8中的曲线2和曲线3可知：防护电路是否接入屏蔽层对防护效果有一定影响；由表4可得，耦合峰值电压从接入无屏蔽防护电路的312 V降到接入有屏蔽层防护电路的196 V，屏蔽层能更有效地降低耦合的电压，有利于耦合脉冲的防护。

根据式（2）和式（3）计算得到的接入有屏蔽层的防护电路时，最大功率约643 W，终端负载为50 Ω时耦合能量约为0.001 9 mJ，耦合出的功率和能量已经大大降低。

由以上试验结果分析可知，设计的防护电路能有效地降低天线电磁脉冲耦合出的电压、功率和能量，尤其是屏蔽后的电磁脉冲防护电路效果更加明显。

4 结束语

本文首先对超短波天线进行电磁脉冲耦合试验研究，分析研究不同工况下的超短波天线耦合波形，然后根据电磁脉冲耦合试验和防护电路性能要求进行电磁脉冲防护电路设计，并对防护电路性能和电磁脉冲耦合响应特性进行试验研究。

天线电磁脉冲耦合试验结果表明：超短波天线轴向与电场极化方向相同时，耦合电压峰值最大，能量最高，这种情况下是超短波天线电磁耦合的最恶劣情况；超短波天线电磁脉冲耦合电压中心频率主要集中在天线中心频率附近，对天线工作具有直接影响。

防护电路性能测试试验表明：设计的超短波电磁脉冲防护电路在正常情况下对接收的信号影响很小，各项电路性能指标符合要求。

防护电路效果试验表明：在电磁脉冲耦合波形峰值最大的情况下，能有效地降低耦合电压和耦合能量；对防护电路进行屏蔽能有效地提高防护效果。

参考文献

[1] 柴焱杰，孟丁，李建军．复杂电子系统强电磁脉冲效应研究 [J]．电磁场与微波，2011，4 (1)：38-40．

[2] 赖祖武．强电磁脉冲的破坏效应及防护 [J]．电子科技导报，1997 (11)：32-34．

[3] 谢彦召，孙蓓云，周辉，等．地面附近的高空核爆电磁脉冲环境 [J]．强激光与粒子束，2003，15 (7)：680-684．
[4] 刘成龙．电磁脉冲对天线系统的耦合效应仿真 [D]．南京：南京理工大学，2012．
[5] 张昕，王锋．电磁脉冲与短波天线耦合特性的研究 [J]．现代电子技术，2011，34 (5)：187-189．
[6] 甄可龙，吕善伟，张岩．强电磁环境对雷达接收机的天线耦合分析 [J]．河北科技大学学报，2011 (2)：147-151．
[7] 王天顺．机载天线电磁耦合分析 [J]．飞机设计，1995 (3)：62-68，80．
[8] Jiang Zheng，Yin Wenyan，Liu Qifeng，et al．Transient responses of some antennas under the impact of an intentionally incident high-power electromagnetic pulse [J]．Progress in Electromagnetic Research，2010，105：365-381．
[9] 颜克文，阮成礼，梁源，等．通信设备天线端口电磁脉冲防护技术研究 [J]．舰船电子工程，2012，32 (8)：61-63．
[10] 良志强．电磁脉冲的防护研究 [D]．西安：西安电子科技大学，2010．
[11] 颜克文．短波通信设备电磁防护技术研究 [D]．成都：电子科技大学，2009．
[12] 国防科学技术工业委员会．GJB 151B—2013 军用设备和分系统电磁发射和敏感度要求与测量 [S]．北京：总装备部军标出版发行部，2013．
[13] 王宇，方东明，陈博，等．基于旋转谐振结构的单芯片二维电场传感器 [J]．传感器与微系统，2016，35 (2)：103-105，112．
[14] 马天兵，赵耀军．基于DSP的光纤电压传感器的设计 [J]．传感器与微系统，2006，25 (6)：58-60．
[15] Mats G Backstrom，Karl Gunnar Lovstrand．Susceptibility of electronic systems to high-power microwaves：summary of test experience [J]．IEEE Transactions on Electromagnetic Comptibility，2004，46 (3)：396-403．
[16] He Jinliang，Chen Shuiming，Zeng R，et al．Electrical parameter statistic analysis and parallel coordination of ZnO varistors in low-voltage protection devices [J]．IEEE Transactions on Power Delivery，2005，20 (1)：131-137．

（收稿日期：2017－02－14）EA

(上接第55页)

器有载调压开关故障诊 [J]．高压电器，2012 (1)：76-81．
[2] 张伟政．小波奇异性检测诊断有载调压开关故障 [J]．高电压技术，2006 (7)：49-52．
[3] 高鹏．调压开关振动信号EMD熵和小波熵的比较 [J]．电力系统及其自动化学报，2012 (4)：48-53．
[4] 洪祥．基于EEMD的有载调压开关触头松动故障诊断 [J]．华电技术，2012 (1)：12-15．
[5] 郑婧．基于独立成分分析和端点检测的变压器有载调压开关振动信号自适应分离 [J]．电网技术，2010 (11)：208-213．

（收稿日期：2016－11－09）EA