

强电磁脉冲对武器装备电子系统毁伤效应分析及电磁防护材料技术

张存瑞*, 米玉洁, 王 喆, 张贵恩, 张小刚, 王月祥

中国电子科技集团公司第三十三研究所, 材料部, 山西 太原

收稿日期: 2022年4月26日; 录用日期: 2022年5月24日; 发布日期: 2022年5月31日

摘 要

文章介绍了强电磁脉冲武器的特点以及毁伤机理, 同时对强电磁脉冲防护技术进行了分析, 最后研究了强电磁脉冲防护技术以及新型电磁防护材料在电磁脉冲防护领域的应用技术, 同时对强电磁脉冲防护技术的发展趋势和未来发展方向进行了分析, 为进行强电磁脉冲防护材料提供一定的研究基础。

关键词

强电磁脉冲, 电子系统, 毁伤效应, 脉冲防护技术, 电磁防护材料

Damage Effect Analysis of Strong Electromagnetic Pulse on the Electronic System of Weapon Equipment and the Technology of Electromagnetic Protection Materials

Cunrui Zhang*, Yujie Mi, Zhe Wang, Guien Zhang, Xiaogang Zhang, Yuexiang Wang

Department of Electromagnetic Protection Material, The 33rd Research Institute of China Electronics Technology Group Co., Ltd., Taiyuan Shanxi

Received: Apr. 26th, 2022; accepted: May 24th, 2022; published: May 31st, 2022

*通讯作者。

文章引用: 张存瑞, 米玉洁, 王喆, 张贵恩, 张小刚, 王月祥. 强电磁脉冲对武器装备电子系统毁伤效应分析及电磁防护材料技术[J]. 应用物理, 2022, 12(5): 304-310. DOI: 10.12677/app.2022.125035

Abstract

In this paper, the characteristics and damage mechanism of EMP weapon are introduced, and the protection technology of EMP weapon is analyzed. Strong electromagnetic pulse protection technology and new electromagnetic protection materials in the field of electromagnetic pulse protection technology is introduced. The development trend and future development direction of the technique are analyzed, which provides a certain research basis for strong electromagnetic pulse protection materials.

Keywords

Strong Electromagnetic Pulse, Electronic System, Damage Effect, Pulse Protection Technology, Electromagnetic Protection Materials

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着微电子技术的不断发展, 各类现有系统不断完善, 而多种新型系统不断出现, 在这种背景下系统中电子装备占比不断增加, 尤其是在一些高技术含量的系统中, 例如: 在航天飞机中电子设备所占比重大约为 60%, 在军事通信系统中电子设备占到了大约 90% [1]。在电子设备中对电磁脉冲(EMP)最灵敏、最易损的元器件就是微电子器件[2], 像微波 GaAsFET、低 NF 硅双极器件与部分 CMOS 器件的损伤能量阈值只有几个 μJ ($<10 \mu\text{J}$) [3], 它们非常易受电磁脉冲的影响而出现损伤或失效, 从而导致整个系统功能的失效。

在现代化立体式战场环境下, 陆、海、空、天、电磁五维一体联合作战体制是各大国都采取的战场作战方式[4], 其中针对敌方武器系统中的电子设备和器件进行直接攻击是一种比较直接的战争方式。同时在民用通信电子领域, 微波毫米波射频电路、微波毫米波行波管在设计、生产、分析测试、装配、发货等各个阶段都可能存在静电放电(ESD)对电子设备的损伤现象的存在。有报道称全世界 1994 年一年的电子设备由于静电放电导致的整机和微波毫米波电子元器件的经济损失已达四百亿美元之多[3] [4]。所以针对现代战争中军用电子装备的电磁防护进行讨论和研究有一定的现实意义。

2. 强电磁脉冲对电子系统的耦合毁伤研究

以超宽带微波源和高功率微波波源为发射源的多种非核强电磁脉冲源, 在现代天线技术和强电磁脉冲技术领域的发展背景之下应用而生。电磁脉冲武器也在这种背景下产生了。射频电磁波是强电磁脉冲武器辐射的电磁波, 这种电磁波最主要的类型是微波。为了满足现代武器装备系统的强杀伤功率, 使用脉冲电磁波是其主要手段。目前, 核电磁脉冲、电磁导弹及高功率微波武器是目前装备强电磁脉冲武器领域主要应用领域。

1) 核电磁脉冲

发生一次核爆炸大约就会有一百万分之一左右的能量转变为的电磁脉冲, 核电磁脉冲属于核武器发生爆炸时所产生的强脉冲波。核电磁脉冲具有特别宽的电磁波频谱, 该脉冲具有较高的电磁能量, 会对

武器系统以及内部的电子设备和元器件产生特别大的损毁。同时部分微波、无线电设备、电子电力等都会受到核电磁脉冲的损毁。

2) 电磁导弹的概念是吴大钧教授提出的，它是一种具有较慢衰减特性的脉冲电磁波，它的工作方式和传统工作方式不一样。在目标识别、电磁兼容、通信、遥感、雷达、定向能武器等领域，电磁导弹具有十分重要的意义。

3) 高功率微波武器可以把大功率微波变成强大的能量，该武器可以毁伤和迎击武器装备的电子元件和电子系统以及地方的军事目标。它是由高增益天线、大功率电磁波发生装置连带其他设备而组成的装备系统。

2.1. 电磁脉冲耦合途径的分析

如图 1 所示，电缆、电线的耦合与传导；天线之间的直接耦合；对金属或者导电壳体表面的孔、洞、缝的耦合以及金属或者导电框架、金属或者导电管道等的结构耦合；电磁脉冲对金属或者导电壳体层的穿透。所有的上述方式都可以归结为传导耦合和辐射耦合这两种类型的耦合方式。而电磁脉冲进入电磁系统是通过上述各种耦合途径实现的。

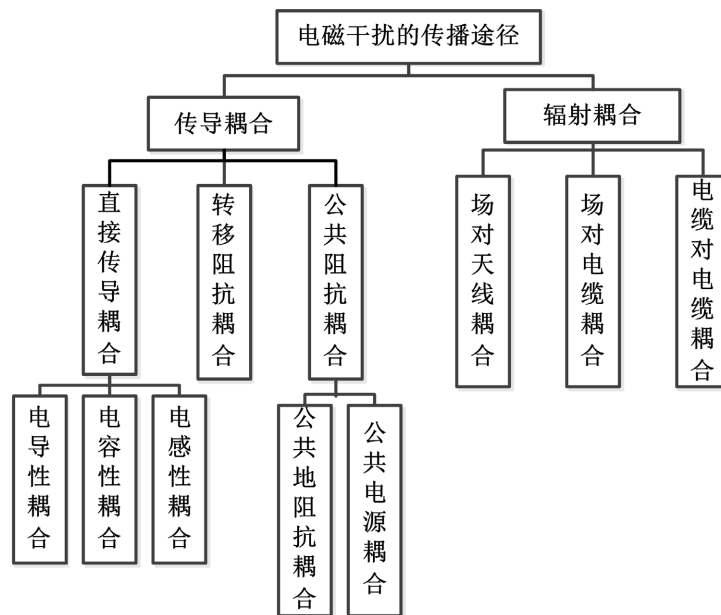


Figure 1. Classification of coupling pathways

图 1. 耦合途径的分类

脉冲后门耦合和脉冲前门耦合是电磁脉冲能力耦合的主要方式。通过目标的洞口或者缝隙耦合的方式进入系统是后门耦合的主要方式，后门耦合是毁伤电子设备中的微波毫米波电路以及微波毫米波元器件主要方式之一，后门耦合对电子设备以及元器件的危害较大。脉冲前门耦合式微波能量或电磁脉冲通过传输线或者天线等方式耦合到系统的发射和接收系统中。脉冲前门耦合主要是可以破坏电子设备或者元器件的前端。电磁脉冲前门耦合相对后门耦合来说防护难度低[5] [6]。

2.2. 电磁脉冲对电子系统设备以及元器件的毁伤效应分析

电磁脉冲损伤效应和电磁脉冲干扰的复杂程度随着近年来微波毫米波电子设备和元器件的小型化、

集成化程度的增加而日益提高。如果想使军用电子系统在现代化战场存在的强电磁脉冲复杂电磁环境的突防和生存能力,对脉冲环境下微波毫米波电子元器件和设备的效应进行研究是很有必要的[7] [8]。

瞬态干扰的故障不是永久性的。它是指当微波毫米波电子设备或者元器件的芯片电路输入端产生的电流或者电压高于一定的阈值的时候,产生的输入逻辑值由“0”变为“1”或者由“1”变为“0”的改变,这样就会产生误码。这种改变在电流电压消失后可以发生复原或者复位,并未达到损毁芯片或者电路的程度。这种属于瞬态干扰故障,属于暂时性的。干扰阈值是瞬态干扰的起始值[9] [10]。

不可逆的损伤叫做永久性失效。当大功率微波毫米波电子设备与电子系统在强电磁脉冲环境下高速运行的时候,电磁脉冲的能力对电子设备和元器件的耦合能量超过电压或者电流的阈值的时候,电子系统就可能难以正常恢复或者运行,更有甚者会严重毁伤电子设备的元器件或者组件。当造成电子设备的永久性毁伤的时候,电子系统便会停止工作。损伤阈值是指开始出现了永久损伤的阈值[11]。强电磁脉冲对微波毫米波电子设备和系统的永久性毁伤包括以下几方面的内容:

1) 强电磁脉冲会造成系统通信设备的损毁。通信的雷达系统指挥官,当通信发生故障或者中断的时候,雷达系统就相当于一个瞎子一样失去了核心。强电磁脉冲可以通过通信线路进入雷达系统,干扰通信的环境和对通信源头进行破坏,这样会导致通信系统产生系统性的损毁。通信设备的元器件烧毁或者失效的功率范围为 $0.01\sim 1\text{ W/cm}^2$ 。当微波的功率达到 $0.01\sim 1\ \mu\text{W/cm}^2$ 的时候,设备就不能正常工作。

2) 强电磁脉冲会损毁情报自动化设备。现代战场下的雷达情报系统以及单部雷达的计算机数量都与日俱增。 5 V 是微处理器的损毁电压阈值, 7 V 是高速随机存储器的损毁电压阈值, $7\sim 15\text{ V}$ 是半导体的损毁电压阈值。由于计算机的击穿电压最高到 $2\sim 3\text{ kV}$,但是强电磁脉冲的电压达到几百 kV ,很容易将计算机损毁。

3) 对处于电磁脉冲环境下的人员造成伤害。人体的健康会受到电磁脉冲的影响。甲状腺的功能会受到电磁脉冲的干扰,人体内部的新陈代谢也会受到影响。作战人员的记忆力会下降。反应速度会降低,动作也会变得笨拙。

综上所述,强电磁脉冲可以通过传导耦合和辐射耦合的方法进入电子设备和元器件内部,并可以破坏电子设备或者元器件的前端。强电磁脉冲对电子设备和电子元器件的毁伤主要有瞬态干扰和不可逆毁伤,其中瞬态干扰主要是导致电子设备和元器件发生误操作等错误,导致系统指令紊乱,这种干扰是暂时的可恢复的,而不可逆干扰是指永久性失效,会导致电子设备系统停止工作或者系统瘫痪。

3. 强电磁脉冲环境下的电子设备防护技术

结合强电磁脉冲对电子设备以及系统的各种耦合效应,可以针对各个耦合方式展开吸收、隔离、反射等方式,将其耦合能量缩减到敏感源能够耐受的阈值,就可以对电子设备进行电磁脉冲防护。接地、滤波、屏蔽是强电磁脉冲的主要防护手段。

3.1. 强电磁脉冲的技术防护措施

1) 电子设备接地。接地是电子系统抑制传导耦合这种方式比较好的措施,同时接地也可以解决电子设备的 EMC 问题。安全接地是接地的一种方式,安全接地包括人身安全和设备安全。干扰控制接地时接地的另一种方式,这种方式也叫信号接地。在工程实践中,工作接地和保护接地以及防雷接地这几个组成共同接地的系统,并不会单独去做防电磁脉冲接地方式。这时候的接地电阻的最小值应该不大于 $4\ \Omega$ 。 $1\ \Omega$ 是非电力系统的最小电阻值。 $4\ \Omega$ 是非电力设备的最小电阻值。 $10\ \Omega$ 是有电磁脉冲防护要求的系统的最大电阻值。

2) 滤波

滤波的防护方式是电子设备以及系统的一种重要电磁脉冲防护的重要方法，也是抑制系统传导干扰的重要手段。针对能量比较低的干扰源，由于其干扰频谱比较宽，可以使用加装的方式限制频带同时抑制无意干扰。

当高功率电磁脉冲弹或者高功率微波攻击电子设备时，滤波的防护方式基本可以保证系统恢复工作或者保证系统不被破坏。通过对接收信号的匹配滤波，消减耦合的天线耦合能量，对电子设备进行防护。

对于电缆耦合的强电磁脉冲，可以采用低通滤波器也就是电源滤波器的方式进行滤波。采用带通滤波器的方式对较长的信号传输线进行滤波防护。

3) 屏蔽防护

将电气设备系统以及电子系统等敏感部位在空间上进行电磁脉冲辐射隔离防护的方式就是屏蔽措施，通过屏蔽防护可以减少脉冲对电子设备及系统的耦合效应。磁场屏蔽和电场屏蔽室屏蔽的两种主要方式。电场屏蔽通常是使用电阻较低的导电材料作屏蔽体，并将屏蔽体实现良好接地，这样可以防止电场耦合，同时将电场终止在屏蔽体表面。电场屏蔽必须具备的两个实现条件是良好的接地和完全的屏蔽体。

场屏蔽的机理与磁场频率是磁场屏蔽两个重要因素。由于高频是电磁脉冲武器的辐射脉冲防护的关键，因而对高频磁场屏蔽研究非常重要。利用金属屏蔽体上感生的涡流产生反磁场起排斥原磁场的作用是高频磁场的屏蔽主要方式。

3.2. 强电磁脉冲的战术防护措施

1) 从强电磁脉冲的源头上出手。一是摧毁敌人的脉冲武器。在作战的过程中，在保证我军阵地的反击的情况下，对于敌方阵地的机场、基地、舰艇等目标进行摧毁打击，从源头上解决强电磁脉冲。二是利用地空导弹部队对我方雷达进行火力掩护，同时可以拦截对方的弹道导弹。三是利用预警机等武器系统做出前战，以破坏或者降低脉冲武器的作战效能。

2) 对强电磁脉冲武器实施主动电子干扰。导弹是依靠 GPS 来修正累计偏差的，如果对其导弹的导航接收机进行电磁干扰，其惯性导航系统的精度就会受到严重影响，从而导致强电磁脉冲武器的攻击目标发生偏离，提高了我军装备在战场上的生存能力。

3) 对地方作战系统实现欺骗和伪装手段。敌方作战必须有获取我方阵地目标的可靠信息，而雷达探测是目前主要的探测方式，当我军装备采用示假的方式，采用真假目标伪装的方式，就极大的降低了我军装备受敌军强电磁脉冲武器打击的概率。

4) 快速机动的作战反应。由于电磁脉冲武器的作战距离有限，当距离大于一定值的时候，电磁脉冲的能量会较低，一般几十公里。同时导弹发射准备时间长，这样我军就可以利用时间差对敌人的战术意图进行判断，并采取相应的作战对策。

综上所述，强电磁脉冲的防护技术主要包括技术防护措施和战术防护措施。其中技术防护措施主要有：电子设备接地、滤波、屏蔽防护这三种防护措施，而战术防护措施主要有：从强电磁脉冲的源头上出手，摧毁敌人的脉冲武器、利用地空导弹部队对我方雷达进行火力掩护、利用预警机等武器系统做出前战；对强电磁脉冲武器实施主动电子干扰；对地方作战系统实现欺骗和伪装手段；快速机动的作战反应。在不同背景下，可以采用多种防护方式结合使用，已很好的保护电子设备和元器件[12]-[18]。

4. 电磁脉冲防护材料简介

尽管电磁脉冲防护方法会降低武器装备损伤的概率，但是电子装备或者系统的连接处、洞、孔等部位是不可避免的。在这种情况下传统的防护手段难以解决问题。下边对电磁脉冲防护材料进行介绍。

4.1. 等离子体防护材料

等离子体不同于一般的介质或导体，等离子体与大功率微波相互作用时，高功率微波会被等离子体反射，微波能量会被反射出去，同时等离子体也可以将高功率微波吸收，这样可以使得进入到电子设备的微波功率值低于设备的破坏阈值。同时等离子体也使电磁脉冲微波的传播方向发生变化，以保护电子设备。等离子体是一种新型的电磁脉冲防护材料。

4.2. 新型吸波防护材料

吸波材料是一类可以将电磁波能量转化为其他形式能量的材料，该类材料可以提高装备的电磁脉冲防护效能。介电损耗型吸波材料和磁滞损耗型吸波材料是吸波材料的两种不同机理的吸收材料。碳基材料属于电损耗型吸波材料，羰基金属粉、铁氧体属于磁损耗型吸波材料。通过对吸波材料的介质参数和配比以及对吸波材料阻抗进行设计，可以实现对电磁波的吸收，以降低电磁脉冲对装备的损伤。

4.3. 特种集成芯片

具有特殊功能的集成芯片采用先进的制备工艺采用各种高品质材料制备而成，该类材料可以用于电磁脉冲的防护，以提高电子系统的抗脉冲能力，目前国外研制的新型特种芯片与普通芯片相比，其抗脉冲能力可以提高八倍到十倍左右。

4.4. 光导纤维

由于光导纤维不会与电磁脉冲产生耦合作用，而且仅对光信号进行传导，因此采用光导纤维完成各种电子设备之间的信号传输，电磁脉冲辐射干扰能够得到有效防止。光导纤维电缆是由一捆光导纤维复合而成，简称为光缆。光导纤维是一种传输光束的细微而柔韧的媒质。光缆具有衰减较小、电磁绝缘性能好、频带较宽等优点，是数据传输中最有效的一种传输介质，因此可以在电磁脉冲武器的防护领域得到广泛的应用。

5. 结语

强电磁脉冲环境是未来武器面对的主要战场，未来装备要想在现代战场立于不败之地，必须对电子设备和电子元器件进行强电磁脉冲防护，否则在现代战争发现及摧毁的背景下，军队的指挥控制能力就会丧失，电磁脉冲的未来发展趋势和方向主要有：

1) 不断加强对军民用电设备在电磁环境下的环境效应以及影响机理研究，让我军设备的综合防护技术得以提升。针对强电磁脉冲在电子设备以及元器件传递的途径以及在设备内耦合进行研究，确定系统在电磁场中的作用规律和损伤机理，结合装备和系统的重要性，采用拓扑考虑中的整体防护、分布防护，从系统、分系统、器件、电路不同的层次分别采取全方位综合防护技术成为发展趋势。

2) 建立基于系统工程理论的多易损对象、多损伤机理的系统防护方法，建立多源、大动态范围的电磁环境防护仿真分析模型。建立射频模块的非线性大信号等效电路模型，开展不同电场强度的数值仿真试验、半实物/实物电磁环境效应试验，从元件布局、材料选型、工艺改进多方面增强射频电路的抗毁伤性能。基于空间电磁场传播理论、场路耦合理论、孔缝耦合理论以及空间电磁场传播理论，重点研究电子设备的电磁防护仿真分析方法，编写强电磁环境防护能力电磁仿真预测分析软件，构建强电磁环境防护能力电磁仿真平台，具备分析计算电子设备电磁能量分布及易损对象的防护效果的能力。

3) 探索强电磁防护新原理、新概念、新方法。重点探索电子元器件的电磁脉冲防护新技术、新工艺，通过应用新型半导体材料、综合集成多模式半导体防护技术，可以为电磁防护设计提供理论。

参考文献

- [1] 刘红兵, 王长河, 赵彤, 等. ESD 与 EMP 对微波晶体管损伤机理研究[J]. 半导体技术, 2008, 33(8): 705-710.
- [2] 乔登江, 主编. 电子元器件电磁脉冲效应手册[M]. 西安: 西北核技术研究所, 1992.
- [3] Vinson, J.E. and Liou, J.J. (1998) Electrostatic Discharge in Semiconductor Devices Overview. *Proceedings of the IEEE*, **86**, 399-418. <https://doi.org/10.1109/5.659493>
- [4] 刘尚合, 武占成, 朱长青. 静电放电及危害防护[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2004.
- [5] 周壁华, 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.
- [6] 谢彦召, 王赞基, 王群书, 孙蓓云, 郭晓强, 赵宇明. 基于频域幅度谱数据重建电磁脉冲时域波形[J]. 强激光与粒子束, 2004, 16(3): 320-324.
- [7] 潘峰, 余同彬, 李炎新. 电磁脉冲对微机接口电路的耦合实验研究[J]. 安全与电磁兼容, 2001(3): 12-16.
- [8] 陈修桥, 胡以华, 张建华, 黄友锐, 何丽. 计算机机箱的电磁脉冲耦合模拟仿真[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(12): 2786-2788.
- [9] 臧扬, 刘文冰, 魏明, 路潇. FPGA 静电电磁脉冲辐照效应试验研究[J]. 军械工程学院学报, 2005, 17(5): 22-28.
- [10] 张力群, 石立华, 谭坚文. 电磁脉冲对微控制器干扰特性的实验研究[J]. 安全与电磁兼容, 2005(1): 33-35.
- [11] 侯民胜, 许明辉. 核电磁脉冲对武器装备电子系统的辐照效应实验[J]. 航天电子对抗, 2003(6):46-48.
- [12] 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.
- [13] 宁成. 新型人工周期结构仿真和设计方法及其在强电磁防护中的应用研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- [14] Li, Y. and Tan, Z.-L. (2018) Stimulation and Design of RF Front-End Electromagnetic Protection Module Based on HF Communication. 2018 *International Conference on Electronics Technology*, Chengdu, 23-27 May 2018 142-146. <https://doi.org/10.1109/ELTECH.2018.8401444>
- [15] Xu, W.R. and Sonkusale, S. (2013) Microwave Diode Switchable Meta-Material Reflector/Absorber. *Applied Physics Letters*, **103**, Article ID: 031902. <https://doi.org/10.1063/1.4813750>
- [16] Smedes, T. (2009) ESD Testing of Devices, IC and Systems. *Microelectronics Reliability*, **49**, 941-945. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2009.07.013>
- [17] Rui, X., Jin, H., Deng, W. (2003) The Study of Spectrum Stimulation in the Power Electron IC Device Based on Wavelet Analysis. Dongnan University Press, Nanjing, 182-185.
- [18] Shi, L.H., Li, Z.D., Li, Y.X., *et al.* (2003) Estimation of the EMP Response of a System from Its Continuous Wave Measurement Results. Dongnan University Press, Nanjing, 340-343.