

引用格式: 刘培国, 刘晨曦, 谭剑锋, 等. 强电磁防护技术研究进展[J]. 中国舰船研究, 2015, 10(2): 2-6.

LIU Peiguo, LIU Chenxi, TAN Jianfeng, et al. Analysis of the research development on HPM/EMP protection[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2015, 10(2): 2-6.

## 强电磁防护技术研究进展

刘培国, 刘晨曦, 谭剑锋, 董雁飞, 易波

国防科学技术大学 电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073

**摘要:** 高功率微波武器是现代战场上极具杀伤性的攻击手段。针对现代武器装备的强电磁防护问题, 通过介绍高功率微波武器及防护研究发展进程, 结合传统电磁防护方法, 分析电磁自适应防护、微波加固和硬件演化等前沿技术手段, 从电路防护和空间防护的角度出发, 论述射频电磁防护单元、皮秒级电磁脉冲抑制器件、频率选择表面等强电磁防护器件和装置的研究成果以及强电磁防护的新材料, 并从系统综合防护、设备潜在失效性、强电磁防护标准3个方面对强电磁防护技术的发展给出相应的建议。

**关键词:** 高功率微波; 防护; 器件; 装置; 材料; 综述

中图分类号: U665.26

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1673-3185.2015.02.002

### Analysis of the research development on HPM/EMP protection

LIU Peiguo, LIU Chenxi, TAN Jianfeng, DONG Yanfei, YI Bo

College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology,  
Changsha 410073, China

**Abstract:** High power microwave (HPM) and electromagnetic pulse (EMP) weapons both are highly lethal weapons in modern warfare. In order to protect modern weaponry against HPM/EMP attack, frontier technologies and methods such as adaptive electromagnetic protection, microwave reinforcement, and evolvable hardware are reviewed in this paper, where conventional protection methods are first described based on the development process of HPM/EMP weaponry and the protection research. Research achievements such as radio frequency electromagnetic protection units, picosecond EMP suppression device, and frequency selective surface are summarized, with new protection materials being presented in the end. Also, suggestions are given for the future development direction of HPM/EMP protection technology from the perspective of systematic protection, potential loss of effectiveness of equipment, as well as the standard on HPM/EMP protection.

**Key words:** high power microwave (HPM); protection; device; equipment; material; review

## 0 引言

随着科学技术的不断进步, 电子信息系统的研究朝着综合化、一体化的方向不断发展, 武器装备的性能得到极大提升。电子信息系统在不断智能化、小型化和集成化的同时, 也增加了其对电磁

干扰的敏感性和易损性。高功率微波 (High Power Microwave, HPM) 武器、电磁脉冲武器等新概念强电磁武器将逐步投入使用。强电磁武器具有功率高、频谱宽、杀伤力大的特点, 其通过前门耦合与后门耦合进入武器设备的电子系统, 干扰和破坏设备的正常工作。因此, 电磁脉冲 (electromagnetic

收稿日期: 2014-09-30

网络出版时间: 2015-3-30 15:15:40

基金项目: 国家级重大基础研究项目

作者简介: 刘培国 (通信作者), 男, 1969年生, 博士, 教授。研究方向: 电磁兼容与频谱管理, 电磁场与微波技术, 生物电磁学。

E-mail: pg731@126.com

刘晨曦, 男, 1990年生, 硕士生。研究方向: 电磁兼容与防护, 电磁场与微波技术。E-mail: dierzhanqingchun@163.com

pulse, EMP)武器的出现,对现代军事行动中越来越依赖于电子设备的信息化武器装备构成了巨大威胁。强电磁防护技术由传统的电磁兼容性技术发展而来。由于世界各军事强国对强电磁防护的高度重视,针对强电磁武器的防护技术近几年发展迅猛,各种手段与方法不断革新,新的防护装置与器件也不断涌现<sup>[1-3]</sup>。

## 1 强电磁武器与防护技术发展进程

1990年,法国马特拉公司研制了一种以制导炸弹为载体的弹载电磁脉冲武器。1999年,美国使用尚处于试验阶段的电磁脉冲武器对南联盟实施了轰炸,使南联盟部分地区的通信设施瘫痪超过3 h。进入21世纪后,强电磁武器的发展日新月异。2001年,俄罗斯在利马举行的海事与航空展上展出了一种名为Ranets-E的高功率微波武器系统,其利用可变射频防御系统对敌方飞机和制导武器系统实施摧毁或破坏。Ranets-E采用X波段、500 MW的电磁脉冲发生源,能产生重复频率500 Hz、脉宽10~20 ns的强电磁脉冲。美国在2003年的伊拉克战争中使用了携带电磁脉冲弹的“战斧”式巡航导弹攻击伊拉克的通信网,产生了类似于高空核电磁脉冲的强电磁辐射,直接摧毁或损伤多种敏感电子系统<sup>[4-5]</sup>。2012年10月16日,英国《每日邮报》报道,美国波音公司与空军研究实验室联合测试了无人机投放的电磁脉冲弹,项目代号为“反电子设备高功率微波先进导弹项目”。试验中,导弹在犹他州试验场低空飞行,向7个目标辐照强电磁脉冲,彻底瘫痪了所有试验计算机。《美国空军2025年战略规划》中提出发展空基电磁脉冲武器,用低轨道卫星组网把强电磁脉冲辐射到地面与空中的打击目标。

现代强电磁武器技术已日益走向成熟,具有单一甚至组合脉冲波形多变、辐射场极高、频谱极宽等特征。预计到2020年左右,强电磁武器将能批量装备部队,大规模应用于局部战争中。

近20年来,美国、俄罗斯等国在研究和发**展强电磁武器的同时,也高度重视武器装备强电磁防护加固技术的研究。早在1979年,在美国总统卡特发布的第59号指令中就强调了核电磁脉冲的严重威胁,要求国防部每开发一种武器都必须考虑其对电磁脉冲的防护。1986年,美军完成了电子元器件易损性与加固测试。进入20世纪90年代后,美军已把各种电磁危害源的作用归纳为武器系统在现代战争中遇到的电磁环境效应问题,并于1993年完成了“强电磁干扰和高功率微**

波辐射下集成电路的防护方法”研究,目前,美军已将对电磁脉冲的防护能力列入其军用标准和国家标准中。俄罗斯也于1993年完成了电磁脉冲对微电子电路的效应实验和防护技术研究,其武器系统一般都有电磁兼容性、抗静电和抗电磁脉冲的技术指标。

总体上,随着各种强电磁武器的飞速发展,实现电磁攻击的手段不断增加,强电磁防护方法的研究也在不断推进。本文将对当前强电磁防护技术、器件与装置以及新材料的进展情况予以详细的阐述,并对未来防护技术的发展方向进行展望。

## 2 防护技术

强电磁防护技术由电磁兼容手段发展而来,传统的防护方法已日趋成熟,主要有屏蔽、限幅、接地及滤波等,下面介绍强电磁防护技术研究的发展前沿与研究热点。

### 1) 电磁自适应防护技术。

在电磁故障诊断的基础上进行武器装备电磁自适应防护是强电磁防护的重要发展方向。除采用新材料、新结构对系统的复杂电磁环境进行调节和控制外,利用冗余、容错、标志和数字滤波等软件设计技术以及拦截、屏蔽、均压、分流、接地与滤波等硬件防护措施,在武器装备系统中预制电磁兼容与强电磁防护的软、硬件自适应手段,也能降低系统间的电磁干扰,增强抵抗高功率EMP的攻击能力。

### 2) 微波固态加固技术。

微波固态加固主要指的是研制具有更强抗烧毁能力的接收放大器件,尤其是增强天线的抗烧毁能力。实现HPM加固包括低损耗及耐高温材料的选择、天线罩到天线的距离的增加,以及罩内能流密度降低等方法,以使电子系统的薄弱环节免受HPM损伤。依据EMP的耦合途径,分为前门加固和后门加固。前门加固主要是限制天线或传感器的耦合,降低入口有效面积;限制耦合能量传播到系统内部,减少入口和系统内部敏感组件间的耦合。后门加固最有效的方法是屏蔽,包括系统屏蔽、设备和组件屏蔽、电缆与接插件屏蔽,以及终端保护<sup>[6]</sup>。这2种加固选择可以通过采用各种形式的滤波和级联限幅实现。

### 3) 演化硬件技术。

演化硬件是指在硬件电路设计中引入演化计算,在可编程逻辑器件上通过对基本电路元器件进行演化而自动生成人工不可能设计出的电路结构。该概念自从1992年提出以来,便在国际上掀

起了研究热潮,受到各国政府和众多学科科学家们的重视。1995年10月,在瑞士洛桑召开了第一次演化硬件国际研讨会,之后,每年都召开一次。日本、美国、英国和瑞士等成立了相应的研究中心,主要研究:基于演化硬件的自动化电子设计方法与技术,即离线演化或外演化技术;演化硬件的自修复和自主配置技术,即在线演化或内演化技术。演化硬件技术将成为2020年后硬件设计的基本技术之一。演化硬件具有自我重配置和可进化的功能,为强电磁防护开辟了新的研究领域。

### 3 防护器件与装置

#### 1) 射频前端保护单元。

随着高功率和超宽带(ultra-wideband, UWB)电磁脉冲等新概念武器的不断涌现,未来战争的初期将以破坏敌方指控和通信探测系统为主。一旦战争爆发,信息系统将成为强电磁武器攻击的主要目标。强电磁武器以其瞬间释放的高强度、超宽频谱的电磁脉冲能量破坏敏感电子设备和系统,成为信息系统的头号杀手。高功率电磁脉冲耦合进入系统之后,将直接导致内部射频微波前端模块中半导体器件和电路的电击穿、热熔断或热应力破坏<sup>[7]</sup>。

因此,需要采用脉冲半导体、气体等离子或铁氧体限幅器件,或它们的组合来构成防护电路,提高开关保护电路的瞬态特性,确保在强电磁脉冲冲击时能及时响应,阻止电磁脉冲进入接收机前端,并切断供电电源,减少元器件受到损伤的可能性。

#### 2) 皮秒(ps)级电磁脉冲抑制器件。

目前,超宽带电磁脉冲上升沿时间已经达到亚纳秒级,窄带源输出峰值电平超过6 MV,未来的强电磁武器上升沿将更小、功率将更大,但是目前电磁危害防护领域使用的防护器件不仅响应时间较长(最快的瞬态抑制二极管响应时间为纳秒级),对上升时间在亚纳秒量级的快上升沿电磁脉冲则无防护作用,而且能够抑制的功率也十分有限。美军标 MIL-STD-461F<sup>[8]</sup>系列对瞬态脉冲的抑制能力要求更高,为适应强电磁防护需要,必须研制快速反应、大功率脉冲吸收的新型皮秒级抑制器件。

#### 3) 频率选择表面。

频率选择表面(Frequency Selective Surface, FSS)是一种微波周期结构,应用十分广泛<sup>[9]</sup>。尽管科学家们认识和利用FSS已经有很长的历史,但由于物理模型准确建模困难以及分析十分复杂,近几十年才开始实现对FSS的系统研究和严格的数值分析。例如,FSS常用作发射面天线的副发射器,以提高对发射面天线的利用效率。在微波领域,则主要通过采用FSS设计雷达天线罩,以降低天线系统的雷达散射截面(RCS)。

2012年,国内设计了“防潮砖式”<sup>[10]</sup>和环缝隙腔两种典型的三维频率选择结构(图1),仿真分析了频率选择特性与结构几何参数的关系。结果表明,“防潮砖式”结构具有宽通带和多谐振的特性,而环缝隙式结构的通带带宽几乎达到了30%,且其频选特性高度类似于椭圆滤波器的特性。所提出的概念和设计对频率选择结构设计具有丰富和深远的参考价值。利用天线罩上的FSS对强电磁脉冲进行防护,工作频带内的正常信号可正常收发,并能反射频带外的高功率HPM。

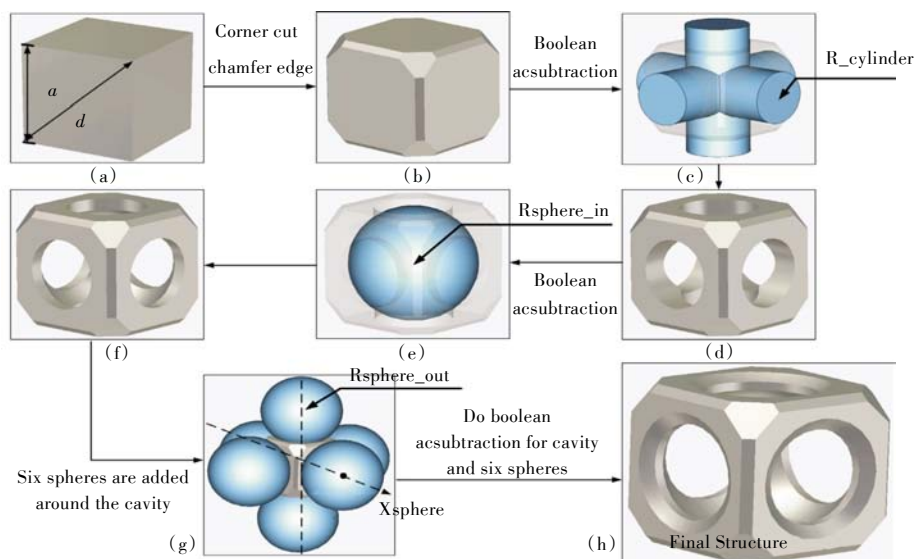


图1 “防潮砖式”三维频率选择结构及其实现<sup>[10]</sup>

Fig.1 Schematic drawing constructing the “moistureproof brick” 3D frequency selective structure<sup>[10]</sup>

#### 4) 嵌入式电源与滤波器。

美国帕沃思公司研制出了通流特性和抗毁能力更强的嵌入式电源。电源板内置有符合美军标的功率适配器、电磁干扰滤波器和瞬态防护装置,能够满足 1275 标准规定的军品级防浪涌和过压保护要求。其直流输入范围为 18~36 V,无需额外调节功率或电磁干扰滤波器,且尺寸小,可抗高冲击和振动,适用于各种军用地面车辆和军用飞机。

电磁干扰/射频干扰滤波器生产商费尔一卷材公司宣布推出了其 1 200 A 的三相电磁脉冲/高空电磁脉冲滤波器,可抵挡 MIL-STD-188-125-1<sup>[11]</sup> 试验中使用的电磁脉冲。该高空电磁脉冲滤波器具备 277/480 V 交流额定电压,工作频率为 50~60 Hz,电介质耐压值为 2 500 V DC。新型过滤器可承受 140% 的过载,过载时间可达 15 min, 14 kHz~1 GHz 的插入损耗大于 100 dB。

#### 5) 能量选择表面。

强电磁辐照下电子信息系统的空间防护需要兼顾正常电磁信号的有效接收和发送,并能抵御强电磁脉冲攻击。能量选择表面<sup>[12]</sup>利用半导体器件的压控导电特性设计出具有能量低通特性的强电磁防护器件,具有电磁环境自适应特性。图 2 给出了一种典型的能量选择表面结构,该结构由离散的“十”字金属单元和二极管元件组成,可防护任意极化的强电磁脉冲。其中: $d_1$ 表示二极管的长度; $d_2$ 表示“十”字金属单元的长度; $w_0$ 表示相邻“十”字金属单元的间距。当强电磁脉冲作用于该表面时,若空间场强高于安全阈值,则相邻“十”字金属单元之间会感应出高电压,二极管导通,形成导电网格,此时,防护表面具有金属网的屏蔽特性;当空间场强降低至安全阈值以下时,相邻“十”字金属单元之间感应高电压低于二极管导通阈值,二极管截止,导电网格彼此断开,此时,该表面具有透波特性。

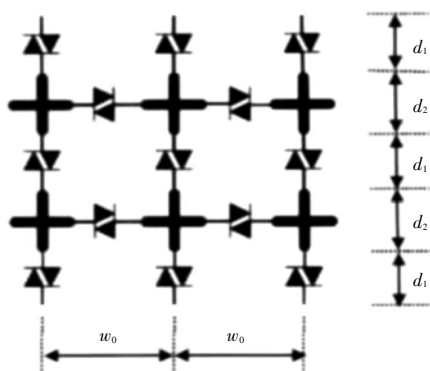


图2 能量选择表面结构图<sup>[12]</sup>

Fig.2 The structure of energy selective surface<sup>[12]</sup>

## 4 新材料

### 1) 纳米材料。

纳米材料指的是材料组分的特征尺寸处于纳米量级的材料,独特的结构使其具有量子尺寸效应、宏观量子隧道效应、小尺寸和界面效应,从而呈现出奇特的电、磁、光、热以及化学等特性。目前,被称作“超黑色”纳米材料对电磁波的吸收率高达 99%。美国麻省理工学院研制的纳米复合材料在 8~18 GHz 范围内对电磁波的屏蔽效能与铜相当。2012 年,美国国防部和航空航天局与纳米技术公司签约,大规模生产碳纳米管薄片、导线,以提高装备的防静电放电和电磁干扰屏蔽性能。同时,业界还开展了大量应用性研究,如具有高屏蔽性能的环氧基多壁碳纳米管复合物在航空中的应用,工程碳纳米管复合材料以及纳米结构复合材料多层屏蔽体的优化方案等,均取得了一定进展。

### 2) 石墨烯。

研究者在石墨烯材料方面进行了研究,通过在石墨烯中添加不同的物质,可以让石墨烯呈现出不同的屏蔽特性,由于石墨烯具有出色的电子迁移率,再加上其很高的饱和速率、热导率和微米级弹道式输运,使其所制备的材料具有较好的屏蔽性能。美国 IBM 公司已研制出首块基于石墨烯的集成电路,运行频率最高达 10 GHz。2012 年,该公司研究中心又利用几层石墨烯制成了新的防护材料,可对兆赫兹频率的辐射和微波的电磁辐射进行有效防护,显著降低了敏感电子设备中的外部电磁干扰。此举推进了石墨烯芯片在强电磁防护领域的实用化。

### 3) 光导纤维。

光导纤维能够传导光信号,却不会耦合电磁脉冲,因此采用光导纤维能够在各种电子设备之间传输信号的同时,有效防止电磁脉冲辐射的干扰<sup>[13]</sup>。光导纤维是一种传输光束的细微而柔韧的媒质,光导纤维电缆(光缆)具有频带较宽、电磁绝缘性能好、衰减较小、中继器的间隔较大等优点,因此可以广泛应用于对强电磁武器的防护。

### 4) 等离子体。

等离子体与高功率微波相互作用时,具有与一般导体或介质完全不同的特性。等离子体能够在一定条件下反射高功率微波,而在一定条件下又能吸收高功率微波,使透射进入电子设备的微波功率低于干扰或破坏阈值。等离子还可以在低功率微波的入射角度发生变化时改变高功率微

波的传播方向,避免电子设备受到损伤<sup>[14]</sup>。因此,等离子体成为强电磁防护的一种新型材料。

## 5 结 语

随着强电磁武器不断实现超大功率化和超宽带化,其威力和破坏力迫使军事强国积极开展电子信息设备对强电磁脉冲的适应性及其防护加固技术的研究。通过研究电子设备信号线路、电源线路和接地网络等所有可能途径的电磁易损性,确定电磁场对武器平台的作用规律,结合武器装备的重要性或遭受强电磁攻击后的生存需求,从元器件、电路到系统的全方位综合防护技术与手段成为强电磁防护的发展趋势。

同时,在强电磁防护方面还需要关注强电磁武器对电子系统造成的潜在性失效。潜在性失效具有不可预测性,同时又是电磁脉冲效应的重要形式,必须从损伤机理出发,从微观角度深入研究潜在性失效的形成过程,并提出检测方法与防护原则。

从总体设计的角度上来说,强电磁防护手段与方法在不断进步与多样化的同时,必须制定适当的标准和防护规范,将强电磁防护技术指标纳入武器电子信息系统的考核体系,按照标准、规范进行设计、验收和维护。

### 参考文献:

- [1] BAUM C E. Reminiscences of high-power electromagnetic[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2007, 49(2): 211-218.
- [2] 张春侠,周春梅,林金永.电磁脉冲对电子设备的耦合效应试验研究[J].航天电子对抗, 2010, 28(5): 89-92.  
ZHANG Chunxia, ZHOU Chunmei, LIN Jinyong. Experimental study of EMP coupling for electronic equipment[J]. Aerospace Control, 2010, 28(5): 89-92.
- [3] KOCH A. Directed energy weapons emerge from secrecy[J]. Jane's Defense Weekly, 2006, 43(18): 7.
- [4] 孟范江.电磁脉冲武器发展和应用[J].光机电信息, 2010, 27(9): 81-84.  
MENG Fanjiang. Development and application of microwave pulse weapon[J]. OME Information, 2010, 27(9): 81-84.
- [5] 刘尚合.武器装备的电磁环境效应及其发展趋势[J].装备指挥技术学院学报 2005, 16(1): 1-5.

- LIU Shanghe. Effect of electromagnetic environment to weaponry and its trend of development [J]. Journal of the Academy of Equipment Command and Technology, 2005, 16(1): 1-5.
- [6] 丁茜,韩福丽.高功率微波武器防护[J].数字技术与应用, 2011, 1(1): 79.
- [7] 肖金石,刘文化,张世英,等.强电磁脉冲对导弹的电磁毁伤性分析[J].火力与指挥控制, 2010, 35(8): 63-65, 74.  
XIAO Jinshi, LIU Wenhua, ZHANG Shiyong, et al. Electromagnetic damage analysis of high power electromagnetic pulse attacking missiles [J]. Fire Control and Command Control, 2010, 35(8): 63-65, 74.
- [8] Department of Defense. MIL-STD-461F Electromagnetic environmental effects requirements for systems [S]. U.S.A.: Department of Defense Interface Standard, 2007.
- [9] 鲁戈舞,张剑,杨洁颖,等.频率选择表面天线罩研究现状与发展趋势[J].物理学报, 2013, 60(19): 9-18.  
LU Gewu, ZHANG Jian, YANG Jieying, et al. Status and development of frequency selective surface radome [J]. Acta Physica Sinica, 2013, 60(19): 9-18.
- [10] LU Z H, LIU P G, HUANG X J. A novel three-dimensional frequency selective structure[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2012, 11: 588-591.
- [11] Department of Defense. MIL-STD-188-125-1 High-altitude EMP protection for fixed ground-based facilities [S]. U.S.A.: Department of Defense Interface Standard, 2005.
- [12] 杨成,刘培国,刘继斌,等.能量选择表面的瞬态响应[J].强激光与粒子束, 2013, 25(4): 1045-1049.  
YANG Cheng, LIU Peiguo, LIU Jibin, et al. Transient response of energy selective surface [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(4): 1045-1049.
- [13] 乔晓强,柳永祥,梁涛.新材料在电磁脉冲防护中的应用[J].河北科技大学学报, 2011, 38(12): 184-186.  
QIAO Xiaoqiang, LIU Yongxiang, LIANG Tao. Application of the new material on high power electromagnetic pulse protection [J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2011, 38(12): 184-186.
- [14] BALEVICIUS S, ZURAUŠKIENE N, STANKEVIC V, et al. Fast protector against EMP using thin epitaxial and polycrystalline manganite films [J]. Electron Device Letters, 2011, 32(4): 551-553.

[责任编辑:喻菁]