

doi: 10.7690/bgzdh.2021.10.009

## 高空电磁脉冲对武器装备的影响及其防护综述

陈书恒, 朱倪瑶

(中国人民解放军 92728 部队, 上海 200436)

**摘要:** 为在日益复杂的电磁环境中保持战斗力, 开展武器装备的高空电磁脉冲 (high-altitude electromagnetic pulse, HEMP) 防护研究。针对高空电磁脉冲辐射范围广、强度大、频带宽等特点对武器装备系统构成的威胁, 对高空电磁脉冲及其武器装备电子信息系统损伤的特点进行分析, 并给出高空电磁脉冲的各类防护建议及手段。该研究可提高我军武器装备在未来战场上的可靠性。

**关键词:** 武器装备; 电子信息系统; 高空电磁脉冲

**中图分类号:** TJ0 **文献标志码:** A

## Survey of HEMP Influence and Protection on Weaponry and Equipment

Chen Shuheng, Zhu Ni Yao

(No. 92728 Unit of PLA, Shanghai 200436, China)

**Abstract:** In order to maintain the combat effectiveness of the military weaponry and equipment in increasingly complex electromagnetic environment, the protective technologies of high-altitude electromagnetic pulse (HEMP) need to be researched. HEMP has the characteristics of wide radiation range, high intensity and broad frequency band, and has always been a threat to military weaponry and equipment. The characteristics of HEMP and its influence on electronic information system are analyzed, then some suggestions and strategies for HEMP protection are provided. The research could improve the reliability of our military weaponry and equipment in future battlefield.

**Keywords:** weaponry and equipment; electronic information system; HEMP

### 0 引言

未来战场空间日趋复杂, 正经历从“平台中心战”向“网络中心战”的转变, 基于网络中心战的战争特点: 一体化的战场信息、5 维化(海、陆、空、天、电磁)的作战空间、透明化的战场控制、模糊化的战场态势、多能化的军兵种作战、快速化的作战节奏等<sup>[1-2]</sup>。通过遍布战场的传感器网络, 决策者和执行者共享情报和作战信息, 网络中心战的战争体系对在最合理的时间和地点实施快速指挥和联合作战提供了保障, 可获得压倒性的作战优势。网络中心战所依赖的各类传感器、供电设备、计算机、网络平台、侦查和预警设备、导航卫星及各类信息化和智能化武器装备等, 均以各种电子设备为基础, 当电子设备受到强电磁脉冲攻击时, 会造成敏感元器件的失效或损毁, 瞬间破坏电子信息系统。这对严重依赖电子信息设备的未来战争而言, 是一种极大的威胁<sup>[3-4]</sup>。

雷达、通信设备的发射功率越来越大, 电磁频谱战也日趋激烈。随着电子战系统的广泛应用和各类电磁脉冲武器的出现, 各类自然电磁能量(雷击、

静电、地磁等)和人为造成的有意或无意的电磁能量等复合环境, 使得战场空间的电磁环境更加恶劣。

高空核爆电磁脉冲(简称高空电磁脉冲, HEMP)是电磁脉冲的一种重要形式, 是距离地面 30 km 以上的核爆炸产生的各类加速粒子与大气相互作用产生的电磁脉冲。在这种情况下, 核爆炸的其他效应, 如爆炸、地面冲击、热辐射及致电离辐射等均不会对地面造成大的影响, 但由此产生的强电磁脉冲可能会引起通信、电子和电力系统的损坏。

一旦电气、监视和控制等设备遭到破坏, 轻则影响系统功能的正常运行, 重则引起连锁性的系统故障, 造成严重事故。1962 年, 美国在太平洋约翰斯顿岛进行了代号为 Starfish Prime 的高空核试验, 爆炸高度为 400 km, 导致离爆心 1 400 km 外的夏威夷群岛发生了街灯熄灭、警报齐鸣、变压器熔丝烧断、通信中断、高压线路避雷器动作等多种效应。同年, 前苏联也在哈萨克斯坦进行编号为 Test 184 的高空核试验, 爆炸高度为 290 km, 导致约 400~1 000 km 范围的柴油发电机故障、电力线路短路, 造成绝缘损坏、电话线路沿线过电压保护器动作、

收稿日期: 2021-06-11; 修回日期: 2021-07-20

作者简介: 陈书恒(1984—), 男, 湖南人, 硕士, 工程师, 从事航空电子对抗和机载预警探测研究。E-mail: chenshuheng1984@sina.cn。

火电厂发生火灾、雷达和无线电设备失效等现象。以上现象证实了 HEMP 作用半径可达上千米，而且会破坏地面电力及电子设备。美国、前苏联等针对关键基础设施的 HEMP 易损性开展了一系列研究，结果表明：HEMP 会对国防指挥、控制、信息、情报、监视、侦察、通信和电网等国家关键基础设施产生灾难性影响<sup>[5-7]</sup>，且系统电子化程度越高，对 HEMP 就越敏感。欧美发达国家已经对此开展相应研究，我军在武器装备研制过程中，高空电磁脉冲的防护也获得了足够重视。为了在日益复杂的电磁环境中保持战斗力，笔者就 HEMP 核爆、HEMP 对电子系统的影响以及 HEMP 的防护进行研究。

### 1 HEMP 波形参数

HEMP 是在高空位置核爆产生的各种高速带电粒子与大气、地磁场等相互作用而产生的电磁辐射。目前，对 HEMP 辐射的定量描述，多以双指数函数作为辐射效应电磁场，其数学表达式为

$$E(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ E_0 k (e^{-\beta t} - e^{-\alpha t}), & t \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中： $E_0$  为峰值场强； $k$  为修正系数； $\alpha$  为表征脉冲前沿的参数； $\beta$  为表征脉冲后沿的参数。目前，在描述高空核爆炸波形方面，已存在很多标准具体量化的双指数函数，其中以国际电工委员会 (international electrotechnical commission, IEC) 制定的 HEMP 标准、Bell 实验室标准和 1976 年出版物标准最为常用<sup>[8]</sup>。表 1 列出了这 3 种标准有关双指数函数的表达式参数。

表 1 各主要 HEMP 表述的波形参数对比

参数	1976 年出版物标准	Bell 实验室标准	IEC 标准
$k$	1.04	1.05	1.3
$\alpha$	$1.5 \times 10^6$	$4 \times 10^6$	$4 \times 10^7$
$\beta$	$2.6 \times 10^8$	$4.76 \times 10^8$	$6 \times 10^8$
$t_r$	7.8	4.1	2.5
$t_p$	1 465	550	55

上表中： $t_r$  为波形上升时间； $t_p$  为衰落的时间；各标准波形峰值场强幅值  $E_0$  没有差别，统一为 50 kV/m；主要的差异体现在时域参数上，按照前沿时间的长短分为 3 类，即较长 (1976 年出版物)、中等 (Bell)、较短 (IEC)，前沿依次变快，持续时间变短。3 种类型的 HEMP 时域波形如图 1 所示，都具有前沿陡峭，宽度较窄；覆盖较宽的频带，具有辐射范围广、辐射强度大、覆盖频谱宽等特点，会对各类电子电气系统构成严重威胁<sup>[9]</sup>。

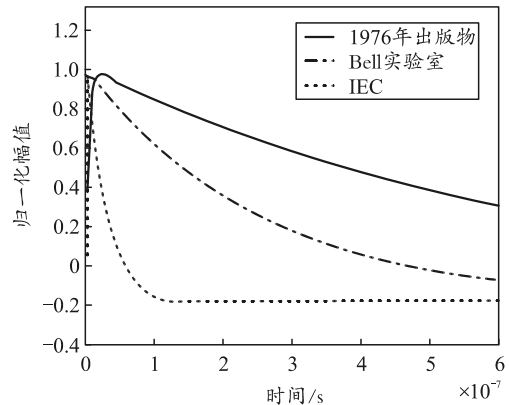


图 1 各种典型 HEMP 标准时域波形

### 2 HEMP 对电子系统的影响

通过各种耦合途径进入系统内部的高功率电磁脉冲能量，会对电子器件造成影响甚至破坏，使其功能下降或完全失效。原因可能包括：热二次击穿、瞬态场致电电压击穿、复杂波形引起的其他失效、瞬时热效应引起的金属化失效。

当强电磁场作用于逻辑电路、控制电路、各类电磁传感器以及通信收发机中的含有半导体器件的集成电路时，会出现高功率微波热效应。HEMP 电磁脉冲易使半导体器件材料产生分子共振，从而吸收大量能量，在电子元件内部产生局部大电流，形成“高温点”，当温度超过器件可承受温度上限时，会使电子元件丧失工作能力，甚至完全损毁。当系统某个通信模块芯片出现损毁时，将严重影响整个系统运行的安全与稳定。

电子电路还可能在强电磁场干扰或电噪声作用下产生误动或功能失效。例如在电磁辐射引起的耦合电压达到干扰阈值时，核心芯片虽不会被烧坏，但输出端的逻辑值可能会改变，产生误码。关键信号一旦发生错误，会导致指令无法识别，对于武器装备的信息和通信系统来说是致命的。另一方面，常用的一些磁传感器、记忆元件在电磁辐射的作用下，也会受影响而导致原始信息出错或发生其他类型的逻辑错误。若一些自动控制算法的预设值被改变，逻辑控制功能将变得混乱，可能造成严重后果。

对于各类器件的电磁敏感性的判断，目前国际上还没有对电磁敏感性相关数据达成共识。经过大量研究，美国 Harry Diamond 实验室得到了部分组件敏感性数据<sup>[10]</sup>。根据这些数据和之前大量敏感性研究的经验，给出部分典型器件在高功率微波作用下的损伤阈值如表 2 所示。

表 2 典型电子元器件的损伤阈值  $J/cm^2$ 

元器件类型	损坏能量阈值	损坏功率阈值
整流二极管	$0.5 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-3}$	400~4 000
小功率晶体管	$2 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-3}$	10~800
微波二极管	$7 \times 10^{-7} \sim 1.2 \times 10^{-5}$	4~100
开关晶体管	$2 \times 10^{-5} \sim 3 \times 10^{-4}$	30~300
双极型晶体管	$1 \times 10^{-5} \sim 5 \times 10^{-2}$	7~800
CMOSRAM	$7 \times 10^{-5} \sim 2 \times 10^{-4}$	10~100
运算放大器	$2 \times 10^{-3} \sim 6 \times 10^{-2}$	30~300

按照电磁脉冲造成的破坏程度和照射目标的电磁波功率密度, 电磁脉冲的辐照效应大致可分为干扰、降级、损伤和损毁 4 个层级:

1) 干扰: 照射功率密度为  $1 \mu W/cm^2 \sim 0.01 W/cm^2$ , 暂时性造成设备不能正常工作, 干扰源撤销后, 系统恢复正常;

2) 降级: 照射功率密度为  $0.01 \sim 1 W/cm^2$ , 造成系统进入锁死或保护状态而关机, 必须重新开机或进行维修;

3) 损伤: 照射功率密度为  $1 \sim 100 W/cm^2$ , 造成系统或子系统中等程度的伤害, 此效应产生的影响可能是永久的, 至于影响多大则视攻击状况及系统修复能力而定;

4) 损毁: 照射功率密度为  $100 W/cm^2 \sim 10 kW/cm^2$ , 可对系统造成致命且永久性的破坏, 若要恢复系统功能, 则需全面替换整个系统、设备及硬件<sup>[9,11]</sup>。

### 3 HEMP 的防护

对 HEMP 的防护与对一般电磁脉冲的防护基本一致, 特殊之处在于针对具体情况选择合适的器件及其参数。电磁脉冲对电子系统的防护主要是控制电磁场通过辐射或传导的方式进入电子系统、设备或元器件。按照防护的机理不同, 电磁防护可分为空域、频域和能域防护等<sup>[12-13]</sup>。

空域防护是对空间辐射干扰和感应耦合干扰的有效控制方法, 主要采用空间分离、隔离措施来保证敏感设备不受电磁干扰的影响。空间分离通过增加敏感设备和干扰源之间的空间距离, 确保在到达敏感设备时干扰信号的幅度已衰减到足够小; 空间隔离主要是采用金属体屏蔽的措施, 将对电磁干扰敏感的电子、电气设备及系统与电磁辐射环境保证足够的隔离程度, 减少电磁场对设备及系统的耦合。

频域防护主要包括滤波、调频、编码、频谱管制和光电转换等方法。利用系统的频谱选择特性, 对所需成分(电源工频交流频率、信号工作频率等)

加以接收, 而对其余频率成分加以抑制或剔除<sup>[11]</sup>。

能域防护主要采用浪涌抑制器件, 进行旁路分流或限幅钳位, 当电压超过某一阈值时, 立即进行电位限幅钳位, 让超过限值的能量从旁路分流泄放掉。浪涌抑制器件通常有半导体器件(如雪崩二极管等)充气放电管、压敏电阻和火花隙放电器<sup>[13]</sup>。

### 4 结束语

为了确保武器装备在未来战场上的可靠性, 确保在信息化战争时代处于不败之地, 笔者开展了 HEMP 特点及防护研究, 分析其与常规电磁环境试验项目之间的差异, 并针对性地提出了高空电磁脉冲防护的相关试验验证要求。

### 参考文献:

- [1] 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: 129-130.
- [2] 秦荀, 李三军. 美军的自主系统参考框架[J]. 兵工自动化, 2020, 39(1): 6-10.
- [3] 姜百汇, 米小川, 查旭. 国外电磁脉冲武器的应用[J]. 航天制造技术, 2010(1): 12-16.
- [4] 刘尚合, 杨洁. 电磁脉冲与电磁环境效应[J]. 中国防雷, 2004(5): 9-15.
- [5] GAUDET J A, PRATHER W D, BURGER J, et al. Progress in gallium arsenide photoconductive switch research for high power applications[C]. USA: Power Modulator Symposium, 2002.
- [6] LEACH R D, ALEXANDER M B. Electronic Systems Failures and Anomalies Attributed to Electromagnetic Interference[R]. Washington: National Aero-nautics and Space Administration, DC, NASA Report 1374, 1995. CC 20546-0001.
- [7] Commission to Assess the Threat to the United States from Electromagnetic Pulse Attack[R]. Nuclear EMP Attack Scenarios and Combined-Arms Cyber Warfare. 2017.
- [8] 谢彦召, 王赞基, 王群书, 等. 高空核爆电磁脉冲标准波形及特征分析[J]. 强激光与粒子束, 2003, 15(8): 781-786.
- [9] 邱扬. 复杂电子系统抗核电磁脉冲设计的拓扑图法[J]. 航天控制, 1991, 9(3): 76-80.
- [10] 郭建飞. 车辆电控系统电磁防护技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2013: 1-30.
- [11] 柴焱杰, 孟丁, 李建军, 等. 复杂电子系统强电磁脉冲效应研究[J]. 电磁场与微波, 2011, 41(1): 38-40
- [12] 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.
- [13] 王天顺. 核电磁脉冲干扰及防护技术[J]. 飞机设计, 2000, 12(4): 33-39.