

美国水面舰船电磁脉冲防护标准浅析

李超¹, 吴垚², 袁犇³

(1.海军装备研究院, 上海 200235; 2.92602 部队, 上海 201900; 3.91656 部队, 上海)

摘要: 为了提高强电磁脉冲的防护能力, 必须面对雷电、核电电磁脉冲高功率微波的挑战。首先分析了水面舰船电磁脉冲能量的耦合方式和途径, 包括“前门”耦合, “后门”耦合, 并在此基础上分析了国外水面舰船, 主要是美国水面舰船强电磁脉冲防护的标准及要求, 为我国水面舰船的强电磁脉冲防护标准制订提供技术参考。

关键词: 电磁脉冲; 标准分析; 水面舰船

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2018.03.015

中图分类号: TJ83 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2018)03-0071-05

Protective Standards for Electromagnetic Pulse of American Surface Ship

LI Chao¹, WU Yao², YUAN Ben³

(1.Naval Academy of Armament, Shanghai 200235, China; 2.92602 Unit of the PLA, Shanghai 201900, China; 3.91656 Unit of the PLA, Shanghai, China)

ABSTRACT: To improve the protective capability of strong electromagnetic pulse, the challenges of the thunder, nuclear electromagnetic pulse (EMP) must be faced. The coupling mode and way for EMP power of surface ship was analyzed, include front gate coupling and back gate coupling. Based on this analysis, the standard and requirement on EMP protection of surface ship were analyzed. It provides an effective reference to make our own EMP protective standards.

KEY WORDS: electromagnetic pulse (EMP); standards analysis; surface ship

强电磁脉冲是一种瞬变电磁现象, 也是一种宽频段、高功率的电磁环境。强电磁脉冲可以由雷电等自然现象产生, 也可以由核武器或电磁脉冲武器等产生^[1]。

电磁脉冲对武器装备尤其是电子信息装备破坏性极大, 可能造成通信瘫痪、指挥失灵、性能下降甚至丧失等, 直接影响武器装备的战斗效能发挥和战场生存能力。水面舰船作为海上主要作战平台, 具有高科技电子信息装备十分密集的显著特点^[2]。平台内安装有大量复杂的各种电子设备^[3]、电气设备和作战武器系统。一艘典型水面舰船上的电子设备包括几十台发射机和接收机, 几十副以上的通讯和雷达天线等。研究表明, 一旦遭受敌方电磁脉冲武器的打击, 舰船上的众多天线^[4]、电缆和管道等金属导体就可能收集

到巨大的电磁脉冲能量, 使与这些导体相连的电子、电气系统被干扰甚至损坏, 从而导致舰船的作战性能降级甚至丧失作战能力^[5]。因此为了提高水面舰船强电磁脉冲的防护能力, 就需要针对雷电脉冲、核电电磁脉冲、高功率微波和超宽带强电磁脉冲等类型的强干扰威胁, 分析外军主要是美军水面舰船电磁脉冲能量的耦合方式和途径^[6], 对国内外水面舰船防护设计的标准要求开展研究。

1 水面舰船电磁脉冲能量耦合方式和途径

任何电磁干扰的发生都必然存在干扰能量的耦

合途径(或传输通道)。通常有两种耦合方式:一种是传导耦合,另一种是辐射耦合^[7]。

传导耦合必须在干扰源和敏感电子设备之间有完整的电路连接,干扰信号沿着这个连接链路传到敏感设备,发生干扰破坏现象。辐射耦合是指干扰信号通过空间传播,干扰能量按电磁场的规律向周围空间辐射。常见的辐射耦合有三种:干扰信号被天线接收,称为天线耦合;空间辐射干扰信号经导线感应耦合,称为场对线的耦合;两根平行导线之间的高频信号感应,称为线对线耦合。

辐射耦合是指电磁脉冲能量以电磁辐射方式通过空间对系统形成的耦合。其耦合方式主要有电磁脉冲对天线的耦合、对电缆等长导体的耦合、对孔洞与缝隙的耦合等。传导耦合则是指电磁脉冲能量以电压或电流形式通过金属导体或元件(如电容器、变压器)对系统形成的耦合。

水面舰船属于大型金属结构,它暴露在电磁场中就成为辐射能量的接收器。当电磁脉冲冲击到一艘舰艇时,某些辐射能量通过舱口、通道、窗口及缝隙直接穿透至甲板下隔舱。其中大部分接收到的脉冲能量通过舰上天线、外部电缆、管道等进入内部的电子系统,并耦合到电线、电缆、设备附件上,使敏感电子设备突然承受受到较大的冲击电流,从而干扰甚至损坏C4ISR系统和电气设备,导致水面舰船作战性能降级甚至丧失作战能力。

在电磁脉冲环境中运行的电子、电力系统,电磁脉冲能量可通过各种途径进入系统,这些进入途径主要有:天线或起天线作用的长导体和环状导体对电磁能量的收集;电线、电缆的耦合与传导;对设备壳体的穿透;通过金属壳体上缝、孔、洞的耦合;金属框架、管道等的结构耦合。

通常电磁脉冲能量进入水面舰船内部的途径有:

通信、雷达天线;船舱外部的电力、信号电缆和波导;对舰船壳体和设备壳体的穿透;通过舱口、通道、窗口及缝隙进入舰船内部;通过通风管等金属管道进入舰艇内部。电磁脉冲进入水面舰船内部的耦合途径如图1所示。

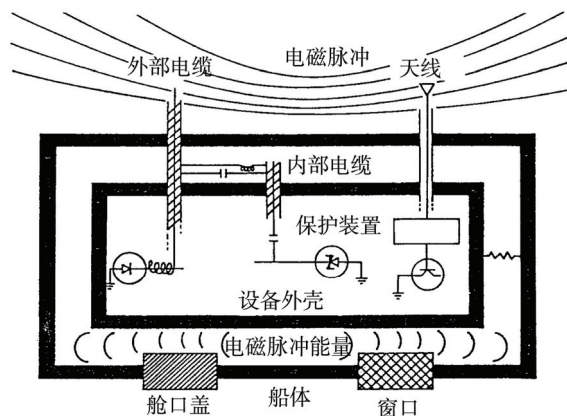


图1 电磁脉冲能量进入水面舰船的耦合途径

水面舰船暴露在电磁脉冲环境中,电磁脉冲能量进入舰艇内部的途径是多方面的,由于舰面上层建筑复杂,电磁脉冲潜在的进入部位非常多。美国海军在研究水面舰船电磁脉冲防护与加固技术时进行了全舰电磁脉冲试验,并对电磁脉冲能量进入水面舰船内部的耦合途径进行了分析。图2给出了美国“宙斯盾”巡洋舰“安吉奥”舰(USS Anzio, CG68)作战系统中电磁脉冲潜在的进入部位。从图2中可以看出,这些潜在进入部位主要是作战系统的雷达、通信天线,以及舱面、侧舷武器开孔处。

对于水面舰船舰载电子、武器系统来说,电磁脉冲进入的耦合途径又分为“前门”和“后门”两种途径。“前门”指设备的天线,“后门”指设备的连接电缆、机壳或屏蔽箱体上的洞孔等。

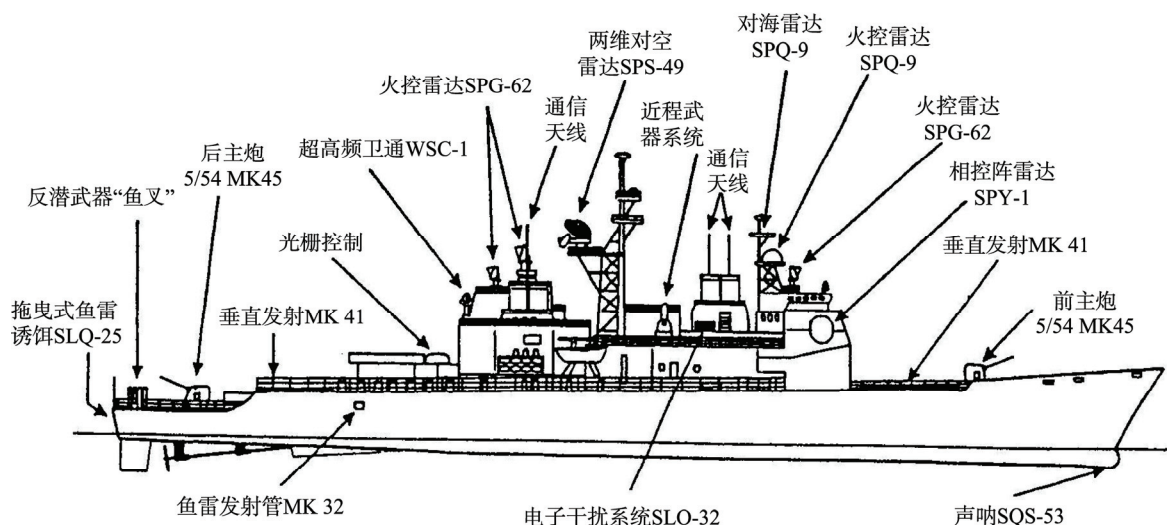


图2 “安吉奥”舰作战系统中电磁脉冲潜在的进入部位

“前门”耦合是指电磁脉冲能量直接通过天线进入包含有发射机和接收机的系统。通信、雷达及电子对抗设备的天线是“前门”耦合的主要对象。其天线的功能是将能量耦合进设备，这就为电磁脉冲能量进入设备并造成破坏提供了有效的途径。天线是用来收集能量的，舰载 C4ISR 系统舱面上的天线都具备这种作用。

“前门”耦合一般是单通道耦合，接收天线一般具有方向性和通频带，与天线相匹配的传输线、低通或高通滤波器也只能传输一定频率的信号。因此，只有当电磁脉冲信号的频率落在接收天线的带宽内，耦合功率最强。电磁脉冲信号频率落在接收天线带宽外时，耦合功率一般很小；频率在通频带上时，耦合能量按频率的平方关系迅速下降；频率在通频带以下时，按频率的四次方关系迅速下降。

由于高功率微波覆盖范围广，并且传播到海面上的水面舰船处时为平面波的形式，场强峰值没有变化，基本上没有方向性。舰载电子、武器系统的天线一般都装有保护器件，用于限制进入天线的电磁能量。例如一般雷达接收机的前部都装有开关和限幅器以保护后面的电路，但是由于电磁脉冲是场强非常高、时间非常短（纳秒级）的窄脉冲，一般保护器件对外界电磁能量的响应时间超过电磁脉冲通过时间，因此对其抑制作用很小，电磁脉冲能量可以直接通过天线端保护器件直接进入设备内部^[8]。

“前门”（天线）是电磁脉冲能量进入水面舰船舰载电子、武器系统的一个最主要的途径。天线吸收的电磁脉冲能量可以直接毁坏天线接收设备，也可以通过天线进入系统内部，破坏系统内部的电子元器件，从而破坏系统的功能。

“后门”耦合是指电磁脉冲能量通过电子设备外壳的开口与缝隙进入设备，或在设备之间的连接电缆上产生传导干扰信号。

水面舰船舰载电子、武器系统“后门”耦合电磁脉冲能量的方式主要有以下几种。

1) 传导耦合方式。电磁脉冲能量耦合至水面舰船甲板的外部信号电缆上，这些电缆直接与舰艇舱室内部的电子设备相连，耦合能量直接进入设备内部。电磁脉冲能量耦合至水面舰船甲板的外部电力电缆上，通过电力系统进入舱室内部的电子设备。

2) 辐射耦合方式。电磁脉冲能量通过舱口、通道、窗口及缝隙辐射进入或穿透舰艇壳体进入舰艇舱室内。这些辐射进入的能量又通过设备上的开孔、缝隙进入设备内部。

3) 交叉耦合方式。电磁脉冲能量耦合在舰艇甲板外部电力、信号电缆上，进入舱室后这些电缆辐射电磁脉冲能量，通过辐射和传导耦合方式进入舱室内其他电子设备内部。通过舱口、通道、窗口及缝隙辐

射进入或穿透舰艇壳体进入舰艇舱室内的电磁脉冲能量，耦合至信号或电力电缆上，通过传导方式耦合进入电子设备内部。

“后门”耦合是多通道耦合：耦合强度与孔缝的数目、尺寸、形状以及截止的频率有关，电磁脉冲信号在耦合的过程中可能出现“共振增强”的现象；通过等效天线（偶极子和磁极子）将高频能量耦合到低频电路中；通过“整流”或“互调”将射频信号转换成“视频脉冲”或带宽信号，该信号传遍整个电子系统而发生作用，在传输过程中因寄生谐振可能会在电路中产生频率等于两个或多个基频、谐波之和或差的信号。

水面舰船内各种电子设备的机箱，大部分是用金属板材加工组合而成的。由于技术水平的限制和功能需要，存在孔缝是难免，有的还要在壳体上开口。如各种操作平台的显示器、通风散热窗口、操作显示窗口、电源、信号的出入口、各种表头显示观察窗口、灯座、开关和操作按键安装孔、接缝处的缝隙等，这些孔隙是电磁脉冲能量进入的重要途径。另外，舰艇上线缆分布非常广泛。可见“后门”耦合具有相当的普遍性^[9]。

从水面舰船的结构和敏感电子设备的布置特点来看，舰载电子、武器系统中的敏感电子设备置于甲板以下封闭的金属舱室内，其中重点敏感设备舱室为屏蔽舱室。另一方面，舰面甲板上露天电力、信号等电缆均为屏蔽电缆，因此电磁脉冲能量难以直接通过“后门”耦合途径进入敏感设备内部，主要通过舰面布置的天线（“前门”）耦合进入敏感设备内部。

2 国外水面舰船强电磁脉冲防护标准要求分析

美国在水面舰船强电磁脉冲防护领域开展研究时间长、成果多，标准相对全面。因此对美国舰船强电磁脉冲防护标准的分析有助于我们了解和借鉴国外先进技术，更好地制定适合我国的水面舰船电磁脉冲防护标准。

2.1 雷电电磁脉冲防护要求标准

涉及水面舰船雷电电磁脉冲防护要求的美国军用标准主要是 MIL-STD-464C《电磁环境效应要求和方法》，该标准的 5.5 条为雷电要求。

系统在雷电的直接和间接效应下，均需满足其工作性能要求。军械在暴露状态下经受近距雷击或在封存状态下经受直接雷击之后，应满足其工作性能要求。军械在经受暴露状态下直接雷击的期间及之后，仍需保证安全。表 1 提供了与直接雷击引起的间接效应相关的雷电环境数据，表 2 适用于近距雷击环境。符合性应通过系统、分系统、设备和部件（如结构和天线罩）级试验、分析或其组合来验证^[10]。

表 1 雷电间接效应波形参数

| 电流分量 | 图形说明 | $i(t) = I_0 (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t})$ | | |
|------|---------|---|-----------------|----------------|
| | | I_0/A | α/s^{-1} | β/s^{-1} |
| A | 强闪击 | 218 810 | 11 354 | 647 265 |
| B | 中间电流 | 11 300 | 700 | 2 000 |
| C | 连续电流 | 400 (对0.5 s) | / | / |
| D | 再闪击 | 109 405 | 22 708 | 1 294 530 |
| D/2 | 多次闪击 | 54 703 | 22 708 | 1 294 530 |
| H | 多次闪击脉冲群 | 10 572 | 187 191 | 19 105 100 |

表 2 雷电间接效应波形特征

| 电流分量 | 峰值 电流/kA | 峰值衰减 50%时间/ μs | 峰值上升至 10%时间/ μs | 峰值上升至 90%时间/ μs | 峰值 时间/ μs | 峰值上升率 $t=0^+/(A \cdot s^{-1})$ |
|------|-----------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------|-----------------------------------|
| A | 200 | 69 | 0.15 | 3.0 | 6.4 | 1.4×10^{11} |
| B | 产生持续时间超过5 ms, 平均值为2 kA的连续电流 | | | | | |
| C | 定义为幅度等于400 A, 持续500 ms的方波 | | | | | |
| D | 100 | 34.5 | 0.08 | 1.5 | 3.18 | 1.4×10^{11} |
| D/2 | 50 | 34.5 | 0.08 | 1.5 | 3.18 | 0.7×10^{11} |
| H | 10 | 4.0 | 0.0053 | 0.11 | 0.24 | 2.0×10^{11} |

2.2 核电磁脉冲防护要求标准

涉及水面舰船核电磁脉冲防护要求的美国军用标准主要包括：MIL-STD-464C《系统电磁环境效应要求》、MIL-STD-461F《设备与分系统电磁干扰控制要求》。464C标准规定了适用于舰船平台的核电磁脉冲防护要求，461F标准规定了适用于舰载设备和分系统的核电磁脉冲防护要求。

1) MIL-STD-464C《系统电磁环境效应要求》中5.6条规定的电磁脉冲要求如下：系统在承受电磁脉冲环境以后，需要满足其工作性能要求。相应的电磁环境有不同的类别，且在MIL-STD-2169《高空电磁脉冲环境》中有定义。仅在订购方有明确要求时，该条件才适用。符合性应通过系统、分系统、设备级试验、分析或其组合来验证MIL-STD-2169标准为秘密级标准，其要求限值波形未对外公布，MIL-STD-464C给出了可供参考的核电磁脉冲环境要求，如图3所示。

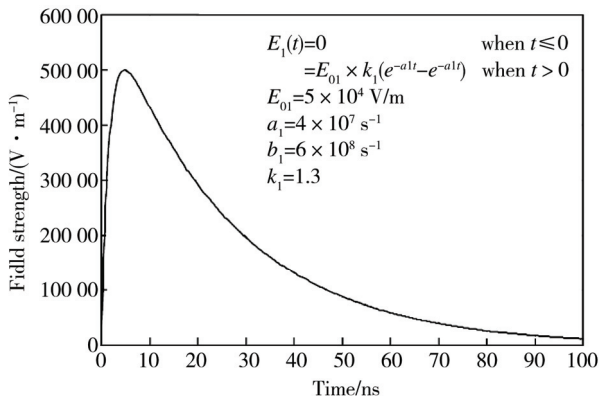


图 3 核电磁脉冲环境要求

2) MIL-STD-461F《设备与分系统电磁干扰控制要求》中5.21条为RS105瞬态电磁场辐射敏感度，其条文规定：当设备或分系统安装在加固（屏蔽）的平台或设施的外部时，RS105适用于水面舰船、潜艇、陆军飞机（包括机场维护工作区）、海军飞机和海军地面上的设备和分系统壳体。订购方有规定时，RS105既适用于上述平台中只预定用于非金属平台上的设备，也适用于空间系统平台上的设备。对于陆军飞机上用于安全目的的关键性安全设备或分系统，当其安装在外部时，RS105也适用。当按该标准中图2-3所示试验信号的波形和幅度进行试验时，受试设备不应出现任何故障、性能降低或偏离规定的指标值，或超出单个设备和分系统规范中给出的指标允差。至少施加5个脉冲，重复频率步重复频率不超过1个脉冲/min。

2.3 高功率微波防护要求标准

涉及水面舰船高功率微波防护要求的美国军用标准主要是MIL-STD-464C《电磁环境效应要求和方法》，该标准的5.4条规定了高功率微波防护要求。

系统在承受窄带或宽带高功率微波之后，仍需满足其工作性能要求。利用经过诸如《Capstone Threat Assessment Report》权威验证的具有威胁的源数据，并基于系统工作情况、方案和任务要求，订购方需提供系统可适用的场级和高功率微波脉冲特性。仅在订购方有明确要求时，该条件才适用。符合性应通过系统、分系统、设备级试验、分析或其组合来验证。

3 结语

国外水面舰船强电磁脉冲防护的标准及要求的分析能为我国水面舰船的强电磁脉冲防护提供一定的技术参考, 对我国水面舰船的抗强电磁脉冲标准制订具有较好的借鉴作用。

参考文献:

- [1] RADASKY W A, BAUM C E, WIK M W. Introduction to the Special Issue on High-Power Electromagnetics and Intentional Electromagnetic Interference[J]. IEEE Trans Electromagn Compat, 2004, 46(3): 314-321.
- [2] 郑生全, 吴晓光, 朱英富. 舰船平台强电磁脉冲威胁与防护要求[J]. 微波学报, 2010, 35(8): 101-106.
- [3] JOSEPH R M, RONALD J C. Modeling of Army Research Laboratory EMP Simulators[J]. IEEE Trans NS, 1993, 40(6): 1967-1976.
- [4] 颜克文, 阮成礼, 吴多龙. 通信系统在强电磁脉冲环境下的电磁防护[J]. 装备环境工程, 2008, 5(3): 76-80.
- [5] GARCIA E. Electromagnetic Aompatibility Uncertainty, Risk, and Margin Management[J]. IEEE Trans Electromagn Compat, 2010, 52(1): 3-10.
- [6] 杨继坤, 牛龙飞, 李进, 等. 舰船系统级强电磁脉冲防护试验与关键技术[J]. 现代防御技术, 2016, 44(1): 22-26.
- [7] MENG Cui, CHENG Yu-sheng, LIU Shun-kun. Numerical Simulation of Early-time High Altitude Electromagnetic Pulse[J]. Chinese Journal of Physics, 2003, 12(12): 484-488.
- [8] 李小伟, 孙凤杰. 系统级电磁脉冲模拟源辐照试验方法[J]. 信息与电子工程, 2012, 10(5): 551-553.
- [9] 陈炜峰. 电磁脉冲模拟器及其应用研究[D]. 南京: 东南大学, 2007.
- [10] JUMP M E, EMBERSON W C. Ship Electromagnetic Pulse Survivability Trial[J]. Naval Engineers Journal, 1991, 10(3): 136-140.