

环境试验与评价

美国海军全舰船电磁脉冲生存能力试验 与鉴定研究进展

冯寒亮, 毛从光, 吴刚, 孙蓓云

(西北核技术研究所, 西安 710024)

摘要: 为了了解美国海军在这一领域取得的研究进展, 回顾了近十年来, 美国海军在电磁脉冲生存能力试验与鉴定方面所开展的工作, 重点介绍和分析了美国海岸警卫队退役快艇“MONHEGAN”号电磁脉冲试验情况、美军标 MIL-STD-4023 中关于水面舰船电磁脉冲防护及试验要求、美国海军全舰船威胁级电磁脉冲模拟器参数信息及有关舰船电磁脉冲评估的其他试验基础设施资源需求。

关键词: 美国海军; 舰船; 电磁脉冲; 模拟器; 试验与鉴定

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2020.01.015

中图分类号: TJ83

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2020)01-0097-08

Research Progress in the U.S. Navy Full Ship Electromagnetic Pulse Survivability Test & Evaluation

FENG Han-liang, MAO Cong-guang, WU Gang, SUN Bei-yun
(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

ABSTRACT: In order to understand the progress of the U.S. Navy in this field, the works over the past decade carried out by the U.S. Navy in the field of electromagnetic pulse survivability test & evaluation were reviewed, the electromagnetic pulse tests of the retired U.S. Coast Guard Cutter “MONHEGAN” were analyzed, the protection and test requirements of military surface ships in MIL-STD-4023 were introduced, the parameter information of the U.S. Navy full ship threat level electromagnetic pulse simulator and other test infrastructure resource requirements for ship electromagnetic pulse assessment were provided in this article.

KEY WORDS: U.S. navy; ship; electromagnetic pulse; simulator; test & evaluation

电磁脉冲 (Electromagnetic Pulse, EMP) 是一种在瞬间产生的强大电磁场, 会对海军舰船平台、舰载电子信息系统及武器装备等造成严重影响, 甚至损伤。因此, 美国海军一直十分重视舰船 EMP 生存能力试验与鉴定, 并在这一领域开展了深入研究, 取得了丰富的成果。其一般测试方法是对舰船系统和子系统进行有限的测试, 然后利用这些结果外推 EMP 对

整艘舰船的影响。随着电子器件和信息系统在海军舰船上的大量应用, 各类海军舰船平台的电子信息系统、信息化武器装备对电磁辐射越来越敏感。与此同时, 其面临的 EMP 环境威胁也日益凸显。美国国防部作战试验与鉴定局认为, 当前这种测试方法无法提供海上舰船 EMP 生存能力评估所需的全部数据, 而且现有的 EMP 建模与仿真所能提供的有关舰船生存

收稿日期: 2019-07-14; 修订日期: 2019-08-26

Received: 2019-07-14; Revised: 2019-08-26

作者简介: 冯寒亮 (1982—), 男, 陕西宝鸡人, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为电磁脉冲效应。

Biography: FENG Han-liang (1982—), Male, from Baoji Shaanxi, Master, Assistant researcher, Research focus: electromagnetic pulse effect.

能力信息非常有限,不确定性非常大,并给出了“美国海军目前不具备对整艘舰船 EMP 生存能力进行评估的能力”这一结论^[1-3]。为此,美国国防部及海军相关机构开展了大量工作,并考虑建造一种全舰船威胁级电磁脉冲模拟器(Full-ship EMP Threat Level Simulator, EMP TLS)^[4],填补这项能力空白。

1 美国海军近十年发展动态

近十年来,美国海军在新一轮 EMP 计划的支持下,针对海军装备,通过开展一系列试验,研发替代测试设备及方法等,筹划发展海军 EMP 评估能力,特别是全舰船 EMP 生存能力的评估。

2008年9月,美国国防部通过化学、生物、放射性、核生存能力(Chemical, Biological, Radiological, Nuclear, CBRN)政策机制和国防部指令 3150.09,正式建立了一个高级别化学、生物、放射性、核生存能力监督小组(CBRN Survivability Oversight Group, CSOG)^[5-6]。在这一生存能力政策的扶持及相关组织的监督指导下,美国海军从2009财年开始,在“海军空间与电子战保障”项目的支持下,启动了“EMP生存能力”子项目^[7]。该项目为所有海军系统、舰船、潜艇和岸上设施更新和制定了新的设计标准、试验方法、试验限度和生存能力验证程序,开发并改进了建模能力,旨在评估所有关键系统的 EMP 生存能力,支持 EMP 加固保证与维护任务。

2010年3月,美国海军海上系统司令部重新成立了新的 EMP 评估小组(该小组曾暂停活动长达10年),重启海军 EMP 计划^[6],开始继续研究如何应对 EMP 威胁。美国海军这一新的 EMP 计划任务涉及多个方面:确立与 EMP 生存能力有关的系统采办标准,协助制定测试与评估未来系统的标准与方法,评估目前任务关键系统在 EMP 生存能力方面的态势,并与其他各军种和机构协调共享 EMP 资源和信息,最终归结为向海军高层领导提供信息以评估舰队在 EMP 方面面临的态势。

2011年,美国海军开始利用美国海岸警卫队退役快艇“MONHEGAN”号作为 EMP 和电磁环境效应试验平台,开展了 EMP 辐照试验、脉冲电流注入试验,研制线缆屏蔽接地适配器,研究低幅度连续波辐照器(Low-Level Continuous Wave Illuminator, LLCWI)试验方法等^[8]。该系列 EMP 试验的数据和方法,为制定美军标 MIL-STD-4023 提供了重要信息,为未来开展全舰船 EMP 试验奠定了基础。

2014年11月4日,美国国防威胁降低局发布名为《Electromagnetic Pulse Threat-Level Simulator (EMP TLS) for Ships》的信息征询通知^[4]。该通知中提出了美国海军欲建造的全舰船 EMP TLS 的主要参数及相关要求。这表明相关部门已开始进行市场调研,

寻求能够设计、制造、现场演示这种设备的承包商。

2015 财年,经美国国防部长办公室对核能力进行详细的评估,CSOG 小组核领域试验与鉴定工作组路线图将全舰船 EMP TLS 确定为他们最为重要的技术缺口。美国国防威胁降低局也已确定:使用全舰船 EMP TLS 进行的测试,是演示验证舰船防护威胁级高空电磁脉冲(High Altitude Electromagnetic Pulse, HEMP)并保障海军要求任务的最佳方法。

另外,在2015财年至最新2017财年连续几年的美国国防部作战试验与鉴定局年度报告中均指出^[1-3]:美军目前对舰船系统和子系统进行有限的测试、建模与仿真等方法及能力有限,不足以支撑整艘舰船的 EMP 生存能力评估。特别是,2017年11月15日,美国陆军部合同司令部发布了题为《用于海军水面舰船 HEMP 评估的试验基础设施资源需求》的信息征询书^[9],列出了目前美国海军水面舰船 EMP 试验基础设施资源需求涉及的5个方面。

综上所述,经过持续数年的试验与研究,美国海军获取了大量舰船电磁脉冲试验数据和成果,为探索全舰船 EMP 试验方法与要求、制定海上 HEMP 演示验证计划、研制建造全舰船 EMP TLS 等奠定了基础,为后续开展全舰船 EMP 试验积累了丰富的经验。

2 “MONHEGAN”号电磁脉冲试验

2011—2014年,美国海军水面作战中心达尔格伦分部与海军航空系统司令部帕图克森特河分部合作,将美国海岸警卫队退役的“岛屿”级快艇“MONHEGAN”号作为 EMP 和电磁环境效应试验平台,开展了相关试验。“MONHEGAN”号长约37.49 m,舷宽6.4 m,排水量为153 t,航速为54.63 km/h,载员16人。

2.1 试验目的

此项试验的主要目的为:1)研究(舰船的)HEMP生存能力;2)研究提高军舰加固的方法;3)支持制定和验证 MIL-STD-4023 标准;4)舰船 EMP 效应研究;5)其他调查研究。其中关于舰船 EMP 效应研究主要包括:射频屏蔽、接地和连接的改进;HEMP 生存能力评估方法。

2.2 已完成的试验

1)高幅度电流注入试验。研究人员使用 E1 低幅度脉冲发生器(1 kA),在船体上注入宽带电流脉冲,采用定量注入驱动(空间、幅度、频率)的方式,测量了泄漏场/电流。试验获得约500 A的峰值电流。试验结果表明,此模拟试验远达不到威胁级水平。该试验方法验证了用于加固维护/监测的潜在技术,还验证了结果和建模与仿真结果的良好相关性(如图1所示)。

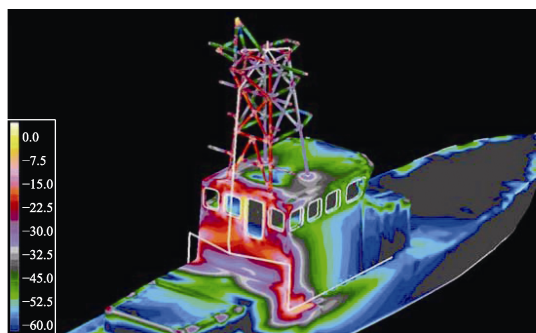


图 1 高幅度电流注入试验的建模与仿真
Fig.1 Modeling and simulation of high amplitude current injection test

2) LLCWI 试验。研究人员分别利用 Ellipticus 天线、半对数/环形天线 (>2 MHz) 产生均匀垂直与

水平极化辐射场辐照船体, 模拟试验环境与威胁级环境具有一定相关性 (如图 2 所示)。此外, 研究人员还进行了桅杆线缆试验, 仅利用了垂直极化波, 场覆盖范围和均匀性有限, 但可用于加固维护/监测。

3) 桅杆线缆试验。研究人员利用连接船首、桅杆、船尾的单线辐照器辐照船体, 以获取响应数据, 并与预先定义的、用甲板以下峰值场表征的基准数据进行比较。试验结果表明: 辐射场的垂直分量大于水平分量; 场覆盖范围和均匀性有限; 环形区域场的差异很小。该模拟方法产生的电磁脉冲环境达不到威胁级要求, 但可用于加固维护/监测。由于许多因素的影响, 与建模与仿真结果 (如图 3 所示) 的对比没有给出指向性的结论。



图 2 低幅度连续波辐照器试验
Fig.2 Low amplitude CW irradiator test

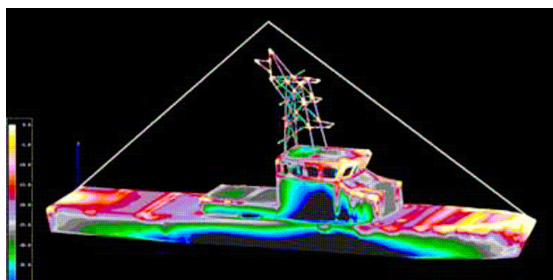
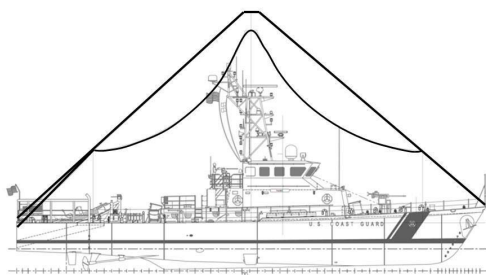


图 3 单线辐照器开展桅杆线缆试验及其建模与仿真
Fig.3 Single mast cable test and its modeling and simulation of irradiator

4) 高频鞭状天线试验。研究人员利用网络分析仪激励快艇自有高频鞭状天线 (如图 4 所示), 产生

大范围电场, 覆盖频段受到天线谐振的影响 (如天线高度为半波长奇数倍的频点不能有效激励)。利用船载发射器驱动高频鞭状天线, 产生大范围电场, 测试频点受到调谐器的限制。相关技术有望用于加固维护/加固监视, 但要同 LLCWI 或高场强脉冲辐照试验产生的基准数据进行比较仍存在困难。

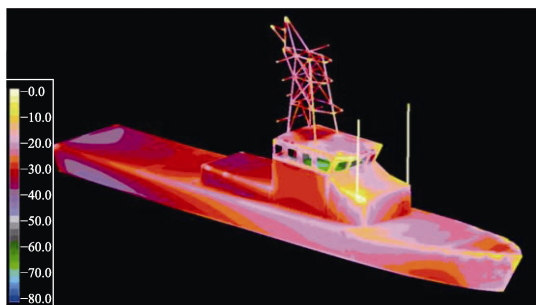


图 4 高频鞭状天线试验的建模与仿真
Fig.4 Modeling and simulation of high frequency whip antenna test

5) 脉冲电流注入试验。该项试验主要有两个内容: 1) 安装海军电缆屏蔽接地适配器, 用于长期试验与评估; 2) 脉冲电流注入, 训练员工队伍, 评估端端电路和分布式电路, 评估接地效能的潜在替代方法。

2.4 美国海军研究人员的认识

根据此项试验, 美国海军研究人员得到如下几点

认识。

1) 针对海军舰船开展均匀辐照试验存在难度。基于美国海军现有技术水平, 需要针对大型海军舰船的大型天线, 从而需要提高试验成本和后勤保障要求。由于大型天线安置距离远, 使得场强减小, 并可能限制低频频谱数据的有效性。

2) 多项技术可应用于加固维护/加固监视。针对屏蔽接地适配器的脉冲电流注入, 定性评估试验在后勤与成本方面有一定优势。

3) 开展计算电磁学建模具有一定价值。结果表明, 甲板以上的计算电磁学结果与试验结果的相关性较好, 但需考虑物理约束。

4) 数据采集处理需要更高的准确性和精确性。从舰船内外测点传感器获得的测量结果, 需经电缆回传至数据采集处理系统, 但舰船布线复杂, 且非常耗时, 并受船上正常操作和电磁完整性影响, 会导致试验资金成本和时间增加, 因此需要一个更好的数据采集解决方案。

根据以上披露的信息, 美国海军认为利用退役的“MONHEGAN”号快艇作为 EMP 和电磁环境效应试验平台, 开展研究、研制、试验和鉴定工作非常具有价值, 但由于舰船尺寸、设计、复杂性等因素使得所需测试点、测量、分析等面临巨大挑战。

3 MIL-STD-4023 中关于水面舰船 HEMP 防护及试验要求

美国在水面舰船 EMP 防护领域开展研究时间长, 成果多, 标准相对全面, 且为多国采用, 因此具有较强的借鉴和参考价值。除 MIL-STD-464C《系统电磁环境效应要求》和 MIL-STD-461F《分系统与设备的电磁干扰特性控制需求》等相关标准外^[10-12], 专门涉及水面舰船 EMP 防护及试验要求的美军标当属 2016 年 1 月最新发布的 MIL-STD-4023《军用水面舰船的 HEMP 防护》。该标准给出了基于海军水面舰船性能的 EMP 防护标准规范。

MIL-STD-4023 主要内容包括前言、目录、范围、应用文件、定义、一般要求、具体要求、注释和附录等章节。主要涉及军用水面舰船 HEMP 防护的技术

要求、性能标准和测试程序; HEMP 防护子系统的一般和具体要求; EMP 耦合和加固分配、分析; 设备抗扰度测试; 防护元件性能测试; 全舰船验证试验和加固维护/监测试验^[13]。

MIL-STD-4023 的核心要求是: 达到 6 dB 或 20 dB 的加固裕度; 相关的 HEMP 防护子系统可通过授权采购和生产, 但设计需求必须符合基于性能的要求和标准; 在舰船开发过程中, 要求进行 HEMP 防护子系统测试, 并于海上试航期间在作战任务条件下通过全舰船威胁的三级 HEMP 验证试验。

3.1 一般要求

MIL-STD-4023 的“一般要求”部分, 给出了标准的关键要素及为演示验证军用水面舰船在一次 HEMP 事件中能够生存而确定的一般性试验与报告要求。其中, MIL-STD-4023 关于一般性试验分类是指: 在舰船建造和舰船系统/子系统开发过程中进行有限的一系列测试, 以确保通过全舰船验证测试的风险最小(如图 5 所示)。

3.2 具体要求

MIL-STD-4023 舰船加固裕度水平和试验分类的详细要求见表 1。

3.3 舰船 HEMP 试验的三个阶段

MIL-STD-4023 规定舰船 HEMP 试验包括以下三个主要的测试阶段。

1) 开发试验 (Developmental Testing): 证明 HEMP 防护子系统组件满足分配的性能要求。

2) 全舰船验证试验 (Full-Ship Verification Testing): 舰船在运行期间暴露于模拟的 HEMP 威胁环境时, 验证舰船执行任务能力没有降级, 并满足加固裕度要求(如图 6 所示)。

3) 寿命周期试验 (Life Cycle Testing): 在部署寿命周期内实施加固维护/监测计划, 以维持 HEMP 防护子系统性能, 并按照要求重新进行验证试验。

其中, 关于全舰船验证试验, MIL-STD-4023 指出: 需要通过全舰船 EMP TLS 测试来支持水面舰船的生存能力评估, 并列出了全舰船验证试验包括三种类型。

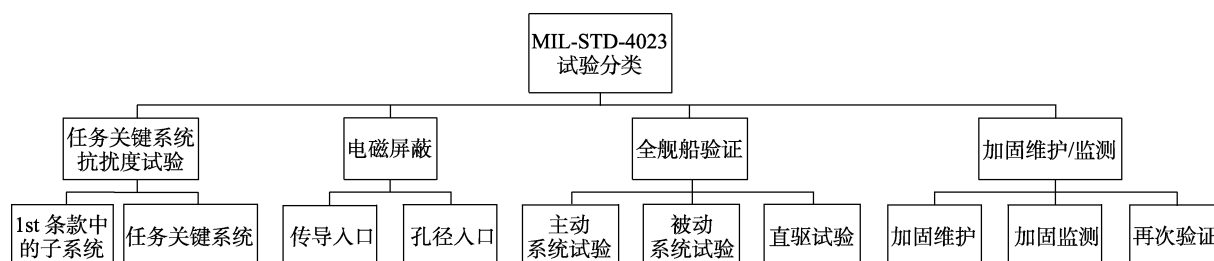


图 5 MIL-STD-4023 中关于试验的分类
Fig.5 The classification of tests in MIL-STD-4023

表 1 MIL-STD-4032 舰船加固裕度水平和试验分类的详细要求
Tab.1 Detail requirements on reinforcement margins and experiment classification of MIL-STD-4032 ships

项目	舰船加固裕度水平等级	
	20 dB	6 dB
甲板下子系统抗扰度	根据 CS116 与 RS103 内容，经重要改进后再次进行*	
甲板上子系统抗扰度	根据 CS116 与 RS105 内容，经重要改进后再次进行*	
任务关键系统抗扰度试验	根据威胁级模拟器内容，经重要改进后再次进行*	
舰船电磁屏蔽性能	每份加固指标分配报告中应包括关于所有屏蔽接地适配器、非线性 PPD 及可控孔缝的内容	
舰船验证试验	主动系统试验、被动系统试验、直驱试验、针对首次生产的舰船	
加固维护 / 监测	加固维护 / 监测计划要求	
再次验证试验	所选舰船每 7 年或经重要改进后实施一次**	

*：甲板上 GFE/CFE 上舰安装前应当按照相关标准要求演示验证三级抗扰度
**：如果某艘舰船经过一次改装或重要改进，并经过再次验证试验，7 年周期重新开始计算

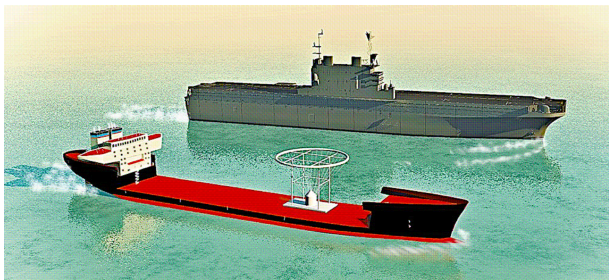


图 6 全舰船 EMP 试验概念图
Fig.6 Concept map of full ship EMP experiment

- 1) 主动系统试验 (Active System Test, AST) : 确保没有关键任务故障, 识别有缺陷的设备或错误的安装实施。
- 2) 被动系统试验 (Passive System Test, PST) : 表征残余的内部瞬态应力, 以外推至威胁级, 并加上裕度, 用于脉冲电流注入测试。
- 3) 直接试验 (Direct Drive Test, DDT) : 通过脉冲电流注入来演示残余的内部瞬态电流加上裕度不会导致任务关键系统的关键故障; 通过试验后检查、性能校验和响应数据分析来证明防护装置不会因为威胁相关 (威胁与加固裕度) 的瞬变而受损或降级; 为加固维护/监测计划的基线数据和舰船的 HEMP 加固评估提供数据; 根据需要更新加固指标分配报告。
- 综上所述, 美国海军水面舰船 EMP 防护及试验标准具有较强的技术参考价值, 全面地涵盖了美国海军当前及未来舰船 EMP 生存能力的试验要求。将有效推动美国海军全舰船 EMP 生存能力试验与鉴定的发展, 特别是将推动全舰船 EMP 试验装置的研发。

4 试验基础设施资源需求

MIL-STD-4023 定义了评估海军水面舰船 HEMP-E1 生存能力的要求: 从施工阶段的试验开始, 历经主动和被动系统试验, 以威胁级辐照试验结束, 并可能进行“高裕度”系统脉冲电流注入试验。目前还

没有按照 MIL-STD-4023 标准建造的舰船, 特别是还没有满足 MIL-STD-4023 测试要求的威胁级辐照器。这直接导致其未来水面舰船采办计划 (如 DDG 51) 中还没有进行全舰船 EMP 试验的安排。另外, 现有的美国海军水面舰船始建于 20 世纪 70 年代, 而当前舰船的施工技术已发生了巨大变化, 舰载系统不断升级和改进, 导致现有舰船难以按照 MIL-STD-4023 中定义的方法开展 HEMP 评估。在美国军方看来, 这一现状主要症结在于美国海军用于水面舰船 EMP 评估的试验基础设施资源不足。

4.1 美国海军未来全舰船威胁级电磁脉冲模拟器参数

美国国防部国防威胁降低局认为: 使用全舰船 EMP TLS 进行的测试, 是演示验证舰船防护威胁级 HEMP 并保障海军要求任务的最佳方法。MIL-STD-4023 和《DDG 51 舰船规范》中明确了有关舰船 EMP 试验的要求, 并认可了全舰船 EMP TLS 是军舰 EMP 威胁生存能力保障所必须的。同时, 全舰船 EMP TLS 的海上测试也将通过为 HEMP 建模提供测试数据和为舰员提供真实的 HEMP 训练场景来支持海军任务保障, 利用此项能力演示验证全舰船 EMP 的生存能力, 并保证美国的核威慑态势。因此, 全舰船 EMP TLS 成为美国海军水面舰船 EMP 评估试验基础设施资源需求的最重要硬件设备之一。

事实上, 早在 20 世纪 80 年代, 美国海军就建造了舰船电磁脉冲辐射环境模拟器 EMPRESS II (Electromagnetic Pulse Radiation Environment Stimulation for Ships), 并于 20 世纪 90 年代开展过针对全舰船的大型试验, 但在试验后不久被拆除 (图 7 中军舰为基本型 IV“宙斯盾”巡洋舰“Anzio”号, 其下方为第二代舰船 EMP 辐射环境模拟器 EMPRESS II^[14])。直到 2014 年 11 月 4 日, 美国国防威胁降低局发布了用于舰船的 EMP TLS 信息征询通知, 透露出未来新的全舰船 EMP TLS 参数信息。该通知内容

表明,国防威胁降低局数年前就重新考虑建造用于美国海军舰船的 EMP TLS, 并已有初步规划。



图7 美国海军在切萨皮克湾进行全舰 EMP 试验

Fig.7 Full ship EMP experiment carried by US navy in the chesapeake bay

美国国防威胁降低局提出的该模拟器主要组件包括脉冲源、辐照天线、支持保障设备(脉冲源诊断、试验空间内的自由场诊断等),并特别提出该模拟器能够利用垂直极化 EMP 辐照一艘航空母舰。具体参数及要求如下。

1) EMP TLS 能够辐照航空母舰,其产生的辐射场于舷侧入射,并与水线垂直。

2) EMP TLS 波形规范,与 MIL-STD-464C 图 A-3 中给出的脉冲波形相同(如图8所示^[11])。

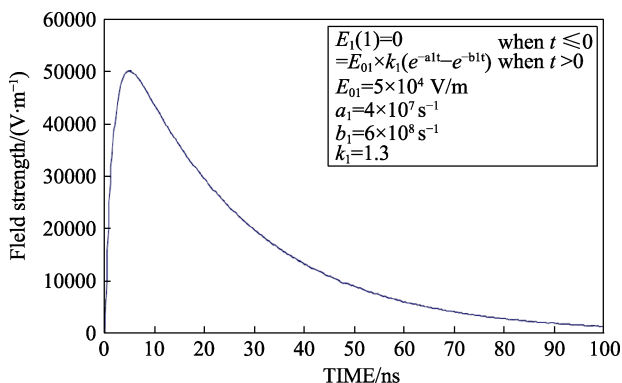


图8 MIL-STD-464C 中 EMP 时域波形

Fig.8 EMP time domain waveform in MIL-STD- 464C

3) EMP TLS 的试验空间定义: EMP 入射到核动力航空母舰的舷侧。高度约 76.2 m(水线至桅杆顶部),深度约 76.81 m,长度(舷侧)约 335.28 m。

4) 在 EMP TLS 试验空间内,所有三个波形参数(如峰值电场 N_1)变化范围不会超过 2 倍($N_{1\max} - N_{1\min} < 2N_1$),即每一个参数在试验空间内的最大变化范围为 2:1。

5) EMP TLS 将被安装于可在开阔海域行驶的驳船上,具体环境要求待定。

6) 需要用于测量 EMP TLS 性能的仪器。

7) 需要能够测试航空母舰上 100 个测试点响应的仪器设备,以及相应的具有 10 kHz~1 GHz 带宽的 100 个同步数字化通道。

由于相关信息较少,因此关于该全舰船 EMP TLS 的具体信息及后续发展尚未可知。可以确定的是,建造这样的模拟器的技术难度和成本相当巨大。美国国防威胁降低局与海军海上系统司令部估算,建造一套具备相应能力的全舰船 EMP TLS,成本约为 4900~5400 万美元。一旦开始运行,前 9 次试验的成本约为 1750~1860 万美元。

4.2 其他试验基础设施资源需求

尽管全舰船 EMP 试验如此重要,由于受到目前能力与条件的限制,在全舰船 EMP TLS 尚未建成前,美国海军需要开发其他相关试验方法和技术来满足现阶段 EMP 试验需求。2016 财年,美国海军海上系统司令部已指示海军 EMP 计划办公室开发一种利用一台 LLCWI 对待测舰船进行测试的方法,这将有助于满足近期试验要求。

在此之后,为进一步确定美国海军在水面舰船上开展早期高空电磁脉冲(HEMP E1)测试的试验资源需求,为相关研究提供信息,2017 年 11 月 15 日,美国陆军部合同司令部发布了题为《用于海军水面舰船 HEMP 评估的试验基础设施资源需求》信息征询书。该信息征询书提出的关于水面舰船 EMP 试验的其他基础设施资源需求主要涉及以下五个方面。

1) 建造 LLCWI 扫频辐照系统。作为 EMP TLS 的替代品,LLCWI 应覆盖 100 kHz~1 GHz 的频率范围,并且辐射场最大范围可覆盖 152.4~335.28 m,高度从舰船水线以上至最高点达 76.2 m。LLCWI 的垂直和水平极化波需要使用单独的天线或单个多极天线,输出场强至少为 1 V/m,而舰上的变化限于 ± 6 dB。辐照器必须能够进行陆基或海基测试,待将来的选址决定。该系统应包括辐照器电源、辐射场条件控制、精确的频率参考以及与舰载电流探头实时协调所需的所有电子元件,以实现较高的信噪比。

2) 建设基于历史试验记录的水面舰船 HEMP 测试数据库。军方已有的 HEMP 舰船测试数据与 20 世纪 90 年代国防威胁降低局“AIRBASE”试验数据一样,存储在多个不同的位置,且数据格式迥异。由于绝大多数水面舰船 HEMP 试验数据位于计算机外围存储设备上(如磁盘等),导致目前无法使用。因此,需要将历史测试报告和电子文件转换为计算机数据库(不需要分析软件),以供将来测试人员和评估人员分析 HEMP 与舰船和舰船系统的相互作用,并基于这些试验数据建设新的数据库。

3) 研发针对非 MIL-STD-4023 要求的水面舰船 EMP 评估方法。当前,美国海军水面舰船的施工技术已发生了巨大变化,舰载系统不断升级和改进,但

美国海军舰队中还没有按照美军标 MIL-STD-4023 建造的水面舰船。因此, 美国海军认为其需要一种新的方法来支持现有水面舰船的 HEMP 评估。覆盖现有(按照非 MIL-STD-4023 标准建造的)舰船的新 HEMP 评估方法必须考虑 HEMP 与水面舰船相互作用的关键威胁可关联参数, 适用于替代辐照方法(如幅度连续波、步进频率天线), 并定义相关 HEMP 数据的收集、推断和分析, 以供评估。新评估方法必须适用于长度在 152.4~335.28 m 之间, 波束覆盖水线至舰船最高点距离在 30.48~76.2 m 之间的大型水面舰船。

4) 建设三维海基辐射场测绘阵列。精确地测绘辐射场是 HEMP E1 辐照试验的关键。对于拥有电子设备且大面积分布的大型系统来说, 测绘精确的辐射场更为重要和困难。水面舰船生存能力的成功评估要求具备辐射场三维测绘能力, 但美国海军目前缺乏这样的数据采集系统。因此, 美国海军提出一种海基可定向控制的辐射场传感器阵列(电场探头或磁场探头), 可提供实时多维辐射场测绘, 要求必须覆盖与航空母舰相当的有效空间, 并具有足够的灵敏度和空间分辨率, 以支持外推高幅度脉冲或 LLCW 电缆耦合测量。

5) 研究 LLCW 仪器、数据采集和分析。美国海军要求在使用上述辐照器或其他新颖方法的情况下, 对仪器设备、舰船屏蔽效能进行测量, 获取和分析的能力应符合 MIL-STD-4023 和 MIL-STD-188-125-1 标准要求。如整个船体内电场强度应该在 100 kHz~1 GHz 的整个频谱范围内大于 1.0 V/m; 传感系统必须在甲板和甲板下的分散环境中运行, 并在有其他人造和舰载电磁噪声的情况下准确测量场强和电流。

6) 其他需求。在传感器和测量方面, 美国海军要求测量技术和相关硬件, 能够测量电场、磁场、电缆束上的电流以及甲板和甲板下分散环境中单根电缆上的电流, 并认为无论是时域还是频域, 标量和/或矢量诊断能力, 都有助于更好地评估舰船对从 100 kHz~1 GHz 的 HEMP E1 脉冲波形的屏蔽效能。特别关注在信号接近环境噪声较低频率(<1 MHz)的更深层甲板下, 增强评估屏蔽效能的硬件或技术。在物理属性方面, 美国海军预计, 试验中需要跨越几十个舱室的多个传感器节点(数量约为 500 至 1000)才能配备整艘军舰。另外, 测试一艘海军舰船所需的时间(约 2 周)成本相对昂贵。因此, 美国海军认为其要解决的问题在于: 传感器诊断能力如何能够支持这种大规模节点部署, 并且最大限度地减少配置设备和测试整个舰船所需的时间; 如何收集和处理来自所有这些物理分布的传感器节点的数据, 以及如何实现节点与中央处理终端(如果适用)之间的通信; 在低于甲板和通过防水封闭舱壁的情况下, 该通信方式如何实现; 减少或避免必须绕过复杂通道的长距离光缆

布线方法; 解决数据采集如何正确触发/计时以及最终如何收集。

5 结语

尽管美国军方在水面舰船的 EMP 防护研究方面已经积累了几十年的经验, 开展过多次全舰船 EMP 试验, 验证了相关技术和方法, 但受到现代舰载电子器件和系统的升级换代、建船技术工艺改进等因素的影响, 美国海军认为无论是进行有限的测试, 外推整艘舰船的 EMP 生存能力水平, 还是通过建模与仿真提供有关舰船生存能力信息, 其目前都不具备对整艘舰船 EMP 生存能力进行评估的能力。主要原因在于其用于水面舰船电磁脉冲评估的试验基础设施资源不足。

全舰船 EMP TLS 是其中关键试验资源之一。无论是美国化学、生物、放射性、核生存能力监督小组, 国防部国防威胁降低局, 国防部作战试验与鉴定局, 还是美军标 MIL-STD-4023 及新一代舰船的建造规范《DDG 51 舰船规范》, 都认可了全舰船 EMP TLS 是军舰 EMP 威胁生存能力保障所必须的。美国国防部国防威胁降低局核生存能力部门主任 Michael Rooney 及美国海军水面战中心防护系统部 EMP 部门主管 Michael E Jump 对 EMP TLS 的评价很明确^[15]: 使用 EMP TLS 是测试水面舰船以确保其具备 HEMP 生存能力的最佳方法, 没有其他测试或理论分析能够有效地保证舰船能够在 HEMP 发生期间和之后完成其任务。

就目前相关技术现状来看, 美国军方通过制定 EMP 防护军标 MIL-STD-4023、开展小型舰船 EMP 试验、研发 LLCWI 替代试验方法等, 筹划发展全舰船 EMP 生存能力的评估能力。虽然相关能力发展和设施建造的时间表尚未可知, 但根据以往获得的数据和结果, 美国海军正在按照相关军标和规范所要求的, 逐渐向开展全舰船 EMP 生存能力评估试验目标靠近。

参考文献:

- [1] GILMORE M J. Director, Operational Test and Evaluation. FY 2015 Annual Report[R]. Virginia: Department of Defense Operational Test and Evaluation, 2016.
- [2] GILMORE M J. Director, Operational Test and Evaluation. FY 2016 Annual Report[R]. Virginia: Department of Defense Operational Test and Evaluation, 2016.
- [3] BEHLER F R. Director, Operational Test and Evaluation. FY 2017 Annual Report[R]. Virginia: Department of Defense Operational Test and Evaluation, 2018.
- [4] Electromagnetic Pulse (EMP) Threat-level Simulator

- (TLS) for Ships[EB/OL].(2018-12-06). <https://www.fbo.gov/spg/ODA/DTRA/DTRA01/HDTRA1-15-RFI-EMPTLS/listing.html>.
- [5] Department of Defense. DoD Instruction 3150.09: The Chemical, Biological, Radiological, and Nuclear (CBRN) Survivability Policy[EB/OL]. (2018-12-06). <http://www.esd.whs.mil/Portals/54/Documents/DD/issuances/dodi/315009p.pdf>.
- [6] CORBETT B, PARTAK J. The U S Navy's New Electromagnetic Pulse Program—Resurrecting the Capability in a New World[J]. Chips, 2010, 1-3: 14-15.
- [7] Department of the Navy. Department of the NAVY Fiscal Year (FY) 2010 Budget Estimates. Research, Development, Test & Evaluation, Navy[R]. Department of the Navy, 2009.
- [8] MARTIN S. Electromagnetic Pulse Experiments on the Ex-united States Coast Guard Cutter MONHEGAN[C]// 2017 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility & Signal/Power Integrity (EMCSI). 2017.
- [9] Request for Information-High Altitude Electro Magnetic Pulse (HEMP) Evaluations[EB/OL]. (2018.12.6). <https://www.governmentcontracts.us/government-contracts/opportunity-details/NBD00159790694125454>.
- [10] 李超, 吴垚, 袁彝. 美国水面舰船电磁脉冲防护标准浅析[J]. 装备环境工程, 2018, (3): 71-75.
- LI Chao, WU Yao, YUAN Ben. Protective Standards for Electromagnetic Pulse of American Surface Ship[J]. Equipment Environmental Engineering, 2018, 15(3): 71-75.
- [11] MIL-STD-464C, Electromagnetic Environmental Effects Requirements for Systems[S].
- [12] MIL-STD-461F, Requirements for the Control of Electromagnetic Interference Characteristics of Subsystems and Equipment[S].
- [13] SCOTT W. Overview of MIL-STD-3023 HEMP Protection of Military Aircraft and MIL-STD-4023 HEMP Protection of Military Surface Ships[C]// 2017 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility & Signal/Power Integrity (EMCSI). 2017.
- [14] IX-513 during Shakedown in the Chesapeake Bay with USS Anzio (CG-68), Circa 1993[EB/OL]. (2018.12.6). <http://www.navsource.org/archives/04/1168/040168.htm>
- [15] ROONEY M, JUMP M, RAINONE H, et al. DoD Policy, Requirements, and Test Resources to Verify Protection of Military Surface Ships for High-altitude Electromagnetic Pulse Survivability (Abstract)[C]// Combat system Symposium. Washington D C: The American Society of Naval Engineers, 2016.