

环境试验与评价

系统电磁环境效应要求和试验评估研究

张勇, 赵炳秋, 何纯全, 吴文力

(海军研究院, 北京 100161)

摘要: **目的** 提高武器系统适应日益复杂的电磁环境, 提升装备的作战效能, 提出合理的系统电磁环境效应要求, 并开展试验评估, 以验证指标是否得到满足。**方法** 采用基于使用需求和标准分析的方法, 针对系统级电磁环境效应的复杂性和特殊性, 通过对电磁环境效应要求和标准的分析, 提出采用建模仿真, 预测电磁环境, 开展缩比模型、1:1 模型试验验证等方法确定电磁环境效应指标和要求。**结果** 提出了系统内自兼容、系统间兼容性和系统与外部电磁环境 3 大类 14 小类的系统电磁环境效应要求, 分析了每项电磁环境效应要求对四大类典型系统的适用性, 提出了开展系统电磁环境效应试验的方法和流程, 为开展装备系统级电磁环境效应工程研制、试验和评估提供了技术支撑。**结论** 采用提出并确定系统电磁环境效应要求和试验评估方法, 实施武器系统的电磁环境效应控制和评估, 对装备使用性能的充分发挥具有十分重要的意义。

关键词: 电磁环境效应; 武器系统; 建模仿真

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2019.09.011

中图分类号: U655.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2019)09-0063-06

Study on Requirements and Test Evaluation of Electromagnetic Environmental Effects for Systems

ZHANG Yong, ZHAO Bing-qiu, HE Chun-quan, WU Wen-li
(Naval Research Academy, Beijing 100161, China)

ABSTRACT: Objective In order to improve the weapon system to adapt to the increasingly complex electromagnetic environment and to enhance the operational effectiveness of the equipment, it is necessary to put forward reasonable requirements for the electromagnetic environment effect of the system, and carry out an experimental evaluation to verify whether the target is satisfied or not. **Methods** In view of the complexity and particularity of the electromagnetic environment effect at the system level, based on the analysis of the requirements and standards of the electromagnetic environment effect, the method of modeling and simulation was used to predict the electromagnetic environment, which was based on the method of using requirement and standard analysis. In this paper, the model of 1:1 was used to test and verify the electromagnetic environmental effects. **Results** In this paper, The requirements of 3 main categories and 14 sub-categories of system electromagnetic environment effect were put forward, such as system self-compatibility, inter-system compatibility and system and external electromagnetic environment. The applicability of each requirement to on four kinds of typical systems was analyzed. The method and flow of system electromagnetic environmental effect test were put forward, which provides provided technical support for the development, test and evaluation of electromagnetic environmental effect engineering of equipment system level. **Conclusion** It is of great significance to put forward and determine the requirements of electromagnetic environment effect of system and test evaluation method to con-

收稿日期: 2019-07-24; 修订日期: 2019-08-19

基金项目: “十二五”总装备部预研项目 (51333010102)

作者简介: 张勇 (1975—), 男, 安徽人, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为装备系统电磁兼容论证、评估、试验和标准。

trol and evaluate electromagnetic environment effect of weapon system. It is of great significance to and give full play to the performance of equipment.

KEY WORDS: electromagnetic environmental effects; weapon system; modeling and simulation

信息化条件下联合作战, 战场电磁环境日益复杂, 电磁环境效应对装备的影响和危害愈发凸显。装备面临的电磁环境既有自然的, 又有人为的; 既有外部的, 又有内部的; 既有有意的、又有无意的。复杂的电磁环境下, 武器系统中任何一个环节出现电磁不兼容现象, 都将导致武器装备作战效能的大幅降低, 使装备作战效能大打折扣, 甚至产生严重后果, 电磁环境效应问题更加突出。

电磁环境已成为战场环境的重要构成要素, 电磁环境效应要求是武器装备在复杂电磁环境下是否具备战斗力的关键。为了解决日益严重的电磁环境效应问题, 美军制定了一系列的电磁环境效应标准和指令指示等标准文件, 以实施武器装备的电磁环境效应控制和认证。在美军控制电磁环境效应和装备采办过程中有相应的 DoDD 3222.3 国防部电磁环境效应程序等指令指示和 MIL-HDBK-237D 军用操作手册支持, 为武器装备达到电磁兼容性提供指导和管理指南。在随后的几十年里, 系统级电磁兼容性理论和试验措施被不断的丰富和发展。美国系统级军用电磁兼容性标准经历了 MIL-STD-1385《预防电磁辐射对军用系统危害的一般要求》和 MIL-STD-1818, 现在发展到 MIL-STD-464C《系统电磁环境效应要求》^[1]。因此, 开展电磁环境效应要求研究, 掌握电磁环境效应要求, 加强电磁环境效应试验评估, 对于提高武器装备电磁兼容性和适应复杂电磁环境的能力具有十分重要的意义。

1 开展系统级要求和试验评估研究的重要性

电磁环境效应是研究电磁环境对设备、系统及平台的综合影响, 分析系统对电磁环境的适应能力。它涉及了所有与之相关的电磁现象, 不仅包含了“电磁兼容性”的全部技术内容, 而且增加了雷电、静电等自然电磁环境及电磁武器等新电磁现象, 增加了人员、军械、燃油等电磁环境受体, 增加了电磁防护和电磁易损性等技术内容。电磁环境效应涵盖了武器装备与电磁环境的所有关联关系^[2]。

系统级是相对设备而言。设备电磁兼容性测试中, 被试品是单一设备或分系统, 其设备构成、线缆数量、耦合关系相对简单。系统级则包括了较多单设备和分系统。系统级试验还需面对相对设备级更多的线缆等互联问题, 还要考虑对使用环境的适应性, 包括舰面环境、系统间和编队环境等。因为对装备提出

的性能要求是适用于装备使用工况, 所以对使用要求的装备, 在系统级电磁兼容性试验中就应考核此性能。

1) 武器装备的电磁环境效应最终是在整个装备系统层面进行鉴定考核, 只有通过系统级的全面试验和评估, 才能判定是否满足研制总要求规定。

2) 从板级、设备级到分系统级的设计、防护和试验考核是为系统级提供良好的基础。

3) 系统级的电磁环境效应试验和评估才是装备能否成功研制和适应复杂电磁环境的关键所在。

2 系统电磁环境效应要求的发展

美国是世界上最早提出电磁环境效应概念并开展研究的国家, 其系统电磁环境效应要求主要以标准文件固化下来, 对美军相关标准文件进行研究分析, 可以掌握其对系统提出的电磁环境效应要求。分析美军相关标准化文件, 这些文件包括军用标准规范、军用手册、指令指示等类别, 涉及武器装备系统、分系统、设备的电磁兼容性管理要求、技术要求和试验方法等内容。

经分析, 美国用于电磁环境效应要求分布在各指令、操作手册和标准中。电磁兼容及防护指标以国防部、海军部等有关电磁环境效应指令指示、MIL-HDBK-237D 管理手册和《系统电磁环境效应要求》为主线。在上述文件中提出技术、管理上的电磁兼容性要求, 并以直接引用的电磁环境效应标准为支撑。引用的电磁环境效应标准提出具体的电磁兼容性要求和指标, 在技术要素和管理、试验方面都有相应的要求^[3]。

从 20 世纪 30 年代的射频干扰, 发展到 20 世纪 60 年代的电磁干扰和电磁兼容, 到 20 世纪 90 年代初的“电磁环境效应”已引起人们的关注。1950 年美军颁布了第一个系统级电磁兼容标准——MIL-E-6051《系统电磁兼容性要求》, 从此美军武器装备研制有了顶层的电磁兼容性要求。该标准先后经过了 3 次改版, 至 1997 年作废, 使用了 47 年。1992 年美军颁布的 MIL-STD-1818《系统电磁环境效应要求》, 是第一个系统级电磁环境效应要求标准。1997 年美军颁布了 MIL-STD-464《系统电磁环境效应要求》, 取代了 MIL-STD-1818 和 MIL-E-6051 标准。MIL-STD-464 标准在真正意义上统一和规范了电磁环境效应所涉及的内容和要求, 是电磁环境效应研究领域标准化上的一个重要标志^[4]。该标准也经历了 3 次修订, 现行有效的是 2010 年颁布的 C 版本, 见表 1。

我国使用的电磁环境效应的概念与美国基本一

表 1 美军系统级电磁环境效应标准的发展过程

代号	名称	版次	颁布时间
MIL-E-6051	系统电磁兼容性要求	原版	1950 年 3 月 28 日
		A 版	1953 年 1 月 23 日
		C 版	1960 年 6 月 17 日
		D 版	1967 年 9 月 7 日
MIL-STD-1818	系统电磁环境效应要求	原版	1992 年 5 月 8 日
		A 版	1993 年 10 月 4 日
MIL-STD-464	系统电磁环境效应要求	原版	1997 年 3 月 18 日
MIL-STD-464A	系统电磁环境效应要求	A 版	2002 年 12 月 19 日
MIL-STD-464B	系统电磁环境效应要求	B 版	2010 年 10 月 1 日
MIL-STD-464C	系统电磁环境效应要求	C 版	2010 年 12 月 1 日

致，研究的内容基本相同，但在概念推出的时间上比美国略晚。1985 年颁布了 GJB 72—1985《电磁干扰和电磁兼容性名词术语》，首次对电磁干扰、电磁兼容等给出了定义。2002 年颁布的 GJB 72A，正式给出了电磁环境效应定义，等效采用了美军标 MIL-STD-464A，尚未包括高功率微波、静电放电等。2015 年编制完成的国军标《系统电磁环境效应试验方法》

已等效采用了美军标 MIL-STD-464C 的电磁环境效应定义。

1992 年颁布了第一个系统级电磁兼容性标准——GJB 1389《系统电磁兼容性要求》。为适应复杂电磁环境对装备的新要求，对该标准进行了修订。2005 年颁布了 GJB 1389A《系统电磁兼容性要求》，名称虽然仍成为“系统电磁兼容性要求”，但明确引入了电磁环境效应的概念，指标要求和主要技术内容涵盖了当时电磁环境效应领域的全部技术内容，实质上就是电磁环境效应^[5]。2017 年，以 464C 为基础，对 GJB 1389A 进行了修订，其名称和要求内容均明确是系统电磁环境效应要求。

3 系统级电磁环境效应要求

3.1 确定要求的方法

系统电磁环境指标要求的确定应优先采用实测和预测的数据，通常可采用如下方法（见图 1）：分析系统的使命任务和作战使用要求；结合以往工程经验；采用建模仿真，预测电磁环境，开展电磁兼容分析；开展缩比模型、1：1 模型等试验等方法；进行军用标准分析，开展相关的电磁环境效应分析，确定

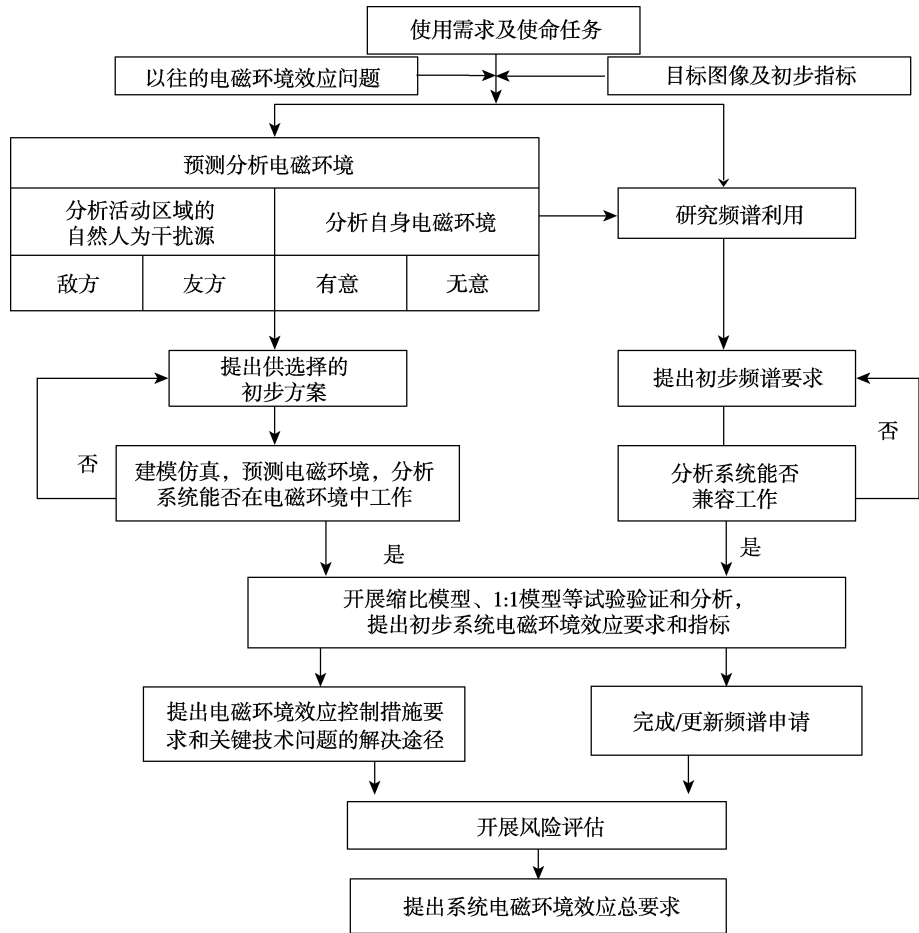


图 1 系统电磁环境效应指标确定方法流程

装备具体的指标项目和量值。

通过对电磁环境效应要求的内涵以及相互之间关系的分析,系统内所有分系统和设备之间应是电磁兼容的,系统与系统外部的电磁环境也应兼容。装备的电磁环境效应主要涉及系统内和系统间及系统与外部环境三大部分的研究内容,其中系统内电磁环境效应是分析和检验系统自身的电磁适应性,系统外电磁环境效应则反映了武器系统对外部电磁环境的适应能力。其组成如图 2 所示。

1) 系统自兼容:对于集多种功能于一体的系统,系统中大功率发射设备、高灵敏度接收设备共处同一平台,其自身的电磁兼容性要求是面临的首要和基本问题。包括系统内电磁兼容性要求、安全裕度、电搭接及设备 and 分系统电磁干扰等要求。其中系统内电磁兼容性要求一般还包括船壳引起的互调干扰、内部电

磁环境、电源线瞬变和二次电子倍增等。

2) 系统间电磁兼容:系统不因其他系统中的电磁干扰和电磁危害而产生明显降级的状态。包括频谱兼容性、防信息泄漏、电磁辐射危害、外部接地和发射控制等要求。

3) 系统与外部电磁环境:装备会直接暴露在自然环境中,系统必须适应自然环境要求,包括雷电、静电等要求。同时,确保装备实战环境下的生存力是装备具备作战能力的关键,包括外部射频电磁环境、电磁脉冲、高功率微波要求。

3.2 各要求对系统的适用性

对于具体系统,其系统电磁环境效应要求取决于其所要工作和使用的电磁环境。具体对各系统的适用性可参见表 2,通常选用时可考虑以下方面。

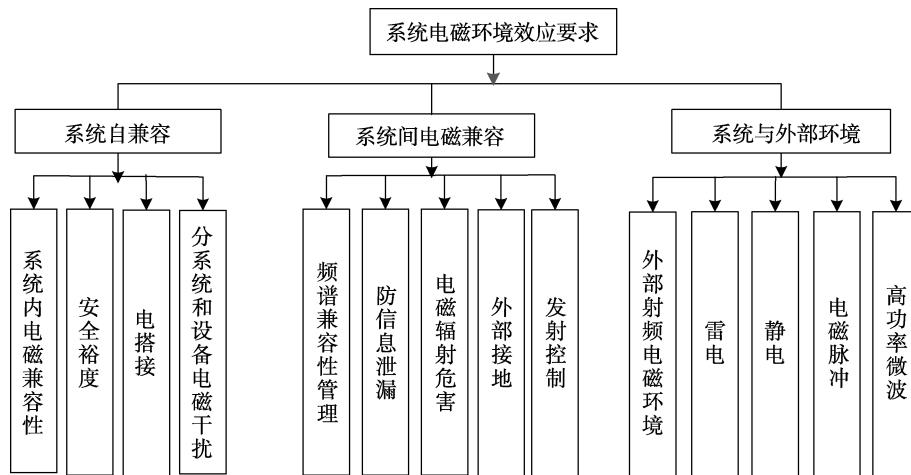


图 2 系统电磁环境效应要求组成架构

表 2 各具体要求对系统的适用性

序号	系统电磁环境效应要求	飞机	舰船	空间和运载	地面
1	系统内电磁兼容性要求	A	A	A	A
1.1	内部电磁环境	A	A	A	A
1.2	船壳引起的互调干扰	/	A	/	/
1.3	电源线瞬变	A	A	A	A
1.4	二次电子倍增	/	/	A	/
2	安全裕度	A	A	A	A
3	分系统和设备电磁干扰	A	A	A	A
3.1	舰船直流磁场环境	/	Y	/	/
4	电搭接	A	A	A	A
5	频谱兼容性管理	A	A	A	A
6	防信息泄漏	A	A	A	A
7	发射控制	A	A	S	S
8	电磁辐射危害	A	A	A	A
9	外部接地	A	A	A	A
9.1	飞机接地插座	A	A	S	/
9.2	服务和维护设备接地	A	A	A	A

续表						
序号	系统电磁环境效应要求		飞机	舰船	空间和运载	地面
10		外部射频电磁环境	A	A	A	A
11		雷电	A	S	A	A
12		静电电荷控制	A	A	A	A
12.1	系统与外部 电磁环境	直升机和空中加油机	A	A	S	/
12.2		沉积静电	A	/	A	/
12.3		军械分系统	A	A	A	A
13		电磁脉冲	A	A	A	A
14		高功率微波	A	A	A	A

注：“A”表示该要求适用，“S”表示由订购方规定是否适用，“/”表示不适用。以上要素可根据平台要求的不同进行剪裁

- 1) 首先系统自身的自兼容要求是必须满足的首要
- 和基本要 求，就是通常所说的系统要实现自兼容。
- 2) 其面临的电磁环境和工作模式是选择单项要求
- 的根本条件。如船壳引起的互调干扰、舰船直流磁场环境
- 是舰船系统必须选择的要求，但内部电磁环境应该是
- 飞机、空间和运载、地面系统也必须满足的要求。
- 3) 如果系统可能处在多种工作条件和多个环境
- 中，应选择最严格的要求。如导弹在存储、安装和发
- 射后所面临的电磁环境不同，应选择最严酷的电磁环
- 境要求。

4 系统级电磁环境试验评估

系统电磁环境效应试验评估的目的就是为了验证系统的电磁环境效应要求是否得到满足，是对研制

要求符合情况的全面考核，需按照研制要求分解规划需要考核的试验项目和指标，以确保通过试验可以全面评估装备电磁环境效应的符合情况^[6]，证明系统在使用全过程中不会由于电磁环境的作用对它的使用性能和安全性造成影响。

4.1 确定试验方案的方法

试验方案确定应以实际系统使用的电磁环境为基础要求，紧密结合装备系统的使用工况和功能性能，综合考虑系统要求与各设备分系统测试结果，具体方法如图 3 所示。

4.2 试验流程

- 1) 系统安装，进行安装检查，确定安装是否正确（接地、搭接、缆线布置等）。

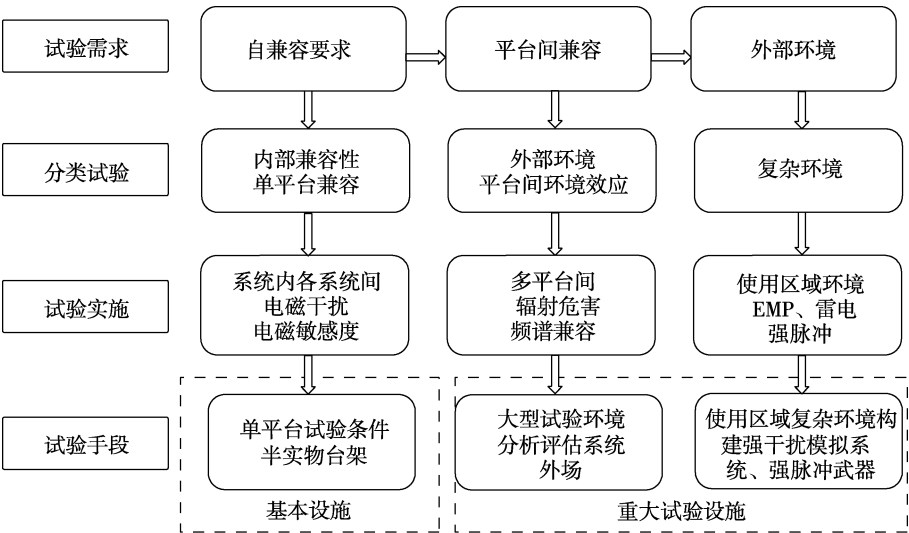


图 3 试验方案确定

- 3) 系统内试验，其目的是表明构成功能分系统的
- 设备（如通信系统、雷达系统、指控、动力等）在
- 一起能够正常兼容工作^[7]。
- 4) 平台/系统内试验和分析，其目的是验证在平台
- 或系统上的项目功能正常，从而平台/系统能执行任务。

- 该工作也将确认平台/系统内所有的分系统和设备都能
- 有效运作，而没有由于 E3 降低彼此的性能^[8]。
- 5) 整个平台或系统的试验和分析，确认所有分
- 系统和设备在一个能够代表使用场景的电磁环境中
- 都能展示出其作战性能，所有的项目都能运行^[9]。

4.3 试验评估

试验评估是基于仿真和测试等数据,依据规定的性能和指标,对系统的电磁环境效应性能进行分析、比对,并作出符合性评判结果的过程。评估是从建模和仿真、试验或使用得到定性或定量数据进行判断和分析的过程,一般方法如下。

1) 以设备、分系统的试验数据为基础,将每个试验项目的试验结果与研制要求或标准中规定的要求进行对比和判断。敏感度项目必须合格,电磁发射类项目若超标,必须整改,整改后仍不满足要求的,应在系统级试验时作为重点进行关注和测试,确保在系统试验时,设备、分系统每个试验项目符合使用要求。

2) 根据系统电磁环境效应各项试验结果,依据研制总要求或合同中规定的电磁干扰和敏感度判别要求,结合测试结果数据,判定系统是否出现干扰和敏感。若出现干扰和敏感,并导致系统性能降级、失效或故障等,则系统不能满足自兼容要求,应对干扰或敏感现象进行识别、分析和整改。

3) 综合全部试验数据,并通过层次分析等方法确定各要素对系统影响的权重^[10],通过综合加权结果,分析对系统使用的影响,评定试验结果是否满足要求,判定系统是否达到研制要求。

5 结语

开展系统电磁环境效应要求和试验评估研究,对装备性能和作战使用十分关键。通过对美军和国内电磁环境效应要求和标准的分析研究,针对系统级电磁

环境效应的特殊性和重要性,提出了确定电磁环境效应要求的方法,详细分析了系统内自兼容、系统间兼容性和系统与外部环境三大部分的系统电磁环境效应要求及对平台的适用性,提出了开展系统电磁环境效应试验的方法和试验流程,为开展装备系统级电磁环境效应工程研制、试验提供技术支撑。

参考文献:

- [1] 张勇,汤仕平,龚亚樵. 舰船电磁兼容性标准体系的构建[J]. 舰船科学技术, 2011, 23(3): 95-96.
- [2] MIL-STD-464C, Electromagnetic Environmental Effects Requirements for Systems[S].
- [3] MIL-HDBK-237D, Electromagnetic Environmental Effects and Spectrum Supportability Guidance for the Acquisition Process[S].
- [4] 汤仕平,张勇,万海军,等. 电磁环境效应工程[M] 北京:国防工业出版社, 2017
- [5] GJB 1389A—2005, 系统电磁兼容性要求[S].
- [6] 李明,刘澎. 武器装备发展系统论证方法与应用[M] 北京:国防工业出版社, 2004.
- [7] MERRILL S. Introduction to Radar Systems[M]. 第三版. 北京:电子工业出版社, 2006.
- [8] 汪鹏,张伟. 舰船短波天线隔离度的预测与分析[J]. 舰船电子工程, 2007(2): 194.
- [9] 吴晓平. 舰船装备系统综合评估的理论与方法[M] 北京:科学出版社, 2007.
- [10] 张勇,刘俊伟,李超,等. 舰船电磁兼容性评估指标体系及评估应用研究[J]. 舰船科学技术, 2014, 36(7): 103-104.