



国防科技图书出版基金

电磁环境效应工程

Electromagnetic Environmental
Effects Engineering

汤仕平 张勇 万海军 成伟兰 施佳林 著

E³



国防工业出版社

National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

电磁环境效应工程

Electromagnetic Environmental Effects Engineering

汤仕平 张勇 万海军 成伟兰 施佳林 著



国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

电磁环境效应工程 / 汤仕平等著. —北京:国防
工业出版社, 2017. 10

ISBN 978-7-118-11459-1

I. ①电… II. ①汤… III. ①电磁环境—环境效应—
研究 IV. ①X21

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 054969 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

三河市腾飞印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 22 字数 420 千字

2017 年 10 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 99.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010)88540777

发行邮购: (010)88540776

发行传真: (010)88540755

发行业务: (010)88540717

致 读 者

本书由中央军委装备发展部国防科技图书出版基金资助出版。

为了促进国防科技和武器装备发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。这是一项具有深远意义的创举。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在中央军委装备发展部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由中央军委装备发展部国防工业出版社出版发行。

国防科技和武器装备发展已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。开展好评审工作,使有限的基金发挥出巨大的效能,需要不断摸索、认真总结和及时改进,更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授、以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金 第七届评审委员会组成人员

主任委员 潘银喜

副主任委员 吴有生 傅兴男 赵伯桥

秘书长 赵伯桥

副秘书长 许西安 谢晓阳

委	员	才鸿年	马伟明	王小谟	王群书
(按姓氏笔画排序)		甘茂治	甘晓华	卢秉恒	巩水利
		刘泽金	孙秀冬	芮筱亭	李言荣
		李德仁	李德毅	杨伟	肖志力
		吴宏鑫	张文栋	张信威	陆军
		陈良惠	房建成	赵万生	赵凤起
		郭云飞	唐志共	陶西平	韩祖南
		傅惠民	魏炳波		

序

对电磁环境效应的控制是武器装备研制和使用中的关键技术之一,也是当前装备建设与发展中急需解决的一大难题。随着信息化装备的迅速发展,装备面临的电磁环境日趋复杂,电磁干扰、电磁易损性等问题愈发凸显,作为装备重要性能指标的电磁兼容性研究已扩展到电磁环境效应研究。

本书是作者及其研究团队多年来从事电磁环境效应研究及大量工程实践经验的结晶。本书紧密结合装备实际,从全寿命期的角度系统地论述了电磁环境效应工程。书中通过深入分析电磁环境效应内涵、电磁环境特性、电磁环境对装备的影响和电磁环境效应特点,阐述了装备电磁环境效应工程管理、控制技术和方法,重点论述了电磁脉冲和射频电磁场防护的基本原理和方法,构建了电磁环境效应工程技术体系。结合舰船平台电磁兼容性工程实践,围绕论证、试验评估和使用,全面地分析了装备电磁环境效应工作内容,给出了电磁环境效应论证、试验验证、评估、使用维护方法。针对大型武器平台论证、评估和研制的需要,论述了复杂系统电磁环境效应建模仿真方法,将指标和标准要求相结合,系统地分析了装备电磁环境效应标准和体系构建方法。本书注重理论与实践相结合,采用仿真、实测等多种方式验证了理论、技术和方法的科学性及有效性,建立的电磁环境效应标准体系、指标体系、试验评估方法体系,具有较强的创新性,对推动装备电磁环境效应技术领域的研究和工程实践具有重要的指导意义和工程应用价值。

本书从大型系统论证、研制、试验、评估和全寿命期使用角度阐述了电磁环境效应,内容涉及面广,论述具体全面,系统性和实用性强,学术思想新颖,是一部系统论述电磁环境效应及工程应用的专著。

本书对从事电磁环境效应、电磁兼容及防护工作的科研、工程技术和管理人员具有指导意义和参考价值,对我国电磁环境效应学科领域的研究和发展将起到重要的推动作用。



注:刘尚合 中国工程院院士。

前 言

电子信息技术广泛应用,装备信息化程度越来越高,同时电磁脉冲、高功率微波等新技术不断发展,使得装备面临的电磁环境日趋复杂,电磁干扰、电磁损伤等问题愈发凸显。随着信息技术的发展和对电磁环境认识的不断深入,作为装备重要性能指标的电磁兼容性的内涵已扩展到电磁环境效应。电磁环境效应研究电磁环境对人员、设备、系统和平台的工作能力的影响,包括电磁兼容性,电磁干扰,电磁易损性,电磁脉冲,静电放电,电子防护,电磁辐射对人员、军械和易挥发物质(如燃油)的危害等,包括所有电磁环境来源,如射频系统、超宽带装置、高功率微波系统、雷电和静电等产生的电磁效应。关于电磁环境效应的研究是伴随着解决装备实际使用中出现的問題而不断推进的,从射频干扰到电磁干扰,从电磁兼容到电磁环境效应,可以看出其发展都是实际应用和技术进步的结果,已逐渐形成一个开放的技术体系。

近年来,电磁环境效应及相关技术得到了极大的关注,越来越多的技术人员开展了电磁环境效应理论和方法的研究。但对于舰船、飞机等大型复杂系统,集多种设备于一体,涉及射频电磁场、电磁脉冲场、电磁安全性等多种效应,电磁环境效应是其研制和使用中急需解决的难题。究竟要考虑哪些电磁环境因素,电磁环境效应工作如何开展、如何考核评估、如何使用维护,是必须回答却又难以解决的问题。究其原因主要是缺乏科学的电磁环境效应控制方法、论证方法和指标,缺乏系统级电磁环境效应试验与评估方法和手段,缺少电磁环境和系统级电磁防护设计标准。

实践证明,在装备研制之后,在使用中出现电磁环境效应问题再来解决,不仅花费大量经费,还得不到最佳效果。电磁环境效应工作应贯穿于装备寿命期全过程。电磁环境效应工程就是系统地应用各种科学技术、管理措施和工程实践,控制电磁环境对装备效能影响或提高装备适应复杂电磁环境能力的系统工程。

本书总结了作者及其研究团队多年来从事装备电磁兼容和电磁环境效应的研究成果及大量的工程实践经验,结合仿真建模和多型装备实测数据的分析,并吸收了国内外电磁环境效应相关领域的先进经验和成果。全书共计 10 章。以大型复杂系统为对象,采用系统工程方法,围绕论证、评估和使用,结合工程实际,理论和

实践相结合,从全寿命期角度系统地阐述了电磁环境效应工程理论和技术,论述了电磁环境效应控制方法、论证方法、标准体系、指标体系、试验评估方法和仿真模型。

第1章介绍了电磁环境效应概念的发展演变,给出了电磁环境效应的基本概念、内涵和研究内容,分析了装备电磁环境效应特点、相关术语和概念之间的相互关系,概括了国内外研究进展及发展趋势。

第2章针对装备特点,详细分析了装备面临的电磁环境及其特性,给出了电磁环境的量化描述,阐述了电磁环境对装备的影响,为深入开展电磁环境效应研究提供理论基础。

第3章结合装备研制程序,论述了装备全寿命期电磁环境效应工程管理工作内容、工作流程和方法,给出了电磁环境效应文件类型和基本内容。

第4章分析了电磁环境效应标准体系和标准基本情况,论述了工程标准体系构建方法、工程应用中标准适用性、选用与剪裁,为开展工程电磁环境效应工作提供技术依据。

第5章重点阐述了电磁环境效应建模仿真流程、方法、模型、重点参数仿真和示例,给出了验证结果;结合复杂系统论证、评估需要,分析了仿真实验环境和数据库建设要求。

第6章主要介绍了电磁环境、电磁干扰控制的方法;根据电磁防护的实际,重点论述了电磁脉冲和射频电磁场防护的基本原理和方法,为开展电磁环境效应设计提供指导。

第7章阐述了装备电磁环境效应论证目标、内容、方法,重点论述电磁环境效应指标论证、多方案评估与优选、关键技术和风险论证,提出了电磁环境效应指标体系和量化指标要求,并结合应用给出了示例。

第8章介绍了电磁环境效应试验验证类型、内容、试验设备和设施,阐述了试验技术体系的基本组成,重点论述了缩尺模型验证原理和方法、系统级电磁环境效应试验方法和设备级电磁兼容性测量方法。

第9章结合工程研制阶段叙述了电磁环境效应评估内容和层次划分,阐述了基于标准规范、技术指标、效能以及管理控制对效能影响的评估指标、评估模型和评估方法,给出了综合评估方法和应用示例。

第10章分析了装备使用阶段电磁兼容性变化情况,提出了电磁兼容性维修的概念,阐述了使用和维修中保持和改进电磁兼容性的技术和途径,介绍了电磁兼容性使用管理和定期监测方法。

电磁环境效应是一个正在不断发展的新的综合性学科领域,涉及技术领域多、范围广,目前还缺少系统介绍电磁环境效应,尤其是从大系统研制和使用角度论述电磁环境效应论证、评估和试验的专著,希望本书对装备论证、研制和使用维护等单位 and 部门从事电磁环境效应、电磁兼容及电磁防护相关领域工作的科研、工程技术和管理人员有所帮助。

全书主要由汤仕平撰写并统稿;张勇撰写了第7章、第8章部分内容,万海军撰写了第3章、第5章、第6章部分内容,成伟兰撰写了第9章、第10章部分内容,施佳林撰写了第5章部分内容。在本书写作的过程中得到了李建轩、金祖升、赵炳秋、何纯全、吴文力等同事的大力帮助,得到了多位专家的关心和指导,并对书稿提出了宝贵的意见,国防工业出版社也为本书的出版做了大量细致的工作,在此一并表示衷心的感谢。本书的研究工作得到了各级机关以及有关单位和专家的大力支持和帮助,在此深表谢意。

承蒙刘尚合院士、朱英富院士的推荐,感谢国防科技图书出版基金的资助。

限于作者的水平和经验有限,难免存在错误和不足之处,恳请广大读者批评指正。

著者

目 录

第 1 章 电磁环境效应概论	1
1.1 电磁环境效应概念及内涵	1
1.1.1 电磁环境效应概念的提出及发展	1
1.1.2 电磁环境效应的定义	5
1.1.3 电磁环境效应涉及的术语和范围	6
1.1.4 电磁环境效应要求	9
1.1.5 电磁环境效应主要研究内容	11
1.1.6 电磁环境效应概念和发展的认识	13
1.2 装备电磁环境效应特点	14
1.2.1 复杂性	14
1.2.2 多样性	15
1.2.3 对抗性	18
1.2.4 易损性	19
1.3 与相关概念的关系辨析	21
1.3.1 电磁兼容性	21
1.3.2 电磁防护	22
1.3.3 复杂电磁环境与战场电磁环境	22
1.3.4 电磁环境适应性与复杂电磁环境适应性	23
1.3.5 电磁频谱管理与频谱可支持性	23
1.4 国内外研究进展及发展趋势	25
1.4.1 国外研究进展	25
1.4.2 国内研究进展	28
1.4.3 发展趋势	29
第 2 章 装备电磁环境及其效应	30
2.1 电磁环境分类及特点	30
2.1.1 电磁环境分类	30

2.1.2	电磁环境特点	31
2.2	电磁环境及其特性	32
2.2.1	射频电磁环境	32
2.2.2	电磁脉冲	44
2.2.3	高功率微波	47
2.2.4	雷电	51
2.2.5	静电	54
2.2.6	磁场	56
2.2.7	传导干扰环境	58
2.3	电磁环境对装备的影响	61
2.3.1	电磁环境对装备影响的表现形式	61
2.3.2	射频电磁辐射危害	62
2.3.3	雷电效应	66
2.3.4	静电电荷效应	67
2.3.5	电磁脉冲效应	68
2.3.6	高功率微波效应	69
第3章	电磁环境效应工程管理	71
3.1	工程管理的主要内容	71
3.1.1	涉及的主要因素	71
3.1.2	主要工作内容	72
3.2	工程管理流程	73
3.2.1	工作流程	73
3.2.2	标准化工作	77
3.2.3	试验验证工作	78
3.3	工程管理方法	80
3.3.1	基本方法	80
3.3.2	审查方法	81
3.4	工程管理文件	82
3.4.1	文件类型	82
3.4.2	标准规范	83
3.4.3	电磁环境效应大纲	83
3.4.4	电磁环境效应试验大纲	84
3.4.5	电磁环境效应试验报告	85

第4章 电磁环境效应标准	86
4.1 电磁环境效应标准概况	86
4.1.1 国外电磁环境效应标准	86
4.1.2 国内电磁环境效应标准	94
4.1.3 复杂电磁环境构建标准	98
4.2 工程电磁环境效应标准体系的建立	99
4.2.1 标准体系的概念	99
4.2.2 标准体系的构建原则	100
4.2.3 标准体系的构建方法	100
4.2.4 标准体系的构成及内容	102
4.3 电磁环境效应标准的工程应用	104
4.3.1 标准的适用性	104
4.3.2 标准的选用与剪裁	108
第5章 电磁环境效应建模仿真	112
5.1 建模仿真技术特点及流程	112
5.1.1 建模仿真技术特点	112
5.1.2 建模仿真应用及流程	113
5.2 建模方法	114
5.2.1 几何建模	115
5.2.2 电磁建模	117
5.3 电磁计算方法	121
5.3.1 常用计算方法	121
5.3.2 适用性分析	122
5.4 典型指标仿真	124
5.4.1 天线方向图仿真	124
5.4.2 电磁环境仿真	126
5.4.3 电磁干扰仿真	131
5.4.4 电磁脉冲仿真	137
5.5 仿真验证	146
5.5.1 仿真有效性评估方法	146
5.5.2 仿真验证参数类型及方法	146
5.5.3 典型验证示例	147

5.6	仿真实验环境和数据库	148
5.6.1	基本要求	148
5.6.2	系统组成	149
5.6.3	实验数据库	151
第6章	电磁环境效应控制	153
6.1	平台电磁环境控制	153
6.1.1	天线优化布置	153
6.1.2	射频系统集成技术	154
6.2	电磁干扰控制	156
6.2.1	自适应干扰对消	156
6.2.2	大功率设备传导干扰抑制	157
6.3	射频电磁辐射危害防护	160
6.3.1	人体射频电磁辐射危害防护	160
6.3.2	军械射频电磁辐射危害防护	165
6.3.3	燃油射频电磁辐射危害防护	170
6.4	电磁脉冲防护	171
6.4.1	电磁脉冲耦合途径	171
6.4.2	电磁脉冲防护技术	173
6.4.3	电磁脉冲防护效果评估方法	175
第7章	电磁环境效应论证	178
7.1	论证目标和内容	178
7.1.1	论证目标	178
7.1.2	论证内容	178
7.2	论证方法	179
7.2.1	频谱分析法	179
7.2.2	仿真预测法	181
7.2.3	标准分析法	184
7.2.4	论证方法的选用	185
7.3	交互方法	186
7.4	电磁环境效应指标论证	189
7.4.1	需求转化	189
7.4.2	指标分解及确立	191

7.4.3	电磁环境效应指标体系	197
7.4.4	关键指标论证	198
7.5	多方案评估和优选	201
7.5.1	评估程序	201
7.5.2	评估指标体系	202
7.5.3	评估模型	202
7.5.4	评估与优选	204
7.6	关键技术及风险论证	206
7.6.1	关键技术	206
7.6.2	风险论证	207
7.7	应用示例	209
第8章	电磁环境效应试验验证	212
8.1	试验验证目标和类型	212
8.1.1	目标	212
8.1.2	类型	212
8.2	试验验证体系	213
8.2.1	基本组成	213
8.2.2	技术指标	214
8.2.3	试验方法	214
8.2.4	试验系统	214
8.3	模型试验验证	220
8.3.1	模型试验理论	220
8.3.2	试验要求和条件	221
8.3.3	模型试验及实施	222
8.4	系统级电磁环境效应试验验证	223
8.4.1	安全裕度试验及评估方法	223
8.4.2	系统内电磁兼容性试验方法	226
8.4.3	外部射频电磁环境敏感性试验方法	230
8.4.4	高功率微波试验方法	234
8.4.5	雷电试验方法	235
8.4.6	电磁脉冲试验方法	239
8.4.7	分系统和设备电磁干扰试验方法	243
8.4.8	静电放电试验方法	244

8.4.9	电磁辐射危害试验方法	246
8.4.10	电搭接和外部接地试验方法	249
8.4.11	发射控制试验方法	249
8.4.12	频谱兼容性试验方法	251
8.4.13	电磁环境试验方法	252
8.5	设备级电磁兼容性试验	256
8.5.1	试验方法分类	256
8.5.2	大电流设备传导发射试验方法	257
8.5.3	辐射发射现场试验虚拟暗室技术	259
第9章	电磁环境效应评估	261
9.1	评估内容	261
9.2	基于标准规范的评估	263
9.2.1	评估指标体系	263
9.2.2	定量指标的评估方法	265
9.2.3	定性要求的量化评估方法	274
9.3	基于技术指标的定量评估	275
9.3.1	评估指标	275
9.3.2	评估方法	276
9.4	基于效能的评估	279
9.4.1	评估指标	279
9.4.2	评估方法	281
9.5	电磁兼容管理控制对效能影响评估	282
9.5.1	评估参数	282
9.5.2	评估方法	283
9.6	综合评估方法	287
9.6.1	评估模型	287
9.6.2	权重计算方法	287
9.6.3	单项指标的评分	288
9.7	应用示例	288
第10章	使用与维修中的电磁环境效应控制	291
10.1	概述	291
10.1.1	使用阶段电磁兼容性变化情况	291

10.1.2	电磁兼容性维修概念	294
10.2	电磁兼容性故障诊断	294
10.2.1	故障原因分析	294
10.2.2	电磁兼容性故障诊断方法及应用	296
10.3	电磁兼容性维修技术	299
10.3.1	电磁兼容性维修内容	299
10.3.2	电磁兼容性维修程序	300
10.3.3	电磁兼容性维修方法及实施	301
10.3.4	电磁兼容性维修资源	313
10.4	电磁兼容性使用管理	316
10.4.1	电磁兼容性管理控制	317
10.4.2	电磁辐射危害防护使用管理	317
10.5	定期监测与评估	319
缩略语		321
参考文献		325

Contents

Chapter 1	Introduction to electromagnetic environmental effects(E3)	1
1.1	The concept and connotation of E3	1
1.1.1	The concept of E3 and its evolution	1
1.1.2	Definition of E3	5
1.1.3	The terms and scope involved in E3	6
1.1.4	Requirements of E3	9
1.1.5	Main research contents of E3	11
1.1.6	Understanding of E3 concept and development	13
1.2	E3 characteristics	14
1.2.1	Complexity	14
1.2.2	Diversity	15
1.2.3	Antagonism	18
1.2.4	Vulnerability	19
1.3	Analysis of the relationship between relevant concepts	21
1.3.1	Electromagnetic compatibility(EMC)	21
1.3.2	Electromagnetic protection	22
1.3.3	Complex electromagnetic environment and battlefield electromagnetic environment	22
1.3.4	Electromagnetic environment adaptability and complex electromagnetic environment adaptability	23
1.3.5	Electromagnetic spectrum management and spectrum supportability	23
1.4	Research advancement and development trend at domestic and abroad	25
1.4.1	Abroad research advancement	25