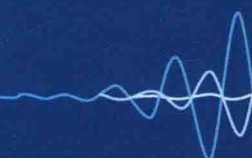


电磁环境效应



刘培国 丁亮 张亮 编著
茅剑 刘晋明



科学出版社

电磁环境效应

刘培国 丁 亮 张 亮 编著
茅 剑 刘晋明

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系统介绍电磁环境对设备、材料及生物体等产生的效应、作用机理及防护方法等。一方面,讨论装备和易挥发材料的电磁效应;另一方面,讨论电磁环境的生物效应及其相关参数的测量方法。作者收集和整理了国内外众多学者近十几年在该领域的研究成果,以及作者在这一领域多年的研究成果。

本书适合高等院校电子科学与技术、生物医学工程和信息工程等专业本科生、研究生以及工业、国防和医疗等领域的相关科研人员使用。

图书在版编目(CIP)数据

电磁环境效应 / 刘培国等编著. —北京:科学出版社,2017.6
ISBN 978-7-03-051753-1

I. ①电… II. ①刘… III. ①电磁环境-环境效应 IV. ①X21

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 027070 号

责任编辑:张艳芬 王 苏 / 责任校对:桂伟利

责任印制:张 伟 / 封面设计:蓝 正

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京教图印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 6 月第 一 版 开本:720×1000 B5

2017 年 6 月第一次印刷 印张:14 1/2

字数:278 000

定价:88.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

电磁环境是存在于空间的所有电磁现象的总和,对设备、材料及生物体等产生的作用效果就是电磁环境效应。

电磁环境是一种客观存在的自然环境,对人类和各种设备(主要是电子设备)产生无时不在、无处不在的效应。信息化时代到来之前,电磁环境效应并不明显,但是随着科学技术的发展,各种无意、有意电磁辐射密布生活、工作空间,特别是各种大功率、高压、高频等设备设施的广泛使用,使得环境中的电磁强度不断提高。据统计,环境中的背景电磁强度每3~5年就会提高一倍,同时,电磁波的时间、空间、频谱分布日益密集,这导致电磁环境空前复杂。因此,电磁环境对人员和设备产生的效应不容忽视。电磁环境效应涉及电磁学、电子学、生物学和数学等学科领域,电磁环境效应研究旨在揭示和讨论自然环境因素和人为环境因素的电磁波和电磁场对具有电磁结构的电子信息系统和生物体的作用机理、效果和防护方法等。

电磁效应的应用有有益和危害两种结果。对于信息化设备来讲,电磁波控制、使用得当,可以成为信息传输、获取和探测等的有效载体和手段,反之则可能使电子信息系统功能降级或失效,甚至造成破坏性的损伤、损坏,也可能被恶意操作者作为手段实现对设备的欺骗、篡改或控制。对于有机体来讲,电磁波既可以是医疗、保健的手段,也可能损伤、损毁有机体的功能。但是,研究电磁环境效应的出发点主要是基于消除电磁危害。

本书既包含电磁环境效应的基本理论和基本方法,也总结了作者研究团队在相关领域的最新研究内容和研究成果,同时使用了大量的实例进行说明。本书从电子设备和生物体两个方面来分析电磁环境效应。一方面讨论电磁环境对装备的效应、作用机理和规律及其防护方法,包括电磁兼容性、电磁骚扰与电子防护等;另一方面,讨论电磁辐射对生物体,特别是对人员的危害及防护方法,归纳总结生物组织电磁参数测量的多种方法。

限于作者知识水平,书中难免存在不足之处,希望读者提出宝贵意见。

刘培国
2017年2月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 电磁环境	1
1.1.1 电磁环境的定义	1
1.1.2 复杂电磁环境	2
1.2 电磁环境效应内涵	3
1.2.1 电磁环境效应的概念	3
1.2.2 电磁环境效应的划分	5
1.3 电磁环境效应的研究现状和发展趋势	7
1.3.1 电磁环境效应的研究现状	7
1.3.2 电磁环境效应的发展趋势	9
参考文献	9
第 2 章 电子信息系统的电磁环境效应机理	10
2.1 电子信息系统与电磁环境的耦合	11
2.1.1 前门耦合	11
2.1.2 后门耦合	12
2.2 电磁环境对电子信息系统的干扰效应	14
2.2.1 射频对电子信息系统的干扰效应	14
2.2.2 电磁脉冲对电子信息系统的干扰效应	16
2.2.3 静电对电子信息系统的干扰效应	17
2.3 电磁环境对电子信息系统的损毁效应	20
2.3.1 射频对电子信息系统的损毁效应	20
2.3.2 电磁脉冲对电子信息系统的损毁效应	20
2.3.3 静电对电子信息系统的损毁效应	23
2.4 电磁环境对电发火装置和燃油的影响	24
参考文献	27
第 3 章 电子信息系统的电磁环境效应分析	29
3.1 电磁干扰源的建模与分析	29
3.1.1 电磁干扰源的建模	30
3.1.2 电磁干扰源的分析计算	31
3.2 电磁能量耦合规律的建模与分析	36

3.2.1 天线互耦的快速计算	37
3.2.2 线缆网电磁传输特性的计算	40
3.2.3 孔缝耦合的建模与分析	48
3.3 电磁敏感度的建模与分析	49
3.4 复杂系统电磁效应的建模与分析	51
参考文献	55
第4章 电子信息系统的电磁环境效应试验	57
4.1 电磁环境效应的试验方法	57
4.2 电磁干扰源的检测和定位	60
4.3 电磁敏感度试验测试	64
4.3.1 电磁敏感度指标	64
4.3.2 电磁环境效应考核环境构建	74
4.4 电磁毁伤效应的试验方法	77
参考文献	79
第5章 电磁环境中电子信息系统的效应控制与防护	81
5.1 敏感系统的确定	81
5.2 定量评估	84
5.3 效能评估试验方法	88
5.4 综合效能评估方法	91
5.5 效能评估可信性技术	96
参考文献	99
第6章 电子信息系统的电磁环境效应评估	100
6.1 电磁兼容控制	100
6.2 被动防护	102
6.2.1 屏蔽	102
6.2.2 接地	106
6.2.3 滤波	109
6.2.4 隔离	111
6.3 主动防护	112
6.3.1 演化硬件技术	112
6.3.2 电磁仿生技术	113
参考文献	114
第7章 生物体的电磁特性及其测量方法	116
7.1 生物组织的电特性及其测量方法	116
7.1.1 生物组织的电特性及其建模方法	116
7.1.2 生物组织的电特性的测量方法	118

7.2 微波断层成像中的电磁逆问题求解方法	129
7.2.1 线性求解方法	130
7.2.2 BIM	135
7.2.3 非线性求解方法	137
7.3 生物组织的磁特性及其测量方法	143
7.3.1 生物组织的磁特性及其建模方法	143
7.3.2 生物组织的磁特性的测量方法	144
参考文献	145
第8章 生物组织的电磁效应	160
8.1 生物组织电磁热效应	161
8.1.1 电磁波对生物组织的热效应机理	161
8.1.2 生物组织电磁热效应特点	162
8.2 生物组织电磁非热效应	163
8.2.1 生物组织电磁非热效应的机理	163
8.2.2 自由基在电磁场生物效应中的作用	165
8.2.3 细胞对电磁场反应的放大过程	166
8.2.4 跨膜信息发放的生物物理模型	168
8.2.5 生物组织电磁非热效应举例	169
8.3 生物电磁场剂量学	175
参考文献	176
第9章 生物组织电磁特性在医学检测中的应用	180
9.1 核磁共振	180
9.1.1 NMR 技术的发展	180
9.1.2 MRI 的基本原理及方法	182
9.1.3 NMR 技术在生物医学中的应用	185
9.1.4 MRI 的优缺点	187
9.2 射频消融治疗	188
9.2.1 RFA 技术消融肿瘤的基本原理	188
9.2.2 RFA 技术治疗肿瘤的历史	188
9.2.3 RFA 技术的临床应用	189
9.2.4 RFA 技术的优缺点和发展趋势	191
9.3 脑电	192
9.3.1 EEG 的产生	192
9.3.2 EEG 的特征	193
9.3.3 EEG 的医学应用	194
9.4 心电	195

9.4.1 心电信号的产生原理	195
9.4.2 心电信号的特征	196
9.4.3 心电信号的噪声	197
9.5 电穿孔	198
9.5.1 强脉冲电场的电穿孔效应	198
9.5.2 电穿孔的量效关系	199
9.5.3 受治疗组织中的脉冲电场分布	199
9.5.4 电穿孔研究的方法学进展	200
9.5.5 电脉冲临床应用中的副作用及对策	201
9.6 经颅磁刺激	201
9.6.1 经颅磁刺激的发展历史	202
9.6.2 经颅磁刺激的医学应用	202
参考文献	204
第 10 章 生物体的电磁防护	208
10.1 电离辐射及防护措施	208
10.2 电离辐射防护量	210
10.3 电离辐射治疗	213
10.4 非电离辐射防护与损伤治疗	214
10.5 非电离辐射损伤防治及其药物治疗	218
参考文献	221

第1章 绪 论

1.1 电 磁 环 境

电磁环境(electromagnetic environment, EME)是电磁空间的一种表现形式,指存在于给定场所电磁现象的总和。“给定场所”即空间;“电磁现象的总和”包括了全部时间与全部频谱。

1.1.1 电磁环境的定义

美国电气和电子工程师协会(Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE)将电磁环境定义为:一个设备、分系统或系统在完成其规定任务时可能遇到的辐射或传导电磁发射电平在不同频段内功率与时间的分布,即存在于一个给定位置的电磁现象的总和。

美国军用标准《系统电磁环境效应需求》(MIL-STD-464A)将电磁环境定义为:电磁能量的空间和时间的分布,包含各种不同的频率范围,而且包括辐射和传导的电磁能量。它是电磁能量的总体(人为产生的和自然产生的),对任何暴露在其中的武器平台/系统或者分系统/设备,在各种环境(如陆地、空中、空间、海洋等)以及全寿命的各个期间都会发生作用。

《苏联军事百科全书》将电磁环境定义为:影响无线电装置或者其部件工作的电磁辐射环境。规定区域内或者目标上的电磁环境主要取决于无线电装置(及其部件)的数量、工作状态、功率和辐射频率等。并且认为,电磁环境是指电子战双方在特定、感兴趣的区域内,由使用各自电磁能的电子战系统构成的信号和信号密度的总和。

由上述定义可知,空间、时间、频率、能量是构成电磁环境的重要因素。电磁环境是存在于给定空间所有电磁现象的总和,包括自然电磁环境和人为电磁环境。前者如雷电、静电等,后者如高功率微波(high power microwave, HPM)、超宽带(ultra wide band, UWB)、高空核爆电磁脉冲(high-altitude EMP, HEMP)等电磁脉冲源产生的辐射环境。

在电子技术广泛应用的今天,一般情况下,构成空间电磁环境的主要因素有自然环境因素和人为环境因素两大类。当研究或关注某一局部环境时,小区域的电磁环境往往由附近作用比较明显的个别电磁辐射源决定。按照场所大小、辐射源

性质和应用目的的不同,电磁环境可分为许多具体的小环境,如城市电磁环境、工业区电磁环境、舰船电磁环境、电力系统电磁环境、武器系统电磁环境、战场电磁环境等。构成电磁环境的一般因素如图 1.1 所示^[1]。

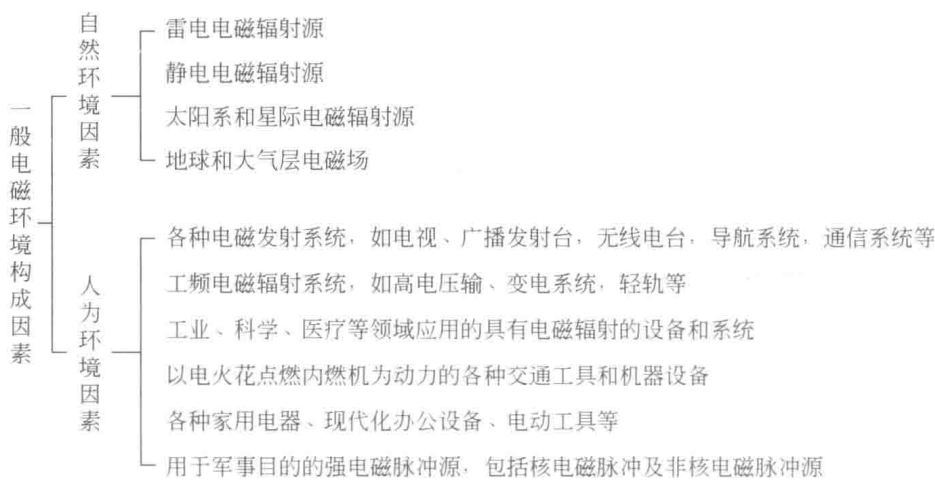


图 1.1 构成电磁环境的一般因素

1.1.2 复杂电磁环境

随着电子技术的发展和广泛应用,未来的军事行动将在越来越复杂的电磁环境中实施。由于受参战地域装备的分布状况、工作频率、辐射功率(场强)、辐射方式、所处地理环境、气象条件等多种因素的影响,因此战场电磁环境在时域、频域、能量域和空域的分布呈现出随机动态的特征。

战场电磁环境可定义为:一定的战场空间内对作战有影响的电磁活动和现象的总和,即在一定的战场空间内,由空域、时域、频域、能域分布的数量繁多、样式复杂、密集重叠、动态交叠的电磁信号构成的电磁环境。

战场电磁环境是在特定的行动环境里,军队、系统或者平台执行其规定的任务时可能遇到的,在各种频率范围内由辐射或传导的电磁发射(水平)功率和时间分布的结果。它是电磁骚扰、电磁脉冲、电磁辐射对人员、军械和挥发性材料的危害,以及雷电和沉积静电等自然现象的综合。和战场中的其他环境相比,电磁环境是战场环境中更为重要的组成部分。战场电磁环境不仅是战场上通信、雷达、计算机、光电设备的信号环境,而且也是电子对抗的信号环境。由于电子信息化设备的普及和使用,现代战场上电磁辐射源和电磁信号变得高度密集,电磁辐射源多样,电磁辐射信号种类繁多,导致电磁环境日趋复杂。

战场电磁环境的构成因素很多,既有自然因素又有人为因素。从未来战场可能遇到的电磁环境的构成和特点来分析,基本上可将战场条件下的电磁环境视为在特

定的战场空间内,对作战行动有影响的自然电磁现象和人为电磁现象的总和。

自然电磁现象来自自然界产生的各类电磁环境信号,包括雷电电磁辐射、静电电磁辐射、太阳系和星际电磁辐射、地球和大气层电磁场等。

人为电磁现象来自各种人为活动或人造设备器械等产生的电磁信号。人为因素既有有意电磁干扰,又有无意电磁干扰;既有军用电磁辐射,又有民用电磁辐射;既有我方电磁辐射,又有敌方电磁辐射。

随着高科技在军事领域的广泛应用,各种军用电磁辐射体(如雷达、通信、导航等辐射源)的功率越来越大,数量成倍地增加,频谱也越来越宽;再加上高功率微波武器等定向能武器和电磁脉冲弹以及超宽带、强电磁辐射干扰机的出现,战场的电磁环境十分复杂。任何一个作战平台在战场上都会受到来自空中、地面、海洋及系统间、系统内部的电磁场作用,其电磁频谱十分复杂。可见,在高科技战争中,有效地运用电磁频谱,控制电磁环境,夺取并保持电磁优势,是打赢现代高科技战争的重要前提和至关重要的因素^[2]。

综上所述,复杂电磁环境应定义为:在一定的战场空间,由时域、频域、能量域和空域上分布密集、数量繁多、样式复杂、动态随机的多种电磁信号交叠而成,对装备、燃油和人员等构成影响,严重妨碍信息系统和电子设备的正常工作,显著影响武器装备的作战运用和效能发挥的战场电磁环境。

1.2 电磁环境效应内涵

电磁环境效应(electromagnetic environment effects, E3)这一概念是随着电磁环境的变化演变而来的,从最初的射频干扰(radio frequency interference, RFI)到电磁干扰(electromagnetic interference, EMI)、电磁兼容(electromagnetic compatibility, EMC),直到现在。以前的研究主要针对电力、电子设备内部及其设备间的电磁干扰问题展开,其目的是确保在电磁环境中共存的设备及其元器件正常工作,而将相互影响控制在允许的范围内。当前,随着科学技术的发展,各种军用电磁辐射体如雷达、通信等辐射源的功率越来越大,数量成倍增加,频谱越来越宽。更值得关注的是高功率微波武器、电磁脉冲弹和超宽带武器的出现,原因是这些武器使高科技战场电磁环境趋于复杂和恶化。电磁环境的性质发生了变化,能量由弱变强,频谱由窄变宽,效应由干扰变成了毁伤。现代电力电子装备多是机电仪一体化技术与自动控制技术紧密结合的产物,其电磁敏感度越来越高,而复杂电磁环境能使其性能降低、损伤甚至爆炸。因此,研究电磁环境效应及分析方法,提高电子装备和人员在复杂电磁环境中的生存能力已成为亟待解决的问题。

1.2.1 电磁环境效应的概念

电磁环境效应是指构成电磁环境的某种因素或总体对装备和易挥发材料及生

物体等的作用效果。美国 2007 年出版的《电子战》将电磁环境效应定义为:电磁环境对军队、设备、系统和平台作战能力所产生的影响。美国国防部 AD 报告(AD-A243367)和我国军用标准《电磁干扰和电磁兼容性术语》(GJB 72A—2002)规定电磁环境效应包括电磁兼容性、电磁干扰、电磁易损性、电磁脉冲、电子对抗、电磁辐射对武器装备和易挥发物质的危害及雷电与静电效应。美国国防部还把静电放电(electro static discharge, ESD)等电磁环境效应规定为武器系统可靠性与维修性研究的指标之一。

美国关于电磁环境效应的定义是经过多次修订不断完善的。1978 年的美国国防部 AD 报告《电磁环境效应的在役保障计划》[AD-A098322(海军)]将电磁环境效应定义为:在共存的作战系统中,与电磁辐射体和收集体有关的总体现象。对于舰队的作战目的来说,它包括电磁兼容性、电磁脉冲、电磁易损性和电磁安全性。

1991 年 12 月的美国国防部 AD 报告《集成后勤保障中的电磁环境效应方案》[AD-A244172(陆军)]中指出,当计划对一个武器系统在开发阶段进行保障时,需要考虑的电磁环境效应包括静电放电、电磁兼容性、电磁辐射危害、电子对抗、阻塞/拦截、电磁干扰、电磁脉冲、雷电效应、高功率微波以及部件之间的干扰。

1993 年 10 月美国颁布的《陆军电磁环境效应纲要》中对该定义进行了修订:电磁环境效应是电磁环境对军队、设备、系统和平台作战能力所产生的影响。电磁环境效应涵盖所有电磁学科,包括电磁兼容性/电磁干扰、电磁易损性、电磁脉冲、电子对抗、电磁辐射对人员及军械和挥发性材料的危害,以及闪电和沉积静电自然现象效应。在 1997 年至今的各种文献资料中,如 1997 年颁布的美国军用标准《系统电磁环境效应的要求》(MIL-STD-464)、2002 年颁布的美国军用标准《系统电磁环境效应需求》MIL-STD-464A 和 2008 年颁布的美国《国防部军用语词典》(JP1-02)中对电磁环境效应的定义趋于一致,都将其定义为:电磁环境对军队、设备、系统和平台作战能力所产生的影响。

电磁环境效应可以视为电磁环境对军事行动中所有相关因素作用和影响的结果,其本质是电磁能量对军事行动的作用效果。我国相关国家军用标准已经对电磁环境效应的概念有过定义。国家军用标准《电磁干扰和电磁兼容性术语》(GJB 72A—2002)和国家军用标准《系统电磁兼容性要求》(GJB 1389A—2005)中,对电磁环境效应的定义是:电磁环境对电气电子系统、设备、装置运行能力的影响。它涵盖所有的电磁学科,包括电磁兼容性、电磁干扰、电磁易损性、电磁脉冲、电子对抗及电磁辐射对武器装备和易挥发物质的危害,以及雷电和沉积静电等自然效应。国家军用标准《战场电磁环境术语》(GJB 6130—2007)对电磁环境效应的定义是:构成电磁环境的电磁辐射源通过电磁场或电磁波对装备或生物体的作用效果。

分析有关国家军用标准的定义及当前的一些文献资料可知,电磁环境效应的内容基本是相通的,即电磁环境对各种对象功能的作用结果,这与美国军用标准的

定义也基本相同,反映了当前对电磁环境效应的基本认识。但是,从另外的角度来看,在对电磁环境效应概念的认识上,意见还不够统一,在文字的表述上还不够一致。例如,有的认为电磁环境效应可以理解为不包括对燃油或者油料作业安全性的影响。其理由是,根据1997年出版的《中国人民解放军军语》的定义,装备是指武器装备的简称;根据2000年中央军事委员会颁布的《中国人民解放军装备条例》的界定,装备是指实施和保障军事行动的武器、武器系统和军事技术器材的统称,所以装备不包括燃油。因此,电磁环境对“装备或生物体的作用效果”显然不包括其对燃油或者油料作业安全性的作用。此外,文件描述在某些方面忽视了电磁环境的生物效应因素。例如,“电磁环境对电气电子系统、设备、装置的运行能力的影响”可以理解为不包括其对生物体的影响。事实上,无论对于人员安全性还是对于易挥发物质的安全性,射频的危害都是不容忽视的,它们都是构成电磁环境效应的基本要素。

通过对比我国军用标准和美国军用标准的概念还可以看出,美国军用标准概念的起点和层次比我国军用标准高。美国军用标准的定义是指电磁环境对军队、设备、系统和平台作战能力产生的影响,而我国军用标准的定义是指电磁环境对电气电子系统、设备、装置的运行能力的影响。当美国军用标准在考察电磁环境对军事行动的影响时,其焦点不仅仅局限于具体的系统、设备和平台等局部或单个对象,而是从整个军队作战能力的全局来衡量;相比之下,国内的概念还只是针对具体的系统、设备和装置的影响,因此,从起点和层次上看是不同的。尽管电磁环境事实上就是通过具体的作用对象来影响军事行动的,但是从概念里反映出美军已经从军队作战能力的宏观层面上来衡量电磁环境效应。从这一角度来说,美国军用标准的概念在其军事应用方面有着更深层次的含义。

研究复杂电磁环境归根到底是研究电磁环境效应问题,其目的是为掌握制电磁权、打赢信息化战争服务,准确把握电磁环境效应概念的内涵及其发展趋势,对于提高我军武器装备和军事训练的质量具有重要的意义。

1.2.2 电磁环境效应的划分

从广义上说,电磁环境效应就是电磁环境对军队作战能力的影响。当电磁环境效应在某个军事行动中的影响程度超出了战术技术层面时,往往要从其广义的角度去理解。例如,定向能武器攻击可能导致作战对手C4ISR系统的瘫痪,从而使作战进程发生决定性的转变,甚至影响到战争的结局。又如,高空核爆电磁脉冲由于其巨大的破坏能力,能够使数千公里范围内的电气电子系统瘫痪。这样的结果就是战略层面的效应问题,必须从广义的层面去理解。

从技术的角度来看,电磁环境效应涵盖了所有电磁学科,涉及电磁兼容性、电磁干扰、电磁易损性、电磁脉冲、电子对抗、电磁防护、电磁辐射等对生物体、电子装

备(装置)、电发火装置和燃油产生的作用与危害,以及雷电和沉积静电等自然效应。因此,一切涉及装备(设施)、燃油和人员受电磁环境作用及影响的问题统统归入电磁环境效应的范畴。电子设备或电子信息系统的电磁兼容性,电子战(或电子对抗)中的电子攻击和电子防护,射频能量对电火工品(导弹和弹药等)以及加油作业的危害,作业人员在复杂电磁环境中的安全与健康问题,雷电和静电的危害,武器装备的电磁防护加固,甚至包括大到具有战略意义的国家重点工程和基础设施的电磁防护性能评估与防护加固等问题,都属于电磁环境效应研究的范畴。

从军事应用角度来讲,电磁环境效应对军事行动影响的广泛性,不仅涉及武器装备的发展战略,还对军事理论研究、联合作战的战法研究、指挥控制方式研究、军事行动的决策,以及部队的作战、训练和装备保障等各方面都产生影响。从狭义的层面去理解,电磁环境效应就是电磁环境在战术技术层面上对武器装备、电气电子系统(分系统)、人员、电发火装置和燃油等安全性和可靠性的作用与危害。例如,大功率干扰机的使用能够使作战对手和己方未管控好的某些用频设备受到干扰,电磁炸弹攻击能够使战场局部的电子系统瘫痪,雷击闪电能够对电气电子系统造成干扰和破坏,在大功率雷达附近的加油作业可能导致燃油事故等,类似的问题可以从战术和技术(狭义)层面上去研究^[3]。

电磁环境效应研究是在首先保证系统电磁兼容性的前提下,在复杂电磁环境下对系统电磁兼容性,系统电磁易损性和对武器、人员及燃油等的安全性等方面进行研究。为了更加深入地研究电磁环境效应,可将电磁环境效应分为系统电磁兼容性、电磁易损性、电磁辐射对武器设备和人员的安全性进行分别研究,具体的划分如图 1.2 所示。

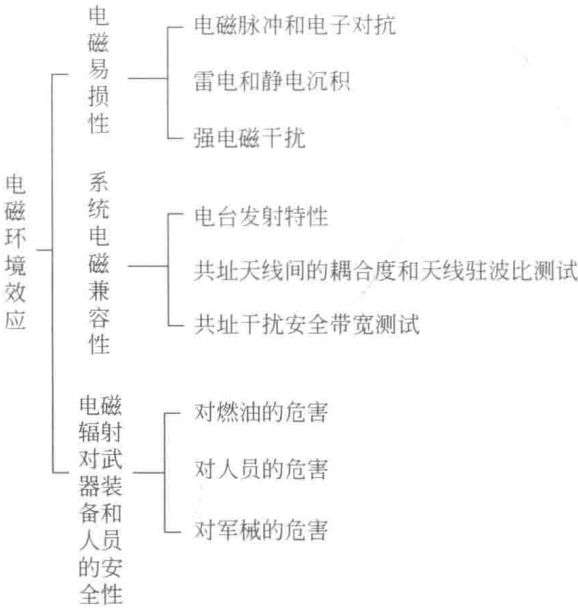


图 1.2 电磁环境效应划分

从系统在复杂电磁环境下的耦合途径和电磁环境效应的划分进行分析,当系统处于复杂电磁环境下时,不仅要关注系统自身的电磁兼容性,还要分析系统在复杂电磁环境下的表现。但是,系统的电磁兼容性必须放在首位考虑,只有系统的辐射发射和敏感度满足要求,系统电磁环境效应的研究才具有意义。因此,在对系统电磁环境效应的研究中应该将系统电磁兼容性放在首位。

1.3 电磁环境效应的研究现状和发展趋势

1.3.1 电磁环境效应的研究现状

研究复杂电磁环境归根到底是研究电磁环境效应问题,就是研究复杂电磁环境在信息化战争中作用规律的问题。纵观电磁环境效应研究的历史,美国在该领域的研究最早,研究的系统性和连续性最强,并且由于其相关资料对外开放程度较高,因此成为各国研究电磁环境效应问题的重要参考。

美军对电磁环境效应问题的研究可以追溯到 20 世纪 30 年代。在第一次世界大战前,美军将无线电装置首次安装在军用车辆上时就产生了射频干扰的问题。从那时起,军事行动中来自己方和敌方军队的电磁干扰对战术通信的影响越来越严重。在电磁环境效应研究初期,主要解决的是通信干扰问题。

自美国陆军通信兵于 1934 年制定了第一个专业标准《电屏蔽和车载无线电电源》(SCL-49)以后,各军种独立的电磁兼容/电磁干扰标准不断出现,这给各种武器系统(设备)的研发和采购造成了很大的困难。此后,1967 年美军颁布了第一个国防部统一的标准系列:《设备电磁干扰特性要求》(MIL-STD-461)、《电磁干扰特性测量》(MIL-STD-462)、《电磁干扰技术定义和单元系统》(MIL-STD-463)。上述标准的颁布和执行成为电磁环境效应研究标准化历史上的一个里程碑。随后,这一标准不断修订,至今已升级到 461F 版。该标准已被世界上许多国家军队采用。1997 年 3 月,美军颁布了《系统电磁环境效应的要求》(MIL-STD-464),首次将电磁环境效应涉及的内容正式纳入一个标准中,成为电磁环境效应研究史上的又一个里程碑。

为了解决电磁环境效应问题,美国国防部出台了一系列相关政策,并设立了相关机构。美国陆军很早就组建了陆军电磁兼容性和干扰减轻项目部(Department of the Army's Electromagnetic Compatibility and Interference Reduction Program)。1960 年 7 月,美国国防部指令(DoDI 3223.3)对电磁环境效应研究的相关责任在军种范围内进行了分配:电磁兼容性标准和说明书由海军负责,电磁兼容性测量技术和仪器由陆军负责,电磁兼容性分析能力和数据库的使用由空军负责。空军为国防部电磁兼容分析中心还成立了专门的管理局。1991 年,陆军负责管理电磁环

境效应问题的职能部门是陆军电磁环境效应项目部(Department of the Army Electromagnetic Environmental Effects Program)。针对不同时期和不同用途的电子系统,他们还专门成立了由用户、合同商、技术权威专家和项目管理者等组成的多个电磁兼容性/电磁环境效应委员会,分析武器装备面临的复杂电磁环境,预测可能发生的问题,提出解决的方案。

随着战场电磁环境越来越复杂,以及各种电气电子系统(分系统)和设备对电磁环境的敏感性不断提高,电磁环境效应所涉及的领域不断拓宽。在电磁环境效应基础研究、应用研究和试验评估等方面,美军进行了全方位的研究探索。在电磁兼容性与干扰控制,针对射频对军械(hazards of electromagnetic radiation to ordnance, HERO)、人员(hazards of electromagnetic radiation to personnel, HERP)和燃油(hazards of electromagnetic radiation to fuel, HERF)的危害控制与防护,静电和雷电的防护,核电磁脉冲和非核电磁脉冲的产生机理与防护,电磁频谱的管控,电磁环境的仿真、模拟和控制,信息泄露与发射控制等方面,他们都进行了系统的试验研究。他们建造了世界上规模最大的电磁环境效应试验设施,对小到部件(器件)级,大到飞机和舰艇平台级的对象进行了试验研究,不断改进其适应复杂电磁环境的能力。以飞机为例,在两年的周期内,每个型号的飞机都要做例行的电磁环境效应试验。由于在电磁环境效应研究领域起步较早,加上职能部门的组织领导和相关政策的配套执行,以及长期和系统的试验研究,美军在该领域的水平一直领先于世界各国军队,为其掌握信息化战争中的制电磁权打下了坚实的基础。

目前,美国拥有世界上规模最大、设备最先进的陆、海、空三军电磁脉冲效应研究机构。该研究机构着重于军事项目和暴露环境的研究,并对美军各种电磁辐射装备提出暴露标准。科索沃战争和“9·11事件”之后的伊拉克战争都表明,美国十分重视用电磁炸弹和电磁脉冲武器打击重要军事目标和电台等民用设施。可见,电磁环境效应尤其是电磁脉冲或高功率微波武器,在未来对各种电磁敏感系统的威胁是不可忽视的。

俄罗斯在此领域的研究起步也较早,特别是在核电磁脉冲(nuclear electromagnetic pulse, nuclear EMP)、非核电磁脉冲武器及电磁防护方面的研究范围很广、成果很多,但是由于他们的研究成果开放程度较低,因此可供研究参考的信息资料不多。而其他国家,如英国、瑞士、法国、意大利和澳大利亚等国的电磁环境效应研究在很大程度上也都受到美国的影响,并且大部分采用了美国的研究成果,包括概念定义、技术和军用标准等。

在电磁环境效应研究方面,我国还处于起步阶段。对电磁环境效应研究的历史、概念演化及其内涵实质等基本问题还不是很清楚,相关研究文献对有关问题还不能给以完整和前后一致的解释。我国对此类问题的研究始于20世纪70年代,

先后有 10 余个单位参与到相关课题的研究中。在效应试验方面,我国通过微电子器件的核电磁脉冲辐照试验、高功率微波的孔缝耦合试验、高功率微波对宽带微波放大器的效应试验、电子器件的微波辐照敏感度试验和静电放电电磁脉冲对电子元器件、电路单元及火工品的辐照效应试验等获取了大量数据,得到了许多重要结论。虽然我国在此类研究上取得了较快的进展,但受资料、试验设备、场地等条件所限,大型武器系统的电磁环境效应试验尚处于探索阶段。

在效应建模分析方面,我国科研人员在孔缝耦合、场线耦合、细线散射、屏蔽效应、多导体传输线和电磁加固技术等方面以及相关的时域有限差分法、传输线法、积分方程、奇异点展开法、特征值展开法等研究方法上都进行了大量而深入的研究。但我国对复杂系统的效应建模研究还比较薄弱,尤其是对复杂系统的效应建模研究中关键的多导体传输线网络分析法和基于电磁拓扑理论的分析法两种分析手段的研究还非常有限。我国还应在复杂系统电磁环境效应试验设备、场地和试验方法以及复杂系统效应建模上加大研究的力度。

1.3.2 电磁环境效应的发展趋势

电磁环境效应研究发展呈现以下趋势:

(1) 电磁环境效应试验的方法从单一因素向多种电磁场共同作用下的效应研究和各种试验方法的等效性及相关性研究发展。

(2) 研究重点从系统级、分系统级的电磁兼容性研究转向战场复杂电磁环境效应和复杂电磁环境条件下作战模式的研究。

(3) 电磁防护的手段从屏蔽、接地、滤波等传统的被动防护转向主动防护,如演化硬件技术、电磁仿生技术等。

(4) 新原理、新方法、新技术不断涌现,如平台级电磁兼容顶层设计方法、潜在性失效机理、混响室技术、宽带电磁脉冲场测试等。

参 考 文 献

- [1] 刘尚合. 武器装备的电磁环境效应及其发展趋势[J]. 装备学院学报, 2005, 16(1): 1-6.
- [2] 王先义, 陈丹俊, 刘斌, 等. 复杂电磁环境战场频谱管理[J]. 中国电子科学研究院学报, 2008, 3(4): 338-344.
- [3] 李莉, 孙振华, 李立伟, 等. 装备定型试验中复杂电磁环境研究[J]. 装备学院学报, 2009, 20(2): 73-76.