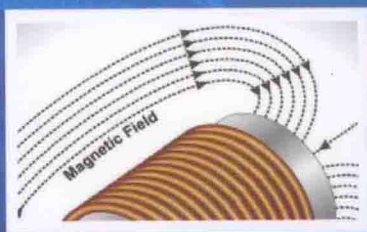


国防科学技术大学“十二五”重点建设研究生教材

电磁兼容维护技术

刘培国 李高升 周东明 刘继斌 白洋 编著



科学出版社

国防科学技术大学“十二五”重点建设研究生教材

电磁兼容维护技术

刘培国 李高升 周东明 编 著
刘继斌 白 洋



科学出版社

北京

内 容 简 介

随着服役年限的增加和电磁环境的日益复杂化,大型系统或平台内设备的电磁自扰、互扰等不兼容问题将越来越突出,开展专题性的管理与维护工作具有重要的现实意义。本书围绕电子信息系统电磁兼容维护这一中心内容,阐述了测试、预测、分析、评估等相关技术和方法。全书内容包括电磁兼容维护的内涵、系统级电磁兼容现场测量、系统非线性特性测量、系统级电磁兼容预测、线缆耦合分析、功率器件的行为级建模、电磁兼容预知性维护与模型综合、电磁兼容加改装以及电磁兼容维护效果评估等。

本书既有一定的理论深度和创新性,又紧密结合科研和工程实践经验,例证丰富,讲解深入浅出,适合作为电子信息系统使用、维护与研制等单位 and 部门管理人员、工程技术人员的参考书,也可以作为相关专业研究生的教材。

图书在版编目(CIP)数据

电磁兼容维护技术/刘培国等编著. —北京:科学出版社, 2015.2

(国防科学技术大学“十二五”重点建设研究生教材)

ISBN 978-7-03-043146-2

I. ①电… II. ①刘… III. ①电磁兼容性 IV. ①TN03

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 017712 号

责任编辑:潘斯斯 张丽花 / 责任校对:桂伟利

责任印制:霍 兵 / 封面设计:迷底书装

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>

四季青双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 3 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2015 年 3 月第一次印刷 印张:16 1/2

字数:391 000

定价:50.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

电子设备与系统良好的电磁兼容性能通过科学合理的电磁兼容设计与制造获得，并通过及时且有效的电磁兼容维护而得以保持。

本书研究分析电磁兼容维护技术，力图将维护范围和领域从电气维护扩展到电子维护、从功能维护扩展到性能维护提供支撑。目前，维护工作主要直接面向设备的功能指标，性能维护通常是被动的，相关标准和规定几乎是空白。当前，多种体制、不同技术水平的电子设备和系统并存、协同工作，使得电磁兼容性能成为一个重要指标，是保证总体效能发挥的关键之一。另一方面，几乎不会开展专题性的电磁兼容性能维护，属于“不坏不修”的模式。到了真正发现电磁自扰、互扰时，其后果将可能会很严重，临时处置电磁干扰问题往往是“猝不及防”或“力不能及”。对于电力、交通、通信等信息化程度较高的大型系统，如果平时疏于故障诊断和电磁兼容健康管理，一旦出现电磁干扰，就会带来重大损失，因此对设备和系统的电磁兼容维护是十分必要的。

本书研究电磁兼容维护技术和方法，为保持或恢复电子信息系统的电磁兼容状态提供技术支撑。电磁兼容性能维护不同于其他维护技术，也与其他电磁兼容技术有所不同。本书提出了电磁兼容模型综合、电磁兼容可靠性、电磁兼容体检和电磁兼容维护等概念，对电子信息系统电磁兼容性能的针对性测试、主动管理和预知性维护与保障具有直接作用，有助于将电磁兼容领域的被动和消极维护转变为主动和积极维护。

全书共9章。第1章阐述电磁兼容维护的内涵，进行了电磁兼容维护的需求分析，对电磁兼容维护方法进行了概述。第2章讨论系统级电磁兼容现场测量问题，主要包括时域测量技术和基于虚拟暗室的现场测量技术以及基于空间滤波的现场测量方法。第3章研究系统非线性特性测量方法，介绍了多音测量技术，重点阐述了双频测试技术和自动双频测试系统及其应用。第4章涉及系统级电磁兼容预测方面，涵盖电磁兼容性预测的数学模型、电磁兼容性预测算法、系统级电磁兼容预测的拓扑分析和电磁兼容预测实施。第5章分析线缆耦合问题，包括传输线模型、线缆间串扰预测方法以及场线电磁耦合预测方法。第6章是功率器件的行为级建模，介绍了典型的行为模型，阐述了功放模型的仿真与测试，并对行为模型进行了对比。第7章阐述电磁兼容预知性维护和模型综合技术，研究了电磁兼容预知性维护技术，阐述了电磁兼容模型综合的概念与内涵，研究了基于统计和神经网络的电磁兼容性能参数模型综合方法，探讨了电磁兼容可靠性和基于测量数据及模糊技术的系统电磁兼容模型综合技术。第8章讨论电磁兼容加改装问题，研究了电磁兼容加改装的论证与设计方法，分析了加改装中的频谱管控技术。第9章是电磁兼容维护效果评估，阐述了评估思路和基本方法。

本书是作者近年来理论研究和工程实践经验的总结，内容具体，贴近实际，提出的部分方法和建立的模型在电磁兼容维护系统中得到了应用，并针对舰船、潜艇和飞机等重要平台的电子信息系统开展了电磁兼容试验，取得了良好的效果。对于信息化设备设计、使用与加改装等工作也有指导作用。本书可作为相关工程技术人员、管理人员的参考书，也可作为高等院校相关专业研究生的教学用书。

本书由刘培国负责内容编排，参加编写的有李高升、周东明、刘继斌和白洋等。强电磁场环境模拟与防护技术国防科技重点实验室魏光辉、电磁兼容性国防科技重点实验室侯冬云和浙江大学尹文言审阅了全书。覃宇建、卢中昊、黄纪军和薛国义等为本书提供了具体指导并提出了宝贵意见，在此一并表示感谢。

电磁兼容维护是信息化装备全寿命周期管理中的重要环节，涉及测试、分析、评估、预测和加改装等多项技术，本书针对相关理论和部分关键技术开展了研究。

由于作者能力和时间有限，对很多问题仅开展了初步分析与探讨，有些问题尚待进一步研究和分析。对书中不当之处，恳请广大读者批评指正。

编者
2014年9月

目 录

前言	
第 1 章 电磁兼容维护概述	1
1.1 电磁兼容维护内涵	1
1.1.1 电磁兼容维护含义	1
1.1.2 电磁兼容维护原因	1
1.2 电磁兼容维护需求分析	4
1.2.1 电磁干扰	4
1.2.2 电磁环境效应	5
1.2.3 电磁防护	8
1.2.4 电磁频谱管理	9
1.2.5 电磁兼容标准	11
1.3 电磁兼容维护方法	12
第 2 章 系统级电磁兼容现场测量	14
2.1 现场测量概述	14
2.2 时域测量技术	15
2.2.1 时域测量与分析	15
2.2.2 时域信号处理	21
2.2.3 时域测量设备	35
2.3 基于虚拟暗室的现场测量技术	38
2.3.1 虚拟暗室技术	38
2.3.2 虚拟暗室测量系统	40
2.4 基于空间滤波的现场测量方法	43
2.4.1 基本原理	43
2.4.2 测向算法与波束形成	45
2.4.3 仿真结果	50
2.4.4 实测性能	52
第 3 章 系统非线性特性测量	55
3.1 多音测量技术	55
3.1.1 单音信号激励	55
3.1.2 双音信号激励	56
3.2 双频测试技术	58
3.2.1 双频测试原理	58
3.2.2 双频图生成	60

3.2.3	双频信号扫描方式	60
3.2.4	参数确定	61
3.3	自动双频测试系统	68
3.3.1	系统配置	68
3.3.2	系统校准	71
3.4	双频测试应用	71
3.4.1	测试项目	71
3.4.2	测试示例	73
第 4 章	系统级电磁兼容预测	87
4.1	概述	87
4.1.1	电磁兼容预测的基本概念	87
4.1.2	电磁兼容预测成果	88
4.1.3	电磁兼容预测中的数学方法	91
4.2	电磁兼容性预测的数学模型	93
4.2.1	干扰源模型	94
4.2.2	敏感设备模型	97
4.2.3	耦合途径模型	101
4.3	电磁兼容性预测算法	105
4.3.1	幅度筛选	106
4.3.2	频率筛选	106
4.3.3	详细分析	107
4.3.4	性能分析	107
4.4	系统级电磁兼容的拓扑分析	109
4.4.1	电磁拓扑理论	109
4.4.2	电磁干扰统一模型	115
4.5	电磁兼容预测实施	120
4.5.1	拓扑分解和统一模型描述	121
4.5.2	天线互耦分析	123
4.5.3	线缆耦合分析	126
第 5 章	线缆耦合分析	133
5.1	传输线模型	133
5.1.1	概述	133
5.1.2	分布参数提取	134
5.1.3	传输线方程	137
5.2	线缆间串扰预测方法	137
5.2.1	基于高阶 FDTD 的传输线串扰预测模型	137
5.2.2	改进节点分析法	139
5.2.3	高阶 FDTD 与 MNA 混合计算方法	140
5.2.4	串扰分析实例	142

5.3	场线电磁耦合预测方法	144
5.3.1	多导体传输线的场线耦合模型	144
5.3.2	复杂电路终端的 MNA 方法	151
5.3.3	场线耦合预测分析实例	151
第 6 章	功率器件的行为级建模	155
6.1	行为模型概述	155
6.1.1	行为模型概念	155
6.1.2	行为模型及其种类	157
6.1.3	行为模型的数学描述	158
6.2	典型的行为模型	158
6.2.1	无记忆模型	158
6.2.2	Wiener 模型和 Hammerstein 模型	160
6.2.3	记忆多项式模型	163
6.2.4	神经网络模型	164
6.2.5	Volterra 级数模型	165
6.3	功放模型的仿真与测试	168
6.4	行为模型比较与分析	170
6.4.1	功放模型的选择依据	170
6.4.2	功放模型的有效性	171
6.4.3	功放模型的比较	171
第 7 章	电磁兼容预知性维护与模型综合	174
7.1	电磁兼容预知性维护技术	174
7.1.1	电磁兼容故障预测和健康管理	174
7.1.2	数据挖掘技术	178
7.2	电磁兼容性模型综合概述	180
7.2.1	基本概念与内涵	180
7.2.2	电磁兼容模型综合的实现思路	181
7.3	电磁兼容性能参数的模型综合	182
7.3.1	电磁兼容数据预处理	182
7.3.2	模型综合的统计分析方法	185
7.3.3	模型综合的神经网络方法	189
7.4	系统电磁兼容模型综合	193
7.4.1	电磁兼容可靠性	193
7.4.2	基于测量数据的电磁兼容性能预测	194
7.4.3	基于模糊技术的电磁兼容模型综合	205
第 8 章	电磁兼容加改装	211
8.1	电磁兼容加改装概述	211
8.1.1	加改装的目的和原则	211
8.1.2	电磁兼容加改装的实施	211

第1章 电磁兼容维护概述

电子设备与系统的良好电磁兼容性能通过电磁兼容设计而获得,通过电磁兼容维护而保持。

1.1 电磁兼容维护内涵

1.1.1 电磁兼容维护含义

电磁兼容维护虽然不是一个完全崭新的概念,但是目前尚没有统一的标准定义,不同的人可能有不同的理解。

从狭义上看,电磁兼容维护是为了消除电子设备与系统在使用阶段出现的电磁干扰,使电子设备与系统保持良好的电磁兼容性能。从广义上来讲,电磁兼容维护可以扩展到电子设备与系统的全寿命周期。所谓全寿命电磁兼容维护,是指在电子设备与系统的论证、设计、制造、使用、退役等全寿命周期进行电磁兼容工作,因为所有这些工作都是为了电子设备与系统具有良好的电磁兼容性能。

从电子设备与系统全寿命周期的电磁兼容性能来看,电磁兼容维护泛指在任何阶段对电子设备和系统进行的电磁兼容手段和措施。即使是从狭义上看,电磁兼容维护需要对从电子设备与系统进行加固、改造等工作,相当于对电子设备与系统的电磁兼容再论证、再设计。但是与论证设计阶段相比,电子设备与系统的状态、工作条件以及所处的电磁环境等都有不同,因此所采取的技术和方法也有所不同。电磁兼容维护技术涉及电磁兼容标准、电磁兼容设计、电磁兼容测量、电磁兼容预测、电磁防护与加固、电磁频谱管理以及电磁兼容分析评估等。

本书主要是指在使用阶段对电子设备和系统所采取的电磁兼容手段和措施,主要内容将围绕以上除电磁兼容设计外的几个方面展开,包括电磁兼容现场测量与故障诊断、电磁兼容性能变化规律综合、防护加固、评估等,进而分析如何做好电子设备和系统的电磁兼容维护。

1.1.2 电磁兼容维护原因

1. 电磁兼容的内在要求

国家军用标准 GJB 72A—2002 中,电磁兼容是指设备、分系统、系统在共同的电磁环境中能够一起执行各自功能的共存状态。美国对电磁兼容定义为:设备、分系统、系统利用电磁频谱,在想定的操作环境中,避免因电磁辐射和敏感而引起的不可接受的降级而实现其功能的能力。可见,两者对电磁兼容的定义略有不同,但基本含义一致。GJB 72A—2002 电磁兼容定义中“共存状态”包含两层含意:一是设备、分系统、系统运行时,不能因无意电磁干扰而受损或产生不可接受的降级;二是设备、分系统、系统正常工作时不能给环境带来不

可接受的电磁干扰。关于这两点,美国给出的电磁兼容定义显得更明确。如果电子设备和系统的电磁兼容性能不过关,就会产生电磁干扰。电磁干扰发生在设备、分系统、系统内部,称为系统内电磁干扰;也可能存在于设备、分系统、系统之间或外部环境之间,称为系统间电磁干扰,因此,电磁兼容分为系统内电磁兼容和系统间电磁兼容^[1]。

GJB 72A—2002 电磁兼容概念看似比较简单,但是内涵比较丰富。为了能够深刻理解电磁兼容的内涵,首先分析定义中的“共同的电磁环境”,其含义为:在电子设备与系统论证设计阶段,要科学地想定其未来使用的电磁环境(美国电磁兼容定义中明确提出了这一点)是什么,并根据想定的电磁环境采取相应的电磁兼容设计技术,从源头上消除干扰,有效保证电子设备与系统的电磁兼容性;在电子设备与系统应用阶段,要尽量使使用阶段的电磁环境符合设计时的想定电磁环境,这样所采取的电磁兼容设计技术才会起作用,电子设备与系统才能达到设计的电磁兼容性能。但是,电子设备与系统实际操作时面临的电磁环境与设计时的想定电磁环境难以完全一致,两者必然存在差异,这样就可能导致最初的电磁兼容设计技术不能应对实际电磁环境带来的影响,从而产生电磁不兼容问题。

解决电子设备和系统使用时出现的电磁不兼容问题已经超出了电磁兼容设计的要求,解决这种矛盾采用的方法与手段即为对电子设备与系统进行的电磁兼容维护,目的是解决电子设备与系统使用过程中出现的电磁不兼容。反之,如果不采取及时的电磁兼容措施,电子设备与系统使用阶段的电磁不兼容问题将越来越严重。

以上分析可以看到,电磁兼容基本概念中已经体现对电子设备与系统必须进行电磁兼容维护,做好电磁兼容维护对电子设备与系统保持良好的电磁兼容性能至关重要。

电磁兼容设计与电磁兼容维护是针对电子设备与系统全寿命周期不同阶段所采取的电磁兼容手段与方法,对电子设备与系统保持良好的电磁兼容性能是同样重要的。需要看到两者是相互关联的,电磁兼容维护可以保障电磁兼容设计技术的实现和持续发挥作用,同时做好电磁兼容维护也需要采用一定的电磁兼容设计技术。

2. 消除电磁不兼容的必然选择

实际上,从分析影响电子设备与系统电磁兼容性能的因素出发,也可以得到以上结论。影响电子设备与系统电磁兼容性能的原因有很多,下面进行简要分析。

1) 设计不周

电子设备与系统电磁兼容设计如果存在缺陷,可能会导致严重后果。例如,美国“民兵”导弹最初曾因为电磁兼容设计不周而发生自毁爆炸。如图 1.1 所示,火箭头由锥体和柱体部分构成。火箭发射升空后,与大气摩擦产生电荷积累,因为两部分的结构不一样,前部积累电荷多、后部少。最初两部分之间是导电不良的密封圈连接,两边电荷不能相互平衡,结果形成一个电压差。随着火箭速度加快,电压差越来越大,达到一定程度后发生放电,放电产生的电磁波激发自毁装置,导致发生爆炸。这种事故先后发生了两次,后来两级间采取导体搭接,此类事故再未发生。美军黑鹰直升机飞控系统电磁兼容设计存在隐患,容易被大功率辐射源干扰而导致飞行控制紊乱,在微波源和广播塔附近曾发生多起坠毁事件。

2) 使用不当

电子设备与系统配置操作不当也会引起严重的电磁干扰。1967年7月29日,美国福莱斯特航空母舰,舰上的大功率雷达工作时,不慎照射到甲板上的飞机,导致机载火箭弹误触发并击中其他战机,引起一系列爆炸,死亡134人。可见,电磁不兼容不仅与电子设备与系统设计有关,也与应用有关。

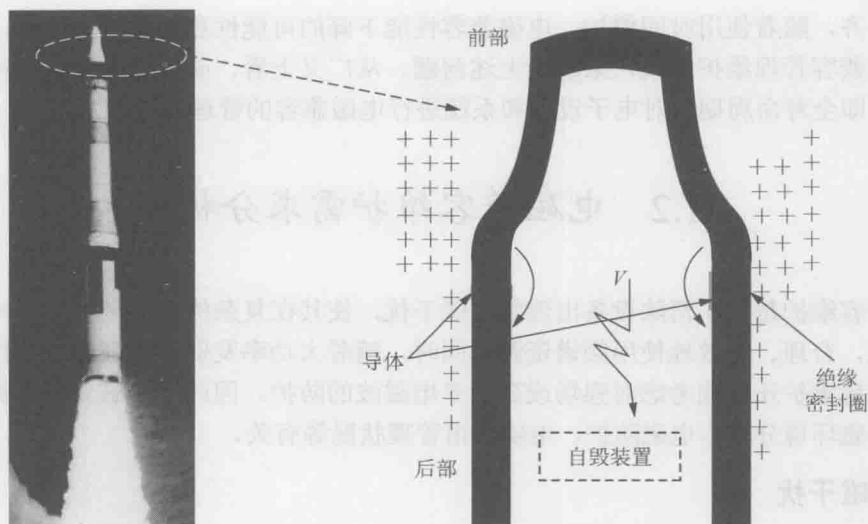


图 1.1 “民兵”导弹设计不周示意图

3) 设备老化

随着电子设备与系统运行时间的增加，元器件逐渐老化，电磁兼容性能呈不断恶化的趋势，电磁不兼容故障率随之提高。如图 1.2 所示，美军分析了其电子设备与系统在使用过程中的电磁兼容变化规律，数据表明，当电子设备与系统运行到 5 年时，电磁不兼容造成的故障率占 20%；当运行到 10 年时，这种故障率上升到 30%，随着时间的增加，由于电磁不兼容导致的装备故障率还会提高。可见，随着使用时间的增加，电子设备与系统之间相互干扰的可能性显著增加，这是一个客观规律，对此必须充分认识并正确对待。

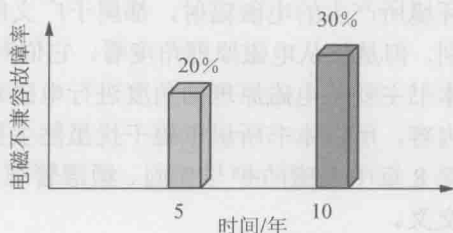


图 1.2 美军电子装备电磁兼容变化规律

4) 电磁环境日益复杂

随着信息化的发展，电磁辐射源迅速增加。一个世纪前，几乎没有有意的电磁辐射源，但在信息时代的今天，各种各样的电磁辐射源层出不穷。据统计，民用电子设备的数量以 3 年翻一番的速度增加。而且随着机械、电气等设备广泛应用到工农业生产和日常生活中，这些设备产生的无意电磁辐射的影响同样也不可忽视。以上原因导致电磁环境中频谱占用度越来越高，环境噪声越来越高，出现电磁不兼容的概率也大大增加。由此使得设备使用时所处的电磁环境与论证设计阶段可能发生变化，导致最初的论证与设计手段出现不足。

电磁兼容设计对保证设备具有良好电磁兼容性能的基础作用是不容置疑的，但是如果仅仅强调电磁兼容设计的重要性而忽视在设备使用阶段的电磁兼容工作，是一种片面的认识。在使用阶段对设备采取适当的电磁兼容手段或措施，是解决由设计不周、元器件老化、使用不当以及电磁环境变化等原因造成电磁不兼容的必然选择。因此，对于电子设备和系统，良好的电磁兼容性能不仅是设计出来的，也是管理维护出来的，电磁兼容设计与管理维护是解决电子设备与系统全寿命周期电磁不兼容问题的不可缺少、不可替代的手段，两者同样重要，不可偏颇。

在信息化快速发展的今天，各种各样、不同技术水平的电子设备和系统并存，电磁兼容

性能参差不齐,随着使用时间增加,电磁兼容性能下降的可能性更加严重,因此,需要通过有效的电磁兼容管理维护手段,来解决上述问题。从广义上看,必须在论证、设计、使用等各个阶段,即全寿命周期内对电子设备和系统进行电磁兼容的管理维护。

1.2 电磁兼容维护需求分析

电磁兼容维护是为了消除设备出现的电磁干扰,使其在复杂的工作环境下保持良好的电磁兼容性能,合理、有效地使用频谱资源。同时,随着大功率发射源、强电磁干扰的逐步增多,电磁兼容维护还必须考虑对强场或高功率电磁波的防护。因此,电磁兼容维护与电磁干扰特性、电磁环境分布、电磁防护、电磁频谱管理状况等有关。

1.2.1 电磁干扰

电磁兼容性差或下降,将产生电磁干扰,影响设备与系统的正常工作。

1. 电磁干扰概念

电磁干扰是指任何对电子设备和系统的造成影响的电磁信号或能量,偏重于指电磁干扰源。实际工作中,电磁干扰还包含电磁干扰源对电子设备和系统形成影响的过程或结果,是一种广义的电磁干扰。电子战研究的敌方恶意电磁辐射,电磁兼容研究的己方设备以及自然环境所产生的电磁辐射,都属于广义的电磁干扰。虽然它们的来源、形式、作用方式等有区别,但是仅从电磁原理角度看,它们对电子设备和系统的作用机理是一致的。鉴于以上原因,本书主要从电磁原理的角度进行电磁兼容管理维护的分析,而不涉及战术应用、信号体制等内容,所以本书所讲电磁干扰虽然主要是指己方设备以及自然环境所产生的电磁辐射,但是第8章中电磁防护与加固、频谱管理等内容涉及的电磁干扰也会与电子战中的电磁干扰有交叉。

2. 电磁干扰形式

电磁干扰形式多样,频域上电磁干扰可以归纳为同频干扰、邻频干扰等主要形式。

1) 同频干扰

与有用信号频率相同的电磁干扰称为同频干扰。由于同频干扰信号与有用信号的频率相同,接收机很难完全消除和抑制这种干扰信号,使得干扰与信号同时被放大、解调、输出,导致同频失真和阻塞等结果。

2) 邻频干扰

发射机产生的邻频信号对接收机形成的干扰,以及环境信号从接收机通带附近进入接收机而形成的干扰,都属于邻频干扰。在多数无线设备中,总是需要对发射信号的带外辐射进行限制,还要求接收机具有足够的邻频衰减,减小邻频干扰信号功率。邻频干扰增加了接收机的噪声功率,使得接收机信噪比下降、灵敏度降低,导致雷达作用距离减小,通信距离缩短、误码率增加,甚至造成接收机阻塞。

3) 谐波干扰

辐射源的谐波发射进入敏感设备接收机造成的电磁干扰称为谐波干扰。谐波干扰频率是辐射源信号频率的整数倍,如果超过规定电平就会产生与同频干扰类似的现象。

4) 互调和交调干扰

互调是指两个或两个以上信号同时进入接收机,由于接收机内部器件(放大器、混频器等)的非线性而产生新的信号。这些信号如果引起干扰就是互调干扰。交调干扰是指不希望信号对希望信号进行了调制,其机理与互调相同。后果主要表现为显示屏上的干扰条纹、雪花点、重影、变形、语音的失真、噪声等,导致电子设备与系统的作用距离下降。

3. 电磁干扰三要素

无论哪种形式的电磁干扰,其形成必须同时具备电磁干扰源、耦合途径、电磁敏感设备三个条件,这就是电磁干扰三要素,也称为电磁兼容三要素,如图 1.3 所示。

电磁干扰源是指产生电磁干扰的元件、器件、设备、分系统、系统和自然辐射源等电磁辐射源;敏感设备是指对电磁干扰产生响应的设备;耦合途径是指把干扰能量从干扰源耦合到敏感设备内的通路或媒质。

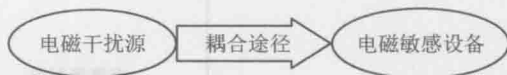


图 1.3 电磁干扰三要素

由电磁干扰源产生的电磁能量经过耦合途径传输到敏感设备,导致敏感设备出现某种形式的响应,称为电磁干扰效应。只要做到消除电磁干扰源、切断耦合途径、降低敏感设备感性中的任何一点,都有利于实现电磁兼容。

设备之间的干扰包含多种耦合。图 1.4 所示为设备的一般构成,包括天线、主机以及各种连接线缆等。天线、滤波电路、放大电路等构成接收机的信号通道,主要是用来接收工作信号的。需要注意的是,信号能通过的通道,有的干扰也能通过,因此,接收机信号通道通常称为电磁耦合前门。另外,干扰信号还可能通过电源线、地线和屏蔽装置的孔、缝等耦合到接收机信号通道或敏感部件上产生干扰,影响设备正常工作。因此,公共地、控制线、电源线、偏置电路、设备外壳的孔、缝等通常称为电磁耦合后门。前门和后门特性不一样。例如,前门一般具有较强的频率选择性和空间选择性,从前门进入设备的能量主要作用于信号通道上,后门则不具有明显的频率选择性和空间选择性,或者很难清楚其特性,从后门耦合的电磁能量也不一定作用于信号通道上。

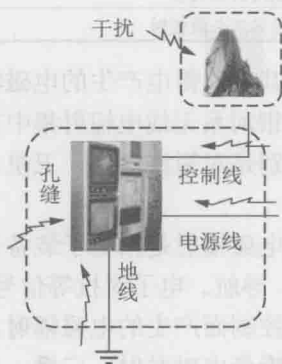


图 1.4 电子系统基本结构示意图

实际工程中因为多种耦合同时存在,反复交叉耦合,共同产生干扰,使得电磁干扰变得难以控制。特别是后门特性难以把握,对设备一些不经意的改动都可能产生意想不到的结果^[2]。

1.2.2 电磁环境效应

电磁环境定义为存在于给定场所的所有电磁现象的总和。给定场所即自然空间;所有电磁现象包括所有电场、磁场与电磁场。1988 年美军将电磁环境定义为“军队、系统或平台在预定工作环境中执行任务时可能遇到的在各种频率范围内电磁辐射或传导辐射的功率和时间的分布状况”。电磁环境对军队、设备、系统和平台的影响涉及所有电磁学科,如电磁兼容、电磁干扰、电磁易损性、电磁脉冲、电子对抗等。

电磁环境的构成要素包括自然电磁辐射源和人为电磁辐射源两大类,如表 1.1 所示。电

磁辐射源的数目、频率、功率、极化、时间以及工作方式等特性影响了电磁环境的频带、空间、时间等分布^[3]。

表 1.1 主要电磁辐射源

自然电磁辐射源	雷电	
	磁暴	
	太阳辐射	
	宇宙辐射	
人为电磁辐射源	有意辐射源	广播
		电视
		通信
		雷达
		导航
		电子对抗
	无意辐射源	机动车辆
		输电线
		电动机械
		家用电器
		办公设备
		工业、医用射频设备
雷达、通信等的杂散辐射		

自然电磁辐射源包括雷电、磁暴、太阳辐射以及宇宙辐射等。其中，雷电产生的电磁辐射覆盖 30MHz 以下频段，太阳辐射主要集中在 10MHz~30GHz，银河系无线电辐射集中在 150~200MHz。自然电磁辐射对电磁环境的影响有时相当明显，特别是对短波通信、卫星、飞船、弹道导弹等可能产生干扰^[4]。

人为电磁辐射源包括有意电磁辐射源和无意电磁辐射源。有意电磁辐射是指电子装备为实现某种特定目的而发射的电磁辐射，如广播、电视、通信、雷达、导航、电子对抗等信号。无意电磁辐射是指电子设备、电气设备、电器等因不加控制和无法控制而产生的电磁辐射，如电动机械、输电线、办公用电器、家用电器、医疗器械等产生的附带电磁发射，广播、电视、通信、雷达、导航、电子对抗等产生的杂散辐射(非工作信号)，也属于无意辐射。

有人从电子对抗角度，把人为电磁辐射分为非对抗性电磁辐射和对抗性电磁辐射。非对抗性电磁辐射是指工业用电器设备、广播、电视、通信、雷达、导航等己方电磁活动产生的辐射，对抗性电磁辐射包括压制性电子干扰、欺骗性干扰、定向能(激光、高功率微波)攻击等敌对电磁活动产生的辐射。电子对抗是信息化战场上影响电磁环境的核心因素。

电磁环境主要与敌方的恶意干扰、己方的电磁自扰互扰以及自然电磁辐射有关。随着信息化设备的大量使用和电器的普及，电磁环境越来越复杂。特别是在信息化战场上，敌我双方的通信、探测以及电子对抗等使用的电子装备种类多、数量大、功率强，再加上各种民用和自然辐射的各种电磁波，构成了复杂的电磁环境^[5]。

研究电磁环境的核心问题之一就是研究电磁环境对电子设备与系统的电磁效应，即电磁环境效应(Electromagnetic Environment Effect, E3)。电磁环境效应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，以及对人员和材料产生的危害。为了应对电磁环境效应，必须在电子系统和设备的全寿命周期(图 1.5)的每一阶段采取相应措施。

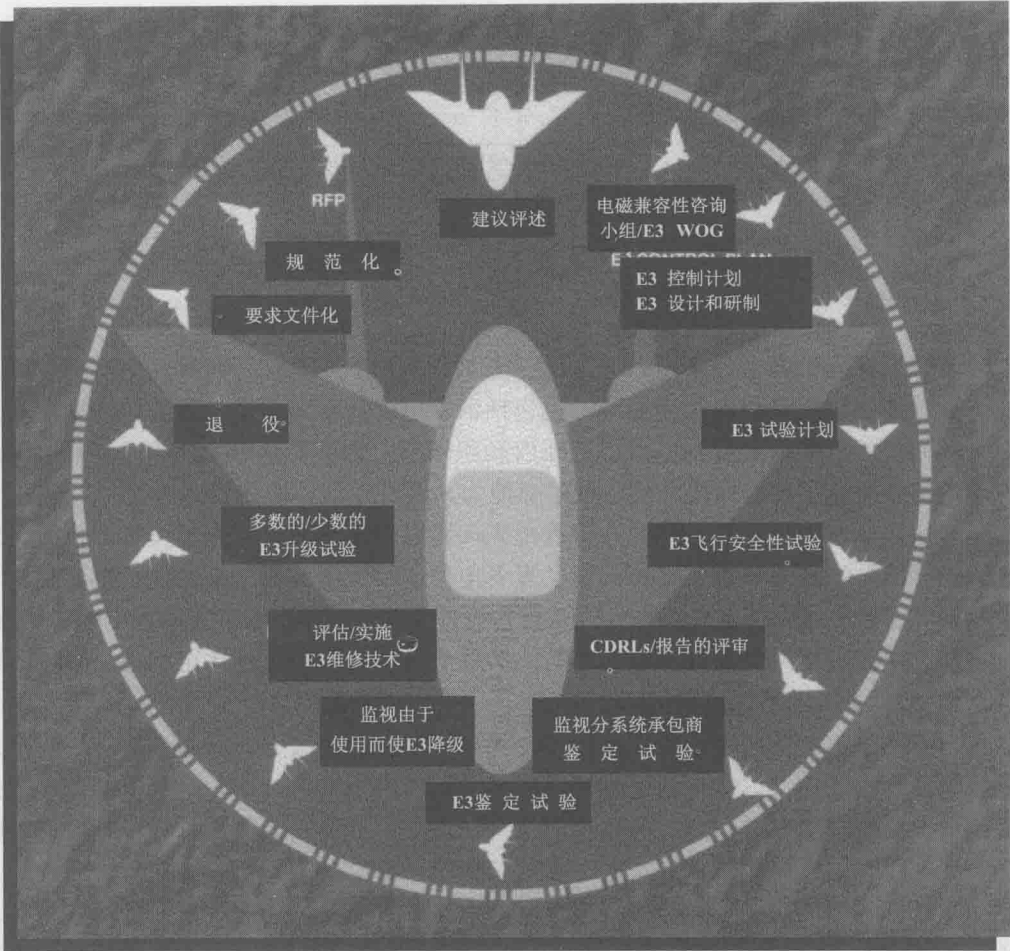


图 1.5 E3 的寿命周期示意

E3 产生机理为：电磁环境中的电磁辐射源产生的电磁辐射通过一定的电磁传播途径作用在电子系统、设备、装置上，对易受干扰的电子设备产生影响，从而使设备效能发生变化。这与电磁干扰的机理是一致的，也就是说电磁环境产生效应与发生电磁干扰本质是相同的。

E3 使电子信息系统和设备系统性能降低。特别是现在某些设备和系统设计的趋势是朝着更敏感、较低逻辑电平的电子集成电路发展。低成本、小尺寸、质量轻的设备与系统，常常将其封装在非导电的复合材料中，具有较少的预先电磁干扰保护。这种设计倾向，将会十分明显地增加设备与系统的电磁易损性。

日益严重的电磁环境威胁，要求对设备与系统进行电磁干扰综合控制，进行全寿命期电磁环境分析、试验等，即从预研到工程设计的样机、从生产和鉴定到退役，电磁干扰都得到控制，以保证电磁兼容性。

从应对 E3 的角度看，实施合理的电磁兼容和频谱管理措施，可以消除设备电磁自扰和设备间的电磁互扰，电子对抗可以有效应对敌方的恶意干扰，如图 1.6 所示。因此，做好设备的电磁兼容管理维护，对于应对电磁环境效应具有重要意义。



图 1.6 电磁环境内涵及其应对策略

1.2.3 电磁防护

电磁防护是指为消除电磁环境效应，而在电子设备与系统设计、研制、生产中使其具有抗电磁干扰或电磁毁伤能力的技术措施，也包括消除电磁环境对电爆装置、燃油以及人员的影响而采取的措施。电磁兼容与电磁防护在内涵和外延上是一个有机的整体，其目的都是保障电子设备与系统在预定的电磁环境中的生存能力、运行能力和电磁安全性。

加强装备强场电磁环境效应研究，掌握电磁环境对电子系统、电爆装置等的作用机理，形成有效的电磁防护技术措施，是解决电子设备电磁安全性问题的基础途径。电磁防护与下列技术和研究内容有关：电子元器件的电磁损伤机理、损伤规律；电子元器件电磁防护设计；人员、燃油、电爆装置电磁辐射危害与防护；武器系统瞬态强电磁场作用机理与防护；射频辐射对用频装备的作用规律；电磁主动防护等。

屏蔽、吸波技术是常用且易实现的防护措施，将屏蔽和吸波材料覆盖于被防护对象之上即可起到电磁防护作用，屏蔽是将电磁能反射回去从而阻止其进入防护对象内部，吸波是衰减电磁能量使其减弱到不能对防护对象造成损害。屏蔽多用金属或磁性材料，吸波材料则相对复杂和多样化。根据电磁防护需求的发展技术状况，未来吸波材料需要从其吸波性能、带宽特性、重量、环境适应性等方面进行改进，并应展开吸波材料、透波材料、纳米材料、手性材料、智能材料、多频谱雷达吸波材料(RAM)等新型 RAM 的研究。寻求发展新的先进有效的防护材料，特别是电磁兼容及防护领域的 RAM 技术和新型防护材料，已成为提高作战武器系统生存和突防能力的当务之急。

复杂电磁环境对电磁防护增加了新内涵，有观点认为新型隐身技术也属于电磁防护领域。电磁隐形技术就是针对探测系统发展起来的对抗技术，是传统伪装技术的发展和延伸，能使伪装技术由防御走向进攻，由消极被动变为积极主动，也使得复杂电磁环境下的信息火力对抗更为隐蔽和突然。目前，电磁隐形技术已开始应用于飞机、导弹、坦克、艇船等的设计制造、电子对抗以及对重要目标的伪装等方面，并在战争中发挥了重要的作用。在复杂电磁环境下，电子设备与系统面临着以激光、红外、微波、毫米波、可见光等电磁波为媒介的先进探测系统的严重威胁，而且对其实施干扰的难度增大，为了提高电子设备与系统生存能力以及对敌方打击的突然性，必须采取相应的措施，来降低电子设备与系统被发现的概率。探测技术的飞速发展，使得各种具有高探测精度、高分辨率的探测设备不断涌现出来，常规的隐形技术越来越不能满足现代战争的需要。随着军事侦察探测技术的大力发展，侦察频段越来越宽，多种侦察探测技术并用，只有发展新型电磁隐形技术才能满足未来战争的需要。

随着技术发展，未来电子战的新技术和新战法对电磁防护提出了更高要求。传统电子战利用电磁能、定向能、声能、反辐射摧毁、火力打击、网络攻击等手段，破坏敌方电子信息