

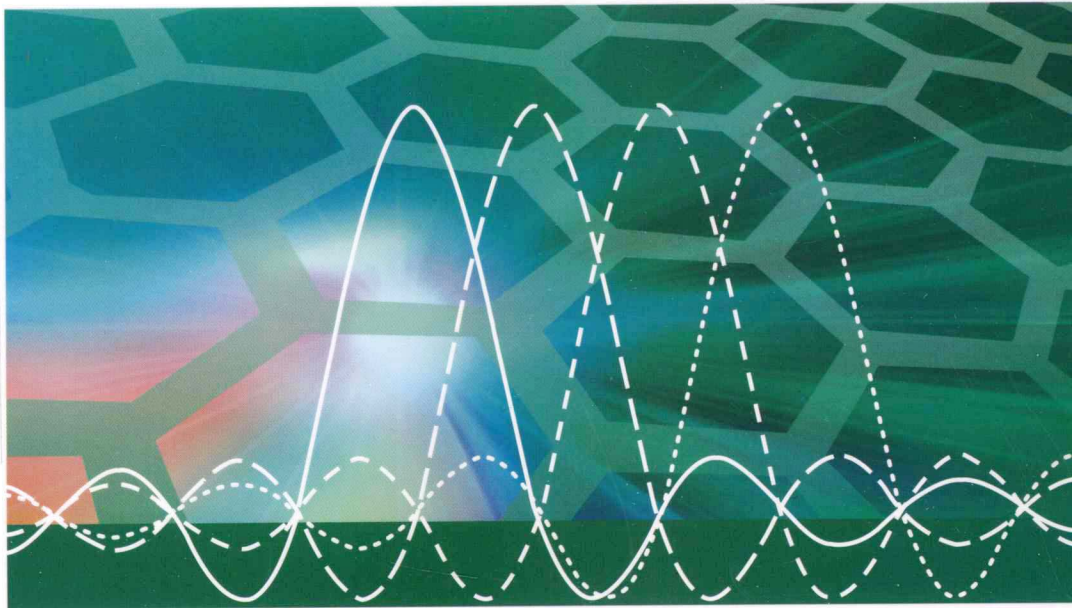


电磁兼容与电磁防护系列著作

电磁兼容原理

Electromagnetic
Compatibility Principles

■ 谭志良 王玉明 闻映红 等编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

电磁兼容与电磁防护系列著

电磁兼容原理

主 编 谭志良
副主编 王玉明 闻映红
编 著 谭志良 王玉明 闻映红
毕军建 谢鹏浩 胡小锋
马立云 王平平 陈光辉



国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书从电磁兼容性的基本原理出发,充分考虑这门学科与工程应用紧密结合的实际,系统地介绍了电磁兼容相关概念、电磁干扰源、电磁干扰的传播与耦合、电磁危害与控制、电磁兼容性设计方法、电磁兼容性预测、电磁兼容性试验设施、电磁发射和电磁敏感度测试等。书中既有理论分析与基本原理阐述,又有示例和工程应用,内容丰富、深入浅出,具有较强的实用性和可读性。

本书可作为高等院校电磁场与电磁防护、电气与电子工程、无线电与通信工程等相关专业本科生与研究生教材,也可以作为工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电磁兼容原理/谭志良等编著. —北京:国防工业出版社,2013.5
ISBN 978-7-118-08532-7

I. ①电… II. ①谭… III. ①电磁兼容性—理论
IV. ①TN03

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 031453 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)
北京嘉恒彩色印刷有限责任公司
新华书店经售

*

开本 710×960 1/16 印张 15 $\frac{3}{4}$ 字数 297 千字
2013 年 5 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 48.00 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

前 言

随着电气、电子技术的迅速发展,电磁环境日趋复杂,电磁兼容问题日益突出。电磁兼容的应用范围涉及所有用电领域,来保证现代生产、生活中人身及设备的安全。

电磁兼容学科是一门综合性交叉学科,与电磁场与微波技术、信息与信号处理、电子科学与技术、通信与信息系统、计算机科学与技术等许多学科相互渗透。它起源于无线电干扰问题的解决,随着信息技术的发展,成为自然科学与工程学的一个交叉学科,其核心仍然是电磁理论,但理论基础宽,工程实践性强,是电气、电子、电力等专业必须掌握的基本知识和技术。

本书编著委员会由9人组成,谭志良任主编,王玉明、闻映红任副主编,毕军建、谢鹏浩、胡小锋、马立云、王平平、陈光辉任编委。

全书共11章:第1章为电磁兼容概论;第2章介绍引起电磁干扰的电磁干扰源;第3章介绍电磁干扰传播与耦合理论;第4章介绍电磁危害与控制;第5章为接地技术及应用;第6章为屏蔽技术;第7章为滤波技术及应用,第8章为电磁兼容性预测;第9章为电磁兼容性试验设施;第10章为电磁发射和电磁敏感度测试;第11章为电缆的电磁兼容分析。

本书是在军械工程学院强电磁场环境模拟与防护技术国防科技重点实验室的大力支持下完成的。第1、2、4、11章由谭志良、王平平编写,第5~7章由王玉明、马立云编写,第3、9章由闻映红编写,第8章由胡小锋、谢鹏浩编写,第10章由毕军建、陈光辉编写。

由于电磁兼容原理涉及多个学科,内容丰富,相关理论和技术发展迅速,工程要求不断提高,本书不能涵盖全部内容。加之作者水平有限,书中难免存在错误和不足,衷心希望广大读者批评指正。

作 者

目 录

| | |
|--------------------------------|----|
| 第 1 章 电磁兼容概论 | 1 |
| 1.1 电磁兼容学科发展历史 | 1 |
| 1.1.1 早期历史概述 | 1 |
| 1.1.2 EMC 技术的发展进程 | 2 |
| 1.1.3 EMC 技术在军事领域的发展现状 | 3 |
| 1.1.4 我国 EMC 技术的发展状况 | 3 |
| 1.1.5 电磁兼容学科发展趋势 | 4 |
| 1.2 电磁兼容基本概念 | 5 |
| 1.3 电磁兼容标准概述 | 8 |
| 1.3.1 电磁兼容标准分级 | 8 |
| 1.3.2 主要制定电磁兼容标准的组织和标准介绍 | 9 |
| 1.3.3 电磁兼容标准的内容 | 9 |
| 1.4 电磁兼容问题三要素 | 11 |
| 1.5 电磁兼容学科的主要研究内容 | 11 |
| 1.5.1 电磁兼容仿真预测技术 | 11 |
| 1.5.2 电磁兼容设计与全寿命周期控制技术 | 12 |
| 1.5.3 电磁兼容试验与评估技术 | 14 |
| 1.5.4 电磁频谱工程 | 15 |
| 第 2 章 电磁干扰源 | 17 |
| 2.1 电磁干扰源的分类 | 17 |
| 2.2 自然干扰源 | 17 |
| 2.2.1 大气噪声 | 17 |
| 2.2.2 宇宙噪声 | 18 |
| 2.2.3 静电噪声 | 18 |
| 2.2.4 热噪声 | 18 |
| 2.3 人为干扰源 | 18 |

| | | |
|------------|------------------------|-----------|
| 2.3.1 | 功能性干扰源 | 19 |
| 2.3.2 | 非功能性干扰源 | 19 |
| 第3章 | 电磁干扰传播与耦合 | 21 |
| 3.1 | 电磁干扰的传播与耦合 | 21 |
| 3.2 | 传导耦合原理 | 21 |
| 3.2.1 | 电阻性耦合 | 22 |
| 3.2.2 | 电容性耦合 | 24 |
| 3.2.3 | 电感性耦合 | 26 |
| 3.3 | 辐射耦合 | 28 |
| 3.3.1 | 天线的辐射 | 28 |
| 3.3.2 | 场对天线的耦合 | 31 |
| 3.3.3 | 场对导线的耦合 | 35 |
| 第4章 | 电磁危害与控制 | 37 |
| 4.1 | 电磁环境效应 | 37 |
| 4.2 | 电磁干扰对电气、电子设备的危害 | 39 |
| 4.3 | 电磁干扰对燃油的危害 | 41 |
| 4.4 | 电磁能量对军械的危害 | 43 |
| 4.5 | 电磁能量对人员的危害 | 45 |
| 第5章 | 接地技术及应用 | 47 |
| 5.1 | 接地的含义与目的 | 47 |
| 5.2 | 安全接地方法及原则 | 48 |
| 5.2.1 | 设备安全接地 | 49 |
| 5.2.2 | 接零保护接地 | 50 |
| 5.2.3 | 防雷安全接地 | 50 |
| 5.3 | 地线干扰形成的原因 | 51 |
| 5.3.1 | 信号接地 | 51 |
| 5.3.2 | 地线阻抗 | 52 |
| 5.3.3 | 地线干扰形成的原因 | 54 |
| 5.4 | 信号接地方法及原则 | 55 |
| 5.4.1 | 单点接地 | 56 |
| 5.4.2 | 多点接地 | 58 |
| 5.4.3 | 混合接地 | 60 |

| | | |
|------------|----------------|------------|
| 5.4.4 | 悬浮接地 | 61 |
| 5.5 | 电子电路的接地设计 | 62 |
| 5.5.1 | 一般单元电路的接地 | 62 |
| 5.5.2 | 多级电路的接地 | 63 |
| 5.6 | 地线干扰的抑制措施 | 65 |
| 5.6.1 | 隔离变压器 | 65 |
| 5.6.2 | 纵向扼流圈 | 66 |
| 5.6.3 | 光耦合器 | 69 |
| 5.6.4 | 差分平衡电路 | 70 |
| 第6章 | 屏蔽技术 | 72 |
| 6.1 | 屏蔽的原理 | 72 |
| 6.1.1 | 屏蔽的分类 | 72 |
| 6.1.2 | 电场屏蔽原理 | 72 |
| 6.1.3 | 磁场屏蔽原理 | 75 |
| 6.1.4 | 电磁屏蔽原理 | 79 |
| 6.2 | 屏蔽效能和屏蔽理论 | 80 |
| 6.2.1 | 屏蔽效能的表示 | 80 |
| 6.2.2 | 屏蔽的传输理论 | 80 |
| 6.2.3 | 屏蔽效能的计算 | 83 |
| 6.2.4 | 低频磁场的屏蔽方法 | 89 |
| 6.3 | 几种实用屏蔽技术 | 91 |
| 6.3.1 | 薄膜屏蔽 | 91 |
| 6.3.2 | 多层屏蔽 | 92 |
| 6.3.3 | 泄漏抑制措施 | 93 |
| 6.4 | 屏蔽体的设计 | 95 |
| 6.4.1 | 屏蔽体的设计原则 | 95 |
| 6.4.2 | 屏蔽体设计中的处理方法 | 96 |
| 第7章 | 滤波技术及应用 | 101 |
| 7.1 | 滤波器的特性及分类 | 101 |
| 7.1.1 | 滤波器的特性 | 101 |
| 7.1.2 | 滤波器的分类 | 103 |
| 7.2 | 反射式滤波器 | 104 |
| 7.2.1 | 低通滤波器 | 104 |

| | | |
|------------|-------------------------|------------|
| 7.2.2 | 高通滤波器 | 108 |
| 7.2.3 | 带通滤波器与带阻滤波器 | 109 |
| 7.3 | 电磁干扰滤波器 | 109 |
| 7.3.1 | 电磁干扰滤波器的特点 | 109 |
| 7.3.2 | 电磁干扰滤波器的基本电路结构 | 110 |
| 7.3.3 | 电磁干扰滤波器的阻抗匹配问题 | 111 |
| 7.4 | 电源线滤波器 | 112 |
| 7.4.1 | 共模干扰和差模干扰 | 112 |
| 7.4.2 | 电源线滤波器的网络结构 | 112 |
| 7.5 | 滤波器件的实现 | 114 |
| 7.5.1 | 电容器的实现 | 114 |
| 7.5.2 | 电感器的实现 | 117 |
| 7.6 | 滤波器的选择与安装 | 118 |
| 7.6.1 | 滤波器的选择 | 118 |
| 7.6.2 | 滤波器的安装 | 119 |
| 第8章 | 电磁兼容性预测 | 122 |
| 8.1 | 电磁兼容性预测的原理 | 123 |
| 8.2 | 电磁兼容性的基本方程 | 124 |
| 8.3 | 电磁兼容性预测的数学方法 | 124 |
| 8.3.1 | 数学模型 | 126 |
| 8.3.2 | 干扰源模型 | 127 |
| 8.3.3 | 传输耦合模型 | 127 |
| 8.3.4 | 敏感设备模型 | 128 |
| 8.4 | 电磁兼容性预测的步骤 | 129 |
| 8.4.1 | 系统间分析预测步骤 | 131 |
| 8.4.2 | 系统内预测分析步骤 | 132 |
| 8.4.3 | 设备级预测分析步骤 | 133 |
| 8.4.4 | 电磁兼容性预测分析软件 | 135 |
| 8.5 | 小孔腔体的电磁耦合规律仿真预测分析 | 139 |
| 8.5.1 | 实验方案 | 139 |
| 8.5.2 | 仿真结果分析 | 139 |
| 第9章 | 电磁兼容性试验设施 | 149 |
| 9.1 | 测试场地 | 149 |

| | | |
|---------------|-----------------------------------|------------|
| 9.1.1 | 屏蔽室 | 149 |
| 9.1.2 | 开阔场地 | 151 |
| 9.1.3 | 电波暗室 | 154 |
| 9.2 | 常用测量仪器及设备 | 161 |
| 9.2.1 | 测量接收机(电磁干扰测量仪) | 162 |
| 9.2.2 | 频谱分析仪/电磁干扰接收机 | 165 |
| 9.2.3 | 电源阻抗稳定网络 | 167 |
| 9.2.4 | 亥姆霍兹线圈 | 168 |
| 9.2.5 | 电流探头 | 169 |
| 9.2.6 | 横电磁波传输小室 | 170 |
| 9.2.7 | 常用天线 | 176 |
| 第 10 章 | 电磁发射和电磁敏感度测试 | 181 |
| 10.1 | 对测试场地、仪器设备的一般要求 | 182 |
| 10.1.1 | 测量容差 | 182 |
| 10.1.2 | 环境电平 | 183 |
| 10.1.3 | 测试场地 | 183 |
| 10.1.4 | 接地平板 | 184 |
| 10.1.5 | 电源阻抗 | 185 |
| 10.1.6 | EUT 测试配置 | 186 |
| 10.1.7 | EUT 状态及其监控 | 188 |
| 10.1.8 | 测试设备 | 190 |
| 10.1.9 | 扫描频率控制 | 192 |
| 10.1.10 | 场强监控 | 193 |
| 10.1.11 | 测量注意事项 | 193 |
| 10.2 | CE102 10kHz ~ 10MHz 电源线传导发射 | 194 |
| 10.2.1 | 极限值 | 194 |
| 10.2.2 | 测试设备及测试配置 | 195 |
| 10.2.3 | 校准 | 196 |
| 10.2.4 | 测试 | 198 |
| 10.2.5 | 注意事项 | 198 |
| 10.3 | CS101 25Hz ~ 50kHz 电源线传导敏感度 | 199 |
| 10.3.1 | 极限值 | 199 |
| 10.3.2 | 测试设备及测试配置 | 201 |
| 10.3.3 | 校准 | 201 |

| | | |
|---------------|---------------------------------|------------|
| 10.3.4 | 测试 | 202 |
| 10.4 | CS114 10kHz ~ 400MHz 电缆束注入传导敏感度 | 203 |
| 10.4.1 | 极限值 | 203 |
| 10.4.2 | 测试设备及测试配置 | 205 |
| 10.4.3 | 校准 | 205 |
| 10.4.4 | 测试 | 206 |
| 10.5 | RE102 10kHz ~ 18GHz 电场辐射发射 | 207 |
| 10.5.1 | 极限值 | 208 |
| 10.5.2 | 测试设备及测试配置 | 208 |
| 10.5.3 | 校准 | 209 |
| 10.5.4 | 测试 | 210 |
| 10.6 | RS103 10kHz ~ 40GHz 电场辐射敏感度 | 211 |
| 10.6.1 | 极限值 | 212 |
| 10.6.2 | 测试设备 | 212 |
| 10.6.3 | 校准 | 213 |
| 10.6.4 | 测试 | 213 |
| 10.7 | RS101 25Hz ~ 100kHz 磁场辐射敏感度 | 214 |
| 10.7.1 | 极限值 | 214 |
| 10.7.2 | 测试设备及测试配置 | 215 |
| 10.7.3 | 校准 | 215 |
| 10.7.4 | 测试 | 216 |
| 10.8 | 电缆屏蔽效能测试 | 217 |
| 10.9 | 电磁干扰滤波器的测试 | 219 |
| 第 11 章 | 电缆的电磁兼容分析 | 221 |
| 11.1 | 电缆和导线的辐射 | 221 |
| 11.1.1 | 环路的辐射 | 223 |
| 11.1.2 | 几何形状的传输线辐射 | 223 |
| 11.2 | 串扰和电磁耦合 | 225 |
| 11.3 | 导线和电缆间的容性串扰和电场耦合 | 227 |
| 11.4 | 导线和电缆间的感性串扰和磁场耦合 | 233 |
| 11.5 | 接口电路 | 235 |
| 11.6 | 连接器 | 237 |
| 11.7 | PCB 之间的互连 | 238 |
| 参考文献 | | 241 |

第1章 电磁兼容概论

电磁兼容(EMC)一般指电气、电子设备在共同的电磁环境中能执行各自功能的共存状态,既要求都能正常工作又互不干扰,达到“兼容”状态。

随着科技的发展,人们在生产、生活中使用的电气、电子设备越来越广泛。这些设备在工作中产生一些有用或无用的电磁能量,这些能量影响到其他设备的工作,就形成了电磁干扰。严格地讲,只要将两个以上的元件(或电路、设备、系统)置于同一电磁环境中,就会产生电磁干扰。

近年来,电磁干扰问题越来越成为电子设备或系统中的一个严重问题,电磁兼容技术已成为许多技术人员和管理人员十分重视的内容。其主要原因如下:

(1) 电子设备的密集度已成为衡量现代化程度的一个重要指标,大量的电子设备在同一电磁环境中工作,电磁干扰的问题呈现出前所未有的严重性。

(2) 现代电子产品的一个主要特征是数字化,微处理器的应用十分普遍,而这些数字电路在工作时,会产生很强的电磁干扰发射。不仅使产品不能通过有关的电磁兼容性标准测试,甚至连自身的稳定工作都不能保证。

(3) 电磁兼容性标准的强制执行,使电子产品必须满足电磁兼容性标准的要求。

(4) 电磁兼容性标准已成为西方发达国家限制进口产品的一道坚固的技术壁垒。

1.1 电磁兼容学科发展历史

1.1.1 早期历史概述

最早出现的电磁干扰现象是于19世纪发现的“单线电报间的串扰”。1881年,英国著名科学家希维赛德发表了“论干扰”的文章,可算是最重要的早期文献。但这类干扰现象在当时并未引起干扰者和被干扰者的重视。

1833年法拉第发现电磁感应定律,指出变化的磁场在导线中产生感应电动势。1864年麦克斯韦引入位移电流的概念,指出变化的电场将激发磁场,并由此预言电磁波的存在。这种电磁场的相互激发并在空间传播,正是电磁干扰存在的理论基础。

随着电气运输的出现,在一根通信线与不对称的强电线之间有较长的平行运行,干扰问题日益严重。这样在 1887 年,柏林电气协会成立了“全部干扰问题委员会”,成员有赫姆霍尔兹和西门子等。

1888 年,赫兹用实验证明了电磁波的存在,同时该实验也证明各种打火系统向空间发出电磁干扰。从此开始了对干扰的实验研究。

1889 年,英国邮电部门研究了通信干扰问题,美国《电世界》杂志登载了电磁感应方面的文章。

20 世纪初,许多学者对电磁感应影响的研究日益深入,并进一步研究感性、容性及阻性等耦合方式引起的干扰,还对辐射性干扰进行了大量研究。

早期的专业刊物——美国的 *Radio Frequency Interference* 是有关射频干扰的专业刊物。到 1964 年,随着专刊内容范围的增加,改名为 EMC 专刊。

美国从 1945 年开始,颁布了一系列电磁兼容方面的军用标准和设计规范,并不断加以充实和完善,使得电磁兼容技术得到快速发展。苏联在 1948 年制定了“工业无线电干扰的极限允许值标准”。之后,其他国家也相继加强了射频干扰的研究工作。

1.1.2 EMC 技术的发展进程

电气、电子技术的发展及广泛应用,设备和系统数量的急剧增多,使得电磁环境日益复杂。例如,1975 年,日内瓦国际频率登记委员会所登记的无线电发射机有 100 多万台,其中 1 万多台无线发射机的总功率超过 540MW,在更高频率上,情况更复杂。1976 年,仅在美国就有 200 多万台移动式无线电发射机和基地台在工作,而军用无线电发射机可能更多。1988 年,世界范围内的工业、科学和医疗 (ISM) 设备的数量已达到一亿二千万台,并以 5% 的速度逐年递增,这些设备有相当数量工作在国际电信联盟 (IUT) 指定的频率之外,或超过国际无线电干扰特别委员会 (CISPR) 对 ISM 设备所规定的辐射干扰极限值的要求,其功率泄漏及高次谐波造成强烈的干扰。

20 世纪 60 年代以来,现代科技向高频、高速、高灵敏度、高安装密度、高集成度、高可靠性方向发展,其应用范围越来越广,渗透到社会的每一个角落。大规模集成电路的出现将人类带入信息时代,信息高速公路和高速计算机技术成为人类社会生产和生活的主导技术。快速发展带来的负面影响之一就是电磁干扰问题的日趋严重,这也极大地促进了 EMC 技术的发展。

电磁背景功率的增加会导致需要增加无线电发射机的功率。例如,60 年前,工业活动还很少时,1 台 120kW 长波发射机的功率场就能覆盖 $3 \times 10^5 \text{km}^2$ 。而现在,要想达到同样的效果,其功率就要增大 17 倍(达到 2MW)。电磁波发射功率竞相增大和社会电子化、工业化增长的共同作用,最终会导致现有利用电信号作为代

码的接收、传输和处理信息的系统的危机与崩溃,这将带来难以想象的,也是史无前例的灾难。

为了避免出现这种结果,就必须采取控制措施,不能让这种趋势不加限制地继续下去,要从组织上、技术上采取相应措施。所以电磁兼容的研究和管理受到各国的重视,近年来获得较快的发展。

进入 20 世纪 80 年代,电磁兼容已成为十分活跃的学科领域,许多国家(美、德、英、法、日等国)在电磁兼容标准与规范,分析预测、设计、测量及管理等方面均达到很高水平,有高精度的电磁干扰(EMI)和电磁敏感度(EMS)自动测量系统,可进行各种系统间的 EMC 试验,研制出系统内和系统间的各种 EMC 计算机分析程序。在电磁干扰抑制技术方面,理论和实际处理方法日臻完善,研制出许多专用的新材料、新器件,并形成了一类新的 EMC 产业。特别是一些国家还建立了对军品和民品 EMC 检验及管理的专门机构,不符合 EMC 标准要求的产品不能装备或不能进入市场,这样还达到了在国际贸易中建立技术壁垒的目的。

1.1.3 EMC 技术在军事领域的发展现状

战争本身是刺激技术发展的重要因素,先进的技术首先会应用于国防和军事,因此各国军工行业的 EMC 技术领先于其他行业。

从军用电子设备角度看,在战争模式发展到电子战的今天,制电磁权的争夺使得强化电子设备的电磁兼容性是确保在战争环境中人员、电子设备、信息情报的安全、获得战争胜利的关键环节。

现代军用装备中大量电子设备装配在密集狭小的空间内,相互间的电磁干扰非常严重,常造成失灵、瘫痪等事故,甚至由于不能同时兼容工作而遭受攻击的情况屡见不鲜。

美国在电磁兼容方面的研究已经开展了 50 年,在电磁兼容的各个领域都处于领先地位。发射电磁干扰已作为特殊进攻方式应用于战场,目前美国已拥有电磁干扰飞机和电磁炸弹等。

特别值得提出的是,美国科研部门为保护通信网和某些军事装备不受强电磁(包括高空核磁爆)影响,正在全力研究新的抗电磁干扰技术。为此,仅在 1982 年开始时,美国国防部就投入了 200 亿美元,用以专门对付“电磁脉冲(EMP)”的科学研究与设施开发。

1.1.4 我国 EMC 技术的发展状况

我国开展 EMC 工作较晚,与先进国家差距较大,尤其是缺乏管理规范和设计规范。第一个干扰标准是 1966 年由原第一机械工业部制定的部级标准 JB-854—1966《船用电气设备工业无线电干扰端子电压测量方法与允许值》。

1986年我国出台 GJB 151—86《军用设备和分系统电磁发射和敏感度要求》后,电磁兼容问题逐步得到重视。到 1997 年颁布并强制执行了 GJB 151A—97、GJB 152A—97《军用设备和分系统电磁发射和敏感度测量》电磁兼容国军标及保密委标准后,电磁兼容技术水平提高很快。目前已制定出国家标准及军用标准 30 余个,标准要求基本等同于国际标准和美军标。为考核进出口电子、电气产品的干扰特性提供了一定条件,使我国在电磁兼容标准与规范方面有了较大进展。

近年来国家有关部门对电磁兼容十分重视,电磁兼容学术组织纷纷成立,在许多单位建立了 EMC 实验室,引进较先进的 EMI、EMS 自动测量系统和设备,在各地区及一些军工系统建立了国家级 EMC 测量中心,已具备各种 EMC 测量和试验的能力。

1.1.5 电磁兼容学科发展趋势

现代工业的快速发展,使辐射源的增长率达到每年 5% ~ 8%,特别是在城市,人为的电磁辐射密度增长率达到每年 7% ~ 14%。因此,城市中电磁能量密度每 5 ~ 10 年增加 1 倍。在今后 25 年内,社会生产所引起的电磁干扰能量密度将增加 30 倍,50 年内可增加 700 ~ 1000 倍,21 世纪电磁环境恶化形势已成定局。因此,如何使电子设备正常工作将变得越来越困难,对释放的干扰控制也越来越严格。

在军事方面,美俄等国正在研制中的第三代核武器之一就是核电磁脉冲弹。一般的核武器有三大效应:冲击波、热辐射(光辐射)和放射性污染。实际上核武器还有第四效应——电磁脉冲(Electromagnetic Pulse, EMP),普通核武器以电磁脉冲形式释放的能量仅占总释放量的 $3/10^{10} \sim 3/10^5$,而核电磁脉冲弹则可将此值提高到 40%。核爆炸瞬间,弹体释放出大量 γ 射线、X 射线和高能中子。由于这些射线能量很大,使周围空气分子电离,产生大量带电粒子,这些粒子的运动形成电流,激励电磁场,使爆心周围产生一个很强的瞬时电磁场,它以波的形式并以光速向外传播。其电场强度可达 50kV/m ~ 100kV/m,频谱很宽,作用范围大,能在电子设备的导体中感应出很大的瞬时电压和电流,使电子设备、电路和元器件受到不同程度的干扰和破坏。EMP 可使敌方指挥、控制、通信和情报、监视、侦察(Command、Control、Communication、Computer&Intelligence、Surveillance、Reconnaissance, 简称为 C⁴ISR)系统遭到毁灭性打击,并导致系统瘫痪、电力网断路、金属管线及地下电缆通信网等受到影响而陷入无电源、无通信、无计算机的三无世界。它的后果是破坏电子设备而不伤害人(这与中子弹的效果恰好相反),这就把核武器常规化了。这个新的发现,直接促成现在研究核电磁脉冲的热潮。

信息系统的 TEMPEST 技术是电磁兼容领域发展起来的一个新的研究方向。其具体内容是针对信息设备的电磁干扰与信息泄漏问题,从信息接收和防护两个方面展开一系列研究和开发工作,包括信息接收、信息破译、防泄漏能力与技术、相

关规范标准及管理手段等。

由于计算机系统是各种信息处理设备中最为关键和重要的组成部分,因而也使得利用信息设备的电磁泄漏来获取信息情报更为及时、准确、广泛及连续,而且安全、可靠、隐蔽。正是这样,TEMPEST 防护研究一般都是针对计算机系统及其外设配置而开展的,也包括接收系统、电传机、数字电话等。

信息处理设备的电磁辐射有两方面影响:

- (1) 对电磁环境构成污染。
- (2) 对信息安全与信息保密构成严重威胁。

海湾战争中,美国通过其间谍卫星的 TEMPEST 接收系统截获伊拉克及海湾地区的政治、军事、经济情报,其相当多的部分就是利用对方电子设备自身泄漏的电磁波获取的。

分析表明,数字电路组成的信息处理设备由于辐射频谱及谐波非常丰富,因而很容易被窃收和解译,其信息泄漏现象非常突出和严重。以计算机视频显示器为例,其中各种印制电路、各部件之间的电源、信号接口与连线、数据线、接地线等都可以产生程度不同的电磁辐射。在辐射频谱中,所包含的信息也各不相同,理论上这些信息都可以被接收和解译。

因此,研究计算机的 TEMPEST 技术已和研究计算机病毒一样,被认为是涉及计算机安全的重要方面,受到国内外相关部门的密切关注。

从电气、电子设备的抗干扰问题,到同一电磁环境中能执行各自功能的共存状态,达到“兼容”。随着科技的发展,电磁兼容学科研究的范围不断扩大,涉及的专业越来越多,目前一些电磁兼容学者又进一步探讨电磁污染,电磁环境对人类及生物的危害影响,地球电磁,地震电磁学,太阳、宇宙电磁等。学科范围已不仅局限于设备与设备、系统与系统之间的问题。因此一些学者也将电磁兼容这一学科发展称为“环境电磁学”。

1.2 电磁兼容基本概念

(1) 电磁兼容 (Electromagnetic Compatibility, EMC): 国家军用标准 GJB 72A—2002《电磁干扰和电磁兼容性术语》中给出电磁兼容性的定义为:“设备、分系统、系统中共同的电磁环境中能一起执行各自功能的共存状态。包括以下两个方面:设备、分系统、系统在预定的电磁环境中运行时,可按规定的裕度实现设计的工作性能,且不因电磁干扰而受损或产生不可接受的降级;设备、分系统、系统在预定的电磁环境中正常地工作且不会给环境(或其他设备)带来不可接受的电磁干扰”。可见,从电磁兼容性的观点出发,除了要求设备、分系统、系统能按设计要求完成功能外,还要求设备、分系统、系统有一定的抗干扰能力,不产生超过规定限制

的电磁干扰。

美军在 2007 年 10 月出版的《国防部军事相关术语词典》中对于电磁兼容定义为：“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”。

国际电工委员会(IEC)认为：“电磁兼容性是设备的一种能力，它在其电磁环境中能完成自身的功能，而不至于在其环境中产生不允许的干扰”。

电磁兼容与电磁环境密切相关，国家军用标准 GJB 72A—2002 对电磁环境的定义为：“电磁环境是指存在于给定场所的所有电磁现象的总和”。美军在 2007 年 10 月出版的《国防部军事相关术语词典》中定义电磁环境为：“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(电平)功率和时间分布的结果。它是电磁干扰、电磁脉冲、电磁辐射对人员、军械和挥发性物质危害，以及雷电和沉积静电等自然现象的综合”。苏联军事百科全书对电磁环境的定义是：“影响无线电装置或其部件工作的电磁辐射环境。规定区域内或目标上的电磁环境，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。并且还认为，电磁环境是指电子战双方在特定的感兴趣的区域内，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”。

美国军用标准 MIL - STD - 464A《系统电磁环境效应要求》给出电磁环境效应的定义为：“电磁环境对军事力量、设备、系统和平台工作能力的影响”。

(2) 安全裕度:敏感度阈值与环境中的实际干扰影响下性能降级或不能完成规定任务的特性。

(3) 电磁骚扰:任何可能引起装置、设备或系统性能低或对有生命或无生命物质产生损害作用的电磁现象。电磁骚扰可能是电磁噪声、无用信号或传播介质自身的变化。

(4) 电磁干扰(EMI):电磁干扰引起的设备、传输通道或系统性能的下降。又可解释为:任何可能中断、阻碍,甚至降低、限制无线电通信或其他电子设备性能的传导或辐射的电磁能量。

(5) 辐射干扰:任何源自部件、天线、电缆、互连线的电磁辐射,以电场、磁场形式(或兼而有之)存在,并导致性能降级的不希望有的电磁能量。

(6) 传导干扰:沿着导体传输的不希望有的电磁能量,通常用电压或电流来定义。

(7) 电磁脉冲(EMP):核爆炸或雷电放电时,在核设施或周围介质中存在光子散射,由此产生的康普顿反冲电子和光电子所导致新的电磁辐射。由电磁脉冲所产生的电场、磁场可能会与电子或电子系统耦合产生破坏性的电压和电流浪涌。

(8) 浪涌:沿线路或电路传播的电流、电压或功率的瞬态波。其特征最先快速

上升后缓慢下降。浪涌由开关切换、雷电放电、核爆炸引起。

(9) 静电放电(ESD):不同静电电位的物体靠近或直接接触时产生的电荷转移。

(10) 串扰:通过与其他传输线路的电场(容性)或磁场(感性)耦合,在自身传输线路中引入的一种不希望有的信号扰动。

(11) 串扰耦合:对于从一个信道传输到另一个信道的干扰功率的度量;存在于两个或多个不同信道之间、电路组件或元件之间的不希望有的信号耦合。

(12) 抑制:通过滤波、接地、搭接、屏蔽和吸收,或这些技术的组合,以减小或消除不希望有的发射。

(13) 射频:在电磁频谱中介于音频和红外线频率之间、用于无线电发射的频率。目前应用的射频范围是9kHz~3000GHz(3THz)。

(14) 电磁敏感度(EMS):设备、器件或系统因电磁干扰可能导致工作性能降级的特性。

(15) 辐射发射(RE):以电场形式,通过空间传播的有用或无用的电磁能量。

(16) 传导发射(CE):沿金属导体传播的电磁发射。此类导体可以是电源线、信号线及一个非专门设置、偶然的导体辐射敏感度(RS)对造成设备、分系统、系统性能降级的辐射干扰场强的度量。

(17) 传导敏感度(CS):当引起设备呈现不希望有的响应式性能降级时,对电源线、信号线或控制线上的干扰信号电流或电压的度量。

(18) 屏蔽效能(SE):屏蔽体的有效性用屏蔽效能(SE)来度量。具体定义为

$$SE = 20\lg(E_0/E_1) \text{ (电场)}$$

$$SE = 20\lg(H_0/H_1) \text{ (磁场)}$$

式中: E_0 、 H_0 为没有屏蔽时测得的电场强度、磁场强度; E_1 、 H_1 为屏蔽后测得的电场强度、磁场强度。屏蔽效能的单位是dB。

屏蔽效能与衰减量的关系:

分贝(dB)的定义:分贝是两个功率的比值的对数,具体形式为

$$\text{分贝} = 10\lg(P_2/P_1) \text{ (dB)}$$

式中: P_1 、 P_2 为两个功率数值,分贝可以用来表示功率增益($P_2 > P_1$)或功率损耗($P_2 < P_1$)。

使用分贝数的好处是可以较小的坐标描述很宽的范围。由于在EMC中,干扰的幅度范围和频率范围都很宽,因此用分贝描述更加方便。

(19) 远场与近场:

近场区:到辐射源的距离小于 $\lambda/2\pi$ 的区域。

远场区:到辐射源的距离大于 $\lambda/2\pi$ 的区域。