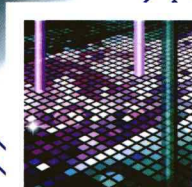
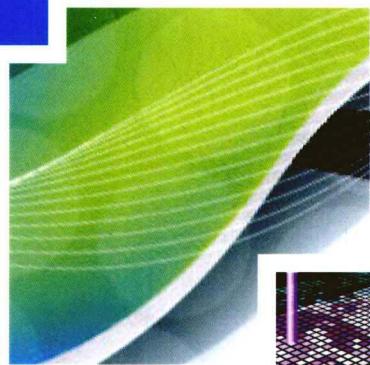


21世纪高等院校信息与通信工程规划教材  
21st Century University Planned Textbooks of Information and Communication Engineering

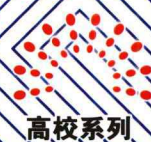
# 电磁兼容 技术

王培章 钱祖平 于同彬 编著

Electromagnetic Compatibility



 人民邮电出版社  
POSTS & TELECOM PRESS



高校系列

21世纪高等院校信息与通信工程规划教材  
21st Century University Planned Textbooks of Information and Communication Engineering

# 电磁兼容 技术

王培章 钱祖平 于同彬 编著

Electromagnetic Compatibility

人民邮电出版社

北京



高校系列

## 图书在版编目 (C I P) 数据

电磁兼容技术 / 王培章, 钱祖平, 于同彬编著. --  
北京: 人民邮电出版社, 2011.5  
21世纪高等院校信息与通信工程规划教材  
ISBN 978-7-115-24572-4

I. ①电… II. ①王… ②钱… ③于… III. ①电磁兼容性—高等学校—教材 IV. ①TN03

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第036746号

## 内 容 提 要

本书从电磁兼容基本概念入手,介绍了电磁兼容的基本概念、发展历史、常用术语以及电磁兼容标准;在电磁兼容的电磁原理中,介绍了相关的电磁基本原理,电磁辐射与散射,传导耦合以及瞬态干扰;阐述了电磁兼容预测技术,包括干扰源、敏感源以及耦合途径的数学模型,预测流程和步骤,以及相关的电磁兼容预测软件;介绍了电磁兼容工程方法,主要包括接地、搭接、屏蔽和滤波的基本方法和具体应用;介绍了电磁兼容的应用,瞬态干扰的抑制技术,包括PCB(印制电路板)设计、生物电磁效应以及电磁辐射防护;介绍了频谱管理与频率指配,包括频率的划分与使用,频率的指配技术、方法以及指配效果评估;介绍了电磁兼容测量方法、电磁兼容测量场地与设备以及电磁兼容测量的实施等。

本书内容简明,便于自学。可作为高等院校电气、工程专业的基础教材,也可供从事电子技术工作的工程技术人员学习参考。

21世纪高等院校信息与通信工程规划教材

### 电磁兼容技术

- 
- ◆ 编 著 王培章 钱祖平 于同彬  
责任编辑 刘 博
  - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街14号  
邮编 100061 电子邮件 315@ptpress.com.cn  
网址 <http://www.ptpress.com.cn>  
北京昌平百善印刷厂印刷
  - ◆ 开本: 787×1092 1/16  
印张: 24.5  
字数: 624千字
  - 2011年5月第1版  
2011年5月北京第1次印刷

---

ISBN 978-7-115-24572-4

定价: 45.00元

读者服务热线: (010)67170985 印装质量热线: (010)67129223  
反盗版热线: (010)67171154

21 世纪是电子产品的新世纪，严酷的市场竞争使得人们已经不再可能执行多次产品创建、测试、再设计的循环过程了。如果电磁兼容问题不能从产品开始研发阶段到设计完成之前认真加以解决，产品的面市将无法进行。目前，一些发达国家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了很高的水平，有高精度的 EMI 和 EMS 自动测量系统，可进行各种系统间的电磁兼容试验，并研制出系统内和系统间的各种电磁兼容计算机分析程序，形成了一套较完整的电磁兼容设计体系。

电磁兼容学科是一门综合性交叉学科，与信息信号处理、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，随着信息化技术的发展、扩展，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，且理论基础宽、工程实践综合性强，是电力、电子、电气等专业人员必须掌握的基础知识和技术。

电磁兼容既是一门科学技术，也是一种工程方法。一方面，为了实现众多设备的兼容工作，所有产品从设计、制造到使用都必须符合电磁兼容规范和标准，实行电磁兼容认证，加强电磁兼容测试和管理。另一方面，必须对相关人员进行培训，使之掌握电磁兼容技术，增加对电磁兼容的认识，提高电磁兼容意识，熟悉电磁兼容工程方法。

本书适用于电气与电子工程专业的本科电磁兼容（EMC）课程，也可以作为对电磁兼容感兴趣的专业工程技术人员的参考书。学习本书前需要预修几门本科电气与电子工程专业的基础课程：电路、信号与系统、电磁场与微波技术等。

全书分 12 章，第 1 章介绍了电磁兼容性基本概念，电磁兼容性常用的名词术语，电磁兼容设计的基本内容，电磁兼容的设计和电磁兼容性的工程实施方法，电磁兼容领域的发展，电磁兼容性标准和规范，各种信号的频谱分析，分贝的概念与应用。第 2 章介绍了电磁屏蔽原理，电磁屏蔽的类型，屏蔽材料的特性，孔缝泄漏的抑制措施。第 3 章介绍了电磁干扰滤波器，滤波器的分类及特性，电源线滤波器，电源线滤波器的安装，微波滤波器，微波滤波器的分类，低通原型滤波器，滤波器的频率变换。第 4 章介绍了接地和搭接技术，地回路干扰，抑制地回路干扰的技术措施，接地及其分类，接地的概念、接地的要求、接地的分类，安全接地，设备安全接地，防雷接地，安全接地的有效性，信号接地单点接地、多点接地、混合接地，搭接的概念，搭接的有效性。第 5 章介绍了线路板设计中的电磁兼容问题，元器件的选择，线路板上的电磁骚扰辐射，表面安装技术（SMT），印制电路板

(PCB)的设计,印制电路板设计的一般原则,PCB布局的基本原则,PCB设计规范。第6章介绍了电缆设计和辐射干扰,传导耦合,电容性耦合与电感性耦合的综合考虑,高频耦合,无耗传输线的状态分析,辐射耦合,基本振子的电磁场分布,干扰耦合的抑制措施,辐射干扰耦合的抑制措施。第7章介绍了瞬态干扰的抑制技术,电快速瞬变脉冲群(EFT),雷击浪涌,直击雷、感应雷与浪涌防护技术,雷击与瞬变脉冲电压,雷害的防护,静电放电(ESD)产生的电磁干扰,ESD的基本概念,抑制瞬变骚扰的常用器件。第8章介绍了电磁兼容性预测技术,第9章介绍了电磁干扰的诊断与解决技术,样机(模型)和鉴定阶段中的电磁干扰问题,检查是否符合发射规范,现场电磁干扰问题的排查技术。第10章介绍了EMC试验技术,EMC测量设备,EMC测量标准,EMC测量方法,传导发射测试辐射发射测试,传导抗扰度测试,辐射抗扰度测试,系统级EMC试验,系统级EMC试验内容。第11章介绍了生物电磁效应与应用,第12章介绍了频谱管理与频率指配技术。

本书是在解放军理工大学通信工程学院的大力支持下完成的。编写过程中得到钱祖平教授的支持和鼓励,雷光、韩继伟等绘制了部分图表,在此一并表示感谢。

由于编者水平有限,书中不当和错误之处在所难免,衷心希望广大读者批评指正。

编 者

2010年8月

# 目 录

<b>第 1 章 电磁兼容技术概述</b> .....1	1.6.3 电磁兼容技术标准与规范的内容特点	51
1.1 电磁兼容的概念.....1	1.6.4 电磁兼容认证	52
1.1.1 电磁干扰.....1	1.7 各种信号的频谱分析	53
1.1.2 电磁干扰 (EMI) 对电气、电子设备的危害	1.7.1 信号的分类	54
.....4	1.7.2 信号的时域分析与频域分析	55
1.1.3 电磁兼容的含义	1.7.3 傅里叶变换的应用	63
.....8	1.8 分贝的概念与应用	64
1.1.4 电磁兼容性的实施	1.8.1 分贝的定义	64
.....9	1.8.2 分贝的应用	66
1.1.5 电磁兼容技术的发展	<b>第 2 章 屏蔽技术</b> .....68	
.....9	2.1 电磁屏蔽原理	68
1.2 电磁兼容技术术语	2.1.1 电磁屏蔽的类型	68
.....11	2.1.2 静电屏蔽	68
1.2.1 一般术语	2.1.3 交变电场的屏蔽	69
.....11	2.1.4 低频磁场的屏蔽	70
1.2.2 干扰术语	2.1.5 高频磁场的屏蔽	71
.....12	2.1.6 电磁屏蔽	72
1.2.3 发射术语	2.2 屏蔽效能	73
.....13	2.2.1 屏蔽效能的表示	73
1.2.4 电磁兼容性术语	2.2.2 屏蔽效能的计算	74
.....14	2.3 磁屏蔽材料的特性	78
1.3 电磁兼容的工程方法	2.3.1 导磁材料	78
.....16	2.3.2 导电胶与导磁胶	79
1.3.1 电磁兼容性的工程分析方法	2.3.3 电磁屏蔽的结构	79
.....16	2.4 孔缝泄漏的抑制措施	81
1.3.2 电磁兼容性控制技术	2.4.1 装配面处接缝泄漏的抑制	82
.....17	2.4.2 通风冷却孔泄漏的抑制	83
1.3.3 电磁兼容性分析与设计方法	2.4.3 观察窗口 (显示器件) 泄漏的抑制	85
.....21	<b>第 3 章 滤波技术</b> .....87	
1.3.4 电磁兼容性测量与试验技术	3.1 电磁干扰滤波器	87
.....26	3.2 滤波器的分类及特性	90
1.4 电气、电子产品的 EMC 设计	3.2.1 反射式滤波器	90
.....31		
1.4.1 EMC 的设计方法		
.....31		
1.4.2 EMC 的设计步骤		
.....34		
1.4.3 EMC 设计的理论基础和 EMC 管理		
.....35		
1.4.4 预测及解决 EMI 问题的流程		
.....35		
1.5 EMC 设计的基本过程		
.....38		
1.5.1 EMC 设计的措施		
.....38		
1.5.2 产品 EMC 设计的技术		
.....38		
1.5.3 EMC 设计与产品开发关系		
.....39		
1.5.4 系统级 EMC 设计		
.....41		
1.6 电磁兼容标准		
.....44		
1.6.1 与电磁兼容技术标准有关的组织机构		
.....44		
1.6.2 我国的电磁兼容技术标准体系		
.....46		

3.2.2 滤波连接器 .....	95	<b>第 5 章 线路板设计 EMC 技术</b> .....	131
3.2.3 铁氧体抑制电磁干扰的 应用 .....	95	5.1 元器件的选择 .....	131
3.3 电源线滤波器 .....	97	5.1.1 常用元器件的选择和电路 设计 .....	131
3.3.1 共模干扰(骚扰)和差模 干扰(骚扰)信号 .....	98	5.1.2 有源器件敏感度特性和发射 特性 .....	136
3.3.2 电源线滤波器的网络结构 .....	98	5.2 线路板上的电磁骚扰辐射 .....	138
3.3.3 电源线滤波器的安装 .....	99	5.2.1 共模辐射与差模辐射 .....	138
3.4 微波滤波器 .....	101	5.2.2 差模辐射 .....	139
3.4.1 微波滤波器概述 .....	101	5.2.3 共模辐射 .....	141
3.4.2 低通原型滤波器 .....	104	5.3 表面安装技术(SMT) .....	143
3.4.3 频率变换 .....	107	5.3.1 表面安装技术的发展 .....	143
<b>第 4 章 接地和搭接技术</b> .....	113	5.3.2 新型片式器件的发展 .....	144
4.1 地回路干扰 .....	113	5.3.3 高密度电子组装技术 .....	145
4.1.1 接地公共阻抗产生的干扰 .....	113	5.4 PCB 的原理设计 .....	145
4.1.2 接地电流与地电压的形成 .....	114	5.4.1 PCB 设计的准备工作 .....	145
4.1.3 地回路干扰 .....	115	5.4.2 PCB 的分区 .....	146
4.2 抑制地回路干扰的技术措施 .....	116	5.4.3 混合信号 PCB 的分区设计 .....	148
4.2.1 接地点的选择 .....	116	5.4.4 PCB 内元器件的布局、互连 与电磁兼容设计 .....	149
4.2.2 差分平衡电路 .....	118	5.5 PCB 的设计 .....	150
4.2.3 隔离变压器 .....	119	5.5.1 单面板 .....	151
4.2.4 纵向扼流圈 .....	120	5.5.2 双面板 .....	155
4.2.5 光电耦合器 .....	121	5.5.3 单面板和双面板几种地线的 分析 .....	155
4.3 接地及其分类 .....	121	5.5.4 多层板 .....	156
4.3.1 接地的概念 .....	121	5.5.5 PCB 布局的基本原则 .....	161
4.3.2 接地的要求 .....	122	5.5.6 PCB 设计规范 .....	163
4.3.3 接地的分类 .....	122	5.5.7 PCB 的高频辐射 .....	167
4.4 安全接地 .....	122	5.6 PCB 布线设计 .....	168
4.4.1 设备安全接地 .....	123	5.6.1 PCB 布线设计的 ESD 抑制 准则 .....	168
4.4.2 防雷接地 .....	123	5.6.2 PCB 布线设计基础 .....	169
4.4.3 安全接地的有效性 .....	123	5.6.3 PCB 布线设计的基本原则 .....	171
4.5 信号接地 .....	124	5.7 PCB 分层设计 .....	177
4.5.1 单点接地 .....	124	5.7.1 PCB 分层设计的必要性 .....	177
4.5.2 多点接地 .....	126	5.7.2 PCB 分层设计 .....	177
4.5.3 混合接地 .....	126	5.7.3 多层 PCB 分层共同原则 .....	178
4.5.4 悬浮接地 .....	127	5.7.4 多层板布线层 .....	178
4.6 搭接技术 .....	128		
4.6.1 搭接的概念 .....	128		
4.6.2 搭接的有效性 .....	129		

5.8 时钟电路的 EMC 设计	180	7.2.2 雷击与瞬变脉冲电压	232
5.8.1 高频时钟电路	180	7.2.3 雷害的防护	233
5.8.2 阻抗匹配方法	183	7.3 静电放电 (ESD) 产生的电磁 干扰	236
5.9 高速电子线路	184	7.3.1 ESD 的基本概念	236
5.9.1 高速电子线路的信号完整性 设计	184	7.3.2 直接放电和间接放电	239
5.9.2 避免传输线效应实现信号 完整性	189	7.3.3 对 ESD 防护的设计技术	240
5.10 PCB I/O 电路的 EMC 设计	191	7.3.4 多层印制板防止 ESD 技术	241
5.10.1 PCB I/O 电路 EMC 设计	191	7.4 抑制瞬变骚扰的常用器件	244
5.10.2 PCB I/O 连接的结构设计	194	7.4.1 气体放电管	244
5.11 背板 I/O 电路的 EMC 设计	196	7.4.2 压敏电阻	245
5.11.1 背板 I/O 电路的连接设计	196	7.4.3 电压瞬变吸收 二极管 (TVS)	247
5.11.2 背板 I/O 电路的结构设计	196	7.4.4 几种抑制瞬态骚扰器件的 比较	248
5.11.3 背板连接的设计经验	197	<b>第 8 章 电磁兼容预测技术</b>	250
<b>第 6 章 电缆设计</b>	198	8.1 概述	250
6.1 传导耦合	198	8.1.1 电磁兼容性预测基本原理	250
6.1.1 电容性耦合	198	8.1.2 电磁兼容性预测的基本 方程	251
6.1.2 电感性耦合	202	8.1.3 电磁兼容性预测数学方法 概述	251
6.1.3 电容性耦合与电感性耦合的 综合考虑	203	8.1.4 电磁兼容预测分析的步骤和 作用	253
6.2 高频耦合	205	8.1.5 系统级电磁兼容研究中的 关键问题	254
6.2.1 均匀传输线方程及工作特性	205	8.2 电磁兼容性预测的数学模型	255
6.2.2 传输线阻抗与状态参量	209	8.2.1 干扰源模型	256
6.2.3 无耗传输线的状态分析	211	8.2.2 敏感设备模型	258
6.3 辐射耦合	215	8.2.3 耦合途径模型	260
6.3.1 基本振子的电磁场分布	216	8.2.4 电磁兼容建模中的关键 问题	262
6.3.2 辐射耦合	219	8.3 电磁兼容性预测算法	262
6.4 干扰耦合的抑制措施	220	8.3.1 幅度筛选	263
6.4.1 电容性耦合干扰抑制措施	220	8.3.2 频率筛选	264
6.4.2 电感性耦合干扰的抑制 措施	220	8.3.3 详细分析	264
6.4.3 辐射干扰耦合的抑制措施	221	8.3.4 性能分析	265
<b>第 7 章 瞬态干扰的抑制</b>	224	8.4 电磁兼容性预测软件介绍	266
7.1 电快速瞬变脉冲群 (EFT)	225		
7.1.1 EFT 概述	225		
7.1.2 EFT 干扰的抑制	228		
7.2 雷击浪涌	229		
7.2.1 直击雷、感应雷与浪涌	230		



8.4.1 电磁兼容预测软件概述	266	10.1.2 EMC 测量标准	295
8.4.2 国外 EMC 预测软件	268	10.2 EMC 测量设备	296
8.4.3 Ansoft HFSS	269	10.2.1 电磁干扰测量设备	297
8.4.4 ANSYS FEKO	273	10.2.2 电磁敏感度测量设备	302
8.4.5 国内 EMC 预测软件	274	10.3 EMC 测量方法	305
<b>第 9 章 电磁干扰的诊断与解决技术</b>	<b>277</b>	10.3.1 EMC 测试简介	306
9.1 样机 (模型) 和鉴定阶段中的 电磁干扰问题	277	10.3.2 EMC 测试准备	307
9.1.1 实际的电磁干扰 (EMI) 问题	278	10.3.3 传导发射测试	309
9.1.2 符合规范的问题	278	10.3.4 辐射发射测试	314
9.1.3 安排好开发/预测试的顺序	278	10.3.5 传导抗扰度测试	316
9.2 检查是否符合发射规范	279	10.3.6 辐射抗扰度测试	320
9.2.1 测试场所的最低要求	279	10.3.7 谐波电流发射试验 IEC61000-3-2/4	321
9.2.2 仪器设备	280	10.3.8 静电放电抗扰性试验	322
9.2.3 待测设备 (EUT) /样品的 安装	282	10.3.9 辐射电磁场抗扰性试验 (RS) IEC61000-4-3 (GB/T17626.3)	323
9.3 符合抗干扰性规范的检测	283	10.3.10 电快速瞬变脉冲群抗扰性 试验 (EFT/Burst) IEC61000-4-4	325
9.3.1 测试场合的最低要求	283	10.3.11 浪涌抗扰性试验 (Surge) IEC61000-4-5	326
9.3.2 传导敏感性测试的准备 工作	283	10.3.12 传导骚扰抗扰性试验 (CS) IEC61000-4-6	327
9.3.3 瞬变脉冲群 (EFT) 干扰 测试	284	10.4 系统级 EMC 试验	328
9.3.4 ESD 测试	286	10.4.1 系统级 EMC 试验基本 概念	328
9.4 现场电磁干扰问题的排查	287	10.4.2 系统级 EMC 试验的必要性和 复杂性	329
9.4.1 排查的准备	288	10.4.3 系统级 EMC 试验内容	330
9.4.2 现场检查	288	<b>第 11 章 生物电磁效应与应用</b>	<b>333</b>
9.4.3 诊断、排查电磁干扰故障 问题的“强制损坏”技术	289	11.1 生物电与人体电磁兼容	333
9.5 诊断、排查电磁干扰问题的思路 概括	289	11.1.1 生物电	334
9.5.1 诊断、排查电磁干扰故障的 过程	290	11.1.2 人体电磁兼容	335
9.5.2 诊断、排查电磁干扰故障 问题的流程	291	11.2 电磁波的生物效应	337
<b>第 10 章 EMC 测量</b>	<b>294</b>	11.2.1 电磁波生物效应	338
10.1 EMC 试验概述	294	11.2.2 微波的生物效应	340
10.1.1 EMC 试验在测试学科中的 重要位置	294	11.2.3 微波的热效应	342
		11.2.4 微波的非热效应	343

11.3 电磁的应用与防护.....	344	12.2 频率指配效果的评价.....	370
11.3.1 电磁在生物学中的应用...	344	12.2.1 频率指配中需要使用的传播	
11.3.2 电磁场在其他方面的应用...	349	预测.....	370
11.3.3 电磁辐射的保护.....	351	12.2.2 干扰分析.....	371
<b>第 12 章 频谱管理与频率指配.....</b>	<b>363</b>	12.3 频率指配方法和技术.....	376
12.1 频谱划分的有关规定.....	363	12.3.1 频率指配的数学模型.....	377
12.1.1 频谱分配和使用的规定.....	363	12.3.2 蜂窝网络规划工程应用的	
12.1.2 典型移动通信系统中的		频率指配算法.....	378
频率划分.....	367	12.3.3 频率指配.....	378
12.1.3 军用无线频谱管理.....	369	<b>参考文献.....</b>	<b>380</b>

## 1.1 电磁兼容的概念

### 1.1.1 电磁干扰

#### 1. 电磁干扰的定义

##### (1) 电磁骚扰

电磁骚扰 (ElectroMagnetic Disturbance, EMD) 是“任何可能引起装置、设备或系统性能下降及对有生命或无生命物质产生作用的电磁现象。电磁骚扰可能是电磁噪声、无用信号或传播媒介自身的变化”。

##### (2) 电磁干扰

电磁干扰 (ElectroMagnetic Interference, EMI) 是“电磁骚扰引起的设备、传输通道或系统性能的下降”。电磁骚扰仅仅是电磁现象,即客观存在的一种物理现象,它可能引起设备性能的降级或损害,但不一定形成后果。而电磁干扰是由电磁骚扰引起的后果。以前在术语上并未将物理现象与其造成的后果明确划分,统称为干扰 (Interference)。IECS0 (161) 于 1990 年颁布后,引入了 Disturbance 这一术语 (中文译为“骚扰”),对骚扰和干扰给出了明确的区分。但是为了方便,通常人们在分析电磁干扰问题时常常是与电磁骚扰联系在一起讨论,或统称为电磁干扰。

#### 2. 电磁干扰 (骚扰) 源的分类

电磁干扰的分类可以有多种,例如,按传播途径分,有传导干扰和辐射干扰,其中传导干扰的传输性质有电耦合、磁耦合及电磁耦合;按辐射干扰的传输性质分,有近区场感应耦合和远区场辐射耦合;按频带分,有窄带干扰和宽带干扰;按干扰频率范围分,可细分为 5 种 (见表 1-1);按实施干扰者的主观意向分,可分为有意干扰源和无意干扰源;按干扰源性质分,有自然干扰和人为干扰等。后面我们将详细说明自然干扰和人为干扰。

表 1-1 电磁干扰频率范围分类

电磁干扰根据频率范围的分类	频率范围	典型电磁干扰源
工频及音频干扰源	50 Hz 及其谐波	输电线
甚低频干扰源	30 kHz 以下	电力牵引系统、有线广播
载频干扰源	10~300 kHz	高压直流输电、高次谐波交流输电及电气铁路高次谐波
射频、视频干扰源	300kHz~300MHz	工业、科学、医疗
微波干扰源	300MHz~100GHz	微波炉、微波通信等

### 3. 电磁干扰的三要素

所有的电磁干扰都是由三个基本要素组合而产生的，它们是：电磁干扰源；对该干扰能量敏感的设备；将电磁干扰源传输到敏感设备的媒介，即传输通道或耦合途径。相应地对抑制所有电磁干扰的方法也应由这三要素着手解决。

- ① 电磁干扰源：指产生电磁干扰的任何元件、器件、设备、系统或自然现象。
- ② 耦合途径（或称传输通道）：指将电磁干扰能量传输到受干扰设备的通道或媒介。
- ③ 敏感设备：指受到电磁干扰影响或者对电磁干扰发生响应的设备。

### 4. 自然干扰（噪声）

自然电磁干扰存在于地球和宇宙，自然电磁现象会产生电磁噪声。自然干扰主要分为宇宙干扰、大气干扰、雷电干扰和热噪声。

#### （1）宇宙干扰

宇宙干扰是指来自太阳系、银河系及河外星系的电磁骚扰，主要包括太空背景噪声和太阳、月亮、木星等发射的无线电噪声。太阳无线电噪声则随着太阳的活动性明显变化，太阳活动性高则无线电噪声显著增加。太阳的干扰频率从 10MHz 到几十 GHz。银河系的干扰峰值出现在频段 100~200MHz。宇宙干扰影响最大的频段是 20~500MHz。

#### （2）雷电干扰

雷电干扰主要是由夏季本地雷电和冬季热带地区雷电放电所产生。地球上平均每秒发生 100 次左右的雷击放电。雷电是一连串的干扰脉冲，其电磁发射借助电离层的传输可传播到几千千米以外的地方。雷电干扰的频谱在 50MHz 以下都有分布，主要能量分布在 100kHz 左右，对地球上 20MHz 以下的无线电通信影响较大。大气层中的其他自然现象（如沙暴、雨雾等）也会形成较强烈的电磁噪声源。

#### （3）大气干扰

大气干扰是指除雷电放电外，大气中的尘埃、雨点、雪花、冰雹等微粒在高速通过飞机、飞船表面时，由于相对摩擦运动而产生电荷迁移从而沉积静电，当电势升高到 1MV 时，就会发生火花放电、电晕放电现象。这种放电产生的宽带射频噪声频谱分布在几赫兹到几十兆赫的范围内，会严重影响高频、甚高频频段的无线电通信和导航。

#### （4）热噪声

热噪声是指处于一定热力学状态下的导体中所出现的无规则电起伏，它是由导体中自由

电子的无规则运动引起的，如电阻热噪声、气体放电噪声、有源器件的散弹噪声。

## 5. 人为干扰（噪声）

人为干扰分别来自有意发射干扰源和无意发射干扰源。

### （1）有意发射干扰源

有意发射干扰源是专用于辐射电磁能的设备，如广播、电视、通信、雷达、导航等发射设备，是通过向空间发射有用信号的电磁能量来工作的，它们对不需要这些信号的电子系统或设备将构成功能性干扰，而且是电磁环境的重要污染源。经过分析不难看出，这类干扰源有以下特点。

① 为了保证一定的作用距离，这些设备具有高功率的发射机，向空间发射大量的电磁能量。如中波广播输出功率可达兆瓦，短波广播输出功率可达几百千瓦，目前我国电视广播1~12频道的输出功率一般为10kW，13频道以上的发射功率为30kW。远程雷达的脉冲发射功率可达10MW以上。

② 这些无线电发射设备，均按无线电管理的有关规定，工作在指定的频段上，抑制各无线系统间的相互干扰，这些设备的发射功率及工作频率可人为地予以规定及限制，辐射能量的空间分布是由发射天线的方向性决定的。

③ 广播（包括调频广播）和电视发射台的数量多，发射功率大而且发射天线高，发射的电磁能量覆盖很广的区域，广播与电视发射对环境所造成的电磁污染比同功率的其他工业干扰源要大得多。因为前者发射的是有用信号不能施加电磁屏蔽，而后者产生的是无用干扰信号，可用屏蔽等技术措施予以抑制，而广播电视发射塔多建在城市附近，因此广播与电视发射是污染城市电磁环境的主要干扰源。

### （2）无意发射干扰源

有许多装置都无意地发射电磁能量，如汽车的点火系统。各种不同的用电装置和带电动机的装置，如照明装置、霓虹灯广告、高压电力线、工业、科学和医用设备以及接收机的本机振荡辐射等都在无意地发射电磁能量。这种发射可能是向空间辐射，也可能是沿导线的传导发射，所发射的电磁能是随机的或是有规则的，一般占有非常宽的频带或离散频谱，所发射的功率可从微微瓦到兆瓦量级。无意发射干扰源主要有如下几种。

#### ① 用于工业、科学、医疗及生活中的高功率设备

这类设备包括工业加热设备（如感应加热器和介质加热器等），射频电弧焊、医疗加热设备（微波理疗机）、微波外科手术设备、超声波发生器及微波炉等。这类设备的特点是功率高、数量多，一般输出功率可达千瓦甚至兆瓦；而且其数量逐年迅速递增。他们工作时的电磁泄漏会造成很强的干扰。国际无线电干扰特别委员会（CISPR）对这类设备规定了干扰限值。

#### ② 汽车等机动车辆

汽车等机动车辆的点火系统、发电机、风扇、风挡刮水器电动机等，由于向外辐射电磁能量而造成干扰。通常，点火系统是最强的宽带干扰源，当点火时产生波形前沿很陡的电弧，频谱是一个低频基波分量再加上许多谐波，以及占有很宽一段频谱的暂态（瞬态）过程，这样的噪声在10~100MHz范围内具有很大的场强。一般观测表明，小汽车比卡车的噪声约小10dB，而摩托车的噪声与卡车的噪声差不多，这是因为虽然摩托车比小汽车、卡车的功率小得多，但很少采取或根本没有采取屏蔽措施的缘故。

### ③ 静电放电干扰

静电放电也是一种有害的电磁骚扰源。当两种介电常数不同的材料发生接触，特别是相互摩擦时，两者之间会发生电荷的转移，而使各自成为带有不同电荷的物体。当电荷积累到一定程度时，就会产生高电压。此时，带电物体与其他物体接近就会产生电晕放电或火花放电，形成静电骚扰。静电骚扰最为危险的后果是可能引起火灾，导致易燃、易爆物引爆；其次，可能导致测量、控制系统失灵或发生故障，也可能导致计算机程序出错、集成电路芯片损坏。

### ④ 核爆炸电磁脉冲

核爆炸时会产生极强的电磁脉冲，其强度可达  $10^5\text{V/m}$  以上，分布的范围极广。高空核爆炸的影响半径可达数千千米。核电磁脉冲对于武器、航天飞行器、舰船、地面无线电指挥系统、工业控制系统、电力电子设备等都会造成严重的干扰和破坏。

## 6. 电磁干扰（骚扰）源的时、空、频谱特性

### （1）干扰能量的空间分布

对于有意辐射干扰源，其辐射干扰的空间分布是比较容易计算的，主要取决于发射天线的方向性及传输路径损耗。

对于无意辐射干扰源，无法从理论上严格计算，经统计测量可得到一些无意辐射干扰源干扰场分布的有关数学模型及经验数据。

对于随机干扰，由于不能确定未来值，其干扰电平不能用确定的值来表示，需用其指定值出现的概率来表示。

### （2）干扰能量的时间分布

干扰能量随时间的分布与干扰源的工作时间和干扰的出现概率有关，按照干扰的时间出现概率可分为周期性干扰、非周期性干扰和随机干扰 3 种类型。周期性干扰是指在确定的时间间隔上能重复出现的干扰。非周期干扰虽然不能在确定的周期内重复出现，但其出现时间是确定的，而且是可以预测的；随机干扰则以不能预测的方式变化，其变化特性也没有规律，因此随机干扰不能用时间分布函数来分析，而应用幅度的频谱率特性来分析。

### （3）干扰的频率特性

按照干扰能量的频率分布特性可以确定干扰的频谱宽度，按其干扰的频谱宽度可分为窄带干扰与宽带干扰。一般而言，窄带干扰的带宽只有几十赫，最宽只有几百千赫。而宽带干扰的能量分布在几十至几百兆赫，甚至更宽的范围内。在电磁兼容学科领域内，带宽是相对接收机的带宽而言的，根据国家军用标准 GJB72-85 的定义，窄带干扰指主要能量频谱落在测量接收机通带之内，而宽带干扰指能量频谱相当宽，当测量接收机在  $\pm 2$  个脉冲宽内调谐时，它对接收机输出响应的影响不大于 3dB。

有意发射源干扰能量的频率分布，可根据发射机的工作频带及带外发射等特性得出，而对无意发射源，则用统计规律来得出经验公式和数学模型。

## 1.1.2 电磁干扰（EMI）对电气、电子设备的危害

无论是自然的还是人为的电磁骚扰源，都可以将它们按构成的威胁程度划分为 4 类：雷电、强电磁脉冲、静电放电和开关动作，它们的电压、电流和时域特性如表 1-2 所列，表中的状态 a 是直接造成的最坏瞬变状态；状态 b 是间接造成的瞬变状态。

表 1-2 电磁骚扰电压、电流和时域特性

瞬变的来源	状态	电压	电流	上升时间	延续时间
雷电	a	500kV	200kA	<1.5 $\mu$ s	20 $\mu$ s
	b	6kV	3kA	<8 $\mu$ s	20 $\mu$ s
核爆炸产生的电磁脉冲	a	100kV	10kA	10ns	150ns
	b	1kV	>10kA	20ns	1 $\mu$ s
静电放电	a	40kV	80A	1~5ns	<100ns
	b	1~5kV	>10A	10ns	>100ns
开关动作	a	<2 500V	200A	<10 $\mu$ s	>40 $\mu$ s
	b	<600V	<500A	<50 $\mu$ s	>10 $\mu$ s

## 1. 雷电 (Lighting)

雷电更确切地说是伴随雷电产生的雷电电磁脉冲, 会对电气、电子设备造成严重的威胁, 是最为严重的自然电磁干扰源。闪电放电脉冲的陡度大、峰值电流大、电场强、频谱宽 (100Hz~100MHz), 无论是天线、架空电网、外露的电线、电缆、埋地电缆或裸露金属体等都会被感应上强大的感应过电压、过电流。雷电电磁脉冲若被引入电气、电子设备, 将会产生破坏性后果。

由于雷电电磁脉冲无孔不入地从空间各个方面侵袭各种现代科技设备, 因此 IEC1312-1 (1995-02) 规范提出了分区防护概念, 即按对雷击敏感的程度不同, 把建筑物内、外环境分成几个区域来进行防护。

## 2. 强电磁脉冲 (EMP)

一般地讲, 强电磁脉冲是指两种极强的人工电磁干扰源: 核电磁脉冲 (NEMP) 或高空核电磁脉冲 (HEMP) 和非核高能微波电磁脉冲 (HPM)。如图 1-1 所示, 它们都是极强的电磁辐射源, 对人体特别是对电气或电子系统、设备进行干扰破坏, 使之失效、瘫痪。它们是现代战争的电磁武器, 在 1991 年的海湾战争中已显示出强大作用。

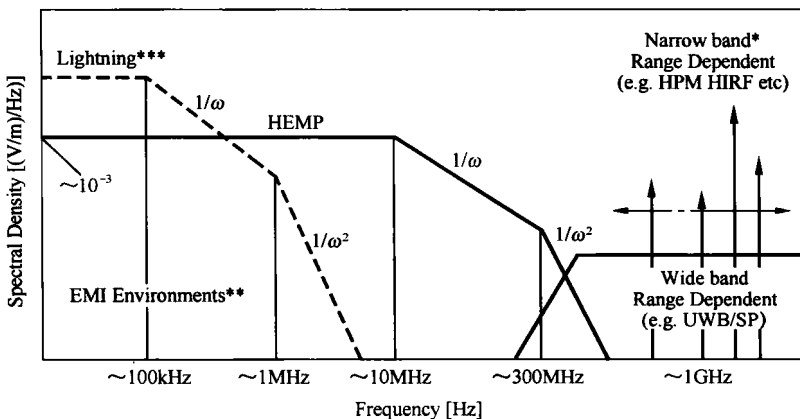


图 1-1 几种典型高功率环境的频谱覆盖范围

现代战争可以说是电子战争，在电子战争中，核电磁脉冲的打击是主要手段。对于非核高能微波电磁脉冲来说， $0.01 \sim 1 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  的电磁能量就可以对电气、电子设备造成干扰； $0.01 \sim 1 \text{W}/\text{cm}^2$  的电磁能量会毁坏电气、电子设备的芯片； $10 \sim 100 \text{W}/\text{cm}^2$  的电磁能量会对电气、电子设备造成永久性损伤； $1\ 000 \sim 10\ 000 \text{W}/\text{cm}^2$  的电磁能量会烧毁电气、电子设备。在现代电子战争中，引爆电磁弹（FCG）、“空爆弹”的无线电引信，进行无源探测定位，制造电磁制导导弹，制造特洛伊木马，进行 C<sup>4</sup>I（指挥、控制、通信、计算机和情报）电子对抗等，都是战争制胜的常用手段。

目前，现代高能微波武器已达到的技术指标是：频率  $1 \sim 100\text{GHz}$ ，脉冲宽度  $0.1 \sim 1 \mu\text{s}$ ，定向性小于  $30^\circ$ ，峰值功率  $10 \sim 100\text{GW}$ ，总输出能量约  $100\text{kJ}$ ，直接破坏距离达  $300\text{m} \sim 1\text{km}$ 。在其作用范围内的架空输电线好比是个巨大的接收天线，会产生很高的感应电压，其峰值可达  $10^3\text{kV}$  量级，破坏力极强。

### 3. 静电放电（ESD）

静电放电是人或设备在低湿度环境中运动（一般与化纤地毯或化纤衣鞋有关）时很容易产生的一种物理现象，即在运动的过程中吸取和释放静电。内有运动部件的静止设备同样能引起静电放电，例如，复印机和打印机在送纸过程中也会产生静电放电。

静电放电不同于周期性的脉冲，它是一种非周期性的放电脉冲，它的频谱能量分布是连续性的，是一种宽带干扰源，不仅能干扰宽带设备，甚至能干扰窄带设备。抑制它的有效方法是防止它直达被保护的器件。对于同一个需保护的环路来说，为了减小 ESD 在环路中产生的骚扰电压，它所需的屏蔽效能应比一般减小辐射电磁场骚扰电压所需的屏蔽效能高  $10 \sim 100$  倍（或高  $20 \sim 40\text{dB}$ ）。

雷电产生的静电放电感应会造成区域性的灾害。因为输电线和各类信号线遍布城乡，当雷电开始瞬间，在静电场的作用下，上述各类导线会感应带电，并迅速聚集到先导通道附近。主放电开始后，由于放电发展的速度极快，约  $10^7 \text{m/s}$ ，是先导通道速度的  $100$  倍。在主放电通道中，正负电荷猛烈中和，而在附近金属物上的感应电荷不能以主放电的速度流散，结果会产生高达几十千伏的静电感应电压，并向两端流散，循着输电线、信号线窜入配电设备，窜入信号线终端设备。特别是对计算机通信接口的损坏，往往直接导致整个通信网络系统的瘫痪。统计发现，分布在同一建筑物或相邻建筑物内的计算机局域通信网络，遭受的损坏最为严重，其中又以计算机同轴网络适配卡的损坏为最多。在计算机远程通信中，调制解调器大多与市话线相连接，雷电静电放电感应导致的调制解调器的损坏也比较严重。

### 4. 开关操作

开关的通或断会引起电压或电流的急剧变化，从而产生瞬态骚扰。电子开关虽然不如机械开关那样容易产生火花放电，但由于电子开关的速度快，产生导致电流迅速变化的干扰就不可避免。开关通断引起电流波的波形上升的时间越短，占有的频带就越宽，所含有的高次谐波就会越丰富。若令电流波的上升时间为  $\tau$ 、传输此电流波所需占用的频带宽度为  $B$ ，则它们之间的关系为

$$\tau B = 0.5 \sim 1.0 \quad (1-1)$$



在日常生活中，常见的实例有电冰箱、空调、电加热器等，这些电器在接入电网或断开时，会出现持续时间很短的电压脉冲，这个电压脉冲就是由于电感性负载的接入或断开所造成的电感性的电压瞬变。

电容性的电压瞬变在日常生活中也同样存在。如供电局在白天供电时，为了提高功率因数，需要在电网上并接电容器以补偿极大的电感性负载。到了夜间，工厂机器关闭，电网的负载由电感性变成电阻性，不再需要补偿，此时切断电容器，便会出现电容性电压瞬变。

电源在接通瞬间产生的冲击电流现象更是比比皆是。以白炽灯为例，由于钨丝的电阻是随温度的升高而增大的，发光状态下的电阻要比常温时大得多，因此白炽灯在接通瞬间便会产生冲击电流。由于闪光灯所产生的冲击电流要比照明灯的冲击电流大6倍以上，因此，反复进行开关操作的闪光灯产生的问题就更多了。电动机也不例外，因为电动机产生的反向电动势与转速成正比，刚启动时（即电源接通瞬间）的转速为零，若电动机的效率为90%以上，则启动电流将是稳态电流的10倍左右。

为了从时域上区分由开关操作所产生的干扰性质，通常将瞬变时间小于8.4ms的干扰定义为浪涌电压。如果瞬变电压的波形近似正弦波并按指数规律衰减，一般都和高阻抗有关，其电压变化范围会很宽：小者数毫伏，大者可达千伏、万伏。如果浪涌电压的波形近似方波并按指数规律衰减，一般都和低阻抗有关，浪涌电压幅度99%不超过正常工作电压的3倍，90%不超过正常工作电压的两倍。通常情况下，浪涌电压按两倍工作电压进行计算。

## 5. EMI对电气、电子设备或元器件造成的危害

半导体器件的一般损伤阈值为 $10^{-5} \sim 10^{-2} \text{ J/cm}^2$ ，易损器件降为 $0.1 \sim 1 \mu\text{J/cm}^2$ ，若不损坏器件，只引起瞬时失效或干扰，其损伤阈值还要低（2~3）个数量级。因此，上述各类电磁骚扰对电气、电子设备或系统，特别是对含有半导体器件的设备或系统会产生严重的破坏作用。这些破坏效应归纳起来主要有：

### （1）高压击穿

器件接收电磁能量后可能转化为大电流，在高阻抗处可能转化为高电压，将引起接点、部件或回路间的电击穿，导致器件损坏或瞬时失效。例如，脉宽 $0.1 \mu\text{s}$ ，电流幅度为1A的电流脉冲，可在接点间电容为 $1 \text{ pF}$ 处的接点上产生 $100 \text{ kV}$ 电压。该接点被击穿后，会产生数百千赫的衰减正弦振荡，并辐射出电磁波。

### （2）器件烧毁或受瞬变干扰

除高压击穿外，器件因瞬变电压造成短路损坏的原因一般归结于功率过大而烧毁，或PN结的电压过高而击穿。无论是集成电路（IC）、存储器，还是晶体管、二极管、可控硅，都是一样的。引起大多数半导体器件损坏的最低有效功率为 $1 \mu\text{s}$ 、 $10 \text{ W}$ 或 $10 \mu\text{J}$ ，一些敏感器件则降为 $1 \mu\text{s}$ 、 $1 \text{ W}$ 或 $1 \mu\text{J}$ 。另外，半导体器件损坏或受瞬变干扰的过程还会出现以下4种状况：

① 所有CMOS器件都是用氧化膜绝缘或用氧化膜保护集成电路中的不同元件，但氧化膜的厚度只有几微米，一旦电压超过氧化膜的绝缘强度便会将其击穿，造成短路。

② 当电流通过PNP结构时，由于电流的不均匀，往往会烧毁镀覆的金属导体造成开路。

③ 会出现因瞬时电压的能量尚不足以立即造成损坏，但会使性能下降、丢失数据、影响功能运作、产生误动作、使半导体进入不能自动复原的导通状态（俗称死机），一旦切断电源