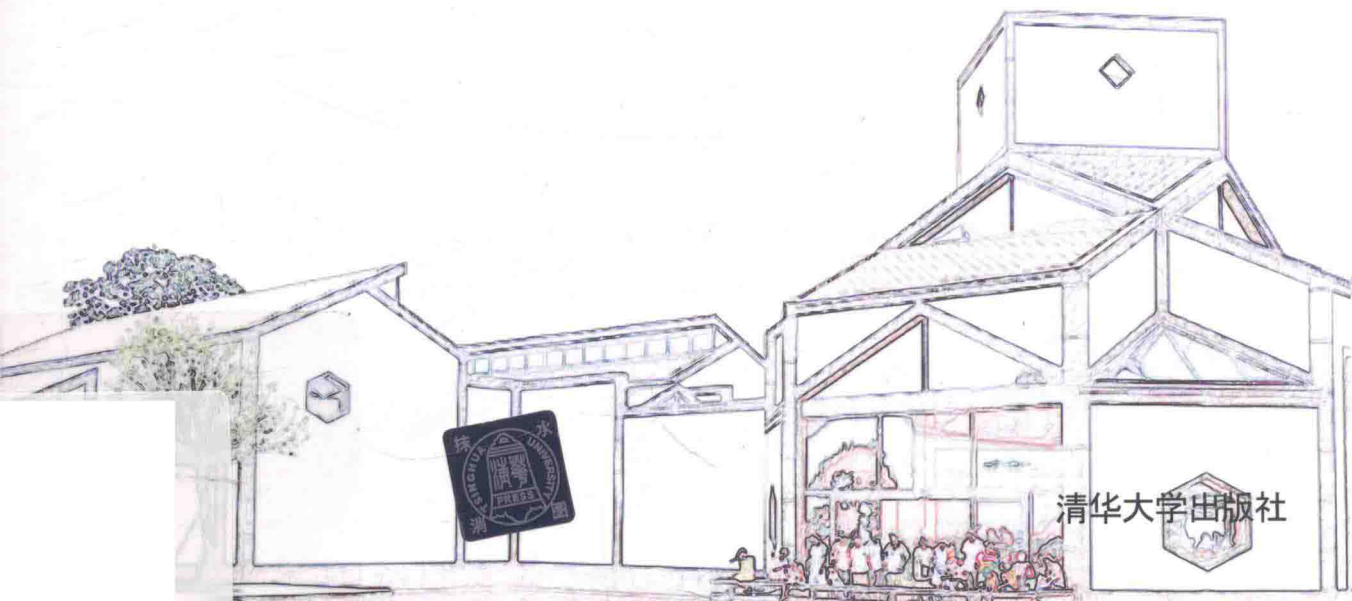


全国普通高校  
电子信息与  
电气学科  
基础规划教材

# 电磁兼容与PCB设计

邵小桃 编著



全国普通高校电子信息与电气学科基础规划教材

# 电磁兼容与PCB设计

邵小桃 编著

清华大学出版社  
北京

## 内 容 简 介

本书从电磁兼容的基本原理出发,结合 PCB 设计中遇到的各种问题,全面系统地阐述了电磁兼容理论与 PCB 设计。全书共分为 9 章,分别介绍了:电磁兼容概论;PCB 中的电磁兼容;元件与电磁兼容;信号完整性分析;电磁兼容抑制的基本概念;旁路和去耦;阻抗控制和布线;静电放电抑制的基本概念;电磁兼容标准与测试。本书为每章精心设置了科技简介,内容通俗易懂,涉及相关的前沿科技。

本书内容简洁,概念清楚,深入浅出,可作为高等院校电子、电气、通信和相关专业本科生的教材,是大学高年级本科生难得的专业技术基础教材之一,也可作为相关学科教师、科研人员以及工程技术人员进行电磁兼容分析和 PCB 设计的重要参考书。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

### 图书在版编目(CIP)数据

电磁兼容与 PCB 设计/邵小桃编著. —北京:清华大学出版社,2017

(全国普通高校电子信息与电气学科基础规划教材)

ISBN 978-7-302-45246-1

I. ①电… II. ①邵… III. ①印刷电路—电磁兼容性—计算机辅助设计—高等学校—教材  
IV. ①TN410.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 243986 号

责任编辑:曾 珊

封面设计:傅瑞学

责任校对:梁 毅

责任印制:刘海龙

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, [c-service@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

质量反馈:010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

课件下载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 装 者:北京泽宇印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:14.25

字 数:350 千字

版 次:2017 年 1 月第 1 版

印 次:2017 年 1 月第 1 次印刷

印 数:1~2000

定 价:29.00 元

---

产品编号:055092-01

# 前言

电磁兼容(Electromagnetic Compatibility, EMC)是一门迅速发展的综合性交叉学科,主要研究如何使在同一电磁环境下工作的各种电子器件、电路或系统,都能正常工作,达到兼容状态。电磁兼容以电磁场和无线电技术理论为基础,涉及微波技术、微电子技术、计算机技术、通信技术、网络技术,以及新材料等多个技术领域。在电力、通信、交通、航天、军工、计算机、医疗等各个行业都有着广泛的应用。随着电磁环境的不断恶化,电磁干扰已经成为电子、通信设备中必须面对的关键问题,电磁兼容越来越受到人们的重视。

随着高频、高速数字通信的不断发展和高速大规模电子系统的广泛应用,电路设计越来越复杂,PCB集成度也越来越高,这就对从事电子或通信领域的专业技术人员提出了更高的要求。PCB设计又直接影响到电子、通信设备的性能。当系统时钟达到120MHz时,基于传统方法设计的PCB将无法工作。因此,在PCB设计中考虑电磁兼容性已经成为必须采取的手段。

本书从电磁兼容的基本原理出发,结合PCB设计中遇到的各种问题,分9章全面系统地阐述了电磁兼容理论与PCB设计方法。第1章电磁兼容概论,阐述了电磁兼容的基本概念,电磁干扰的三要素以及减小干扰的方法;第2章PCB中的电磁兼容,阐述了PCB设计的构成,PCB中产生电磁干扰的原因,并对共模辐射和差模辐射进行了分析比较;第3章元件与电磁兼容,介绍了元器件的种类和封装,分析了无源元件的频率响应以及有源器件的电磁兼容特性;第4章信号完整性分析,阐述了信号完整性问题,PCB终端匹配的几种方法;第5章电磁兼容抑制的基本概念,论述了镜像面的工作原理以及对电磁兼容的抑制作用,阐述了三种常用接地方法的特点和用途;第6章旁路和去耦,阐述了电容器的主要用途,介绍了电容的物理特性、谐振特性、三端电容与穿心电容、电源层和接地层电容以及电容的选择和放置;第7章阻抗控制和布线,阐述了元件的布局、阻抗控制的基本原理,分析和讨论了PCB布线中常用的四种基本结构的特点,介绍了PCB的布线要求以及多层板的叠层设计;第8章静电放电抑制的基本概念,分析了静电放电产生的原因、特点和危害,阐述了静电放电的常用保护技术以及PCB中静电放电的保护方法;第9章电磁兼容标准与测试,简要介绍了电磁兼容标准的内容,阐述了典型的电磁兼容测试项目,及测试中常见的试验场地以及试验设备,最后对静电放电测试、浪涌抗扰度试验、谐波电流检测以及雷电及防护进行了简要说明。

本书还精心挑选了9个科技简介,在每章最后做了简要介绍。其中包括:电磁场对健康的影响,电磁感应,超导技术,高功率微波,地线与接地电阻,吸波、透波及缩波效应,电磁波的极化和反射,静电力以及闪电。内容通俗易懂,涉及相关的前沿科技。

本书的编写思路来源于聆听Mark I. Montrose主讲的“Printed Circuit Board Design Techniques for Signal Integrity and EMC Compliance”课程,也包含作者在多年教学和电路设计、PCB设计中的经验总结。本书的编写目标是要适应知识更新和课程体系改革的需要,为本科通信工程专业课程的实际需求提供专业技术基础教材,解决电磁兼容与PCB设

计中的相关问题,设计出符合电磁兼容规范的高性能 PCB。

本书内容编排简洁清晰,概念原理论述清楚,分析深入浅出,图文并茂,概括和总结了电磁兼容与 PCB 设计中的理论和设计原则,适用范围广,可作为高等院校电子工程、电气工程、通信和计算机等相关专业本科生的教材,是大学高年级本科生难得的专业技术基础教材之一;本书可供有关学科教师参考,也可作为从事科研和工程项目的工程技术人员、硬件设计工程师、测试工程师进行电磁兼容分析和 PCB 设计的重要参考书。

全书由邵小桃编写。在编写过程中,参考和阅读了许多专家和学者的著作和学术论文,以及相关专家的学术讲座等,在此一并对他们表示衷心的感谢!在此还要特别感谢清华大学出版社对本书进行编辑、校对以及排版人员。本书能够顺利出版,离不开各位的辛勤工作和大力支持。

由于作者水平有限,时间较紧,内容涉及领域广泛,相关技术发展迅速,虽然付出了最大的努力,本书内容仍然不可避免地会出现不当和疏漏,敬请各位读者和专家指正。

编 者

2016 年 7 月

# 教学建议

本课程的授课对象为电气电子、信息、通信工程类专业的本科生,课程类别属于电气通信类。参考学时为 32 学时,包括课程理论教学环节和实验教学环节。

课程理论教学环节主要包括:课堂讲授、研究性教学、作业和答疑。课程以课堂教学为主,部分内容可以通过学生自学加以理解和掌握。研究性教学针对课程内容进行扩展和探讨,要求学生根据教师布置的题目撰写论文提交报告,课内讨论讲评。

实验教学环节包括常用的 PCB 设计软件工具、信号完整性设计工具的应用,参观电磁兼容实验室等,可根据学时灵活安排,主要由学生课后自学完成。

本课程的主要知识点、重点、难点及课时分配见下表。

序号	知识单元(章节)	知识点	要求	推荐学时
1	电磁兼容概论	电磁兼容、电磁干扰基本概念	掌握	4
		分析电磁兼容问题的五个方面	理解	
		电磁干扰的三要素、噪声耦合的途径	掌握	
		系统级电磁干扰产生的原因	理解	
		分贝的工程定义及换算关系	掌握	
2	PCB 中的电磁兼容	PCB 高速 PCB 设计中的问题	了解	3
		电流元与磁流元的关系	理解	
		PCB 产生电磁干扰的原因	掌握	
		趋肤效应和引线电感的概念和计算	理解	
		共模和差模电流的基本概念	掌握	
		通量消除的主要方法	了解	
3	元件与电磁兼容	元器件的种类及组装,SMT 技术特点	了解	2
		无源元件在高、低频时频率响应	掌握	
		有源器件与电磁兼容的关系	了解	
		元器件的选择	掌握	
4	信号完整性分析	信号完整性概念	掌握	4
		传播速度与相对介电常数的关系	了解	
		衰减振荡、传输线的最小反射条件	掌握	
		串扰消除和减小的方法	掌握	
		PCB 终端匹配的基本方法	掌握	
		电源完整性分析	掌握	
		信号完整性常用设计工具	了解	
5	电磁兼容抑制的基本概念	镜像面概念	理解	4
		元件间环路面积与辐射的关系	掌握	
		三种主要的接地方法	掌握	
		分区法和隔离法	了解	
		元件与电磁兼容的关系	理解	
		元件的正确选择	掌握	

续表

序号	知识单元(章节)	知识点	要求	推荐学时
6	旁路和去耦	电容的作用以及谐振特性	掌握	4
		电源层和接地层电容的计算	了解	
		并联电容器的使用	掌握	
		电容的正确放置	掌握	
7	阻抗控制和布线	微带线、带状线线路阻抗、阻抗控制	掌握	4
		PCB 布线要点	掌握	
		掌握多层板的分层结构	掌握	
8	静电放电抑制的概念	静电放电概念	了解	2
		静电放电的保护技术及相应措施	掌握	
9	电磁兼容标准与测试	电磁兼容的国际规范与测试标准	掌握	2
		简单的测试环境及测试设备	掌握	
10	研究性教学	课后完成,课堂讨论点评	理解	3

第 1 章 电磁兼容概论 .....	1
1.1 电磁兼容与电磁干扰 .....	1
1.1.1 综述 .....	1
1.1.2 电磁干扰与危害 .....	2
1.1.3 电磁兼容技术的发展 .....	4
1.1.4 电磁兼容的国际组织 .....	6
1.1.5 我国电磁兼容技术的发展 .....	7
1.2 电磁兼容基本概念 .....	8
1.2.1 电磁兼容中的常用定义 .....	8
1.2.2 设计中常见的电磁兼容问题 .....	10
1.2.3 电磁兼容设计规则与设计过程 .....	11
1.2.4 潜在的电磁干扰/射频干扰辐射等级 .....	13
1.3 分析电磁兼容问题的五个方面 .....	13
1.4 电磁干扰及系统设计方法 .....	14
1.4.1 电磁干扰三要素 .....	14
1.4.2 如何设计出满足电磁兼容性标准的系统 .....	21
1.5 系统级电磁干扰产生的原因 .....	21
1.6 电磁兼容的单位及换算关系 .....	22
1.6.1 功率增益 .....	22
1.6.2 电压增益 .....	23
1.6.3 电流增益 .....	23
1.6.4 电场强度和磁场强度测量的通用单位 .....	24
1.6.5 单位间的互换 .....	24
科技简介 1 电磁场对健康的影响 .....	26
习题 .....	28
第 2 章 PCB 中的电磁兼容 .....	30
2.1 PCB 设计概念 .....	30
2.1.1 概述 .....	30
2.1.2 PCB 基本设计构成 .....	32
2.1.3 高速 PCB 设计中的问题 .....	34
2.1.4 PCB 设计常用软件工具 .....	38
2.2 PCB 产生电磁干扰的原因 .....	39
2.2.1 电磁理论 .....	39



2.2.2	磁流元与电流元的天线辐射特性 .....	41
2.2.3	PCB 中产生电磁干扰的进一步说明 .....	44
2.3	差模电流和共模电流 .....	45
2.3.1	差模电流 .....	46
2.3.2	共模电流 .....	48
2.3.3	共模电流与差模电流的比较 .....	50
2.4	通量消除的概念与方法 .....	51
2.4.1	通量消除的概念 .....	51
2.4.2	通量消除的基本方法 .....	52
科技简介 2	电磁感应 .....	52
习题	.....	54
<b>第 3 章</b>	<b>元件与电磁兼容</b> .....	<b>55</b>
3.1	元器件概述 .....	55
3.1.1	元器件的种类 .....	55
3.1.2	元器件的组装技术 .....	55
3.1.3	表面安装技术的特点 .....	56
3.2	无源元件的频率响应 .....	56
3.2.1	导线的频率响应 .....	56
3.2.2	电阻的频率响应 .....	59
3.2.3	电容的频率响应 .....	60
3.2.4	电感的频率响应 .....	65
3.2.5	变压器的频率响应 .....	69
3.3	有源器件与电磁兼容 .....	69
3.3.1	边沿速率 .....	69
3.3.2	元件封装 .....	72
3.3.3	接地散热器 .....	76
3.3.4	时钟源的电源滤波 .....	78
3.3.5	集成电路中的辐射 .....	78
3.4	元器件的选择 .....	79
科技简介 3	超导技术 .....	81
习题	.....	83
<b>第 4 章</b>	<b>信号完整性分析</b> .....	<b>84</b>
4.1	信号完整性概述 .....	84
4.2	传输线 .....	85
4.2.1	传输线概述 .....	85
4.2.2	PCB 内传输线的等效电路 .....	85
4.2.3	传输线效应 .....	86
4.3	相对介电常数与传播速度 .....	87

4.4	反射和衰减振荡 .....	88
4.4.1	反射 .....	88
4.4.2	衰减振荡 .....	92
4.5	地弹 .....	93
4.6	串扰 .....	93
4.6.1	串扰及消除 .....	93
4.6.2	3-W 原则 .....	97
4.7	PCB 终端匹配的方法 .....	98
4.7.1	串联终端 .....	99
4.7.2	并联终端 .....	99
4.7.3	戴维南网络终端 .....	99
4.7.4	RC 网络终端 .....	100
4.7.5	二极管网络终端 .....	101
4.7.6	时钟走线的终端 .....	101
4.7.7	分叉线路走线的终端 .....	101
4.8	电源完整性分析 .....	102
4.8.1	电源完整性分析概述 .....	102
4.8.2	同步开关噪声 .....	103
4.8.3	电源分配设计 .....	104
4.9	信号完整性常用设计工具介绍 .....	104
4.9.1	APSIM 软件介绍 .....	104
4.9.2	SPECCTRAQuest .....	106
4.9.3	ICX .....	106
4.9.4	SIwave .....	107
4.9.5	Hot-Stage 4 .....	107
4.9.6	SIA3000 信号完整性测试仪 .....	107
科技简介 4	高功率微波 .....	108
	习题 .....	109
<b>第 5 章</b>	<b>电磁兼容抑制的基本概念</b> .....	<b>110</b>
5.1	镜像面 .....	110
5.1.1	概述 .....	110
5.1.2	镜像面的工作原理 .....	111
5.2	元件间环路面积的控制 .....	113
5.3	三种主要的接地方法 .....	116
5.3.1	接地基本概念 .....	116
5.3.2	接地方法 .....	118
5.4	分区法和隔离法 .....	123
5.4.1	分区法 .....	123

5.4.2 隔离法 .....	126
科技简介 5 地线与接地电阻 .....	126
习题 .....	127
<b>第 6 章 旁路和去耦 .....</b>	<b>129</b>
6.1 电容的 3 个用途 .....	129
6.1.1 去耦电容 .....	129
6.1.2 旁路电容 .....	130
6.1.3 体电容 .....	130
6.2 电容与谐振 .....	130
6.2.1 谐振电路 .....	130
6.2.2 电容的物理特性 .....	130
6.2.3 电容的谐振特性 .....	132
6.3 并联电容器 .....	133
6.3.1 并联电容器的工作特性 .....	133
6.3.2 并联电容器的计算 .....	135
6.4 三端电容与穿心电容 .....	135
6.4.1 三端电容的工作特性 .....	135
6.4.2 穿心电容的工作特性 .....	136
6.5 电源层和接地层电容 .....	137
6.5.1 电源层和接地层的电容 .....	137
6.5.2 20-H 原则 .....	138
6.6 电容的选择与放置 .....	139
6.6.1 电容选择 .....	139
6.6.2 去耦电容的选择 .....	140
6.6.3 大电容的选择 .....	142
6.6.4 电容的放置 .....	144
科技简介 6 吸波、透波及缩波效应 .....	145
习题 .....	146
<b>第 7 章 阻抗控制和布线 .....</b>	<b>147</b>
7.1 元件的布局 .....	147
7.1.1 PCB 布局 .....	147
7.1.2 PCB 分层 .....	149
7.2 阻抗控制 .....	149
7.2.1 微带线结构 .....	150
7.2.2 嵌入式微带线 .....	151
7.2.3 单带状线结构 .....	152
7.2.4 双带状线结构 .....	152
7.2.5 差分微带线和带状线结构 .....	153

7.2.6	布线考虑	154
7.2.7	容性负载	154
7.3	走线长的计算	155
7.4	PCB 板的布线要点	157
7.4.1	布线基本要求	157
7.4.2	单端布线	162
7.5	多层板的叠层设计	164
7.5.1	四层板	165
7.5.2	六层板	165
7.5.3	八层板	166
7.5.4	十层板	166
	科技简介 7 电磁波的极化和反射	167
	习题	168
<b>第 8 章</b>	<b>静电放电抑制的基本概念</b>	<b>170</b>
8.1	静电放电现象	170
8.1.1	静电放电	170
8.1.2	静电放电的危害	173
8.2	静电放电保护技术	174
8.2.1	器件的防护	174
8.2.2	整机产品防护	174
8.2.3	PCB 静电放电保护	175
8.2.4	环路面积的控制	176
8.2.5	静电放电中的保护镶边	176
8.3	ESD 常见问题与改进	177
	科技简介 8 静电力	178
	习题	179
<b>第 9 章</b>	<b>电磁兼容标准与测试</b>	<b>180</b>
9.1	电磁兼容标准	180
9.2	电磁兼容测试	183
9.2.1	试验场地	184
9.2.2	试验设备	187
9.2.3	静电放电测试	190
9.2.4	浪涌抗扰度试验	192
9.2.5	谐波电流检测	193
9.3	雷电及防护	194
9.3.1	雷电的形成	194
9.3.2	雷电中的电磁现象	195
9.3.3	雷击的形成	195

9.3.4 雷电对人身的危害 .....	196
9.3.5 雷电的防护 .....	196
科技简介 9 闪电 .....	198
习题 .....	199
附录 A 电磁兼容国家标准 .....	200
附录 B 部分电磁兼容国际标准 .....	207
附录 C 部分常用元件的封装 .....	212
参考文献 .....	215

# 第1章 电磁兼容概论

本章主要阐述了电磁兼容的基本概念、电磁兼容性标准、电磁兼容设计规则、设计过程以及分析电磁兼容的五个方面；同时也介绍了电磁干扰的危害以及电磁干扰的三要素，并详细分析了传导耦合、电场耦合、磁场耦合、共阻抗耦合和电磁场耦合五个噪声耦合的主要传播途径，以及减小电磁干扰的方法。最后对电磁兼容常用的单位给出了公式、定义以及它们之间的换算关系。

## 1.1 电磁兼容与电磁干扰

### 1.1.1 综述

电磁兼容(Electromagnetic Compatibility, EMC)是一门迅速发展的综合性交叉学科，主要研究电磁干扰(Electromagnetic Interference, EMI)和电磁敏感度(Electromagnetic Susceptibility, EMS)的问题，即怎样使在同一电磁环境下工作的各种电子电气器件、电路、设备或系统，都能正常工作，互不干扰，达到兼容状态，即设备在共同的电磁环境中能一起执行各自功能的共存状态。电磁兼容以电磁场和无线电技术的基本理论为基础，并涉及微波技术、微电子技术、计算机技术、通信技术、网络技术以及新材料等许多技术领域。它的研究领域也非常广泛，包括电力、通信、交通、航天、军工、计算机、医疗等各个行业。

自发现电磁波百余年来，电磁能得到充分的利用。尤其在科学发达的今天，广播、电视、通信、导航、雷达、遥测遥控以及计算机等领域得到了迅速的发展，特别是信息、网络技术的快速发展，使世界对话的距离和时间骤然缩短，世界变得越来越小。然而，伴随电磁能的利用，也带来和产生了各种电磁干扰问题。各个频段的电磁场以及电磁能量，通过辐射和传导的途径，以场和电流(电压)的形式，影响工作着的敏感电子设备，使其无法正常工作。而且，如同生态环境的污染一样，随着科学技术的发展，电磁环境的污染也越来越严重。它不仅对电子产品的安全与可靠性产生危害，还会对人类及生态环境产生不良的影响。但是这种污染不会滞留和积累电磁能量，一旦电磁骚扰源停止工作，电磁干扰也就随即消失。

电磁环境的不断恶化，引起了世界各发达国家的重视，特别是20世纪70年代以来，许多发达国家进行了大量的理论研究及实验工作，进而提出了如何使电子设备或系统在其所处的电磁环境中，能够正常地运行，同时也对在该环境中工作的其他设备或系统不引入不能承受的电磁干扰的新课题。电磁兼容研究的热点问题包括电磁频谱的利用和管理；电磁兼容性标准与规范；电磁兼容性的测量与试验技术。

电磁兼容学是技术与管理并重的实用工程学，它涉及范围较广，包括自然界中的各种电磁干扰，以及各种电器、电子设备的设计、安装和各系统之间的电磁干扰等，涉及的频率范围可达0~400GHz；而且它的技术难度也较大，因为干扰源日益增多，传播的途径也是多种多样的，在军工、电力、通信、交通和工矿企业普遍存在电磁干扰问题。因此，需要投入大量的人力和财力。国际标准化组织已经和正在制定电磁兼容的有关标准和规范，并强制实施。我国要参与世界技术市场的竞争，进出口的电子产品也都必须通过电磁兼容测试。

## 1.1.2 电磁干扰与危害

一切电子设备、电器在工作时,都会辐射出不同频率的干扰波。如电视发射台、广播电台;计算机及外部设备;通信设备,如手机和发射基站;工业、医疗用的电磁加热设备;家用电器如彩电、微波炉等。所有这些不同频率的、不同用途的电磁波能量合在一起称“电波色拉”,而且它们互相干扰。这些电磁能量也会影响其他设备或系统的正常运行,这就是电磁干扰(Electromagnetic Interference, EMI)。电磁干扰也就是指电磁骚扰(Electromagnetic Disturbance)引起的设备、传输通道或系统性能的下降。这里的电磁骚扰是指“任何可能引起装置、设备或系统性能降低,或者对有生命或无生命物质产生损害作用的电磁现象”。电磁骚扰仅仅是客观存在的一种物理现象,它可能是电磁噪声、无用信号或传播媒介自身的变化。电磁骚扰只有在影响敏感设备正常工作时才构成电磁干扰,即电磁干扰是由电磁骚扰引起的后果。电磁干扰依危害程度可分为灾难性的、非常危险的、中等危险的、严重的和使人烦恼的五个等级。

### 1. 常见领域的电磁干扰现象

下面就几个常见领域的电磁干扰现象作简要介绍。

#### 1) 信息技术设备

信息技术设备指用于以下目的的设备:

- (1) 接收来自外部源的数据(如通过键盘、数据线输入);
- (2) 对接收到的数据进行某些处理;
- (3) 提供数据输出。

在过去,人们往往认为计算机是以逻辑为特征的数字系统,受自身和外来电磁干扰的影响不会很大。随着微电子技术的发展,计算机已朝着高速度、高灵敏度、高集成和多功能方向发展,电磁环境的干扰和系统内部的相互串扰,严重地威胁着计算机和数字系统工作的稳定性、可靠性和安全性。

#### 2) 信息技术设备的电磁泄漏威胁着信息安全

在通信领域的信号传播主要依靠电缆、光缆和无线电波,所以网络时代传导形式的泄密更加严重。当然,辐射造成的泄密也是不可忽视的。目前的截获技术已经相当先进,可在1千米之内获取清晰的屏幕图像。曾有人做过试验,将辐射信号截获设备“数据扫描器”装在汽车上,对沿途正在工作的计算机进行辐射信号监测,他们惊奇地发现可以得到许多信息。如果截获者对其有兴趣,便可通过放大、特征提取、解密、解码等技术或信息处理等,获得有用的情报。在网络时代,信息泄露被认为是网络安全的最大威胁。所以,防止信息泄露已不再只是对军事领域才有意义,而且在经济领域及各行各业都应引起足够的重视。

#### 3) 机载系统的电磁干扰现象

现代交通工具越来越多地依赖于电子系统。对车载接收、监控和定位等电子控制系统来说,如果电磁抗扰度不够,它们就很容易受空间电磁环境干扰而不能正常工作,甚至失控造成事故。大家都知道,在飞机上不允许使用手机和调频收音机等,特别是在飞机起飞和降落期间,其原因就在于避免这些设备对飞机导航系统产生电磁骚扰。一旦电磁骚扰通过飞机上的电缆线耦合到机上的敏感设备,就可能形成干扰,有可能造成飞机的电子控制系统失灵,使设备工作不稳,甚至失控。铁路道岔的信号自动控制,如果因电磁干扰造成误控,也将

会给列车的行驶带来不堪设想的灾难。

#### 4) 微波领域的电磁干扰

卫星地面站和雷达装置都会受到如特高频波段的电视信号、核电信号等干扰。正在研制的新一代大功率微波武器,其频率在 $1\sim 100\text{GHz}$ 范围内,它强大的微波辐射将会给电子设备或系统以及生物带来非常严重的破坏和伤害。

#### 5) 电磁对医疗卫生设备或系统的危害

许多医疗设备如核磁共振、B超仪、心电图、CT仪等,都采用了先进的电子和信息技术。这些设备的抗扰度直接关系到人们的生命安危。心脏起搏器也会受到来自计算机、手机等的电磁干扰,使其功能发生变化。所以医疗设备的电磁兼容性设计尤为重要,医疗单位的电磁环境关系到病人的生命安危,更值得关注。

#### 6) 电磁干扰对人的危害

日益发达的生活条件以及生活环境,给人们的生活带来了巨大的变化和满足,同时,我们也必须看到这种现代化的生活方式给人们带来的不良影响。

手机对人的影响取决于手机的工作频率、发射功率、照射时间等因素。各个手机生产厂家虽然也在控制辐射强度方面做了许多工作,手机在获准进入市场之前必须要通过进网测试与全面型号认证(Full Type Approval, FTA),但进网测试与FTA测试并非人体安全认证。为了对人体安全进行认证,国际上提出了比吸收率(Specific Absorption Ratio, SAR)——手机人体辐射安全标准认证。SAR测试标准公布了各种型号手机的SAR值,让消费者了解手机是否符合安全标准,但手机在某种程度上仍然对人有影响。据有关部门的初步检测和分析,手机的电磁辐射为点频微波辐射。手机在使用过程中,其电磁辐射以手机与基站取得联系时最大,第一声铃响后,辐射逐渐减小。所以,在手机接通后的最初几秒之内,最好不要马上将手机贴耳接听。因为人的大脑和眼睛对辐射是比较敏感的,以免造成伤害。当然,在通话过程中,声调的高低、声音的大小和快慢也会使辐射有所不同。另外,手机的类型不同,天线的内置或外置,其辐射都会有所不同。另外,在一些特殊场所也要慎用手机,如飞机上,加油站,医院,雷雨天等。在加油站使用手机,加油站的计数器是由电子控制的,如受到手机信号干扰,就可能影响机件的精密性,甚至诱发火灾。在雷雨天,由于雷电的干扰,手机的电波频率跳跃性增强,易诱发雷击、烧机等事故。

另外,几乎所有的家用电器都会或多或少地产生电磁辐射,计算机则是其中之一。计算机等荧光屏可产生相当强的电磁辐射,人们面对屏幕和长时间的操作,会影响身体健康。计算机中的CPU、机箱内的时钟电路,甚至计算机键盘,都会产生对人有危害的射频干扰。还有其他家用电器,如微波炉,它所产生的微波辐射对人体的危害是由热效应产生的。人体吸收RF微波能量,并将它变换成热,在低电平时人没有感觉,但它对脑、眼睛、胃组织的影响最大,过度照射可能引起白内障等生理疾病。所以,家用电器都必须确定一个安全的辐射电平标准,使家电特别是微波设备的用户生活在一个安全的环境下。

利用电磁场对人的影响,一些发达国家产生了新式的微波武器。这些微波能量比大功率雷达用的微波功率还要高几个数量级。美国已研制成功强微波发生器和高增益定向天线,这些产品可以发射高强度的微波射束,它不会损坏设备的躯体,但会严重损害中心枢纽,使它完全瘫痪,不能工作,人如果受到这种波束的辐射,可使人的神经中枢细胞功能紊乱,引起心脏衰竭和呼吸功能停止,造成人员猝死。



## 2. 电磁干扰频谱

电磁干扰按频谱可划分为以下几个方面：

(1) 工频干扰(50Hz)：输配电、电力系统，波长为 6000km；

(2) 甚低频干扰(30kHz)：波长大于 10km；

(3) 载频干扰(10~300kHz)：高压直流输电谐波干扰、交流输电谐波干扰以及交流电气铁道的谐波干扰等，波长大于 1km；

(4) RF、视频(300kHz~300MHz)：ISM、输电线电晕放电、高压设备和电力牵引系统的火花放电、电动机、家用电器、照明电器等，波长为 1~1000m；

(5) 微波干扰(300MHz~300GHz)：特高频、超高频、极高频等干扰，波长为 1mm~1m；

(6) 雷电及核电磁脉冲干扰：由 GHz 到接近直流，范围很宽。

从 1906 年到现在，电磁频谱带宽变化示意图如图 1-1 所示。

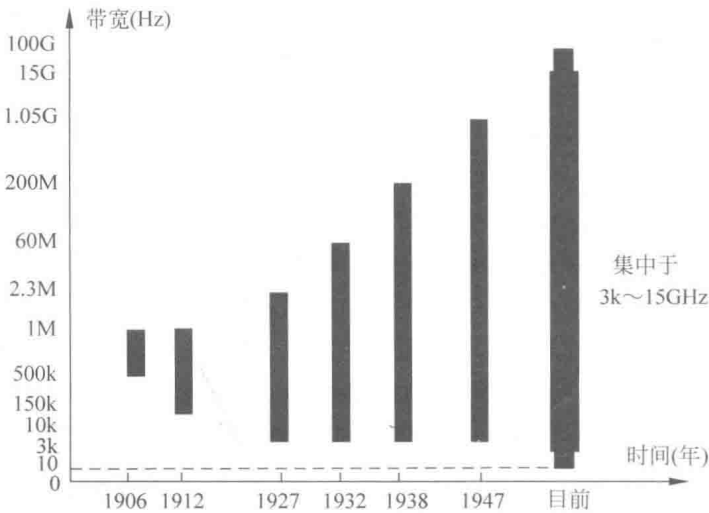


图 1-1 电磁频谱带宽变化示意图

## 3. 电磁干扰研究的热点问题

电磁干扰研究的热点问题主要有：

- (1) 电磁干扰源的特性及其传输特性；
- (2) 电磁干扰的危害效应；
- (3) 电磁干扰的抑制技术；
- (4) 电磁泄漏与静电放电等。

### 1.1.3 电磁兼容技术的发展

电磁辐射和电磁干扰已经成为危害日益严重的电磁兼容问题，电磁兼容学正是人们在不断认识电磁干扰、研究电磁干扰、减小电磁干扰的过程中发展起来的。

电磁干扰是人们最早发现的电磁现象，它几乎跟电磁效应的现象同时被发现。早在 19 世纪初，随着电磁学的萌芽和发展，安培于 1823 年提出了电流产生磁力的基本定律；1831 年英国科学家法拉第发现了电磁感应现象，创建了电磁感应定理，建立电磁理论基石；1864 年，麦克斯韦总结出电磁波经典理论——Maxwell 方程组，提出位移电流理论，论述了电与