



高等学校电子与通信类专业“十一五”规划教材

# 电磁兼容原理与技术

主编 何 宏  
主审 秦会斌



西安电子科技大学出版社  
<http://www.xduph.com>

TN03/40

2008

高等学校电子与通信类专业

“十一·五”规划教材

# 电磁兼容原理与技术

主 编 何 宏

副主编 王红君 杨伟东 潘红艳

主 审 秦会斌

西安电子科技大学出版社

2008

## 内 容 简 介

电磁兼容(ElectroMagnetic Compatibility, EMC)作为一门新兴的综合性交叉学科正在迅速发展,它涉及到电子、计算机、通信、航空航天、铁路交通、电力、军事,以及人民生活的各个方面。本书深入浅出地介绍了电磁兼容的原理与技术。全书共分为9章:第1章 电磁兼容技术概述;第2章 电磁兼容理论基础;第3章 干扰耦合机理;第4章 滤波技术;第5章 屏蔽技术;第6章 印制电路板 PCB 的电磁兼容设计;第7章 接地技术;第8章 计算机系统 中的电磁兼容性;第9章 电磁兼容的预测与建模技术。

本书适合于电子工程、电气工程、信息和计算机技术、自动控制与机电一体化、仪器和测试技术、生物医学工程等专业作本科生和研究生教材,还可供从事电气和电子产品研发、设计、制造、质量管理、检测与维修的工程技术人员使用。

★本书配有电子教案,有需要的老师可与出版社联系,免费提供。

### 图书在版编目(CIP)数据

电磁兼容原理与技术/何宏主编.

—西安:西安电子科技大学出版社,2008.7

高等学校电子与通信类专业“十一五”规划教材

ISBN 978 - 7 - 5606 - 2040 - 4

I. 电… II. 何… III. 电磁兼容性—高等学校—教材 IV. TN03

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 062473 号

策 划 寇向宏

责任编辑 寇向宏

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

<http://www.xduph.com> E-mail: [xdupfb001@163.com](mailto:xdupfb001@163.com)

经 销 新华书店

印刷单位 陕西光大印务有限责任公司

版 次 2008年7月第1版 2008年7月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张 15.625

字 数 365千字

印 数 1~4000册

定 价 22.00元

ISBN 978 - 7 - 5606 - 2040 - 4/TN · 0425

**XDUP 2332001-1**

\*\*\* 如有印装问题可调换 \*\*\*

本社图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版。

**西安电子科技大学出版社**  
**高等学校电子与通信类专业“十一五”规划教材**  
**编审专家委员会名单**

**主任:** 杨震 (南京邮电大学校长、教授)

**副主任:** 张德民 (重庆邮电大学通信与信息工程学院副院长、教授)

秦会斌 (杭州电子科技大学电子信息学院院长、教授)

**通信工程组**

**组长:** 张德民 (兼)

**成员:** (成员按姓氏笔画排列)

王晖 (深圳大学信息工程学院副院长、教授)

巨永锋 (长安大学信息工程学院副院长、教授)

成际镇 (南京邮电大学通信与信息工程学院副院长、副教授)

刘顺兰 (杭州电子科技大学通信工程学院副院长、教授)

李白萍 (西安科技大学通信与信息工程学院副院长、教授)

张邦宁 (解放军理工大学通信工程学院卫星系系主任、教授)

张瑞林 (浙江理工大学信息电子学院院长、教授)

张常年 (北方工业大学信息工程学院院长、教授)

范九伦 (西安邮电学院信息与控制系系主任、教授)

姜兴 (桂林电子科技大学信息与通信学院副院长、教授)

姚远程 (西南科技大学信息工程学院副院长、教授)

康健 (吉林大学通信工程学院副院长、教授)

葛利嘉 (中国人民解放军重庆通信学院军事信息工程系系主任、教授)

**电子信息工程组**

**组长:** 秦会斌 (兼)

**成员:** (成员按姓氏笔画排列)

王荣 (解放军理工大学通信工程学院电信工程系系主任、教授)

朱宁一 (解放军理工大学理学院基础电子学系系主任、工程师)

李国民 (西安科技大学通信与信息工程学院院长、教授)

李邓化 (北京信息工程学院信息与通信工程系系主任、教授)

吴谨 (武汉科技大学信息科学与工程学院电子系系主任、教授)

杨马英 (浙江工业大学信息工程学院副院长、教授)

杨瑞霞 (河北工业大学信息工程学院院长、教授)

张雪英 (太原理工大学信息工程学院副院长、教授)

张彤 (吉林大学电子科学与工程学院副院长、教授)

张焕君 (沈阳理工大学信息科学与工程学院副院长、副教授)

陈鹤鸣 (南京邮电大学光电学院院长、教授)

周杰 (南京信息工程大学电子与信息工程学院副院长、教授)

欧阳征标 (深圳大学电子科学与技术学院副院长、教授)

雷加 (桂林电子科技大学电子工程学院副院长、教授)

**项目策划:** 毛红兵

**策划:** 曹 昶 寇向宏 杨 英 郭 景



## 前 言

电磁兼容(ElectroMagnetic Compatibility, EMC)作为一门新兴的综合性交叉学科正在迅速发展,它涉及到电子、计算机、通信、航空航天、铁路交通、电力、军事,以及人民生活的各个方面。随着科学技术的进步,电磁环境日趋复杂,电磁干扰及电磁防护问题日益突出。世界各发达国家均对此予以高度重视,我国的相关部门与机构也积极开展电磁兼容性的理论和应用研究。国家3C(China Compulsory Certification,中国强制性产品认证)认证制度的实施,有力地促进了电磁兼容性技术的进步。

本书深入浅出地介绍了电磁兼容原理与技术。全书共分为9章:第1章给出了电磁兼容的基本概念和含义,对电磁干扰三要素和电磁骚扰源进行了分析,介绍了电磁兼容技术的发展及电磁认证;第2章用周期性函数的傅里叶变换和非周期性干扰信号的频谱分析对电磁干扰(骚扰)进行数学描述,讲述了电路、磁路、分贝的概念与应用;第3章对传导耦合、高频耦合和辐射耦合等干扰耦合机理进行了详细的分析;第4、5章详细地介绍了电磁兼容的滤波技术和屏蔽技术;第6章讨论了印制电路板PCB的电磁兼容设计;第7章讨论了电磁兼容的接地技术;第8章针对计算机电磁兼容性问题的特殊性,重点介绍了计算机系统抗干扰技术;第9章是电磁兼容的预测与建模技术,在明确EMC预测与建模的目的后选择所属电磁场的计算方法,包括有限差分法、有限元法、矩量法及几何绕射理论等,介绍了电磁兼容预测常用软件的功能。

本书是在作者多年教学和科研积累之上完成的,由何宏教授任主编,王红君、杨伟东、潘红艳老师任副主编。参加本书编写工作的人员还有李丽、杜明星、韩芳芳、李鹏海、周滢、宋殿友、王洛欣、张华、张志宏等,全书由何宏教授统稿,杭州电子科技大学秦会斌老师主审。汤璐、贾衡天、崔欣、李伟、孙虹等为本书的绘图做了大量的工作,在此一并向他们表示衷心的感谢。

全书的阐述都从电磁兼容技术的角度出发,所讨论的问题来龙去脉清晰、图文并茂,内容丰富翔实,适合电子工程、电气工程、信息和计算机技术、生物医学工程、自动控制与机电一体化、仪器和测试技术等专业作教材或参考书使用,还可供从事电气和电子产品研发、设计、制造、质量管理、检测与维修的工程技术人员使用。

由于电磁兼容的内容涉及到的技术领域和服务对象范围非常广,相关的理论和技术发展迅速,加上作者水平有限,书中难免存在不妥之处,敬请各位读者和专家批评指正。

编 者

2008年4月

# 目 录

<b>第 1 章 电磁兼容技术概述</b> .....	1
1.1 电磁兼容概述 .....	1
1.1.1 引言 .....	1
1.1.2 电磁干扰的危害 .....	2
1.1.3 电磁兼容的含义 .....	5
1.1.4 电磁干扰的三要素 .....	6
1.1.5 电磁干扰(骚扰)源的分类 .....	7
1.1.6 电磁干扰(骚扰)源的时、空、频谱特性 .....	9
1.1.7 电磁兼容性分析与设计方法 .....	10
1.1.8 电磁兼容性研究的基本内容 .....	12
1.2 电磁兼容技术的发展和电磁认证 .....	12
1.2.1 电磁兼容技术的发展 .....	12
1.2.2 电磁兼容技术的认证 .....	15
习题 .....	18
<b>第 2 章 电磁兼容理论基础</b> .....	19
2.1 电磁干扰(骚扰)的数学描述方法 .....	19
2.1.1 周期性函数的傅里叶变换 .....	19
2.1.2 非周期性干扰信号的频谱分析 .....	20
2.1.3 脉冲信号的傅里叶积分 .....	21
2.1.4 脉冲信号的快速时频域转换 .....	23
2.2 电路与磁路 .....	25
2.2.1 电路 .....	25
2.2.2 磁路 .....	27
2.3 分贝的概念与应用 .....	32
2.3.1 分贝的定义 .....	32
2.3.2 分贝的应用 .....	35
习题 .....	36
<b>第 3 章 干扰耦合机理</b> .....	37
3.1 传导耦合 .....	37
3.1.1 电容性耦合 .....	38
3.1.2 电感性耦合 .....	44
3.1.3 电容性耦合与电感性耦合的综合考虑 .....	49
3.2 高频耦合 .....	53
3.2.1 分布参数电路的基本理论 .....	53
3.2.2 高频线间的耦合 .....	55
3.2.3 低频情况的耦合 .....	57
3.3 辐射耦合 .....	58
3.3.1 电磁辐射 .....	58
3.3.2 近场区与远场区的特性 .....	62

3.3.3 电磁波的极化 .....	65
3.3.4 辐射耦合 .....	66
习题 .....	66
<b>第4章 滤波技术</b> .....	<b>68</b>
4.1 电磁干扰滤波器 .....	68
4.1.1 电磁干扰滤波器的工作原理 .....	68
4.1.2 电磁干扰滤波器的特殊性 .....	68
4.1.3 滤波器的插入损耗 .....	69
4.2 滤波器的分类及特性 .....	69
4.2.1 反射式滤波器 .....	69
4.2.2 吸收式滤波器 .....	74
4.2.3 电源线滤波器设计示例 .....	77
4.3 常用滤波器元件 .....	79
4.3.1 电容器 .....	79
4.3.2 电感 .....	86
4.3.3 铁氧体 EMI 抑制元件 .....	90
4.3.4 滤波器的安装 .....	93
习题 .....	94
<b>第5章 屏蔽技术</b> .....	<b>96</b>
5.1 电磁屏蔽原理 .....	96
5.2 屏蔽效能 .....	96
5.3 电磁屏蔽的类型 .....	97
5.3.1 电场屏蔽 .....	98
5.3.2 磁场屏蔽 .....	100
5.3.3 电磁屏蔽 .....	104
5.4 屏蔽效能的计算 .....	105
5.4.1 金属平板屏蔽效能的计算 .....	105
5.4.2 非实芯型的屏蔽体屏蔽效能的计算 .....	109
5.4.3 多层屏蔽体屏蔽效能的计算 .....	111
5.4.4 导体球壳屏蔽效能的计算 .....	112
5.4.5 圆柱形壳体低频磁屏蔽效能的近似计算 .....	113
5.5 屏蔽材料 .....	114
5.5.1 导磁材料 .....	114
5.5.2 导电材料 .....	115
5.5.3 薄膜材料与薄膜屏蔽 .....	115
5.5.4 导电胶与导磁胶 .....	116
5.6 屏蔽完整性 .....	118
习题 .....	121
<b>第6章 印制电路板 PCB 的电磁兼容设计</b> .....	<b>122</b>
6.1 有源器件敏感度特性和发射特性 .....	122
6.1.1 电磁敏感度特性 .....	122
6.1.2 电磁骚扰发射特性 .....	124
6.1.3 $\Delta I$ 噪声电流和瞬态负载电流 .....	124
6.2 线路板上的电磁骚扰辐射 .....	128

6.3	单、双和多层板的 PCB 设计	132
6.3.1	单面印制电路板(PCB)的设计	133
6.3.2	双面印制电路板(PCB)的设计	137
6.3.3	单面板和双面板几种地线的分析	138
6.3.4	多层印制电路板(PCB)的设计	143
6.4	面向 21 世纪的表面安装技术	151
6.4.1	表面安装技术的特点	151
6.4.2	SMT 设备的发展	152
6.4.3	SMT 封装元器件及工艺材料的发展	154
	习题	154
<b>第 7 章</b>	<b>接地技术</b>	<b>155</b>
7.1	电子设备接地的目的	155
7.2	接地系统	155
7.2.1	悬浮地	155
7.2.2	单点接地	156
7.2.3	多点接地	157
7.2.4	混合接地	158
7.2.5	大系统接地	159
7.3	安全地线	161
7.3.1	设置安全地线的意义	161
7.3.2	设置安全接地的方法	162
7.3.3	接地装置	163
7.4	地线中的干扰	164
7.4.1	地阻抗干扰	164
7.4.2	地环路干扰	165
7.4.3	地线中的等效干扰电动势	165
7.5	低阻抗地线的设计	166
7.5.1	导体的射频电阻	166
7.5.2	导体的电感	167
7.5.3	实心接地平面的阻抗	168
7.5.4	低阻抗电源馈线	168
7.6	阻隔地环路干扰的措施	169
7.6.1	变压器耦合	169
7.6.2	纵向扼流圈(中和变压器)传输信号	170
7.6.3	电路单元间用同轴电缆传输信号	171
7.6.4	光耦合器	171
7.6.5	光缆传输信号	172
7.6.6	用差分放大器减小由地电位差引起的干扰	172
7.7	屏蔽电缆的接地	173
7.7.1	屏蔽层接地产生的电场屏蔽	173
7.7.2	屏蔽层接地产生的磁场屏蔽	174
7.7.3	地环路对屏蔽的影响	175
7.8	附加实例	175
	习题	176



<b>第 8 章 计算机系统中的电磁兼容性</b> .....	177
8.1 计算机电磁兼容性问题的特殊性 .....	177
8.1.1 数字计算机中的干扰 .....	177
8.1.2 特殊环境中的计算机电磁兼容问题 .....	179
8.1.3 计算机病毒 .....	180
8.1.4 计算机的电磁泄漏 .....	180
8.1.5 计算机电磁兼容性问题的新动向 .....	180
8.2 计算机元件的抗干扰措施 .....	181
8.2.1 一般数字集成电路的抗干扰措施 .....	181
8.2.2 动态 RAM 的抗干扰分析 .....	182
8.2.3 A/D 转换器的抗干扰措施 .....	182
8.2.4 计算机接口电路的抗干扰措施 .....	184
8.2.5 微型计算机总线的抗干扰措施 .....	185
8.3 工业控制环境中计算机的抗干扰技术 .....	186
8.3.1 工控计算机硬件的抗干扰设计 .....	186
8.3.2 工控计算机软件抗干扰设计 .....	187
8.3.3 软件技术在工控计算机中的应用 .....	190
8.4 计算机电磁信息泄漏与防护 .....	194
8.4.1 计算机电磁信息辐射泄漏的途径 .....	194
8.4.2 计算机电磁信息辐射的特点 .....	194
8.4.3 计算机电磁信息辐射泄漏的防护技术 .....	195
习题 .....	197
<b>第 9 章 电磁兼容的预测与建模技术</b> .....	198
9.1 明确 EMC 预测与建模的目的 .....	198
9.2 判断 EMC 问题所属的电磁场性质 .....	199
9.2.1 场的分类及特性 .....	199
9.2.2 确定 EMC 问题所属的电磁场性质 .....	202
9.3 电磁兼容预测与建模计算方法的选择 .....	203
9.3.1 场的方法 .....	203
9.3.2 路的方法 .....	212
9.3.3 场路结合 .....	213
9.4 电磁兼容预测常用软件 .....	213
9.4.1 Zeland 软件 .....	214
9.4.2 Apsim 仿真软件 .....	215
习题 .....	216
<b>附录 A 电磁兼容国家标准</b> .....	217
<b>附录 B 部分电磁兼容国际标准</b> .....	224
<b>附录 C 电磁干扰(骚扰)源的频谱</b> .....	229
<b>附录 D 电磁兼容技术术语</b> .....	232
<b>参考文献</b> .....	238

# 第 1 章 电磁兼容技术概述

## 1.1 电磁兼容概述

### 1.1.1 引言

随着科学技术的发展,人们在生产及生活中使用的电气及电子设备的数量越来越多,这些设备在工作的同时往往要产生一些有用的或无用的电磁能量,这些能量将影响其他设备的工作,从而形成了电磁干扰。例如,继电器通、断所产生的瞬态电磁脉冲使计算机工作失常;汽车驶过或飞机低空飞过住宅时,将干扰电视机的正常工作,使电视机出现杂乱的画面。严格地说,只要把两个以上的元件置于同一环境中,工作时就会产生电磁干扰。在两个系统之间会出现系统间的干扰,例如,飞机航行系统、船上电子系统、雷达系统、通信系统、电视和广播系统等。相互之间出现的干扰如图 1-1 所示。

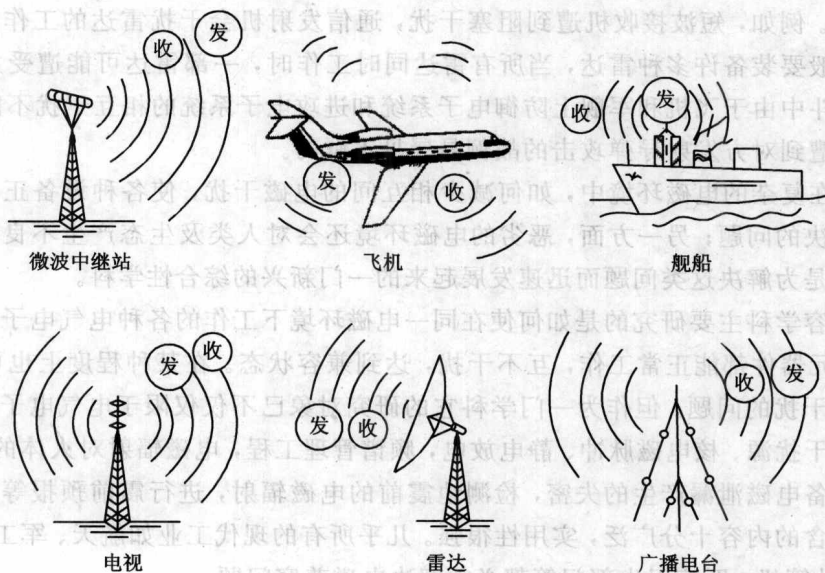


图 1-1 系统间的电磁干扰

在系统内部各设备之间也会出现设备间的干扰,称为系统内的干扰。例如,汽车内自动点火系统对车内收音机的干扰,雷达发射机对雷达接收机的干扰等。

在同一电子设备中的各部分电路间会存在干扰，即一个电路可能受其他电路的干扰，也可能干扰周围其他电路。例如，数字电路对共用同一电源的低电平模拟电路的干扰，计算机中磁带驱动器的磁场对低电平数字电路的干扰，以及无线电接收机各级电路间的干扰（如图 1-2 所示），等等。

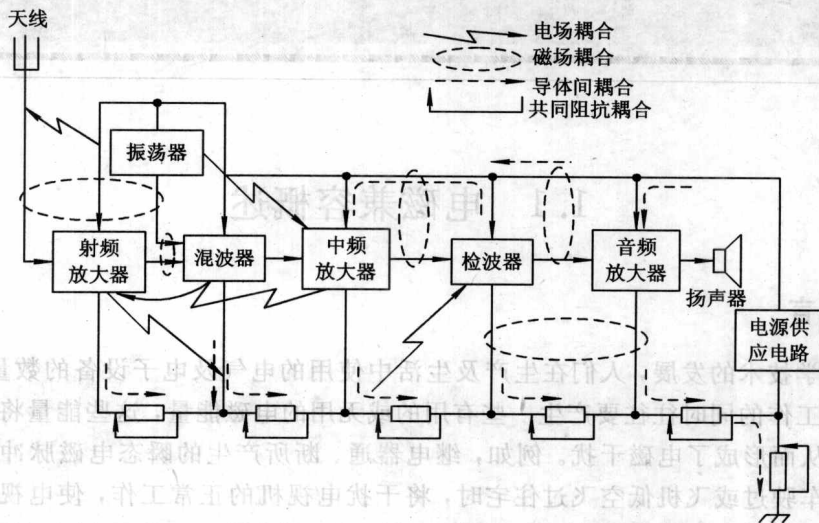


图 1-2 无线电接收机内各级电路间的干扰

在航天飞行器、飞机、舰艇中，大量的电子设备密集在狭小的空间，相互间的电磁干扰非常严重。例如，短波接收机遭到阻塞干扰，通信发射机会干扰雷达的工作，在飞机或舰艇上，一般要装备许多种雷达，当所有雷达同时工作时，一部雷达可能遭受几部雷达的干扰。在战斗中由于飞机和军舰上防御电子系统和进攻电子系统的相互干扰不能同时兼容工作，因而遭到对方发射导弹攻击的战例是屡见不鲜的。

因此，在复杂的电磁环境中，如何减少相互间的电磁干扰，使各种设备正常运转，是一个亟待解决的问题；另一方面，恶劣的电磁环境还会对人类及生态产生不良的影响。电磁兼容学正是为解决这类问题而迅速发展起来的一门新兴的综合性学科。

电磁兼容学科主要研究的是如何使在同一电磁环境下工作的各种电气电子系统、分系统、设备和元器件都能正常工作，互不干扰，达到兼容状态。在某种程度上也可以说是研究干扰和抗干扰的问题。但作为一门学科它的研究对象已不仅仅限于电气电子设备，而是拓宽到自然干扰源、核电磁脉冲、静电放电，频谱管理工程，电磁辐射对人体的生态效应，信息处理设备电磁泄漏产生的失密，检测地震前的电磁辐射，进行震前预报等方面。电磁兼容学科包含的内容十分广泛，实用性很强。几乎所有的现代工业如航天、军工、电力、通信、交通、计算机、医疗卫生部门等都必须解决电磁兼容问题。

### 1.1.2 电磁干扰的危害

在人们的生活中，电磁兼容效应普遍存在，形式各异。如果电磁兼容效应严重，则将导致严重的故障或事故，同时对人体健康也有影响。



## 1. 电磁干扰对设备的危害

人们将电磁干扰的危害程度分为灾难性的、非常危险的、中等危险的、严重的和使人烦恼的五个等级。

### 1) 电磁干扰会破坏或降低电子设备的工作性能

据不完全统计,全世界电子电气设备由于电磁干扰而发生故障,每年都会造成数亿美元的经济损失。例如,BP机发射台等大功率电磁信号的干扰,影响飞机正常起降;移动电话信号干扰可使仪表显示错误,甚至可以造成核电站运转失灵。

美国航空无线电委员会(Radio Technical Commission for Aeronautics, RTCA)曾在一份文件中提到,由于没有采取对电磁骚扰的防护措施,一位旅客在飞机上使用调频收音机,使导航系统的指示偏离 $10^\circ$ 以上。因此,在国际上,对舰载、机载、星载及地面武器、弹药的电磁环境都有严格要求。1993年美国西北航空公司曾发表公告,限制乘客使用移动电话和调频收音机等,以免骚扰导航系统。

### 2) 电磁干扰造成的灾难性后果

电磁信息泄密使企业科技和商业机密被竞争对手轻易获取,严重影响企业的生存和发展;电磁波的辐射造成国家政治、经济、国防和科技等方面的重要情报泄密,关系到国家的保密安全问题。

1976~1989年,我国南京、茂名和秦皇岛等地的油库及武汉石化厂,均因遭受雷击引爆原油罐,造成惨剧。雷击引起的浪涌电压属于高能电磁骚扰,具有很强的破坏力。1992年6月22日傍晚,雷电击中北京国家气象局,造成一定的破坏和损失。因为雷击有直接雷击和感应雷击两种,而避雷针只能局部地防护直接雷击,对感应雷击则无能为力,故对感应雷击应采用电磁兼容防护措施。据悉,绝大部分的雷灾事故中受损的是电视、电话、监测系统和电脑等高科技产品。在受灾单位中有寻呼台、信息计算机中心、医院和银行等。

灾情有的造成整个计算机网络系统瘫痪,有的造成通信系统不畅,有的还造成辖区大面积停电。据悉,2000年1至8月份,广州市因雷击造成的死伤多达67人,其中死亡人数多达20人。同时,雷击已经成为酿成广州电气火灾的第二大罪魁祸首。房屋和电器等因雷击损毁也较1999年严重,经济损失愈亿元。

下面介绍几个由于电磁干扰造成国外航天系统故障的例子。1969年11月14日上午,土星V-阿波罗12火箭载人飞船发射后,飞行正常。起飞后36.5s,飞行高度为1920m时,火箭遭到雷击。起飞后52s,飞行高度为4300m时,火箭又遭到第二次雷击。这便是轰动一时的大型运载火箭载人飞船在飞行中诱发雷击的事件。故障分析及试验研究的结果表明,此次事故是由于火箭及火箭发动机火焰所形成的导体(火箭与飞船共长100m,火焰折合导电长度约200m)在飞行中使云层至地面之间及云层至云层之间人为地诱发了雷电所造成的。1961年秋,一系列的雷电使部署在意大利的美国丘比特导弹武器系统多次遭到严重损坏,甚至原以为系统中隔离较好而与外界环境无关的元件也受到了严重的影响。

1962年开始进行的民兵I导弹战斗状态的飞行试验,前两发均遭失败。这两发导弹的故障现象相似,都是制导计算机受到脉冲干扰而失灵。经过分析,故障是由于导弹飞行到一定高度时,在相互绝缘的弹头结构与弹体结构之间出现了静电放电,它产生的骚扰脉冲破坏了计算机的正常工作而造成的。



1967年大力神ⅢC运载火箭的C-10火箭在起飞后95s,飞行高度为26km时,制导计算机发生故障。C-14火箭起飞后76s,飞行高度为17km时,制导计算机也发生了故障。经过分析,制导计算机中采用的金属网套没有接地的部分与火箭之间产生电压,当火箭飞行高度增加,气压下降到一定值时,此电压产生的火花放电使计算机发生了故障。

1964年在肯尼迪角发射场,德尔它运载火箭的Ⅲ级X-248发动机发生意外的点火事故,造成3人死亡。在塔尔萨城对德尔它火箭进行测试时,也发生过一起Ⅲ级X-248发动机意外点火事故。分析结果表明,肯尼迪角发射场的事故是由于罩在第三级轨道观测卫星上的聚乙烯罩衣,造成了静电荷的重新分布,结果使漏电流经过发动机的一个零件到达点火电爆管的壳体而引起误爆。在塔尔萨城发生的事故是由于一个技术员戴着皮手套偶然摩擦发动机吸管的塑料隔板,使发动机点火电爆管引线上感应静电荷而引起的。

综上所述,可以看到,电磁干扰有可能使设备或系统的工作性能偏离预期的指标或使工作性能出现不希望的偏差,即工作性能“降级”。甚至还可以使设备或系统失灵,或导致寿命缩短,或使系统效能发生不允许的永久性下降。严重时,还能摧毁设备或系统。

## 2. 电磁场对人体的危害

在现代社会,随着电子产品的日益增多,电磁分布也日益复杂,只要有人的地方,无处不存在着电磁场。长期受到电磁辐射将会影响人体健康并造成电磁污染。高频辐射大于一定限值时,会使人产生失眠、嗜睡等植物神经功能紊乱,以及脱发、白血球下降、视力模糊、晶状体混浊、心电图异常等症状。由于电磁骚扰的频谱很宽,可以覆盖0~40GHz频率范围,因此电磁波辐射继水源、大气和噪声之后成为第四大环境污染源,正在引起人们极大的关注。

电磁污染源很广泛,它就在我们生活的周围,几乎包括所有的家电,只是污染程度有强弱之分罢了。计算机首当其冲,是因为人们必须与它面对面地操作,而且长时间接触,不像电视机能远距离接触。据德国慕尼黑大学医学研究所自1994年以来对近万名长期操作电脑的职业女性进行的跟踪调查表明,长时间操作电脑的妇女患乳腺癌的危险性,比其他职业妇女的患病概率高出43%。研究人员用雌性白鼠在电磁场中进行模拟实验,不久发现白鼠的乳腺出现肿瘤,其成长速度与磁场强度有关。

微机等荧光屏可产生相当强的电磁辐射,对人体健康不利,对孕妇的影响更明显,对1~3个月的胎儿危害更大。据美国的一项报告,德伯特公司有12名孕妇在荧光屏前工作,一年间竟有7名孕妇流产,1名孕妇早产;国防兵役局有15名孕妇在荧光屏前工作,有7人流产,3人产下畸形婴儿。像这样的例子数不胜数。据来自美国的一项研究发现,每周操作计算机达20小时的孕妇,在妊娠3个月内流产的可能性是通常情况下的两倍。

当今世界移动通信发展迅速。我国手机用户已超过美国与日本,成为世界上手机用户最多的国家。手机持有者希望在任何地方都能获得通信服务,这就势必要求移动通信基站无处不在。

手机、无绳电话对人体的危害及其防治措施是人们日常生活中最关注,同时也是国际上最热点的问题,因为它们用天线直接对着人的脑部辐射电磁波。更为严重的是,人们都习惯于将手机紧紧贴着耳朵讲话,20%以上的辐射功率都被脑部吸收了。关于手机辐射对人体的影响,世界各国都在研究。

移动通信器材运行时接收来自基站的无线电信号,对波及范围的人影响不大,但当发话时,其顶部的发射天线附近会产生较强的高频电磁波,5~10 cm处范围可达100~300  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$  (我国规定卫生标准为50  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ )。当手机收发信号时,头部受到电磁辐射的辐照,头部解剖组织复杂,其分层结构及形状使电磁场偏向不均匀分布,组织的比吸收率(SAR)要增大,时间一长对大脑势必造成危害,严重者可形成癌瘤以致危及生命。一位意大利企业家使用手机,工作效率大增,可3年后他的头部发现癌瘤,从CT确诊癌瘤部位恰好位于手机天线顶端习惯放置的部位。1994年一位美国商人使用移动电话4年后,同样也发现了头部癌肿,经治疗无效死亡。

据(纽约时报)报道,美国研究人员赖·亨利博士在不久前布鲁塞尔召开的国际移动电话安全会议上报告说,移动电话发射的微波可导致实验室中的老鼠暂时丧失某些能力。他在一项实验中对老鼠进行了大约45分钟低能量辐射——大体上相当于一部移动电话发射的能量,结果发现,老鼠在接受辐射后短时间内产生了头脑混乱。他认为,移动电话很可能对哺乳动物的脑细胞造成不良影响,因为这种辐射改变了细胞组织,因此也改变了脑细胞执行任务的方法。欧洲的几位科学家同意此观点。英国政府主管放射研究的国家放射线保护委员会的科学家说,他们接受“移动电话可能改变人类细胞功能”的说法。另外,澳大利亚的研究人员在最近也发现,经常使用移动电话可能会导致淋巴瘤。

利用电磁场对人体的影响,目前产生了新式的杀伤性武器。科学家发现,当电子束以光速或接近光速的速度通过等离子体时,会产生出定向微波能量,这种微波能量比大功率雷达用的微波功率要高几个数量级。如果将这种波束能量加以会聚,就可能研制出直接杀伤对方战斗成员的电磁武器。据报道,美国已研制成功强微波发生器和高增益定向天线,可以发射出高强度的微波射束。据报道,人员直接遭到这种波束的“闪击”,可以造成神经细胞的功能混乱,出现神经错乱、晕头转向等现象;造成心房纤颤或心力衰竭,引起心脏病,甚至使心脏和呼吸功能停止,从而造成人员猝死。

### 1.1.3 电磁兼容的含义

电磁兼容(ElectroMagnetic Compatibility, EMC)一般指电气及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,即要求在同一电磁环境中的上述各种设备都能正常工作又互不干扰,达到“兼容”状态。换句话说,电磁兼容是指电子线路、设备、系统相互不影响,从电磁角度具有相容性的状态。相容性包括设备内电路模块之间的相容性、设备之间的相容性和系统之间的相容性。

我国国家军用标准 GJB72-85《电磁干扰和电磁兼容性名词术语》中给出电磁兼容性的定义为:“设备(分系统、系统)在共同的电磁环境中能一起执行各自功能的共存状态,即:该设备不会由于受到处于同一电磁环境中其他设备的电磁发射而导致或遭受不允许的性能降级,它也不会使同一电磁环境中其他设备(分系统、系统)因受其电磁发射而导致或遭受不允许的性能降级”。可见,从电磁兼容性的观点出发,除了要求设备(分系统、系统)能按设计要求完成其功能外,还要求设备(分系统、系统)有一定的抗干扰能力,不产生超过规定限度的电磁干扰。

国际电工技术委员会(IEC)认为,电磁兼容是一种能力的表现。IEC给出的电磁兼容性定义为:“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,而不致

于在其环境中产生不允许的干扰”。

进一步讲,电磁兼容学是研究在有限的空间、有限的时间、有限的频谱资源条件下,各种用电设备或系统(广义的还包括生物体)可以共存,并不致引起性能降级的一门学科。电磁兼容的理论基础涉及到数学、电磁场理论、电路基础、信号分析等学科与技术,其应用范围又几乎涉及到所有用电领域。由于其理论基础宽、工程实践综合性强、物理现象复杂,因此在观察与判断物理现象或解决实际问题时,实验与测量具有重要的意义。对于最后的成功验证,也许没有任何其他领域像电磁兼容那样强烈地依赖于测量。在电磁兼容领域中,我们所面对的研究对象(主要指电磁噪声)无论是时域特性还是频域特性都十分复杂。此外,研究对象的频谱范围非常宽,使得电路中的集中参数与分布参数同时存在,近场与远场同时存在,传导与辐射同时存在,为了在国际上对这些物理现象有统一的评价标准和统一实现设备或系统电磁兼容的技术要求,对测量设备与设施的特性以及测量方法等均予以严格的规定,并制定了大量的技术标准。目前,国际上正在掀起一个电磁兼容要求法规化、电磁兼容技术标准国际化及推行电磁兼容强制性认证的热潮。

### 1.1.4 电磁干扰的三要素

电磁兼容学科研究的主要内容是围绕构成干扰的三要素进行的,即电磁骚扰源、途径和敏感设备。具体内容如下。

#### 1. 电磁骚扰源

电磁骚扰(Electromagnetic Disturbance)的定义为:“任何可能引起装置、设备或系统性能降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、无用信号或传播媒介自身的变化。电磁噪声(Electromagnetic Noise)是指“一种明显不传送信息的时变电磁现象,它可能与有用信号叠加或组合。”例如,电气设备运行中经常产生的放电噪声、浪涌噪声、振荡噪声等不带任何有用信息。无用信号是指一些功能性的信号,例如,广播、电视、雷达等,本身是有用信号,但如果干扰其他设备的正常工作则对被干扰的设备而言它们是“无用信号”,所以电磁骚扰的含义比电磁噪声更广泛一些。有时人们常把骚扰、噪声和“干扰”混同起来,实际上“电磁干扰”是有明确定义的,即“由电磁骚扰引起的设备、传输通道或系统性能的下降”。“骚扰”是一种客观存在,只有在影响敏感设备正常工作时才构成了“干扰”。骚扰源可分为自然骚扰源和人为骚扰源。骚扰源的研究包括其发生的机理、时域和频域的定量描述,以便从源端来抑制骚扰的发射。

#### 2. 传输途径

骚扰的传输途径有两条,通过空间辐射和通过导线传导,即辐射发射和传导发射。辐射发射主要研究在远场条件下骚扰以电磁波的形式发射的规律以及在近场条件下的电磁耦合。共模电流辐射也是重要研究的内容之一。传导发射讨论传输线的分布参数和电流的传输方式对噪声传输的影响,例如,共阻抗耦合、共模-差模电流转换等。

#### 3. 敏感设备

敏感设备即指受干扰设备。设备的抗干扰能力用电磁敏感度(Susceptibility)来表示。设备的电磁干扰敏感性电平阈值越低,即对电磁干扰越灵敏,电磁敏感度越大,抗干扰能



力越差，或称抗扰度(Immunity)性能越低。反之，接收器的电磁敏感度越低，抗干扰能力也越高。采用不同的结构和选用不同的元器件都将大大影响设备的抗干扰能力。这些都是设备或系统的设计阶段要考虑的。各种设备的抗扰度指标都可从 EMC 手册中查到。

### 1.1.5 电磁干扰(骚扰)源的分类

电磁干扰的分类可以有多种分法，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，有近场区感应耦合和远场区辐射耦合；按频带分，有窄带干扰和宽带干扰；按干扰频率范围分，可细分为五种(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(如图 1-3 所示)，等等。这里面主要讨论自然干扰(骚扰)和人为干扰(骚扰)。

表 1-1 电磁干扰的频率范围分类

根据频率范围电磁干扰的分类	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 电力牵引系统 有线广播
甚低频干扰源	30 kHz 以下	雷电等
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	300 kHz~300 MHz	工业、科学、医疗设备 电动机，照明电气 宇宙干扰
微波干扰源	300 MHz~100 GHz	微波炉 微波接力通信 卫星通信

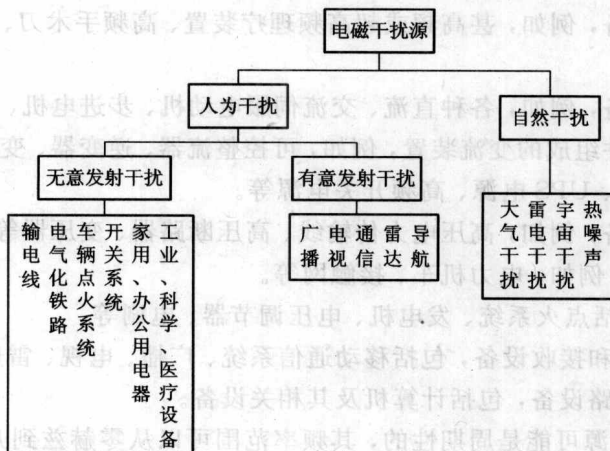


图 1-3 电磁干扰源的分类



## 1. 自然干扰(骚扰)源

自然电磁干扰源存在于地球和宇宙中,自然电磁现象会产生电磁噪声。由自然界的电磁现象产生的电磁噪声,比较典型的有:

- (1) 大气噪声,如雷电;
- (2) 太阳噪声,如太阳黑子活动时产生的磁暴;
- (3) 宇宙噪声,来自银河系;
- (4) 静电放电(ESD)。

## 2. 人为干扰(骚扰)源

人为干扰分为有意发射干扰源和无意发射干扰源。

有意发射干扰源是专用于辐射电磁能的设备,例如,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。

有许多装置都无意地发射电磁能量,例如,汽车的点火系统,各种不同的用电装置和带电动机的装置,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的辐射,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瓦到兆瓦量级。

任何电气电子设备都可能产生人为骚扰,这里只是列出一些容易产生骚扰的设备。

### (1) 家用电器和民用设备。

◆ 有触点电器,例如,电冰箱、电熨斗、电热被褥、电磁开关、继电器等。

◆ 使用整流子电动机的机器,例如,电钻、电动刮胡刀、电按摩器、吸尘器、电动搅拌机、牙科医疗器械等。

◆ 家用电力半导体器件装置,例如,硅整流调光器、开关电源等。

### (2) 高频设备。

◆ 工业用高频设备,例如,塑料热合机、高频加热器、高频电焊机等。

◆ 高频医疗设备,例如,甚高频或超高频理疗装置、高频手术刀、电测仪、X光机等。

### (3) 电力设备。

◆ 电力传动设备,例如,各种直流、交流伺服电动机、步进电机、电磁阀、接触器等。

◆ 电力电子器件组成的变流装置,例如,可控整流器、逆变器、变频器、斩波器、无触点开关、交流调压器、UPS电源、高频开关电源等。

◆ 电力传输设备,例如,高压电力传输线、高压断路器、变压器等。

◆ 电气化铁道,例如,电力机车、接触网等。

(4) 内燃机,包括点火系统、发电机、电压调节器、电刷等。

(5) 无线电发射和接收设备,包括移动通信系统、广播、电视、雷达、导航设备等。

(6) 高速数字电路设备,包括计算机及其相关设备。

各种不同的干扰源可能是周期性的,其频率范围可以从零赫兹到几十千赫兹、几兆赫兹、甚至千兆赫兹(GHz)或更高。干扰信号也可能是非周期性或脉冲形式的。能量也可能是极微弱的或者是兆瓦级的。表1-2给出了经常遇到的一些干扰源的频谱范围[5]。