



电磁兼容原理及 应用教程

(第2版)

吕文红 郭银景 唐富华 杨 阳 陈幼峰 编著

- 剖析电磁干扰机理，阐述电磁兼容标准和测试技术
- 深入工程技术实践，精心进行电磁兼容滤波器设计
- 紧扣电磁兼容关键技术问题，论述屏蔽和搭接原理
- 凝聚最新研究成果，分析印制电路板实战设计原理
- 基于生物电磁学的研究，论述电磁辐射防护和利用

清华大学出版社



TN03/8=2

2008

电磁兼容原理及应用教程

(第2版)

吕文红 郭银景 唐富华 杨 阳 陈幼峰 编著

清华大学出版社

北 京

内 容 简 介

本书侧重于电磁兼容技术的实际应用, 兼顾其基础理论。在表达上, 多用数据和图表说明技术原理, 省略了烦琐的公式推导和论证。

全书的主要内容包括电磁兼容的基本概念和原理, 各种电磁兼容产生的机理、危害和防护措施, 电磁兼容的测试和预测, 电磁波的生物效应和电磁防护等。本书从实际工作的需要出发, 论述了电磁故障诊断技术, 电波暗室的设计、防电磁干扰滤波器的设计和 PCB 板设计等技术, 详细阐述了工程中常遇到的屏蔽、搭接、系统接地和隔离等技术。通过典型案例分析, 阐述相关原理、步骤和具体方案。

本教材适合电子工程及其相关专业的师生使用, 也可作为相关专业工程技术人员继续教育的培训教材, 还可供从事科研和工程项目的相关人员作为电磁兼容性分析、测试和设计的参考书。

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 13501256678 13801310933

图书在版编目(CIP)数据

电磁兼容原理及应用教程(第2版)/吕文红, 郭银景, 唐富华, 杨阳, 陈幼峰编著. —北京: 清华大学出版社, 2008.2

ISBN 978-7-302-16760-0

I.电… II.①吕…②郭…③唐…④杨…⑤陈… III.电磁兼容性—教材 IV.TN03

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 002265 号

责任编辑: 彭 欣 闫光龙

封面设计: 山鹰工作室

版式设计: 杨玉兰

责任校对: 李玉萍

责任印制: 杨 艳

出版发行: 清华大学出版社

地 址: 北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn>

邮 编: 100084

c-service@tup.tsinghua.edu.cn

社 总 机: 010-62770175

邮购热线: 010-62786544

投稿咨询: 010-62772015

客户服务: 010-62776969

印 装 者: 北京鑫海金澳胶印有限公司

经 销: 全国新华书店

开 本: 185×260 印 张: 23 字 数: 553 千字

版 次: 2008 年 2 月第 2 版 印 次: 2008 年 2 月第 1 次印刷

印 数: 1~4000

定 价: 35.00 元

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题, 请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话: (010)62770177 转 3103 产品编号: 023801-01

前 言

自《电磁兼容原理及应用教程》出版以来,来自于读者的反馈意见非常多,既有对该书的赞誉,也有一些非常中肯的建议。电磁兼容技术的快速发展,为本书的修订提供了大量的第一手资料,也促使作者下决心对原来的编排结构进行一些调整。本修订版在原版的基础上增加了工程实际应用的内容,并对部分不规范的图表进行了修订,力求做到用浅显的分析、直观的图表阐述具有一定深度的电磁兼容理论。

本书主要是为电子工程类专业本科高年级学生编写的,也可作为研究生的基础课教材。此外,既可作为相关专业工程技术人员继续教育的培训教材,也适于从事科研和工程项目的相关人员作为电磁兼容性分析、测试和设计的参考书。本书的教学时数为60~80学时。

全书共分10章。第1章主要阐述了电磁干扰的危害、电磁兼容认证的重要性和技术要求,并对在电磁兼容理论中出现的名词术语进行了解释。第2章论述了电磁兼容理论的主要技术基础。第3章围绕电磁干扰三要素进行了详细的论述,阐述了静电、雷电和辐射等干扰产生的机理及危害,描述了人体的静电放电模型,讨论了电磁干扰三要素之间的关系。第4章介绍了电磁兼容的相关测试标准、测试用电波暗室的设计、笔者在实际工作中总结出的实用故障诊断技术,以及一款电磁测试软件。第5章介绍了电磁干扰滤波器的工作原理与分类,以及一些常用的滤波元器件,并结合实际应用阐述了滤波器的正确选用与安装。第6章论述了电磁兼容技术中的4项最为重要的技术:屏蔽、搭接、系统接地和隔离。重点论述了屏蔽技术的原理和完整性,并描述了各种屏蔽材料的性能特点。第7章总结了作者在长期的电路设计工作中的经验,论述了PCB的电磁兼容设计的原则、干扰消除、抗串扰和PCB接地技术。详细介绍常见元件的分布参数模型。第8章阐述了人体电磁兼容原理、电磁波的生物效应和电磁波的防护等与人体健康息息相关的一些问题。第9章介绍了一些电磁兼容的典型案例分析,详细阐述了案例分析的原理、步骤及具体方案。第10章主要论述了电磁兼容预测的原理,并简要介绍了两款电磁兼容预测软件。

本书是编者基于多年教学和科研工作实践,吸收了一些最新的研究成果和工程经验,以原有的本科教学讲义和培训教材为基础编写完成的。杨阳编写了第1章和第2章,郭银景编写了第3章和第6章,吕文红编写了第4章、第8章和第10章,唐富华编写了第5章和第7章,陈幼峰编写了第9章,山东科技大学的曹丽娜、王谦、徐涛、谢芳华、邓敏、刘滨、黄焕和陈贤卿等参加了部分章节的编写工作,全书由吕文红统稿审定。

在本书的编写出版过程中,得到了我国著名武器系统专家康景利教授和著名通信系统专家金振玉教授的指导与帮助,在此表示衷心感谢。

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,敬请读者不吝赐教。

编 者

目 录

第 1 章 电磁兼容概述.....1	
1.1 电磁干扰的危害.....1	
1.1.1 电磁干扰对设备的危害.....2	
1.1.2 电磁场对人体的危害.....5	
1.1.3 电磁脉冲在军事上的应用.....6	
1.2 电磁兼容的名词术语与常见术语.....7	
1.3 电磁兼容技术的发展及电磁兼容认证.....11	
1.3.1 电磁兼容技术的发展.....11	
1.3.2 电磁兼容认证.....16	
习题.....19	
第 2 章 电磁兼容理论基础.....20	
2.1 各种信号的频谱分析.....20	
2.1.1 信号的分类.....20	
2.1.2 信号的时域分析与频域分析.....22	
2.1.3 傅里叶变换的应用.....32	
2.2 电路与磁路.....34	
2.2.1 电路.....34	
2.2.2 磁路.....37	
2.3 电磁场原理.....42	
2.4 电磁兼容的单位及换算.....45	
2.4.1 电磁干扰场强的基本单位.....45	
2.4.2 电磁干扰场强的分贝制单位.....46	
2.4.3 分贝单位在实际工程中的应用.....53	
2.4.4 电磁干扰场强单位间的相互换算.....54	
习题.....55	
第 3 章 电磁环境及电磁污染途径.....58	
3.1 自然电磁环境.....58	
3.1.1 静电.....58	
3.1.2 雷电.....64	
3.1.3 自然辐射.....70	
3.2 人工电磁干扰.....73	
3.2.1 辐射干扰源.....73	
3.2.2 传导干扰源.....76	
3.3 电磁干扰三要素.....80	
3.3.1 敏感设备的敏感度度量.....81	
3.3.2 传播干扰能量的途径.....82	
习题.....86	
第 4 章 电磁兼容试验.....88	
4.1 电快速瞬变脉冲群抗扰度试验.....88	
4.1.1 试验等级.....89	
4.1.2 试验方法.....90	
4.1.3 试验实施.....93	
4.2 静电放电抗扰度试验.....95	
4.2.1 试验等级.....95	
4.2.2 试验方法.....96	
4.2.3 试验步骤.....98	
4.3 浪涌(冲击)抗扰度试验.....99	
4.3.1 试验等级.....100	
4.3.2 试验方法.....102	
4.3.3 试验步骤.....104	
4.4 射频场感应的传导骚扰抗扰度试验——注入电流试验.....105	
4.4.1 试验等级.....105	
4.4.2 试验准备.....106	
4.4.3 试验方法.....107	
4.5 电波暗室.....109	
4.5.1 半电波暗室的设计.....110	
4.5.2 全电波暗室.....113	
4.6 实用电磁干扰故障诊断技术.....115	
4.6.1 故障诊断前的准备工作.....116	
4.6.2 深刻理解 dB.....119	

4.6.3 常见故障的解决方法	121	6.2.2 编织类电磁屏蔽材料	189
4.7 EMC-Scanner 电磁辐射测试软件	123	6.2.3 截止波导与蜂窝板	192
习题	125	6.2.4 磁屏蔽材料	193
第5章 电磁兼容滤波器设计	126	6.3 屏蔽完整性	195
5.1 干扰的分类	126	6.4 搭接技术	199
5.1.1 按噪声产生的原因分类	126	6.5 系统接地	203
5.1.2 按噪声传导模式分类	127	6.5.1 安全接地技术	203
5.1.3 按噪声波形及性质分类	128	6.5.2 信号接地技术	206
5.2 电磁干扰滤波器	129	6.6 隔离技术	210
5.2.1 电磁干扰滤波器的		6.6.1 隔离变压器	210
工作原理	129	6.6.2 光电耦合器	212
5.2.2 电磁干扰滤波器的		习题	212
特殊性	129	第7章 PCB 的电子兼容设计	214
5.2.3 滤波器的主要特性	130	7.1 PCB 中的电磁干扰	214
5.2.4 滤波器的分类	131	7.1.1 干扰的本质	214
5.2.5 反射式滤波器	132	7.1.2 噪声耦合	216
5.2.6 低通滤波器的分类	135	7.1.3 PCB 和天线	218
5.2.7 低通滤波器的结构选择	142	7.1.4 系统级电磁干扰产生	
5.2.8 低通滤波器的平衡结构		的原因	219
与串联形式	142	7.2 PCB 的一般设计原则	219
5.3 常用滤波器元件	145	7.2.1 布局	219
5.3.1 电容器	145	7.2.2 布线	220
5.3.2 电感	154	7.3 旁路和去耦	221
5.3.3 铁氧体 EMI 抑制元件	156	7.3.1 谐振概述	222
5.3.4 滤波连接器	160	7.3.2 物理特性	224
5.4 滤波器的选用和安装	164	7.3.3 并联电容器	227
5.4.1 滤波器的选用	164	7.3.4 引线长度电感	228
5.4.2 滤波器的安装	168	7.3.5 去耦电容的选择	228
习题	172	7.3.6 大电容的选择	230
第6章 屏蔽、搭接、系统接地		7.4 PCB 中的抗串扰设计	232
与隔离	173	7.4.1 串扰的测量单位	234
6.1 电磁屏蔽原理	173	7.4.2 避免串扰的设计技术	234
6.1.1 屏蔽效能	174	7.4.3 3W 原则	235
6.1.2 屏蔽技术	176	7.5 PCB 接地	236
6.2 电磁屏蔽材料	180	7.5.1 基本接地概念	236
6.2.1 覆膜类电磁屏蔽材料		7.5.2 安全地	238
与工艺	180	7.5.3 信号电压参考地	238
		7.5.4 接地方法	239



7.5.5 电源和接地结构中的 共阻抗耦合的控制	244	9.3.2 干扰信号的传播方式	308
7.5.6 接地环路	246	9.3.3 变频调速系统的抗 干扰对策	309
7.5.7 多点接地中的谐振	248	9.3.4 结论	310
习题	248	9.4 开关电源中电磁干扰的抑制	311
第 8 章 生物电磁效应与应用	250	9.4.1 180W 开关电源的电路 结构分析与电磁干扰测试	311
8.1 生物电与人体电磁兼容	250	9.4.2 电磁干扰的抑制	313
8.1.1 生物电	251	9.4.3 总结	319
8.1.2 人体电磁兼容	252	9.5 通信网络及电力线路中的干扰 及其解决方案研究	319
8.2 电磁波的生物效应	254	9.5.1 无线通信系统频率干扰 及其解决方案研究	319
8.2.1 电磁波生物效应	256	9.5.2 卫星通信中的常见干扰 及处理措施	322
8.2.2 微波的生物效应	259	9.5.3 线路谐波的危害及抑制	325
8.2.3 微波的热效应	261	9.6 计算机产生的射频, 电磁干扰 的解决	328
8.2.4 微波的非热效应	262	9.6.1 简述	328
8.3 电磁的应用与防护	263	9.6.2 射频干扰源	329
8.3.1 电磁在生物医学中的应用	263	9.6.3 射频干扰路径	330
8.3.2 电磁场在其他方面的应用	269	9.6.4 消除射频干扰	331
8.3.3 电磁辐射的保护	272	习题	334
习题	284	第 10 章 电磁兼容预测	335
第 9 章 电磁兼容案例分析	285	10.1 电磁兼容预测原理	335
9.1 防雷保护案例分析	285	10.1.1 电磁兼容预测方法	336
9.1.1 雷电的产生及其对电器 设备的危害	285	10.1.2 电磁兼容模型描述	337
9.1.2 视频监控系統防雷 保护方案	286	10.1.3 电磁兼容预测分析的 步骤和作用	339
9.1.3 通信线路的雷电过 电压及抑制措施	292	10.2 电磁兼容预测软件概述	340
9.1.4 油库及汽车加油站系统 防雷设计	295	10.3 典型的电磁兼容预测软件	343
9.2 电子元器件电磁兼容案例分析	301	10.3.1 Apsim 仿真软件	343
9.2.1 电子元件的防静电 损坏措施	301	10.3.2 Zeland 软件	347
9.2.2 直流放大器电磁兼容 分析	305	10.3.3 Ansoft HFSS	349
9.3 变频器应用中的干扰问题 及其对策	307	10.3.4 ANSYS FEKO	353
9.3.1 变频器干扰的来源	307	习题	356
		参考文献	357

第 1 章 电磁兼容概述

随着电子技术的高速发展,世界进入了信息时代。电子、电气设备或系统获得了越来越广泛的应用。大功率的发射机对不希望接受其信息的高灵敏度接受机构成了灾难性的干扰。在工业发达的大城市中的电磁环境越来越恶劣,往往使电子、电气设备或系统不能正常工作,引起性能降低,甚至受到损坏。

电磁干扰产生于干扰源,它是一种来自外部的、并有损于有用信号的电磁现象。由电磁干扰源发生的电磁能,经某种传播途径传输至敏感设备,敏感设备又对此表现出某种形式的“响应”,并产生干扰的“效果”,这个作用过程及其结果,称为电磁干扰效应。在人们的生活中,电磁干扰效应普遍存在,形式各异。如果干扰效应十分严重,设备或系统失灵,导致严重故障或事故,则称为电磁兼容性故障。显而易见,电磁干扰已是现代电子技术发展道路上必须逾越的巨大障碍,为了保障电子系统或设备的正常工作,必须研究电磁干扰,分析、预测干扰,限制人为干扰强度,研究抑制干扰的有效技术手段,提高抗干扰能力,并对电磁环境进行合理化设计。

本章概要介绍了电磁干扰的危害,回顾了电磁兼容技术的发展历史,展望了今后的发展趋势,并对在电磁兼容理论中出现的名词术语进行了解释,最后强调了电磁兼容认证的重要性和技术要求。

本章学习重点:

- 电磁兼容的名词术语
- 电磁兼容认证的技术要求

1.1 电磁干扰的危害

随着科学技术的进步,人类正进入信息化社会。人类的生存环境也同电磁环境相互交融。早在 1975 年专家学者就曾预言,随着城市人口的迅速增长,汽车、通信、计算机与电子、电气设备大量进入家庭,空间人为电磁能量每年增长 7%~14%,也就是说,25 年环境电磁能量密度最高可增加 26 倍,50 年可增加 700 倍,21 世纪电磁环境会日益恶化。在这种复杂的电磁环境中,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,而如何降低恶劣的电磁环境对人体及生态产生的不良影响,也是一个不容忽视的问题。



1.1.1 电磁干扰对设备的危害

近年来,媒体常提及“公害”一词,诸如水质污染、空气污染、噪音问题等等。环境污染已成为人类最头痛的问题。

电子技术的日新月异,各种电子设备相继出现。这些设备有的是独立工作的,有的需要同其他设备组合一起组成系统来工作;电子设备的电路工作方式有模拟的,有数字的,或是两者皆有。这些日益增多的电子设备特别是大功率设备,造成了严重的电磁污染,即电磁干扰(Electro magnetic Interference, EMI)。例如:一些汽机车引擎点火会对电视机造成干扰,以条纹方式出现在电视画面上,或对收音机造成干扰而以爆豆声或以背景噪声方式出现在喇叭中;聆听音响时可能会由于电梯或高调波设备产生的信号串入音响器材而遭成不愉快的声音输出,冰箱的启动会造成家用电脑的错误动作等。

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的故障,每年都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源的干扰,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。

水管中的地电流产生的磁场,使医院里高灵敏度的电子仪器屡受影响。例如:一个病人的导管泵被静电放电损坏,幸而报警系统没有受到影响,护士听到了报警;在一次手术中,一台塑料焊接机对病人的监控系统产生了干扰,致使其没有探测到病人手臂中的血液循环停止,后来这位病人的手臂只得切除掉。

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 度以上。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,以免导航系统受到骚扰。

2. 雷电电磁脉冲造成的灾难性后果

雷击引起的浪涌电压,属于高能电磁骚扰,具有很大的破坏力。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、计算机信息中心、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。据发达国家的保守估计,由于雷电电磁脉冲导致的计算机网络失效或损坏,平均每年约占全部故障的 70%。我国近几年雷灾事故也很频繁,数量激增,损失巨大。据一些省市统计,信息系统因雷灾的直接损失约占雷害总损失的 80%,同时造成无法估量的间接损失与社会影响。下面是一些雷电灾害的示例。



1) 信息中心大楼雷电灾害示例

1992年6月22日傍晚,一个落地雷击中某信息中心大楼顶,楼内的大型计算机与小计计算机网络中断,整个计算机系统停止工作达两天之久,损失数十万元。大楼装有避雷针,闪电由避雷针引入大地,大楼、人员及普通设备安然无恙,但雷电流在四周产生的巨大脉冲电磁场,却使具有极为灵敏的微电子器件的计算机系统毁坏了。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。2002年5月11日晚,北京市某电视塔遭雷击,造成交换机受损,附近的一个观测自动站也被击坏,主要原因是雷电感应造成的。2006年4月14日凌晨,泉州市交警考场遭雷击,电子桩考系统和路考系统大面积损毁瘫痪,直接经济损失20万元。2006年6月25日19时45分中石化宁化中沙加油站向省分公司传输数据时,遭遇强雷暴,只听到一声巨响,一名正在使用发票机打印发票的员工遭受强雷电流的闪击,全身发麻,幸好未出现生命危险;距加油站约80米的电信电杆,进入加油站的通信电缆和铁丝吊线被击断,路灯被击碎;加油站后墙通信总接线盒受雷击盒内线路烧毁,线路板崩出,盒盖被掀落在地;总配电箱电涌保护器被雷击坏,已呈故障状态;与Modem相连接的信号线、电话线被强大的雷电流熔断,墙壁被烧黑,信号避雷器端口明显被烧焦,Modem、信号电源避雷器、电源避雷器、90台汽油加油机和两台计算机被雷击损坏。

2) 金融行业雷电灾害示例

1995年6月,某省中国人民银行清算中心一座33层高楼遭雷击,导致网络停止工作3天,几亿元资金无法运行,仅利息损失就达200多万元。2005年5月18日,南安市工商银行计算机网络设备被雷击坏,损失10万元。

3) 微波通信系统雷电灾害示例

某大电网有微波站近百个,其中进口设备站65个。事故统计表明,造成设备损坏、导致长时间通信中断的主要原因是雷害。某一线段的15个站有12个站曾遭受雷击影响正常通信,个别微波站几乎每年都遭雷击。2005年8月23日下午3点~6点,因雷击造成福建省莆田有线电视台损坏发射机1台、光接收机2台、放大器数十个、分支器数百只,损失30多万元。2006年3月22日20时20分,连江县丹阳地区发生严重雷击事故,连江县防雷中心次日派员调查;这次雷击事故造成丹阳供电线路615线被击断,当地供电人员连夜抢修至23时才恢复供电;这次雷击事故造成驻连某部队的电脑68部、电视5部、程控交换机、IP电话、有线电视放大器全部被击坏;部分电器虽未开机,但因其未拔下电源插头还是未能逃过一劫,还有附近两个村的电器损坏,经济损失巨大。

4) 计算机网络雷电灾害示例

某机场航材供应中心计算机网络有主机2台,带有若干终端,安装在机房二楼,大楼有一台服务器及若干微机,构成一个局域网。1995年7月,在一场暴雨中近区落雷,计算机网络瞬即全部停运,两台主机的数据库被冲乱,大楼的网络集线器(Hub)损坏,与(Hub)连接的微机和服务网网卡损坏。从事故范围和设备元器件损坏情况分析判断,这是一起雷电波从信号传输线路上侵入,造成计算机网络损坏的典型事例。

5) 人身财产雷电灾害示例

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。据悉,上海市1999年由于雷电所造成的损失就超过2亿元。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。房屋和电器等损毁也较 1999 年严重,经济损失愈亿元。根据 2005 年度收集到的部分雷灾统计,福建省因雷击造成人员伤亡的 31 起,其中死亡 24 人;因雷击起火爆炸、建筑物损坏、电子电器设备损坏、输电线路事故、输电设备损坏等 800 多宗,财产损失达 1 亿元以上。因雷击而停电、停工、停产等引起的间接损失更是令人触目惊心。2005 年 5 月 2 日晚,国家著名旅游风景名胜区泉州清源山南台寺大雄宝殿遭雷击,因寺内无完善的防雷设施,电线老化起火,大雄宝殿和里面四五尊大佛像、几十尊小佛像(十八罗汉、观世音菩萨、地藏王等)全都毁于一旦,仅剩三面墙壁,造成经济损失约 200 万元。

3. 电磁干扰对航天系统造成的灾难性后果

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。

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。早在 20 世纪 70 年代初,在美国某导弹基地的一次演习中,就因为导弹指令系统的频率和试验场区附近加油站自动门的控制信号辐射的电磁波频率完全一致,以致形成误触发,使导弹在人们毫无准备的情况下“自动”弹出发射架,飞向天空。

1962 年开始进行的民兵 I 导弹战斗弹状态的飞行试验,前两发均遭到失败。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。

1963 年 7 月 9 日,美国在太平洋的约翰斯顿岛上空 400km 处进行空爆核试验后,距约翰斯顿岛 1400km 之遥的檀香山却陷入一片混乱,防盗报警器响个不停,街灯熄灭,动力设备上的继电器一个个被烧毁。

1967 年大力神 II C 运载火箭的 C-10 火箭在起飞后 95s,飞行高度 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操作罩在第三级轨道观测卫星



上的聚乙烯罩衣时,造成静电荷的重新分布,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。

1991年英国劳达航空公司的那次触目惊心的空难至今令人难忘,有223人死于这次空难。据有关部门分析,这次空难极有可能是机上有人使用笔记本电脑、移动电话等便携式电子设备,它释放的频率信号启动了飞机的反向推动器,致使机毁人亡。

1996年10月巴西TAM航空公司的一架“霍克-100”飞机也莫名其妙地坠毁了,机上人员全部遇难,甚至地面上的市民也有数名惨遭不幸,这是巴西历史上第二大空难事件。专家们调查事故原因后认为,机上有乘客使用移动电话极有可能是造成飞机坠毁的元凶。也就是源于这次空难,巴西空军部民航局(DAC)研拟了一项关于严格限制旅客在飞机飞行时使用移动电话的法案。

1998年初,台湾华航一班机坠毁,参与调查的法国专家怀疑有人在飞机坠毁前打移动电话,导致通信受到干扰,致使飞机与控制塔失去联络,最后坠毁。

我国也有类似的事情发生,1996年7月11日,由上海飞往广州的CZ3504航班的南航2566号飞机准备降落时,由于有四五名旅客使用移动电话致使飞机一度偏离正常航道;也是在这一年,一架南航2564号飞机执行CZ3502航班从杭州飞回广州时,在着陆前4分钟,发现飞机偏离正常航道6度,据查当时也是有人在使用移动电话。这两起事例虽然没有酿成大祸,但让人想起来就后怕,如果偏离的不是6度而是更大,其后果不堪设想。

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,还可能摧毁设备或系统。

1.1.2 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,电磁场无处不在。而居于电磁场周围的生物和非生物都要受到它的影响。过去,人们由于对电磁场的认识不够全面,没有很好地管理,使电磁辐射问题日益严重,而电磁场本身对周围空间的辐射潜移默化地对生物产生负作用,使得它日益影响人类及动物的正常生活。因此电磁波辐射成为继水源、大气和噪声之后的第四大环境污染源。现在,世界各国都对此极其关注,在这方面作了大量的研究并制定了防备措施。广大的公众也对此产生很大的兴趣,关心电磁辐射对人体的影响。

电磁污染源很广泛,在各种电器设备中,计算机首当其冲,因为人们必须与它面对面地操作,而且长时间近距离接触,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。

计算机显示器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。

2006 年第二季度, 中国移动通信用户达到 4.26 亿, 如包含小灵通用户中国移动通信用户将超过 6 亿, 我国已超过美国和日本, 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, 但当通话时其顶部的发射天线附近会产生较强的高频电磁波, $5 \sim 10\text{cm}$ 范围内可达 $100 \sim 300\mu\text{W}/\text{cm}^2$ (我国规定卫生标准为 $50\mu\text{W}/\text{cm}^2$)。还有一种新型手机, 性能更好, 辐射功率也更大, 其场强可高达 $5.97\text{mW}/\text{cm}^2$, 超过标准 120 倍。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, 严重者可形成肿瘤以致危及生命。一位意大利企业家使用手机, 工作效率大增, 可 3 年后他的头部发现肿瘤, 从 CT 确诊肿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, 同样也发现了头部肿瘤, 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。

1.1.3 电磁脉冲在军事上的应用

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; 造成心房纤颤或者心力衰竭, 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。

电磁脉冲是短暂瞬变的电磁现象, 它以空间辐射为传播形式, 可对电子、信息、电力、

光电、微波等设施造成破坏,可使电子设备半导体绝缘层或集成电路烧毁,甚至使设备失效或永久损坏。

电磁脉冲武器号称“第二原子弹”,世界军事强国的电磁脉冲武器已开始走向实用化,能对敌方电子信息系统、指挥控制系统及网络等构成极大威胁。常规型的电磁脉冲炸弹已经爆响,而核电磁脉冲炸弹——“第二原子弹”正在向人类逼近。

1991年海湾战争期间,美军在E-8“联合星”飞机携带和使用电磁脉冲武器。1993年,美国进行了代号为“竖琴”的电磁脉冲武器实验,天线群向大气层的电离层发射电磁脉冲,阻断通信和摧毁来袭导弹。

1996年,美国一国家实验室研制出手提箱大小的高能电磁脉冲武器,以及可装备在巡航导弹上的电磁脉冲武器,其有效作战半径达10公里。

1998年,俄罗斯发明了重8公斤的小型强电流电子加速器,爆炸时发出X射线、高功率微波,可破坏电子设备。

1999年3月,美国在对南联盟的轰炸中,使用了尚在试验中的微波武器,造成南联盟部分地区通信设施瘫痪3个多小时。伊拉克战争中,美军于2003年3月26日,用电磁脉冲弹空袭伊拉克国家电视台,造成其转播信号中断。

1.2 电磁兼容的名词术语与常见术语

本节中给出的名词术语仅限于研究电磁兼容问题最基本和常用的名词术语。

- (1) 电磁环境(electromagnetic environment): 存在于给定场所的所有电磁现象的总和。
- (2) 电磁噪声(electromagnetic noise): 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。
- (3) 无用信号(unwanted signal, undesired signal): 可能损害有用信号接收的信号。
- (4) 干扰信号(interfering signal): 损害有用信号接收的信号。
- (5) 电磁骚扰(electromagnetic disturbance): 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。



注意: 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。

(6) 电磁干扰(electromagnetic interference, EMI): 电磁骚扰引起的设备、传输通道或系统性能的下降。

(7) 电磁兼容性(electromagnetic compatibility, EMC): 设备或系统在其电磁环境中能正常工作且不对该环境中任何事物构成不能承受的电磁骚扰的能力。

(8) [电磁]发射([electromagnetic] emission): 从源向外发出电磁能的现象。

(9) [无线电通信中的]发射(emission [in radiocommunication]): 由无线电发射台产生并向外发出无线电波或信号的现象。

(10) [电磁]辐射([electromagnetic] radiation): ①能量以电磁波形式由源发射到空间的现象。②能量以电磁波形式在空间传播。

 **注意：**“电磁辐射”一词的含义有时也可引申，将电磁感应现象也包括在内。

(11) 无线电环境(radio environment): 国家技术监督局 1995 年 8 月 25 日批准, 1996 年 3 月 1 日实施的标准中的定义为①无线电频率范围内的电磁环境。②在给定场所内所有处于工作状态的无线电发射机产生的电磁场总和。

(12) 无线电[频率]噪声(radio [frequency] noise): 具有无线电频率分量的电磁噪声。

(13) 无线电[频率]骚扰(radio [frequency] disturbance): 具有无线电频率分量的电磁骚扰。

(14) 无线电频率干扰(radio frequency interference, RFI): 由无线电骚扰引起的有用信号接收性能的下降。

(15) 系统间干扰(inter-system interference): 由其他系统产生的电磁骚扰对一个系统造成的电磁干扰。

(16) 系统内干扰(intra-system interference): 系统中出现的由本系统内部电磁骚扰引起的电磁干扰。

(17) 自然噪声(natural noise): 来源于自然现象而非人工装置产生的电磁噪声。

(18) 人为噪声(man-made noise): 来源于人工装置的电磁噪声。

(19) [性能]降低(degradation [of performance]): 装置、设备或系统的工作性能与正常性能的非期望偏离。

(20) [对骚扰的]抗扰性(immunity [to a disturbance]): 装置、设备或系统面临电磁骚扰不降低运行性能的能力。

(21) [电磁]敏感性([electromagnetic] susceptibility): 在存在电磁骚扰的情况下, 装置、设备或系统不能避免性能降低的能力。

 **注意：**敏感性高的设备, 往往抗扰性差。

(22) 静电放电(electrostatic discharge, ESD): 具有不同静电电位的物体相互靠近或直接接触引起的电荷转移。

(23) 瞬态[的] (transient [adjective and noun]): 在两相邻稳定状态之间变化的物理量或物理现象, 其变化时间小于所关注的时间尺度。

(24) 脉冲(Pulse): 在短时间内突变, 随后又迅速返回其初始值的物理量。

(25) 冲激脉冲(impulse): 针对某给定用途, 近似于一单位脉冲或狄拉克函数的脉冲。

(26) 尖峰脉冲(spike): 持续时间较短的单向脉冲。

(27) [脉冲的]上升时间(rise time [of a pulse]): 脉冲瞬时值首次从给定下限值上升到给定上限值所经历的时间。

 **注意：**除特别指明外, 下限值及上限值分别定为脉冲幅值的 10%和 90%。

(28) 上升率(rate of rise): 一个量在规定数值范围内, 即从峰值的 10%~90%, 随时间变化的平均速率。

(29) 猝发[脉冲或振荡](burst [of pluses or oscillations]): 一串数量有限的清晰脉冲或一

个持续时间有限的振荡。

(30) 脉冲噪声(impulsive noise): 在特定设备上出现的、表现为一连串清晰脉冲或瞬态的噪声。

(31) 脉冲骚扰(impulsive disturbance): 在某一特定装置或设备上出现的、表现为一连串清晰脉冲或瞬态的电磁骚扰。

(32) 连续噪声(continuous noise): 对一个特定设备的效应不能分解为一串能清晰可辨的效应的噪声。

(33) 连续骚扰(continuous disturbance): 对一个特定设备的效应不能分解为一串能清晰可辨的效应的电磁骚扰。

(34) 准脉冲噪声(quasi-impulsive noise): 等效于脉冲噪声与连续噪声的叠加的噪声。

(35) 非连续干扰(discontinuous Interference): 出现于被无干扰间歇隔开的一定时间间隔内的电磁干扰。

(36) 随机噪声(random noise): 给定瞬间值不可预测的噪声。

(37) 喀喇声(Click): 用规定方法测量时, 其持续时间不超过某一规定值的电磁骚扰。

(38) 喀喇声率(click rate): 单位时间(通常为每分钟)超过某一规定电平的喀喇声数。

(39) 基波[分量](fundamental [component]): 一个周期量的傅里叶级数的一次分量。

(40) 谐波[分量](harmonic [component]): 一个周期量的傅里叶级数中次数高于1的分量。

(41) 谐波次数(harmonic number): 谐波频率与基波频率的整数比。

 **注意:** 谐波次数又称谐波阶数(harmonic order)。

(42) 第 n 次谐波比(n th harmonic ratio): 第 n 次谐波均方根值与基波均方根值之比。

(43) 谐波含量(harmonic content): 从一交变量中减去其基波分量后所得到的量。

(44) 基波系数(fundamental factor): 基波分量与其所属交变量之间的均方根值之比。

(45) [总]谐波系数([total] harmonic factor): 谐波含量与其所属交变量之间的均方根值之比。

(46) 脉动(pulsating): 用来表述具有非零平均值的周期量。

(47) 交流分量(alternating component): 从脉动量中去掉直流分量后所得到的量。

 **注意:** 交流分量有时又称纹波含量(ripple content)。

(48) 纹波峰值系数(peak-ripple factor): 脉动量纹波峰谷间差值与直流分量绝对值之比。

(49) 纹波均方根系数(r. m. s-ripple factor): 脉动量纹波含量的均方根值与直流分量的绝对值之比。

(50) [时变量的]电平(level [of a time varying quantity]): 用规定方式在规定时间间隔内求得的诸如功率或场参数等时变量的平均值或加权值。

 **注意:** 电平可用对数来表示, 例如相对于某一参考值的分贝数。

(51) 电源骚扰(mains-borne disturbance): 经由供电电源线传输到装置上的电磁骚扰。

(52) 电源抗扰性(mains immunity): 对电源骚扰的抗扰性。

(53) 电源去耦系数(mains decoupling factor): 施加在电源某一规定位置上的电压与施加在装置规定输入端且对装置产生同样骚扰效应的电压值之比。

(54) 机壳辐射(cabinet radiation): 由设备外壳产生的辐射, 不包括所接天线或电缆产生的辐射。

(55) 内部抗扰性(internal immunity): 装置、设备或系统在其常规输入端或天线处存在电磁骚扰时能正常工作而无性能降低的能力。

(56) 外部抗扰性(external immunity): 装置、设备或系统在电磁骚扰经由除常规输入端或天线以外的途径侵入的情况下, 能正常工作而无性能降低的能力。

(57) 骚扰限值[允许值](limit of disturbance): 对应于规定测量方法的最大电磁骚扰允许电平。

(58) 干扰限值[允许值](limit of interference): 电磁骚扰使装置、设备或系统最大允许的性能降低。

(59) [电磁]兼容电平([electromagnetic] compatibility level): 预期加在工作于指定条件的装置、设备或系统上的规定的最大电磁骚扰电平。

 **注意:** 实际上电磁兼容电平并非绝对最大值, 而可能以小概率超出。

(60) [骚扰源的]发射电平(emission level [of a disturbance source]): 用规定方法测得的由特定装置、设备或系统发射的某给定电磁骚扰电平。

(61) [来自骚扰源的]发射限值(emission limit [from a disturbing source]): 规定的电磁骚扰源的最大发射电平。

(62) 发射裕量(emission margin): 装置、设备或系统的电磁兼容电平与发射限值之间的差值。

(63) 抗扰性电平(immunity level): 将某给定电磁骚扰施加于某一装置、设备或系统而其仍能正常工作并保持所需性能等级时的最大骚扰电平。

(64) 抗扰性限值(immunity limit): 规定的最小抗扰性电平。

(65) 抗扰性裕量(immunity margin): 装置、设备或系统的抗扰性限值与电磁兼容电平之间的差值。

(66) [电磁]兼容裕量([electromagnetic] compatibility margin): 装置、设备或系统的抗扰性电平与骚扰源的发射限值之间的差值。

(67) 耦合系数(coupling factor): 给定电路中, 电磁量(通常是电压或电流)从一个规定位置耦合到另一规定位置, 目标位置与源位置相应电磁量之比即为耦合系数。

(68) 耦合路径(Coupling path): 部分或全部电磁能量从规定源传输到另一电路或装置所经由的路径。

(69) 地耦合干扰(earth-coupled interference, ground-coupled interference): 电磁骚扰从一电路通过公共地或地口路耦合到另一电路从而引起的电磁干扰。

(70) 接地电感器(earthing inductor, grounding inductor): 与设备的接地导体串联的电感器。