

电磁兼容设计与 测试技术

DIANJIJIANRONG SHEJI YU CESHIJISHU

主 编 何 宏
副主编 张宝峰 王红君 肖志涛



北京航空航天大学出版社

TN03/37

2008

电磁兼容 设计与测试技术

主 编 何 宏

副主编 张宝峰 王红君 肖志涛

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

以现有国际、国内电磁兼容标准为基础,介绍电磁兼容设计与测试技术。主要内容包括电磁兼容技术概述和理论基础,干扰耦合机理,传输线及干扰分析,电磁骚扰发射测量,抗扰度的测试,电磁兼容滤波、接地及屏蔽技术,印制电路板 PCB 的电磁兼容设计,电磁干扰故障诊断与解决技术等。

本书可作为电气与电子工程、信息和计算机技术、自动控制与机电一体化、仪器和测试技术及生物学工程等专业的本科生和研究生的教材,还可作为从事电气和电子产品研发、设计、制造、质量管理、检测与维修等工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电磁兼容设计与测试技术/何宏主编. —北京:北京航空航天大学出版社,2008.5

ISBN 978-7-81124-174-7

I. 电… II. 何… III. ①电磁兼容性—设计②电磁兼容性—测试技术 IV. TN03

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 200442 号

电磁兼容设计与测试技术

主 编 何 宏

副主编 张宝峰 王红君 肖志涛

责任编辑 王 实

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(100083) 发行部电话:010-82317024 传真:010-82328026

<http://www.buaapress.com.cn> E-mail: bhpess@263.net

北京市媛明印刷厂印制 各地书店经销

*

开本:787×1092 1/16 印张:16.25 字数:416千字

2008年5月第1版 2008年5月第1次印刷 印数:4000册

ISBN 978-7-81124-174-7

定价:29.00元

前 言

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理论和应用的研究。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。

电磁兼容性 EMC(Electromagnetic Compatibility)作为一门新兴的综合性交叉学科正在我国迅速发展。本书以现有的国际、国内电磁兼容标准为基础,深入浅出地介绍电磁兼容设计与测试技术。全书共分9章。第1,2章介绍电磁兼容的基本概念和基础理论,对电磁干扰三要素和电磁骚扰源进行了分析,并介绍电磁兼容技术的发展及其认证;第3章分别对传导耦合、高频耦合和辐射耦合的干扰耦合机理进行了详细分析;第4章对传输线及干扰进行了分析;第5,6章详细介绍电磁骚扰发射和抗扰度的测试技术;第7章讨论电磁兼容滤波、接地及屏蔽技术;第8章讨论印制电路板PCB的电磁兼容设计;第9章重点介绍电磁干扰故障诊断与解决技术。

全书的阐述都从电磁兼容技术的角度出发,所讨论的问题脉络清晰,图文并茂,内容丰富、翔实,适合电气与电子工程、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师生的教学用书,还可供从事电气和电子产品研发、设计、制造、质量管理、检测与维修等工程技术人员参考。

本书是作者在多年教学和科研积累的基础上完成的,由何宏教授任主编,张宝峰教授、王红君副教授和肖志涛博士后任副主编,参编人员有李丽、韩盛磊、韩芳芳、卢晋、宋殿友、周滢、张志宏和张华等。全书由何宏教授统稿审定。天津理工大学研究生汤璐、崔欣、李伟、贾衡天和孙虹等为本书的绘图做了大量工作,在此向他们表示衷心的感谢。

由于电磁兼容的内容所涉及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。

作 者

于天津理工大学

2008年2月

目 录

| | |
|----------------------------------|----|
| 第 1 章 电磁兼容技术概述 | 1 |
| 1.1 概 述 | 1 |
| 1.1.1 电磁干扰的危害 | 1 |
| 1.1.2 电磁兼容的含义 | 4 |
| 1.1.3 电磁干扰的三要素 | 5 |
| 1.1.4 电磁干扰(骚扰)源的分类 | 6 |
| 1.1.5 电磁干扰(骚扰)源的时间、空间、频谱特性 | 8 |
| 1.1.6 电磁兼容性分析与设计方法 | 9 |
| 1.1.7 电磁兼容性研究的基本内容 | 10 |
| 1.2 技术术语 | 11 |
| 1.2.1 一般术语 | 11 |
| 1.2.2 干扰术语 | 12 |
| 1.2.3 发射术语 | 14 |
| 1.2.4 电磁兼容性术语 | 14 |
| 1.3 发展及认证 | 17 |
| 1.3.1 电磁兼容技术的发展 | 17 |
| 1.3.2 电磁兼容技术的认证 | 19 |
| 习 题 | 23 |
| 第 2 章 电磁兼容理论基础 | 24 |
| 2.1 电磁干扰(骚扰)的数学描述方法 | 24 |
| 2.1.1 周期性函数的傅里叶变换 | 24 |
| 2.1.2 非周期性干扰信号的频谱分析 | 24 |
| 2.1.3 脉冲信号的傅里叶积分 | 26 |
| 2.1.4 脉冲信号的快速时频域转换 | 27 |
| 2.2 电路与磁路 | 28 |
| 2.2.1 电 路 | 28 |
| 2.2.2 磁 路 | 31 |
| 2.3 分贝的概念与应用 | 36 |
| 2.3.1 分贝的定义及换算关系 | 36 |
| 2.3.2 分贝的应用 | 38 |
| 习 题 | 39 |
| 第 3 章 干扰耦合机理 | 40 |
| 3.1 传导耦合 | 40 |
| 3.1.1 电容性耦合 | 40 |

| | | |
|--------------|-------------------------|----|
| 3.1.2 | 电感性耦合 | 46 |
| 3.1.3 | 电容性耦合与电感性耦合的综合考虑 | 52 |
| 3.2 | 高频耦合 | 55 |
| 3.2.1 | 分布参数电路的基本理论 | 55 |
| 3.2.2 | 高频线间的耦合 | 57 |
| 3.2.3 | 低频情况的耦合 | 60 |
| 3.3 | 辐射耦合 | 60 |
| 3.3.1 | 电磁辐射 | 61 |
| 3.3.2 | 近场区和远场区的特性 | 63 |
| 3.3.3 | 电磁波的极化 | 66 |
| 3.3.4 | 辐射耦合途径 | 67 |
| | 习 题 | 67 |
| 第 4 章 | 传输线及干扰分析 | 68 |
| 4.1 | 传输线的信号传输特征 | 68 |
| 4.1.1 | 传输线方程组 | 68 |
| 4.1.2 | 无限长传输线 | 69 |
| 4.1.3 | 传输线的基本参数 | 70 |
| 4.1.4 | 传输线方程的双曲线函数解 | 71 |
| 4.1.5 | 实际传输线 | 71 |
| 4.1.6 | 传输线的输入阻抗 | 71 |
| 4.1.7 | 终端开路或短路的传输线 | 72 |
| 4.2 | 双导线传输线 | 73 |
| 4.2.1 | 双导线传输线的基本假设 | 73 |
| 4.2.2 | 均匀双导线传输线的信号传输特征 | 73 |
| 4.3 | 干扰源位于传输线任意位置时沿线电压和电流的分布 | 76 |
| 4.4 | 多导线传输线 | 77 |
| 4.4.1 | 均匀介质中的无损耗多导线传输线 | 78 |
| 4.4.2 | 不均匀介质中的无损多导线传输线 | 79 |
| 4.5 | 导线间的串扰 | 82 |
| | 习 题 | 83 |
| 第 5 章 | 电磁骚扰发射测量 | 84 |
| 5.1 | 传导骚扰发射测量 | 84 |
| 5.1.1 | 测量接收机 | 85 |
| 5.1.2 | 人工电源网络 | 90 |
| 5.1.3 | 试验方法 | 91 |
| 5.2 | 辐射骚扰发射测量 | 92 |
| 5.2.1 | 开阔试验场 | 92 |
| 5.2.2 | 电波暗室 | 93 |

| | |
|------------------------|------------|
| 5.2.3 必要的试验设施 | 98 |
| 5.2.4 试验方法 | 103 |
| 5.3 用吸收钳法测量辐射功率发射 | 105 |
| 5.3.1 试验方法的提出 | 105 |
| 5.3.2 功率吸收钳 | 105 |
| 5.3.3 测量线路 | 106 |
| 5.3.4 吸收钳法测试说明 | 107 |
| 5.4 电源谐波电流发射 | 107 |
| 5.4.1 测量电路 | 107 |
| 5.4.2 测量方法 | 108 |
| 5.5 电压波动和闪烁的测试 | 109 |
| 5.5.1 电压波动测试 | 109 |
| 5.5.2 闪烁测试 | 109 |
| 习 题 | 111 |
| 第 6 章 抗扰度的测试 | 112 |
| 6.1 静电放电抗扰度试验 | 112 |
| 6.1.1 静电的产生与危害 | 112 |
| 6.1.2 试验等级 | 113 |
| 6.1.3 试验方法 | 114 |
| 6.1.4 试验配置 | 115 |
| 6.1.5 试验步骤 | 117 |
| 6.1.6 对标准的说明 | 117 |
| 6.2 电快速瞬变脉冲群抗扰度试验 | 118 |
| 6.2.1 电快速瞬变脉冲群的产生机理和危害 | 118 |
| 6.2.2 试验等级 | 119 |
| 6.2.3 试验方法 | 121 |
| 6.2.4 试验配置和布局 | 122 |
| 6.2.5 试验和步骤 | 125 |
| 6.2.6 对标准的说明 | 125 |
| 6.3 雷击浪涌抗扰度试验 | 126 |
| 6.3.1 雷击浪涌试验的提出 | 126 |
| 6.3.2 试验等级 | 127 |
| 6.3.3 试验方法 | 128 |
| 6.3.4 试验配置 | 130 |
| 6.3.5 试验步骤 | 130 |
| 6.3.6 对标准的说明 | 131 |
| 6.4 射频辐射电磁场抗扰度试验 | 132 |
| 6.4.1 射频辐射电磁场抗扰度的由来 | 132 |

| | | |
|--------------|---------------------------------|------------|
| 6.4.2 | 试验等级 | 133 |
| 6.4.3 | 试验方法 | 133 |
| 6.4.4 | 试验布置 | 136 |
| 6.4.5 | 试验步骤 | 137 |
| 6.4.6 | 试验记录 | 137 |
| 6.4.7 | 对标准的说明 | 137 |
| 6.5 | 横电磁波传输小室 GTEM | 138 |
| 6.6 | 由射频场感应所引起的传导干扰抗扰度试验 | 141 |
| 6.6.1 | 由射频场感应引起的传导干扰的由来 | 141 |
| 6.6.2 | 试验等级 | 141 |
| 6.6.3 | 试验方法 | 142 |
| 6.6.4 | 试验配置 | 143 |
| 6.6.5 | 试验步骤 | 144 |
| 6.7 | 电压跌落、短时中断和电压渐变抗扰度试验 | 145 |
| 6.7.1 | 电压跌落、短时中断和电压渐变的产生 | 145 |
| 6.7.2 | 试验仪器 | 145 |
| 6.7.3 | 试验方法 | 146 |
| 6.7.4 | 电压瞬时跌落和短时中断优先选用的试验等级及持续时间 | 147 |
| | 习 题 | 148 |
| 第 7 章 | 电磁兼容滤波、接地及屏蔽技术 | 149 |
| 7.1 | 电磁干扰滤波器 | 149 |
| 7.2 | 滤波器的分类及特性 | 150 |
| 7.2.1 | 反射式滤波器 | 150 |
| 7.2.2 | 吸收式滤波器 | 155 |
| 7.2.3 | 滤波器的安装 | 158 |
| 7.3 | 接 地 | 159 |
| 7.4 | 屏 蔽 | 165 |
| 7.5 | 设备最佳设计法 | 176 |
| | 习 题 | 177 |
| 第 8 章 | 印制电路板 PCB 的电磁兼容设计 | 178 |
| 8.1 | 电磁干扰 | 178 |
| 8.1.1 | 电磁干扰的本质 | 178 |
| 8.1.2 | 噪声耦合 | 180 |
| 8.1.3 | 印制电路板 PCB 和天线 | 181 |
| 8.1.4 | 系统级电磁干扰产生原因 | 182 |
| 8.2 | 一般设计原则 | 182 |
| 8.2.1 | 印制电路板布局 | 182 |
| 8.2.2 | 印制电路板布线 | 183 |

| | | |
|--------------|----------------------------|------------|
| 8.2.3 | 单面板和双面板几种地线的分析 | 185 |
| 8.2.4 | 多层板 | 190 |
| 8.3 | 旁路和去耦 | 193 |
| 8.3.1 | 谐振概述 | 194 |
| 8.3.2 | 物理特性 | 195 |
| 8.3.3 | 并联电容器 | 198 |
| 8.3.4 | 引线长度电感 | 199 |
| 8.3.5 | 去耦电容的选择 | 200 |
| 8.3.6 | 大电容的选择 | 201 |
| 8.4 | PCB 中的抗串扰设计 | 203 |
| | 习 题 | 205 |
| 第 9 章 | 电磁干扰故障诊断与解决方法 | 206 |
| 9.1 | 故障诊断前的准备工作 | 206 |
| 9.2 | 深刻理解 dB | 211 |
| 9.3 | 传导骚扰、辐射骚扰发射的定性观察法 | 212 |
| 9.4 | 常见故障的解决方法 | 214 |
| 9.4.1 | 辐射发射超标 | 214 |
| 9.4.2 | 传导发射超标 | 215 |
| 9.4.3 | 抗静电干扰不合格 | 216 |
| 9.4.4 | 抗脉冲群干扰不合格 | 218 |
| 9.4.5 | 抗浪涌干扰不合格 | 218 |
| 9.4.6 | 抗射频辐射电磁场干扰不合格 | 218 |
| 9.4.7 | 由射频场感应所引起的传导干扰抗扰度不合格 | 219 |
| 9.5 | EMC Scanner 电磁辐射测试软件 | 219 |
| | 习 题 | 221 |
| 附录 A | 电磁兼容国家标准 | 222 |
| 附录 B | 部分电磁兼容国际标准 | 229 |
| 附录 C | 电磁兼容认证的有关文件 | 234 |
| 附录 D | 电磁干扰(骚扰)源的频谱 | 244 |
| 参考文献 | | 247 |

第 1 章 电磁兼容技术概述

1.1 概 述

随着现代科学技术的发展,电气及电子设备的数量及种类不断增加,使电磁环境日益复杂。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骚扰,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。

电磁兼容性 EMC(Electromagnetic Compatibility)在国家军用标准 GJB 72—85《电磁干扰和电磁兼容性名词术语》第 5.10 条中定义为:“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导致或遭受不允许的降级;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降级。”由此可见,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及电子系统、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及电子设备,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。因此,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包括航天、军工、电力、通信、交通、计算机及医疗卫生部门都必须解决电磁兼容问题。

1.1.1 电磁干扰的危害

在人们的日常生活中,电磁兼容效应普遍存在,形式各异。如果电磁兼容效应严重,则会导致严重的故障或事故,同时对人体的健康也有影响。

1. 电磁干扰对设备的危害

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,这些设备在运转的同时,往往要产生一些有用或无用的电磁能量,这些能量会影响其他设备或系统的工作,这就是电磁干扰。有人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 5 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,每年都造成数亿美元的经济损失。例如,寻呼机(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 RTCA(Radio Technical Commission for Aeronautics)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,致使导航系统的指示偏离 10° 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,酿成惨剧。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。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,绝大部分在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—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。

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。

1961 年秋,一系列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影响。

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,在相互绝缘的弹头与弹体结构之间出现了静电放电,所产生的干扰脉冲破坏了计算机的正常工作而造成的。

1964 年在肯尼迪航天中心——卡纳维拉尔角发射场,德尔它(Delta)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,肯尼迪航天中心——卡纳维拉尔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名技术员戴着皮手套偶然摩擦发动机吸管的塑料隔板,致使发动机点火电爆管引线上感应静电荷而引起的。

1967 年大力神 III C 运载火箭的 C—10 火箭在起飞后 95 s,飞行高度为 26 km 时,制导计算机发生故障。C—14 火箭起飞后 76 s,飞行高度为 17 km 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。

1969 年 11 月 14 日上午,土星 V—阿波罗 12 火箭一载人飞船发射后,飞行正常。起飞后

36.5 s,飞行高度为1 920 m时,火箭遭到雷击。起飞后52 s,飞行高度为4 300 m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发动机喷出的火焰所形成的导体(火箭与飞船共长100 m,火焰折合导电长度约200 m)在飞行中使云层至地面之间以及云层至云层之间诱发了雷电所造成的。

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,一般只要有人的地方,都存在着电磁场,因而给人类生存的环境带来电磁污染,而长期受到电磁辐射将会影响人体健康。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、晶状体混浊及心电图改变等症状。由于电磁骚扰的频谱很宽,可以覆盖0~40 GHz的频率范围,因此电磁波辐射继水源、大气和噪声污染之后成为第四大环境污染源,目前正在引起人们极大的关注。

电磁污染源很广泛,它就在人们生活的周围,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。

计算机等的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,尤其是对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 h的孕妇,在妊娠3个月内流产的可能性是通常情况下的2倍。

当今世界移动通信发展迅速。我国移动电话用户在1999年底就已达到4 300万,将超过美国和日本,成为世界上移动电话用户最多的国家。到2010年,我国移动电话用户将达到2亿。用户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。

移动电话和无绳电话对人体的危害及其防范措施是人们最关注的,同时也是国际上最热点的问题,因为它们的天线直接对着人的脑部辐射电磁波。更为严重的是,人们都习惯于将移动电话紧紧贴着耳朵讲话,20%以上的辐射功率都被脑部吸收。关于移动电话辐射对人体的影响,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范围可达 $100\sim 300\ \mu\text{W}/\text{cm}^2$ (我国规定卫生标准为 $50\ \mu\text{W}/\text{cm}^2$)。当移动电话收发信号时,头部受到电磁波的辐射,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移

移动电话,工作效率大增,可3年后他的头部发现癌瘤,从CT确诊的癌瘤部位恰好位于移动电话天线顶端习惯放置的部位。一位美国商人在使用移动电话4年后,同样也发现了头部癌瘤,经治疗无效死亡。

据纽约时报报道,美国研究人员赖·亨利博士不久前在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 min低能量辐射——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;可以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。

1.1.2 电磁兼容的含义

电磁兼容性 EMC(Electromagnetic Compatibility)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,电磁兼容性指电子线路、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 GJB 72—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是:“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,还要求其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是:“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、有限的时间及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数学、电磁场理论、电路基础及信号分析等学科与技术,其应用范围又几乎涉及所有用电领域。由于其理论基础宽,工程实践综合性强,物理现象复杂,所以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,所面对的研究对象(主要指电磁噪声)无论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如文献[2]。在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。

1.1.3 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、传输途径和敏感设备。

1. 电磁骚扰源

电磁骚扰(electromagnetic disturbance)的定义是:“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。”(GB/T 4365—1995)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)的定义是:“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。”(GB/T 4365—1995)例如,电气设备运行中经常产生的放电噪声、浪涌噪声和振荡噪声等不带任何有用信息。无用信号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,它们就是无用信号,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。”(GB/T 4365—1995)“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“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,亦即电磁敏感度越大,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。这些都是在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。

1.1.4 电磁干扰(骚扰)源的分类

电磁干扰源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(如图1-1所示),等等。这里主要讨论自然干扰(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 |

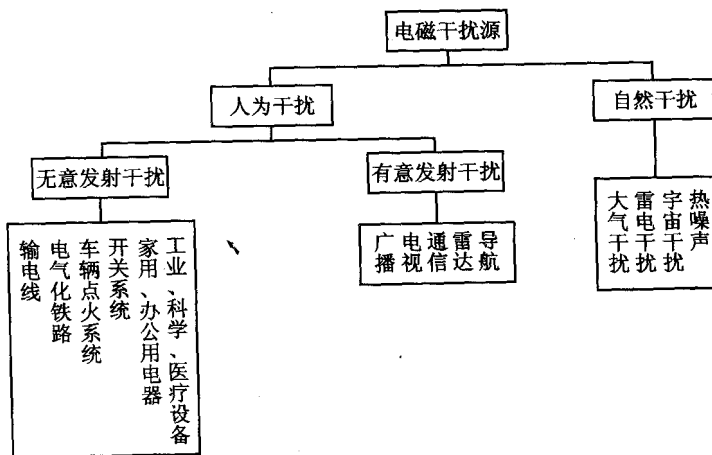


图 1-1 电磁干扰源的分类

1. 自然干扰(骚扰)源

自然电磁干扰源存在于地球和宇宙,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,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

人为干扰分别来自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、雷达及导航等发射设备,是通过向空间发射有用信号的电磁能量来工作的;而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,并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、高压电力线以及工业、科学和医用的设备、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律的,一般占有非常宽的频带或离散频谱,所发射的功率量级可从 pW(皮瓦)到 MW(兆瓦)。

任何电气及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、电磁开关及继电器等。
- 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、电动搅拌机及牙科医疗器械等。
- 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、高频加热器及高频电焊机等。
- 高频医疗设备,例如甚高频或超高频理疗装置、高频手术刀、电测仪及 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、电磁阀及接触器等。
- 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 电源及高频开关电源等。
- 电力传输设备,例如高压电力传输线、高压断路器及变压器等。
- 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、电压调节器及电刷等。

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

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 0 Hz 到几十 kHz、几 MHz,甚至几 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 MW 级的。表 1-2 列出了经常遇到的一些干扰源的频谱范围。

表 1-2 常遇干扰源的频谱范围

| 源 | 频 谱 | 源 | 频 谱 |
|----------------|--------------------|------------------|-------------------|
| 地磁测向 | <3 Hz | 雷电放电 | 几 Hz~几百 MHz |
| 探测烧焦的金属 | 3~30 Hz | 电视 | 30 MHz~3 GHz |
| 直流或工频输电 | 0 Hz 或 50 Hz/60 Hz | 移动通信 (包括移动电话) | 30 MHz~3 GHz |
| 无线电灯塔 气象预报站 | 30~300 kHz | 微波炉 | 300 MHz~3 GHz |
| 电动机 | 10~400 kHz | 核脉冲 | 高达 GHz |
| 照明(荧光灯) | 0.1~3.0 MHz | 海上导航 | 10 kHz~10 GHz |
| 电晕放电 | 0.1~10 MHz | 工、科、医用 高频设备 | 几十 kHz~ 几十 GHz |
| 直流电源开关电路 | 100 kHz~30 MHz | 无线电定位 | 1~100 GHz |
| 广播 | 150 kHz~100 MHz | 空间导航卫星 | 1~300 GHz |
| 电源开关设备 | 100 kHz~300 MHz | 先进的通信和 遥测系统 | 30~300 GHz |

1.1.5 电磁干扰(骚扰)源的时间、空间、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,须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。周期性干扰指在确定的时间间隔内能重复出现的干扰。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,其变化特性也是没有规律的,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,可分为窄带干扰和宽带干扰。一般而言,窄带干扰的带宽只有几十 Hz,最宽也只有几百 kHz。而宽带