



国防特色教材·信息与通信技术

电磁兼容原理与技术

吴群 傅佳辉 孟繁义 编著

Principles and Techniques of
Electromagnetic Compatibility



哈尔滨工业大学出版社

北京航空航天大学出版社 北京理工大学出版社
哈尔滨工程大学出版社 西北工业大学出版社



国防特色教材·信息与通信技术

电磁兼容原理与技术

吴 群 傅佳辉 孟繁义 编著

哈尔滨工业大学出版社

北京航空航天大学出版社 北京理工大学出版社
哈尔滨工程大学出版社 西北工业大学出版社

内容简介

本书是“十一五”国防特色规划教材。

本书主要内容包括:绪论,电磁兼容技术,滤波技术,接地技术,屏蔽技术,计算机系统的电磁兼容性,电磁辐射的危害及防护,电磁兼容分析与设计方法,电磁兼容测试技术和系统级电磁兼容仿真分析与预测技术等。

本书应在学习过电路分析基础、信号与系统、模拟电路基础、电磁场与电磁波、微波技术与天线等基础课程后进行学习。

本书可作为电子、信息、通信和控制工程等专业本科生或研究生选修课教材。也可作为从事电磁兼容设计、射频与无线通信领域的工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电磁兼容原理与技术/吴群,傅佳辉,孟繁义编著.—哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2009.12

“十一五”国防特色规划教材

ISBN 978-7-5603-2977-2

I. ①电… II. ①吴… III. ①电磁兼容性 IV. ①TN03

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 225247 号

电磁兼容原理与技术

吴群 傅佳辉 孟繁义 编著

责任编辑 王超龙 费佳明

*

哈尔滨工业大学出版社出版发行

哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号(150006) 发行部电话:0451-86418760 传真:0451-86414749

<http://hitpress.hit.edu.cn>

哈尔滨工业大学印刷厂印装 各地书店经销

*

开本:787×960 1/16 印张:13.75 字数:294 千字

2010 年 6 月第 1 版 2010 年 6 月第 1 次印刷 印数:3 000 册

ISBN 978-7-5603-2977-2 定价:33.00 元

前 言

电磁兼容(Electromagnetic Compatibility, EMC)是一门新兴的综合性交叉学科,它研究的对象涉及电子、计算机、通信、航空航天、电力、军事等领域,研究内容涵盖生活的各个方面。当前,电磁环境日趋复杂,电磁干扰及电磁防护问题日益突出,因此,电磁兼容的原理与技术成为当今从事电子、信息和通信等领域的技术人员必须掌握的基本知识。

本书深入浅出地介绍了电磁兼容原理及技术。全书共分10章:第1章为绪论,介绍电磁兼容的基本概念,电磁兼容性技术发展历史,电磁干扰的三要素;第2章讲述电磁兼容常用名词术语,电磁兼容的研究任务,电磁兼容技术的认证,电磁兼容问题的模型描述;第3章介绍滤波技术,包括滤波器的主要性能指标、滤波器分类和滤波器的设计;第4章讲述接地技术,包括接地干扰与抑制措施、搭接技术和信号接地技术;第5章介绍屏蔽技术,包括电屏蔽、磁屏蔽、电磁屏蔽、屏蔽材料与性能、屏蔽效能计算;第6章针对计算机的电磁兼容性,讲述计算机系统的抗干扰设计、单片机系统的抗干扰设计、PCB板高速数字电路的信号完整性;第7章介绍电磁辐射的危害及防护技术,包括电磁辐射对人体的危害机理、电磁辐射对军械系统电爆装置的危害、电磁辐射对元器件和设备的危害、电磁辐射的防护,进而分析了武器装备的电磁环境的发展方向;第8章讲述电磁兼容预测步骤、系统法分析流程、电磁兼容技术支持系统;第9章讲述电磁兼容测试的目的与方法、测试仪器与设施;第10章针对系统级电磁兼容仿真与预测技术,以典型的EMC-Analyzer仿真工具为例,重点介绍了该软件的功能、特点及其应用实例。

本书是在作者多年来从事电磁兼容教学和科研工作积累总结的基础上完成的,尽可能多地反映了当今国内外电磁兼容研究的最新成果,进而形成系统而全面的理论体系。本书在注重基础性和实用性的同时,突出了国防应用特色,体现了理论与工程实践的紧密结合的特点。

本书由吴群教授主编。第1章、第2章、第6章、第8章和第10章由吴群编写,第4章、第5章和第7章由边莉编写,第3章由孟繁义编写,第9章由傅佳辉编

写。参加本书编写工作的人员还有杨国辉、张狂、张少卿、张谅、王玥、宋立众、陈春雨等。

本书编者感谢哈尔滨工业大学微波工程系电磁场与无线技术专业全体教师在此教材编写中所给以的建议和指导,也感谢电磁场与微波技术学科全体博士生在教材选材、软件仿真及文稿绘图方面做出的帮助。特别感谢北京天源博通科技有限公司(www.tianyuantech.com)的王湃博士在本教材编写过程中所给予的技术支持。

由于电磁兼容所涉及的技术领域和服务对象范围广,相关的理论与技术发展迅速,加之作者的水平有限,难免存在不妥之处,敬请读者批评指正。

编者
2010年1月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 电磁兼容概述	1
1.2 电磁干扰的三要素	5
1.3 电磁兼容技术的发展历史	10
习题	12
第 2 章 电磁兼容基本原理	13
2.1 电磁兼容的研究任务	13
2.2 电磁兼容的认证	14
2.3 电磁兼容常用名词和术语	16
2.4 电磁兼容的标准及其内涵	24
习题	25
第 3 章 滤波技术	26
3.1 滤波器的主要性能指标	26
3.2 滤波器分类	27
3.3 滤波器的设计	33
3.3.1 滤波器的衰减函数与逼近	34
3.3.2 无源滤波器综合	38
3.3.3 频率变换	44
3.3.4 有源滤波器综合	46
习题	51
第 4 章 接地技术	52
4.1 接地原理及其分类	52
4.1.1 接地的概念	53
4.1.2 接地的分类	54
4.1.3 接地的注意事项	54
4.2 安全接地	55
4.2.1 设备安全接地	55
4.2.2 接零保护接地	56

4.2.3	防雷接地	57
4.3	电磁兼容的系统接地	57
4.3.1	系统接地网络	58
4.3.2	单点接地	58
4.3.3	多点接地	58
4.3.4	混合接地	59
4.3.5	浮动接地	60
4.4	屏蔽体的接地	61
4.4.1	放大器屏蔽盒的接地	61
4.4.2	电缆屏蔽层的接地	61
4.4.3	电缆屏蔽层的一端接地与两端接地	64
4.5	搭接技术	66
4.5.1	搭接的概念	66
4.5.2	搭接的方法及一般准则	66
4.5.3	搭接的测试方法	68
4.6	设计实例	69
	习题	69
第5章	屏蔽技术	70
5.1	屏蔽的基本原理	70
5.1.1	屏蔽	70
5.1.2	场域划分	71
5.1.3	波阻抗和能量密度	72
5.2	屏蔽的分类	74
5.2.1	地磁屏蔽	74
5.2.2	磁场屏蔽	75
5.2.3	电磁场屏蔽	77
5.3	屏蔽效能评价	82
5.3.1	屏蔽效能的表示	82
5.3.2	屏蔽效能的计算方法	83
5.4	屏蔽材料	90
5.4.1	金属屏蔽	90
5.4.2	屏蔽材料选择	91
5.4.3	屏蔽材料的类别	92

习题	100
第 6 章 计算机系统的电磁兼容技术	101
6.1 计算机系统电磁兼容性的特点	101
6.2 计算机的电磁泄露与防护	102
6.2.1 TEMPEST 技术	103
6.2.2 TEMPEST 泄漏的防护	104
6.3 计算机系统的电磁兼容设计	106
6.3.1 数字集成电路的电磁兼容设计	106
6.3.2 接口电路的电磁兼容设计	106
6.3.3 动态 RAM 的电磁兼容设计	108
6.3.4 总线的电磁兼容设计	108
6.3.5 计算机传输通道的电磁兼容设计	109
6.3.6 计算机接地系统的电磁兼容设计	110
6.4 单片机应用系统的电磁兼容设计	111
6.5 高速数字信号 PCB 电磁兼容设计	115
6.5.1 信号完整性的含义	115
6.5.2 传输线理论	116
6.5.3 反射	119
6.5.4 串扰	120
6.5.5 同步噪声开关	120
6.5.6 终端匹配技术	121
6.5.7 高速 PCB 电磁兼容研究方法	123
习题	125
第 7 章 电磁辐射的危害及防护	126
7.1 电磁辐射的产生及分类	126
7.1.1 电磁辐射的产生	126
7.1.2 电磁辐射的分类	126
7.2 电磁辐射对人体的影响	127
7.2.1 电磁辐射对人体作用机理	127
7.2.2 电磁辐射对人体的危害	130
7.2.3 电磁辐射对人体危害的预防措施	132
7.3 电磁辐射对移动通信系统的影响研究	132
7.4 武器装备的电磁环境	136

7.4.1	电磁环境与电磁环境效应	136
7.4.2	电磁环境的作用机理及其效应	137
7.4.3	电磁环境对装备和战争的影响	138
7.4.4	复杂电磁环境中信息化战争	140
7.4.5	电磁环境效应对导弹武器系统的影响	142
	习题	143
第 8 章	电磁兼容分析与设计方法	144
8.1	电磁兼容分析方法	144
8.2	系统法电磁兼容设计流程	145
8.3	电磁兼容的预测方法	149
8.3.1	电磁兼容预测模型	151
8.3.2	电磁兼容预测分析步骤和方法	153
8.4	电磁兼容技术支持系统	154
8.4.1	电磁兼容技术支持系统构成原理	155
8.4.2	子系统设计	156
8.4.3	流程化分析的设计方法	159
8.5	军用装备研制与生产的电磁兼容实施	162
8.5.1	电磁兼容是可靠性的要求	162
8.5.2	军用装备生产电磁兼容实施步骤	163
	习题	165
第 9 章	电磁兼容性测试技术	166
9.1	电磁兼容测试目的	166
9.2	电磁兼容测试常用仪器	167
9.2.1	时域分析仪(示波器)	168
9.2.2	频域分析仪	168
9.3	电磁兼容测量设施	169
9.3.1	开阔场地	170
9.3.2	电波暗室	170
9.3.3	横电磁波小室	171
9.3.4	混响室	172
9.3.5	吉赫兹横电磁波小室	173
9.4	电磁兼容测试天线	174
9.4.1	电磁兼容测试天线的特点	174

9.4.2 各种天线简介	175
9.5 屏蔽效能测试方法	178
9.5.1 MIL—STD—285 测试法	178
9.5.2 同轴支架法	179
9.5.3 双 TEM 小室法	179
9.5.4 时域法	180
9.6 测量单位及换算关系	182
9.6.1 功率	182
9.6.2 电压	183
9.6.3 电流	184
9.6.4 功率密度	184
9.6.5 电场强度、磁场强度	184
习题	185
第 10 章 系统级电磁兼容仿真分析与预测技术	186
10.1 EMC - A 电磁兼容预测软件	187
10.2 EMC - A 的应用领域	187
10.3 EMC - A 的编写思想	188
10.4 EMC - A 的主要功能	192
10.5 EMC - A 的基本术语和定义	194
10.6 EMC - A 的典型应用	196
习题	199
附录	200
附录 1 国家军用 EMC 标准简介	200
附录 2 美国军用 EMC 标准(MIL)、规范和手册简介	201
附录 3 S11,回波损耗,反射系数,电压驻波比参数的意义与关系	204
参考文献	207

第 1 章 绪 论

1.1 电磁兼容概述

当前人类社会已进入信息化时代,人类的生存环境也已具有浓厚的电磁环境内涵。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、电子、通信、计算机与家电设备大量进入家庭,空间人为电磁能量每年增长 7% ~ 14%,也就是说 25 年后环境电磁能量密度最高可增加 26 倍,50 年增加 700 倍。显然,进入 21 世纪,日益恶化的电磁环境是必须解决的首要问题。如何在这种复杂电磁环境中减少相互间的电磁干扰,使得各种电子设备正常运转,成为亟待解决的问题。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学科。

作为一门综合学科,其研究对象不仅仅局限于电气电子设备,而是拓宽到自然干扰源、核电脉冲、静电放电、雷电防护、频谱管理工程、电磁辐射对人体的生态效应、信息处理设备的电磁泄漏、地震电磁现象预测等领域,因此现代工业,如航天航空、舰船、武器系统及测量设备、电力、交通、通信、计算机、医疗卫生等部门都面临大量的电磁兼容问题。

现代电子设备与当今日趋复杂的电磁环境已构成一对难舍难分的孪生兄弟。电子设备现代化程度越高,其所造成的电磁环境便越复杂;反之,复杂的电磁环境又对电子设备提出更为苛刻的要求。电磁兼容已成为国内外颇为瞩目的发展迅速的学科。

1. 电磁干扰的危害

电磁干扰按其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。电磁干扰会破坏或降低电子设备的工作性能,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航线 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。这也是为什么乘坐飞机在起飞和降落期间要限制乘客在机舱内使用移动电话、游戏机、便携式计算机和调频收音机等设备,以免骚扰飞机正常的导航及通信系统。

电磁波的辐射还会造成国家政治、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。

2. 电磁干扰灾难性后果的典型事例

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。北京国家气象局在 1992 年

曾遭受雷电击中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,在雷灾事故中,受损的绝大部分设备是电视、电话、监测系统和信息电子设备等高科技产品。

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,前两发均失败。这两发导弹的故障现象相似,都是制导计算机系统受到瞬时电磁脉冲干扰而失灵。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程序的正常工作。

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。分析结果表明,事故的原因是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,事故的原因是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。

1967年大力神ⅢC 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,土星 V-阿波罗 12 火箭载人飞船发射后,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及火箭发动机火焰所形成的导体(火箭与飞船总长度为 100 m,火焰折合导电长度约 200 m)在飞行中使云层与地面之间及云层与云层之间人为地诱发了雷电所造成的。

从上述事例可以清楚地看到,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。

3. 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。长时间受到高强度的电磁辐射将会影响人体健康并造成生物电磁污染。当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。

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,只不过是污染程度有强弱之分。计算机的电磁污染首当其冲,是因为人们必须与它面对面地操作,它被渗透到各个应用领域,而且长时接触。由于电磁骚扰的频谱覆盖很宽,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,正在引起人们极大的关注。

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,同时也是国际上生物电磁效应的最热点研究问题,因为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,世界各国都在积极研究并采取相应措施降低危害。

利用电磁场对人体的有害影响,人们发明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出几个数量级,如果将这种波束能量加以会聚,就可能研制出直接杀伤敌人的电磁武器。利用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,人员直接遭到这种波束的“闪击”,会造成神经细胞的功能紊乱,出现神经错乱、晕头转向等现象,造成心房颤动或心力衰竭,引起心脏病,甚至使心脏和呼吸功能停止,危及生命。

4. 电磁兼容学科的研究内容

电磁兼容的研究是围绕构成电磁干扰的三要素(电磁干扰源、干扰耦合途径和敏感设备)进行的,其研究内容包括:电磁干扰产生的机理、电磁骚扰源的发射特性以及如何抑制电磁骚扰源的发射;电磁干扰以何种方式通过什么途径耦合(或传输)以及如何切断电磁干扰的传输途径;敏感设备对电磁骚扰产生何种响应以及如何提高敏感设备的抗干扰能力。

电磁兼容一词对应的是英文 Electromagnetic Compatibility,简称 EMC,对于设备或系统的指标来说,直译为“电磁兼容性”,但作为一门学科来说,应该译为“电磁兼容”。电磁兼容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。

按照国际电工技术委员会(IEC)给出的定义,电磁兼容是指一个设备在电磁环境中能满意地完成其功能而又不对环境(包括其他设备)造成不允许的干扰的能力。随着通信、计算机、控制系统及其他电气和电子设备的高速发展,使用的频谱日益扩展,各种电子设备的利用已经渗透到人们生活的各个方面,使得系统内和系统间的电磁干扰(EMI)问题变得越来越严重,需要设立专门的学科和管理机构研究当前电磁干扰问题。电磁兼容所涉及的研究课题很多,包括各种干扰源的特性和形成的原因,系统内和系统间干扰的分析、预测、抑制和防护,系统性能的测量方法和设备以及防信息泄漏和信息截获等。

典型的电磁兼容问题包括以下 8 点:

①军用电子系统中防核爆炸产生的电磁脉冲(EMP),电子对抗以及微波定向能武器都是电磁兼容的研究范围。

②现代计算机系统的计算速度越来越高,计算机主机及其各种外围设备的高频电磁辐射能够在距离计算机站的一定距离处检测到,若将检测到的信号送进另一终端,则可显示远距离计算机显示屏上正在显示的内容。因此计算机信息的保密,即如何防护计算机的信息泄漏以及如何截获计算机的信息是电磁兼容的重要研究课题。

③共场地通信系统相互间的干扰。在飞机、船舶上和移动通信中心站通常都有多台发射和接收设备,它们之间虽然工作频率不同,但由于邻近信道和其他非线性原因产生的频率使它们之间可能存在相互干扰,如何使共场地的通信系统能正常工作是电磁兼容要解决的问题。

④静电放电问题在许多方面已成为电磁兼容性的重要课题。例如在微波集成电路芯片加工期间造成的干扰,静电放电对航空器和汽车造成的干扰等。

⑤频谱资源的保护和利用也涉及电磁兼容的问题。为了使有限的频谱资源得到合理和有序利用,成立了最关键的两个国际机构组织——国际电信联盟(ITU)和国际电工技术委员会(IEC)。各国也成立了国家级的频谱管理机构,但是由于合法和非法的用户不断膨胀,频率资源使用不合理而造成了许多射频干扰问题。

⑥各类电气和电子系统的研制必须解决电磁兼容问题,因为各种电磁干扰造成的电气和电子系统的误动作,可能引起严重的故障,造成重大的损失。

⑦高速数字电路印刷电路板(PCB)抗电磁干扰布线设计。PCB设计的体积减小导致电路的布局布线密度变大,而同时信号的频率还在提高,从而使得如何处理高速信号问题成为一个设计能否成功的关键因素。随着电子系统中逻辑和系统时钟频率的迅速提高和信号边沿不断变陡,印刷电路板的线迹互连和板层特性对系统电气性能的影响也越重要,这就迫切要求在制版之前对电路板的电磁兼容进行有效的分析与预测。

⑧电磁兼容人工智能与专家设计系统。电磁兼容虽然发展迅速,在解决实际问题中也积累了许多经验,但尚未形成系统的理论,大量的资料分散在相关的刊物、会议录、各种标准文件、专题著作和解决电磁兼容案例的分析报告中。电磁兼容问题中有许多是电磁场的问题,为了能够实现自动化分析、预测、设计与仿真,利用计算机数据库建立电磁兼容智能专家设计系统,形成高效的、系统的、全面的分析方法和问题解决方法。

因此,概括起来,电磁兼容学科主要研究方向包括:

①电磁干扰源及耦合途径的理论研究。

②电磁频谱利用和管理。

③电磁兼容工程分析及控制技术(屏蔽、接地、滤波、PCB等)。

④电磁兼容设计与预测技术。

⑤电磁兼容测量技术。

- ⑥电磁兼容的标准。
- ⑦信息泄漏与防护技术(Tempest、红信号)。
- ⑧环境电磁脉冲及防护(雷电等)。
- ⑨生物电磁效应。

电磁兼容学科研究的范围不断扩大,涉及的专业越来越多,目前一些电磁兼容学者又进一步探讨电磁污染、电磁环境对人类及生物的危害和影响、地球电磁、地震电磁学、太阳及宇宙电磁等。电磁兼容学科范围已不仅局限于设备与设备、系统与系统之间的问题,因此一些学者也将电磁兼容这一学科称为“环境电磁学”。

1.2 电磁干扰的三要素

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,而不至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,并不至引起性能降级的一门学科。

EMC 属于一个涉及多种学科综合性边缘交叉的科学领域,目前已发展成为一门新兴独立的电磁兼容学科,其核心仍然是电磁场与电磁波,它的理论基础涉及数字技术、无线电电子学、微电子学、电磁场理论、电路理论、微波理论与技术、天线与电波传播、通信理论、材料学、机械工艺学、计算机与控制理论、核物理学、生物医学以及法律学与社会学等内容,其应用范围几乎涉及所有用电领域。一些新技术领域还会对 EMC 提出新的挑战,比如新材料、新器件、生物工程、数字成像技术、新能源、高密度数据存储、计算机技术及其应用、神经网络、自适应过程控制、人工智能(AI)及模糊逻辑控制等。由于其理论知识面宽、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,我们所面对的研究对象(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,人们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。

电磁兼容核心研究的主要内容是围绕着构成干扰的三要素进行的,即电磁干扰源、耦合途径(耦合路径)和敏感设备。具体描述如下:

(1)电磁干扰源

电磁干扰源是指产生电磁干扰的元件、器件、设备或自然现象。分为自然产生的和人为造成的两类,典型的自然干扰源包括以下两种。

①大气中雷电干扰源。大气中产生的雷电过程造成的电磁干扰表现为三种形式:

a. 对任何导体例如架空电力线的直接放电。放电产生一个大的电脉冲通过整个电力线系统,放电电压超过 200 kV,这么高的电压不仅使该系统靠近放电处的那部分受到破坏,而且通过地的放电电流可能耦合到附近的任何电缆系统。

b. 与带电的雷暴云有关。在地表处总存在一个量级为 1 ~ 10 kV/m 的电场。当有闪电的时候,在放电区域这个场附近的导体上将引起感生的瞬变过程而形成干扰源。

c. 沿放电通道电流的急剧变化将产生宽带的高频辐射,频率可达 100 MHz 以上,这种辐射是造成大气噪声的主要原因。

闪电是一个宽带的冲击性的潜在干扰源,其频谱是连续的(从几 Hz 到 100 MHz 以上),能传播较远的距离,对电话、电力线系统、飞机和大范围的计算机网络都构成威胁。

②宇宙干扰源。宇宙干扰源是来自外层空间的干扰噪声,频率从几百 MHz 到 30 GHz。太阳的辐射引起电离层的变化对短波和卫星通信造成影响。

人为造成的干扰源可分为有意的和无意的两种,有意的人为造成的干扰源是为了某种目的使对方的电子系统不能正常工作而专门发射的干扰,因此形成了专门研究如何制造干扰和抗干扰的称为电子对抗的技术课题。无意的人为造成的干扰源则包括各种电气和电子子系统,其中有些子系统本身就是专为辐射电磁能而设计的,诸如电视、无线电通信、传呼机手机基站天线、导航和雷达等系统,它们的有用辐射有可能对其他子系统造成干扰,而更为严重的是伴随其有用辐射而产生的寄生辐射形成的干扰。另一种子系统是其工作时附带产生的电磁辐射,例如汽车点火装置、高频加热炉、计算机、高压电力线、各种照明装置、各种用电设备和各种医疗设备等。

(2)耦合途径

耦合途径是指把能量从干扰源耦合到敏感设备上并使该设备产生响应的媒介和通道,又称为传输途径或耦合通道。干扰的耦合途径有两条: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干扰以电磁波形式的发射规律以及在近场条件下的电磁耦合。传导发射是研究传输线上分布参数和电流的传输方式对噪声传输的影响。

(3)敏感设备

敏感设备是指受到电磁干扰产生响应的设备,又称为接收器。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度阈值越低,即对电磁干扰越灵敏,电磁敏感度就越大,抗干扰能力就越差,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。通常,采用不同的结构和选用不同的元器件都将影响设备的抗干扰能力。这些都是设备或系统的设计阶段必须要考虑的。

所有电磁干扰都是由上述三个因素组合而产生的,因此把它们称为电磁干扰三要素。

由电磁干扰源发出的电磁能量,经过某种耦合通道传输到敏感设备,导致敏感设备出现某种形式的响应并产生效果。当电磁干扰超过敏感设备的敏感度时,就会产生电磁干扰,这一作用过程及其效果,称为电磁干扰效应,其作用机理如图 1.1 所示。

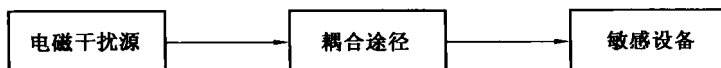


图 1.1 电磁干扰效应的作用机理

电磁活动产生电磁干扰的方式和途径不一,其中电磁辐射、传导是产生电磁干扰的主要电磁活动方式或途径;而有的电磁干扰既以辐射方式也以传导方式传播。

为了分析研究电磁干扰的性质、影响等,必须确定电磁干扰的空间、时间、频率、能量、信号形式等特性。因此通常采用以下参数进行电磁干扰描述:频率范围、频带宽度、频谱幅度或电平幅度、干扰波形、出现率、极化特性、方向特性等,这些特性与电磁干扰三要素密切相关。

电磁干扰如果存在,这三个要素缺一不可,因此,只要消除其中任何一个要素,电磁干扰问题也就得到了解决,如图 1.2 所示。作为电磁兼容设计的主要任务就是决定哪一个是最容易消除掉的。以产品设计为例,电磁兼容性要求有两方面:降低辐射或传导的电磁能量、降低进入封装内的电磁能量或降低对进入封装能量的敏感,两者都与辐射和传导有关系。

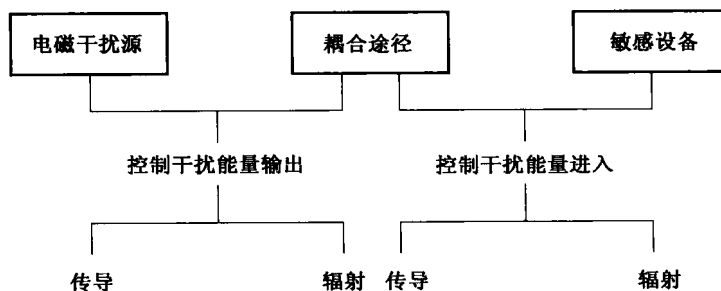


图 1.2 基于三要素的电磁干扰控制

通常,辐射发射模式是指两个隔离的设备、子系统或系统间的相互干扰直接通过辐射场的耦合完成,而传导发射模式是指干扰源和接受器之间通过电流流动引起的干扰模式。图 1.3 表示了各种干扰源可能的传播途径。图中第 1 种途径是干扰源和接受器之间通过传导发射模式,第 2 种途径是干扰源和接受器之间通过辐射发射模式,第 3 种途径是干扰源产生的干扰先