

高等学校“学历教育合训”系列教材

电磁兼容基础

Electromagnetic Compatibility Fundamentals

刘培国 侯冬云 编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

清华大学“卓越工程师教育培养计划”重点教材

电磁兼容基础

Electromagnetic Compatibility Fundamentals

王兆成 王宇 编

清华大学出版社

www.tup.tsinghua.edu.cn

TN03/38

2008

高等学校“学历教育合训”系列教材

电磁兼容基础

Electromagnetic Compatibility Fundamentals

刘培国 侯冬云 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书从电磁兼容基本概念切入,介绍了电磁兼容的基本概念、发展历史、常用术语以及电磁兼容标准;在电磁兼容的电磁原理中,介绍相关的电磁基本原理,电磁辐射与散射,传导耦合以及瞬态干扰;阐述了电磁兼容预测技术,包括干扰源、敏感源以及耦合途径的数学模型,预测流程和步骤,以及相关的电磁兼容预测软件;介绍电磁兼容工程方法,主要包括接地、搭接、屏蔽和滤波的基本方法和具体应用;电磁兼容的应用,包括PCB电路板设计、生物电磁效应以及电磁辐射防护;频谱管理与频率指配,包括频率的划分与使用,频率的指配技术、方法以及指配效果评估;电磁兼容测量方法、电磁兼容测量场地与设备以及电磁兼容测量的实施等。

本书内容简明,便于自学。可作为电气、电子工程专业的基础教材,也可供从事电子技术工作的工程技术人员学习参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

电磁兼容基础/刘培国,侯冬云编著. —北京:电子工业出版社,2008.7

(高等学校“学历教育合训”系列教材)

ISBN 978-7-121-06468-5

I. 电… II. ①刘…②侯… 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 099605 号

策划编辑:陈晓莉

责任编辑:陈晓莉

印 刷:北京市海淀区四季青印刷厂

装 订:三河市万和装订厂

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本:787×1 092 1/16 印张:14.5 字数:368 千字

印 次:2008 年 7 月第 1 次印刷

印 数:4000 册 定价:24.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

前 言

电磁兼容学科是一门综合性交叉学科,与信息信号处理、电子科学与技术、通信与信息系、计算机科学与技术等许多学科相互渗透。它起源于无线电干扰问题的解决,随着信息技术的发展、扩展,成为自然科学与工程学的一个交叉学科。其核心仍然是电磁理论,但是理论基础宽、工程实践综合性强,是电力、电子、电气等专业人员必须掌握的基础知识和技术。

电磁兼容既是一门科学技术,也是一种工程方法。电磁环境的日益复杂、恶劣,处于其中的电气电子设备面临着越来越多的干扰,造成性能降低、功能丧失的概率显著增加。一方面,为了实现众多设备的兼容工作,所有产品从设计、制造到使用都必须符合电磁兼容规范和标准,实行电磁兼容认证,加强电磁兼容测试和管理。另一方面,必须对相关人员进行培训,使之掌握电磁兼容技术,增加对电磁兼容的认识,提高电磁兼容意识,熟悉电磁兼容工程方法。

本书适用于电气与电子工程专业的本科电磁兼容(EMC)课程,也可以作为对电磁兼容感兴趣的专业工程技术人员的参考书。学习本教材前需要预修几门本科电气与电子工程专业的基础课程:电路、信号与系统、电磁场与微波技术等。

全书共分7章,第1章是电磁兼容概述,第2章分析了电磁兼容的电磁原理,第3章分析了电磁兼容预测技术,第4章分析了电磁兼容工程方法,第5章介绍了电磁兼容应用,第6章介绍了频谱管理与频率指配,第7章介绍了电磁兼容性测量。

本书是在国防科技大学电子科学与工程学院及电磁兼容性国防科技重点实验室的大力支持下完成的。由刘培国负责内容编排,参加编写的还有侯冬云、周东明、熊辉、覃宇建、李颖等同志,并由刘培国统编全稿。

编写过程中得到唐朝京教授的支持和鼓励,以及涂瑞斌和李贵林两位同志的帮助,何建国教授、毛钧杰教授、刘克诚教授、刘继斌副教授、李高升讲师等为本书提供了具体指导和宝贵的意见,博士生肖志文、任蒙、向道朴、刘锋,研究生卢中昊、杨利江、董霖、黄晶晶、杨阳等绘制了部分图表,在此一并表示感谢。

电磁兼容内容丰富,发展迅速,工程要求不断提高,因此本书不可能全部介绍。由于编者水平有限,书中不当和错误之处在所难免,衷心希望广大读者批评指正。

编 者

2008年5月于长沙

目 录

第 1 章 电磁兼容概述	1
1.1 电磁兼容简介	1
1.1.1 引言	1
1.1.2 电磁环境	2
1.1.3 电磁兼容发展	5
1.1.4 电磁兼容研究内容	6
1.2 电磁兼容现象	7
1.2.1 电磁兼容的重要性	7
1.2.2 电磁骚扰现象	8
1.2.3 电磁兼容事件	10
1.3 电磁兼容性的基本概念	11
1.3.1 电磁干扰三要素	11
1.3.2 电磁兼容基本概念	15
1.4 电磁兼容标准和规范	18
1.4.1 电磁兼容的标准化组织	19
1.4.2 电磁兼容标准制定与内容	21
习题与思考题	25
第 2 章 电磁兼容的电磁原理	27
2.1 电磁基本原理	27
2.1.1 麦克斯韦方程	27
2.1.2 边界条件	28
2.1.3 唯一性定理	29
2.1.4 叠加原理	29
2.1.5 镜像原理	29
2.1.6 等效原理	30
2.1.7 互易定理	32
2.2 电磁辐射	32
2.2.1 基本电振子	32
2.2.2 基本磁振子	35
2.2.3 惠更斯元	35
2.2.4 电磁散射	36
2.3 传导耦合	38
2.3.1 电路性耦合	38

2.3.2	电容性耦合	39
2.3.3	电感性耦合	41
2.3.4	传导干扰	43
2.4	瞬态场	48
2.4.1	电快速瞬变脉冲群(EFT)	49
2.4.2	雷击浪涌	49
2.4.3	静电放电(ESD)	51
	习题与思考题	52
第3章	电磁兼容预测技术	54
3.1	概述	54
3.1.1	电磁兼容性预测基本原理	54
3.1.2	电磁兼容性预测的基本方程	54
3.1.3	电磁兼容性预测数学方法概述	55
3.2	电磁兼容性预测的数学模型	57
3.2.1	干扰源模型	59
3.2.2	敏感设备模型	62
3.2.3	耦合途径模型	66
3.3	电磁兼容性预测算法	71
3.3.1	幅度筛选	72
3.3.2	频率筛选	73
3.3.3	详细分析	73
3.3.4	性能分析	74
3.4	电磁兼容性预测软件介绍	76
3.4.1	国外 EMC 预测软件	76
3.4.2	国内 EMC 预测软件	76
	习题与思考题	81
第4章	电磁兼容工程方法	83
4.1	接地	83
4.1.1	接地的含义和分类	83
4.1.2	安全接地	84
4.1.3	信号接地	86
4.1.4	地线中的干扰	88
4.1.5	减小地线干扰的措施	90
4.2	搭接	95
4.2.1	搭接的目的和分类	95
4.2.2	搭接的方法和原则	95
4.3	屏蔽	96
4.3.1	屏蔽的作用和分类	97
4.3.2	屏蔽的原理和分析	97

4.3.3 屏蔽效能和屏蔽理论	103
4.3.4 屏蔽效能的计算	106
4.3.5 几种实用的屏蔽技术	113
4.3.6 电磁屏蔽设计要点	114
4.4 滤波	115
4.4.1 滤波器的分类	115
4.4.2 滤波器的频率特性	116
4.4.3 几种常用电磁干扰滤波器的原理和构成	117
4.4.4 滤波器的选择和使用	125
习题与思考题	126
第5章 电磁兼容应用	127
5.1 电路设计中的电磁兼容性问题	127
5.2 电路设计中的电磁兼容措施	128
5.2.1 电路方案设计	128
5.2.2 PCB设计	134
5.2.3 小结	139
5.3 电磁辐射生物效应和安全防护	139
5.3.1 电磁辐射热效应的作用原理	140
5.3.2 微波电磁场的防护	141
5.3.3 射频辐射的预防措施	142
5.4 电磁辐射防护的基本方法措施	146
5.4.1 辐射防护的基本问题	146
5.4.2 辐射防护的基本方法措施	146
5.4.3 辐射源安全防护	147
5.4.4 加速器辐射安全	151
5.4.5 同位素辐照装置安全	153
5.4.6 辐射环境安全	154
习题与思考题	155
第6章 频谱管理与频率指配	156
6.1 频谱划分的有关规定	156
6.1.1 频谱分配和使用的规定	156
6.1.2 典型移动通信系统中的频率划分	161
6.1.3 军用无线频谱管理	163
6.2 频率指配效果的评价	164
6.2.1 频率指配中需要使用的传播预测	164
6.2.2 干扰分析	165
6.3 频率指配方法和技术	171
6.3.1 频率指配的数学模型	171
6.3.2 图形标色	174

6.3.3	蜂窝网络规划工程应用的频率指配算法	176
6.3.4	现代频率指配算法简介	179
	习题与思考题	182
第7章	电磁兼容性测量	183
7.1	电磁兼容测量设施及仪器	183
7.1.1	电磁兼容主要测量设施	185
7.1.2	电磁兼容测量设备	193
7.1.3	测量系统及测量软件	198
7.1.4	电磁敏感度测量设备	198
7.1.5	敏感度测试系统及测量软件	202
7.2	设备、分系统电磁兼容性测量	203
7.2.1	军用船舶设备、分系统的电磁兼容性要求	203
7.2.2	测试方法	204
7.3	系统电磁兼容性测量	209
7.3.1	电磁辐射危害测量	209
7.3.4	电源特性测量	213
7.3.5	天线干扰耦合测量	215
7.3.6	安全裕度试验	218
	习题与思考题	220
	参考文献	221

第1章 电磁兼容概述

1.1 电磁兼容简介

1.1.1 引言

自从麦克斯韦建立电磁理论、赫兹发现电磁波一百多年来,电磁波得到了充分利用。在科学发达的今天,广播、电视、通信、导航、雷达、遥测遥控及计算机等迅速发展,尤其是信息、网络技术以爆炸性方式增长,电磁波利用的快速扩张,产生了不断增长的电磁污染,带来了越来越严重的电磁干扰。各种电磁能量通过辐射和传导的途径,以电波、电场和电流的形式,影响着敏感的电子设备,严重时甚至使电子设备无法正常工作。电磁污染和电磁干扰不仅对电子产品安全与可靠性产生危害,还会对人类及生态产生不良影响。电磁环境的污染是科技与社会发展的必然结果,而且随着科学技术的发展会越来越严重。电磁兼容就是减小环境电磁污染、控制电磁干扰以保障电子设备正常工作的技术和方法。

一方面,电子设备如果存在电磁兼容问题,就会造成环境的电磁污染;另一方面,如果环境存在电磁污染,要求设备的电磁兼容性越高。电磁环境的污染首先表现为对电子设备的电磁骚扰。电磁骚扰问题往往是通常人们不易觉察的,比如一台计算机突然死机了,人们总是认为这是软件质量问题或者是病毒,很少会考虑到电磁兼容性。日常生活中我们经常会遇到这样的情况,当收听广播或收看电视时,如果附近有人使用电吹风、吸尘器等,声音会出现噪声,图像出现雪花,这就是产品的电磁兼容性有问题;当我们使用计算机时,如果通过电缆与其他设备热插拔连接,可能出现鼠标不能拖动、光标无法移动、计算机死机等情况,造成这些不良结果的重要原因就可能是电磁兼容性问题。在工农业生产中,电磁兼容问题也普遍存在,有时可能产生严重后果。例如,如果在单片机控制系统的设计中出现电磁兼容性问题,即使软件正确,也难以使系统调试成功;正在飞行的飞机上如果有乘客违规使用强干扰信号的电子设备,很有可能导致飞机的坠毁。这些例子说明,我们生活的空间不仅确实存在电磁污染,而且电磁污染是在不易察觉的情况下干扰人们的正常生活和工作。当然,这种污染一般不会滞留和积累电磁能量,一旦电磁骚扰源停止工作,干扰也即消失。因此,为了使电子设备、系统能够正常工作,电子设备、系统必须达到电磁兼容。

那么什么是电磁兼容呢?从概念上讲,电磁兼容(EMC, Electromagnetic Compatibility)是指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和能力,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辐射导致不允许的降级;也不会使同一电磁环境中其他设备因受其电磁辐射而导致不允许的降级。这个定义的前一半体现的是设备的电磁干扰特性,既不对其他设备产生电磁干扰,不对环境构成电磁污染;后一半体现的是设备的电磁敏感特性,既不受其他设备的电磁干扰,不对电磁环境产生敏感反应。

符合电磁兼容的不同电子设备可以在一起正常工作,它们是相互兼容的,否则就是不兼容

的。电磁兼容有时又称作电磁兼容性,某些场合两者通用,但是显然电磁兼容含义更广,电磁兼容性更侧重于从性能方面描述。

从学科角度讲,电磁兼容是一门新兴的综合性学科,主要研究如何使在同一电磁环境下各种电气电子设备和元器件都能正常工作,互不干扰,达到兼容状态。显而易见,电磁兼容技术是解决电磁干扰相关问题的技术。

1.1.2 电磁环境

1.1.2.1 电磁环境概念

要研究电磁兼容,首先需要了解电磁环境,有观点认为电磁兼容学科应称为环境电磁学。所谓电磁环境是指特定区域内各种电磁信号特性和信号密度的总和。其中信号特性包括频率特性、脉冲串特性、天线扫描特性、极化特性和功率电平特性等。信号密度主要指辐射源的数目或在接收动态范围之内电子系统可以接收到的每秒脉冲数。

1988年美国军方将电磁环境定义为“军队、系统或平台在预定工作环境中执行任务时,可能遇到的在各种频率范围内电磁辐射或传导辐射的功率和时间的分布状况,是电磁干扰、电磁脉冲、电磁辐射对人体、兵器和材料的危害,以及闪电和天电干扰等自然现象效应的总和”。电磁环境对军队、设备、系统和平台的影响包含所有电磁学科,如电磁兼容、电磁干扰、电磁易损性、电磁脉冲、反电子干扰等。

由此可见,电磁环境与自然环境一样,是我们无法回避的、必须时刻面对的一种客观存在。在某种程度上,可以认为电磁环境对电磁设备的效应如同自然环境对我们人类的影响一样。从另外一个角度讲,电磁环境的构成主体电磁频谱是一种有限资源,称作电磁资源。虽然人类开发利用的可利用电磁资源频段在不断扩展,但是电磁资源本身是不可再生的。

电磁环境主要取决于下列基本因素:

- (1) 电子设备的数量;
- (2) 电子设备的使用方案;
- (3) 电子设备的复杂性以及辐射信号的特性;
- (4) 对电子设备的依赖程度;
- (5) 分析、掌握电磁环境的能力和需求等。

1.1.2.2 电磁环境主要特征

1. 影响电磁环境的主要因素

- (1) 电磁信号的密度、强度越来越大

电子设备日益密集,种类增多,电磁信号的功率与频谱域值增大。据报道电子设备的数量以三年翻一番的速度飞速增加。据调查,美军在 1000km^2 范围内,辐射源如表1-1所示。

以一个集团军作战地域为例,有无线接力机近百部,敌我无线电台 6000 余部,再加上雷达、电子对抗等无线电设备和民用通信设备,在指挥所地域电磁辐射源配置密度每平方千米高达 20~25 个;在重要的作战方向、地区和时节,电磁辐射源每平方千米高达 130~140 个。

表 1-1 1000km² 范围内辐射源分布

频率范围	辐射源数目(个)
0~500MHz	485
500MHz~2GHz	6
2~8GHz	20
8~40GHz	50

(2) 电子设备杂散辐射多

由于设备的电磁兼容性设计、控制较差,加之设备老化,电子设备的杂散辐射无处不在。2003年一家工厂研制的某新型通信设备在样机鉴定时,其电磁辐射达到规定要求,但投入使用后,却发现其辐射严重超标。经检测,原来是材料易老化,致使电磁辐射超标。

(3) 无意干扰多、电磁环境变得恶劣

现在电子目标星罗密布,频率拥挤不堪,各种电磁波纵横交错,在陆、海、空、天多维空间形成密集的电磁频谱网。例如,海湾战争中美军通过对战区电子战的电磁信号测试,发现信号环境密度高达每秒120~150万个脉冲。

(4) 有意干扰强

美国AN/ALQ99D和AN/ALQ99E干扰机的有效功率达10kW,能有效干扰工作在30MHz~18GHz频域和200~300km距离范围内的全部预警、测高、引导、监视、炮瞄和制导等雷达。

2. 电磁环境主要特征

(1) 客观真实性

电磁环境的客观真实性包括两层含义:电磁波既是信息的载体也是信息的表现形式;电磁环境客观存在,具有规律可以把握。

尽管电磁波看不见、摸不着,但是电磁波是一种物质形态,具有客观存在性,它遍布整个空间,作用于有形的电子设备上。复杂电磁环境的影响,本质上是不同形态的物质之间的相互作用。

电磁环境的产生、存在、变化及其对电子设备的作用等具有客观规律性,掌握了其规律,就可以充分认识和利用电磁环境,研究电磁环境的目的就在于研究其规律。

需要指出的是,虽然电磁环境对人体也有影响,针对人员的电磁武器也有研究报告和试验,但是目前来看,电磁环境的影响对象基本上是电子系统和设备,而且不分敌我。

电磁环境的客观性决定了电磁环境的存在、变化、作用等具有客观规律性,掌握了其规律,就可以充分认识和利用电磁环境,研究电磁环境的目的就在于研究其规律。另外,电磁环境的客观性决定了电磁环境是发展变化的,随着科技发展特别是信息化程度的不断提高而发展,因此对电磁环境的认识绝不可能想达到一劳永逸,需要随着实践而发展。

(2) 动态交织性

复杂电磁环境中各种电磁信号交织在一起,空间交错、信号重叠、时间覆盖且变化无常。

战场上,敌我双方在电磁交织状态下互相对垒,电子目标将星罗密布,频率拥挤不堪,在陆、海、空、天多维战场空间内形成密集的电磁网,敌我双方相互争夺电磁主动权,电磁信号相

互交织在一起。

战场上大量的电磁信号是在人为控制下产生的,或者说是由交战双方为控制电子设备而有目的地实施的有意辐射所产生的。因此,复杂电磁环境动态多变。从时间上看,有时表现为相对静默,有时表现为相对密集。由于计算机技术和信号处理能力的提高,电子设备性能和效率明显提高,简短高效、压缩处理的信息可以快速发射传递,各种设备频繁开关机。从频谱上看,由于信息技术的迅猛发展和电子信息装备的大量使用,战场上电磁信号所占频谱越来越宽,几乎覆盖了全部电磁信号频段。同时各种变频、调频、扩频技术的应用,使得空间电磁波频谱分布动态变幻莫测。从能量上看,因电磁波传播因素的影响,战场空间的电磁信号能量强弱起伏不均,在有些地方能量集中,非常强,有些地方能量分散,非常弱。

总之,在不同的作战时间,交战双方因作战目的不同,所产生的电磁信号数量、种类、密集程度将随时间而变化,其变化的方式难以预测。

(3) 激烈对抗性

电磁资源为我所用,必然限制其他使用,因此电磁频谱资源越来越紧张。特别是战场电磁环境的对抗性集中体现在敌对双方对电磁频谱的使用权和控制权的激烈争夺上,以达到削弱或摧毁敌方使用电磁资源的能力、同时我方最大限度地使用电磁资源的目的。电磁对抗活动主要包括:电子侦察与反侦察、电子干扰与反干扰、电子欺骗与反欺骗、电子隐身与反隐身、电子摧毁与反摧毁,基本思想是“逆对方企图而动,违对方意志而动”,即与敌方在电磁领域里“对着干”。对抗性是战场电磁环境的突出特征和复杂多变的根本原因。

(4) 人为可控性

尽管影响复杂电磁环境的因素很多,甚至许多因素还不能确定,但是对复杂电磁环境人们也不是无能为力的。构成电磁环境的主要因素是电磁干扰源,电磁干扰源如表 1-2 所示。从下面电磁干扰源以及电磁耦合途径分析可知,构成电磁环境的某些要素和某些环节是可以人为控制的,因此复杂电磁环境具有可控性。

可以通过控制辐射源,改变电磁传播的路径,设计电磁感应源特性等手段,对复杂电磁环境的形成、存在及其对电子设备的作用进行控制。因此,只要认真分析研究影响复杂电磁环境的关键或重要因素,并积极采取措施,就可以对复杂电磁环境进行控制或达到对复杂电磁环境主要特性的控制。例如,控制战场复杂电磁环境的关键是我方有效实施频谱管理、电磁兼容,以及有效应对敌方的恶意电磁干扰。所以,尽管战场电磁环境的构成十分复杂,但只要统筹好电磁频谱的使用,实施科学、规范、严格的管理,就可以尽量避免相互之间的自扰,达成对复杂电磁环境的有效控制。对敌意干扰可以实施反对抗措施,达成对我有利的复杂电磁环境。因此,复杂电磁环境具有可控性。

(5) 相对复杂性

电磁环境越来越复杂。复杂电磁环境的中电磁信号密集、样式繁杂,其复杂性主要体现在:客观认识不足,感知有限,交织杂乱,动态无常,对抗激烈和控制能力有限。

但是,复杂本身就具有相对性。复杂电磁环境的相对性具有几个层次。

首先,电磁环境的复杂程度与人对其认识、感知的程度相关,从这一点上讲具有相对性。电磁环境是发展变化的,它随着科技发展特别是信息化程度的不断提高而发展,因此对电磁环境的认识绝不可能一劳永逸,需要随着实践而发展。

其次,电磁环境的整体复杂性不代表微观上局部、短时的简单性。因为电磁波在空间的能

量分布有起伏、存在时间不连续、频谱不均匀,因此在电磁环境中不可否认在某些局部、某些时段、某些频带上电磁环境的相对简单性。因此,电磁环境具有宏观上的相对复杂性与局部和具体设备所处的电磁环境的相对简单性。

再次,电磁环境的影响表现为电子设备对电磁环境的感应和反应,其相对性体现在不同设备的感应灵敏度不同、反应程度不同,因此相同的电磁环境对不同设备的影响也不同,相对而言复杂程度就不一样。对于具体设备而言,电磁环境等同于设备前端的电磁环境,不同装备的电磁特性不同(频率、波形、波束等),决定了不同设备对电磁环境的反应不同,即同一种电磁环境对不同的具体对象产生的效应不同。例如,一个复杂的微波电磁环境仅仅是作用于微波波段的通信、雷达等设备的复杂电磁环境,对光学系统的影响不大,所以它不是光学设备的复杂电磁环境。同样一个电磁环境,对高灵敏度接收机的影响就比对低灵敏度接收机的影响要大,所以可能只对于高灵敏度接收机而言是复杂电磁环境。另外,电子设备对电磁频谱的感知各异。战场上不同的、相同的甚至同一部电子设备在不同频段、不同时间、不同位置、不同方向、不同工作体制等情况下,对电磁环境的感知也是不同的。例如,对于工作在米波波段的雷达来说,厘米波波段的电磁环境再复杂,它也很难感知;雷达主波瓣和副波瓣对电磁环境的感知也不一样,主波瓣对电磁环境较敏感,副波瓣则较迟钝,因此干扰信号通过主波瓣比较容易形成干扰,而通过副波瓣则较困难。

1.1.3 电磁兼容发展

虽然电磁干扰问题由来已久,但电磁兼容学科却是近代形成的。1822年安培提出了磁现象的根源是电流的假说,1831年法拉第发现了变化的磁场在导线中产生感应电动势的规律,1864年麦克斯韦全面论述了电磁相互作用,提出了位移电流理论,总结出麦克斯韦方程,预言电磁波的存在,麦克斯韦的电磁场理论是研究电磁兼容的基础。1881年英国科学家希维塞德发表了“论干扰”的文章,标志着电磁兼容性研究的开端。1888年德国科学家赫兹首创了天线,第一次把电磁波辐射到自由空间,同时又成功地接收到电磁波,从此开始了电磁兼容性的实验研究。1889年英国邮电部门研究了通信中的干扰问题,使电磁兼容性研究开始走向工程化。1944年德国电气工程师协会制定了世界上第一个电磁兼容性规范 VDE0878,1945年美国颁布了第一个电磁兼容性军用规范 JAN-1-225。

20世纪40年代提出了电磁兼容性概念,电磁干扰问题由单纯的排除干扰逐步发展成为从理论和技术上全面控制电气设备在其电磁环境中正常工作能力保证的系统工程。60年代以来,现代科学技术向高频、高速、高灵敏度、高安装密度、高集成度、高可靠性方向发展,其应用范围的越来越广,渗透到了社会的每一个角落,正是由于大规模集成电路的出现把人类带入信息时代,近年来信息高速公路和高速计算机技术成为人类社会生产和生活水平主导技术,同时也由于航空工业、航天工业、造船工业以及其他国防军事工业的需要,使得电磁兼容获得空前的大发展。70年代以来,电磁兼容技术逐渐成为非常活跃的学科领域之一,美国、德国、日本、前苏联、法国等经济发达国家在电磁兼容研究和应用方面达到很高的水平。建立了相应的电磁兼容标准和规范,电磁兼容设计成为民用电子设备和军用武器装备研制中必须严格遵循的原则和步骤,电磁兼容性成为产品可靠性保证中的重要组成部分。1989年欧洲共同体委员会颁发了 89/336/EEC 指令,明确规定,自1996年1月1日起,所有电子、电气产品须经过电

磁兼容性能的认证,否则将禁止其在欧共体市场销售。此举在世界范围内引起较大反响,电磁兼容成为影响国际贸易的一项重要指标。目前电磁兼容性工程以事后检测处理发展到预先分析评估、预先检验、预先设计。

我国电磁兼容技术起步很晚,无论是理论、技术水平,还是配套产品(屏蔽材料、干扰滤波器)制造,与发达国家都存在相当差距。直到 20 世纪 80 年代之后才系统地研究并制定国家级和行业级的电磁兼容性标准和规范。随着国民经济和高科技产业的迅速发展,在航空、航天、通信、电子等部门,电磁兼容技术受到格外重视。

近年来,电磁兼容技术的重要性日益增加,这两个方面的原因:第一,电子设备日益复杂,特别是模拟电路和数字电路混合的情况越来越多、电路的工作频率越来越高,这导致了电路之间的干扰更加严重,设计人员如果不了解有关的设计技术,会导致产品开发周期过长,甚至开发失败。第二,为了保证电子设备稳定可靠的工作,减小电磁污染,越来越多的国家开始强制执行电磁兼容标准,特别是在美国和欧洲国家,电磁兼容指标已经成为法制性的指标,是电子产品厂商必须通过的指标之一,设计人员如果在设计中不考虑有关的问题,产品不能通过电磁兼容试验,无法走上市场。而与此形成强烈反差的是,在加入 WTO 以后,我们面对的是公平的国际竞争,各国之间唯一的贸易壁垒就是技术壁垒,而电磁兼容指标往往又是众多技术壁垒中最难突破的一道。

1.1.4 电磁兼容研究内容

电磁兼容学是一门新兴的跨学科的综合应用学科,它以电气和无线电技术的基本理论为基础,并涉及许多新的技术领域,如微波技术、微电子技术、计算机技术、通信和网络技术以及新材料等。电磁兼容技术研究范围很广,几乎所有现代化工业领域,如电力、通信、交通、航天、军工、计算机和医疗等都必须解决电磁兼容问题。

电磁环境的不断恶化,引起了世界各工业发达国家的重视,特别是 20 世纪 70 年代以来,进行了大量的理论研究及实验工作。电磁兼容学科研究的基本内容是围绕构成电磁干扰的三要素进行的,即对电磁干扰源、耦合通道和敏感设备的研究。干扰源的研究包括干扰发生的机理、时域和频域的定量描述,以便从源端来抑制干扰的发射。干扰的耦合通道有两条:空间辐射、导线传导。空间辐射研究主要包括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规律,通常采用屏蔽技术来阻断干扰的辐射。传导耦合研究主要讨论干扰沿导线传输的影响,通常传导耦合通过公共地线、公共电源线和互连线而实现。

电磁兼容的研究内容非常广泛,如电磁兼容控制技术、测量技术、分析预测技术等,研究热点主要有:

- (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) 电磁频谱的利用和管理;
- (5) 电磁兼容性标准与规范;
- (6) 电磁兼容性的测量与试验技术;
- (7) 电磁泄漏与静电放电等。

电磁兼容学不仅仅是一种理论技术,而且是技术与管理并重的实用工程学。开展这样的工程,需要投入大量的人力和财力。国际标准化组织已经并正在制定电磁兼容的有关标准和规范,我国在这方面的起步虽然较晚,但发展很快。随着市场经济的发展,我国要参与世界技术市场的竞争,进出口的电子产品都必须通过电磁兼容检验。因此,我国政府和相关部门越来越关注电磁兼容问题,不断制定了有关的强制性标准,各部门和军兵种建立了不同规模的电磁兼容实验室和检测中心、电磁兼容认证机构等。

另外,电磁兼容学科领域范围日益扩大,现已不只限于电子设备本身,还涉及电磁污染、电磁饥饿等一系列生态效应问题及其他多方面的问题,“电磁兼容”一词似乎已不能包含电磁兼容学科的全部内容。最近,日本文献对电磁兼容作了如下定义:“电磁兼容是一门独立的学科,随着电磁能量利用的发展,它将研究:预测并控制变化着的地球和天体周围的电磁环境、为了协调环境所采取控制方法、各项电气规程的制定,以及电磁环境的协调和电磁能量的合理应用等。”可见,电磁兼容学科涉及范围越来越宽,包括工程学、自然科学、医学、经济学、社会学等基础科学。

1.2 电磁兼容现象

1.2.1 电磁兼容的重要性

1. 电子设备可靠性要求

电磁干扰不仅影响电子设备的正常工作,甚至造成电子设备中的某些元件损害,因此对电子设备的电磁兼容技术要给予充分的重视。既要注意电子设备不受周围电磁干扰而能正常工作,又要注意电子设备本身不对周围其他设备产生电磁干扰,影响其他设备正常运行。

2. 电磁兼容国际认证

电磁兼容性已由事后处理发展到预先分析、预测和设计,成为现代工程设计中的重要组成部分。电磁兼容性达标认证已由一个国家范围向全球地区发展,使电磁兼容性与安全性、环境适应性处于同等重要的地位。欧共体将产品的电磁兼容性要求纳入技术法规,强制执行 89/336/EEC 指令,从 1996 年 1 月 1 日起,电气和电子产品必须符合电磁兼容性要求,并加贴 CE 标志后才能市场销售。

为了与国际接轨,我国外经部和国家出入境检验局于 1999 年 1 月起对个人计算机、显示器、打印机、开关电源、电视机和音响设备实施电磁兼容性强制检测。国家技术监督局规定从 2002 年 10 月起陆续对声音和电视广播设备、信息技术设备、家用电器、电动工具、电源、照明电器、电点火驱动装置、金融结算电子设备、安防电子产品和低压电器实施电磁兼容性强制性认证。

3. 人身安全的保证

电磁波通过与电爆装置控制电路的感应耦合,形成的干扰电流可能引起电爆装置爆炸。因此 GJB786 中规定,电引爆器导线上的电磁干扰感应电流和电压必须小于最大不发火电流和电压的 15%。另外,各种燃油在强电磁场的作用下(直接照射、电火花、静电放电)有发生燃烧和爆炸的危险。电磁能量通过对人体组织的物理化学作用会产生有害的生理效应,因此,为了人身和某些特殊材料的安全,GJB786 中还规定,电子设备的电磁辐射量连续波的平均功率

密度不允许超过 $4\text{mW}/\text{cm}^2$, 脉冲波的平均功率密度不允许超过 $2\text{mW}/\text{cm}^2$ 。

4. 电磁武器的防护

核爆炸时产生的电磁脉冲, 以光速向外辐射传播, 其电场强度可达 $10^5\text{V}/\text{m}$, 磁场强度可达 $260\text{A}/\text{m}$, 脉冲宽度为 20ns 量级, 电磁脉冲峰值处频率为 10kHz 。这种电磁脉冲作用于电子设备时, 轻者造成电子设备性能恶化, 重者造成电路元件损坏。

特别是当今和未来战争中, 已经应用的电磁脉冲弹和正在研制的高功率微波武器都具有类似核爆炸时产生的电磁脉冲辐射, 将对电子设备构成致命威胁。而电磁兼容可以为对抗这种威胁提供基本技术指导。

1.2.2 电磁骚扰现象

电磁骚扰问题使人们对它“不易觉察”, 主要原因是这种骚扰的途径是通过空间无形的辐射和电源线、信号线的传导造成的。电磁骚扰问题非常普遍, 只是程度不同。实际上, 凡是有电、有开关的设备, 不管电压高低, 都会产生电磁骚扰。用 220V 交流电源供电的设备固然会有电磁骚扰, 就是用 1.5V 电池进行工作的儿童玩具也有电磁骚扰。

电磁骚扰如果没有对电子设备造成明显的后果, 则称之为电磁骚扰; 反之, 如果电磁骚扰对电子设备造成了不良后果, 则称之为电磁干扰。人们常说的射频干扰是指无线电广播范围的电磁干扰。1934年在巴黎成立的国际无线电干扰特别委员会(CISPR), 是人类第一次开始对电磁干扰及其控制技术的世界性有组织的研究。在进入信息化社会的今天, 电磁波作为一种资源, 已在 $0\sim 400\text{GHz}$ 宽频范围内广泛地用于信息技术产品中, 如汽车、通信、计算机、家电等产品, 大量地涌入社会和家庭。伴之而来的电磁干扰也就从甚低频到微波、毫米波、亚毫米波、太赫兹波段, 无孔不入地辐射或传导至运行中的电子设备或系统, 以及周围的环境, 给设备或系统及生态带来各种各样的危害。下面就几个领域的电磁骚扰(干扰)现象作简要介绍。

1.2.2.1 电子设备的电磁干扰

信息技术设备接收来自外部源的数据(如通过键盘、数据线输入), 对接收到的数据进行某些处理, 提供数据输出。过去, 人们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影响不会很大。尽管在系统设计和工程实现中, 也自觉或不自觉地进行着防止和消除各种干扰的工作, 然而, 提到掌握和运用 EMC 技术上来认识和研究, 其意识性还欠缺。然而, 随着微电子技术的发展, 计算机已朝高速度、高灵敏度、高集成度和多功能方向发展, 系统已是含有多种元器件和许多分系统的低压传输信息的复杂设备。高速电子元器件和电路, 以及高密度的空间结构, 会大大加重系统的辐射。同时, 低压、高灵敏度会使系统的抗扰度降低。因此, 由于电磁环境的干扰和系统内部的相互窜扰, 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。例如计算机经常出现莫名其妙的死机现象就是典型的例子。

1.2.2.2 信息设备的电磁泄漏

计算机的键盘、显示屏等都会使信息辐射泄漏出去, 如果泄漏的是有用信息, 一旦被敌方