

电磁兼容原理及
刘鹏程
邱扬

电磁兼容原理 及技术

刘鹏程 邱 扬

TN03

高等教育出版社

11103

L70

376987

电磁兼容原理及技术

刘鹏程 邱 扬



高等教育出版社

(京) 112 号

013/15

内 容 简 介

电磁兼容是近代发展起来的新学科领域,也是电子工程技术人员必备的专业基础知识。本书是为适应各高等学校普遍开设电磁兼容选修课,并举办在职工程技术人员培训班的需要而编写的。本书在充分研究电磁兼容总体知识结构的基础上,按照学科的内在联系,由浅入深地组织教材理论体系,同时充分考虑实际工程的需要,具有较强的实用性和可读性。全书共10章,内容包括:电磁兼容概论,电磁场基础,电磁干扰与电磁环境,电磁干扰的耦合与传输,接地干扰与抑制措施,抑制干扰的技术措施,屏蔽的理论计算与工程技术,实现电磁兼容的组织措施,电磁兼容性分析与设计,电磁兼容测量。书末附有习题和参考文献。



电磁兼容原理及技术

刘鹏程 邱 扬

*

高等教育出版社出版

新华书店总店科技发行所发行

西安电子科技大学印刷厂印装

*

开本 787×1092 1/16 印张 15.25 字数 390000

1993年9月第1版 1993年9月第1次印刷

印数: 1—4095

ISBN7-04-004830-2/TM·240 定价 9.00 元

序

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,空间电磁环境日益复杂。在这种复杂的电磁环境下,如何减少相互间的电磁干扰,使各种设备能正常运转,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(EMC)正是为了解决这类问题而迅速发展起来的一门新兴学科。海湾战争以来,又大大地更新和增加了电磁兼容的研究内容,使这门学科既有很强的理论性,又有丰富的实践内容,成为涉及一切与电子有关的极广泛领域的综合性学科。

为了满足国内进行EMC技术培训和高校开设EMC选修课的需要,西安电子科技大学刘鹏程及邱扬二位老师在对EMC进行多年教学和研究的基础上,编写了《电磁兼容原理及技术》一书。

编者按学科的内部联系,兼顾认识论的规律,由浅入深安排章节,使读者易于掌握全书内容。书中不仅全面地阐述了EMC的基本技术与理论,而且反映了很多国外在EMC学科方面的最新成就,对基本的定量公式,编者均运用基础知识,给出推导及来源。在电磁耦合和电磁屏蔽等有关章节中反映了编者的科研心得。书中对各种耦合、接地以及EMC设计等内容的论述也有其独到之处。

本书是一本良好的高等学校教材,对于从事电磁兼容研究的科技人员以及相关的工程技术人员与管理人员也是一本较全面的参考书,该书的及早问世,无疑是对我国EMC学科的一个重要促进。

高攸纲

1993.7

前 言

电磁兼容(EMC)是近代发展起来的新的学科领域。随着科学技术的发展,电磁兼容在现代科技中的作用与地位日益提高,它已成为有关工程技术人员必备的专业基础知识。在我国开展电磁兼容教育的任务已经迫在眉睫,不仅需要培养电磁兼容专业技术人员,而且需要对电子工程技术人员进行电磁兼容技术培训,并在高等学校有关专业中进行电磁兼容教育。本书就是为适应这一需要而编写的。该书是列入国家教育委员会高等学校工科基础课 1991~1995 年教材建设规划中的选修课教材,可供有关专业的本科生及研究生选修课使用,也可作为工程技术人员学习和工作的参考书。

本书是在充分研究电磁兼容总体知识结构的基础上,根据其学科的内部联系,并兼顾认识论的规律,以通俗易懂的教学语言,按照由浅入深的顺序编写的。全书共分十章,第一章概述了电磁兼容的研究内容及学科特点,使读者在了解总体知识结构基础上有目的地学习后续章节;第二章集中阐述了本书所必需的电磁场知识及其有关公式;第三章和第四章分析了电磁干扰的性质及干扰耦合的计算;第五、六、七章讨论抑制干扰的各种技术措施;第八、九章给出了实施电磁兼容的组织措施和技术措施,其内容包括电磁兼容标准与规范,电磁兼容分析与预测,以及电磁兼容设计等;第十章简介了电磁兼容的基本测量。全书内容的结构体系见图 0-1 所示。

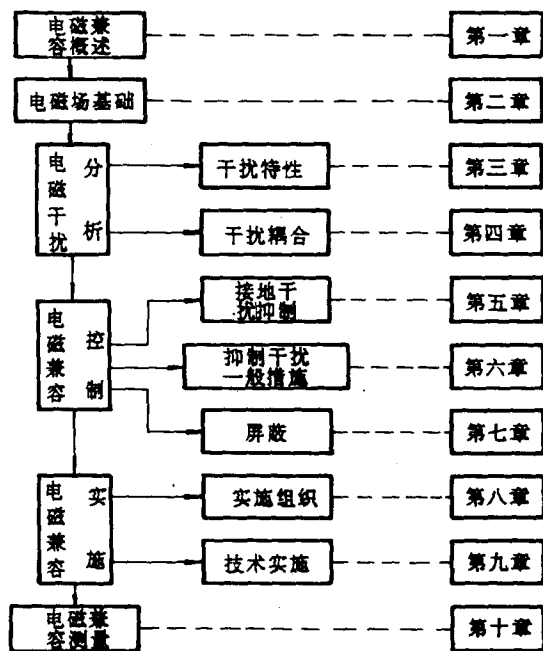


图 0-1 本书的内容框图

本书是编者多年来进行电磁兼容教学及科学研究经验的总结，不仅全面地阐述了电磁兼容领域的基础理论与技术，而且介绍了电磁兼容领域的新发展，书中的定量公式均给出推导及来源，使读者打下坚实的理论基础，并注意通过实例来阐述问题，以加深读者对问题的理解。书后附有习题、附录和参考文献以便于读者深入学习。

本书由西安电子科技大学刘鹏程担任主编，邱扬执笔第七章、第九章（部分内容）、第十章；刘鹏程执笔其余各章并统编全书。毛康侯教授对本书进行了全面地审阅。在编写过程中曾得到我国著名电磁兼容专家高攸纳教授的指导和帮助，陈穷高级工程师和吴大正教授对本书的内容也提出了宝贵的意见和建议，使本书的编写质量获得提高。此外，西安电子科技大学老一辈专家茅于宽教授和王一平教授为本书提供许多现代技术资料，在此一并表示诚挚的谢意。

由于电磁兼容是一门综合性的新兴学科，其内容极为丰富，并在迅速发展，加之编者水平有限及时间仓促，书中不妥之处肯定存在，诚恳希望读者批评指正。

编 者

1993 年 6 月于西安电子科技大学

目 录

第一章 电磁兼容概论	1
1.1 电磁兼容的研究内容及其重要性	1
1.1.1 引言	1
1.1.2 电磁兼容的研究内容及特点	2
1.1.3 电磁兼容在现代科技中的地位及重要性	3
1.2 电磁兼容的发展	4
1.2.1 电磁兼容发展的直观背景	4
1.2.2 电磁兼容的发展是人类社会科技发展之必然	5
1.2.3 电磁兼容技术发展概况	5
1.3 电磁兼容的基本概念	7
1.3.1 电磁兼容的含义	7
1.3.2 电磁兼容常用名词术语	7
1.3.3 电磁兼容性的实施	10
1.4 形成电磁干扰的基本要素	10
1.4.1 电磁干扰源	11
1.4.2 干扰的耦合途径	12
1.4.3 敏感设备	14
第二章 电磁场基础	16
2.1 电偶极子与磁偶极子的静态场	16
2.1.1 电偶极子的场	16
2.1.2 磁偶极子的场	17
2.2 电场耦合与耦合电容	18
2.2.1 电场耦合与电容的概念	18
2.2.2 传输线电容的计算公式	19
2.3 磁场耦合与耦合电感	22
2.3.1 磁场耦合与互感的概念	22
2.3.2 传输线间互感的计算公式	23
2.4 导体的阻抗	27
2.4.1 导体的直流电阻	27

2.4.2 导体的交流电阻	27
2.4.3 导线的电感	28
2.5 偶极辐射	29
2.5.1 辐射的物理概念	29
2.5.2 偶极子的辐射场	29
2.5.3 偶极子场的波阻抗	32
2.6 电磁波在有耗媒质中的传播	33
2.6.1 平面电磁波在有耗媒质中的传播特性	33
2.6.2 集肤效应与电磁屏蔽	34
第三章 电磁干扰与电磁环境	36
3.1 地表面的自然电磁场	36
3.1.1 地表面自然磁场的分布概况	36
3.1.2 地磁场的等效模型	36
3.1.3 地磁场的起伏和磁暴	37
3.1.4 地表面的自然电场	38
3.2 自然噪声	39
3.2.1 宇宙噪声	39
3.2.2 雷电放电	39
3.2.3 大气噪声	40
3.3 人为干扰	42
3.3.1 人为干扰的产生	42
3.3.2 有意发射干扰源	43
3.3.3 无意发射干扰源	45
3.3.4 静电放电干扰	47
3.4 电磁干扰源的特性分析	48
3.4.1 干扰能量的空间分布	48
3.4.2 干扰的频率特性	49
3.4.3 干扰的频带特性与波形的关系	50
3.4.4 干扰能量的时间分布	52
第四章 电磁干扰的耦合与传播	55
4.1 传导耦合	55
4.1.1 电路性传导耦合	55
4.1.2 电容性耦合	56

4.1.3 电感性耦合	59	5.3.5 电路系统的组合接地选择	95
4.1.4 电容耦合与电感耦合的综合考虑	62	5.4 抑制地回路干扰的技术措施 ...	97
4.2 导线间的高频耦合	65	5.4.1 浮地	97
4.2.1 分布参数电路的基本概念	65	5.4.2 差分平衡电路	98
4.2.2 高频线间耦合的计算	66	5.4.3 隔离变压器	99
4.2.3 低频情况的耦合	69	5.4.4 纵向扼流圈	101
4.3 辐射耦合	70	5.4.5 光耦合器	103
4.3.1 导体的天线效应	71	第六章 抑制干扰的技术措施	104
4.3.2 小型电路的辐射模型	71	6.1 概述	104
4.3.3 天线与天线间的辐射耦合	73	6.2 导体的搭接	105
4.4 场到线的耦合	74	6.2.1 搭接的一般概念	105
4.4.1 场到线的共模耦合与异模耦合	74	6.2.2 搭接的有效性	106
4.4.2 场对高频传输线的耦合 ...	75	6.2.3 搭接的方法及应注意的问题	107
4.4.3 平面波的电场平行传输线终端时的负载电流	78	6.3 滤波	109
4.4.4 平面波的电场平行传输线时的负载电流	80	6.3.1 电磁干扰滤波的概念	109
第五章 接地干扰及抑制措施	84	6.3.2 反射式滤波器	112
5.1 接地概念与接地方法	84	6.3.3 吸收式滤波器	114
5.1.1 接地平面的要求	84	6.3.4 铁氧体磁环与穿心电容的滤波	115
5.1.2 安全接地与信号接地	84	6.4 电磁屏蔽	117
5.1.3 信号地线的接地方式	86	6.4.1 电场屏蔽	117
5.2 地回路干扰	88	6.4.2 磁场屏蔽	119
5.2.1 接地公共阻抗产生的干扰	88	6.4.3 电磁屏蔽	121
5.2.2 接地电流与地电压的形成	89	6.4.4 屏蔽壳体对其内的场源或防护线路的影响	121
5.2.3 地回路干扰	90	6.5 几种电磁干扰的抑制方法	121
5.3 抑制地回路干扰的接地点选择	91	6.5.1 电源干扰的抑制方法	122
5.3.1 放大器与信号源间接地点的选择	92	6.5.2 具有感性负载触点瞬态噪声的抑制	125
5.3.2 多级电路接地点的选择 ...	93	6.5.3 干扰耦合的抑制措施	126
5.3.3 电缆屏蔽层的接地点选择	93	第七章 屏蔽的理论计算与工程技术	130
5.3.4 谐振回路的接地点选择 ...	95	7.1 屏蔽效能的计算	130
		7.1.1 导体平板的屏蔽效能	130
		7.1.2 非实心型的屏蔽体屏蔽效能的计算	136
		7.1.3 多层屏蔽体屏蔽效能的计算	138

7.1.4	导体球壳屏蔽的计算	139
7.2	屏蔽的材料特性	140
7.2.1	导磁材料	140
7.2.2	导电材料	141
7.2.3	薄膜材料	142
7.2.4	导电胶与导磁胶	142
7.3	屏蔽体的结构	144
7.3.1	电屏蔽的结构	144
7.3.2	磁屏蔽的结构	145
7.3.3	电磁屏蔽的结构	146
7.4	孔缝泄漏的抑制措施	147
7.4.1	装配面处接缝泄漏的抑制	148
7.4.2	通风冷却孔泄漏的抑制	148
7.4.3	观察窗口泄漏的抑制	151
7.4.4	器件调谐孔泄漏的抑制	152
第八章	实现电磁兼容的组织措施	154
8.1	国际组织与合作	154
8.2	频谱管理与频谱工程	156
8.2.1	电磁频谱命名	156
8.2.2	频谱管理	156
8.2.3	频谱工程	158
8.3	电磁兼容标准与规范	159
8.3.1	标准和规范的内容和特点	159
8.3.2	表示电磁兼容性极限值的单位及换算	160
8.3.3	国外电磁兼容标准与规范	163
8.3.4	我国的电磁兼容标准与规范	163
8.4	瞬态电磁脉冲辐射标准与 Tempest 技术	165
8.4.1	建立瞬态电磁脉冲辐射标准的意义	165
8.4.2	机要设备的电磁防护	165
8.4.3	Tempest 技术与电磁兼容技术间的关系	166

第九章	电磁兼容性分析与设计	167
9.1	电磁兼容性分析与预测	167
9.1.1	电磁兼容分析与预测的基本内容和方法	167
9.1.2	系统的模型	170
9.1.3	系统内部和系统之间的电磁兼容性分析	173
9.2	电磁兼容性设计内容及设计要点	176
9.2.1	电磁兼容性的设计内容	176
9.2.2	电磁兼容设计的主要参数	177
9.2.3	电磁兼容的设计要点	178
9.3	电磁兼容设计程序	181
9.3.1	系统整体设计与研制程序	181
9.3.2	电磁兼容性分析与设计程序	182
9.3.3	设计举例	184
9.4	屏蔽设计的方法与步骤	189
9.4.1	屏蔽效能的确定	190
9.4.2	屏蔽的设计程序	193
9.4.3	确定屏蔽的计算举例	194
9.5	系统电磁兼容性设计的拓朴图论方法	195
9.5.1	系统电磁兼容性问题的分解	195
9.5.2	系统电磁兼容性问题的拓朴描述	196
9.5.3	系统电磁兼容性问题的拓朴关联信息	197
9.5.4	系统电磁兼容性分析与设计	198
第十章	电磁兼容性测量	200
10.1	电磁兼容性测量的内容与要求	200
10.1.1	电磁兼容性测量的主要内容	200
10.1.2	对测量场地的要求	200

10.1.3 测量仪器的基本要求及其配置	203	10.3.4 壳体电流传导敏感度的测量	212
10.2 常用的测量仪器和设备	204	10.3.5 电场辐射敏感度的测量 (横电磁波室法)	213
10.2.1 测量接收机	204	10.3.6 屏蔽室屏蔽效能测量 ...	214
10.2.2 频谱分析仪	206	10.4 电磁兼容性的自动测量	216
10.2.3 亥姆霍兹线圈	207	附录一 习题	217
10.2.4 平行板线	207	附录二 部分国家从事电磁兼容标准、规范研究的机构及其制定的部分标准、规范	225
10.2.5 横电磁波室	208	附录三 美国军用标准与 CISPR 标准的主要区别	227
10.2.6 试验用天线	208	参考文献	229
10.3 典型的电磁兼容性测量	210		
10.3.1 电源线传导发射的测量	210		
10.3.2 磁场辐射发射的测量 ...	210		
10.3.3 电场辐射发射的测量 ...	211		

第一章 电磁兼容概论

1.1 电磁兼容的研究内容及其重要性

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,将干扰电视机和收音机的正常工作,使电视机出现杂乱的画面,使收音机收到讨厌的噪声。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,见图1-1所示。

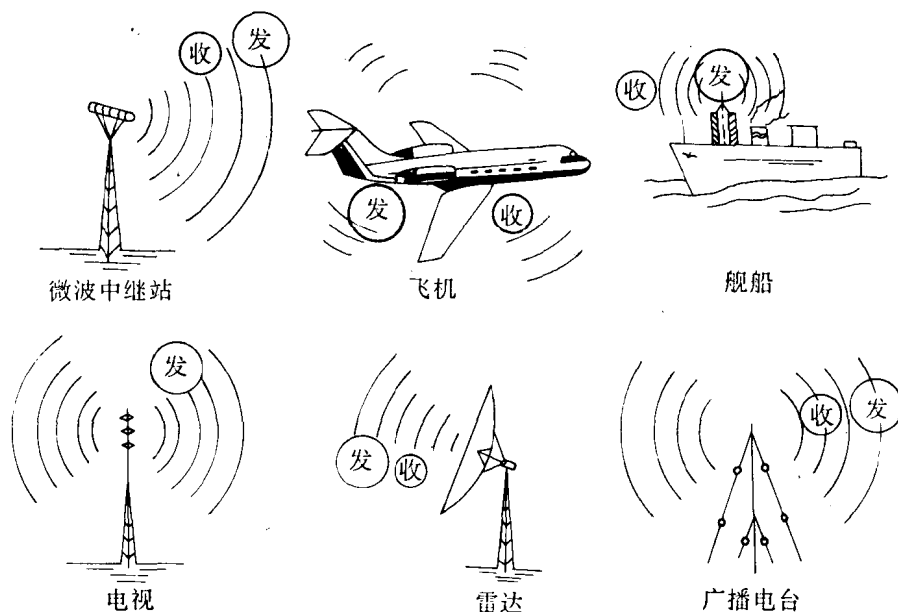


图1-1 系统间的电磁干扰

在系统内部各设备之间会出现设备间的干扰,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,称为系统内的干扰。

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(见图1-2)等等。

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

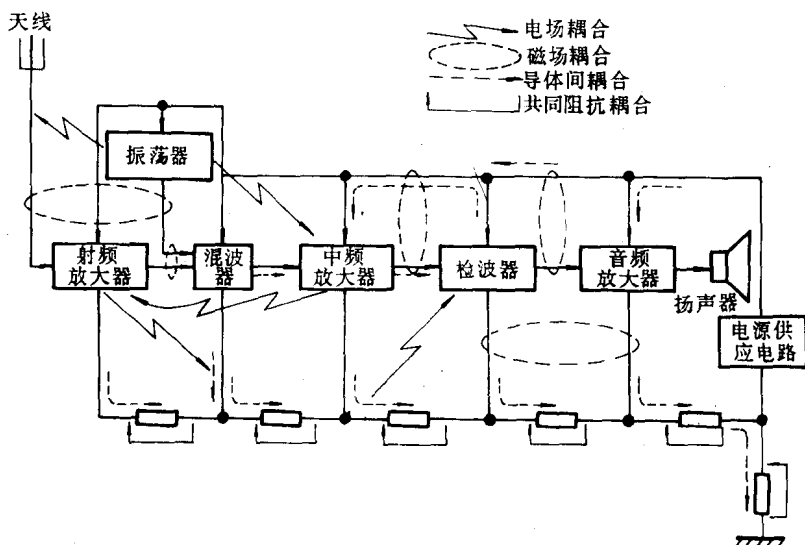


图 1-2 无线电接收机内各级电路间的干扰

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，而遭到对方发射导弹的攻击的战例是屡见不鲜的。由于电磁干扰问题不能解决使新型航天飞行器、飞机、舰艇等产品长期不能投入使用，而增加研制时间和研制经费更是不乏其例。

此外，人为干扰及自然干扰（雷电、大气干扰和宇宙干扰）有可能使系统或设备的性能发生有限度的降级，甚至可能使系统或设备失灵，即性能发生永久性下降，干扰严重时会使系统或设备发生故障或事故。例如，由于雷电和静电放电干扰和其他人为干扰，使火箭、飞船发射后出现计算机故障或自毁系统误爆而炸毁的事件多次发生。各种强电干扰可能引起易挥发燃料的自然，弹药和含电爆装置的自爆，交通工具上电子自控系统的失灵等事故，同时，长期的电磁辐射将影响人体健康而造成电磁污染。

客观事实使人们认识到电磁干扰的严重危害，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，并进行合理的设计等，以使共同环境中的系统和设备能执行各自的正常功能，这种对电磁环境进行设计的新的学科领域就是电磁兼容。

1.1.2 电磁兼容的研究内容及特点

电磁兼容课程的研究对象是电磁干扰。电磁干扰就本质来说虽然并不复杂，但它无所不在、行踪不定、形式各异；而且由于长期以来缺乏对电磁干扰全面的研究和系统的阐述，使许多工程技术人员对此感到困惑：干扰是怎样产生的？是怎样向外传播的？是怎样作用的？作用的后果及危害是什么？它的形态及性质有哪些？怎样防止它的产生？怎样抑制或消除它的作用？怎样预测和分析它的影响？怎样测量它的大小以及如何合理设计而消除其危害等一系列问题，均要求予以解答。电磁兼容将对上述问题从理论上进行系统的论述，并研究电磁兼容技术的方法和途径，其研究范围包括从静电问题到电磁脉冲，从低频到超高频，用场的方法又用路的方法，有强电（电力）问题又有弱电（电子）问题，有工程技术问题，又有管理工程。其基础知识比较广泛，它将涉及到电子、电气、电磁场、计算机、电磁测量、机械结构、自动控制、生物医学、工艺材料等方面的知识。

电磁兼容是研究电磁干扰这一传统问题的扩展与延伸，它要求用一种特定的方法去分析

控制系统的整个电磁现象，电磁兼容不仅要考虑系统的工作性能，而且还要考虑系统工作时所产生的副产品。研究系统工作时所产生的非预期效果，并对这些非预期效果进行控制与合理设计。因此电磁兼容工程师与普通的电子工程师所设计的内容和追求的目标是不同的，电子工程师主要关心的是系统工作性能的设计，而电磁兼容工程师除了考虑系统的工作性能之外，还要分析系统的非工作性能，例如，发射机的带外辐射，接收机的乱真响应，方向图的旁瓣和后瓣，以及电磁能的非指定路径的传输等。电子工程师所追求的设计指标是提高信号与噪声之比值，而电磁兼容工程师所追求的是降低干扰与噪声之比值，因为只有外来干扰低于受干扰设备的噪声电平，该设备才不会对干扰有响应，表示处于电磁兼容状态。

电磁兼容研究的重点是系统工作时所产生的非预期效果，一般来说它比研究系统的工作性能往往要复杂得多，需采用特定的方法及程序来对各种干扰进行分析和计算，以便进行合理的设计。为了保证测量结果的可比性，电磁兼容测量不仅要有高精度的测量设备并且要有统一规定的测量方法，因此电磁兼容有其特定的目标及研究内容，它能够解决其他学科无法解决的技术问题。

1.1.3 电磁兼容在现代科技中的地位及重要性

随着电子系统和设备数量的逐渐增多和性能的不断提高，电磁干扰将越来越严重，因此如何在共同的电磁环境中使电子系统和设备不受干扰的影响而相容地正常工作是迫切需要解决的技术问题，而这一点正是研究电磁兼容的宗旨。目前，电磁兼容已成为电子系统或设备的技术关键，为了保证电子系统的正常工作，必须进行严格的电磁兼容设计，它对系统效能有着重大影响，其影响范围见图1-3所示。由图可见电磁兼容决不单纯是质量部门的工作，在研制、设计、生产、工艺、试验、使用等各阶段均要采用电磁兼容技术，电磁兼容设计和管理应贯穿于从产品的研制到使用的始终。经验告诉我们，在产品研制设计之初就应考虑电磁

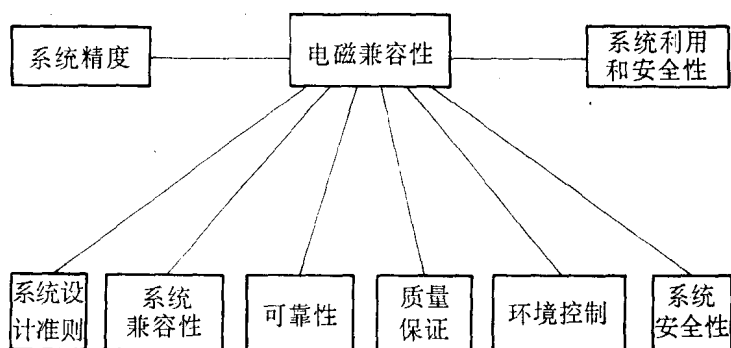


图1-3 电磁兼容影响效能的范围

兼容问题，否则待产品生产出来进行测试时才发现问题，那时再设法解决将花费很高的代价，甚至不能彻底解决出现的问题。没有正确的电磁兼容设计，各种无线电系统和大型计算机就不能可靠地运行，对电磁兼容问题如果缺乏周密地考虑，令人叹服的航天飞行也就难以实现。

为了造成一个良好的电磁环境，减少各种相互干扰和电磁污染，有关国际组织和许多国家对电子、电气产品规定了电磁兼容质量标准，不满足电磁兼容要求的产品不准进入市场，所以每种电子、电气产品在设计时必须考虑电磁兼容，并进行电磁兼容测试和质量检查，可见电磁兼容已是一门与国民经济、国防建设和人民生活休戚相关的学科领域。

由于电磁兼容是伴随电子技术而出现并发展的，因此凡是有电子技术的领域都离不开电

磁兼容。电磁干扰存在的普遍性决定了电磁兼容应用的广泛性。可以预料,随着生产的发展和科技的进步,电磁兼容的作用和地位将日益提高。

1.2 电磁兼容的发展

1.2.1 电磁兼容发展的直观背景

1. 电气、电子技术的发展及广泛应用,其设备或系统的数量急剧增多,造成了复杂的电磁环境。

1975年,日内瓦国际频率登记委员会所登记的无线电发射机有一百多万台,同年在长波和中波的无线电行政大会上报导,有一万多台无线电发射机其总功率超过540MW,在更高频率上,其情况更复杂,例如,1976年单在美国就有二百多万台移动式无线电发射机和基地台在工作,而军用无线电发射机可能还要更多。此外,更多数量的设备在无意地辐射电磁能,也就是说辐射电磁能是这些设备工作时的副产品。例如,超外差式收音机和电视接收机(本地振荡器辐射)、汽车(点火系统的辐射)、各种不同的用电装置及带电动机的装置、照明装置、霓虹灯广告、高压电力线、医疗设备等许多装置都属于这类设备。它们辐射电磁能可能是随机的或呈有规则的,它们占有非常宽的频带或离散谱线,其辐射功率可从微瓦到兆瓦。据1998年国际电热联盟(UIE)的初步统计,世界范围内的工业、科学和医疗(ISM)设备的数量已达到一亿二千万台,并以5%的速度逐年递增,这些设备的输出功率多为千瓦(kW)或兆瓦(MW)量级,而且有相当数量的ISM设备工作在国际电信联盟(ITU)指定的频段之外,或者超过国际无线电干扰特别委员会(CISPR)对ISM设备所规定的辐射干扰极限值的要求,其功率泄漏及高次谐波将造成强烈的干扰。在一些工业发达国家,电子设备的数量每四至五年增加一倍,政府部门及军队都拥有大量电子设备,有些地方其电子设备非常密集,例如,无线电枢纽部一般都配备几十部甚至上百部的工作在不同频段的发射机。在战场上每平方公里约有几十部电子设备,在舰艇、飞机及坦克中其电子设备将更加拥挤。由于电子设备数量增多,密度加大,相互之间干扰问题日益严重。

2. 频谱资源有限,应用的频谱范围及数量日益扩展,所以工作频道拥挤,干扰日益严重。

虽然在理论上频谱范围可由 $f=0$ 至 $f\rightarrow\infty$,现代电子技术的工作频段已扩展到光波波段,但经常使用的频率多在50GHz以下,尤其集中于3kHz~15GHz的频率范围内。近三十年来,随着电子学的迅速发展,要求增加各种不同的无线电系统和设备,使越来越多的国家成为频谱的积极使用者,例如,美国空中交通无线电控制业务对频谱范围的要求,1980年比1968年增大三倍,按此预计1995年还要增大三倍。在1969年至1976年间,美国本土陆上移动式无线电通信设备的数量增大17倍,到1980年这个数量已经又翻一番。长期以来全世界的固定业务、移动业务和广播业务都密集地占用短波波段。1982年利用高频波段的广播发射机约有1500个,其中很大一部分发射机功率超过200kW,全世界发射时间超过每天17000小时的惊人数字,这个事实说明了频谱的过载情况。对频谱的大量需求使频谱的利用越来越向更高的范围发展,但仍不能缓解频道拥挤情况,某些业务无法从拥挤的较低频率转移到较高的频率范围,因此,大量的电子设备就不得不重复使用某些频段,使其相互干扰严重。

3. 电子设备的性能要求越来越高,这些要求的提高使相互间的干扰越来越严重,而抗干扰能力越来越降低。

首先,近年来发射机发射的功率电平有很大提高,雷达的发射功率提高了数十倍,其脉冲功率已达几十至几百兆瓦,一些军用电台的发射功率也提高了20~30倍,而接收机的灵敏度已提高到优于 10^{-12}W 。发射功率的提高使之对其他设备的干扰加重,灵敏度的提高使其抗干扰的能力下降,可想而知,大功率发射机对不希望接收其信息的高灵敏度接收机无疑将构成灾难性干扰。其次,电子技术正向集成化、数字化、密集化方向发展,要求高速度、高精度、小型化等,使之频谱扩展、宽频带工作,内部线路密度加大,这些因素都会引起系统内外干扰的增强。

由于上述原因,电磁干扰现象日益严重,恶劣的电磁环境往往使电子、电气设备或系统不能正常工作,甚至出现故障。这就促使电磁兼容技术的出现并迅速发展。因此,电磁兼容这一新的学科领域是由实践中提出,并在解决干扰的实际问题中不断地丰富和发展起来的,它是一门正在发展的应用性很强的综合性学科。从该学科的发展过程不难看出它有鲜明的实践性和广泛的应用性。

1.2.2 电磁兼容的发展是人类社会科技发展之必然

系统的外界干扰,取决于系统所处的电磁环境,而人为电磁环境最复杂的区域是城市,因为,现代城市不仅集中了人口,而且也集中了各种装置、系统及设备,其中有许多就是无线电辐射源,因此城市是辐射的集合体,向外辐射大量的电磁能量。根据有关理论模式的分析可知,城市中的电磁能量密度是与人口密度、每个人所占有的辐射源数及、每个辐射源的平均功率三者之积成正比的。这三个因素中的每一个因素,都是大致按指数律增加的。因此各种辐射能量的通量密度也会随着时间按照指数关系而增加,即

$$S = S_0 e^{(W_p + W_m + W_l)t} \quad (1.1)$$

式中, S_0 为常数,指数 W_p 、 W_m 和 W_l 分别表示辐射源的平均功率、人口密度和辐射源数增加的因素,是时间变数。

经有关组织的分析和预测,城市人口密度的年增长率为(1~3)%,单个辐射源平均功率的年增长率也为(1~3)%,每人占有辐射源的年增长率为(5~8)%,由公式(1.1)可知人为无线电辐射能量密度年增长率可达到(7~14)%。因此,城市中辐射能量密度每5~10年增加一倍。如果每年人为无线电辐射密度系数增长率趋势持续为14%,则下一个五年就会产生与过去的40年内的增长有同样结果。在以后的25年内,人为引起的能量密度将增长30倍,而再过24年,就将增长到1000倍。

电磁背景功率的增加会导致需要增加无线电发射机的功率。例如,在50年前,一台120kW长波发射机,其功率场强能覆盖某个国家。而现在,要想达到同样的效果,其功率就需增大17倍(达2MW)。因此,确保电磁兼容正变成越来越迫切和困难的事业。发射机功率竞相增大、社会的电子化和工业化的增长一起最终会导致现有的利用电信号的接收、传输和处理信息的系统的危机和崩溃。其后果将带来史无前例的大灾难。为了避免出现这种结果,这就要求人们控制其活动能力,不能让现存的发展趋势不加限制地继续发展下去,要求从组织上和技术上采取相应措施,以保护各系统的正常工作,所以电磁兼容的研究受到各国有关部门及专家的重视,近年来获得较快的发展,这是社会和科技发展的必然。

1.2.3 电磁兼容技术发展概况

电磁兼容是通过控制电磁干扰来实现的,因此该学科是在认识电磁干扰、研究电磁干扰

和对抗电磁干扰的过程中发展起来的。

电磁干扰是人们早已发现的古老问题,1881年英国著名科学家希维赛德发表了“论干扰”的文章,这是研究干扰问题最主要的早期文献。1833年法拉弟发现电磁感应定律,指出了变化的磁场在导线中产生感应电动势。1864年麦克斯韦引入位移电流的概念指出变化的电场将激发磁场,并由此预言电磁波的存在,这种电磁场的相互激发并在空间传播,正是电磁干扰存在的理论基础。1887年柏林电气协会成立全部干扰问题委员会,1888年赫芝用实验证明了电磁波的存在,同时该实验也指出了各种打火系统将向空间发出电磁干扰,从此开始了对干扰问题的实验研究。1889年英国邮电部门也研究了通信干扰问题,1934年英国有关部门对一千例干扰问题进行了分析,发现其中50%是电气设备引起的。随着广播等无线电事业的发展,使人们逐渐认识到应该对各种干扰进行控制。国际无线电干扰特别委员会(CISPR),以及其他有关学术组织及专业委员会的成立,开始了对电磁干扰问题进行世界性的有组织地对抗,这些组织对电磁干扰技术标准的制定和推广,对电磁干扰控制技术的发展和提高起了重大作用。

显而易见,干扰与抗干扰问题是贯穿于无线电技术发展的始终。电磁干扰问题虽然由来已久,但电磁兼容这一新的学科却是近代形成的。在干扰问题的长期研究中,使人们从理论上认识了电磁干扰产生的原因,明确了干扰的性质及其数学物理模型。逐渐完善了干扰传输及耦合的计算方法,提出了抑制干扰的一系列技术措施,建立了电磁兼容的各种组织及电磁兼容系列标准和规范,解决了电磁兼容分析、预测设计及测量等方面一系列理论问题和技术问题,逐渐在电子学中形成一个新的分支——电磁兼容。

80年代以来,电磁兼容已成为十分活跃的学科领域,许多国家(美国、德国、日本、法国等)在电磁兼容标准与规范,分析预测、设计、测量及管理等方面均达到了很高水平,有高精度的电磁干扰(EMI)及电磁敏感度(EMS)自动测量系统,可进行各种系统间的EMC试验,研制出系统内及系统间的各种EMC计算机分析程序,有的程序已经商品化,形成一套较完整的EMC设计体系,在电磁干扰的抑制技术方面,已研制出许多新材料、新工艺及规范的设计方法。一些国家还建立了对军品和民品的EMC检验及管理机构,不符合EMC质量要求的产品不准投入市场。

随着科学技术的发展,对电磁兼容和标准不断提出新的要求,其研究范围也日益扩大,现在电磁兼容已不只限于电子和电气设备本身,还涉及到电磁污染,电磁饥饿等一系列生态效应及其他一些学科领域。所以某些学者已将电磁兼容这一学科扩大,改称为环境电磁学。

在我国由于过去的工业基础比较薄弱,电磁环境危害尚未充分暴露,对电磁兼容的研究认识不足,使该项工作起步较晚,与国际间的差距较大,第一个干扰标准是1966年由原第一机械工业部制定的部级标准JB-854-66《船用电气设备工业无线电干扰端子电压测量方法与允许值》。近些年来,在标准与规范方面取得了很大进展,至今已制定国家标准及军用标准三十余个,为考核进出口电子、电气产品的干扰特性提供一定条件,使我国在电磁兼容标准与规范方面有了较大的进展。

随着我国经济建设及科学技术的飞跃发展,近年来对电磁兼容的研究出现了热潮。国家有关部门对电磁兼容技术十分重视,有关电磁兼容的学术组织纷纷成立,这些组织成立后,在EMC领域频繁的开展学术活动,举办了各种形式的EMC技术培训班及研讨班,在国际交往方面,多次派出代表参加国际EMC学术会议,了解了国际学术动态,吸取了国外的先进经验。国内不少单位在最近几年建设或改造了EMC实验室,在各地建立了测量中心,引进了较先

进的电磁干扰和电磁敏感度自动测试系统和设备,培训了一批能掌握全自动测试的工程技术人员,目前已具备按照国家标准、国家军用标准和国际其他一些标准进行EMC测量和试验的能力。

综上所述,电磁兼容已成为国内外瞩目的迅速发展的学科,预计二十一世纪它还将获得更加迅速的发展,一些著名专家曾预言,如果现在对电磁兼容学科还不予足够的重视,那么十年以后将会非常被动。在这方面我国确实应该引起注意,应投入足够的研究力量,加速研究步伐,改善测量设备,完善资料和数据积累,加强EMC管理,开展对各种系统的EMC预测分析和设计方法的研究,并将此项研究渗透于产品的设计、工艺等生产全过程,可以预料,在我国,电磁兼容这一学科领域的研究工作,将会得到飞跃的发展。

1.3 电磁兼容的基本概念

1.3.1 电磁兼容的含义

什么是兼容呢?一般来说这个术语描述一种共有状态,即能够共存,在这个意义上,它广泛用于各种自然的和人造系统中,例如,一条河中鱼的生态问题,这条河的水若被工厂排出的有毒废物所污染,鱼和工厂两个是不兼容的,如果对工厂排入河中的水采用有效的过滤装置,使水得到净化,鱼的生命便不受威胁,鱼和工厂两者则均可兼容。

电磁兼容限于与电磁场及其现象有关的那些学科、技术及生活的领域。我国军用标准(GJB72-85)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它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它设备(分系统、系统)因受其电磁发射而导致或遭受不允许的降级。”可见从电磁兼容的观点出发,除了要求设备(分系统、系统)能按设计要求完成其功能外还有两点要求:(1)有一定的抗干扰的能力;(2)不产生超过限度的电磁干扰。

某系统与它运行所处的电磁环境或与其它系统之间的电磁兼容性称为系统之间的电磁兼容性,影响系统间电磁兼容性的主要因素是信号及功率传输系统与天线之间的耦合。在给定的系统内部的分系统、设备及部件相互之间的电磁兼容称为系统内部的电磁兼容性,影响系统内的电磁兼容性的主要因素是导线间的电感、电容耦合,还有系统内公共阻抗耦合及天线与天线之间的耦合等。为了更好地理解电磁兼容的含义,最后我们引用国际电工技术委员会(IEC)所给出的定义:“电磁兼容是设备的一种能力,它在其电磁环境中能完成它的功能,而不至于在其环境中产生不能容忍的干扰。”

1.3.2 电磁兼容常用名词术语

电磁兼容作为一个新的学科领域必然定义一系列的名词和术语。由于电磁兼容要解决一个地区、一个国家甚至世界范围内的电子系统相容工作的问题,因此在相应的范围内必须有统一的名词术语,才能保证叙述及论证的统一性以及设计与测量结果的可比性。电磁兼容标准的一个重要的内容就是统一规定名词术语,我国国家军用标准GJB72-85规定了《电磁干扰和电磁兼容名词术语》,应注意的是这里定义的某些术语与电子工程中的习惯理解是不完全相同的,而且名词术语的说明和定义也只应用于本学科的范围。为了确切地掌握电磁兼容的