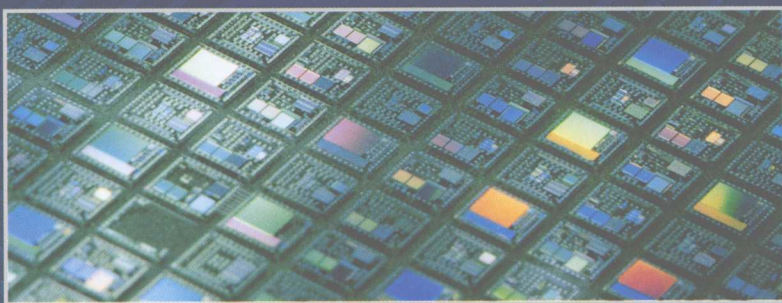


EMC

设计工程实务



◎ 马永健 编著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

EMC 设计工程实务

马永健 编著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书旨在从工程角度讲述一些实例解读及设计模板;阐明在产品研发过程中各个阶段(如原理图阶段、电源配电阶段、PCB设计阶段等)组织实施 EMC 的设计规范和设计规则;阐明产品的“研发—中试—量产”三个阶段中各环节的 EMC 工作重点、工作方法和解决问题的技巧;对 EMC 认证测试中出现的问题提出解决问题的途径及解决措施。针对实际工作中遇到的具体问题,着重于如何实施与解决,意在提高研发人员对产品 EMC 设计的三大手法(屏蔽、接地、滤波)的认识和理解;提高测试认证人员的测试、整改、认证的知识水平。

本书可供研发部主管、研发工程师、测试工程师、系统工程师在工程实践中参考,也可作为在校大学生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

EMC 设计工程实务 / 马永健编著. —北京: 国防工业出版社, 2008. 10

ISBN 978 - 7 - 118 - 05788 - 1

I. E... II. 马... III. 电磁兼容性—设计 IV. TN03

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 083574 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100044)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787 × 1092 1/16 印张 25 1/4 字数 626 千字

2008 年 10 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—5000 册 定价 48.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

前 言

电磁兼容是通过控制电磁干扰来实现的,是在认识电磁干扰、研究电磁干扰、对抗电磁干扰、管理电磁干扰的过程中发展起来的。

19世纪,电报电话开始进入人们的日常生活,电磁干扰问题随之引起人们的重视。英国科学家希维塞德在1881年发表了第一篇讨论电磁干扰的文章——“论干扰”,开创了电磁干扰理论研究的先河。为了进一步研究电磁干扰,1887年在德国柏林成立了国际上第一个专门研究电磁干扰问题的组织——德国柏林电气协会的“干扰问题委员会”。到了第二次世界大战,美国空军出于战争的需要,创立的国际上第一个电磁兼容标准32331——《A Suppressor, Electrical Noise, Radio Frequency》,将电磁兼容理念第一次标准化地纳入到电子产品的制造之中。美国麦道公司在1971年推出了世界上第一个电磁兼容分析预测软件——IEMCAP(Intra-system Electromagnetic Compatibility Analysis Program),更是将电磁兼容学科推到了一个新的高度。

进入20世纪70年代,电子工业的发展开始循着摩尔定律(Moore's Law)前进。摩尔定律预测:集成电路的集成度每3年增长4倍;特征尺寸每3年缩小1/4。或者说集成电路的逻辑密度每18个月将翻一番。受摩尔定律的支配,电磁干扰的三要素:骚扰源、耦合途径、敏感元件分别每3年增长4倍,从而使得电磁兼容问题以指数规律迅速增长。

21世纪是电子产品的新世纪,严酷的市场竞争使得人们已经不再可能执行多次产品创建、测试、再设计的循环过程了。如果电磁兼容问题不能从产品开始研发阶段到设计完成之前认真加以解决,产品的面市将无法正常进行。发达国家做过统计,企业在整个产品的设计过程中面临着各种各样挑战,其中尤以电磁兼容设计的占比最大,并呈逐年增加之势。企业为了保持竞争力,必须做好电磁兼容设计。如果电磁兼容问题影响研发进度并造成产品交货延迟,那将是企业付出的最昂贵的代价。目前,美国、法国、日本、德国等许多国家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的水平,有高精度的EMI和EMS自动测量系统,可进行各种系统间的电磁兼容试验,并研制出系统内和系统间的各种电磁兼容计算机分析程序,形成了一套较完整的电磁兼容设计体系。一些国家还建立了对军品和民品的电磁兼容检验和管理机构,不符合电磁兼容质量要求的产品是不准投放市场的。

在我国,电磁兼容问题开展的比较晚。第一个部级电磁干扰标准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》在1966年问世后,直到1983年才制定了第一个国家级的电磁兼容标准(GB/T 3907—1983)《工业无线电干扰基本测量方法》。2001年12月,为了应对日益国际化的需要,强化全民电磁兼容性意识,促使国内的电磁兼容技术向前发展,国家发布了《强制性产品认证管理规定》(China Compulsory Certification)——“3C”认证。

目前,我国正在逐渐从“中国制造”向“中国创造”转变,“创造”对中国来说,既是机遇,也是挑战。“创造”的核心是一种产品的设计能力,其中就包括电磁兼容设计能力。电磁兼容设

计能力已成为电子产品设计人员的一种基本技能。良好的电磁兼容设计可以使产品的各个模块彼此共存,不致引起相互骚扰;良好的电磁兼容设计可以使产品能够通过电磁兼容认证试验,从而正常地走向市场。纵观世界发达国家,无不以电磁兼容设计能力作为核心竞争力之一。在中国,大多数电子产品研发人员尚没有很好地掌握电磁兼容设计方法,同时公司研发系统也没有建立一套完善的电磁兼容流程。设计人员基本上是只注重输入/输出端口的滤波效果,对电路和结构的电磁兼容设计不太重视,导致多数产品在后期不能顺利地通过测试与认证,影响了产品的上市进度。如果能从设计流程的早期阶段就导入正确的电磁兼容设计策略,同时研发工程师掌握正确的电磁兼容设计方法,进行良好的电路及产品结构设计,从产品设计源头解决电磁兼容问题,将使得在产品获得电磁兼容认证、尽快进入市场等方面减少许多不必要的人力及研发成本,缩短产品上市周期。因而,提高电磁兼容设计能力已成为我国电子业界当前亟待解决的挑战之一。

本书的编写就是源于参加的大量的研讨班和在公司进行职工培训的心得,旨在通过一些成功案例的分析,以工程实践为基础,实施与解决实际工作中遇到的具体问题。第1章叙述了各种各样的骚扰源通过传导和辐射耦合方式对电气、电子设备造成的干扰,提出了对这些干扰进行建模分析的方法。第2章讲述了电气、电子产品的EMC研究方法,以实例解读方式介绍了国际国内比较系统流程化的电气、电子产品的EMC设计思路及如何使得EMC设计理念融入产品开发流程之中。叙述了EMC设计的基本过程,并对设计过程的几个关键技术点,提出了输入节点和输出节点。第3章详细分析了电阻、电感、电容及逻辑器件的R.L.C.频率响应特性,进行了元器件的EMI特性分析。第4章详述了PCB分区的必要性,以实例解读方式阐述了PCB分层设计的9条一般原则;列举了10款分层设计模板;阐述了35条PCB布局设计原则以及47条PCB布线设计原则;对多层PCB中的起重大抑制作用的镜像对消作用进行了详细讲述。第5章解读了为什么可以说良好的接地可以解决50%的EMC问题;以实例方式分析了各种各样的接地方式,阐述了接地和搭接的设计要点。第6章对时钟电路、高速电路、单板电源以及背板电路等关键电路进行了详细分析,介绍了传输线效应,阐明了保证信号完整性和电源完整性方法,并详细解读了关键电路的EMC设计模板。第7章详细解读了进行电场屏蔽、磁场屏蔽以及电磁屏蔽的方法和完成这些屏蔽作用所需用的材料的特性;列举了安装屏蔽材料所常用的结构形式和设计要点。第8章对电气电子设备的I/O电路的EMC设计进行了详细论述,详细分析了背板I/O口的结构、连接器感应以及互连电缆的传导耦合,并结合实例解读了抑制I/O口骚扰的措施。第9章重点介绍了PCB电路的滤波设计中,电容、磁珠的位置安排及其不同参数值的选用原则。在第9章的9.1节中,列举了大量的滤波电路参考图例。第10章通过实例介绍了瞬态骚扰抑制技术。第11章重点强调EMC认证试验中的注意事项。第12章对EMC认证试验中出现的问题,提出诊断和整改的流程和措施。

本书在编写过程中得到了北京邮电大学李玲教授和电子科学研究院黄照祥博士的帮助,在此表示衷心的感谢!

编者
2008年2月

目 录

第 1 章 电气、电子设备的电磁兼容性	1
1.1 电磁环境	1
1.1.1 自然电磁噪声源	1
1.1.2 人为电磁噪声源	3
1.1.3 有意辐射体	4
1.2 电磁骚扰的特性和耦合途径	4
1.2.1 电磁骚扰的特性	4
1.2.2 电磁骚扰的耦合途径	6
1.2.3 共模电流和差模电流	8
1.3 电磁干扰(EMI)对电气、电子设备的危害	11
1.4 电气、电子设备的电磁兼容性分析	14
1.4.1 电场、磁场	14
1.4.2 近场和远场	17
1.4.3 干扰耦合信号的频谱分析	19
1.4.4 骚扰信号对敏感设备的干扰	20
1.4.5 EMI 建模	21
1.4.6 电气、电子设备的 EMC 分级	22
第 2 章 产品 EMC 设计介入流程	23
2.1 电气、电子产品的 EMC 设计	24
2.1.1 EMC 的设计方法	24
2.1.2 EMC 的设计步骤	25
2.1.3 EMC 设计的理论基础和 EMC 管理	26
2.2 预测及解决 EMI 问题的流程	27
2.3 EMC 设计的基本过程	29
2.3.1 EMC 设计的措施	29
2.3.2 产品 EMC 设计的技术	29
2.3.3 EMC 设计与产品开发关系	30
2.4 系统级 EMC 设计	32
第 3 章 元器件的 EMC	36
3.1 电阻元件	36

3.1.1	电阻元件的 R、L、C 频率响应特性	36
3.1.2	电阻各项电性能参数特性及 EMI	37
3.2	电容元件	38
3.2.1	实际电容器的特性	38
3.2.2	实际电容对滤波特性的影响	39
3.2.3	温度对电容值的影响	40
3.2.4	电压对电容值的影响	41
3.2.5	电容器的种类、特性及选用	42
3.2.6	电容各项电性能参数及 EMI	49
3.3	电感元件	50
3.3.1	电感的 R、L、C 频率响应特性	50
3.3.2	电感各项电性能参数及 EMI	51
3.3.3	克服电感寄生电容的方法	52
3.3.4	共模扼流圈	52
3.4	铁氧体 EMI 抑制元件	54
3.4.1	铁氧体的特性	54
3.4.2	铁氧体的应用	57
3.5	有源器件和电磁骚扰发射的抑制	59
3.5.1	有源器件的敏感度特性与发射特性	59
3.5.2	ΔI 噪声电流和瞬态负载电流是传导骚扰和辐射骚扰的初始源	60
3.5.3	IC 封装的影响	62
3.6	逻辑器件	64
3.6.1	逻辑器件的频率特性	64
3.6.2	逻辑器件的电路设计	66
3.7	阻抗	69
3.7.1	导线的阻抗	69
3.7.2	公共阻抗耦合——阻性耦合	71
第 4 章	PCB EMC 设计技术	73
4.1	PCB 的原理设计	73
4.1.1	PCB 设计的准备工作	74
4.1.2	PCB 的分区	74
4.2	混合信号 PCB 的分区设计	76
4.3	PCB 分层设计	77
4.3.1	PCB 分层设计的必要性	77
4.3.2	PCB 分层设计	78
4.4	多层板设计	79
4.4.1	多层 PCB 分层共同原则	79

4.4.2	多层板布线层	79
4.4.3	PCB 分层设计模板	83
4.4.4	多层板设计中的镜像对消作用	85
4.5	PCB 布局设计	85
4.6	PCB 的高频辐射	91
4.7	PCB 布线设计	92
4.7.1	PCB 布线设计的 ESD 抑止准则	92
4.7.2	PCB 布线设计基础	93
4.7.3	PCB 布线设计的基本原则	95
4.7.4	布局布线技术的发展	100
第 5 章	EMC 接地设计技术	101
5.1	接地的概念及功能	101
5.1.1	接地的基本术语及其意义	101
5.1.2	接地的目的和要求	104
5.2	地回路干扰及其控制措施	104
5.2.1	接地公共阻抗产生的干扰	104
5.2.2	抑制地回路干扰的技术措施	105
5.3	安全接地	109
5.3.1	安全接地、接大地和大系统接地	109
5.3.2	设备安全接地	111
5.3.3	接零保护接地	112
5.3.4	雷击保护接地	112
5.4	信号接地	114
5.4.1	单点接地	114
5.4.2	多点接地	116
5.4.3	混合接地	118
5.4.4	悬浮接地	119
5.5	电子设备的接地	119
5.5.1	接地的分割	119
5.5.2	接地的基本原理	120
5.5.3	电子设备的单点接地	123
5.5.4	多层 PCB 的接地	125
5.5.5	电子设备的屏蔽接地	126
5.5.6	电子设备的接地准则	129
5.6	接地设计的思路及设计要点	130
5.6.1	地线中的干扰及消除	130
5.6.2	接地设计的思路	131

5.6.3	接地的设计要点	132
5.7	搭接	134
5.7.1	搭接的概念	134
5.7.2	搭接方法	135
5.7.3	搭接面处理及材料选择	136
5.7.4	良好搭接的一般原则	136
第6章	关键电路的 EMC 设计	139
6.1	时钟电路的 EMC 设计	139
6.1.1	高频时钟电路	139
6.1.2	阻抗匹配方法	142
6.1.3	减小时钟骚扰的新方法	142
6.2	高速电子线路	143
6.2.1	高速电子线路的信号完整性设计	143
6.2.2	避免传输线效应,实现信号完整性	148
6.3	单板电源部分的设计	151
6.3.1	单板供电系统	151
6.3.2	单板分布式供电系统电性能设计	153
6.3.3	电源导致的信号非理想回路	153
6.3.4	电源保护	155
6.3.5	电源滤波	156
6.3.6	开关电源 EMI 的抑制	158
6.4	电磁骚扰发射的抑制方法——电源完整性	162
6.5	背板设计	167
6.5.1	背板设计的基础	168
6.5.2	背板的分层与分区	172
6.5.3	背板的布线	172
6.6	关键电路的 EMC 设计模板	174
第7章	EMC 屏蔽设计技术	182
7.1	电磁屏蔽的概念	182
7.2	屏蔽效能	187
7.2.1	金属平板的屏蔽效能	188
7.2.2	多次屏蔽体的屏蔽效能	190
7.2.3	典型电子设备的屏蔽效能	190
7.3	屏蔽材料的特性	191
7.3.1	导磁材料	191
7.3.2	导电材料	192

7.3.3	薄膜材料与薄膜屏蔽	192
7.3.4	导电胶与导磁胶	193
7.4	屏蔽体的结构	193
7.4.1	电屏蔽的结构	193
7.4.2	磁屏蔽的结构	195
7.4.3	电磁屏蔽的结构	195
7.5	孔、缝泄露的抑制措施	196
7.5.1	机箱屏蔽分析	197
7.5.2	装配面处接缝泄露的抑制	198
7.5.3	电磁密封衬垫	200
7.5.4	通风冷却孔泄露的抑制	209
7.5.5	显示窗口泄露的抑制	214
7.6	电缆屏蔽附件及特殊屏蔽材料	217
7.6.1	电缆用屏蔽附件	217
7.6.2	电缆用屏蔽部件的类型	218
7.6.3	特殊屏蔽材料	219
7.6.4	塑胶件结构屏蔽设计	224
第8章	电子设备接口设计技术	225
8.1	PCB I/O 电路的 EMC 设计	225
8.1.1	PCB I/O 电路设计	225
8.1.2	PCB I/O 连接的结构设计	227
8.2	背板 I/O 电路的 EMC 设计	229
8.2.1	背板 I/O 电路的连接设计	229
8.2.2	背板 I/O 电路的结构设计	230
8.2.3	背板连接的设计经验	230
8.3	单板上的连接器设计	231
8.3.1	连接器的互感	231
8.3.2	连接器的串联感应产生 EMI	233
8.3.3	连接器的引脚电容和导线电容	234
8.3.4	降低连接器影响的措施	234
8.3.5	特殊连接器	236
8.4	互连电缆设计技术	237
8.4.1	电缆中的导体上的传导耦合	238
8.4.2	处在电磁场中的传输线和电缆	242
8.4.3	互连电缆的端接连接技术	243
8.4.4	电缆耦合干扰的抑制措施	244

第 9 章 EMC 滤波设计技术	249
9.1 EMI 滤波器	249
9.1.1 EMI 滤波器的工作原理及频率特性	249
9.1.2 滤波器的分类及其特性	256
9.2 反射式滤波器	258
9.2.1 低通滤波器	259
9.2.2 其他几种常用滤波器	263
9.3 吸收式滤波器	265
9.4 滤波连接器	267
9.5 铁氧体元件滤波	269
9.5.1 铁氧体的磁导率	269
9.5.2 铁氧体磁环和磁珠	270
9.5.3 铁氧体抑制元件的选用	273
9.6 电容滤波	275
9.7 电源线滤波器	276
9.7.1 电源线滤波器的典型电路	276
9.7.2 电源线滤波器的插入损耗的测量	280
9.8 数字信号线 EMI 滤波器	281
9.9 PCB 的滤波设计模板	282
第 10 章 瞬态骚扰及抑制技术	289
10.1 电快速瞬变脉冲群(EFT)	290
10.1.1 辉光放电和弧光放电	290
10.1.2 EFT 干扰产生的机理	290
10.1.3 EFT 的特性	291
10.1.4 IEC61000-4-4 EFT 的抗扰度试验	292
10.1.5 抑制 EFT 的方法	294
10.2 雷击浪涌	296
10.2.1 直击雷、感应雷与浪涌	296
10.2.2 雷击和瞬变脉冲电压	297
10.2.3 IEC61000-4-5(GB/T 17626.5)雷击浪涌的抗扰度试验	298
10.2.4 雷害的防护	299
10.3 电压跌落、短时中断和电压渐变	301
10.4 静电放电	301
10.4.1 ESD 的基本概念	301
10.4.2 静电放电的影响	304
10.4.3 IEC61000-4-2(GB/T 17626.2)静电放电抗扰度试验	305

10.4.4	防护静电放电影响的设计及措施	307
10.4.5	防静电的软件设计	314
10.5	电磁干扰隔离及抑制技术	316
10.6	抑制瞬态骚扰的器件	321
10.6.1	瞬态骚扰抑制器	321
10.6.2	气体放电管	322
10.6.3	氧化锌压敏电阻(MOV)	325
10.6.4	硅瞬态电压抑制二极管	328
10.6.5	TVS 晶闸管	330
10.6.6	几种瞬态干扰抑制器件的比较	331
10.7	浪涌保护实例	332
10.7.1	浪涌保护电路	332
10.7.2	常见手持设备的 ESD 保护对 TVS 的要求	335
10.7.3	PCB 布局保护配合	336
10.7.4	ESD 保护器件的典型应用	336
10.7.5	电路保护元件设计和结构发展趋势	338
第 11 章	EMC 测量方法	339
11.1	EMC 试验	339
11.1.1	EMC 试验概述	339
11.1.2	EMC 试验用测试场地	340
11.1.3	EMC 试验用测试设备	346
11.2	传导发射试验	355
11.3	辐射发射试验	357
11.4	谐波电流发射试验 IEC61000 -3 -2/4	358
11.5	静电放电抗扰性试验	359
11.6	辐射电磁场抗扰性试验(RS) IEC61000 -4 -3(GB/T 17626.3)	360
11.7	电快速瞬变脉冲群抗扰性试验(EFT/Burst) IEC61000 -4 -4	362
11.8	浪涌抗扰性试验(Surge) IEC61000 -4 -5	362
11.9	传导骚扰抗扰性试验(CS) IEC61000 -4 -6	364
11.10	工频磁场骚扰抗扰性试验(PFMF) IEC61000 -4 -8	368
第 12 章	EMC 故障诊断及整改技术	369
12.1	噪声源诊断分析的内容	369
12.1.1	电磁骚扰故障诊断的工作准备	369
12.1.2	电磁骚扰问题的诊断	370
12.1.3	EMI 和 EMS	371
12.1.4	近场探头	372

12.2	如何确定噪声源	374
12.2.1	共模和差模的分离测量	374
12.2.2	利用功率合成器分离差模和共模干扰	374
12.2.3	结构泄露诊断分析	376
12.2.4	电缆辐射诊断分析	377
12.2.5	器件噪声诊断分析	379
12.2.6	噪声解调与定位	380
12.3	EMC 整改技术	381
12.3.1	EMC 整改的概念	381
12.3.2	辐射发射超标的整改	381
12.3.3	常见测试频谱超标的整改方法	383
12.4	ESD 问题的整改	388
	参考文献	391

第1章 电气、电子设备的电磁兼容性

电磁兼容性(Electromagnetic Compatibility, EMC)的标准定义为:设备或系统在其电磁环境(Electromagnetic Environment, EME)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(Electromagnetic Disturbance, EMD)的能力。在电磁环境中,存在着大量的与有用信号叠加组合在一起的一种明显不传送信息的时变电磁现象——电磁噪声(Electromagnetic Noise, EMN)。这个电磁噪声电平值超过一定数值后,会产生引起设备、传输通道或系统性能下降的电磁干扰(Electromagnetic Interference, EMI)。电气、电子设备 EMC 设计的目标就在于达到 EMC 标准花费最少,找到性价比最优的方式,来降低受试设备(Equipment Under Test, EUT)对外发射电磁骚扰的电磁噪声电平,并提高受试设备避免性能降低的能力的电磁敏感性(Electromagnetic Susceptibility, EMS)。

1.1 电磁环境

明确电磁环境是提出和确定设备或系统 EMC 的指标要求,实施 EMC 的前提。只有首先明确和依据预期的电磁环境,确定和遵循正确的设计、研制、试验、生产、安装、使用和维修的要求和步骤,并在整个寿命期内采取充分的管理保障措施,才能达到所希望的水平。

在进行 EMC 设计之前,必须分析预期的电磁环境,确定电磁环境电平;并从分析电磁骚扰源、耦合途径和敏感设备着手,做好电磁兼容设计的前期工作。

电磁环境由各种电磁骚扰源产生。因此,电磁环境即设备、分系统或系统在执行规定任务时,可能遇到的各种电磁骚扰源的数量、种类、分布,以及在不同频率范围内,功率或场强随时间的分布等有关电磁作用状态的总和。

电磁骚扰源分自然的和人为的两种。在大多数情况下,自然辐射源的电平远低于人为辐射源的电平。大多数的人为发射占有很宽的频率范围,属于宽带发射;而有意发射,例如,无线电和电视广播,则称为窄带发射。窄带电场强度的度量单位为 V/m,用分贝表示为 $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$;宽带电场强度的度量单位,用分贝表示为 $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}/\text{kHz}$ 或 $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}/\text{MHz}$ 。在军用标准中一般采用的电场强度单位是宽带电场强度单位。在宽带噪声的宽带测量中,在接收机带宽中会捕获到许多随机的或与谐波相关的谱线。而在窄带测量中,在接收机带宽中只能捕获到一根谱线。因此,将窄带噪声源的量值与宽带噪声源的量值直接加以比较是不正确的。

1.1.1 自然电磁噪声源

在电磁环境中,自然界的电磁噪声源主要是大气噪声和宇宙噪声。图 1-1 显示了大气噪声、宇宙噪声和热噪声的电平。

在图 1-1 中,曲线 A 表示宇宙噪声,它是由天空背景射电噪声构成的噪声源的复合物,是由电离辐射和同步辐射(它经历每日的变化)以及太阳射电噪声形成的,太阳射电噪声随着太阳活动和太阳耀斑的增加而显著地增加。而来源于月亮、木星和仙后星座-A 的宇宙噪声则稍弱一

些。曲线 B 表示设计良好的接收机内部的热噪声电平,曲线 C 表示来自地球表面的理论热背景辐射电平,曲线 D 表示大气无线电噪声,曲线 E 表示在北极地区测到的大气无线电噪声场强。

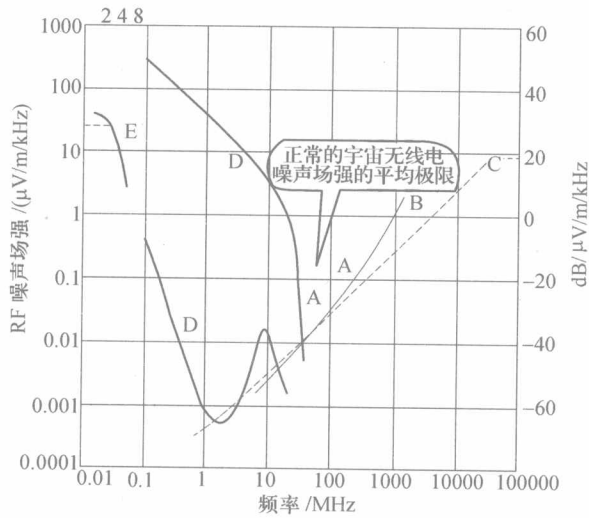


图 1-1 大气噪声、宇宙噪声和热噪声电平

A—正常的宇宙无线电噪声场强的平均上限值和下限值; B—精心设计的接收机内部相应的噪声场强; C—在 300K 温度时由“黑体”辐射产生的噪声场强; D—大气噪声场强的上限值和下限值; E—在北极实测的大气无线电噪声场强。

由脉动的天然大气噪声产生的 EMI 对无线电通信的影响称之为“天电干扰”。大气噪声主要是由夏天的局部雷暴和冬天的热带地区雷暴产生。雷电噪声的频谱在 50MHz 以下都有分布,主要能量分布在 100kHz 左右。在频率为 100kHz 时,它的场强电平范围从最大值 $108\text{dB}\mu\text{V}$ (0.25V)/ m/MHz 到最小值 $-6\text{dB}\mu\text{V}$ ($0.5\mu\text{V}$)/ m/MHz ,对地球上 20MHz 以下的无线电通信影响最大。除了雷电放电外,大气中的尘埃、雨点、雪花、冰雹等微粒在高速通过的飞机、飞船表面,由于相对摩擦运动而产生电荷迁移从而沉积静电,当电势升高到 1MV 时,就发生火花放电、电晕放电。这种放电产生的宽带射频噪声频谱分布在几赫到几十兆赫的范围内,会严重影响高频、甚高频频段的无线电通信和导航。由于在宽广的频率范围内产生着各种自然发射,所以在高频/甚高频/特高频/超高频 (HF/VHF/UHF/SHF) 的传输中,它们都可能引起 EMI。

图 1-2 给出了大气噪声源和宇宙噪声源相对强度的比较以及辐射频率的范围。

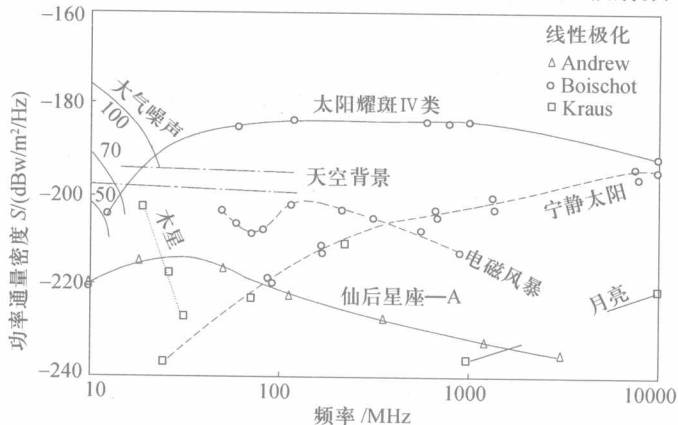


图 1-2 宇宙噪声源电平比较

1.1.2 人为电磁噪声源

人为的电磁噪声源主要如下:

(1) 由设备工作时产生的连续干扰,主要产生辐射或传导干扰。像广播站、高功率雷达、电动机噪声、固定和移动通信、计算机、显示单元、打印机、高重复频率点火噪声、交流/多相电力整流器以及太阳系和宇宙无线噪声等属于连续电磁干扰源,它们是固定频率的源的噪声源。

(2) 由电磁瞬态过程产生的脉冲干扰,具有很宽的频谱,向空间辐射干扰。像雷电、核电磁脉冲、电力线火花、开关和继电器、电焊设备、低重复频率点火噪声、电气电力点火、人类静电放电等属于脉冲电磁干扰源,它们是大频谱范围的噪声源。

(3) 与机械运动有关的间接干扰源,例如,车、船和飞机的壳体与空气中的尘粒、烟尘、雪片等摩擦起电生成的干扰。

(4) 金属的接触面具有复阻抗特性,在振动、颠簸、撞击时,接触阻抗是可变的,外界强辐射场产生感应电流,由于接触阻抗的作用会产生二次辐射,成为接触干扰源。辐射频谱为原辐射频谱加上接触阻抗变化的调制,产生附加频率分量。当接触的金属面停止运动时这种干扰便会消逝。

表 1-1 中列出了一些无意发射设备产生骚扰的原因以及骚扰的特点。

表 1-1 几种无意发射设备产生骚扰的原因与特点

设备	产生骚扰原因	特 点
电动机	(1) 火花放电; (2) 滑动接触噪声(整流子电机中电枢与整流子间的滑动)	在电动机的接线端子上传导干扰电压可达几十微伏至几百毫伏,对于金属壳的电动机,在 1m 距离处辐射干扰所引起的感应电压可达 3mV ~ 5mV,这类干扰具有较宽的频带
照明设备 (荧光灯、日光灯等)	(1) 气体放电; (2) 弧光放电; (3) 辉光放电; (4) 伴随放电产生的高频振荡	荧光灯工作时,除放电发光产生放电干扰外,两极板还会产生几千赫左右的高频振荡,在电源端子引起的传导干扰电压可达几十微伏,甚至几十毫伏,同时,荧光灯本身及电线还将产生辐射干扰。日光灯在工作时将产生电击穿脉冲,从而造成射频辐射干扰,也可通过电线注入公共电源造成传导干扰
电力输电线	(1) 电晕放电(由导线表面场梯度引起空气电离); (2) 由于绝缘子断裂、绑扎脱落等偶发的接触不良所产生的微弧以及受污染的导线表面上的火花	一般只出现在高于 100kV 的线路上,通常不会影响调频和电视的接收,只对中、长波的接收有影响。但在某些情况下,当电力线工作在大于 2kV/cm 的电场梯度下,而天气又非常恶劣时,也会对电视的接收构成干扰,这个仅限于 1 频道(40MHz ~ 60MHz)
电气化铁路	(1) 接触网和变电所等高压供电系统产生干扰; (2) 电弓脱离接触产生的火花干扰; (3) 电动机整流子和电刷之间的火花放电; (4) 交流电气化铁路的真空开关产生的冲击电压和冲击电流	(1) 电气列车在牵引状态及惯性状态干扰电平没有明显差别; (2) 列车速度较高时,由于电弓的离线率增加,产生的干扰电平较高; (3) 列车进站时,由于站内道岔多,使车体颠簸晃动离线率升高,干扰电平也随之增加; (4) 电气火车的各种干扰中,以电弓脱离接触产生的火花干扰最为严重
公共电源	(1) 电源内阻不为零; (2) 电源的通、断产生的瞬态冲击电流、电压; (3) 传导干扰通过电源线向电源注入干扰	这是一种最严重的传导干扰源,由于市电电源是公用的,而且电源内阻不等于“零”,尤其是在高频频段,电源除向设备提供有用的电能外,同时也提供了无用的成分。这些无用的成分通过对称的方式以及不对称的方式进入设备,从而构成了干扰。这些无用的成分可能是十几伏的低频干扰信号,也可能是几伏的高频干扰信号,还可能是数百伏或千伏左右的尖峰脉冲干扰信号以及衰减振荡形式的干扰信号

1.1.3 有意辐射体

除了无意发射,电磁环境中也充斥着来自无线电、电视和雷达发射机的有意辐射,这些有意辐射体都有可能干扰那些不作任何形式接收的设备以及可调谐到不同频率的收音机,其中一种引起 EMI 最常见的原因是无线电发射机产生的电磁场。

无线电发射属于窄带发射,其基频连续波(CW)的谐波辐射是有限的。若这些谐波被调制,则会导致边带也产生辐射。除了与基频有关的频率外,发射机也可能辐射本机震荡噪声或在发射机各级产生的宽带噪声。发射天线的辐射场强与距离、发射机的输出功率、天线的方向性、天线与测量点之间的相对高度、反射的距离或插入的吸波材料及建筑物等因素有关。来自发射机的杂乱噪声、宽带噪声以及谐波相关的噪声的合成一般至少应低于基波 70dB。

在我国香港,在两栋屋顶上安装了贝尔蜂窝电话天线的公寓大楼上进行测量,在 880MHz 频段上的电场强度分别是 7.86V/m 和 6.48V/m,阳台上的最大电场强度分别达到 12V/m 和 12.9V/m。若是在家庭住宅里安装了业余无线电发射机,屋顶上安装了天线,其室内测到的环境电场强度可达 30V/m。5W 收发机在 823MHz 上距收发机(步话机)12cm 处产生的电场强度高达 55V/m。在美国,所有城市中的居民平均暴露值是 0.137V/m,99.9% 的居民暴露在 1.94V/m 以下的电场强度中。

1.2 电磁骚扰的特性和耦合途径

1.2.1 电磁骚扰的特性

按照电磁骚扰能量的频率分布特性,可以确定其频谱宽度。在连续波骚扰中,交流声骚扰的频谱宽度最窄;在脉冲骚扰中,单位脉冲函数的频谱宽度最宽。一般而言,窄带骚扰的带宽只有几十赫,最宽只有几百千赫。宽带骚扰的能量分布在几十兆赫至几百兆赫,甚至更宽的范围内。有意发射源的骚扰能量的频率分布,可根据发射机的工作频带及带外发射等特性得出;而对于无意发射源,则需要用统计规律来得出经验公式和数学模型。图 1-3 给出了有记录以来电磁频谱的带宽变化,截止目前,电磁带宽最高已达到 300GHz。表 1-2 中列出了电磁骚扰源的频谱特性,表 1-3 中列出了电磁骚扰的发射频谱。

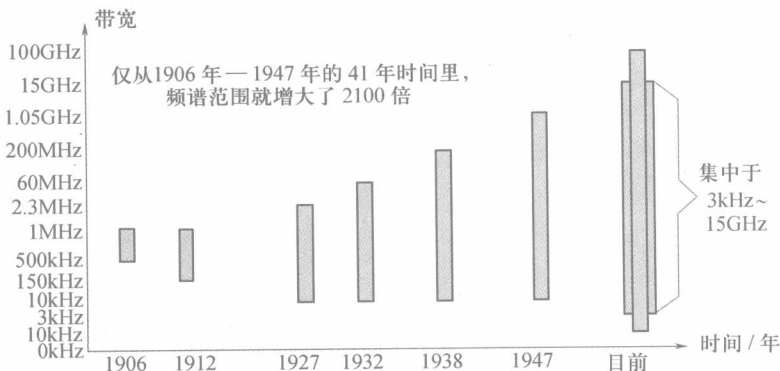


图 1-3 电磁频谱带宽变化示意图