



国家出版基金项目  
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

舰 | 船 | 现 | 代 | 化

# 电磁兼容性原理

周开基 赵刚 编著



HEUP 哈尔滨工程大学出版社  
Harbin Engineering University Press



国家出版基金项目  
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

舰船现代化

# 电磁兼容性原理

周开基 赵 刚 编著

哈尔滨工程大学出版社

## 内容简介

本书主要内容包括电磁兼容基本原理和概念、电磁兼容预测和分析方法、电磁干扰控制技术、电磁兼容测量与试验技术、电磁兼容标准。

全书归纳了电磁兼容学科近年来新进展和前沿课题,内容翔实,论述清晰,说理透彻,紧密结合工程实际。

本书可供高等工科院校电子、电气工程专业研究生及相关专业人员参考使用。对于从事电子、电气工程的科技人员也是一本系统、实用的工具书。

## 图书在版编目(CIP)数据

电磁兼容性原理/周开基,赵刚编著. —哈尔滨:  
哈尔滨工程大学出版社,2012. 12  
ISBN 978 - 7 - 5661 - 0495 - 3

I. ①电… II. ①周… ②赵… III. ①电磁兼容性  
IV. ①TN03

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 298281 号

---

出版发行 哈尔滨工程大学出版社  
社 址 哈尔滨市南岗区东大直街 124 号  
邮政编码 150001  
发行电话 0451 - 82519328  
传 真 0451 - 82519699  
经 销 新华书店  
印 刷 黑龙江省教育厅印刷厂  
开 本 787mm × 1 092mm 1/16  
印 张 32  
字 数 780 千字  
版 次 2012 年 12 月第 1 版  
印 次 2012 年 12 月第 1 次印刷  
定 价 170.00 元  
<http://press.hrbeu.edu.cn>  
E-mail: heupress@hrbeu.edu.cn

---

# 前 言

电磁兼容性是一门跨学科的工程实践性强的年轻学科,在我国仅有几十年的历史。它主要研究电子、电气设备之间,它们与环境之间的兼容性,它的理论是建立在电磁场理论、电路理论的基础上。电子、电气设备既是依靠电磁能工作,当它们在一起时相互间的电磁耦合是避免不了的;电子设备总处于一个空间环境内,它们与环境之间也存在电磁能量的耦合,要保证电子设备与其他设备、与环境兼容地运行是一项困难的事情。随着电子技术不断发展,电磁频谱资源与物理空间都是有限的,电磁兼容(EMC)将是一个愈来愈复杂而又无法回避的问题。本书主要从EMC这门学科的基本原理,主要的研究领域和基本的方法上作一个全面、深入的阐述。EMC在国外已有半个世纪以上的发展历史,其研究领域主要是在EMC预测与分析、电磁干扰(EMI)的控制技术、EMC测量与试验、EMC标准与规范四个方面。本书第1章综述EMC的发展历史、EMC的基本概念、主要研究领域;第2~4章阐述EMC预测的基本方法,包括传导和辐射的机理与预测模型、场-线耦合机理与模型、计算电磁学(矩量法、时域有限差分法、有限元法、高频法等)在EMC预测中的应用;第5~10章研究经典的EMI控制技术(接地、屏蔽、滤波)、光纤通信系统中的EMC、静电放电(ESD)和频谱利用;第11章研究EMC测量技术;第12章阐述EMC标准,第13章给出本书理论的几个工程应用示例。EMC由于是横断学科,涉及范围非常广泛,近年来国内有不少EMC的书籍出版,本书立足于选取国内外EMC近十年来的最新进展作为素材,并且在阐明原理、概念的基础上紧密结合工程应用的问题。限于篇幅,对一些EMC的常用方法和一般概念就不一一罗列,读者可从很多EMC著作和手册中查阅。

本书由周开基和赵刚编著,各章节分工如下:第1章赵刚;第2,3,5章,11章11.4~11.5节,12章及13章13.1,13.4,13.5节周开基;特邀东南大学计算电磁学研究中心徐金平、崔铁军、洪伟三位教授编写了第4章;第6,7,8章及11章11.1~11.3节张坤元;第9章郑生全;第10章李国成;第11章11.3~11.6节王海婴;第13章13.2~13.3节王荣成。参加全书统稿的有邹忠栾、宋东安、宋文武、易学勤。施海峰担任全书初稿的文字录入和插图工作。

限于时间仓促,水平有限,书中会有不少疏漏甚至谬误,恳请国内各位同行不吝指教。

编著者

2012年3月

# 目 录

<b>第 1 章 导论</b> .....	1
1.1 引言 .....	1
1.2 电磁环境 .....	1
1.3 EMC 的发展历史 .....	1
1.4 电磁干扰和电磁兼容性概念的定义 .....	4
1.5 实际经验与相关事项 .....	6
1.6 频谱管理 .....	10
1.7 电磁干扰和电磁兼容性综述 .....	12
<b>第 2 章 辐射和传导发射</b> .....	13
2.1 引言 .....	13
2.2 辐射发射 .....	13
2.3 传导发射 .....	23
<b>第 3 章 场线耦合</b> .....	34
3.1 引言 .....	34
3.2 双线传输线 .....	41
3.3 用导电地面作回路的单导线传输线 .....	61
3.4 传输线网络 .....	75
3.5 多导体传输线 .....	76
3.6 场对天线耦合问题的关系 .....	77
<b>第 4 章 计算电磁学在电磁兼容中的应用</b> .....	80
4.1 引言 .....	80
4.2 矩量法 .....	82
4.3 快速算法 .....	99
4.4 时域有限差分法 .....	112
4.5 有限元方法 .....	121
4.6 高频方法 .....	144
<b>第 5 章 接地与搭接</b> .....	162
5.1 引言 .....	162
5.2 EMI 控制的接地与搭接 .....	162
5.3 安全控制的接地与搭接 .....	173
<b>第 6 章 屏蔽</b> .....	187
6.1 引言 .....	187
6.2 屏蔽的基本分析技术 .....	187
6.3 屏蔽的传输理论 .....	191

6.4	设计数据 .....	200
6.5	材料电特性的测量技术 .....	209
6.6	设计用的列线图 .....	211
6.7	非均匀屏蔽的设计原则 .....	215
6.8	多层屏蔽 .....	219
6.9	频率范围的扩展 .....	220
6.10	谐振效应 .....	221
6.11	一些特殊要求的设计 .....	221
6.12	屏蔽室的变异 .....	229
<b>第7章</b>	<b>滤波 .....</b>	<b>232</b>
7.1	引言 .....	232
7.2	主要指标 .....	232
7.3	S-平面和单极点滤波器 .....	233
7.4	波特图法 .....	236
7.5	多极点网络 .....	241
7.6	铁氧体元件 .....	249
7.7	电流传输模型 .....	257
7.8	电源滤波器 .....	266
<b>第8章</b>	<b>光纤通信系统的 EMC .....</b>	<b>276</b>
8.1	引言 .....	276
8.2	光纤的分类和特性 .....	276
8.3	光纤的基础知识 .....	280
8.4	光通信系统中的本征噪声源 .....	286
8.5	光通信系统中的电磁干扰(EMI) .....	298
8.6	简单分析金属线飞行系统中的光纤应用 .....	304
<b>第9章</b>	<b>静电放电 .....</b>	<b>315</b>
9.1	引言 .....	315
9.2	静电放电过程 .....	315
9.3	ESD 的电流波形和辐射场 .....	318
9.4	ESD 的威胁机理 .....	326
9.5	ESD 的基本防护和控制 .....	327
9.6	ESD 测试程序 .....	334
<b>第10章</b>	<b>频率指配和频谱保护 .....</b>	<b>338</b>
10.1	引言 .....	338
10.2	电磁频谱 .....	340
10.3	频率的划分和频率的指配 .....	342
10.4	频谱保护方法 .....	355
10.5	综述 .....	363

---

---

<b>第 11 章 EMC 测量</b> .....	364
11.1 引言 .....	364
11.2 主要的 EMC 测量设施 .....	364
11.3 EMC 测试设施的理论和设计 .....	365
11.4 EMC 测试环境和测量不确定度 .....	388
11.5 利用 EMC 测试设施 .....	396
<b>第 12 章 EMC 标准</b> .....	404
12.1 引言 .....	404
12.2 民用 EMC 标准 .....	404
12.3 军用 EMC 标准 .....	431
<b>第 13 章 EMC 工程应用示例</b> .....	454
13.1 分散接地对辐射发射的影响 .....	454
13.2 长距离传输线的场耦合 .....	456
13.3 设施的电磁脉冲防护 .....	461
13.4 没有进行 EMC 设计引起的核设施中的误报 .....	464
13.5 手机的近场场强计算 .....	466
<b>参考文献</b> .....	503

# 第 1 章 导 论

## 1.1 引 言

电气、电子和机电设备共处一个有限空间内,它们各自不应产生太大的电磁干扰而影响其他设备正常工作,同时也应具有一定的抗干扰能力,以承受其他设备对它的干扰。它们与周围的环境,一方面不应过分污染环境,同时也应承受环境中自然的和人为的干扰。电磁频谱是一项有限的资源,电子设备尤其是无线电设备必须相互协调,合理使用这一资源。所有这些,本质上都是设备相互间通过电磁能量的作用产生的效应,电磁兼容性这门学科就是研究这些相互作用的机理,寻求它们能兼容工作的途径。本章作为全书的开头,主要讨论电磁环境,电磁兼容性(EMC)学科的发展历史,EMC 的基本概念,EMC 的主要研究领域和发展趋势。

## 1.2 电 磁 环 境

电磁环境是我们生活的这个世界的一部分,各种装置,诸如无线电和电视广播台、通信发射机、雷达和导航设备,在它们的正常运行中都辐射电磁能量。这些是电磁能量“有意”地辐射到环境中。还有很多装置,譬如汽车点火系统、工业控制设备、电焊机,也辐射电磁能量到环境中,显然它们是“无意的”辐射。此外,自然中的雷电、宇宙无线电噪声、太阳黑子辐射也是电磁环境的组成部分。研究电磁环境的特性是 EMC 最基本的内容之一。

## 1.3 EMC 的发展历史

### 1.3.1 第二次世界大战前

人们认识电磁环境的干扰并予以重视是在 20 世纪 20 年代出现了无线电广播后。无线电噪声干扰的后果导致美国全国电灯协会和全国电气制造协会建立技术委员会,对无线电噪声的干扰进行考察。当时的目标是推动测量技术和性能的标准研究。20 世纪 30 年代这些工作的成果是出版了一些技术报告、测量方法的文件和测量仪表的发展,包括测量架空电力线电场强度的方法、无线电广播电台产生的场强的测量、测量无线电噪声和场强的仪表研制,确定无线电噪声允许限值的数据库。

在大西洋的另一边,几乎是同一时间,欧洲的几个国家开始出现无线电干扰(也叫做电磁干扰(EMI))各个方面的技术论文。这些论文不仅调查了无线电发射产生的电磁干扰,也调查了接收无线电信号遇到的干扰。1934 年,英国有人分析了 1 000 多起无线电干扰的投诉,发现这些干扰是由电动机、电子开关、汽车点火器具的运行产生的;还观察到电动牵引



和输电线也能产生干扰。在欧洲,人们认识到,无线电干扰是值得国际关注的协定的技术研究领域,因而,在无线电干扰这一问题的国际合作是必要的,因为无线电发射不分地区和国界,更进一步地说,使用电动机之类的各种器具除了在生产的国家投入市场和使用之外,还可能在其他许多国家投入市场和使用,因此这些装置必须符合所有相关国家的性能标准。20世纪30年代,国际电工委员会(IEC)和国际广播协会联手研究相关的技术问题,从而在1933年形成了国际无线电干扰特别委员会(CISPR),并在1934年召开了CISPR的第一次会议。CISPR最初研究的两个重要问题是无线电干扰的界限值以及测量这种干扰的方法。在以后的两年中,发展了测量无线电干扰的方法和频率在160至1605 kHz之间的测量仪器。那时,CISPR的第一批出版物所规定的干扰界限值提出了信噪比为40 dB,调制度为20%,场强为1 mV/m的基准。

这一时期的重要里程碑简述如下:

- (1) 1940年公开发表了测量无线电噪声方法的一篇报告(在美国);
- (2) 公开发表了CISPR会议录,以及从1934到1939年的RII-8报告。RII-8报告提供了测量接收机设计、人工电源网络、场测量等数据;
- (3) 频段为0.15~18 MHz的无线电噪声和场强计的规范;
- (4) 无线电广播场强和高架电线附近的无线电噪声场强的实际测量;
- (5) 电气设备的传导无线电噪声测量方法的研究,以及测量频率范围在160~1605 kHz内的人工电源网络;
- (6) 用于上述测量的测量接收机、无线电噪声场强仪及其他仪器的设计和生产。

### 1.3.2 第二次世界大战及之后的25年

第二次世界大战的爆发中断了对无线电噪声的研究和控制。战争的几年间,CISPR支持下的技术工作完全停止了,但同时也产生了新的推动力。

随着二战中军队使用无线电通信和雷达设备的兴趣扩大,军队对无线电干扰的关注也变得越来越强烈。他们也高于正常无线电广播频率的频段感兴趣。军队的这些兴趣使军事标准得到了发展,并且在20世纪40年代,20 MHz以下电磁干扰的可靠测量仪器也得到了发展,在20世纪50年代上升到30 MHz,并在20世纪60年代上升到1000 MHz。从一开始,对军事性能标准的需求就更加迫切。在航天和卫星技术中,电磁干扰的概念和抗干扰的有效步骤也是极为重要的。这导致了許多务实的技术工作,然而这些工作的结果保密了很长时间。

二战后CISPR会议重新开始。这时,美国、加拿大和澳大利亚加入了CISPR会议。CISPR讨论会成为在无线电干扰测量方法和测量工具上达成一致的技术聚会。高频的使用增多,推动了测量方法、标准体系和高频仪表的发展。越来越多的亚洲国家和世界其他地区的国家,以及几个国际组织(例如国际无线电通信咨询委员会),由于对无线电科学的兴趣,也开始参加CISPR会议。由于国际上加入和从事的技术领域的增多,CISPR会议成为在电磁干扰方面增强国际理解和合作的重要媒介。因此,在这一讨论会上发展了测量技术和用于高频的详细实验规划;同时,也讨论并通过了频率达到1000 MHz的测量方法的详细步骤。

随着二战后无线电通信的非军事应用,电磁干扰与无线电通信产品设计原理的结合变得明显了。因此,包括干扰机制和它们的影响、测量技术和使电磁干扰最小化的设计方法等几个主要技术,成为世界许多地区包括美国和欧洲国家认真研究的课题。这一时期完成了

许多实际的某些电气、电子设备和系统发射的射频噪声测量。作为 CISPR 中商议的技术背景的一部分,对无线电和电视、传输线、家用器具、机动车辆和工业/科学/医学(ISM)器具产生的电磁噪声进行了详细的测量、报告,并在 CISPR 会议上进行了广泛的讨论。开始强调的是在测量方法和使用工具的细节上达成一致;而将性能界限值这一更难的课题推后处理。随后各国管理机构例如美国的联邦通讯委员会(FCC)、大不列颠联合王国的英国标准机构(BSI),开始发布适用于他们各自国家的干扰界限值。

这一时期发展中的重要里程碑简述如下。

(1)1945年,20 MHz 以下的无线电干扰测量方法的第一个陆海军联合标准 JAN - I - 225(在1946年度为63.1文件);1963年覆盖30 MHz的测量叫做C 63.2的修改过的标准;1964年覆盖1 000 MHz频率的仪器的标准C 63.3。

(2)1967年公开发表美国军用标准 MIL - STD - 462“EMI 特性测量”;1968年公开发表 MIL - STD - 461“控制电磁干扰的电磁发射和敏感度要求”。

(3)CISPR 将测量技术和使用工具(非军事专用)进一步标准化,1958年覆盖频率波段为30 MHz,1961年为300 MHz,1968年为1 000 MHz。

(4)发明了测量频率为30至300 MHz时家用器具电磁发射的铁氧体卡钳方法。

(5)1967年CISPR公开发表的CISPR - 4出版物——“频率300至1 000 MHz的测量装置标准”和CISPR - 5除准峰值检波器外的其他检波功能的无线电干扰测量仪器。

(6)正式成立了包括测量方法和ISM设备、电源线、汽车、无线电/电视接收机以及家用器具的干扰源在内的技术信息组织。

(7)1968年公开发表诸如联邦通讯委员会等机构的关于电磁干扰的国家管理措施,即FCC规则和规章第二卷第十八部分“工业、科学和医学设备”。

### 1.3.3 过去的40年

在近40年内,电力和电子仪表工程技术领域发展十分迅速,主要的发展是在数字计算机、信息技术、仪表、电信和半导体技术领域。在所有这些领域中电磁噪声和抑制电磁干扰技术都占有重要地位。在电磁噪声领域,世界各国已经进行了大量的技术工作。

对CISPR 16号出版物深入研究,就会发现它是综合了多种测量方法和电磁干扰的推荐界限值而形成的一个自成体系的文件。在CISPR中发表的这项研究覆盖了无线电和电视接收机,工业、科学、医学仪器,汽车和荧光灯的电磁噪声和它的测量。随着信息技术和数字电子产品的相应发展,针对20世纪80年代这项新出现的重要技术,CISPR也推出了CISPR 22号出版物,它覆盖了信息技术设备。

军用设施对电磁噪声领域的研究也引起电磁干扰以及测量与控制干扰技术领域的长足进步。理解了EMI和达到电磁兼容性的重要性,就导致该项研究直接应用于各国的军事领域,颁布了重要的军用标准 MIL - STD - 461 和 MIL - STD - 462。在一些国家陆海空三军都发布了自己的限制电磁干扰的标准。除了基本的军用标准 MIL - STD - 461/462/463,美国军队也发表了几项其他标准,包括诸如雷达、飞机电源、空间系统、海军平台、移动通信等领域的系统电磁兼容性和各种设备的设计和性能要求。

在世界范围内数字技术的进步,包括工业自动化的应用,在20世纪80年代极大地影响了和电磁噪声相关问题的的发展。数字设备和仪器对电磁噪声非常敏感是因为这些设备和仪器都不能区分信号和瞬态噪声,它们易受电磁噪声的干扰而产生故障。同时,数字电路和设

备产生了大量的电磁噪声(这是一种重要的宽带噪声,它产生于数字信号的极短脉冲上升时间)。用于数字电路和设备的时钟频率也会产生电磁噪声。数字电子设备使固态器件和集成电路有更广泛的应用。固态器件和集成电路更容易被瞬变电磁干扰所破坏。因此,为了避免灵敏的半导体设备被电磁环境干扰,特殊的设计和工程方法是很必要的。在过去30年内此领域已受到相当大的关注,并在全世界公布了大量论文。关于这些技术和方法的讨论仍然在国内和国际会议上占有重要地位。

一些国家为各种电气和电子设备发射的电磁噪声规定了界限值,在投放市场之前这种设备和仪器必须经受合格性检测。因此,美国的FCC、德国的FTZ组织、英国的标准协会、日本的VCCI组织和其他国家类似的协会都发布了控制电磁噪声发射和抗扰度要求的标准。特殊的政府代理比如美国的NASA和NTIA,其他国家类似的组织,也发布了控制电磁噪声发射和抗扰度要求的性能标准。国际组织如ICAO和IMCO也相当关注电磁噪声和它的允许界限值。

随着欧洲自由贸易的出现,20世纪80年代,欧洲国家对制定电磁噪声发射和抗扰度界限值的要求特别关注。为了能让在整个欧洲开拓产品市场,一个统一的方法和一致的标准是很必要的。欧洲经济共同体中的欧洲电力产品标准委员会成立于1973年,负责制定协调电磁噪声和仪器性能界限值的欧洲标准。CENELEC制定的各种导则包括无线电和电视接收机,信息技术设备和工业、科学、医学仪器等。CENELEC导则紧密结合CISPR和其他IEC的出版物。

## 1.4 电磁干扰和电磁兼容性概念的定义

电磁干扰是一种普遍的电磁现象,它会降低装置、设备或一个系统的性能。“电磁干扰”和“射频干扰”有时互相代用,实际上这是不准确的。射频干扰是指由射频噪声引起的有用信号接收能力的下降,属于射频范围内的电磁扰动,见图1-1。

我们来研究电磁干扰如何从源传至接收器,后者可以是一台装置、设备或一个系统。我们用“接收器”这个词表示它可接受电磁干扰。图1-2表示了电磁干扰从其源传至接收器的各种途径:

- (1) 从源直接辐射至接收器(路径1);
- (2) 来自源的辐射直接被连接于接收器的电源线或信号/控制线接收,并传导至接收器(路径2);
- (3) 由源处的电源、信号或控制电缆的辐射引起的电磁辐射(路径3);
- (4) 电磁干扰通过共用电源或共用信号、公用控制线缆直接从源传至接收器(路径4);
- (5) 连接在源上的电源、信号、控制线缆与接收器的电源、信号、控制线缆耦合时(特别是当线缆成束敷设在一起时)引起的电磁干扰(这种干扰可通过传导转至接收器,即使共用电源、信号、控制线缆不存在)。

因此,电磁干扰从其源传至接收器的主要方式为辐射和传导,从源耦合产生的电磁干扰传至接收器就会影响接收器正常工作状态。当电磁干扰的强度超过了界限值时,该接收器就会受损。一部接收器(装置,设备,系统)能在电磁环境中正常工作,且不会对该环境中其他设备和系统产生不能承受的电磁扰动,我们将这种能力称为电磁兼容性(EMC)。在过去的80年中,电磁干扰和电磁兼容性这门学科不断发展并已进入工程中,不过这一领域中许多分析与实验课题有待进一步深入研究。

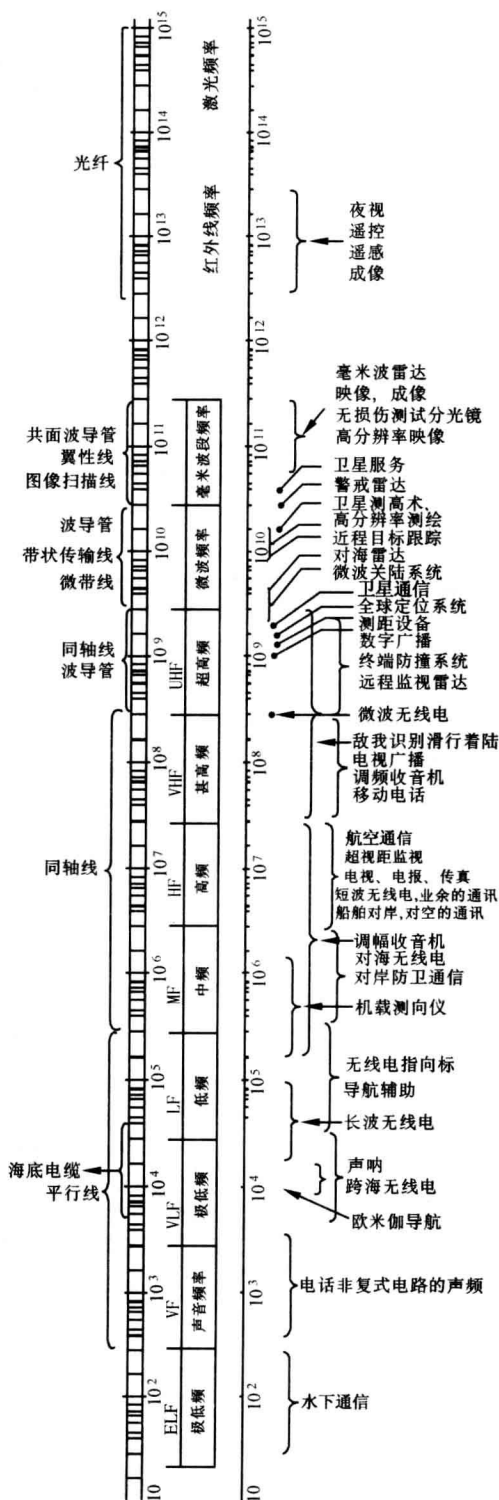


图 1-1 电磁频谱及其用途

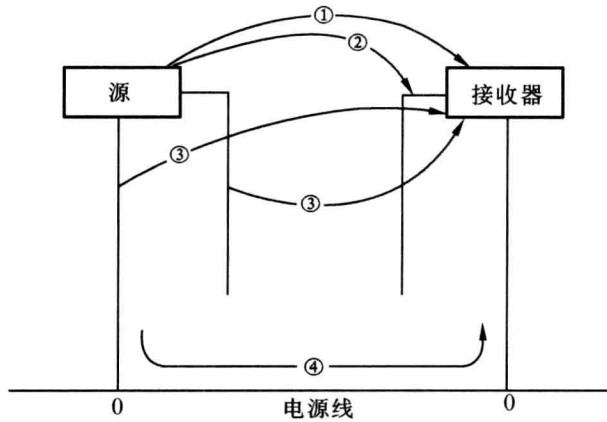


图 1-2 电磁干扰机理

## 1.5 实际经验与相关事项

比起 60 年前,我们现在使用了品种、数量更多的能产生电磁干扰的仪器设备,并且品种和数量还在增加。这些仪器设备和系统本身也是电磁干扰的受害者。同时,它们的分布密度正逐步加大。半导体设备和超大规模集成电路技术的应用使我们能够在低功率和微信号电平下工作的电路和系统。这些装置和电路对电磁干扰的承受能力很弱,容易敏感,导致故障或损坏。对付 EMI 有许多新方法。根据过去的实际经验,简述如下。

### 1.5.1 传输线

高压电力传输线对其周围而言是一个电磁场的源。该电源线通常能传输 100 kV 以上的电压和超过 100 A 的电流。图 1-3 显示的是高出地面 10 m 的 525 kV 电力传输线对地面产生的电场。从这些数据中可看出高电场强不仅存在于电力线之下,而且存在于离中心线(中跨距)一定距离的地方,表 1-1 表示在承载不同电压电力传输线之下的中跨距处的电场强度。

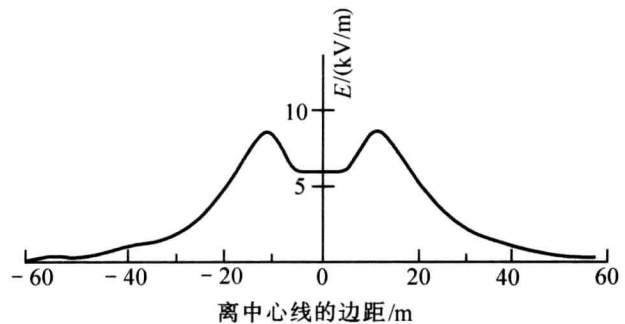


图 1-3 525 kV 电源传输线之下的地面电场强度

高强度电磁场还存在于水面/水下极低频(ELF)通信站、广播或电视发射台的近处。这种超强电磁场可引起电引爆装置的意外触发或爆炸,这些还不包括辐射对人体的伤害。

表 1-1 高压电源传输线之下中跨线处的电场强度

系统电压 /kV	电场强度 / (kV/m)
123	1 ~ 2
245	2 ~ 3
420	5 ~ 6
800	10 ~ 12
1200	15 ~ 17

### 1.5.2 主电源

露天电源传输线容易从雷电中拾取电磁噪声。在工业和民用中使用的主电源线,也存在一个由于开关、断路器、大负荷转换等引起的瞬态过程。这些干扰的强度能影响到计算机及许多通信技术产品。因此,在设计和安装计算机电源时一定要采用有效的防范措施。

### 1.5.3 开关和继电器

与电话电路或控制仪器的通断操作相随的放电都可能形成电磁干扰。在电话电路、射电望远镜、高灵敏度控制以及远程控制电路中,这是一个关系到实际使用寿命的问题。因为它们处理的都是极低电平的信号。

### 1.5.4 电话设备

应该考虑电话设备周围(如电话中心交换机室)的电场强度,因为这一类系统要求环境场强限制在  $1 \text{ V/m}$  ( $120 \text{ dB}\mu\text{V/m}$ ) 以内。在美国的一项研究中已经表明超出这个场强阈值的电话中心交换机室占有很大的比例。在其他国家也遇到了同样的问题,在那里据称电话线及电话设备检测到了由附近电视台发射的信号。为解决这个问题,必须设计专用的电话线滤波器,并安装在设备和电话的适当位置。AM, FM, TV 广播发射机,雷达、导航、移动通信和电视机等都是电磁污染源。电磁干扰的强度取决于下列因素:工作频率、输出功率强度以及(在设计、安装及设备运行过程中的)电磁干扰抑制措施。

### 1.5.5 射电天文学

在射电天文学领域,来自中子星和遥远银河系的微弱无线电信号难以检测到。由于地球电磁干扰源的存在使得精确观察复杂化。射电望远镜中的电磁干扰来源于诸如数字时钟脉冲、电源、继电器、开关以及其他接触器(这会有电弧存在)的突发噪声;还包括一些常规的干扰源,像无线电、电视、雷达以及其他高功率发射。

这种情况要求周密地设计控制室,妥善安排电缆走线和接线,计算机和外设使用特殊的屏蔽,在电源设计和配电上采取专用措施,合理选择天线位置。在射电望远镜附近对结构进行电弧焊引起的脉冲电磁干扰可以导致灵敏接收机过载。

### 1.5.6 生物效应

电磁场对生物和人类的影响是一个需要关注和研究的课题。人体暴露在强电磁场中,会有两个方面的影响。其一是,由于长时间暴露在电磁场中而在人体中引起恒定的感应电流;其二是通过人体的浪涌电击,当一个人在强电场中去触摸一个绝缘的金属物体(像电动机),就会产生这种电击。人体是一个自然的电磁场源。人体利用电学信号来控制肌肉的运动和在各部位之间传输信息。例如,心电图(ECG)就表明了人体心脏的功能,典型的心电图信号具有每分钟45~150次跳动约1 mV峰值。来自身体其他部位的电信号,像脑细胞,构成了脑电图(EEG)的基础。典型的脑电图(EEG)幅值30~50  $\mu\text{V}$  节律约10 Hz。因此当有相当强度的电场或信号通过人体时,这种变化所产生的电学过程和电压是一个有趣的生物化学研究课题。研究人体或其他生物体长期暴露在低强度电磁场中的影响也是现今的一个研究领域。该场也能对人体产生感应电流,人体的细胞组织中的少量磁粒子同样要经受时变场的转矩。这很可能对生物的反馈信息产生影响。例如,打开或关闭频道会影响细胞。正在努力制定一个人体电磁辐射的安全界限值,无论从医学还是从安全角度都表明这个进入人体的安全阈值是100 mA/m<sup>2</sup>。人体可以短暂地承受每平米数伏的强场。长期暴露在相干激励状态中,强度为10 mA/m<sup>2</sup>或10 V/m也应予以充分的考虑。然而到目前为止长期暴露在低电平场中对人体和生物的影响我们知之甚少,相关的实验几乎难以进行,主要是难控制生物实验体和环境的变化。

### 1.5.7 飞机导航

近年来,在从纽约飞往 Saint Maarten 的民航客机上,发生了多次欧米伽导航仪出错。仪器的指示相互矛盾,时间和飞机的着陆位置出错。相关的调查表明,这是由于乘客使用手提电视机所产生的电磁干扰所致。在另一事件中,乘客操作手提电脑在飞机的起飞和着陆过程中,严重干扰了飞机的导航设备。

### 1.5.8 军用装备

在军用航天系统中,包括导弹、火箭运载工具,系统的整体电磁兼容性与系统的可靠性同等重要。各个部件(电路或设备)子系统在组成系统之前都进行了严格的电磁兼容性测试。至于雷电、静电放电、过渡过程,在设计 and 组装过程中都进行了周密论证,采取了适当的抑制技术措施。然而,由于安全的考虑和应用性质的分类,在这一领域的出版信息很少且常常有很严重的滞后。有些由于电磁干扰而导致故障的事件时有报导,像在 Saturn(土星), Minuteman(民兵), Titan(大力神)及 Atlas-Centaur(宇宙神-半人马神)运载工具的 EMI 产生的事故。今天,航天系统已构成一个研究领域,它所采用的电磁干扰抑制技术对确保发射的成功起着至关重要的作用。在这个应用领域采取的重要措施和技术手段包括周密的频率规划和分配、接地、搭接、屏蔽、滤波、电缆布局、电路结构、静电积累、互调(包括被动互调或锈蚀螺钉效应,尤其是军舰上因多种射频源、接收机和天线引起的调制)。

### 1.5.9 保密通信

通信和数据处理在某些军事部门和国内部门的保密应用中至关重要。通过辐射或传导

方式,无意地发射信息信号,若被截获并被专用传感器分析,有可能泄漏保密信息。这类截获可发生在发射、接收信息处理设备的数据处理过程。为此,在某些关键的应用中,某些可能通过传导和辐射而致泄密的发射将采取严格规范的控制。该相关的规范在国外称之为 TEMPEST。

TEMPEST 不是一个缩略语,而是一个用来确保符合相关规范的一整套严格的规定和特殊的测量程序。该标准规定了在军用通信、雷达、导航、航空、信息处理以及计算设备中电磁辐射电平的水准。在数据处理或通信系统中的打印机、视频显示单元、电缆部件等,会辐射低电平的杂散电磁场。虽然这些电磁场很微弱,但是还是能被灵敏的装置检测到。

TEMPEST 防护通常包括:

- (1) 源抑制技术,其措施是周密的电路设计及布置来减少(消除)无用干扰发射;
- (2) 滤波技术及完整的电磁屏蔽来阻止所有可能的发射;
- (3) 框架组件和设备之间的互连应采取防护措施以防止可能的电磁能量泄漏;
- (4) 安置灵敏设备的机房,应实施有效的电磁屏蔽并限制机房的入口。

TEMPEST 标准防护的系统和设备,是经过专业设计和测试的可以确保不辐射杂散的电磁波,这些杂散波有可能被敌方控制或解码获得保密的有用信息。TEMPEST 标准与规范正是由于某些关键防御系统在安全上的需要应运而生的。近来,国内有些机构,工业企业、商业机构也开始利用类似的手段和技术来加强信息安全。由于这些方面的原因,符合 TEMPEST 标准和规范的设备通常会增加成本。然而,为满足某些特定场合数据安全的需要,这种开支是可以接受的。

TEMPEST 测试采用了专业设计的测试设备,它具有更高的灵敏度,且常常进行精确而严格的标定。接收器通常有光标控制的综合扫描能力,这使得测试工程师可以锁定某一扫描点,进行被测信号的互动作用分析。内置或自动标定是另一大特色,这常常在 TEMPEST 测试设备中采用。自动信号分析和测试设备提供了一个复杂的波形数据算法,其应用了异步和同步技术来识别发射及分析它们。在 TEMPEST 合格性测试设备中,还采用相关技术的高速信号处理器的数字滤波器。

我国在类似 TEMPEST 方面也在开展工作,力求避免保密信息的漏泄。

### 1.5.10 集成电路

当今广泛应用在仪器仪表中的集成电路(包括信息技术产品),深受电磁干扰之害。一个极端情况是它导致这类装置的烧毁。在含数字信号电路中,由于电磁干扰的作用增加位出错的概率或电路误动作。在模拟信号情况下,电磁干扰会增加噪声电平,导致电路或系统性能恶化。

上面所列举的是各领域中一个不完整的统计情况,表明近来所遭遇的并关系在将来会遇到的电磁干扰。其目的不仅在于提供一个警示,更是要指出 EMI/EMC 在当今是一个多维性问题。在设计和使用所有电气、电子仪器和系统的过程中,尤其在通信和控制中要时刻注意。



## 1.6 频谱管理

从图 1-1 我们可知电磁频谱有许多应用,频道常常被用于各种广播、通信、导航及其他用途。近 30 年来这种用途急剧增长,这种势头还在延续之中。然而,电磁频谱是一个有限的资源,这种需求增长的结果是各种机构和应用必须与其他用户分享某特定的频段,而没有用户能独享这种资源。在这种情况下电磁兼容性显得尤为重要。

### 1.6.1 发射机与接收机

图 1-1 表明,各种不同的应用以及提供此类应用的设备及其在指定频段或频率上的操作。各种国内管理团体和国际论坛对它进行了严格的限定。因此,各种无线电和电视广播发射机、雷达发射机或是通信发射机都规定使用特定的频率(或频段)来发射电磁能量。发射机、接收机影响电磁兼容性及频谱使用的基本参数列于表 1-2 中。

表 1-2 发射机和接收机影响电磁兼容性的参数

发射机	输出功率
	频率
	带宽
	边带发射
	乱真发射
接收机	灵敏度
	选择性
	镜像抑制
	乱真抑制
	邻道抑制

众所周知,各种发射机会发出超出带宽范围的边带电磁辐射,这种发射是调制的结果。大多数发射机会以乱真发射的形式在带宽以外的频率上发射电磁能量。这些乱真发射包括谐波发射、寄生发射、互调产物、变频产物。实际上,无论是边带发射还是乱真发射,都是由于发射机使用了超出指定的带宽,与边带发射不同的是乱真发射可以通过在不影响信息发射的前提下采用适当的设计手段来降低它的影响程度。

同样地,接收机设计中的关键参数是灵敏度、选择性、镜像和乱真响应以及邻道抑制能力。接收机的效率可以通过衡量把输入能量转换成中频输出的能力来判定。发射机和接收机的参数在降低电磁干扰确保有效使用频谱上具有同等重要的意义。这是可以理解的,因为发射机和相对应的接收机必须在紧密协调的情况下工作。优化合理的发射机和相对应的接收机将确保占用最窄的使用频带。