

# 电磁兼容 与电磁干扰

何 宏 张宝峰 张大建 孟 晖 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

TN03/33

2007

# 电磁兼容与电磁干扰

何宏 张宝峰 张大建 孟晖 著

国防工业出版社

·北京·

**图书在版编目(CIP)数据**

电磁兼容与电磁干扰 / 何宏等著. —北京: 国防工业出版社, 2007. 10

ISBN 978 - 7 - 118 - 05300 - 5

I. 电... II. 何... III. ①电磁兼容性②电磁干扰  
IV. TN03

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 113572 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)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

\*

开本 710 × 960 1/16 印张 13¼ 字数 235 千字

2007 年 10 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3500 册 定价 25.00 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(ElectroMagnetic Compatibility, EMC)作为一门新兴的综合性交叉学科正在我国迅速发展,它涉及到电子、计算机、通信、航空航天、铁路交通、电力、军事以及人民生活的各个方面。在当今信息社会中,随着电子技术、计算机技术的发展,一个系统中采用的电气及电子设备数量大幅度增加,而且电子设备的频带日益加宽,功率逐渐增大,信息传输速率提高,灵敏度提高,连接各种设备的网络也越来越复杂,因此,电磁环境日趋复杂,电磁干扰及电磁防护问题日益突出。世界各发达国家均对此予以高度重视,我国已加入世界贸易组织,电磁兼容技术壁垒将是我国电子产品出口的更大障碍,我国的相关部门与机构也积极开展电磁兼容性的理论和应用研究。国家3C(China Compulsory Certification, 中国强制性产品认证)认证制度的实施,有力地促进了电磁兼容性技术的进步,同时也要求相关的教育与科研部门加强电磁兼容性技术的研究。

现在,国内外已有许多EMC的定期杂志、论文和专业会议专门讨论此问题,但在国内很少有专门从电磁学的数值计算方面研究电磁兼容性问题的专著。本书是天津市社会发展重点基金(05YFSYSF033)、天津市自然科学基金(05YFJMJC13100)、天津理工大学专著出版资金资助项目。全书共分七章:第1章给出了电磁兼容的基本概念和原理,并用周期性函数的傅里叶变换和非周期性干扰信号的频谱分析对电磁干扰(骚扰)进行数学描述;第2章在明确EMC预测与建模的目的后选择所属电磁场的计算方法,包括有限差分法、有限元法、矩量法及几何绕射理论等;第3章对干扰耦合机理进行了详细的分析,分别是传导耦合、高频耦合和辐射耦合;第4章对电磁兼容滤波、接地及屏蔽技术进行了分析;第5章对传输线的信号传输特征及干扰进行了分析;第6章通过对开关电源电磁干扰机理的分析,给出开关电源电磁干扰的抑制措施,并使用谐波平衡有限元法分析高频开关电源;第7章针对计算机系统的特殊性着重讨论有关的电磁兼容技术,如在工业控制环境中软件的干扰抑制,计算机的病毒与防护,电磁信息的泄漏与防护等。

特别感谢天津市科委、天津市计量监督检测科学研究院、天津市电磁兼容检

测中心、天津理工大学给予出版的资助。

本书是在著者多年教学和科研积累之上完成的。本书由何宏教授、张宝峰教授、教授级高工张大建、高级工程师孟晖、高级工程师莫凯、高级工程师张艳和工程师宁书岩著,全书由何宏教授统稿审定。天津理工大学硕士研究生汤璐、崔欣、李伟、孙虹、贾衡天为本书的绘图做了大量的工作,在此一并表示衷心的感谢。

全书的阐述从电磁兼容技术的角度出发,讨论的思路清晰、内容丰富、资料翔实,图文并茂,适合作为电气与电子工程、信息和计算机技术、生物医学工程、自动控制与机电一体化、仪器和测试技术等专业师生的教学参考书,还可供从事电气和电子产品研发、设计、制造、质量管理、检测与维修工程技术人员使用。

由于电磁兼容的内容涉及到的技术领域和服务对象范围非常广,相关的理论和技术发展迅速,加上作者水平有限,书中难免存在不妥之处,敬请读者和专家批评指正。

作者 E-mail:heho604300 @ 126. com

著者  
于天津理工大学  
2007年6月

# 目 录

<b>第 1 章 电磁兼容技术概述</b> .....	1
1.1 电磁兼容概述 .....	1
1.1.1 电磁兼容的含义 .....	1
1.1.2 电磁干扰的三要素 .....	2
1.1.3 电磁干扰(骚扰)源的分类 .....	3
1.1.4 电磁干扰(骚扰)源的时、空、频谱特性 .....	6
1.1.5 电磁兼容性分析与设计方法 .....	7
1.1.6 电磁兼容性研究的基本内容 .....	9
1.2 电磁兼容技术术语 .....	10
1.2.1 一般术语 .....	10
1.2.2 干扰术语 .....	12
1.2.3 发射术语 .....	13
1.2.4 电磁兼容性术语 .....	14
1.3 电磁干扰(骚扰)的数学描述方法 .....	17
1.3.1 周期性函数的傅里叶变换 .....	17
1.3.2 非周期性干扰信号的频谱分析 .....	18
1.3.3 脉冲信号的傅里叶积分 .....	19
1.3.4 脉冲信号的快速时频域转换 .....	21
<b>第 2 章 电磁兼容的预测与建模技术</b> .....	24
2.1 明确 EMC 预测与建模的目的 .....	24
2.2 判断 EMC 问题所属的电磁场性质 .....	25
2.2.1 场的分类及特性 .....	25
2.2.2 确定 EMC 问题所属的电磁场性质 .....	28
2.3 EMC 预测与建模计算方法的选择 .....	30
2.3.1 场的方法 .....	30
2.3.2 路的方法 .....	42
2.3.3 场路结合 .....	43
<b>第 3 章 干扰耦合机理</b> .....	44

3.1	传导耦合	44
3.1.1	电容性耦合	45
3.1.2	电感性耦合	51
3.1.3	电容性耦合与电感性耦合的综合考虑	57
3.2	高频耦合	60
3.2.1	分布参数电路的基本理论	61
3.2.2	高频线间的耦合	63
3.2.3	低频情况的耦合	66
3.3	辐射耦合	67
3.3.1	电磁辐射	68
3.3.2	近场区与远场区的特性	72
3.3.3	电磁波的极化	76
3.3.4	辐射耦合	77
<b>第4章</b>	<b>电磁兼容滤波、接地及屏蔽技术</b>	<b>79</b>
4.1	电磁干扰滤波器	79
4.1.1	电磁干扰滤波器的工作原理	79
4.1.2	电磁干扰滤波器的特殊性	79
4.1.3	滤波器的插入损耗	80
4.2	滤波器的分类及特性	80
4.2.1	反射式滤波器	80
4.2.2	吸收式滤波器	86
4.2.3	滤波器的安装	89
4.3	接地的概念	91
4.4	接地的技术	92
4.5	接地分类	95
4.6	屏蔽	99
4.6.1	静电屏蔽	99
4.6.2	电磁屏蔽	100
4.6.3	低频磁场屏蔽	105
4.6.4	屏蔽材料的选择	108
4.6.5	屏蔽的应用	110
4.6.6	不均匀屏蔽理论	111
4.7	设备最佳设计法	112
<b>第5章</b>	<b>传输线及干扰分析</b>	<b>114</b>
5.1	传输线的信号传输特征	114

5.1.1	传输线方程组 .....	114
5.1.2	无限长传输线 .....	116
5.1.3	传输线的基本参数 .....	117
5.1.4	传输线方程的双曲线函数解 .....	118
5.1.5	实际传输线 .....	118
5.1.6	传输线的输入阻抗 .....	119
5.1.7	终端开路或短路的传输线 .....	120
5.2	双导线传输线 .....	121
5.2.1	双导线传输线的基本假设 .....	121
5.2.2	均匀双导体传输线的信号传输特征 .....	121
5.3	干扰源位于传输线任意位置时沿线电压电流的分布 .....	125
5.4	多导体传输线 .....	127
5.4.1	均匀介质中的无损耗多导体传输线 .....	128
5.4.2	不均匀介质中的无损耗多导体传输线 .....	129
5.5	导线间的串扰 .....	132
<b>第6章</b>	<b>开关电源中的电磁兼容技术 .....</b>	<b>135</b>
6.1	开关电源电磁干扰的机理分析 .....	135
6.1.1	整流电路的谐波干扰 .....	136
6.1.2	高频变压器造成的干扰 .....	136
6.1.3	输出整流二极管的尖峰干扰 .....	137
6.1.4	开关电源电磁噪声的耦合通道 .....	137
6.2	开关电源电磁干扰的抑制 .....	139
6.2.1	采用 EMI 滤波器 .....	139
6.2.2	改善开关管的波形 .....	140
6.2.3	输出二极管电压尖峰抑制 .....	140
6.3	开关电源变压器中的谐波分析 .....	140
6.3.1	应用于磁路的谐波平衡分析的概念 .....	140
6.3.2	由电流源产生的磁场的谐波平衡有限元法 .....	141
<b>第7章</b>	<b>计算机系统电磁兼容技术 .....</b>	<b>147</b>
7.1	计算机电磁兼容性问题的特殊性 .....	147
7.1.1	数字计算机中的干扰 .....	147
7.1.2	特殊环境中的计算机电磁兼容问题 .....	150
7.1.3	计算机病毒 .....	151
7.1.4	计算机的电磁泄漏 .....	151
7.1.5	计算机电磁兼容性问题的新动向 .....	151



7.2	计算机元、部件抗干扰措施 .....	152
7.2.1	一般数字集成电路的抗干扰措施 .....	152
7.2.2	动态 RAM 的抗干扰分析 .....	153
7.2.3	A/D 转换器的抗干扰措施 .....	154
7.2.4	计算机接口电路的抗干扰措施 .....	156
7.2.5	微型计算机总线的抗干扰措施 .....	157
7.3	工业控制环境中计算机的抗干扰技术 .....	158
7.3.1	IPC 硬件的抗干扰设计 .....	159
7.3.2	IPC 软件的抗干扰设计 .....	160
7.3.3	IPC 抗干扰用到的软件技术 .....	164
7.4	计算机电磁信息泄漏与防护 .....	168
7.4.1	计算机电磁信息辐射泄漏的途径 .....	168
7.4.2	计算机电磁信息辐射的特点 .....	169
7.4.3	计算机电磁信息辐射泄漏的防护技术 .....	170
<b>附录 A</b>	<b>电磁兼容国家标准 .....</b>	<b>173</b>
<b>附录 B</b>	<b>部分电磁兼容国际标准 .....</b>	<b>183</b>
<b>附录 C</b>	<b>电磁干扰(骚扰)源的频谱 .....</b>	<b>190</b>
<b>参考文献</b>	<b>.....</b>	<b>193</b>

# 第 1 章 电磁兼容技术概述

## 1.1 电磁兼容概述

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,使电磁环境日益复杂。在这种复杂的电磁环境中,如何减少相互间的电磁骚扰,使各种设备正常运转,是一个急待解决的问题;另一方面,恶劣的电磁环境还会对人类及生态产生不良的影响。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性学科。

国家军用标准 GJB72—85《电磁干扰和电磁兼容性名词术语》第 5.10 条将电磁兼容性(Electromagnetic Com-patibility, EMC)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导致或遭受不允许的降级;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降级<sup>[1]</sup>。”由此可见,电磁兼容学的主要研究任务是,如何使在同一电磁环境下工作的各种电气电子系统、分系统、设备和元器件都能正常工作,互不干扰,达到兼容状态。在某种程度上也可以说是研究干扰和抗干扰的问题。但作为一门学科,它的研究对象已不仅仅限于电气电子设备,而是拓宽到自然干扰源、核电磁脉冲、静电放电;频谱管理工程;电磁辐射对人体的生态效应;信息处理设备电磁泄漏产生的失密;检测地震前的电磁辐射,进行震前预报等方面。因此,电磁兼容学科包含的内容十分广泛,实用性很强,几乎所有的现代工业,包括航天、军工、电力、通信、交通、计算机、医疗卫生等领域都必须解决电磁兼容问题。

### 1.1.1 电磁兼容的含义

电磁兼容(ElectroMagnetic Compatibility, EMC)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。

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(IEC)认为,电磁兼容是一种能力的表现。IEC对电磁兼容性的定义为:“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,而不致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,并不致引起性能降级的一门学科。电磁兼容的理论基础涉及数学、电磁场理论、电路基础、信号分析等学科与技术,其应用范围又几乎涉及到所有用电领域。由于其理论基础宽、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,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<sup>[2]</sup>。现国际上正在掀起一个电磁兼容要求法规化、电磁兼容技术标准国际化及推行电磁兼容强制性认证的热潮。

### 1.1.2 电磁干扰的三要素

电磁兼容学科研究的主要内容是围绕以下构成干扰的三要素进行的,即电磁骚扰源、途径和敏感设备。

#### 1. 电磁骚扰源

电磁骚扰(Electromagnetic Disturbance)的定义为:“任何可能引起装置、设备或系统性能降低或对有生命或无生命物质产生损害作用的电磁现象。”电磁骚扰可能是电磁噪声、无用信号或传播媒介自身的变化。电磁噪声(Electromagnetic Noise)是指“一种明显不传送信息的时变电磁现象,它可能与有用信号叠加或组合。”如电气设备运行中经常产生的放电噪声、浪涌噪声、振荡噪声等不带任何有用信息的噪声。无用信号是指一些功能性的信号,如广播、电视、雷达等,本身是有用信号,但如果干扰其他设备的正常工作,则对被干扰的设备而言,它们就是“无用信号”,所以电磁骚扰的含义比电磁噪声更广泛一些。有时人们常把骚扰、噪声和“干扰”混同起来。实际上“电磁干扰”是有明确定义的,即“由电磁骚扰引起的设备、传输通道或系统性能的下降”。“骚扰”是一种

客观存在,只有在影响敏感设备正常工作时才构成了“干扰”<sup>[3]</sup>。骚扰源可分为自然骚扰源和人为骚扰源。骚扰源的研究包括其发生的机理、时域和频域的定量描述,以便从源端来抑制骚扰的发射。

## 2. 传输途径

骚扰的传输途径有两条,通过空间辐射和导线传导,即辐射发射和传导发射。辐射发射主要研究在远场条件下骚扰以电磁波的形式发射的规律,以及在近场条件下的电磁耦合。共模电流辐射也是重要研究内容之一。传导发射则讨论传输线的分布参数和电流的传输方式对噪声传输的影响,如共阻抗耦合、共模—差模电流转换等。

## 3. 敏感设备

敏感设备即指受干扰设备。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性电平阈值越低,即对电磁干扰越灵敏,也即电磁敏感度越大,抗干扰能力越差,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。采用不同的结构和选用不同的元器件都将大大影响设备的抗干扰能力。这些都是在设备或系统的设计阶段要考虑的。各种设备的抗扰度指标可从 EMC 手册中查到。

### 1. 1. 3 电磁干扰(骚扰)源的分类

电磁干扰的分类可以有多种分法<sup>[4]</sup>,例如,按传播途径分,有传导干扰和辐射干扰,其中传导干扰的传输性质有电耦合、磁耦合及电磁耦合;按辐射干扰的传输性质分,有近场区感应耦合和远场区辐射耦合;按频带分,有窄带干扰和宽带干扰;按干扰频率范围分,可细分为5种(表1-1);按实施干扰者的主观意向分,可分为有意干扰源和无意干扰源;按干扰源性质分,有自然干扰和人为干扰(图1-1)等。这里主要讨论自然干扰(骚扰)和人为干扰(骚扰)。

表 1-1 按干扰频率范围分类

电磁干扰的分类	频率范围	典型电磁干扰源
工频及音频干扰源	50Hz 及其谐波	输电线,电力牵引系统,有线广播
甚低频干扰源	30kHz 以下	雷电等
载频干扰源	10kHz ~ 300kHz	高压直流输电高次谐波,交流输电及电气铁路高次谐波
射频、视频干扰源	300kHz ~ 300MHz	工业、科学、医疗设备,电动机,照明电气,宇宙干扰
微波干扰源	300MHz ~ 100GHz	微波炉,微波接力通信,卫星通信

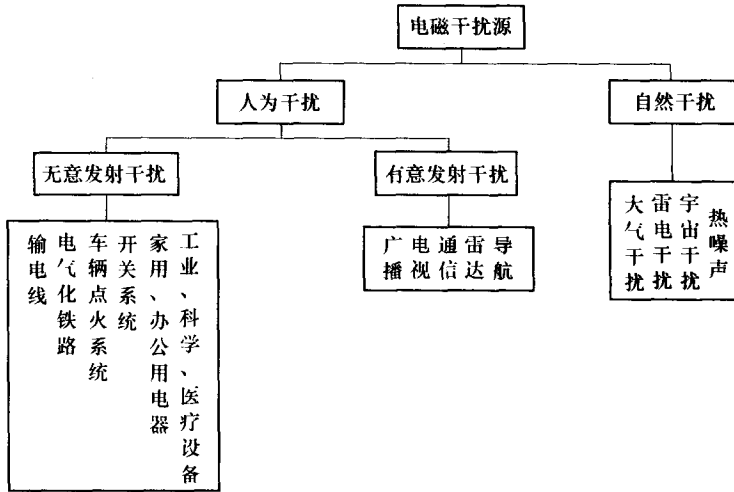


图 1-1 电磁干扰源的分类

### 1. 自然干扰(骚扰)源

自然电磁干扰源存在于地球和宇宙,自然电磁现象会产生电磁噪声。由自然界的电磁现象产生的电磁噪声,比较典型的有以下几种。

- (1) 大气噪声,如雷电。
- (2) 太阳噪声,太阳黑子活动时产生的磁暴。
- (3) 宇宙噪声,来自银河系。
- (4) 静电放电(ESD)。

### 2. 人为干扰(骚扰)源

人为干扰分别来自有意发射干扰源和无意发射干扰源。

有意发射干扰源是专用于辐射电磁能的设备,如广播、电视、通信、雷达、导航等发射设备,是通过向空间发射有用信号的电磁能量来工作的,它们对不需要这些信号的系统或设备构成功能性干扰,而且是电磁环境的重要污染源。

有许多装置都无意地发射电磁能量,如汽车的点火系统,各种不同的用电装置和带电动机的装置,照明装置、霓虹灯广告、高压电力线、工业、科学和医用设备,以及接收机的本机振荡辐射等。这种发射可能是向空间的辐射,也可能是沿导线的传导发射,所发射的电磁能是随机的或是有规则的,一般占有非常宽的频带或离散频谱,所发射的功率可从皮瓦量级到兆瓦量级。

任何电气电子设备都可能产生人为骚扰,以下只是列出一些容易产生骚扰的设备。

### 1) 家用电器和民用设备

(1) 有触点电器,如电冰箱、电熨斗、电热被褥、电磁开关、继电器等。

(2) 使用整流子电动机的机器,如电钻、电动刮胡刀、电按摩器、吸尘器、电动搅拌机、牙科医疗器械等。

(3) 家用电力半导体器件装置,如硅整流调光器、开关电源等。

### 2) 高频设备

(1) 工业用高频设备,如塑料热合机、高频加热器、高频电焊机等。

(2) 高频医疗设备,如甚高频或超高频理疗装置、高频手术刀、电测仪、X光机等。

### 3) 电力设备

(1) 电力传动设备,如各种直流、交流伺服电动机、步进电机、电磁阀、接触器等。

(2) 电力电子器件组成的变流装置,如可控整流器、逆变器、变频器、斩波器、无触点开关、交流调压器、UPS电源、高频开关电源等。

(3) 电力传输设备,如高压电力传输线、高压断路器、变压器等。

(4) 电气化铁道,如电力机车、接触网等。

### 4) 内燃机

内燃机包括点火系统、发电机、电压调节器、电刷等。

### 5) 无线电发射和接收设备

无线电发射和接收设备包括移动通信系统、广播、电视、雷达、导航设备等。

### 6) 高速数字电路设备

高速数字电路设备包括计算机及其相关设备。

各种不同的干扰源可能是周期性的,其频率范围可以从零赫兹到几万赫兹、几兆赫兹、甚至吉赫兹或更高。干扰信号也可能是非周期性或脉冲形式的。能量也可能是极微弱的或者是兆瓦级的。表 1-2 给出了经常遇到的一些干扰源的频谱范围。

表 1-2 常遇干扰源的频谱范围

源	频谱	源	频谱
地磁测向	<3Hz	雷电放电	几赫兹~几百兆赫兹
探测烧焦的金属	3Hz~30Hz	电视	30MHz~3GHz
直流或工频输电	0或50/60Hz	移动通信 (包括手机)	30MHz~3GHz
无线电灯塔 气象预报站	30kHz~300kHz	微波炉	300MHz~3GHz

(续)

源	频谱	源	频谱
电动机	10kHz ~ 400kHz	核脉冲	高达 GHz
照明(荧光灯)	0.1MHz ~ 3.0MHz	海上导航	10kHz ~ 10GHz
电晕放电	0.1MHz ~ 10MHz	工、科、医用 高频设备	几万赫兹 ~ 几十吉赫兹
直流电源开关电路	100kHz ~ 30MHz	无线电定位	1GHz ~ 100GHz
广播	150kHz ~ 100MHz	空间导航卫星	1GHz ~ 300GHz
电源开关设备	100kHz ~ 300MHz	先进的通信 系统、遥测	30GHz ~ 300GHz

### 1.1.4 电磁干扰(骚扰)源的时、空、频谱特性

#### 1. 干扰能量的空间分布

对于有意辐射干扰源,其辐射干扰的空间分布是比较容易计算的,主要取决于发射天线的方向性及传输路径损耗。

对于无意辐射源,无法从理论上严格计算,经统计测量可得到一些无意辐射源干扰场分布的有关数学模型及经验数据。

对于随机干扰,由于不能确定未来值,其干扰电平不能用确定的值来表示,需用其指定值出现的概率来表示。

#### 2. 干扰能量的时间分布

干扰能量随时间的分布与干扰源的工作时间和干扰的出现概率有关。按照干扰的时间出现概率可分为周期性干扰、非周期性干扰和随机干扰三种类型:周期性干扰是指在确定的时间间隔上能重复出现的干扰;非周期干扰虽然不能在确定的周期重复出现,但其出现时间是确定的,而且是可以预测的;随机干扰则以不能预测的方式变化,其变化特性也是没有规律的,因此随机干扰不能用时间分布函数来分析,而应用幅度的频谱率特性来分析。

#### 3. 干扰的频率特性

按照干扰能量的频率分布特性可以确定干扰的频谱宽度,按其干扰的频谱宽度,可分为窄带干扰与宽带干扰。一般而言,窄带干扰的带宽只有几十赫兹,最宽只有几十万赫兹。而宽带干扰的能量分布在几十兆赫兹至几百兆赫兹,甚至更宽的范围内。在电磁兼容学科领域内,带宽是相对接收机的带宽而言,根据国家军用标准 CJB72—85 的定义,窄带干扰指主要能量频谱落在测量接收机通

带之内,而宽带干扰指能量频谱相当宽,当测量接收机在 $\pm 2$ 个脉冲宽内调谐时,它对接收机输出响应的影响不大于3dB。

有意发射源干扰能量的频率分布,可根据发射机的工作频带及带外发射等特性得出;而对无意发射源,则用统计规律来得出经验公式和数学模型。

为了确定干扰源在空间产生的干扰效应,必须知道干扰信号的空间、时间或频率分布。该分布可用功率密度 $P$ 表示为 $P = (t, f, \Phi, r)$ ,括号中的变量分别为时间、频率、方位和距离。根据干扰源的频率分布特性可知干扰的频谱宽度,它分为窄带及宽带两种。“窄”、“宽”都是相对于被干扰对象的工作带宽而言。在国家军用标准GJB72—85中规定窄带干扰能量频谱落在对象的工作通频带之内,而宽带干扰的能量谱相当宽,其能量分布可在几十赫兹到上百兆赫兹,如雷电脉冲、静电放电及核脉冲的频谱则可达到几兆赫兹或几千兆赫兹。

区别“窄带(NB)”、“宽带(BB)”的最简单的方法是:给定接收机(或被干扰设备的输入级)的通频带带宽( $B_p$ )以及干扰源的基频 $F_0$ ,则干扰类型可判别为:当 $B_p > F_0$ 时,为宽带;当 $B_p < F_0$ 时,为窄带。如图1-2所示<sup>[180]</sup>,干扰信号的任意两个谐波的频率间隔大于接收机的带宽时为窄带干扰,反之为宽带干扰。

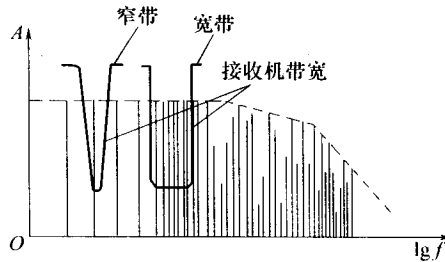


图 1-2 窄带及宽带干扰

## 1.1.5 电磁兼容性分析与设计方法

### 1. 电磁兼容性分析方法

随着电子技术的发展,电磁兼容技术也在不断向前发展,电磁兼容性分析方法逐步得到提高和完善,其发展过程通常分为三种方法,即问题解决法、规范法和系统法<sup>[149]</sup>。

#### 1) 问题解决法

问题解决法是解决电磁兼容问题的早期方法。首先按常规设计建立系统,然后再对现场实验中出现的电磁干扰问题设法予以解决。由于系统已安装完



工,要解决电磁干扰问题比较困难。为了解决问题,可能要进行大量的拆卸,甚至要重新设计,对于大规模集成电路要严重地破坏其图版。因此,问题解决法是一种非常冒险的方法,而且这种头痛医头、脚痛医脚的办法是不能从根本上解决电磁干扰问题的。这种方法在设计阶段节省电磁兼容支持所增加的成本,但在成品的最后阶段解决电磁兼容问题时不仅困难大,而且成本很高。此方法只适合比较简单的设备。

## 2) 规范法

规范法比问题解决法较为合理。该方法是按现行电磁兼容标准(国家标准或军用标准)所规定的极限值来进行计算,使组成系统的每个设备或子系统均符合所规定的标准,并按标准所规定的试验设备和实验方法核实它们与规范中规定极限值的一致性。该方法可在系统实验前对系统的电磁兼容有一些预见性。但其有如下缺点。

(1) 标准与规范中的极限值是根据最坏情况规定的,这就可能导致设备或子系统的设计过于保守,引起过储备保护设计。

(2) 规范法没有定量地考虑系统的特殊性,可能遗留下许多电磁兼容问题在系统实验时才能发现,并需事后解决这些问题。

(3) 该方法对系统之间的电磁耦合常常不做精确考虑和定量分析。

(4) 设备或子系统数据与系统性能并不是用固定的规范法联系起来,为了符合对设备或子系统的固定要求,导致提高成本来修改设计,但该固定要求不一定符合实际情况。

由此可见,规范法的主要缺点在于既有可能过储备设计,同时谋求解决的问题又不一定是真正存在的问题。

## 3) 系统法

系统法是近几年兴起的一种设计方法,它在产品的初始设计阶段对产品的每一个可能影响产品电磁兼容性的元器件、模块及线路建立数学模型,利用计算机辅助设计工具对其电磁兼容性进行分析预测和控制分配,从而为整个产品的满足要求打下良好基础。

系统法是电磁兼容设计的先进方法,它集中了电磁兼容方面的研究成就,根据电磁兼容要求给出最佳工程设计的方法。系统法从设计开始就预测和分析电磁兼容性,并在系统设计、制造、组装和实验过程中不断对其电磁兼容性进行预测和分析。由于在设计阶段采取电磁兼容措施,因此可以采取电路与结构相结合的技术措施。这种方法通常在正式产品完成之前可解决 90% 的电磁兼容问题。

无论是问题解决法、规范法还是系统法设计,其有效性都应是最后产品、