



高等学校教材

GAODENG XUOXIAO JIAOCAI

电磁兼容原理

DIANCI JIANRONG YUANLI

张厚 编 著

 西北工业大学出版社

高等学校教材

电磁兼容原理

张厚 编著

西北工业大学出版社

【内容简介】 电磁兼容作为一门新兴的综合性交叉学科正在迅速发展,它涉及电子、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。本书重点围绕电子系统中形成电磁干扰的三大要素,从电磁兼容的基本概念入手,由浅入深、循序渐进地介绍了电磁兼容的基本概念、原理及其研究内容。

本书适合电子工程、电气工程、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研究生和高年级学生作教材或参考书使用,还可供从事电气和电子产品研发、设计、制造、质量管理、检测与维修的工程技术人员使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

电磁兼容原理/张厚编著. —西安:西北工业大学出版社,2009.4
ISBN 978-7-5612-2515-8

I. 电… II. 张… III. 电磁兼容性 IV. TN03

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009)第 022026 号

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路 127 号 邮编:710072

电 话:(029)88493844 88491757

网 址:www.nwpup.com

印 刷 者:陕西丰源印务有限公司

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16

印 张:11.125

字 数:267 千字

版 次:2009 年 4 月第 1 版 2009 年 4 月第 1 次印刷

定 价:18.00 元

前 言

电磁兼容 (Electromagnetic Compatibility, 简称 EMC) 作为一门新兴的综合性交叉学科正在迅速发展, 它涉及电子、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。随着科学技术的进步, 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) 制度的实施, 有力地促进了电磁兼容性技术的进步。

EMC 涉及电磁能量的产生、传输和接收, 这三个方面构成了 EMC 设计的基本框架。源 (也称发射器) 产生发射, 传输或耦合路径将发射的能量传递到接收器, 发射的能量在接收器被处理, 产生所期望的或意外的动作。如果接收到的能量引起接收器以意外的方式动作, 这就发生了干扰。电磁能量常常通过无意的耦合模式传递。只有在接收器输入端接收到的能量有足够的幅度和频谱分量而引起接收器以意外的方式动作时, 电磁能量的这种无意传递才会造成干扰。电磁能量的无意发射或接收并不一定都有害, 接收器的意外动作才会构成干扰。因此, 接收器对接收到的能量的处理是能否产生干扰的一个重要方面。通常很难用推理的方法确定入射到接收器的信号是否会对该接收器造成干扰。

理解源或接收器被分为有意或无意两类也是很重要的。事实上, 源或接收器可能同时以两种模式起作用。源或接收器是有意的还是无意的取决于耦合路径和源或接收器的类型。

本书重点围绕电子系统中形成电磁干扰的三大要素, 从电磁兼容的基本概念入手, 由浅入深、循序渐进地展开讨论。全书共分为 7 章: 第 1 章给出了电磁兼容的基本概念和含义, 介绍了频谱工程、电磁兼容研究的内容、电磁兼容技术的实施和发展, 讲述了电磁兼容技术用到的单位和元件; 第 2 章对电磁干扰源进行了分析; 第 3 章讲述了电磁干扰的传输途径及相应的抑制措施; 第 4 章对敏感性标准、现象和接收机的敏感性进行了分析; 第 5 章讨论了电磁兼容的接地、搭接和滤波等抑制技术; 第 6 章介绍了传输线理论、信号完整性及印制电路板 PCB 的电磁兼容设计; 第 7 章介绍了常用的电磁兼容性分析的程序。

本书是作者在多年教学和科研实践的基础上编写的, 全书的阐述都是从电磁兼容技术的角度出发的, 所述内容丰富翔实。本书适合电子工程、电气工程、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作教材或参考书使用, 还可供从事电气和电子产品研发、设计、制造、质量管理、检测与维修的工程技术人员使用。

由于电磁兼容的内容涉及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, 敬请各位读者和专家批评指正。

作 者

2008 年 9 月

目 录

第 1 章 电磁兼容概述	1
1.1 电磁兼容的基本概念	1
1.2 电磁兼容标准和规范	2
1.3 频谱工程	4
1.4 电磁兼容的实施	6
1.5 电磁兼容研究的内容	7
1.6 电磁兼容系统常用的单位——分贝	9
1.7 电磁兼容中的常用元件.....	13
1.8 电磁兼容的发展趋势.....	15
习题 1	16
第 2 章 电磁干扰源	17
2.1 自然干扰源.....	17
2.2 人为干扰源.....	17
2.3 电磁环境与电磁污染.....	22
习题 2	24
第 3 章 电磁干扰的传输途径	25
3.1 传导干扰.....	25
3.2 辐射干扰.....	41
习题 3	65
第 4 章 电磁敏感性	67
4.1 电磁敏感性的有关标准和规范.....	67
4.2 系统和设备的敏感性现象.....	67
4.3 接收机的敏感性.....	69
4.4 电磁敏感性评定标准.....	71
习题 4	75
第 5 章 电磁干扰的抑制	76
5.1 接地与搭接.....	76
5.2 屏蔽.....	85
5.3 滤波.....	95

习题 5	104
第 6 章 传输线理论与信号完整性	106
6.1 传输线概述	106
6.2 传输线方程及其解	108
6.3 均匀长线上行波的传输特性	113
6.4 均匀无耗长线的传输特性	115
6.5 均匀无耗长线的三种工作状态	118
6.6 信号完整性和高速 PCB 电路设计	126
习题 6	130
第 7 章 电磁兼容性分析与设计	131
7.1 干扰预测方程	131
7.2 数学模型	132
7.3 电磁干扰预测的基本方法与范围	133
7.4 干扰预测程序	137
7.5 系统电磁兼容性分析程序	140
7.6 系统内电磁兼容性分析程序	141
7.7 系统间电磁干扰预测分析程序	146
7.8 电磁环境/干扰预测模型.....	147
7.9 天线系统配置的预测分析	148
7.10 系统电磁干扰预测的实例.....	151
7.11 电磁兼容性设计.....	153
习题 7	157
附录 EMC 专用名词大全	158
参考文献	170

第 1 章 电磁兼容概述

随着科学技术的不断发展,各种电子、电气设备或系统广泛应用于国民经济、军事以及人们的日常生活等各个领域。这些电子、电气设备在运行的同时大多都伴随着电磁能量的转换,或多或少地以不同的方式向外泄漏着电磁能量,极有可能对其他电子、电气设备产生不良影响,甚至造成严重的危害,这就是电磁干扰。在有限的时间、空间和有限的频率资源条件下,电子、电气设备的数量与日俱增,各个设备产生的电磁能量的泄漏形成了一个极其复杂的电磁环境。电子系统越是现代化,其所造成的电磁环境就愈是复杂,产生的电磁干扰就愈强。因此,如何使现代电子、电气设备在复杂的电磁环境中能够正常地运行,各设备之间互不干扰,能够“兼容”地在一起共同工作,这一系列问题就自然摆在了人们的面前。在这种背景下,产生了电磁兼容的概念,形成了一门新的学科——电磁兼容(Electromagnetic Compatibility,简称 EMC)。

本章主要介绍电磁兼容的基本概念、电磁兼容的标准和规范、频谱工程、电磁兼容性的实施、电磁兼容研究的内容、电磁兼容常用的单位和常用元件,以及对电磁兼容研究的发展趋势。

1.1 电磁兼容的基本概念

1. 电磁干扰

(1)电磁干扰的概念。电磁干扰是指任何能中断、阻碍、降低或限制电子、电气设备有效性能的电磁能量。

电磁干扰的形式很多。例如,由大气无线电噪声引起的天电干扰;由银河系的电磁辐射引起的宇宙干扰;由输电线、电网以及各种电子、电气设备工作时引起的工业干扰;由传输电路间的电或磁的相互耦合引起的串扰等。

(2)电磁干扰的危害。电磁干扰产生的危害是显而易见的,轻者可使电子、电气设备的性能降低,重者使电子设备无法工作。从以下几个方面可以更充分地证明这一点。

1)中波、短波、超短波、微波站的电磁场感应进入导弹的电爆管中或其他设备中,能引起电爆管引爆或性能降低。国外曾发生过由于电台电磁辐射引爆化工产品而造成人员伤亡的事例,还发生过电磁干扰使导弹意外发射的事例。

2)由于各种摩擦产生的静电及大功率电磁辐射可能产生火花,从而导致易燃、易爆品意外点燃。

3)汽车或电气化铁道的电力机车产生的电磁干扰使附近的广播、通信、电视接收受到一定的影响。

4)电子设备的开关动作可导致打印机设备出现误码。

5)电磁辐射使微机工作失常,而微机的工作又产生宽带电磁干扰信号。

(3)形成电磁干扰的三个要素。形成电磁干扰必须同时具备以下三个条件,又称为三要素:

1)电磁干扰源,指产生电磁干扰的元件、器件、设备、系统或自然现象。

2)干扰接受器(又称敏感设备),指对电磁干扰发生响应的设备,即受到电磁干扰的设备。

3)传输途径(又称耦合途径),指把电磁能量从干扰源耦合或传输到敏感设备上,并使该设备产生响应的媒介。

由电磁干扰源发出的电磁能量,经过某种耦合途径传输至敏感设备,导致敏感设备出现某种形式的响应并产生效果,这就是电磁干扰的整个过程,又称为电磁干扰效应。

电磁干扰一般包括系统内部干扰和系统之间干扰两个方面。例如,雷达干扰飞机的导航系统就是系统之间的干扰;雷达发射机的能量泄漏对接收机的干扰就是系统内部的干扰。

2. 电磁兼容与电磁兼容性

电磁兼容是指电子、电气设备或系统的一种工作状态,在这种工作状态下,它们不会因为内部或彼此间存在的电磁干扰而影响其正常工作。

电磁兼容性则是指电子、电气设备或系统在预期的电磁环境中,按设计要求正常工作的能力。它是电子、电气设备或系统的一种重要的技术性能。电磁兼容性包含两方面的含义:一方面是指设备或系统应具有抵抗给定电磁干扰的能力,并且有一定的安全余量。即它不会因受到处于同一电磁环境中的其他设备产生的电磁干扰而产生不允许的工作性能降级。另一方面是指设备或系统不产生超过规定限度的电磁干扰。即它不会产生使处于同一电磁环境中的其他设备出现超过规定限度的工作性能降级的电磁干扰。

由于电磁干扰包括系统内部的干扰和系统之间的干扰,所以,系统内的电磁兼容性和系统间的电磁兼容性是不同的。前者指的是在给定系统内部的各分系统、设备及部件相互之间的电磁兼容性;后者指的是给定系统与其工作的电磁环境中的其他系统之间的电磁兼容性。

电磁兼容性是一个新概念,它是抗干扰概念的扩展和延伸。从最初的设法防止射频频段内的电磁噪声、电磁干扰,发展到防止和对抗各种电磁干扰,进一步在认识上产生了质的飞跃,把主动采取措施抑制电磁干扰贯穿于设备或系统的设计、生产和使用的整个过程中。这样才能保证电子、电气设备和系统实现电磁兼容性。

应该指出,在技术发展的早期阶段,保证设备兼容工作主要靠改进个别电路和结构的方案,以及使用频率的计划分配。但到现在,采用个别的局部措施已经远远不够了。从整体上说,兼容性问题具有明显的系统性特点。在电子、电气设备寿命期的所有阶段,都必须考虑电磁兼容性问题。如果忽视电磁兼容性,使设备兼容性遭到破坏,此时若要保证电子、电气设备的电磁兼容性则需要付出更昂贵的代价,且得不到满意的效果。

1.2 电磁兼容标准和规范

为了确保系统及各项设备必须满足的电磁兼容工作特性,国际有关机构、各国政府和军事部门,以及其他相关组织制定了一系列的电磁兼容标准和规范,对设备或系统作出了规定和限制,所以执行标准和规范是实现电磁兼容性、提高系统和设备性能的重要保证。

1. 标准和规范的主要内容及特点

标准和规范是两个不同的概念。规范是一个包含详细数据、必须按合同遵守的文件；标准是一个一般性准则，由它可以导出各种规范。标准和规范的类别和数量是相当多的，其主要内容可以归纳为以下四部分：

第一部分，规定名词术语。例如中国国家军用标准 GJB72—85，美国军用标准 MIL—STD—463A 等。

第二部分，规定电磁发射和敏感度的极限值。

第三部分，规定统一的测试方法。

第四部分，规定电磁兼容控制方法或设计方法。

电磁兼容标准和规范表示的概念是，如果每个部件都符合该规范的要求，则设备的电磁兼容性就能得到保障。由于电磁兼容讨论和处理的是设备或系统的非设计性能和非工作性能，例如发射机的非预期发射和接收机的非预期响应，很自然，电磁兼容标准和规范也要强调设备或系统的非预期方面，并用相应的词句描述。

2. 国内电磁兼容标准和规范

我国的电磁兼容标准和规范制度工作开展较晚，与国际发展水平存在一定的差距。国内第一个无线电干扰标准是 1966 年制定的 JB854—66《船用电气工作无线电端子电压测量方法与允许值》，它比美国的第一个无线电干扰标准晚 20 年。1981 年，由国家标准局召集有关部门和单位成立了“全国无线电干扰标准化工作组”，提出制定包括国家级和部级共 32 项电磁兼容标准和规范的计划。1986 年，国防科工委正式颁布了 GJB151，GJB152 和 GJB72 等我国第一套三军通用的电磁兼容标准。

这些标准和规范的制定和实施，使我国电子、电气产品的工作可靠性和稳定性显著提高，环境的电磁污染也得到一定的控制。电磁兼容标准和规范对电子设备和系统的研制和生产提出了新的要求，许多工厂、研究所都把电子设备的电磁兼容性设计作为重要的设计内容。

3. 国外电磁兼容标准和规范

国外在研究、制定和实施电磁兼容标准方面已有较长的历史。美国从 20 世纪 40 年代起到现在已先后制定了有关的军用标准和规范 100 多个。

国际无线电干扰特别委员会(CISPR)作为国际电工技术委员会(IEC)的下属机构，是国际间从事无线电干扰研究的权威组织。它以出版物的形式向世界各国推荐各种电磁兼容标准和规范，并已被许多国家直接采纳，成为电磁兼容民用标准和通用标准。

由于各个国家的实际情况不同，各国制定的电磁兼容标准和规范也不尽相同，这给电子设备的国际贸易带来了一定的不便，较好的解决方法是制定一个全球统一的 EMC 标准和规范。显然这是一项艰巨的任务，需要国际间长期的不懈努力与合作。

1.3 频谱工程

1. 电磁频谱

一个电磁振荡的能量在频域上的分布称为该振荡的频谱,可以用频谱函数或频谱图来表示。电磁频谱在极宽的频域内存在,其频率可从 $5 \times 10^{-4} \sim 6 \times 10^{22}$ Hz。人类目前利用的无线电频谱大约在3 Hz~3 000 GHz,但最拥挤的频段为中频(300~3 000 kHz)、高频(3~30 MHz)、甚高频(30~300 MHz)、特高频(300~3 000 MHz)等几个频段。

可见,电磁频谱是一个有限的自然资源。在科学技术特别是电子技术高度发达的今天,对频谱的需求越来越多,使用的频率越来越拥挤。因此,如何合理、有效地利用无线电频谱已成为一个重要的研究课题。

2. 频谱管理

(1) 频谱管理机构。我国现行的无线电管理体制为国家无线电管理局,又称为国家无线电办公室,其办事机构挂靠在信息产业部,下设各省市(地区)的无线电管理委员会(隶属于当地政府负责地方的无线电管理)、中国人民解放军无线电管理委员会(简称全军无委,挂靠在总参通信部)以及各军区无委负责军队的无线电管理。使用者若需占用电磁频谱中某一频段的某个频道,必须向相应的无委会(无线电技术委员会)提出申请,得到批准后才能开始使用。

国际电信联盟(ITU)是负责协调国际无线电事宜的组织,是联合国处理电信问题的专门机构。ITU有四个常设机构,即总秘书处、国际电报电话咨询委员会(CCITT)、国际无线电咨询委员会(CCIR)和国际频率登记委员会(IFRB)。“国际无线电规则”是ITU进行无线电频率协调和管理的唯一依据,具有国际法性质。

(2) 频谱管理方法。

1) 频率分配。频率分配是指给某一种业务划定一个或一组使用频率的范围,如移动通信的频率为900 MHz和1 800 MHz,它遵循以下原则:

第一,所选用的频段须符合国际和国家有关无线电管理部门的有关规定,根据系统或设备的业务种类,在指定的频段内选用的工作频段或工作频率,并向相应的管理部门(无委会)提出频率申请。

第二,在确定新系统的工作频率时,应避免使用部门现有的和规划中的频率,避免使用环境中其他系统的频率,以免新系统投入使用后发生相互干扰。

第三,综合考虑系统或设备的技术体制、信息带宽、电波传播特性、战术或使用性能要求,以及元器件水平、成本、技术成熟程度等因素,选取合适的工作频段。尽可能避免选用已经十分拥挤的频段。

第四,含有若干分系统、子系统的大型无线电工程,在分配频率时,应注意勿使大量设备集中于同一频段而难于实现电磁兼容性。

2) 频率指配。对无线电设备指定具体的工作频率的过程称为频率指配。在进行频率指配时,除了必须按有关无线电管理文件的规定,在规定的频段内进行指配外,还应注意以下问题:

第一,避开有关保护频率(如标准时间信号频率、遇险呼救频率)以及常规无线电广播、电

视等频率及其谐波的影响。

第二,为在使用区域内避免同频干扰、邻道干扰、中频干扰、镜像干扰以及相互干扰,在指配频率时必须进行干扰预测分析,并根据业务性质、通信质量等要求确定干扰余量及保护比。

第三,除频率因素外,还须考虑使用环境、作用距离、发射功率、谐波与杂波电平、占有带宽等因素。

(3)无线电监测。无线电监测是维护电波秩序,实现频谱管理的重要手段,是各级无线电管理部门的首要任务之一。各省市无线电管理委员会都设有无线电监测计算站。其监测的主要内容包括:本区所有发射台的无线电发射是否符合规定;记录频谱占有度;对未经允许的无线电活动进行测向定位等。

3. 频谱工程

频谱工程是研究电磁频谱特性及其应用的一门科学,其研究内容就是以充分利用频谱资源、实现电磁兼容性为目的,从频谱特性、电波传播、频率分配、干扰分析、系统的技术体制和设备性能以及频谱管理方法等方面,去研究以节省频谱、实现电磁兼容性为原则的若干技术问题。具体包括以下内容:

(1)从频谱管理人员的角度考虑:

第一,频率的指配;

第二,短期兼容规划;

第三,利用的政策;

第四,为压缩所用的频谱而改进设备技术规程的准备;

第五,过载的解决和在实际工作中发生的干扰问题;

第六,附属设备调度的考虑。

(2)从频谱规划者的角度考虑:

第一,最佳频率分配和分布研究;

第二,频谱过载研究(现在的和预测的);

第三,现在受到的和预测的干扰问题的研究;

第四,频谱使用的规定和测量;

第五,为提高频谱的使用率,设备和系统特性的最优化;

第六,大范围兼容规划;

第七,自然的和人为的无线电干扰方面的知识和可能的控制;

第八,别的通信手段的评价;

第九,设备、系统和操作规则的目标;

第十,频谱使用对信息传递的研究。

(3)从设备设计者的角度考虑:

第一,降低寄生辐射;

第二,接收机截止频率以外响应的降低;

第三,在给定带宽下接收特性的最佳化;

第四,发射机和接收机产生相互调制的控制;

第五,为使覆盖范围最大、干扰最小,天线系统设计的最优化;

第六,辐射噪声的抑制和减少。

4. 有效利用频谱的有关技术

频谱利用是通信系统电磁兼容性研究的重要课题,有效地利用频谱,是实现电磁兼容性的技术手段之一。

(1)短波预测与实时选频技术。短波通信是远距离通信的主要手段之一。但是,短波信道是以电离层为主要媒介实现信号传输的,由于电离层的不稳定性,短波信道成为时变色散通道。短波预测与实时选频技术就是为了克服这一缺点,自动选择最佳工作频率,实现自适应通信,确保通信质量的一种手段。

实时选频是基于对电离层的实时探测和预报,实现最佳通信。它可以针对任何一种通信体制选择最佳频率,从而提高短波频段的利用率。

(2)频率自适应与功率自适应技术。频率自适应技术是一种载频自动转换系统,或称自动躲避干扰系统。在复杂的电磁环境下,遇到干扰可以自动寻找可用信道,将载频转换到不受干扰的频道上去。

功率自适应即功率自动控制,多用于移动通信网中。移动台在运动中随着距离的变化,其发射功率受接收信号强度的控制,即当接收信号强度增加时,在保证本信道通信质量的条件下,通过电台的控制单元降低本台的发射功率,从而可降低或消除基地台附近由移动台造成的邻道干扰、强信号干扰和互调干扰,达到多信道兼容的目的。

(3)频率共用与频率再用技术。频率共用与频率再用是充分有效地利用频谱资源的方法之一,两者在本质上没有严格的区别,都是实现同一频率的重复使用。通常,同一地区(或相邻地区)在不同的业务之间共同使用一个频段(或一个频率)称为频率共用。而频率再用则是指在同一种业务或同一通信系统中,同一地区(或相邻地区)的许多用户使用同一频率。

最小必需的有用信号与干扰信号之比,称为同频干扰保护比。频率共用与频率再用技术的关键是解决同频干扰,使干扰信号小于正常接收的有用信号。满足这个要求时,虽有同频干扰信号存在,但不影响正常接收。

通过限制发射功率、使用窄波束定向天线、采用不同极化、使用自适应抗干扰天线、扩展频谱调制等手段可以满足同频干扰保护比的要求,以实现频率共用与频率再用。

(4)信道复用技术。在一个无线信道上实现多用户同时通信,这种方式称为信道复用。与一对用户占用一个射频信道的方式相比,采用信道复用技术显然大大地提高了频谱利用率。

采用频分复用(FDM)和时分复用(TDM)方法就可以实现信道的多路复用。

(5)扩频通信技术。在码分多址(CDMA)体制中,各站发送的载波包含有两种调制:一种是基带信号(可以是数字的或模拟的)的调制;另一种是地址码的调制。接收时则根据地址码的不同来区分别地址。用地址码对已调载波进行了再调制,使其频谱宽度比原来大为扩展,这就是扩频通信技术。

1.4 电磁兼容性的实施

实施电磁兼容性的目的是保证系统和设备的电磁兼容性。从总体上看,电子、电气设备或系统的电磁兼容性实施,必须采取技术和组织两方面的措施。技术措施是系统工程方法、电路

技术方法、设计和工艺方法的总和,其目的是改善电子、电气设备的性能。采用这些方法是为了降低干扰源产生的干扰电平,增加干扰在传播途径上的衰减,降低敏感设备对干扰的敏感性,等等。组织措施是对各设备和系统进行合理的频谱分配,并选择设备或系统分布的空间位置,还包括制定和采用某些限制和规章。其目的就在于整顿电子、电气设备的工作,以便排除非有意干扰。

在现代电子技术发展的过程中,先后出现过问题解决法、规范法和系统法来实施设备和系统的电磁兼容性。

问题解决法是先行研制,然后根据研制成的设备和系统在联试中出现的电磁干扰问题,运用各种抑制干扰的技术去逐个解决。这是一种落后而冒险的方法,因为系统已经装配好,再去“解决”电磁干扰问题是很困难的。为了解决问题,可能要进行大量的拆卸和修改,甚至还要重新设计。这种方法显然是不可取的。

规范法是按颁布的电磁兼容标准和规范进行设备和系统设计制造。这种方法可以在一定程度上预防电磁干扰问题的出现,较之问题解决法更为合理。但由于标准和规范不可能是针对某个设备和系统而制定的。因此,试图解决的问题不一定是真正存在的问题。

系统法是用计算机技术针对某个特定系统和设备的设计方案进行电磁兼容性预测和分析。系统法从设计开始就预测和分析设备或系统的电磁兼容性,并在设备或系统设计、制造、组装和试验过程中不断对其电磁兼容性进行预测分析。若预测结果表明存在不兼容问题或存在太大的过量设计,则可修改设计后再进行预测,直到预测结果表明完全合理,再进行硬件生产。用这种方法进行系统或设备的设计和研制,基本上可以避免一般出现的电磁干扰问题或过量的电磁兼容性设计。因此,系统法被广泛地应用于现代电子系统或设备的设计和制造之中。

通过利用系统法对系统或设备进行电磁干扰预测与分析之后,还应进行系统的电磁兼容性设计,这与干扰的预测、分析是紧密相连的。最后,还必须进行系统的电磁兼容性试验或测量予以验证。这就是实施电磁兼容性的三大步骤。

1.5 电磁兼容研究的内容

电磁兼容的研究是围绕构成电磁干扰的三要素进行的。其三要素即干扰源、干扰传输途径和干扰接收器。研究干扰产生的机理、干扰源的发射特性以及如何抑制干扰的发射;研究干扰以何种方式、通过什么途径传输的,以及如何切断这些传输通道;研究干扰接收器对干扰产生何种响应以及如何提高接收器的抗干扰能力即敏感度。围绕这些问题可把电磁兼容的研究内容粗略地分为以下几大类。

1. 干扰源的研究

干扰产生的原因包括:各种放电产生的噪声,金属接触面之间产生的噪声,过渡现象即电压电流的瞬时变化产生的噪声,无用信号产生的干扰,信号反射引起的干扰,强电磁辐射源及脉冲产生的干扰,等等。

干扰源通常分为自然干扰源和人为干扰源。自然干扰源是自然界本身产生的,例如主要由雷电引起的大气噪声,由磁暴引起的太阳噪声和来自银河系统的宇宙噪声等,它对无线电通

信广播会产生相当大的影响,下雨时发生的雷电还可能直接危害电子设备的安全。人为干扰主要由人们制造的各种电气电子设备产生,这里指的是无意识的干扰,至于为达到某种目的而施放的有意识干扰,例如电子对抗等则不属于电磁兼容的研究领域。

2. 传输途径的研究

干扰主要是通过空间辐射和导线传导方式从干扰源传输到干扰接收器的。当两者间的距离与波长相比较大时,例如研究系统间的兼容问题时,干扰以电磁波的形式传播,因此干扰电磁波的传播特性也是研究的内容之一。当两者间的距离与波长相比较小时,干扰的传输可看成是近场感应,即电场(电容)耦合或磁场(电感)耦合,主要讨论线与线、机壳与机壳、天线与天线和场与导线、机壳、天线间的耦合问题。

干扰的传导主要讨论通过电源线、控制线、信号线和其他金属体传输的共模干扰和差模干扰,还讨论由于不同设备使用公共电源或公共地线所产生的共阻抗干扰。

3. 干扰接收器的研究

干扰接收器在受到干扰侵入后会降低其性能或产生误动作,甚至危及其安全。该部分主要研究接收器对干扰的响应以及与抗干扰能力有关的指标。接收器的规模根据研究层次不同可以是系统、分系统、设备、印刷电路板和各种元器件。研究对象涉及通信、导航、雷达、广播、电视、信息处理、遥控遥测、自动控制等很多领域中的电磁敏感设备。此外,人体也是一种干扰接收器,电磁辐射对人体的生态敏感是电磁兼容性的重要研究内容之一。强电磁辐射引起燃油燃烧、武器弹药的爆炸等也在研究之列。

应该指出的是,所有发射电磁能量的设备在一定的条件下都可以成为干扰源,有时它们也可能是干扰接收器。

4. 电磁干扰抑制技术的研究

屏蔽、滤波、接地是三项最基本的干扰抑制技术。

(1)屏蔽主要用于切断通过空间辐射的干扰的传输途径,根据其性质可分为电场屏蔽、磁场屏蔽和电磁屏蔽。屏蔽体可能很小,如元件的屏蔽壳;也可能很大,例如屏蔽室。衡量屏蔽的好坏,采用屏蔽效能这一指标。屏蔽问题主要研究各种材料(如金属和磁性材料)、各种结构(如多层、单层、孔缝等)及各种形状的屏蔽体的屏蔽效能以及屏蔽体的设计。

(2)滤波技术用来抑制沿导线传输的传导干扰。该技术主要研究滤波电路的设计和装置的设计。

(3)接地除了提供设备的安全保护地以外,还提供了设备运行必需的信号参考地。该技术主要研究如何正确地布置地线以及接地体的设计等。搭接是实现接地的实际技术,如何减小搭接电阻也是接地需要研究的问题之一。

屏蔽、接地和滤波主要用来切断干扰的传输途径。从广义上看电磁干扰的抑制还应包括抑制干扰源的发射和提高敏感器的抗干扰能力。但由于干扰源和敏感器种类繁多,功能不同,其控制技术已延伸到其他学科领域。

5. 测试技术的研究

对电磁兼容性测试的研究是非常重要的,它贯穿于电磁兼容性实施的各种阶段,主要对测试方法、测试仪器设备和测试场所进行研究。

测试方法包括干扰源的辐射发射和传导发射特性的测试,干扰接收器的辐射敏感度和传导敏感度的测试。由于干扰源和接收器种类繁多,用途不一,有军用的、民用的,所占频带很宽,从几赫兹到几十吉赫兹,所以对测试方法必须分频段并根据用途归类进行研究。

电磁兼容性测试使用的专门仪器通常有干扰场强测试仪、带预选器准峰值适配器的频谱分析仪、数字或模拟存储示波器等,用于进行干扰的频域和时域测量。由于绝大部分人为干扰都是脉冲性的宽带干扰,所以要求这些仪器具有良好的脉冲响应。与这些仪器配合使用的专用设备有各种天线、各种探头、功率吸收钳、人工电源网络、各种干扰脉冲模拟器等。这些仪器设备的研制、开发使用和自动测试网络的组建等是研究的主要内容。

电磁兼容性测试应该在规定的场所进行,例如室外开阔场地、屏蔽室、屏蔽半暗室、混响室、横电波小室(TEM CELL)、角锥型横电波小室(CTEM CELL)。要了解场所对测量结果的影响必须研究场所的特性,例如研究开阔场的传输衰减、屏蔽室中的谐振模、屏蔽半暗室的静区、横电磁波小室内场的分布等。

1.6 电磁兼容系统常用的单位——分贝

1. 声音中的音量单位

分贝(decibel)dB最初用于表示声音的响度,声音其实是经媒介传递的快速压力变化。当声音在空气中传递时,大气压力会循环变化。每一秒内压力变化的次数叫作频率,量度单位是赫[兹](Hz),其定义为每秒的周期数目。频率越高,声音的音调越高。响亮度是声音或噪声的另一个特性。强的噪声通常有较大的压力变化,弱的噪声压力变化则较小。压力和压力变化的量度单位为帕[斯卡](Pa)。其定义为牛/平方米(N/m^2)。人类的耳朵能感应声压的范围很大。正常的人耳能够听到最微弱的声音叫作听觉阈,为20个微帕(μPa)的压力变化,即 20×10^{-6} Pa。另一方面,非常噪吵的情况能产生很大的压力变化,如一架太空穿梭机在发出最大马力时能在近距离产生大约2000 Pa的噪声。

显然,如用帕来表达声音或噪声会颇为不便。较简单的做法是用一个以10为底的对数标度(logarithmic scale)来表达声音或噪声的响亮度,故使用分贝这个标度。该标度以听觉阈 $20 \mu Pa$ 作为参考声压值,并定义这声压水平为0 dB。

日常生活和工作中离不开自然计数法,但在一些自然科学和工程计算中,对物理量的描述往往采用对数计数法。从本质上讲,在这些场合用对数形式描述物理量是因为它们符合人的心理感受特性。这是因为,在一定的刺激范围内,当物理刺激量呈指数变化时,人们的心理感受是呈线性变化的。它揭示了人的感官对宽广范围刺激的适应性和对微弱刺激的精细分辨,好像人的感受器官是一个对数转换装置一样。例如两倍频的声音可以感受一个八度音程,而一个十二平均律的小二度正好是八度音程的对数的 $1/12$ 。

用对数标度来表达声音和噪声还有另一优点:人类的听觉反应是基于声音的相对变化而

非绝对的变化。对数标度正好能模仿人类耳朵对声音的反应。

现实生活中我们经常会同时遇到几个声音。如果一个声音与另一个声音结合时,会产生什么结果呢?我们都知道 60 个苹果加 60 个苹果,等于 120 个苹果。但是,这种方法并不适用于以 dB 来表示的声音。

分贝是音量的单位,分贝数越大表示所发出的声音越大,分贝在计算上是每增加 10 dB,则声音大小约是原来的 10 倍。

2. 通信系统传输单位

采用对数描述的物理量,一是用较小的数描述了较大的动态范围,特别有利于作图的情况。它也把某些非线性变化的量转换成线性量。例如频率从 0 Hz 到 1 Hz 的差别可比 1 000 ~ 1 001 Hz 差别大得多。当然频率的对数单位不是以 dB 而是以倍频程表示。另一个好处是把某些乘、除运算变成了加、减运算,如计算多级电路的增益,只须求各级增益的代数和,而不必将各级的放大/衰减倍数相乘。零和小于零的负数是没有对数的,只有大于零的正数才能取对数,这样一来,最初的物理量经过对数转换后,原来的功率、幅度、倍数等这些非负数性质的量,它们的值域便扩展到了整个实数范围。这并不意味着它们本身变负了,而只是说明它们与给定的基准值相比,是大于基准值还是小于基准值,小于则用负对数表示,若大于则用正对数表示。

分贝的计算很简单,对于振幅类物理量,如电压、电流强度等,将测量值与基准值相比后求常用对数再乘以 20;对于它们的二次方项的物理量如功率,取对数后乘以 10 就行了;不管是振幅还是功率,变成分贝后它们的量级是一致的,可以直接进行比较、计算。

在电信技术中一般都是选择某一特定的功率为基准,取另一个信号相对于这一基准的比值的对数来表示信号功率传输变化情况,经常是取以 10 为底的常用对数和以 $e=2.718$ 为底的自然对数来表示。其所取的相应单位分别为贝尔(B)和奈培(Np)。贝尔(B)和奈培(Np)都是没有量纲的对数计量单位。分贝(dB)的英文为 decibel,1/10(它的词冠来源于拉丁文 decimus,意思是十分之一)分贝一词于 1924 年首先被应用到电话工程中。

在 1926 年国际长途电话咨询委员会召开的第一次全体会议上,讨论并通过了使用传输单位的建议,贝尔和奈培正式在通信领域中普遍使用。分贝的代号也有过多种形式:DB,Db,db,dB。1968 年国际电报电话咨询委员会(CCITT)第四次全会考虑到在通信领域里同时使用两种传输单位非常不方便,而当时无线电领域中却只使用着一种传输单位 dB,因此全会规定在国际上只使用分贝一种传输单位,并统一书写为 dB。

我国在 1980 年以前,无线电领域多使用 dB,载波电话、电报等多使用 Np,测量海拔高低的基准点是位于青岛的黄海水准点,测量温度高低的基准点是纯水在一个大气压时的结冰点,测量电信号(功率、电压、电流)的基准点是人为选择的特定基准,这个基准暂且把它叫做“零电平”。这个特定的功率基准就是取 1 mW 功率作为基准值,这里要特别强调的是,这 1 mW 基准值是在 600 Ω 的纯电阻上耗散 1 mW 功率,此时电阻上的电压有效值为 0.707 V,所流过的电流为 1.291 mA。取作基准值的 1 mW,0.707 V,1.291 mA 分别称为零电平功率,零电平电压和零电平电流(我们国家不采用电流电平测量基准)。

(1)功率电平。利用功率关系所确定的电平可以称为功率电平(需要计量的功率值和功率为 1 mW 的零电平功率比较),用数学表达式描述就是:

$$P_{\text{dBm}} = 10 \lg(P_{\text{mW}}/1) \quad (1.1)$$

式中, P_{dBm} 表示以 1 mW 为基准的功率电平的分贝值; P_{mW} 代表需要计量的绝对功率值, 单位为 mW。

如果以 1 W 作为基准参考量, 此时是以带有功率量纲的分贝 dBW 表示 P , 所以

$$P_{\text{dBW}} = 10 \lg \frac{P_{\text{w}}}{1 \text{ W}} = 10 \lg P_{\text{w}} \quad (1.2)$$

式中, P_{w} 是实际功率的绝对值, 以 W 为单位; P_{dBW} 是用 dBW 表示的功率值。

类似地, 以 1 μ W 作为基准参考量, 表示 0 dB μ W, 称为分贝微瓦。dBW, dBmW, dB μ W 的换算关系为

$$P_{\text{dBmW}} = 10 \lg P_{\text{mW}} = 10 \lg P_{\text{w}} + 30 \quad (1.3)$$

$$P_{\text{dB}\mu\text{W}} = 10 \lg P_{\mu\text{W}} = 10 \lg P_{\text{mW}} + 30 = 10 \lg P_{\text{w}} + 60 \quad (1.4)$$

(2) 电压电平。电压的单位有 V(伏)、mV(毫伏)、 μ V(微伏), 电压的分贝单位(dBV, dBmV, dB μ V) 表示为

$$U_{\text{dBV}} = 20 \lg \frac{U_{\text{V}}}{1 \text{ V}} = 20 \lg U_{\text{V}} \quad (1.5)$$

$$U_{\text{dBmV}} = 20 \lg \frac{U_{\text{mV}}}{1 \text{ mV}} = 20 \lg U_{\text{mV}} \quad (1.6)$$

$$U_{\text{dB}\mu\text{V}} = 20 \lg \frac{U_{\mu\text{V}}}{1 \mu\text{V}} = 20 \lg U_{\mu\text{V}} \quad (1.7)$$

电压以 V, mV, μ V 为单位和以 dBV, dBmV, dB μ V 为单位的换算关系为

$$U_{\text{dBmV}} = 20 \lg \frac{U_{\text{V}}}{10^{-3} \text{ V}} = 20 \lg U_{\text{V}} + 60 \quad (1.8)$$

$$U_{\text{dB}\mu\text{V}} = 20 \lg \frac{U_{\text{V}}}{10^{-6} \text{ V}} = 20 \lg U_{\text{V}} + 120 = 20 \lg U_{\text{mV}} + 60 \quad (1.9)$$

(3) 电流电平。电流的单位是 A(安)、mA(毫安)、 μ A(微安), 电流的分贝单位(dBA, dBmA, dB μ A) 表示为

$$I_{\text{dBA}} = 20 \lg \frac{I_{\text{A}}}{1 \text{ A}} = 20 \lg I_{\text{A}} \quad (1.10)$$

$$I_{\text{dBmA}} = 20 \lg \frac{I_{\text{A}}}{1 \text{ mA}} = 20 \lg I_{\text{mA}} \quad (1.11)$$

$$I_{\text{dB}\mu\text{A}} = 20 \lg \frac{I_{\mu\text{A}}}{1 \mu\text{A}} = 20 \lg I_{\mu\text{A}} \quad (1.12)$$

电流以 A, mA, μ A 为单位和以 dBA, dBmA, dB μ A 为单位的换算关系为

$$I_{\text{dBmA}} = 20 \lg \frac{I_{\text{A}}}{10^{-3} \text{ A}} = 20 \lg I_{\text{A}} + 60 \quad (1.13)$$

$$I_{\text{dB}\mu\text{A}} = 20 \lg \frac{I_{\text{A}}}{10^{-6} \text{ A}} = 20 \lg I_{\text{A}} + 120 = 20 \lg I_{\text{mA}} + 60 \quad (1.14)$$

(4) 电场强度。电场强度的单位是伏/米(V/m), 毫伏/米(mV/m), 微伏/米(μ V/m), 电场强度的分贝单位为 dBV/m, dBmV/m, dB μ V/m。

$$E_{\text{dB}(\mu\text{V}/\text{m})} = 20 \lg \frac{E_{\mu\text{V}/\text{m}}}{1 \mu\text{V}/\text{m}} = 20 \lg E_{\mu\text{V}/\text{m}} \quad (1.15)$$

因为