

普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
高等学校电子信息类精品教材

# 电磁兼容原理与技术

## (第4版)

杨德强 潘 锦 杨显清 胡皓全 编著

电子工业出版社版权所有  
盗版必究

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

本书从电磁兼容基本概念入手,由“电磁干扰三要素”中的“电磁干扰源”和“耦合通道”展开,介绍电磁干扰源的特点及性质,分析传导干扰和辐射干扰,阐述抑制电磁干扰的“三大技术(接地、屏蔽和滤波)”的基本方法及应用,电磁兼容预测分析数学模型、预测方法,电磁兼容性测试设备与场地、测试内容与方法,还附有电磁兼容性教学实验,使读者对电磁兼容的知识有一个较为全面的了解,为日后进一步研究和解决电磁兼容问题打下坚实的基础。

本书适合作为电气与电子信息类专业本科生的教材,可作为研究生相关课程的参考教材,也可供从事电子技术的工程技术人员参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

## 图书在版编目(CIP)数据

电磁兼容原理与技术/杨德强等编著. —4版. —北京:电子工业出版社,2023. 10

ISBN 978-7-121-46452-2

I. ①电… II. ①杨… III. ①电磁兼容性-高等学校-教材 IV. ①TN03

中国国家版本馆 CIP 数据核字(2023)第 183335 号

责任编辑:韩同平

印 刷:

装 订:

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编:100036

开 本:787×1092 1/16 印张:13.25 字数:424 千字

版 次:2012 年 1 月第 1 版

2023 年 10 月第 4 版

印 次:2023 年 10 月第 1 次印刷

定 价:59.90 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888, 88258888。

质量投诉请发邮件至 [zltz@phei.com.cn](mailto:zltz@phei.com.cn), 盗版侵权举报请发邮件至 [dbqq@phei.com.cn](mailto:dbqq@phei.com.cn)。

本书咨询联系方式:88254525, [hantp@phei.com.cn](mailto:hantp@phei.com.cn)。

# 前 言

新中国成立特别是改革开放以来,在中国共产党的坚强领导下,我国国民经济持续快速增长,人民生活水平显著提高。从新中国成立伊始提出建设“社会主义现代化”、构建独立自主、门类齐全的工业体系,到改革开放后大力推进新型工业化、信息化、城镇化、农业现代化,再到新时代提出以新发展理念统领经济社会发展全局、实现高质量发展,我们党总能顺应时代潮流,为我国现代化进程和经济发展指明方向。如今,电子信息产业作为新一轮科技革命和产业变革的重要领域,作为推动信息化与工业化深度融合的重要动力,在国民经济和社会发展战略中的战略性、基础性、先导性作用更加突出,已经成为国际竞争的制高点。随着电子信息技术产品数量大幅度增加,新技术在深刻改变着人们生产和生活方式的同时,产生了日益突出的电磁干扰问题,也促进了电磁兼容学科的发展。

电磁兼容是一门综合性交叉学科,以电磁场理论和电路理论为基础,并涉及通信系统、信息与信号处理、计算机科学与技术、电子机械与控制系统、电磁测量、材料科学、生物医学工程等。随着现代科学技术的发展,电子电气设备或系统获得越来越广泛的应用,电磁环境日益复杂,处在其中的电子电气设备面临越来越多的干扰,造成性能降低、功能丧失的概率明显增加。因此,在电子电气设备和系统的设计、研制和生产过程中,如何解决电磁兼容问题已受到越来越广泛的重视。对于广大的工程技术人员来说,了解电磁兼容的基本原理,掌握电磁兼容的工程技术是十分必要的。

**本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。**

本书从电磁兼容基本概念入手,由“电磁干扰三要素”中的“电磁干扰源”和“耦合通道”展开,介绍电磁干扰源的特点及性质,分析传导干扰和辐射干扰,进而讨论电磁干扰控制原理及控制电磁干扰的“三大技术(接地、屏蔽和滤波)”,介绍电磁兼容预测分析及电磁兼容性测试技术,还附有电磁兼容性教学实验,使读者对电磁兼容的知识有一个较为全面的了解,为日后进一步研究和解决电磁兼容问题打下坚实的基础。

本书第4版第1、2章由潘锦完成,第3、4章由胡皓全完成,第5、6章由杨显清完成,第7、8、9章由杨德强完成,全书由杨德强统编定稿。在本书编写和出版过程中,本书责任编辑韩同平做了大量耐心细致的工作,在此一并致以衷心的感谢。同时也对本书所列参考文献的作者表示衷心的感谢。

电磁兼容涉及面广、内容丰富,处于迅速发展之中,而作者学识有限,书中难免有不妥和错误之处,敬请读者批评指正。

作 者

于电子科技大学

(dqyang@uestc.edu.cn)





# 目 录

第 1 章 电磁兼容概论 .....	(1)	3.4.2 磁基本振子(磁流元)的辐射 ...	(41)
1.1 电磁干扰及其危害 .....	(1)	3.4.3 辐射耦合方式 .....	(42)
1.2 电磁兼容的基本概念 .....	(3)	习题 .....	(42)
1.2.1 电磁兼容的含义 .....	(3)	第 4 章 接地与搭接技术 .....	(43)
1.2.2 基本电磁兼容技术术语 .....	(3)	4.1 接地的概念 .....	(43)
1.2.3 电磁干扰效应 .....	(7)	4.2 安全接地 .....	(44)
1.3 电磁兼容学科的研究领域 .....	(7)	4.3 信号接地 .....	(45)
1.4 电磁兼容的研究方法 .....	(10)	4.3.1 单点接地 .....	(45)
1.4.1 电磁兼容学科的特点 .....	(10)	4.3.2 多点接地 .....	(47)
1.4.2 电磁兼容的实施 .....	(11)	4.3.3 浮地 .....	(48)
1.4.3 电磁兼容研究的几个重要 发展趋势 .....	(12)	4.3.4 混合接地 .....	(49)
1.5 电磁兼容性标准概况 .....	(13)	4.3.5 转换接地 .....	(49)
1.5.1 电磁兼容性标准的基本内容 ...	(13)	4.4 地线回路的干扰及抑制 技术 .....	(50)
1.5.2 国内外电磁兼容性标准简介 ...	(14)	4.4.1 地线回路中的电磁干扰 .....	(50)
1.6 电磁兼容计量单位和换算 关系 .....	(16)	4.4.2 两点接地时的噪声电压 .....	(51)
习题 .....	(18)	4.4.3 抑制地回路耦合电磁干扰的 技术 .....	(53)
第 2 章 电磁干扰源 .....	(19)	4.5 电缆屏蔽体的接地 .....	(59)
2.1 电磁干扰源的分类 .....	(19)	4.5.1 低频电缆屏蔽体接地点的 选择 .....	(59)
2.2 自然电磁干扰源 .....	(20)	4.5.2 高频电缆屏蔽体的接地 .....	(61)
2.3 人为电磁干扰源 .....	(24)	4.6 屏蔽盒的接地 .....	(62)
2.4 电磁干扰源的基本性质 .....	(27)	4.6.1 单层屏蔽盒的接地 .....	(62)
习题 .....	(29)	4.6.2 双层屏蔽盒的接地 .....	(63)
第 3 章 电磁干扰的耦合与传播 .....	(30)	4.7 搭接 .....	(63)
3.1 电磁干扰的耦合方式 .....	(30)	习题 .....	(65)
3.2 传导干扰传输线路的性质 ...	(31)	第 5 章 屏蔽技术 .....	(67)
3.3 传导耦合分析 .....	(32)	5.1 概述 .....	(67)
3.3.1 电阻性耦合 .....	(32)	5.2 电屏蔽 .....	(68)
3.3.2 电容性耦合 .....	(34)	5.2.1 电屏蔽的原理和分析 .....	(68)
3.3.3 电感性耦合 .....	(38)	5.2.2 低频电屏蔽效能的计算 .....	(69)
3.4 辐射耦合分析 .....	(39)	5.2.3 电屏蔽的设计要点 .....	(71)
3.4.1 电基本振子(电流元)的辐射 ...	(39)		

5.2.4 多级级联电路的屏蔽盒结构	(71)
5.3 磁屏蔽	(72)
5.3.1 磁屏蔽的原理和分析	(72)
5.3.2 磁屏蔽效能的计算	(73)
5.3.3 磁屏蔽体的设计要点	(75)
5.4 电磁屏蔽	(75)
5.4.1 电磁屏蔽的原理和分析	(75)
5.4.2 单层金属板的电磁屏蔽效能	(76)
5.4.3 双层屏蔽的电磁屏蔽效能	(80)
5.4.4 薄膜屏蔽的电磁屏蔽效能	(81)
5.4.5 非实心型屏蔽体的电磁屏蔽效能	(82)
5.4.6 装配面处缝隙电磁泄漏的抑制	(83)
5.4.7 通风孔的电磁屏蔽	(84)
5.4.8 观察窗口(显示器件)电磁泄漏的抑制	(89)
5.4.9 器件调谐孔(有连接杆的操作器件)电磁泄漏的抑制	(90)
5.5 电磁屏蔽设计要点	(90)
习题	(91)
第6章 滤波技术	(92)
6.1 电磁干扰滤波器的特性和分类	(92)
6.2 插入损耗的计算方法	(94)
6.3 反射式滤波器	(95)
6.3.1 低通滤波器	(95)
6.3.2 高通滤波器	(101)
6.3.3 带通滤波器	(103)
6.3.4 带阻滤波器	(103)
6.4 电容、电感的频率特性	(103)
6.4.1 电容的频率特性	(104)
6.4.2 电感的频率特性	(106)
6.5 有源滤波器	(107)
6.6 吸收式滤波器	(108)
6.7 反射-吸收组合式低通滤波器	(108)
6.8 电源滤波器	(109)
6.9 滤波器的选择和使用	(110)
习题	(112)

第7章 电磁干扰预测	(113)
7.1 电磁干扰预测的目的和作用	(113)
7.2 电磁干扰预测建模	(113)
7.3 电磁干扰发射机模型	(116)
7.3.1 基波发射模型	(117)
7.3.2 谐波发射模型	(118)
7.3.3 非谐波发射模型	(119)
7.4 电磁干扰接收机模型	(120)
7.4.1 接收机的选择性	(120)
7.4.2 基本接收通道模型	(121)
7.4.3 乱真响应模型	(121)
7.4.4 接收机互调	(123)
7.4.5 接收机交调	(123)
7.4.6 接收机减敏	(124)
7.5 天线模型	(124)
7.5.1 天线的方向性	(124)
7.5.2 全向天线的方向图	(125)
7.5.3 定向天线的方向图	(126)
7.5.4 发射天线-接收天线对的极化匹配修正	(128)
7.5.5 近场天线模型	(128)
7.5.6 发射天线-接收天线对的配置	(129)
7.5.7 天线扫描	(130)
7.6 电磁干扰预测方法	(131)
7.6.1 电磁干扰预测的基本步骤	(131)
7.6.2 分级预测方法	(131)
7.7 系统间电磁干扰预测	(133)
7.7.1 干扰预测方程	(133)
7.7.2 系统间干扰预测实施过程	(135)
7.8 系统间电磁干扰控制	(138)
7.8.1 频率管理	(139)
7.8.2 时间管理	(140)
7.8.3 空间管理	(141)
7.9 系统内部电磁干扰预测	(143)
7.9.1 系统内部电磁干扰预测流程	(143)
7.9.2 系统内部 EMI 预测实例	(144)
习题	(146)

<b>第 8 章 电磁兼容性测试技术</b> .....	(147)	8.5.1 一般要求 .....	(167)
8.1 电磁兼容性测试项目 .....	(147)	8.5.2 传导发射测试 .....	(169)
8.2 测试场地 .....	(149)	8.5.3 传导敏感度测试 .....	(170)
8.2.1 开阔测试场地 .....	(149)	8.5.4 辐射发射测试 .....	(174)
8.2.2 屏蔽室 .....	(150)	8.5.5 辐射敏感度测试 .....	(175)
8.2.3 电波暗室 .....	(151)	<b>8.6 电磁兼容的自动测试技术</b>	
8.2.4 混波室 .....	(151)	简介 .....	(179)
8.2.5 平行板线 .....	(152)	8.6.1 电磁干扰自动测试系统 .....	(179)
8.2.6 横电磁波传输室 .....	(153)	8.6.2 电流传导敏感度自动测试系统 .....	(180)
8.2.7 吉赫兹横电磁波传输室 .....	(154)	<b>8.7 电磁干扰扫描装置</b> .....	(181)
<b>8.3 常用测试仪器与设备</b> .....	(154)	<b>8.8 移动电话比吸收率(SAR)</b>	
8.3.1 电磁干扰测量仪 .....	(155)	测试系统 .....	(182)
8.3.2 频谱分析仪/电磁干扰接收机 .....	(157)	习题 .....	(184)
8.3.3 线路阻抗稳定网络(LISN) .....	(159)	<b>第 9 章 电磁兼容性教学实验</b> .....	(185)
8.3.4 亥姆霍兹线圈 .....	(159)	实验一 传导干扰抑制与滤波	
8.3.5 电流探头 .....	(160)	实验 .....	(185)
8.3.6 功率吸收钳 .....	(160)	实验二 频谱分析仪测量小信号	
8.3.7 信号发生器 .....	(161)	实验 .....	(189)
8.3.8 功率放大器 .....	(164)	实验三 电磁屏蔽效能测量实验 .....	(193)
<b>8.4 电磁兼容性测试用天线</b> .....	(164)	实验四 利用手机工程模式开展电磁兼容实验 .....	(196)
8.4.1 电磁兼容性测试用天线的特点 .....	(164)	实验五 利用手机 Wi-Fi 开展电磁兼容实验 .....	(198)
8.4.2 各种天线简介 .....	(165)	实验六 安全接地实验 .....	(200)
<b>8.5 电磁发射测试与电磁敏感度测试</b> .....	(167)	<b>参考文献</b> .....	(204)





# 第 1 章 电磁兼容概论

随着现代科学技术的发展,电子电气设备或系统获得越来越广泛的应用。自改革开放以来,我国经济社会快速发展,综合国力显著增强,人们在生活环境中使用的电子电气设备越来越多。这些运行中的电子电气设备,为人民生活和工作带来方便的同时,其产生的电磁信号也构成了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越复杂;反之,复杂的电磁环境又对电子系统提出了更为严格的要求。人们面临着一个新问题,就是如何提高现代电子电气设备或系统在复杂的电磁环境中的生存能力,以保证电子系统按照初始设计目标正常运行。正是在这种背景下产生了电磁兼容的概念,并形成了专门的学科——电磁兼容(Electromagnetic Compatibility, EMC)。

本章将介绍有关电磁兼容的基本概念、电磁兼容的研究方法、电磁兼容性标准等。

## 1.1 电磁干扰及其危害

电磁干扰现象普遍存在于人类生活的空间。对于电磁干扰问题的研究,最早可以追溯到 19 世纪末期,1881 年科学家希维赛德发表的文章《论干扰》,开创了电磁干扰问题研究的先河。到 20 世纪 30 年代,国际无线电干扰特别委员会(CISPR)成立,开始了对电磁干扰问题进行国际性有组织的研究。可以这样说,当电子电气设备运行所发射出的电磁能量影响到其他设备的正常工作时,就产生了电磁干扰效应,或简称为电磁干扰。

电磁干扰的危害是多方面的,其危害程度也不尽相同,人们通常将电磁干扰的危害程度分为五个等级,即灾难性的、非常危险的、中等危险的、严重的、使人烦恼的。

下面介绍电磁干扰危害的几种主要表现。

### 1. 对电子设备或系统的危害

电磁干扰会对电子设备或系统产生影响,特别是对包含半导体器件的设备或系统产生严重的影响。强电磁发射能量将使电子设备中的元器件性能降低或失效,最终导致设备或系统损坏。例如,强电磁场照射可使半导体器件的结温升高,造成 PN 结击穿,使器件性能降低或失效;强电磁脉冲在高阻抗、非屏蔽线上感应的电压或电流可使高灵敏度部件受到损坏等。下面介绍一些典型电磁干扰事例。

(1) 1967 年 11 月 14 日上午,土星 V-阿波罗 12 火箭-载人飞船发射后飞行正常。起飞后 36.5 s,飞行高度为 1920 m 时,火箭遭到雷击;起飞后 52 s,飞行高度为 4300 m 时,火箭再次遭到雷击。这便是轰动一时的大型运载火箭-载人飞船在发射中诱发雷击的事件。究其原因,此次事故是由于火箭及其发动机火焰所形成的导体(火箭与飞船共长 100 m,火焰折合导电长度约 200 m)在飞行中使云层至地面之间以及云层至云层之间人为地诱发了雷电所造成的。

(2) 1971 年 11 月 5 日,欧罗巴 II 火箭发射。火箭起飞后 105 s,高度约为 27 km 时,制导计

算机发生故障,火箭姿态失控,约1分钟后火箭炸毁。故障分析和模拟试验结果表明,这次事故是由静电放电引起计算机故障所引发的。

(3) 1962年进行的民兵I导弹战斗弹状态飞行试验,前两发弹均遭到失败。这两发弹的故障现象相似,在炸毁之前,两发弹的制导计算机都受到脉冲干扰而失灵。分析表明,故障是由于导弹飞行到一定高度时,在相互绝缘的弹头结构与弹体结构之间出现了静电放电,它产生的干扰脉冲破坏了计算机的正常工作而造成的。

(4) 1982年,英(国)阿(根廷)马岛(马尔维纳斯群岛)之战,英国的一艘导弹驱逐舰,由于要进行远程通信而将雷达系统关闭,因此未能及时发现进攻之敌,被阿根廷发射的鱼鱼导弹击沉。这是未解决好舰上的雷达系统与通信系统间的电磁兼容问题而造成灾难的事例。

(5) 1997年8月13日12~14时,深圳黄田机场地空通信不断受到干扰而被迫关闭两小时。其原因是一些单位或个人擅自设置传呼台,且发射功率过大。这是国内第一起因传呼台无线电发射造成的“空中杀手”关闭机场的事件。

综上所述,电磁干扰可能使电子设备或系统的工作性能偏离预期的指标,即性能降级,甚至使设备或系统失灵,严重时还会摧毁设备或系统。

## 2. 对武器装备及燃油的危害

现代武器装备大量使用电引爆装置来完成各种功能,成为武器装备系统的重要组成部分。例如,导弹使用电引爆装置来完成点燃固体燃料、启动继电器、起爆战斗部等任务。大功率无线电发射机(如雷达发射机)产生的强辐射场可使灵敏的电引爆装置失控而过早启动,最终引起系统误发射、制导系统偏离正常飞行轨道、轰炸机误投弹等灾难性后果。对燃油的潜在危害是由电磁辐射感应电压引起的火花(或电弧)所引起的,研究表明,频率为24~32 MHz的电磁辐射当场强达到37 V/m时就可能引起电弧和电火花放电使燃油燃烧。

## 3. 对人体的危害

为研究电磁辐射对人体的影响,可将人体等效为介电体,并以等效介电系数和等效电阻率为其电参数。当电磁波照射到人体时,有一部分电磁波被反射,一部分被吸收。电磁波对人体将产生各种各样的影响,其影响程度与电磁波的频率、功率密度、照射时间、波形、生物体的构造,以及环境温度、湿度等因素有关,因而问题是相当复杂的。通常将电磁辐射对人体的影响归纳为热效应与非热效应。

当生物体受到高强度电磁辐射作用时,生物体物质产生极化和定向弛豫现象,物质分子产生热运动,使生物体的温度上升,这就是热效应。当热效应升温超过体温调节能力时,温度平衡失调,并因此出现生理功能紊乱和病理变化等各种生物效应。

生物体在长时间的低电平电磁能辐射作用下,也会引起电磁生物效应,这类效应与热效应不同,称之为非热效应。产生非热效应时,人体温度没有明显上升,但在低电平场长时间作用下,或在某一特定频段上,也会引起对生物体的损害。非热效应的机理尚不完全清楚,一般认为在一定频率的电磁场照射下,细胞分子会产生共振作用,使神经系统功能紊乱或失调,以及影响心血管系统。

热效应与非热效应的划分界限并非很明确,通常以比吸收率(SAR)的大小来划分。当 $SAR > 1 \text{ W/kg}$ 时,认为是热效应;当 $SAR < 0.1 \text{ W/kg}$ 时,认为是非热效应;处在两者之间则认为模糊的。

## 1.2 电磁兼容的基本概念

### 1.2.1 电磁兼容的含义

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。按此定义,电磁兼容性包括以下两方面的含义:

其一,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。即它应不会因受到处于同一电磁环境中的其他设备或系统发射的电磁干扰而产生不允许的工作性能降低。

其二,设备或系统不会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或系统出现超过规定限度的工作性能降级的电磁干扰。

从电磁兼容性观点出发,电子设备或系统可分为兼容、不兼容和临界三种状态,用电磁干扰余量(Interference Margin, IM)来衡量,用分贝表示即为

$$IM = P_I - P_S \quad (\text{dB}) \quad (1-1)$$

式中,  $P_I$  为干扰电平(dB);  $P_S$  为敏感度门限电平(dB)。当  $P_I > P_S$ , 即干扰电平高于敏感度门限电平时,  $IM > 0$ , 表示有潜在干扰, 设备或系统处于不兼容状态; 当  $P_I < P_S$ , 即干扰电平低于敏感度门限电平时,  $IM < 0$ , 表示设备或系统处于兼容状态; 当  $P_I = P_S$ , 即干扰电平等于敏感度门限电平时,  $IM = 0$ , 表示设备或系统处于临界状态。

在分析研究中,通常把系统内电磁兼容性和系统间电磁兼容性区分开来。前者指的是给定系统内部各分系统、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所在电磁环境中的其他系统之间的电磁兼容性。

电磁兼容是一个新概念,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干扰,发展到防止对抗各种电磁干扰,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,这样才能保证电子电气设备和系统实现电磁兼容。

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来实现。现在采用个别的、局部的措施已经远远不够了。从整体上说,电磁兼容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问题。忽视电磁兼容,设备的电磁兼容性会遭到破坏,此时要保证设备的电磁兼容性,就必须付出更昂贵的代价。

### 1.2.2 基本电磁兼容技术术语

电磁兼容作为一个新的学科领域,为保证在该领域中研究问题的统一性和设计参数、测试结果的可比性,需要统一定义一系列的名词术语,并将其作为电磁兼容标准系列之一。在这里,根据国家军标《电磁干扰与电磁兼容性术语》(GJB72A-2002)列出一部分最基本的和常用的名词术语供读者参考使用。

## 1. 一般术语

系统(system)——执行或保障某项工作任务的若干设备、分系统、专职人员及技术的组合。一个完整的系统除包括有关的设施、设备、分系统、器材和辅助设备外,还包括保障该系统在规定的环境中正常运行的操作人员。

分系统(subsystem)——系统的一个部分,它包含两个或两个以上的集成单元,可以单独设计、测试和维护,但不能完全执行系统的特定功能。每一个分系统内的设备或装置在工作时可以彼此分开,安装在固定或移动的台站、运载工具或系统中。为了满足电磁兼容性(EMC)要求,以下均应看作分系统:① 作为独立整体行使功能的许多装置或设备的组合,但并不要求其中的任何一台设备或装置能独立工作;② 设计和集成为一个系统的主要分支,且完成一种功能的设备和装置。

设备(equipment)——任何可作为一个完整单元、完成单一功能的电气、电子、机电装置或元件的集合。

运行环境(operational environment)——所有可能影响系统运行的条件和作用的总和。

电磁环境(electromagnetic environment)——存在于某场所的所有电磁现象的总和。

电磁环境电平(electromagnetic ambient level)——在规定的测试地点和测试时间内,当试验样品尚未通电时,已存在的辐射和传导的信号及噪声电平。环境电平是由人为及自然的电磁能量共同形成的。

电磁环境效应(electromagnetic environment effect)——电磁环境对电气电子系统、设备、装置的运行能力的影响。它涵盖所有的电磁学科,包括电磁兼容性、电磁干扰、电磁易损性、电磁脉冲、电子对抗、电磁辐射对武器装备和易挥发物质的危害,以及雷电和沉积静电(P-static)等自然效应。

降级(degradation)——在电磁兼容性或其他测试过程中,对规定的任何状态或参数出现超出容许范围的偏离。

性能降级(degradation of performance)——任何装置、设备或系统的工作性能偏离预期的指标。

## 2. 有关噪声与电磁干扰的术语

电磁噪声(electromagnetic noise)——与任何信号都无关的一种电磁现象。通常是脉动的和随机的,但也可能是周期的。

无线电噪声(radio noise)——射频频段内的电磁噪声。

宽带无线电噪声(broadband radio noise)——频谱宽度与测量仪器的标称带宽可比拟、频谱分量非常靠近且均匀,以至测量仪器不能分辨的一种无线电噪声。

共模无线电噪声(common-mode radio noise)——在传输线的所有导线相对于公共地之间出现的射频传导干扰。它在所有导线上引起的干扰电位相对于公共地做同相位变化。

差模无线电噪声(differential-mode radio noise)——引起传输线路中一根导线的电位相对于另一根导线的电位发生变化的射频传导干扰。

随机噪声(random noise)——有以下两种定义方式:① 随机出现的、含有瞬态扰动的噪声;② 在给定的短时间内量值不可预见的噪声。

电磁干扰(electromagnetic interference)——任何可能中断、阻碍,甚至降低、限制无线电通信或其他电气电子设备性能的传导或辐射的电磁能量。

辐射干扰(radiated interference)——任何源自部件、天线、电缆、互连线的电磁辐射,以电场、磁场形式(或兼而有之)存在,并导致性能降级的不希望有的电磁能量。

传导干扰(conducted interference)——沿着导体传输的不希望有的电磁能量,通常用电压或电流来定义。

窄带干扰(narrowband interference)——一种主要能量频谱落在测量设备或接收机通带之内的不希望有的发射。

宽带干扰(broadband interference)——一种能量频谱分布相当宽的干扰。当测量接收机在正负两个冲激脉冲带宽内调谐时,它所引起的接收机输出响应变化不超出 3 dB。

脉冲(pulse)——在短时间内突然变化,然后迅速返回初始值的物理量。

电磁脉冲(electromagnetic pulse)——核爆炸或雷电放电时,在核设施或周围介质中存在光子散射,由此产生的康普顿反冲电子所导致的电磁辐射。由电磁脉冲所产生的电磁场可能会与电力或电子系统耦合产生破坏性的电压和电流浪涌。

雷电电磁脉冲(lightning electromagnetic pulse)——与雷电放电相关的电磁辐射,由它所产生的电场和磁场可能与电力、电子系统耦合产生破坏性的电流浪涌和电压浪涌。

核电磁脉冲(nuclear electromagnetic pulse)——核爆炸使得核设施或周围介质中存在光子散射,由此产生的康普顿反冲电子导致的电磁辐射。该电磁场可与电力、电子系统耦合产生破坏性电压和电流浪涌。

浪涌(surge)——沿线路或电路传播的电流、电压或功率的瞬态波,其特征是先快速上升后缓慢下降。浪涌由开关切换、雷电放电、核爆炸引起。

静电放电(electrostatic discharge)——不同静电电位的物体靠近或直接接触时发出的电荷转移。

### 3. 有关发射和响应的术语

发射(emission)——以辐射及传导的形式从源传播出去的电磁能量。

辐射发射(radiated emission)——以电磁场形式通过空间传播的有用或无用的电磁能量。

传导发射(conducted emission)——沿金属导体传播的电磁发射。此类金属导体可以是电源线、信号线及一个非专门设置的、偶然的导体,例如一个金属管等。

宽带发射(broadband emission)——带宽大于干扰测量仪或接收机标准带宽的发射。

窄带发射(narrowband emission)——带宽小于干扰测量仪或接收机标准带宽的发射。

电磁干扰发射(electromagnetic interference emission)——任何可导致系统或分系统性能降级的传导或辐射发射。

乱真发射(spurious emission)——任何在必须发射带宽以外的一个或几个频率上的电磁发射。这种发射电平降低时还会影响相应信息的传输。乱真发射包括寄生发射和互调制的产物,但不包括在调制过程中产生的、传输信息所必需的紧邻工作带宽的发射。谐波分量有时也被认为是乱真发射。

谐波发射(harmonic emission)——由发射机或本机振荡器发出的、频率是载波频率整数倍的电磁辐射,它不是信号的组成部分。

寄生发射(parasitic emission)——发射机发出的由电路中不希望有的寄生振荡引起的一种电磁辐射。它既不是信号的组成部分,也不是载波的谐波。

不希望有的发射(unwanted emission)——由乱真发射和带外发射组成的发射。

带外发射(out-of-band emission)——有以下两种定义:① 在规定频率范围之外的一个或

多个频率上的发射;②由调制过程引起的、紧靠必须带宽之外的一个或多个频率上的发射,但不包括乱真发射。

串扰(crosstalk)——通过与其他传输线路的电场(容性)或磁场(感性)耦合,在自身传输线路中引入的一种不希望有的信号扰动。

串扰耦合(cross-coupling)——有以下两种定义:①对于从一个信道传输到另一个信道的干扰功率的度量;②存在于两个或多个不同信道之间、电路组件或元件之间不希望有的信号耦合。

互调制(inter-modulation)——两个或多个输入信号在非线性元件中混频,在这些输入信号或它们的谐波之间的和值或差值频率点上产生新的信号分量。这种非线性元件可以是设备、分系统或系统内部的,也可以是某些外部装置的。

交叉调制(cross-modulation)——有以下两种定义:①由不希望有的信号对有用信号载波进行的调制,它是互调制的一种;②由非线性设备、电网络或传输媒体中信号的相互作用而产生的一类不希望有的信号对有用信号载波进行的调制。

不希望有的响应(undesirable response)——与标准参考输出的偏差超过设备技术要求中容差规定的一种响应。

#### 4. 有关干扰抑制和电磁兼容性的术语

抑制(suppression)——通过滤波、接地、搭接、屏蔽和接收,或这些技术的组合,以减少或消除不希望有的发射。

屏蔽(shield)——能隔离电磁环境、显著减小在其一边的电场或磁场对另一边的设备或电路影响的一种装置或措施,如屏蔽盒、屏蔽室、屏蔽笼或其他通常的导电物体。

屏蔽效能(shielding effectiveness)——对屏蔽体隔离或限制电磁波的能力的度量。通常表示为入射波与透射波的幅度之比,用分贝表示。

电磁兼容性(electromagnetic compatibility)——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。包括以下两个方面:①设备、分系统、系统在预定的电磁环境中运行时,可按规定的裕度实现设计的工作性能,且不因电磁干扰而受损或产生不可接受的降级;②设备、分系统、系统在预定的电磁环境中正常工作且不会给环境(或其他设备)带来不可接受的电磁干扰。

电磁兼容性故障(electromagnetic compatibility malfunction)——由于电磁干扰或敏感性原因,使系统或相关的分系统及设备失效。它可导致系统损坏、人员受伤、性能降级或系统有效性发生不允许的永久性降级。

自兼容性(self-compatibility)——当其中所有的部件或装置以各自的设计水平或性能协同工作时,设备或分系统的工作性能不会降级,也不会出现故障的状态。

系统间的电磁兼容性(intersystem electromagnetic compatibility)——任何系统不因其他系统中的电磁干扰源而产生明显降级的状态。

系统内的电磁兼容性(intra-system electromagnetic compatibility)——系统内部的各个部分不会因本系统内其他电磁干扰源而产生明显降级的状态。

电磁易损性(electromagnetic vulnerability)——系统、设备或装置在电磁干扰影响下性能降级或不能完成规定任务的特性。

安全裕度(safety margin)——敏感度门限与环境中的实际干扰信号电平之间的对数值之差,用分贝表示。

电磁敏感性 (electromagnetic susceptibility) ——设备、器件或系统因电磁干扰可能导致工作性能降级的特性。[注:① 在电磁兼容性领域中,还用到与该术语相关的另一术语——抗扰性 (immunity),它是指器件、设备、分系统或系统在电磁骚扰存在的情况下性能不降级的能力。② 敏感度电平越低,敏感性越高,抗扰性越差;抗扰度电平越高,敏感性越低,抗扰性越强]。

辐射敏感度 (radiated susceptibility) ——对造成设备、分系统、系统性能降级的辐射干扰场强的度量。

敏感度门限 (susceptibility threshold) ——引起设备、分系统、系统呈现最小可识别的不希望有的响应或性能降级的干扰信号电平。测试时,将干扰信号电平置于检测门限之上,然后缓慢减小干扰信号电平,直到刚刚出现不希望有的响应或性能降级,即可确定该电平。

### 1.2.3 电磁干扰效应

不管是简单装置,还是复杂的设备或系统,电磁干扰的形成必须同时具备以下三个因素:

- (1) 电磁干扰源,指产生电磁干扰的元件、器件、设备、分系统、系统或自然现象;
- (2) 耦合通道,指将电磁能量从干扰源耦合 (或传输) 到敏感设备上,并使敏感设备产生响应的通路或媒介;

- (3) 敏感设备,指对电磁干扰产生响应的设备。

通常将以上三个因素称为电磁干扰三要素,如图 1-1 所示。

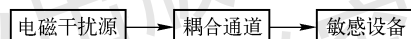


图 1-1 电磁干扰三要素

由电磁干扰源发出的电磁能量,通过某种耦合通道传输至敏感设备,导致敏感设备出现某种形式的响应并产生效果。这一作用过程及其效果,称为电磁干扰效应。

电磁干扰效应普遍存在于人们周围。若电磁干扰效应表现为设备或系统的性能产生有限度的降级,这就是前面提到的“电磁易损性”。假如电磁干扰效应十分严重,设备或系统出现失灵,甚至引起严重事故,这就是“电磁兼容性故障”。正如前面已提到的,把电磁干扰效应按其危害程度分为灾难性、非常危险、中等危险、严重、使人烦恼五个等级。

为了说明电磁干扰源是否对敏感设备造成干扰,从而引起电磁干扰效应,通常应用前面提到的“安全裕度”来判别。安全裕度  $S_1$  表示敏感度门限电平  $S$  与环境中的实际干扰信号电平  $I$  的差值,即

$$S_1 = S - I \quad (\text{dB}) \quad (1-2)$$

当  $S_1 < 0$  时,表示有潜在干扰效应;当  $S_1 > 0$  时,表示不存在干扰效应; $S_1 = 0$  时,表示临界状态。

顺便指出,式 (1-2) 和式 (1-1) 本质上是一样的,只不过是提法不同。

## 1.3 电磁兼容学科的研究领域

电磁兼容是涉及多个学科的新兴学科领域,是伴随着电子电气技术及其他科学技术的发展而出现并不断发展的边缘学科。今天,电磁兼容问题已经成为制约许多应用学科继续发展、充分发挥设备或系统性能以及影响人类生存环境的重要因素,因此引起世界各国尤其是工业

发达国家的重视。为了使同一电磁环境中的各种电子电气设备或系统正常工作,维护正常的生态环境,即实现电磁兼容,人们需要进行的研究可归纳为以下几个方面。

#### (1) 电磁干扰源、耦合通道、敏感设备特性的分析

为抑制电磁干扰,实现电磁兼容,必须研究干扰源的产生机理及性质;研究电磁干扰如何由电磁干扰源传播到敏感设备,包括对传导干扰和辐射干扰的分析;研究敏感设备的响应特性及抗干扰能力。

#### (2) 电磁兼容性分析预测

电磁兼容性分析预测技术是建立各种干扰源、耦合通道和敏感设备的数学模型,利用计算机技术,编制计算程序,得出关于潜在干扰的定量计算结果,以此来指导或修正电磁兼容性设计。电磁兼容性分析预测通常在三个级别上进行,即芯片级的电磁兼容性分析预测、设备级的电磁兼容性分析预测和系统级的电磁兼容性分析预测。

#### (3) 电磁兼容性设计

电磁兼容性设计是实现电子设备或系统规定功能的重要保证,设计的目的是使所设计的设备或系统在预期的电磁环境中实现电磁兼容。必须在进行设备或系统功能设计时,同步进行电磁兼容性设计。这种设计是在电磁兼容性分析预测基础上进行的,有时还需要将电磁兼容性分析预测和电磁兼容性设计交替进行。若分析预测结果表明有潜在干扰,则必须修改功能设计,再进行分析预测,直到实现电磁兼容。

#### (4) 电磁干扰抑制技术

屏蔽、接地、滤波称为抑制电磁干扰的三大技术,在工程实践中被广泛应用。屏蔽的机理和设计、接地的概念及方法、电磁干扰滤波器设计等都是研究的内容。

#### (5) 电磁兼容性测试

电子设备或系统是否实现了电磁兼容,最终要通过测试结果来判定。电磁兼容性测试有其自身的特点,测试设备、测试场地、测试方法等都是需要研究的内容。

#### (6) 电磁兼容性标准和规范

电磁兼容性标准和规范是进行电磁兼容性设计的指导性文件,也是进行电磁兼容性测量的依据。电磁兼容性测量项目、测量方法以及极限值都是由标准和规范给定的。

随着科学技术的发展,电磁兼容性标准和规范也需要不断修订。因此,电磁兼容性标准和规范的研究、制定和实施是电磁兼容管理的重要内容。

#### (7) 信息泄露与防泄露技术

计算机等信息技术设备在运行时,它所处理的信息可能通过设备泄漏的电磁波以辐射的方式发射出去,也可能通过电源线、地线、信号线等以传导的方式发射出去,使得在一定距离内不采用特殊设备即可复现这些信息,从而造成机密信息的泄露。为防止信息泄露,确保机要信息的安全,20世纪70年代一些科技文献上出现了TEMPEST一词,它是一种防电磁泄漏的新技术,其任务是检测、评价和控制来自信息技术设备的非功能性传导发射和辐射发射,防止被窃听的危险。

TEMPEST与电磁兼容技术之间有许多相同的概念和技术,因此将TEMPEST也列入电磁兼容学科的研究领域。当然,TEMPEST有其特殊性,还有一些特殊的研究内容。

#### (8) 频谱管理

电磁频谱是永存于自然界的一种不灭资源,是人类除土地、水、矿产、森林和能源之外的第六种自然资源。

随着技术的进步,各种无线电系统大量增加,占用的频谱范围不断扩大,出现许多新



的矛盾,加之电磁频谱本身的特点,使得对电磁频谱的管理和合理应用必须通过国际组织进行协调。重要的国际组织有国际电信联盟(ITU)和国际电工技术委员会(IEC)。其中,国际电信联盟主要从事电磁频谱管理和协调确定通信系统参数的工作,国际电工技术委员会主要负责电气和通信设备的重要参数以及一些直接与频谱保护有关的参数的协调工作并提出各种建议。这些国际组织制定了无线电规则和国际电信公约。

国家级的频谱管理机构的主要职责是:

- ① 检查所申请的使用频率是否与国家和国际规则一致;
- ② 检查新申请的用户是否有可能产生有害干扰而影响对国内外其他频谱的使用;
- ③ 授权给各个用户使用某个频率并颁发使用证;
- ④ 检查技术设备;
- ⑤ 指导监测工作;
- ⑥ 进行使用频率的国家注册;
- ⑦ 控制人为噪声电平。

在我国,国家级的频谱管理机构是国家无线电管理委员会和全军无线电管理委员会,地方也有相应的机构,负责频率分配、协调等有关频谱管理工作。

无线电频谱一般可分为若干波段,每个波段又分为若干频道。频道的宽度应足以容纳给定工作模式的典型信号。使用者需要占用某个频道,必须向无线电管理委员会提出申请,得到批准后才能使用。

分配频率时需考虑的因素有对频道的需求量、可用频道的数量、接收机的特性、发射机的工作方式及覆盖范围、信号的带宽和调制方式等。此外,还需规定所允许的发射功率、天线辐射的覆盖范围和工作时间、地点等。凡使用相同频道或相邻频道的用户之间,必须有最低限度的地理间隔,以确保满足电磁兼容性指标。

随着频谱利用和频谱保护方面研究工作的新进展,在电磁兼容学科领域出现了一个重要分支,这就是所谓“频谱工程”,它包括以下几方面研究内容:

● 从频谱管理角度考虑

- ① 频率的指配;
- ② 短期兼容规划;
- ③ 频谱利用的政策;
- ④ 为压缩所用的频谱而改进设备技术规程的准备;
- ⑤ 过载的解决和在实际工作中发生的干扰问题;
- ⑥ 附属设备调度的规定;
- ⑦ 频谱管理自动化系统;
- ⑧ 无线电监测管理系统和技术。

● 从频谱规划角度考虑

- ① 最佳频率指配和分布研究;
- ② 频谱过载的研究(现存的和预期的);
- ③ 现在受到的和预期的干扰问题研究;
- ④ 频谱使用的规定和测量研究;
- ⑤ 为提高频谱的使用率,设备和系统特性的最优化研究;
- ⑥ 频谱使用对信息传递影响的研究;



- ⑦ 设备、系统和操作规则的目标研究;
- ⑧ 大范围兼容规则研究;
- ⑨ 其他通信手段的评价研究;
- ⑩ 自然的和人为的无线电干扰和可能的控制技术的研究。

• 从设备设计者的角度考虑

- ① 降低非谐振辐射的研究;
- ② 降低接收机截止频率外响应的研究;
- ③ 在给定带宽下接收特性的最佳化研究;
- ④ 控制发射机和接收机相互调制的研究;
- ⑤ 为使覆盖范围最大、干扰最小,天线系统设计的最优化研究;
- ⑥ 抑制和减少辐射噪声的研究。

可见,频谱工程所涉及的研究内容是非常广泛的,它反映了频谱管理问题的复杂性。解决这些问题,就可沿着有效地和兼容性地利用频谱这一共同目标前进。

## 1.4 电磁兼容的研究方法

电磁兼容作为一门新兴边缘学科,它所跨学科之多反映了当今世界高科技发展过程中学科交叉的重要特征。电磁兼容的研究方法也有其特殊之处,这里先阐述电磁兼容学科的特点,再介绍电磁兼容设计方法的演变,最后简要介绍电磁兼容学科的几个重要发展趋势。

### 1.4.1 电磁兼容学科的特点

如前所述,电磁兼容学科是一门新兴的边缘学科,它的形成和发展还处于不断完善的阶段,其理论体系还不够严密和完整。读者先了解电磁兼容学科的特点,会有助于更好地理解 and 掌握电磁兼容原理与技术。

#### (1) 理论体系以电磁场理论和电路理论为基础

电磁兼容学科是在研究电磁干扰及其抑制方法中形成和发展的,大部分电磁干扰是以电磁场和电路的形态出现的。因此,在电磁兼容原理与技术中必然引用大量的电磁场理论和电路理论的方法和结论。例如,电磁兼容性仿真、电磁兼容性测量、电磁干扰数值分析、串扰的分析计算等,都离不开电磁场理论和电路理论的支撑。

作为一门综合性学科,电磁兼容学科还涉及更为广泛的学科领域,如电磁测量、信号处理、计算机科学与技术、材料科学、生物医学工程等。

#### (2) 大量引用无线电技术的概念和术语

电磁干扰现象最初只在无线电技术中较为突出,随着电报、电话、广播电视、微波通信等技术的发展,抗电磁干扰的理论与技术得以形成和发展并广泛应用于工程实践。半导体、集成电路等微电子技术的发展和应用,使电磁兼容从无线电抗干扰技术延伸到所有电子电气设备,确立了其公共技术基础的地位。然而,在其理论与技术中仍大量沿用了无线电技术的概念和术语。例如,把导线与导线之间的耦合称为“串扰”,把时变电磁场在导线上产生感应电压称为“电磁场激励”等。读者应根据它们的物理本质正确理解和掌握。

#### (3) 计量单位的特殊性

电磁兼容领域广泛采用分贝(dB)为度量单位。在电工技术中,通常采用W(瓦)、V(伏)、

A(安)作为功率、电压、电流的单位,而在电磁兼容领域中则采用 dBW、dBV、dBA 作为功率、电压、电流的度量单位。应当注意,dBW、dBV、dBA 与 W、V、A 之间的换算不是简单的关系。关于分贝(dB)的定义及换算关系将在 1.6 节介绍。

### 1.4.2 电磁兼容的实施

实施电磁兼容的目的是保证系统或分系统的电磁兼容性。从总体上看,电子电气设备或系统的电磁兼容实施,必须采取技术和组织两方面的措施。所谓技术措施,包括系统工程方法、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,增加干扰在传播路径上的损耗,降低敏感设备对干扰的敏感性(或提高抗扰度)等。所谓组织措施,包括对各设备和系统进行合理的频谱分配、选择设备或系统的空间位置,还包括制定和采用某些限制性规章,目的在于整顿电子电气设备的工作,以消除非有意干扰。

就技术措施而言,在现代电子技术发展进程中,电磁兼容设计方法经历了三个发展阶段。

#### (1) 问题解决法

这种方法是先进行设备或系统的研制,然后根据所研制成的设备或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,再去解决干扰问题是困难的。为了解决问题,可能要进行大量的拆卸和修改,也许还要重新设计。对于大规模集成电路,可能会严重损坏其版图,甚至要大量返工。这不仅造成人力物力的浪费,延误系统研制周期,而且会使系统性能下降。这种方法在国外一直沿用到 20 世纪 50 年代,国内一些厂商则仍停留在这个阶段。

#### (2) 规范法

规范法按所颁布的电磁兼容性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,比用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制定的,因此,要解决的问题不一定是实际存在的问题,只是为了适应规范而已。另外,规范是建立在电磁兼容实践经验的基础上的,没有进行电磁干扰的分析预测,因而往往会导致过量的预防储备,可能使系统成本增加。这种方法在美国较普及,从 20 世纪 60 年代一直延续到 20 世纪 80 年代。

#### (3) 系统法

系统法利用计算机预测程序对某个特定系统的设计方案进行电磁兼容性分析预测。这种方法从设计开始就分析和预测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分析预测。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,才能进行硬件的生产和系统安装。用这种方法进行系统设计,基本上可以避免通常出现的电磁干扰问题或过量的电磁兼容设计。

系统法是一种新的设计思想和设计理念,它集中了近代电磁兼容性方法的成就,体现了现代电子系统设计的总趋势。实践证明,这种基于计算机技术的数模预测方法是投资少、见效快且功能广泛的途径。近年来,美英等发达国家已研制出了许多功能完善的电磁兼容性预测程序和数据库,在军用和民用电子系统设计中发挥作用。

实施电磁兼容是一项极其复杂的任务。在研究任何电子设备和电气工程设备时,应当在尽可能早的阶段注意保证它们的电磁兼容性。随着电子电气设备研制工作的完成,可以利用

的抗干扰措施的数目将减少,而所需成本反而增高,如图 1-2 所示。可见,在早期阶段采取措施排除非有意干扰对敏感设备的影响可得到比较好的效果,且在经济上也更合算。据国外资料介绍,在设备的设计阶段及时采取措施可以避免(80~90)%的与干扰影响有关联的、潜在的困难。相反,在较晚的阶段才采取解决方法,措施将更加复杂,需要更多的工时且增加设备的消耗,延长研制周期,有时甚至根本不可能解决。

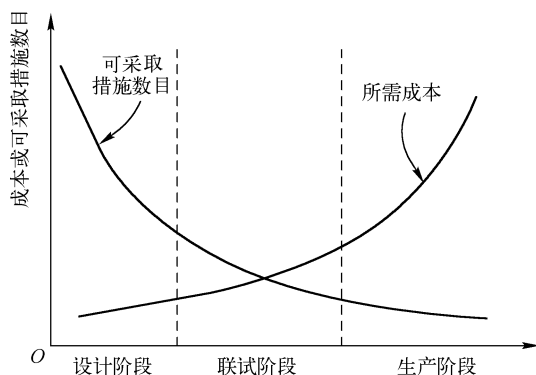


图 1-2 产品开发过程的各个阶段采取保证电磁兼容措施数目与所需成本

实施电磁兼容,最后都必须通过电磁兼容性测试予以验证。归纳起来,系统电磁兼容性的实施在技术层面上需要经过三大步骤:① 电磁干扰分析预测;② 电磁兼容性设计;③ 电磁兼容性测试。

### 1.4.3 电磁兼容研究的几个重要发展趋势

电磁兼容以及由此而进行的关于方法、技术、理论、测试设备及测试环境等的研究已全面展开,必将更加受到人们的重视并得到更迅速的发展,它在军用和民用方面的价值将更重要。以下几个方面的发展趋势值得重视。

#### (1) 数据采集自动化

这里的数据主要是指在电磁兼容测试、鉴定、测量中获取的数据。以前基本上是表征单项电磁干扰参数的数据。随着数据融合技术、综合性多参数测试技术的发展,今后将向集成化参数迈进,也就是要采用多传感器、多参数测量和处理数据,使测试系统更加自动化。

#### (2) 评价体系综合化

由于电磁兼容技术是多维考虑、多样分析、多方位设置、多参数处理,以及多机或多系统联合设计的,所以不可能单以某一参数的好坏、某一性能指标的优劣来评价一台设备或一个系统的电磁兼容性。为科学地评价设备或系统的电磁兼容性,必须使评价体系综合化,并利用评价技术与测试技术密切相关这一特点,促进综合评价体系的建立。

#### (3) 设计程序化和自动化

进行系统的电磁兼容设计是一个复杂的过程,且其设计又必须与设备或系统本身的功能设计紧密结合。一旦人们对电磁环境、电磁干扰及干扰控制技术的研究达到相当水平,加之数学建模技术、计算机技术的提高,就可逐步实现电磁兼容设计的程序化和自动化。

#### (4) 标准的国际化

世界许多国家和组织都制定了电磁兼容标准,具有权威性和广泛影响的是 IEC、CISPR、

MIL、FCC、VDE 等标准。这些标准之间又存在不少差别。随着世界各国经济朝着全球一体化发展的趋势,打破技术壁垒,电磁兼容标准将逐渐趋向统一,实现电磁兼容标准的国际化。

## 1.5 电磁兼容性标准概况

为了确保系统及其各单元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性标准和规范,这些标准和规范对设备或系统非预期发射和非预期响应做出了规定和限制,执行标准和规范是实现电磁兼容、提高系统性能的重要保证。

电磁兼容性标准和规范是进行电磁兼容设计的指导性文件,也是电磁兼容性测试的依据,测试项目、测试方法和极限值都是标准和规范给定的。

### 1.5.1 电磁兼容性标准的基本内容

标准和规范的区别在于:标准是一个一般性准则,由它可以导出各种规范;规范则是一个包含详细数据、必须按合同遵守的文件。标准和规范的类别和数量是相当多的,分类的方法也很多。有一种方法是將电磁兼容性标准分为管理标准、设计标准、设计规范、设计手册、设计指南、要求与极限值、测试标准等。标准和规范的主要内容可以归纳为以下几个方面。

#### (1) 规定名词术语

这是基础类标准,它规定了电磁干扰和电磁兼容性的术语及其定义。我国的国家标准(简称国标)GB/T4365—2016《电工术语 电磁兼容》、国家军用标准(简称国军标)GJB72A—2002《电磁干扰和电磁兼容性术语》、美国军标 MIL-STD-463A《电磁干扰和电磁兼容性技术的术语定义和单位制》等均属此类标准。

#### (2) 规定电磁发射和电磁敏感度的限值

某一电子设备或系统要通过某个电磁兼容标准认证,必须用具体的数据来说明,这就要在标准中规定电磁干扰信号数值的限值。限值可以用峰值、准峰值或平均值来表示,军标都用峰值,而民标一般用准峰值或平均值。不同的标准有不同的限值,使用的场合不同也有不同的限值。标准限值的制定要有科学依据,不能定得过高或过低。国标 GB4824—2019《工业、科学和医疗设备射频骚扰特性 限值和测量方法》、国军标 GJB151B—2013《军用设备和分系统电磁发射和敏感度要求与测量》、美国军标 MIL-STD-461G《电磁干扰发射和敏感度控制要求》等都属于这类标准。

#### (3) 规定测试方法

检验某一产品是否满足电磁兼容性标准规定的限值要求,必须有统一的测试方法,才能保证测试数据的准确和有可比性,否则将会由于测试环境不同、测试设备和测试方法不同,而得到不同的测试结果,也就不能判定其是否满足限值要求。例如,国军标 GJB151B—2013《军用设备和分系统电磁发射和敏感度要求与测量》就分别对传导发射(CE)、辐射发射(RE)、传导敏感度(CS)和辐射敏感度(RS)规定了一系列测试方法。美国军标 MIL-STD-462D《电磁干扰特性的测量》也属于这类标准。

我们注意到,近几年修订和新制定的国标和国军标,往往将限值和测试方法置于同一标准中颁布。例如国标 GB4824—2019 及国军标 GJB5240—2004 等。

另外,电磁兼容性标准和所有标准一样,都不是一成不变的,随着科学技术的发展,经过一段时

间的实践,将会制定出新的、更科学的电磁兼容性标准,对标准限值、测量方法做出更为科学的规定。例如,20 世纪 60 年代美国制定了 MIL-STD-461A/462A,后来修改为 B、C、D、E 等版本。

(4) 规定电磁兼容控制方法或设计方法

电磁兼容性是设计出来的,研究如何设计电子设备或系统使其工作不受外界干扰,同时也不要产生干扰影响其他设备。电磁兼容性设计标准中包括系统电磁发射和敏感度要求、系统电磁环境要求、雷电及静电防护技术准则,以及屏蔽、接地、滤波、布线、搭接等设计规范和要 求。这类标准的数量相当多,例如,GB/T13617—1992《短波无线电收信台(站)电磁环境要 求》、GJB1389A—2005《系统电磁兼容性要求》、GJB/Z25—1991《电子设备和设施的接地、搭接 和屏蔽设计指南》、GJB/Z214—2003《军用电磁干扰滤波器设计指南》等。

在电磁兼容性设计中,应根据标准规定的限值进行设计,而后根据标准规定的测试方法进行检 验。由于标准和规范是通用文件,其限值是按最不利原则确定的,这就可能对某一具体设备的电磁 兼容性设计过于保守。因此,针对某一设备或系统,往往需要通过电磁兼容性分析预测来修正 设计。

电磁兼容性标准和规范表示的概念是:如果每个部件都符合规范要求,则设备的电磁兼容 性就得到保证。由于电磁兼容领域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,因此,电磁兼容性标准和规范也着重描述设 备或系统的非预期方面。

在使用电磁兼容性标准和规范时,一个非常重要的参数是电磁干扰安全余量。这个参数 既可用于传导干扰,又可用于辐射干扰。由于辐射途径的不确定性,通常辐射耦合的安全余量 应大于传导耦合的安全余量。

1.5.2 国内外电磁兼容性标准简介

1. 国内标准与规范

我国的电磁兼容性标准与规范的制定工作开展得较晚,与国际发展水平有一定差距。自 1983 年我国发布第一个电磁兼容性标准以来,本着等同、等效、参照采用国际先进标准的原 则,在制定或修订国内民用、军用标准方面做了大量的工作,至今已发布了 100 多个电磁兼容 性国标和国军标,逐步形成了符合我国国情并与国际接轨的电磁兼容性标准体系。国内电磁 兼容性标准分为四类:基础标准、通用标准、产品类标准和系统间电磁兼容性标准。这些标准 的实施,为促进军用、民用电子电气产品的研制,为检验进出口电子电气产品的电磁兼容性,发 挥了重要作用。表 1-1、表 1-2 分别列出部分电磁兼容性国标和国军标,供参考。

表 1-1 电磁兼容性国标(部分)

标 准 号	标 准 名 称
GB/T 3907—1983	工业无线电干扰基本测量方法
GB/T 4365—2016	电工术语 电磁兼容
GB 4824—2019	工业、科学和医疗(ISM)射频设备电磁骚扰特性限值和测量方法
GB/T 4859—1984	电气设备的抗干扰特性基本测量方法
GB15707—2017	高压交流架空送电线无线电干扰限值
GB/T 7349—2002	高压架空送电线、变电站无线电干扰测量方法

表 1-2 电磁兼容性国军标(部分)

标 准 号	标 准 名 称
GJB/Z 17—1991	军用装备电磁兼容性管理指南
GJB/Z 25—1991	电子设备和设施的接地、搭接和屏蔽设计指南
GJB/Z 36—1993	舰船总体天线电磁兼容性设计导则
GJB 72A—2002	电磁干扰和兼容性术语
GJB/Z 124—1999	电磁干扰诊断指南
GJB/Z 132—2002	军用电磁干扰滤波器选用和安装指南
GJB 151B—2013	军用设备和分系统电磁发射和敏感度要求与测量
GJB 870—1990	军用电子设备方舱通用规范
GJB 911—1990	电磁脉冲防护器件测量方法
GJB 1210—1991	接地、搭接和屏蔽设计的实施
GJB 1389A—2005	系统电磁兼容性要求
GJB 2926—1997	电磁兼容性测试实验室认可要求

2. 国外标准与规范

国外(尤其是西方发达国家)在研究、制定和实施电磁兼容性标准方面已有较长的历史。例如,美国从 20 世纪 40 年代起已先后制定了与电磁兼容有关的军用标准和规范 100 多个。1964 年美国国防部组织专门小组改进标准和规范的管理工作,制定了三军共同的标准和规范,这就是著名的 MIL-STD-460 系列电磁兼容性标准。该标准主要用于设备和分系统的干扰控制及其设计,它提供了评价设备和分系统电磁兼容性的基本依据。后来,这个标准系列经过多次修订,不仅成为美国的军用标准,而且被亚欧各国的军事部门所采用。

除美国军标外,国际上还有许多具有权威性和广泛影响的电磁兼容性标准,如 CISPR、TC77、FCC、VDE 等标准,有少数发达国家的保密机构还制定了 TEMPEST 标准,这是研究信息泄露的标准。

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性标准和规范,并已被许多国家直接采纳,成为电磁兼容性民用标准的通用标准。

第 77 技术委员会(TC77)也是 IEC 的下属机构,它与 CISPR 并列为涉及电磁兼容的组织,它制定的 IEC 61000 系列标准在国际上很有影响力。

美国联邦通信委员会(FCC)负责管理控制可能产生电磁辐射的工、商和民用设备,它制定的有关条例对所有生产、出售和使用的工、商和民用设备都适用。

德国电气工程师协会(VDE)制定了一些电磁兼容性标准,它分为 A 类(保护距离为 30 m 的设备)和 B 类(保护距离为 10 m 的设备)。A 类符合 CISPR 标准,B 类比 A 类更严,但低于 MIL-STD-460 系列标准。VDE 标准在欧洲影响很大。

表 1-3 列出了部分美国军标,供参考。

表 1-3 美国军用电磁兼容性标准和规范(部分)

标 准 号	标 准 名 称
MIL-STD-188-124B	关于公用远距离战术通信系统接地、搭接与屏蔽的一般要求
MIL-STD-1857	接地、搭接和屏蔽的设计实例



续表

标 准 号	标 准 名 称
MIL-STD-461 G	电磁干扰发射和敏感度控制要求
MIL-STD-462 D	电磁干扰特性的测量
MIL-STD-463 A	电磁干扰和电磁兼容性技术的术语定义和单位制
MIL-STD-469 B	雷达工程设计的电磁兼容性要求
MIL-E-6051 D	系统电磁兼容性要求
MIL-E-6181 D	机载设备干扰控制要求

## 1.6 电磁兼容计量单位和换算关系

如前所述,电磁兼容学科领域中通常以分贝(dB)作为测试计量单位。这是因为在电磁兼容性测量中往往会遇到量值相差非常大的信号,为了便于叙述、表示和运算,就采用表示两个参数间倍率关系的单位——分贝(dB)作为度量单位。

### 1. 功率的分贝单位

功率的分贝单位表示为

$$[\text{dB}]_P = 10\lg\left(\frac{P_1}{P_2}\right) \quad (1-3)$$

式中, $P_1$ 为某一功率; $P_2$ 是作为比较的基准功率。这里的 $P_1$ 和 $P_2$ 采用相同的单位,例如用瓦(W),因而分贝(dB)仅为两个量的比值,是无量纲的。随着分贝表示式中基准量的单位不同,分贝(dB)在形式上也带有某种量纲。常见的情况有:

① 如果以 $P_2 = 1\text{ W}$ 作为基准功率,则 $P_1/P_2$ 相当于1 W的比值, $[\text{dB}]_P$ 就表示 $P_1$ 相对于1 W的倍率,即以1 W为0 dB。此时是以带有功率量纲的dBW(称为瓦分贝)表示 $P_1$ 的,故

$$P_{\text{dBW}} = 10\lg\left(\frac{P_{\text{W}}}{1\text{ W}}\right) = 10\lg P_{\text{W}}$$

式中, $P_{\text{dBW}}$ 是以dBW为单位的功率; $P_{\text{W}}$ 是以W为单位的功率。

② 如果以 $P_2 = 1\text{ mW}$ 作为基准功率,即以1 mW为0 dB。此时是以dBmW(称为毫瓦分贝)表示 $P_1$ 的,故

$$P_{\text{dBmW}} = 10\lg\left(\frac{P_{\text{mW}}}{1\text{ mW}}\right) = 10\lg P_{\text{mW}}$$

dBmW与W的关系为

$$P_{\text{dBmW}} = 10\lg\left(\frac{P_{\text{mW}}}{10^{-3}\text{ W}}\right) = 10\lg P_{\text{W}} + 30 = P_{\text{dBW}} + 30$$

显然, $0\text{ dBmW} = -30\text{ dBW}$ 。

③ 如果以 $P_2 = 1\text{ }\mu\text{W}$ 作为基准功率,即以1  $\mu\text{W}$ 为0 dB。此时是以dB $\mu\text{W}$ (称为微瓦分贝)表示 $P_1$ 的,故

$$P_{\text{dB}\mu\text{W}} = 10\lg\left(\frac{P_{\text{W}}}{10^{-6}\text{ W}}\right) = 10\lg P_{\text{W}} + 60 = P_{\text{dBW}} + 60$$



此外,  $P_2$  还可以用 1 nW 和 1 pW 作为基准功率, 分别用 dBnW (称为纳瓦分贝) 和 dBpW (称为皮瓦分贝) 表示  $P_1$ 。

## 2. 电压的分贝单位

电压的分贝单位表示为

$$[\text{dB}]_U = 20\lg\left(\frac{U_1}{U_2}\right) \quad (1-4)$$

式中,  $U_2$  为基准电压;  $[\text{dB}]_U$  为电压  $U_1$  相对于基准电压  $U_2$  的比值的对数函数, 反映  $U_1$  和  $U_2$  两个电压的倍率关系。

如果以  $U_2 = 1\text{ V}$  作为基准电压, 则得到  $U_1$  相对于 1 V 的比值的对数, 用 dBV (称为伏分贝) 表示  $U_1$ , 故

$$U_{\text{dBV}} = 20\lg\left(\frac{U}{1\text{ V}}\right) = 20\lg U$$

同样,  $U_2$  可分别以 1 mV、1  $\mu\text{V}$  作为基准电压, 则得到用 dBmV (称为毫伏分贝)、dB $\mu\text{V}$  (称为微伏分贝) 表示的  $U_1$  的表示式

$$U_{\text{dBmV}} = 20\lg\left(\frac{U}{10^{-3}\text{ V}}\right) = 20\lg U + 60 = U_{\text{dBV}} + 60$$

$$U_{\text{dB}\mu\text{V}} = 20\lg\left(\frac{U}{10^{-6}\text{ V}}\right) = 20\lg U + 120 = U_{\text{dBV}} + 120$$

## 3. 电流的分贝单位

电流的分贝单位表示为

$$[\text{dB}]_I = 20\lg\left(\frac{I_1}{I_2}\right) \quad (1-5)$$

式中,  $I_2$  为基准电流;  $[\text{dB}]_I$  为电流  $I_1$  相对于基准电流  $I_2$  的比值的对数。

当  $I_2 = 1\text{ A}$  时,  $I_1$  可用 dBA (称为安分贝) 表示;

当  $I_2 = 1\text{ mA}$  时,  $I_1$  可用 dBmA (称为毫安分贝) 表示;

当  $I_2 = 1\text{ }\mu\text{A}$  时,  $I_1$  可用 dB $\mu\text{A}$  (称为微安分贝) 表示。

电流用 A 作为单位和用 dBA、dBmA、dB $\mu\text{A}$  作为单位的换算关系分别为

$$I_{\text{dBA}} = 20\lg I$$

$$I_{\text{dBmA}} = 20\lg I + 60 = I_{\text{dBA}} + 60$$

$$I_{\text{dB}\mu\text{A}} = 20\lg I + 120 = I_{\text{dBA}} + 120$$

## 4. 电场强度、磁场强度和功率密度的分贝单位

电场强度  $E$  的分贝单位表示为

$$[\text{dB}]_E = 20\lg\left(\frac{E_1}{E_2}\right) \quad (1-6)$$

式中,  $E_2$  为基准电场强度;  $[\text{dB}]_E$  为电场强度  $E_1$  相对于  $E_2$  的比值的对数。

当  $E_2 = 1\text{ V/m}$  时,  $E_1$  可用 dBV/m (伏每米分贝) 表示;

当  $E_2 = 1\text{ mV/m}$  时,  $E_1$  可用 dBmV/m (毫伏每米分贝) 表示;

当  $E_2 = 1\text{ }\mu\text{V/m}$  时,  $E_1$  可用 dB $\mu\text{V/m}$  (微伏每米分贝) 表示。

显然  $1\text{ V/m} = 0\text{ dBV/m} = 60\text{ dBmV/m} = 120\text{ dB}\mu\text{V/m}$

同样, 磁场强度  $H$  的分贝单位可用 dBA/m (安每米分贝)、dBmA/m (毫安每米分贝)、dB $\mu\text{A/m}$

m(微安每米分贝)表示,它们之间的关系为

$$1 \text{ A/m} = 0 \text{ dBA/m} = 60 \text{ dBmA/m} = 120 \text{ dB}\mu\text{A/m}$$

功率密度定义为垂直通过单位面积的功率,它是坡印廷矢量  $\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H}$  的模。这里的  $\mathbf{E}$  的单位为 V/m,  $\mathbf{H}$  的单位为 A/m,  $\mathbf{S}$  的单位为 W/m<sup>2</sup>。

功率密度的分贝单位可用 dBW/m<sup>2</sup>(瓦每平方米分贝)、dBmW/m<sup>2</sup>(毫瓦每平方米分贝)、dBμW/m<sup>2</sup>(微瓦每平方米分贝)表示,它们之间的关系为

$$1 \text{ W/m}^2 = 0 \text{ dBW/m}^2 = 30 \text{ dBmW/m}^2 = 60 \text{ dB}\mu\text{W/m}^2$$

在电磁兼容性测试中,常用磁感应强度  $\mathbf{B}$  表示磁场,而不是用磁场强度  $\mathbf{H}$ 。考虑到  $\mathbf{B}$  的单位 T(特斯拉)是一个很大的单位,实际应用中常以 pT 为单位。而  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ ,  $1 \text{ T} = 1 \text{ Wb/m}^2$ ,  $1 \text{ Wb} = 1 \text{ A} \cdot \text{H}$ , 故得

$$\begin{aligned} B_{\text{T}} &= \mu_0 H_{\text{A/m}} = 4\pi \times 10^{-7} (\text{H/m}) \times H_{\text{A/m}} = 4\pi \times 10^{-7} \times H_{\text{A/m}} \\ &= 4\pi \times 10^{-7} \times H_{\text{pA/m}} \times 10^{-12} \end{aligned}$$

用分贝表示则为

$$B_{\text{dB T}} = 20 \lg(4\pi \times 10^{-7}) + 20 \lg(H_{\text{A/m}}) = H_{\text{dBA/m}} - 118$$

或

$$B_{\text{dBpT}} = B_{\text{dB T}} + 240 = H_{\text{dBA/m}} + 122$$

## 5. 远场区内,电场强度 $E$ 、磁场强度 $H$ 、功率密度 $S$ 的换算关系

在远场区,  $E/H = Z_0 = 377 \Omega$  ( $Z_0$  为自由空间波阻抗)。因  $H_{\mu\text{A/m}} = E_{\mu\text{V/m}}/Z_{0\Omega}$ , 用分贝表示为

$$H_{\text{dB}\mu\text{A/m}} = 20 \lg(H_{\mu\text{A/m}}) = 20 \lg(E_{\mu\text{V/m}}/Z_{0\Omega}) = 20 \lg(E_{\mu\text{V/m}}) - 20 \lg 377 = E_{\text{dB}\mu\text{V/m}} - 51.5$$

又因

$$S_{\text{W/m}^2} = E_{\text{V/m}} \times H_{\text{A/m}} = E^2/Z_{0\Omega} = E_{\text{V/m}}^2/377 = 2.65 \times 10^{-3} E_{\text{V/m}}^2$$

用分贝表示则为

$$\begin{aligned} S_{\text{dBW/m}^2} &= 10 \lg(S_{\text{W/m}^2}) = 10 \lg(2.65 \times 10^{-3} E_{\text{V/m}}^2) \\ &= 10 \lg 2.65 - 30 + 20 \lg(E_{\text{V/m}}) = E_{\text{dBV/m}} - 25.77 \end{aligned}$$

若以 mW/cm<sup>2</sup> 为功率密度的单位,可得

$$S_{\text{dBmW/cm}^2} = E_{\text{dBV/m}} - 35.77$$

## 习题

- 1.1 什么是电磁兼容?它与抗干扰有何区别?
- 1.2 电磁干扰的危害程度分为几个等级?试举例说明电磁干扰对电子设备的危害。
- 1.3 电磁兼容学科的研究领域大致可归纳为哪几个方面?
- 1.4 什么是“问题解决法”?
- 1.5 什么是“规范法”?
- 1.6 什么是“系统法”?
- 1.7 实施电子系统的电磁兼容性通常要经过哪几个主要步骤?
- 1.8 电磁兼容性标准的基本内容和特点是什么?试举例说明。
- 1.9 我国制定电磁兼容性标准的原则是什么?我国的电磁兼容标准分为哪四大类?
- 1.10 举出几种你了解的电磁兼容性国标和国军标。
- 1.11 将电压 8 mV 转换为用 dBμV 表示。
- 1.12 功率密度  $S$  的基本单位是 W/m<sup>2</sup>,常用单位是 mW/cm<sup>2</sup> 或 μW/cm<sup>2</sup>,试写出它们之间的转换关系式;若采用分贝表示,即用 dBW/m<sup>2</sup>、dBmW/cm<sup>2</sup>、dBμW/cm<sup>2</sup> 表示,再写出它们之间的转换关系。