



普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
电子信息科学与工程类专业 规划教材

# 电磁兼容原理与技术

## (第3版)

◆ 杨显清 杨德强 潘 锦 编著

Electronic Information  
Science and Engineering



 中国工信出版集团



电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY  
<http://www.phei.com.cn>

普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
电子信息科学与工程类专业规划教材

# 电磁兼容原理与技术

(第3版)

杨显清 杨德强 潘 锦 编著

电子工业出版社

**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“干扰源”和“传播途径”展开,介绍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)的基本方法及其应用,介绍电磁兼容预测分析数学模型、预测方法,介绍电磁兼容性测试设备与场地、测试内容与方法,还附有电磁兼容的教学实验,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好坚实的基础。

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之部分或全部内容。

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/杨显清,杨德强,潘锦编著. —3版. —北京:电子工业出版社,2016.8

电子信息科学与工程类专业规划教材

ISBN 978-7-121-29197-5

I. ①电… II. ①杨… ②杨… ③潘… III. ①电磁兼容性-高等学校-教材 IV. ①TN03

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第143392号

责任编辑:韩同平 特约编辑:邹凤麒 王 博

印 刷:三河市良远印务有限公司

装 订:三河市良远印务有限公司

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:382千字

版 次:2012年1月第1版

2016年8月第3版

印 次:2016年8月第1次印刷

定 价:39.80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 zllts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式:88254113。

# 前 言

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,是在王定华、赵家升编著的《电磁兼容原理与设计》一书基础上改编而成的。

本教材从电磁兼容基本概念入手,由“电磁干扰三要素”中的“干扰源”和“传播途径”展开,介绍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)”,最后介绍电磁兼容预测分析及电磁兼容性测试技术。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电磁兼容课程教材,也可作为研究生相关课程的参考教材,以及对电磁兼容感兴趣的工程技术人员的参考书。

本教材第1、2、3章由潘锦修订,第4、5、6章由杨显清修订,第7、8、9章由杨德强修订,全书由杨显清统编定稿。电子科技大学胡皓全教授仔细审阅了全书,并提出许多宝贵意见。在编写和出版过程中,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)	3.4.3 辐射耦合方式 .....	(44)
1.1 电磁干扰及其危害 .....	(1)	习题 .....	(44)
1.2 电磁兼容的基本概念 .....	(3)	第4章 接地与搭接技术 .....	(45)
1.2.1 电磁兼容的含义 .....	(3)	4.1 接地的概念 .....	(45)
1.2.2 基本电磁兼容技术术语 .....	(3)	4.2 安全接地 .....	(46)
1.2.3 电磁干扰效应 .....	(7)	4.3 信号接地 .....	(47)
1.3 电磁兼容学科的研究领域 .....	(8)	4.3.1 单点接地 .....	(47)
1.4 电磁兼容的研究方法 .....	(10)	4.3.2 多点接地 .....	(49)
1.4.1 电磁兼容学科的特点 .....	(10)	4.3.3 浮地 .....	(50)
1.4.2 电磁兼容的实施 .....	(11)	4.3.4 混合接地 .....	(51)
1.4.3 电磁兼容研究的几个重要发展 趋势 .....	(12)	4.3.5 转换接地 .....	(51)
1.5 电磁兼容性标准概况 .....	(13)	4.4 地线回路的干扰及抑制 技术 .....	(52)
1.5.1 电磁兼容性标准的基本内容 .....	(13)	4.4.1 地线回路中的电磁干扰 .....	(52)
1.5.2 国内外电磁兼容性标准简介 .....	(14)	4.4.2 两点接地时的噪声电压 .....	(53)
1.6 电磁兼容计量单位和换算 关系 .....	(18)	4.4.3 抑制地回路耦合电磁干扰的 技术 .....	(55)
习题 .....	(20)	4.5 电缆屏蔽体的接地 .....	(61)
第2章 电磁干扰源 .....	(21)	4.5.1 低频电缆屏蔽体接地点的 选择 .....	(61)
2.1 电磁干扰源的分类 .....	(21)	4.5.2 高频电缆屏蔽体的接地 .....	(63)
2.2 自然电磁干扰源 .....	(22)	4.6 屏蔽盒的接地 .....	(64)
2.3 人为电磁干扰源 .....	(26)	4.6.1 单层屏蔽盒的接地 .....	(64)
2.4 电磁干扰源的基本性质 .....	(29)	4.6.2 双层屏蔽盒的接地 .....	(65)
习题 .....	(31)	4.7 搭接 .....	(65)
第3章 电磁干扰的耦合与传播 .....	(32)	习题 .....	(67)
3.1 电磁干扰的传播途径 .....	(32)	第5章 屏蔽技术 .....	(69)
3.2 传导干扰传输线路的性质 .....	(33)	5.1 概述 .....	(69)
3.3 传导耦合分析 .....	(34)	5.2 电屏蔽 .....	(70)
3.3.1 电阻性耦合 .....	(34)	5.2.1 电屏蔽的原理和分析 .....	(70)
3.3.2 电容性耦合 .....	(36)	5.2.2 低频电屏蔽效能的计算 .....	(71)
3.3.3 电感性耦合 .....	(40)	5.2.3 电屏蔽的设计要点 .....	(73)
3.4 辐射耦合分析 .....	(41)	5.2.4 多级级联电路的屏蔽盒结构 .....	(73)
3.4.1 电基本振子的辐射 .....	(41)	5.3 磁屏蔽 .....	(74)
3.4.2 磁基本振子(磁流元)的辐射 .....	(43)		

5.3.1 磁屏蔽的原理和分析 .....	(74)	作用 .....	(115)
5.3.2 磁屏蔽效能的计算 .....	(75)	7.2 电磁干扰预测建模 .....	(115)
5.3.3 磁屏蔽体的设计要点 .....	(77)	7.3 电磁干扰发射机模型 .....	(118)
5.4 电磁屏蔽 .....	(77)	7.3.1 基波发射模型 .....	(119)
5.4.1 电磁屏蔽的原理和分析 .....	(77)	7.3.2 谐波发射模型 .....	(120)
5.4.2 单层金属板的电磁屏蔽效能 .....	(78)	7.3.3 非谐波发射模型 .....	(121)
5.4.3 双层屏蔽的电磁屏蔽效能 .....	(82)	7.4 电磁干扰接收机模型 .....	(122)
5.4.4 薄膜屏蔽的电磁屏蔽效能 .....	(83)	7.4.1 接收机的选择性 .....	(122)
5.4.5 非实心型屏蔽体的电磁屏蔽效能 .....	(84)	7.4.2 基本接收通道模型 .....	(123)
5.4.6 装配面处接缝泄漏的抑制 .....	(85)	7.4.3 乱真响应模型 .....	(123)
5.4.7 通风孔的屏蔽 .....	(86)	7.4.4 接收机互调 .....	(125)
5.4.8 观察窗口(显示器件)泄漏的抑制 .....	(91)	7.4.5 接收机交调 .....	(125)
5.4.9 器件调谐孔(有连接杆的操作器件)泄漏的抑制 .....	(92)	7.4.6 接收机减敏 .....	(126)
5.5 电磁屏蔽设计要点 .....	(92)	7.5 天线模型 .....	(126)
习题 .....	(93)	7.5.1 天线的方向性 .....	(126)
<b>第6章 滤波技术 .....</b>	<b>(94)</b>	7.5.2 全向天线的方向性图 .....	(127)
6.1 电磁干扰滤波器的特性和分类 .....	(94)	7.5.3 定向天线的方向性图 .....	(128)
6.2 插入损耗的计算方法 .....	(96)	7.5.4 发射天线-接收天线对的极化匹配修正 .....	(130)
6.3 反射式滤波器 .....	(97)	7.5.5 近场天线模型 .....	(130)
6.3.1 低通滤波器 .....	(97)	7.5.6 发射天线-接收天线对的配置 .....	(131)
6.3.2 高通滤波器 .....	(103)	7.5.7 天线扫描 .....	(132)
6.3.3 带通滤波器 .....	(105)	7.6 电磁干扰预测方法 .....	(133)
6.3.4 带阻滤波器 .....	(105)	7.6.1 电磁干扰预测的基本步骤 .....	(133)
6.4 电容、电感的高频特性 .....	(105)	7.6.2 分级预测方法 .....	(133)
6.4.1 电容的频率特性 .....	(106)	7.7 系统间电磁干扰预测 .....	(135)
6.4.2 电感的频率特性 .....	(108)	7.7.1 干扰预测方程 .....	(135)
6.5 有源滤波器 .....	(109)	7.7.2 系统间干扰预测实施过程 .....	(137)
6.6 吸收式滤波器 .....	(110)	7.8 系统间电磁干扰控制 .....	(140)
6.7 反射-吸收组合式低通滤波器 .....	(111)	7.8.1 频率管理 .....	(141)
6.8 电源滤波器 .....	(111)	7.8.2 时间管理 .....	(142)
6.9 滤波器的选择和使用 .....	(112)	7.8.3 空间管理 .....	(143)
习题 .....	(114)	7.9 系统内部电磁干扰预测 .....	(145)
<b>第7章 电磁干扰预测 .....</b>	<b>(115)</b>	7.9.1 系统内部电磁干扰预测流程 .....	(145)
7.1 电磁干扰预测的目的和		7.9.2 系统内部EMI预测实例 .....	(146)
		习题 .....	(148)
		<b>第8章 电磁兼容性测试技术 .....</b>	<b>(149)</b>
		8.1 电磁兼容性测试项目 .....	(149)

8.2 测试场地 .....	(151)	测量 .....	(169)
8.2.1 开阔测试场地 .....	(151)	8.5.1 一般要求 .....	(169)
8.2.2 屏蔽室 .....	(152)	8.5.2 传导发射测量 .....	(171)
8.2.3 电波暗室 .....	(153)	8.5.3 传导敏感度测量 .....	(172)
8.2.4 混波室 .....	(153)	8.5.4 辐射发射测量 .....	(176)
8.2.5 平行板线 .....	(154)	8.5.5 辐射敏感度测量 .....	(177)
8.2.6 横电磁波传输室 .....	(155)	8.6 电磁兼容的自动测试技术	
8.2.7 吉赫横电磁波(GTEM)		简介 .....	(181)
传输室 .....	(156)	8.6.1 电磁干扰自动测试系统 .....	(181)
8.3 常用测试仪器与设备 .....	(156)	8.6.2 电流传导敏感度自动测试	
8.3.1 电磁干扰测量仪/电磁干扰		系统 .....	(182)
接收机 .....	(157)	8.7 电磁干扰扫描装置 .....	(183)
8.3.2 频谱分析仪/电磁干扰		8.8 移动电话比吸收率(SAR)	
接收机 .....	(160)	测试系统 .....	(184)
8.3.3 线路阻抗稳定网络		习题 .....	(186)
(LISN) .....	(161)	<b>第9章 电磁兼容性教学实验</b> .....	(187)
8.3.4 亥姆霍兹线圈 .....	(161)	<b>实验一 传导干扰抑制与滤波</b>	
8.3.5 电流探头 .....	(162)	实验 .....	(187)
8.3.6 功率吸收钳 .....	(162)	<b>实验二 微波频谱分析仪测量小信号</b>	
8.3.7 信号发生器 .....	(163)	实验 .....	(191)
8.3.8 功率放大器 .....	(166)	<b>实验三 电磁屏蔽效能测量实验</b> .....	(195)
8.4 电磁兼容性试验用天线 .....	(166)	<b>实验四 利用手机开展电磁兼容</b>	
8.4.1 电磁兼容性试验用天线的		实验 .....	(198)
特点 .....	(166)	<b>实验五 安全接地实验</b> .....	(200)
8.4.2 各种天线简介 .....	(167)	<b>参考文献</b> .....	(203)
8.5 电磁发射与电磁敏感度			

# 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。运行中的电子、电气设备大多伴随着电磁能量的转换,高密度、宽频谱的电磁信号充满人类生存的空间,构成了极其复杂的电磁环境。以通信系统、控制系统和计算机系统为主干的电子系统在这样的电磁环境中受到了严峻的考验。可以这样说,现代电子系统与当今电磁环境构成了一对难舍难分的孪生兄弟。电子系统越是现代化,其所造成的电磁环境就越加复杂;反之,复杂的电磁环境又对电子系统提出了更为严峻的要求。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,以保证达到电子系统的初始设计目标。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、电磁兼容的实施办法、电磁兼容性标准和规范,以及电磁兼容领域的发展概况。

## 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可追溯到 19 世纪末期,1881 年英国科学家希维赛德(Heaviside)发表的文章“论干扰”可以说是首开了电磁干扰问题研究之先河。英国有关部门曾经对 1000 例干扰问题进行了分析研究,发现有一半以上是由电气设备引起的。20 世纪 30 年代,国际无线电干扰特别委员会(CISPR)在巴黎成立,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、电气设备运行时发射出的电磁能量影响到其他设备的正常工作时,我们就说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。下面介绍一些已见诸报刊或专著的典型电磁干扰事例。

(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, 被阿根廷发射的飞鱼导弹击沉。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。查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。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地启动, 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。

生物体受到高强度电磁辐射作用时, 使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照射下, 将使细胞分子产生共振作用, 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是模糊的。

## 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

$$IM = P_1 - P_s \quad (\text{dB}) \quad (1-1)$$

式中,  $P_1$  为干扰电平(dB);  $P_s$  为敏感度门限电平(dB)。当 $P_1 > P_s$ ,即干扰电平高于敏感度电平时,  $IM > 0$ ,表示有潜在干扰,设备或系统处于不兼容状态;当 $P_1 < P_s$ ,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 $P_1 = P_s$ ,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中,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。但到现在,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,设备的电磁兼容性遭到破坏,此时若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,以下均应看做分系统: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)——有以下两种方式定义: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和光电子所导致的电磁辐射。由电磁脉冲所产生的电场、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和光子导致的电磁辐射。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、传输信息所必须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的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,以减小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,可按规定的安全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地工作且不会给环境(或其他设备)带来不可接受的电磁干扰。

电磁兼容性故障(EMC 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敏感度电平越小,敏感性越高,抗扰性越差;抗扰度电平越大,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,然后缓慢地减小干扰信号电平,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、使人烦恼等五个等级。

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、电磁干扰滤波器的设计等都是研究的内容。

#### (5) 电磁兼容性测量

电子设备或系统是否实现了电磁兼容,最终要通过测量结果来判定。电磁兼容性测量有其自身的特点,测量设备、测量场地、测量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) 信息泄漏与防泄漏技术

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漏。为防止信息泄漏,确保机要信息的安全,20世纪70年代西方科技文献上出现了TEMPEST技术,这是一项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 技术与电磁兼容技术之间有许多相同的概念和技术,因此将 TEMPEST 技术也列入电磁兼容学科的研究领域。当然,TEMPEST 技术有其特殊性,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张,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到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 降低寄生辐射的研究;
  - 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综合基础与高精技术相结合的重要特征。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。