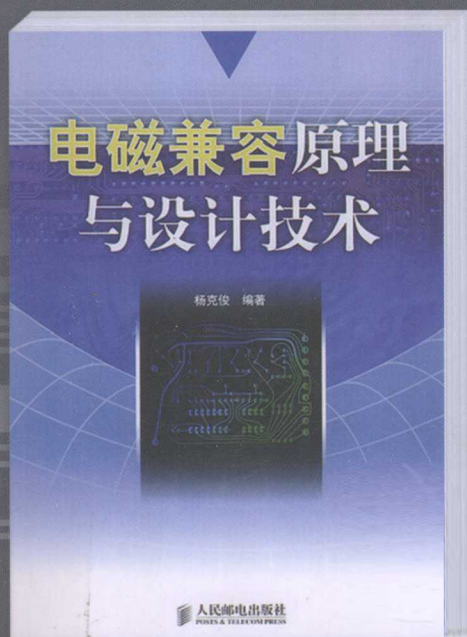


Electro  
Magnetic  
Compatibility

# 电磁兼容原理与 设计技术 (第二版)

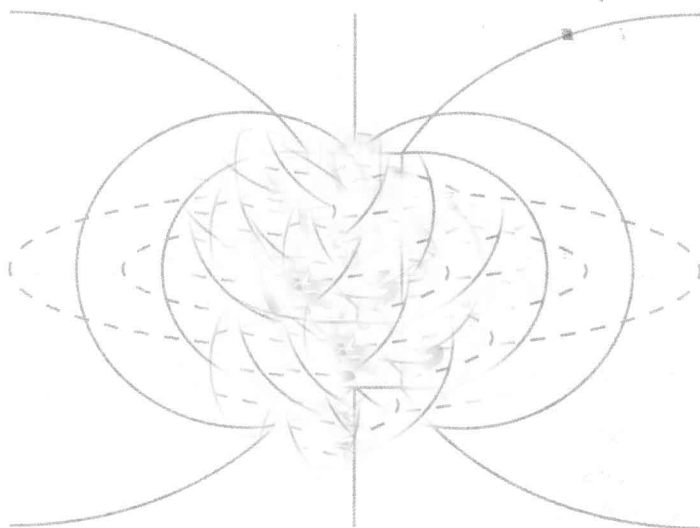
杨克俊 编著



人民邮电出版社  
POSTS & TELECOM PRESS

# 电磁兼容原理与设计技术 (第二版)

■ 杨克俊 编著



人民邮电出版社  
北京

## 图书在版编目 (CIP) 数据

电磁兼容原理与设计技术 / 杨克俊编著. -- 2版

. -- 北京: 人民邮电出版社, 2011.6

ISBN 978-7-115-24898-5

I. ①电… II. ①杨… III. ①电磁兼容性—理论②电磁兼容性—设计 IV. ①TN03

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第034109号

## 内 容 提 要

本书系统介绍电磁兼容技术的基本知识、概念,以及国内外电磁兼容技术标准,着重从工程实践的角度阐述电磁兼容技术的原理、应用方法及应注意事项。全书共分 11 章,内容包括:屏蔽技术、滤波技术、接地技术、线路板设计、电缆设计、瞬态干扰抑制、电磁干扰诊断与解决技术、无线电通信系统和计算机系统上的 EMC 技术以及电磁兼容问题的预测、建模和仿真分析。

全书内容丰富,深入浅出,具有较强的实用性,适合从事电气和电子产品开发、设计、生产、管理、检验与维护的工程技术人员使用,同时也可供电气与电子工程、无线电与通信工程、计算机与自动控制、仪器与测量技术等专业的师生参考。

### 电磁兼容原理与设计技术(第二版)

◆ 编 著 杨克俊  
责任编辑 杨 凌

◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街4号

邮编 100061 电子邮件 315@ptpress.com.cn

网址 <http://www.ptpress.com.cn>

北京鑫正大印刷有限公司印刷

◆ 开本: 787×1092 1/16

印张: 26.75

字数: 655 千字

印数: 13 301 - 16 800 册

2011 年 6 月第 2 版

2011 年 6 月北京第 1 次印刷

ISBN 978-7-115-24898-5

定价: 69.00 元

读者服务热线: (010)67129264 印装质量热线: (010)67129223

反盗版热线: (010)67171154



## 第二版前言

本书自 2004 年出版以来,电磁兼容技术又有了很大的进展,尤其是计算机的飞速发展以及电磁场数值分析方法的不断进步,使得电磁兼容性仿真预测对电气、电子产品设计、制造的指导意义愈加明显。各种商用化软件的不推出和基于专家系统、智能化系统的电磁兼容性软件的发展,更是加速了电磁兼容技术应用的发展进程。各种电磁兼容预测、建模和分析软件大量地出现,有商业性的、专用的,有用于复杂系统的、子系统的以及部件的,有用于外部系统的,有用于系统内部的,有基于电磁场数值计算的,有基于人工智能、专家系统、知识库和模糊逻辑的。这些软件大多是基于可视化人机接口的,具有可操作性强、功能强大的特点。电磁兼容问题的预测、建模和仿真分析,是采用计算机数字仿真技术,将各种电磁干扰特性、传输函数和敏感度特性全部用数学模型描述编制成程序,然后根据预测对象的具体状态,运行预测程序来获得潜在的电磁干扰计算结果。本版较详细地介绍了电磁兼容技术目前的发展情况,包括电磁兼容问题预测建模分析的目的、原理、方法,电磁场数值计算方法,以及电磁兼容预测分析的软件和程序,还介绍了电磁兼容性频率指配的算法。

新的欧洲电磁兼容指令(2004/108/EC 指令)已于 2004 年 12 月 31 日在“欧盟的官方期刊”上发布,并于 2005 年 1 月 20 日开始生效。被取代的 89/336/EEC 指令已于 2007 年 7 月 20 日废止,不过符合 89/336/EEC 指令要求的设备可以销售到 2009 年 7 月 20 日。从 2007 年 1 月开始,欧共体国家将新的 EMC 指令作为其国家的规范,新的指令已在 2007 年 7 月开始实施。从 2009 年 7 月开始,新指令将被强制实施,只有符合新指令的产品才能被允许在欧共体国家中销售。在“欧盟的官方期刊”上还公布了在新指令 2004/108/EC 下的统一的(协调的)电磁兼容标准。本版本为方便读者参考,在附录 B 中全部引用了这些电磁兼容标准。此外,在附录 B 中还增加了 CISPR、ISO 和美国军用(MIL)等电磁兼容标准。

作者在本书第二版的编写过程中,得到了北京航空航天大学硕士研究生戴妮妮的大力帮助。为保证本书迅速完成,贤妻任爱芳及爱女戴湘延给予了许多支持、鼓励和帮助,在此对她们一并表示诚挚的感谢。

由于电磁兼容涉及的范围非常广泛,其理论和技术发展十分迅速,加上作者水平有限,书中错误和不当之处在所难免,敬请广大读者和专家批评指正。

作者

2011 年 2 月于西安



# 前 言

电磁兼容 (EMC, ElectroMagnetic Compatibility) 是指, 在复杂的电磁环境中, 每台电子、电气产品除了本身要能抗住一定的外来电磁干扰保持正常工作以外, 还不能产生对该电磁环境中的其他电子、电气产品所不能容忍的电磁干扰, 或者说, 既要满足有关标准规定的电磁敏感度限值要求, 又要满足其电磁发射限值要求, 这就是电子、电气产品电磁兼容应当解决的问题, 也是电子、电气产品要通过电磁兼容认证的必要条件。

电磁兼容技术是一门迅速发展的交叉学科, 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。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, 信息传输速率和灵敏度不断提高, 连接各种设备的网络也越来越复杂, 因此, 电磁兼容问题日显重要。

现在, 许多国家对电子产品的电磁兼容性都做了强制性限制。我国已加入 WTO, 电磁兼容技术壁垒将是我国电子产品出口的更大障碍, 我国对部分电子产品的电磁兼容性也做了强制性要求, 自 2003 年 5 月 1 日起, 未获得强制性产品认证证书和没有中国强制性认证标志的产品不得出口和在国内销售。但是, 我国产品的电磁兼容性指标与先进的国际标准相比还有相当差距, 因此学习和借鉴国外先进技术和经验, 掌握电磁兼容技术, 培养自己的技术人才, 尤为紧迫。

为适应形势, 一个学习电磁兼容技术、培训电磁兼容技术人才的热潮已经在业内掀起, 各种“电磁兼容技术培训班”如雨后春笋。本书突出实用性, 系统、全面讲述电磁兼容技术及基本概念, 正好迎合了这种形势, 不失为一本学习电磁兼容技术, 培训电磁兼容技术人才的好教材。

全书共分 10 章。第 1 章介绍电磁兼容的基本概念, 系统概述电磁兼容技术的基本知识。第 2~4 章详细介绍了最常用的三项基本电磁兼容技术, 即屏蔽技术、滤波技术和接地技术, 叙述了它们的技术原理、使用方法及应注意的事项。第 5 章讲述线路板设计, 从元器件的选择、干扰的抑制技术、新技术的发展到具体的设计技巧都做了详细叙述。第 6 章讲述电缆设计, 详细地叙述了干扰耦合的机理及抑制干扰的具体措施。第 7 章介绍了瞬态干扰, 如电快速瞬变脉冲群 (EFT)、雷击浪涌 (Surge) 和静电放电 (ESD) 的特性及常用的抑制器件。第 8 章详细讲述电磁干扰的诊断与解决技术, 包括使用的仪器设备。第 9 章讲述无线电通信系统中的电磁兼容技术, 着重介绍无线电波传播中产生的电磁波干扰以及为抑制这种电磁波干扰而发展起来的新技术。第 10 章讲述计算机系统电磁兼容技术, 针对计算机电磁兼容性问题的特殊性, 重点介绍了工控环境中计算机的抗干扰技术和计算机电磁信息泄漏与防护技术。

作者在编写本书的过程中, 得到了国家无线电频谱管理研究所冯晓敏、高永龙高级工程师的大力协助和支持。西安邮电学院冯博教授为本书的编写提供了许多宝贵的建议和资料, 中国科学院陕西天文台杨怀旭、梁仲环两位高级工程师审阅了全书并提出了许多重要的修改意见, 西北大学硕士研究生李俐为本书的绘图做了大量工作, 西安电子科技大学硕士研究生杨伊宁、程青奇、王承杰、李斌、杨兴运、张廌、杨海波、杨广智、李鹏亮等参与了本书的编写, 在此一并表示诚挚的感谢。

由于电磁兼容技术涉及面广, 发展迅速, 加之作者水平有限, 书中错误和不当之处在所难免, 敬请广大读者批评指正。

作者

2004 年 5 月于西安

# 目 录

<b>第 1 章 电磁兼容技术概述</b> .....	1
1.1 电磁兼容的概念 .....	1
1.1.1 电磁干扰 .....	1
1.1.2 电磁兼容的含义 .....	6
1.1.3 电磁兼容性的实施 .....	6
1.1.4 电磁兼容技术的发展 .....	7
1.2 电磁兼容技术术语 .....	9
1.2.1 一般术语 .....	9
1.2.2 干扰术语.....	11
1.2.3 发射术语.....	12
1.2.4 电磁兼容性能术语.....	12
1.3 电磁兼容的工程方法.....	15
1.3.1 电磁兼容性的工程分析.....	15
1.3.2 电磁兼容性控制技术.....	16
1.3.3 电磁兼容性分析与设计方法.....	20
1.3.4 电磁兼容性测量与试验技术.....	25
1.4 电磁兼容标准.....	30
1.4.1 与电磁兼容技术标准有关的组织机构.....	30
1.4.2 我国的电磁兼容技术标准体系.....	34
1.4.3 电磁兼容技术标准与规范的内容特点.....	34
1.4.4 电磁兼容认证.....	36
1.5 电磁干扰信号的时域与频域分析.....	37
1.6 分贝的概念与应用.....	37
1.6.1 分贝的定义.....	37
1.6.2 分贝的应用.....	40
<b>第 2 章 屏蔽技术</b> .....	41
2.1 电磁屏蔽原理.....	41
2.1.1 电磁屏蔽的类型.....	41
2.1.2 静电屏蔽.....	41
2.1.3 交变电场的屏蔽.....	42
2.1.4 低频磁场的屏蔽.....	43
2.1.5 高频磁场的屏蔽.....	45
2.1.6 电磁屏蔽.....	47

2.2	屏蔽效能	47
2.2.1	屏蔽效能的表示	47
2.2.2	屏蔽效能的计算	48
2.3	屏蔽材料的特性	56
2.3.1	导磁材料	56
2.3.2	导电材料	57
2.3.3	薄膜材料与薄膜屏蔽	57
2.3.4	导电胶与导磁胶	58
2.4	屏蔽体的结构	59
2.4.1	电屏蔽的结构	59
2.4.2	磁屏蔽的结构	61
2.4.3	电磁屏蔽的结构	62
2.5	孔缝泄漏的抑制措施	63
2.5.1	装配面处接缝泄漏的抑制	64
2.5.2	通风冷却孔泄漏的抑制	65
2.5.3	观察窗口(显示器件)泄漏的抑制	68
2.5.4	器件调谐孔(有连接杆的操作器件)泄漏的抑制	69
<b>第3章</b>	<b>滤波技术</b>	<b>70</b>
3.1	电磁干扰滤波器	70
3.2	滤波器的分类及特性	73
3.2.1	反射式滤波器	74
3.2.2	吸收式滤波器	78
3.2.3	滤波连接器	80
3.2.4	铁氧体抑制电磁干扰的应用	81
3.2.5	穿心电容滤波	84
3.3	电源线滤波器	85
3.3.1	共模干扰(骚扰)和差模干扰(骚扰)信号	85
3.3.2	电源线滤波器的网络结构	86
3.3.3	电源线滤波器的安装	86
<b>第4章</b>	<b>接地和搭接技术</b>	<b>88</b>
4.1	地回路干扰	88
4.1.1	接地公共阻抗产生的干扰	88
4.1.2	接地电流与地电压的形成	89
4.1.3	地回路干扰	90
4.2	抑制地回路干扰的技术措施	91
4.2.1	接地点的选择	91
4.2.2	差分平衡电路	95
4.2.3	隔离变压器	97
4.2.4	纵向扼流圈	98

4.2.5 光电耦合器 .....	100
4.3 接地及其分类 .....	100
4.3.1 接地的概念 .....	100
4.3.2 接地的要求 .....	101
4.3.3 接地的分类 .....	101
4.4 安全接地 .....	102
4.4.1 设备安全接地 .....	102
4.4.2 接零保护接地 .....	103
4.4.3 防雷接地 .....	104
4.4.4 安全接地的有效性 .....	104
4.5 信号接地 .....	105
4.5.1 单点接地 .....	105
4.5.2 多点接地 .....	107
4.5.3 混合接地 .....	108
4.5.4 悬浮接地 .....	109
4.6 搭接技术 .....	110
4.6.1 搭接的概念 .....	110
4.6.2 搭接方法与类型 .....	111
4.6.3 搭接的有效性 .....	112
4.6.4 搭接的实施 .....	113
4.6.5 搭接质量的测试 .....	115
<b>第5章 线路板设计</b> .....	<b>116</b>
5.1 元器件的选择 .....	116
5.1.1 常用元器件的选择和电路设计 .....	116
5.1.2 有源器件敏感度特性和发射特性 .....	125
5.2 线路板上的电磁骚扰辐射 .....	130
5.2.1 共模辐射与差模辐射 .....	130
5.2.2 差模辐射 .....	131
5.2.3 共模辐射 .....	133
5.3 表面安装技术(SMT) .....	135
5.3.1 表面安装技术的发展 .....	136
5.3.2 新型片式器件的发展 .....	137
5.3.3 高密度电子组装技术 .....	137
5.4 印制电路板(PCB)的设计 .....	137
5.4.1 单面板 .....	138
5.4.2 双面板 .....	142
5.4.3 单面板和双面板几种地线的分析 .....	142
5.4.4 多层板 .....	147
<b>第6章 电缆设计</b> .....	<b>152</b>



6.1	传导耦合 .....	152
6.1.1	电容性耦合 .....	152
6.1.2	电感性耦合 .....	158
6.1.3	电容性耦合与电感性耦合的综合考虑 .....	163
6.2	高频耦合 .....	165
6.2.1	分布参数电路的基本理论 .....	166
6.2.2	高频线间的耦合 .....	168
6.2.3	低频情况的耦合 .....	170
6.3	辐射耦合 .....	171
6.3.1	基本振子的电磁场分布 .....	171
6.3.2	辐射耦合 .....	177
6.4	处在电磁场中的传输线和电缆 .....	180
6.4.1	场到线的共模耦合与异模耦合 .....	180
6.4.2	场对高频传输线的耦合 .....	181
6.5	干扰耦合的抑制措施 .....	184
6.5.1	电容性耦合干扰抑制措施 .....	184
6.5.2	电感性耦合干扰的抑制措施 .....	184
6.5.3	辐射干扰耦合的抑制措施 .....	187
<b>第7章</b>	<b>瞬态干扰的抑制</b> .....	<b>189</b>
7.1	电快速瞬变脉冲群(EFT) .....	190
7.1.1	EFT 概述 .....	190
7.1.2	EFT 干扰的抑制 .....	193
7.2	雷击浪涌 .....	196
7.2.1	直击雷、感应雷与浪涌 .....	196
7.2.2	雷击与瞬变脉冲电压 .....	200
7.2.3	雷害的防护 .....	202
7.3	静电放电(ESD)产生的电磁干扰 .....	204
7.3.1	ESD 的基本概念 .....	204
7.3.2	ESD 对电子设备的影响 .....	207
7.3.3	防护 ESD 影响的设计及措施 .....	207
7.4	抑制瞬变骚扰的常用器件 .....	211
7.4.1	气体放电管 .....	211
7.4.2	压敏电阻 .....	213
7.4.3	硅瞬变电压吸收二极管 .....	215
7.4.4	TVS 应用的有关问题 .....	217
7.4.5	几种抑制瞬变骚扰器件的比较 .....	219
<b>第8章</b>	<b>电磁干扰的诊断与解决技术</b> .....	<b>221</b>
8.1	样机(模型)和鉴定阶段中的电磁干扰问题 .....	221
8.1.1	实际的电磁干扰(EMI)问题 .....	222

8.1.2	符合规范的问题 .....	222
8.1.3	安排好开发/预测试的顺序 .....	222
8.2	检查是否符合发射规范 .....	224
8.2.1	测试场所的最低要求 .....	224
8.2.2	仪器设备 .....	224
8.2.3	待测设备(EUT)/样品的安装 .....	227
8.2.4	传导发射(CE)符合性测试 .....	227
8.2.5	设备不能接入 LISN 时采取的措施 .....	230
8.2.6	辐射发射(RE)测量的替代方法 .....	231
8.3	符合抗干扰性规范的检测 .....	242
8.3.1	测试场合的最低要求 .....	242
8.3.2	传导敏感性测试的准备工作 .....	242
8.3.3	瞬变脉冲群(EFT)干扰测试 .....	243
8.3.4	ESD 测试 .....	246
8.4	现场电磁干扰问题的排查 .....	248
8.4.1	排查的准备 .....	248
8.4.2	现场检查 .....	249
8.4.3	检测电磁干扰电流 .....	251
8.4.4	诊断、排查电磁干扰故障问题的“强行损坏”技术 .....	251
8.5	诊断、排查电磁干扰问题的思路概括 .....	256
8.5.1	诊断、排查电磁干扰故障的仪器和工具箱 .....	256
8.5.2	诊断、排查电磁干扰故障的过程 .....	257
8.5.3	诊断、排查电磁干扰故障问题的流程 .....	258
<b>第 9 章</b>	<b>无线电通信系统中的电磁兼容技术 .....</b>	<b>262</b>
9.1	无线电通信系统中的电磁波干扰(无线电干扰) .....	262
9.1.1	无线电发射机的杂散发射 .....	262
9.1.2	无线电波传播的杂散干扰(杂散波) .....	265
9.1.3	移动通信中的电磁波干扰 .....	268
9.1.4	共信道干扰与邻道干扰 .....	270
9.2	无线电通信系统中的电磁兼容技术 .....	272
9.2.1	频率的指配与管制 .....	272
9.2.2	无线电发射机的杂散发射功率电平限值 .....	273
9.2.3	干扰协调区 .....	277
9.2.4	频谱共用中的电磁兼容技术 .....	277
9.2.5	蜂窝移动通信系统中的电磁兼容技术 .....	278
9.2.6	无线电通信系统中的其他电磁兼容技术 .....	295
9.3	无线电通信系统中的电磁兼容标准 .....	298
9.3.1	我国有关无线电通信业务电磁兼容的国家标准与行业标准 .....	298
9.3.2	国际电联(ITU)有关无线电通信业务的电磁兼容标准 .....	299

<b>第 10 章 计算机系统中的电磁兼容技术</b> .....	304
10.1 计算机电磁兼容性问题的特殊性 .....	304
10.1.1 数字计算机中的干扰 .....	304
10.1.2 特殊环境中的计算机电磁兼容问题 .....	306
10.1.3 计算机病毒 .....	307
10.1.4 计算机的电磁泄漏 .....	307
10.2 工控环境中计算机的抗干扰技术 .....	307
10.2.1 工控计算机硬件的抗干扰设计 .....	308
10.2.2 工控计算机软件的抗干扰设计 .....	308
10.2.3 工控计算机抗干扰用到的软件技术 .....	312
10.3 计算机电磁信息泄漏与防护 .....	315
10.3.1 计算机电磁信息辐射泄漏的途径 .....	315
10.3.2 计算机电磁信息辐射的特点 .....	316
10.3.3 计算机电磁信息辐射泄漏的防护技术 .....	316
<b>第 11 章 电磁兼容问题的预测、建模和仿真分析</b> .....	319
11.1 电磁兼容(EMC)问题的分析与预测 .....	319
11.1.1 EMC 问题分析与预测的目的 .....	319
11.1.2 EMC 问题分析与预测的原理 .....	320
11.1.3 EMC 问题分析与预测的方法 .....	320
11.2 电磁兼容(EMC)问题的预测、模拟与仿真 .....	321
11.2.1 判断 EMC 问题所属的电磁场性质 .....	321
11.2.2 严格剖析 EMC 问题的空间维数 .....	325
11.2.3 EMC 问题的模拟与仿真分析方法 .....	326
11.2.4 EMC 问题的预测、模拟与仿真计算机软件 .....	350
11.3 电磁兼容性频率指配的算法 .....	360
11.3.1 频率指配的数学模型 .....	360
11.3.2 图形标色 .....	362
11.3.3 蜂窝网络规划工程应用的频率指配算法 .....	364
11.3.4 现代频率指配算法简介 .....	366
<b>附录 A 电磁兼容国家标准</b> .....	370
<b>附录 B 部分电磁兼容国际标准</b> .....	375
<b>附录 C 电磁兼容认证的有关文件</b> .....	397
<b>附录 D 电磁干扰(骚扰)源的频谱</b> .....	408
<b>附录 E 传导、无线辐射、ESD 和 EFT 数据报表</b> .....	411
<b>附录 F 无线辐射限值转换为共模电流限值</b> .....	415
<b>参考文献</b> .....	416

# 第 1 章 电磁兼容技术概述

## 1.1 电磁兼容的概念

### 1.1.1 电磁干扰

#### 1. 电磁干扰的定义

##### (1) 电磁骚扰 (EMD, ElectroMagnetic Disturbance)

电磁骚扰是指“任何可能引起装置、设备或系统性能降级或对有生命或无生命物质产生作用的电磁现象。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”。

##### (2) 电磁干扰 (EMI, ElectroMagnetic Interference)

电磁干扰是指“电磁骚扰引起的设备、传输通道或系统性能的下降”。电磁骚扰仅仅是电磁现象，即客观存在的一种物理现象，它可能引起设备性能的降级或损害，但不一定已经形成后果。而电磁干扰是由电磁骚扰引起的后果。过去在术语上并未将物理现象与其造成的后果明确划分，统称为干扰 (Interference)。IEC50 (161) 于 1990 年发布后，引入了 Disturbance 这一术语 (中文译为“骚扰”)，给出了明确的区分。但是为了方便，通常人们在分析电磁干扰问题时常常是与电磁骚扰联系在一起讨论，或统称为电磁干扰。

#### 2. 电磁干扰 (骚扰) 源的分类

电磁干扰的分类可以有多种分法，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，有近区场感应耦合和远区场辐射耦合；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 (见表 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 (如图 1-1 所示)，等等。后面我们将详细说明自然干扰和人为干扰。

表 1-1

电磁干扰的频率范围分类

根据频率范围电磁干扰的分类	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	10~300kHz	高压直流输电高次谐波 交流输电及电气铁路高次谐波

续表

根据频率范围电磁干扰的分类	频率范围	典型电磁干扰源
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

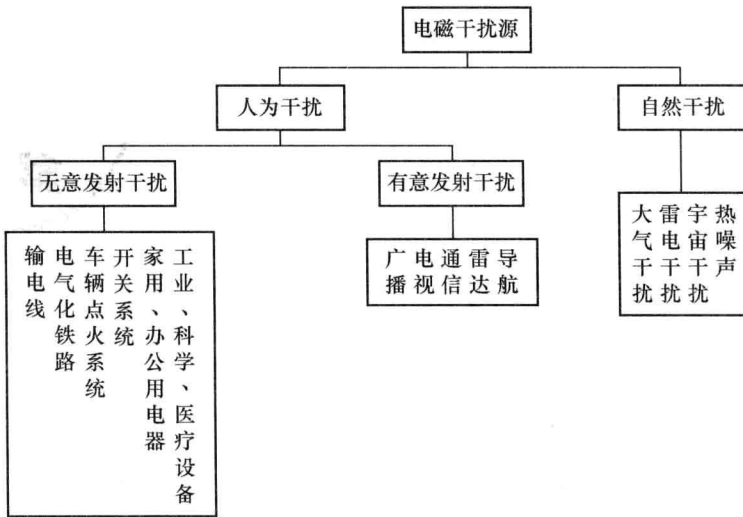


图 1-1 电磁干扰源分类

### 3. 电磁干扰的三要素

所有的电磁干扰都是由 3 个基本要素组合而产生的，它们是：电磁干扰源；对该干扰能量敏感的设备；将电磁干扰源传输到敏感设备的媒介，即传输通道或耦合途径（如图 1-2 所示）。相应地，对抑制所有电磁干扰的方法也应由这三要素着手解决。

① 电磁干扰源：指产生电磁干扰的任何元件、器件、设备、系统或自然现象。

② 耦合途径（或称传输通道）：指将电磁干扰能量传输到受干扰设备的通道或媒介。

③ 敏感设备：指受到电磁干扰影响，或者说对电磁干扰发生响应的设备。

### 4. 自然干扰（噪声）

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。自然干

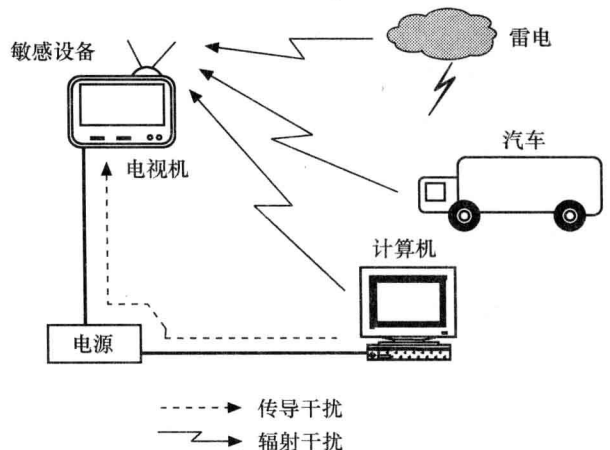


图 1-2 电磁干扰源作用于敏感设备的耦合途径



扰主要分为宇宙干扰、大气干扰、雷电干扰和热噪声。

#### (1) 宇宙干扰

宇宙干扰是来自太阳系、银河系及河外星系的电磁骚扰，主要包括太空背景噪声和太阳、月亮、木星等发射的无线电噪声。太阳无线电噪声则随着太阳的活动性明显变化，太阳活动高年无线电噪声显著增加。太阳的干扰频率从 10MHz 到几十吉赫。银河系的干扰峰值出现在 100~200MHz 频段。宇宙干扰影响最大的频段是 20~500MHz。

#### (2) 雷电干扰

雷电干扰主要是由夏季本地雷电和冬季热带地区雷电放电所产生。地球上平均每秒钟发生 100 次左右的雷击放电。雷电是一连串的干扰脉冲，其电磁辐射借助电离层的传输可传播到几千公里以外的地方。雷电干扰的频谱在 50MHz 以下都有分布，主要能量分布在 100kHz 左右，对地球上 20MHz 以下的无线电通信影响较大。大气层中的其他自然现象（例如沙暴、雨雾等）也会形成较强烈的电磁噪声源。

#### (3) 大气干扰

大气干扰是指除雷电放电外大气中的尘埃、雨点、雪花、冰雹等微粒在高速通过飞机、飞船表面时，由于相对摩擦运动而产生电荷迁移从而沉积静电，当电势升高到 1MV 时，就发生火花放电、电晕放电。这种放电产生的宽带射频噪声频谱分布在几赫兹到几十兆赫兹的范围内，会严重影响高频、甚高频频段的无线电通信和导航。

#### (4) 热噪声

热噪声是指处于一定热力学状态下的导体中所出现的无规则电起伏，它是由导体中自由电子的无规则运动引起的，例如电阻热噪声、气体放电噪声、有源器件的散弹噪声。

### 5. 人为干扰（噪声）

人为干扰分别来自有意发射干扰源和无意发射干扰源。

#### (1) 有意发射干扰源

有意发射干扰源是专用于辐射电磁能的设备，例如广播、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将构成功能性干扰，而且是电磁环境的重要污染源。经过分析不难看出，这类干扰源有以下特点。

① 为了保证一定的作用距离，这些设备具有高功率的发射机，向空间发射大量的电磁能量。例如中波广播输出功率可达兆瓦，短波广播输出功率可达几百千瓦，目前我国电视广播 1~12 频道的输出功率一般为 10kW，13 频道以上的发射功率为 30kW。远程雷达的脉冲发射功率可达 10MW 以上。

② 这些无线电发射设备均按无线电管理的有关规定，工作在指定的频段上，以防止各无线系统间的相互干扰。这些设备的发射功率及工作频率可人为地予以规定及限制，而且辐射能量的空间分布是由发射天线的方向性决定的。

③ 广播（包括调频广播）和电视发射台的数量多，发射功率大而且发射天线高，发射的电磁能量覆盖很广的区域。广播与电视发射对环境所造成的电磁污染比同功率的其他工业干扰源要大得多，因为前者发射的是有用信号不能施加电磁屏蔽，而后者产生的是无用干扰信号，可用屏蔽等技术措施予以抑制。广播电视发射塔多建在城市附近，因此广播与电视发射是污染城市电磁环境的主要干扰源。

(2) 无意发射干扰源

有许多装置都无意地发射电磁能量，例如汽车的点火系统，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都在无意地发射电磁能量。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，所发射的电磁能量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到兆瓦量级。无意发射干扰源主要有如下几种。

① 用于工业、科学、医疗及生活中的高功率设备。这类设备包括工业加热设备（感应加热器和介质加热器等）、射频电弧焊、医疗加热设备（微波理疗机）、微波外科手术设备、超声波发生器及微波炉等。这类设备的特点是功率高、数量多，一般输出功率可达千瓦甚至兆瓦，而且其数量在逐年迅速递增。这些设备工作时的电磁泄漏会造成很强的干扰。国际无线电干扰特别委员会（CISPR）对这类设备规定了干扰极限值（见附录 B）。

② 汽车等机动车辆。汽车等机动车辆的点火系统、发电机、风扇、风挡刮水器电动机等，由于向外辐射电磁能量而造成干扰。通常，点火系统是最强的宽带干扰源，点火时会产生波形前沿很陡的电弧，其频谱是一个低频基波分量再加上许多谐波，以及占有很宽一段频谱的暂态（瞬态过程），这样的噪声在 10~100MHz 范围内具有很大的场强。一般测量表明，小汽车比卡车的噪声约小 10dB，而摩托车的噪声与卡车的噪声差不多，这是因为虽然摩托车比小汽车、卡车的功率小得多，但很少采取或根本没有采取屏蔽措施的缘故。例如，小汽车的金属外壳就可以提供约 15dB 的屏蔽作用。汽车干扰一般为垂直极化（特别是在 100MHz 频率以内的范围），汽车产生干扰的幅度一般为正态分布，而且干扰脉冲的峰值幅度与汽车点火系统的类型、汽车的速度、正常工作的机械负载以及汽车的老化和磨损程度等因素有关。随着经济的发展，个人占有汽车等机动车辆的数量每年以 12% 以上的速度增长。统计表明，当交通量增加一倍时，其干扰功率频谱强度就会增加 3~6dB，因此汽车等机动车辆是重要的干扰源之一。

③ 其他一些无意发射设备。表 1-2 列出了一些无意发射设备干扰源。

表 1-2 几种无意发射干扰源

设 备	产生干扰原因	特 点
电动机	<ul style="list-style-type: none"> <li>火花放电</li> <li>滑动接触噪声（整流子电机中电枢与整流子间的滑动）</li> </ul>	在电动机的接线端子上传导干扰电压可达几十微伏至几百毫伏，对于无金属壳的电动机，在 1m 距离处辐射干扰所引起的感应电压可达 3~5mV，这类干扰具有较宽的频带
照明设备 (荧光灯、日光灯等)	<ul style="list-style-type: none"> <li>气体放电</li> <li>弧光放电</li> <li>辉光放电</li> <li>伴随放电产生的高频振荡</li> </ul>	荧光灯工作时，除放电发光产生放电干扰外，两极板还会产生几千赫左右的高频振荡，在电源端子上引起的传导干扰电压可达几十微伏，甚至几十毫伏，同时，荧光灯本身及电线还将产生辐射干扰。日光灯在工作时将产生电击穿脉冲，从而造成射频辐射干扰，也可通过电线注入公共电源造成传导干扰
电力输电线	<ul style="list-style-type: none"> <li>电晕放电（由导线表面场梯度引起空气电离）</li> <li>由于绝缘子断裂、绑扎脱落等偶然发生的接触不良所产生的微弧以及受污染的导线表面上的火花</li> </ul>	一般只出现在电压高于 100kV 的线路上，通常不会影响调频和电视的接收，只对中、长波的接收有影响。但在某些情况下，当电力线工作在大于 2kV/cm 的电场梯度下，而天气又非常恶劣时，也会对电视的接收构成干扰，这仅限于 1 频道（40~60MHz）

续表

设 备	产生干扰原因	特 点
电气化铁路	<ul style="list-style-type: none"> <li>接触网和变电所等高压供电系统产生干扰</li> <li>电弓脱离接触产生的火花干扰</li> <li>电动机整流子和电刷之间的火花放电</li> <li>交流电气铁路的真空开关产生的冲击电压和冲击电流</li> </ul>	(1) 电气列车在牵引状态及惯性状态干扰电平没有明显差别 (2) 列车速度较高时, 由于电弓的离线率增加, 产生的干扰电平较高 (3) 列车进站时, 由于站内道岔多, 使车体颠簸晃动离线率升高, 干扰电平也随之增加 (4) 电气火车的各种干扰中, 以电弓脱离接触产生的火花干扰最为严重
公共电源	<ul style="list-style-type: none"> <li>电源内阻不为零</li> <li>电源的通、断产生的瞬态冲击电流、电压</li> <li>传导干扰通过电源线向电源注入干扰</li> </ul>	这是一种最重要的典型的传导干扰源。由于市电电源是公用的, 而且电源内阻不等于“零”, 尤其是在高频频段, 电源除向设备提供有用的电能外, 同时也提供了无用的成分。这些无用的成分通过对称的方式以及不对称的方式进入设备, 从而构成了干扰。这些无用的成分可能是十几伏的低频干扰信号, 也可能是几伏的高频干扰信号, 还可能是数百伏或千伏左右的尖峰脉冲干扰信号以及衰减振荡形式的干扰信号

④ 静电放电干扰。静电放电也是一种有害的电磁骚扰源。当两种介电常数不同的材料发生接触, 特别是相互摩擦时, 两者之间会发生电荷的转移, 而使各自成为带有不同电荷的物体。当电荷积累到一定程度时, 就会产生高电压。此时, 带电物体与其他物体接近就会产生电晕放电或火花放电, 形成静电骚扰。静电骚扰最为危险的后果是可能引起火灾或导致易爆物引爆; 其次, 可能导致测量、控制系统失灵或发生故障, 也可能导致计算机程序出错、集成电路芯片损坏。

⑤ 核爆炸电磁脉冲。核爆炸时会产生极强的电磁脉冲, 其强度可达  $10^5$  V/m 以上, 分布的范围极广。高空核爆炸的影响半径可达数千公里。核电磁脉冲对于武器、航天飞行器、舰船、地面无线电指挥系统、工业控制系统、电力电子设备等都会造成严重的干扰和破坏。

## 6. 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 3 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, 最宽只有几百千赫。而宽带干扰的能量分布在几十至几百兆赫, 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的，根据国家军用标准 GJB 72-85 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。附录 D 中列出了一些干扰源的频谱范围，并给出了几种简单脉冲波形的频谱。

### 1.1.2 电磁兼容的含义

电磁兼容（EMC, ElectroMagnetic Compatibility）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。

我国国家军用标准 GJB 72-85《电磁干扰和电磁兼容性名词术语》中给出电磁兼容性的定义为：“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而导致或遭受不允许的性能降级，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性能降级”。可见，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 给出的电磁兼容性定义为：“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。在电磁兼容领域中，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。当前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。

### 1.1.3 电磁兼容性的实施

为了实现系统内、外的电磁兼容，需从技术和组织两方面采取措施。

所谓技术措施，就是从分析电磁干扰三要素（即干扰源、耦合途经和敏感设备）入手，