

高等学校教材

# 电磁兼容性结构设计

吕仁清 蒋全兴



东南大学出版社

03

## 内 容 提 要

本书为电子工业部工科电子类规划教材。主要内容有：电磁兼容性基本概念与电磁干扰特性；电屏蔽、磁屏蔽、电磁屏蔽的分析计算、结构设计及屏蔽效能的测量；滤波、接地与搭接技术；电磁兼容性试验的基本方法等。

本书是大专院校“电子设备结构”专业的统编教材，也可用作无线电及计算机等有关专业的教学参考书，对从事电子设备和分系统研制、设计、生产的工程技术人员也有较大的参考价值。

责任编辑 施 恩

责任对校 王小宁

### 电磁兼容性结构设计

吕仁清 蒋全兴

---

东南大学出版社出版

南京四牌楼2号

江苏省新华书店发行 东南大学激光照排印刷中心印刷

开本787×1092毫米 1/16 印张13 1/8 字数316千

1990年9月第1版 1990年9月第1次印刷

印数：1—1500册

---

ISBN7-81023-374-2

---

TH·20 定价：2.65元

## 出 版 说 明

根据国务院关于高等学校教材工作分工的规定，我部承担了全国高等学校、中等专业学校工科电子类专业教材的编审、出版的组织工作。由于各有关院校及参与编审工作的广大教师共同努力，有关出版社的紧密配合，从1978年至1988年，已编审、出版了两轮教材，正在陆续供给高等学校和中等专业学校教学使用。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应“三个面向”的需要，贯彻“努力提高教材质量，逐步实现多样化，增之不同品种、不同层次、不同学术观点、不同风格、不同改革试验的教材”的精神，部所属的七个高等学校教材编审委员会和两个中等专业学校教材编审委员会，在总结前两轮教材工作的基础上，结合教育形势的发展和教学改革的需要，制订了1986~1990年的“七五”(第三轮)教材编审出版规划。列入规划的教材、实验教材、教学参考书等近400种选题。这批教材的评选推荐和编写工作由各编委会直接组织进行。

这批教材的书稿，是从通过教学实践、师生反映较好的讲义中经院校推荐，由编审委员会(小组)评选择优产生出来的。广大编审者、各编审委员会和有关出版社为保证教材的出版和提高教材的质量，作出了不懈的努力。

限于水平和经验，这批教材的编审、出版工作还会有缺点和不足之处，希望使用教材的单位，广大教师和同学积极提出批评建议，共同为不断提高工科电子类专业教材的质量而努力。

电子工业部教材办公室

## 前 言

本书是原电子工业部工科电子类1986~1990年编审出版规划的统编教材，用于大学本科“电子设备结构”专业。本教材由电子机械编审委员会无线电设备结构设计教材编审小组招标、审定并推荐出版。责任编委邱成悌副教授。

本教材由东南大学机械工程系主编，由北京邮电学院李家樾主审。本教材第一、二、三、四、六章由吕仁清编写，第五、七、八、九章由蒋全兴编写。

电磁兼容性 (Electromagnetic Compatibility, 简称 EMC) 是一门综合性学科，它涉及的内容非常广泛，本书仅限于讨论电子设备（包括分系统）之间及其内部的电磁兼容性问题，重点是讨论如何从结构上提高设备或分系统的电磁兼容性。

本书的重点是屏蔽、接地、搭接和滤波，这是电磁兼容性结构设计的主要内容，也是提高电子设备和分系统电磁兼容性的重要手段。

通过电磁兼容性试验，可以发现受试设备在电磁兼容性方面的问题，特别是结构设计方面的缺陷。任何电子设备的研制、生产定型和验收，均要进行电磁兼容性试验，这是检验电子设备电磁兼容性质量的重要措施。由于电磁兼容性学科实践性很强，因此了解电磁兼容性试验装置和试验技术对于电磁兼容性故障诊断是十分必要的，本书对此也作了适当的阐述。

考虑到电子设备结构专业和结构设计人员的知识特点，本书最后编入了与电磁兼容性结构设计、测试密切有关的电磁场与传输线基础。

本书主审人李家樾教授对全书各章均提出了极为宝贵的意见，在本书中还引用了李教授主编的《电子设备结构设计原理》第一册的部分内容。东南大学无线电工程系章文勋教授对本书也提出不少宝贵意见，谨此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中难免还存在一些缺点和错误，殷切希望广大读者批评指正。

编 者

于东南大学

1989.6.

# 目 录

## 第一章 电磁兼容性与电磁干扰

1.1 电子系统的电磁兼容性	( 1 )
1.1.1 电磁兼容性定义	( 1 )
1.1.2 电磁兼容性研究的基本内容	( 1 )
1.2 电磁干扰源与传播途径	( 2 )
1.2.1 干扰源的分类	( 2 )
1.2.2 电磁干扰的特性	( 7 )
1.2.3 电磁干扰的传播	( 7 )
1.2.4 电磁干扰的危害	( 9 )
1.3 电子设备的电磁兼容性设计	( 10 )

## 第二章 电屏蔽

2.1 屏蔽概述	( 12 )
2.2 电屏蔽原理与结构	( 12 )
2.2.1 电屏蔽的分析	( 13 )
2.2.2 电屏蔽设计要点	( 14 )
2.2.3 电屏蔽效能的计算	( 15 )
2.2.4 电屏蔽体的结构	( 15 )

## 第三章 磁屏蔽

3.1 磁场干扰及其影响	( 19 )
3.2 磁屏蔽的基本原理	( 19 )
3.3 磁屏蔽效能的计算	( 20 )
3.3.1 空心长圆管屏蔽体的磁屏蔽效能	( 20 )
3.3.2 封闭式空心屏蔽体的磁屏蔽效能	( 20 )
3.3.3 矩形长管中含有磁芯的磁屏蔽效能	( 20 )
3.3.4 屏蔽体处在交变磁场中的磁屏蔽效能	( 22 )
3.4 磁屏蔽的结构	( 22 )
3.4.1 合理布置接缝与磁场的相对方位	( 22 )
3.4.2 正确布置通风孔	( 23 )
3.4.3 合理的结构与工艺	( 23 )
3.4.4 双层磁屏蔽	( 25 )
3.5 减小磁场干扰的其他措施	( 26 )
3.5.1 漏磁短路环	( 26 )
3.5.2 变压器铁心外侧包薄钢板	( 26 )
3.5.3 控制干扰场源与被干扰元件的距离及相对方位	( 27 )
3.5.4 交叉扭绞布线和双绞线	( 27 )
3.5.5 抗干扰变压器	( 29 )

3.5.6 减小电源变压器本身的漏磁	( 29 )
3.5.7 恒压电源变压器的漏磁	( 30 )
<b>第四章 电磁屏蔽</b>	
4.1 涡流的屏蔽效应	( 32 )
4.2 实心型屏蔽	( 33 )
4.2.1 金属板电磁屏蔽的物理过程	( 34 )
4.2.2 吸收损耗	( 36 )
4.2.3 反射损耗	( 38 )
4.2.4 多次反射修正系数	( 39 )
4.2.5 薄膜屏蔽	( 41 )
4.2.6 导电布、导电纤维与导电纸	( 43 )
4.2.7 双层屏蔽效能的计算	( 43 )
4.3 非实心型屏蔽	( 46 )
4.3.1 缝隙的屏蔽	( 46 )
4.3.2 通风孔洞的屏蔽	( 51 )
4.3.3 调控轴的屏蔽	( 58 )
4.3.4 表头孔等的屏蔽	( 59 )
4.3.5 显示器、数码管、指示灯等的孔口屏蔽	( 60 )
4.3.6 保险丝座的屏蔽	( 60 )
4.3.7 电缆和连接器的屏蔽	( 61 )
4.4 实际屏蔽体的屏蔽效能	( 63 )
4.5 电磁屏蔽设计程序	( 65 )
4.6 电磁屏蔽室	( 66 )
4.6.1 屏蔽室壁板的结构型式	( 66 )
4.6.2 屏蔽室关键部分的结构	( 68 )
4.6.3 屏蔽室的谐振	( 70 )
4.6.4 屏蔽室的反射	( 71 )
4.6.5 屏蔽室的接地	( 72 )
4.7 电波暗室	( 73 )
<b>第五章 接地与搭接</b>	
5.1 电子设备接地的目的	( 74 )
5.2 安全地线	( 74 )
5.2.1 设置安全地线的意义	( 74 )
5.2.2 设置安全地线的方法	( 76 )
5.3 地线中的干扰	( 78 )
5.3.1 地阻抗干扰	( 78 )
5.3.2 地环路干扰	( 79 )
5.3.3 地线中的等效干扰电势	( 79 )
5.4 低阻抗地线的设计	( 80 )
5.4.1 导体的射频电阻	( 80 )
5.4.2 导体的电感	( 81 )

5.4.3	实心接地平面的阻抗	(83)
5.5	低阻抗电源馈线	(83)
5.6	阻隔地环路干扰的措施	(84)
5.6.1	变压器耦合	(84)
5.6.2	纵向扼流圈(中和变压器)传输信号	(85)
5.6.3	电路单元间用同轴电缆传输信号	(87)
5.6.4	光耦合器	(88)
5.6.5	光纤电缆传输信号	(89)
5.6.6	用差分放大器减小由地电位差引起的干扰	(89)
5.7	电子设备的接地	(90)
5.7.1	接地的种类	(90)
5.7.2	单元电路的接地	(92)
5.7.3	多级电路的接地	(93)
5.7.4	大型复杂电子设备的接地	(94)
5.8	电缆屏蔽层的接地	(96)
5.8.1	低频时电缆屏蔽层的接地	(96)
5.8.2	电缆屏蔽层单点接地时接地点的选择	(97)
5.8.3	高频时电缆屏蔽层的接地	(99)
5.8.4	兼有一点和多点的混合接地	(99)
5.9	信号电路屏蔽罩的接地	(100)
5.9.1	单层屏蔽罩的接地	(100)
5.9.2	双层屏蔽罩的接地	(100)
5.9.3	热敏信号传感器的接地	(101)
5.10	电缆引入屏蔽盒的接地方法	(101)
5.11	多芯插座的接地	(102)
5.12	搭接	(103)
5.12.1	搭接的类型和方法	(103)
5.12.2	搭接片(条)	(104)
5.12.3	搭接面的处理	(104)
5.12.4	间接搭接结构实例	(105)
5.12.5	搭接技术的一般原则	(105)

## 第六章 滤波

6.1	概述	(107)
6.2	滤波器的特性	(107)
6.3	滤波器的种类	(108)
6.4	滤波器插入损耗的计算	(108)
6.5	L-C 滤波器元件与特性	(109)
6.5.1	电容器	(109)
6.5.2	电感器	(111)
6.5.3	L-C 滤波器特性举例	(112)
6.6	吸收式滤波器(损耗型滤波器)	(113)

6.6.1	电缆滤波器	(113)
6.6.2	滤波连接器	(114)
6.6.3	损耗型滤波器与反射滤波器的组合	(114)
6.6.4	磁环	(114)
6.6.5	馈通滤波器	(115)
6.7	有源滤波器	(115)
6.8	双T选频网络	(116)
6.9	滤波器的安装	(117)
6.10	滤波器插入损耗的测量	(118)
6.11	抑制计算机电网干扰的方法	(118)
<b>第七章 屏蔽效能的测量</b>		
7.1	屏蔽效能测量的基本原理	(121)
7.2	低频磁屏蔽效能的测量	(122)
7.2.1	低频磁场测量探头	(122)
7.2.2	电源变压器漏磁与屏蔽盒屏蔽效能的测量	(123)
7.2.3	其它磁屏蔽体(罩)屏蔽效能的测量	(124)
7.3	高频磁屏蔽效能测量	(125)
7.4	电场屏蔽效能的测量	(126)
7.5	屏蔽材料屏蔽效能的测量	(128)
7.5.1	小线圈法	(128)
7.5.2	带法兰的对接同轴线测试法	(128)
7.5.3	孪生横电磁波室法	(129)
7.5.4	时域测量法	(130)
7.6	屏蔽室屏蔽效能的测量	(131)
7.6.1	100Hz~20MHz范围内屏蔽效能测量	(131)
7.6.2	300~1000MHz范围内屏蔽效能测量	(133)
7.6.3	微波波段的屏蔽效能测量	(135)
<b>第八章 电磁兼容性试验</b>		
8.1	名词术语	(137)
8.2	电磁兼容性文件中规定的极限值及其单位	(138)
8.3	电磁兼容性试验项目	(139)
8.4	试验设备	(140)
8.4.1	电磁干扰测量仪	(140)
8.4.2	频谱分析仪/电磁干扰接收机	(143)
8.4.3	尖峰信号发生器	(144)
8.4.4	线路阻抗稳定网络(人工电源网络)	(146)
8.4.5	穿心电容器	(147)
8.4.6	电流探头	(147)
8.4.7	注入隔离变压器	(148)
8.4.8	中和变压器	(148)
8.4.9	平行板线	(149)



8.4.10	横电磁波室 (TEM Cell)	(149)
8.4.11	试验用天线	(153)
8.5	试验场地	(159)
8.5.1	专用试验室	(159)
8.5.2	接地平板	(160)
8.5.3	开阔场地	(160)
8.6	宽带发射与窄带发射的判别	(161)
8.7	试验频率与工作状态	(162)
8.7.1	发射试验频率	(162)
8.7.2	敏感度试验频率	(162)
8.7.3	标准响应	(163)
8.8	典型试验方法介绍	(163)
8.8.1	电源线传导发射电压的测量 (10kHz~30MHz)	(163)
8.8.2	电源线和互连线传导发射电流的测量 (25Hz~50MHz)	(164)
8.8.3	电源线尖峰信号传导敏感度	(164)
8.8.4	辐射发射 (25Hz~30kHz) 磁场	(165)
8.8.5	辐射发射 (14kHz~10GHz) 电场	(166)
8.8.6	电视接收机和调频收音机本振辐射干扰的测量	(167)
8.8.7	结构共模电流传导敏感度 (25Hz~100kHz)	(168)
8.8.8	磁场辐射敏感度 (25Hz~30kHz)	(169)
8.8.9	静电放电试验	(170)
8.8.10	电场辐射敏感度 (横电磁波室法)	(170)
8.9	电磁干扰和敏感度自动测量	(171)
<b>第九章 电磁场与传输线基础</b>		
9.1	电磁辐射	(174)
9.1.1	电偶极子的电磁辐射	(174)
9.1.2	磁偶极子的电磁辐射	(176)
9.2	近场区与远场区的特性	(177)
9.2.1	近场区	(177)
9.2.2	远场区	(179)
9.2.3	波阻抗与场源特性、波长、距离的关系	(180)
9.2.4	导体的波阻抗	(180)
9.3	电磁波的极化	(181)
9.4	传输线	(182)
9.4.1	传输线方程组	(182)
9.4.2	无限长传输线	(184)
9.4.3	传输线的基本参数	(185)
9.4.4	传输线方程的双曲线函数解	(186)
9.4.5	实际传输线	(186)
9.4.6	一般终端负载的传输线输入阻抗	(187)
9.4.7	终端开路或短路的传输线	(187)

9.4.8 传输线上的反射 .....	(188)
9.5 波导 .....	(191)
9.5.1 波导传输的模式 .....	(194)
9.5.2 矩形波导的基本特性 .....	(194)
9.5.3 圆波导 .....	(196)
9.5.4 波导中的衰减 .....	(197)
9.6 各种传输线的适用频率范围 .....	(198)
附录 我国电磁兼容性标准 (部分) .....	(199)
参考文献 .....	(200)

效地管理和合理使用频谱，无论是国际或国内，现在都已有了专门的管理机构。

(4) 电磁兼容性规范、标准的研究 电磁兼容性规范、标准是电磁兼容性设计的主要依据。通过制订规范、标准来控制电子系统或设备的电磁发射和敏感度，从而使系统和设备相互干扰的可能性大大下降，达到防患于未然。

(5) 电磁兼容性测试和模拟技术的研究 由于电磁环境很复杂、频率范围宽广、干扰特性又各不相同，电磁兼容性测试不但项目繁多，而且还在不断地深化和扩展之中。这就要求不断改进和完善测试技术，研制适合于电磁兼容性测试用的各种模拟源和检测设备。

## 1.2 电磁干扰源与传播途径

所谓电磁干扰是指由无用信号或电磁骚扰（噪声）对有用电磁信号的接收或传输所造成的损害。而电磁噪声是指不同于任何信号的一种电磁现象，它通常是脉动的和随机的，也可以是周期的。

### 1.2.1 干扰源的分类

干扰源可分为两大类：自然干扰源和人为干扰源。

#### 1. 自然干扰源

自然干扰源包括地球上各处雷雨、闪电产生的天电噪声，太阳黑子爆炸和活动产生的噪声以及银河系的宇宙噪声。天电噪声的能谱主要集中在 20 MHz 以下，即对在 20MHz 以下工作的电子设备影响较大。宇宙噪声的能谱在 20~500 MHz 频率范围内，所以它主要影响工作在该频率范围内的电子设备。

天电干扰是有季节性和区域性的，一般在夏季和热带区域尤为严重。由于雷电的强度很大，所以即使远离雷电区，其干扰场强仍相当可观。地球上平均每秒钟发生的闪电约有 100 次左右，这些闪电在时间上往往是重叠的。遥远的雷电产生的干扰可认为是波动的，邻近的雷电干扰则是脉冲型的，一般天电干扰属准脉冲型。

#### 2. 人为干扰源

人为干扰源是由机电或其它人工装置产生的电磁干扰，它包括：各种无线电发射机；工业、科学和医用 (I.S.M.) 射频设备；架空输电线、高压设备和电力牵引系统；机动车辆和内燃机；电动机、家用电器、照明器具及类似设备；信息技术设备；以及静电放电和电磁脉冲等。

随着科学技术和生产力的发展以及人民生活水平的提高，人为干扰源的种类不断增加，所产生的电磁干扰对环境的污染日益严重。当前，人为干扰源已成了电磁环境电平的主要来源。

电磁环境电平在不同的时间和地区是不同的，白天比晚上强，城市比乡村强，城市中的工业区比住宅区强。为了控制电磁环境电平，就必须制订各种标准和规范，对人为干扰源的发射进行限制。国际无线电干扰特别委员会 (CISPR) 为了保护通信、广播与电视制订了工业、科学、医用和家用电器及电动工具等人为干扰源的干扰极限值，并以出版物的形式向世界各国推荐。

下面介绍几种人为干扰源产生干扰的机理。

### 1) 发射机

通信、广播、电视、雷达等发射机都要发射很强的电磁波，它对于相应的接收机来说是有用信号源，达到传递信息的目的，但对于其它电子设备和仪器则是电磁干扰源。

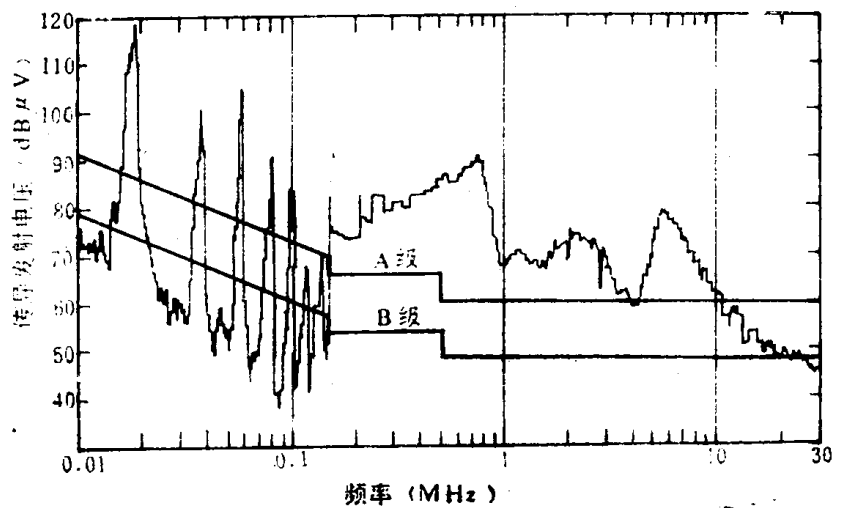
一台发射机主要有下列三种形式的发射：(1)基波发射。就是发射机技术指标中规定的工作频带内的输出功率；(2)谐波发射。指频率是发射机基波、或产生基波器件（如主控振荡器、频率合成器等）的频率整数倍的发射；(3)非谐波寄生发射。有些设备，如磁控管发射机或高脉冲功率源等会产生寄生发射。所谓寄生发射就是发射机电路中产生不希望有的振荡后引起的一种电磁发射。它既不是信号的组成部分，又不是谐波。上述三种发射不仅能经过天线和机箱本身向外辐射，还能沿着与机箱连接的信号线或电源线传导。

### 2) 工业、科学和医用射频设备

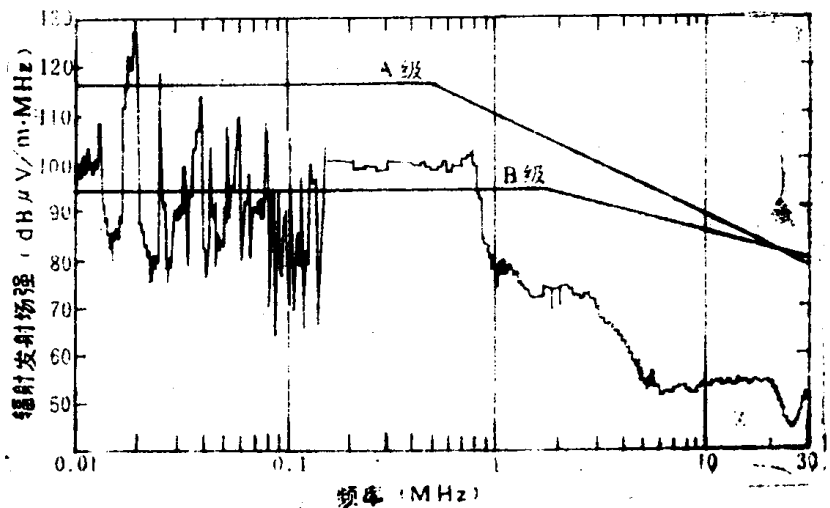
这类设备包括用于工业加热的射频振荡器、焊接机械、医疗用射频设备和超声仪器等。它们虽然没有发射天线，但由于机箱的屏蔽和接地不良，以及电源滤波性能不佳等因素，电磁能量将通过机箱向外辐射或沿电源线向外传导。工业、科学和医用射频设备的射频功率一般都很大，因此产生的电磁干扰也就特别严重，甚至会影响操作人员的健康。

家用电磁灶和微波炉的应用已日趋广泛，它们是较为严重的干扰源。图 1-1 给出了用电磁干扰自动数据采集系统测得的家用电磁灶电磁发射值，图中 (a) 是某电磁灶的传导发射值与频率的关系曲线，它表明在很宽的频率范围内超过了标准规定的极限值。图中 (b) 是某电磁灶的辐射发射值与频率的关系曲线，由图可见，仅在低频端少数频率上超过了规定的极限值 (A 级)。

3) 架空输电线、高压设备和电力牵引系统



(a) 传导发射特性



(b) 辐射发射特性 (a)

图1-1 家用电磁灶的电磁干扰特性

运行中的电力设备（包括输电线、绝缘子串、开关、变压器、避雷器等），当它们的表面电场强度超过空气起晕临界场强或存在接触不良的小间隙时，就会在导体表面和间隙中产生电晕、火花放电或刷形放电等，这一连串的放电脉冲将形成频谱很宽的电磁干扰。这类干扰的频谱一般从几十千赫到几百兆赫。图 1-2 是电晕和间隙放电的频谱相对噪声电平。

电力牵引系统主要是电力机车和市内交通用的电车，由于电力牵引车辆的导电弓的跳动与抖动，使导电弓架与架空导线之间经常出现部分接触不良，甚至两者相互分离，形成放电间隙，导致随机或周期性的脉冲干扰的产生。这种脉冲将循着导线传导，并向空间辐射电磁波，从而对其它设备造成干扰。图1-3表示了距电气化铁道 10m 处干扰场强随频率的分布特性。

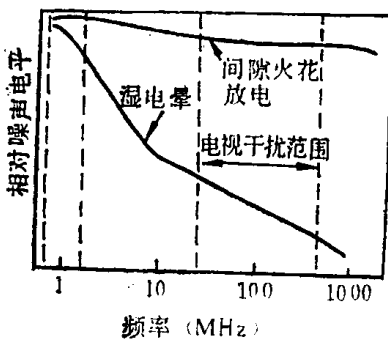


图1-2 电晕和间隙放电的相对噪声电平

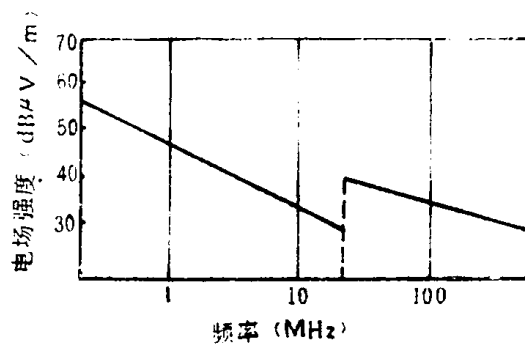


图1-3 距电气化铁道 10m 处的干扰场强

#### 4) 机动车辆和内燃机

汽车、摩托车等机动车辆和有点火系统的发动机运行时，它们的火花塞会产生电磁干扰。图 1-4 是汽车火花塞产生的电场强度与距离的关系，其测试频率为 235MHz。

#### 5) 电动工具、家用电器、照明器具及类似设备的干扰

这类设备种类繁多，如手持电动工具、电扇、洗衣机、电冰箱、吸尘器、收音机和荧光灯等，它们在启动、工作和切断时都会产生电磁干扰。表 1-1 列出了电吹风和吸尘器工作时输送到电网的传导干扰电压实测值。

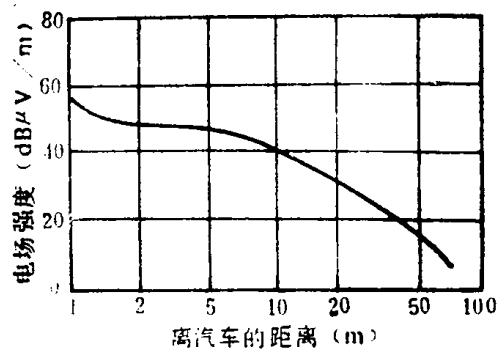


图1-4 汽车点火系统的干扰场强

表 1-1 电吹风和吸尘器的传导干扰电压

受试产品干扰电压 (dBμV)	频率 (MHz)					
	0.15	1.0	5.0	10	20	30
三用电吹风	67.5	39.0	50.0	56.5	59.5	65.5
吸尘器	79.5	61	64	59	63.5	59.0

荧光灯是根据电击穿原理工作的，电击穿瞬间会产生射频噪声，这种干扰可以通过荧光灯本身向外辐射，也可由连接荧光灯的电源线引起传导发射 (Conducted Emission)。荧光灯在工作时，由于导电离子不规则地碰撞管壁，还会产生射频噪声。

可控硅整流和调速系统的电流波动往往很大，在电网中将产生浪涌电流，造成电网电压的瞬间跌落和电源波形畸变，因此它们对电网的污染是十分严重的。如即使功率不太大的可控硅调光台灯，也可能产生足以危害收音机正常接收的电磁干扰。

#### 6) 信息技术设备及工业控制设备

信息技术设备是指对输入数据进行演算、数据交换、传送等处理的设备，以及数据的输入、输出设备。以前曾把它们作为工业、科学和医用设备的一种，1986年后才单独划归增设的 CISPR 的 G 分会管理。这类设备内部的干扰源主要是：①开关电源；②时钟振荡器及频率变换器；③脉冲信号。开关电源与时钟振荡器所产生的电磁干扰主要是它们的基波与谐波，属窄带干扰；而脉冲信号（特别是重复频率较低时）则是一种频谱很宽的宽带干扰源。

计算机进行信息处理时所产生的信号泄漏与发射，将造成信息被窃收的危险，由此在电磁兼容性领域内又开辟了一个新的分支“TEMPEST”，它的含义是对危及信号传输安全的电磁发射与泄漏实施控制与防护。TEMPEST 对于电子设备及系统防护的严格要求，必将进一步促进屏蔽、接地、滤波等电磁兼容性结构设计理论的研究及新技术、新材料的开发。

#### 7) 静电

当两种介电常数不同的绝缘材料发生直接接触，特别是发生相互摩擦时，则两者间会发生电荷的转移而各自带有不同的电荷，这种作用称之为静电充电。人体同样也会发生静电充电：人穿着与地毯材料不同的、有很好绝缘性能的鞋，在鞋底上会积累多余的电荷。人体是导电的，由于感应，在人体上就产生了感应电荷，其电荷量通常为 0.5~5 微库伦。气候愈干燥，感应电荷量愈大。人在穿着绝缘鞋的情况下，人体对地电容一般为 100~250 微微法。因此感应静电足以使人体充到很高的电压。例如，设人体对地电容为 150 微微法，带电量为 3 微库伦，则可按下述关系式求得人体的充电电压  $U$ ：

$$U = \frac{Q}{C} = \frac{3 \times 10^{-6}}{100 \times 10^{-12}} = 30000 \text{ (V)}$$

一个带有上述电荷的人员触及电子计算机和其它电子设备（如电子测量仪器和控制系统等）的键盘和各种控制旋钮时，就会发生放电现象，如图 1-5 所示。放电火花产生的电磁干扰有可能使计算机程序出错或丢失数据，使测量和控制系统失灵或发生故障。

为防止这种静电的形成，可采取下列措施：

(1) 用导电纤维编织地毯或在木质地板上铺设导电材料，在计算机房里铺设抗静电活动地板时，要求地板的表面电阻为  $10^5 \sim 10^8 \Omega$ ，阻值下限是为了人身安全，上限是不易产生静电的数值。

(2) 用导电织物或电导布制造操作人员的工作服和工作鞋。

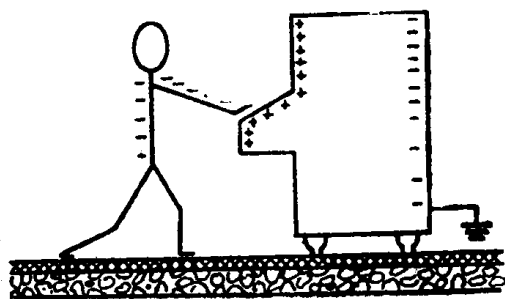


图1-5 静电放电

(3) 操作人员戴上接地的导电手铐。

(4) 把空气的相对湿度增加到60~70%，以便增加潮气的含量，从而增加诸如纤维、木质、混凝土或砖墙之类绝缘材料的电导率。

(5) 把系统或设备内所有金属构件用导电条连接起来，以消除在该系统中的任何两个金属物体之间由静电感应而引起的电位差。

8) 电磁脉冲 (EMP)

核爆炸会产生电磁脉冲辐射，此脉冲的强度极高，数量级可达  $10^5 \text{ V/m}$ ，对应的磁场强度为  $260 \text{ A/m}$ ，脉冲的宽度约为  $20 \text{ ns}$  量级。图1-6示出了归一化的 EMP 频谱。

当电磁脉冲作用于电路时，可能引起电路性能恶化、部分元件烧毁。电路性能恶化是指电路的正常工作状态发生急剧变化，乃至出现饱和或截止等极端情况，从而使电路的输出发生很大变化。

为给初步设计提供参考，图 1-7 列出了在电磁脉冲作用下，各种电路元件性能恶化或烧毁前允许承受的作用时间为  $1 \mu\text{s}$  的功率容限。由图可见，使性能恶化所需的功

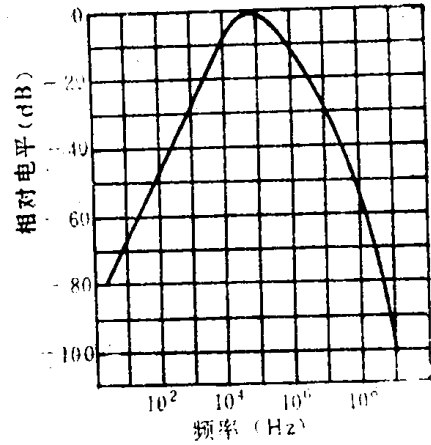


图1-6 归一化的EMP频谱

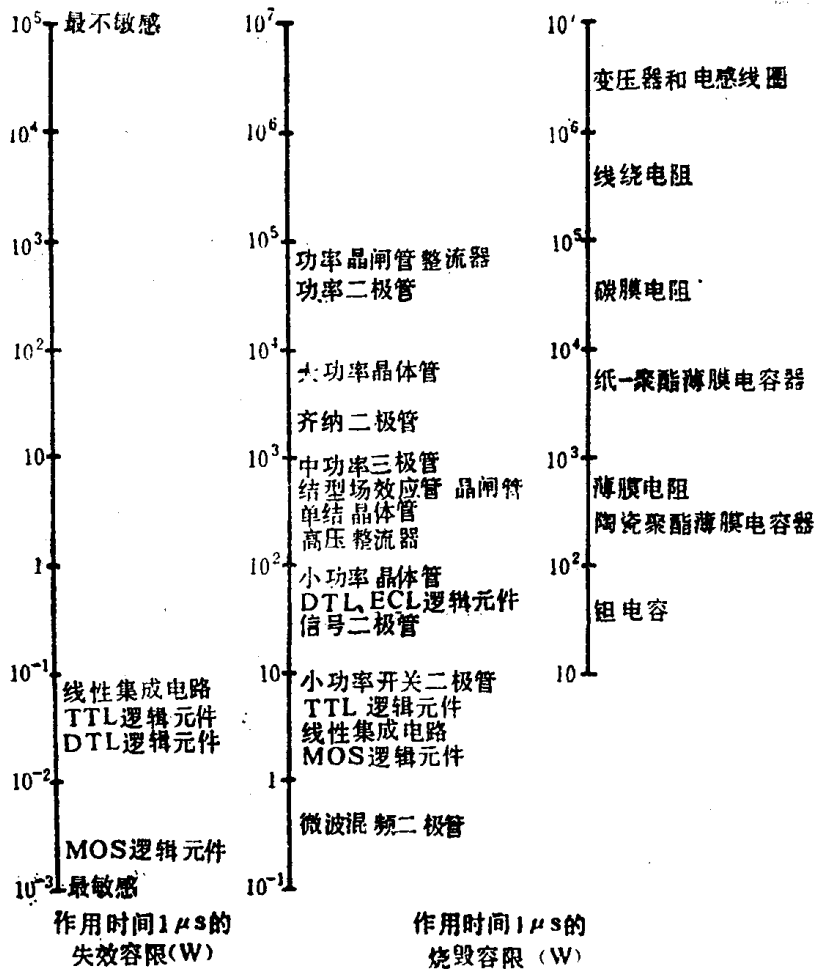


图1-7 元、器件的失效和烧毁容限

率容限比烧毁所需的功率容限要小很多。

当产生的能量超过足以引起典型的半导体结烧毁的能量时，随之就会发生结的界面击穿和器件的金属化损坏。这种损坏是由于焦耳热引起的熔化、溅射及内部连接系统的断路。

一般说来，正向偏置的结比反向偏置的结有较高的烧毁容限，这是因为正向导通时，电压较低，阻抗较小的缘故。

### 1.2.2 电磁干扰的特性

电磁干扰根据作用时间区分有：长期起作用的为连续干扰源，短期起作用的为间歇干扰源，偶然单次开关切换、时间很短且非周期性作用的为瞬变干扰源。

以频谱区分有宽带干扰和窄带干扰两类。表 1-2 列出了按频谱区分的人为干扰源的典型设备。

宽带干扰是能量频谱分布相当宽的一种不希望有的发射，其能谱分布大于测量接收机的带宽。而窄带干扰是一种主要能量频谱落在测量接收机通带之内的不希望有的发射。

表1-2 人为干扰源的特性

宽 带			窄 带	
瞬 变	间 歇	连 续	间 歇	连 续
1. 机械开关	1. 电子计算机	1. 点火系统	1. 连续波多普勒雷达	1. 电源线的哼声
2. 电动机启动器	2. 电动机调速器	2. 弧光灯	2. 无线电发射机及其谐波	2. 接收机本机振荡器
3. 恒温器	3. 接地不良的接头	3. 脉冲发生器	3. 信号发生器振荡器和其它类似设备	
4. 定时器	4. 电弧焊机	4. 脉冲雷达发射机	4. 发射机应答器	
5. 晶闸管触发电路	5. 电钻	5. 滑动接头	5. 电热设备	
		6. 电传打字机		
		7. 开关式稳压器		

窄带干扰通常是单一频率或有限频率的正弦信号，这些频率在测量接收机通带中仅占很小的范围。测试窄带干扰电压或场强，一般取平均值或有效值。

宽带干扰可以看作由一系列重复频率很低的脉冲所组成。实际上，大多数宽带干扰都可以归纳成两种不同的类型：一种为脉冲型干扰，其特点为脉冲间隙期远远大于其持续期，即占空比很小，其电压或电流的峰值虽然很大，但平均值却很小，近似为零；另一种为“白噪声”的不规则干扰，其干扰波形的特点是脉冲一个紧挨一个，非常密集，以致于单个脉冲的特征已经消失，电压或电流的峰值只略大于其平均值或均方根值。所以，测试脉冲型干扰电压或场强，一般取峰值，而“白噪声”则取平均值或均方根值。

### 1.2.3 电磁干扰的传播

干扰源所产生的电磁发射必须通过耦合通道才能到达感受器，典型的电磁干扰传播模式



如图 1-8 所示。

实现电磁兼容性的任务之一就是采用有效手段阻塞各种耦合通道，包括时域和频域的分隔。

### 1. 传导干扰

沿电源线或信号线传输的电磁干扰称为传导干扰。电子系统内各设备之间或电子设备内各单元电路之间存在各种连线，如电源线、传递信号的导线以及公用地线等，这样就有可能使一个设备（或单元电路）的电磁能量沿着这类导线传输到其它设备和单元电路，从而造成干扰。

(1)沿电源线传导的电磁干扰 在电网中连接着各种电气、电子和机械设备，这些设备在启动、工作、切断时都要向电网传输频谱相当宽的电磁干扰。此外，在电子系统或电子设备内部，则会通过公共电源线构成各部分的相互干扰。图 1-9 说明了干扰源（电动机）的干扰通过电源线直接传输到感受器（信号电路）上的情况。这种干扰在采用可控硅调速的场合将会成为一个十分严重的问题。

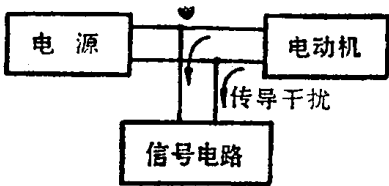


图1-9 沿电源线的传导干扰

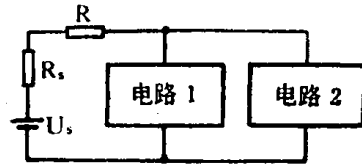


图1-10 公共电源内阻的耦合

(2)通过公共电源内阻的耦合 当两个甚至几个设备或电路单元共用一个电源时，如图 1-10 所示，由于电源内阻  $R_s$  和公共阻抗  $R$  的作用，电路 2 的电源电流发生任何变化都会影响电路 1 的电源电压。

(3)通过公共地线阻抗的耦合 在电子系统或电子设备内部，往往几个设备或电路单元的电流经一条公共地线，如图 1-11 所示。各设备或单元的电流在流过地线阻抗  $R_g$  时就产生压降，造成各单元对地电压的相互影响和牵制。由图 1-11 可见，电路 1、2 的对地电压为  $U_g = (I_1 + I_2)R_g$ 。任一电路的电流变化势必会影响另一电路的对地电压。

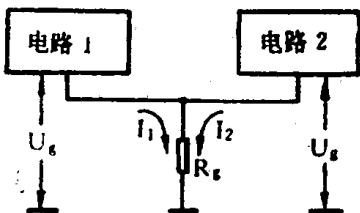


图1-11 公共地线阻抗耦合

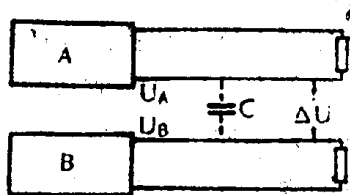


图1-12 电容耦合途径

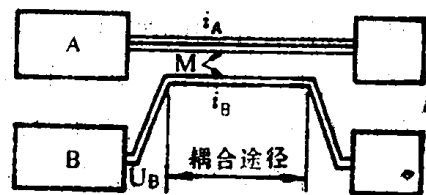


图1-13 电感耦合途径

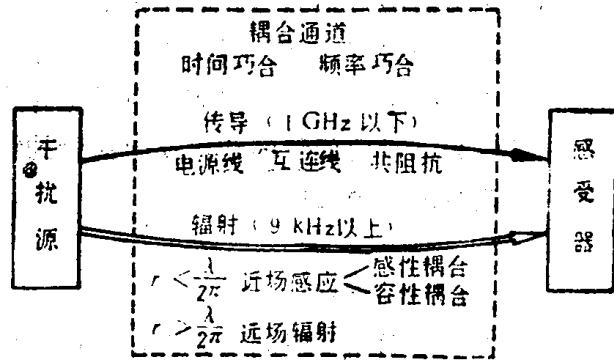


图1-8 电磁干扰的传播模式

### 2. 辐射干扰

辐射干扰是指通过空间传播的电磁干扰。干扰源的电源电路、输入输出信号电路和控制