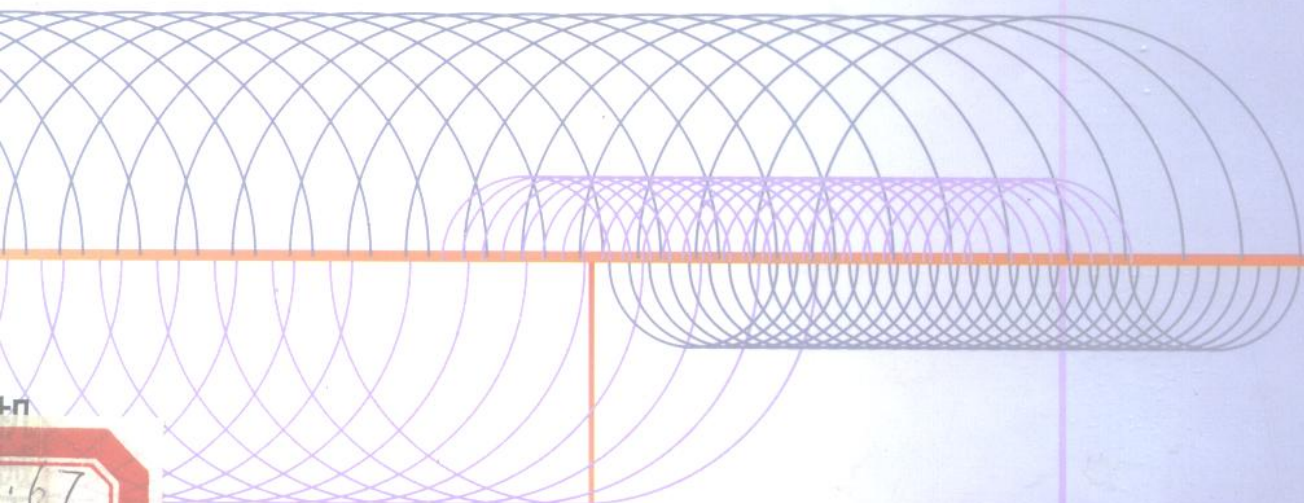


电磁干扰与电磁兼容技术

# 电磁干扰与 电磁兼容技术

王庆斌 刘 萍 尤利文 林啸天 编著



社

机械工业出版社

73-25551  
117

# 电磁干扰与电磁兼容技术

王庆斌 刘萍 尤利文 林啸天 编著



机械工业出版社

本书主要包括电磁兼容的基本概念和原理,各种电磁干扰对的计算方法,无线电系统的干扰预测分析与电磁兼容技术,计算机的电磁兼容原理与技术,电磁干扰对动物、植物及物质的作用,抑制电磁干扰的电磁兼容性技术等。

电磁兼容是一门既有理论又有技术的综合性学科。本书以理论与实践并重、学以致用为原则,例举了很多的来自于实际工程的计算题目,并在每一章后面都附有相当的习题,供读者实践。

本书可作为电子与信息类专业的本科生和研究生的教课书,它也是工程技术人员进行继续教育的参考书,也可供各级管理人员参考。

2014/10

### 图书在版编目 (CIP) 数据

电磁干扰与电磁兼容技术/王庆斌等编著. —北京:机械工业出版社, 1999.8

ISBN 7-111-07297-9

I. 电… II. 王… III. ①电磁场-干扰 ②电磁兼容性 IV. 0441.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 14785 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:牛新国 版式设计:霍永明 责任校对:韩晶

封面设计:姚毅 责任印制:路琳

高等教育出版社印刷厂印刷 新华书店北京发行所发行

1999年8月第1版第1次印刷

787mm×1092mm $\frac{1}{16}$ ·14.25印张·346千字

0 001—4 000 册

定价:24.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换  
本社购书热线电话 (010) 68993821、68326677—2527

机械工业出版社

## 前 言

本书是为电子工程专业类的研究生课程编写的，也可以作为本科高年级学生的教材。本书的教学时数为60~80学时。

全书共分为6章。第1章主要阐述了电磁干扰的基本理论及干扰的数学模型；第2章具体地讨论了电磁干扰对各种计算方法；第3章围绕无线电系统，详细地讨论了电磁干扰预测方程及理论模型，电磁兼容技术中的筛选、修正、工作性能预测等；第4章介绍了计算机中的电磁干扰问题，分析了计算机系统的电磁兼容技术；第5章讨论了电磁辐射对人类的影响，对动物、植物以及物质的作用；第6章阐述了电磁兼容的技术，着重探讨了接地、滤波、屏蔽三大技术原理。全书理论与实践并重，在每章后面都附有相当的练习题，书后有附录和参考文献，以供读者实践。

本书在作者多年教学和科研积累之上，写成了初稿，又在完成国家重大科研项目之后进一步完善成现在的全书。本书第1章、第2章、第3章、第6章的部分内容由王庆斌撰稿；第1章、第2章、第3章、第6章的部分内容由刘萍撰稿；第4章由林啸天撰稿；第5章由尤利文撰稿；全书由王庆斌统稿审定。

本书的出版得到大连理工大学教材出版基金的资助。

由于电磁兼容的内容涉及到的技术领域和服务对象几乎包括了一切用电的或涉及电磁的设备及系统，且发展迅速，加之作者水平有限，书中不妥之处，敬请读者不吝赐教。

作者通信地址：

大连理工大学电子与信息工程学院

王庆斌或刘萍 收

邮编：116023

电话：0411—4708484

E-mail: LPING@dlut. edu. cn

作 者

1998年12月于大连

# 目 录

前言	
<b>第 1 章 电磁干扰的基本理论</b> .....	1
1.1 电磁干扰和电磁兼容术语 .....	1
1.2 电磁干扰概述 .....	4
1.2.1 电磁干扰的分类 .....	4
1.2.2 电磁干扰的三要素 .....	4
1.3 传导干扰 .....	4
1.3.1 传导干扰源 .....	4
1.3.2 传导电磁干扰传输通道 .....	4
1.3.3 传导电磁干扰频谱 .....	7
1.3.4 抑制传导干扰的有效办法 .....	7
1.4 辐射干扰 .....	8
1.4.1 辐射干扰源 .....	8
1.4.2 辐射干扰源数学模型 .....	10
1.4.3 辐射干扰频谱 .....	13
1.4.4 辐射干扰传输通道 .....	14
1.4.5 辐射干扰传输通道数学模型 .....	15
1.4.6 接收器 .....	32
1.4.7 减少辐射干扰的有效方法 .....	32
习题 .....	33
<b>第 2 章 电磁干扰对的计算</b> .....	35
2.1 感应近区场干扰的计算 .....	36
2.1.1 强电力线的电场对通信线路的影响 .....	36
2.1.2 强电力线的磁场对通信线路的影响 .....	38
2.2 辐射近区场干扰对的计算 .....	41
2.2.1 强辐射近区场干扰源 .....	41
2.2.2 辐射近区场的计算 .....	44
2.3 远区场干扰对的计算 .....	44
2.3.1 干扰方位角的计算 .....	45
2.3.2 天线波束方位方向性系数及方位增益的计算 .....	46
2.3.3 地波干扰场强的计算方法 .....	52
2.3.4 中波天波干扰场强的计算 .....	57
2.3.5 短波天波干扰场强的计算 .....	60
2.3.6 超短波干扰场强的计算 .....	60
2.3.7 微波波段的干扰 .....	71
习题 .....	72
<b>第 3 章 无线电系统干扰的预测与分析</b> .....	74
3.1 概述 .....	74
3.1.1 术语 .....	74
3.1.2 无线电系统电磁干扰的三要素 .....	77
3.1.3 电磁兼容性的标准与规范 .....	77
3.2 收发系统间干扰预测模型综述 .....	78
3.2.1 问题的提出 .....	78
3.2.2 干扰预测方程 .....	79
3.2.3 发射机模型 .....	80
3.2.4 天线模型 .....	81
3.2.5 传输模型 .....	85
3.2.6 接收机模型 .....	86
3.2.7 接收机最窄通带与最宽通带 .....	87
3.3 快筛选和粗筛选 .....	87
3.3.1 快筛选 .....	87
3.3.2 粗筛选概述 .....	88
3.3.3 发射机模型 .....	89
3.3.4 接收机模型 .....	94
3.3.5 天线模型 .....	99
3.3.6 传播模型 .....	105
3.3.7 干扰余量的计算 .....	106
3.4 带宽修正与频率间隔修正筛选 .....	107
3.4.1 概述 .....	107
3.4.2 发射机频率模型 .....	110
3.4.3 接收机频率模型 .....	115
3.4.4 天线模型 .....	117
3.4.5 传播模型 .....	118
3.5 细筛选 .....	119
3.5.1 概述 .....	119
3.5.2 发射机模型与接收机模型 .....	120
3.5.3 天线效应模型 .....	125
3.5.4 传播考虑 .....	129

3.6 性能预测 .....	129	措施 .....	153
3.6.1 工作性能考虑 .....	130	4.5 计算机空间电磁干扰的抑制	
3.6.2 工作性能度量(话音通信		技术 .....	155
系统) .....	130	4.5.1 计算机系统外部电磁辐	
3.6.3 工作性能门限 .....	131	射干扰源 .....	155
3.6.4 工作性能模型 .....	131	4.5.2 静电对计算机的危害及	
3.6.5 系统电磁效率模型 .....	132	防护 .....	155
习 题 .....	134	4.5.3 雷电干扰与防护 .....	156
<b>第 4 章 计算机中的电磁兼容性</b> .....	136	4.6 计算机的电磁泄漏及防护措施 .....	156
4.1 计算机电磁兼容性综述 .....	136	4.6.1 计算机电磁泄漏的概念 .....	156
4.1.1 研究计算机中电磁兼容性		4.6.2 计算机电磁泄漏的主要	
的重要性 .....	136	途径 .....	157
4.1.2 计算机电磁兼容性问题的		4.6.3 计算机电磁泄漏的危害 .....	157
特殊性 .....	136	4.6.4 计算机电磁泄漏的防护	
4.1.3 计算机电磁兼容性问题的		措施 .....	158
新动向 .....	139	4.7 计算机机房设计 .....	159
4.2 计算机元、部件抗干扰措施 .....	140	4.7.1 计算机机房的设计内容 .....	159
4.2.1 一般数字集成电路的抗干		4.7.2 计算机机房的选址原则 .....	159
扰措施 .....	140	4.7.3 计算机机房屏蔽体的结构	
4.2.2 动态 RAM 的抗干扰分析 .....	140	设计 .....	159
4.2.3 A/D 转换器的抗干扰措施 .....	141	4.7.4 计算机机房内的静电 .....	162
4.2.4 计算机接口电路的抗干扰		4.7.5 计算机机房内的电磁防护 .....	162
措施 .....	142	4.7.6 计算机机房内的噪声控制 .....	163
4.2.5 微型计算机总线的抗干扰		4.7.7 场地环境的安全保护 .....	163
措施 .....	143	4.7.8 计算机室内主要设备位置	
4.2.6 单片机系统的抗干扰措施 .....	144	安排实例 .....	163
4.3 计算机传输通道的电磁兼容性		4.8 计算机软件抗干扰 .....	163
问题 .....	147	4.8.1 软件抗干扰的特点 .....	163
4.3.1 计算机传输通道的特殊		4.8.2 计算机抗干扰用到的软件	
问题 .....	147	技术 .....	164
4.3.2 计算机使用的传输线及其		4.8.3 计算机软件抗干扰实例 .....	165
抗干扰技术 .....	147	4.9 计算机系统的电磁兼容性问	
4.3.3 计算机接地系统的抗干扰		题及设计举例 .....	168
问题 .....	149	4.9.1 系统总体设计中的电磁	
4.3.4 计算机中的屏蔽技术 .....	150	兼容性问题 .....	168
4.3.5 计算机印制电路板抗干扰		4.9.2 计算机电磁兼容性设计	
措施 .....	151	举例 .....	168
4.4 计算机电源系统的电磁兼容性		习 题 .....	171
问题 .....	152	<b>第 5 章 电磁辐射对生物和物质的</b>	
4.4.1 研究计算机电源系统电磁		影响 .....	172
兼容性的重要性 .....	152	5.1 电磁辐射对人体的影响 .....	172
4.4.2 供电系统的干扰来源 .....	153	5.1.1 电磁场对人体作用的机理 .....	172
4.4.3 计算机供电系统的抗干扰		5.1.2 电磁场对人体的益处 .....	175

5.1.3 电磁场对人体的危害 .....	176	6.3 接地的概念 .....	201
5.1.4 电磁场对人体危害的实例及 相应的保护措施 .....	178	6.4 接地的技术 .....	202
5.2 电磁辐射对植物的影响 .....	183	6.4.1 浮地接地系统 .....	202
5.2.1 静电场对植物的作用 .....	183	6.4.2 单点接地系统 .....	202
5.2.2 静电场生物效应的普遍规律 的研究 .....	184	6.4.3 多点接地系统 .....	202
5.2.3 有效利用高压静电对植物的 影响 .....	185	6.4.4 混合接地系统 .....	203
5.3 电磁场对动物的作用 .....	185	6.4.5 接地连线 .....	203
5.4 电磁场对物质的作用 .....	187	6.5 接地分类 .....	204
5.4.1 电磁场对物质的微观作用 .....	187	6.5.1 安全接地 .....	204
5.4.2 电磁场对物质的宏观作用 .....	188	6.5.2 静电接地 .....	205
5.5 保护人类生存的电磁环境 .....	189	6.5.3 避雷击接地 .....	205
习 题 .....	191	6.5.4 电源接地 .....	205
<b>第 6 章 电磁兼容技术</b> .....	192	6.5.5 电路接地 .....	205
6.1 电磁干扰滤波器 .....	192	6.5.6 屏蔽接地 .....	206
6.1.1 电磁干扰滤波器的工作 原理 .....	192	6.7 屏蔽 .....	207
6.1.2 电磁干扰滤波器的特殊性 .....	192	6.7.1 静电屏蔽 .....	207
6.1.3 滤波器的插入损耗 .....	193	6.7.2 电磁屏蔽 .....	208
6.2 滤波器的分类及特性 .....	193	6.7.3 低频磁场屏蔽 .....	212
6.2.1 反射式滤波器 .....	193	6.7.4 屏蔽材料的选择 .....	214
6.2.2 吸收式滤波器 .....	197	6.7.5 屏蔽的应用 .....	216
6.2.3 滤波器的安装 .....	199	6.7.6 不均匀屏蔽理论 .....	217
		6.8 设备最佳设计法 .....	218
		习 题 .....	218
		<b>附录</b> .....	219
		<b>参考文献</b> .....	222

# 第1章 电磁干扰的基本理论

随着电子技术的高速发展，世界进入了信息时代。电子、电气设备或系统获得了越来越广泛的应用。大功率的发射机对不希望接收其信息的高灵敏度接收机构成了灾难性的干扰。在工业发达的大城市中的电磁环境越来越恶劣，往往使电子、电气设备或系统不能正常工作，引起性能降低，甚至受到损坏。

电磁干扰产生于干扰源，它是一种来自外部的、并有损于有用信号的电磁现象。由电磁干扰源发出的电磁能，经某种传播途径传输至敏感设备，敏感设备又对此表现出某种形式的“响应”，并产生干扰的“效果”，这个作用过程及其结果，称为电磁干扰效应。在人们的生活中，电磁干扰效应普遍存在，形式各异。如果干扰效应十分严重，设备或系统失灵，导致严重故障或事故，这被称为电磁兼容性故障。显而易见，电磁干扰已是现代电子技术发展道路上必须逾越的巨大障碍。为了保障电子系统或设备的正常工作，必须研究电磁干扰，分析预测干扰，限制人为干扰强度，研究抑制干扰的有效技术手段，提高抗干扰能力，并对电磁环境进行合理化设计。

## 1.1 电磁干扰和电磁兼容术语

### 1. 干扰源 interference source

任何产生电磁干扰的元件、器件、设备、分系统或自然现象。

### 2. 工业干扰 industrial interference

由输电线、电网以及各种电气和电子设备工作时引起的电磁干扰。

### 3. 宇宙干扰 cosmic interference

由银河系（包括太阳）的电磁辐射引起的电磁干扰。

### 4. 天电干扰 atmospheric interference

由大气中发生的各种自然现象所产生的无线电噪声引起的电磁干扰。

### 5. 雷电冲击 lightning surge

由雷电在电气或电子电路中引起的瞬态电扰动。

### 6. 辐射干扰 radiated interference

由任何部件、天线、电缆或连接线辐射的电磁干扰。

### 7. 传导干扰 conducted interference

沿着导体传输的电磁干扰。

### 8. 电磁骚扰 electromagnetic disturbance

任何可能引起装置、设备或系统性能降低或者对有生命或无生命物质产生损害作用的电磁现象。

### 9. 电磁干扰 electromagnetic interference (EMI)

电磁骚扰引起的设备、传输通道或系统性能的下降。



10. 系统间干扰 inter-system interference  
由其他系统产生的电磁骚扰对一个系统造成的电磁干扰。
11. 系统内干扰 intra-system interference  
系统中出现的由本系统内部电磁骚扰引起的电磁干扰。
12. 干扰信号 interfering signal  
损害有用信号接收的信号。
13. 人为噪声 man-made noise  
来源于人工装置的电磁噪声。
14. 电磁噪声 electromagnetic noise  
一种明显不传送信息的时变电磁现象，它可能与有用信号叠加或组合。
15. 无用信号 unwanted signal, undesired signal  
可能损害有用信号接收的信号。
16. 自然噪声 natural noise  
来源于自然现象而非人工装置产生的电磁噪声。
17. 脉冲噪声 impulsive noise  
在特定设备上出现的、表现为一连串清晰脉冲或瞬态的噪声。
18. 喀咧声 click  
用规定方法测量时，其连续时间不超过某一规定电平的喀咧声数。
19. 随机噪声 random noise  
给定瞬间值不可预测的噪声。
20. 无线电（频率）噪声 radio (frequency) noise  
具有无线电频率分量的电磁噪声。
21. 电磁脉冲 electromagnetic pulse (EMP)  
指围绕整个系统（它犹如一个天线），具有宽带大功率效应的脉冲。例如在核爆炸时就会对系统产生这种影响。
22. 电磁环境 electromagnetic environment  
存在于给定场所的所有电磁现象的总和。
23. （性能）降低 degradation (of performance)  
装置、设备或系统的工作性能与正常性能的非期望偏离。
24. 大功率效应 high power effects  
仅在强信号情况下发生的效应。采用传统的频率分析处理方法（即频率指配、互调制、附加响应等）既不能预测也无法避免这种效应。它包括永久的电磁损坏和暂时的性能降级这两种情况，而且与是否存在天线关系不大。
25. 电磁易损性  
系统在人为的恶劣环境中遭到一定程度的机理性威胁后，在执行任务时经常出现有限程度降级的一种特性。
26. 干扰抑制 interference suppression  
削弱或消除电磁干扰的措施。
27. （对骚扰的）抗扰性 immunity (to a disturbance)

装置、设备或系统面临电磁骚扰不降低运行性能的能力。

28. 抗扰性电平 immunity level

将某给定电磁骚扰施加于某一装置、设备或系统而其仍能正常工作并保持所需性能等级时的最大骚扰电平。

29. 抗扰性限值 immunity limit

规定的最小抗扰性电平。

30. 抗扰性裕量 immunity margin

装置、设备或系统的抗扰性限值与电磁兼容电平之间的差值。

31. 电磁兼容性 electromagnetic compatibility (EMC)

设备或系统在其电磁环境中能正常工作且不对该环境中任何事物构成不能承受的电磁骚扰的能力。

32. 系统间的电磁兼容性 inter-system electromagnetic compatibility

给定系统与它运行所处的电磁环境或其他系统之间的电磁兼容性，影响系统间电磁兼容性的主要因素是信号及功率传输系统与天线之间的耦合。

33. 系统内的电磁兼容性 inter-system electromagnetic compatibility

在给定系统内部的分系统设备及部件相互之间的电磁兼容性。

34. (电磁)兼容电平 (electromagnetic) compatibility level

预期加在工作于指定条件的装置、设备或系统上的规定的最大电磁骚扰电平。

35. (电磁)兼容裕量 (electromagnetic) compatibility margin

装置、设备或系统的抗扰性电平与骚扰源的发射限值之间的差值。

36. 电磁兼容性故障

由于电磁干扰或敏感性原因，使系统中有关的分系统及设备失灵，从而导致使用寿命缩短、运输工具受损、飞机失事或系统效能发生不允许的永久性下降。

37. 电磁干扰控制

对辐射和传导能量进行控制，使设备、分系统或系统运行时尽量减小或降低不必要的发射。所有的辐射和传导的电磁发射不论它们来源于设备、分系统或系统都要进行控制。若在控制敏感性同时还能成功地控制电磁干扰，就能实现电磁兼容。

38. 屏蔽体

为了阻止或减小电磁能传输而对装置进行封闭或遮蔽的一种阻挡层。它可以是导电的、导磁的、介质的或带有非金属吸收填料的。

39. 屏蔽 screen

用来减少场向指定区域穿透的措施。

40. 电磁屏蔽 electromagnetic screen

用导电材料减少交变电磁场向指定区域穿透的屏蔽。

41. 屏蔽效能 shielding effectiveness

对给定外来源进行屏蔽时，在某一点上屏蔽作安放前后的电场强度或磁场强度之比，通常以 dB 表示。

## 1.2 电磁干扰概述

### 1.2.1 电磁干扰的分类

电磁干扰的分类方法很多，在此只讨论其中主要几种。

1. 电磁干扰按传播途径可以分为两类：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。辐射干扰的传输性质有近区场感应耦合及远区场辐射耦合。

2. 电磁干扰按干扰源的性质可以分为两类：自然干扰和人为干扰。

自然干扰包括宇宙干扰、天电干扰及雷电冲击。

人为干扰包括工业干扰、辐射干扰、传导干扰、串扰、天线端传导干扰、宽带干扰、窄带干扰、有害干扰、大功率效应及电磁脉冲。

3. 电磁干扰按频带可以分为两类：窄带干扰和宽带干扰。

### 1.2.2 电磁干扰的三要素

形成所有的电磁干扰都是由三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接收器；将电磁干扰源传输到接收器的媒介，即传输通道。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。

## 1.3 传导干扰

如前所述，传导干扰是指沿着导体传播的，所以任何导体，如导线、传输线、电感器、电容器等都是传导干扰的传输通道。

形成干扰有不带任何信息的噪声及带信息的无用信号。电源开关的瞬间产生的火花对一个敏感电路就可能会产生干扰。一个带信息的信号在一个通道中是有用的信号，如果它进入别的通道中去，就是带信息的无用信号，将对别的通道形成干扰。由此看出，任何一个电子设备都可能成为一个干扰源。

### 1.3.1 传导干扰源

传导干扰源按带不带信息可以分为信息传导干扰源和电磁噪声传导干扰源两类：信息传导干扰源指的是带有信息的无用信号对接收器产生干扰。电磁噪声传导干扰源指的是不带任何信息的电磁噪声对接收器产生的干扰。

表 1-1 列出了常见的信息传导干扰源，表中还指出产生这种干扰的原因。

表 1-2 列出了常见的电磁噪声传导干扰源，表中也指出产生这种干扰的原因。

### 1.3.2 传导电磁干扰传输通道

传导电磁干扰的途径称之为传导电磁干扰传输通道。传导电磁干扰传输通道能把传导干扰源所产生的传导电磁干扰沿着传输通道线路传给接受器的输入端，并且在接受器中产生相应的干扰电流和电压。传导电磁干扰传输通道是电磁干扰三要素之一，因此，研究电磁干扰问题不可能不分析干扰源和接受器之间的传输途径问题。

传导电磁干扰传输是指设备或电路与其他设备或电路之间的电联系，这种传输能把一个设备或电路中的电流和电压，通过传输途径在另一个设备或电路里产生相应的电流或电压。因此传输起着把电磁能量从一个设备或电路传送到另一个设备或电路中去的作用。

表 1-1 信息传导干扰源

信息传导干扰源	产生干扰的原因
雷达发射机 地线回路	发射能量泄漏到接收机回路电流产生的级间耦合
周期性信号发生器 多谐振荡器 锯齿波发生器 脉冲发生器 计算机时钟 固定快速继电器	固定频率连续波产生干扰及由于脉冲波形的电流、电压上升前沿陡峭, 含有丰富的高次谐波引起感应
电源频率交流声 脉冲发生器重复频率交流声 时钟序列重复交流声 时钟重复频率交流声 扫描电路频率交流声	交流声进入系统以后, 开始时电压很低还不能形成干扰, 而经过系统后被逐级放大而形成干扰

表 1-2 电磁噪声传导干扰源

电磁噪声传导干扰源	产生干扰的原因
旋转电机	电源接线端上会产生传导干扰电压
换向器 (整流器)	电流的突然改变
荧光灯 气体放电灯	电击穿瞬间会产生射频噪声
数字设备 (数据处理机、计算机、数字式仪表等)	因为这些设备中有: 电动机、整流器、继电器、啮合电磁铁、步进开关、荧光灯、高压汞灯等产生干扰引入电源线
直流电源输出端	输出端有交流声干扰
机动车干扰	因为车上使用交流发电机、电磁线圈及点火系统, 这些设备产生传导干扰
静态功率设备	脉冲式电流产生传导干扰

传导电磁传输通道可以分为

电容传导耦合或称为电场耦合, 这种耦合指的是干扰源和接受器之间通过导线以及部件的电容互相交连而构成的电磁传导耦合。

电阻传导耦合或称为公共阻抗耦合, 这种耦合指的是干扰源和接受器之间通过公共阻抗上的电流或电压交链而构成的传导电磁耦合。

电感传导耦合或称互感耦合, 这种耦合实际上是磁场耦合。干扰源和接收器之间通过干扰源电流产生磁场相交链而构成电感传导耦合。

1. 电容耦合 如图 1-1 所示, 设  $V_1$  为传导电磁干扰源电压,  $Z_i$  为接收器输入阻抗,  $V_2$  为接收器输入端相应产生的电压,  $C$  为耦合电容, 即为干扰源和接收器之间的电容耦合通道。若设干扰源的频率为  $\omega$ , 则有

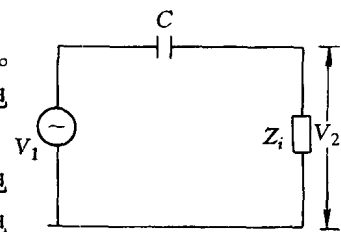


图 1-1 电容耦合

$$V_2 = \frac{Z_i}{Z_i + \frac{1}{j\omega C}} V_1 \quad (1-1)$$

由式 (1-1) 可知,  $V_2$  的大小和  $C$  的容抗及  $Z_i$  阻抗的相对大小有关。当  $\frac{1}{j\omega C}$  一定时,  $V_2$  和  $Z_i$  成正比。当  $Z_i$  一定时,  $V_2$  和  $\frac{1}{j\omega C}$  成反比, 即  $\omega$  大时, 则  $V_2$  就大,  $C$  大时, 则  $V_2$  也大。由此可看出, 减小电容耦合干扰电压的有效方法有三种:

- (1) 减小传导干扰源的频率  $\omega$ , 当频率  $\omega$  很低时, 传导干扰电容耦合可以忽略;
- (2) 减小耦合电容  $C$  的电容值, 当耦合电容  $C$  的电容值很小时, 传导干扰电容耦合可以忽略;

(3) 减小接收器输入阻抗  $Z_i$  的值, 当接收器输入阻抗很小时, 传导干扰电容耦合可以忽略。

2. 电阻耦合 如图 1-2 所示,  $i_1$  是电磁干扰源,  $Z$  是电磁干扰源和接收器之间的电阻耦合通道。  $Z_i$  是接收器输入阻抗。  $V_2$  是干扰源在耦合阻抗  $Z$  上的电压降, 这个电压降将在接收器中产生干扰电压。显然, 公共阻抗  $Z$  成了接收器中输入阻抗的一部分。

$$V_2 = i_1 Z$$

(1-2)

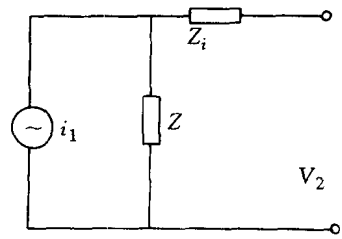


图 1-2 电阻耦合

常见的电阻耦合有以下几种:

(1) 公共地线阻抗产生的耦合干扰。

如图 1-3 所示, 在公共地线上有各种信号的电流, 并由地线阻抗  $Z$  产生电压。当这部分电压构成低电平信号放大器输入电路的一部分时, 公共地线上的耦合电压就被放大并成为干扰输出。

(2) 公共电源内阻产生的耦合干扰。

图 1-4 所示为公共电源内阻产生的耦合干扰电路。输出电流经电源而由电源内阻  $Z_0$  转换为电压, 这个电压耦合到接收器里成为干扰电压。

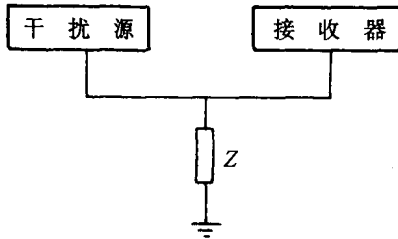


图 1-3 公共地线阻抗产生耦合干扰

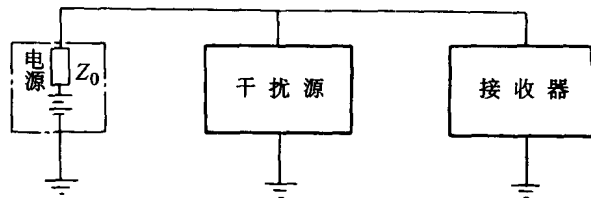


图 1-4 公共电源内阻产生耦合干扰

(3) 公共线路阻抗形成的耦合干扰。图 1-5 所示为公共线路阻抗产生的耦合干扰。电路 2 的电源电流的任何变化都会影响电路 1 的电源电压, 这是由公共线路阻抗造成的。

3. 电感耦合 电感耦合的形成是由于干扰源的时变电流产生的时变磁场, 时变的磁场产生时变的磁通, 这时变化的磁通在接收器的输入阻抗两端感应电压, 这个感应电压就是干扰电压

$$\begin{aligned} V &= M \left( \frac{di}{dt} \right) \\ &= j\omega M i \end{aligned} \quad (1-3)$$

显然, 电压  $V$  与频率、互感  $M$  以及干扰源的电流  $i$  成正比。

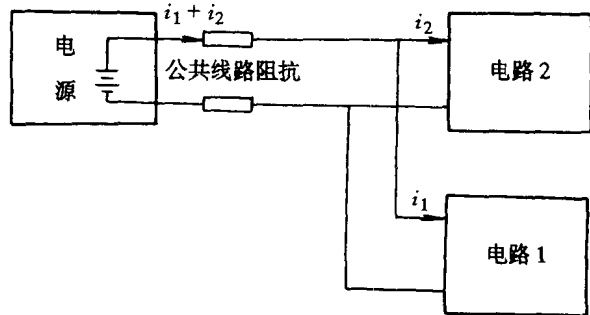


图 1-5 公共线路阻抗形成耦合干扰

电感耦合的主要形式有线圈和变压器耦合、平行双线间的耦合等。铁心损耗常常使得变压器的作用类似于抑制高频干扰的低通滤波器。因此, 比较重要的电感耦合常常是导线到导线之间这种形式。电感耦合的等效电路如图 1-6 所示。

由式 (1-3) 可知, 要想减小干扰电压, 就必须尽量减少互感  $M$ 。

### 1.3.3 传导电磁干扰频谱

任何种类的干扰都与干扰源的功率、频率有关。这里讨论频率问题——传导频谱。测量表明, 传导频谱由最低可测的频率到 1GHz 以上的频谱。通常情况下, 频率最高为几十兆赫以下, 这是因为当频率升高时, 由于导体损耗以及布线电感和分布电容的作用, 使传导电流大为衰减。

表 1-3 列出了传导干扰源及传导干扰频谱。

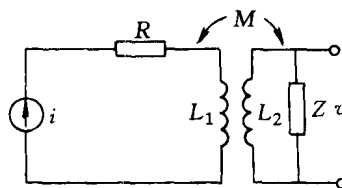


图 1-6 电感耦合

表 1-3 传导干扰源及传导干扰频谱

传导干扰源	频 谱	传导干扰源	频 谱
真空吸尘器	0.1~1.0MHz	计算机逻辑组件	50kHz~20MHz
断路器凸轮触点	10~20MHz	镇定接触器线圈脉冲	1~25MHz
转换开关	0.1~25MHz	镇定接触器通断周期	50kHz~25MHz
电源开关电路	0.5~25MHz	多路通信设备	1~10MHz
指令程序装置电源线	1~25MHz	功率控制器	2~15kHz
指令程序装置信号线	0.1~25MHz	功率转换控制器恒定噪声	10~25MHz
荧光灯	0.1~3MHz	功率转换控制器瞬态	50kHz~25MHz
高压汞灯	0.1~1.0MHz	功率转换控制器磁铁电枢	2~4MHz

### 1.3.4 抑制传导干扰的有效办法

如上所述, 构成干扰的三要素是干扰源、传输通道、接收器。因而, 抑制传导干扰也应从这三个方面着手研究。

#### 1. 传导干扰源的处理

(1) 如果传导干扰源是产生强电磁场元件, 如线圈、变压器等, 在布置时应远离接收器或加以屏蔽。

(2) 如果传导干扰源是频率相同的电路, 如接收机的高频放大、输入及振荡电路, 它们之间的交链容易引起自激振荡, 因此布置应相隔远些。

(3) 移去对系统工作无用的、有潜在的干扰设备的电源。

(4) 应尽可能使设备工作在设计曲线线性最好的部分, 以便输出所含谐波分量最小。

(5) 如果干扰源的工作波形是脉冲形状, 因为当脉冲上升沿较慢且持续时间较长时, 产生的电磁干扰最小, 随着脉冲宽度减少且上升时间缩短, 脉冲中的高频成分的幅度将增加。所以一个控制装置或其他脉冲的上升时间只需快到能在指定的时间内保证可靠工作即可。

不要使振荡器和开关器件的工作速度高于性能所需要的速度。

(6) 电弧放电: 当两个物体之间的电位差大到足以使它们之间的绝缘击穿时就会产生电弧。因此要尽量避免出现电弧放电。

电弧放电的能量取决于产生放电现象的触点闭合的形式, 因而要选择好触点的形式。例如选择微型开关, 因为它们的尺寸小, 工作电压低, 产生的电磁干扰比继电器小。

#### 2. 传输通道的处理

(1) 为缩短电磁干扰传输通道的长度, 要使电路中的导线尽量短。

- (2) 把带有电磁干扰的导线和元件与连接接收器的布线隔离开来。
- (3) 把带有电磁干扰的元件的回线与接收器回线隔离开来。
- (4) 用粗的隔离线和隔离套来减少级间的电容耦合。
- (5) 各级电路的连接导线应尽可能缩短，对高频电路的布置尤应注意这个问题。
- (6) 对高频电路，应尽量避免平行排列导线，特别不能像低频电路那样将各种导线扎成一束。一些可能引起交链的导线，如晶体管 c、b 极引出导线，放大器的输入输出导线，应尽量避免相距过近和平行排列。
- (7) 减小引线电感，以使感应电压减到最小。然而当频率升到高频时，线绕电阻会呈现串联电感，甚至合成电阻也会出现引线电感，这些电感再加上杂散电容则可能形成并联谐振回路。由于介质损耗电容器也会呈现串联电阻，并有引线电感，因此，在设备的布线设计时，必须十分注意，以减少这些效应。图 1-7 画出了线路元件的高频特性。

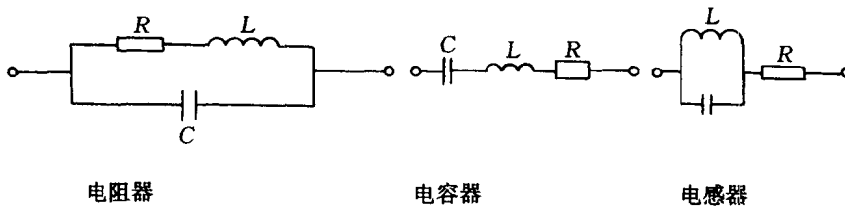


图 1-7 线路元件的高频特性

- (8) 产生电磁干扰的元件应尽量靠近与它们相关联的负载，以使耦合路径最短。
- (9) 由同一电源总线馈电的几个设备之间，必须用旁路电容去耦。在干扰极严重的情况下，可以用齐纳二极管或分别供电的方法来隔离设备间的耦合。有时需要对潜在的干扰源（如触发器及其他数字电路）和敏感器件（如低电平场效应晶体管放大器）专门去耦。
- (10) 滤波器对于防止干扰以及把信道中的能量输送到指定的设备上是很重要的。例如，电源线滤波器应该安装在靠近直流电动机处，把  $\pi$  型滤波器接到电动机上能使射频电流和电动机的地短接。

### 3. 接收器处理

- (1) 尽量少用低电平器件，只使用完成任务所需的灵敏度。
- (2) 移去那些在系统工作时不需要的接收器的电源。
- (3) 对电磁场感应敏感的接收器如果可能的话可加屏蔽。

## 1.4 辐射干扰

辐射干扰是指以电磁波形式传播的干扰。这类干扰的能量是由干扰源辐射出来，通过介质（包括自由空间）以电磁波的特性和规律传播的。是否构成辐射干扰，应由构成辐射干扰的三要素来考虑：辐射干扰源向外辐射能量的特性，如方向性、极化、调制特性、带宽等；辐射干扰传输通道，即介质（包括自由空间）对电磁波能量的损耗程度，辐射干扰接收器的敏感度、方向性、极化、选择性、带宽等。

### 1.4.1 辐射干扰源

构成辐射干扰源有两个条件：一个是有产生电磁波的源泉；另一个是能把这个电磁波能

量辐射出去。不是任何装置都能辐射电磁波，其结构必须是开放式的，几何尺寸和电磁波的波长必须是在同一量级的。显然，各种天线是辐射电磁波最有效的设备，除此之外，就是布线、结构件、元件、部件满足上述辐射条件时，起着发射天线与接收天线的的作用，即产生天线效应。

如同传导干扰一样，辐射干扰源也有信息辐射干扰源和电磁噪声辐射干扰源之分。

信息辐射干扰源指的是带有信息的无用信号通过辐射对接收器进行干扰。电磁噪声辐射干扰源指的是不带任何信息的电磁噪声通过辐射对接收器进行干扰。

1. 信息辐射干扰源 常见的信息辐射干扰源有发送设备、本地振荡器、设备功能的非线性等，下面分别讨论。

(1) 发送设备 发送设备通过发送天线辐射出去，有时通过编织屏蔽层和通风管道辐射出去，通过连接电缆向外辐射。

(2) 本地振荡器 本地振荡器和混频器通常是由传输线及波导相连接的，这种传输线和波导，若屏蔽不好或者匹配不好，都会有电磁波能量向外辐射的。另外还有本地振荡器连接线向外辐射。

(3) 设备功能非线性产生的辐射 所谓设备功能非线性所产生的辐射干扰，指的是电路中器件工作在非线性状态时所产生的干扰。如丙类放大器、检波器、混频器等都工作在器件的非线性状态，它们的输出端将产生不希望有的谐波分量和互调产物。

(4) 核电磁脉冲辐射 爆炸核武器时，核辐射与周围环境相互作用，使带电粒子强烈运动，由此产生核电磁脉冲。这种强脉冲的突出特点是：脉冲上升时间极短，仅有 10ns 左右；频谱极宽，由超长波到微波波段的低端；脉冲的场强极强，电场强度为  $10^5\text{V/m}$ ，磁场强度为  $100\text{A/m}$ ；脉冲释放的能量极大，可为  $4 \times 10^9\text{J}$ 。这样强大的核电磁脉冲所产生的干扰和破坏作用是极其严重的。如果电子设备或系统天线直接接收核电磁脉冲，最轻的是干扰有用信号，影响工作；重的则因焦耳热使电子系统受到损伤和破坏。核爆炸的同时将产生 X 射线、 $\gamma$  射线、 $\beta$  粒子和核电磁脉冲，使大气发生异常电离，并形成附加电离区和骚扰电离层，其结果会造成电波传输的衰减、折射和反射等，这也将严重影响通信设备正常工作。核电磁脉冲能传播很远距离，比核辐射本身传播的距离还远，所以核电磁脉冲干扰、损伤和破坏区域广。

2. 电磁噪声辐射干扰源

(1) 银河系无线电辐射。

(2) 太阳无线电辐射。

(3) 大气中的无线电辐射。

(4) 闪电和雷暴的电场。

(5) 大气中的电流电场。

(6) 大地表面的电场。

(7) 大地内部的电场。

(8) 大地表面磁场。

(9) 大地磁层。

大地表面磁场和大地磁层一起称为自然磁场。

(10) 电力线路辐射干扰源 主要产生两种辐射干扰：一种是绝缘子两端局部放电所产



生的脉冲，其频率在 100MHz 以上，而且直接向空间辐射，这种干扰的特点是在电压低于 100kV 的线路上，雨天、潮湿天干扰弱，而在风天、干燥天干扰强，另一种则是输电线电晕放电效应，产生放电的原因是在尖形电极的顶端附近，由于电位梯度大可产生火花放电，这种干扰的频率在数兆赫以下，可以直接向空间幅射或者沿传输线传到较远的距离，这种干扰的特点是在电压高于 100kV 的线路上，雨天、潮湿天干扰强，而在风天、干燥天干扰弱。

电力线辐射干扰对电子设备的干扰可分为两方面，一方面电力线产生的辐射干扰在空间传输时遇到配电线路、有线广播线路、通信线路等传输系统，干扰通过耦合后沿着这些系统传输；另一方面则是干扰沿电力线传输，这会影响到中波和长波的广播和通信。

(11) 荧光灯辐射源 荧光灯接通后电击穿会产生射频干扰。这种射频干扰可从荧光灯本身或者电源线辐射出去。荧光灯外壳正确接地可以很好地减少其辐射干扰。

(12) 降物静电放电辐射干扰 所有飞行器上产生的电荷以电晕放电形式放掉或者对地以电弧形式放掉，这就是所谓降物静电放电。静电放电产生的电压在  $4 \times 10^4 \sim 10^6 \text{V}$  之间，是一种从低频到中频具有连续频谱的宽带干扰。这种干扰的效果轻者造成干扰，重则可造成飞行器的失事。

(13) 人体静电放电干扰 由人体积累的电荷照样能形成静电放电辐射干扰。它可以构成对电子设备的金属部分直接放电，或者通过放在机器的工作台等金属部件放电而产生对设备的干扰。当人体积累的电荷较多时，静电放电的电流脉冲峰值可以达到 20A，这将严重影响电子设备的正常工作。

(14) 机动车干扰源 机动车包括电气火车、电动汽车、汽车、有轨电车、无轨电车等。干扰源包括点火装置、发电机、稳压器、灯开关、电动机、喇叭以及车顶上的集电器等。集电器在车顶上沿着架空线滑动，有时发生跳动使集电头瞬间离开架空线而引起打火生成脉冲干扰。

当频率在 100MHz 以下时，汽车的噪声是垂直极化的，其电平为正态分布。点火装置是最强的宽带干扰源，其频率在 10~100MHz 范围内并有相当大的场强。

(15) 周围介质的非线性效应 金属表面由于被腐蚀或者沉积化学物等原因，在表面上形成各种各样非线性电阻接点。这种非线性电阻的作用就可以等效成为一个混频器，其结果会使不同信号频率同时作用到此金属表面，从而产生互调产物。然后互调产物再次辐射构成辐射干扰。

(16) 信息技术设备辐射干扰 信息技术设备的作用有两个：一个是接收输入数据；另一个是对接收的输入数据作处理后再输出。信息技术设备电源端会引起辐射干扰。这种辐射使得在一定距离内被截获，造成机密的严重泄漏。

(17) 工业、科学和医疗设备的辐射干扰 这种辐射干扰的设备应包括工业加热设备、医疗加热设备、超声波发生器、微波发生器等。这些设备可以辐射各种频率的电磁波形成辐射干扰。

#### 1.4.2 辐射干扰源数学模型

建立和完善辐射干扰源的数学模型是电磁干扰预测与分析的必要工作。如上所述，所有的电磁辐射干扰源按辐射形式可归纳为两大类：基本形式和标准形式。

1. 基本形式 基本形式包括电偶极子（电流元）和磁偶极子（磁流元）辐射。

(1) 电偶极子辐射数学模型 电子设备中的电路连接导线和印制电路板上每根金属线，