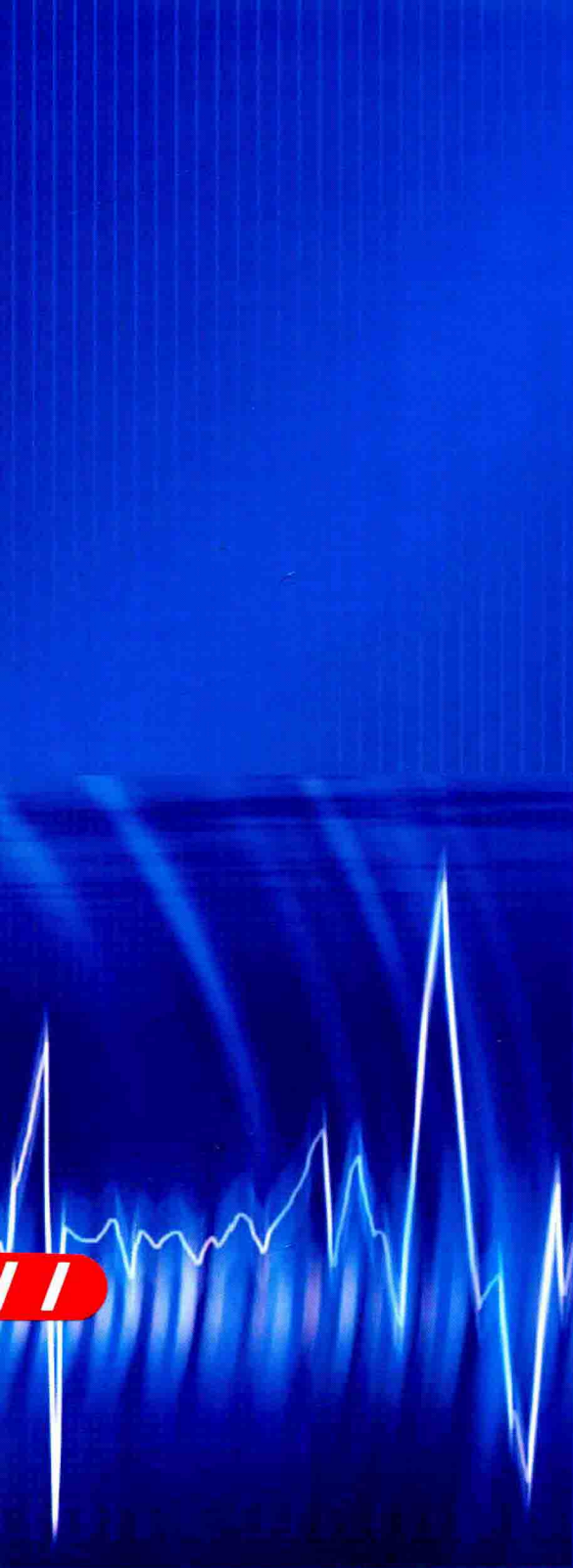


邹澎 马力 编著



电磁兼容
原理、技术和应用
教学指导书
——习题解答与实验
(第2版)

邹澎 马力 编著

电磁兼容

原理、技术和应用 教学指导书

——习题解答与实验

(第2版)

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书是《电磁兼容原理、技术和应用(第2版)》(邹澎、马力、周晓萍)的教学指导书,希望能够帮助使用该教材的教师和学生理解和掌握各章教学的基本要求,把握好教学中的重点与难点,帮助学生加深对电磁兼容基础理论的理解,掌握一些基本的分析方法、计算方法、解题技巧和实验方法,学会分析、解决一些实际的工程电磁兼容问题。本书包括“习题解答”和“电磁兼容实验”两部分。

本书也可以作为“电磁兼容技术”类课程的教学指导书。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

电磁兼容原理、技术和应用 教学指导书:习题解答与实验/邹澎,马力编著.--2版.--北京:清华大学出版社,2014

ISBN 978-7-302-36253-1

I. ①电… II. ①邹… ②马… III. ①电磁兼容性—高等学校—教学参考资料 IV. ①TN03

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第076278号

责任编辑:文 怡

封面设计:邹 澎

责任校对:李建庄

责任印制:沈 露

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦A座 邮 编:100084

社总机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课 件 下 载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 装 者:北京市清华园胶印厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:9.5 字 数:232千字

版 次:2011年5月第1版 2014年8月第2版 印 次:2014年8月第1次印刷

印 数:1~2000

定 价:25.00元

产品编号:059455-01

本书是《电磁兼容原理、技术和应用(第2版)》(邹澎、马力、周晓萍)的教学指导书,希望能够帮助使用该教材的教师和学生理解和掌握各章教学的基本要求,把握好教学中的重点与难点。本书包括“习题解答”和“电磁兼容实验”两部分。

电磁兼容课程的特点是应用性强,电磁兼容测量、电磁兼容认证、抗干扰技术和电磁兼容设计等都是实用技术,但是在教学中也不能忽视基础理论的学习,解题是一个重要的教学环节,通过解题能够帮助学生加深对电磁兼容基础理论的理解,掌握一些基本的分析方法、计算方法和解题技巧,学会分析、解决一些实际的工程电磁兼容问题。在“习题解答”中,围绕基本教学内容编写了大量的习题,每章均由以下两部分组成:①基本教学内容、主要公式及重要提示;②习题解答。

加强实验教学是电磁兼容课程的另一个重要的教学环节,通过实验可以使学生了解和掌握电磁兼容测量、抗干扰技术和电磁兼容设计等实用技能。“电磁兼容实验”部分包括8个实验:频谱分析仪的使用,骚扰信号特性的研究,辐射骚扰测量,传导骚扰测量,利用电流探头测量骚扰电流,屏蔽效果的测量,接地电阻的测量,电磁兼容仿真试验。其中实验6和实验8分别利用实验的方法和仿真的方法研究屏蔽效果。相同的实验装置,相同的试品,对比测量结果和仿真结果,可以验证仿真方法,教学效果很好。

“习题解答”由邹澎编写,马力解答了部分习题并验算了全部习题。“电磁兼容实验”中的实验8由马力编写,其余实验由邹澎编写。

本书可以作为“电磁兼容技术”类课程的教学指导书。读者若发现本书中有错误和不当之处,恳请指出或提出修正意见。

编者

2014年3月

第1篇 习题解答

第1章 绪论	3
1.1 基本教学内容、主要公式及重要提示	3
1.1.1 电磁能的广泛应用	3
1.1.2 电磁辐射的危害	3
1.1.3 电磁兼容性概述	4
1.2 习题解答	4
第2章 电磁干扰	5
2.1 基本教学内容、主要公式及重要提示	5
2.1.1 电磁干扰概述	5
2.1.2 电磁骚扰源	5
2.1.3 骚扰信号的特性	6
2.1.4 骚扰信号的传播	8
2.2 习题解答	14
第3章 电磁敏感性	40
3.1 基本教学内容、主要公式及重要提示	40
3.1.1 一些基本概念	40
3.1.2 接收机的电磁敏感性	41
3.2 习题解答	42
第4章 电磁兼容	43
4.1 基本教学内容、主要公式及重要提示	43

4.1.1	电磁兼容标准和规范	43
4.1.2	电磁兼容认证	43
4.1.3	电磁辐射环境影响评价	43
4.2	习题解答	43
第 5 章	电磁兼容测量	45
5.1	基本教学内容、主要公式及重要提示	45
5.1.1	电磁兼容测量内容	45
5.1.2	常用单位及换算	46
5.1.3	常用的测量仪器	46
5.1.4	传导骚扰测量	53
5.1.5	辐射骚扰测量	54
5.1.6	静态(准静态)电、磁场的测量	55
5.1.7	电磁敏感度测量	57
5.2	习题解答	59
第 6 章	抗干扰技术	71
6.1	基本教学内容、主要公式及重要提示	71
6.1.1	屏蔽技术	71
6.1.2	滤波技术	75
6.1.3	接地和搭接技术	79
6.1.4	其他抗干扰技术简介	81
6.1.5	频谱管理与频谱技术的应用	81
6.2	习题解答	81
第 7 章	电磁兼容设计简介	103
7.1	基本教学内容、主要公式及重要提示	103
7.1.1	一些元器件产生的骚扰及控制	103
7.1.2	电路的骚扰及控制	103
7.1.3	电路的布局和配线	104
7.1.4	抑制传导骚扰的措施	105
7.1.5	抑制辐射骚扰的措施	105
7.2	习题解答	105
第 8 章	专题研究一：通信系统的电磁兼容	108
8.1	基本教学内容、主要公式及重要提示	108
8.1.1	系统内的电磁兼容	108
8.1.2	系统间的电磁兼容	109
8.2	习题解答	109

第 2 篇 电磁兼容实验

实验 1 频谱分析仪的使用	115
实验 2 骚扰信号特性的研究	120
实验 3 辐射骚扰测量	122
实验 4 传导骚扰测量	124
实验 5 利用电流探头测量骚扰电流	126
实验 6 屏蔽效果的测量	128
实验 7 接地电阻的测量	130
实验 8 电磁兼容仿真试验	132
附录 A 接地电阻测试仪使用方法	134
附录 B XFDTD 使用方法	135
参考文献	141

第1篇

习题解答

绪 论

1.1 基本教学内容、主要公式及重要提示

1.1.1 电磁能的广泛应用

概述。

1.1.2 电磁辐射的危害

1. 电磁辐射的量子能量

$$w = hf \quad (1-1)$$

其中, h 是普朗克常数, $h = 6.62 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$; f 是频率(Hz)。如果电磁辐射的频率 $f > 3 \times 10^{15} \text{ Hz}$, 量子的能量可以使原子和分子电离, 称为电离辐射, 例如 X 射线辐射、 γ 射线辐射。如果电磁辐射的频率 $f < 3 \times 10^{15} \text{ Hz}$, 量子的能量不能使原子和分子电离, 称为非电离辐射。电磁骚扰和电磁污染一般属于非电离辐射。

2. 比吸收率

生物体单位时间内、单位质量吸收的电磁辐射能量(W/kg)称为比吸收率(specific energy absorption rate, SAR), 即

$$\text{SAR} = \frac{p}{\rho} = \frac{\sigma E^2}{\rho} \quad (1-2)$$

其中, p 是功率密度, 即单位时间内、单位体积吸收的电磁辐射能量; ρ 是生物体的密度; σ 是生物体的电导率; E 是生物体内电场强度的振幅。

3. 电磁辐射防护限值

电磁辐射防护限值分为职业辐射限值(每天 8 小时工作时间内照射允许的电磁辐射限值)和公众辐射限值(一天 24 小时内连续照射允许的电磁辐射限值), 公众辐射限值比职业辐射限值更严格一些, 辐射功率密度是职业辐射限值的 1/5。国家标准《电磁辐射防护规定》(GB 8702—88)中规定的公众辐射限值如表 1-1 所示。

表 1-1 公众辐射限值

频率范围/MHz	电场强度/(V/m)	磁场强度/(A/m)	功率密度/(W/m ²)
0.1~3	40	0.1	40
3~30	$67/f^{1/2}$	$0.17/f^{1/2}$	$12/f$
30~3000	12	0.032	0.4
3000~15000	$0.22f^{1/2}$	$0.001f^{1/2}$	$f/7500$
15000~30000	27	0.073	2

公众辐射限值是指在一天 24 小时内,电磁辐射场量在任意连续 6 分钟内的平均值应符合表中的要求,全身平均的比吸收率(SAR)应小于 0.02W/kg。

1.1.3 电磁兼容性概述

电磁兼容的定义,电磁兼容学科的发展,电磁兼容研究涉及的领域。

1.2 习题解答

习题 4 试说明电离辐射和非电离辐射的区别,计算电磁干扰和电磁污染研究中电磁辐射的最大量子能量。^①

解: 电离辐射和非电离辐射的区别(略)。

电磁干扰和电磁污染研究中电磁辐射的最高频率为 3×10^{15} Hz,最大量子能量为

$$\omega = hf = 6.62 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^{15} = 1.986 \times 10^{-18} (\text{J})$$

习题 5 在国家标准《电磁辐射防护规定》中,30~3000MHz 频段电场强度的公众辐射限值是多少? 在 100MHz 时生物体的等效电导率 $\sigma \approx 0.77\text{S/m}$,等效质量密度 $\rho \approx 1.08$ (1000kg/m³),求在上述场强限值时,生物体内靠近表面处的比吸收率 SAR。

解: 30~3000MHz 频段电场强度的公众辐射限值是 12V/m,生物体内靠近表面处的比吸收率为

$$\text{SAR} = \frac{\sigma E^2}{\rho} \approx 0.1027 \text{W/kg}$$

^① 与主教材《电磁兼容原理、技术和应用(第 2 版)》中的题号对应,方便学生查找。

电 磁 干 扰

2.1 基本教学内容、主要公式及重要提示

2.1.1 电磁干扰概述

1. 电磁骚扰的分类

(1) 按传播途径分类

传导骚扰、辐射骚扰。

(2) 按场的性质分类

电场骚扰、磁场骚扰、电磁辐射骚扰。

(3) 按骚扰的来源分类

自然骚扰、人为骚扰。

(4) 按信号的功能分类

功能性骚扰、非功能性骚扰。

(5) 按骚扰的特性分类

① 按频率分类：射频骚扰(包括低频信号骚扰、高频信号骚扰、微波信号骚扰)、工频骚扰(50Hz)、静态场骚扰(包括静电场骚扰、恒定磁场骚扰)。

② 按波形分类：连续波骚扰、脉冲波骚扰。

③ 按带宽分类：宽带骚扰、窄带骚扰。

④ 按骚扰信号出现的规律分类：有规则骚扰(包括周期性骚扰信号和非周期性骚扰信号)、随机骚扰。

2. 产生电磁干扰的三个要素

① 电磁骚扰源：指产生电磁骚扰的元器件、设备、系统或自然现象。

② 骚扰信号耦合的通道：指骚扰信号传播的途径，包括传导耦合和辐射耦合。

③ 对此类骚扰敏感的仪器设备：即被干扰体，指对此类骚扰发生响应的设备。

2.1.2 电磁骚扰源

(1) 传导骚扰源

(2) 辐射骚扰源

2.1.3 骚扰信号的特性

1. 频谱

(1) 定义

任何骚扰信号都可以利用傅里叶级数(对于周期性骚扰信号)或傅里叶积分(对于非周期骚扰信号)分解成不同频率简谐信号的叠加,这些简谐信号的幅值随频率变化的函数(C_n 或 $F(\omega)$),称为骚扰信号的频谱。

(2) 周期性骚扰信号的频谱

大多数功能性骚扰源产生的都是周期性骚扰信号。设 $f(t)$ 是一周期性骚扰信号,可以用傅里叶级数展开为

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n e^{jn\omega_0 t} \quad (2-1)$$

其中, $n\omega_0$ 频率分量的幅度为

$$C_n = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) e^{-jn\omega_0 t} dt \quad (2-2)$$

其中, ω_0 是基波; $n\omega_0$ 表示各次谐波。周期性骚扰信号也可以展开为实数形式,即

$$f(t) = C_0 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cos(n\omega_0 t - \phi_n) \quad (2-3)$$

例如周期性方波信号的频谱如图 2-1 所示。

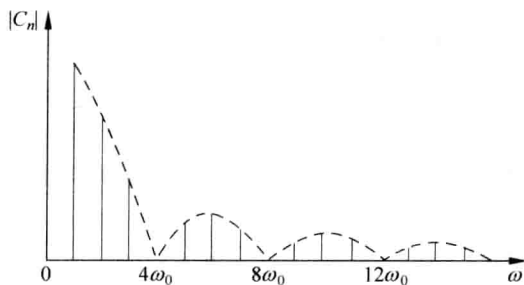


图 2-1 周期性方波信号的频谱

周期性骚扰信号频谱的特点:

① 离散性: 周期性信号的频谱由不连续的谱线组成,谱线间隔为 ω_0 ,每条谱线代表一个正弦分量。

② 谐波性: 周期性信号频谱的每一条谱线,只能出现在基频的整数倍的频率上。

③ 收敛性: 各次谐波的幅值随频率的增加而减小,频谱是收敛的。

(3) 非周期性骚扰信号的频谱

大多数非功能性骚扰源产生的都是非周期性骚扰信号。设 $f(t)$ 是一非周期性骚扰信号,可以利用傅里叶积分展开为

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (2-4)$$

其中, $F(\omega)$ 是非周期性骚扰信号 $f(t)$ 的频谱函数,可以写为

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt \quad (2-5)$$

非周期性骚扰信号的频谱是连续的,也是收敛的,如图 2-2 所示。

(4) 脉冲宽度和频谱宽度

① 脉冲宽度。对于任意脉冲,脉冲宽度定义为:脉冲的幅度下降为最大值 $1/e$ (≈ 0.368)时的宽度。

② 频谱宽度。频谱宽度定义为:频谱的幅度下降为最大值 $1/e$ 时的宽度。

2. 带宽和波形

(1) 窄带骚扰和宽带骚扰

“窄带”和“宽带”是相对于接收机的带宽而言的,接收机的带宽定义为接收机的总选择性曲线上,低于中点(最大值)某一规定电平的宽度,用 B_n 表示, n 是所规定电平的分贝数,例如, B_6 表示 6dB 带宽, B_3 表示 3dB 带宽,如图 2-3 所示。

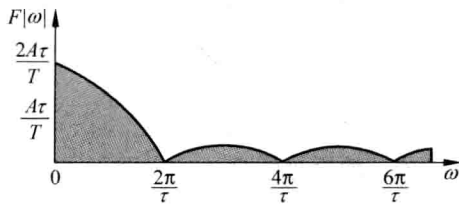


图 2-2 非周期性方波信号的频谱

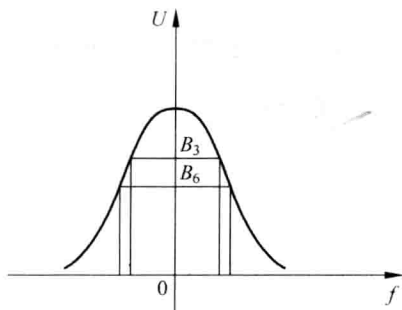


图 2-3 6dB 带宽和 3dB 带宽

(2) 骚扰信号的波形

常见的骚扰信号的波形有连续波(例如正弦波)、脉冲波(例如矩形波、锯齿波、尖脉冲、窄脉冲等)。由骚扰信号的波形可以了解信号幅度的大小、幅值对时间的分布、起始时间(前沿)、持续时间(宽度)、时间滞后、相位滞后、波形的畸变(失真)等特性。

(3) 时域分析与频域分析

① 时域分析:分析骚扰信号的波形,例如幅值对时间的分布、脉冲的前沿和宽度、时间滞后、相位滞后、波形的畸变等,是以时间轴 t 为横坐标表示骚扰信号。所用的测量仪器为示波器。

② 频域分析:分析骚扰信号的频谱分布(幅值与频率的关系),是以频率轴 f (或 ω)为横坐标表示骚扰信号。所用的测量仪器包括频谱分析仪、测量接收机、选频电压表。

3. 幅度

对于传导骚扰,幅度是指骚扰信号电压、电流的大小;对于辐射骚扰,幅度是指骚扰信号的场强(电场强度、磁场强度)、辐射功率密度(能流密度)的大小。

对于连续波骚扰,幅度可用峰值、准峰值、平均值表示;对于脉冲骚扰,频谱是连续的,幅度可用频谱密度表示,例如: $\text{dB}\mu\text{V}/\text{MHz}$ 、 dBm/MHz 等。

4. 出现率

周期性骚扰、非周期性骚扰、随机骚扰。

5. 极化特性

- (1) 线极化波
- (2) 圆极化波(左旋、右旋)
- (3) 椭圆极化波(左旋、右旋)

6. 共模骚扰与差模骚扰

对于设备的两个输入端(例如信号线或电源线),如果两输入端骚扰信号的方向、幅度、相位都相同,称为共模骚扰;如果两输入端骚扰信号的方向相反、幅度相同,称为差模骚扰。

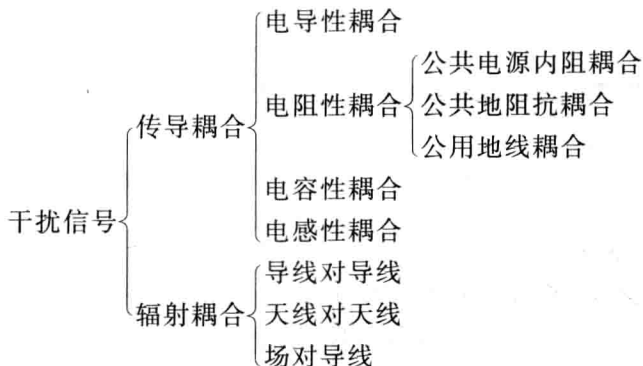
7. 近区场骚扰和远区场骚扰

- (1) 近区场的范围和特点
- (2) 远区场的范围和特点

近区场和远区场的性质不同,场分布的特点不同,所以测量方法不同,使用的测量仪器、天线(或探头)也不同。

2.1.4 骚扰信号的传播

骚扰信号由骚扰源产生,经过一定的传播途径到达接收机造成干扰,传播的途径主要有:



1. 传导骚扰的传播

1) 电导性耦合

(1) 圆截面导线的电阻和阻抗

一根均匀截面的导线的直流电阻为

$$R_{DC} = \rho \frac{l}{S} (\Omega) \quad (2-6)$$

式中,导线长度 l 的单位为 m; 导线横截面积 S 的单位为 m^2 ; 导线电阻率 ρ 的单位为 $\Omega \cdot m$ 。

导线的高频电阻

$$R_{RF} = \rho \frac{l}{S_{eff}} = \rho \frac{l}{\pi D \delta} = R_{DC} \cdot \frac{D}{4\delta} \quad (2-7)$$

其中, D 是导线的直径; 趋肤深度 δ 可以表示为

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (2-8)$$

式中, μ 为导体的磁导率, $\mu = \mu_0 \mu_r$; f 为频率, 单位为 Hz; σ 为电导率, 单位为 S/m。

高频时,除了考虑高频电阻外,导线的电感将起主要作用。对于一根长度为 l , 直径为 D 的导线,当 $l/D \gg 1$ 时,导线的电感为

$$L = 0.2l \ln\left(\frac{4l}{D}\right) \quad (\mu\text{H}) \quad (2-9)$$

式中, l 和 D 的单位为 m。

导线的总阻抗为

$$Z = R_{\text{RF}} + j\omega L \quad (2-10)$$

$$|Z| = \sqrt{R_{\text{RF}}^2 + (\omega L)^2} \quad (2-11)$$

对于高频情况, $|\omega L| \gg R_{\text{RF}}$, 因此高频时导线的阻抗为

$$|Z| = |\omega L| \cdot \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{R_{\text{RF}}}{\omega L}\right)^2\right] \quad (2-12)$$

(2) 条状导体带的电阻和阻抗

对于印刷电路板,连接导线为条状导体带,其直流电阻为

$$R_{\text{DC}} = \frac{1000l}{\sigma w t} \Omega \quad (2-13)$$

其中, l 为长度,单位为 mm; w 为宽度,单位为 mm; t 为厚度,单位为 mm。对于铜带, $\sigma = 5.8 \times 10^7 \text{ S/m}$, 直流电阻为

$$R_{\text{DC}} = \frac{17.2l}{wt} \mu\Omega \quad (2-14)$$

高频时考虑趋肤效应的射频电阻值 R_{RF} 为

$$R_{\text{RF}} = \frac{1000l}{\sigma w \delta \cdot 2} \quad (2-15)$$

或

$$R_{\text{RF}} = R_{\text{DC}} \frac{t}{2\delta} \quad (2-16)$$

当 $l \gg w+t$ 时,条状导体带的电感为

$$L = 0.2l \ln\left(\frac{2l}{w+t}\right) \quad (\mu\text{H}) \quad (2-17)$$

总的阻抗为

$$Z = R_{\text{RF}} + j\omega L \quad (2-18)$$

一般情况下,对于高频信号, $|\omega L| \gg R_{\text{RF}} \gg R_{\text{DC}}$, 因此导线的阻抗主要是电感的感抗。

2) 电阻性耦合

电阻性耦合包括通过公用电源内阻的耦合、通过公共接地回路的耦合和通过公用地线的耦合等,如图 2-4 所示。

对于电阻性耦合,以上各种公共阻抗(例如电源内阻、公共接地回路的阻抗、公用地线的电阻等)都很小,属于分布阻抗(分布电阻、分布电感等),在电路图上都被忽略,但是在研究干扰时,成为骚扰信号的耦合通道。

3) 电容性耦合

频率较高时,骚扰信号可以通过导线间的分布电容从一个回路传导到另一个回路,称为电容性耦合。接地板上两平行导线之间的电容耦合及其等效电路如图 2-5 所示。

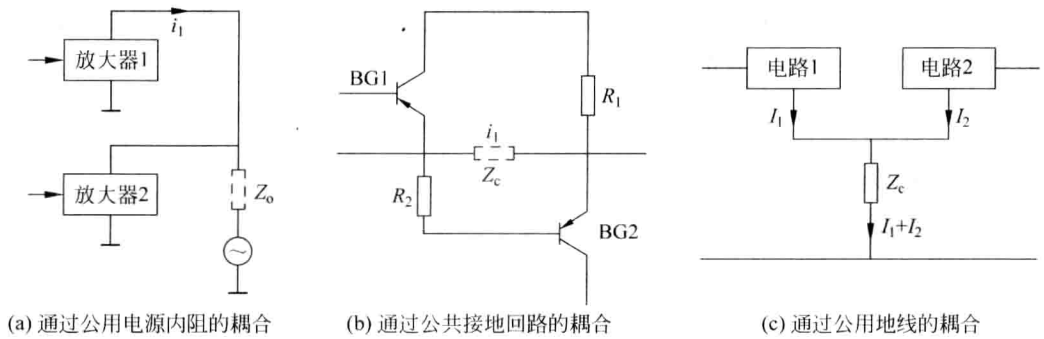


图 2-4 电阻性耦合

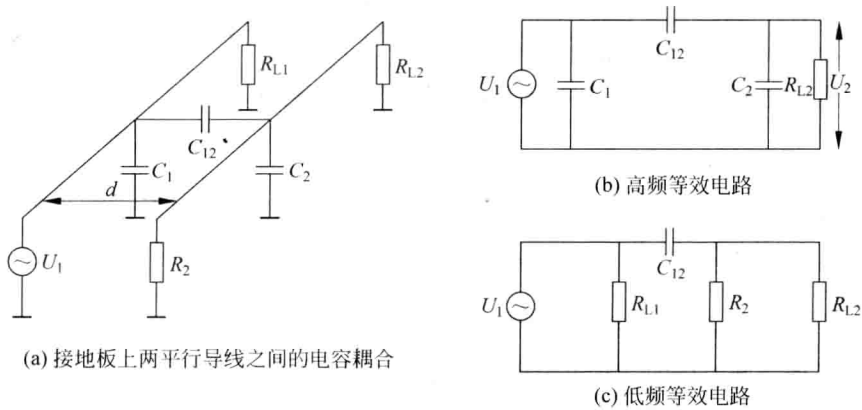


图 2-5 接地板上两平行导线之间的电容耦合及其等效电路

4) 电感性耦合

骚扰信号通过导线间的分布电感或线圈和变压器的漏磁, 从一个回路传到另一个回路称为电感性耦合。接地板上两平行导线之间的电感耦合及其等效电路如图 2-6 所示。

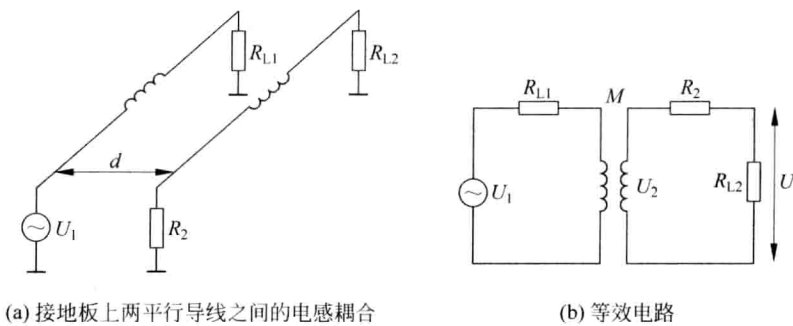


图 2-6 接地板上两平行导线之间的电感耦合及其等效电路

2. 辐射骚扰的传播

1) 电磁波的传播和衰减

(1) 自由空间电磁波的传播

设一天线, 输入功率为 P_T , 方向系数为 D_T , 最大辐射方向上距天线 r 处的辐射功率密