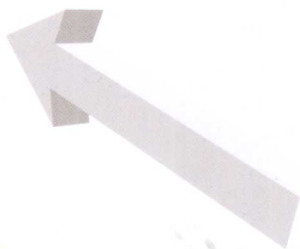


高职高专“十一五”规划教材



# 电磁兼容设计 与电磁干扰抑制技术

曹丰文 瞿 敏 编



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

高职高专“十一五”规划教材

# 电磁兼容设计 与电磁干扰抑制技术

曹丰文 瞿 敏 编  
何湘宁 主审



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

## 内 容 提 要

本书为高职高专“十一五”规划教材。

本书共7章，主要包括电磁干扰源、电磁噪声耦合途径、电磁兼容设计与电磁干扰抑制技术、瞬态噪声的抑制、电力电子装置的谐波干扰与抑制、计算机中的电磁兼容性、电磁兼容测量方法和标准等。

电磁兼容理论计算复杂，本书深入浅出，注重应用。

本书可作为高职高专、成人高校及本科院校的二级职业技术学院电类各专业教材，也可作为相关工程技术人员的参考书。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

电磁兼容设计与电磁干扰抑制技术/曹丰文，瞿敏编. —北京：中国电力出版社，2009

高职高专“十一五”规划教材

ISBN 978 - 7 - 5083 - 9257 - 8

I. 电… II. ①曹…②瞿… III. ①电磁兼容性—设计—高等学校：技术学校—教材②电磁干扰—抑制—高等学校：技术学校—教材 IV. TN03

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 133832 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

\*

2009 年 9 月第一版 2009 年 9 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 8.75 印张 210 千字

印数 0001—3000 册 定价 15.00 元

## 敬 告 读 者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失  
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

# 前 言

随着电子、电气设备数量急剧增加和家用电器日益普及,用电设备的密集程度越来越大,设备自身又朝着高频、高速、多功能、小型化的方向发展,其功率能量和功率密度也不断增加,在有限的时间、空间和频谱资源下,电磁干扰越来越严重,往往会使电子、电气设备不能正常工作,引起性能降低,甚至损坏,同时在电网中产生大量谐波。因此要求产品具有良好的电磁兼容性。

电子电气类企业的设计开发人员、质检人员以及生产人员都应该了解或掌握电磁兼容设计与电磁干扰抑制技术的相关知识,因此编者在多年前就将一般在本科高年级甚至研究生开设的课程引入高职高专,以适应经济社会发展和科技进步的需要,毕业生受到企业欢迎。

本书由编者使用多年的讲义改编而成,深入浅出,注重应用。

本书主要内容包括电磁干扰源、电磁噪声耦合途径、电磁兼容设计与电磁干扰抑制技术、瞬态噪声的抑制、电力电子装置的谐波干扰与抑制、计算机中的电磁兼容性、电磁兼容测量方法和标准等。

本书第1~3章由曹丰文编写,第4~7章由瞿敏编写。全书由曹丰文教授统稿审定。

浙江大学何湘宁教授认真审阅了全书,提出了许多宝贵意见,在此表示诚挚的感谢。

限于编者学识水平,书中疏漏之处在所难免,敬请读者不吝赐教。

编 者

2009年7月

# 目 录

## 前言

|                                    |     |
|------------------------------------|-----|
| <b>第 1 章 概述</b> .....              | 1   |
| 1.1 电磁干扰与电磁兼容 .....                | 1   |
| 1.2 电磁干扰源 .....                    | 2   |
| 1.3 电磁兼容设计的任务 .....                | 6   |
| 1.4 电磁兼容设计相关的知识领域 .....            | 6   |
| <b>第 2 章 电磁噪声耦合途径</b> .....        | 8   |
| 2.1 电磁噪声传导耦合 .....                 | 9   |
| 2.2 电磁噪声辐射耦合 .....                 | 15  |
| <b>第 3 章 电磁兼容设计与电磁干扰抑制技术</b> ..... | 23  |
| 3.1 屏蔽 .....                       | 23  |
| 3.2 接地 .....                       | 40  |
| 3.3 滤波 .....                       | 54  |
| <b>第 4 章 瞬态噪声的抑制</b> .....         | 68  |
| 4.1 触点开关噪声及抑制 .....                | 68  |
| 4.2 浪涌噪声及其防护 .....                 | 73  |
| <b>第 5 章 电力电子装置的谐波干扰与抑制</b> .....  | 82  |
| 5.1 电力电子装置的谐波干扰 .....              | 82  |
| 5.2 谐波干扰的危害 .....                  | 84  |
| 5.3 电力电子系统谐波干扰的抑制 .....            | 86  |
| 5.4 谐波标准与测量 .....                  | 94  |
| <b>第 6 章 计算机中的电磁兼容性</b> .....      | 100 |
| 6.1 计算机电磁兼容性概述 .....               | 100 |
| 6.2 计算机传输通道的电磁兼容性问题 .....          | 100 |
| <b>第 7 章 电磁兼容测量方法和标准</b> .....     | 110 |
| 7.1 电磁兼容测量的基本概念 .....              | 110 |
| 7.2 电磁兼容测量场地 .....                 | 112 |
| 7.3 电磁兼容测量的常用设备 .....              | 116 |
| 7.4 电磁兼容测量方法 .....                 | 123 |
| 7.5 电磁兼容标准 .....                   | 128 |
| <b>参考文献</b> .....                  | 133 |

## 第1章 概述

### 1.1 电磁干扰与电磁兼容

随着科学技术的发展,一方面,电子、电气设备正朝着高频、高速、高灵敏度、高可靠性、多功能,以及小型化的方向发展,同时其自身功率能量和功率密度也不断增加,致使周围环境及电网遭受的电磁污染日益严重;另一方面,在有限的时间、空间和频谱资源下,电子及电气设备数量急剧增加,家用电器日益普及,用电设备的密集程度也越来越大,给电磁环境的治理增加了难度。在恶劣的电磁环境下,往往会使电子及电气设备不能正常工作,引起性能降低,甚至损坏。

电磁污染已经是继水质污染、大气污染和噪声污染之后,被世界公认的第四大污染。有些国家成立了专门机构对此进行管理,并制定相应的规范,电子设备必须经过这些专门机构的鉴定和批准,方能进入市场。电磁兼容(Electromagnetic Compatibility, EMC)已是当今现代电子技术发展道路上的不可避免的问题,它已不再仅仅局限于军用设备与系统和通信领域,而是已扩展到与电子技术应用相关的工业和民用的各个领域。由于电磁干扰而导致的危害事例有以下几方面。

1967年6月越南美军基地一艘美军军舰上的高功率雷达所发射的射频能量,耦合到一台装在飞机上的导弹火箭的电机驱动电路,导致该电机启动,将导弹火箭点火,并触发了停在航空母舰飞行甲板上的其他导弹。引爆了27枚导弹,使134人丧生,造成7200亿美元的损失。1980年前后,德国报道一个陆地发射台所发射的射频能量,干扰了一台航空电子设备,曾导致一架军用航空飞机爆炸。类似的由EMI造成的惨痛教训,使军用及通信电子设备的设计部门早已把EMC设计当作设计和生产质量控制过程的一个重要组成部分。

日常生活中会经常遇到电磁干扰的问题,例如当看电视的时候,如果旁边有人使用电吹风或电剃须刀之类的家用电器,屏幕上会出现令人反感的雪花条纹。图1-1是家用电吹风机对电视机发生干扰的传输途径。电吹风机作为干扰源,它一方面产生射频噪声向空间发射,以辐射传输方式通过电视机天线耦合引起干扰;同时射频噪声还会在电视机的电源线中感应,再以传导方式进入电视机;另外吹风机在电源中产生的高频谐波和尖脉冲,通过连接导线传导使电视机受到干扰。正因为电磁干扰是多途径、反复交叉耦合,才使电磁干扰难

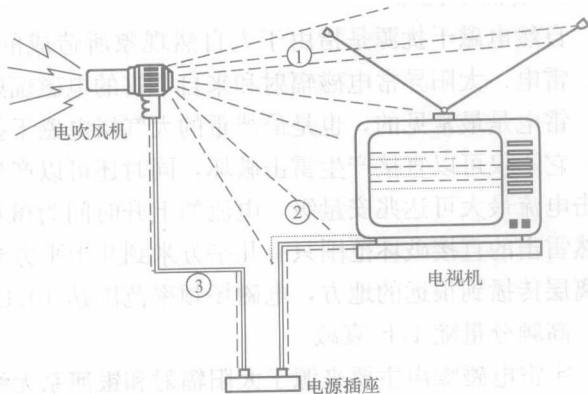


图1-1 电吹风机对电视机的干扰

①—射频噪声通过电视机天线耦合引起干扰;②—射频噪声在电视机的电源线中感应;③—高频谐波和尖脉冲,通过连接导线传导

以控制。

电磁兼容性是指设备或系统在其电磁环境中能正常工作且不对该环境中的其他任何设备产生不能承受的电磁干扰的能力,即包含电磁干扰(Electromagnetic Interference, EMI)和电磁敏感性(Electromagnetic Susceptibility, EMS)两个方面的含义。

(1) EMI。设备或系统自身产生的电磁噪声(Electromagnetic Noise, EMN)必须限制在一定的电平范围内,使由它所造成的电磁干扰不致对它周围的电磁环境造成严重的污染,影响其他设备或系统的正常运行。

(2) EMS。电子设备或系统内部的各个部件与子系统、一个系统内部的各台设备乃至相邻几个系统,在它们自己所产生的电磁环境及它们所处的外界电磁环境中,能按原设计要求正常运行。即设备应具有一定的电磁敏感度,以保证它们对电磁干扰具有一定的抗扰度(Immunity to a Disturbance)。

## 1.2 电磁干扰源

### 1. 电磁干扰源的一般分类

了解常见的电磁干扰源是发现和解决电磁干扰问题的关键。从不同的侧重点出发,电磁干扰源可分为以下几类。

按其来源可分为自然干扰源和人为干扰源;按干扰频谱宽度可分为宽带干扰源和窄带干扰;按干扰信号的频率范围可分为工频(50Hz及其谐波)干扰、甚低频(30Hz以下)干扰、载频(10~300kHz)干扰、射频及视频(300kHz~300MHz)干扰和微波(300MHz~300GHz)干扰;按其耦合方式可分为传导干扰和辐射干扰;按功能划分,可分为功能性干扰源和非功能性干扰源。功能性干扰源是指设备实现功能过程中造成对其他设备的直接干扰;非功能性干扰源是指用电装置在实现自身功能的同时伴随产生或附加产生的副作用,如开关闭合或切断产生的电弧放电干扰。

### 2. 自然干扰源

自然电磁干扰源是指由于大自然现象所造成的各种电磁噪声,它们主要包括大气层噪声、雷电、太阳异常电磁辐射和来自宇宙的电磁辐射噪声等。

雷电是最常见的,也是最严重的大气层电磁干扰源。地球上每秒钟发生100次左右的雷电,它不仅可以直接产生雷击破坏,同时还可以产生电磁噪声间接破坏用电设备。雷击时的闪击电流最大可达兆安量级,电流的上升时间为微秒量级,持续时间可达几毫秒乃至几秒。虽然雷击的直接破坏范围只有几平方米到几十平方米,但伴随其产生的强烈电磁骚动能借助电离层传播到很远的地方,电磁场频率范围达10Hz~300kHz,主要能量分布在100kHz左右,高频分量随 $1/r^2$ 衰减。

宇宙电磁噪声主要来源于太阳辐射和银河系无线电辐射。太阳电磁辐射噪声是太阳黑子发射出的噪声和太阳黑子增加或活动激烈时产生的磁暴,其干扰信号的频谱通常在数十兆赫范围。银河系无线电辐射是由银河系及超远星系的高能粒子运动和银河系恒星体上的爆炸现象引起的电磁噪声,其干扰信号的频谱通常在数十兆赫兹到数万兆赫兹的范围。宇宙的电磁辐射噪声将影响航天器、通信、遥测等电子设备。

### 3. 人为干扰源

人为电磁干扰源来源于各种电气设备,涉及的范围十分广泛,其中一部分是专门用来发射电磁能量的装置,如广播、电视、通信、雷达和导航等无线电设备,称为有意发射干扰源;另一部分是在完成自身功能的同时附带产生的电磁能量发射,如机动车辆、架空输电线、照明器具、家用电器和工业设备等的无意发射干扰源。根据这些干扰源的物理性质可大致分为五大类:元器件的固有噪声、电化学反应噪声、放电噪声、电磁感应噪声及非线性开关过程噪声。

(1) 元器件的固有噪声。元器件均存在固有噪声,它们主要有热噪声 (Thermal Noise)、散粒噪声 (Shot Noise)、接触噪声 (Contact Noise) 和爆米花噪声 (Popcorn Noise)。

1) 热噪声源于电阻类导体或元器件中由于电子布朗运动引起的电子热骚动,在一定温度下,导体中电子与分子撞击产生一个短暂的电流小脉冲。由于随机性,电流脉冲的平均值为零,其瞬时值具有高斯正态分布的特征。

2) 散粒噪声是电流流过势垒而产生的噪声。在电子管中,热阴极电子发射存在着随机性,在半导体器件中,载流子越过势垒的扩散电流和漂移电流以及在长基区中电子空穴对的产生和复合过程也是随机的。所以,这些载流子的随机性造成电流的随机波动。

3) 接触噪声是由于两种材料接触时接触不良造成的电导率的波动引起的噪声,如继电器和开关的触头、集成电路芯片电极引出部分的合成电阻等。电导率大小取决于构成原件的材料、外形、表面的状态、接触压力大小和环境因素(如温度、湿度等)等。在低频段接触阻抗主要由接触电阻决定,在高频段接触阻抗主要由容抗决定。系统在静止状态时,接触电阻不发生变化则不会产生电磁干扰,当系统运动时,振动与颠簸导致接触电阻的变化,此时元件在电流和电压的作用下将产生电磁干扰。

4) 爆米花噪声又称为爆裂噪声,主要存在于半导体二极管和集成电路中,由半导体器件的P-N结中的金属杂质造成的缺陷。它的特点是在热噪声背景上叠加不规则的脉冲噪声,脉冲的脉宽在微秒到秒的范围中变化,它的干扰电压幅值通常是热噪声的2~100倍。它对高阻抗电路(如运算放大器的输入级)具有严重的影响。

(2) 物理或化学噪声源。在弱信号电路中,由于物理或化学原因造成的干扰是必须考虑的,它们主要有:原电池噪声、电解噪声、摩擦电噪声和导线移动造成的噪声等。

1) 原电池噪声是当两块不同的金属相互接触,并且其间隙中存在潮气和水的的话,则它们会构成一个化学湿电池系统,产生电池端电压。

2) 电解噪声是两块相同的金属相互接触,接触面间存在电解液(如带弱酸的水汽等),并且流过直流电流时,将产生电解反应,结果在产生电解噪声的同时,也会造成金属的腐蚀。特别在大功率电力电子装置中,由于广泛采用流过大电流的接线排,设备的工作环境通常比较恶劣,电解效应是不容忽视的。

3) 摩擦及导线移动造成的噪声是当导线中的金属芯线与其绝缘外套相互摩擦产生感应电荷,造成的摩擦噪声。同时当一根导线在磁场中移动时,因切割磁力线也会在导线两端产生感应电压。通常电源线和大功率电力电子装置功率回路中常流过较大的电流,它的周围空间里存在着相当强的杂散磁场,所以当低电平的信号线移动的时候,就必然会因之产生感应干扰信号。

(3) 放电噪声。这类干扰源的共同特征是它们起源于放电 (Discharging) 过程。

1) 静电放电 (Electrostatic Discharge, ESD)。静电是一种有害的干扰源。当两块非导体 (绝缘体) 相互接触并摩擦时, 两者之间发生电荷 (电子) 转移而使各自成为带有不同电荷的物体。随着电荷的累积绝缘体上建立的静电电压有时可高达几千至几万伏, 该绝缘体与在附近的导体 (金属、碳棒、人体等) 上产生感应电荷, 产生静电放电。

人体是主要静电感应干扰源之一, 人体的静电放电模型如图 1-2 所示, 图 1-2 (a) 为人体的等效电容和电阻示意图, 图 1-2 (b) 为等效电路。其中,  $C_b$  为人体对地的电容, 它的大小与人体周围环境条件有关, 其值在  $50 \sim 250 \text{pF}$  之间。 $R_b$  为等效人体电阻, 它与人体产生静电放电的具体部位有关, 其大小在  $500 \Omega \sim 10 \text{k}\Omega$  之间。放电电流的上升时间用等效电感表示, 通常取  $0.1 \mu\text{H}$  以下。 $U_b$  用以等效人体因静电感应积累的等效电荷效应, 其数值在  $0 \sim 20 \text{kV}$  之间。所以人体接触电路板或电子装置时就可能造成静电放电。

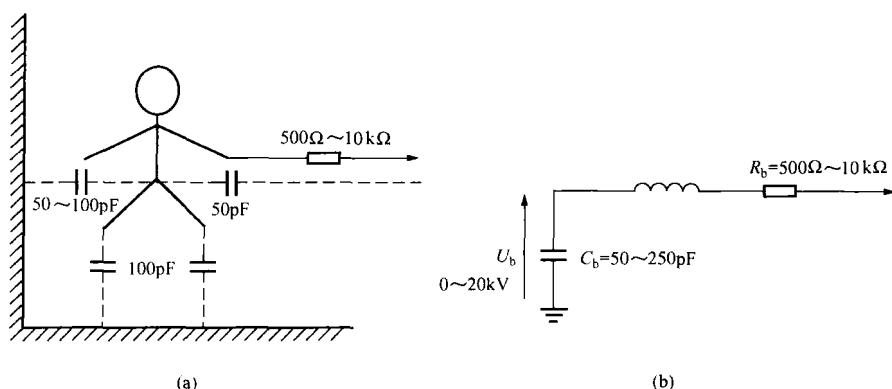


图 1-2 人体的静电放电模型

(a) 人体的等效电容和电阻示意图; (b) 等效电路

大多数半导体器件都很容易受到静电放电而损坏, 特别是大规模集成电路器件更为脆弱。常见的半导体器件对静电放电的易损值为  $100 \sim 3000 \text{V}$ , 表 1-1 是常见器件的易损参考值。

表 1-1 常见器件的静电放电易损值

| 器件类型    | 对静电放电的易损电压参考值 (V) |
|---------|-------------------|
| 肖特基二极管  | 300~2500          |
| 肖特基 TTL | 1000~2500         |
| 双极晶体管   | 380~7000          |
| ECL     | 500~1500          |
| 晶闸管     | 680~1000          |
| JFET    | 140~7000          |
| CMOSFET | 100~200           |
| CMOS    | 250~3000          |
| GaAsFET | 100~300           |
| EPROM   | 100               |

电视和调频广播则影响不大。

2) 电晕放电噪声。电晕放电噪声主要来自交流高压输电线, 是由高达几万伏到几十万伏的电压产生很强的电场引起周围气体分子电离, 产生辉光 (电晕) 放电, 属于一种持续放电干扰源。实验表明, 输电线垂直方向上电晕噪声强度的衰减与距离的平方成正比, 在  $15 \text{kHz} \sim 400 \text{MHz}$  的频率范围, 其衰减与频率成反比, 干扰主要在数兆赫以下, 主要对电力线载波电话、低频航空无线电以及调幅广播等产生干扰, 对于

3) 辉光放电 (Glow Discharge)。持续的辉光放电物理现象已广泛地应用于离子管、等离子反应器和低压气体放电灯中。除此以外,在人们所处的电磁环境中,还存在一些不受控的辉光放电干扰源。例如,电气开关接通(或断开)瞬间,当开关两触头在一定的触头间隙内,触头之间也会产生“辉光放电”现象。所以,辉光放电噪声引起的干扰可能是持续的,也可能是瞬态的,它的特点是中压,小电流。辉光放电造成的干扰与电晕放电情况类似,属于辐射性质的干扰。通常,这种放电是发生在设备内部,其产生的干扰要比电晕放电的影响更为明显和严重。

4) 弧光放电。弧光放电是最危险的骚扰源之一,它与辉光放电在物理本质上的根本区别是它源于阴极电子发射而与气体电离无关,其放电特点是低压大电流。持续弧光放电的典型应用是电弧焊接和高压气体放电灯等。除此以外,与辉光放电类似,当电气开关换接时,开关两接头之间在“开”、“关”瞬间也会产生不受控的弧光放电过程,这一过程会导致断续的电磁干扰。弧光放电所产生的  $0.15\sim 150\text{MHz}$  的辐射骚扰可以传播很远的距离。

5) 高频电火花干扰。在实际工业现场和日常生活中,除了前述那些持续的或断续的辉光和弧光放电造成的电磁辐射干扰以外,还有许多电力电子设备(如汽车发动机点火装置、电焊机、高频电火花切割机等)更是直接的电磁干扰源。这些设备的电火花能量很大,电磁干扰的强度也很大。例如汽车发动机点火系统在点火时产生波形前沿陡峭的火花电流脉冲和电弧峰值可达几千安培。在开阔地,干扰可传至  $1000\text{m}$  远,其干扰噪声主要集中在  $10\sim 100\text{MHz}$  范围内。

(4) 电磁波辐射干扰。生活中有些装置以向空间辐射电磁波为目的,例如无线电电视广播、通信、遥感、遥控、遥测、雷达等各种发射机等,它们同时也会在相应的发射频率(包括它们的高次谐波)范围内对其他电子装置造成干扰。此外,还有一些装置,例如中频感应和高频感应加热电源、高频开关电源、电子镇流器、超声波发生器、高速数字脉冲电路、核电磁脉冲等,它们虽然不以向空间辐射电磁波为目的,但是在运行时也会在附近空间里产生很强的电磁场。

(5) 半导体器件开关过程和变流电路引起的噪声。随着电力电子技术的迅速发展,利用各种现代功率半导体器件快速开关特性构成的各种半导体变流装置日益广泛地应用于工业、商业、医疗及家电中。它们带来的电磁环境污染问题已引起了人们广泛的关注。虽然这些装置工作频率通常不太高,但它们的功率容量很大,因此造成的电磁干扰常常是很强的,不容忽视。下面就与这类装置有关的一些典型噪声源加以阐述。

1) 功率半导体器件开关过程造成的电磁噪声。所有半导体变流装置主电路的核心部件是各类现代功率半导体器件,如功率二极管(包括快恢复功率二极管)、大功率晶体管(GTR)、晶闸管(SCR和GTO)、复合场控功率晶体管(IGBT)和功率场效应管(MOSFET)等。而这些装置的控制部分,常常应用各种大规模数字集成电路、DSP和CPU芯片等高速集成电路。因此,在这类电力电子装置中,无论是主回路还是控制回路,在器件开关过程中,都存在着高的  $di/dt$ ,它们通过线路或元器件的引线电感引起瞬态电磁噪声。它们的频率可高达几十千赫兹至几百千赫兹乃至几兆赫兹,成为不可忽视的噪声源。

2) 整流电路造成的谐波干扰和电磁噪声。整流电路是电力电子系统的最基本电路之一,由于它与交流供电电网直接相连,所以它本身产生的谐波干扰和电磁噪声,以及由它供电的后级电路产生的电磁噪声,均可通过整流电路以传导耦合的形式引入电网,造成对接在同一

电网内的其他设备的干扰。图 1-3 (a) 是一个典型的带电容滤波的单相桥式整流电路。由于输出滤波电容  $C$  的作用, 其网侧电流波形为脉冲波, 而不是正弦波, 它在交流电网内阻抗上产生的压降会造成网侧相电压波形畸变, 如图 1-3 (b) 所示。

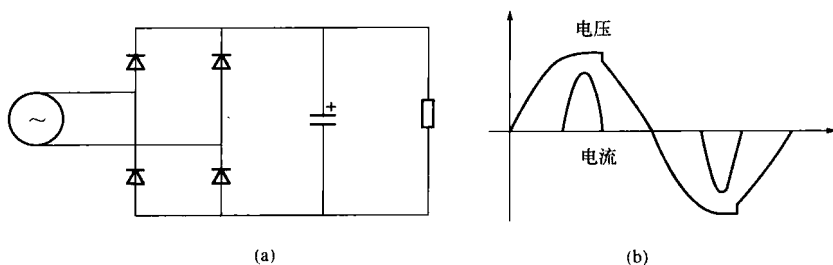


图 1-3 单相桥式整流电路

(a) 典型的电容滤波单相桥式整流电路; (b) 网侧电流和电压波形

在许多情况下, 整流电路是经过一个变压器接入电网的, 在考虑由整流电路注入电网的电磁噪声时, 还必须考虑变压器的变比。在忽略变压器漏感以及原边和副边之间的杂散电容, 认为变压器变比与频率无关的条件下, 整流电路注入电网的电磁噪声应乘以一个系数  $20\lg(U_p/U_s)$ , 其中,  $U_p$  为变压器原边电压,  $U_s$  为变压器副边电压。上述假设对结构设计良好的变压器, 在良好屏蔽的情况下, 对最初的几十次谐波还是成立的。

3) 用 PWM 技术的各种电力电子电路造成的电磁噪声。近十几年来, 随着场控功率器件的飞速发展, 脉冲宽度调制 (PWM) 技术在各种电力电子装置中得到广泛地应用。因此在它们的主功率电路中, 通常会流过一系列的 PWM 功率脉冲, 其重复频率视应用场合可从几千赫兹到几百千赫兹不等。因而这些脉冲电流中所包含的谐波可以达到几兆赫兹乃至几十兆赫兹的范围, 而且它们产生的电磁噪声强度很大。

### 1.3 电磁兼容设计的任务

当前电磁兼容性已经是衡量电子设备性能的重要指标之一。电磁兼容设计是实现设备或系统规定的功能, 使系统性能得以充分发挥的重要保证。在产品的设计阶段首先应该进行电磁兼容设计, 使电磁兼容的问题解决在设计定型之前, 并贯穿于开发的整个阶段。如果等到产品的生产阶段再去解决, 不但会在技术上带来很大的难度, 而且会造成人力、财力和时间上的极大浪费。

进行电磁兼容设计就要从形成电磁干扰的三个基本要素出发, 即干扰源 (噪声)、噪声的耦合途径和噪声接收器 (被干扰设备)。采取有效的技术手段, 抑制或削弱干扰源能量、隔离或减弱干扰噪声的耦合途径、降低设备干扰的响应或增加电磁敏感性电平以提高设备对电磁干扰的抵抗能力。

### 1.4 电磁兼容设计相关的知识领域

电磁兼容性是一门涉及多学科的综合学科, 是伴随着其他科学技术特别是电子与电气技术的发展而出现并不断地发展的边缘学科。它主要研究的课题有: 干扰源性质, 敏感设备

性质, 传输与耦合通道特性, 电磁兼容性标准和规范, 电磁兼容性测试方法和测试仪器设备, 电磁兼容性分析预测, 电磁兼容性设计, 电磁兼容性结构设计及材料、工艺, 频谱工程, 电磁兼容抑制技术和诊断技术, 电磁兼容性管理, 电磁兼容性教育等。与其相关的知识领域有以下五方面。

(1) 电气工程。模拟和数字电路设计, 半导体器件工艺技术, 无线电波传输理论(特别是近场效应), 射频接收机和发射机原理, 光隔离技术, 线路板设计, 结构设计中电磁设计部分, 电气安全和雷电防护滤波器、浪涌吸收器, 屏蔽理论和屏蔽设计, 传输电缆的辐射, 功率产生、分配和开关系统等。

(2) 物理学和化学。分析射频电流与电磁波之间电磁能量交换的物理学; 研究电磁波在近场和远场的传播以及驻波现象和无线电波的吸收与反射现象等。

(3) 数学建模。通常电磁兼容问题无论是从结构、激励源或者是从材料成分的观点来看, 边界条件都非常复杂。所以, 用传统的电磁数值计算方法很难求解。随着计算机技术的发展可以通过建立电磁兼容数学模型利用计算机分析程序进行分析和预测。数学模型包括实际电路, 以及布线和参数建立起来的所有干扰源、传输途径和干扰接受模型。分析程序应能计算所有干扰源通过各种可能传输途径对每个器件的影响, 并判断这些综合影响的危害是否符合相应的标准或设计要求。

(4) EMC 测量。电磁兼容性测量的对象是干扰和噪声, 不同于一般的有用信号。噪声的拾取和噪声的衡量以及误差的分析等都有自己的特点, 对测量方法、测量仪器设备, 以及测量场所的研究是电磁兼容学科的重要组成部分。

(5) EMC 标准。EMC 标准规定了各个频段各种类型的电子电气设备发射干扰的限制和对敏感度以及电磁干扰的测量方法、仪器设备和实验场所的要求。因为大部分干扰具有脉冲性质, 采用不同的测量方法和手段即使测量同一干扰所得结果也可能相差甚远。产品必须符合标准是达到电磁兼容性的先决条件, 因此制定和执行标准是决定电磁兼容性问题的一种重要措施。

目前国际上有权威性的电磁兼容性标准有原联邦德国的 VDE 标准、美国 FCC 标准、美国军用标准 MIL-STD、CISPR 的推荐标准以及其他一些标准。近年来我国已陆续制定 30 多种电磁兼容性的有关标准。民用标准基本上以 CISPR 为蓝图, 军用标准主要参考美国军标 MIL-STD。

## 第2章 电磁噪声耦合途径

电磁干扰的发生都必然存在干扰能量的传输，通常认为噪声通过传导和辐射两种方式耦合到被干扰对象，如图2-1所示。

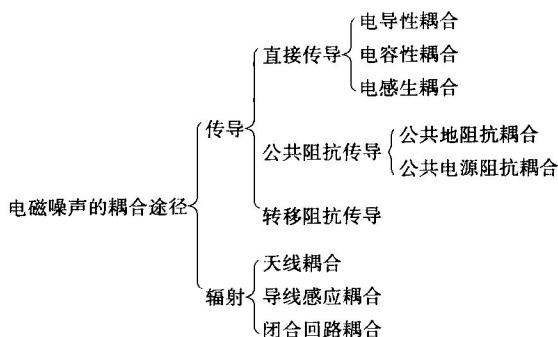


图 2-1 电磁噪声的耦合方式分类

传导耦合是指电磁噪声的能量在电路中以电压或电流的形式，通过金属导线或其他元件（如电容器、电感器、变压器等）耦合至被干扰设备（电路）。根据电磁噪声耦合的特点，传导耦合可分为直接传导耦合、公共阻抗耦合和转移阻抗耦合三种。

辐射耦合是指电磁噪声的能量以电磁场能量的形式，通过空间辐射传播耦合到被干扰设备（电路）。根据电磁噪声的频率、电磁干扰源与被干扰设备（电路）的距离，辐射耦合可分为天线耦合、导线感应耦合和闭合回路耦合三种情况。

电磁噪声耦合途径归纳表示如图2-2所示。

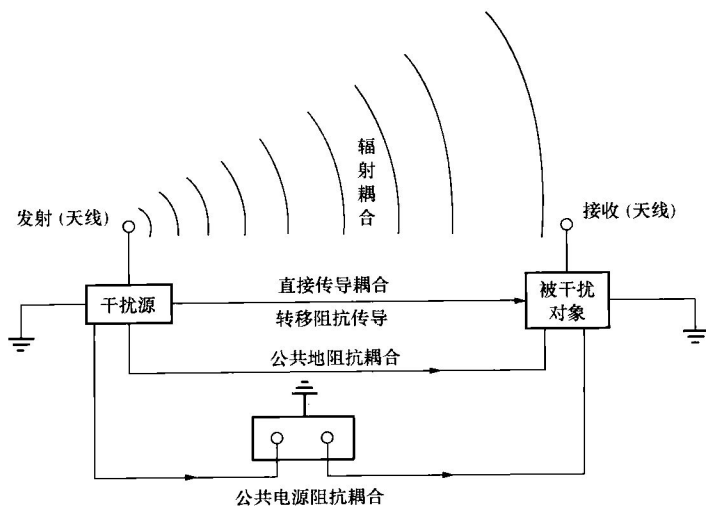


图 2-2 噪声耦合途径图

## 2.1 电磁噪声传导耦合

### 2.1.1 直接传导耦合

噪声直接通过导线、电阻器、电容器、电感器或变压器等实际或寄生元件耦合到被干扰设备（电路）的方式被称为直接传导耦合。根据耦合元件的不同直接耦合又分为电导性耦合、电感性耦合和电容性耦合三种。

#### 1. 电导性耦合

电导性直接耦合是最常见而又最简单的一种耦合方式。例如连接两元件或设备（系统）之间的导线、铜排或电缆、电源与负载之间的电源线等，它们都是阻抗元件而并非理想导体。因此在考虑 EMC 问题时，必须考虑导线不但有电阻  $R_l$ ，而且有电感  $L_l$ 、漏电阻  $R_p$  以及杂散电容  $C_p$ ，如图 2-3 所示。显然在高频时它们将构成一个谐振回路，谐振频率为  $f_0 =$

$$\frac{1}{2\pi\sqrt{L_l C_p}}。$$

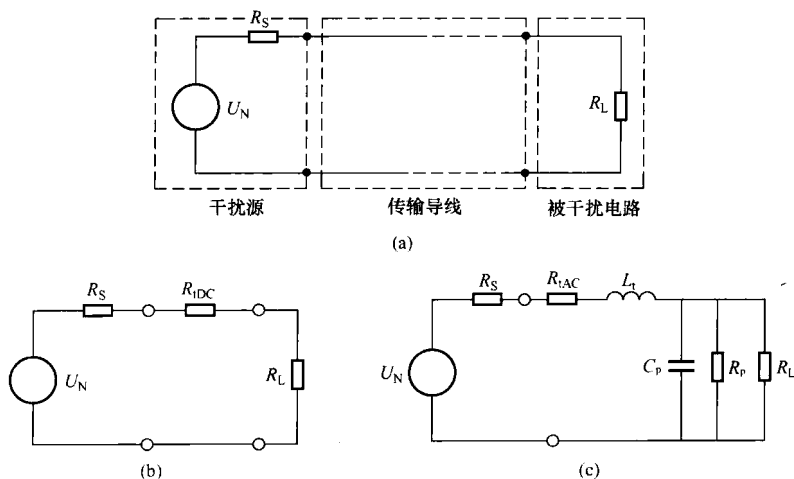


图 2-3 直接电导耦合示意图

(a) 电导传输实际线路；(b) 低频等效电路；(c) 高频等效电路

由于集肤效应，图 2-3 中的等效电阻  $R_l$  是频率的函数， $R_{lDC}$  为其低频和直流时等效阻值， $R_{lAC}$  为其高频时等效阻值。此外，如果噪声是与导线自身谐振频率相接近或是信号为高速高频脉冲列时，此时导线也应视为传输线来处理。

(1) 导线的直流等效电阻。在直流和低频情况下传输线等效电阻为

$$R_{DC} = \frac{\rho l}{A} (\Omega) = \frac{l}{A\sigma} (\Omega) \quad (2-1)$$

式中， $l$  为导线的长度 (m)； $A$  为导线的截面积 ( $m^2$ )； $\rho$  为导线的电阻率 ( $\Omega \cdot m$ )； $\sigma$  为导线的电导率。

(2) 导线的交流等效电阻。在高频时，由于趋肤效应的作用，导线中流动的电流趋向表面，所以导线载流的有效截面  $A_{eff}$  要比导线本身的截面积小，导致导线的高频电阻（或交流电阻） $R_{AC}$  要比它的直流电阻  $R_{DC}$  大，即

$$R_{AC} = R_{DC} \cdot \frac{A}{A_{eff}} \quad (2-2)$$

对于圆截面导体,  $A_{eff} = \pi D \delta$ , 其中,  $D$  为导体直径,  $\delta$  为趋肤深度。

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} = \frac{66}{\sqrt{\mu_r \sigma_r f}} \text{ (mm)} \quad (2-3)$$

式中,  $\mu$  是金属导体的磁导率, 且  $\mu = \mu_r \mu_c$ ,  $\mu_c = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$  为铜的磁导率,  $\mu_r$  为其他金属对铜的相对磁导率;  $\sigma$  为导线的电导率,  $\sigma = \sigma_r \sigma_c$ ,  $\sigma_c$  为铜的电导率,  $\sigma_r$  为其他金属对铜的相对电导率;  $f$  为频率 (Hz)。

$$R_{AC} = R_{DC} \cdot \frac{D}{4\delta} \quad (2-4)$$

若导线为印制板上一条厚度为  $t$  的铜箔条, 则该铜箔条的交流电阻为

$$R_{AC} = R_{DC} \frac{t}{\delta} \quad (2-5)$$

(3) 导线的等效电感。通常实际电路的工作频率多低于谐振频率  $f_0$ , 因此导线一般呈现感性, 存在等效电感  $L_i$ 。它对电路中噪声和瞬态信号的影响十分重要, 甚至在低频下, 一根导线的感抗也可能会大于它们自身的电阻。一根导线的总电感量, 等于它的外电感量  $L_w$  和内电感量  $L_R$  之和, 即  $L_i = L_w + L_R$ 。

内电感  $L_R$  是用来描述导线内部的磁场效应的, 它的大小与导线的尺寸和与地平面的距离无关, 但与其截面形状和电流频率有关。通常要比外电感量小得多, 特别在高频时, 趋肤效应使电流集中从导线外表流过, 这时内电感更小。用扁平的导线, 空心的铜管均可以有效地减小内电感的大小。对于一个环形截面的直导线, 当均匀地流过低频电流时, 其内电感等于  $0.05 \mu\text{H/m}$ 。

一根导线的等效电感量通常可由其外电感量  $L_w$  决定。一根直的直径为  $D$  的圆导线, 离地面的高度为  $h$ , 且  $h > 1.5D$  时, 该导线单位长度的外电感为

$$L_w = \frac{\mu}{2\pi} \ln\left(\frac{4h}{D}\right) \quad (\text{H/m}) \quad (2-6)$$

若导线为印制板上的铜箔, 则外电感为

$$L_w = 0.2 \ln\left(\frac{2h}{w+t}\right) \quad (\mu\text{H/m}) \quad (2-7)$$

式中,  $w$  为铜箔的宽度,  $t$  为铜箔的厚度。

(4) 导线的特征阻抗  $Z_0$ 。良好 EMC 设计应将连接导线制成均匀传输线的形式 (单位长度电感、电阻和分布电容均匀一致), 并使传输线的特征阻抗与负载阻抗匹配, 以有效地减小导线电感对信号传输的不良影响, 减小噪声传导耦合。

常见的传输线结构有地平面上的圆直导线、地平面上的条状导线、平行圆直导线、同轴电缆等, 它们的结构示意图如图 2-4 所示。

圆直导线—地平面传输线的特性阻抗为

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \text{arccosh}\left(\frac{2h}{D}\right) \quad (\Omega) \quad (2-8)$$

$$\text{当 } \frac{2h}{D} \gg 1 \text{ 时} \quad Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln\left(\frac{4h}{D}\right) \quad (\Omega) \quad (2-9)$$

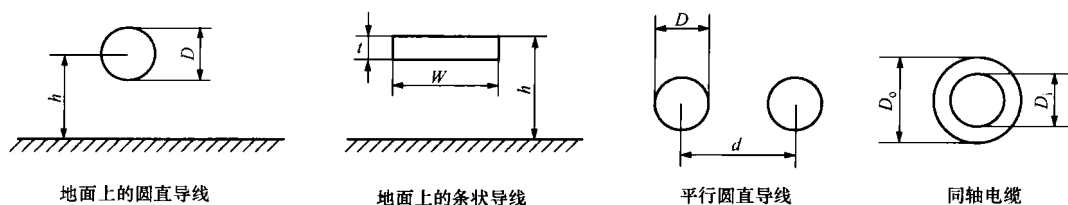


图 2-4 几种常见的传输线结构

$\epsilon_r$  为相对介电常数。

印制板上条状导线—地平面传输线的特性阻抗为

$$Z_0 = \frac{377}{\sqrt{\epsilon_r}} \times \frac{h}{W} \quad (\Omega) \quad (t \ll h \ll W) \quad (2-10)$$

平行圆直导线的特性阻抗为

$$Z_0 = \frac{120}{\sqrt{\epsilon_r}} \operatorname{arccosh}\left(\frac{d}{D}\right) \quad (\Omega) \quad \text{或} \quad Z_0 = \frac{120}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln\left(\frac{2d}{D}\right) \quad (\Omega) \quad (d \gg D) \quad (2-11)$$

同轴电缆的特性阻抗为

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln\left(\frac{D_o}{D_i}\right) \quad (\Omega) \quad (2-12)$$

## 2. 电感性耦合

电感性耦合 (Inductive Coupling) 也称为磁性耦合, 是指干扰源产生的噪声磁场与被干扰回路发生磁通交链, 以互感的形式产生传导性干扰。

设噪声磁场的磁通密度为  $B$ , 穿过一个闭合面积为  $A$  的闭合回路, 则在该回路中感生干扰电压  $U_N$

$$U_N = -\frac{d}{dt} \int_A B \cdot A \quad (2-13)$$

式中,  $B$  和  $A$  均为矢量。

如果该闭合回路固定不变, 磁通密度为正弦函数, 上式积分后可得

$$U_N = j\omega B A \cos\theta \quad (2-14)$$

如图 2-5 所示,  $A$  为闭合回路的面积,  $B$  为角频率为  $\omega$  的正弦磁通密度的有效值,  $U_N$  为感应电压的有效值。  $B A \cos\theta$  表示耦合到敏感电路的总磁通量。

$$U_N = j\omega B A \cos\theta$$

这一关系也可以用两个电路之间的互感  $M$  来表示。如图 2-6 所示, 当干扰电路中流过干扰电流  $I_1$ , 在电路 2 上将产生磁通, 使电路 1 和 2 之间产生互感  $M$ 。

$$M = \Phi_{12} / I_1 \quad (2-15)$$

$\Phi_{12}$  表示电路 1 的电流  $I_1$  引起电路 2 的磁通。

此时感生干扰电压为

$$U_N = j\omega M I_1 = M \frac{di_1}{dt} \quad (2-16)$$

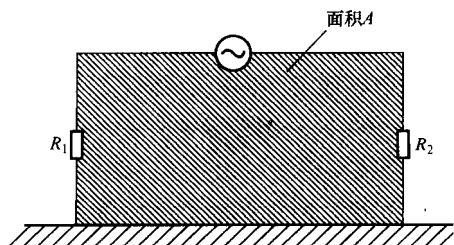


图 2-5 噪声磁场在被干扰电路的闭合回路中产生噪声电压

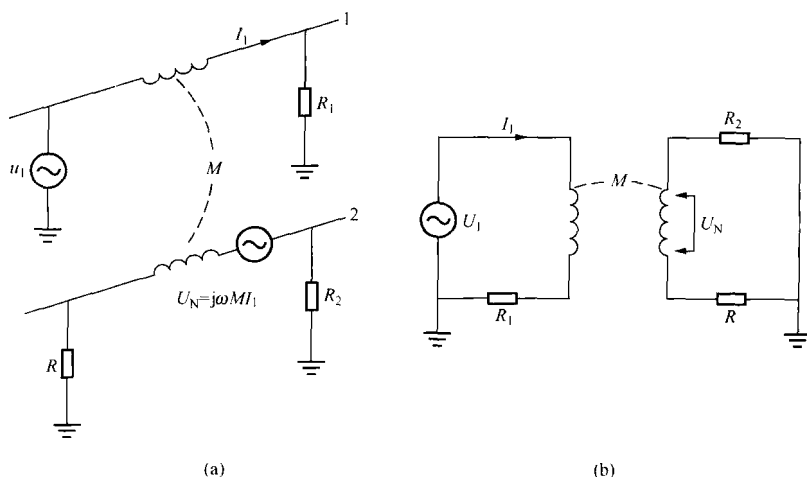


图 2-6 两个电路通过互感产生磁耦合

(a) 电感耦合模型；(b) 等效电路

为了减小噪声电压，必须减小  $B$ ， $A$  或  $\cos\theta$ 。减小  $B$ ，可以采用电路的物理隔离。减小敏感电路的面积  $A$ ，可以将导线紧贴在地平面上（如果返回电流通过地平面时）或者使用两根绞合在一起的导线（如果返回电流是在该对导线中）。减小  $\cos\theta$ ，可以适当调整骚扰源和敏感电路的相对位置。另外，噪声电压还直接与频率成正比。

### 3. 电容性耦合

电容性耦合（The Capacitive Coupling）也称为电耦合，它是由两电路间的电场相互作用所引起。

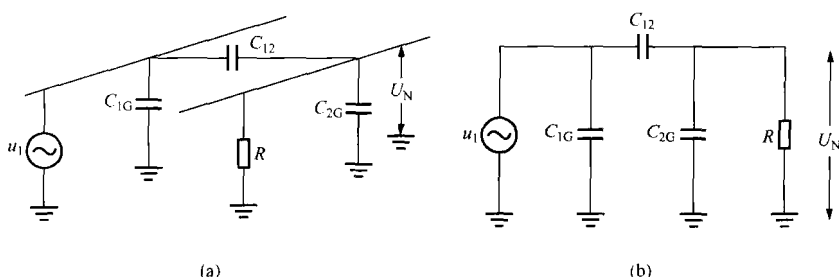


图 2-7 两个导体之间的电容耦合

(a) 电容耦合模型；(b) 等效电路

两个导体之间的电容耦合，可用图 2-7 简单地示意。 $C_{12}$  是导线 1 与 2 之间的杂散电容。 $C_{1G}$  和  $C_{2G}$  分别是导体 1 和 2 与地之间的总电容（包括杂散电容及外接电容）， $R$  为导体 2 对地外接的电阻。电压  $U_1$  是加在导体 1 上的干扰源，导体 2 为被干扰电路。由于电容耦合，在导体 2 对地之间产生的噪声电压  $U_N$ 。

$$U_N = \frac{j\omega C_{12} R}{1 + j\omega R (C_{12} + C_{2G})} U_1 \quad (2-17)$$

图 2-8 是电容性耦合干扰的电频率响应，是式 (2-17) 的骚扰电压  $U_N$  与频率的关系曲线图。