

# 印制电路板的 电磁兼容性设计

吴建辉 编著

国防工业出版社

<http://www.ndip.cn>

# 印制电路板的电磁兼容性设计

吴建辉 编著

国防工业出版社

·北京·

## 内 容 简 介

本书首先从电磁干扰的产生原因与种类入手,分析电磁兼容性原理,介绍印制电路板的设计流程,重点根据电磁兼容性设计要求,对在印制电路板设计过程中的电磁兼容性问题进行研究,分析在印制电路板设计中的电源干扰与抑制、接地干扰与抑制以及电磁与空间干扰与抑制,最后介绍了考虑电磁兼容性的印制电路板设计的布局、布线的特点与要求。本书共分7章。第1章为电磁兼容性概述,描述了电磁干扰产生的原因及其抗干扰的方法、电磁兼容设计技术;第2章为印制电路板概述;第3章则介绍了印制电路板的基本设计流程;第4章着重论述了印制电路板设计中要考虑的电磁兼容性;第5章至第7章分别介绍了电源干扰与抑制、地线干扰与抑制以及考虑电磁兼容性的布局与布线等。

本书适合于从事电子设计的工程技术人员阅读参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

印制电路板的电磁兼容性设计/吴建辉编著. —北京:  
国防工业出版社,2005.2  
ISBN 7-118-03750-8

I.印 ... II.吴 ... III.印刷电路板(材料)—电  
磁兼容性—设计 IV.TN410.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 001188 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号)

(邮政编码 100044)

涿中印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 787×1092 1/16 印张 14 323千字

2005年2月第1版 2005年2月北京第1次印刷

印数:1—4000册 定价:24.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

# 前 言

在出现电子元器件后,印制电路板就应运而生,印制电路板的设计就成为影响电子系统与设备的性能的一个重要方面;随着科学技术的发展、信息时代的到来以及电气化、自动化水平的提高,电磁干扰及电磁防护问题日益突出,因此出现了电磁兼容研究。所以,在进行印制电路板设计时必须考虑电磁兼容性要求。

本书共分为7章。第1章首先从电磁干扰的产生原因与种类入手,分析电磁兼容性原理。第2章则介绍印制电路板的基本知识。第3章介绍了采用 Protel 99 SE 软件进行印制电路板设计时的设计流程。而从第4章到第7章重点是根据电磁兼容性设计要求,对在印制电路板的设计过程中的电磁兼容性问题进行研究。第4章分析了印制电路板设计中的电磁兼容性考虑以及信号完整性分析。第5章介绍了印制电路板设计中的电源干扰与抑制。第6章论述了接地干扰与抑制。第7章则介绍了考虑电磁兼容性的印制电路板设计的布局、布线的特点与要求。

在本书的编写过程中,得到了东南大学电子工程系李红、茅洁等多位教师的大力支持与帮助,在此表示衷心感谢。

本书可以作为电子工程设计人员的参考书。

由于编著者水平有限和时间仓促,书中缺点和错误之处难免存在,恳请各位读者批评指正。

编著者

# 目 录

<b>第 1 章 电磁兼容技术概述</b> .....	1
1.1 电磁兼容的发展 .....	1
1.2 电磁兼容的主要研究内容 .....	3
1.3 电磁干扰系统及种类 .....	4
1.3.1 电磁干扰系统 .....	4
1.3.2 电磁干扰的种类 .....	5
1.3.3 电磁干扰的传播途径 .....	6
1.4 敏感接收单元.....	21
1.4.1 模拟电路系统敏感度.....	21
1.4.2 数字电路系统敏感度.....	21
1.5 电磁兼容控制技术.....	22
1.5.1 电磁干扰的控制策略.....	22
1.5.2 电磁兼容控制技术.....	22
1.6 电磁兼容性设计.....	28
<b>第 2 章 印制电路板基础</b> .....	32
2.1 印制电路板的发展.....	32
2.1.1 印制电路基板材料的发展.....	33
2.1.2 印制电路制造工艺的新发展.....	33
2.1.3 印制电路生产的新发展.....	35
2.2 印制电路板的分类.....	35
2.2.1 根据 PCB 基材分类 .....	36
2.2.2 根据 PCB 的导电结构分类 .....	37
2.3 印制电路板基板的选择.....	37
2.4 印制电路板组成要素.....	38
2.4.1 尺寸.....	38
2.4.2 导线.....	39
2.4.3 过孔.....	39
2.4.4 焊盘.....	40
2.4.5 非金属涂覆层.....	41
2.4.6 敷形涂层.....	42
2.5 印制电路板的阻燃性.....	42
2.6 印制电路板的电气性能.....	43

2.6.1	电阻	43
2.6.2	载流量	44
2.6.3	其他电气性能	45
<b>第3章</b>	<b>印制电路板设计基础</b>	<b>46</b>
3.1	设计流程	46
3.1.1	原理图设计	47
3.1.2	PCB 设计流程	48
3.2	印制电路板的散热设计	66
3.3	PCB 设计的可制造性	67
3.3.1	通孔插装元件的可制造性设计规范	67
3.3.2	表面贴元器件的 PCB 可制造性设计规范	69
3.4	PCB 的可测性设计	70
3.4.1	概述	70
3.4.2	PCB 测试的策略	72
3.5	PCB 的仿真设计	73
<b>第4章</b>	<b>电磁兼容设计</b>	<b>75</b>
4.1	基本概念	76
4.1.1	信号完整性	76
4.1.2	传输速度	80
4.1.3	微带线与微带波导	80
4.1.4	印制电路板中基本元素的电磁兼容设计高频等效电路	83
4.1.5	20H 规则与 3W 规则	84
4.1.6	串扰	85
4.1.7	PCB 互联中传输线的阻抗及反射	90
4.1.8	电磁兼容设计的带宽	100
4.1.9	容性负荷影响	102
4.1.10	逻辑组件的选择	103
4.1.11	镜像平面	104
4.1.12	分区	105
4.2	印制电路板中干扰	105
4.3	PCB 的电磁兼容性设计	112
4.3.1	电磁兼容综述	112
4.3.2	印制电路板层的确定及安排	113
4.3.3	多层印制电路板电磁兼容设计的理论方法	116
4.3.4	PCB 中电磁兼容设计方法	118
4.3.5	高速 PCB 的设计技术	124
4.4	信号完整性解决方法	124

4.4.1	信号完整性设计的一般准则	125
4.4.2	信号完整性分析	129
<b>第5章</b>	<b>电源的干扰与抑制</b>	<b>133</b>
5.1	电源干扰	133
5.1.1	共阻抗耦合干扰	133
5.1.2	电源环路干扰	135
5.1.3	高频电路中的电源噪声	135
5.2	电源干扰的抑制	136
5.2.1	旁路与去耦	136
5.2.2	小型电源母线	146
5.2.3	电源线的布线	148
5.3	PCB设计中消除电源噪声的方法	150
5.3.1	电源分配方式及阻抗	150
5.3.2	线路噪声的滤除	151
<b>第6章</b>	<b>接地的干扰与抑制</b>	<b>154</b>
6.1	地线中的干扰	154
6.1.1	地线阻抗干扰	154
6.1.2	地环路干扰	158
6.2	地线干扰的抑制	159
6.2.1	电路设计	159
6.2.2	印制电路板接地设计	165
6.3	实际电子系统与设备的接地设计	182
6.3.1	印制电路板地线设计原则	182
6.3.2	实际印制电路板接地设计实现	186
<b>第7章</b>	<b>布局与布线</b>	<b>197</b>
7.1	PCB电磁兼容设计中的布局	197
7.2	电磁兼容设计中的布线	204
7.3	射频电路印制电路板的布局与布线	214
7.4	混合信号PCB的电磁兼容设计中的布局与布线	216
<b>参考文献</b>		<b>218</b>

# 第 1 章 电磁兼容技术概述

电磁干扰在电子系统与设备中无处不在,因此,如何使电子系统与设备满足电磁兼容的要求是一关键技术。本章从电磁兼容发展的历史出发,对电子系统与设备的电磁兼容技术进行了概述,以作为印制电路板电磁兼容设计的基础。

## 1.1 电磁兼容的发展

电磁兼容(EMC:Electromagnetic Compatibility)是一门新兴的综合性学科,主要研究电磁干扰和抗干扰的问题,即研究在同一电磁环境下工作的各种电气电子系统、分系统、设备和元器件如何正常工作、互不干扰,进而达到兼容的状态。

电磁干扰(Electromagnetic Disturbance)几乎和电磁效应同时被发现,而电磁干扰对系统及设备的危害极大。电磁干扰的危害主要体现在:使电子元器件降级,甚至失效而造成电子系统或设备工作性能的降低甚至破坏;可能引起易燃易爆物品的起火和爆炸,造成武器装备的失灵等;可对人体组织器官造成伤害,危及人类的身体健康。

因此,人们致力于如何抑制电磁干扰的影响。早期的电磁兼容设计曾采用“问题解决法”,它的实质是:在设计完成后,如果发现 EMC 问题再对该电磁干扰采取相应的措施,即就事论事的排除干扰的经验方法。在电子系统或设备设计研制过程中不作电磁兼容性设计,这种方法既耗时又加大了产品的成本。

随着电磁兼容性标准和规范的完善与发展,电磁兼容性设计出现了比较合理的“规范法”。“规范法”以贯彻相应的国、军标(或相应的国际标准)为基础,建立必备的实验条件,通过测试验证,把电气、电子设备的相互干扰抑制在相应的国、军标范围内,这种方法简便易行。该方法以系统和设备所遵循的标准规定的极限值为计算基础。由于各种标准和规范中的极限值是以同类系统或设备中最严重情况制订的,因此可能导致具体设备设计的过分保守。由于电磁兼容性和规范在一定程度上反映了系统和设备中存在的共性问题以及解决问题的规则,因此,该方法对系统电磁兼容性设计提供了预见性和综合性,故它比“问题解决法”更为合理和进步。

随着大规模集成电路的迅猛发展和推广,产品从部件到系统的集成密度越来越高,直接用测试方法确定大量存在的 EMC 问题的可能性就越越来越小。因此,相应地产生了“系统法”。“系统法”是从电子设备(部件)、分系统、系统的研制开始就和 EMC 要求结合起来的方法。对于被研制的电子系统与设备,从一开始就要确定它的电磁兼容性要求,这是进行正确设计的起点,应明确一些重要的原则、要求和要达到的目标,即必须确定在这一阶段所采用的基本技术和应用指南。对于电子设备(部件)的电磁兼容性应给予描述,对可能的电磁发射(EMI)和电磁敏感度(EMS)都需要说明。对于一个电磁兼容性描述可能

包括一组与电磁兼容性有关的数据并用表格给出。在这一阶段,对于从手册中已选择的一些部件,它的电磁兼容性技术指标也是至关重要的。电磁兼容性设计准则必须在器件的位置安排和布线、走线时予以遵循。这些准则被概括为一些规定,通常它们代表一些基本经验的总结。应把这些准则结合到设计过程中去。电磁兼容性评定是指要考核研制设备与原确定的电磁兼容性指标的符合性。通常必须将用计算机仿真所作的评定与实际测试所作的评定区分开来。实际测试需要有一个分系统或系统的原型样机,还必须有良好的实验室和设备,总之,将测试评定法的风险降至最低程度。测试评定的范围要限于法定文件,如标准和规范所要求的程度。另一方面,考虑到节约经费和时间,特别强调采用计算机仿真,对于电容兼容性作反复优化设计后再进行评定。但是要注意计算机仿真应在设计完成之后和完成样机之前进行。对于一些因寄生效应产生的电磁兼容性问题,计算机还难于辨别和评定。最后,从电磁兼容性评定的要求出发,需要进行:电磁兼容性分析,通过建模、仿真、电磁兼容性规范的检查,避免可能出现的电磁兼容性问题;电磁兼容性诊断,评估反演电磁兼容性分析的结果;电磁兼容性优化,将上述几个步骤的结果与系统测试相结合,反复优化以达到电子系统所要求的电磁兼容性目标。

综上所述,按电磁兼容性设计的发展过程,由“问题解决法”到“规范法”,再到“系统法”,设计逐步得到完善和提高,技术手段越来越先进,理论体系越来越成熟和严密,至今电磁兼容学科还在发展,系统法本身还在不断发展和完善。为了从理论与技术上解决电磁干扰对系统及设备的影响,出现了所谓的电磁兼容概念。

电磁兼容性概念最早是在 20 世纪 40 年代提出的,所谓电磁兼容性是指电子系统或设备在其电磁环境中能正常工作,并且不对其中任何事物构成不能承受的电磁干扰。电磁兼容具有两方面的含义:一方面是指电子系统或设备产生的电磁干扰,不应对其周围的电子系统或者设备造成不能承受的影响,也不应对周围环境造成不能承受的“污染”;另一方面是指电子系统或设备对来自周围环境中的电磁干扰,应具有足够的防御能力。电磁兼容是电子系统与设备工程的重要指标,也是产品质量可靠性的重要指标。目前,电子系统与设备的灵敏度越来越高,并且接收微弱信号的能力越来越强,同时电子产品频带也越来越宽,尺寸越来越小,要求电子系统与设备抗干扰能力越来越强。

电磁兼容技术从分析电磁干扰产生的原因及性质入手,研究干扰传输及耦合的机理,系统地提出了抑制干扰的技术措施,制定了电磁兼容的一系列标准和规范,建立了电磁兼容试验和测量体系,解决了电磁兼容设计、分析和预测的一系列理论和技术问题,并随着在认识电磁干扰、研究电磁干扰和控制电磁干扰的过程中发展而发展,最终形成了电磁兼容学科。20 世纪 70 年代以来,电磁兼容技术逐渐成为非常活跃的学科领域之一。

电磁兼容已发展成一门独立的新兴综合性学科。它的定义、理论和电磁兼容性标准,已成为一个国家、一个地区、乃至世界范围内解决系统(或设备)相互兼容问题的基础。

电磁兼容工程是一项系统工程,系统的电磁兼容性必须在工程设计前进行全面规划,同时对每个用电设备按照国家制订的电磁兼容标准规范来限制它的电磁发射,降低它的

敏感度,使它具备电磁兼容的能力。

## 1.2 电磁兼容的主要研究内容

电磁兼容学科包含的内容十分广泛,电磁兼容现在不仅仅限于电气、电子设备,几乎所有的现代工业,如航天、军工、电力、通信、交通、计算机、医疗卫生部门,都必须解决电磁兼容问题。

电磁兼容的主要研究内容包括:电磁兼容设计、电磁兼容测试、电磁兼容标准以及电磁兼容预测。具体而言,其主要研究内容为:

① 电磁干扰特性及传播耦合理论 只有先弄清楚电磁干扰的特性和传播耦合方式才能更好地实现电磁干扰的抑制,进而实现电磁兼容设计。

② 电磁耦合的工程分析 由于电子系统和设备日益复杂,电磁干扰的传播和耦合常常由多种基本耦合特性组合而成,即为综合性的典型耦合模式。在实际工程分析中,常用典型的耦合干扰模式作为一种固定的工程模式直接用于分析更复杂的现象。因此,在电磁兼容研究中首先要分析和研究典型耦合模式。

③ 电磁兼容控制技术 电磁兼容控制技术,如屏蔽、滤波、合理接地和合理布局等,抑制干扰的措施在工程实践中经常很有效,但是这些方式必须与质量要求、成本等之间进行权衡,选择出合适的控制技术以满足电磁兼容的要求。

④ 电磁兼容设计理论及方法 对于任何一项工程设计,都必须考虑其费效比,这也是电磁兼容设计得以发展的一个重要原因。一般而言,在产品设计的初始阶段就应该考虑电磁兼容性,以解决电磁干扰问题,这样控制干扰的措施最容易实现。另一方面,电磁兼容设计又必须与系统工程设计紧密结合,电磁兼容设计应该成为系统工程的一个重要组成部分。

⑤ 电磁兼容性试验与测量技术 随着电子系统与设备复杂程度的提高,对电磁兼容性的测量与试验技术的要求也越来越多,越来越复杂,因此,必须进行电磁兼容测量与试验技术的研究。

⑥ 电磁兼容预测和分析 电磁兼容预测和分析在电磁兼容设计中至关重要,是进行合理的电磁兼容性设计的基础。在进行系统设计时应应对系统的电磁兼容性进行分析与预测,以便设计能满足电磁兼容的要求。现在电磁兼容预测和分析的基本上通过对各种电磁干扰特性、传输函数和敏感度等相关特性进行建模,然后采用 EDA 仿真技术对电磁干扰进行计算与分析,从而对电磁兼容进行预测,实现电子系统与设备的电磁兼容设计。因此,电磁兼容的预测与分析的关键就在于相对应的数学模型的建立和计算机分析程序的编制。

另外,电磁兼容性标准、规范及工程管理等也是电磁兼容设计的一个重要方面,这有利于更加有效地进行电磁兼容设计。目前国际上有权威性的电磁兼容标准有 CISPR 标准、IEC 标准、欧共体的 EN 标准、德国的 VDE 标准、美国的 PCC 标准和军用标准 MIL-SID。当然,电磁频谱利用与管理、电磁泄漏及防护技术、电磁脉冲及防护也是电磁兼容设计的研究内容。

## 1.3 电磁干扰系统及种类

### 1.3.1 电磁干扰系统

#### 1) 电磁干扰三要素

产生电磁干扰必须具备三要素:干扰源、传输途径以及敏感体,这三要素缺一不可,必须同时考虑。

##### (1) 电磁干扰源

电磁干扰源是指任何可能引起电子系统或设备性能降低,或对有生命或无生命物质产生损害作用的电磁噪声源(包括电磁噪声、无用信号或传播媒介自身的变化等)。干扰源可分为自然干扰源和人为干扰源两大类。

##### (2) 传输途径

干扰的传输途径可分为两种:一种是通过空间辐射的辐射发射,另一种是通过导线传导的传导发射。

① 辐射发射主要是指在远场下干扰以电磁波的形式发射,以及在近场条件下的电磁耦合,并且包括共模电流辐射。

② 传导发射是指传输线的分布参数和电流的传输方式对噪声传输的影响,例如,共阻抗耦合、共模-差模电流转换等。

##### (3) 敏感体

敏感体是指那些易受到电磁干扰的电子仪器设备。电磁兼容主要研究电磁干扰如何降低设备的性能或产生不希望有的响应,进而研究如何降低敏感设备对干扰的敏感性,提高其抗干扰能力。

#### 2) 电磁干扰系统构成

电磁干扰源是电子系统与设备发生电磁干扰的三要素之首要因素。没有电磁干扰源就不会存在所谓的 EMI,但即使存在干扰源也不一定就会产生电磁干扰,实际上存在着发生干扰和兼容的两种可能。由于大部分干扰源的发射都是无意的,通常伴随着用电设备实现某种电能转换功能而产生,因此,企图完全消除干扰源的存在是极困难的,甚至是不可能的,但在实际设计过程中必须把电磁干扰源所产生的干扰限制在不影响其他电子设备正常工作的范围内。

电磁干扰和电磁兼容就是存在干扰源的两种结果,干扰和兼容两者可以相互转化,转化的条件就是改变“三要素”的变量关系。为了达到系统电磁兼容的目的,需要尽量削弱干扰源,抑制干扰传输途径,降低每个设备的敏感度。

从以上电磁兼容学科的主要研究内容的分析可以看出它们是围绕构成干扰的三要素进行的,干扰源、传输途径和敏感体,切断以上任何一项都可解决电磁兼容问题。图 1.1 表示了一个干扰系统的组成。

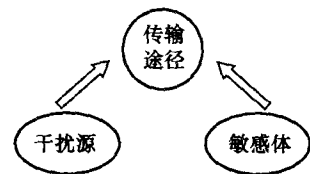


图 1.1 电磁干扰系统

### 1.3.2 电磁干扰的种类

电磁干扰的分类方法有很多,可以根据干扰的来源、发生机理、传输方式、频率范围、时域特性等划分。下面分别进行介绍。

#### (1) 根据电磁干扰的来源划分

从电磁干扰的来源来划分,可以分为自然干扰源和人为干扰源两类。

① 自然干扰源是指由于自然界的电磁现象所产生的电磁噪声,主要来源于大气层的天电噪声、地球外层空间的宇宙噪声,如:大气噪声、太阳噪声、宇宙噪声、静电放电(ESD)等。

② 人为干扰是一种无意识的干扰,指电子系统与设备或其他人工装置产生的电磁干扰,主要包括功能性的无用信号和非功能性的电磁噪声,如:发射机、架空输电线、高压设备、射频设备、静电、电动工具、家用电器及照明器具等。因此,人为干扰的种类很多,所产生的电磁干扰对环境的影响越来越大。人为干扰源现在已成为电磁环境干扰的一个最主要的来源之一。

#### (2) 根据电磁干扰的发生机理划分

根据电磁干扰的发生机理可把电磁干扰划分为放电噪声、接触噪声、非功能性噪声、无用信号、反射、过渡现象等。

① 放电噪声是一种最常见的电磁干扰现象,由于在放电时常常伴随着急剧的电流、电压的瞬时变化,从而产生很大的电磁噪声。

② 接触噪声是指由于触点之间的接触电阻发生变化而产生的噪声。

③ 非功能性噪声是指电子设备在正常工作时存在的一些与完成特定功能无关的信号而产生的噪声。

④ 无用信号,这是一个相对的概念,是指一个电子系统中完成特定功能的信号,对于另一个电子系统中的敏感设备而言可能就是干扰信号,因此对于这些敏感设备而言,这些特定功能的信号就称为无用信号。因此,无用信号是一些功能性信号。

⑤ 反射指电磁波在空间传播时遇到障碍物而被反射回源端并与原信号叠加,从而产生对原信号干扰的现象。

⑥ 过渡现象是产生噪声的根本原因,也是普遍发生的现象。主要指电子设备及系统在正常工作时,电流、电压的瞬态变化而产生的噪声现象。

#### (3) 根据电磁干扰属性划分

根据电磁干扰的属性进行划分,电磁干扰的种类可以分为功能性干扰源和非功能性干扰源两大类。

① 功能性干扰源是指电子系统与设备在实现所需功能的过程中造成对其他电子系统与设备的直接干扰。

② 非功能性干扰源是指电子系统与设备在实现自身功能的同时伴随产生的或附加产生的一种副作用。

#### (4) 根据电磁干扰信号频谱宽度划分

按电磁干扰信号的频谱宽度进行划分,电磁干扰可以分为宽带干扰源和窄带干扰源两大类。这种分类方法是相对于指定感受器的带宽大小来定义的,干扰信号的带宽大于

指定感受器带宽的干扰源称为宽带干扰源,而如果干扰信号的带宽小于指定感受器的带宽的干扰源就称为窄带干扰源。

#### (5) 根据干扰信号的频率范围划分

按干扰信号的频率范围来划分电磁干扰源,可以分为工频干扰源与音频干扰源(50Hz及其谐波)、甚低频干扰源(30Hz以下)、载频干扰源(10kHz~300kHz)、射频及视频干扰源(300kHz~300MHz)以及微波干扰源(300MHz~100GHz)等。

### 1.3.3 电磁干扰的传播途径

电磁干扰的传输主要有三种方式:导线传输、传导传输和辐射传输。因此,干扰的耦合可分为传导耦合和辐射耦合两类。

#### 1) 导线传输

电磁干扰通过导线传输主要是导线的传输线特性,传输线本身具有电阻、电感、电容,特别是在较高频率下这些分布参数对信号的影响十分明显。

##### (1) 传输线的电阻

导线的电阻可分为直流电阻与高频交流电阻两类。

① 导线的直流电阻可表示为  $R_{DC} = 1/\sigma\pi r^2$ ,其中  $\sigma$  为金属的电导率,而  $r$  为导线的直径。

② 导线的高频交流电阻必须考虑导线的高频趋肤效应,此时其阻值可表示为  $R_{AC} = 1/2\pi r\delta$ ,其中  $\delta = 1/\sqrt{\pi f\mu\sigma}$ ,称为金属集肤深度,而  $\mu$  为磁导率, $f$  为工作频率。所以高频交流电阻为:

$$R_{AC} = \frac{1}{2r} \sqrt{\frac{\mu f}{\pi\sigma}} \quad (1.1)$$

由上式可以看出:导线的高频交流电阻与导线的截面积形状有关,即改变截面积形状就可以改变导线的交流电阻。

##### (2) 传输线的电感

导线在流过电流时,在导线中及其周围都必定存在着磁场,所以导线具有电感特性,而此时导线电感可分为内电感与外电感两类。

##### ① 内电感可表示为:

$$L_i = \frac{1}{4\pi r} \sqrt{\frac{\mu}{\mu\sigma f}} \quad (1.2)$$

##### ② 外电感(平行双线环路电感)可表示为:

$$L_e = \frac{\mu}{\pi} \ln\left(\frac{s}{r}\right) \quad (1.3)$$

在式(1.2)与式(1.3)中  $\sigma$  为金属的电导率, $r$  为导线半径, $\mu$  为磁导率, $f$  为工作频率, $s$  为平行双线间距,而且两式中电感的单位都为 H/m。注意使用该式的条件是  $s \geq 5r$ 。

平行双线的总电感为内电感与外电感之和。但是由式(1.2)与式(1.3)可以看出:内电感远小于外电感,并且频率  $f$  越高,内电感越小。所以内电感在一般情况下可以忽略,即考虑导线的电感时可只考虑外电感。外电感随导线间的间隔增大而增大,但由于是对

数关系,所以电感值在增大到一定程度后基本保持不变。

**注意:**导线电感(外电感)总是由于环路的存在而存在,单根导线的电感可以理解为该导线与其他导线相距较远时的外电感。

### (3) 传输线的电容

平行导线之间的电容可表示为:

$$C = \frac{\pi\epsilon}{\ln(s/r)} \quad (1.4)$$

上式电容的单位为 F/m,而  $\epsilon$  为电线之间的介电常数, $s$  为平行导线的间距, $r$  为导线的半径。从式(1.4)可以看出导线的间隔越远,电容越小;而导线的线径越粗,电容越大。

结合式(1.3)与式(1.4)进行联立求解,可以得到

$$LC = \epsilon\mu \quad (1.5)$$

式(1.5)表明导线周围介质均匀不变时,即  $\mu$ 、 $\epsilon$  不变,则  $LC$  为常数。这个结果表明传输线的电容增大则其电感必然减小,这是一个非常有用的结论。

### (4) 传输线的特性阻抗

由以上的分析可知,传输线上均匀分布着电阻、电感及电容,统称为分布参数,可以用特性阻抗( $Z_0 = \sqrt{L/C}$ )来表示。特性阻抗是表征传输线特性的一个物理量,只与传输线的结构与传输线周围的介质有关,而与其上的电感与电流无关。

但要注意特性阻抗并不是传输线的真正的阻抗,并且特性阻抗与传输线的长度无关,描述的是传输线的分布参数特性。

传输线的分布电阻、电容、电感必然会影响到传输线中的信号传输,根据传输线理论,传输线的长短对传输线的分布参数的影响也相当密切。

① 当  $l \leq \lambda/20$  (或  $t_d \leq t_r/4$ ) 时,称为短传输线,其中  $\lambda$  为传输线中信号的波长, $t_d$  为传输线中数字脉冲信号的传输延迟时间, $t_r$  为传输线中数字脉冲信号的上升时间。对于短传输线可以用集中参数等效电路来表示,即传输线上总的分布参数值等于单位长度各值乘以传输线的长度。在低频时其电阻起主要作用,而频率较高时其电感起主要作用。

② 当  $l > \lambda/20$  (或  $t_d > t_r/4$ ) 时,称为长传输线,此时导线必须用传输线理论来分析,必须考虑阻抗匹配,否则会出现反射现象。

## 2) 传导耦合

### (1) 传导耦合的基本原理

传导传输在干扰源和敏感设备之间必须有完整的电路连接,干扰信号沿着这个连接电路传递到敏感设备,发生干扰现象。传输电路包括导线、设备的导电构件、供电电源、公共阻抗、接地平面、电阻、电感、电容和互感元件等。

根据耦合的原理,传导耦合主要有三种基本的耦合性质:电阻性耦合、电感性耦合和电容性耦合。在实际工程中,它们往往是同时存在、互相联系的。

① 电阻性耦合是一种最简单的传导耦合方式。电磁干扰通过诸如两个电路的连接导线、电源和负载之间的电源线及设备和设备之间的信号连线等进行传导。这些连接线除了正常传递控制信号和供电电流之外,还通过导线传送干扰信号。

电阻性传导耦合的典型电路如图 1.2 所示,干扰源通过导线的电阻  $R_1$  与  $R_2$  直接耦合到敏感接收器或敏感元器件上。

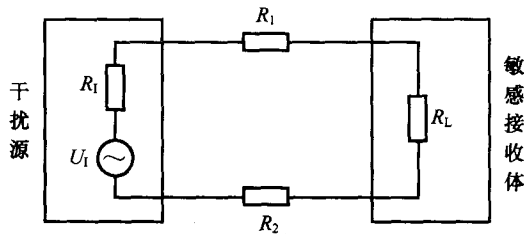


图 1.2 电阻性传导耦合等效电路

图中  $U_1$  为干扰电压,  $R_1$  为干扰源内阻,  $R_1$ 、 $R_2$  分别为两导线的电阻, 则根据 KCL 定理可求出敏感接收体上的电压为:

$$U = \frac{R_L}{R_1 + R_1 + R_2 + R_L} U_1 = \frac{1}{1 + (R_1 + R_1 + R_2)/R_L} U_1 \quad (1.6)$$

由式(1.6)可以发现:对于电阻性传导耦合,干扰源的干扰电压越大或敏感接收体的内阻越大,则敏感接收体越容易受干扰。

而对于  $R_1$ 、 $R_2$ , 由于在不同的信号频率会表现出不同的阻抗特性, 因此, 必须对此进行分别讨论。

■ 在低频情况时, 可以认为导线只表现出纯电阻特性, 并可用欧姆定律求得:  $R = \frac{\rho l}{S}$  ( $\Omega$ ), 其中  $l$  为导线长度(m),  $S$  为导线截面积( $\text{m}^2$ ),  $\rho$  为导线电阻率( $\Omega\text{m}$ )。所以, 对于铜的圆直导线有  $R_{\text{DC}} = \frac{22}{d^2} l \times 10^{-6}$  ( $\Omega$ ), 式中  $d$  为导线的直径(mm),  $l$  为导线的长度(mm)。

■ 在高频情况时, 由于趋肤效应使电流集中于导线表面, 因此导线的有效截面积变小, 并可表示为:  $S_{\text{AC}} = \pi d \delta$ , 其中  $\delta$  为集肤深度, 并且  $\delta = \frac{66}{\sqrt{\mu_r \sigma_{\text{Cu}} f}}$ , 其中  $\mu_r$ ,  $\sigma_{\text{Cu}}$  分别为铜的相对磁导率和相对于铜的电导率, 因此, 在高频时必须考虑导线的电感特性。

② 电感性耦合 根据电磁场理论可知: 如果一个回路中的电流发生改变, 则在该回路周围的空间必然会产生变化的磁场, 而这个变化的磁场又会在相邻回路中产生感应电压, 因此, 对于电磁干扰而言, 也必然存在这样一种方式把一个干扰电压耦合到敏感接收电路中, 这就是所谓的电感性耦合, 也可称为磁场耦合。

典型的电感性耦合的简化等效模型如图 1.3(a)所示, 而图 1.3(b)即为其等效电路。

图中 A、B 分别代表电子系统设备中两个相邻的回路, 并且定义 A 回路为干扰源, 而 B 回路则为敏感接收电路,  $R_A$  为 A 回路的电阻,  $R_B$  为 B 回路的电阻,  $M$  表示两根导线之间的互感, 则根据电磁感应原理可以求得接收电路 B 中的感应电压为:

$$U_M = M \frac{dI_A}{dt} \quad (1.7)$$

如果  $I_A$  为正弦交流电流, 则式(1.7)可以简化成:  $U_M = j\omega M I_A$ , 式中  $\omega$  为干扰电流的角频率。由式(1.7)可以看出:

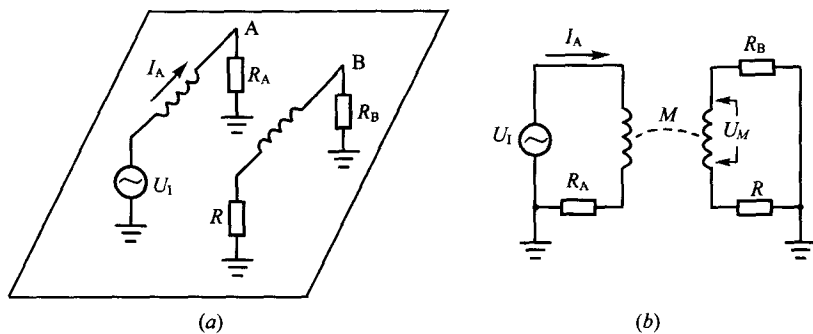


图 1.3 电感耦合模型及其等效电路

(a) 等效模型; (b) 等效电路。

■ 如果干扰源回路的干扰电流频率越高,或干扰电压越大,或干扰回路的阻抗  $R_A$  越小,则在敏感接收回路所产生的电感耦合干扰电压越大;

■ 在相同条件下,如果两回路之间的距离越短,则其互感耦合系数  $M$  越大,干扰回路电流  $I_A$  对敏感接收回路所产生的电感耦合干扰电压也越大。

因此,在设计高频或高速印制电路板(PCB)时,应注意干扰源与敏感接受体回路之间的空间间距不能太小,必须进行合理的布局与布线,以尽量避免相互之间的干扰。

③ 电容性耦合 由电磁场理论可知:如果一个电子系统或设备中的两个导体相距较近,并且相互之间存在电位差时,则两个导体上的电流所产生的电场会相互耦合、相互影响,致使它们的电场都发生变化。

两个导体之间电场耦合的大小取决于导体的开关频率、尺寸大小、相互位置和周围介质的性质,而这些因素可以通过两导体之间的分布电容  $C$  的大小得到体现。由电场理论的分析可求得两导体的电位  $\varphi_1$  和  $\varphi_2$ ,以及导体的电量  $Q$ ,并根据公式  $C = Q/U$ ,可以计算出各种结构的导体之间的分布电容。

电容性耦合的典型方式如图 1.4(a)所示,而图 1.4(b)则是其等效电路。

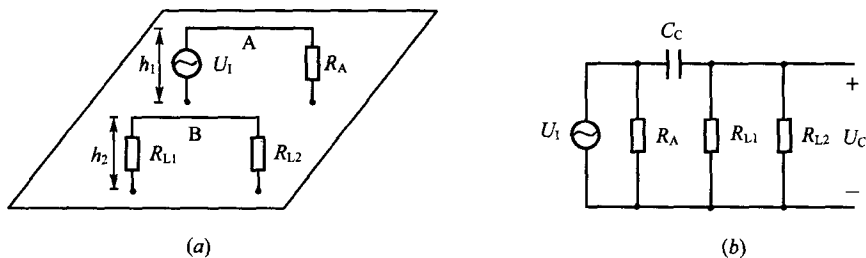


图 1.4 电容耦合分析

(a) 模型; (b) 等效电路。

图 1.4 中假设导体 A 为干扰源,  $U_1$  为干扰电压,  $R_A$  为干扰源内阻,而导体 B 为敏感接收电路,  $C_C$  表示两导体之间的分布电容。

由图 1.4(b)所示的等效电路,根据基尔霍夫定理,可以计算出通过电容  $C_C$  传导耦合到敏感接收电路的电压  $U_C$ :

$$U_C = \frac{R_{L1} \parallel R_{L2}}{R_{L1} \parallel R_{L2} + X_C} U_1 \quad (1.8)$$

上式中  $X_C = \frac{1}{j\omega C_C} = -j \frac{1}{2\pi f C_C}$ , 将其代入式(1.8)可得到:

$$U_C = \frac{j2\pi f C_C (R_{L1} \parallel R_{L2})}{1 + j2\pi f C_C (R_{L1} \parallel R_{L2})} U_1 \quad (1.9)$$

在实际电路中,一般导体之间的耦合电容  $C_C$  都很小,所以可以认为  $2\pi f C_C (R_{L1} \parallel R_{L2}) \ll 1$ , 此时式(1.9)可以化简成:

$$U_C = j2\pi f C_C (R_{L1} \parallel R_{L2}) U_1 \quad (1.10)$$

由式(1.10)可以知道:干扰源 A 在敏感接收导体 B 上产生的电容耦合干扰电压  $U_C$  正比于干扰信号的频率  $f$ 、耦合电容  $C_C$  以及并联阻抗  $(R_{L1} \parallel R_{L2})$ , 所以,如果干扰源频率  $f$  越高、耦合电容越大以及敏感接收电路的并联阻抗越大时,在敏感接收电路上由电容耦合产生的干扰电压则越大。

因此,在进行高频或高速电路的印制电路板设计时,为了减小干扰源通过电容耦合方式对敏感接收电路的干扰,就必须进行有目的的布局,以减小导体之间的分布电容与敏感接收电路的并联阻抗。

## (2) 典型传导耦合

在实际电子系统设备中,经常存在公共电源阻抗耦合与公共地阻抗耦合两种典型的传导耦合模式。

① 公共电源耦合 在电子系统设备中,经常存在多个负载由某单个电源驱动的情况,因而会造成公共电源传导耦合干扰。

如图 1.5(a)所示的是一个电源给多个电子电路供电的等效模型,而图 1.5(b)则为其相应的等效电路。为了简单起见,只考虑一个电源给两个单元电路供电的情况,即如图 1.5 中的单元电路 A 与单元电路 B。

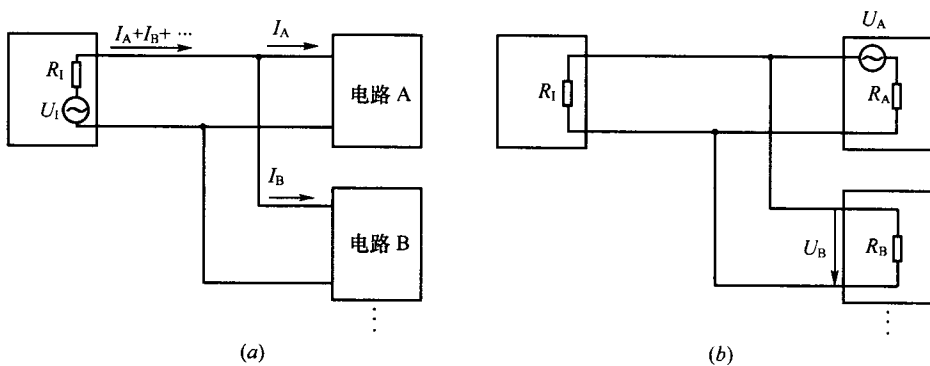


图 1.5 公共电源耦合

(a) 等效模型; (b) 等效电路。

假设单元电路 A 中发生一个突变,就会使该支路电流  $I_A$  产生一个变化的电流  $\Delta I$ , 该电流即为干扰电流,由于电源存在内阻  $R_1$ ,因而该干扰电流会在电阻  $R_1$  上产生一个干扰电压增量  $\Delta I R_1$ ,引起电源两端的电压发生变化,该变化电压就会传递到电路 B 中,从而