

SHEPIN DIANLU SHEJI YU YINGYONG

# 射频电路 设计与应用

主编 傅世强 李婵娟  
主审 房少军

大连海事大学出版社

# 射频电路设计与应用

主编 傅世强 李婵娟

主审 房少军

大连海事大学出版社

©傅世强 李婵娟 2018

图书在版编目 (CIP) 数据

射频电路设计与应用/傅世强, 李婵娟主编. — 大连 : 大连海事大学出版社, 2018.1

ISBN 978-7-5632-3576-6

I. ①射… II. ①傅… ②李… III. ①射频电路—电路设计 IV. ①TN710.02

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 022415 号

大连海事大学出版社出版

地址: 大连市凌海路 1 号 邮编: 116026 电话: 0411-84728394 传真: 0411-84727996

<http://www.dmupress.com>

E-mail: cbs@dmupress.com

大连住友彩色印刷有限公司印装

大连海事大学出版社发行

2018 年 1 月第 1 版

2018 年 1 月第 1 次印刷

幅面尺寸: 185 mm×260 mm

印张: 9.25

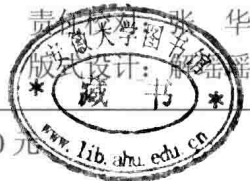
字数: 227 千

印数: 1~1000 册

出版人: 徐华东

责任编辑: 沈荣欣

封面设计: 张爱妮



ISBN 978-7-5632-3576-6

定价: 25.00 元

## 内容简介

本书全面地介绍了无线系统射频前端关键电路的基本原理、设计方法和实际应用。主要内容包括射频电路设计概述、传输线理论和微波网络基础、阻抗匹配电路和衰减器设计、功率分配器和定向耦合器设计、射频滤波器设计、射频放大器设计、射频振荡器和混频器设计、微带天线设计、射频收发实验系统。

本书可作为大学相关专业高年级学生的教材，同时也可作为工程技术人员学习和设计射频电路的实用参考书。

# 前 言

随着无线通信技术的飞速发展,射频技术逐渐成为人们关注的焦点,培养具有射频理论知识和专业技能的人才也成为学校和社会共同的迫切需要。作为微波技术课程的后续课程,射频电路设计重点在于培养学生的综合实践能力,使学生了解基本的射频电路设计思想,具备设计简单射频电路的能力,培养一定的工程素养。

本书侧重于设计实践,通过对无线收发系统和射频前端电路的分析,使学生对射频电路与系统有一个较为全面的认识,掌握主要射频电路模块的设计方法和实际应用。本书省略了冗长的理论细节与数学推导,简明扼要地给出了主要射频电路的基本原理、技术参数和设计思路。如果涉及微波射频电路理论中的严格推导,可以参考相关专业书籍。本书给出了大量的电路设计实例,可供学生深入了解射频电路和无线系统的设计开发过程。

本书的安排如下:第1章为射频电路设计概述;第2章为传输线理论和微波网络基础;第3章为阻抗匹配电路和衰减器设计;第4章为功率分配器和定向耦合器设计;第5章为射频滤波器设计;第6章为射频放大器设计;第7章为射频振荡器和混频器设计;第8章为微带天线设计;第9章为射频收发实验系统。

本书的完成得到了大连海事大学的支持,得到了房少军教授和栾秀珍教授的关心和帮助,我们的研究生阚世宇、方媛、张洪彪、张佳琦为此书做了大量的工作。在此谨向他们表示衷心的感谢。本书参考了国内外许多专家的书籍资料,在此向他们表示诚挚的谢意。

由于编者水平有限,时间仓促,书中难免有错误之处,恳请读者给予批评指正。

# 目 录

第1章 射频电路设计概述 .....	1
1.1 射频电路设计的主要内容 .....	1
1.2 射频电路设计的核心问题 .....	2
1.2.1 频率 .....	3
1.2.2 功率 .....	3
1.2.3 阻抗 .....	3
1.3 射频电路设计的特殊效应 .....	4
1.3.1 趋肤效应 .....	4
1.3.2 分布参数效应 .....	4
1.3.3 寄生参数效应 .....	5
1.3.4 电磁辐射和互耦效应 .....	6
1.4 射频微波平面电路基础 .....	7
1.4.1 射频微波电路分类 .....	7
1.4.2 微带电路基础 .....	8
1.5 射频微波工程基础常识 .....	11
1.5.1 与分贝有关的概念 .....	11
1.5.2 射频微波接插件 .....	12
1.5.3 射频微波常用测试仪器 .....	13
1.5.4 射频微波常用设计软件 .....	13
第2章 传输线理论和微波网络基础 .....	15
2.1 传输线的基本理论 .....	15
2.1.1 传输线的特征参量 .....	15
2.1.2 传输线的状态参量 .....	17
2.2 史密斯 (Smith) 圆图 .....	19
2.2.1 阻抗圆图 .....	19
2.2.2 导纳圆图 .....	21
2.2.3 等 $Q$ 圆图 .....	22
2.2.4 圆图的应用 .....	23
2.3 微波网络 $S$ 参数 .....	24
2.3.1 归一化电压电流波 .....	24
2.3.2 $S$ 参数定义 .....	25
2.3.3 网络参数的转换 .....	26

第3章 阻抗匹配电路和衰减器设计 .....	29
3.1 基本阻抗匹配理论 .....	29
3.1.1 阻抗匹配的目的 .....	29
3.1.2 复数阻抗匹配 .....	29
3.2 集总参数匹配电路 .....	31
3.2.1 L型匹配电路 .....	31
3.2.2 T型和 $\pi$ 型匹配电路 .....	36
3.2.3 低 $Q$ 宽带匹配电路 .....	39
3.3 微带线型匹配电路 .....	39
3.3.1 串联型微带匹配电路 .....	40
3.3.2 并联型微带匹配电路 .....	40
3.3.3 混合式匹配电路 .....	41
3.4 衰减器设计 .....	42
3.4.1 衰减器的技术指标 .....	42
3.4.2 电阻衰减器的设计 .....	42
3.4.3 衰减器的匹配特性 .....	44
第4章 功率分配器和定向耦合器设计 .....	46
4.1 功率分配器和耦合器原理 .....	46
4.1.1 功分器原理 .....	46
4.1.2 耦合器原理 .....	47
4.2 集总参数功分耦合器设计 .....	49
4.2.1 电阻式等功率分配器 .....	49
4.2.2 L-C式功分耦合器 .....	50
4.3 分布参数功分器设计 .....	52
4.3.1 T型结微带功分器 .....	52
4.3.2 Wilkinson微带功分器 .....	53
4.4 分布参数耦合器设计 .....	55
4.4.1 平行耦合线定向耦合器 .....	55
4.4.2 分支线定向耦合器 .....	57
4.4.3 混合环定向耦合器 .....	58
第5章 射频滤波器设计 .....	60
5.1 滤波器的基本原理 .....	60
5.1.1 滤波器原理及分类 .....	60
5.1.2 滤波器的技术指标 .....	60
5.1.3 滤波器的设计方法 .....	63

5.2	集总参数滤波器设计 .....	63
5.2.1	滤波器的低通原型及实现方法 .....	63
5.2.2	滤波器的频率变换和阻抗变换 .....	67
5.2.3	集总参数滤波器设计实例 .....	69
5.3	集总参数到分布参数的变换 .....	71
5.3.1	Richards 变换 .....	71
5.3.2	Kuroda 规则 .....	72
5.3.3	Kuroda 规则实现低通滤波器设计 .....	73
5.4	分布参数滤波器设计 .....	75
5.4.1	高低阻抗线低通滤波器 .....	75
5.4.2	平行耦合线带通滤波器 .....	77
第 6 章	射频放大器设计 .....	81
6.1	放大器的基本原理 .....	81
6.1.1	放大器原理及分类 .....	81
6.1.2	放大器的技术参数 .....	82
6.2	射频放大器的增益 .....	87
6.2.1	增益的分类及定义 .....	87
6.2.2	转换功率增益 .....	88
6.2.3	不同增益的关系 .....	90
6.3	射频放大器的稳定性 .....	91
6.3.1	稳定性判别 .....	92
6.3.2	放大器的稳定措施 .....	95
6.4	射频放大器的设计方法 .....	96
6.4.1	高增益放大器设计 .....	96
6.4.2	低噪声放大器设计 .....	99
6.4.3	高功率放大器设计 .....	102
第 7 章	射频振荡器和混频器设计 .....	104
7.1	振荡器的基本原理 .....	104
7.1.1	振荡器原理及分类 .....	104
7.1.2	振荡器的技术参数 .....	105
7.2	振荡器的设计 .....	107
7.3	混频器的基本原理 .....	111
7.3.1	混频器原理及分类 .....	111
7.3.2	混频器的技术参数 .....	112
7.4	单平衡混频器的设计 .....	112



第 8 章 微带天线设计.....	117
8.1 天线基础知识.....	117
8.1.1 天线的种类.....	117
8.1.2 天线的特性参数.....	117
8.2 微带天线设计.....	119
8.2.1 微带天线的形式及馈电.....	119
8.2.2 矩形微带天线的原理及设计.....	120
8.2.3 圆极化微带天线的原理及设计.....	123
8.3 天线的测量.....	126
8.3.1 天线电路参数的测量.....	126
8.3.2 天线辐射参数的测量.....	127
第 9 章 射频收发实验系统.....	130
9.1 射频收发机的基本知识.....	130
9.1.1 发射机的基本参数.....	130
9.1.2 接收机的基本参数.....	130
9.2 射频通信音视频传输实验系统.....	131
9.2.1 系统原理及构成.....	131
9.2.2 射频模块实验教学.....	132
9.3 调频连续波雷达测距实验系统.....	134
9.3.1 系统原理及构成.....	135
9.3.2 射频模块实验教学.....	136
参考文献.....	138

# 第 1 章 射频电路设计概述

## 1.1 射频电路设计的主要内容

许多初学者可能会对专业术语“高频电路”“射频电路”“微波电路”的概念和定义感到困惑，除微波电路能够在频率范围内（即频率涵盖 300 MHz~300 GHz）严格定义以外，高频电路和射频电路的工作频率范围是没有具体定义的，只能给出模糊的含义解释。高频电路是相对于频率小于 10 kHz 低频电路而言的较高频电路，射频电路泛指用于发射或接收无线电波的电路。通常认为三者在工作频率范围内有图 1.1 所示的对比关系。射频可以说包含了高频的高端和微波的低端。



图 1.1 高频电路、射频电路、微波电路工作频率之间的关系

当今社会，技术发展之迅猛，对人们生活影响之重大，首推无线电技术。射频微波工程就是这一领域的核心。图 1.2 是一个典型的无线通信系统收/发信机的基本组成框图，它由基带、中频和射频三大部分组成。

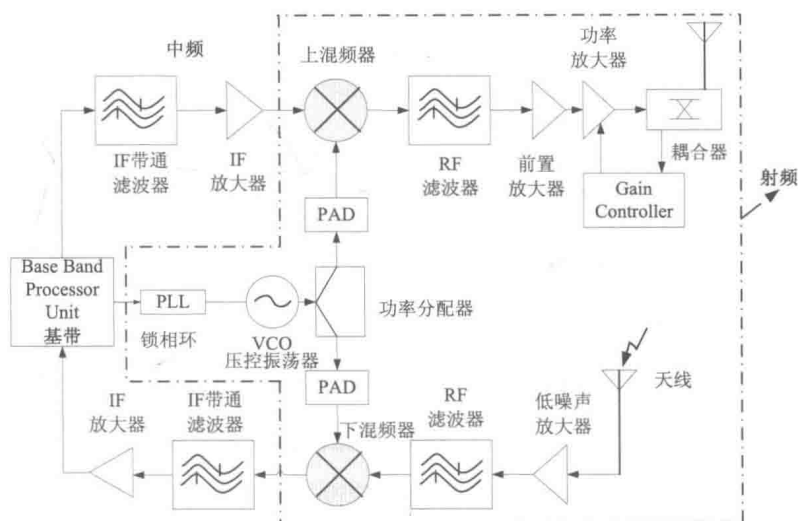


图 1.2 无线通信系统收/发信机电路的基本组成

基带的主要功能是编码和调制，即利用基带信息（语音、视频或数据等）去调制中频正弦波，输出信号被称为中频信号。中频信号经过中频滤波和放大之后，再通过混频器上变频到所需的射频发射频率。经混频器后的带通滤波器允许上混的载波信号通过，而抑制掉镜像频率。如果信号功率小，则可用功率放大器增加发射机的输出功率。最后，利用天线将已调制的载波信号从发射机变换到能够在自由空间传播的电磁波。接收信号的过程基本上是发射的逆过程。天线接收到来自远方的工作频率范围内的电磁波，低噪声放大器放大接收到的微弱信号，并使进入到信号中的噪声影响最小。在低噪声放大器之后的带通滤波器，其主要目的是滤掉不需要的接收信号并让所需频段的信号通过，从而提供一定的频率选择性。再利用混频器将接收到的射频信号下变频到较低的中频频率，并经过中频带通滤波器进行过滤。高增益中频放大器将提升信号的功率电平，以便于基带数据恢复。恢复基带信号的过程称为解调，通常利用数字信号处理电路来实现。

射频电路设计的主要内容包括：射频信号的产生、混频、功率放大、辐射、接收、低噪声放大、滤波、功分、耦合、移相、衰减、开关等各个单元模块的设计、生产和测试。由于在射频微波频率范围内，模块的几何尺寸与信号的工作波长是可比拟的，分布参数的概念始终贯穿于工程设计的各个方面，同一功能的模块，在不同的工作频率，其结构与具体实现方式也大不相同。“结构就是电路”是射频微波电路的显著特征，因此，射频微波电路的设计必须密切关注结构设计，其设计目标就是处理好材料、结构与电路功能之间的关系。

## 1.2 射频电路设计的核心问题

射频微波工程中所要解决的核心问题包括频率、功率和阻抗。这三大核心指标贯穿整个射频微波工程设计，俗称“射频铁三角”，如图 1.3 所示。图中，实线矩形框内是特别关心该参数的射频微波器件，虚线矩形框内是相应参数的常用测量仪器。

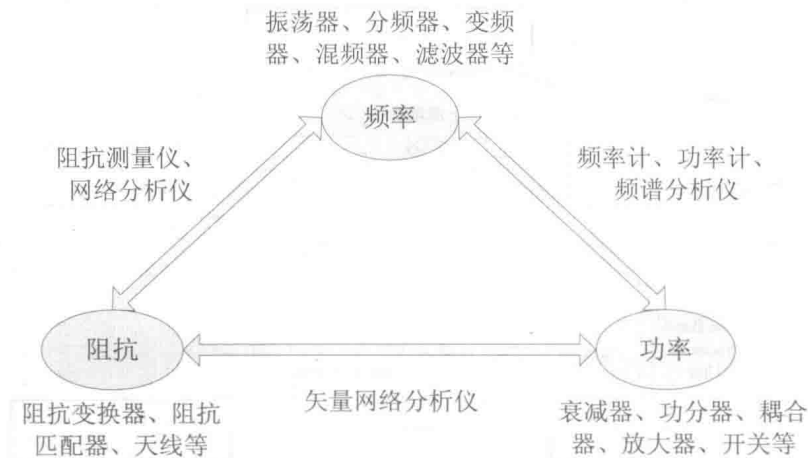


图 1.3 频率、功率和阻抗的铁三角关系

射频铁三角形象地反映了射频微波工程设计的基本内容，这三个指标既有独立性，又互相影响，只要处理好三者的关系，就能实现设计目标。下面对这三个指标进行说明。

## 1.2.1 频率

频率是射频微波工程设计所涉及的最基本的参数,对应于无线通信系统的工作频率范围,工作频率将直接决定电路的结构形式和所选用的元器件与材料。直接影响射频微波信号频率的电路有以下几种:

(1) 信号发生器。信号发生器用于产生特定频率的信号,如固定频率振荡器、机械调谐振荡器、压控振荡器、频率合成器等。

(2) 频率变换器。频率变换器将一个或两个频率的信号变为另一需要的频率信号,如分频器、变频器、倍频器、混频器等。

(3) 频率选择电路。在复杂的频谱环境中,选择所需的频谱范围,即完成选频功能。最典型的选频电路为滤波器,如低通滤波器、高通滤波器、带通滤波器和带阻滤波器等,也有的采用高速电子开关来完成选频功能。

在射频微波系统中,这些电路可以独立工作,也可相互结合,共同构成通信系统。对电路的频率特性可以采用频谱分析仪进行分析,也可采用频率计、功率计、网络分析仪等进行测量。

## 1.2.2 功率

功率是用来描述射频微波信号能量大小的。射频微波电路最终用来实现能量的传递,而在设计中需要尽量保证能量以最佳方式传递。影响射频微波信号功率的主要电路有以下几种:

(1) 衰减器。衰减器控制射频微波信号功率的大小,一般由有耗材料构成,包括固定衰减器和可调衰减器。

(2) 功分器。功分器可将一路射频微波信号功率分成若干路,功率分配方式可以等分,也可以按比例分配,功分器反用则为功率合成器。

(3) 耦合器。定向耦合器是一种特殊的分配器,可以将一小部分能量耦合到支路,用于检测主路信号的工作状态。分支线耦合器和混合环耦合器可实现不同相位的功率分配与功率合成,配合微波二极管,可以完成混频、移相等功能。

(4) 放大器。放大器是提高射频微波信号功率的电路。放大器种类繁多,如用于发射的功率放大器,用于接收的低噪声放大器等,选择放大器需根据其具体用途进行综合考虑。

## 1.2.3 阻抗

阻抗是在特定频率下,描述各种射频微波电路对微波信号能量传输影响的参数。电路的材料和结构对工作频率的响应决定电路阻抗的大小。工程实践中,应设法改进电路的阻抗特性,实现能量最大传输。阻抗参数所涉及的射频微波电路有以下几种。

(1) 阻抗变换器:增加合适的元件或结构,实现一个阻抗向另一个阻抗的过渡。

(2) 阻抗匹配器:一种特定的阻抗变换器,实现两个阻抗之间的匹配。

(3) 天线:一种特定的阻抗匹配器,实现射频微波信号在封闭传输线和自由空间之间的匹配传输。

## 1.3 射频电路设计的特殊效应

### 1.3.1 趋肤效应

趋肤效应通常是指随着频率的升高，电流趋向于导体的表面流动。由于此时该导体内部区域的载流效率比低频时低，所以导体有用的横截面积减小，从而使电阻增大，损耗增加。如图 1.4 所示，对于这个无限宽、无限长和无限深的导电块，趋肤深度  $\delta$  表示为电流密度降低到表面值的  $e^{-1}$  (37%) 时的深度，即

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu_r \mu_0 \sigma}} \quad (1.1)$$

其中， $f$  为信号频率， $\mu_r$  为相对磁导率， $\mu_0$  为真空磁导率， $\sigma$  为导体电导率。

对于铜， $\mu_r = 1$ ， $\sigma = 5.8 \times 10^7 \text{ S/m}$ ，在 1 GHz 时的趋肤深度大约为  $2 \mu\text{m}$ 。铝的趋肤深度略大一些，约为  $2.5 \mu\text{m}$ 。这种指数衰减表明使一个导体的厚度超过趋肤深度很多时所能减少的电阻可以忽略不计，这是因为所增加的材料几乎不载流。射频工程师充分利用这种特性，在导电能力比较好的导体（铜、铝）电镀上具有较小趋肤深度的优良导体（金、银），用这种方法可以用最小的成本获得电性能优良的导体。

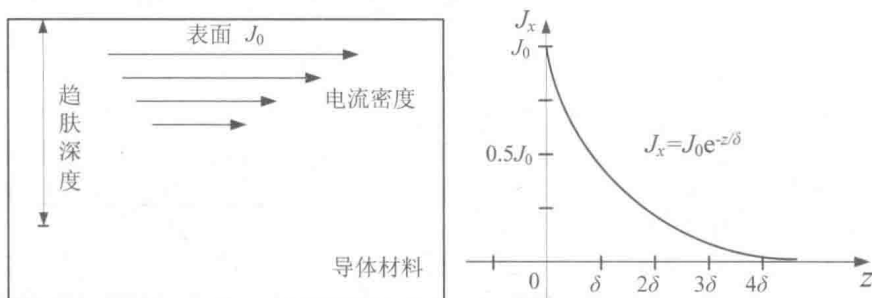


图 1.4 趋肤效应示意图

### 1.3.2 分布参数效应

在低频电路中，一般认为电能全部集中在电容中，磁能全部集中在电感中，只有电阻消耗能量，连接各元件的导线是理想导线。由这些参数元件构成的电路称为集总参数电路。由于传输信号的波长远远大于电路元件的尺寸，因此，在各元器件连接线上，电流自一端到另一端的时间远小于一个信号周期。在稳态情况下，认为沿线电压、电流是同时建立起来的，传输线上各点的电压、电流不随位置变化。而当射频微波信号通过传输线时，因导线流过电流，在其周围产生高频磁场，因此传输线各点产生串联分布电感；两导体间加入电压时，导线间产生高频电场，因此导线间产生并联分布电容；电导率有限的导线流过电流时由于趋肤效应而产生热，表明产生了分布电阻；导线间介质非理想时产生漏电流，表明产生了分布电导。这些参数虽然看不见，但它们分布在整个传输线上，故称为分布参数。

在射频微波频段，波长很短，如果  $l < \lambda/10$  ( $l$  为电路或元件尺寸， $\lambda$  为工作波长)，就认为电路是集总参数电路，同一时刻电路中电压与电流为常数，可以用集总参数电路理论来分析。如果  $l > \lambda/10$ ，则认为是分布参数电路，同一时刻电路中各处电压与电流将不相同，此时应用分布参数传输线理论分析。通常把  $l/\lambda$  称为传输线的电长度，表征的是电路几何长度与信号波长的相对关系。电长度也可以用角度表示，即  $\theta = \beta l = 2\pi l/\lambda$ ，比如  $l = \lambda/4$  的传输线电长度为  $\pi/2$  或  $90^\circ$ 。

### 1.3.3 寄生参数效应

对于直流和低频信号，可以认为金属导线就是一根短路线，不存在电阻、电容和电感等寄生参数。实际上，在低频情况下，这些寄生参数仍然存在，只是很小，可以忽略不计。当工作频率进入射频和微波频段时，金属导线自身的寄生参数已不能被忽略，对电路性能会造成较大影响，需要加以充分考虑。同样，集总元件（如电阻、电容以及电感）如果应用于射频环境下，其频率响应也不再呈现出理想的电阻、电容和电感特性。表 1.1 给出了它们的低频和射频等效电路，很显然，由于寄生参数效应，这两种频率范围内的等效电路有很大的不同。因此，在射频电路的设计以及印刷电路板的布线过程中都必须考虑这些因素的影响。

表 1.1 集总元件的低频和射频等效电路

元件	低频等效电路	射频等效电路	射频响应
导线			
电容器			
电感器			
电阻器			

由表 1.1 电容射频响应可以看出，当频率较低时，阻抗的绝对值接近理想电容，随着频率的增加逐渐下降；当阻抗的绝对值达到最小值时，对应的频率称为电容的自谐振频率；当频率超过自谐振频率时，阻抗的绝对值随着频率的增加逐渐增加，具有电感效应。因此在选择电源滤波电容时，应使滤波电容的自谐振频率尽量等于或接近电路的工作频率，这样滤波电容在工作频率上近似短路，可以得到很好的滤波效果。由表 1.1 电感射频响应可以看出，当频率较低时，阻抗的绝对值接近理想电感，随着频率的增加逐渐增加；当阻抗的绝对值达到最大值时，对应的频率称为电感的自谐振频率；当频率超过自谐振频率时，阻抗的绝对值随着频率的增加逐渐减小，具有电容效应。因此在选择

电源扼流圈时，应使扼流圈的自谐振频率尽量等于或接近电路的工作频率，这样电源扼流圈在工作频率上近似开路，可以很好地抑制交流信号进入电源端。

在射频条件下，为了降低寄生参数的影响，电路中集总元件的物理尺寸应尽可能小，这是因为器件的有效工作频率随其尺寸的减小而升高。因此在今天的射频与微波应用中，集总元件广泛采用表面贴装器件 SMD 形式，图 1.5 给出了常用的贴片集总元件。可以发现，在贴片电阻表面标记了该电阻的额定电阻值，比如“152”，根据业界对贴片电阻铭牌标记的通用规则，其前面两位数值表示电阻值，而后面一位数值表示 0 的个数或 10 的阶数，可以知道其电阻值为 1.5 k $\Omega$ 。表 1.2 给出了常用贴片式 RLC 元件的标准尺寸，用户可以根据实际需要选择元件封装型号，以便于 PCB 布线。由已知尺寸代码决定贴片元件尺寸的方法为：在代码里，头两位数字代表长度  $L$ ，后两位数字代表宽度  $W$ ，均以 10 mil 为单位，其中 1 mil=0.001 in=0.025 4 mm。贴片元件的厚度没有标准化，它依实际元件的类型而定。

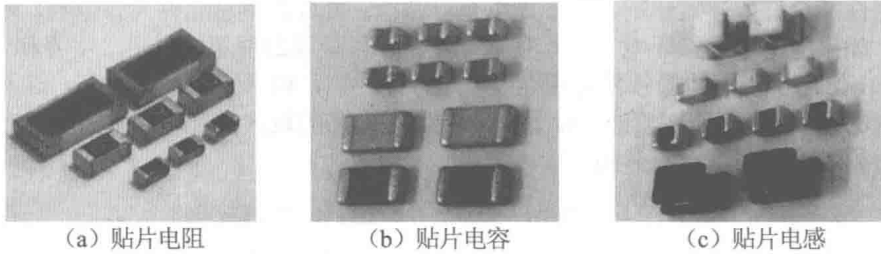


图 1.5 常用贴片集总 RLC 元件

表 1.2 常用贴片式 RLC 元件标准尺寸

几何结构	尺寸代码	长度 $L$ /mil	宽度 $W$ /mil
	0402	40	20
	0603	60	30
	0805	80	50
	1206	120	60
	1812	180	120

### 1.3.4 电磁辐射和互耦效应

在射频电路中，信号很容易从电路内部向外部和在电路内部辐射。这就造成了电路内部元件之间和电路与其环境之间的互相耦合。可以说，在射频电路中产生的干扰及其他很多奇奇怪怪的效应都是这种互耦造成的。互耦效应在直流电路中及低频电路中是见不到的或者是可以忽略的。

空间中去耦的有效手段之一是屏蔽电路中的电磁辐射。所谓屏蔽就是把易引起电磁辐射的元器件用金属盒屏蔽起来或者隔离开来，以切断或削弱它们的电磁耦合途径，金属外壳要妥善接地。电路中去耦的一般方法如图 1.6 所示，使用射频扼流圈 RFC 和电容构成的低通  $\pi$  型去耦电路，每个射频单元由电容构成闭合回路，并联多个不同规格电容的目的是实现宽频率范围的滤波特性，大电容滤低频，小电容滤高频，RFC 起单

元之间的隔离作用，这样就除去了单元之间的耦合。

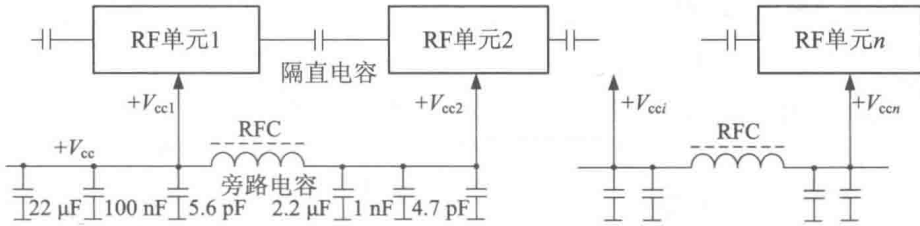


图 1.6 射频电路电源去耦的一般方法

电源去耦电路中的电容及 RFC 的正确使用有时是射频电路成败的关键。从理论上讲，旁路电容和隔直电容（又称为耦合电容）的容量应满足  $1/(\omega C) \rightarrow 0$ 。显然，在任何角频率  $\omega$  下， $C \rightarrow \infty$  是做不到的。在工程上一般要求  $1/(\omega C) < Z_0/10$  ( $Z_0$  是射频标准阻抗，取  $50 \Omega$ )。理论上电容的取值只需大于某临界值即可，并没有限定上限。然而，在实际中  $C$  值在满足要求较小的电容的取值范围内是可以的，并不是越大越好。这是因为，电容值越大，电容的自谐振频率越低，很多大容量的电容不允许应用于射频频段。同样道理，RFC 对射频呈现无限大的阻抗，即  $\omega L \rightarrow \infty$ ；对直流呈现的电阻为零，即直流畅通无阻。而在射频电路工程中 RFC 呈现有限的阻抗值，一般要求  $\omega L > 10Z_0$ 。同样，在实际中  $L$  值在满足要求较小的电感的取值范围内是可以的，并不是越大越好，以防止超过自谐振频率后变容性。

## 1.4 射频微波平面电路基础

### 1.4.1 射频微波电路分类

#### 1. 按照传输线分类

射频微波电路可以按照传输线的性质分类。典型的射频微波传输线包括同轴线、微带线、带状线和共面波导等。其中，微带线已成为射频微波电路中首选的电路结构，因为微带线结构便于器件的安装和电路调试，产品化程度高。所以，本书以微带结构的平面射频电路设计为主。

#### 2. 按照供电分类

按照是否有直流电源供电，射频微波电路分为有源电路和无源电路。其中，有源电路包括放大器、振荡器等；无源电路包括功分器、耦合器、移相器和滤波器等。

#### 3. 按照工艺分类

微波集成电路：采用管芯及陶瓷基片，由微波无源元件、有源器件、传输线和互连线集成在一个基片上，具有某种功能的电路。

微波混合集成电路：用厚膜技术或薄膜技术将各种微波功能电路制作在适合传输微波信号的介质上，采用集总元件及分布参数电路混合集成。

微波单片集成电路 MMIC：采用半导体工艺的微波集成电路，将元器件、传输线、互连线直接制作在半导体基片上的功能块，砷化镓是最常用的基片材料。



## 1.4.2 微带电路基础

### 1. 微带线结构

微带线的几何结构和电磁场线分布如图 1.7 所示。宽度为  $W$  的金属导带印制在厚度为  $H$ 、相对介电常数为  $\epsilon_r$  的接地电介质基片上。由于微带线包含空气和介质基片两种介质，因此为了分析方便，通常引入“有效介电常数  $\epsilon_c$ ”。所谓“有效介电常数  $\epsilon_c$ ”

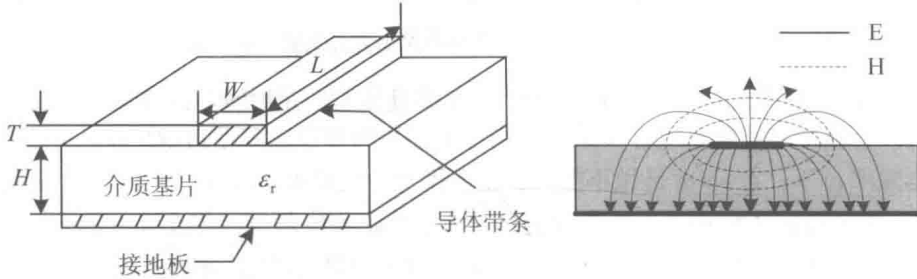


图 1.7 微带传输线几何结构及场线分布

是指在微带尺寸及其特性阻抗不变的情况下，用一均匀介质完全填充微带周围空间，以取代微带的混合介质，此均匀介质的相对介电常数就称为有效介电常数  $\epsilon_c$ 。由于部分场线在电介质区域，部分场线在空气区域，所以有效介电常数满足关系  $1 < \epsilon_c < \epsilon_r$ ，并依赖于基片高度  $H$  和导带宽度  $W$ 。 $\epsilon_c$  的计算公式为

$$\epsilon_c = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \frac{1}{\sqrt{1 + 12H/W}} \quad (1.2)$$

引入  $\epsilon_c$  以后，微带线的特性参量就可以用均匀介质来处理了，此时微带线的各参量由以下公式确定

$$Z_0 = \frac{Z_{01}}{\sqrt{\epsilon_c}}, \beta = \beta_0 \sqrt{\epsilon_c}, \lambda_p = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_c}}, v_p = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_c}} \quad (1.3)$$

式中， $Z_{01}$  为空气微带的特性阻抗， $\beta_0$ 、 $\lambda_0$ 、 $c$  分别为空气中的相移常数、工作波长和光速。可见，在微带线中的工作波长（也叫介质波长  $\lambda_p$ ）相比空气中工作波长缩短了，这也是采用高介电常数微带介质基片能够使射频电路小型化的原因。

如上所述，构成微带线的材料就是金属和介质，对金属的要求是导电性能，对介质的要求是提供合适的介电常数，而不带来损耗。当然，这是理想情况，对材料的要求还与制造成本和系统性能有关。

#### (1) 介质材料

对于射频领域的一般应用，最常用的电介质基片材料是被称为 FR4 的玻璃纤环氧树脂，它的主要优点是成本低。然而，FR4 的介质损耗较大，并且 FR4 板制造的精度不高。所以，一般认为 FR4 不适合性能要求高的射频电路的大量生产。当追求最佳性能时，其他射频微波介质材料要比 FR4 用得更多。表 1.3 提供了常用射频微波材料板的介电特性。就微带加工工艺而言，这些材料有两种实现方式：一种是在基片上沉淀金属导带，这类材料主要是陶瓷类刚性材料，这种方法工艺复杂，加工周期长，性能指标好，在毫米波或要求高的场合使用；另一种是在现成介质覆铜板上光刻腐蚀成印制板电路，这类材料主要是复合介质类材料，这种方法加工方便、成本低，是目前使用最广泛的方