



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
普通高等教育电子设计系列规划教材

通信电子线路实践教程 ——设计与仿真

◎ 刘国华 林 弥 罗 友 编著 ◎ 程知群 主审



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
普通高等教育电子设计系列规划教材

通信电子线路实践教程

——设计与仿真

刘国华 林 弥 罗 友 编著
程知群 主审

电子工业出版社
Publishing House of Electronics Industry

内 容 简 介

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材,是一本集基础实验、电路与系统综合设计、电路仿真设计于一体的通信电子线路实践教材。全书共5章和4个附录,主要包括:通信电子线路设计与实验基础知识;10个基础实验,分别为小信号单调谐和双调谐放大器、高频谐振功率放大器、高频LC和石英晶体振荡器、振幅调制与解调、频率调制与鉴频、锁相环路;以一个调频语音通信系统为主线的6个综合设计性实验,分别为小信号调谐放大器设计、集成宽带程控放大器设计、压控振荡器(本地振荡器)设计、混频器和中频放大器设计、正交鉴频器设计;基于LTSpice仿真软件的高频谐振功率放大器、高频LC振荡器、振幅调制与解调电路、二极管平衡混频电路的设计过程和仿真结果;PSpice软件及应用举例;常用高频电子仪器操作、LTSpice的命令与器件符号及射频信号的功率换算方法等。本书提供配套电子课件和仿真源程序。

本书可作为高等学校电子、通信类专业本科生相关课程设计和实验课程教材,仿真部分可以为相关理论课程提供教学参考,也可作为大学生电子设计竞赛的参考用书,还可供从事高频电子线路设计的工程技术人员学习、参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

通信电子线路实践教程:设计与仿真 / 刘国华, 林弥, 罗友编著. — 北京: 电子工业出版社, 2015.4

ISBN 978-7-121-13987-1

I. ①通… II. ①刘… ②林… ③罗… III. ①通信系统—电子电路—电路设计—仿真设计—高等学校—教材
IV. ①TN91

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第053192号

策划编辑: 王羽佳

责任编辑: 王羽佳 特约编辑: 王 崧

印 刷: 三河市鑫金马印装有限公司

装 订: 三河市鑫金马印装有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编: 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 12.5 字数: 320千字

版 次: 2015年4月第1版

印 次: 2015年4月第1次印刷

定 价: 27.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010)88258888。

前言

随着当今无线通信和集成电路技术的飞速发展,重视对学生工程实践能力和综合创新能力的培养是电子、通信工程类专业教学改革的主要方向之一。本书是一本集通信电路基础性实验、综合设计性实验和软件仿真设计于一体的实验教材,融会了编者多年的教学、科研经验与成果,书中所有实验项目均来自编者教学或指导学生学科竞赛的实践,旨在通过精心设计的实践训练项目,激发学生的学习兴趣,培养和提高学生的动手实践能力、工程设计能力、探索创新意识和团队协作精神。

本书具有以下特色。

1. 内容覆盖全面、层次分明、利于自学

全书内容共有5章和4个附录。实验层次体系以功能电路实验、通信电路综合设计、通信电路仿真设计进行编排,各层次教学目标明确,教学要求循序深入,教学内容涵盖了“通信电子线路”理论课程的所有内容。

第1章为通信电路设计和测试基础,介绍了无源电子器件(如电阻、电容、电感、传输线和二极管)的高频等效电路及使用方法,以及射频电路的各种测试测量方法和数据处理技术。

第2章设计了10个基础性功能电路实验,包括小信号单调谐和双调谐放大器、高频谐振功率放大器、高频LC和石英晶体振荡器、振幅调制与解调、频率调制与鉴频、锁相环路。每个实验都给出了预习要求、实验原理介绍和实验内容,列出了兼顾实践性与开放性的实验思考题。

第3章为6个综合设计性实验。以一个调频通信系统为主线,要求以分立元件设计一个小功率调频发射机,并以功能电路为基础,设计一个调频接收机,包括小信号调谐放大器设计、压控振荡器(本地振荡器)设计、混频器和中频放大器设计、正交鉴频器设计,集成宽带程控放大器设计是小信号调谐放大器设计的扩展。最后列出了两个综合性较强的设计课题,为了教学方便,实验项目以对应理论课程的教学顺序编排。

第4章首先介绍电路仿真软件LTSpice的使用,然后以高频谐振功率放大器、高频LC振荡器、振幅调制与解调电路、二极管平衡混频电路4个典型功能电路为例,介绍LTSpice在通信电路仿真与设计中的应用。每个实例后面列出了设计思考题,并在最后一节列出了调幅通信系统和调频发射机两个综合设计题。

第5章简要介绍电路仿真软件PSpice在通信电路仿真中的应用。这主要考虑到有不少读者习惯于使用PSpice软件,而LTSpice软件入手有一定难度。为避免重复,PSpice和LTSpice仿真内容互为补充,尽量扩大覆盖面。这部分内容可以供学生仿真设计使用,也可供实验或理论课老师上课演示参考。

附录分别给出了实验室常用高频测试仪器的主要技术指标及操作使用方法,设计报告内容及模板,LTSpice软件的常用命令及元器件符号,功率电平的快速换算方法,方便读者在使用本书时快速参考。

每个基础实验和仿真设计实验均由单人完成,实验教学过程中可以根据教学总学时调整每人完成的实验项目数。综合设计性实验建议采用6人一组的分组方法,其中2人完成调频发射机设计。4人完成调频接收机设计,每人负责一个模块,再连接成接收机进行系统调试,最后完成调频通信系统的综合整机调试和验收。为避免相互干扰,各组可以自选或由指导老师分配通信频率。

2. 软件仿真设计贯穿始终,设计环节融入基础实验

通信电路实验对实验者和仪器设备要求较高,全部采用硬件电路实验在现实教学中确实有困难。

故所有硬件电路实验预习时,要求学生先对实验内容进行软件仿真,在基础实验电路中,部分元器件参数没有给出,要求学生要自行计算设计,并根据实验要求在仿真过程中调整参数。综合设计性实验要求学生先给出仿真设计结果,最后将实验结果和仿真结果进行比较、分析、总结。

软件仿真设计突出了 LTSpice 软件的使用。LTSpice 软件免费使用且功能不受限制,具有体积小、效率高的特点。根据作者在教学科研中的使用经验,LTSpice 比较适合通信电路实验和理论教学,第 4 章中的仿真设计实例就是作者近几年来实践和理论教学的总结。

3. 强化设计、培养对知识的应用能力

实验原理部分给出了“够用”的相关理论知识。所有实验项目均包含有设计环节,设计部分要求学生课外完成,突出自主设计,激发创新思维。设计性实验需要多人协作完成,内容分为电路设计、PCB 设计、焊接组装、调试验收等环节。突破了传统实验教学中基础实验以验证为主,学生按照实验指导书操作即可完成的教学局限性,打破了将实验内容集中在课内完成的封闭教学模式,培养了学生对所学知识的综合运用和团队协作能力。

本书第 1~4 章和附录由刘国华执笔,第 5 章由林弥执笔,罗友负责确定全书的组织架构,全书由刘国华统稿。

程知群教授认真审阅了全部书稿,对书中的具体内容提出了很多建设性的修改意见,对书稿质量的提高起到了重要作用,编者表示衷心的感谢。

本书在编写过程中,王光义教授给予了热情支持。课程组的周涛、董志华、柯华杰、易志强老师参与了部分内容的讨论,提出了不少改进意见;实验室的研究生朱丹丹、陈帅绘制了部分电路图,编者在此一并表示衷心的感谢。

电子工业出版社对本书的出版给予了大力支持,王羽佳副编审给予作者许多指导,为本书的顺利出版提供了良好的条件,编者表示衷心感谢。

由于时间和编者水平有限,错漏之处在所难免,欢迎读者批评指正。

编 者

2015 年 2 月于杭州电子科技大学

目 录

第 1 章 通信电路设计与测量基础	1
1.1 通信电路设计基础	1
1.1.1 通信电路中的电子元器件	1
1.1.2 高频电路设计与布线技术	8
1.1.3 抗干扰设计与测试	11
1.2 通信电路测试和数据处理	13
1.2.1 通信电路与系统测试基础	13
1.2.2 数据记录与处理	17
第 2 章 通信电路实验	18
2.1 小信号调谐放大器实验	19
2.1.1 小信号单调谐放大器实验	19
2.1.2 小信号双调谐放大器实验	24
2.1.3 实验思考题	26
2.2 高频谐振功率放大器实验	26
2.2.1 高频谐振功率放大器的背景知识	26
2.2.2 高频谐振功率放大器实验	28
2.2.3 实验思考题	31
2.3 高频 LC 及石英晶体振荡器实验	31
2.3.1 改进型电容三点式振荡器	31
2.3.2 石英晶体振荡器	36
2.3.3 实验思考题	39
2.4 幅度调制与解调电路实验	39
2.4.1 幅度调制电路实验	39
2.4.2 包络检波与同步检波实验	44
2.4.3 实验思考题	47
2.5 变容二极管调频和相位鉴频器实验	47
2.5.1 变容二极管直接调频实验	47
2.5.2 电容耦合的相位鉴频器	50
2.5.3 实验思考题	54
2.6 锁相环及应用电路实验	54
2.6.1 锁相环实验的背景知识	54
2.6.2 锁相环及应用实验	56
2.6.3 实验思考题	59
第 3 章 通信电路综合设计	60
3.1 高频小信号调谐放大器设计	60

3.2	宽带程控放大器设计	64
3.3	LC 压控振荡器设计	67
3.4	晶体管混频器设计	70
3.5	小功率调频发射机设计	73
3.6	正交鉴频器设计	77
3.7	设计课题	80
3.7.1	无线温湿度采集系统	80
3.7.2	无线翻页激光笔	81
第 4 章	LTspice 软件及通信电路仿真设计	82
4.1	电路图绘制 Schematics Capture	82
4.1.1	Schematics Capture 的电路原理图结构	83
4.1.2	Schematics Capture 的基本操作	83
4.1.3	电路图绘制举例	86
4.2	电路性能分析	90
4.3	器件模型与电路图模块化设计	96
4.3.1	外部器件的 Spice 模型导入方法	96
4.3.2	原理图的模块化设计	97
4.4	控制面板的设置	99
4.5	高频谐振功率放大器的设计与仿真	102
4.5.1	设计任务和要求	102
4.5.2	设计过程	102
4.5.3	设计思考题	110
4.6	高频 LC 振荡器仿真与设计	111
4.6.1	基本电容反馈三点式振荡器仿真研究	111
4.6.2	改进型电容三点式振荡器研究	114
4.6.3	压控振荡器仿真研究	117
4.6.4	设计思考题	119
4.7	幅度调制与解调电路仿真	120
4.7.1	AD633 简介	120
4.7.2	基于 AD633 的调幅电路仿真	121
4.7.3	解调电路仿真	125
4.7.4	设计思考题	127
4.8	二极管平衡电路设计与仿真	128
4.8.1	二极管平衡调制电路仿真	128
4.8.2	二极管环形混频器设计与仿真	130
4.8.3	设计思考题	137
4.9	小结	137
4.10	综合设计题	138
第 5 章	PSpice 通信电路仿真	139
5.1	基于 MC1496 的调幅电路	139

5.1.1	绘制电路图	140
5.1.2	直流分析	146
5.1.3	MC1496 调幅电路的仿真分析 (瞬态分析)	148
5.1.4	傅里叶分析	154
5.2	二极管峰值包络检波	155
5.3	石英晶体振荡器	159
5.3.1	石英晶体振荡器的仿真	159
5.3.2	温度分析	161
5.3.3	参数扫描分析	162
5.4	LC 谐振回路	163
5.4.1	LC 谐振回路简述	163
5.4.2	交流小信号分析	164
附录 A	常用高频电子仪器	167
A.1	TDS2012B 型数字存储示波器	167
A.2	AS1054 型高频信号发生器	170
A.3	SP1501 型数字合成标准信号发生器	172
A.4	AT6011 型频谱分析仪	174
A.5	BT-3D 型频率特性测试仪	177
A.6	SP2271 型数字超高频毫伏表	179
A.7	GFC-8131H 型数字频率计	180
A.8	TH2816B 型数字电桥	181
附录 B	设计报告格式模板	184
B.1	LC 压控振荡器设计	184
B.2	小功率调频发射机设计	186
附录 C	LTSpice 点命令和电路器件符号说明	188
C.1	点命令功能简表	188
C.2	元器件符号含义简表	189
附录 D	功率电平与功率值之间的换算方法	190
参考文献		191

第1章 通信电路设计与测量基础

1.1 通信电路设计基础

在低频电路中，电子元件常被视为集总参数，而在高频或射频（Radio Frequency, RF）电路设计中，需要考虑元件和电路的分布参数效应。分布参数主要是分布电阻、分布电容和分布电感。分布电阻是指元件引脚或连线接触点、连线自身和线路板布线形成的非期望电阻，分布电阻通常与元件为串联关系；分布电容主要指元件自身封装、元件之间、元件到接地平面和线路板布线间形成的非期望电容，分布电容通常与元件为并联关系。分布电感是指元件引脚、连线、线路板布线等形成的非期望电感，分布电感与元件为串联关系。

1.1.1 通信电路中的电子元器件

1. 导线

传统的交流电路分析把导线视为电阻和电抗可以忽略不计的近似理想元件。实际上，电阻、容抗和感抗不仅仅由低频电路中的电阻元件、平板器件、线圈等产生，一根平直的导线或一段印制电路板（Printed Circuit Board, PCB）上的铜箔线都可以产生随频率变化的电阻和感抗。例如，一段半径为 a 、长度为 l 、电导率为 σ 圆柱形铜导线的直流电阻为

$$R_{DC} = \frac{l}{\pi a^2 \sigma} \quad (1.1)$$

直流工作时，电流会通过导线的整个横截面。交流工作时，流经导线的电荷会产生趋肤效应，趋肤深度随着工作频率的升高而减小，导致导线的交流电阻增加。当频率增加到 1GHz 时，铜导线的交流电阻大约是直流电阻的 250 倍。

导线中也会有分布电感的存在。假设导线的电感分布参数与频率无关，那么一根长度为 l 、半径为 a 、磁导率为 μ_0 的圆柱形平直导线的分布电感为

$$L = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{2l}{a} \right) - 1 \right] \quad (1.2)$$

计算表明，一段长度为 10cm、线径为 0.2mm 的铜导线的分布电感约为 120nH。

2. 电阻

电阻是电路系统中用途最广泛的无源电子器件。在低频电路中，认为电阻的阻值与频率无关。然而在高频电路中，电阻引线的寄生电感和引线结构的电容效应不能忽略。等效结构如图 1.1 所示，电感 L_1 和 L_2 等效为电阻两端的引线电感，电容 C 模拟电阻的电荷分离效应和结构分布电容。总阻抗为

$$Z = j\omega(L_1 + L_2) + \frac{1}{1/R + 1/j\omega C} \quad (1.3)$$

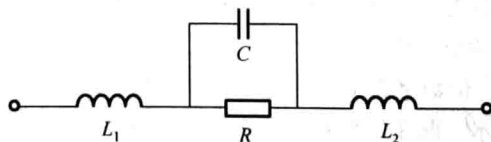


图 1.1 电阻的高频等效电路

工作在低频时,感抗很小,容抗很大,等效为纯电阻,阻值不随频率而改变,随着工作频率升高,容抗和感抗不能忽略。电阻值为 $1\text{k}\Omega$ 、引线电感为 10nH 、分布电容为 5pF 的等效阻抗随频率的变化关系如图 1.2 所示。

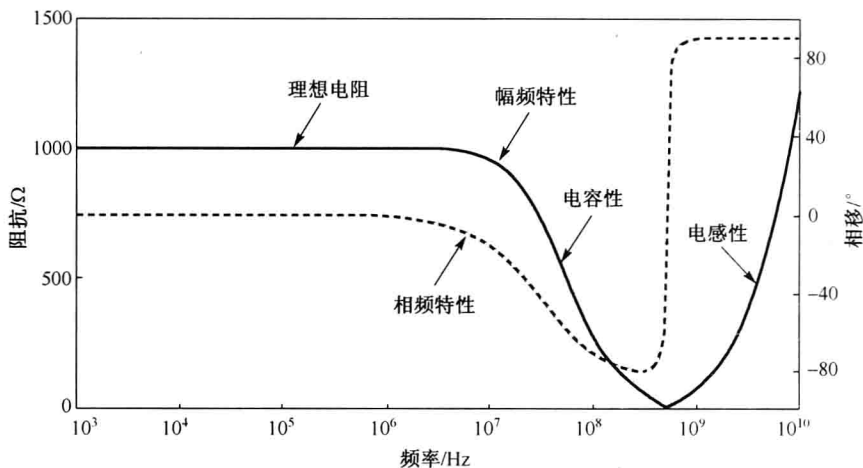


图 1.2 $1\text{k}\Omega$ 电阻的频率特性

可以看出,在低频段,阻值为 $1\text{k}\Omega$,没有相移,说明是纯电阻。当频率达到 4MHz 时,分布电容的影响开始显现,电阻的阻值开始下降,相移为负值,电阻等效为容性阻抗;频率到 500MHz 时,阻抗降到仅有 4Ω 。随着频率的增加,由于引线电感开始起主导作用,相移为正,电阻等效为感性阻抗。因此,在不同的工作频段,电阻可以等效为电阻、电容或电感,这是高频电路设计时要注意的问题。

电阻按材料类型分为线绕电阻、金属膜电阻和碳膜电阻。其中线绕电阻用康铜或镍铬合金电阻丝绕在陶瓷骨架上,工作稳定,耐热性好,用于大功率场合,但分布电感较大,不适用于高频电路。碳膜电阻虽然性能一般,但成本低,分布参数也比线绕电阻小,一般为土黄色的四色环封装,每种色环颜色代表一个数字,第一个、第二个、第三个色环分别代表百位、十位、个位的有效数字,第四个色环代表精度。金属膜电阻的精度高、分布电感小,适用于高频电路,通常为蓝色的五色环封装,前四个色环代表有效数字,第五个色环代表精度。色环颜色与数字或精度的对应关系见表 1.1。

表 1.1 色环与数字的对应关系

颜色	棕	红	橙	黄	绿	蓝	紫	灰	白	黑	金	银
数字或精度	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	$\pm 5\%$	$\pm 10\%$

需要说明的是,在高频电路中,低阻值电阻由于受分布电感的影响较大,实际应用时,阻值更不容易控制。

电阻的封装通常有直插式和贴片式两种。直插式封装电阻功率越大,体积越大。贴片式封装电阻通常用四位数字表示,前两位表示封装长度,后两位表示封装宽度,单位为英寸,如 0402 封装的电阻长度为 0.40 英寸(约 1mm),宽度为 0.20 英寸(约 0.5mm)。贴片封装具有体积小、引脚短、分布电感小、抗干扰能力强、高频性能好的特点。贴片电阻的阻值一般直接标注在封装外壳上,5%精度的用 3 位数字表示,前两位是有效数字,第三位为 0 的个数;精密电阻用 4 位有效数字加两个英文字母表示,前 3 位是有效数字,第四位是 0 的个数,数字中间的字母 R 表示小数点。最后两个英文字母的第一个表示误差,第二个表示温度系数。字母含义如表 1.2 所示。

表 1.2 贴片电阻最后两位字母的含义

字母	误差 (%)	字母	误差 (%)	字母	误差 (%)	字母	温度系数 (ppm/℃)
Y	±0.001	W	±0.05	G	±2	C	50
X	±0.002	B	±0.1	J	±5	D	25
E	±0.005	C	±0.25	K	±10	Y	15
L	±0.01	D	±0.5	M (或省略)	±20	T	10
P	±0.02	F	±1	N	±30	V	5

2. 电容

在高频电路中, 电容通常用于滤波器、阻抗匹配电路、有源器件如晶体管的偏置电路设计中。由于存在分布参数, 电容在高频电路中的作用与在低频电路中的作用有很大的不同。我们知道, 基本的平板电容器的电容值为

$$C = \varepsilon \frac{A}{d} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{A}{d} \quad (1.4)$$

式中, ε 是介电常数; A 是平板面积; d 是平板间距。平板之间填充介质, 介质有很大的介质电阻存在, 实际的电容元件等效为理想电容和介质电阻的并联, 总阻抗为

$$Z = \frac{1}{G_c + j\omega C} \quad (1.5)$$

式中, G_c 是介质电导。此外, 电容器还有寄生引线电感 L 和引线的串联损耗电阻 R_s , 如图 1.3 所示, 其中 $R_c = 1/G_c$, 是介质损耗电阻。

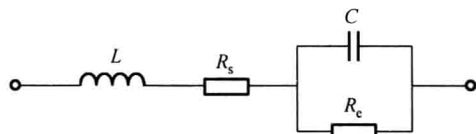


图 1.3 电容的高频等效电路

当分布参数 $L = 20\text{nH}$ 、 $R_s = 1\text{m}\Omega$ 、 $R_c = 50\text{M}\Omega$ 时 47pF 的电容随频率变化的阻抗特性曲线如图 1.4 所示。可以看

出, 在 100MHz 以内, 电容器的容抗随频率的增加而线性减小, 特性接近理想电容, 165MHz 为串联自谐振频率, 此时的阻抗约为 0.5Ω ; 频率高于 165MHz 时, 电容器的特性发生实质性的变化, 等效为一个电感。因此, 电容器在使用时, 工作频率不能超过自谐振频率点。一般为安全起见, 工作频率要低于自谐振频率的一半。Murata 公司(村田制作所)生产的贴片电容的自谐振频率经验公式为 $f_0 = \frac{5400}{\sqrt{C}} \text{MHz}$,

其中 C 为贴片电容值, 范围为 $1.8\text{pF} \sim 18\text{nF}$, 串联电感为 0.86nH , 串联电阻为 $0.08\Omega \sim 0.52\Omega$ 。贴片电容工作在自谐振频率时, 阻抗近似为零, 称为“零”电容, 此时用做射频接地的旁路电容, 效果最好。

需要指出的是, 实际电容器的串联损耗电阻 R_s 值与频率的平方根成正比, 介质损耗电阻 R_c 与工作频率成反比。电容还有两个参数, 即等效串联电阻 (Equivalent Series Resistance, ESR) 和损耗角正切 ($\tan \delta$), $\tan \delta$ 是 ESR 与电容电抗的比值。如前所述, 由于电容串联损耗电阻很小, 故质量优良的电容 $\text{ESR} \rightarrow 0$ 和 $\tan \delta \rightarrow 0$ 。

根据介质材料的不同, 商用电容分为铝电解电容、CBB 电容、陶瓷电容、云母电容、钽电容等。其中除了铝电解电容由于卷绕式制作, 分布电感比较大, 不适合高频外, 其他电容都可以用于高频电路设计中, 尤其是瓷片电容和钽电容, 高频性能比较稳定, 实际使用最广泛。就损耗而言, 铝电解电容的 ESR 最大, 钽电容次之, 陶瓷电容最小。

高频电路中常用的另一种电容是穿心电容。这是一种三端电容, 通常直接安装在金属面板上, 使得接地电感极小, 几乎没有引线电感。由于其输入/输出端被金属板隔离, 消除了高频耦合, 故滤波效果非常好。

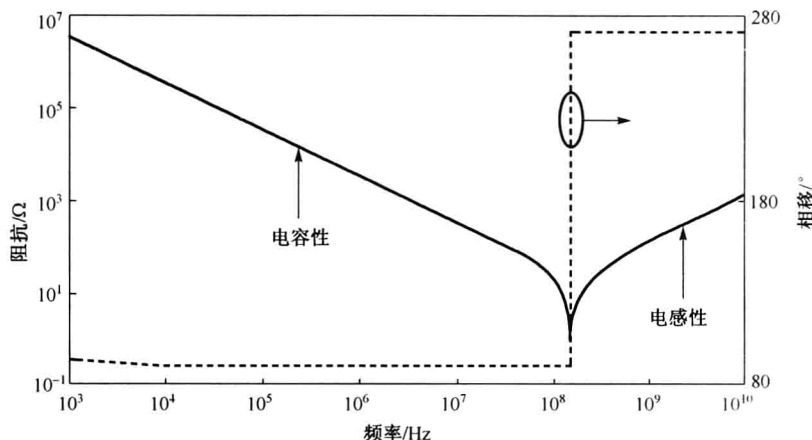


图 1.4 47pF 电容阻抗的频率特性曲线

电容的常见封装方式有两种,即直插式封装和贴片式封装。直插式封面电容一般用于频率比较低的电路和电源滤波电路中。贴片式封装电容体积小、引脚短、分布参数小、性能稳定,常用于高频电路中。

电容器的值通常标注在外壳上。铝电解电容器的电容值直接以数字标出;直插式瓷片电容的电容值为三位数字,前两位是有效数字,第三位是 0 的个数,单位为 pF。例如,103 表示 10000pF。

3. 电感

虽然在电路中的使用没有电阻和电容普遍,但电感元件常用于高频晶体管的偏置电路中,例如,用做高频扼流圈,使得直流电源的电压可以直接加到晶体管上,同时防止高频信号进入直流电源,影响电源的正常供电。由于电感线圈由平直导线绕制而成,前面已说明,导线自身存在交直流电阻 R_s ,虽然直流电阻较小,但交流电阻随频率的增加而增加。线圈的匝与匝之间相互平行,类似于小的平板电容,产生的寄生电容 C_s 与整个电感是并联关系。电感的等效电路如图 1.5 所示。

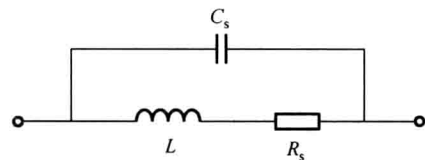


图 1.5 电感的高频等效电路

电感的品质因数 Q 是指在某一频率下感抗与串联电阻 R_s 的比值,即

$$Q = \frac{\omega L}{R_s} \quad (1.6)$$

在低频时, R_s 很小, Q 值很大。随着频率的升高,由于趋肤效应和线圈间的分布电容的影响,导致电感的 Q 值下降。 Q 值表示了电感的损耗, Q 值越高,则损耗越小,电感的性能越好。

对于一个 $10\mu\text{H}$ 的电感,串联分布电阻 R_s 为 0.5Ω ,匝间分布电容 C_s 为 0.5pF 时,对电感高频等效电路的软件仿真分析结果如图 1.6 所示。

可以看出,从低频到 50MHz ,随着频率的增加,相移为正值,阻抗线性增加,呈现比较理想的电感特性;从 50MHz 到电感的自谐振频率点约 71MHz ,随着频率的增加,相移仍然为正,感抗迅速上升,在并联谐振频率点时阻抗达到 $415\text{k}\Omega$;然后频率继续增加,一方面相移为负值,另一方面随着频率增加,电抗下降,电感器件呈现电容特性。因此,实际电路中的电感,如果使用不当,会等效为一个电容。在高频电路设计中应该竭力避免这种情况出现。Murata 公司生产的贴片电感自谐振频率经验公式为 $f_0 = 8920/\sqrt{L} \text{ MHz}$,其中 L 为贴片电感值,取值范围是 22nH 到 1800nH ,并联电容为 0.2pF ,当电感工作在自谐振频率时,它的阻抗最大,理想情况下近似为无穷大,此工作频率的贴片电感用做扼流圈效果最好。

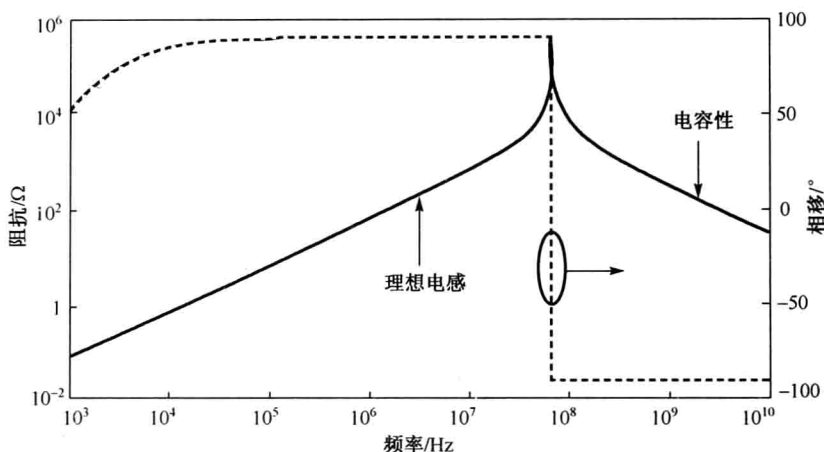


图 1.6 10μH 电感的阻抗特性曲线

在通信电路实验与设计中,常用的有高频扼流圈电感、色环电感和空心自绕电感。扼流圈电感值比较大,一般为带磁心的电感线圈,或者圆柱形封装电感。色环电感外观与色环电阻相似,颜色为绿色,取值不连续,电感值用4个色环表示,前三个色环表示有效数字,第四个色环表示误差,颜色含义与表 1.1 相同。空心电感值比较灵活,绕制后可以通过 LCR 电桥测量电感线圈的各种参数,如电感值、 Q 值、串并联电阻等。也可以通过下式估算空心电感的电感值:

$$L = \frac{10\pi r^2 \mu_0 N^2}{9r + 10l} \quad (1.7)$$

式中, μ_0 为真空磁导率 ($4\pi \times 10^{-7}$); r 为线圈半径; N 为线圈匝数; l 为线圈总长度。

与电感串联的直流分布电阻为

$$R_s = \frac{l_{\text{wire}}}{\sigma_{\text{Cu}} \pi a^2} = \frac{2\pi r N}{\sigma_{\text{Cu}} \pi a^2} \quad (1.8)$$

式中, N 为线圈匝数; r 为线圈半径; a 为导线半径; σ_{Cu} 为铜的电导率。

电感的封装不同,电感值的标注也不一样。图 1.7 是各种封装的电感器实物图。电感器的电感量有直标法、色标法和数字字母组合法。直标法将电感量直接标注在电感外壳上,色标法采用色环标注。与色环电阻类似,数字字母组合标注一般用在贴片电感上,与贴片电阻的阻值标注类似。

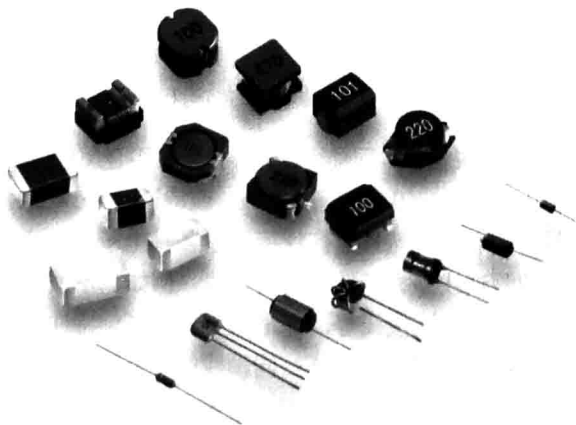


图 1.7 各种封装的电感器实物图

4. 传输线

传输线是用来传输电磁能量的载体,用于连接信号源和负载,以及实现电路模块之间的连接。通信电路工程实践中常用的传输线有双线传输线、同轴线和微带传输线。由于传输线参数的分布特性,它自身有特征阻抗。对于无耗传输线,若单位长度的分布电感为 L , 分布电容为 C , 则特征阻抗 Z_0 为

$$Z_0 = \sqrt{L/C} \quad (1.9)$$

特征阻抗反映了传输线本身的特征,与频率无关。

(1) 双线传输线

双线传输线可以是两条平行的导线或互相绞合在一起的导线;平行传输线是一个开放的系统,随着工作频率的升高,会向外辐射更多的电磁能量,也更容易受到外界电磁信号的干扰。为了减少能量辐射,通常在两条导体周围添加高介电常数的介质,将电磁场集中在导体附近。常见的平行双线有低频用的电源线、电视机天线的馈线、USB 延长线、电话机的电话线等。双绞线的有效回路面积小,可以减小电磁能量辐射和外界电磁干扰,如局域网的网线。

(2) 同轴线

同轴线是两个同轴的导体所构成的传输线,由内导体、介质层和外导体组成,结构和实物如图 1.8 所示。内导体半径为 a , 外导体半径为 b , 内外导体之间填充了介电常数为 ε_r 的低损耗介质,最外面一层是保护层。通常在使用时,外导体接地,电磁场被限制在内外导体之间,可以最大限度地降低传输线的电磁辐射,同时屏蔽外界电磁场的干扰。

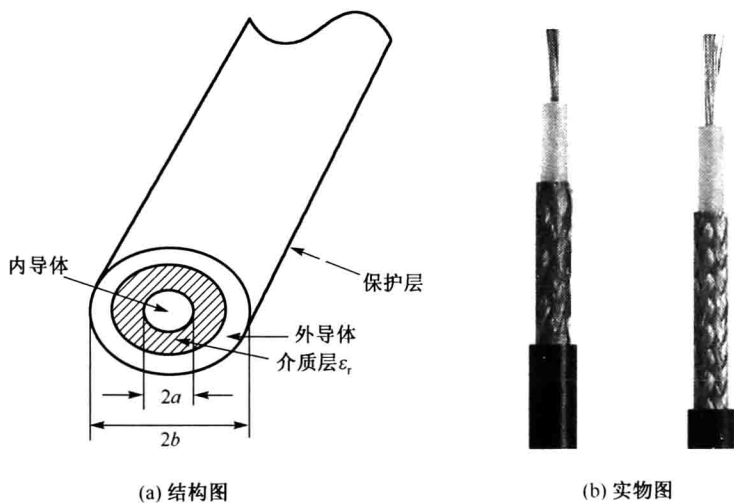


图 1.8 同轴传输线的结构和实物

为了保持良好的弹性和使用的灵活性,同轴线的外导体通常用金属做成编织网状,填充介质材料是介电损耗比较低的聚乙烯 ($\varepsilon_r = 2.3$, $\tan \delta = 0.0004@10\text{GHz}$) 或特氟龙 ($\varepsilon_r = 2.1$, $\tan \delta = 0.0004@10\text{GHz}$)。

由于同轴线良好的信号传输和屏蔽特性,广泛应用于各种电子技术实验室、科研与工程实践中。通信电子电路实验室中用到的测试线绝大多数都是同轴线。例如,示波器探头线、高频仪器设备与被测电路之间的连线、电路单元之间的连接线等,都是具有良好高频特性的同轴线。

如前所述,不同传输线的特征阻抗也不一样。同轴线的特征阻抗为

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\varepsilon_r}} \ln \frac{b}{a} \quad \Omega \quad (1.10)$$

可见同轴线的特征阻抗与填充介质介电常数的平方根成反比,介电常数大,可以认为内导体和外导体之间的等效电容也大,特征阻抗就减小。常用同轴传输线的特征阻抗有 50Ω 和 75Ω 两种,由于高频电子仪器的输出阻抗通常是 50Ω ,故 50Ω 一般作为阻抗标准。通信电子线路实验中用到的信号发生器、频率计、频谱分析仪、射频毫伏表等仪器连接线都是 50Ω 同轴线,而频率特性测试仪的连接线是 75Ω 同轴线。同轴线的特征阻抗与射频测试仪器、被测电路输入/输出阻抗相匹配,是射频电路测试时要满足的一项基本要求。如果阻抗不匹配,就会在传输线和仪器或电路的连接处产生信号反射,从而造成测试数据的不准确。

(3) 微带线

在通信电子系统设计中,常用平面印制电路板作为传输媒介来传输电磁能量信号。在频率很高的射频电路中,我们要考虑腐蚀在 PCB 基板上的金属导带线的高频效应。微带线的典型结构如图 1.9 所示,PCB 基板的介电常数为 ϵ_r ,厚度为 h ,上层微带线的宽度为 W ,用来传输高频信号。底层是金属接地板,构成信号的回路。

在微带线中,电磁场主要集中在金属导带和金属底板之间的区域,如果介质基板的介电常数较高,那么就只有很少的能量泄漏出去。在工作频率很高的通信电路中,PCB 线可以认为是微带线。射频电路中,通常用微带线结构构造无源电抗元件。

例如,用螺旋微带线构造电感、用带间隙或一段微带线构造电容。

介质基板通常选用低损耗的材料,通常使用聚四氟乙烯环氧树脂 ($\epsilon_r=2.55$)、氧化铝 ($\epsilon_r=10.0$) 或高介电常数的新型陶瓷材料。介质基板的介电常数越高,微带线的几何尺寸越小,电磁场的泄漏也越小。

常用的 FR-4 等级基板材料是环氧玻纤布基板 ($\epsilon_r=4.2\sim 4.7$),它具有强度高、耐热性好、介电性好的特点,是覆铜板中用途最广、用量最大的一类,可以用于通信和雷达产品中。

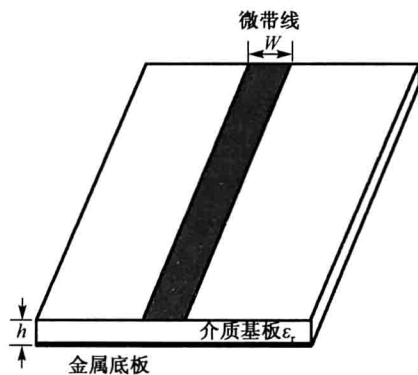


图 1.9 微带线的结构

5. 二极管

二极管是最简单的射频有源器件,由于它的 $I\sim V$ 特性是指数曲线,因此可视为一个非线性电阻。因此,二极管是非线性器件。它可以实现交流信号的整流、检波、相乘等功能,在射频电路中,常用在幅度调制、检波、混频等电路中。

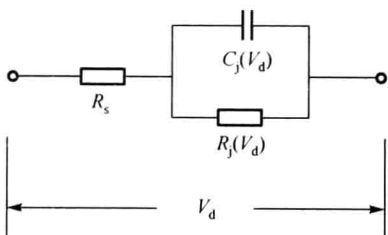


图 1.10 二极管大信号非线性模型

工作在射频小信号状态下的二极管可以用线性模型等效。而实际的二极管包括了半导体区的欧姆电阻、结电容、寄生电容、引线电感等参数,需要采用大信号模型来分析。专业的射频电路仿真软件中的大信号模型考虑了这些参数的影响,等效电路如图 1.10 所示。 R_s 为串联等效电阻,它是固定值,结电容 C_j 和结电阻 R_j 都是二极管外加电压 V_d 的非线性函数。其中,结电容包括 PN 结电容和 PN 结扩散电容两个部分。二极管反偏时,主要是结电容或势垒电容,正偏时扩散电容是主要电容。

射频电路设计中,常用的二极管是检波二极管、变容二极管和肖特基二极管。下面分别说明其特性及应用。

(1) 检波二极管

检波二极管是能够把已调信号中的低频信号检测出来的器件,具有较高的检波效率和良好的频率特性,它要求具有较小的正向压降、结电容和反向电流,较高的工作频率和足够大的正向电流,一般采用点接触的锗二极管。

常用的检波二极管有国产的 2AP 系列锗玻璃封装二极管, 型号为 1N34/A、1N60 的进口检波二极管等。

(2) 变容二极管



图 1.11 变容二极管符号

变容二极管是利用反向偏置电压来改变 PN 结电容容量的特殊半导体器件, 它相当于一个压控可变电容。其等效电路与图 1.10 相同, 符号如图 1.11 所示, 由于工作在反向偏置状态, 所以结电阻 R_j 很高。

结电容 C_j 与反向工作电压 V_d 之间的关系为

$$C_j = \frac{C_{j0}}{(1 - V_d / V_j)^n} \quad (1.11)$$

式中, C_{j0} 是零偏时二极管的结电容, V_d 为二极管的反向偏置电压, 它为负值, V_j 为二极管的内建电势差, 一般取 0.6V, n 是变容二极管的变容指数。

式 (1.11) 中变容二极管的 $C_{j0} = 50\text{pF}$, 变容指数 $n = 1/2$, 反向偏置电压 V_d 为 0~10V 时, 结电容变化曲线如图 1.12 所示。可以看出, 随着反向工作电压绝对值 $|V_d|$ 的增加, 变容二极管的结电容 C_{j0} 由 50pF 逐渐减小到约 12pF。

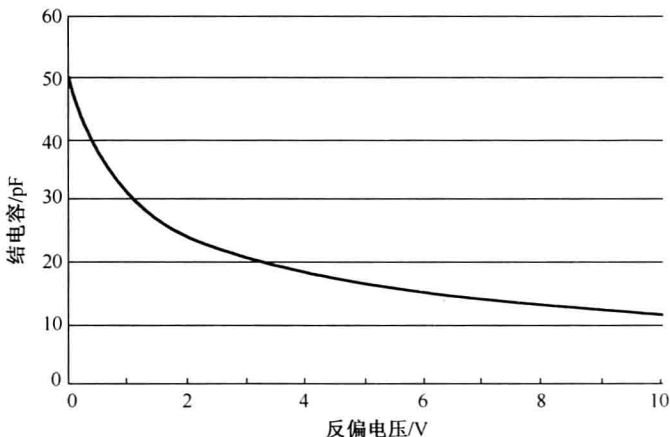


图 1.12 变容二极管结电容随反向电压变化的曲线

由于变容二极管的上述特性, 使得它在众多的射频电路中获得应用, 如压控振荡器电路 (Voltage Controlled Oscillator, VCO)、锁相环电路 (Phase Locked Loop, PLL)、调频波产生电路、电视机的高频头等。本书的第 3 章中有关于变容二极管调频电路的实验, 第 4 章中有基于变容二极管的压控振荡器设计与仿真实例。

(3) 肖特基二极管

肖特基二极管是由金属和半导体材料接触形成的类似 PN 结特性的半导体器件。由于它有更低的串联电阻、更高的截止频率、更快的反向恢复时间和更强的非线性特性, 因此适合于工作在射频电路中。

肖特基二极管的上述优点结合正向压降小的特性, 在射频电路中, 通常用来取代普通的 PN 结二极管, 用于射频开关、通信检波电路、调制和解调电路、混频电路、射频探测器等。

1.1.2 高频电路设计与布线技术

1. 布线技术

近年来, 随着射频通信电子技术的发展迅速, 印制电路板布线越来越复杂, 高频电路由于工作频率较高, 部分分布参数不能忽略, 电路正常工作对布线要求较高。PCB 设计涉及的内容很多, 包括一

些基本原则、抗干扰、电磁兼容、安全防护等。实际上,高频电路布线不仅需要一定的理论知识,更需要必要的经验积累。下面对高频电路布线过程的一些常见问题进行归纳说明。

(1) 小功率射频电路 PCB 通常选用 FR-4 等级的基板材料,典型的是环氧玻璃纤维布基板,介电常数为 4~4.5。这种材料具有较好的机械性能、绝缘性能和耐热性。实验室常用的是双面板,为防止干扰和确保电路性能稳定,最好反面完整接地。

(2) 工作在射频电路中的元器件,应尽量选择贴片封装,因为这类封装体积小、元件引脚引线短、分布参数影响小。对于分立元件如电阻、电容和电感,应尽量使用 0805 以下的封装,因为小封装有利于提高电路的稳定性。

(3) 射频电路板上的元器件安排应尽量紧凑,以缩短器件之间的走线长度,减少分布电阻和分布电感的影响。同时,每个元器件包括电阻、电容、电感等无源器件的接地设计非常重要,对于双面 PCB 板,应该在离元器件引脚最近的地方过孔接地。具体的接地设计接下来会进一步说明。

(4) 对于混合信号 PCB 布线,由于模拟部分通常是小信号,数字部分是逻辑信号,为防止干扰,高频部分与模拟部分要远离数字部分,模拟与高频部分的接地要与数字部分的接地严格分开。由于开关电源纹波大,会破坏射频信号的传输,故不能使用它直接给高频电路部分供电。开关电源要通过高频扼流圈或 π 形滤波电路,再通过低压差线性稳压器 (Low Dropout Line Regulator, LDO) 给高频电路供电。

(5) 对于有多个电源引脚的射频有源器件,需要在每个电源引脚附近单独设置 $0.1\mu\text{F}$ 的去耦合电容,如果空间允许,最好设置 $0.1\mu\text{F}$ 和 1000pF 并联的去耦合电容,通常采用高频性能良好的陶瓷电容。如果熟悉芯片的内部电路结构,就会了解不同的电源引脚为不同的内部电路供电,此时最好再加一个 $10\mu\text{H}$ 的串联磁珠与电源引脚相连。

(6) 射频 PCB 电路板上信号的馈入和馈出,要采用专门的 RF 同轴连接器,最常用的是小型 SMA 型同轴连接器,其最高工作频率在 10GHz 以上。射频测试仪器上也常用 L16 型 N 同轴连接器,频率低于 2GHz 时,通常使用 BNC 和 RCA 同轴连接器,前者使用最为普遍。在实际电路测试时, SMA、BNC、L16、RCA 连接器之间通常需要同轴转换器。多数 RF 连接器有插拔次数的限制,一般为 500 次,超过后可能会永久损坏连接器。

(7) 射频电路需要进行专门的阻抗匹配设计,一般射频系统采用 50Ω 匹配。前面已经介绍,微带线的特征阻抗随线宽和基板介电常数的增加而减小,严格来说,微带线的阻抗需要经过精确的计算,根据基板材料的类型,通过软件仿真确定线宽,但实际加工的 PCB,通常和仿真结果差距很大。好在较小的阻抗失配对工作频率不高的电路影响并不大。

(8) 电感设计不要平行放置,因为这样两个电感会构成空心变压器,通过互感而干扰电路的正常工作。为提高电路工作的稳定性,靠近的电感要垂直放置。

2. 接地设计

接地在高频电路布线中十分重要,有时关系到电路设计的成败。所谓接地,是指电流返回源的低阻抗路径。所有信号返回源的路径都是非理想的,接地要考虑到电流因素。在低频电路中,分布电阻的影响比较大,在高频电路中,分布电感成为主要影响因素。信号在经过地线时,会产生压降和电磁场,若这些电磁量耦合到其他电路的输入端,就可能会被放大,或者影响高速数字信号的完整性,而良好的接地设计可以减轻或避免这些影响。接地分为单点接地、多点接地和混合接地。

(1) 低频电路单点接地

单点接地又分串联单点接地和并联单点接地。接地设计中要牢记两点:一是所有导体均有阻抗,