

电子学基础系列 
ELECTRONICS

GAOPIN DIANLU JICHU GAOPIN DIANLU JICHU GAOPIN DIANLU JICHU
(第二版)

高频电路基础

陈光梦 编著

复旦大学出版社 

电子学基础系列



ELECTRONICS

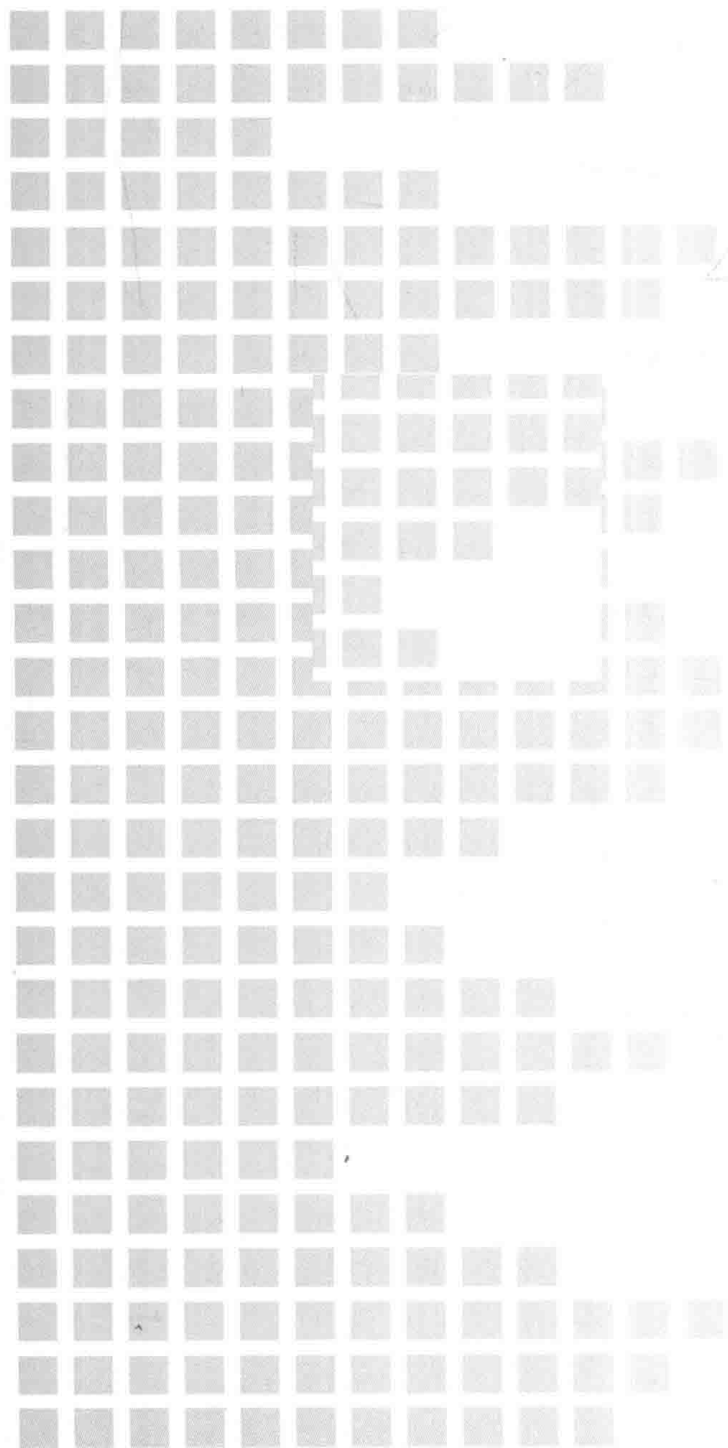
(第二版)

GAOPIN DIANLU JICHU GAOPIN DIANLU JICHU GAOPIN DIANLU JICHU

高频电路基础

陈光梦 编著

复旦大学出版社



图书在版编目(CIP)数据

高频电路基础/陈光梦编著. —2版. —上海:复旦大学出版社,2016.1

(电子学基础系列)

ISBN 978-7-309-12045-5

I. 高… II. 陈… III. 高频-电子电路-高等学校-教材 IV. TN710.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第001015号

高频电路基础(第二版)

陈光梦 编著

责任编辑/梁玲

复旦大学出版社有限公司出版发行

上海市国权路579号 邮编:200433

网址:fupnet@fudanpress.com <http://www.fudanpress.com>

门市零售:86-21-65642857 团体订购:86-21-65118853

外埠邮购:86-21-65109143

上海浦东北联印刷厂

开本 787×960 1/16 印张 30.75 字数 540千


2016年1月第2版第1次印刷

ISBN 978-7-309-12045-5/T·562

定价:59.00元

如有印装质量问题,请向复旦大学出版社有限公司发行部调换。

版权所有 侵权必究

A large, faint watermark of the Fudan University seal is centered on the page. The seal is circular and contains the university's name in Chinese characters, the year 1905, and a central emblem.

“博学而笃志，切问而近思。”

（《论语》）

博晓古今，可立一家之说；
学贯中西，或成经国之才。

作者简介

陈光梦，男，1950年出生.1966年因“文化大革命”辍学，进入工厂.1977年恢复高考后考入复旦大学，毕业后留校至今.

留校以后一直从事电路与系统的教学与科研工作.长期从事电子线路基础教学，曾参加过国家教育部组织的中华学习机系列的研制工作，参加过上海多家工厂的工业自动化改造项目，在自动控制技术、可编程逻辑器件应用技术、声音与图像的处理与应用技术等领域开展过不少工作.编著有《可编程逻辑器件的原理与应用》、《模拟电子学基础》、《数字逻辑基础》、《模拟电子学基础与数字逻辑基础学习指南》、《数字逻辑基础学习指导与教学参考》、《高频电路基础学习指南》等书.

内 容 提 要

高频电路是高等学校电子科学与技术类专业的一门专业必修课,它主要研究高频电子电路的基本原理与基本方法.

本书共分8章,分别介绍了高频无源网络、高频小信号放大器、高频功率放大器、高频振荡器、锁相环与频率合成、混频器、模拟调制与解调、数字调制与解调.同时,在第1章至第6章后增加了附录,分别补充了高频无源滤波器简介、用 S 参数分析小信号放大器、E类和F类放大器高频功率放大器简介、用 S 参数分析振荡器、数字直接合成、微带线耦合器等内容.这些内容超出一般的教学要求,但从教学实践来看又很关键,可供需要深入学习的读者参考.

本书可以作为高等学校电子科学与技术类专业学生的教科书,也可以作为电子信息、通信、自动控制等相关技术人员的参考书.

第二版前言

本书第一版出版以后,笔者以它为教材给本科生上课.在上课过程中,不断有学生提出各种问题,有些问题反映了教材的内容中有不适合初学者理解的地方,也有些问题反映了教材中内容的欠缺,更有细心的学生指出书中的一些明显的错误,这使得笔者产生了在再版时作一个大幅修改的念头.

作为一本教科书,很重要的一点是要考虑到学生的思维方式,能够让一个初学者循序渐进地入门直至掌握该学科的基本知识.这是教材的材料组织必须认真考虑的地方,同时这些材料还必须构成该学科本身的体系.

在第二版中,笔者将原来置于最后一章的锁相环前移到混频与调制解调之前,就是基于上述的考虑.原来在最后一章才讲述锁相环,将许多与现代通信有关的锁相环应用电路合在一起讲述,好处是关于调制和解调等概念学生已经了解,可以比较简单地讲述其应用,但是存在一个较大的问题就是由于没有结合实际的电路讲述锁相环的应用,导致学生只有原理上的知识而没有实际应用概念.这个问题在大学生电子竞赛中就有反映,许多很优秀的学生遇到实际的锁相环应用问题都感到难以下手.现在第二版则试图改变这一状况,第5章从原理上详细讨论锁相环电路,而在随后的混频、模拟与数字的调制和解调等章节中,则详细地阐述锁相环的应用,并给出多个应用实例可以让学生模仿,这样就可以克服原来第一版的不足.另一方面,随着大规模集成电路的发展,现在锁相环已经像集成运放一样成为电子学的一个基本模块,从这个观点来看,在整个电子学体系中也应该将它作为一个基本部件来看待,所以提前讲述锁相环,并在随后的章节中讲述其应用,也符合教材本身的体系要求.

除了锁相环一章有大规模改动外,第二版对混频、数字调制与解调两章也作了较大改动,补充了许多材料.其他章节也有少量的补充,并增加了部分习题.

有些补充的内容涉及S参数、微带线网络等,主要是考虑到现代无线通信越来越向微波频段发展,故有必要向学生介绍这方面的知识.但为了与原来的教学体系相衔接,不可能进行全盘讨论,那样会与其他课程发生冲突,所以这些内容被安排在附录中.感兴趣的读者可以将它当作入门的阅读材料.

除此之外,第二版改正了原教材中的一些错误,对一些表述不妥的地方也作了

适当修改. 尽管这样, 笔者心中还是有些惴惴, 因为限于学识, 不免还会有错误, 为此衷心希望广大读者及时指正.

陈光梦

2015年11月

第一版前言

高频电路是大学本科电子类专业的一门专业必修课,它主要研究高频电子电路的基本原理与基本方法.由于集成电路的飞速发展,以前以晶体管为主的高频电路现在许多已经被集成电路所取代,因此在编写本教材时如何安排课程的内容就颇费思量.考虑到尽管许多电路已经集成化,但是高频电路的基本原理却还是必须用基本的晶体管电路才能说明的,所以本书的内容大部分以晶体管电路为主.考虑到现代无线电的发展,在传统内容的基础上也增加了一些基于集成电路的内容,尤其在数字调制与解调部分,实际电路几乎全部用集成电路构成,所以在本书中也以集成电路为主.

本书共分 8 章.

第 1 章介绍高频无源网络,主要讨论高频电路中常用的无源元件以及用无源元件构成的谐振回路、阻抗变换网络等.考虑到现在的高频通信系统中越来越多地采用微带线结构构成阻抗变换网络,在这一章中也简要介绍了微带线以及用微带线构成的阻抗变换网络,以及与之有密切关系的 Smith 圆图.

第 2 章讨论高频小信号放大器,以晶体管高频小信号放大器为主,也简单介绍了一些集成小信号放大器.主要内容有晶体管的高频参数描述,晶体管小信号放大器的设计,包括增益、稳定性等,还讨论了与小信号放大器密切相关的噪声问题.

第 3 章是高频功率放大器.重点是 C 类放大器和 D 类放大器,除了原理上的分析以外,还以实例的形式介绍了这两类放大器的设计过程.另外还介绍了传输线变压器及其应用,简单介绍了宽带功率放大器.

第 4 章讨论高频振荡器,重点是 LC 振荡器以及晶体振荡器.考虑到后面直接调频和锁相环两个环节的需要,将压控振荡器也安排在这一章.

第 5 章是混频器.这一章中很大的篇幅是介绍非线性电路的工作原理.在混频器电路部分,一方面是出自阐述原理的需要,另一方面是考虑到各种不同的混频器在不同的应用背景中还在实际使用,所以这部分电路既包含了很经典的二极管调制解调电路,也介绍了集成调制解调电路.这一章还分析了混频器电路中可能出现的各种干扰.

第 6 章介绍模拟调制与解调,第 7 章介绍数字调制与解调.这两章尽管都介绍调制与解调,但在内容的安排上有所不同.第 6 章重点在于已调信号的信号特征分

析,电路以晶体管为主,着重在于分析如何实现调制与解调。

第7章主要介绍一些基本的数字调制方式及其信号特征,考虑到学生以后还有信号与系统的课程,所以对于信号的分析介绍较少,而在具体电路中则以集成电路的应用为主。

第8章讨论反馈控制系统,包括自动增益控制、自动频率控制以及锁相环。考虑到学生在后面还有自动控制理论课程,所以反馈控制的基本理论仅作简单介绍,重点是应用电路系统。锁相环部分重点介绍了可以作线性分析的跟踪过程,其余部分则作简单介绍。最后对锁相环的具体应用作了一些概括性的介绍。

另外,在第1章、第2章、第3章以及第8章后面,各增加了一个附录,介绍LC高频滤波器、S参数、E类和F类放大器以及DDS技术等内容。这些内容超出一般的教学要求,但是从笔者的教学实践来看又是很关键的内容。尤其在近几年的全国大学生电子竞赛的辅导工作中,有许多学生主动找参考资料学习并向老师求教这些内容。在本教材中将它们作为附录,让需要深入学习的读者可以有一个入门的阶梯。

本教材曾经作为讲义用于本科教学。在教学过程中,深深感到教学相长的无穷魅力。许多学生不仅给我指出讲义中的笔误和错误,还就许多理论问题与我展开讨论。尽管其中有许多问题是学生的经验不够或其他原因所致,但是通过讨论也使我进一步认识到学生的思维方式以及讲义中的材料取舍等许多问题,这些经验指导我能够对教材作进一步的修订以期达到更完美的教学效果。我的同事唐长文博士也给我指出了一些教材中的错误和不妥。在此向唐长文博士以及给过我帮助的学生们致以诚挚的谢意。

虽然我尽力想将此书写成一本完善的教材,但是囿于本人的学识以及经验,本书中错误或不妥之处仍在所难免。恳切期待专家学者以及广大读者多多指教!

编者

2009年8月

目 录

前言	1
绪论	1
第1章 高频无源网络	6
§ 1.1 集总参数无源元件的高频电特性	6
§ 1.2 集总参数谐振回路	12
1.2.1 LC 谐振回路	12
1.2.2 LC 耦合谐振回路	20
1.2.3 固体谐振器	25
§ 1.3 集总参数阻抗变换网络	27
1.3.1 阻抗的串联-并联等效变换	28
1.3.2 互感耦合和电容分压式阻抗变换网络	29
1.3.3 LC 梯形阻抗变换网络	35
§ 1.4 基于传输线的阻抗变换网络	40
1.4.1 传输线	41
1.4.2 微带线阻抗变换网络	49
§ 1.5 Smith 圆图及其应用	53
1.5.1 Smith 圆图的构成原理与特点	54
1.5.2 用 Smith 圆图进行计算	55
附录 高频无源滤波器简介	62
习题与思考题	79
第2章 高频小信号放大器	83
§ 2.1 晶体管的高频特性	83
2.1.1 高频晶体管及其等效电路	83
2.1.2 晶体管网络参数	85
§ 2.2 高频小信号放大器的增益和频率特性	90
2.2.1 晶体管小信号调谐放大器	93
2.2.2 多级调谐放大器	104
2.2.3 其他形式的高频小信号放大器简介	106
§ 2.3 高频小信号放大器的稳定性	111

2.3.1	放大器的稳定性	111
2.3.2	稳定性设计	114
§2.4	高频放大器中的自动增益控制	116
2.4.1	自动增益控制原理	116
2.4.2	自动增益控制的电路构成	120
§2.5	高频放大器中的噪声和非线性	124
2.5.1	噪声的一般特性	124
2.5.2	高频放大器中常见的噪声来源	126
2.5.3	噪声的计算	129
2.5.4	接收机的灵敏度	138
2.5.5	放大器的非线性和动态范围	139
附录	用S参数分析小信号放大器	143
	习题与思考题	157
第3章	高频功率放大器	161
§3.1	C类谐振功率放大器	161
3.1.1	导通角与集电极效率	161
3.1.2	C类功率放大器的工作原理	164
3.1.3	C类功率放大器的实际电路	173
§3.2	D类谐振功率放大器	185
3.2.1	D类功率放大器的工作原理	185
3.2.2	D类功率放大器的实际电路	189
§3.3	功率分配与功率合成	192
3.3.1	传输线变压器	193
3.3.2	功率合成电路	199
3.3.3	其他功率分配与功率合成电路	204
§3.4	高频宽带功率放大器	206
附录	E类和F类高频功率放大器简介	210
	习题与思考题	213
第4章	高频振荡器	217
§4.1	晶体管LC振荡器	217
4.1.1	LC振荡器原理	217
4.1.2	互感耦合型LC振荡器	223
4.1.3	三点式LC振荡器	226

4.1.4 差分电路 LC 振荡器	234
§4.2 石英晶体振荡器	236
§4.3 振荡器的一些实际问题与现象	240
§4.4 其他形式的振荡器简介	247
4.4.1 负阻振荡器	247
4.4.2 压控振荡器	248
4.4.3 声表面波振荡器	252
4.4.4 多谐振荡器	253
4.4.5 数字集成电路构成的晶体振荡器	255
附录 用S 参数分析振荡器	256
习题与思考题	260
第5章 锁相环与频率合成	265
§5.1 锁相环的结构与工作原理	265
5.1.1 鉴相器	266
5.1.2 环路滤波器	271
5.1.3 压控振荡器	272
5.1.4 反馈信号分频	272
5.1.5 锁相环的控制过程	273
§5.2 锁定状态下的锁相环	274
5.2.1 锁相环的线性化传递函数	274
5.2.2 锁相环的稳态响应	277
5.2.3 锁相环的瞬态响应	281
5.2.4 噪声对于锁相环的影响	286
§5.3 非锁定状态下的锁相环	290
5.3.1 锁相环的捕捉过程	290
5.3.2 锁相环的失锁过程	296
§5.4 数字锁相环简介	300
§5.5 频率合成	303
附录 数字直接合成	311
习题与思考题	316
第6章 混频器	319
§6.1 混频原理	319
6.1.1 频谱变换	319

6.1.2 频谱变换的一般原理	320
6.1.3 非线性元件的线性时变工作状态	324
§6.2 混频电路	330
6.2.1 单管混频器	331
6.2.2 平衡混频器	335
6.2.3 其他形式的混频器	346
§6.3 混频器中的失真与干扰	349
6.3.1 副波道干扰	350
6.3.2 交调、堵塞与互调	352
6.3.3 干扰哨声	354
6.3.4 倒易混频	354
6.3.5 混频器的非线性与干扰的关系	355
§6.4 无线接收机中的混频电路	356
6.4.1 超外差结构	356
6.4.2 中频频率的选择	357
6.4.3 锁相环在混频器中的应用	360
附录 微带线耦合器	363
习题与思考题	374
第7章 模拟调制与解调	377
§7.1 振幅调制与解调	377
7.1.1 振幅调制的信号特征	378
7.1.2 振幅调制电路	382
7.1.3 振幅解调	385
§7.2 角度调制	399
7.2.1 角度调制的信号特征	400
7.2.2 直接调频电路	404
7.2.3 调相电路与间接调频电路	413
§7.3 调角信号的解调	417
7.3.1 振幅鉴频器	417
7.3.2 鉴相器和相位鉴频器	420
7.3.3 锁相鉴频电路	431
7.3.4 其他形式的鉴频电路以及鉴频器中的一些辅助电路	433
习题与思考题	435

第8章 数字调制与解调	439
§8.1 数字调制与解调基本原理	439
8.1.1 振幅键控	440
8.1.2 频移键控	443
8.1.3 相移键控	450
8.1.4 正交调制	454
§8.2 同步信号恢复	460
8.2.1 数字信号接收中的同步	460
8.2.2 载波同步	461
8.2.3 符号同步	462
§8.3 数字通信系统简介	466
8.3.1 ASK 与 FSK 系统	466
8.3.2 正交调制系统	471
习题与思考题	474
参考文献	476

绪 论

本课程研究高频电子线路. 高频电子线路的一个主要应用方向就是如何通过电磁波传递能量和信息, 通常称为无线电. 无线电的历史, 可以追溯到 19 世纪中叶.

英国科学家麦克斯韦(James Clerk Maxwell, 1831—1879)在 1855—1864 年间发表 3 篇论文, 提出位移电流概念, 形成著名的麦克斯韦方程, 奠定无线电科学的理论基础.

随后是德国科学家赫兹(Heinrich Rudolf Hertz, 1857—1894)在 1887 年完成关于电磁波实验, 证明了麦克斯韦的理论, 奠定无线电科学的实验基础.

再后来, 意大利科学家马可尼(Guglielmo Marconi, 1874—1937)和俄国科学家波波夫(Александр Степанович Попов, 1859—1906)在 1894—1897 年间各自独立制成无线电收发报机, 实现了世界上第一次无线电通信, 这时已经有了无线电的雏形.

进入 20 世纪以后, 无线电开始加速发展. 这种发展在两条线上同时进行: 一条线是器件方面的发展, 另一条线是电路技术与应用方面的发展.

1904 年, John Ambrose Fleming 发明了真空二极管. 1907 年, Lee de Forest 发明了真空三极管. 而在随后的 1919—1940 年间, 德国、荷兰、美国、英国以及前苏联科学家陆续发明了真空四极管、真空五极管、超短波速调管、微波磁控管等一系列电真空器件.

在此期间, 无线电技术及其应用也得到极大发展. 1906 年, Reginald Aubrey Fessenden 用调制的无线电波发送音乐和讲话进行广播试验. 1912—1922 年间, Edwin Howard Armstrong、Reginald Aubrey Fessenden 等人发明了多种无线电接收技术, 包括再生式接收技术、超再生接收技术、外差式和超外差式接收技术. 1927 年, Harold Black 发明了负反馈电路. 1933 年, Edwin Howard Armstrong 发现了宽带调频原理, 首次进行调频制广播. 20 世纪 30 年代中期到 40 年代, 出于军事的需要, 雷达开始投入使用. 随后又发展了射电天文学和无线电气象学等. 到了 20 世纪中叶, 现代的模拟信号发送和接收技术几乎都已经出现并投入使用.

在 20 世纪中叶, 又出现了两个里程碑式的发明.

其一是 1948 年由 3 位科学家巴丁(John Bardeen, 1908—1991)、肖克利

(William Schokley, 1910—1989)和布莱顿(Walter Houser Brattain)发明了晶体管,从此固体电子学隆重登场.而自从Clair Kilby和Robert Noyce在1958年各自独立地制成了最早的集成电路后,电子学进入微电子时代.随着制造工艺的日臻完善,集成电路的规模越来越大,而且还在不断以被称为摩尔定律的速度,即每18个月翻一番的速度增长.随着集成电路规模的扩大及其应用领域的日益广泛,我们的世界已经逐步建立在硅的基础上.

另一个里程碑式的发明是20世纪40年代电子计算机的发明以及随后由于集成电路的飞速发展而导致的计算机微型化,它极大地改变了无线电技术的发展进程.电子计算机从开始发明时的一个庞大机器发展成一个小小的芯片,微处理机的出现使得计算机技术可以嵌入到各种实际应用系统中,它最终使得现代无线电技术从模拟信号系统发展为模拟-数字混合信号系统.许多以前只是停留在理论阶段的设想开始逐步成为现实,其中最重要的当数软件无线电,它对现代无线电的变革起到相当深刻的影响.

以前的无线电系统中,所有的信号变换过程都是通过硬件电路实现的.这样的系统一旦组成就难以更改,稳定性虽好,但是灵活性很差.理想的软件无线电思想是:除了发送的功率放大器与接收的前端放大器仍然采用硬件实现外,其余的信号变换功能全部用软件实现.显然,由于软件的灵活性,这样的系统是柔性的、灵巧的,可以应付各种变化的环境.而由于高集成度的支持,这样的系统体积小、功耗低.

显然,若没有微电子技术和计算机技术的发展,上述系统将是无法实现的.尽管目前软件无线电技术还不能达到完全理想的模式,但是已经开始应用在包括军事与民用的许多领域.

总之,现代无线电技术已经深入到我们每个人生活的每个角落.无论是日常生活中的广播、电视、手机、无线网络,还是飞机导航、船舶定位、微波通信、卫星通信等等,都离不开无线电技术.现在已经不能想象没有无线电的世界将是什么状况.

从信息的角度来看,所有无线电技术的发展都是围绕着信息的收集、传送、存储和还原展开的.

信息信号通常包含语音、图像、各种遥控遥测数据等,可以分为模拟信号和数字信号两大类.信息信号的特点是:频率一般都比较低,占有一定的频宽.例如,语音信号的频率为300 Hz~3 400 Hz,音乐信号的频率为20 Hz~20 kHz,电视图像的频率为0~6 MHz等.由于频率低,信息信号一般无法直接通过无线方式传送.

为了远距离传送信息,需要用低频的信息信号去控制一个称为载波的高频电磁波.目前无线电可以利用的高频电磁波频率范围大约从几千赫到几千吉赫.为了