

21 世纪高职高专机电类规划教材

高频电子技术

Gaopin Dianzi Jishu

主 编 ◎ 臧雪岩

副主编 ◎ 郭 庆 刘建军



中国人民大学出版社

21 世纪高职高专机电类规划教材

高频电子技术

主 编 臧雪岩

副主编 郭 庆 刘建军

中国人民大学出版社

• 北京 •

图书在版编目 (CIP) 数据

高频电子技术/臧雪岩主编. —北京: 中国人民大学出版社, 2011. 6
21 世纪高职高专机电类规划教材
ISBN 978-7-300-13873-2

I. ①高… II. ①臧… III. ①高频-电子电路-高等职业教育-教材 IV. ①TN710.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 113663 号

21 世纪高职高专机电类规划教材

高频电子技术

主 编 臧雪岩

副主编 郭 庆 刘建军

出版发行 中国人民大学出版社

社 址 北京中关村大街 31 号

电 话 010-62511242 (总编室)

010-82501766 (邮购部)

010-62515195 (发行公司)

网 址 <http://www.crup.com.cn>

<http://www.ttrnet.com> (人大教研网)

经 销 新华书店

印 刷 秦皇岛市昌黎文苑印刷有限公司

规 格 185 mm×260 mm 16 开本

印 张 10.25

字 数 229 000

邮政编码 100080

010-62511398 (质管部)

010-62514148 (门市部)

010-62515275 (盗版举报)

版 次 2011 年 12 月第 1 版

印 次 2011 年 12 月第 1 次印刷

定 价 20.00 元

版权所有 侵权必究

印装差错 负责调换

前言

本教材适应目前我国职业教育的特点和发展要求,旨在解决高职学生能力培养目标和教材理论深奥、脱离实际的矛盾。

本教材主要包括课程概述,正弦波振荡器,高频小信号选频放大电路,高频功率放大器,振幅调制、解调与混频——频谱搬移电路,角度调制与解调电路,反馈控制电路等。编者本着降低理论难度、突出实际应用、让学生轻松学习并且学以致用想法,结合几年来的教学实践经验,借鉴了许多同类优秀教材的编写思路和内容,力求达到后续专业课程需要的理论基础要求。

本教材的特点如下:

1. 课程概述着重无线电发送设备和接收设备及各个组成部分的介绍,突出全书学习的线索和思路,略去了信道的介绍。
2. 对基本原理和基本分析方法的讲解,叙述详尽,语言通俗易懂,便于学生理解。
3. 本着理论够用的原则,对复杂的数学推导和难懂的电路、原理予以省略。
4. 新知识由一个轻松的话题导入,让学生学习起来感觉轻松。
5. 注重知识的实用性,每一个学习任务中都列举了很多实用电路,突出实用电路的理解与分析。
6. 提供了前后内容的知识链接、应用链接,方便学生复习和理论联系实际。

本教材由辽宁省交通高等专科学校臧雪岩统稿并担任主编,辽宁省交通高等专科学校郭庆和辽宁铁道职业技术学院刘建军担任副主编,参与编写工作的还有辽宁省交通高等专科学校的孔繁瑞和苏琼。

由于编者水平有限,错误、疏漏在所难免,恳请有关专家和同行多提宝贵意见。

编者

教师信息反馈表

为了更好地为您服务，提高教学质量，中国人民大学出版社愿意为您提供全面的教学支持，期望与您建立更广泛的合作关系。请您填好下表后以电子邮件或信件的形式反馈给我们。

您使用过或正在使用的我社教材名称		版次	
您希望获得哪些相关教学资料			
您对本书的建议（可附页）			
您的姓名			
您所在的学校、院系			
您所讲授课程名称			
学生人数			
您的联系地址			
邮政编码		联系电话	
电子邮件（必填）			
您是否为人大社教研网会员	☐ 是 会员卡号：_____ ☐ 不是，现在申请		
您在相关专业是否有主编或参编教材意向	☐ 是 ☐ 否 ☐ 不一定		
您所希望参编或主编的教材的基本情况（包括内容、框架结构、特色等，可附页）			

我们的联系方式：北京市海淀区中关村大街 31 号

中国人民大学出版社教育分社

邮政编码：100080

电话：010-62515913

网址：<http://www.crup.com.cn/jiaoyu>

E-mail：jyfs_2007@126.com

目 录

学习任务 1	课程概述	1
1.1	电子线路的划分	1
1.2	通信与通信系统	2
1.3	本课程学习内容	6
学习任务 2	正弦波振荡器	8
2.1	反馈振荡器的组成及工作原理	8
2.2	LC 正弦波振荡器	10
2.3	石英晶体振荡器	17
2.4	RC 振荡器	20
学习任务 3	高频小信号选频放大电路	30
3.1	选频器	31
3.2	小信号选频放大器	36
3.3	集中选频放大器	41
学习任务 4	高频功率放大器	48
4.1	谐振功率放大器的工作状态	49
4.2	丙类谐振功率放大器的工作原理	50
4.3	丙类谐振功率放大器的工作特性	53
4.4	谐振功率放大电路	58
4.5	丙类倍频器	66
学习任务 5	幅度调制、解调与混频——频谱搬移电路	70
5.1	幅度调制	71
5.2	检波	88
5.3	混频	94
学习任务 6	角度调制与解调电路	108
6.1	角度调制信号的基本特性	108
6.2	调频原理及电路	115
6.3	调频电路的解调——鉴频原理及电路	120
学习任务 7	反馈控制电路	138
7.1	自动增益控制电路	138
7.2	自动频率控制电路	141
7.3	自动相位控制电路	142
参考文献		154

课程概述



学习线索

- 电子线路的划分
- 通信与通信系统



学习重点

- 通信系统的组成
- 无线电发送设备与接收设备的组成



学习内容

学习“高频电子技术”这门课程之前，我们首先来了解一下电子线路的划分方法，从而清楚自己要学习什么。

1.1 电子线路的划分

电子线路（简称电路）就是将各种有源器件和无源器件按照不同的方式连接而成的网络，它能够实现多种处理功能，如信号的产生、放大、运算、变换、传输、调制、混频、倍频等。

电子线路的划分方法有多种形式：

(1) 按照处理信号来分有模拟电路和数字电路。模拟电路处理模拟信号，数字电路处理数字信号。

(2) 按照工作频率来分有低频电路、高频电路和微波电路等。它们分别完成对低频信号、高频信号和微波信号等的处理。

低频信号频率通常为 300kHz 以下，如声音信号、图像信号、生物电信号、机械振动信号等；高频信号频率通常为 300kHz~300MHz，如广播、电视、移动通信等信号，所以我们将要学习的高频电子线路又称通信电子线路；微波信号频率通常为 300MHz 以上，如

卫星、雷达、导航信号等。但实际上高频信号与微波信号的频率界限已经越来越模糊了，无线通信频率越来越高，如手机信号已工作在 900MHz 和 1 800MHz，实际已经进入微波段，但一般仍说手机工作在高频段。

同学们可参照表 1—1 来了解通信频段的划分及用途。

表 1—1 通信频段的划分及用途

频段名称	频率范围	波长范围	波段名称	用途
甚低频 VLF	3~30 kHz	100~10 km	超长波	音频、电话、数据传输、长距离导航、时标
低频 LF	30~300 kHz	10~1 km	长波	远距离通信、导航
中频 MF	0.3~3 MHz	1000~100 m	中波	调幅广播、船舶通信、业余无线电
高频 HF	3~30 MHz	100~10 m	短波	短波广播、移动通信、定点军用通信、业余无线电
甚高频 VHF	30~300 MHz	10~1 m	超短波 (米波)	电视、调频广播、空中管制、车辆通信、导航
特高频 UHF	0.3~3 GHz	100~10 cm	微波	电视、空间遥测、雷达导航、点对点通信、移动通信
超高频 SHF	3~30 GHz	10~1 cm		微波接力通信、卫星和空间通信、雷达
极高频 EHF	30~300 GHz	10~1 mm		雷达、微波接力通信、无线电天文学、着陆设备
超极高频	300~3000 GHz	1~0.1 mm	光波	卫星广播与通信
	3~300 THz	100~1 mm		光学通信数据传输

(3) 按照集成度来分有分立元件电路和集成电路。与分立元件电路相比，集成电路具有体积小、性能稳定、可靠性高、维修使用方便等优点，是电子线路发展的主导方向，但由于频响和功率容量的限制，目前高频、大功率电子线路还是以分立元件电路为主。

(4) 按照电路所包含的元器件性质来分有线性电路和非线性电路。线性电路全部由线性或处于线性工作状态的元器件组成；电路中只要含有一个元器件是非线性的或处于非线性工作状态，那么就是非线性电路。常见的电阻、平板电容和空心电感线圈等都是线性元器件，而各种二极管、三极管等都是非线性元器件。一般来说，线性电路输出信号与输入信号的波形和频率相同，只是幅度有变化；而非线性电路输出信号与输入信号相比，波形和频率分量都不同，具有频率变换作用。非线性电路的分析不能采用叠加定理。

明确了以上的划分方法，需要说明的是，本书主要研究模拟、高频、分立元件、非线性电路，这种电路是通信系统的基本组成电路，下面我们就要简要介绍一下通信与通信系统。

1.2 通信与通信系统

1.2.1 通信与通信系统的组成

广义地讲，通信就是发送者与接收者之间的信息传递，信息的传递通过电信号（或光信号）来完成的。现代通信主要指电通信。实现信息传递所需要的设备总和称为通信系统。一个完整的通信系统包括信号源、发送设备、信道、接收设备、终端设备等，如图

1—1 所示。



图 1—1 通信系统的组成

1. 信号源

信号源包括信源和输入转换装置。信源就是信息的来源，它有不同种形式，如声音、图像、文字等；输入转换装置有话筒、摄像头等，作用是将信源输入的信息转换成待传送的电信号，如将声音变换成音频信号。

2. 发送设备

发送设备用来将待传送的电信号进行某种处理，如调制等，再放大到足够的功率送入信道，以实现信号的有效传送。发送设备输出的信号称为已调信号或已调波。

3. 信道

信道又称传送媒介，是信号传送的通道，一般分有线信道和无线信道两种。有线信道包括架空明线、同轴电缆、光缆等；无线信道包括地表、水下、大气层、宇宙空间等。利用有线信道传送信号的通信方式称有线通信，利用无线信道传送信号的通信方式称无线通信。

4. 接收设备

接收设备与发送设备的作用相反，是将信道传送过来的已调信号进行选频、放大、解调等处理，主要任务是恢复原始电信号。

5. 终端设备

终端设备的作用是将复原的电信号通过输出转换装置转换成相应的原始信息如声音、图像、文字等。终端设备有扬声器、显示屏、打印机等。

1.2.2 无线发送设备与接收设备的组成

无线发送设备和接收设备是现代通信系统的核心部件。现以无线电调幅广播发送和接收设备为例，说明它们的组成。

1. 无线电调幅广播发送设备

图 1—2 是无线电调幅广播发送设备的组成框图，图中还包括各部分输出电压的波形。无线电调幅广播发送设备各组成部分的作用如下。

(1) 高频振荡器。

高频振荡器用来产生频率稳定的高频正弦信号。

知识链接：学习任务2 正弦波振荡器

(2) 倍频器及放大器。

倍频器及放大器用来将高频振荡器产生的高频信号频率整数倍升高到所需值（载频或

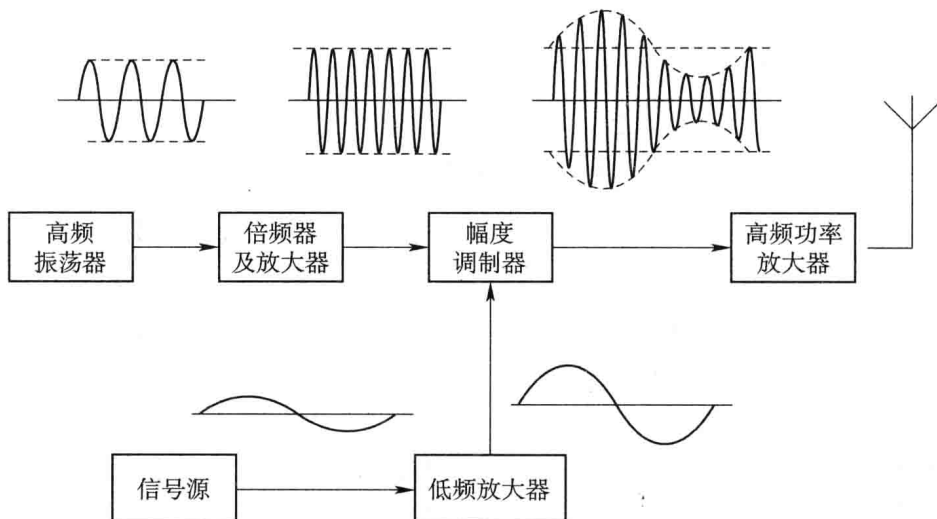


图 1—2 无线电调幅广播发送设备的组成

射频), 并将信号放大到有足够的功率推动幅度调制器。倍频及放大后的信号又称高频载波信号。

知识链接：学习任务 4 高频功率放大器

(3) 信号源。

信号源将信息转换成待传送的低频电信号, 该信号又称调制信号。

(4) 低频放大器。

低频放大器由低频电压和功率放大器组成, 用来放大信号源所产生的微弱调制信号, 并送入幅度调制器。

(5) 幅度调制器。

幅度调制器将输入的高频载波信号和低频调制信号转换成高频已调信号, 就是让高频载波信号“载上”待传送信号(调制信号), 从而实现有效发射和传送。

调制的作用就是用待传送的低频信号去改变高频信号的某一参量, 幅度调制就是用待传送的低频调制信号去控制高频载波信号的振幅, 使高频载波信号的振幅按照待传送低频信号的规律变化, 以实现调幅(AM); 角度调制就是用待传送的低频调制信号去控制高频载波信号的频率或相位, 使高频载波信号的频率或相位按照待传送低频信号的规律变化, 从而实现调频(FM)或调相(PM)。

调制过程对通信系统至关重要: 一方面, 在无线电通信系统中, 电信号是通过天线以电磁波的形式向空间辐射传送的。理论和实践证明, 电信号的波长与天线尺寸相近时(天线尺寸至少为信号波长的十分之一), 电信号才能有效地辐射传送, 而一般待传送电信号频率很低, 如一个 20kHz 的音频信号波长为 15km, 那么天线尺寸至少要做到 1.5km, 这显然是无法实现的。利用调制技术将待传送的低频信号调制到高频载波信号上, 便可实现有效地辐射。另一方面, 如果不进行调制就把信号直接辐射传送出去, 那么各电台所发出的相同频率范围的信号就会互相干扰, 混在一起, 接收设备难以将它们分开, 无法正常收

听和收看。调制作用的实质就是使相同频率范围的信号分别依托于不同频率的高频载波上,接收设备就可以分离出所需要的频率信号,互不干扰,这也是在同一信道中实现多路复用的基础。

知识链接: 学习任务5 幅度调制、解调与混频——频谱搬移电路; 学习任务6 角度调制与解调电路

(6) 高频功率放大器。

高频功率放大器用来将高频已调信号放大到一定的强度,以足够大的功率传送到天线,然后辐射到空间。

知识链接: 学习任务4 高频功率放大器

2. 无线电调幅广播接收设备

目前,无论是无线电广播、电视、通信还是雷达,都是采用超外差式调幅接收设备,组成框图如图1—3所示。图中包含各部分输出电压的波形。

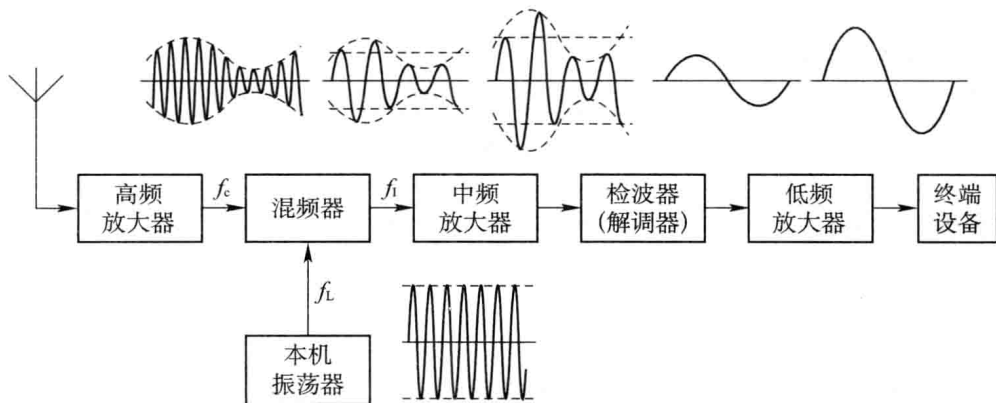


图1—3 超外差式调幅接收设备的组成框图

超外差式调幅接收设备各组成部分的作用如下。

(1) 高频放大器。

高频放大器对天线所接收的微弱电信号进行选频放大,抑制无用频率的电信号,将所需频率(载频)的电信号加以放大,得到高频已调信号。

高频放大器的负载回路一般为LC谐振回路,常称此放大器为小信号选频放大器。

知识链接: 学习任务3 高频小信号选频放大器

(2) 本机振荡器。

本机振荡器又称本振电路,它的任务是为混频器提供高频正弦电信号,以便与接收到的高频已调信号混频。

知识链接：学习任务2 正弦波振荡器

(3) 混频器。

混频器是超外差式调幅接收设备的重要组成部分，高频放大器输出载频为 f_c 的已调信号，本机振荡器产生频率为 f_L 的高频等幅信号，它们同时被送入混频器。在混频器输出端可以获得频率固定的中频已调信号，通常取中频频率为：

$$f_1 = f_L - f_c \quad (1-1)$$



提示：已调信号的载频 f_c 随不同发送设备而不同，但接收设备中混频器输出的中频信号频率是不变的（如 465kHz），这是超外差式调幅接收设备的主要特点。

知识链接：学习任务5 幅度调制、解调与混频——频谱搬移电路

(4) 中频放大器。

中频放大器为中心频率固定在 f_1 上的选频放大器，它进一步滤除无用信号，并将有用信号放大到一定值。中频放大器通常由多级调谐放大器组成。

(5) 检波器（解调器）。

检波器（解调器）对中频放大器送来的信号进行解调，还原为原来的待传送电信号，然后经低频放大器放大后传送给终端设备。因此说检波的作用与幅度调制的作用恰好相反。

知识链接：学习任务5 幅度调制、解调与混频——频谱搬移电路；学习任务6 角度调制与解调电路

(6) 低频放大器。

低频放大器用来放大信号并送入终端设备。

(7) 终端设备。

终端设备的作用就是将复原的电信号转变为原始信息。

1.3 本课程学习内容

通过无线电信号来完成的信息的传递实际就是高频已调信号的传送，通信系统发送设备和接收设备中除了低频放大器外，主要是处理高频信号的电路，包括产生高频信号的高频振荡器、小信号选频放大器、高频功率放大器、幅度调制器、检波器、混频器和倍频器等，这些都是本书要讨论的内容。

另外，在高频电路中，常常需要准确调整放大器的输出电压振幅、混频器的本振频率、振荡信号的频率或相位等，所以还要了解反馈控制电路的一些基本知识。

知识链接：学习任务7 反馈控制电路



要点总结

电子线路的划分有多种形式,本书主要研究模拟、高频、分立元件、非线性电子线路。

现代通信就是通过电信号来实现发送者与接收者之间的信息传递。实现信息传递所需要的设备总和称为通信系统。通信系统包括信号源、发送设备、信道、接收设备、终端设备等。

发送设备的主要功能是实现调制,使高频载波信号的振幅、频率或相位按照调制信号的变化规律而变化。

接收设备的主要功能是从高频调幅波信号中解调出原来的调制信号。

构成通信系统的基本电路大部分是处理高频信号的电路,本课程的学习就围绕这些电路来进行。



巩固与提高

1. 通信系统由哪几部分组成?各部分的作用如何?
2. 无线电通信系统中,发送设备由哪几部分组成?各部分的作用如何?
3. 无线电通信为什么要采用调制技术?
4. 无线电发送设备中调制的作用是什么?
5. 无线电接收设备中检波的作用是什么?

学习任务2

正弦波振荡器



学习线索

- 反馈振荡器的组成及工作原理
- LC 正弦波振荡器
- 石英晶体振荡器
- RC 振荡器



学习重点

- LC 正弦波振荡器
- 石英晶体振荡器



学习内容

振荡器是一种能自动将直流电源能量转换为一定波形的交变振荡信号能量的转换电路。它不需要外加激励信号，就能自行产生具有一定频率、波形和振幅的交流信号。

正弦波是电子技术、通信、电子测量等领域中应用最广泛的波形，能够产生正弦波的振荡器称正弦波振荡器，前面介绍的通信系统发送设备和接收设备中的载波信号源和混频信号源都是正弦波振荡器。

正弦波振荡器按照工作原理来分可分为反馈振荡器和负阻振荡器。常用的正弦波振荡器是反馈振荡器，主要包括 LC 正弦波振荡器、石英晶体振荡器和 RC 振荡器。负阻振荡器是利用负阻元器件的负阻效应产生正弦波，主要用于微波通信领域，本任务重点学习反馈振荡器。

2.1 反馈振荡器的组成及工作原理

2.1.1 反馈振荡器的组成

反馈振荡器由放大器、反馈网络、选频网络和稳幅环节组成，它的组成框图如图 2—1

所示。

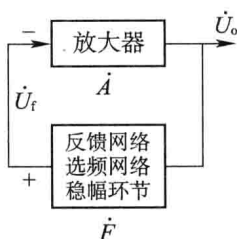


图 2—1 反馈振荡器的组成框图

1. 放大器

放大器是维持振荡器连续工作的主要环节，没有放大，信号就会逐渐衰减，不可能产生持续的振荡。放大器一般由晶体管或集成运放构成。

2. 反馈网络

反馈网络的作用是形成反馈（主要是正反馈），从而实现自激振荡。

3. 选频网络

选频网络的主要作用是产生单一频率的振荡信号，在很多振荡电路中，选频网络和反馈网络结合在一起，经选频网络的选频，使得只有某一频率的信号能反馈到放大器的输入端，而其他频率的信号被抑制。

4. 稳幅环节

稳幅环节的作用是使振荡信号幅值稳定，是振荡器持续工作的主要环节。

2.1.2 振荡的平衡条件和起振条件

1. 振荡的平衡条件

假定振荡已经建立，下面研究电路满足什么条件，才能维持振荡，即振荡的平衡条件。

图 2—1 中， $\dot{A}$ 表示放大器的放大倍数， $\dot{F}$ 表示反馈网络的反馈系数， $\dot{U}_o$ 和 $\dot{U}_f$ 分别表示输出电压和反馈电压，设输入电压为 $\dot{U}_i$ ，因已建立振荡，所以有：

$$\dot{U}_f = \dot{U}_i \quad (2-1)$$

将 $\dot{U}_o = \dot{A} \dot{U}_i$ 和 $\dot{U}_f = \dot{F} \dot{U}_o$ 代入式 (2—1)，整理可得：

$$\dot{A} \dot{F} = 1 \quad (2-2)$$

式 (2—2) 为振荡的平衡条件，它包括振幅平衡条件和相位平衡条件。

振幅平衡条件为：

$$AF = 1 \quad (2-3)$$

式 (2—3) 表明振荡平衡时反馈系数和放大倍数的乘积等于 1，使反馈电压与输入电压大小相等。

相位平衡条件为：

$$\varphi_A + \varphi_F = 2n\pi \quad (n=0, 1, 2\cdots) \quad (2-4)$$

式(2—4)表明放大器与反馈网络的总相移等于 2π 的整数倍,使反馈电压与输入电压相位相同,以保证环路构成正反馈。



提示: 振幅平衡条件和相位平衡条件必须同时满足,才能维持稳定振荡。

2. 振荡的起振条件

上面的内容是维持振荡的平衡条件,是针对振荡器已进入稳定振荡而言,假如振荡器已经有一个稳定的输出,只要满足上面的平衡条件,振荡器就能维持该输出不变。但是振荡器总有接通电源的瞬间,稳定的输出是一个从无到有的上升过程,这就是起振过程,因此,起振过程中,反馈电压幅度必须大于输入电压幅度,而反馈电压的相位同样要与放大器输入电压相位同相,这样才能完成起振,进入稳定振荡。

综上所述,振荡的起振条件如下。

振幅起振条件为:

$$AF > 1 \quad (2-5)$$

相位起振条件为:

$$\varphi_A + \varphi_F = 2n\pi \quad (n=0, 1, 2\cdots) \quad (2-6)$$

由此可见,反馈振荡器既要满足起振条件,又要满足平衡条件,同时放大器应具有非线性特性,即放大倍数随输出幅度的增大而减小的特性。这样,在起振时,放大倍数 A 较大,满足 $AF > 1$,随着输出幅度不断增大,放大倍数 A 逐渐减小,输出幅度的增大受到抑制,直至 $AF=1$,输出幅度不再增大,振荡进入稳定状态,以上所述其实就是振荡电路的稳幅环节。要使反馈振荡器能够产生持续的等幅振荡,必须满足振荡的起振条件、平衡条件,它们是缺一不可的。

此外,为获得正弦波,振荡器中要有选频网络,振荡频率通常就是由选频网络确定的。选频网络经常与反馈网络合二为一。

2.2 LC 正弦波振荡器

LC 正弦波振荡器主要用来产生高频正弦波信号,它的选频网络由电感和电容组成。常见的 LC 正弦波振荡器有变压器反馈式振荡器、电感反馈式振荡器、电容反馈式振荡器,它们的选频网络一般采用 LC 并联谐振回路。

2.2.1 LC 并联谐振回路

LC 并联谐振回路如图 2—2 所示,图中 r 表示回路的等效损耗电阻, $\dot{I}_s$ 为电流源, $\dot{U}_o$ 为回路输出电压。

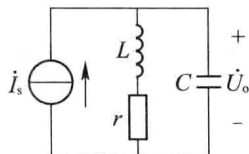


图 2—2 LC 并联谐振回路

由图可知, 电路的总阻抗为:

$$Z = \frac{1}{j\omega C} // (r + j\omega L) = \frac{\frac{1}{j\omega C} (r + j\omega L)}{\frac{1}{j\omega C} + (r + j\omega L)} \quad (2-7)$$

考虑到通常 $r \ll \omega L$, 所以有:

$$Z \approx \frac{\frac{L}{C}}{r + j(\omega L - \frac{1}{\omega C})} \quad (2-8)$$

当电路中感抗与容抗相等即 $\omega L = \frac{1}{\omega C}$ 时, 回路呈现电阻性, 产生并联谐振, 等效阻抗最大:

$$Z = \frac{L}{rC} \quad (2-9)$$

令谐振时的频率为 ω_0 , 则谐振频率等于:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \text{ 或 } f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}} \quad (2-10)$$

即当输入信号 ($\dot{I}_s$) 的频率 f_s 等于 LC 回路谐振频率 f_0 时, 电路产生并联谐振, 整个电路呈电阻性, 等效阻抗 Z 最大, 输出信号 $\dot{U}_o = \dot{I}_s Z$ 最强, 这就是选频的基础。

知识链接: 选频原理的进一步学习见学习任务 3 高频小信号选频放大电路——3.1 选频器

2.2.2 变压器反馈式振荡器

1. 电路构成

如图 2—3 (a) 所示, 变压器反馈式振荡器由晶体管构成放大器、 LC 并联谐振回路构成选频网络, 变压器 Tr 构成反馈网络, 图中的黑点表示两个电感线圈的同名端。图 2—3 (b) 是它的等效交流通路。

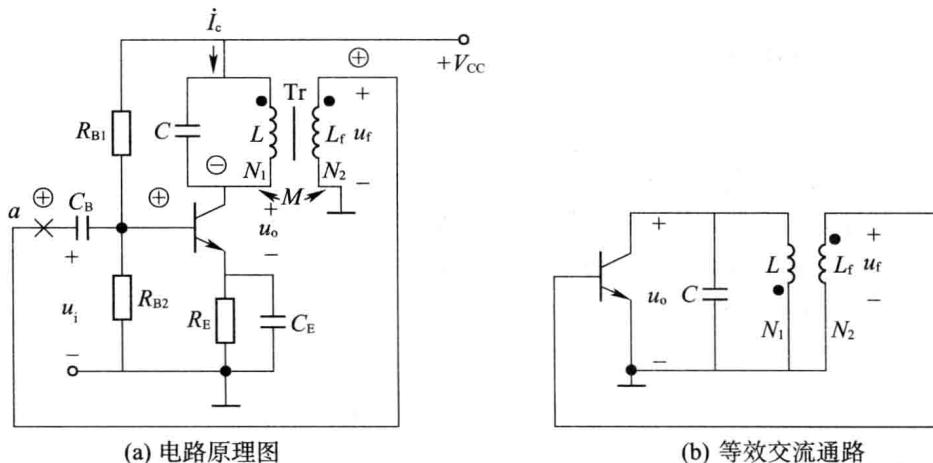


图 2—3 变压器反馈式振荡器