



电工学教学小丛书

振荡器的原理和应用

刘明亮 编

高等教育出版社

电工学教学小丛书

振荡器的原理和应用

刘明亮 编

高等教育出版社

本书是全国高等学校工科电工教材编审委员会电工学编审小组计划编写的电工学教学小丛书之一。

书中一至五章介绍各种常见的电子振荡器,包括 LC 、石英晶体、 RC 正弦波振荡器及非正弦波振荡器的基本原理、简易设计和调试方法,并有适当的例题。第六章分析了放大器中产生寄生振荡的原因和消除方法。第七章列举了在工业、农业、医疗和无线电技术等领域中电子振荡器的一些应用实例。

本书内容深浅程度恰当,与电工学课程内容衔接较好。书中各章讲解明晰。本书适于高校工科各非电类专业学生和非电类工程技术人员阅读和参考。

责任编辑 王缉惠

电工学教学小丛书
振荡器的原理和应用

刘明亮

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

二二〇七工厂印刷



开本 787×1092 1/32 印张 7 字数 145,000

1983年9月第1版 1984年8月第1次印刷

印数 00,001—6,200

书号 15010·0519 定价 1.10元

前 言

本书为高等工业学校非电类专业电工学课程的参考书。它在电工学中电子技术部分的有关章节的基础上适当增加内容的深度和广度，使读者在理论和实际应用方面能获得更多的知识。

振荡器是电子线路的一个重要组成部分。这部分内容要涉及到网络分析、反馈概念及非线性电路理论的综合运用。但在电工学教材中由于受教学时数的限制，内容一般写得很少，分析过于简单，致使学生在学习时很难透彻理解，在实际应用时则感到学的内容太少，不能满足要求。因此本书的任务是把工业中常用电子振荡器的工作原理、分析方法、电路设计和有关测量调试方面的基本知识作进一步的介绍，以满足读者的需要。

本书是电工学的参考书，不是振荡器的专著，故所用的基础知识和分析方法必须使只学过电工学的读者能看得懂，用得上。因此在讨论各种振荡电路的工作原理时，只采用相量图和简化 h 参数等效电路进行分析，而不涉及更高深的理论（例如根轨迹法、非线性微分方程等）。这样物理概念比较清楚，所得的结论和公式对一般应用已足够准确。

书中所讨论的设计方法和计算例题力求简单实用，不追求过分严密、精确。

考虑到电子振荡器在工业、农业、医疗及测量技术等领域中已获得广泛的应用，而一般教科书又很少涉及这些内容。

为了理论联系实际,扩大知识面,本书用较多的篇幅介绍了一些应用实例。

清华大学杨福生副教授对本书初稿进行了审阅,并提出了许多宝贵的意见,在此表示衷心的感谢。

限于编者的水平,书中缺点、错误在所难免,欢迎读者批评指正。

编 者

目 录

第一章 概述	1
第二章 LC 正弦波振荡器	6
2.1 LC 回路的自由振荡和谐振电路	6
1. LC 回路的自由振荡	6
2. 串联谐振电路	7
3. 并联谐振电路	12
4. 负载对谐振电路的影响	17
2.2 变压器反馈 LC 正弦波振荡器	23
1. 相位平衡条件	24
2. 起振条件	25
3. 振荡幅度的稳定	26
4. 偏置对振荡器工作的影响	30
5. 变压器反馈振荡器的其他形式	35
2.3 电感三端式正弦波振荡器	37
1. 相位平衡	37
2. 振荡频率	38
3. 起振条件	39
4. 电感三端式振荡器的其他形式	40
2.4 电容三端式正弦波振荡器	41
1. 相位平衡	41
2. 振荡频率	42
3. 起振条件	42
4. 电容三端式与电感三端式振荡器的比较	43
5. 电容三端式振荡电路的其他形式	44
2.5 场效应管振荡器	47

2.6 LC 正弦波振荡器的频率稳定问题	49
1. 影响振荡频率稳定性的诸因素	50
2. 提高振荡频率稳定度的措施	56
2.7 LC 正弦波振荡器的设计	58
1. 电路形式的选择	58
2. 选用晶体管	59
3. 晶体管偏置元件的估算	62
4. 谐振电路元件参数的计算	65
2.8 LC 振荡器的调整	68
1. 起振的调整	68
2. 振荡频率的测试和调整	69
3. 振荡波形的调整	71
第三章 石英晶体振荡器	73
3.1 石英谐振器	73
1. 石英谐振器的结构	73
2. 石英谐振器的等效电路和谐振频率	74
3. 石英谐振器的电抗曲线	77
4. 石英谐振器的频率温度特性和工作频率	78
3.2 石英晶体振荡器的电路	80
1. 并联谐振型晶体振荡器	81
2. 串联谐振型晶体振荡器	86
3. 泛音晶体振荡器	89
4. 低频晶体振荡器	92
5. 恒温控制高稳定度石英晶体振荡器	94
6. 温度补偿式石英晶体振荡器	97
3.3 晶体振荡器的测试和调整	98
1. 振荡频率的测量和调整	98
2. 激励功率的测量和调整	99
第四章 RC 正弦波振荡器	102
4.1 RC 移相振荡器	102

1. RC 移相网络	102
2. 超前型 RC 移相振荡器	105
3. 滞后型 RC 移相振荡器	109
4.2 RC 桥式振荡器	111
1. RC 串、并联选频网络的特性	111
2. RC 桥式振荡器的电路	114
3. RC 桥式振荡器的稳幅环节	116
第五章 非正弦波振荡器	121
5.1 多谐振荡器	121
1. 工作原理	121
2. 振荡频率	125
3. 改进电路	126
4. 使用集成电路的多谐振荡器	132
5.2 间歇振荡器	137
1. 脉冲变压器	137
2. 间歇振荡器工作原理	139
5.3 锯齿波发生器	143
1. 产生锯齿波电压的基本原理	143
2. 多谐振荡器型锯齿波发生器	144
3. 间歇振荡器型锯齿波发生器	148
第六章 放大器中的寄生振荡及其消除方法	150
6.1 检查寄生反馈和寄生振荡的方法	150
1. 寄生反馈的检查方法	150
2. 寄生振荡的检查方法	151
6.2 产生寄生振荡各种原因和消除寄生振荡的方法	155
1. 电源内阻形成的寄生反馈	155
2. 地线和电源引线的电阻和电感形成的寄生反馈	158
3. 杂散电场或磁场耦合形成的寄生反馈	159
4. 单级放大器中的寄生反馈	161

第七章 电子振荡器的应用	166
7.1 正弦波信号发生器	166
1. 低频信号发生器	166
2. 高频信号发生器	171
7.2 高频加热设备	173
1. 高频加热的基本原理和应用范围	173
2. 高频感应加热设备	179
3. 高频介质加热设备	183
7.3 振荡器用作无触点开关	185
1. 自动温度指示调节仪	185
2. 用于安全保护装置中的振荡开关	187
3. 自动化系统中的接近开关	189
7.4 电源变换器	190
1. 示波器用的高压直流电源变换器	191
2. 农用黑光灯电源	193
3. 脉冲医疗机	196
7.5 振荡器在电子计时器中的应用	198
1. 电子钟中的晶体振荡器	198
2. 电子表中的晶体振荡器	200
7.6 振荡器在无线电技术中的应用举例	203
1. 无线话筒	203
2. 无线电遥控	207

第一章 概 述

振荡器是通过自激方式把直流电能变换为交流电能的一种电子线路。根据振荡器输出电压波形的不同，可分为正弦波振荡器和非正弦波振荡器两大类。

振荡器在电子学领域内有着广泛的用途。在无线电技术发展的初期，它就在发射机中用来产生高频载波电压，在超外差式接收机中用作本机振荡器，成为发射和接收设备的基本部件。随着电子技术的迅速发展，振荡器的用途也越来越广泛。例如在无线电测量仪器中，它产生各种频段的正弦信号电压；在热加工、热处理、超声波加工和某些医疗设备中，它产生大功率的高频电能对负载加热；某些电气设备用振荡器做成的无触点开关进行控制；电子钟和电子手表中采用频率稳定度很高的振荡电路作为定时部件等等。

正弦波振荡器就其工作原理的不同可分为两大类。一类是利用正反馈放大器的原理构成的，称为反馈振荡器，其工作频率可自一赫以下的超低频至数百兆赫以上的超高频。另一类是利用某种器件的负阻效应产生振荡，称为负阻振荡器，它适合于工作在数百兆赫以上的超高频频段。负阻振荡器在工业电子设备内很少使用。

反馈振荡器通常包含基本放大器、选频网络、反馈网络和稳幅环节等四个基本部分，图 1-1 为其方框图(稳幅环节未画出)。

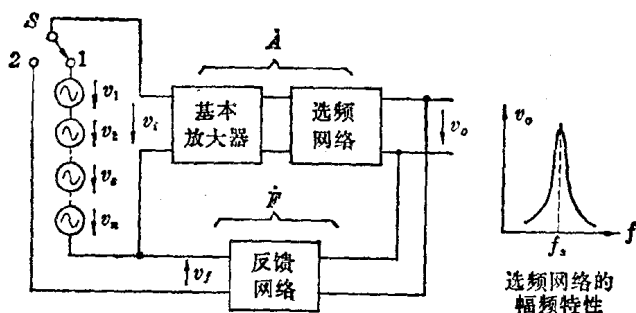


图 1-1 正弦波反馈振荡器的基本原理

设基本放大器和选频网络的总增益^①为

$$\dot{A} = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i} = A e^{j\varphi_o} \quad (1-1)$$

式(1-1)中 A 为增益的模, φ_o 为输出电压 v_o 与输入电压 v_i 的相位差。如果把开关 S 先置于位置 1, 这时 n 个不同频率的电压 $v_1, v_2, \dots, v_n$ 都送至基本放大器的输入端, 即

$$v_i = v_1 + v_2 + v_3 + \dots + v_s + \dots + v_n$$

合成电压 v_i 是非正弦波形。但是由于基本放大器输出端接有选频网络, 它只容许某一特定频率的信号 (例如频率为 f_s 的信号 v_s) 通过, 对其他频率的信号则产生极大的衰减, 故可认为除 v_s 之外, 对其他频率信号的增益 $A=0$ 。因此输出电压 v_o 就只包含频率为 f_s (称为选通频率) 的信号, 其波形当然就是正弦波。容易理解, 如果除去输入电路中其他频率的信号, 只剩下 v_s , 即 $v_i = v_s$, 则输出电压 v_o 不会改变。也就是说, 尽管输入有多个不同频率的信号, 其中只有 v_s 能起作用。这就是一般选频放大器的工作原理。

① 增益也称为放大倍数。

如果把输出电压 v_o 送至一个反馈网络。该反馈网络的输出为 v_f 。 $\dot{V}_f$ 与 $\dot{V}_o$ 之比称为反馈系数,以 $\dot{F}$ 表示,即

$$\dot{F} = \frac{\dot{V}_f}{\dot{V}_o} = F e^{j\varphi_f} \quad (1-2)$$

式(1-2)中, F 为反馈系数的模, φ_f 是反馈电压 $\dot{V}_f$ 与选频网络输出电压 $\dot{V}_o$ 的相位差,即反馈网络引起的相位移。

当满足条件

$$\dot{A} \cdot \dot{F} = A \cdot F e^{j(\varphi_a + \varphi_f)} = 1$$

即 $\frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i} \cdot \frac{\dot{V}_f}{\dot{V}_o} = 1$ 时,有 $\dot{V}_f = \dot{V}_i = \dot{V}_s$, 也就是说反馈电压 $\dot{V}_f$

与信号电压 $\dot{V}_s$ 的数值和相位都完全相同,所以即使把开关 S 置于位置 2,除去外加激励信号,输出电压 $\dot{V}_o$ 也不会改变。但这时电路工作情况却发生了质的变化,从选频放大器变成自激振荡器了。

把式(1-2)分开写成

$$A \cdot F = 1 \quad (1-3)$$

及 $\varphi = \varphi_a + \varphi_f = 2n\pi \quad (n=0,1,2,\dots)$ (1-4)

式(1-3)称为振幅平衡条件。 $A \cdot F$ 为反馈网络输出电压与基本放大器输入电压之比 ($A \cdot F = V_f/V_i$),称为环路增益。当环路增益等于 1 时,从反馈网络输出的电压 V_f 数值刚好符合基本放大器对输入电压 V_i 的要求,故振荡可以维持不变。式(1-4)是相位平衡条件。它说明如果包括选频网络在内的放大器的相位移与反馈网络引起的相位移之和等于 2π 的整数倍时,反馈电压 $\dot{V}_f$ 与放大器要求的输入电压 $\dot{V}_i$ 相位相同,因而形成正反馈。

实际上,为了能可靠的产生自激振荡,环路增益 $A \cdot F$ 等

于1是不够的,而应该设计得大于1. 即

$$A \cdot F > 1 \quad (1-5)$$

式(1-5)称为起振条件。满足这个条件时,振荡器不需要先用外加信号来激励。把反馈网络的输出电压直接连至基本放大器的输入端,这时如果由于任何原因(例如电源接通的瞬变过程、电路元件的热噪声^①等)在电路中引起某种电扰动,这种电扰动往往是非周期性的,它的频谱分布极宽,其中必然包含有频率为选通频率 f_s 的电压分量,这个分量被选频放大器放大,经反馈而形成闭合循环。如果 $A \cdot F > 1$,则反馈网络的输出电压就会大于基本放大器原来的输入电压,所以每循环一次,振幅就加大一次。因此,即使起始的电扰动非常微弱,经过多次循环放大,也可以产生很强的振荡电压,这个过程称为振荡器的自激。

产生自激后,振荡电压会不会逐步增强到无穷大呢?不会的。因为:第一,电源电压是一定的,振荡电压的增长必然要受电源电压的限制;第二,振荡器电路中一般具有稳幅环节,它能自动的调整环路增益 $A \cdot F$ 的数值,使之随振荡幅度的增大而减小,当 $A \cdot F$ 减小到1时,达到振幅平衡状态,此时振荡电压就稳定不变了。

在 LC 振荡器中,稳幅作用通常是利用基本放大器的非线性特性来实现的,称为内稳幅。在 RC 振荡器中,常用某种非线性电阻元件接入电路适当位置作为稳幅环节,或者采用某种自动增益控制电路,称为外稳幅。

最后应该指出,加入选频网络是产生正弦波振荡的必要

^① 热噪声是由电路中电阻内电子的不规则运动引起的一种不规则的电压变化。

条件。如果除去这个网络，那么满足自激振荡条件的频率将不止一个，而是许多个，因此输出的波形就会变为非正弦波了。大家熟知的多谐振荡器就是一个例子。 LC 振荡器的选频网络采用 LC 谐振电路，其工作频率可以从数十千赫至数百兆赫，输出高频功率可从数毫瓦至数十千瓦；当振荡器工作在超低频至一兆赫的频率范围内时，常使用 RC 选频网络，成为 RC 振荡器，这种振荡器输出功率一般在数瓦以下。

第二章 LC 正弦波振荡器

2.1 LC 回路的自由振荡和谐振电路

LC 正弦波振荡器的选频网络是用 LC 谐振电路构成的。为了能较深入的分析 LC 振荡电路，很有必要复习并加深理解电工学中有关谐振电路的基本知识。

1. LC 回路的自由振荡

图 2-1 是一个 LC 振荡回路，其中电阻 r 代表电感的损耗（电容的损耗通常可忽略不计）。若开关 S 先置于位置 1，电容器充电，稳态电压为 E 。再把 S 置于位置 2，则由于电场

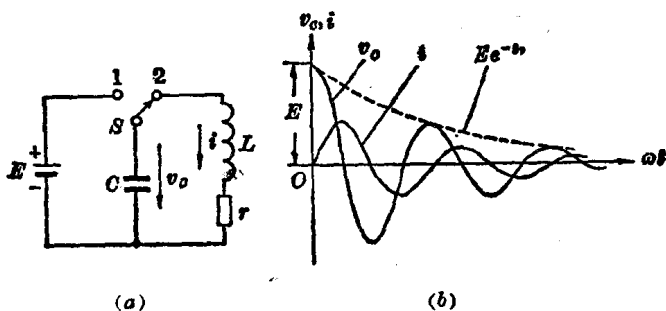


图 2-1 LC 回路的自由振荡
(a) LC 回路 (b) 自由振荡的波形

能量与磁场能量不断互相转换，回路中产生所谓自由振荡，其电压和电流的波形如图 2-1(b) 所示，这是一个振幅按指数规律逐渐衰减的正弦波。可以证明，回路中电压 v_c 和电流 i 可分别表示为

$$v_c \approx E e^{-\delta t} \cos \omega_0 t \quad (2-1)$$

$$i = \frac{E}{\omega_0 L} e^{-\delta t} \sin \omega_0 t \quad (2-2)$$

式中, $\delta = \frac{r}{2L}$ 称为回路的衰减系数,

$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{r}{2L}\right)^2}$ 为自由振荡的角频率。

实际上电阻 r 通常很小, 故

$$\omega_0 \approx \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

由于回路内不可避免存在损耗, 故振荡会逐渐衰减。从式(2-2)可以看出, 电阻 r 与电感 L 的比值越大, 则衰减越快。

容易理解, 要维持振荡幅度不变, 就必须给回路不断地补充电能, 用以补偿电阻 r 的能量损耗。LC 反馈振荡器正是基于这种原理而工作的。

2. 串联谐振电路

在图 2-2 所示的 r 、 L 、 C 三元件的串联电路中, 在外加电压 $\dot{V}$ 的作用下, 流过电路的电流为

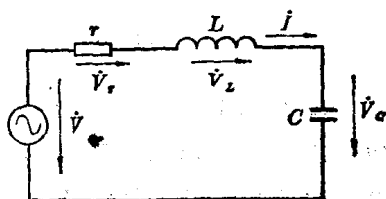


图 2-2 串联谐振电路

$$\dot{I} = \frac{\dot{V}}{Z} = \frac{\dot{V}}{r + j(x_L - x_C)} = \frac{\dot{V}}{r + jx} \quad (2-3)$$

式中 Z 为串联电路的阻抗, 电流的数值为

$$I = \frac{V}{\sqrt{r^2 + (x_L - x_C)^2}} = \frac{V}{\sqrt{r^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} \quad (2-4)$$

电流 $\dot{I}$ 与电压 $\dot{V}$ 的相位差为

$$\varphi = \arctg \frac{x_L - x_C}{r} = \arctg \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{r} \quad (2-5)$$

从式(2-4)及式(2-5)可以看出, 当 r, L, C 数值一定时, 感抗 x_L 、容抗 x_C 、阻抗 z 、电流 I 及相位差 φ 都是角频率 ω 的函数, 图 2-3 画出了它们的数值与频率 ω 的关系。

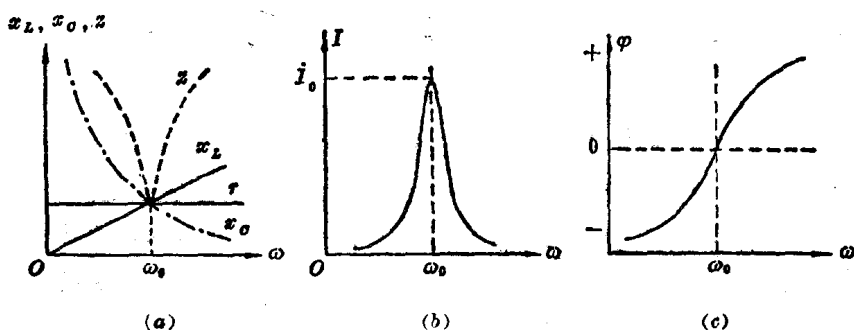


图 2-3 串联电路的谐振曲线

当角频率为某一数值 ω_0 时, 电路中感抗 x_L 和容抗 x_C 数值相等, 即 $x_L = x_C$, 这时 $z = r$, 电路中电流 I 达到最大值, 并且电流 $\dot{I}$ 与电压 $\dot{V}$ 同相, 即 $\varphi = 0$. 这种状态称为串联谐振。谐振时的电流用 I_0 表示。

$x_L = x_C$ 是产生串联谐振的条件。从谐振条件可以求出发生谐振时的角频率 ω_0 。由于谐振时

$$\omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C}$$

故

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$