

584

7M1-43

Lf36
2

电工电子学(下)

主 编 吕厚余

副主编 申群富 肖蕙蕙

重庆大学出版社

内 容 简 介

本书内容包括:正弦波振荡器、直流稳压电源、变流技术、三相正弦交流电路、变压器、电动机、继电器接触器控制、可编程序控制器、电工测量及仪表、安全用电,另外还附有部分习题供学习参考。

本书按新的教学体系:“电路—电子—电力电子—电机与控制—仪表及测量—安全用电”编写,适合工科院校非电类师生教学使用,也可供广大工程技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

电工电子学(下)/吕厚余主编. —重庆:重庆大学出版社,2001.7
ISBN 7-5624-2297-4

I. 电... II. 吕... III. ①电工学②电子学 IV. TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 18187 号

电工电子学(下)

主 编 吕厚余

副主编 申群富 肖葱葱

责任编辑 谭 敏

*

重庆大学出版社出版发行

新华书店经销

重庆华林印务有限公司印刷

*

开本:787×1092 1/16 印张:13 字数:324 千

2001 年 7 月第 1 版 2001 年 7 月第 1 次印刷

印数:1—10 000

ISBN 7-5624-2297-4/TM·67 定价:36.00 元(上、下册)

(本册定价:18.00 元)

序

当今世界,科学技术突飞猛进,知识经济已见端倪,综合国力的竞争日趋激烈。国力的竞争,归根结底是科技与人才的竞争。邓小平同志早已明确指出:科技是现代化的关键,而教育是基础。毫无疑问,高等教育是科技发展的基础,是高级专门人才培养的摇篮。我国高等教育在振兴中华、科教兴国的伟大事业中担负着极其艰巨的任务。

为了适应社会主义现代化建设的需要,在1993年党中央、国务院颁布《中国教育改革和发展纲要》以后,原国家教委全面启动和实施《高等教育面向21世纪教学内容和课程体系改革计划》,有组织、有计划地在全国推进教学改革工程。其主要内容是:改革教育体制、教育思想和教育观念;拓宽专业口径,调整专业目录,制定新的人才培养方案;改革课程体系、教学内容、教学方法和教学手段;实现课程结构和教学内容的整合与优化,编写、出版一批高水平、高质量的教材。

地处巴山蜀水的重庆大学,是驰名中外的我国重要高等学府。重庆大学出版社是一个重要的大学出版社,工作出色,一贯重视教材建设。从90年代初期开始实施“立足西部,面向全国”的战略决策,针对当时国内专科教材匮乏的情况,组织西部地区近20所院校编写出版机械类、电类专科系列教材,以后又推出计算机、建筑、会计类专科系列教材,得到原国家教委的肯定与支持。在1998年教育部颁布《普通高等学校本科专业目录》之后,重庆大学出版社立即组织西部地区高校的数十名教学专家反复领会教学改革精神,认真学习全国的教育改革成果,充分交流各校的教学改革经验,制定机械设计制造及其自动化专业的教学计划和各门课程的教学大纲,并组织编写、出版机械类本科系列教材。为了确保教材的质量,重庆大学出版社采取了以下措施:

- 发挥教育理论与教育思想的指导作用,将教学改革思想和教学改革成果融入教材的编写之中。
 - 根据人才培养计划中对学生知识和能力的要求,对课程体系和教学内容进行整合,不过分强调每门课程的系统性、完整性,重在实现系列教材的整体优化。
 - 明确各门课程在专业培养方案中的地位 and 作用,理顺相关课程之间的关系。
 - 精选教学内容,控制教学学时数,重视对学生自主学习能力、分析解决工程实际问题能力和创新能力的培养。
 - 增强CAD、CAM的内容,提高教材的先进性;尽可能运用CAI等现代化教学手段,提高传授知识的效率。
 - 实行专家审稿制度,聘请学术水平高、事业心强、长期活跃在教学改革第一线的专家审稿,重点审查书稿的学术质量和是否具有特色。
- 这套教材的编写符合教学改革的精神,遵循教学规律和人才培养规律,具有明显的特色。

与出版单科教材相比,有计划地将教材成套推出,实现了整体优化,这富有远见。

经过几年的艰苦努力,这套机械类本科教材已陆续问世了。它反映了西部高校多年来教学改革与教学研究的成果,它的出版必将为繁荣我国高等学校的教材建设作出积极的贡献,特别是在西部大开发的战略行动中,起着十分重要的作用。

高等学校的教学改革和教材建设是一项长期而艰巨的工作,任重道远,不可能一蹴而就。我希望这套教材能够得到读者的关注与帮助,并希望通过教学实践与读者不吝指教,逐版加以修订,使之更加完善,在高等教育改革的百花园中齐花怒放!我深深为之祝愿。

中国科学院院士

杨叔子

2000年4月28日

前 言

众所周知,电工科学是研究电磁现象及其应用的科学,电气技术是以电工科学的理论和方法为基础而形成的工程技术。电工学课程,是高等院校非电专业的一门重要的技术基础课,肩负着使学生获得电气技术必要的基本理论、基本知识和基本技能的任务。目前,国内使用的教材,大多分为“电工技术(上册)”与“电子技术(下册)”,电工技术与电子技术的内容相对独立。在过去相当长的时间里,这是行之有效的教学体系。近年来,由于高新技术的迅速发展和向各技术领域的交叉渗透,使电气技术得到革新并取得向前发展的生命力。从1957年第一只晶闸管诞生以后,电子技术逐步形成了两个分支:以晶体集成电路为核心形成信息处理的电子信息;以晶闸管及其派生器件为核心形成对电能进行处理的电力电子技术。电力电子技术是强电(电力)与弱电(电子)相结合的交叉边缘技术,是电力、控制和电子的技术融合。电气技术发展到今天,传统的电工技术与电子技术越来越融会、交叉,这样,原有的体系给教学带来了诸多的不便。例如,上册在讲交流电机调速时,由于此时还没有讲授电力电子技术内容,因此,对变频调速不便展开讨论,而变频调速又是现代交流电机调速中非常重要的内容。仪表测量部分,也难于讲授数字仪表及智能仪表的内容。本教材基本上以“电路—电子—电力电子—电机及控制—仪表及测量—安全用电”这样的体系进行编写,并加强了内容的联系。例如,三相电路的内容就安排在电动机前讲授。从电气技术发展的趋势出发,调整了传统内容,新加了如可编程序控制器应用、可编程逻辑阵列等体现先进性的内容。再考虑到教学的安排,本教材定名为《电工电子学(上)》、《电工电子学(下)》,以便于使用单位灵活处理。《电工电子学(上)》的内容有电路的基本定律及分析方法、正弦交流电路、电路的暂态响应、半导体器件、简单放大器、负反馈放大器和集成运算放大器、组合逻辑电路、时序逻辑电路、数/模和模/数转换等内容;《电工电子学(下)》的内容有正弦波振荡器、直流稳压电源、变流技术、三相正弦交流电路、变压器、电动机、接触器继电控制、可编程序控制器、电工测量及仪表、安全用电等内容。

本书为《电工电子学(下)》,与《电工电子学(上)》配套使用。本书由重庆大学吕厚余教授主编,负责全书的组织、统稿和定稿。第一副主编是桂林电子工业学院的申群富老师,第二副主编是重庆工学院的肖蕙蕙老师。昆明理工大学的朱荣老师编写了第10、11章;吕厚余编写了第13章;肖蕙蕙编写了第14、15章;申群富编写了第16、17章;西南农业大学的祝诗平老师编写了第12、18、19章。

本书由侯振程教授主审。侯振程教授对书稿提出了许多宝贵意见,在此致以深切的谢意。由于编者水平有限,书中难免存在不少缺点和错误,敬请读者提出批评和改进意见。

编 者
2000年10月

目 录

第10章 正弦波振荡器	1
10.1 自激振荡条件	1
10.2 LC 选频网络和 LC 振荡器	3
10.3 RC 选频网络与 RC 振荡器	7
习题	10
第11章 直流稳压电源	13
11.1 整流及滤波电路	13
11.2 直流稳压电源	18
11.3 集成线性稳压电源	20
习题	22
第12章 变流技术	25
12.1 电力电子器件	25
12.2 单相可控整流电路	30
* 12.3 三相可控整流电路	34
12.4 波形畸变信号的谐波分析	39
12.5 晶闸管的触发电路	48
* 12.6 逆变电路简介	55
习题	60
第13章 三相正弦交流电路	64
13.1 对称三相电路	64
13.2 三相电路负载的联接	67
习题	71
第14章 变压器	73
14.1 交流铁芯线圈	73
14.2 变压器的基本结构和工作原理	75
14.3 特殊变压器	81
14.4 变压器的铭牌数据	83
习题	84
第15章 电动机	86
15.1 三相异步电动机的基本结构和工作原理	86
15.2 三相异步电动机的电磁转矩和机械特性	91
15.3 三相异步电动机的起动与反转	95
15.4 三相异步电动机的调速	100

15.5	三相异步电动机的制动	102
15.6	三相异步电动机的铭牌数据	103
15.7	三相异步电动机的选择	104
15.8	单相异步电动机	105
*15.9	直流电动机	108
	习题	115
第16章	继电器接触器控制	117
16.1	常用低压手动和自动电器	117
16.2	鼠笼式异步电动机直接起动控制电路	124
16.3	鼠笼式异步电动机的正、反转控制电路	127
16.4	行程开关及行程控制	128
16.5	时间继电器及时间控制	130
	习题	133
第17章	可编程序控制器	135
17.1	可编程序控制器的产生	135
17.2	可编程序控制器的组成及工作原理	136
17.3	可编程序控制器的编程语言	142
17.4	可编程序控制器的指令系统	149
17.5	基本电路的编程	158
	习题	160
第18章	电工测量及仪表	164
18.1	电工测量及仪表的基础知识	164
18.2	电工测量仪表的型式	167
18.3	各种电量的测量	171
18.4	非电量的电测法	180
18.5	电工测量新技术	181
	习题	183
第19章	安全用电	185
19.1	安全用电的意义	185
19.2	触电及其对人体的损伤	185
19.3	电气设备的安全保护	188
19.4	电气产品的防静电知识	191
19.5	防雷电破坏措施	191
	习题	194
附录1	电气设备常用基本图形符号	195
附录2	电气设备常用基本文字符号	198
附录3	常用辅助文字符号	199
	参考文献	200

第 10 章 正弦波振荡器

不需要外加输入信号,只靠本身就能产生并输出一定频率和幅度的正弦交流信号的装置,称为正弦波振荡器,亦称为正弦波发生电路。正弦波振荡器的本质是把直流电能(来自直流电源)转换为交流电能,它能产生频率范围宽(从 1 赫兹以下到几百兆赫兹以上)、输出功率大(几毫瓦到几十千瓦)的正弦波信号,广泛应用于通信及无线电广播、工业生产、检测技术、遥控技术、热处理、电加工等领域。

本章先介绍产生正弦波振荡的条件,正弦波振荡器的组成,再介绍常用 RC 振荡器和 LC 振荡器。

10.1 自激振荡条件

10.1.1 自激振荡

通过第 6 章的讨论我们知道,负反馈可以改善放大器的性能。但如处理不当,则可能发生自激振荡,破坏放大器的正常工作。图 10.1.1 为负反馈放大电路的方框图,设电路中的电量均为正弦量, $\dot{X}_i$ 为输入信号, $\dot{X}_o$ 为输出信号, $\dot{X}_f$ 为反馈信号, $\dot{X}_d$ 为偏差信号, $\dot{A}$ 为放大器的传递函数(电压增益), $\dot{F}$ 为反馈环节的传递函数(反馈系数)。当放大器不加输入信号,即 $\dot{X}_i = 0$ 时,仍然有稳定的输出,这种现象称为自激振荡。这就要求在 $\dot{X}_i = 0$ 时,偏差信号 $\dot{X}_d$ 经反馈回路传递一周后得到的 $\dot{X}'_d$ 应与 $\dot{X}_d$ 完全相同,即不仅幅值要相等,而且相位也应相同。从图 10.1.1 可以得到 $-\dot{X}_f = \dot{X}_d$, 因为 $\dot{X}_f = \dot{A}\dot{F}\dot{X}_d$, 因此,可以得到自激振荡的条件为 $\dot{A}\dot{F} = -1$ 。

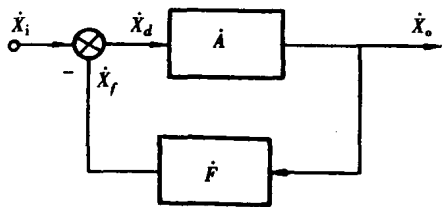


图 10.1.1 负反馈放大电路的方框图

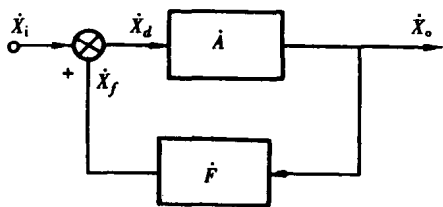


图 10.1.2 正反馈放大电路的方框图

对于负反馈放大器,不希望出现自激振荡。至于如何采取措施消除负反馈放大器的自激振荡,由于不属本书讨论的内容,就不再展开了。

如将图 10.1.1 中反馈信号 $\dot{X}_f$ 的极性由“-”改为“+”,偏差信号 $\dot{X}_d = \dot{X}_i + \dot{X}_f$, 这样,就成为正反馈放大器,如图 10.1.2 所示。同样,当输入 $\dot{X}_i = 0$ 时,该放大器仍有稳定的正弦输出,则放大器处于自激振荡。这种不需外加输入信号就能输出一定频率和幅值的正弦交流信号的装置称为正弦波振荡器。

10.1.2 自激振荡的条件

从图 10.1.2 可知,当 $\dot{X}_i = 0$ 时,正反馈要维持自激振荡,要求 $\dot{X}_f = \dot{X}_d$,因为 $\dot{X}_f = \dot{A}\dot{F}\dot{X}_d$,从而得到正弦波振荡器自激振荡的条件为

$$\dot{A}\dot{F} = 1 \quad (10.1.1)$$

设 $\dot{A} = |\dot{A}|e^{j\varphi_A}$ 、 $\dot{F} = |\dot{F}|e^{j\varphi_F}$,自激振荡的条件还可表示为

(1) 相位条件:反馈信号与输入信号同相, $\varphi_A + \varphi_F = 2n\pi$ (n 取整数),即必须是正反馈。

(2) 幅值条件:放大倍数与反馈系数的乘积的模为 1,即 $|\dot{A}\dot{F}| = 1$ 。

要使反馈放大电路产生自激振荡,必须同时满足这两个条件。相位条件实质上是正反馈,虽然负反馈也产生自激振荡(原因是放大电路产生附加相移在某一频率下满足了相位条件),一般说来引入正反馈产生自激振荡更容易一些,因此,本章讨论的振荡器都采用正反馈形式。应注意幅值条件是指正弦波已产生且电路已进入稳定状态而言的,如果电路的 $|\dot{A}\dot{F}|$ 恒为 1,它只能维持振荡,因为电路刚接通时,放大电路的输入信号、输出信号、反馈信号都为零,受 $|\dot{A}\dot{F}| = 1$ 的限制,振荡建立不起来。因此,要考虑如何使振荡器自行起振。

10.1.3 选频、起振与稳幅

实际振荡电路不需要外加激励信号,在振荡电路接通电源瞬间,放大电路中存在噪声或瞬间扰动,它是非正弦信号,频谱中含有振荡频率 f_0 ,它是电路起振的原始信号。因此,正弦波振荡器中应设计一个选频网络,将频率 f_0 从频谱中选出来,衰减 f_0 以外的其他成分。否则电路会在较宽的频段内产生自激振荡,输出端将出现类似方波那样含有多个频率的振荡波形,而不能获得一个稳定频率的正弦波。因此,振荡器一定要设置选频网络。

振荡器接通电源产生的信号或振荡器内部的噪声幅值较小,如前所述,如振荡器的 $|\dot{A}\dot{F}|$ 恒为 1,振荡是不能建立的。因此,为了起振,除相位要满足 $\varphi_A + \varphi_F = 2n\pi$,幅值还必须满足 $|\dot{A}\dot{F}| > 1$ 的条件。因此,振荡器还必须设置如第 5、6 章所介绍的放大器,使起振的条件 $|\dot{A}\dot{F}| > 1$ 得到保证。

当满足了起振条件和相位条件(即振荡器一定要形成正反馈),又设置了选频网络后,在输出端将获得所需频率 f_0 的信号,这个信号将随时间逐渐增大,直至使放大器进入饱和或截止区,输出的波形将出现失真。为此,振荡器还必须要有稳幅环节,使幅值最终满足在 $|\dot{A}\dot{F}| = 1$ 的平衡条件下,输出波形基本不失真。稳幅的作用还应在振荡器受到干扰时,维持输出信号幅值不变。例如,某些振荡器的放大环节引入非线性反馈,振荡幅值小时减少负反馈,幅值大时增加负反馈。

综上所述,正弦波振荡器一般由放大、反馈、选频、稳幅四个基本部分组成。

判断电路是否能起振,先看正弦波振荡器的组成,即放大电路、反馈网络、选频网络,判别它是否满足相位条件,若不满足,认为电路不能起振;若满足,再判别它是否满足幅值条件,同时满足两个条件才能认为电路能起振。为了稳定输出波形,还需要稳幅环节。此外,放大电路必须有供给能量的电源、静态工作点正确、电路结构合理等条件,以保证放大电路具有放大作用。

常见的正弦波振荡器按组成选频网络的元件类型不同有 RC 正弦波振荡器,LC 正弦波振

荡器和石英正弦波振荡器。

思考与练习

10.1.1 振荡电路与放大电路的主要区别是什么？

10.1.2 产生自激振荡的条件是什么？正反馈产生自激振荡与负反馈产生自激振荡二者之间有何区别？

10.1.3 正弦波振荡器由哪几部分组成？选频电路起什么作用？没有选频电路是否也能产生自激振荡？

10.2 LC 选频网络和 LC 振荡器

LC 正弦波振荡器的选频网络由电感和电容组成，一般用于高频（大于 1MHz，高频可达 1000MHz 以上）的正弦波信号，例如高频淬火炉中的加热源，收音机中的本机振荡电路等。由于普通集成运放频带窄，高速集成运放价格较贵，所以 LC 正弦波振荡器常用分立元件组成。

10.2.1 LC 选频网络

图 10.2.1 是一个 LC 并联谐振回路，其中 R 表示电感回路损耗的等效电阻，按第 2 章 2.5.3 节对谐振的分析方法，我们先分析谐振频率及 LC 回路特性，再用 LC 选频网络、反馈网络和放大电路组成具体的振荡器。由图 10.2.1 可知，LC 并联回路的等效阻抗为

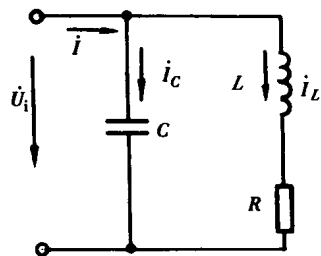


图 10.2.1 LC 并联谐振回路

$$Z = \frac{-j \frac{1}{\omega C} (R + j\omega L)}{-j \frac{1}{\omega C} + R + j\omega L}$$

通常 $R \ll \omega L$ ，所以

$$Z \approx \frac{-j \frac{1}{\omega C} j\omega L}{R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)} = \frac{L/C}{R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)}$$

当并联回路等效阻抗的虚部系数为零，则电压与电流的相位相同，发生并联谐振。由上式可知，LC 并联谐振回路具有如下特点：

1. 回路的谐振频率为

$$\omega = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \text{或} \quad f = f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (10.2.1)$$

2. 谐振时，回路的等效阻抗呈纯电阻性，其值最大，即

$$Z_0 = \frac{L}{RC} = Q\omega_0 L = \frac{Q}{\omega_0 C} \quad (10.2.2)$$

式中 $Q = \omega_0 L/R = 1/\omega_0 CR$ 称回路品质因素，用于评估电路中损耗大小，一般 Q 值在几十到几百范围内。 R 越小， Q 值越大，谐振时阻抗也越大。图 10.2.2 表明当外加信号的频率 $f = f_0$

时,产生并联谐振, Q 值越大, LC 并联回路的 $|Z|$ 越尖锐,相角随频率变化越急剧,选频效果好。

3. 回路电流是输入电流的 Q 倍,电流可表示为

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}}{Z_0} \quad (10.2.3)$$

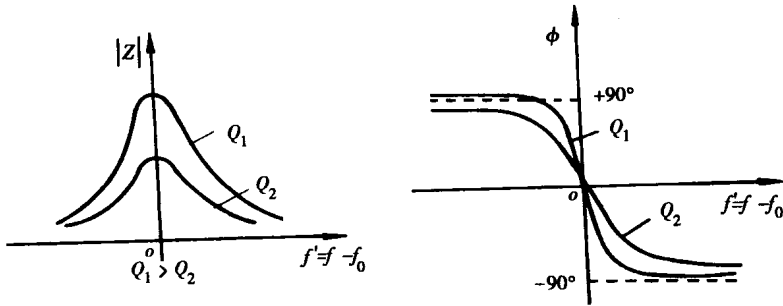
谐振时流过电容的电流之模为

$$|\dot{I}_C| = \omega_0 C |\dot{U}| \quad (10.2.4)$$

将(10.2.3)代入(10.2.4)得

$$|\dot{I}_C| = \omega_0 C |\dot{I} Z_0| = \omega_0 C Z_0 |\dot{I}| = Q |\dot{I}| \quad (10.2.5)$$

通常 $Q \gg 1$, 所以 $|\dot{I}_C| \approx |\dot{I}_L| \gg |\dot{I}|$, 谐振时, LC 并联回路的电流比输入电流大得多,即谐振回路的外界影响可以忽略,因此,并联谐振也称为电流谐振。



(a) 阻抗频率特性

(b) 相频特性

图 10.2.2 LC 并联回路的频率特性

10.2.2 LC 正弦波振荡器

常见的 LC 正弦波振荡器有变压器反馈式、电感三点式和电容三点式三种,其共同点是选频网络由 LC 并联谐振回路构成。下面重点介绍前两种振荡器。

1. 变压器反馈式 LC 正弦波振荡器

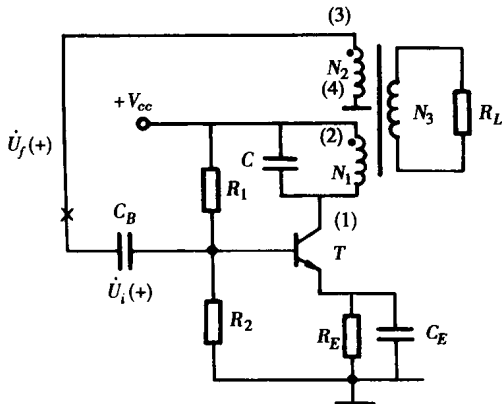


图 10.2.3 变压器反馈 LC 正弦波振荡器

图 10.2.3 是一种变压器反馈 LC 正弦波振荡器,它由放大电路、变压器、反馈网络和 LC 选频网络三部分组成。变压器原边绕组 N_1 和电容 C 并联构成选频网络,替代原放大电路中的集电极电阻作为负载,副边绕组 N_2 产生感应电压通过耦合电容 C_B 送回放大电路输入端形成反馈,副边绕组 N_3 上的正弦波信号送入负载, C_E 是电阻 R_E 的旁路电容。

因为发生谐振,选频电路呈纯电阻性。因此,在分析相位条件时,可采用瞬时极性法,图中在反馈处断开($\times$),设 $\dot{U}_i$ 极性为(+),晶体管 T 集电极电位 $\dot{U}_c$ 与 $\dot{U}_i$ 反相,经绕组 N_1 、绕组 N_2 引回反馈信号 $\dot{U}_f$ 极性也为(+),因 $\dot{U}_i$ 与 $\dot{U}_f$ 同相为正反馈,即 $\varphi_A + \varphi_F = 2\pi$,其中 φ_F 为反馈网络的相移。

分析中应注意, LC 并联电路按谐振时呈电阻性, 电容 C_B 和 C_E 足够大对交流信号可视为短路, 它们都不产生附加相移。正弦波振荡器起振的幅值条件是 $|\dot{U}_f| > |\dot{U}_i|$ (稳定时幅值条件为 $|\dot{U}_f| = |\dot{U}_i|$), 只要变压器的变比适中, 三极管和变压器原、副绕组之间的互感等参数适中, 幅值条件一般容易满足。当 Q 值很高时, 振荡频率基本等于 LC 并联回路的谐振频率, 即

$$f_0 \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (10.2.6)$$

这种振荡器的稳幅是利用放大电路的非线性实现的, 缺点是变压器原、副边之间的耦合较松, 且要求正确区分同名端, 解决办法是用自耦变压器。

2. 电感三点式正弦波振荡器

在图 10.2.3 中, 由于变压器原边绕组的 (2) 端接直流电源, 反馈绕组 N_2 的 (4) 端接地, 对交流信号, 二者等效。可以将 N_1 和 N_2 合并成一个带中心抽头的自耦变压器绕组, 再与电容构成并联谐振电路, N_1 、 N_2 按同一方向绕制而成, 在适当地方 (一般匝数占线圈匝数的 $1/4 \sim 1/8$) 抽头, 避免了同名端易搞错的问题, 且 N_1 、 N_2 耦合较紧, 更容易起振。在图 10.2.3 基础上构成图 10.2.4 的电路, 由于这种并联电路中电感有首端、中间抽头和尾端三个端点, 因此, 称为电感三点式正弦波振荡器。

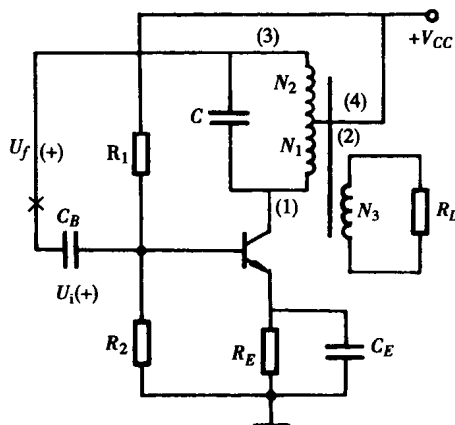


图 10.2.4 电感三点式正弦波振荡器

下面具体分析图 10.2.4 电路的相位条件。将反馈从图中 (x) 处断开, 设 $\dot{U}_i$ 为 (+), 三极管集电极为 (-), 对交流信号, 抽头处可视为接地, 则 (1) 端与 (3)

端相位相反, C_B 和 C_E 视为短路, 即 $\dot{U}_f$ 为 (+), 与 $\dot{U}_i$ 同相, 满足相位条件。至于幅值条件, 只要选取一定的三极管 β (数十倍) 值, 并联 LC 电路的 Q 值不太低, 且谐振时阻抗值在千欧姆以上, $|\dot{A}\dot{F}|$ 大于 1, 幅值条件也容易满足。

电感三点式正弦波振荡器中电感三个端点的相位关系有以下两种情况: (1) 若电感中间抽头交流接地, 则首端与尾端相位相反; (2) 若电感的首端或尾端交流接地, 则其他两个端点相位相同。

电感三点式正弦波振荡器振荡频率基本等于 LC 并联回路的谐振频率, 即

$$f_0 \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_1 + L_2 + 2M)C}}$$

其中 L_1 、 L_2 分别为 N_1 、 N_2 的电感, M 为 L_1 与 L_2 之间的互感, 一般采用改变电感进行粗调, 改变电容实现细调。这种电路的特点是容易起振, 采用可变电容器使频率可调范围宽 (从数百千赫到数十兆赫), 适用于频繁改变频率的地方 (如收音机、信号发生器等), 但由于反馈电压取自 L_2 , 它对高次谐波阻抗大, 因此, 输出波形中含高次谐波, 波形较差。

3. 电容三点式正弦波振荡器

电路如图 10.2.5 所示, 反馈电压取自电容, 因为容抗随频率增大而减小, 高次谐波被抑制, 输出波形较好。电路的相位条件可以用瞬时极性法判别, 方法与电感三点式类同, 留给读

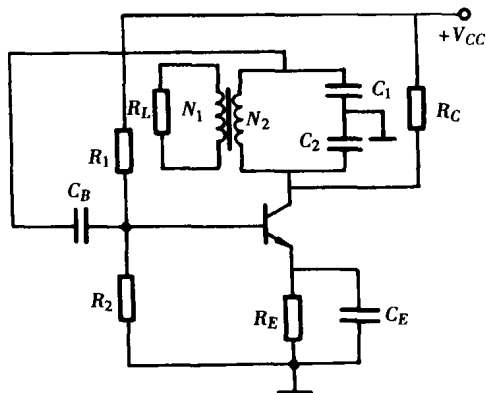


图 10.2.5 电容三点式正弦波振荡器

者自己分析。至于幅值条件,只需将三极管 β (数十倍) 值选大一些,并适当选取比值 C_2/C_1 (0.01 ~ 0.5), 便于起振。电容三点式正弦波振荡器的振荡频率基本等于 LC 并联回路的谐振频率,即

$$f_0 \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{LC'}}$$

其中等效电容 $C' = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$, 当 C_1 、 C_2 取较小值时, 谐振频率可达 100MHz 以上, 实用电路中, 为了使谐振频率易于调整, 通常在电感支路串联较小的可变电容器。

例 10.2.1 试用自激振荡的相位条件分析图 10.2.6 所示电路。

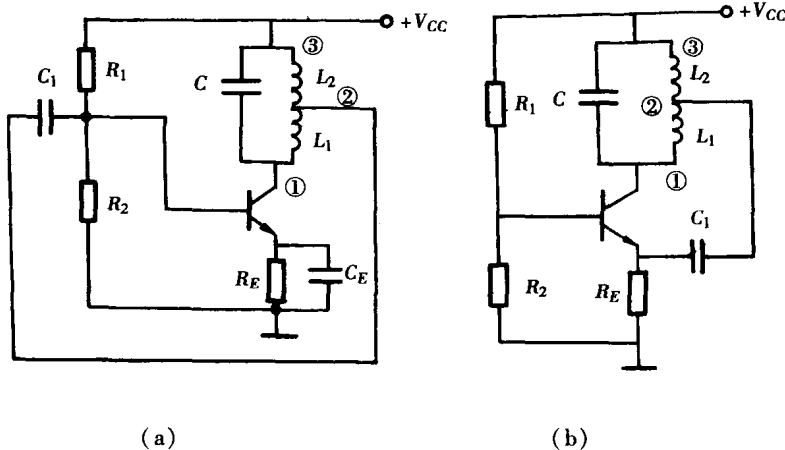


图 10.2.6 例 10.2.1 图

解 图 10.2.6(a) 和 (b) 所示两个电路的直流通路都是分压式偏置电路, 电感 L_1 、 L_2 与电容 C 组成选频电路, C_E 是旁路电容, 构成振荡器的反馈信号从电感 L_2 上取出, 电容 C_1 是耦合电容, 用瞬时极性法判断振荡器反馈的类型。由于电感 L_2 的上端头③交流接地, 则①端和②端相位相同。设晶体管基极瞬间极性为“+”, 视选频电路为纯电阻, 则集电极电位为“-”, 因此①端和②端电位均为“-”。图(a)中, ②端的“-”极性通过 C_1 反馈至晶体管基极, 形成负反馈, 不满足自激振荡的相位条件; 图(b)中, ②端的“-”极性通过 C_1 反馈至晶体管发射极, 形成正反馈, 满足自激振荡相位条件。

思考与练习

10.2.1 图 10.2.3 中电容 C_B 起什么作用, 如没有 C_B , 电路能否产生正弦波振荡? 振荡电路的选频网络和反馈网络是同一个电路吗?

10.2.2 具体说明图 10.2.4 所示的电感三点式正弦波振荡器的组成部分及各部分的作用。

10.3 RC 选频网络与 RC 振荡器

一般 LC 振荡器产生的振荡频率大约在几千赫到几百兆赫之间,若需要更低频率的正弦波信号, L 、 C 值增大,使 L 、 C 的体积、重量、价格增加。通常要产生较低频率(几赫到几十千赫)的正弦波信号,用 RC 振荡器更为简便。

RC 正弦波振荡器采用 RC 串并联网络作为选频网络和反馈网络。下面先了解 RC 串并联网络的频率特性,再根据正弦波振荡器的相位条件和幅值条件,选择合适的放大电路来构成 RC 正弦波振荡器。

10.3.1 RC 选频网络

1. 定性分析

RC 串并联选频网络由电阻与电容串联构成,如图 10.3.1(a)所示,电路中左侧加幅值恒定、频率可变的正弦信号作为输入信号。当频率较低时, $1/\omega C \gg R$,此时,选频网络可近似用图 10.3.1(b)所示的高通电路表示,相应可画出此时高通电路的幅频特性和相频特性,如图 10.3.1(e)所示;当频率足够高时, $1/\omega C \ll R$,此时,选频网络可近似用图 10.3.1(c)所示的低通电路表示,也有相应的幅频特性和相频特性,如图 10.3.1(f)所示。

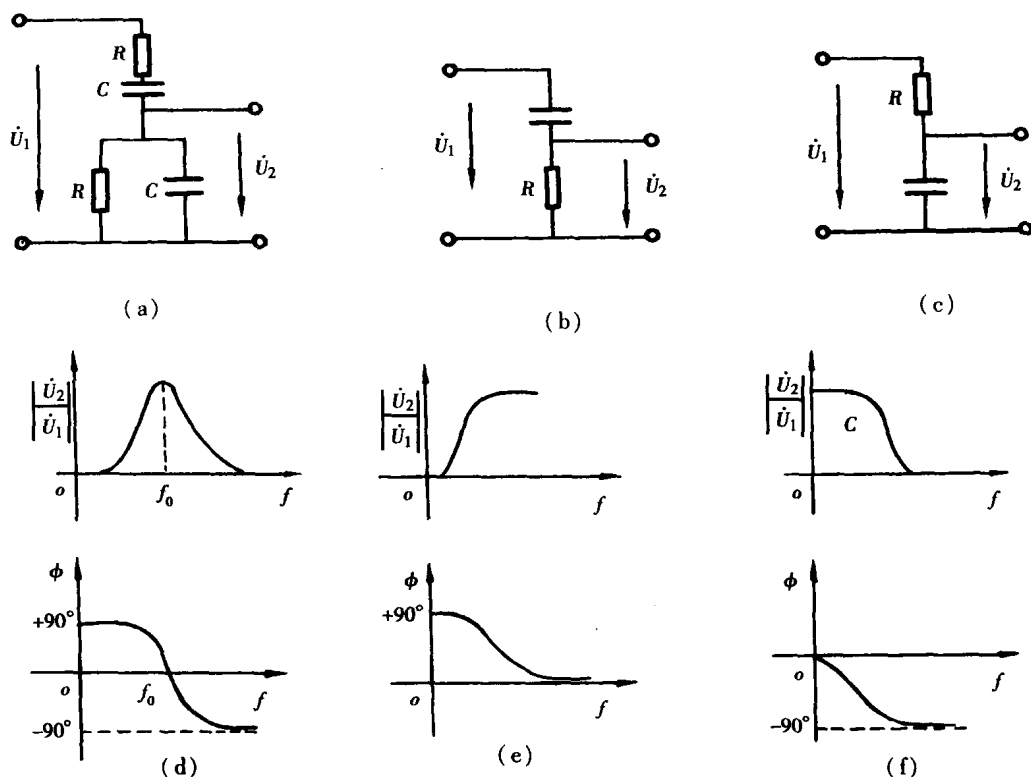


图 10.3.1 RC 串并联电路的频率特性

综合以上两种情况,可以定性画出串并联选频网络的幅频特性和相频特性如图 10.3.1

(d)所示,其中有一个频率(设为 f_0)使相移为零,电压幅值最大,该频率 f_0 即为谐振频率。

2. 定量计算

由图 10.3.1(a)串并联选频网络可得

$$\frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} = \frac{R // \frac{1}{j\omega C}}{\left(R + \frac{1}{j\omega C}\right) + \left(R // \frac{1}{j\omega C}\right)}$$

化简得

$$\frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} = \frac{1}{3 + j\left(\omega RC - \frac{1}{\omega RC}\right)} \quad (10.3.1)$$

设式中 $\omega_0 = \frac{1}{RC}$ 或 $f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$,由此,可得串并联选频网络的幅频特性及相频特性为

$$\left| \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} \right| = \frac{1}{\sqrt{3 + \left(\frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f}\right)^2}} \quad (10.3.2)$$

$$\varphi = -\arctan \frac{1}{3} \left(\frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f} \right) \quad (10.3.3)$$

当 $\omega = \omega_0 = \frac{1}{RC}$ 或 $f = f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$ 时,电路发生谐振,幅频特性的幅值最大,即

$$\left| \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} \right|_{\max} = \frac{1}{3} \quad (10.3.4)$$

而相频特性的相移为零,即

$$\varphi = 0 \quad (10.3.5)$$

这就是说 $f = f_0$ 时,输出电压幅值最大,且输出电压是输入电压的 $1/3$,同时输出电压与输入电压同相位。

10.3.2 RC 正弦波振荡器

1. 电路的构成

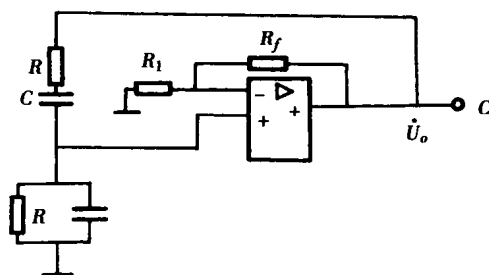


图 10.3.2 RC 串并联式正弦波振荡器

根据 10.1 的分析,正弦波振荡器必须有放大电路、反馈网络和选频网络,而 RC 串并联选频网络可兼作反馈网络,根据串并联选频网络的频率特性,即 $f = f_0$ 时,串并联反馈网络的 $\phi = 0$, $|F| = |\dot{U}_2/\dot{U}_1| = 1/3$,首先要求放大电路的输出与输入的相位为同相,可以采用 RC 耦合共射极放大电路,也可以采用集成运放;其次 $|A\dot{F}| = 1$,要求放大倍数不小于 3,采用放大倍数为 3 的同相比例集成运放作为放大电路。从这两方面考

虑,组成图 10.3.2 所示的 RC 串并联式正弦波振荡器。

2. 幅值条件及稳幅措施

根据式(10.3.2)和起振的幅值条件,放大电路的放大倍数应略大于3,即 $(1 + R_f/R_1)$ 略大于3,或 R_f 略大于 $2R_1$ 。实际电路中,因为电阻器的实际值与标称值间存在一定误差,例如,取 $R_1 = 10\text{k}\Omega$,可用 $18.2\text{k}\Omega$ 的电位器与 $4.7\text{k}\Omega$ 的电位器串联作为 R_f ,便于通过试验调节,使电路容易起振。

当温度、电源、电压或元件参数变化时,会破坏振荡电路的幅值条件 $|\dot{A}\dot{F}| = 1$,若 $|\dot{A}\dot{F}|$ 增大,输出幅值不断增大,集成运放进入非线性工作区,造成输出波形失真;若 $|\dot{A}\dot{F}|$ 减小,不满足振荡条件,输出电压逐渐衰减为零而消失。因此,存在输出电压幅度的稳定问题。

稳幅的措施很多,通常采用在放大电路的负反馈回路中利用非线性元件自动调节反馈强弱以维持输出电压的恒定。例如选择负温度系数的热敏电阻为反馈电阻 R_f ,当 $\dot{U}_o$ 增大时,反馈回路的电流增大而使 R_f 功率增加,温度上升, R_f 下降,从而使放大倍数减小, $\dot{U}_o$ 幅值下降。如果参数合适,可使输出电压幅值基本稳定,且波形失真较小。同样,选用有正温度系数的热敏电阻替代 R_1 可以自动调节反馈强弱,实现稳幅。

3. 振荡频率的估算

图10.3.2电路中,集成运放构成同相比例放大电路,其输出电阻近似为零,输入电阻比 RC 串并网络中的阻抗大得多,可忽略不计,整个 RC 正弦波振荡器的振荡频率近似等于 RC 串并网络的频率 f_0 ,即

$$f = f_0 = \frac{1}{2\pi RC} \quad (10.3.6)$$

由上式可知,要求振荡频率 f_0 高时,应减小 R 和 C 的值,但减小 R 会使放大电路的负载加重, C 值太小, f_0 容易受寄生电容的影响而不稳定,一般而言,由集成运放构成的 RC 正弦波振荡器振荡频率不超过 1MHz 。为使振荡频率的调节方便,一般采用改变电容进行粗调,改变电阻实现细调。

图10.3.3为实用的 RC 正弦波振荡器, R_1 、 R_2 、 R_3 和 R_p 组成负反馈网络, R_p 用来调整电压放大倍数 A_f ,以保证振荡电路能稳定、不失真地工作在线性状态。 RC 串并网络组成正反馈回路,同时有选频特性,决定电路振荡频率 f_0 ,图中 $R = 20\text{k}\Omega$, $C = 0.01\mu\text{F}$,振荡频率为 $f_0 = \frac{1}{2\pi RC} = 796\text{Hz}$ 。

读者可按图中给的数据,验证电路满足幅值条件 $|\dot{A}\dot{F}| \geq 1$,图中二极管 D_1 、 D_2 能自动稳定振荡幅度,当振荡幅度过大使二极管 D_1 、 D_2 导通, R_3 被短接,使 A_f 下降,负反馈加强,可以避免或减少输出信号的非线性失真。

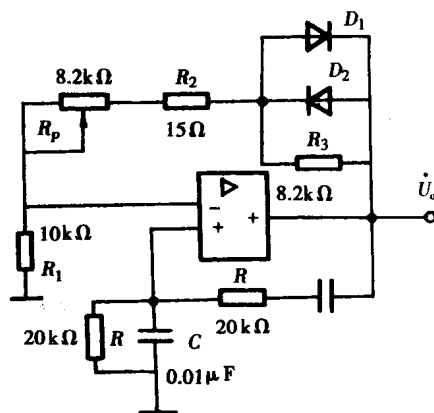


图10.3.3 实用 RC 串联式正弦波振荡器

除了 RC 正弦波振荡器和 LC 正弦波振荡器外,要得到高稳定度 $\left(\frac{\Delta f_0}{f_0} \text{ 优于 } 0.001\%\right)$ 的振荡频率,一般用石英晶体作为选频元件构成正弦波振荡器,电路结构与 LC 正弦波振荡器类似,读者可参阅有关参考文献。

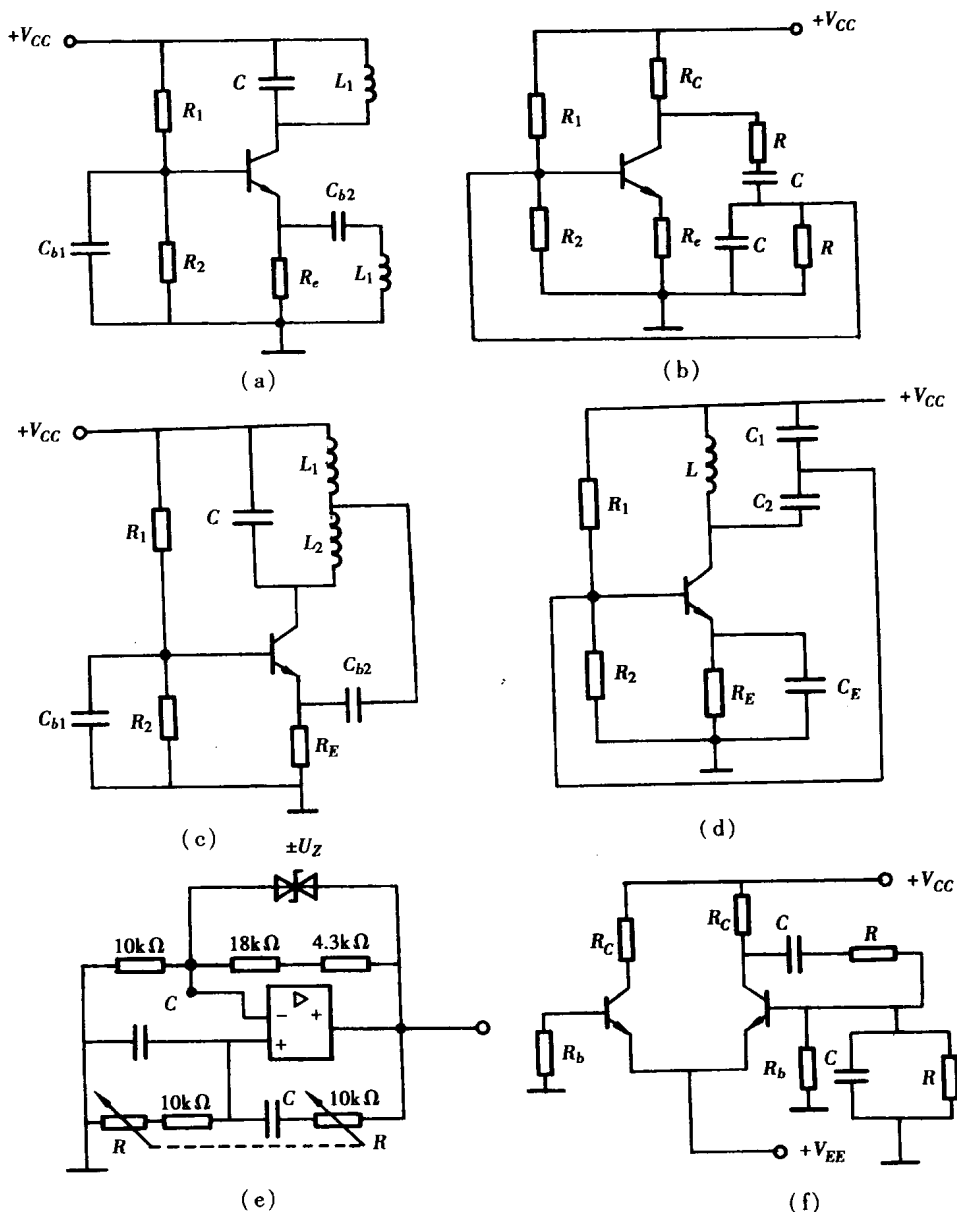
思考与练习

10.3.1 图 10.3.2 中的稳幅措施还可以采用正温度系数的电阻替代 R_1 , 试说明其工作原理。

10.3.2 要使图 10.3.3 中产生的振荡频率可调, 可以有几种方法?

习 题

10.1 试用瞬时极性法判别题 10.1 图各电路能否满足自激振荡的相位条件? 假设电路的幅值条件均满足, 各电路能否起振?



题 10.1 图