

高等学校轻工专业试用教材

电子计时仪器原理

天津大学、哈尔滨工业大学 编

下 册

轻工业出版社

01

高等学校轻工专业试用教材
电子计时仪器原理(下册)
天津大学、哈尔滨工业大学 编

*
轻工业出版社出版
(北京广安门南滨河路 25 号)
轻工业出版社印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行
各地新华书店经售

*
787×1092毫米 1/16 印张: 17 $\frac{8}{16}$ 字数: 391千字

1987年 6 月第一版第一次印刷
印数: 1—3,000 定价: 2.60元
统一书号: 15042.2199

内 容 提 要

本书分上、下两册。在本册（下册）中重点介绍高稳定晶体振荡器，原子频率标准，短时段测量仪器，时间程序机构，周期与频率的测量以及计时仪器在国民经济各领域中的应用。

本书为高等院校时间计控技术及仪器专业师生使用的教材，亦可供有关专业工厂和研究所的技术人员与技术工人参考。

前 言

本教材根据天津大学和哈尔滨工业大学时间计控技术及仪器专业共同拟定的编写大纲编著，经轻工业部时间计控技术及仪器专业教材编审委员会审稿，由何永江同志主编。参加编写的人员有姚婉、沈工、王春林、孙占礼、刘春光、王魁业、何永江等。

本书作为高等学校时间计控技术及仪器专业的教材，共分上、下两册。上册介绍了电子手表发展过程中四个时代的典型结构与原理，重点分析了第三代、第四代电子手表的各个主要组成部分。下册重点介绍了高稳定晶体振荡器、原子频率标准、短时段测量仪器、时间程序机构、周期与频率的测量以及计时仪器在国民经济各领域中的应用。

本书是时间计控技术及仪器专业首次编著出版的电子计时仪器方面的教材。由于资料少、时间仓卒及编著者的水平所限，难免存在缺点和错误，欢迎广大读者批评指正。

在编写过程中，曾得到南京大学等很多兄弟单位的支持和帮助，在此表示感谢。

目 录

第十章 高稳定度晶体振荡器	1
第一节 概述	1
第二节 主振电路	5
第三节 并联晶体振荡器的三种基本电路	14
第四节 串联晶体振荡器	20
第五节 负阻振荡器	25
第六节 辅助电路	28
第七节 恒温箱	41
第十一章 子母钟和时间控制机构	59
第一节 石英母钟的结构和工作原理	59
第二节 子钟结构及其工作原理	72
第三节 时间控制机构	80
第十二章 短时段测量	94
第一节 电容法测时	95
第二节 示波法测时	100
第三节 相位法测时	106
第四节 计数法测时	108
第十三章 频率和周期的测量	113
第一节 频率、周期和频率比的测量原理	113
第二节 测量误差	116
第三节 输入通道中的阻抗变换电路及放大器	120
第四节 输入通道中的整形级及抗干扰电路	130
第五节 计数电路	137
第六节 时基与控制电路	165
第七节 数字显示	174

第八节 多周期同步测量频率的方法.....	175
-----------------------	-----

第十四章 原子频率标准.....	177
------------------	-----

第一节 基本粒子结构.....	178
-----------------	-----

第二节 原子频率标准.....	188
-----------------	-----

第十五章 天文测时.....	225
----------------	-----

第一节 中星仪.....	225
--------------	-----

第二节 等高仪.....	229
--------------	-----

第三节 照相天顶筒.....	235
----------------	-----

第十六章 电子计时仪器在科学研究及生产中的应用.....	248
------------------------------	-----

第一节 体育运动用电子计时仪器.....	248
----------------------	-----

第二节 工业计时仪器.....	255
-----------------	-----

第三节 电子计时仪器在运输业中的应用.....	261
-------------------------	-----

第四节 电子计时仪器在宇宙航行中的应用.....	269
--------------------------	-----

第十章 高稳定度晶体振荡器

第一节 概 述

在本书上册曾对石英手表和石英钟使用的 CMOS 晶体振荡器作了较详细地分析,但这种振荡器在实际应用中有一定的局限性,一方面它只用 CMOS 器件,另一方面它的频率稳定度比较低。在高精密石英钟、导航与雷达、导弹制导、卫星跟踪、宇宙通讯以及时间与频率计量等领域中,对振荡器的频率稳定度提出了越来越高的要求,高频率稳定度的晶体振荡器在各领域中的实用方面都具有非常重要的意义。

精密石英钟的晶体振荡器,应优于 10^{-7} 的频率稳定度才能达到精确地计量时间。在测量一般石英手表和石英钟的仪器中的晶振频率稳定度则约为 2×10^{-8} 。在雷达和导航系统中,发射机工作频率的不稳定会造成目标基本参数(如飞机的方位等)的测量误差。所以雷达和导航、相干脉冲雷达、无线电遥控和连续辐射的多普勒等系统的发射机的频率稳定度要求为 $10^{-8} \sim 10^{-9}$ 量级或更高。据计算,与火星进行可靠的通信,所需要的频率稳定度约为 10^{-11} 。对距地球 5600 万公里的金星进行无线电定位时,其频率稳定度至少应为 10^{-12} 。

显然,LC 振荡器、RC 振荡器、机械的摆轮游丝振荡器、金属音叉振荡器等的频率稳定度都不能满足上面提出的要求。而晶体振荡器根据晶体的类型及电路方案的不同,其频率稳定度大约在 $10^{-4} \sim 10^{-11}$ 范围内。采用低精度的晶体稳定度为 10^{-4} 量级;采用中精度的晶体可达 10^{-6} 量级,采用单层温度控制后稳定度可到 $10^{-7} \sim 10^{-8}$;用高精密晶体单层温度控制可达 $10^{-8} \sim 10^{-9}$ 量级;采用双层温度控制在实验室条件下可达 $10^{-9} \sim 10^{-11}$ 量级。

一、高稳定度晶体振荡器分类

晶体振荡器就其类型及水平大致可分为:

1. 通用型晶体振荡器 它是用晶体作主要的稳频元件,与放大器一起组成晶体振荡器。为使振荡器不受输出电路的影响,加有隔离级。其组成的方框图见图 10-1-1。这种振荡器是最简单的也是应用比较广泛的一种。这种电路不加温度补偿亦不加恒温措施,所以温度的变化是影响频率稳定度的主要因素,晶振中老化等引起的频率变化相对温度引起的变化来看并不是主要的。

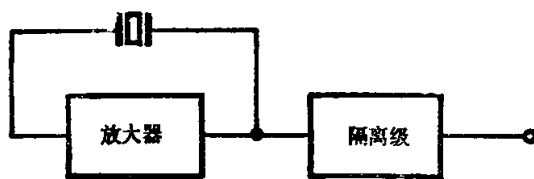


图 10-1-1 通用晶振方框图

2. 温度补偿晶体振荡器 如图 10-1-2 所示, 除具有上述电路的基本组成部分之外, 主要是加入温度灵敏元件, 当温度变化时, 通过它来限制频率的变化, 起到温度补偿的作用。因此, 它虽然较前述电路复杂, 但频率稳定度较前者高。它不用恒温箱, 总是在常温下工作, 晶体的老化也较小。不需要加热功率和加热时间。

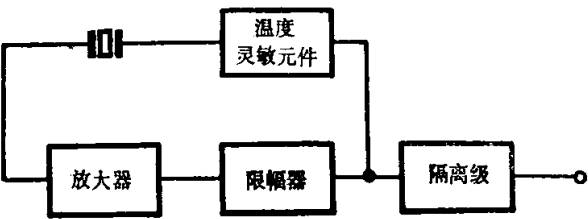


图 10-1-2 一般温度补偿晶振方框图

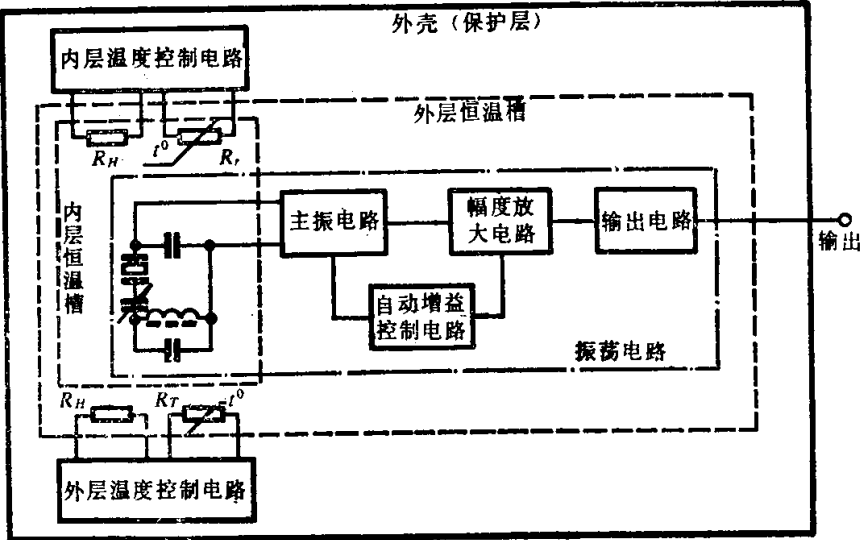


图 10-1-3 高稳定晶振方框图

3. 高稳定度晶体振荡器 其基本组成部分见图 10-1-3。

(1) 高精密石英谐振器 在高频率稳定度的晶体振荡器中广泛地采用温度系数小的 AT 切型的石英谐振器(简称晶体), 例如 AT 切型的 2.5 (MHz) 的五次泛音晶体、AT 切型的 5 MHz 五次泛音晶体以及这两种频率附近的 AT 切型的泛音晶体。其中, 2.5 MHz 晶体品质因数高、老化率低, 长期稳定度可以做得比较高。5 MHz 的晶体老化率也不大, 瞬间稳定度可以做得高些。

(2) 稳定的振荡电路 晶体振荡器的组成中除上述的晶体外, 还包括稳定的主振级、幅度放大电路以及将主振级控制在低电平线性状态的自动增益控制电路。最后经输出电路输出。

(3) 精密恒温箱 它是使晶体及振荡电路在恒温状态下工作, 以提高频率稳定度。其主要部分由恒温槽、温度控制电路、感温元件和其它辅助装置组成。

恒温箱对晶体振荡器频率稳定度的作用是极为重要的。例如, 晶体在拐点附近 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 的平均温度系数为 $5 \times 10^{-8}/^{\circ}\text{C}$, 假设要求将温度变化引起的频率变化限制在 5×10^{-11} 以内, 则要求槽内温度的变化必须保持在 0.001°C 以下, 要达到这样的控温精度, 一般都要采用双层温度控制电路的精密恒温箱。

晶体、振荡电路、温度控制电路在恒温箱中的配置, 可以有多种不同的形式。在高稳定度晶体振荡器中, 通常采用下列两种配置方式:

① 晶体(或包括主振级)用双层恒温, 振荡电路(或除主振级外)及温度控制电路

用单层恒温。即将振荡电路置于内、外层之间，而将温度控制电路置于外层与外壳之间。这种恒温箱的功耗较小，但各层之间的连线较多。

② 晶体(或包括主振级)用双层恒温，振荡电路(或除主振级外)及温度控制电路用单层恒温。即将振荡电路和温度控制电路置于内、外层之间。这种恒温箱的功耗较大，但各层之间的连线较少。

二、高稳定度晶体振荡器的技术指标

(一) 指标定义

在现代计时系统及无线电技术应用中，对晶体振荡器提出下列技术要求：

1. 频率准确度 它是表明晶体振荡器工作频率偏离标称频率的程度，对高稳定晶体振荡器来说，一般要求在 $10^{-9} \sim 10^{-10}$ 量级。

若晶体的实际频率为 f_x ，其标称频率为 f_0 ，则准确度定义为：

$$A_f = \frac{f_x - f_0}{f_0}$$

在实际测量中只能是晶体振荡器的实际频率与标准频率的偏离，即 $\Delta f = f_x - f'_0$ (f'_0 为标准频率)，而不是实际频率与标称频率的偏离。当采用高级的测量系统时，其标准频率 f'_0 与 f_0 很接近，可以认为：

$$f_x - f_0 \approx f_x - f'_0 = \Delta f$$

所以实际应用中，准确度可用下式表示：

$$A = \frac{f_x - f'_0}{f} = \frac{\Delta f}{f}$$

2. 频率稳定度 它表明在指定的时间间隔内，晶体振荡器准确度的变化。它表征振荡器维持在恒定频率上的工作能力，还反映频率的偶然变化和这种变化的波动情况，这种变化可以说明在外界条件变化和内部参数变化时，振荡器所能达到的最高精度界限。定义频率稳定度的数学表达式详见上册有关章节。

显然，准确度和频率稳定度是晶体振荡器的主要技术指标。

3. 开机特性 系指晶体振荡器从冷状态下开机后，在一定的时间间隔内，频率稳定度能达到的数值，用下式表示：

$$V = \frac{f_{\max} - f_{\min}}{f_0}$$

式中 $f_{\max}$ ——测量频率的最大值；

$f_{\min}$ ——测量频率的最小值；

f_0 ——频率的标称值。

4. 频率重复性 是指晶体振荡器在相同条件下，两次或多次开机，在指定的相同时间的频率复合程度。

但也有人认为，在相同条件下关机前和开机后的频率准确度的复合程度为频率的重复性。甚至在某些检定规程中也采用与此相似的定义。这种定义，对于一级频标，由于有 Q 值很高的稳定器件保证，很少受外界条件影响，尚可作这种考虑，但一般来讲，晶体振荡器有开机特性和老化特性，所以在不同条件下开机，不同时间的频率准确度无法比较，这种定义方法就不合适了。

5. 频率调整范围 指晶体振荡器的振荡频率的可调范围。通常具有粗调和细调。粗调一般用于补偿晶体本身老化引起的频率变化。粗调范围一般要求在 $5 \times 10^{-8} \sim 1 \times 10^{-6}$ 。细调一般用来调整振荡频率,使其达到较高的准确度。细调范围一般要求在 $5 \times 10^{-8} \sim 1 \times 10^{-7}$ 。

6. 输出电压幅度 一般是指一定负载阻抗下的输出电压。

7. 外界因素对晶体振荡器频率稳定度的影响 系指负载变化、电压变化、环境温度变化、湿度变化以及冲击振动等外界因素对振荡器频率稳定度的影响。

8. 晶体振荡器的体积、重量、耗电。

(二) 指标间的关系

以上各项技术指标之间是相互关联的,下面我们看它们之间的关系。

1. 频率准确度和频率稳定度的关系 两者之间既有区别又有联系,没有稳定度就谈不上准确度,即频率稳定度是频率准确度的前提,例如一个晶体振荡器在某一时刻的准确度可能高于 10^{-10} 量级,但由于稳定度不高,经过一段时间就漂移到 10^{-7} 量级,从而 10^{-10} 的准确度实际上就没有意义了。所以一般频率准确度比频率稳定度低一个量级。另外,频率稳定度又是通过测量不同时间间隔的准确度而获得的,即要得到晶体振荡器的频率稳定度,就必须比较各特定时间间隔的准确度。

2. 频率稳定度与频率微调范围的关系 当选择频差大的石英谐振器时,微调范围容易达到,但频率稳定度受到影响。当选用频差小的石英谐振器时,对频率稳定度有利,但微调范围不易达到,显然,这是矛盾的,但频率稳定度是主要的。

3. 频率稳定度与开机特性的关系 这二者之间存在着矛盾,主要是由恒温箱的起始加热功率引起的。起始加热功率大,容易满足开机特性的要求,但因为加热功率大,使恒温箱内温度波动影响频率稳定度。为使频率稳定,应采用小功率加热,但开机特性不易满足。在一般情况下,对开机特性没有特殊要求时,应采用较小的功率加热,以满足晶体振荡器的主要技术指标——频率稳定度的要求。有时也采用下列方法,即在开机时用大功率加热,当达到控制温度后,改用小功率加热。这样,既改善了开机特性,又减少了温度波动对频率稳定度的影响。

4. 频率稳定度与输出幅度的关系 从使用晶体振荡器来说,希望振荡器的输出幅度越大越好。但输出幅度大时,级间耦合强,负载效应大,频率稳定度会降低。主振级工作于强激励状态,长期稳定度将变坏。统筹考虑,频率稳定度是主要的,对晶体振荡器的输出幅度不应有过高的要求。

5. 长期稳定度与瞬间稳定度的关系 为了降低晶体老化,希望晶体工作在小功率激励状态,但从瞬间稳定度考虑,应用较大的电流激励晶体,二者是存在着矛盾的。为了解决这一矛盾,可以采用长期稳定度好的主振级通过锁相环路去锁定强激励瞬间稳定度良好的压控晶体振荡器,这样可以同时满足长期稳定度和瞬间稳定度的要求。还可以使主振级工作在低激励状态,保证长期稳定度的要求,而在输出级加性能良好的晶体滤波器以提高瞬间稳定度。

6. 总的技术指标与体积、重量、耗电之间的关系 在一般情况下,总的技术指标要求高,则体积、重量、耗电等都会随之增加。通常地面使用的晶体振荡器主要应满足技术

指标的要求，体积、重量、耗电等是次要的。而空中使用的晶体振荡器就必须考虑体积、重量、耗电等的要求。

综合上述，首先要看频率稳定度和频率准确度，因为它们是晶体振荡器的两项主要指标。但也不要忽视其它方面的要求，因为随着具体使用的场合不同，对各方面指标的要求就应有所侧重。例如：标准时间信号发生器对晶振的长期稳定度提出较高的要求；接收机的本级振荡器和原子钟用的晶振，对长期稳定度和瞬间稳定度都有较高的要求；频率计中的晶振希望在较短的时间内能很快稳定下来以便及时使用，因此必须考虑开机特性；对于作为频率标准的晶振，则要求有较好的频率再现性。有时由于测试的需要，要求晶振的频率微调范围大，频率微调精度高。当一台晶振同时多路输出时，要求输出幅度大，以推动各路正常工作。宇宙飞行用的晶振则应在冲击、振动、离心力作用等恶劣环境条件下工作，而且对晶体的体积、重量、耗电等也有较高的要求。

总之，对晶体振荡器既要看频率稳定度和准确度的主要技术指标，同时也应视具体使用情况以满足不同的要求。

第二节 主 振 电 路

一、概述

由上节所述，对一个振荡器有一系列的指标要求，尤其要着眼于频率稳定度和准确度。对要求不高的一般的晶体振荡器只有主振电路就够了，但对高稳定晶体振荡器则必须有其它辅助电路以实现较高技术指标的要求，因此高稳定晶体振荡器一般由下列部分组成（见图 10-2-1），其方框图分述如下。

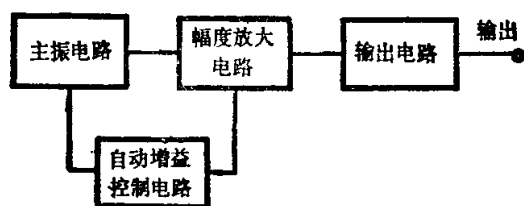


图 10-2-1 晶振电路方框图

1. 主振电路 是高稳定晶体振荡器的基本的也是核心部分，它将直流能量转换成交流能量，其频率主要取决于石英晶体。

2. 幅度放大电路 将主振级输出的微弱信号定量放大，供给输出级，并推动自动增益控制电路。此外还有一定的隔离负载作用。

3. 自动增益控制电路 控制主振级的工作，使放大器件工作在小信号放大状态，并使晶体工作在低激励状态，使激励电平恒定，以提高振荡器的稳定度。

4. 输出电路 用于隔离输出，以减小输出端负载变化对频率稳定度的影响，并从此电路取得一定幅度的无失真电压。

无疑，主振电路是高稳定晶体振荡器的核心部分，因此，下面我们将详细地分析主振电路。对要求不高的晶体振荡器，只有这部分就够了；所以为方便起见，以下通称为

振荡器。

晶体振荡器种类繁多，特点各异，从总体来看，按电路形式基本可分两大类：

- ① 负阻型晶体振荡器；
- ② 反馈型晶体振荡器。

负阻型晶体振荡器可以由负阻器件（例如隧道二极管等）构成，也可以用在某一频率范围内具有负阻特性的放大器构成。负阻型晶体振荡器电路简单，易于实现小型化，但振荡能力较弱，输出功率小。

应用最广泛的是反馈型晶体振荡器，这种振荡器是将放大器输出功率的一部分再反馈到放大器的输入端以维持等幅振荡的电路，实际上就是回路的相移等于零或 $2n\pi$ ，回路增益 ≥ 1 的正反馈放大器。

反馈型晶体振荡器又分为串联晶体振荡器和并联晶体振荡器。在串联晶体振荡器中负载电容与晶体相串联，当负载电容为无穷大时（即不串联电容），晶体工作在串联谐振频率上，晶体的阻抗呈电阻性。串联晶体振荡器又分为调谐式和非调谐式。

并联晶体振荡器是将晶体接于反馈电路中，作为三点式振荡器回路中的一个正电抗元件使用，晶体工作在串联谐振频率与并联谐振频率之间，晶体阻抗呈现感性。

并联晶体振荡器是典型的三点式振荡电路。按晶体接在振荡器中的位置可分为： $c-b$ 电路（皮尔斯电路），见图 10-2-2； $b-e$ 型电路（密勒电路），见图 10-2-3； $c-e$ 型电路，见图 10-2-4。 $c-b$ 电路按放大器接地点的不同可分为：皮尔斯电路（发射极接地）；柯尔匹兹电路（集电极接地），见图 10-2-5；克拉泼电路（基极接地），见图 10-2-6。这些电路图都是以交流形式画出。

综合上述可以简单地列出晶体振荡器的分类。

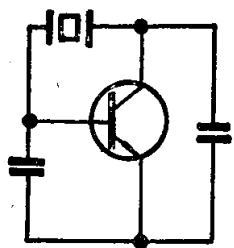


图 10-2-2 $c-b$ 型电路（皮尔斯）

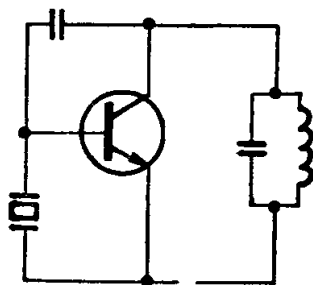


图 10-2-3 $b-e$ 型电路（密勒）

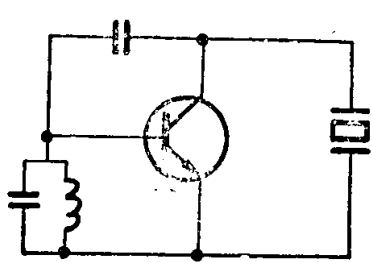


图 10-2-4 $c-e$ 型电路

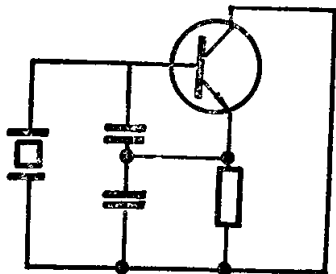


图 10-2-5 柯尔匹兹电路

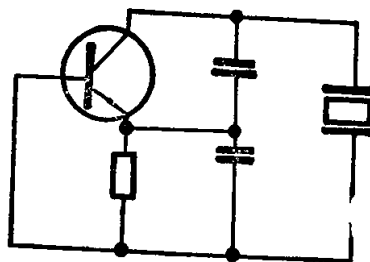
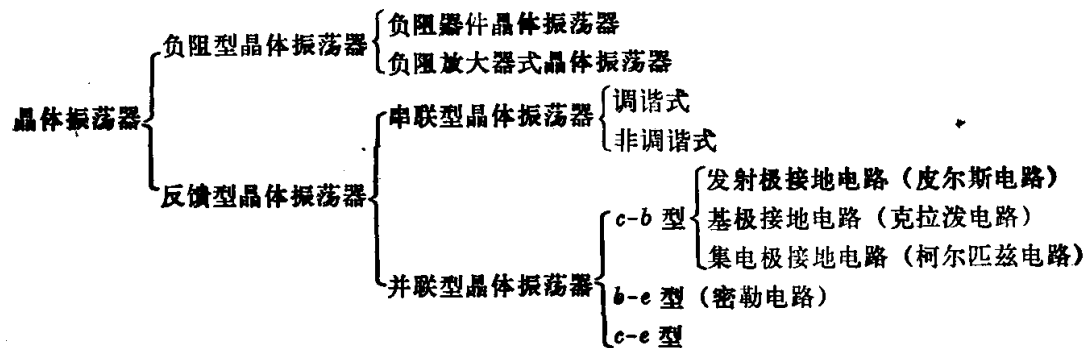


图 10-2-6 克拉泼电路

晶 体 振 荡 器 的 分 类



晶体振荡器的分析方法很多，这里仍沿用上册的方法，即增益法进行分析，这种方法简单明了，而且可以将串联晶体振荡器和并联晶体振荡器的分析方法统一起来。

下面首先分析并联晶体振荡器。

二、并联晶体振荡器的一般分析方法

由前所述，并联晶体振荡器是典型的三点式振荡器，因此，我们首先看一下三点式晶体振荡器的基本原理。

晶体管的三点式 LC 振荡器是晶体管的三个极与 LC 振荡回路的三个端点分别相连的反馈振荡器，见图 10-2-7 (a)、(b)、(c)。

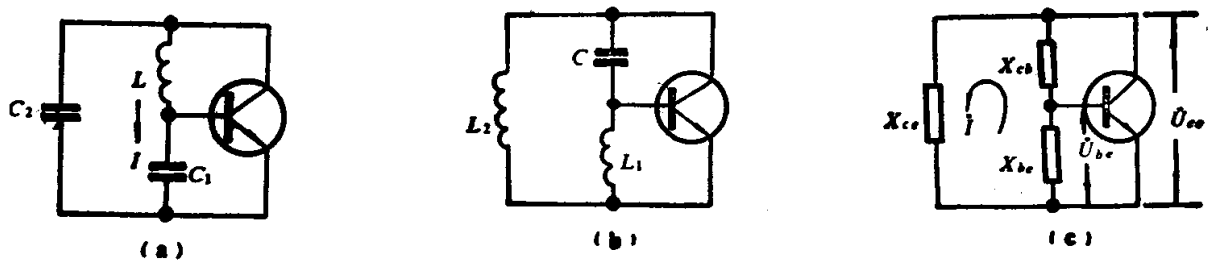


图 10-2-7 三点式 LC 振荡器

晶体管放大器具有倒相作用，因此 U_{be} 与 U_{ce} 的相位差为 180° ，为了保证正反馈，谐振回路的电抗性质必须使反馈到晶体管基极与发射极之间的电压 U'_{be} 与 U_{be} 的相位相同，与 U_{ce} 相位相反。因为 $U_{be} = -U_{eb}$ ，所以 U_{be} 与 U_{ce} 同相。由图 10-2-7 (c) 可知

$$U_{ce} = X_{ce} \cdot I$$

$$U_{be} = X_{be} \cdot I$$

只要 X_{ce} 与 X_{be} 符号相同，即

$$X_{ce} + X_{be} + X_{ee} = 0$$

所以在三点式振荡电路中，电抗 X_{ce} 与 X_{be} 的符号必须相同，而电抗 X_{ce} 与 X_{ee} 、 X_{be} 的符号必须相反。

由上所述可知，若 X_{be} 和 X_{ce} 为容性时， X_{ee} 必须呈现感性，这时就构成电容三点式振荡器，如图 10-2-7(a)。若电抗 X_{be} 和 X_{ce} 为感性时，则 X_{ee} 必须呈现容性，这时就构成电感三点式振荡器。

对于电容三点式振荡器，假设在输入端加一个与谐振回路同频率的电压信号 U_i ，输出电压 U_o 与输入电压 U_i 相位差为 180° ，由 L 和 C_1 组成的支路在回路谐振频率上呈

感性电抗, 所以输出电压 U_o 在 LC_1 支路中产生的电流 I 滞后于输出电压 U_o 90° , 电流 I 在电容 C_1 两端产生的反馈电压 U_f 滞后于电流 I 90° , 这样反馈电压 U_f 与输出电压相位差为 180° , 即与输入信号电压 U_i 同相, 因此, 满足正反馈的相位条件。见图 10-2-8。

图 10-2-7 (a) 可画成图 10-2-9 的等效电路。它是由振荡回路的电感 L 、电容 C 、回路的损耗电阻 R_0 、放大电路的负电阻 R_N 构成的串联回路。其中 C 为

$$C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$$

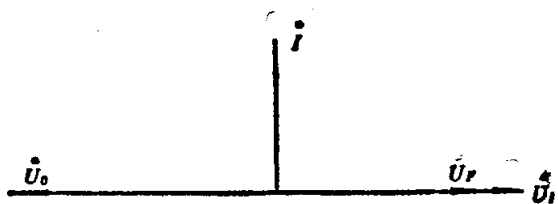


图 10-2-8 电容三点式的相量图

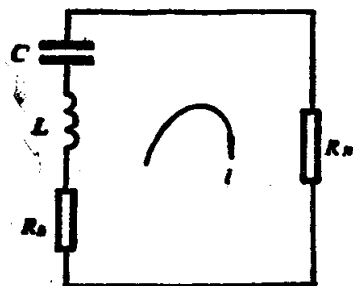


图 10-2-9 电容三点式的等效电路

假设振荡幅度很小, 并只考虑交流分量, 其振荡电流的微分方程可写成

$$\frac{d^2 i}{dt^2} + \frac{R_0 + R_N}{L} \cdot \frac{di}{dt} + \frac{1}{LC} i = 0 \quad (10-2-1)$$

解 (10-2-1) 式可得

$$i = A e^{-\alpha t} \cos(\omega t + \varphi) \quad (10-2-2)$$

式中

$$A = \frac{-U}{\omega t} \quad (\text{初始振幅}) \quad (10-2-3)$$

$$\alpha = \frac{R_0 + R_N}{2L} \quad (\text{等效衰减系数}) \quad (10-2-4)$$

$$\omega = \omega_0 \sqrt{1 - \frac{\alpha^2}{\omega_0^2}} = \frac{1}{\sqrt{LC}} \cdot \sqrt{1 - \frac{C(R_0 + R_N)^2}{4L}} \quad (10-2-5)$$

若认为电流 i 是建立成稳幅的正弦振荡电流, 则回路的等效衰减系数 α 应等于零,

即

$$R_0 = -R_N$$

因此, 振荡频率为

$$\omega = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (10-2-6)$$

在并联晶体振荡器中, 晶体呈现感性, 因此, 可以用晶体来代替三点式 LC 振荡器中的一个电感, 随着晶体在振荡器中的连结位置的不同, 可分成三种基本形式的振荡器, 这三种形式电路都可用下面的交流等效电路来分析, 见图 10-2-10 和图 10-2-11。图中 g_m 为放大管的跨导, u_i 为放大器的输入交流电压, u_f 为经反馈电路后的反馈电压。

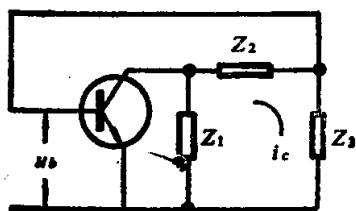


图 10-2-10 并联晶振

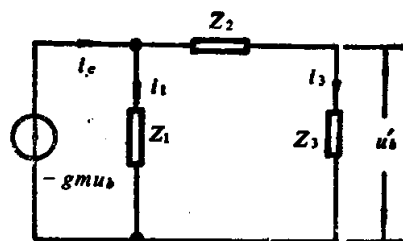


图 10-2-11 并联晶振等效电路

g_m 在低频时为实数，高频时为复数。一般情况下，阻抗 Z_3 远小于晶体管的输入阻抗。由图 10-2-11 可得

$$u'_b = -g_m u_b \frac{Z_1 Z_3}{Z_1 + Z_2 + Z_3} \quad (10-2-7)$$

由式 (10-2-7) 可得到闭环增益

$$K = \frac{u'_b}{u_b} = -g_m \frac{Z_1 Z_3}{Z_1 + Z_2 + Z_3} = K_0 e^{j\varphi} \quad (10-2-8)$$

振荡器平衡状态的条件为

$$K_0 = 1 \quad (10-2-9)$$

$$\varphi = 2n\pi \quad (n=0, 1, 2, \dots) \quad (10-2-10)$$

将公式 (10-2-9) 和 (10-2-10) 代入到式 (10-2-8) 中，即可得到并联晶体振荡器的振荡方程

$$g_m Z_1 Z_3 + Z_1 + Z_2 + Z_3 = 0 \quad (10-2-11)$$

对上述三种基本形式的振荡电路的任一种电路都可用式 (10-2-11) 进行分析，只要把振荡电路中的 Z_1 、 Z_2 、 Z_3 代入到振荡方程中去，就可以进行分析。

依公式 (10-2-11) 可以画出并联晶体振荡器的等效电路。见图 10-2-12。

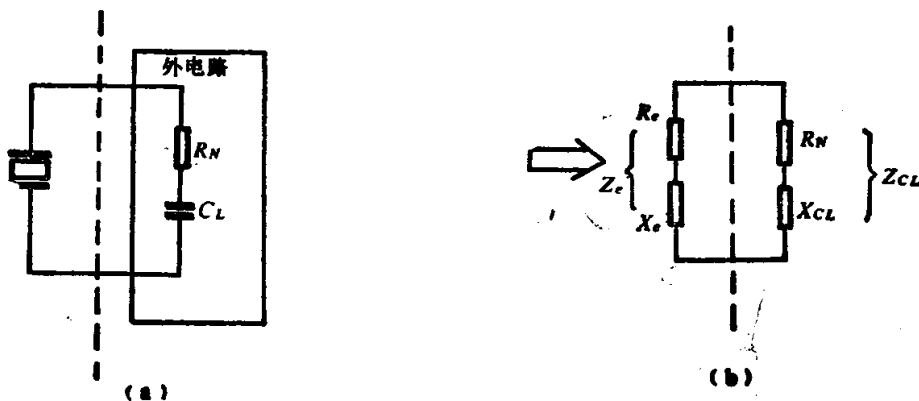


图 10-2-12 并联晶振的等效电路

在振荡频率上，晶体阻抗与外电路的负载阻抗大小相等，符号相反，即

$$Z_e = -Z_L \quad (10-2-12)$$

它们的实数部分和虚数部分各自相等，即

$$R_e = -R_N \quad (10-2-13)$$

$$X_e = -X_L = \frac{1}{\omega C_L} \quad (10-2-14)$$

这里 R_e 和 X_e 分别为晶体的等效电阻和等效电抗。 R_N 和 X_L 分别为外电路的等效负电阻和等效负电抗。 R_N 的大小表示外电路能供给能量的大小。公式 (10-2-13) 说明石英谐振器等效电阻所消耗的能量应等于外电路所补充的能量, 以维持等幅振荡, 即振幅平衡条件。

公式 (10-2-14) 说明晶体的等效感抗与外电路的容抗相等, 即所谓整个振荡系统中电抗的总和为零, 即相位平衡条件, 由此来决定其振荡频率。

下面我们看晶体等效电阻 R_e 和等效电抗的表达式及晶体振荡器的振荡频率。

晶体阻抗 Z 可用下列公式表示

$$Z = \frac{Z_0 Z_1}{Z_0 + Z_1} = R_e + jX_e \quad (10-2-15)$$

$$Z_1 = R_1 + j\left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1}\right) \quad (10-2-16)$$

$$Z_0 = \frac{1}{j\omega C_0} \quad (10-2-17)$$

将公式 (10-2-16) 和 (10-2-17) 代入到公式 (10-2-15), 并经整理得到

$$Z = \frac{R_1}{(1-X)^2 + \frac{1}{M^2}} + j \frac{X(1-X) - \frac{1}{M^2}}{\omega C_0 \left[(1-X)^2 + \frac{1}{M^2} \right]} \quad (10-2-18)$$

式中 X ——相对失谐, 其表达式为

$$X = \omega C_0 \left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1} \right)$$

M ——质量因数, 其表达式为

$$M = \frac{1}{\omega C_0 R_1} = \frac{Q}{r}$$

r ——电容比, 其表达式为

$$r = \frac{C_0}{C_1}$$

由式 (10-2-18) 可得

$$R_e = \frac{R_1}{(1-X)^2 + \frac{1}{M^2}} \quad (10-2-19)$$

$$X_e = \frac{X(1-X) - \frac{1}{M^2}}{\omega C_0 \left[(1-X)^2 + \frac{1}{M^2} \right]} \quad (10-2-20)$$

根据式 (10-2-20) 可得到晶体的电抗——频率特性曲线, 如图 10-2-13 (此曲线亦可见上册)。

当外电路的电抗为 $-X_{eL1}$ 时, 与晶体的电抗曲线相交于两点, 此两点对应的频率

为 f_1 和 f_2 , 当外电路电抗改变为 $-X_{CL2}$ 时, 则有另外两个交点, 相应的频率为 f'_1 和 f'_2 。

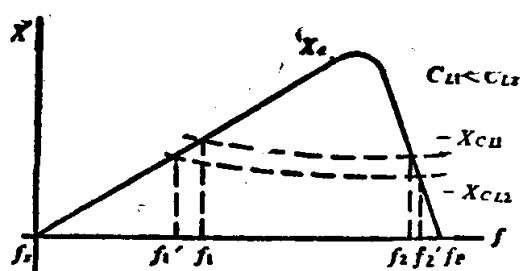


图 10-2-13 晶体电抗频率曲线

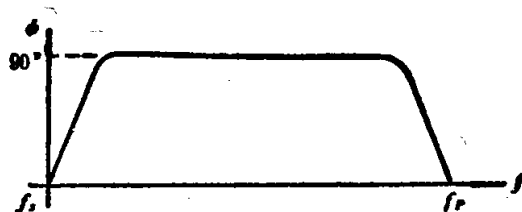


图 10-2-14 晶体的相移曲线

图 10-2-14 为晶体的相移特性曲线, 其相角 ϕ 根据式 (10-2-19) 和式 (10-2-20) 来确定。

$$\phi = \operatorname{tg}^{-1} \frac{X_e}{R_e}$$

另知

$$\begin{aligned} X &= \omega C_0 \left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1} \right) = \frac{C_0}{C_1} (\omega^2 L_1 C_1 - 1) \\ &= \frac{C_0}{C_1} \left(\frac{\omega^2}{\omega_s^2} - 1 \right) = \frac{C_0}{C_1} \cdot \frac{2 \Delta f_s}{f_s} = 2r \frac{\Delta f_s}{f_s} \end{aligned} \quad (10-2-21)$$

将公式 (10-2-21) 代入到公式 (10-2-19) 和 (10-2-20) 则得

$$R_e = \frac{R}{\left(1 - 2r \frac{\Delta f_s}{f_s} \right) + \frac{1}{M^2}} \quad (10-2-22)$$

$$X_e = \frac{\frac{1}{\omega C_0} \left[2r \frac{\Delta f_s}{f_s} \left(1 - 2r \frac{\Delta f_s}{f_s} \right) - \frac{1}{M^2} \right]}{\left(1 - 2r \frac{\Delta f_s}{f_s} \right)^2 + \frac{1}{M^2}} \quad (10-2-23)$$

由前述得知, 振荡器的频率由 X_e 和 X_L 来决定, 即在 $X_e = -X_L$ 点的频率即为振荡频率。由图 10-2-13 所示, 横轴上部实线, 是 X_e 随频率的变化曲线; X_L 随频率的变化曲线, 应在横轴的下面, 而振荡频率是由 $X_e = -X_{L1}$ 决定的, 因此, 依 X_L 作出 $-X_L$ 曲线, 即横轴上部的虚线, X_{L1} 与 X_e 有两个交点, 得到两个频率 f_1 和 f_2 , 若改变振荡电路的负载电容, 如 X_{L2} 与 X_e 也有两个交点, 即 f'_1 和 f'_2 , 就是说, 若改变 X_L , 则振荡频率就随之改变。

一个 X_L 曲线与 X_e 相交两点, 得到两个频率, 那么振荡器是否在两个频率上都能产生振荡, 回答是否定的, 即只能在一个频率上产生振荡, 这就要看在哪个频率上满足振幅平衡条件, 下面就分析和证明这个问题。

对应 X_L 的负载电容为 C_L , 则满足振荡的相位条件为

$$X_e = \frac{1}{\omega C_L}$$