

锁相与频率合成

睦法川 编

國防工業出版社

锁相与频率合成

眭法川 编

国防工业出版社

内 容 简 介

本书主要介绍模拟和数字锁相环及频率合成器的理论、组成、性能、测试及设计。对于新型的全数字锁相环和全数字频率合成器作了较全面的介绍。第1~8章附有思考题及习题。

本书可作为无线电技术专业学生的专业课教材,可供从事通信、广播、电视、雷达、电子测量、仪器仪表、频率标准等工作的工程技术人员参考。

锁相与频率合成

陆法川 编

国防工业出版社

(北京市车公庄西路老虎庙七号)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

大兴兴达印刷厂印装

787×1092 1/16 印张14¹/₂ 338千字

1988年12月第一版 1988年12月第一次印刷 印数: 0,001—1,880册

ISBN 7-118-00349-2/TN67 定价: 2.90元

前 言

本教材是无线电技术专业的专业课教材。本课程的先修课程是“电子线路”、“脉冲数字电路”和“信号与系统”等。本书是按总学时数54~72学时编写的。

全书除绪论外共十章。第一章至第六章为锁相环基本原理、线性和非线性性能、数字锁相环和取样锁相环、集成锁相环及设计、锁相环参数测量及锁相环的实际应用。这一部分重点介绍锁相环的基本性能、基本设计思想,特别是对近年来发展起来的数字锁相环、集成锁相环作了详细介绍。由于锁相环应用范围很广,所以在这一部分用了较大篇幅介绍了其应用。第七章至第十章为频率合成的基本技术、锁相频率合成、频率合成技术的发展及频率合成的应用。这一部分详细介绍了频率合成的理论和锁相频率合成。全数字频率合成器是一种新型的频率合成器,是频率合成的一个新的发展方向,它与微处理器结合可制成智能化的频率合成器。最后简要介绍了频率合成的部分应用,旨在使读者了解频率合成的用途。

本教材由南京工学院何振业教授主审。华东工学院谭新韶付教授代表教材编审小组对书稿进行了审定。太原机械学院王德祥教授,华东工学院朱明武教授及谢继光等同志对本教材的编写曾给书热情的帮助。华东工学院绘图室绘制了全部图表。兵工教材编审室宋筱平同志对书稿进行了认真地审阅和提出了许多意见,在此对上述同志表示衷心感谢。

由于编者水平有限,书中的缺点错误之处敬请读者批评指正。

编 者

目 录

绪论	1	§ 6-3 调频与解调	143
第一章 锁相环的工作原理	3	§ 6-4 调相与解调	148
§ 1-1 锁相环基本原理	3	§ 6-5 钟信号的再生	149
§ 1-2 锁相环的分类	5	§ 6-6 跟踪滤波器	152
✓ § 1-3 鉴相器	5	§ 6-7 彩色电视接收机中彩色副载波 同步	155
§ 1-4 环路滤波器	12	§ 6-8 立体声解码器	157
§ 1-5 压控振荡器	16	§ 6-9 电机速度控制系统	161
§ 1-6 锁相环相位模型和环路基本方程	24	§ 6-10 小结	167
§ 1-7 环路的捕获和跟踪	25	复习思考题及习题	168
§ 1-8 小结	27	第七章 频率合成的基本技术	169
复习思考题及习题	27	§ 7-1 频率合成定义及任务	169
第二章 锁相环性能分析	29	§ 7-2 频率→电压→频率的转换	169
§ 2-1 线性性能	29	§ 7-3 频率的数学运算	170
§ 2-2 捕捉性能	38	§ 7-4 频率合成的数学理论	180
§ 2-3 跟踪性能	49	§ 7-5 直接频率合成	182
§ 2-4 噪声性能	56	§ 7-6 小结	186
§ 2-5 小结	64	复习思考题及习题	186
复习思考题及习题	66	第八章 锁相频率合成	188
第三章 数字锁相环及取样锁相环	68	§ 8-1 锁相倍频	188
§ 3-1 具有数字鉴相器的数字锁相环	68	§ 8-2 锁相分频	192
§ 3-2 全数字锁相环	73	§ 8-3 锁相混频	194
§ 3-3 取样锁相环	87	§ 8-4 锁相单—频率合成器	195
§ 3-4 小结	89	§ 8-5 数字频率合成器	198
复习思考题及习题	90	§ 8-6 锁相十进可变频率合成器	201
第四章 集成锁相环及锁相环设计	91	§ 8-7 小结	203
§ 4-1 集成锁相环的分类及特点	91	复习思考题及习题	203
§ 4-2 国内外典型集成锁相环产品	92	第九章 频率合成技术的发展	204
§ 4-3 典型集成锁相环分析	92	§ 9-1 集成化合成器	204
§ 4-4 PLL电路设计	110	§ 9-2 全数字频率合成技术	214
§ 4-5 设计一个PLL系统的步骤	111	§ 9-3 小结	221
§ 4-6 小结	111	第十章 频率合成器和频率合成 技术的应用	222
复习思考题及习题	114	§ 10-1 频率合成技术在通信中的应用	222
第五章 锁相环参数测量	115	§ 10-2 锁相频率合成在矢量电压 表中的应用	223
§ 5-1 部件参数测量	115	§ 10-3 全数字频率合成技术在数字扫 频信号源中的应用	225
§ 5-2 环路参数测量	118	§ 10-4 小结	227
§ 5-3 小结	125	参考文献	227
复习思考题及习题	126		
第六章 锁相环的实际应用	127		
§ 6-1 调制与解调的一般概念	127		
§ 6-2 调幅与解调	136		

绪 论

锁相技术和频率合成技术从30年代发展开始，至今已有半个世纪。它随着电子器件的发展，从电子管、晶体管，小规模集成电路至大规模集成电路，逐步发展成集成锁相环和集成频率合成器。同时随着数字技术的发展，锁相与频率合成技术也从模拟逐步发展到数字乃至全数字的锁相与频率合成。

锁相技术早期是为了解决接收机的同步接收问题，即接收机本振频率与输入信号的载频相等，相位同步。后来在电视接收机的扫描电路中应用锁相环，减少了噪声对同步的影响，使电视图象同步性能得到很大改善，使锁相技术得到了广泛重视。

特别是空间技术应用锁相环后极大地推动了锁相理论及技术的发展。锁相环从二阶发展到三阶，从单锁相环发展到复合环和混合环。与此同时，频率合成技术从基本的直接频率合成技术发展到了锁相频率合成技术。锁相频率合成技术制成的合成器体积小、成本低、信道多、频率稳定度高、转换频率方便，为频率合成器的广泛应用提供了好的条件。

数字技术和计算技术的发展极大地推动了锁相与频率合成技术的发展。锁相与频率合成器开始数字化甚至智能化了。并且锁相与频率合成理论产生了一个飞跃，出现了与模拟锁相环和频率合成器完全不同的崭新的装置。

由于集成电路的发展，使得锁相和频率合成装置价格大幅度下降，调整简单、维修便利，因此它们的应用范围也大大拓宽了，从通信、导航、雷达、测量到材料、电化学、地球物理等领域逐步渗透到各个领域，直至家用电器，如彩色电视机、立体声收录机等。

锁相技术的特点概括起来是“稳”、“窄”、“抗”和“同步”。

“稳”指的是锁相环的基本性能是输出信号频率稳定地跟踪输入信号频率，它们不存在频率差而只有很小的稳态相位差。因此可以用锁相环做成稳频系统，例如微波稳频信号源、原子频率标准等。

“窄”指的是锁相环具有窄带跟踪性能。正是因为它的窄带特性，可以做成窄带跟踪滤波器。从输入的已调信号中提取基准的载波信号，实现相干性。因此在相干通信中得到广泛应用。

“抗”指的是锁相环的抗干扰性能、抑制噪声性能。理论分析表明，锁相环的环路信噪比比输入信噪比小很多，所以它可以广泛用于抗噪声干扰的装置。同时，锁相环又可以将深埋于噪声中的信息提取出来，因此它在弱信号提取方面发挥了很大的作用。

“同步”指的是锁相环的同步跟踪性能。如果数字信号本身含有位同步信息，利用锁相环可以从数字信号本身来提取位同步信号，所以锁相环在数字通信等系统中广泛地用作位同步装置。

由于频率合成器可以将一个稳定度很高的基准信号合成输出几十乃至几百万个频率稳定的信号，因此它可以做成高稳定的信号源；它可以使通信通道的间隔大大减小，增加信道数；用它做成原子频率标准，将原子跃迁频率的准确性和稳定性传递给晶体振荡

信号。当然，频率合成器以及合成技术还有许多其它用途，特别是与计算技术相结合，应用领域更广，它甚至可用于生物工程，例如一种任意波形合成器可促进核糖核酸(RNA)和脱氧核糖核酸(DNA)的合成。

波形合成技术是经典频率合成技术的一种新的发展，它不仅具有频率稳定度高，而且可以合成任意形状的波形信号，应该引起我们的兴趣，并进行研究，因而在本书中介绍了这方面的一些知识和发展情况。

第一章 锁相环的工作原理

§ 1-1 锁相环基本原理

锁相就是自动控制完成相位同步。能够实现两个电信号相位同步的自动控制系统叫做锁相环路，简称锁相环。锁相环是一个系统跟踪另一个系统的装置，更精确地说，就是一个系统中由振荡器产生的输出信号在频率和相位上与参考信号或输入信号同步。

当锁相环的输入信号和环路的输出信号之间存在相位差时，在锁相环控制机构的作用下，使振荡器输出信号和输入信号之间的相位差减至最小。因此，在这个控制系统中，输出信号相位实际上是锁定到参考信号或输入信号的相位上的，这就是锁相环名称的由来。

锁相环是一个相位自动跟踪系统，因而当锁相环锁定时，不存在输入信号和输出信号之间的频率差，而只存在如前所说的最小相位差。

图 1-1 示出了最基本的锁相环方框图。它包括三个基本部件：压控振荡器(VCO)，鉴相器(PD)和环路滤波器(LF)。

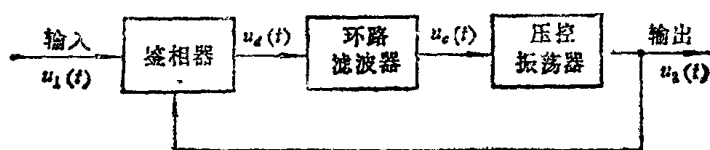


图1-1 基本锁相环方框图

在某些锁相环中，压控振荡器被电流控制振荡器(CCO)代替。此时，鉴相器输出信号是控制电流而不是控制电压。然而其工作原理是一样的。

现在我们简要地分析图 1-1 中三个部件的工作原理。鉴相器是相位比较装置，所以有时也叫做相位比较器或相敏检波器。它把输出信号 $u_2(t)$ 和参考信号 $u_1(t)$ 的相位进行比较，产生对应于两信号相位差 θ_e 的误差电压 $u_d(t)$ 。

环路滤波器的作用是滤除误差电压 $u_d(t)$ 中的高频成分和噪声，以保证环路所要求的性能，增加系统的稳定性。

压控振荡器受控制电压 $u_c(t)$ 的控制，使压控振荡器的频率向参考信号的频率接近，也就是使差拍频率越来越低，直至消除频率差而锁定。

现在让我们简要地介绍整个锁相环的工作原理。首先假设输入信号 $u_1(t)$ 的角频率等于 ω_0 ，而 ω_0 为 VCO 的中心频率，也即控制电压 $u_d(t) = 0$ 时的频率。此时，相位差 θ_e 为零，那么，鉴相器输出也为零，环路滤波器输出也必为零，因此，VCO 输出频率必然为其中心频率 ω_0 。

如果 θ_e 开始不为零，即输入信号 $u_1(t)$ 的角频率不等于 ω_0 ，那么鉴相器会产生非零输出 u_d ，环路滤波器也将产生输出信号 u_c ，这将使 VCO 的工作频率朝着相差 θ_e 消失

的方向变化。

现在假设输入信号频率在 t_0 时刻突变 $\Delta\omega$ ，如图 1-2 所示，输入信号的相位则开始偏离输出信号的相位，两者之间产生相位差，并随时间而增大。这时，鉴相器产生输出信号 $u_d(t)$ 也随时间而增大，经环路滤波器滤波延迟后， $u_c(t)$ 也增大，这就使得 VCO 的频率提高，相位差减少，经一段建立时间之后，VCO 的频率将精确地等于输入信号的频率。其最终相差将根据所使用的环路滤波器类型可能减小到零或很小的有限值。

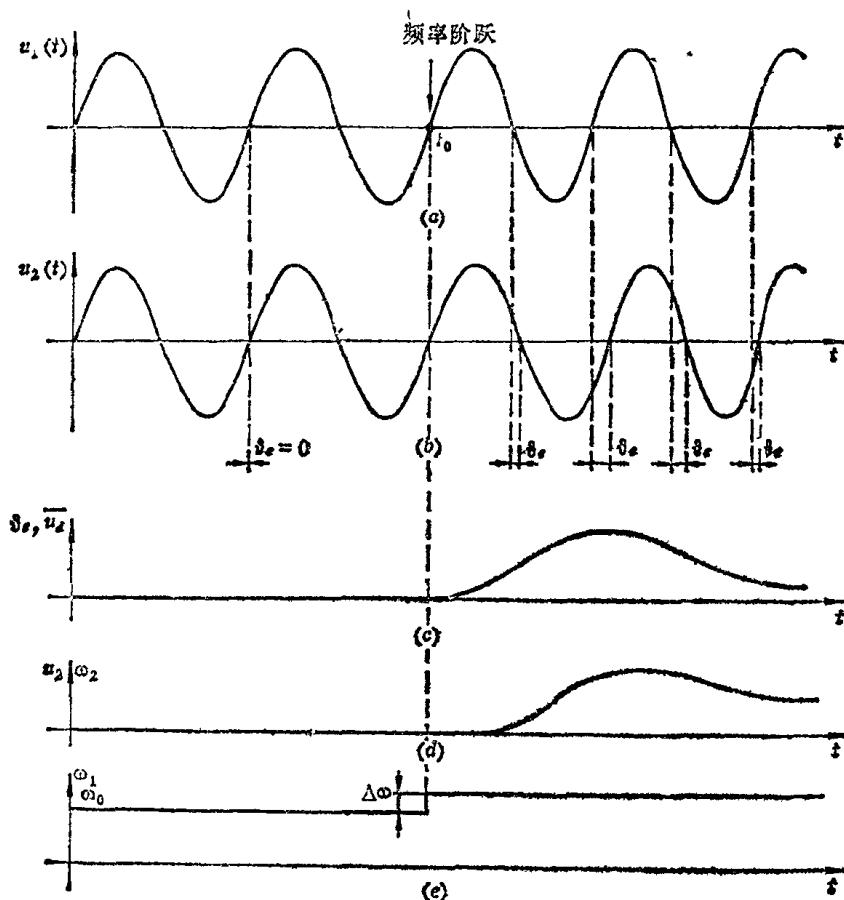


图1-2 输入信号频率阶跃时锁相环呈现的暂态响应

(a) 输入信号 $u_1(t)$ ；(b) VCO 的输出信号 $u_2(t)$ ；(c) 鉴相器输出信号的平均值 $\overline{u_d(t)}$ 和相位差 $\theta_e(t)$ ；(d) VCO 输出的角频率 ω_2 ；(e) 输入信号 $u_1(t)$ 的角频率 ω_1 。

显然，此时 VCO 的工作频率 ω_2 比其中心频率 ω_0 高了 $\Delta\omega$ 。那么，环路滤波器输出 $u_c(t)$ 最终应为 $u_c(t) = \Delta\omega / K_0$ 。 K_0 是 VCO 的压控增益。

如果输入信号是一个低频调制的调频信号，则环路滤波器输出就是解调出来的低频信号，因此锁相环可用作调频信号解调器。后面可以看到，锁相环还可以用作调相信号解调器和调幅信号解调器。

锁相环的一种奇特功能是可以抑制叠加在输入端的噪声，把深埋于噪声中的有用信号检测出来。

锁相环的这些功能，其原因就在于它是控制输出信号 $u_2(t)$ 相位的伺服系统。

由图 1-2 所示，似乎锁相环总是能使输出信号跟踪输入信号相位的，环路总是锁定

的。其实不然，当一个较大的频率阶跃加到输入信号上会引起环路失锁。当然，锁相环本身的控制机构会努力去再次锁定，但是该环路是不是一定会再锁定呢？在下章将详细讨论这个问题。

不同的锁相环，其工作情况也不同，所以首先应该了解不同的基本类型锁相环。

§ 1-2 锁相环的分类

不同类型的锁相环，其工作性能差异较大，这取决于锁相环采用部件的类型。大多数锁相环系统所使用的 VCO 或 CCO 的类型很相似。环路滤波器一般是一阶环路滤波器，但环路滤波器有无源和有源之分。无源环路滤波器又有 RC 积分滤波器和 RC 比例积分滤波器之分。有源环路滤波器也可有有源 RC 积分滤波器和有源 RC 比例积分滤波器之分。滤波器类型不同，环路性能有差异。

鉴相器对锁相环的性能特别是对动态性能影响极大。鉴相器有线性和数字型二类，线性型为模拟比较型。数字型为逻辑电路，例如异或门鉴相器。

锁相环可以根据应用场合的不同，适当组合各种类型的环路部件从而构成不同类型的锁相环。例如，某一锁相环可以选择 RC 积分滤波器和线性型鉴相器以及一般的 VCO 构成一种锁相环。

以下各节将分别讨论鉴相器，环路滤波器和 VCO 的各种类型。

§ 1-3 鉴相器

鉴相器(PD)又称相位检波器或相敏检波器，它是用来鉴别两个信号相位差的。

鉴相器是锁相环中很关键的一个部件，因此对鉴相器需提出一些技术要求。其主要指标有：(1) 鉴相特性形状；(2) 鉴相增益 K_d ；(3) 输入信号的漏泄；(4) 工作频率及输入、输出阻抗；(5) 对频率的鉴别能力。这是为了使锁相环快速锁定所提出的要求。鉴相器的鉴相特性有正弦形、三角形和锯齿形三种。

鉴相增益 K_d 是恒量鉴相器的重要指标。为了定义鉴相增益我们以线性型鉴相器为例。线性型鉴相器可以看作是一个乘法器。

假定鉴相器的输入信号和输出信号的瞬时值是互为正交的正弦波信号，并具有相同的频率 ω_1 。

$$u_1(t) = \hat{U}_1 \sin(\omega_1 t + \theta_1) \quad (1-1)$$

$$u_2(t) = \hat{U}_2 \cos(\omega_1 t + \theta_2) \quad (1-2)$$

因为鉴相器是一乘法器，所以鉴相器的输出信号 $u_d(t)$ 定义为两信号之乘积，即

$$\begin{aligned} u_d(t) &= K_m u_1(t) \cdot u_2(t) = K_m \hat{U}_1 \sin(\omega_1 t + \theta_1) \cdot \hat{U}_2 \cos(\omega_1 t + \theta_2) \\ &= \frac{K_m \hat{U}_1 \hat{U}_2}{2} [\sin(\theta_1 - \theta_2) + \sin(2\omega_1 t + \theta_1 + \theta_2)] \end{aligned} \quad (1-3)$$

式中 $\hat{U}_1, \hat{U}_2$ ——分别为 $u_1(t), u_2(t)$ 的振幅；

θ_1, θ_2 ——分别为 $u_1(t), u_2(t)$ 的初相位；

K_m ——为鉴相器本身的增益系数。

(1-3)式揭示了 $u_d(t)$ 是直流和交流成分的叠加。交流成分几乎完全被环路滤波器滤掉，因此只考虑直流或 u_d 的平均成分。那么，(1-3)式变为

$$\bar{u}_d = \frac{K_m \hat{U}_1 \hat{U}_2}{2} \sin(\theta_1 - \theta_2) \quad (1-4)$$

令 $K_d = \frac{K_m \hat{U}_1 \hat{U}_2}{2}$ 表示鉴相器的鉴相增益, 其单位为 V/rad。 $\theta_d = \theta_1 - \theta_2$ 表示两信号的相位差。因此(1-4)式成为

$$\bar{u}_d = K_d \sin \theta_d \quad (1-5)$$

如果鉴相器不平衡, 例如桥式二极管不对称, 或耦合变压器中心抽头两边的线圈匝数有微小差别, 都可以引起鉴相器输出中漏入输入信号。对于在鉴相器中输出信号漏入输入信号的现象称作漏泄现象。漏泄增加了环路滤波器滤波负担, 同时, 因为环路滤波器滤除能力的限制, 使得 VCO 输出信号变成被输入信号调制的信号, 降低了输出信号的频谱纯度以及增大了输出信号相位抖动。

鉴相器的工作频率是决定锁相环能工作的最高频率。对于不同频率的输入信号应采用与之相适应的鉴相器。若输入信号是微波信号, 则鉴相器应采用微波鉴相器, 例如采用微波混频器作为鉴相器。不言而喻, 鉴相器的输入和输出阻抗对输入信号源和环路滤波器的影响与电子线路中放大器的输入、输出阻抗的作用相同。

为了减小漏泄, 提高鉴相器的工作频率和增大鉴相器的输入阻抗, 在线性型鉴相器中, 往往采用传输线变压器。

既可鉴相又可鉴频的鉴相器称作鉴频鉴相器。当输入信号和输出信号频率有频差时, 鉴频鉴相器起鉴频作用, 其输出的控制电压迅速控制 VCO 的频率趋向于输入信号的频率。当两信号存在相位差时, 鉴频鉴相器起鉴相作用, 使输出信号相位和输入信号相位同步。这样鉴频鉴相器可加快锁相环的捕捉过程, 大大缩短锁定时间。

一、平衡电流开关鉴相器——1型鉴相器

这种鉴相器又称为双差分模拟乘法器。由于集成化的差分电路已经极普遍, 所以在集成化锁相环中多采用这种形式的鉴相器。图 1-3 示出了该电路原理图。

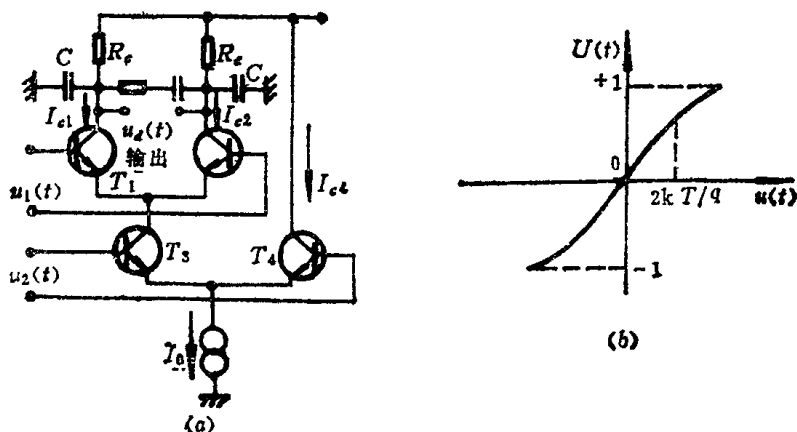


图1-3 平衡电流开关鉴相器

(a) 平衡电流开关鉴相器; (b) 差分放大器的传输特性。

电路由两个差分对 T_1 、 T_2 和 T_3 、 T_4 及恒流源 I_0 组成。 R_e 为差分对的负载电阻。 $u_1(t)$ 、 $u_2(t)$ 为输入电压, $u_d(t)$ 为鉴相器输出电压。

我们假设 $T_1 \sim T_4$ 完全一致, 且电流放大系数均为 $\alpha = 1$, 那么, 此时 $I_{e1} = I_{e2}$ 。根

据晶体管非线性方程, 则有

$$I_e = I_s e^{V_{BE}/V_T} \quad (1-6)$$

式中 $V_T = \frac{kT}{q}$, V_{BE} 为晶体管基-射极(即发射结)电压。

因为图1-3(a)中 T_1 、 T_2 及 T_3 、 T_4 为两个差分对, 它们应符合差分放大器的一些重要特性:

(1) 当 $u(t) = 0$ 时, 差分放大器处于平衡状态, 此时两晶体管电流相等。即 $U(t) = 0$ 也即

$$I_{e3} = I_{e4} = \frac{I_0}{2}$$

或

$$I_{e1} = I_{e2} = \frac{I_{e3}}{2}$$

(2) 当 $|u(t)| < 2V_T$ 时, $U(t)$ 与 $u(t)$ 近似成线性关系:

$$U(t) \approx \frac{u(t)}{2V_T} \quad (1-7)$$

(3) 当 $|u(t)| > 2V_T$ 时, $U(t) \approx 1$, 此时电路呈现良好的限幅特性, 是一性能优良的双向限幅器, 所以称该电路为电流开关电路。

由图1-3(b)可以看出差分放大器的传输特性曲线是一根双曲正切曲线。所以可表示成

$$U(t) = \tanh[u(t)/V_T] \quad (1-8)$$

现在求 $\bar{u}_d$, 首先写出 I_{e1} 、 I_{e2} 及 I_{e3} 表达式

$$\left. \begin{aligned} I_{e1} &= \frac{I_{e3}}{2} [1 + U_1(t)] \\ I_{e2} &= \frac{I_{e3}}{2} [1 - U_1(t)] \\ I_{e3} &= \frac{I_0}{2} [1 + U_2(t)] \end{aligned} \right\} \quad (1-9)$$

差分放大器输出差动电流

$$\Delta I_e = I_{e1} - I_{e2} = \frac{I_0}{2} [U_1(t)U_2(t) + U_1(t)] \quad (1-10)$$

鉴相器输出电压的平均值为

$$\bar{u}_d = \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} R_e \cdot \Delta I_e dt = \frac{I_0 R_e}{2T_0} \left[\int_0^{T_0} U_1(t)U_2(t) dt + \int_0^{T_0} U_1(t) dt \right] \quad (1-11)$$

式中 T_0 ——输出信号周期。

因为 $U_1(t)$ 为奇函数, 上式括号内第二项积分为零, 所以

$$\bar{u}_d = \frac{I_0 R_e}{2T_0} \int_0^{T_0} U_1(t)U_2(t) dt = \frac{V_R}{T_0} \int_0^{T_0} U_1(t)U_2(t) dt \quad (1-12)$$

式中 $V_R = \frac{I_0}{2} R_e$ 。

假设输入信号为两个频率相同, 相位差为 θ 的输入信号。

$$\left. \begin{aligned} u_1(t) &= \hat{U}_1 \sin(\omega t + \theta_e) \\ u_2(t) &= \hat{U}_2 \cos \omega t \end{aligned} \right\} \quad (1-13)$$

时, 则根据输入信号 $u_1(t)$, $u_2(t)$ 电平大小, 通常电路有三种不同的工作方式。

(1) $u_1(t)$ 和 $u_2(t)$ 均为小信号

$$\left. \begin{aligned} U_1(t) &= u_1(t)/2V_T \\ U_2(t) &= u_2(t)/2V_T \end{aligned} \right\} \quad (1-14)$$

将 (1-14) 式代入 (1-12) 式, 有

$$\bar{u}_d = \frac{V_R}{T_0} \int_0^{T_0} \frac{u_1(t)u_2(t)}{4V_T^2} dt = \frac{V_R}{4T_0V_T^2} \int_0^{T_0} [\hat{U}_1 \sin(\omega t + \theta_e) \cdot \hat{U}_2 \cos \omega t] dt \quad (1-15)$$

经低通滤波器滤除 2ω 的和频分量后得

$$\bar{u}_d = -\frac{V_R \hat{U}_1 \hat{U}_2}{8V_T} \sin \theta_e \quad (1-16)$$

(1-16) 式说明, 平衡电流开关鉴相器输出和两输入信号相位差的正弦成正比, 因此该鉴相器在小信号输入时具有正弦形的鉴相特性。

(2) $u_1(t)$ 和 $u_2(t)$ 均为大幅度的载波信号或开关信号时, $U_1(t)$ 和 $U_2(t)$ 均是幅度为 ± 1 的开关信号, 将其展成傅氏级数

$$\left. \begin{aligned} U_1(t) &= \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin n(\omega t + \theta_e)}{n} \quad n \text{ 为奇数} \\ U_2(t) &= \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos(n\omega t)}{n} \quad n \text{ 为奇数} \end{aligned} \right\} \quad (1-17)$$

将上 (1-17) 式代入 (1-12) 式得鉴相器输出平均电压为

$$\begin{aligned} \bar{u}_d &= \frac{V_R}{T_0} \int_0^{T_0} \left[\frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin n(\omega t + \theta_e)}{n} \cdot \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos(n\omega t)}{n} \right] dt \\ &= \frac{V_R \cdot 16}{T_0 \cdot \pi^2} \int_0^{T_0} \left[\sin(\omega t + \theta_e) \cos(\omega t) + \dots + \frac{1}{9} \sin 3(\omega t + \theta_e) \right. \\ &\quad \left. \times \cos(3\omega t) + \dots + \frac{1}{n^2} \sin(\omega t + \theta_e) \cos(n\omega t) + \dots \right] dt \end{aligned} \quad (1-18)$$

经积分、简化, 并用低通滤波器滤除两次谐波以上的分量后可以得到

$$\bar{u}_d = \begin{cases} V_R \cdot \frac{2}{\pi} \theta_e & -\frac{\pi}{2} < \theta_e < \frac{\pi}{2} \\ V_R \left(2 - \frac{2}{\pi} \right) \theta_e & \frac{\pi}{2} < \theta_e < \frac{3\pi}{2} \end{cases} \quad (1-19)$$

由上可见, 当 $u_1(t)$ 和 $u_2(t)$ 均为大幅度的载波信号或开关信号时, 鉴相器呈现三角形鉴相特性, 如图 1-4 所示。

(3) $u_1(t)$ 是开关信号, $u_2(t)$ 是小信号或相反时。

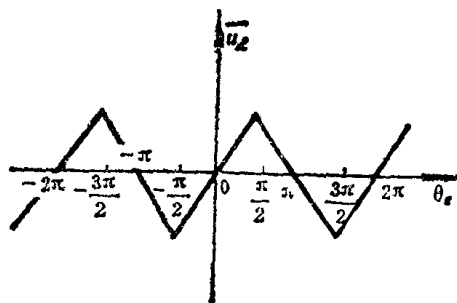


图 1-4 三角形鉴相特性

若 $u_2(t)$ 为小信号, 则

$$U_2(t) = \frac{U_2(t)}{2V_T} = \frac{\hat{U}_2}{2V_T} \cos \omega t \quad (1-20)$$

若 $u_1(t)$ 为开关信号, 则

$$U_1(t) = \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin n(\omega t + \theta_e)}{n} \quad (1-21)$$

将 (1-20) 式和 (1-21) 式代入 (1-12) 式可得

$$\bar{u}_d = \frac{V_R \hat{U}_2}{\pi V_T} \sin \theta_e \quad (1-22)$$

由上式显见, 鉴相器具有正弦鉴相特性, 且与开关信号 $u_1(t)$ 无关。

这种鉴相器可以在很低的输入信噪比下工作, 零点漂移和异调信号引起的漂移很小。因为一般工作情况下晶体管处于非饱和状态, 工作频率可以从很低到几十兆赫。同时, 因为不采用变压器而带来方便, 输出电压也较大, 并且有良好的温度特性。

二、异或门鉴相器——2型鉴相器

异或门电路符号及真值表见图1-5。



u_1	u_2	u_d
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

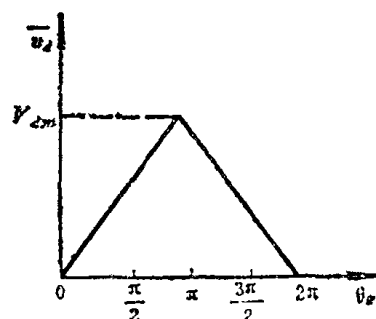


图1-5 异或门电路及真值表

图1-6 异或门电路的鉴相特性

在 $0 < \theta_e < \pi$ 时, 鉴相器输出电压的平均值

$$\bar{u}_d = \frac{1}{\pi} \int_0^{\theta_e} V_{dm} d(\omega t) = \frac{V_{dm}}{\pi} \theta_e$$

在 $\pi < \theta_e < 2\pi$ 时, 同理可求得输出平均电压

$$\bar{u}_d = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi - \theta_e} V_{dm} d(\omega t) = V_{dm} \left(2 - \frac{\theta_e}{\pi} \right)$$

因此

$$\bar{u}_d = \begin{cases} V_{dm} \frac{\theta_e}{\pi} & 0 < \theta_e < \pi \\ V_{dm} \left(2 - \frac{\theta_e}{\pi} \right) & \pi < \theta_e < 2\pi \end{cases} \quad (1-23)$$

(1-23) 式示于图1-6。故“异或”门电路具有三角形鉴相特性。其鉴相增益为

$$K_d = \pm V_{dm} / \pi \quad (1-24)$$

与门(或与非门)、或门(或或非门)同样具有三角形鉴相特性, 其鉴相增益均为 $K_d = \pm V_{dm} / 2\pi$, 比异或门的鉴相增益低一倍。另外异或门输出信号频率是输入信号频率的两倍, 这有利于环路滤波器对纹波的滤除, 使因鉴相器输出纹波引起的环路输出相

位抖动减小。

三、触发器式鉴相器——3型鉴相器

如图1-7所示。用两个输入脉冲信号去触发一个触发器，触发器的输出脉宽代表了两个输入脉冲信号相位差的信息。触发器输出脉冲滤波后呈直流，直流电压的大小就代表了两个脉冲信号的相位差。

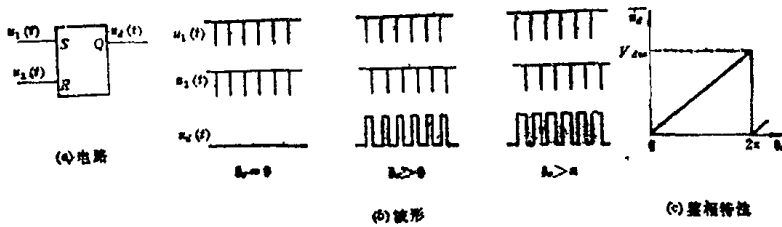


图1-7 触发器式鉴相器

(a) 电路, (b) 波形, (c) 鉴相特性。

由图1-7显见, 鉴相器具有锯齿形鉴相特性。其输出平均电压为

$$\bar{u}_d = \frac{V_{dm}}{2\pi} \theta_e \quad (1-25)$$

$$K_d = V_{dm}/2\pi$$

这种鉴相器应工作在鉴相特性的中间部分, 即 $\theta_e = \pi$ 附近。但此时鉴相器输出是方波信号, 虽经低通滤波器平滑, 仍不能完全滤除泄漏脉冲。泄漏脉冲会使环路输出相位产生抖动, 所以必须采取有效措施减小泄漏脉冲。

四、电压开关式鉴频鉴相器——4型鉴相器

所谓鉴频鉴相器就是它不仅具有同频鉴相作用, 而且具有鉴频作用, 这有利于环路的锁定。

电压开关式鉴频鉴相器如图1-8(a)所示。它由比相器, 泵电路和积分器三部分组成, 并集成于一硅片上。比相器由两个RS触发器和一些与非门组成。它的功能可分几种情况来讨论。

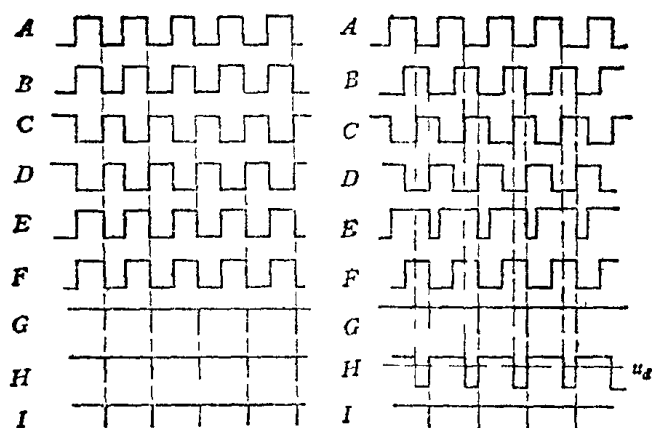
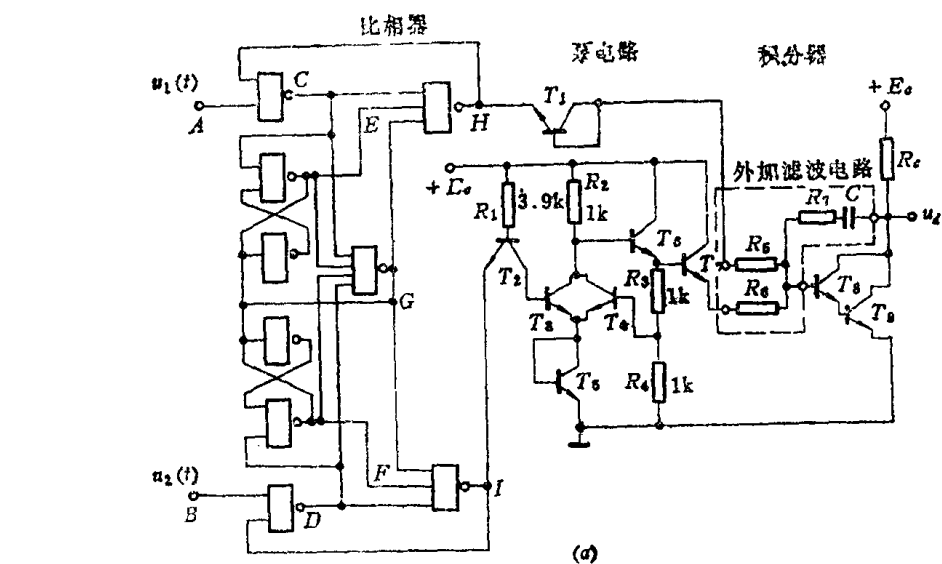
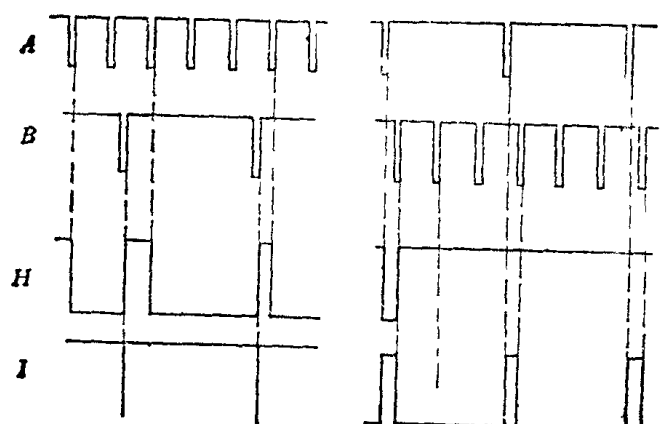
由图1-8(b)看到, 当 $f_1 = f_2$ 时, 相差是由两路输入信号的后沿决定的, 而与输入信号的占空比无关。当 $\theta_e = 0$ 时, 两路输入脉冲信号同时加到触发器, H、I无输出; 当 $u_1(t)$ 超前 $u_2(t)$ 时, 先触发的那一路就有输出, 因此, H有输出, 而I呈高电平状态; 当 $u_1(t)$ 滞后 $u_2(t)$ 时, 情形正好与超前相反。随着 θ_e 的增大, H(或I)输出也增大, 它们以 4π 为一周期, 所以可得图1-8(c)的鉴相特性, 其鉴相增益为

$$K_d = \frac{2V_{dm}}{4\pi} = \frac{V_{dm}}{2\pi} \quad (1-26)$$

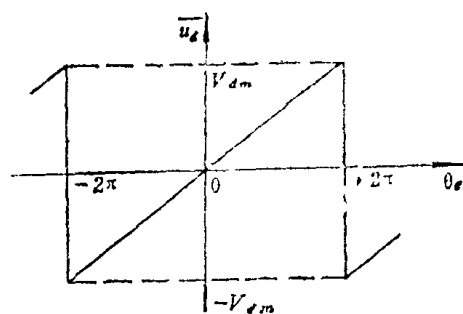
式中 V_{dm} 为 $2V_{BE} \approx 1.4V$ 。 V_{BE} 为晶体管发射结电压。

当输入频率不同时, 如图1-8(c)所示, 不管哪路脉冲先出现, 频率低的那路所对应的输出始终保持高电平, 而频率高的那路则输出一脉冲序列。

泵电路, 就功能来说, 实质上起到数-模转换的作用, 转换方式有恒压型和恒流型


 $\theta_e = 0 \quad f_1 = f_2$
 $\theta_e > 0 \quad f_1 = f_2$

 $f_1 > f_2$
 $f_1 < f_2$

(b)



(c)

图1-8 电压开关式鉴频鉴相器

(a) 电路原理图, (b) 波形, (c) 鉴相特性。

两种。但其结果都是把鉴相输出电压升高（或降低）到某一个电平。也就是说通过鉴相器的输出电压来控制一个恒压源，以给积分电路加入一个正的或负的阶跃电压。或者控制一个恒流源，使积分电路充电或放电。从而获得较大的直流控制电压范围，得以加宽锁相环的捕捉范围。

图1-8(a)中的泵电路相当于一个充放电电流开关。用差动放大器能起到这种作用。举一例来说明泵电路的作用。例如当 $f_1 < f_2$ 时， H 呈高电平，二极管 T_1 截止； I 呈低电平时， T_2 导通， T_3 截止。但电源电压 E_c 通过 R_2 给 T_3 基极注入电流， T_3 导通。使跟随器 T_4 为 T_3 、 T_5 达林顿电路提供足够的导通电流，迫使积分器放电，因而输出 $\bar{u}_d$ 减小，加到压控振荡器振荡回路变容管上的控制电压降低，振荡回路电容加大，使压控振荡器输出频率减小。此过程一直继续到频率相同，环路锁定为止。这时电路维持一定的相位差，产生一个极窄的脉冲，通过泵电路泵入积分器，用以补充电路的漏电以及频率变化造成的微小的相位变化，从而控制环路稳定锁定。

§ 1-4 环路滤波器

环路滤波器（LF）的作用在后面具体环路性能的讨论中可以理解。这一节只介绍四种环路滤波器的电路、传递函数及频率特性。

众所周知，滤波器传递函数的一般表达式为

$$F(s) = \frac{V_e(s)}{V_d(s)} = \frac{a_m s^m + a_{m-1} s^{m-1} + \dots + a_0}{b_n s^n + b_{n-1} s^{n-1} + \dots + b_0} \quad (1-27)$$

在锁相环中通常应用一阶环路滤波器，所以滤波器传递函数的简化表达式可写为

$$F(S) = \frac{a_1 S + a_0}{b_1 S + b_0} \quad (1-28)$$

下面我们扼要介绍四种环路滤波器。

一、RC积分滤波器——1型滤波器

1型滤波器如图1-9(a)所示。其传递函数为

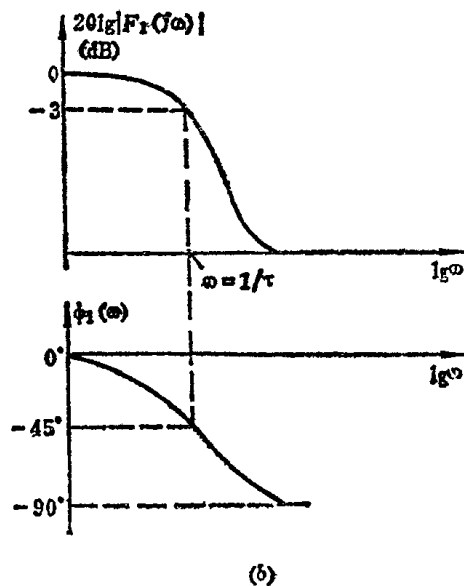
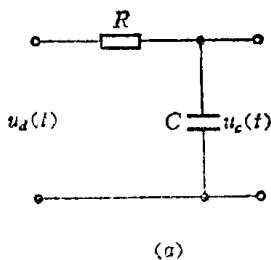


图1-9 RC积分滤波器——1型滤波器

(a) 电路原理图，(b) 幅相特性。