

实用锁相环电路

董献忱 编著 谢沅清 审

SHI YONG
SUO XIANG
HUAN LUAN



河北科学技术出版社

内 容 提 要

锁相技术是通信、电子技术中应用越来越广泛的一门新技术，尤其在各种同步技术中更是不可缺少的。

本书内容分两部分，一部分讲述锁相环的基本知识、基本工作原理及环路各部件和环路特性；另一部分讲述锁相环（以数字集成锁相环电路为主）在稳频技术、通信技术、电子仪表及录象和自控系统中的应用。本书以讲述锁相环的基本知识、基本物理概念为主，避开复杂的数学推导，着重从物理概念着手，介绍实际电路。可供具有高中以上文化水平的从事电子技术的工作人员和电子技术的工程技术人员学习参考。

编者的话

本书是作者在北京邮电学院编写的讲义及讲稿的基础上修改而成的。锁相技术是通信（卫星通信、微波通信、数字通信、载波通信、移动通信等）、电子技术中应用越来越广泛的一门新发展起来的技术，尤其在各种同步技术中更是不可缺少的。本书深入浅出地介绍了锁相环的基本工作原理及其锁相环应用电路。

本书内容分为两部分，一部分是讲述锁相环的组成、各部件的特性、环路工作原理及其环路特性。为了使读者易懂易学，尽量采用深入浅出的方法，以讲述锁相环的基本知识、基本物理概念为主，避开复杂的数学推导，着重从物理概念入手，介绍实际电路，然后得出结论。在写作中，力求内容层次分明、物理概念突出，结论清楚，以达到使读者一目了然的目的。另一部分讲述锁相环应用电路，并以数字集成锁相环电路为主。为了达到学以致用目的，本书介绍了锁相环在稳频技术中的应用、在各种通信中的应用、在仪表中的应用以及在录象和自控系统中的应用等。在讲述中介绍了使用的原则、使用的范围，并注意联系所应用的物理概念、实际的电路等，以达到理论联系实际，同时加深理解锁相环的物理概念及其工作原理。但由于锁相技术涉及的技术内容较广，数学公式较多，再加上作者水平有限，错误之处

在所难免，望读者批评指正。

本书第一章至第八章由董献忱编写，第九章由陈念知编写，全书由北京邮电学院谢沅清副教授审校。在编写过程中还得到陈丽鸣同志、芦雷同志的热情支持和帮助，在此谨致以衷心的感谢。

作者

1985年5月

目 录

第一章 概述	(1)
第一节 锁相技术的发展概况	(1)
一、锁相技术的发展史	(1)
二、为什么要使用锁相环	(5)
三、本书的内容	(9)
第二节 正弦信号的物理量	(10)
一、什么叫正弦信号	(10)
二、正弦信号的物理量(或称特征量)	(11)
三、正弦信号的频率与相位之间的关系	(12)
第三节 反馈控制的基本概念	(14)
一、振幅(幅值)反馈控制环路	(14)
二、频率反馈控制环路	(16)
三、相位反馈控制环路	(18)
第二章 锁相环的工作原理	(21)
第一节 锁相环的构成	(21)
一、锁相的基本概念	(21)
二、锁相环的构成	(25)
第二节 锁相环部件的工作原理	(29)
一、鉴相器	(29)
二、环路滤波器	(44)
三、压控振荡器	(60)

第三节	锁相环的基本方程和相位模型 ·····	(75)
一、	从“时域”求锁相环的基本方程和相位模型·····	(75)
二、	从“复频域”求锁相环的基本方程和相位模型·····	(80)
三、	锁相环路的传递函数·····	(82)
第四节	锁相环的工作状态 ·····	(89)
一、	锁定和跟踪状态·····	(90)
二、	失锁状态·····	(93)
第五节	锁相环锁定、失锁的物理概念 ·····	(94)
一、	锁相环锁定的物理概念·····	(95)
二、	锁相环从失锁到锁定的物理概念·····	(97)
第三章	锁相环线性性能简介 ·····	(102)
第一节	锁相环的频率响应 ·····	(102)
一、	什么叫锁相环的频率响应·····	(102)
二、	锁相环的频率响应·····	(104)
三、	结论·····	(113)
第二节	锁相环的跟踪误差 ·····	(113)
一、	什么叫锁相环的跟踪误差·····	(113)
二、	稳态跟踪误差的分析·····	(114)
第三节	锁相环的时间响应 ·····	(123)
一、	什么叫锁相环的时间响应·····	(123)
二、	一阶锁相环的时间响应·····	(124)
三、	二阶锁相环的时间响应·····	(128)
四、	结论·····	(137)
五、	二阶锁相环的“时域”指标·····	(138)
第四节	锁相环的稳定性 ·····	(140)
一、	根轨迹的基本概念·····	(140)
二、	判断环路的稳定性·····	(145)

三、利用伯德图法判断环路的稳定性·····	(151)
第五节 锁相环的同步带和捕捉带 ·····	(161)
一、什么叫锁相环的同步带·····	(162)
二、同步带的计算·····	(162)
三、什么叫锁相环的快捕带和捕捉带·····	(167)
四、辅助捕获方法·····	(171)
第四章 锁相环在稳频技术中的应用 ·····	(180)
第一节 频率合成器的工作原理 ·····	(180)
一、什么叫频率合成器·····	(180)
二、频率合成器的基本工作原理·····	(183)
三、集成锁相环频率合成器的构成和特点·····	(187)
第二节 数字式频率合成器 ·····	(189)
一、如何实现频率组合·····	(191)
二、双环数字式频率合成器的主要电路·····	(196)
三、集成锁相环频率合成器·····	(202)
第三节 数字频率合成器的设计步骤 ·····	(207)
第五章 锁相接收机 ·····	(215)
第一节 概述 ·····	(215)
一、什么叫锁相接收机·····	(215)
二、为什么要采用锁相接收机·····	(219)
第二节 锁相接收机的工作分析 ·····	(224)
一、锁相接收机是如何工作的·····	(224)
二、锁相接收机举例·····	(229)
第六章 锁相环在有线通信中的应用 ·····	(235)
第一节 有线通信与锁相环 ·····	(235)
第二节 锁相环在调频、调相解调器中的应用 ·····	(239)
第三节 锁相环在同步载波再生方式中的应用 ·····	(244)

第四节	锁相环在定时信号再生方式中的应用…	(251)
第五节	锁相环在网同步方式中的应用…	(258)
第七章	锁相环在无线通信中的应用…	(262)
第一节	概述…	(262)
第二节	锁相环在相位同步解调方式中的应用…	(263)
第三节	锁相环在数字微波中的应用…	(268)
一、	同步载波再生方式…	(273)
二、	实际的同步载波再生电路…	(275)
第四节	锁相环在数字卫星通信中的应用…	(279)
一、	卫星通信中的时钟脉冲同步系统…	(279)
二、	卫星通信中的载波同步系统…	(282)
第八章	锁相环在电子仪表中的应用…	(285)
第一节	锁相环在电平振荡器中的应用…	(285)
一、	什么叫电平振荡器…	(285)
二、	UX—2型1.7MHz电平振荡器…	(285)
第二节	锁相环在频谱分析仪中的应用…	(298)
一、	频谱分析仪的工作概况…	(298)
二、	锁相环电路…	(300)
第九章	锁相环在马达控制中的应用…	(305)
第一节	锁相环与马达控制…	(305)
第二节	锁相环在马达控制系统的构成…	(306)
一、	锁相环…	(306)
二、	速度控制环路…	(308)
第三节	环路的部件和特性…	(308)
一、	位置检波器…	(308)
二、	鉴相器…	(309)
三、	速度检波器…	(311)

四、环路滤波器	(312)
五、马达的驱动电路	(313)
第四节 锁相环在非同步马达控制中的应用	(313)
一、锁相环在直流马达控制中的应用	(313)
二、锁相环在感应马达控制中的应用	(317)
第五节 锁相环在磁带录象机中的应用	(320)
一、磁带录象机的同步控制系统	(321)
二、磁头马达的控制系统	(321)
附录 国内外典型锁相集成电路介绍	(324)

第一章 概 述

第一节 锁相技术的发展概况

一、锁相技术的发展史

锁相技术起源于本世纪30年代，当时正是无线电技术发展的初期，为了寻找一种性能好、结构简单的接收设备，于是就提出了无线电调幅信号的同步检波技术。同步检波要求接收机的本机振荡频率与接收机收到的输入信号的载波频率(或者说、发射机发射的载波频率)相等，而它们之间的相位又是基本上一致。因此，人们提出了相位自动微调系统，如图1·1-1所示。这种系统，当时为同步检波提供了一个与输入信号载波同频同相的本机参考信号。这就促进了锁相技术的发展。但是，在30年代，由于受到技术条件的限制，再加之制作成本高昂，所以在电子技术系统中均未得到实际应用。

到了40年代，由于电视技术得到了迅速发展。普遍应用锁相环路是从电视接收机的垂直与水平同步电路中开始的，它可以减少噪声对同步的影响，使接收到的图象的同步性能有了较大的改善。因此，锁相技术得到了广泛的重视。例如，

号。另外，从同步分离电路分出的同步信号，变换为极性相反的两个脉冲，分别通过 C_1 、 C_2 加给相位检波器进行检波，其检波输出在 R_3 取出，并经由 C_5 、 R_5 、 R_6 组成的积分电路，滤除高频分量与噪声，去控制由行振荡管组成的阴极耦合的多谐振荡器，以达到行同步的目的。这就是说，AFC电路是由相位检波器（相位比较器或鉴相器）、积分电路和行扫描振荡电路组成，如图1-1-3所示。从行扫描电路来的反馈信号（即比较信号）和从同步分离电路来的同步

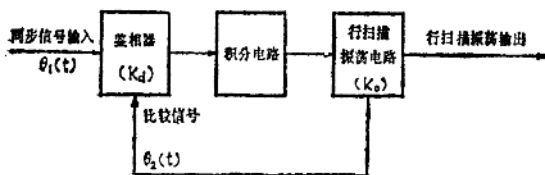


图1-1-3 图1-1-2的方块图

信号，在相位比较器中进行比相，检波出来的相位误差，经过适当的积分电路，去控制行振荡电路。这时，行振荡电路的控制电压控制行振荡频率变化，使同步信号和比较信号的相位误差朝着减小的方向变化。这实际上就是锁相环的基本工作过程。不过，在图1-1-2中组成电路的电子器件是电子管，而在晶体管 and 集成电路相继问世之后，只不过组成各个电路的器件和线路有所变化，但整个电路构成的原理仍与图1-1-1相同。

到了50年代的后半期，由于空间技术的迅速发展，锁相技术获得了更为广泛的应用。例如，射入太空的人造地球卫星，其中载有约10毫瓦的连续波发射机，以发射信号与地面保持联络（当然，也含有传送的各种有用的信息）。可是，地面距轨道上的卫星，近者几百公里，远者几千公里。因此，地面上所接收的由卫星发射来的信号是非常微弱的。又由于距离远，发射与接收信号在时间上有滞后，以及发射机振荡器频率和接收机本机振荡频率受电源、温度等影响而产生频率漂移。因此，我们使用普通的接收机来接收卫星上发射的信号是十分困难的，这就是说，接收机的带宽必须很宽才行，而噪声与带宽成正比，这样信噪比就相当低。此时采用锁相技术来制作锁相跟踪接收机，可以把深埋在噪声中的卫星发射出来的信号检测出来。因此，锁相技术的发展与空间技术的研究和发展是互相促进的。尽管如此，直到60年代前半期，由于锁相技术中的个别部件的制作费用仍然十分昂贵，所以在使用范围上仍受到较大的限制。

到了70年代，由于半导体技术和集成电路技术的迅速发展，使锁相技术越来越广泛地用于电子技术领域。当前，锁相技术已成为现代通信、电子技术领域中不可缺少的一种控制技术。

特别是近十年来，数据通信、卫星通信发展非常迅速，因此，研究、制作数字锁相环也是当前的一个重要的课题。

以上，举出了锁相环主要应用的例子，而其他方面应用的例子是非常多的。在表1—1中，示出了锁相环应用的范围。

表1—1

锁相环的主要应用范围

自动频率控制	马达速度控制（电动机、电唱机）
频率合成、变换	频率合成器，频率倍频、分频（计数器）
调频（FM）、调相（PM）信号的解调	数据传输，卫星通信解调器，FM接收机的鉴频器
信号跟踪	卫星通信
信号的同步	数据通信，PCM通信，电视接收机（行同步、彩色信号电路），计算机中的磁盘转速同步与控制，立体声多路解码等
频率选择	滤波器（带通滤波器）

二、为什么要使用锁相环

锁相技术就是研究和探讨以信号的相位作为输入量和输出量的反馈回路理论与性能的一门科学技术。为什么在电子系统中使用锁相环？其理由是：

1、锁相环能稳定振荡源的频率

无论是测量用的信号发生器、电平表、选频表和误差分析仪，还是通信系统中的收—发信机的振荡源以及其他的振荡源等，其提出的各项技术要求中，最重要的技术指标，应当具有一定的频率稳定性和精确度。可是，当各种频率振荡器的环境温度、电源电压和元件参数变化时，则使振荡源的频率产生漂移，也就是频率的稳定度和精确度下降。假如，

受其影响的各种振荡源的频率漂移严重，小害可使测量仪表误差加大，各种通信不够正常；大害可使测量仪表不能正常使用，各种通信发生中断。为了解决振荡源的频率稳定度，可在振荡电路中，使用高Q值的石英晶体作为振荡回路中的元件。但是，石英晶体频率变化范围是很窄的，且用一块石英晶体只能来稳定一个频率。那么，如果在较宽的频率范围内，要获得多少个频率，就需要使用多少块石英晶体。这样无论从价格、体积、重量来说都是不适宜的。

在振荡频率源电路中，为了不多用石英晶体，又能达到频率宽度要求，这就要使用新的技术。通常采用自动频率调整系统。实施自动频率调整，其方法之一是采用自动频率微调系统（AFC），其方法之二是采用自动相位微调系统（APC）。

2、采用自动频率微调系统不能消灭频差

自动频率微调系统的方块图，如图 1 - 1 - 4 所示。它是由压控振荡器（VCO）、混频器、鉴频器、低通滤波器和基准频率源所组成。这一系统的作用原理是，应当使压控振荡器的频率 f_0 趋向基准频率 f_r 。其过程是把 f_0 和 f_r 在混频器中进行混频，它们之间的频差送到鉴频器，鉴频器输出的电压 $v_d(t)$ 的大小正比于频差（ $|f_r - f_0|$ ），而 $v_d(t)$ 的极性取决于 $f_r - f_0$ 的正负， $v_d(t)$ 经过低通滤波器滤除高频及噪声之后，输出电压为 $v_c(t)$ ，进而改变变容管的电容，使压控振荡器的频率 f_0 的变化趋向基准频率 f_r ，因而减小了 f_0 与 f_r 之间的频差。

但是，在自动频率微调系统中， f_0 只能趋于 f_r ，而永远不会等于 f_r 。这就是说，自动频率微调的结果，仍然存在着

频差，这样， f_0 的稳定度始终低于 f_r 的稳定度。通常把此频

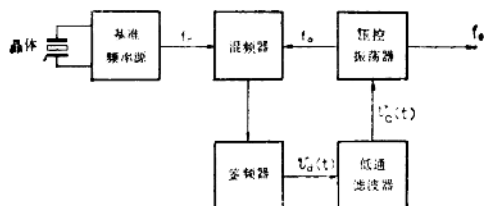


图 1-1-4 AFC系统

差称作剩余频率失谐，存在这一失谐的根本原因，就在于 AFC系统中， $v_d(t)$ 的本身就是由剩余频差产生的，如果没有剩余频差，其控制压控振荡器变容管的电压 $v_c(t)$ 也就消失了，因此，就不可能对 f_0 实施控制。

综上所述，AFC系统调整的结果，只能使 f_0 趋向 f_r ，而不能使 $f_0 = f_r$ 。这就是说，AFC系统是不能消灭频差的。

3、采用自动相位微调系统（锁相环）可消灭频差

自动相位微调系统（锁相环）的方块图，如图 1-1-5 所示。它是由相位比较器（鉴相器）、环路滤波器和压控振

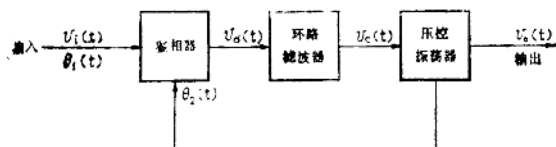


图 1-1-5 锁相环方块图

荡器所组成。这一系统的作用原理是，利用两个信号之间的相位误差来调节系统的输出信号的相位，使之达到与输入信

号频率（基准信号频率）相等，相位一致（或保持一个较小的固定相位差）。其过程是，鉴相器对输入信号相位（基准信号相位）和压控振荡器的输出信号进行相位比较，它的输出是一个反映两个信号相位差大小的误差电压 $v_d(t)$ 。这个电压经过环路滤波器作用后加到压控振荡器上，朝着减小两信号相位误差的方向调节输出信号的频率与相位，使系统达到相位同步或锁定。显然，根据频率与相位的变换关系，只要相位差固定，频率差就为零。因此，自动相位微调系统的输出就可消灭频差了。

综上所述，APC系统调整的结果，能使 $f_0 = f_r$ ，而相位差为零（或保持一较小的相位差）。这就是说，APC系统是能消灭频差的。

4、锁相环具有良好的窄带载波跟踪特性

通过合理的设计，锁相环对输入信号可等效为一个良好的窄带跟踪滤波器。窄带跟踪指的是跟踪输入信号载频的慢变化，例如多普勒引起的载频漂移变化；窄带滤波指的是对于干扰与噪声，锁相环有相当好的窄带滤波作用。这是由于当压控振荡器的输出频率锁定在输入频率时，位于信号频率附近的干扰成分将以低频干扰的形式进入锁相环，而绝大部分干扰会受到环路滤波器的低通特性的抑制，从而减少了对压控振荡器的干扰作用。所以，锁相环对干扰的抑制作用，就相当于一个窄带的高频带通滤波器，其带宽取决于环路滤波器的低通特性。如果改变环路滤波器的带宽，其锁相环相当于一个窄带的高频带通滤波器的带宽也随之改变。一般来说，高频通带可以作得很窄，例如在几十兆赫的频率上可以实现几十赫的窄带滤波。锁相环窄带滤波示意图，如图