

方建邦 董献忱 王天玺 编著

王晓涛 审

邮电高等
函授教材

锁相环原理 及其应用

人民邮电出版社

邮电高等函授教材

锁相环原理及其应用

方建邦 董献忱 王天玺 编著
王晓涛 审

人民邮电出版社

内 容 提 要

本书是根据新的教学大纲要求和近几年来教学实践，为邮电高等函授各专业编写的教材。

全书共八章，详细地介绍了模拟和数字锁相环的基本原理，并具体分析了环路的跟踪性能、捕获性能和噪声性能。此外，还较详细地介绍了各种集成环路部件、通用和专用集成锁相环以及如何使用微机计算环路线性性能。

为了便于自学，在内容叙述上力求通俗易懂，由浅入深地阐明问题，并结合各章的特点，提供思考题与习题、小结，以供学习参考。

本书供邮电高等函授电信各专业作教材，也可供工科院校电子类专业师生以及从事电子和通信工作的工程技术人员参考。

邮电高等函授教材
锁相环原理及其应用
方建邦 董献忱 王天玺 编著
王晓涛 审

人民邮电出版社出版
北京东长安街27号

广益印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行
各地新华书店经售

开本：850×1168 1/32 1988年6月第一版
印张：12²⁴/₃₂ 页数：204 1988年6月北京第1次印刷
字数：335千字 印数：1—1,500册

ISBN 7115-03586-5/TN·001

定价：2.40元

前 言

随着半导体和集成电路的出现,近年来锁相环(PLL)也获得了迅猛的发展。目前,它已经深入到了我们的每个家庭之中,如彩色电视机的同步系统;高保真度设备中的立体声多路解码;频率合成式调谐器;四声道解调器及走带电机速度控制等无不应用到锁相环。至于在雷达、导航、通信、计算机和仪表等方面,则应用得更广泛。例如,在计算机中用于各种钟频信号的供给、磁盘转速同步与控制等;在通信中用于无线收、发信机的主振和本振源,有线通信中的载频供给,数字通信中的载波提取与位同步信号提取等;在雷达中用于微波固态源;微波功率放大器,天线自动跟踪等;在空间技术中,如卫星、导弹、火箭和飞船的测速定轨与测距系统更是离不开锁相环;再如,原子能加速器的同步,原子能反应堆应力形变监测,激光稳频和红外夜视瞄准等设备中,都使用着锁相环。不难看出,凡是要求精度及自动化程度高的电子系统,亦即先进电子设备,都离不开锁相环。因此,为了更好地从事锁相技术领域的工作,需要掌握这门技术,应用这门技术。

本书共分为八章,前四章属于模拟环的基本概念与性能分析。第一章简要地介绍了调频信号和调相信号的基本性质、网络函数和反馈控制,便于学生了解教材中的一些概念、公式和“术语”。第二章从锁相环的基本组成出发,着重从物理概念上阐述锁相环的一些基本概念。第三章详细地叙述了线性化环路的基本特性和环路的线性跟踪性能,以及锁相环的捕获性能。第四章分析了环路在窄带白高斯噪声作用下的性能,并介绍了环路失锁门限及跳周的基本概念。第五章属于数字环部分。介绍了目前正在发展着的,两种数字化锁相环的基本原理和特性。第六章属于锁相环的应用部分。介绍了锁相环的鉴频原理以及限幅器对鉴频环路的影响。在阐明取样锁相环基

本原理的同时，介绍了频率合成技术。最后扼要介绍了锁相接收机的基本原理。第七章属于微机在锁相环性能分析中的应用。介绍了使用微机计算暂态跟踪特性、频域特性及稳定性等的基本方法和步骤。第八章属于环路的测量部分。扼要地说明了环路主要性能的测试方法和原理，通过这章的学习，也是对前面几章内容的一个总结、应用和深入理解的过程。

在学习本课程中，自始至终都要清醒地认识到：锁相环是一个相位负反馈环路，其输入量为输入信号的相位，输出量是输出信号的相位，而输入与输出信号电压： $u_i(t)$ 、 $u_o(t)$ 只不过是测量相位的一种表现形式。锁相环本是一非线性系统，但在一定条件下，可以作为线性系统来分析，因而在使用分析结果时，要注意使用条件。在对基本环路的学习中，应注意定性分析和定量计算的结合，理论与实践的结合。

独立完成规定的作业，是学好本课程十分重要的一个环节，应给予足够的重视。

全书共八章，其中第一、二、三章由董献忱同志执笔，第四、五、六章由方建邦同志执笔，第七、八章由王天玺同志执笔，全书由方建邦同志统编，并经王晓涛同志审核定稿。

由于时间仓促，经验不足，书中难免有谬误之处，希望读者批评指正。

编者 1987.6

目 录

第一章 基本知识

- 第一节 调频信号和调相信号的基本性质 (1)
- 一、调角信号的瞬时频率和瞬时相位 (2)
- 二、调频信号和调相信号的基本性质 (3)
- 第二节 网络函数 (7)
- 一、什么是网络函数 (7)
- 二、网络函数的零点和极点 (8)
- 三、网络的稳定条件 (9)
- 四、网络频域特性 (11)
- 第三节 反馈控制的概念 (13)
- 思考题与习题 (16)

第二章 锁相环的基本原理

- 第一节 锁相环的组成 (19)
- 第二节 环路部件 (20)
- 一、鉴相器 (20)
- 二、环路滤波器 (31)
- 三、压控振荡器 (39)
- 第三节 环路的相位模型和基本方程 (51)
- 一、相位模型 (51)
- 二、基本方程 (52)
- 第四节 环路工作过程的定性说明 (53)
- 小结 (58)
- 思考题与习题 (60)

第三章 锁相环性能分析

- 第一节 线性化概念 (66)
- 一、鉴相器的线性近似 (66)

二、线性化环路的基本方程	(67)
第二节 锁相环的传递函数	(68)
一、环路传递函数的一般形式	(68)
二、实际环路的传递函数	(70)
三、用环路参数表示传递函数	(71)
第三节 锁相环的跟踪性能	(74)
一、相位信号	(74)
二、衡量暂态响应的主要指标	(77)
三、环路的暂态响应	(79)
四、环路的稳态相位误差	(96)
第四节 锁相环的频域特性	(101)
一、引言	(102)
二、一阶环 $[F(S)=1]$	(104)
三、具有理想积分滤波器的二阶环	(106)
四、具有无源比例积分滤波器的二阶环	(110)
第五节 锁相环的稳定性	(114)
一、稳定的概念	(114)
二、环路稳定性的定义	(115)
三、环路的稳定条件	(115)
四、波特准则	(117)
五、几个具体环路的稳定条件	(119)
第六节 锁相环的捕获性能	(128)
一、相图法的基本概念	(129)
二、一阶环的信号捕获	(131)
三、固定频率输入的二阶环信号捕获	(139)
四、辅助捕捉方法	(146)
小结	(153)
思考题与习题	(156)

第四章 锁相环的噪声性能

第一节 噪声的统计特性	(165)
一、随机过程的基本知识	(166)

二、随机过程的数字特性	(170)
三、平稳随机过程的各态历经性	(177)
四、平稳随机过程的功率谱密度	(178)
五、高斯噪声和白噪声	(181)
第二节 环路噪声相位模型	(182)
一、输入相加噪声的性质	(182)
二、有相加噪声时的环路相位模型	(184)
第三节 噪声的线性过滤特性	(187)
一、环路输出相位噪声方差	(189)
二、环路噪声带宽	(190)
三、环路信噪比	(194)
第四节 环路失锁门限和跳周现象	(196)
小结	(200)
思考题与习题	(202)
第五章 数字锁相环原理	
第一节 概述	(204)
一、离散信号——序列	(204)
二、差分方程	(207)
三、Z变换	(209)
第二节 一种数字锁相环	(219)
一、鉴相器类型对数字环动态性能的影响	(219)
二、数字锁相环的捕获过程	(234)
三、数字锁相环的跟踪性能	(238)
第三节 全数字和以软件为基础的锁相环	(240)
一、全数字锁相环功能块的结构	(240)
二、全数字鉴相器	(242)
三、全数字环路滤波器	(249)
四、数字控制的振荡器	(257)
五、全数字锁相环	(260)
小结	(265)
思考题与习题	(266)

第六章 锁相环的应用

第一节 在相干解调技术中应用	(269)
一、锁相鉴频	(270)
二、同步检波器	(291)
三、平方环	(296)
四、反调制环	(298)
五、位同步提取	(299)
第二节 取样锁相环及其在频率合成技术中的应用	(301)
一、取样锁相环的基本原理	(301)
二、频率合成技术	(316)
第三节 锁相接收机	(330)
一、多普勒效应	(330)
二、为什么要采用锁相接收机	(332)
三、锁相接收机是怎样工作的	(334)
第四节 锁相环在其它方面的应用	(336)
一、立体声解码	(336)
二、彩色电视色信号处理和解码电路	(344)
三、电机转速控制电路	(347)
小结	(348)
思考题与习题	(349)

第七章 用微机计算环路的线性性能

第一节 用微机计算锁相环的时域特性	(351)
一、几种常用算法的原理和特点	(351)
二、对于二阶以下环路的时域特性计算可用预报——校正法	(354)
三、用微机计算高阶环路的时域特性	(358)
第二节 用微机计算绘制锁相环的频率特性	(364)
一、余项算法	(364)
二、利用上述方法编制计算环路的频率特性程序	(366)
第三节 运用微机判断锁相环的稳定性能	(372)
一、选择算法，列出计算公式	(373)

二、程序如下(用BASIC语言编写)	(374)
三、运算结果	(375)
四、如果改变环路参数	(375)
思考题与习题	(375)

第八章 锁相环路测量

一、同步带宽与跟踪范围的测量	(378)
二、捕捉带和捕捉时间的测量	(381)
三、稳态相位误差 $\theta_s(\infty)$ 及环路参数的测量.....	(383)
四、环路传递函数(频率特性)的测量	(388)
五、环路的噪声测量	(392)

第一章 基本知识

目的要求

在研究锁相环时，需要对某些基本知识有所了解。本章简单地介绍了调频信号和调相信号的基本性质、网络函数和反馈控制。在这里所介绍的内容都是粗略的和不严格的，其目的是使学生能了解书中的概念、公式和“术语”。

第一节 调频信号和调相信号的基本性质

一个简谐信号可以由它的三个基本参量来描述，即它的振幅、频率和相位，不论改变其中的哪个参量，都可以产生调制作用，从而载有欲传递的信息。例如某高频振荡信号为

$$u_c(t) = U_{cm} \cos(\omega_c t + \theta_0) \quad (1-1-1)$$

式(1-1-1)中： U_{cm} 为信号的幅度， ω_c 是角频率， θ_0 是初相角， $(\omega_c t + \theta_0)$ 为瞬时相位，通常用 $\theta(t)$ 表示，因此式(1-1-1)也可写成

$$u_c(t) = U_{cm} \cos\theta(t) \quad (1-1-2)$$

大家知道，如果使高频振荡的幅度 U_{cm} 随低频调制信号线性地变化，就叫做振幅调制，简称调幅。而使高频振荡的角频率 ω_c 随低频调制信号线性变化，就叫做频率调制，简称调频。同理，使高频振荡的初相 θ_0 随低频调制信号线性变化，就叫做相位调制，简称调相。由式(1-1-1)可看出，不论是调频还是调相，都将使瞬时相位 $\theta(t)$ 发生变化，所以有时统称为调角。

一、调角信号的瞬时频率和瞬时相位

如果将式(1-1-1)用旋转矢量表示时,如图 1-1 所示。其矢量的长短表示振幅 U_{cm} , 矢量逆时针旋转的角速度为角频率 ω_c , 在 $t=0$ 时, 矢量与正实轴的夹角为初相角 θ_0 ; 时间为 t 时, 该夹角为 $\theta(t)$, 则矢量在横轴上的投影就代表式(1-1-2)的高频振荡。

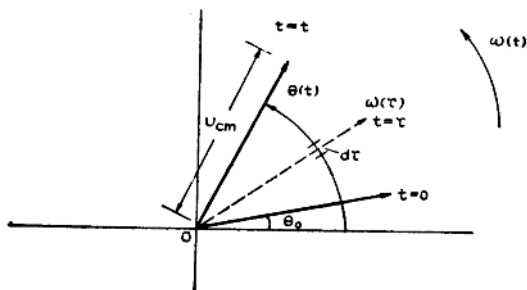


图 1-1 简谐振荡的矢量表示

当角频率 ω_c 为常数时, 矢量以恒定的角速度 ω_c 旋转, 则它在 t 时间内所转过的角度为 $\omega_c t$, 这样, $\theta(t) = \omega_c t + \theta_0$, 这时信号的数学表达式即为式(1-1-1)。

如果为一调角信号, 则其角频率将随时间变化, 矢量将以变化的角速度 $\omega(t)$ 变速旋转, 那么在时间 t 内矢量转过的角度就不是 $\omega(t) \cdot t$, 而是 $\int_0^t \omega(\tau) d\tau$, 所以这时的瞬时相位 $\theta(t)$ 为

$$\theta(t) = \int_0^t \omega(\tau) d\tau + \theta_0 \quad (1-1-3)$$

将式(1-1-3)的两边微分, 得

$$\omega(t) = \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (1-1-4)$$

式(1-1-4)表明, 瞬时角频率 $\omega(t)$ 等于瞬时相位对时间的变化率。

式(1-1-3)和式(1-1-4)是说明角度调制中瞬时频率和瞬时相位之间关系的两个基本方程式。

例 1-1 试求某调角信号 $u(t) = U_m \sin(20\pi t + \pi t^2)$ 的瞬时角频率 $\omega(t)$ 。

解 ∵ 瞬时相位为

$$\theta(t) = 20\pi t + \pi t^2$$

利用式(1-1-4), 可求出瞬时角频率为

$$\omega(t) = \frac{d\theta(t)}{dt} = \frac{d(20\pi t + \pi t^2)}{dt} = 2\pi(10 + t)$$

由此可见, 当 $t=0$ 时, 调角信号 $u(t)$ 的频率 ($f = \omega/2\pi$) 为 10Hz, 并且以每秒 1 Hz 的速率成线性增长。

二、调频信号和调相信号的基本性质

在频率调制中, 若调制信号为 $u_a(t)$, 则瞬时角频率 $\omega(t)$ 为

$$\omega(t) = \omega_c + K_f u_a(t) \quad (1-1-5)$$

式(1-1-5)中, ω_c 是未调制时的载波角频率, $K_f u_a(t)$ 表示有调制后, 由调制信号所引起的瞬时角频率相对于 ω_c 的偏移, 叫做瞬时角频率偏移, 简称角频率偏移或角频偏。 K_f 是一个比例常数, 它表示单位调制信号所产生的角频率偏移, 其单位为弧度/秒·伏。

角频率偏移通常用 $\Delta\omega(t)$ 表示。根据式(1-1-5)可知, 对于调频信号而言, 我们有

$$\Delta\omega(t) = K_f u_a(t) \quad (1-1-6)$$

也就是说, 调频信号的角频率偏移与调制信号成比例地变化。

按照式(1-1-3), 可求得调频信号的瞬时相位为

$$\begin{aligned} \theta(t) &= \int_0^t [\omega_c + K_f u_a(\tau)] d\tau \\ &= \omega_c t + K_f \int_0^t u_a(\tau) d\tau \end{aligned} \quad (1-1-7)$$

式(1-1-7)右边的第二项表示调频信号的相位偏移, 以 $\Delta\theta_f(t)$ 表

示, 即

$$\Delta\theta_r(t) = K_f \int_0^t u_D(\tau) d\tau \quad (1-1-8)$$

可见, 调频信号的相位偏移与调制信号的积分成比例。

把式(1-1-7)代入式(1-1-2)中, 得

$$u_c(t) = U_{em} \cos[\omega_c t + K_f \int_0^t u_D(\tau) d\tau] \quad (1-1-9)$$

这就是调频信号的数学表达式。

在图 1-2 中, 画出了调制信号 $u_D(t)$ 为简谐信号时, 调频信号的波形。其中图(a)为未调制时高频振荡的波形; 同图(b)为调制信号 $u_D(t)$ 的波形; 而图(c)为调频信号瞬时角频率 $\omega(t)$ 随时间变化的波形; 图(d)为调频信号随时间变化的波形。由图 1-2 可见, 调频波是一个连续的疏密变化的等幅波, 其疏密的变化反映了调制信号的变化规律。

在相位调制时, 若调制信号为 $u_D(t)$, 则瞬时相位 $\theta(t)$ 为

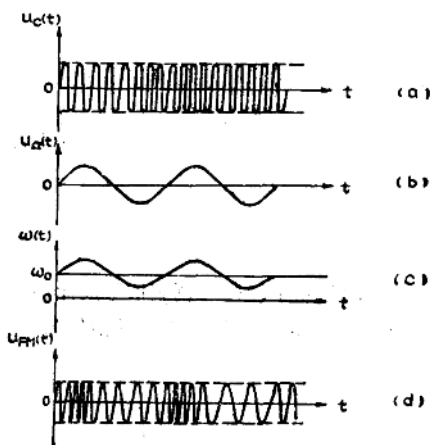


图 1-2 调频波形

$$\theta(t) = \omega_c t + K_p u_D(t) \quad (1-1-10)$$

式(1-1-10)中: $\omega_c t$ 代表未调制时载波信号的瞬时相位, $K_p u_D(t)$ 代表由调制信号所引起的瞬时相位相对于 $\omega_c t$ 的偏移, 叫做瞬时相位偏移, 简称相位偏移或相移。 K_p 是一个比例常数, 它表示单位调制信号所产生的相位偏移, 其单位为弧度/伏。

相位偏移一般用符号 $\Delta\theta(t)$ 表示, 由上式可知, 对于相位调制

$$\Delta\theta(t) = K_p u_D(t) \quad (1-1-11)$$

也即调相信号的相位偏移和调制信号成比例地变化。

将式(1-1-10)两边微分, 可得调相信号的瞬时角频率为

$$\omega(t) = \frac{d\theta(t)}{dt} = \omega_c + K_p \frac{du_D(t)}{dt} \quad (1-1-12)$$

可见, 调相信号的角频率偏移与调制信号的微分成比例。

将式(1-1-10)代入式(1-1-2)中, 得

$$u_c(t) = U_{cm} \cos[\omega_c t + K_p u_D(t)] \quad (1-1-13)$$

这就是调相信号的数学表达式。

在图 1-3 中, 画出了调制信号为简谐信号时, 调相信号的波形。其中, 图(a)为未调制时, 高频振荡的波形; 图(b)为调制信号 $u_D(t)$ 的波形; 图(c)为调相信号瞬时角频率 $\omega(t)$ 随时间变化的波形; 图(d)为调相信号随时间变化的波形。由图可见, 它与调频波相似, 也是一个疏密随时间变化的等幅波。但是, 调相信号的疏密程度的变化不直接反映调制信号 $u_D(t)$, 而是反映调制信号对时间求导的变化规律。

总之, 无论是调频还是调相, 瞬时角频率和瞬时相位都同时随时间发生变化。它们之间的本质区别在于: 调频时, 瞬时频率的变化与调制信号成线性关系, 瞬时相位的变化却和调制信号的积分成比例(或者说, 频率偏移与调制信号成正比, 相位偏移与调制信号的积分成正比); 而调相时, 则是瞬时相位的变化与调制信号成线性关系, 瞬时频率只与调制信号的微分成比例(也即相位偏移与调制

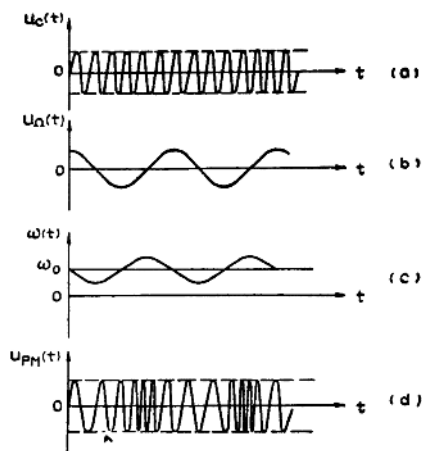


图 1-3 调相波形

信号成正比，频率偏移与调制信号的微分成正比)。

为了便于比较和记忆，下面将上述的重要表达式列入表 1-1 中。

表 1-1 调频波和调相波的基本性质

调制信号: $u_\Omega(t)$; 高频振荡信号: $U_m \cos \omega_c t$			
类别	瞬时角频率 $\omega(t)$	瞬时相位 $\theta(t)$	数学表达式
调频 (FM)	$\omega_c + K_f u_\Omega(t)$	$\omega_c t + K_f \int_0^t u_\Omega(\tau) d\tau$	$u_{FM}(t) = U_m \cos[\omega_c t + K_f \int_0^t u_\Omega(\tau) d\tau]$
调相 (PM)	$\omega_c + K_p \frac{du_\Omega(t)}{dt}$	$\omega_c t + K_p u_\Omega(t)$	$u_{PM}(t) = U_m \cos[\omega_c t + K_p u_\Omega(t)]$

第二节 网络函数

在近代电路分析中，往往将耦合回路、变压器、滤波器以及线性放大器等看成是一个二端口网络，如图 1-4 所示，然后用网络的观点来分析其性能。

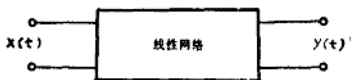


图 1-4 线性网络

一、什么是网络函数

当给线性二端口网络激励(即输入)某一信号 $x(t)$ 时，如果网络中没有初始能量储存，而且 $x(t)$ 是在 $t=0$ 这一时刻送入网络的，那么在输出端的响应信号 $y(t)$ 也只能在 $t=0$ 这一时刻才会出现。当 $t < 0$ 时， $y(t) = 0$ ；当 $t > 0$ 时， $y(t)$ 随 $x(t)$ 变化。这种不可倒置的因果关系，说明了响应与激励是相互关联的，它们是通过一个因子联系着的，该因子就是网络函数，它是响应与激励信号之比。

当把问题移到复频域上时，网络函数 $H(s)$ ，是响应信号 $y(t)$ 的象函数 $Y(s)$ 与激励信号 $x(t)$ 的象函数 $X(s)$ 之比，即

$$H(s) = \left. \frac{Y(s)}{X(s)} \right|_{\text{网络初始条件}=0} \quad (1-2-1)$$

激励信号既可能是电压，也可能是电流；我们研究的网络响应也既可能是电压，也可能是电流。因此它可以是输入阻抗、输入导纳、转移阻抗、转移导纳，也可以是电流、电压的传输系数等。它仅仅决定于网络本身，取决于网络的结构和元件参数，而与外界信号无关。

例如某线性网络，如图 1-5 所示，试写出其电压传输函数 $H(s)$ 。

由图可知