

锁相技术及其应用

罗伟雄 韩力 丁志杰 编

内 容 简 介

本书主要论述锁相环路的基本原理和线性、非线性的分析方法，并对锁相环路的几种主要应用进行较详细的分析，给出了一些典型设计方法。

本书内容包括：锁相环路的各个部件，环路线性分析，环路的非线性分析，环路的噪声性能，全数字锁相环路，锁相接收机，同步提取，锁相频率合成技术及锁相鉴频。

本书作为高等院校通信和电子系统专业本科生及研究生的教材或教学参考书，也可供从事此方面工作的工程技术人员参考。

锁相技术及其应用

罗伟雄 韩力 丁志杰 编

*

北京理工大学出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经营

河北省永清县印刷厂印刷

*

787×1092毫米 32开本 10.5 印张 234 千字

1990年8月第一版 1990年8月第一次印刷

ISBN 7-81013-337-3/TN·19

印数：1—2300册

定价：2.10元

前 言

本书是通信与电子系统专业本科高年级学生及研究生《锁相技术及其应用》的专业课教材，要求教学时数为40~50学时。从加强基础理论的要求出发，本教材前半部分侧重于锁相环路的理论分析，但由于锁相环路的理论基础还不够成熟（尤其是非线性的分析），因此只能从工程技术的角度作一些叙述，有些问题只能给出一些结论性的介绍，读者若要深入了解可参考相应的专著。本教材的后半部分主要叙述锁相环路的几种常用的应用系统，在前半部分理论分析的基础上，主要讲述各种系统的特点和需要解决的特殊问题。本教材的具体内容如下：

第一章 主要介绍锁相环路的各个部件，说明其技术指标和常用的几种电路型式。

第二章 在环路的相位误差较小的情况下，可以将锁相环路线性化，这样就可对环路进行线性分析。它和一般线性系统分析没有什么差异，主要分析系统稳定性，跟踪特性以及频率响应。

第三章 环路处于捕捉状态时，由于相位误差很大，因此环路不能线性化，必须对环路进行非线性分析。在本教材中主要采用相图法和描述函数法进行分析。

第四章 在考虑噪声情况下，对环路进行必要的理论分析。在这章中粗略地介绍了Barton准线性法和Fokker-Planck法，并引入了环路跳周的概念。

第五章 随着数字技术的发展,全数字锁相环路也不断发展。在这章中介绍了全数字锁相环路的组成及各个部件,并介绍了由软件组成的锁相环。

第六章 主要介绍锁相接收机的特点和工作原理,并对锁相接收机中几个主要问题,如假锁,AGC及中频滤波等进行必要的分析,并提出了克服假锁的方法。

第七章 叙述了锁相环路在数字通信中同步提取方面的应用。分析了用于载波同步的平方环,同相-正交环以及反调制环。同时也分析了用于位同步的微分整流环,同相-中相环以及早迟积分环,并对其性能进行了分析。

第八章 叙述了锁相式频率合成技术,讲解了单环和多环频率合成器,并对小数分频技术和吞脉冲技术作了介绍。为了适应新技术不断发展的要求,简述了大规模集成频率合成器和微机控制技术。

第九章 主要围绕如何降低鉴频器门限进行论述。锁相鉴频为什么能降低门限电平,如何对锁相鉴频在降低门限方面作最佳设计。

虽然本书是在原讲义的基础上根据几年教学实践情况改写而成,但由于作者水平有限和锁相环路在理论上和实践应用方面的不断发展,因此在本书中一定存在许多不足之处,望读者批评指正。

本书第七章由韩力同志编写,第八章由丁志杰同志编写,其余均由罗伟雄同志编写。全书由谢源清教授审阅,提出了不少宝贵意见,特此感谢。

编者

1989.6.15

目 录

绪论

§ 0-1 环路的传输函数和基本方程	(3)
0-1-1 各部件的传输函数	(3)
0-1-2 环路的传输函数和基本方程	(6)
§ 0-2 锁相环路的特点	(9)
§ 0-3 锁相环路的应用	(10)
§ 0-4 锁相环路的分析方法	(14)

第一章 锁相环路的各个部件

(16)

§ 1-1 相位检波器的技术指标	(16)
§ 1-2 环形检相器	(18)
§ 1-3 模拟乘法检相器	(21)
§ 1-4 取样保持检相器	(27)
§ 1-5 数字检相器	(32)
1-5-1 异或门检相器	(32)
1-5-2 边沿触发的J-K触发器检相器	(35)
1-5-3 鉴频-检相器	(39)
§ 1-6 LC压控振荡器	(42)
1-6-1 LC压控振荡器的相位噪声谱密度 $P_{\theta v}(j\omega)$	(44)
1-6-2 压控振荡器的控制特性线性度	(47)
1-6-3 压控振荡器的控制范围(覆盖范围)	(49)
§ 1-7 晶体压控振荡器(VCXO)	(49)
1-7-1 晶体参数	(49)
1-7-2 窄带VCXO	(51)
1-7-3 扩展控制范围的方法	(53)

§ 1-8	集成压控振荡器	(54)
1-8-1	差分对式集成VCO	(54)
1-8-2	积分-施密特触发器式VCO	(57)
1-8-3	射极定时压控多谐振荡器	(59)
1-8-4	CMOS数字门压控振荡器	(61)
§ 1-9	环路滤波器	(63)
	附录	(66)
第二章	环路的线性分析	(69)
§ 2-1	环路的稳定性	(69)
2-1-1	一阶环路的稳定性	(70)
2-1-2	采用理想积分滤波器的二阶环路	(72)
2-1-3	采用无源比例积分滤波器的二阶环路	(74)
2-1-4	高阶环路的稳定性	(74)
§ 2-2	环路的跟踪特性	(78)
2-2-1	环路的稳态误差	(79)
2-2-2	环路的暂态响应	(82)
§ 2-3	环路的频率响应	(93)
2-3-1	闭环频率响应	(93)
2-3-2	误差频率响应	(95)
第三章	环路的非线性分析	(97)
§ 3-1	锁相环路快捕、失锁和捕捉过程	(99)
§ 3-2	相图法	(102)
3-2-1	一阶环路的相图分析	(102)
3-2-2	有源比例积分滤波器二阶环路的相图分析	(105)
§ 3-3	二阶环路捕捉带和捕捉时间的近似计算	(112)
§ 3-4	用描述函数法分析二阶环路	(118)
3-4-1	基本概念	(118)
3-4-2	用描述函数分析二阶环路的捕捉时间和捕捉带	(120)
§ 3-5	辅助捕捉方法	(124)
3-5-1	扫瞄法	(125)

3-5-2	变带宽法 (自适应法)	(126)
3-5-3	鉴频法	(129)
第四章	环路的噪声性能分析	(130)
§ 4-1	环路的噪声相位模型	(131)
4-1-1	输入噪声的性质	(131)
4-1-2	有相加噪声时环路相位模型	(132)
4-1-3	分析方法	(134)
§ 4-2	线性分析	(135)
4-2-1	输出相位噪声方差 $\bar{\theta}_n^2$	(137)
4-2-2	环路等效噪声带宽 B_L	(138)
4-2-3	环路输入信噪比和环路信噪比	(141)
§ 4-3	环路参数的最优化	(142)
§ 4-4	考虑噪声时的非线性分析	(150)
§ 4-5	福克-布朗克 (Fokker-Planck) 法分析环路跳周	(157)
4-5-1	一阶环路的稳态概率密度及统计特性	(153)
4-5-2	二阶环路的跳周问题	(161)
第五章	全数字锁相环路	(168)
§ 5-1	全数字检相器	(169)
5-1-1	触发器计数式检相器	(169)
5-1-2	奈奎斯特 (Nyquist) 速率检相器	(170)
5-1-3	数字式取样检相器	(172)
5-1-4	希尔伯特 (Hilbert) 变换检相器	(171)
§ 5-2	数字滤波器	(175)
5-2-1	超前-滞后计数式环路滤波器	(175)
5-2-2	k 计数器式环路滤波器	(177)
5-2-3	“N先于M”数字环路滤波器	(173)
5-2-4	软件式环路滤波器	(179)
§ 5-3	数字控制振荡器 (DCO)	(181)
§ 5-4	全数字锁相环的实例	(184)

第六章 锁相接收机

- § 6-1 锁相接收机的组成和工作原理(188)
- § 6-2 锁相接收机的特殊问题(191)
 - 6-2-1 中频滤波器的考虑(191)
 - 6-2-2 假锁(193)
 - 6-2-3 自动增益控制 (AGC)(196)
- § 6-3 带通限幅器的作用(198)
- § 6-4 环路性能与误差分析(204)
- § 6-5 载波锁相接收机的设计计算(207)

第七章 同步提取(211)

- § 7-1 载波同步提取(212)
 - 7-1-1 平方环(212)
 - 7-1-2 同相-正交环(216)
- § 7-2 载波同步提取性能分析(218)
 - 7-2-1 稳态相位差(219)
 - 7-2-2 随机相位差(219)
 - 7-2-3 平方环与同相-正交环的比较(225)
 - 7-2-4 载波相位误差对误码率的影响(225)
- § 7-3 反调制环(227)
- § 7-4 多相PSK信号的载波同步提取(233)
 - 7-4-1 四次方环(233)
 - 7-4-2 同相-正交环(234)
 - 7-4-3 反调制环(236)
- § 7-5 位同步提取(239)
 - 7-5-1 基带信号及位同步提取环路构成(239)
 - 7-5-2 微分整流位同步环(241)
 - 7-5-3 同相-中相位同步环(244)
 - 7-5-4 早-迟积分位同步环(250)
- § 7-6 位同步环性能分析(255)

- 7-6-1 数字锁相式位同步环性能分析(255)
- 7-6-2 位同步误差对解调性能的影响(258)

第八章 锁相频率合成技术

- § 8-1 锁相频率合成器的基本原理和技术指标(262)
 - 8-1-1 基本原理(262)
 - 8-1-2 主要技术指标(264)
- § 8-2 单环和多环频率合成器(265)
 - 8-2-1 单环频率合成器(265)
 - 8-2-2 双环频率合成器(265)
 - 8-2-3 三环频率合成器(267)
 - 8-2-4 混频频率合成器(267)
- § 8-3 程序分频器(269)
 - 8-3-1 主要技术指标(269)
 - 8-3-2 程序分频器(271)
 - 8-3-3 吞脉冲分频器(273)
 - 8-3-4 小数分频器(276)
- § 8-4 频率合成器设计举例(279)
- § 8-5 大规模集成频率合成器及其微机控制(281)
 - 8-5-1 MC145152单片集成频率合成器(282)
 - 8-5-2 微机控制频率合成器(286)
- § 8-6 频率合成器的短期频率稳定度(290)
 - 8-6-1 频率短期稳定度的频域表示(291)
 - 8-6-2 频率短期稳定度的时域表示(291)
 - 8-6-3 $\sigma_y^2(\tau)$ 和 $P_y(f)$ 的关系(293)
 - 8-6-4 频率合成器相位噪声的测量(295)

第九章 锁相鉴频

- § 9-1 普通鉴频器的门限效应(297)
 - 9-1-1 调频信号的抗干扰性(297)
 - 9-1-2 鉴频器的门限机理(299)

§ 9-2	锁相鉴频原理	(305)
9-2-1	锁相环路对调频信号的响应	(306)
9-2-2	线性鉴频时锁相鉴频器的输出信噪比	(307)
9-2-3	锁相鉴频的门限效应	(309)
§ 9-3	理想解调器和最优锁相鉴频器	(313)
9-3-1	理想解调器	(314)
9-3-2	最优锁相鉴频器	(315)
§ 9-4	二阶锁相鉴频器的门限及最优参数	(320)

参考文献

绪 论

锁相环路是一个相位自动控制系统。任何一个自动控制系统总是由两部分组成。一是误差检测元件。在锁相环路中由检相器来完成这一任务。它对输出信号相位和输入信号相位进行比较，产生一个与两个信号的相位差成比例的误差电压。另一个是执行元件。它受误差电压控制，使误差不断减小。在锁相环路中这个任务是由电压控制振荡器来完成。在锁相环路中，有时为了提高相位控制的性能，在上述两个元件之间，插入一低通滤波器，因此，对于锁相环路常由三个基本部分组成。

1. 相位检波器又叫检相器 (*Phase Detector*)，简称为PD (亦称为鉴相器)。

2. 低通滤波器 (*Low Pass Filter*)，又称环路滤波，简称为LPF。

3. 电压控制振荡器简称压控振荡器 (*Voltage Controlled Oscillator*)，简称为VCO。

这三部分连接图如图0-1所示。

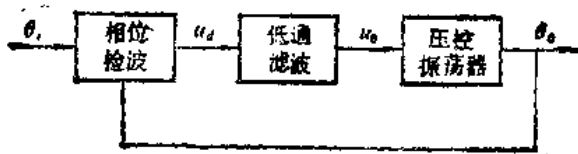


图0-1 锁相环路的组成

9110018

— 1 —

相位检波器是一个误差检测元件。它比较输入电压相位 θ_i 和VCO输出电压相位 θ_o ，并输出一个误差电压 u_e ，它的大小决定于两个输入电压的相位差。然后，这个误差电压通过低通滤波器滤除高频分量，输出控制电压 u_c 去控制VCO输出电压的频率，从而减小输入电压和输出电压之间的相位差。

与一切自控系统一样，环路的输出相位不可能十分精确地等于输入信号的相位，这是因为在环路调整过程中需要一定量的控制电压，使输出信号相位靠近输入信号的相位，也就是说相位检波器必须有一个非零的输出，这就说明环路必然存在一定相位误差。但只要对环路进行较好的设计，就可以使相位误差尽可能地减小。

当环路处于稳态时，输出和输入之间存在一定量相位误差。而对输入信号频率和输出信号频率而言，二者却是相等的，这时环路处于锁定状态。这是锁相环路的一个特点，用这个方法可以得到十分精确的频率控制。而其它的频率控制方法，在稳态时总是存在一定的频率误差。

有关锁相技术最早的论述是1932年Bellescize提出的。当时是为了解决同步检波如何得到本地振荡信号的问题。众所周知，同步检波和一般检波方式相比，在微弱信号接收中有很大的优越性，但要实现同步检波，关键是如何产生一个和输入微弱信号载波频率相等、相位基本一致的本地振荡信号。这就提出了相位自动控制，也就是锁相环路 (*Phase Lock Loop*)，简称PLL。

40年代锁相技术又被运用到电视机的水平扫描和垂直扫描同步中，它可以抑制外界噪声对同步的影响，使

电视图象的同步性能得到很大改善。

随后，为了提高在噪声中检测信号的能力，采用锁相环路做成窄带锁相跟踪接收机，能在信噪比远小于1的情况下，从噪声中把信号提取出来。在锁相技术的理论分析方面，50年代由Jaffe和Rechtin发表了有噪声情况下环路线性分析方法，提出了环路最佳化设计。在1966年Viterbi提出了无噪声情况下环路非线性分析法。以后又有Lindsay和Charles研究了在有噪声情况下环路的非线性分析方法，并得出了不少实验结果，充实了理论分析。但锁相环路毕竟是一个非线性系统，它的环路方程为非线性微分方程，因此还有不少实际和理论问题有待于进一步研究。

§ 0-1 环路的传输函数和基本方程

要对环路进行理论分析，必须求出环路的闭环传输函数。另外，由于环路的研究对象是相位，这就要得到以相位为变量的环路相位模型。要得到环路的传输函数，首先必须求出环路各个组成部件以相位为变量的传输函数。

0-1-1 各部件的传输函数

一、检相器

检相器是一个相位比较装置，用来比较输入信号 $u_1(t)$ 和输出信号 $u_2(t)$ 的相位，得出一个比例于两个输入信号相位差的输出电压。

检相器的电路形式是五花八门的，它的鉴相特性有正弦形、正切形、三角形、锯齿形等等，这在后面有较详细的论

述。在此仅以正弦形检相器为例进行分析。

若环路输入信号 $u_i(t)$ 为

$$u_i(t) = U_{i,m} \sin[\omega_i t + \theta_i(t)]$$

式中 $U_{i,m}$ 为输入信号振幅， ω_i 为输入信号角频率， $\theta_i(t)$ 为输入以其载波角频率 ω_i 为参考的瞬时相位。

压控振荡器输出信号为

$$u_o(t) = U_{o,m} \cos[\omega_o t + \theta_o(t)]$$

式中 $\theta_o(t)$ 是以 ω_o 为参考的瞬时相位。为了简化运算，把输入信号相位也写成以 ω_o 为参考角频率，这样以 ω_o 为参考角频率的输入瞬时相位为

$$\omega_i t + \theta_i(t) = \omega_o t + [(\omega_i - \omega_o)t + \theta_i(t)]$$

$$= \omega_o t + \theta_1(t)$$

$$\theta_1(t) = (\omega_i - \omega_o)t + \theta_i(t) = \Delta\omega_o t + \theta_i(t) \quad (0-1-1)$$

同样 $u_o(t)$ 也改写为

$$u_o(t) = U_{o,m} \cos[\omega_o t + \theta_2(t)] \quad (0-1-2)$$

式中

$$\theta_2(t) = \theta_o(t)$$

经过乘积检相器后，输出电压为

$$\begin{aligned} u'_d(t) &= K_m u_i(t) u_o(t) \\ &= \frac{1}{2} K_m U_{i,m} U_{o,m} \sin[2\omega_o t + \theta_1(t) + \theta_2(t)] \\ &\quad + \frac{1}{2} K_m U_{i,m} U_{o,m} \sin[\theta_1(t) - \theta_2(t)] \end{aligned}$$

再由低通滤波器滤除 $2\omega_o$ 分量后，得

$$\begin{aligned} u_d(t) &= \frac{1}{2} K_m U_{i,m} U_{o,m} \sin[\theta_1(t) - \theta_2(t)] \\ &= K_d \sin\theta_e(t) \end{aligned} \quad (0-1-3)$$

式中 $K_d = \frac{1}{2} K_m U_{i,m} U_{o,m}$

$$\theta_e(t) = \theta_1(t) - \theta_2(t)$$

这样检相器的相位模型可表示为图0-2。

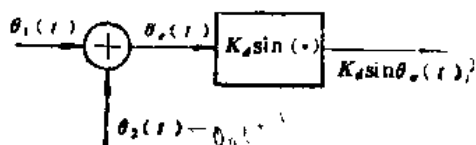


图0-2 检相器的相位模型

二、压控振荡器

压控振荡器是一个电压-频率转换器，它的瞬时角频率 $\omega_o(t)$ 受控制电压 $u_c(t)$ 控制，压控振荡器的角频率-电压特性如图0-3所示。图中 ω_o 为未加控制电压($u_c(t) = 0$)时的振荡角频率，称为固有振荡角频率。一般压控振荡器在原点附近呈线性，可近似表示为

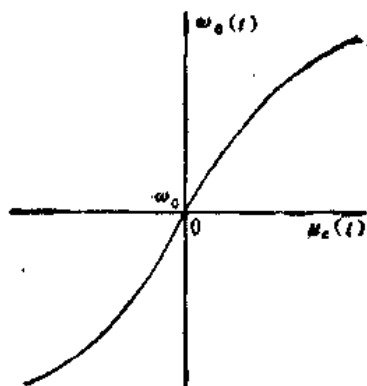


图0-3 VCO的压控特性

$$\omega_o(t) = \omega_o + K_o u_c(t) \quad (0-1-4)$$

式中 K_o 为压控振荡器的控制灵敏度 ($\text{rad/s} \cdot \text{V}$)。

在环路中进行比较的不是角频率，而是相位。相位是频率的积分 这样VCO的输出相位为

$$\theta(t) = \int \omega_o(t) dt = \omega_o t + K_o \int u_c(t) dt$$

将上式和式(0-1-2)比较，可得

$$\theta_e(t) = K_o \int u_c(t) dt$$

图0-4表示VCO的相位模型，上图为时域表示，下图为频域表示。

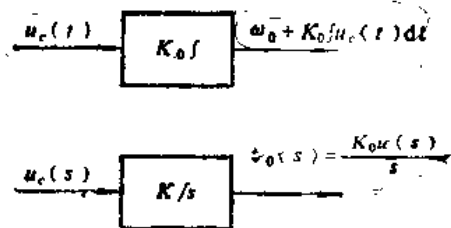


图0-4 VCO的相位模型

三、环路滤波器

环路滤波器是线性网络，它由电阻、电容、电感和运算放大器组成。它的输入电压为 $u_d(t)$ ，输出电压为 $u_c(t)$ 。二者之间的关系可用环路滤波器的传输函数 $F(s)$ 表示为

$$U_c(s) = F(s) \cdot U_d(s) \quad (0-1-5)$$

若写成运算微积表示式为

$$u_c(t) = F(s) \cdot u_d(t) \quad (0-1-6)$$

式中 s 表示运算微积符号。上式用卷积表示为

$$u_c(t) = \int_0^t u_d(\tau) f(t - \tau) d\tau \quad (0-1-7)$$

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(s) e^{st} ds \quad (0-1-8)$$

0-1-2 环路的传输函数和基本方程

从上面对环路三个基本组成部分的分析，可以得到环路的相位模型如图0-5所示。同时也可得到下列联立方程

$$u_d(t) = K_d \sin[\theta_1(t) - \theta_2(t)]$$

$$u_c(t) = \int_0^t u_d(t) f(t - \tau) d\tau$$

$$\frac{d\theta_2(t)}{dt} = K_s u_c(t)$$

$$\theta_e(t) = \theta_1(t) - \theta_2(t)$$

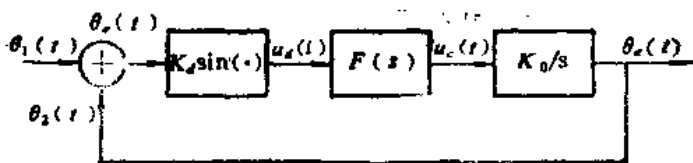


图0-5 环路的相位模型

通过运算可得到

$$\frac{d\theta_e(t)}{dt} = \frac{d\theta_1(t)}{dt} - \underbrace{K_s K_d \int_0^t f(t - \tau) [\sin\theta(\tau)] d\tau}_{u_c(t)} \quad (0-1-9)$$

其中

$\frac{d\theta_e(t)}{dt}$ 为环路的瞬时频差；

$\frac{d\theta_1(t)}{dt} = (\omega_i - \omega_s)$ 为环路的起始固有频差；

$K_s K_d \int_0^t f(t - \tau) [\sin\theta(\tau)] d\tau$ 为环路闭合后，环路控制

作用所得到的控制频差。

式(0-1-9)是环路的基本微分方程，它说明环路闭合后的任何时刻瞬时频差等于起始固有频差减去环路的控制频差。

环路锁定后，其瞬时频差 $\frac{d\theta_e(t)}{dt} \rightarrow 0$ ， $\theta_e(t)$ 不再是 t 的函数，而是一常数。这时鉴相器输出 $u_d(t)$ 为直流电压，环路起始