

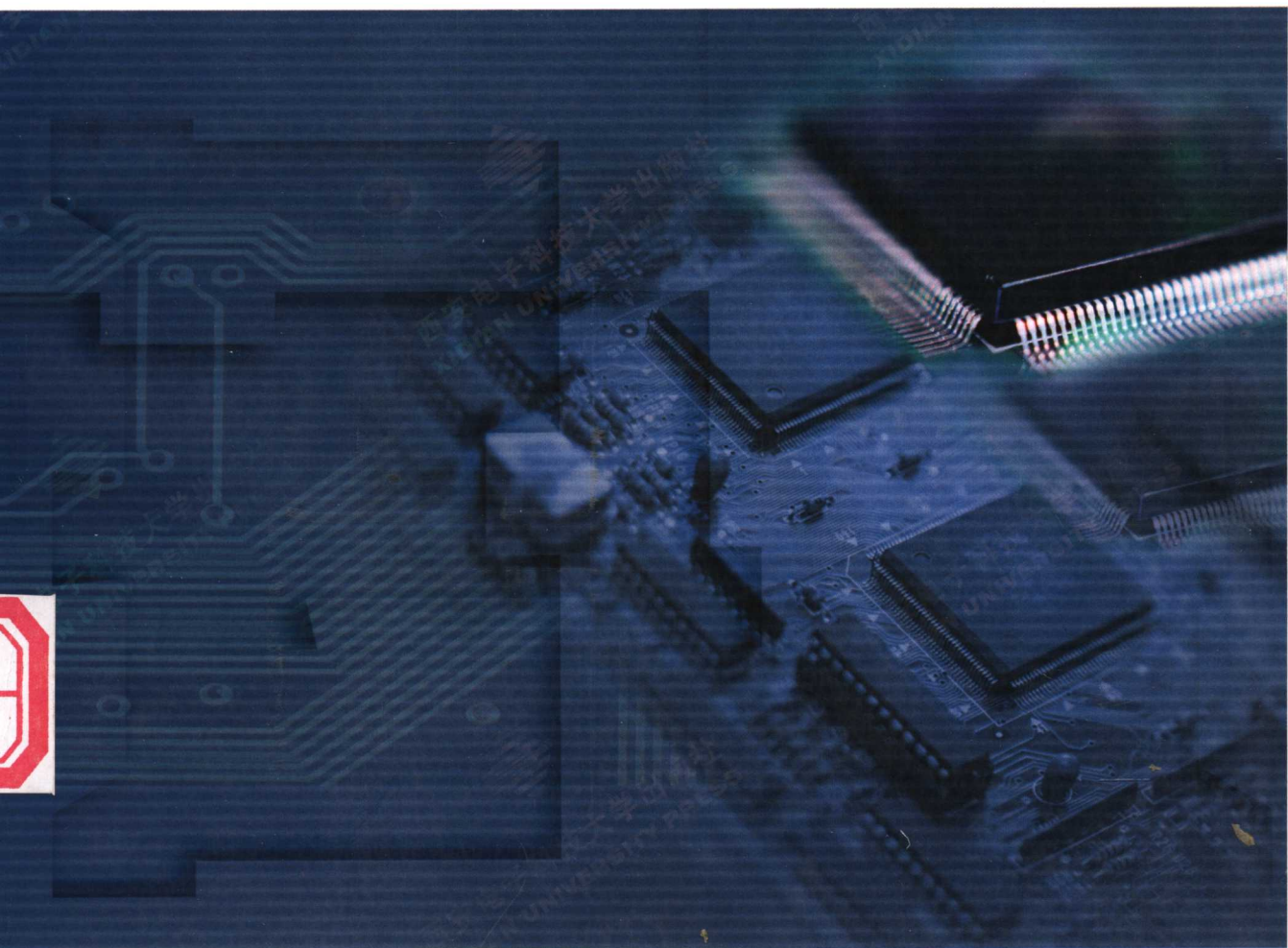


GH

高等学校工科电子类教材

# 锁相技术

■ 张厥盛 郑继禹 万心平



西安电子科技大学出版社

<http://www.xduph.com>

高等学校教材

# 锁相技术

张厥盛 郑继禹 万心平

西安电子科技大学出版社

(陕)新登字 010 号

## 内 容 简 介

本书是在第三轮统编教材《锁相技术》的基础上,根据教学实践的经验和锁相技术的最新发展,重新编写而成的。前四章有关工作原理、跟踪、噪声和捕获性能是基础部分,讲述了锁相环路工作的物理过程、数学模型、各种性能的分析以及工程设计方法。第五章集成锁相环路,介绍了各种典型电路的性能、原理与使用。第六章讲述锁相环路在各种领域的应用。第七章数字锁相环,反映了锁相技术最新的发展。全书由浅入深,概念明了,条理清晰,对锁相技术进行了完整而又系统的阐述。后三章取材新、涉及面广,对进一步深入学习锁相技术,开展研究与工程应用具有参考价值。

本书供工科电子类专业大、专院校师生作教材或参考书。对需自学锁相技术的工程技术人员和其他读者,也是一本适用的书籍。

高等学校教材

### 锁 相 技 术

张厥盛 郑继禹 万心平

责任编辑 叶德福

---

西安电子科技大学出版社出版

地址:西安市太白南路2号 邮编:710071

陕西光大印务有限责任公司印刷

陕西省新华书店发行 各地新华书店经售

开本 787×1092 1/16 印张 15 字数 349 千字

1994年6月第1版 2005年7月第11次印刷 印数 49 051~53 050 册

---

ISBN 7-5606-0292-4/TN·0075(课)

定价:14.80元

**XDUP 0542021-11 本社图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版。**

## 出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作的规定，我部承担了全国高等学校和中等专业学校工科电子类专业教材的编审、出版的组织工作。由于各有关院校及参与编审工作的广大教师共同努力，有关出版社的紧密配合，从1978~1990，已编审、出版了三个轮次教材，及时供给高等学校和中等专业学校教学使用。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应“三个面向”的需要，贯彻国家教委《高等教育“八五”期间教材建设规划纲要》的精神，“以全面提高教材质量水平为中心，保证重点教材，保持教材相对稳定，适当扩大教材品种，逐步完善教材配套”，作为“八五”期间工科电子类专业教材建设工作的指导思想，组织我部所属的九个高等学校教材编审委员会和四个中等专业学校专业教学指导委员会，在总结前三轮教材工作的基础上，根据教育形势的发展和教学改革的需要，制订了1991~1995年的“八五”（第四轮）教材编审出版规划。列入规划的，以主要专业主干课程教材及其辅助教材为主的教材约300多种。这批教材的评选推荐和编审工作，由各编委会或教学指导委员会组织进行。

这批教材的书稿，其一是从通过教学实践、师生反映较好的讲义中经院校推荐，由编审委员会（小组）评选择优产生出来的，其二是在认真遴选主编人的条件下进行约编的，其三是经过质量调查在前几轮组织编定出版的教材中修编的。广大编审者、各编审委员会（小组）、教学指导委员会和有关出版社，为保证教材的出版和提高教材的质量，作出了不懈的努力。

限于水平和经验，这批教材的编审、出版工作还可能有缺点和不足之外，希望使用教材的单位，广大教师和同学积极提出批评和建议，共同为不断提高工科电子类专业教材的质量而努力。

机械电子工业部电子类专业教材办公室

## 前 言

本教材系按电子工业部的工科电子类专业教材 1991~1995 年编审出版规划,由无线电技术与信息系统教材编审委员会无线电通讯编审小组征稿,推荐出版,责任编辑程时昕。

本教材由西安电子科技大学张厥盛担任主编,东南大学邹家驊担任主审。

本课程的参考学时数为 40~60 学时,其主要内容为锁相技术的基本原理、电路与应用。全书共七章和四个附录,分为四部分。第一部分讲解模拟锁相环路的基本工作原理与性能分析,其内容有:锁相环路的基本工作原理、环路跟踪性能、环路噪声性能和环路捕获性能。第二部分介绍集成锁相环路原理与应用。集成锁相环路自 70 年代问世以来发展很迅速,是近年来锁相技术的重要进展。目前,不同品种的锁相环集成电路已有成百上千个产品。集成锁相环路的成本低、性能好、使用方便、应用广泛,已成为电子工程中经常遇到的一种多功能组件。为此,本书第五章专门介绍了集成化环路部件、通用单片集成锁相环和单片集成频率合成器的电路组成和特性。第六章,结合集成锁相环路的使用,着重介绍了集成锁相环路在跟踪滤波、调制与解调、频率合成、载波同步、位同步、FM 立体声解码、彩色电视色副载波提取、电动机速度控制等方面的应用原理与实例。第三部分介绍数字锁相环以适应数字技术迅速发展和数模兼容应用的需要,第四部分给出了锁相环内外部噪声的统计特性与国内外锁相集成电路产品,供加深理解有关理论与工程设计参考。使用本教材时,学生需具备必要的数学与电子线路的基础知识和有关的专业知识;课程实施中应配合适量的实验;锁相技术应用、数字锁相环与取样锁相环方面的内容也可视专业的需要和教学时数的多少自行选取。

本教材的三位编者长期合作编写了本课程的前三轮统编教材《同步控制原理》(上海交通大学归绍升等主审,国防工业出版社出版,1980 年)、《锁相技术》(清华大学李普成主审,西北电讯工程学院出版社出版,1986 年)和《锁相技术》(东南大学邹家驊主审,西安电子科技大学出版社出版,1989 年)。本教材是在上述基础上修订而成的,郑继禹重写了第七章,张厥盛修订其余各章并统编全稿。受限于编者的水平,书中难免还存在一些缺点和错误,殷切希望广大读者批评指正。

编 者

1992 年 12 月

## 绪 言

锁相环路(PLL)是一个能够跟踪输入信号相位的闭环自动控制系统。它在无线电技术的各个领域得到了很广泛的应用。

最初, DeBellescize 于 1932 年提出同步检波理论, 首次公开发表了对锁相环路的描述, 但并未引起普遍的重视。直至 1947 年, 锁相环路才第一次应用于电视接收机水平和垂直扫描的同步。从此, 锁相环路开始得到了应用。由于技术上的复杂性以及较高的成本, 应用锁相环路的领域主要在航天方面, 包括轨道卫星的测速定轨和深空探测等。性能要求较高的精密测量仪器和通信设备有时也用到它。到 70 年代, 随着集成电路技术的发展, 逐渐出现了集成的环路部件、通用单片集成锁相环路以及多种专用集成锁相环路, 锁相环路逐渐变成了一个成本低、使用简便的多功能组件, 这就为锁相技术在更广泛的领域应用提供了条件。至今, 普遍应用锁相技术的主要有调制解调、频率合成、电视机彩色副载波提取、FM 立体声解码等等。随着数字技术的发展, 相应出现了各种数字锁相环路, 它们在数字信号传输的载波同步、位同步、相干解调等方面发挥了重要的作用。

锁相环路所以能得到如此广泛的应用, 是由其独特的优良性能所决定的。它具有载波跟踪特性, 作为一个窄带跟踪滤波器, 可提取淹没在噪声之中的信号; 用高稳定的参考振荡器锁定, 可作提供一系列频率高稳定的频率源; 可进行高精度的相位与频率测量等等。它具有调制跟踪特性, 可制成高性能的调制器和解调器。它具有低门限特性, 可大大改善模拟信号和数字信号的解调质量。

为适应锁相技术的发展, 1980 年前后, 国内各高等院校电子类专业普遍开设了有关课程。编者编写了《同步控制原理》(国防工业出版社, 1980) 和《通信工程中的锁相环路》(西北电讯工程学院, 1980) 两本统编教材(上海交通大学主审)。1986 年编者又编写了第二轮统编教材《锁相技术》(清华大学主审)。1989 年编写了第三轮统编教材《锁相技术》(东南大学主审)。近年来, 锁相技术已有了发展, 经教学实践也积累了一些经验, 有必要在此基础上重新编写《锁相技术》一书, 以适应新教学计划的要求。

在本书编写过程中, 编者注意到: (一) 把握好本课程的范畴, 避免与前修课程重复。本课程以前修课“信号与系统”和“高频电子线路”为起点。(二) 突出本课程的重点——模拟锁相环路的基本概念、分析设计方法、性能特点及其应用。掌握好本科生教学的要求, 更为深入的、适宜于研究生教学的内容就不再涉及。(三) 全书要反映锁相技术有关的新论点、新技术和新电路以适应今后若干年发展的需要。(四) 全书要具有教科书的鲜明特点、阐述条理清晰、理论结合实际, 选用教学效果好的计算举例和习题等, 以便教与学。

全书共分为七章, 前四章属锁相环路的基本概念与性能分析。第一章锁相环路的基本工作原理, 详细讲述了锁定与跟踪的基本概念、环路的组成与数学模型等, 最后以一阶锁相环路为例, 全面分析了它的线性与非线性性能, 并得到环路工作物理过程的明确概念。本章所给出的概念与方法都具有普遍意义, 是本课程学习的重要基础。第二章分析环路跟踪状态的性能, 包括时域响应、频域响应和稳定性等等。分析的方法主要是用

拉氏变换法求解线性微分方程，这在前修课程中已学过，本书不再赘述。环路的跟踪性能是决定环路工作性能好坏的主要方面，也是环路工程设计的主要依据，学习中应引起足够的重视。第三章分析环路的噪声性能。环路工作时，干扰与噪声是不可避免的。环路对它们过滤性能的优劣，将影响环路的工作性能甚至决定环路能否正常工作。本章重点是分析环路对弱输入高斯噪声与压控振荡器噪声的线性过滤性能，有关指标可供工程实用。对于强噪声作用下，环路相差的统计特性只作简要的介绍。第四章研究环路的捕获性能，捕获是环路得以正常工作的前提。本章分析环路牵引捕获过程的特性，给出捕获带与捕获时间的分析结果，可供工程设计使用。此外还介绍了工程中常用的一些辅助捕获方法。

第五章集成锁相环路。本章介绍了各种典型的集成环路部件、通用集成锁相环路与锁相环集成频率合成器的组成、特性和应用，对工程有重要的实用价值。集成锁相环路是近年来锁相技术的一项重要进展，因此在学好锁相原理与技术的基础上，有必要进一步掌握好典型集成锁相环路的组成、特性、电路与应用方法，以便为今后在工程实践中灵活应用锁相技术打下电路基础。

第六章锁相环路应用。考虑到通信与电子系统领域的实际需要，本章结合集成锁相环路的使用，着重介绍了集成锁相环路在跟踪滤波、调制解调、频率合成、载波同步、位同步、FM 立体声解码、彩色电视色副载波提取、电动机速度控制、锁相接收机及其它方面的应用原理与实例。锁相技术是理论性与工程性都很强的一门课程。学习环路应用，是对环路基本原理理解的进一步深化，本章叙述的有关工程实践问题也是理论联系实际的一个重要方面。

第七章数字锁相环。除全面讲述它的组成、分类、部件及其原理之外，着重分析两种常用的数字锁相环路，即位同步数字环和正向过零检测数字锁相环，并举有实例。触发器型全数字锁相环也是应用十分广泛的，单片集成的典型产品 SN54/74 LS297 在工程中被普遍采用，本章对此作了较为详细的分析与介绍。本章内容对扩展知识面和工程应用都会有帮助。

本书末的 4 个附录对本课程的学习是必要的，或者为今后的工程实践可提供参考。

# 目 录

绪 言 .....	1	第五节 环路稳定性 .....	49
第一章 锁相环路的基本工作原理 .....	1	一、稳定性问题与判别方法 .....	49
第一节 锁定与跟踪的概念 .....	1	二、常用二阶锁相环路的稳定性 ...	51
一、相位关系的描述 .....	1	第六节 非线性跟踪 .....	54
二、捕获过程 .....	3	一、锁定时的稳态相差 .....	54
三、锁定状态 .....	4	二、同步带 .....	55
四、环路的基本性能要求 .....	4	三、最大同步扫描速率 .....	56
第二节 环路组成 .....	5	四、最大频率阶跃量与峰值暂态 相差 .....	57
一、鉴相器 .....	5	习题 .....	57
二、环路滤波器 .....	6	第三章 环路噪声性能 .....	60
三、压控振荡器 .....	9	第一节 环路噪声相位模型 .....	60
四、环路相位模型 .....	10	第二节 对输入白高斯噪声的线性 滤波特性 .....	62
第三节 环路的动态方程 .....	10	一、环路输出噪声相位方差 .....	63
第四节 一阶锁相环路的捕获、锁定 与失锁 .....	13	二、环路噪声带宽 $B_L$ .....	64
一、 $\Delta\omega_s < K$ 时的捕获与锁定 .....	13	三、环路信噪比 .....	66
二、 $\Delta\omega_s > K$ 时的失锁状态 .....	15	第三节 环路对压控振荡器相位噪声 的线性过滤 .....	67
三、 $\Delta\omega_s = K$ 时的临界状态 .....	17	第四节 环路对各类噪声与干扰的 线性过滤 .....	69
习题 .....	18	一、环路输出的总相位噪声功率 谱密度 .....	69
第二章 环路跟踪性能 .....	19	二、环路带宽的最佳选择 .....	70
第一节 线性相位模型与传递函数 .....	20	第五节 环路跳周与门限 .....	71
一、线性相位模型与传递函数的 一般形式 .....	20	一、环路跳周与门限的概念 .....	71
二、二阶锁相环路的线性动态方程 与传递函数 .....	21	二、相差的非线性分析 .....	72
第二节 二阶线性系统的一般性能 .....	23	习题 .....	75
一、二阶系统及其描述 .....	23	第四章 环路捕获性能 .....	77
二、时间响应及其指标 .....	25	第一节 捕获的基本概念 .....	77
三、频率响应 .....	27	第二节 捕获过程与捕获特性 .....	78
第三节 环路对输入暂态信号的响应 ...	29	一、捕获过程 .....	78
一、误差的时间响应 .....	29	二、捕获过程的特性 .....	81
二、稳态相位误差 .....	38	第三节 捕获带与捕获时间 .....	82
第四节 环路对输入正弦相位信号的 响应 .....	40	一、二阶环的快捕带与快捕时间 ...	82
一、锁相环路的频率响应 .....	40	二、二阶环的捕获带与捕获时间 ...	82
二、二阶锁相环的频率响应 .....	42	第四节 辅助捕获方法 .....	85
三、调制跟踪与载波跟踪 .....	47		



一、人工电调 .....	86	一、平方环 .....	154
二、自动扫描 .....	86	二、同相—正交环 .....	156
三、辅助鉴频 .....	90	第五节 位同步 .....	158
四、变带宽 .....	91	一、非线性变换—滤波法 .....	158
五、变增益 .....	92	二、同相—中相位同步环 .....	159
习题 .....	93	三、早—迟积分清除位同步环 .....	161
第五章 集成锁相环路 .....	94	第六节 FM 立体声解码 .....	163
第一节 概述 .....	94	第七节 彩色副载波同步 .....	166
第二节 集成鉴相器 .....	95	第八节 电动机转速控制 .....	168
一、模拟乘法器 .....	95	第九节 锁相接收机 .....	170
二、数字式鉴频鉴相器 .....	99	第十节 其它应用 .....	173
三、门鉴相器 .....	102	一、相移器 .....	173
第三节 集成压控振荡器 .....	103	二、频率变换 .....	174
一、积分—施密特触发电路型		三、同步滤波 .....	175
压控振荡器 .....	103	四、自动跟踪调谐 .....	175
二、射极耦合多谐振荡器型压控		五、微波锁相频率源 .....	178
振荡器 .....	106	第七章 数字锁相环 .....	180
三、LC 负阻型压控振荡器 .....	108	第一节 全数字环概述 .....	180
四、数字门电路型压控振荡器 .....	109	一、一般构成与分类 .....	180
第四节 通用单片集成锁相环 .....	111	二、数字环部件电路与原理 .....	181
一、高频单片集成锁相环 .....	111	三、数字环的工作速率 .....	187
二、超高频单片集成锁相环 .....	114	第二节 位同步数字环实例 .....	187
三、低频单片集成锁相环 .....	116	一、电路组成与说明 .....	188
第五节 集成频率合成器 .....	119	二、环路位同步原理 .....	189
一、中规模集成频率合成器 .....	120	三、性能分析 .....	190
二、大规模集成频率合成器 .....	121	第三节 $ZC_1$ -DPLL 的原理与性能 .....	192
第六章 锁相环路的应用 .....	126	一、环路方程与模型 .....	193
第一节 跟踪滤波器 .....	127	二、环路的暂态跟踪性能 .....	195
一、跟踪特性 .....	128	三、有量化时的 $ZC_1$ -DPLL .....	199
二、频率特性 .....	129	第四节 单片集成全数字锁相环 .....	203
第二节 调制器与解调器 .....	131	一、工作原理 .....	203
一、调幅信号的调制与解调 .....	131	二、环路性能分析 .....	206
二、模拟调频和调相信号的调制		三、应用举例 .....	207
与解调 .....	134	附录 .....	211
三、数字调频和调相信号的调制		附录一 环路输入噪声的基本特性 .....	211
与解调 .....	138	一、统计特性 .....	211
第三节 频率合成 .....	142	二、窄带噪声 .....	212
一、概述 .....	142	附录二 压控振荡器的相位噪声 .....	214
二、变模分频合成器 .....	144	一、相位噪声的一般概念 .....	214
三、多环频率合成器 .....	147	二、LC 振荡器输出相位噪声 .....	215
四、小数分频合成器 .....	150	三、晶振的相位噪声 .....	217
五、频率合成器实例 .....	152	附录三 国外部分集成锁相	
第四节 载波同步 .....	154	电路介绍 .....	218

一、单片集成鉴相器 .....	218	五、专用单片集成锁相环 .....	224
二、单片集成压控振荡器 .....	218	附录四 国内集成锁相电路介绍 .....	225
三、通用单片集成锁相环 .....	219	参考文献 .....	227
四、单片集成频率合成器 与部件 .....	221		

# 第一章 锁相环路的基本工作原理

锁相环路是一个闭环的相位控制系统。对它的研究需首先建立完整的数学模型，继而以模型为基础，分析它在各种工作状态下的性能与指标，诸如跟踪、捕获、噪声的影响等等。在着手全面分析之前，先就锁相环的基本原理作一概要的阐述。介绍锁相环路是怎样组成、如何工作的，对它有哪些基本要求，并通过分析一个最简单的锁相环——一阶环，说明锁相技术中最常用的一些概念与专用术语，了解分析时用到的一些基本方法以及一阶环的基本性能。这对进一步学习是会有帮助的。

以上就是本章所要讲述的主要内容。

## 第一节 锁定与跟踪的概念

锁相环路(PLL)是一个相位跟踪系统，方框表示如图 1-1 (a)。设输入信号

$$u_i(t) = U_i \sin[\omega_c t + \theta_i(t)] \quad (1-1)$$

式中  $U_i$  是输入信号的幅度；

$\omega_c$  是载波角频率；

$\theta_i(t)$  是以载波相位  $\omega_c t$  为参

考的瞬时相位。

若输入信号是未调载波， $\theta_i(t)$

即为常数，是  $u_i(t)$  的初始相位；若

输入信号是角调制信号(包括调频调相)， $\theta_i(t)$  即为时间的函数。

设输出信号

$$u_o(t) = U_o \cos[\omega_o t + \theta_o(t)] \quad (1-2)$$

式中  $U_o$  是输出信号的幅度；

$\omega_o$  是环内被控振荡器的自由振荡角频率，它是环路的一个重要参数；

$\theta_o(t)$  是以自由振荡的载波相位  $\omega_o t$  为参考的瞬时相位，在未受控制以前它是常数，在输入信号的控制之下， $\theta_o(t)$  即为时间的函数。

因为锁相环路是一个相位控制系统，输入信号  $u_i(t)$  对环路起作用的是它的瞬时相位，它的幅度通常是固定的。输出信号  $u_o(t)$  的幅度  $U_o$  通常也是固定的，只是其瞬时相位受输入信号瞬时相位的控制。因此，我们希望直接建立输出信号瞬时相位与输入信号瞬时相位之间的控制关系。为此，先讨论两个不同频率信号之间的相位关系。

### 一、相位关系的描述

输入信号  $u_i(t)$  可以用矢量  $U_i e^{j[\omega_c t + \theta_i(t)]}$  在虚轴上的投影来表示， $u_i(t)$  的瞬时相位，即矢

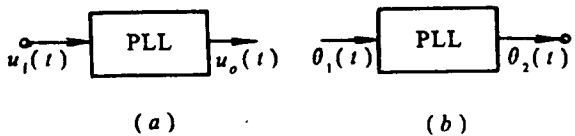


图 1-1 相位跟踪系统框图

量与实轴的交角为  $\omega_i t + \theta_i(t)$ ；输出信号  $u_o(t)$  可以用矢量  $U_o e^{j[\omega_o t + \theta_o(t)]}$  在实轴上的投影来表示， $u_o(t)$  的瞬时相位，即矢量与实轴的交角为  $\omega_o t + \theta_o(t)$ ，如图 1-2(a) 所示。从图上可以得到两个信号的瞬时相位之差

$$\theta_s(t) = [\omega_i t + \theta_i(t)] - [\omega_o t + \theta_o(t)] = (\omega_i - \omega_o)t + \theta_i(t) - \theta_o(t) \quad (1-3)$$

在上面的表示方法中， $\theta_i(t)$  是以输入信号的载波相位  $\omega_i t$  为参考的，而  $\theta_o(t)$  则是以受控振荡器自由振荡的载波相位  $\omega_o t$  为参考的。由于参考不同， $\theta_i(t)$  与  $\theta_o(t)$  无法直接比较。为便于比较，需选择统一的参考相位。

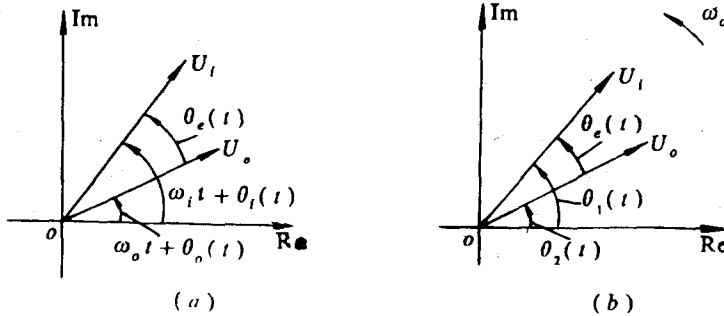


图 1-2 输入信号和输出信号的相位关系

前面已经说到，被控振荡器的自由振荡角频率  $\omega_o$  是系统的一个重要参数，它的载波相位  $\omega_o t$  可以作为一个参考相位。这样一来，输入信号的瞬时相位可以改写为

$$\omega_i t + \theta_i(t) = \omega_o t + (\omega_i - \omega_o)t + \theta_i(t) \quad (1-4)$$

令 
$$\Delta\omega_o = \omega_i - \omega_o \quad (1-5)$$

为输入信号频率与环路自由振荡频率之差，称为环路的固有频差。

再令 
$$\theta_1(t) = \Delta\omega_o t + \theta_i(t) \quad (1-6)$$

为输入信号以  $\omega_o t$  为参考的瞬时相位，因此，(1-4)式可以改写为

$$\omega_i t + \theta_i(t) = \omega_o t + \theta_1(t) \quad (1-7)$$

同理，输出信号的瞬时相位可以改写为

$$\omega_o t + \theta_o(t) = \omega_o t + \theta_2(t) \quad (1-8)$$

$$\theta_2(t) = \theta_o(t) \quad (1-9)$$

式中  $\theta_2(t)$  也是以  $\omega_o t$  为参考的输出瞬时相位。利用(1-6)式和(1-9)式可表示输入和输出信号的相位。由于有了共同的参考，就很便于比较。将(1-6)式和(1-9)式代入(1-3)式，得到环路的瞬时相位差

$$\theta_s(t) = \theta_1(t) - \theta_2(t) \quad (1-10)$$

应用上述描述方法，矢量图可以画成图 1-2(b)。系统的瞬时相差  $\theta_s(t) = \theta_1(t) - \theta_2(t)$ ，瞬时频差

$$\frac{d\theta_s(t)}{dt} = \dot{\theta}_s(t) = \dot{\theta}_1(t) - \dot{\theta}_2(t) = \Delta\omega_o + \frac{d\theta_1(t)}{dt} - \frac{d\theta_2(t)}{dt} \quad (1-11)$$

图 1-2(b) 两矢量的关系清晰地反映了系统的工作状态。当输入角频率  $\dot{\theta}_1(t)$  (即矢量  $U_i e^{j\theta_1}$  的旋转速率)与输出角频率  $\dot{\theta}_2(t)$  (即矢量  $U_o e^{j\theta_2}$  的旋转速率)不同时，两矢量将相对旋转，其夹角  $\theta_s(t)$  将随时间无限增大，绕过一周 ( $2\pi$ ) 又一周，这就是系统的失锁状态。只有

当  $\dot{\theta}_1(t)$  与  $\dot{\theta}_2(t)$  相等时, 两矢量以相同的角速度旋转, 相对位置, 即夹角维持不变, 通常数值又较小, 这就是环路的锁定状态。究竟环路如何从起始状态进入锁定的? 锁定状态的特征又有哪些? 这些都有必要作进一步的讨论。

## 二、捕获过程

从输入信号加到锁相环路的输入端开始, 一直到环路达到锁定的全过程, 称为捕获过程。一般情况, 输入信号频率  $\omega_i$  与被控振荡器自由振荡频率  $\omega_o$  不同, 即两者之差  $\Delta\omega_o \neq 0$ 。若没有相位跟踪系统的作用, 两信号之间相差

$$\theta_e(t) = \Delta\omega_o t + \theta_i(t) - \theta_o(t)$$

将随时间不断增长。

假如固有频差  $\Delta\omega_o$  在一定的范围之内, 依靠锁相环路的相位跟踪作用, 会迫使输出信号的相位跟踪输入信号相位的变化。两信号之间的相位差将不会随时间无限增长, 而是最终使两者的相位差保持在一个有限的范围  $2n\pi + e_{\omega}$  之内, 其中  $e_{\omega}$  是一个很小的量。这个过程就是锁相环路的捕获过程。捕获过程中瞬时相差  $\theta_e(t)$  和瞬时频差  $\dot{\theta}_e(t)$  均随时间变化, 典型的变化曲线如图 1-3 所示。

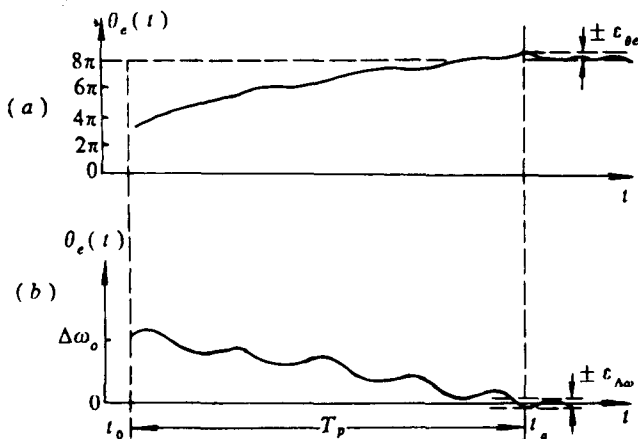


图 1-3 捕获过程中瞬时相差与瞬时频差的典型时间图

从起始状态  $[\theta_e(t_0), \dot{\theta}_e(t_0)]$  开始, 由于存在频差  $\dot{\theta}_e(t_0)$ , 相差  $\theta_e(t)$  将随时间增长, 跨越一个又一个  $2\pi$  (即一次次周期跳越)。从矢量图 1-2(b) 上看, 即矢量  $U_i e^{j\theta_i}$  相对于矢量  $U_o e^{j\theta_o}$  转过一圈又一圈。最终,  $\theta_e(t)$  稳定在  $2n\pi + e_{\omega}$  之内,  $n$  是正整数。图 1-3(a) 中,  $n=4$ 。在此过程中频差  $\dot{\theta}_e(t)$  经若干次波动而逐渐减小, 最终  $\theta_e(t)$  趋向稳定, 也就是  $\dot{\theta}_e(t)$  变成一个很小的值  $e_{\Delta\omega}$ 。最终的状态  $[2n\pi \pm e_{\omega}, e_{\Delta\omega}]$  是相差稳定在  $2n\pi$  附近, 频差接近于零。从矢量图上看,  $U_i e^{j\theta_i}$  与  $U_o e^{j\theta_o}$  不再相对旋转, 而是在一个很小的范围之内相对摆动, 其夹角维持在  $\pm e_{\omega}$  之内, 摆动的速率在  $e_{\Delta\omega}$  之内。这就是锁相环路的同步状态, 或称跟踪状态。

设系统最初进入同步状态  $[2n\pi \pm e_{\omega}, e_{\Delta\omega}]$  的时间为  $t_s$ , 如图 1-3 所示, 那么, 从  $t = t_0$  的起始状态到达  $t = t_s$  进入同步状态的全部过程就称为锁相环路的捕获过程。捕获过程所需的时间  $T_p = t_s - t_0$  称为捕获时间。显然, 捕获时间  $T_p$  的大小不但与环路的参数有关, 而且与起始状态有关。

对一定的环路来说, 是否能通过捕获而进入同步完全取决于起始频差  $\dot{\theta}_s(t_0) = \Delta\omega_s$ 。若  $\Delta\omega_s$  超过某一范围, 环路就不能捕获了。这个范围的大小是锁相环路的一个重要性能指标, 称为环路的捕获带  $\Delta\omega_c$ 。

### 三、锁定状态

捕获状态终了, 环路的状态稳定在

$$\begin{aligned} |\dot{\theta}_s(t)| &\leq \varepsilon_{\Delta\omega} \\ |\theta_s(t) - 2n\pi| &\leq \varepsilon_{\theta_s} \end{aligned} \quad (1-12)$$

这就是同步状态的定义。实际运行中的锁相环路, 输入  $\theta_1(t)$  通常是随时间变化的, 其原因可能是信号调制, 也可能是噪声或干扰。经过环路的跟踪作用,  $\theta_2(t)$  随  $\theta_1(t)$  变化, 其间的相差  $\theta_s(t)$  也会随时间变化。由(1-12)式的同步状态定义可知, 只要在整个变化过程中一直满足(1-12)式, 那么仍称环路处于同步状态。

下面讨论环路输入固定频率信号, 即  $d\theta_1(t)/dt = 0$  时的特殊情况。这是环路分析中经常遇到的一种情况。此时

$$\theta_1(t) = \Delta\omega_s t + \theta_i$$

式中  $\theta_i$  为常数, 是输入信号的起始相位。而

$$\begin{aligned} \theta_s(t) &= \Delta\omega_s t + \theta_i - \theta_o(t) \\ \dot{\theta}_s(t) &= \Delta\omega_s - \dot{\theta}_o(t) \end{aligned}$$

当环路经捕获过程进入同步之后, 据(1-12)式, 输出信号的瞬时相位  $\theta_o(t)$  和瞬时频偏  $\dot{\theta}_o(t)$  应满足下述关系:

$$\begin{aligned} \theta_o(t) &= \Delta\omega_s t + \theta_i - \varepsilon_{\theta_s} \\ \dot{\theta}_o(t) &= \Delta\omega_s \end{aligned}$$

将此式代入输出信号表达式(1-2), 得

$$\begin{aligned} u_o(t) &= U_o \cos[\omega_o t + \Delta\omega_s t + \theta_i - \varepsilon_{\theta_s}] \\ &= U_o \cos[\omega_i t + (\omega_i - \omega_o)t + \theta_i - \varepsilon_{\theta_s}] \\ &= U_o \cos[\omega_i t + \theta_i - \varepsilon_{\theta_s}] \end{aligned}$$

由此可见, 当环路进入同步状态之后, 环内被控振荡器的振荡频率已等于输入信号频率  $\omega_i$ , 也就是说输出信号已“锁定”在输入信号上。两信号之间只差一个固定的相位  $\varepsilon_{\theta_s}$ , 这就是锁定以后的稳态相差, 是一个很小的值。

由上可知, 在输入固定频率信号的条件之下, 环路进入同步状态后, 输出信号与输入信号之间频差等于零, 相差等于常数, 即

$$\left. \begin{aligned} \dot{\theta}_s(t) &= 0 \\ \theta_s(t) &= \text{常数} \end{aligned} \right\} \quad (1-13)$$

这种状态就称为锁定状态。从矢量图上看, 锁定之后两矢量都以角频率  $\omega_i$  旋转, 相对位置固定, 其夹角  $\varepsilon_{\theta_s}$  维持在一个很小的数值上。锁定之后无频差, 这是锁相环路独特的优点, 也是其它控制系统通常不能达到的。

### 四、环路的基本性能要求

如上所述, 环路有两种基本的工作状态。

其一是捕获过程。评价捕获过程性能有两个主要指标。一个是环路的捕获带  $\Delta\omega_c$ ，即环路能通过捕获过程而进入同步状态所允许的最大固有频差  $|\Delta\omega_s|_{\max}$ 。若  $\Delta\omega_s > \Delta\omega_c$ ，环路就不能通过捕获进入同步状态。故

$$\Delta\omega_c = |\Delta\omega_s|_{\max} \quad (1-14)$$

另一个指标是捕获时间  $T_c$ ，它是环路由起始时刻  $t_0$  到进入同步状态的时刻  $t_s$  之间的时间间隔，即

$$T_c = t_s - t_0 \quad (1-15)$$

捕获时间  $T_c$  的大小除决定于环路参数之外，还与起始状态有关。一般情况下输入起始频差越大， $T_c$  也就越大。通常以起始频差等于  $\Delta\omega_c$ ，来计算最大捕获时间，并把它作为环路的性能指标之一。

环路的另一个基本工作状态是同步。环路锁定之后，稳态频差等于零。稳态相差(下面用符号  $\theta_s(\infty)$  表示)通常总是存在的。它是一个固定值，反映了环路跟踪的精度，是一重要的指标。此外，已经锁定的锁相环路，若再改变其固有频差  $\Delta\omega_s$ ，稳态相差  $\theta_s(\infty)$  会随之改变。当  $\Delta\omega_s$  增大到某一值时，环路将不能维持锁定。这个锁相环路能够保持锁定状态所允许的最大固有频差称为环路的同步带  $\Delta\omega_H$ ，也是环路的一个重要参数。

上面提及的几项指标是对环路最基本的性能要求。锁相环路作为一个控制系统，要全面衡量它的性能尚有一系列的指标，诸如稳定性、响应速度、对干扰和噪声的过滤能力等等。尤其是在噪声作用下环路性能的研究更是一个复杂的问题，恰恰又是电子技术应用中不可避免的问题，这将在第三章中专门讨论。

## 第二节 环路组成

锁相环路为什么能够进入相位跟踪，实现输出与输入信号的同步呢？因为它是一个相位的负反馈控制系统。这个负反馈控制系统是由鉴相器(PD)、环路滤波器(LF)和电压控制振荡器(VCO)三个基本部件组成的，基本构成如图 1-4。实际应用中有各种形式的环路，但它们都是由这个基本环路演变而来的。下面逐个介绍基本部件在环路中的作用及其数学模型，从而导出整个锁相环路的数学模型。

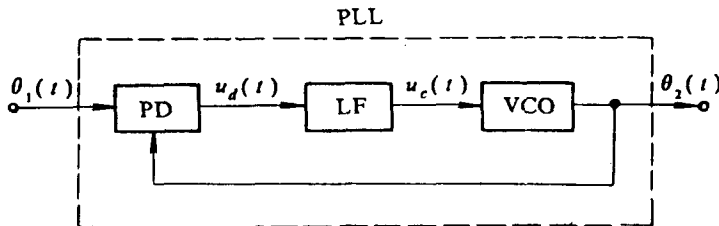


图 1-4 锁相环路的基本构成

### 一、鉴相器

鉴相器是一个相位比较装置，用来检测输入信号相位  $\theta_1(t)$  与反馈信号相位  $\theta_2(t)$  之间的相位差  $\theta_e(t)$ 。输出的误差信号  $u_e(t)$  是相差  $\theta_e(t)$  的函数，即

$$u_e(t) = f[\theta_e(t)]$$

鉴相特性  $f[\theta_e(t)]$  可以是多种多样的, 有正弦形特性、三角形特性、锯齿形特性等等。常用的正弦鉴相器可用模拟相乘器与低通滤波器的串接作为模型, 如图 1-5(a) 所示。

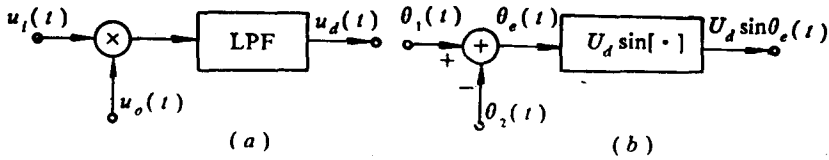


图 1-5 正弦鉴相器模型

设相乘器的相乘系数为  $K_m$  [单位为  $1/V$ ], 输入信号  $u_1(t)$  与反馈信号  $u_o(t)$  经相乘作用

$$\begin{aligned} K_m u_1(t) u_o(t) &= K_m U_1 \sin[\omega_c t + \theta_1(t)] U_o \cos[\omega_c t + \theta_2(t)] \\ &= \frac{1}{2} K_m U_1 U_o \sin[2\omega_c t + \theta_1(t) + \theta_2(t)] \\ &\quad + \frac{1}{2} K_m U_1 U_o \sin[\theta_1(t) - \theta_2(t)] \end{aligned}$$

再经过低通滤波器 (LPF) 滤除  $2\omega_c$  成分之后, 得到误差电压

$$u_e(t) = \frac{1}{2} K_m U_1 U_o \sin[\theta_1(t) - \theta_2(t)]$$

令

$$U_e = \frac{1}{2} K_m U_1 U_o \tag{1-16}$$

为鉴相器的最大输出电压, 则

$$u_e(t) = U_e \sin\theta_e(t) \tag{1-17}$$

这就是正弦鉴相特性, 如图 1-6。

正弦鉴相器特性 (1-17) 式也就是鉴相器的数学模型, 这个模型可表示为图 1-5(b)。鉴相器的电路是多种多样的, 总的可以分为两大类: 第一类是相乘器电路, 它是对输入信号波形与输出信号波形的乘积进行平均, 从而获得直流的误差输出, 如上面分析的那样。第二类是序列电路, 它的输出电压是输入信号过零点与反馈电压过零点之间时间差的函数。因此这类鉴相器的输出只与波形的边沿有关, 与其它是无关的。这类鉴相器适用于方波 (也可以用正弦波通过限幅得到) 输入, 通常用数字电路构成。几种常用的集成鉴相器将在第五章中讨论。

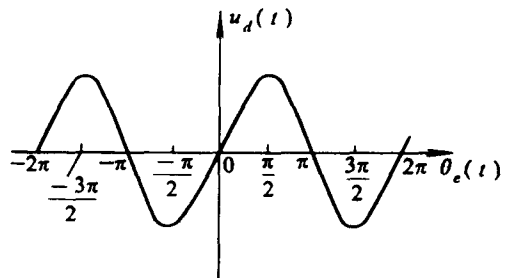


图 1-6 正弦鉴相器特性

对鉴相器的性能要求除特性的形状之外, 鉴相特性的斜率以及输出电压的幅度也是很重要的。它直接影响环路的基本参数。此外, 工作频率, 输入、输出阻抗, 寄生分量输出, 门限等等也应达到一定的要求。

## 二、环路滤波器

环路滤波器具有低通特性, 它可以起到图 1-5(a) 中低通滤波器的作用, 更重要的是它对环路参数调整起着决定性的作用。从以后各章的分析中可以逐步看到, 它对环路的各



项性能都有着重要的影响。环路滤波器是一个线性电路，在时域分析中可用一个传输算子  $F(p)$  来表示，其中  $p(\equiv d/dt)$  是微分算子；在频域分析中可用传递函数  $F(s)$  表示，其中  $s(a + j\Omega)$  是复频率；若用  $s = j\Omega$  代入  $F(s)$  就得到它的频率响应  $F(j\Omega)$ ，故环路滤波器模型可表示为图 1-7。

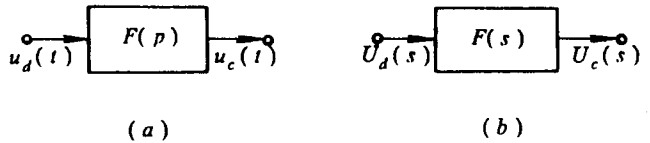


图 1-7 环路滤波器的模型

常用的环路滤波器有  $RC$  积分滤波器、无源比例积分滤波器和有源比例积分滤波器三种，现分别说明如下。

1.  $RC$  积分滤波器 这是结构最简单的低通滤波器，电路构成如图 1-8(a)，其传输算子

$$F(p) = \frac{1}{1 + p\tau_1} \quad (1-18)$$

式中  $\tau_1 = RC$  是时间常数，这是这种滤波器唯一可调的参数。

令  $p = j\Omega$ ，并代入(1-18)式，即可得滤波器的频率特性

$$F(j\Omega) = \frac{1}{1 + j\Omega\tau_1} \quad (1-19)$$

作出对数频率特性，如图 1-8(b)。可见，它具有低通特性，且相位滞后。当频率很高时，幅度趋于零，相位滞后接近于  $\pi/2$ 。

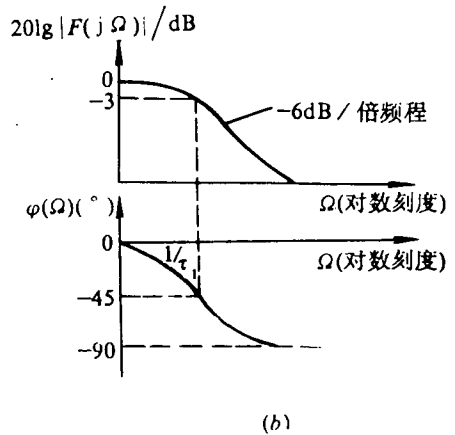
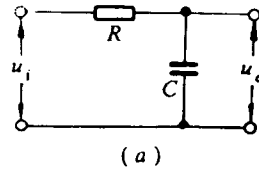


图 1-8  $RC$  积分滤波器的组成与对数频率特性 (a) 组成； (b) 频率特性

2. 无源比例积分滤波器 无源比例积分滤波器如图 1-9(a) 所示，它与  $RC$  积分滤波器相比，附加了一个与电容器串联的电阻  $R_2$ ，这样就增加了一个可调参数，它的传输算子为

$$F(p) = \frac{1 + \tau_2 p}{1 + \tau_1 p} \quad (1-20)$$

式中  $\tau_1 = (R_1 + R_2)C$ ； $\tau_2 = R_2C$ 。这是两个独立的可调参数，其频率响应为

$$F(j\Omega) = \frac{1 + j\Omega\tau_2}{1 + j\Omega\tau_1} \quad (1-21)$$

据此可作出对数频率特性，如图 1-9(b) 所示。这也是一个低通滤波器，与  $RC$  积分滤波器不同的是，当频率很高时

$$F(j\Omega)|_{\Omega \rightarrow \infty} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

等于电阻的分压比，这就是滤波器的比例作用。从相频特性上看，当频率很高时有相位超前校正的作用，这是由相位超前因子  $1 + j\Omega\tau_2$  引起的。这个相位超前作用对改善环路的稳