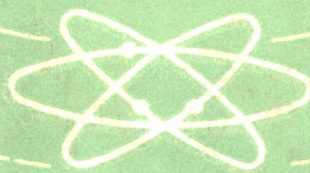


高等学校教材

# 锁相技术

张厥盛等 编



西北电讯工程学院出版社

458

# 锁相技术

——

锁相放大器与锁相环路

高等学校教材

# 锁相技术

张厥盛 郑继禹 万心平 编

西北电讯工程学院出版社

## 内 容 简 介

本书主要讲述锁相环路的基本概念、分析设计方法、性能特点以及主要应用。在介绍锁相环路组成、工作状态和数学模型的基础上,详细阐明了环路工作的物理过程。有关环路的跟踪性能、噪声性能和捕获性能分章作了详细的分析,并给出了工程设计方法和改善环路性能的技术。书中重点介绍了各种集成环路部件、通用和专用集成锁相环路的品种、性能特点、电路和应用方法,对工程技术人员很有参考价值。

本书供工科电子类专业大、专院校师生作教科书或参考书用,也可供研制新型电子设备、电子仪器和从事通信工作的工程技术人员自学参考。

高等学校教材

### 锁 相 技 术

张厥盛 郑继禹 万心平 编

---

西北电讯工程学院出版社出版

西北电讯工程学院印刷厂印刷

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 12 8/16 字数 298千字

1986年6月第一版 1986年6月第一次印刷 印数1—6,000

---

统一书号: 15322·48

定价: 2.10元

## 出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作分工的规定，我部承担了全国高等学校工科电子类专业课教材的编审、出版的组织工作。从一九七七年底到一九八二年初，由于各有关院校，特别是参与编审工作的广大教师的努力和有关出版社的紧密配合，共编审出版了教材 159 种。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应社会主义现代化建设培养人才的需要，反映国内外电子科学技术水平，达到“打好基础、精选内容、逐步更新、利于教学”的要求，在总结第一轮教材编审出版工作经验的基础上，电子工业部于一九八二年先后成立了高等学校《无线电技术与信息系统》、《电磁场与微波技术》、《电子材料与固体器件》、《电子物理与器件》、《电子机械》、《计算机与自动控制》，中等专业学校《电子类专业》、《电子机械类专业》共八个教材编审委员会，作为教材工作方面的一个经常性的业务指导机构，并制定了一九八二~一九八五年教材编审出版规划，列入规划的教材、教学参考书、实验指导书等共 217 种选题。在努力提高教材质量，适当增加教材品种的思想指导下，这一批教材的编审工作由编审委员会直接组织进行。

这一批教材的书稿，主要是从通过教学实践、师生反映较好的讲义中评选择优和从第一轮较好的教材中修编产生出来的。广大编审者，各编审委员会和有关出版社都为保证和提高教材质量作出了努力。

这一批教材，分别由电子工业出版社、国防工业出版社、上海科学技术出版社、西北电讯工程学院出版社、湖南科学技术出版社、江苏科学技术出版社、黑龙江科学技术出版社和天津科学技术出版社承担出版工作。

限于水平和经验，这一批教材的编审出版工作肯定还会有许多缺点和不足之处，希望使用教材的单位、广大教师和同学积极提出批评建议，共同为提高工科电子类专业教材的质量而努力。

电子工业部教材办公室

## 前 言

本教材系由无线电技术与信息系统教材编审委员会无线电通信编审小组评选审定，并推荐出版。

本教材由西北电讯工程学院和桂林电子工业学院共同编写，清华大学李普成主审。编者均依据无线电通信编审小组审定的编写大纲进行编写和审阅的。

本课程的参考教学时数为40~60学时，其主要内容为锁相技术的基本原理与应用。全书共六章，分为两部分。第一部分讲解锁相环路的工作原理与性能分析，其内容有：锁相环路基本工作原理、环路跟踪性能、环路噪声性能、环路捕获性能。第二部分介绍锁相环路的应用及其有关的原理与电路。集成锁相环路自七十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，不同品种的锁相环路集成电路已有成百上千。集成锁相环路的成本低、性能好、使用方便、应用广泛，已成为电子工程中常常遇到的一种多功能组件。为此，本书第六章专门介绍这方面的知识，分别讲述集成化环路部件、通用单片集成锁相环路和专用集成锁相环路的分类、电路原理和使用方法。使用本教材时，学生需具备必要的数学和电路基础知识；课程实施应配合适量的实验；本目录中带\*号的内容可供选学，锁相技术应用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。

本教材由西北电讯工程学院张厥盛编写绪言、第一章和第二章。桂林电子工业学院郑继禹编写第三章和第五章。西北电讯工程学院万心平编写第四章和第六章。张厥盛统编全稿。由于编者水平有限，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 1985

# 目 录

## 绪 言

<b>第一章 锁相环路的基本工作原理</b> .....	3
第一节 锁定与跟踪的概念.....	3
一、相位关系的描述.....	3
二、捕获过程.....	5
三、锁定状态.....	6
四、环路的基本性能要求.....	6
第二节 环路组成.....	7
一、鉴相器.....	7
二、环路滤波器.....	8
三、压控振荡器.....	11
四、环路相位模型.....	12
第三节 环路的动态方程.....	12
第四节 一阶锁相环路的捕获、锁定与失锁.....	14
一、 $\Delta\omega_0 < K$ 时的捕获与锁定.....	15
二、 $\Delta\omega_0 > K$ 时的失锁状态.....	16
三、 $\Delta\omega_0 = K$ 的临界状态.....	18
第五节 一阶环的线性跟踪.....	20
一、动态方程的线性近似.....	20
二、一阶环对输入暂态信号的响应.....	21
三、一阶环对输入正弦信号的响应.....	24
习 题.....	26
<b>第二章 环路跟踪性能</b> .....	28
第一节 线性相位模型与传递函数.....	28
一、线性相位模型与传递函数的一般形式.....	28
二、二阶锁相环路的线性动态方程与传递函数.....	30
第二节 二阶线性系统的一般性能.....	32
一、二阶系统及其描述.....	32
二、时间响应及其指标.....	33
三、频率响应.....	36
第三节 环路对输入暂态信号的响应.....	37
一、误差的时间响应.....	38
二、稳态相位误差.....	46
第四节 环路对输入相位谱的响应.....	49

一、锁相环路的频率响应	49
二、二阶锁相环的频率响应	50
三、调制跟踪与载波跟踪	55
第五节 环路稳定性	57
一、稳定性问题与判别方法	57
二、常用二阶锁相环路的稳定性	59
第六节 非线性跟踪	62
一、锁定时的稳态相差	62
二、同步带	63
三、最大同步扫描速率	64
四、最大频率阶跃量与峰值暂态相差	64
习 题	65
<b>第三章 环路噪声性能</b>	67
第一节 环路噪声相位模型	67
第二节 对输入白高斯噪声的线性过滤特性	69
一、环路输出噪声相位方差	70
二、环路噪声带宽 $B_L$	71
三、环路信噪比	73
第三节 环路对各类噪声与干扰的线性过滤	74
第四节 用准线性法分析环路门限	75
一、准线性法的基本原理	75
二、环路门限分析	77
* 第五节 跟踪相差的统计特性	80
一、一阶环环路相差的统计特性概述	80
二、一阶环稳态概率密度与失锁概率	81
三、二阶环环路相差的稳态概率密度与跳周频率	84
习 题	85
<b>第四章 环路捕获性能</b>	87
第一节 捕获的基本概念	87
第二节 捕获过程与捕获特性	88
一、捕获过程	88
二、捕获过程的特性	91
第三节 捕获带与捕获时间	92
一、二阶环的快捕带与快捕时间	92
二、二阶环的捕获带与捕获时间	93
第四节 辅助捕获方法	100
* 一、辅助相位捕获	100
二、辅助频率捕获	102
习 题	107



<b>第五章 锁相环路的应用</b> .....	108
第一节 锁相式频率合成.....	108
一、电流型鉴频鉴相器的数字式合成器环路.....	109
二、合成器输出纹波.....	113
*三、合成器相位噪声.....	118
四、合成器环路的设计与举例.....	125
第二节 锁相鉴频.....	128
一、概述.....	128
二、各种锁相环路的鉴频输出.....	131
三、锁相鉴频器的输出信噪比.....	134
四、鉴频器的门限效应.....	137
五、锁相鉴频器设计举例.....	144
第三节 锁相环路的其它应用.....	145
一、在相干解调技术中的应用.....	146
二、倍频、分频与移频.....	149
三、微波固态源.....	150
四、锁相接收机.....	151
五、在工业生产上的应用.....	153
习 题.....	154
<b>第六章 集成锁相环路</b> .....	156
第一节 概述.....	156
第二节 集成鉴相器.....	157
一、模拟乘法器.....	157
二、数字式鉴频鉴相器.....	160
三、门鉴相器.....	163
第三节 集成压控振荡器.....	164
一、积分-施密特触发电路型压控振荡器.....	164
二、射极耦合多谐振荡器型压控振荡器.....	166
三、LC 负阻型压控振荡器.....	167
四、数字门电路型压控振荡器.....	169
第四节 通用单片集成锁相环.....	171
一、高频单片模拟锁相环 L562.....	171
二、超高频单片模拟锁相环 NE564.....	177
三、低频单片数字锁相环 5G4046.....	181
第五节 集成频率合成器.....	182
一、中规模单片集成频率合成器.....	183
二、大规模单片集成频率合成器.....	183
第六节 专用单片集成锁相环.....	184

一、调频立体声多路解码器(MPX).....	184
二、彩色电视色处理与解码电路.....	186
三、电机转速控制电路.....	188
<b>附录 噪声的基本特性.....</b>	<b>189</b>

## 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。到七十年代, 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 FSK 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)。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, 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。

全书共分为六章, 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，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的过滤性能，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、捕获带与捕获时间，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。

第五章是锁相环路的应用。考虑到无线电技术领域的实际需要，本章以频率合成和锁相鉴频为重点，讲述其原理、分析与工程实践问题。此外，还介绍了其它方面的应用。学习环路应用，是对环路基本原理理解的进一步深化，有关的工程实践问题也是理论联系实践的一个重要方面。

集成锁相环路是近年来锁相技术的一项重要进展。在学好锁相原理与技术的基础上，进一步掌握集成锁相环路的品种、性能特点、电路与应用方法，这就为今后在工程实践中灵活应用锁相技术打下了基础。第六章集成锁相环路就介绍了各种集成环路部件、通用和专用集成锁相环路的品种、性能特点、电路和应用方法，对工程实践有重要的参考价值。

# 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

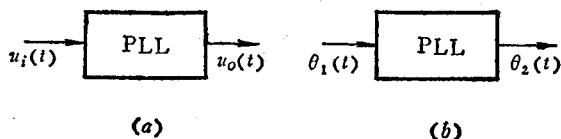
锁相环路(PLL)是一个相位跟踪系统，方框表示如图 1-1(a)。设输入信号

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

式中  $U_i$  是输入信号的幅度；

$\omega_i$  是载波角频率；

$\theta_i(t)$  是以载波相位  $\omega_i t$  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。

图 1-1 相位跟踪系统框图

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  $U_i e^{j[\omega_i t + \theta_i(t)]}$  在虚轴上的投影来表示， $u_i(t)$  的瞬时相位，即矢量与实轴的交角为  $\omega_i t + \theta_i(t)$ ；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

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

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。

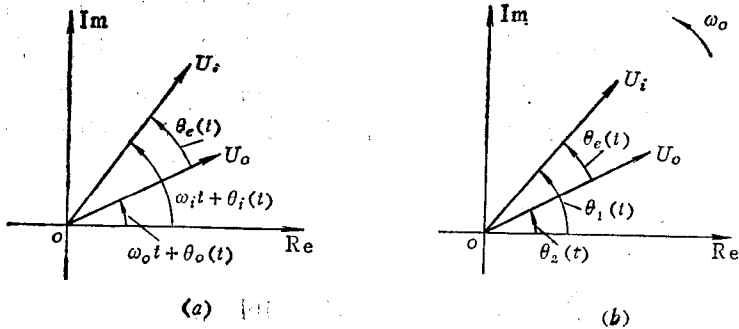


图 1-2 输入信号与输出信号的相位关系

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

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

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  $\theta_e(t) = \theta_1(t) - \theta_2(t)$ , 瞬时频差

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

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  $\theta_e(t)$  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

假定输入信号是未调载波，那么  $\theta_1(t) = \theta_i$  是常数。再设起始状态下被控振荡器的振荡频率等于其自由振荡频率  $\omega_o$ ，那么  $d\theta_o(t)/dt = 0$ 。在这种情况下，据 (1-11) 式， $t = t_0$  时的起始频差

$$\dot{\theta}_e(t_0) = \Delta\omega_o$$

等于环路的固有频差。一般情况下  $\Delta\omega_o \neq 0$ 。若没有相位跟踪系统的作用，两信号之间相差

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

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  $2n\pi + \epsilon_{\theta_e}$  之内，其中  $\epsilon_{\theta_e}$  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。

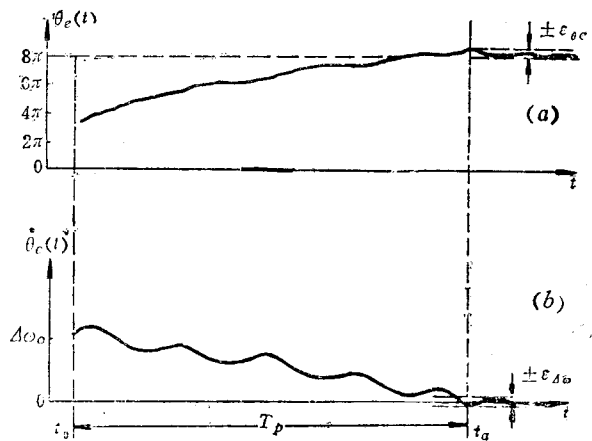


图 1-3 捕获过程中瞬时相差和瞬时频差的典型时间图

从起始状态  $[\theta_e(t), \dot{\theta}_e(t_0)]$  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  $U_i e^{j\theta_1}$  相对于矢量  $U_o e^{j\theta_2}$  转过一圈又一圈。最终， $\theta_e(t)$  稳定在  $2n\pi + \epsilon_{\theta_e}$  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  $\dot{\theta}_e(t)$  趋向稳定，也就是  $\dot{\theta}_e(t)$  变成一个很小的值  $\epsilon_{\Delta\omega_o}$ 。最终的状态  $[2n\pi \pm \epsilon_{\theta_e}, \epsilon_{\Delta\omega_o}]$  是相差稳定在  $2n\pi$  附近，频差接近于零。从矢量图上看， $U_i e^{j\theta_1}$  与  $U_o e^{j\theta_2}$  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  $\pm \epsilon_{\theta_e}$  之内，摆动的速率在  $\epsilon_{\Delta\omega_o}$  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  $[2n\pi \pm \epsilon_{\theta_e}, \epsilon_{\Delta\omega_o}]$  的时间为  $t_a$ ，如图 1-3 所示，那么，从  $t = t_0$  的起始状态到达  $t = t_a$  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  $T_p = t_a - t_0$  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  $\dot{\theta}_e(t_0) = \Delta\omega_o$ 。若  $\Delta\omega_o$  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  $\Delta\omega_p$ 。

### 三、锁定状态

捕获状态终了，环路的状态稳定在

$$\left. \begin{aligned} |\dot{\theta}_e(t)| &\leq \varepsilon_{\Delta\omega} \\ |\theta_e(t) - 2n\pi| &\leq \varepsilon_{\theta} \end{aligned} \right\} \quad (1-12)$$

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 $\theta_e(t)$ 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

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

式中 $\theta_i$ 为常数，是输入信号的起始相位。

而

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

$$\dot{\theta}_e(t) = \Delta\omega_o - \dot{\theta}_o(t)$$

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

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

$$\dot{\theta}_o(t) = \Delta\omega_o$$

将此式代入输出信号表达式(1-2)，得

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

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 $\varepsilon_{\theta_e}$ ，这就是锁定以后的稳定相差，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

$$\begin{aligned} \dot{\theta}_e(t) &= 0 \\ \theta_e(t) &= \text{常数} \end{aligned} \quad (1-13)$$

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 $\varepsilon_{\theta_e}$ 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  $\Delta\omega_p$ ，即环路能通过捕获过程而进入同步状态的最大固有频差  $|\Delta\omega_o|_{max}$ 。若  $\Delta\omega_o > \Delta\omega_p$ ，环路就不能通过捕获进入同步状态，故

$$\Delta\omega_p = |\Delta\omega_o|_{max} \quad (1-14)$$

另一个指标是捕获时间  $T_p$ ，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

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

捕获时间  $T_p$  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， $T_p$  也就越大。通常以起始频差等于  $\Delta\omega_p$ ，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  $\theta_e(\infty)$  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，是一个重要的指标。此外，已经锁定的锁相环路，若再改变其固有频差  $\Delta\omega_o$ ，稳态相差  $\theta_e(\infty)$  会随之改变。当  $\Delta\omega_o$  增大到某一值时，环路将不能维持锁定。这个能够保持锁相环路锁定状态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。

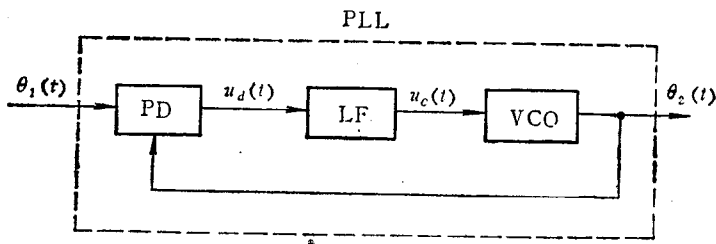


图 1-4 锁相环路的基本构成

### 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  $u_d(t)$  是相差  $\theta_e(t)$  的函数，即