

全国普通高等院校
电子信息与通信类精品教材

QUANGUO PUTONG GAODENG YUANXIAO DIANZI XINXI YU TONGXINLEI JINGPIN JIAOCAI



锁相技术 (第三版)

王福昌 鲁昆生 编著

Phase lock

 华中科技大学出版社
<http://www.hustp.com>

全国普通高等院校
电子信息与通信类精品教材

锁相技术

(第二版)

王福昌 鲁昆生 编 著

华中科技大学出版社
中国·武汉

图书在版编目(CIP)数据

锁相技术(第二版)/王福昌 鲁昆生 编著. —武汉:华中科技大学出版社,2009年9月
ISBN 978-7-5609-5651-0

I. 锁… II. ①王… ②鲁… III. 锁相技术-高等学校-教材 IV. TN911.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 152416 号

锁相技术(第二版)

王福昌 鲁昆生 编著

策划编辑:江 津

责任编辑:江 津

责任校对:李 琴

封面设计:潘 群

责任监印:周治超

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87557437

录 排:武汉正风图文照排中心

印 刷:华中科技大学印刷厂

开本:787mm×1092mm 1/16

印张:11.5

字数:272 000

版次:2009年9月第2版

印次:2009年9月第4次印刷

定价:19.50元

ISBN 978-7-5609-5651-0/TN·156

(本书若有印装质量问题,请向出版社发行部调换)

全国高等院校教材
电子信息类课程教材

内 容 简 介

本书讲述锁相环的原理与应用。原理部分包括模拟锁相环及电荷泵锁相环工作的物理过程、跟踪性能、捕获性能、稳定性能和抗噪性能,以及用于位同步提取的数字锁相环的组成、工作原理、同步性能指标等;应用部分包括锁相频率合成、锁相调制、锁相解调、锁相同步提取等。书中给出了锁相环的一些应用实例及部分典型的集成锁相环,结合理论分析和应用实例介绍了锁相环路的设计方法。

本书可作为工科电子类专业大专院校师生的教科书,也可作为从事电子、通信工作的科研人员和工程技术人员的参考书。

北京邮电大学出版社
北京·西便门

第二版前言

本书第一版自 1997 年问世以来,先后印刷了 6 次,作者直到现在才作进一步修改,在此向广大读者致以歉意。

第二版在章节安排上与第一版基本相同。编写时仍坚持“理论与物理概念并重,原理与应用并重,由浅入深,突出重点,便于自学”这一原则,并根据高等教育大众化的现状及通信新技术的要求作了以下改进:在数字锁相环部分,删去了差分方程分析方法,直接从物理概念出发,通过比较简单的数学运算得到环路的几个性能指标。在其他部分也尽量压缩了数学分析的内容;在锁相频率合成部分,增加了直接数字频率合成技术,频率合成器举例中所用的集成锁相环更具有代表性;在锁相调制解调部分,增加了两点注入式锁相调频方面的内容。

第二版的编写大纲由王福昌、鲁昆生共同拟定,王福昌编写序言、第 1、2、3、4、5、7、8 章及 6.5 节,鲁昆生编写第 6 章的其余各部分,王福昌统编全书。

华中科技大学的郭鹏老师、张华老师、潘晓明老师等在使用本书的过程中,先后提出过许多修改意见,在此表示感谢。

本书仍会存在一些需要改进的地方,敬请广大读者赐教,不胜感激。

王福昌

2009 年 6 月于华中科技大学喻园

Wang.fuchang@hotmail.com

第一版前言

作者从70年代开始从事锁相技术方面的科研工作,先后在对流层散射通信、卫星电视、移动通信、无绳电话、光通信等科研项目中,成功地应用锁相环研制了短波、超短波、微波等频段的频率合成器,以及调频器、鉴频器、载波同步器、位同步器、时隙同步器等。与此同时,作者一直为通信工程、电子工程、信息工程、微波工程等专业的学生讲授这方面的课程。教学及科研实践使作者深感锁相技术是一门应用很广泛的技术,是每一个从事电子、通信工作的科研及工程技术人员应该具备的专业基础知识,学校开设此课程时必须特别注意理论联系实际。为了满足教学需要,作者于1991年编写了《锁相技术》讲义。此讲义反映了作者对锁相环的理解、体会和实际经验,包含了作者及同事们的许多科研成果,得到广大同学、有关老师及领导的充分肯定。1996年,华中理工大学出版社决定正式出版此书。作者吸收了六届教学中收集到的意见及近年来的科研成果,对原讲义进行了修改,在出版社的大力支持下,使本书得以定稿出版。

在本书的编写过程中,我们力图做到理论与物理概念并重,原理与应用并重,由浅入深,突出重点,便于自学,使读者在理论与实践上都得到帮助。由于作者水平有限,书中难免还存在一些不足之处,恳切期望广大读者指正。

本书编写大纲由王福昌、鲁昆生共同拟定,王福昌编写序言、第1、2、3、4、5、7、8章,鲁昆生编写第6章,王福昌统编全书。

在本书定稿过程中,程文青老师提出了不少宝贵意见,在此表示感谢。

我们感谢王筠教授、黄铁侠教授、姚天任教授对本书的编写与出版所给予的支持和指导,感谢华中理工大学出版社的同志们的辛勤劳动。

作者

1996年11月于华中理工大学

序 言

如果我们打开电视机和收音机,就可以立刻体会到锁相环(PLL——Phase-Locked Loop)为人们的生活带来的好处。它可以使我们方便地变换电视频道并看到清晰的图象,可以使我们听到悦耳的立体声广播。在高技术领域锁相环更可以大显神通。比如,它可以把深埋在噪声中的有用信号提取出来,从而使地面接收设备正确收到卫星、宇宙飞船等空间飞行体发回的信息。现在,锁相环已成为通信、雷达、导航、深空探测、电子仪器等设备中不可缺少的一部分,锁相技术已成为每一个从事电子技术工作的工程技术人员必须掌握的基础知识。

锁相环(简称环路)之所以能得到广泛的应用,是因为它具有独特的窄带跟踪性能,能完成频率合成、调制解调、同步提取、测速测距、微量频率变换等任务。窄带跟踪性能包含两层意义:一是对输入信号的跟踪性能;二是对输入噪声的窄带滤波性能。环路可以只跟踪输入信号的载频,也可以既跟踪输入信号的载频又跟踪由基带信号调频(或调相)所引起的频率和相位变化。前者为载波跟踪性能,后者为调制跟踪性能。跟踪载频时不存在稳态频差,当输入信号为高稳定晶体振荡信号时,利用锁相环可以产生与晶振具有相同稳定度的一系列不同频率的信号,这就是频率合成。在环内适当位置注入基带信号时,可产生调角信号,这种调角信号的载频稳定度与输入晶振信号的稳定度相同且可方便地改变载频的大小。当输入信号为已调信号时,用锁相环可以提取纯净的相干载波从而实现相干解调,也可以用锁相环直接解调出基带信号。由于环路具有窄带滤波特性,锁相鉴频器可以扩展解调门限。同样,由于锁相环具有窄带跟踪性能,用来提取的位同步信号质量及测速测距的精度都是很高的。

锁相环能得到广泛应用的另一个原因是目前已有许多价格便宜,性能良好的集成锁相环部件及通用和专用集成锁相环。通常,人们只要掌握了锁相环的基本原理和集成电路的外特性,就可以很方便地设计出能完成各种任务的环路。

锁相环是一个闭环相位自动控制系统,它的理论基础是自动控制理论。Debellescize于1932年提出同步检波理论,首次公开发表了对锁相环的描述。1947年,锁相环第一次应用于电视接收机水平和垂直扫描的同步系统中。从此,锁相环开始得到了应用。20世纪70年代前由于技术上的复杂性以及较高的成本,应用锁相环的领域主要在航天方面以及性能要求较高的精密测量仪器和通信设备中。20世纪70年代后,随着集成电路技术的发展,出现了越来越多的集成锁相环,这就为锁相技术在更广泛的领域应用提供了条件。为了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,许多刊物也纷纷载文介绍锁相环的基本原理及应用成果,越来越多的工程技术人员掌握了锁相技术并利用锁相环解决了许多技术难题。为适应锁相技术的发展和满足教学的要求,作者根据自己及同事们的教学、科研经验,参考国内外有关教材及文献资料,编写了此教材。

学生在学习此课程之前,应学过“高频电路”、“脉冲数字电路”、“模拟集成电路”、“信号与系统”、“概率论与随机过程”等课程。这样,本课程所需要的数学知识、电路知识等学生即已具备,我们则只需着重从理论与实践的结合上阐明锁相环的一些重要概念。从工程实用出发,本书对有噪声及无噪声环路的非线性性能一般只作定性分析,并直接给出分析结果。另外,对于构成锁相环的一些具体电路,本书也不作详细介绍,而只从原理上分析这些电路所起的作用。集成锁相环已有数百个品种,我们不可能也无必要用过多的篇幅去介绍它们。通用集成锁相环中,绝大多数都是采用模拟乘法器作鉴相器的模拟锁相环或采用数字鉴频鉴相器、模拟环路

滤波器及模拟压控振荡器的电荷泵锁相环,全数字集成锁相环则很少。模拟集成锁相环和电荷泵锁相环的典型代表分别是 L562 和 CD4046,我们较详细地介绍了这两种通用集成锁相环。专用集成电路中,最多的是集成锁相频率合成器,我们结合锁相环的具体应用,介绍了几种大规模集成锁相频率合成器。对于其他的集成锁相环,读者根据有关资料给出的组成方框图和电路及有关说明,完全可以自己分析和设计。

本书共分 8 章。前 5 章讲述锁相环的工作原理,后 3 章介绍锁相环的应用。第 1 章给出锁相环的一些基本概念,包括基本工作原理、锁定状态、失锁状态、捕捉带、同步带,还简单介绍了锁相环的应用,以使读者学完本章后对锁相环有一个全面了解。

第 2 章分析模拟锁相环的线性性能、非线性性能。线性性能包括跟踪性能和稳定性。本章从时域和频域两个方面来进行分析,得出跟踪速度、跟踪误差、载波跟踪、调制跟踪、相对稳定性、稳定余量等重要概念及性能指标。环路的非线性指标包括同步带、捕捉带、快捕带、捕捉时间等。本章用相图法分析了一阶环的非线性性能和二阶环的捕捉过程,直接给出了二阶环的非线性性能的相图法分析结果。本章还介绍了一些常用的辅助捕捉方法和取样锁相环。2.4 节介绍了锁相调频与锁相鉴频原理,目的是使读者加深对环路频率特性、调制跟踪和载波跟踪等重要内容的理解。

第 3 章为环路的噪声性能。本章详细分析了锁相环对输入加性白噪声的滤除能力及对各种干扰和环内噪声的响应,得出环路对输入白噪声的窄带滤波特性、环路带宽与滤除各种干扰以及环内噪声的关系。这种分析方法及结论对模拟锁相环及电荷泵锁相环都是适用的。本章直接给出模拟锁相环的失锁门限、跳周等非线性噪声性能的分析结果并作定性说明。

第 4 章介绍电荷泵锁相环。在一定条件下,电荷泵锁相环的线性化相位模型与模拟锁相环相同,因此第 2 章及第 3 章中有关模拟锁相环的线性性能分析方法和结论也适用于此种锁相环。这一章重点介绍电荷泵锁相环的一些特殊问题,包括环路的频率模型、捕捉过程、鉴相纹波等。目前锁相频率合成器大都采用电荷泵锁相环,本章对这种电荷泵锁相环频率合成器工作原理及环路性能参数等也作了介绍。

第 5 章介绍数字锁相环及位同步提取,重点介绍用来提取位同步信号的两种数字锁相环——超前滞后型数字锁相环和触发器型数字锁相环。另外还介绍了用三类锁相环提取位同步信号时的一些特殊问题。

在详细分析了各种锁相环的性能并简单介绍了锁相环的应用之后,本书在第 6 章、第 7 章、第 8 章中分别详细介绍了锁相频率合成、锁相调制与解调及锁相环的其他应用。

锁相环的设计方法和步骤是多种多样的,很难给出一个统一的模式和程序,加上篇幅限制,我们没有设置专门的章节来讨论此问题。但读者只要掌握了锁相环的工作原理、各种性能指标及具体应用要求,就不难拟定设计方案。在有关章节中,我们给出了锁相环的设计过程,供读者参考。

锁相环路参数的测量也是一个重要内容,因篇幅限制未能编入,读者可参阅有关文献。

目 录

第 1 章 锁相环基本概念	(1)
1.1 闭环控制系统简介	(1)
1.2 锁相环的构成及工作原理	(2)
1.2.1 锁相环的构成	(2)
1.2.2 锁相环的工作原理	(3)
1.2.3 锁相环分类	(5)
1.3 锁相环的工作状态	(5)
1.3.1 锁定状态	(6)
1.3.2 线性跟踪状态	(6)
1.3.3 失锁状态	(7)
1.4 锁相环的捕捉带与同步带	(7)
1.5 锁相环应用简介	(9)
1.6 锁相环的性能指标.....	(10)
1.7 小结.....	(11)
思考与练习	(11)
第 2 章 模拟锁相环	(13)
2.1 环路数学模型.....	(13)
2.1.1 鉴相器的数学模型.....	(13)
2.1.2 环路滤波器的数学模型.....	(14)
2.1.3 压控振荡器的数学模型.....	(16)
2.1.4 环路的数学模型与动态方程.....	(17)
2.1.5 环路的线性化及传递函数.....	(17)
2.2 环路的时域跟踪性能.....	(20)
2.2.1 典型暂态相位信号.....	(20)
2.2.2 环路对典型暂态相位信号的响应.....	(21)
2.2.3 瞬态指标.....	(22)
2.2.4 稳态指标.....	(24)
2.3 环路的频域跟踪性能.....	(25)
2.3.1 环路频率特性含义.....	(25)
2.3.2 环路的频率特性.....	(26)
2.3.3 频域指标.....	(30)
2.3.4 载波跟踪和调制跟踪.....	(31)
2.4 锁相调频与锁相鉴频原理.....	(32)
2.4.1 锁相调频.....	(32)
2.4.2 锁相鉴频.....	(34)

2.5	环路稳定性	(35)
2.5.1	环路的不稳定现象	(35)
2.5.2	伯德准则及二阶环路稳定性分析	(36)
2.5.3	三阶环稳定性分析	(39)
2.6	环路非线性性能	(41)
2.6.1	一阶环非线性性能	(42)
2.6.2	二阶环非线性性能	(46)
2.7	辅助捕捉方法	(49)
2.7.1	人工电调	(49)
2.7.2	自动扫描	(50)
2.7.3	变带宽	(51)
2.7.4	变增益	(52)
2.8	取样锁相环	(53)
2.8.1	工作原理	(53)
2.8.2	环路性能	(54)
2.9	模拟集成锁相环 L562	(56)
2.9.1	电路连接与调整	(57)
2.9.2	应用实例	(59)
2.10	小结	(60)
	思考与练习	(62)
第3章	锁相环噪声性能	(64)
3.1	输入白噪声下的环路数学模型	(64)
3.1.1	相位模型	(64)
3.1.2	线性化相位模型	(66)
3.2	环路对输入白噪声的线性过滤特性	(67)
3.2.1	环路输出相位噪声方差	(67)
3.2.2	环路噪声带宽 B_L	(68)
3.2.3	环路输入信噪比、环路信噪比与环路输出信噪比	(69)
3.3	环路失锁门限与环路跳周	(71)
3.3.1	环路失锁门限	(71)
3.3.2	环路跳周	(72)
3.4	环路窄带跟踪性能	(73)
3.4.1	环路工作于调制跟踪状态	(73)
3.4.2	环路工作于载波跟踪状态	(74)
3.5	环路对压控振荡器相位噪声的线性过滤特性	(75)
3.5.1	振荡器的相位噪声	(75)
3.5.2	线性过滤特性	(75)
3.6	环路对各类干扰的线性过滤特性	(76)
3.6.1	杂波抑制制度与寄生调制指数的关系	(76)
3.6.2	第一类干扰	(77)

3.6.3 第二类干扰	(78)
3.6.4 第三类干扰	(79)
3.7 小结	(80)
思考与练习	(81)
第4章 电荷泵锁相环	(83)
4.1 电荷泵鉴相器	(83)
4.1.1 鉴相原理	(83)
4.1.2 鉴频原理	(85)
4.1.3 电流型电荷泵鉴相器实例	(87)
4.2 电荷泵锁相环数学模型	(87)
4.2.1 电流型电荷泵锁相环	(87)
4.2.2 电压型电荷泵锁相环	(88)
4.3 二阶电荷泵锁相环	(89)
4.4 三阶电荷泵锁相环	(92)
4.5 集成电荷泵锁相环 CD4046	(94)
4.6 电荷泵锁相环频率合成器	(95)
4.7 小结	(98)
思考与练习	(99)
第5章 数字锁相环与位同步提取	(101)
5.1 超前-滞后型 DPLL	(101)
5.2 触发器型 DPLL	(103)
5.2.1 基本原理	(103)
5.2.2 实例	(104)
5.3 DPLL 的性能指标	(108)
5.4 位同步提取	(110)
5.4.1 DPLL 位同步器	(111)
5.4.2 CPPLL 位同步器	(111)
5.4.3 APLL 位同步器	(112)
5.5 小结	(113)
思考与练习	(113)
第6章 锁相频率合成	(114)
6.1 概述	(114)
6.1.1 频率合成器的主要性能指标	(114)
6.1.2 频率合成器的基本方法	(115)
6.2 单环频率合成器	(116)
6.2.1 基本形式	(116)
6.2.2 改进型单环频率合成器	(117)
6.2.3 单环频率合成器线性化数学模型	(122)
6.3 多环频率合成器	(124)
6.3.1 双环频率合成器	(124)

6.3.2	三环频率合成器	(125)
6.4	单环频率合成器的输出杂波和输出相位噪声	(125)
6.4.1	输出杂波	(125)
6.4.2	输出相位噪声	(126)
6.4.3	减小分频器触发噪声的方法	(127)
6.5	含有 DDS 的锁相频率合成器	(128)
6.5.1	DDS 简介	(128)
6.5.2	含有 DDS 的锁相频率合成器结构	(129)
6.6	锁相频率合成器实例	(131)
6.6.1	频率合成器 IC 芯片实例	(132)
6.6.2	频率合成器实例	(139)
6.7	小结	(142)
	思考与练习	(142)
第 7 章	锁相调制与解调	(144)
7.1	二点注入式锁相调频	(144)
7.1.1	方案一	(144)
7.1.2	方案二	(145)
7.2	锁相鉴频低门限机理	(146)
7.3	2PSK 信号的相干载波提取	(149)
7.3.1	平方环	(150)
7.3.2	同相正交环	(150)
7.3.3	判决反馈环	(151)
7.4	4PSK 信号的相干载波提取	(153)
7.5	FM 立体声解码	(155)
7.5.1	FM 立体声信号频谱	(155)
7.5.2	FM 立体声解码器原理	(156)
7.6	彩色副载波同步	(158)
7.7	小结	(160)
	思考与练习	(161)
第 8 章	锁相环的其他应用	(162)
8.1	卫星测速测距	(162)
8.1.1	测速测距原理	(162)
8.1.2	相干应答器	(164)
8.1.3	锁相接收机	(164)
8.2	功率放大及微量频率变换	(165)
8.2.1	功率放大	(165)
8.2.2	微量频率变换	(165)
8.3	电动机转速控制	(167)
	习题参考答案	(169)
	参考文献	(171)

第 1 章 锁相环基本概念

本章介绍锁相环的一些基本概念,包括锁相环的构成、工作原理、锁定状态、跟踪状态、失锁状态、捕捉带、同步带,以及锁相环的分类、性能指标等。另外,本章还简单介绍了锁相环的应用。

1.1 闭环控制系统简介

锁相环(PLL——Phase-Locked Loop)是一个相位反馈系统(或称相位闭环控制系统、相位自动控制系统)。因此,在介绍锁相环之前,我们先简单阐述一般闭环控制系统的工作原理。

闭环控制系统由控制器、控制对象及反馈网络组成,其原理框图如图 1.1.1 所示。



图 1.1.1 闭环控制系统

闭环控制系统的目的是使系统的输出量按照预定规律变化,或达到某一预定值。系统的输入量与预定值成对应关系。反馈网络测量输出量并形成反馈量。控制器用来检测输入量与反馈量之间的偏差并产生一个控制信号。在这个控制信号的作用下,控制对象的输出向着预定值变化,最终消除或减小偏差。人们日常生活中普遍使用的空调器就是一个闭环控制系统。我们用遥控器对空调器设置某一温度,在空调器的控制板上就形成了一个与这一温度相对应的电信号,这个电信号就是输入量。感温头用来测量环境温度,形成一个反馈电信号。只要反馈电信号与输入电信号不相等,空调器就产生冷风(或热风),使房间温度向预定温度方向变化。此温度控制系统中,房间是控制对象,房间温度是输出量,空调器中包括了控制器和反馈网络两个部件。

可见,闭环控制系统的工作原理可简单地概括为:检测偏差,产生控制信号,消除或减少偏差。

检测偏差,就是用输入量减反馈量。所以此处所说的闭环控制系统是一个负反馈系统。

闭环控制系统的指标主要是稳定性、准确性、快速性。比如打开空调器,我们希望房间温度快速、准确地达到设定值,而且不出现周期性的高低温变化。为了使这些指标满足一定要求,往往需要在控制器和控制对象之间串接一个校正网络。这种带有校正网络的闭环控制系统如图 1.1.2 所示。



图 1.1.2 有校正网络的闭环控制系统

在自动控制理论中,常称输入量为控制量,输出量为被控制量,控制对象的输入信号为控制信号。

在电子系统中,我们可以用幅度、频率或相位来描述电信号的参数。因此,在电子闭环控制系统中,我们希望系统输出信号的幅度、频率或相位按照预定规律变化或达到某一预定值,分别称它们为自动增益控制(AGC)系统、自动频率控制(AFC)系统或自动相位控制(APC)系统。目前,通常将 AFC 称为自动频率微调,而将 APC 系统称为锁相环(PLL)。

在变参通信系统中,由于信道存在慢衰落及快衰落现象,接收机收到的信号幅度变化范围很大。为了保证输入大信号时,接收机输出信号不失真,输入小信号时,接收机输出信号足够大,在接收机中必须采用性能优良的 AGC 放大器。在直扩码分复用(DS-CDMA)通信系统中,接收机的 AGC 功能就更为重要。因为接收的多路信号具有相同的频率,仅基站地址码/信道地址码不同,信号路数随实际通用户数变化而变化,再加上信道的影响,接收信号幅度起伏范围更大。

AFC 系统可以使自激振荡器的频率锁定到近似等于预期的标准频率上,这个标准频率就是 AFC 系统的输入量,自激振荡器的实际振荡频率为 AFC 系统的输出量。

AFC 系统的工作原理与 PLL 类似,读者掌握了 PLL 的有关知识后,即可对 AFC 系统有更加深刻的理解。

关于 AGC 及 AFC 的具体电路及其工作原理,请读者查阅有关文献,此处不再赘述。

1.2 锁相环的构成及工作原理

1.2.1 锁相环的构成

工程实践中使用的锁相环(本书简称为环路)是各种各样的,但无论多么复杂的锁相环都包含鉴相器(PD—Phase Detector)、环路滤波器(LF—Loop Filter)以及压控振荡器(VCO—Voltage Controlled Oscillator)这三个基本部件。由这三个基本部件组成的锁相环如图 1.2.1 所示,我们称之为基本锁相环。图中 $u_i(t)$ 、 $u_o(t)$ 、 $u_f(t)$ 分别为环路的输入信号、输出信号和反馈信号。

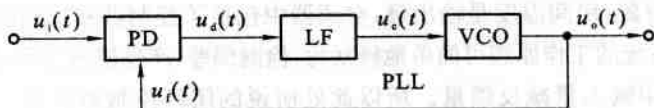


图 1.2.1 基本锁相环组成

实际使用的锁相环还可能包含有放大器、混频器、分频器、滤波器等部件,但这些部件不影响锁相环的工作原理,在进行理论分析时可不予考虑。

由图 1.2.1 可见,锁相环是一个闭环控制系统。基本锁相环是一个全反馈系统,它的反馈信号 $u_f(t)$ 等于输出信号 $u_o(t)$ 。

PD 对输入信号 $u_i(t)$ 和反馈信号 $u_f(t)$ 的相位作比较、运算处理,其输出信号可表示为

$$u_d(t) = f[\theta_e(t)] \quad (1.2.1)$$

式中, $\theta_e(t)$ 表示输入信号与反馈信号的相位差, $f[\cdot]$ 表示运算关系。

LF 是一个线性低通网络,用来滤除 $u_d(t)$ 中的高频成分和调整环路参数,它对环路的性能

指标有重要影响。LF 的输出信号 $u_c(t)$ 被用来控制 VCO 的频率和相位。常称 $u_d(t)$ 为误差信号, $u_c(t)$ 为控制信号, 它们之间的关系可表示为

$$u_c(t) = F(p)u_d(t) \quad (1.2.2)$$

式中, p 为微分算子符号, $F(p)$ 为 LF 的传输算子。

VCO 是一个电压/频率变换装置, 它的频率 $\omega_v(t)$ 随 $u_c(t)$ 变化, 一般可把它们表示为线性关系

$$\omega_v(t) = \omega_0 + K_o u_c(t) \quad (1.2.3)$$

式中, K_o 为 VCO 的控制灵敏度, 简称为压控灵敏度, 单位是 $\text{rad}/(\text{s} \cdot \text{V})$ 或 Hz/V 。 ω_0 为 VCO 的固有振荡频率, 即控制信号为零时的振荡频率(此时 VCO 不受环路控制)。

1.2.2 锁相环的工作原理

在锁相环中, PD 是控制器, VCO 是控制对象, LF 是校正网络, 基本锁相环中反馈网络的传递函数为 1。反馈网络传递函数为 1 的环路称为单位反馈环, 它的反馈信号等于输出信号, 反馈量等于输出量。在本书中, 无特殊说明的锁相环皆是单位反馈环。

鉴相器检测输入信号与反馈信号之间的相位偏差, 利用相位偏差产生控制信号, 从而减小或消除相位偏差。这就是锁相环的工作原理。

在锁相环中把相位偏差叫相位误差, 简称相差。由于偏差是输入量与反馈量之差, 所以锁相环的输入量是输入信号 $u_i(t)$ 的相位, 反馈量是 $u_f(t)$ 的相位, 输出量是 VCO 输出信号 $u_o(t)$ 的相位。

下面对锁相环的工作原理作一简单的定量分析, 并对分析结果进行定性说明。

设 $u_i(t)$ 是一个频率为 ω_i 、初相为 θ_i 的周期信号(即固定频率信号), 则锁相环的输入量为 $\omega_i t + \theta_i$ 。

由式(1.2.3)得输出量为 $\omega_0 t + K_o u_c(t)/p$

在全反馈系统中, 相位误差为

$$\theta_e(t) = \Delta\omega_0 t + \theta_i - K_o u_c(t)/p \quad (1.2.4)$$

式中, $\Delta\omega_0 = \omega_i - \omega_0$, 称为环路的固有频差, 常称 $\theta_e(t)$ 为环路的瞬时相位误差(简称瞬时相差或相差)。

对式(1.2.4)两边微分, 得

$$d\theta_e(t)/dt = \Delta\omega_0 - K_o u_c(t) \quad (1.2.5)$$

式中, $K_o u_c(t)$ 表示控制电压使 VCO 产生的频率变化, 称为控制频差。 $d\theta_e(t)/dt$ 为环路的瞬时频率误差(输入信号频率与反馈信号频率之差, 简称瞬时频差或频差)。可见, 当环路输入为固定频率周期信号时, 瞬时频差、固有频差及控制频差之间的关系为

$$\text{瞬时频差} = \text{固有频差} - \text{控制频差}$$

下面分析一种最简单的锁相环的瞬时相差和瞬时频差的变化规律。在这种环路中, $F(p) = 1$, $u_d(t) = K_d \theta_e(t)$, 由式(1.2.1)和式(1.2.2)得

$$u_c(t) = K_d \theta_e(t) \quad (1.2.6)$$

将式(1.2.6)代入式(1.2.5), 得

$$d\theta_e(t)/dt = \Delta\omega_0 - K \theta_e(t) \quad (1.2.7)$$

式中, $K = K_d K_o$ 。解此一阶微分方程, 得

$$\theta_e(t) = \frac{\Delta\omega_0}{K}(1 - e^{-Kt}) + \theta_e(0)e^{-Kt} \quad (1.2.8)$$

式中第一项为零状态响应,第二项为零输入响应, $\theta_e(0)$ 为起始相差,即式(1.2.7)的初始状态。

1. $\Delta\omega_0 = 0$

由式(1.2.8)得

$$\theta_e(t) = \theta_e(0)e^{-Kt} \quad (1.2.9)$$

$$\frac{d\theta_e(t)}{dt} = -K\theta_e(0)e^{-Kt} \quad (1.2.10)$$

此两式分别表示环路相差和频差的变化规律,变化曲线如图 1.2.2(a)、(b)所示,图中设起始相差大于 0。

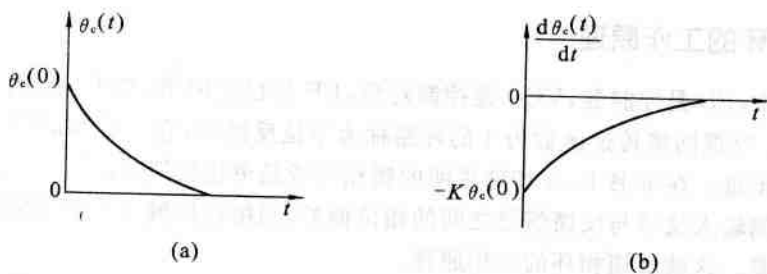


图 1.2.2 有起始相差时的相差、频差曲线

可见,环路可消除起始相差。为消除起始相差,当起始相位大于 0 时,控制电压使 VCO 的频率在一定时间内高于输入信号频率,频差为负值。频差曲线的积分与起始相差大小相等,符号相反,以抵消起始相差。

若起始相差小于零,则相差与频差的符号与图 1.2.2 相反。

2. $\Delta\omega_0 > 0, \theta_e(0) = 0$

由式(1.2.8)得

$$\theta_e(t) = \frac{\Delta\omega_0}{K}(1 - e^{-Kt}) \quad (1.2.11)$$

$$\frac{d\theta_e(t)}{dt} = \Delta\omega_0 e^{-Kt} \quad (1.2.12)$$

相差和频差的变化曲线如图 1.2.3(a)、(b)所示。

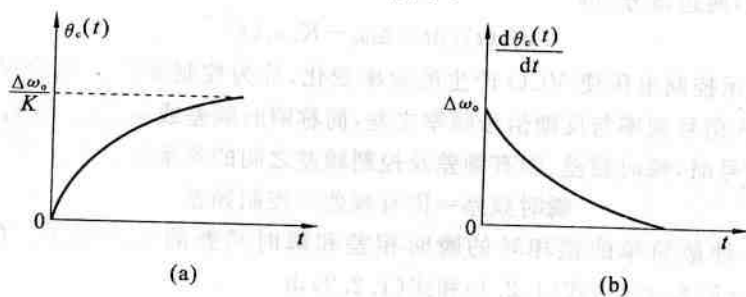


图 1.2.3 有起始频差时的相差、频差曲线

可见,环路可以消除固有频差,但存在一定相差。若环路断开,则输入信号和 VCO 的信号之间的固有频差无法消除,相差会越来越大。环路闭合后虽然不能消除相差,但仍可把相差减小到一定范围之内。

这一固定相差是为消除固有频差所必须存在的。频差为零,就意味着 VCO 的频率由 ω_0 变为 ω_1 ,变化量为 $\Delta\omega_0$,这就需要有一个控制电压 $\Delta\omega_0/K_0$,它对应的相差就是 $\Delta\omega_0/K$ 。

若 $\Delta\omega_0 < 0$,则相差、频差的符号与图 1.2.3 相反。

当 LF 是一个低通滤波器时, $F(p) \neq 1$,环路动态方程是一个二阶或高阶微分方程,在起始相差或固有频差的作用下,环路相差及频差的变化过程比较复杂,但总的变化趋势与上述情况是相似的。

总之,当锁相环输入周期信号的频率固定时,它的输出信号频率可以与输入信号频率相同,即锁相环可以消除频差。但能否消除相差取决于所用 LF 的形式。若 LF 的直流增益为无穷大,则可消除相差。因为这时虽然 $\theta_e(t)$ 与 $u_d(t)$ 都等于零,但通过一个直流增益为无穷大的 LF,可得到所需要的控制电压 $\Delta\omega_0/K_0$ 。若 LF 的直流增益为有限值,则不能消除相差。

当然,设计一个锁相环不只是为了得到一个与输入同频的信号,实际的鉴相器输出也不一定与相差成正比关系,这些问题在后面再作详细介绍。

1.2.3 锁相环分类

目前,主要是根据锁相环的部件电路类型来对锁相环分类的。

1. 模拟锁相环(APLL)

PD、LF、VCO 等部件全是模拟电路。这是应用较早的锁相环。在模拟锁相环中,最常用的鉴相器是模拟乘法器。环路滤波器是由 RC 组成的无源低通滤波器或由 RC 和运算放大器组成的有源低通滤波器。压控振荡器有变容二极管压控管振荡器,射极耦合多谐压控振荡器等。另外,由数字门电路组成的振荡器也常归属于模拟压控振荡器,因为它的控制电压是模拟量,振荡频率是连续可变的。锁相接收机、载波提取、调角信号的产生与解调等常用模拟锁相环。

2. 模数混合锁相环

采用数字鉴相器,LF、VCO 仍与模拟环相同。这种锁相环出现初期,常被称为数字锁相环,可称之为传统的数字锁相环。在这种锁相环中, u_d 、 u_c 仍为模拟信号。PD 的两个输入信号为二进制数字信号。

电荷泵锁相环(CPLL)是一种典型的模数混合锁相环,常在频率合成器中使用,也可用于提取相干载波及位同步信号,产生及解调调角信号。

3. 数字锁相环(DPLL)

全部部件都是数字电路,所有信号都是二进制的或多数进制的数字信号,而且 VCO 的频率不是连续可调的。数字锁相环常用来提取位同步信号。

模拟锁相环的输入信号是固定频率正弦信号或正弦载波调角信号。电荷泵锁相环的输入信号是固定频率矩形脉冲周期信号或脉冲载波调角信号。数字锁相环输入信号一般是固定码速随机矩形脉冲序列,它不是一个周期信号。

1.3 锁相环的工作状态

工程上使用的锁相环有两种工作状态,即锁定状态和线性跟踪状态,不同用途的锁相环应在不同状态。在锁相频率合成器中,锁相环工作在锁定状态,在锁相接收机、锁相调制、锁相解调及锁相环相干载波提取等用途中,锁相环工作在线性跟踪状态。