

❖ 高等院校通信与信息专业规划教材 ❖

锁相技术

PHASELOCK TECHNIQUES



张涛 编著



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

本书赠送电子教案

高等院校通信与信息专业规划教材

锁相技术

张 涛 编著



机械工业出版社

本书是作者在从事集成锁相环频率合成器电路设计的科研基础上,结合长期从事“锁相技术”课程的教学实践的经验,介绍了锁相环的基本原理、数学模型、设计方法和芯片应用,以及本领域的新发展、新器件和新应用。前四章是讲述锁相环的传统内容:锁相环基本原理、数学模型、单元电路以及跟踪、捕获性能。后三章取材新颖,第5章讲述了目前集成芯片常用的电荷泵锁相环及其实际芯片应用,第6章讲述了由电荷泵锁相环组成的频率合成器及其设计流程,第7章介绍了直接数字频率合成器以及AD9854的应用。

本书可作为高等学校电子信息工程、通信工程、集成电路设计等专业本专科师生的教材和参考书,也可供相关专业研究生和工程技术人员参考。

本书配有电子教案,需要的教师可登录 www.cmpedu.com 免费注册后下载,或联系编辑索取(QQ: 241151483, 电话 010-88379753)。

图书在版编目(CIP)数据

锁相技术 / 张涛编著. —北京: 机械工业出版社, 2015.3

高等院校通信与信息专业规划教材

ISBN 978-7-111-49780-6

I. ①锁… II. ①张… III. ①锁相技术—高等学校—教材
IV. ①TN911.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 059620 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 李馨馨 责任校对: 张艳霞

责任编辑: 李馨馨

责任印制: 李洋

北京瑞德印刷有限公司印刷 (三河市胜利装订厂装订)

2015 年 4 月第 1 版·第 1 次印刷

184mmx260mm·10 印张·245 千字

0001—3000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-49780-6

定价: 29.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线: (010) 88379833

机工官网: www.cmpbook.com

读者购书热线: (010) 88379649

机工官博: weibo.com/cmp1952

教育服务网: www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

金书网: www.golden-book.com

前 言

锁相环是现代电子系统不可缺少的核心部件，在通信系统中，它的同步作用无处不在，在微处理器等大规模数字系统中，锁相环是产生精准时钟的必备模块。

本书主要介绍了锁相技术的基本概念、原理和应用。从理论上探讨锁相环的建模与仿真，应用数学模型研究锁相环的跟踪性能和捕获性能。第 1 章简单介绍了锁相环的基本原理和应用，让学生在最短时间内对锁相环有一个全面的认识。第 2 章锁相环的基本单元电路和数学模型，将电路实现与数学模型结合到一起讲解，使学生既有实际电路的感性认识，又有上升到数学模型的理论升华，是不同于其他教材的探索。这样，学生能够将理论和实际相结合，使锁相技术与电子技术这两门课产生密切的联系，有利于学生将所学知识融会贯通。第 3 章讲述锁相环的稳定性、暂态响应和稳态响应，这是应用数学模型对锁相环进行分析研究。第 4 章讲述锁相环的捕获性能，这是锁相环的非线性性能，如何对非线性系统进行分析研究是锁相环学习的难点。第 5 章电荷泵锁相环是当前锁相环集成电路设计的研究热点，目前单片集成锁相环基本上是电荷泵锁相环。该章讲述了电荷泵锁相环的电路结构和数学模型，重点探讨了电荷泵鉴频鉴相器以及二阶、三阶、四阶电荷泵锁相环的建模和 MATLAB 仿真，简要介绍了锁相环噪声的定义和评价指标以及噪声来源，最后讲解了一个通用集成锁相环的设计实例。第 6 章频率合成器（锁相环一般是以频率合成器的形式进入应用），该章主要讲述频率合成器的系统结构、各种分频器电路形式，以及详细介绍了一个电荷泵锁相环系统的设计实例，并通过仿真来验证。第 7 章简单介绍了直接数字频率合成器，直接数字频率合成器因其全数字电路、可编程、可数控等灵活的特点，得到广泛应用。该章讲述直接频率合成器的基本原理和单元电路的构成，重点以 AD9854 为例，介绍直接频率合成器设计实例。

本书知识体系注重知识的关联学习，在传授理论知识的同时，注重学生对知识的应用。注重锁相环基本理论讲述的同时，加入实际电路的实现，使学生将先修的电子技术课程的知识应用于本课程。书中实例来源于实际科研课题，可帮助学生掌握工程的设计方法，培养良好的工程意识。

本书的作者具有多年“锁相技术”课程的教学经验，同时一直从事锁相环频率合成器集成电路的设计研究工作，具有丰富的实际研发经验，同时了解本学科的发展前沿和最新状况，所以本书能够反映本学科发展的新成果、新知识，具有前沿性。

本书所有逻辑电路中的逻辑门符号均采用了国外流行符号，国标符号与本书所用符号的对照表可见附录。

鉴于作者水平有限，难免有错误与不足之处，恳请读者批评指正。

作 者
2015 年 2 月

目 录

前言

第 1 章 锁相环的基本概念	1
1.1 锁相环的基本原理	2
1.1.1 锁相环的组成与工作原理	2
1.1.2 锁相环的工作状态	3
1.1.3 锁相环的应用	4
1.1.4 锁相环性能指标	7
1.2 锁相环的分类	8
思考与练习题	9
第 2 章 锁相环的基本单元电路和数学模型	10
2.1 锁相环的基本单元电路	12
2.1.1 鉴相器	12
2.1.2 环路滤波器	23
2.1.3 压控振荡器	26
2.2 锁相环线性相位模型	31
2.2.1 锁定状态下的锁相环数学模型	31
2.2.2 四种锁相环传递函数	32
2.2.3 二阶系统传递函数一般表达式	35
思考与练习题	39
第 3 章 锁相环的跟踪性能（锁定性能）	41
3.1 环路稳定性	42
3.1.1 稳定性判据	42
3.1.2 采用 RC 积分滤波器的二阶环稳定性分析	44
3.1.3 采用无源超前滞后滤波器的二阶环	46
3.1.4 理想二阶环	48
3.1.5 高阶环路稳定性分析与设计	50
3.2 暂态响应	55
3.2.1 典型暂态相位信号	55
3.2.2 环路对典型暂态相位信号的响应	56
3.2.3 环路的稳态相位误差	65
3.3 稳态响应	67
思考与练习题	73

第 4 章 锁相环的捕获性能	75
4.1 捕获状态（失锁状态）下的数学模型	76
4.2 一阶环的捕获性能	78
4.2.1 $ \Delta\omega < K$ 时的捕获状态	79
4.2.2 $ \Delta\omega > K$ 时的失锁状态	80
4.2.3 $ \Delta\omega = K$ 时的临界状态	81
4.2.4 一阶锁相环性能指标	82
4.3 二阶环的捕获性能	83
4.3.1 频率捕获	83
4.3.2 相位捕获	85
4.3.3 二阶锁相环的性能指标	88
4.4 锁相环的辅助捕获方法	95
4.4.1 减小环路起始频差法	96
4.4.2 变带宽和变增益法	96
思考与练习题	97
第 5 章 电荷泵锁相环	99
5.1 电荷泵鉴频鉴相器数学模型	100
5.1.1 电流型电荷泵鉴频鉴相器	100
5.1.2 电压型电荷泵鉴频鉴相器	102
5.2 电荷泵锁相环的线性模型	102
5.2.1 二阶电荷泵锁相环	102
5.2.2 三阶电荷泵锁相环	105
5.2.3 四阶电荷泵锁相环	107
5.3 锁相环噪声性能	109
5.3.1 锁相环中相位噪声的定义与表达式	110
5.3.2 锁相环的噪声来源	112
5.4 电荷泵锁相环应用实例——集成锁相环 4046	114
思考与练习题	118
第 6 章 锁相环频率合成器	119
6.1 频率合成器简介	120
6.1.1 频率合成的基本方法	120
6.1.2 频率合成器的主要技术指标	121
6.2 频率合成器的结构	121
6.2.1 单环结构频率合成器	121
6.2.2 多环结构频率合成器	123
6.3 频率合成器中的分频器	124
6.3.1 双模分频器	124
6.3.2 双模预分频器	125
6.3.3 小数分频器频率合成器	127

6.4 电荷泵锁相环频率合成器设计实例	130
6.4.1 锁相环频率合成器系统参数的确定	131
6.4.2 数学模型的建立与仿真	133
思考与练习题	135
第7章 直接数字频率合成器	136
7.1 DDS 简介	137
7.2 DDS 的基本原理与构成	138
7.3 DDS 单元电路	141
7.3.1 相位累加器	141
7.3.2 正弦 ROM 存储器	142
7.3.3 数模转换器与低通滤波器	143
7.4 DDS 散杂频谱分析	143
7.4.1 正弦 ROM 存储器的相位截断误差	143
7.4.2 正弦 ROM 存储器中幅值量化误差	143
7.4.3 DAC 的非线性误差	144
7.5 DDS 芯片应用实例 (以 AD9854 为例)	144
7.5.1 AD9854 的基本构成	145
7.5.2 AD9854 应用实例	147
思考与练习题	150
附录 常用逻辑符号对照表	151
参考文献	152

第7章

锁相环的基本概念

1.1 锁相环的基本原理

1.2 锁相环的分类

思考与练习题

本章主要介绍锁相环的基本概念、构成和工作原理，以及各部件的功能。讲述锁相环的两种工作状态、锁相环的应用、锁相环性能指标和分类。

1.1 锁相环的基本原理

1.1.1 锁相环的组成与工作原理

锁相环 (Phase Locked Loop, PLL) 是一个闭环负反馈相位控制系统，在不同的实际应用中，锁相环是各种各样的，但无论多么复杂的锁相环应用都包含以下 3 个不可缺少的基本单元电路：

- 鉴相器 (Phase Detector, PD)。
- 环路滤波器 (Loop Filter, LF)。
- 压控振荡器 (Voltage Controlled Oscillator, VCO)。

图 1-1 所示为基本锁相环的框图。其中，输入信号为 $u_i(t)$ ，信号的角频率为 ω_i 。锁相环的输出信号，也就是压控振荡器的输出信号为 $u_o(t)$ ，输出信号的角频率为 ω_o 。鉴相器输出的误差电压信号为 $u_d(t)$ 。环路滤波器输出的控制电压信号为 $u_c(t)$ 。

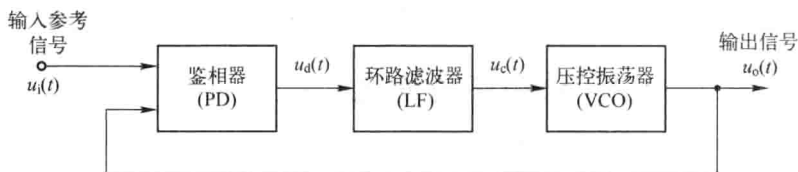


图 1-1 锁相环的框图

鉴相器将输入周期信号的相位与压控振荡器输出信号的相位进行比较，得到两信号的相位差 θ_e ，PD 将 θ_e 转换为误差电压信号 $u_d(t)$ 输出。误差电压通过环路滤波器进行滤波，滤除交流成分，输出直流控制电压 $u_c(t)$ 。 $u_c(t)$ 控制压控振荡器的输出频率，以减小输入信号与压控振荡器输出信号之间的相位误差。

当环路锁定时，控制电压把压控振荡器输出信号频率的平均值调整到与输入参考信号频率的平均值完全一样。理想情况下，压控振荡器输出信号的频率和相位等于输入参考信号的频率和相位，我们称环路处于锁定状态（同步状态、跟踪状态）。锁相环路的锁定也称之为锁相环输出信号跟踪输入参考信号。但实际情况下，相差不为零，会存在一个很小且恒定的相位误差。

下面详细说明图 1-1 中，PLL 三个基本模块的工作原理。

1. 鉴相器

鉴相器实质上是一个相位比较器，将锁相环输出信号（也就是压控振荡器的输出信号）的相位与输入参考信号的相位进行比较，得到相位误差 θ_e ，鉴相器输出的误差电压 $u_d(t)$ 正比于 θ_e ，在一定的范围内，有

$$u_d(t) = K_d \cdot \theta_e \quad (1-1)$$

其中, K_d 代表鉴相器的增益, 单位为 V/rad 。图 1-2 为鉴相器的传递函数的图形表示。从图 1-2 中可看到: 误差电压 $u_d(t)$ 与相位误差 θ_e 成正比, 直线的斜率为 K_d , 鉴相器的实质是将相位误差 θ_e 转化为电压量 $u_d(t)$ 。

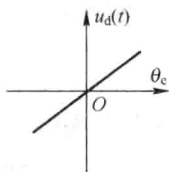


图 1-2 鉴相器的传递函数

2. 环路滤波器

鉴相器的输出信号 $u_d(t)$ 含有直流成分和交流成分, 交流成分是不需要的, 因此通过环路低通滤波器, 滤除误差电压 $u_d(t)$ 中的交流成分, 滤波的过程即为对误差电压 $u_d(t)$ 求平均的过程, 最终得到直流电压 $u_c(t)$ 。

3. 压控振荡器

环路滤波器输出的直流电压 $u_c(t)$ 控制压控振荡器的振荡频率 ω_o , 即

$$\omega_o = \omega_0 + K_{\text{VCO}} u_c(t) \quad (1-2)$$

式中, ω_0 是压控振荡器的自由振荡频率 (或称中心频率、固有频率), 即 $u_c(t) = 0$ 时, 压控振荡器的输出频率。 K_{VCO} 是压控振荡器的压控增益, 单位为 $\text{rad/s} \cdot \text{V}$ 。压控振荡器的传递函数的图形表达如图 1-3 所示。图中的斜线的斜率为 K_{VCO} 。

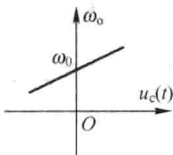


图 1-3 压控振荡器的传递函数

当输入参考信号的角频率等于压控振荡器的自由振荡频率 ω_0 , 且相位误差 θ_e 为 0 时, 鉴相器输出的误差电压 $u_d(t)$ 为 0, 环路滤波器的输出电压 $u_c(t)$ 也为 0。从图 1-3 中可看到: 此时压控振荡器工作在它的自由振荡频率 ω_0 。反之, 当相位误差 θ_e 不为 0 时, 鉴相器输出的误差电压 $u_d(t)$ 也不为 0, 环路滤波器的输出电压 $u_c(t)$ 将控制压控振荡器的工作频率, 使压控振荡器输出信号的频率和相位与输入参考信号的频率和相位相等。

1.1.2 锁相环的工作状态

下面通过图 1-4 来说明锁相环从锁定—失锁—锁定的捕获过程。

假设在 $t < t_0$ 时刻, 输入信号的频率和相位等于压控振荡器的自由振荡频率和相位, 相差为零, 误差电压和控制电压也为零。此时, 环路处于锁定状态。

在 $t \geq t_0$ 时刻, 输入信号的频率发生突变, 产生 $\Delta\omega$ 阶跃, 即输入信号的频率为



$\omega_1 = \omega_n + \Delta\omega$ 。此时，环路输入/输出信号的频率不等，环路处于失锁状态。

输入信号的相位超前输出信号的相位，相位误差 θ_e 增加（逐渐增加，不可能突变），鉴相器输出的误差电压 $u_d(t)$ 也随之增加，通过环路滤波器后，输出的控制电压 $u_c(t)$ 也增加，它控制压控振荡器的频率上升，这样将导致输出信号与输入信号的相位误差减小，通过一段时间的捕获，压控振荡器的输出频率精确锁定在输入信号的频率上，控制电压 $u_c(t) = \Delta\omega / K_{VCO}$ 。

根据环路滤波器类型的不同，理论上最终相位误差将会减小到 0 或一个非常小的值，此时环路进入锁定状态，环路由失锁状态进入锁定状态的过程，称为环路的捕获。

由此可知，锁相环包含两个工作状态：锁定状态和捕获状态。

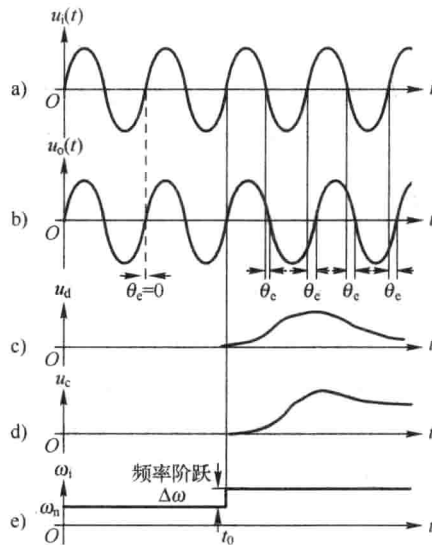


图 1-4 输入信号发生频率阶跃时，PLL 的瞬态响应

a) 输入信号 b) 输出信号 c) 鉴相器输出的误差电压 d) 环路滤波器输出的控制电压 e) PLL 的输出频率

1.1.3 锁相环的应用

锁相环有一个非常显著的特性：能从噪声中恢复输入信号。当输入信号包含有很多随机噪声时，鉴相器有能力排除其他干扰，仅仅检测输入信号与输出信号的相位差。包含在输入信号中的噪声会使输入信号的过零点前后抖动（在频域中称为相位噪声），这将导致鉴相器输出的误差电压 $u_d(t)$ 围绕误差电压的平均值 \bar{u}_d 上下波动（幅度噪声不会对 PLL 造成影响）。通过环路低通滤波器的过滤作用，将得到稳定的直流输出 $u_c(t)$ ，它控制压控振荡器的输出频率等于输入信号的频率，相位等于输入信号相位的平均值。这样，PLL 实质上能从噪声中提取有用信号，同时 PLL 能跟踪输入信号的相位，保持锁定。

从上面分析可看出，PLL 是一种让信号通过、把噪声滤除的滤波器。作为一种滤波器，PLL 有两个重要的特性：第一，具有很窄的带宽；第二，能自动跟踪输入信号的频率和相位。自动跟踪和窄带是通信接收机中普遍采用锁相技术的主要原因。正是因为很窄的带宽，

窄带锁相环能够滤除大量的噪声，恢复有用信号。因此，通信中时钟恢复、载波恢复等电路的核心部分都是锁相环。由此可见：窄带锁相环多应用于通信领域。

另外，还有一种宽带锁相环，这类锁相环环路的频带较宽，多应用于高精度频率源（因为输入参考信号多为纯净无噪声的信号，如晶体振荡器产生的信号）。

如图 1-5 所示，锁相环的绝大多数应用中，都要加入分频器 $1/N$ （即 N 计数器），分频器的作用是对压控振荡器输出信号的频率进行 N 分频。严格讲，加入分频器的锁相环叫锁相环频率合成器，锁相环频率合成器将在第 6 章详细讲述。其实当分频器的分频数 $N=1$ 时，就是一个最简锁相环。所以有时本书不加区分地将图 1-5 称为锁相环。

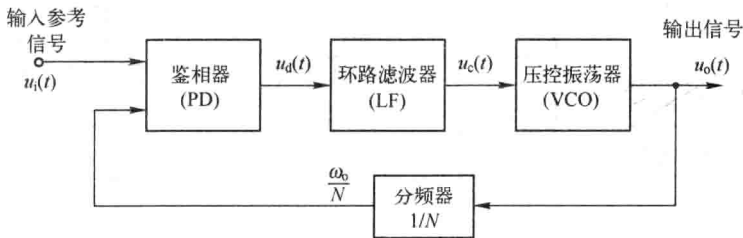


图 1-5 频率合成器——加入分频器的锁相环框图

(1) 锁相环应用于调制解调

锁相环应用于调制解调如图 1-6 所示。锁相环频率合成器作为发射机的上变频（调制）和接收机的下变频（解调）中的本振信号，具有以下优点：灵活的调谐范围和信道步长，高频谱纯度，低相位噪声。特别是在跳频接收机中广泛采用。

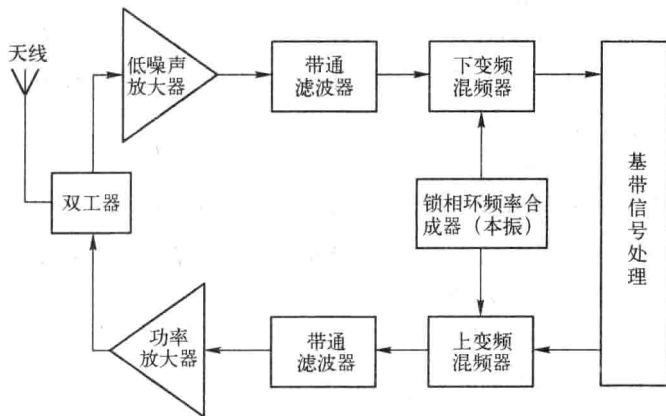


图 1-6 通用收发器框图

(2) 锁相环应用于高速视频接口电路

锁相环应用于高速视频接口电路中，作为低压差分信号的同步时钟如图 1-7 所示。低压差分信号（Low Voltage Different Signal, LVDS）因其具有高速度、低噪声、低功耗等优点广泛应用于数字视频高速传输系统。基于 LVDS 标准的发送器将 7 位 CMOS 并行信号转换为 1 位 LVDS 信号串行输出，为了保持数据传输率不变，输出数据的速率是输入数据速率的 7 倍，这要求同步时钟也要提高 7 倍。

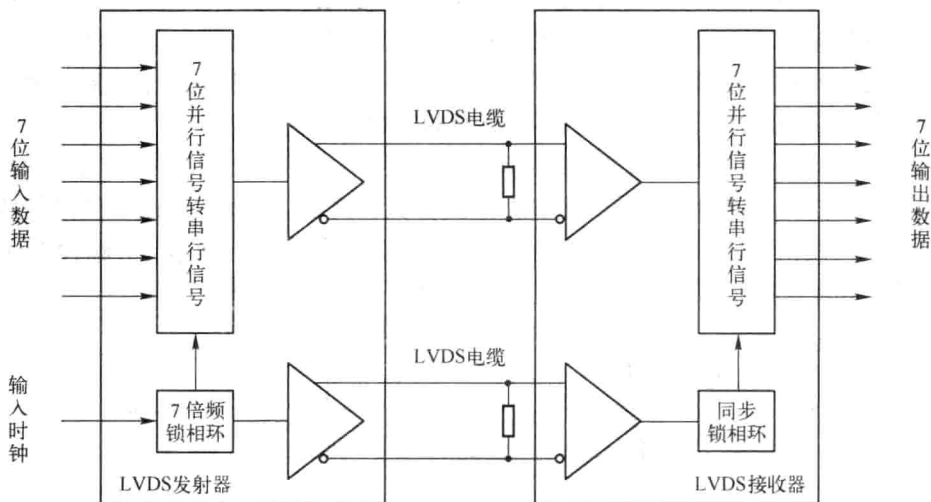


图 1-7 锁相环倍频器应用于低压差分信号的同步时钟

(3) 锁相环应用于数字通信系统

锁相环作为系统时钟应用于数字通信系统。大规模数字通信系统中包含了许多与同一时钟源同步的高精度时钟，通过这些时钟去控制数字通信系统中的每一个模块。每个下级时钟一般都由锁相环产生，并与上一级时钟同步，这些锁相环如同时钟中继站。而且从时钟的稳定性和频谱纯度来看，锁相环必须是窄带锁相环。

(4) 锁相环应用于高速计算机和大规模数字系统

高速计算机和大规模数字系统中，由于存在时钟延时，导致数据出错，这称为时钟歪斜。锁相环由于是一个相位跟踪系统，能够使时钟边沿对齐，消除时钟歪斜，因此，在计算机等大规模数字系统中，要用到大量的锁相环。

(5) 锁相环应用于电视接收机

电视接收机中大量使用锁相环，如水平扫描和垂直场扫描电路中使用锁相环进行同步；锁相环为提取彩色副载波提供相位基准；FM 伴音的解调、残留边带视频信号的相干解调、接收调谐器等方面都要用到锁相环。

(6) 锁相环应用于电机速度控制

锁相环应用于电机速度控制的基本原理如图 1-8 所示。基准信号源产生一个与电机转速频率成 n 倍的精准方波信号，锁相环中的压控振荡器由电机和光转速盘取代。电机驱动一个透光和不透光相间隔的圆盘，圆盘转动时不断切断发光二极管的光线，使光传感器产生与电机转速成 n 倍的方波信号，通过鉴相器，这个信号与基准信号相比较，产生误差电压 u_d ，通过环路滤波器和功率放大器，产生控制电压 u_c 控制电机转速，使电机的平均转速被控制到基准源的频率上。

此外，窄带锁相环具体应用还有：跟踪滤波器、同步滤波、移相器、频率变换、自动跟踪调谐等。

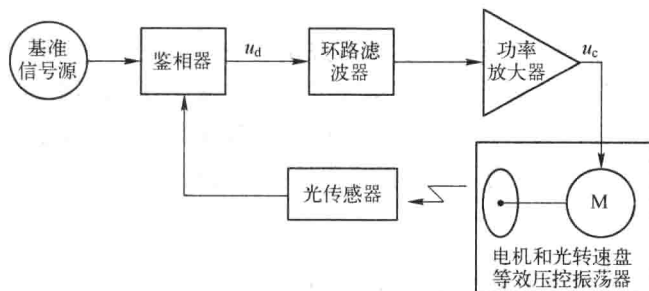


图 1-8 电机速度锁相控制

锁相环的另外一种应用是高精度频率源。

- 某些高频或大功率频率源，频率稳定性很差，可通过锁相环锁定到一个频率较低、功率较小，但频率非常稳定的基准振荡器上。锁相环稳频最典型的应用是原子钟（原子频标），提取原子能级跃迁，产生的光谱，将这个稳定的频率作为锁相环的输入参考频率，锁相环的输出就锁定在这个精准的基准频率源上。
- 微处理器等大规模数字系统的时钟源。这样的锁相环应该有很宽的带宽，良好的响应速度，起到快速稳频稳相的作用。

总之，从带宽的角度来看，窄带锁相环与宽带锁相环的应用是不同的，宽带锁相环多应用于高精度频率源。

无论哪种应用，锁相环的最终目的是将输出信号锁定到输入信号。本教材关注的重点是锁相环在什么条件下保持锁定？什么条件下能够从失锁状态，通过捕获，进入锁定。

1.1.4 锁相环性能指标

不同应用场合锁相环会有不同的性能要求。但是，锁相环作为一个闭环控制系统，稳定、准确、快速是闭环控制系统的一般要求。此外，锁相环处理的是电信号，对噪声的抑制能力也是必须考虑的指标。因此，本教材中，我们将围绕稳、准、快、抗噪这 4 个方面对锁相环进行性能分析。对于绝大多数应用场合，下列参数能表现锁相环的性能：频率范围、稳态误差、捕获时间、频谱纯度。

1. 频率范围

锁相环的频率范围是由控制压控振荡器的控制电压的范围决定的。目前，锁相环中广泛应用的压控振荡器有：环形振荡器、RC 多谐振荡器和 LC 谐振回路振荡器。环形压控振荡器有很宽的频率范围，但由于受反相延迟单元时间的限制，频率不可能达到很高。而 LC 谐振回路压控振荡器很难获得宽的频率范围，但可达到很高的频率。

2. 稳态相位误差

理想情况下，当环路锁定时，锁相环输出信号的频率和相位等于输入信号的频率和相位，但实际情况下，两信号的相位差不为零，而是存在一个很小的值，这就是稳态相位误差。这个值越小，说明环路的跟踪精度越高。

3. 捕获时间

锁相环的捕获时间是指从上电到环路锁定或从一个频率点锁定到另一个频率点锁定所需要的时间。决定捕获时间的关键因素是环路带宽，环路带宽越大，捕获时间越短。然而，环路带宽不能无限制地增大，为了保证环路稳定性，环路带宽应为鉴频鉴相器输入参考信号的 $1/10$ 。其次，在有些应用场合，为了保证低噪声输出，环路带宽应尽量小。

4. 频谱纯度

当环路锁定时，锁相环应该输出稳定的周期波形，但实际电路中存在各种非理想因素，导致输出波形存在相位噪声和幅度噪声。相位噪声在时域中称为抖动，是指波形的过零点围绕理想值随机波动，即相位的随机变化。在频域中，则表现为频率的变化。如图 1-9a 所示。相位噪声或抖动是一个表述锁相环频谱纯度的重要参数。引起锁相环相位噪声的主要原因有两个：输入参考信号和压控振荡器。如果输入参考信号是由晶体振荡器产生，那么压控振荡器是导致相位噪声的主要原因。另外一个频谱纯度的参数是幅度噪声，它在频域和时域中的噪声表现如图 1-9b 所示。显然，图 1-9 所示频谱图中，中心频率两边产生了大量的旁频。

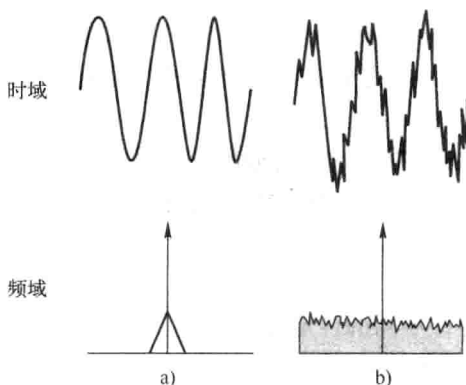


图 1-9 频域和时域中的噪声表示

a) 相位噪声 b) 幅度噪声

1.2 锁相环的分类

1932 年，法国工程师 Bellescize 发明了第一个锁相环，应用于同步通信。1965 年，第一片集成电路锁相环诞生，广泛应用于广播电视领域。当时的锁相环是一个纯模拟电路，应用四象限模拟乘法器实现鉴相器；无源和有源滤波器实现环路低通滤波器；通过压控振荡器实现锁相环输出信号。我们称此种锁相环为模拟锁相环或线性锁相环。

20 世纪 70 年代，随着数字电路技术的发展，出现了数字鉴相器，例如，异或门、触发器实现鉴相器，但其他模块还是模拟电路，我们称此种锁相环为混合信号锁相环，其中电荷泵锁相环是最常用的一种。

几年后，全数字锁相环被发明，数字锁相环中各模块都是通过数字电路来实现，没有电阻电容等无源器件。我们称此种锁相环为全数字锁相环或简称数字锁相环。

近年，全部由计算机软件实现的锁相环出现，锁相环的所有模块不是由硬件电路实现，而是由计算机编程实现，我们称此种锁相环为软件锁相环。软件锁相环在本书中不涉及，有兴趣的读者请参看文献[4]。

不同的锁相环特性是不同的，理论也是不同的。但模拟 PLL 和混合信号 PLL 是类似的，因此，本书首先介绍模拟锁相环的理论，然后，以此为基础，在第 5 章进一步讲解混合信号锁相环（主要是电荷泵锁相环）。数字锁相环作为独立的内容，将在第 7 章中讲解。

思考与练习题

- 1.1 锁相环由哪些基本模块组成，各部分的作用是什么？
- 1.2 简述锁相环的工作原理。
- 1.3 简述锁相环的工作状态及其捕获过程。
- 1.4 通过查阅资料，结合自己所学知识，列举两个锁相环应用的例子。
- 1.5 简述相位噪声和幅度噪声的区别。
- 1.6 锁相环的基本参数有哪些？每种参数表示锁相环的什么性能？
- 1.7 简述锁相环的分类。

第2章

锁相环的基本单元电路和数学模型

2.1 锁相环的基本单元电路

2.2 锁相环线性相位模型

思考与练习题