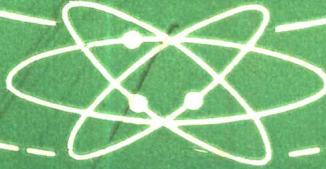


高等学校教材

锁相与频率合成技术

仇善忠 张冠百 编



电子工业出版社

锁相与频率合成技术

仇善忠 张冠百 编

电子工业出版社

内 容 简 介

本书重点介绍了锁相与频率合成技术的工作原理及应用。对于锁相环路的主要部件、环路的线性和非线性性能作了深入浅出的分析。并详细讨论了在噪声影响下的环路失锁门限及跳周等问题。对于频率合成方法及新技术,如小数分频、中大规模集成锁相环与数字频率合成技术、微机控制频率合成器等也都作了详细的介绍。

本书适合于全国各类高校电子类专业师生使用,也可供从事通信、测量、遥控遥测、雷达导航等工程技术人员参考。

锁相与频率合成技术

仇善忠 张冠百 编

责任编辑 王玉国

*

电子工业出版社出版 (北京市万寿路)

北京科技印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

开本: 787×1092 1/16 印张: 14.75 字数: 340 千字

1986年5月第一版 1986年5月第一次印刷

印数: 4000册 定价: 2.50元

统一书号: 15290·320

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。并制定了一九八二年到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《通信》编审小组评选审定，并推荐出版。

本教材由上海交通大学仇善忠、张冠百同志担任主编，天津大学俞肇基同志担任主审，编者均依据《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：第一章叙述了锁相环路的基本工作原理与主要部件，讨论了锁相环路与频率合成器中使用的鉴相器、环路滤波器、压控振荡器的技术指标和工作原理，使初学者对锁相环路与频率合成器有一个概括的了解。第二章主要是根据锁相环路的线性化理论，对环路的传递函数、频率响应、线性跟踪、稳定性理论等各种动态性能进行了较深入的讨论。第三章运用非线性理论，对环路的同步性能、捕捉特性、存在噪声时的环路非线性特性、环路的跳周理论等进行了较详细地论述。第四章介绍了模拟与数字频率合成器的构成方法与工作原理，讨论了数字式频率合成器的主要部件——可变程序分频器，对零读出和吞脉冲程序分频器作了详细的讨论，对单环和多环数字式频率合成器进行了分析比较，同时对最先进技术——小数分频频率合成器进行了较详细的阐述，并给出了具体的实用电路，最后介绍了数字频率合成器的工程设计方法与实例。第五章介绍了目前广泛使用的集成单片锁相环和集成数字频率合成器的工作原理与实际电路，讨论了微机控制的数字频率合成器，介绍了微机控制的输出频率为任选、存储、跳频和扫描等工作方式及有关流程图和软程序，附录中给出了中外集成锁相环与数字频率合成器型号的参考资料。第六章叙述了相位噪声与功率频谱密度的基本概念，讨论了干扰与噪声对环路性能的影响及环路对它们的滤除能力，最后讨论了短期频率稳定度的时域与频域表征方法以及它们之间的关系。每章最后都配备有一定数量的习题，以利于补充和巩固教学内容。使用本教材时应注意：本教材授课时数为40~60学时（若选40学时，可省去标题前打星号部分的内容），教学实施时应安排二至三个单独实验或一个大型系统的设计性实验，以便加强学生的基本技能训练。学习本课程的学生需要具备“脉冲与数字逻辑电路”、“信号与系统”、“非线性高频电路”等技术基础课的知识。

本教材由仇善忠同志编写绪论、第一至三章及第四、五章的部分内容，由张冠百同志编写第四、五章的部分内容及第六章，本书由仇善忠同志统编全稿。参加审阅工作的还有李普成、乔学礼、姚彦等同志，并为本书提出了许多宝贵意见，这里表示诚挚的感谢。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年5月于上海交大

目 录

绪论	1
第一章 锁相环路基本原理与主要部件	7
§1-1 概述	7
§1-2 锁相环路的工作原理	7
§1-2-1 主要部件的功能模型	7
§1-2-2 相位数学模型和基本方程	11
§1-2-3 锁相环路的工作过程	12
§1-3 鉴相原理	14
§1-3-1 二极管平衡鉴相器	15
§1-3-2 数字电压型鉴相器	17
*§1-3-3 模拟乘法鉴相器	25
§1-4 环路滤波理论	27
§1-4-1 RC 积分滤波器(滞后网络)	27
§1-4-2 无源比例积分滤波器(滞后-超前网络)	28
§1-4-3 有源比例积分滤波器	29
§1-5 压控振荡技术	32
§1-5-1 压控振荡器的技术指标	32
§1-5-2 压控振荡器的特殊问题	34
§1-5-3 集成负阻压控振荡器	39
*§1-5-4 射极定时压控振荡器	41
习题	43
第二章 线性化性能分析	47
§2-1 概述	47
§2-2 线性化环路方程与相位数学模型	47
§2-3 锁相环路的传递函数	48
§2-3-1 传递函数的一般表示式	48
§2-3-2 实际环路的传递函数	49
*§2-3-3 二阶环路的 ω_n 和 ζ	52
§2-4 锁相环路的频率响应	55
§2-4-1 $F(p) = 1$ 的一阶环路	55
*§2-4-2 $F(p) = \frac{1}{1 + p\tau}$ 的二阶环路	56
§2-4-3 $F(p) = \frac{1 + p\tau_2}{p\tau_1}$ 的二阶环路	59
§2-5 锁相环路的线性跟踪	61
§2-5-1 瞬态相位误差	62

§2-5-2 稳态相位误差	66
*§2-5-3 环路对调角信号的跟踪性能	69
§2-5-4 跟踪性能的时域指标	72
§2-6 锁相环路的稳定性理论	75
§2-6-1 稳定的充要条件	76
§2-6-2 稳定性判据——波特准则	76
§2-6-3 稳定余量	77
*§2-6-4 几种环路的稳定性分析	78
习题	81
第三章 非线性性能分析	83
§3-1 概述	83
§3-2 锁相环路的同步性能	83
§3-2-1 环路的同步带和捕捉带	83
§3-3 信号的捕捉特性	85
§3-3-1 一阶环路相图与捕捉特性	85
§3-3-2 理想二阶环路相图与捕捉特性	88
*§3-3-3 非理想二阶环路相图或捕捉特性	91
§3-4 环路对相加噪声的过滤特性	94
§3-4-1 限带高斯白噪声	94
§3-4-2 存在相加噪声时的环路相位数学模型	96
§3-4-3 环路对输入相加噪声的响应	98
*§3-5 存在输入噪声时的环路的非线性特性	104
§3-5-1 波顿准线性方法	105
§3-5-2 存在输入相加噪声时的环路工作门限	108
*§3-6 环路跳周理论	109
习题	115
第四章 频率合成技术	117
§4-1 概述	117
§4-1-1 混频滤波法(直接合成法)	117
§4-1-2 脉控锁相法(间接合成法)	118
§4-1-3 数字锁相法(间接合成法)	119
§4-2 频率合成器的主要性能指标	120
§4-3 可变程序分频器	121
§4-3-1 程序分频器的主要技术指标	121
§4-3-2 程序分频器的工作原理	123
§4-3-3 提高程序分频器速度的方法	127
§4-3-4 零读出法程序分频器	129
*§4-3-5 吞脉冲程序分频器	133
§4-4 单环数字式频率合成器	138
§4-4-1 环路相位数学模型	138
§4-4-2 环路性能讨论	139

*§4-5 多环数字式频率合成器	142
§4-5-1 双环数字式频率合成器	143
§4-5-2 三环数字式频率合成器	144
*§4-6 小数分频频率合成器	145
§4-6-1 基本工作原理	146
§4-6-2 输出频谱的改善	147
§4-6-3 相位数学模型与特殊电路介绍	148
§4-7 频率合成器的设计	153
§4-7-1 频率合成器的设计步骤	153
*§4-7-2 设计实例	155
习题	156
第五章 集成频率合成器及其微机控制	160
§5-1 概述	160
§5-2 集成频率合成器的类型	160
§5-2-1 单片集成锁相环组成的频率合成器	161
§5-2-2 直接式集成锁相频率合成器	162
§5-2-3 吞脉冲式集成锁相频率合成器	163
§5-2-4 预定标式集成锁相频率合成器	164
§5-2-5 混频式集成锁相频率合成器	165
§5-3 单片集成频率合成器	169
*§5-4 微机控制的频率合成器	172
§5-4-1 微机控制系统	172
§5-4-2 微机控制的软件程序	178
§5-4-3 结束语	187
习题	187
附录一 国内外典型的集成锁相电路简介	188
附录二 监控程序	192
第六章 频率合成器的相位噪声	194
§6-1 概述	194
§6-2 相位噪声的基本概念	194
§6-2-1 相位噪声功率谱密度	194
§6-2-2 相位噪声的四则运算	198
§6-3 频率合成器的寄生输出	199
§6-3-1 环路对杂散干扰的滤除能力	199
§6-3-2 减小杂散干扰输出的方法	203
§6-4 频率合成器的输出相位噪声	206
§6-4-1 频率合成器的噪声来源	206
§6-4-2 各种输入噪声的功率谱密度	207
§6-4-3 环路输出的噪声响应	213
§6-4-4 环路最佳参数的选择	214
*§6-5 频率合成器的短期频率稳定度	217

§6-5-1 短期频率稳定度的时域表征	218
§6-5-2 短期频率稳定度的频域表征	220
§6-5-3 频域表征与时域表征的关系	221
*§6-6 频率合成器的相位噪声测量	223
习题	226
参考文献	227

绪 论

锁相技术是实现相位自动控制的一门科学,是专门研究系统相位关系的新技术。随着科学技术的发展,人们对各种设备的控制精度要求愈来愈高。众所周知,在无线电技术中自动控制技术的应用已经进入到第三代。第一代是自动增益控制(Automatic Gain Control 或 AGC);第二代是自动频率控制(Automatic Frequency Control 或 AFC);第三代是自动相位控制(Automatic Phase Control 或 APC)。它们在无线电设备中都有应用。

回顾一下锁相技术的发展史是很有意义的。锁相技术的发现距今已有三百多年历史了。远在 1665 年,霍金斯(Huygens)第一个获得锁相原理的第一手观察资料。当时他注意到肩并肩地挂在墙上的两座钟摆的运动,已远远超出它们能力范围,实现了长期同步,准确匹配得象机械装置一样。他假定肩并肩地挂在墙上的两座钟的钟摆之间发生一种“共振”现象。他发现两只钟摆走得一样快慢,它们是通过空气媒质得到了相互支援。也就是说,它们的相互支援达到了相互之间的相位锁定。第一次给出了两个振荡器之间出现相位锁定的物理解释。但是,因为当时科学技术条件的限制,没有被引起重视和得到应有的发展,所以霍金斯也没有预见到相位锁定技术在未来的无线电技术和电力分配系统中起着如此重要的作用。

在数学理论方面来说,锁相原理可以回逆到十九世纪。早在 1930 年已建立了同步控制理论的基础。1932 年贝尔赛什(Bellescize)第一个公开发表了锁相环路(Phase Lock Loop 或 PLL)的数学描述,提出了同步检波理论。实现同步检波技术的关键是如何产生一个本振信号,使它与同步检波器另一输入的微弱载波信号保持频率相同。相位保持一定关系叫做相位相干。而在一般的自动频率控制或自动频率微调技术中,因存在固有的频率误差而不能满足上述要求。众所周知,要保持两个振荡器信号的频率相等,必须保持这两个信号的相位差恒定。换句话说,如果能保证两个信号之间的相位差恒定,那么必然保证两个振荡器的频率相等,如图 0-1 所示。从图 0-1 中可以看到若角频率 $\omega_1 = \omega_2$, 则一定是初始相位 $\theta_1(t) - \theta_2(t) = \theta_c(t)$ 为常数。换句话说,如果初始相位 $\theta_1(t) - \theta_2(t) = \theta_c(t)$ 为常数,则必然有 $\omega_1 = \omega_2$, 这种现象称为频率同步或相位锁定。这是锁相技术最基本的概念,也是锁相技术的理论基础。这里我们提出一个问题:如何能保持两个相位差恒定呢?由于科学技术发展和实际应用的需要,促进了人们对锁相技术的研究,从而促进了锁相技术的发展。

1940 年锁相技术第一次成功地应用于电视机水平扫描线的同步装置中,它可以抑制外界噪声对同步信号的干扰,使电视图象的同步性能得到很大改善。利用锁相环路的窄带滤波特性滤除噪声,使行扫描振荡器跟踪输入行扫描信号并与其保持同步,使得荧光屏上图象稳定清晰。

在五十年代,随着空间技术的发展,由杰费(Jaffe)和里希廷(Rechtin)利用锁相环路作为导弹信标的跟踪滤波器获得成功,他们第一次发表了包含有噪声效应的锁相环路线性理论分析的文章,同时解决了锁相环路最佳化设计的问题。

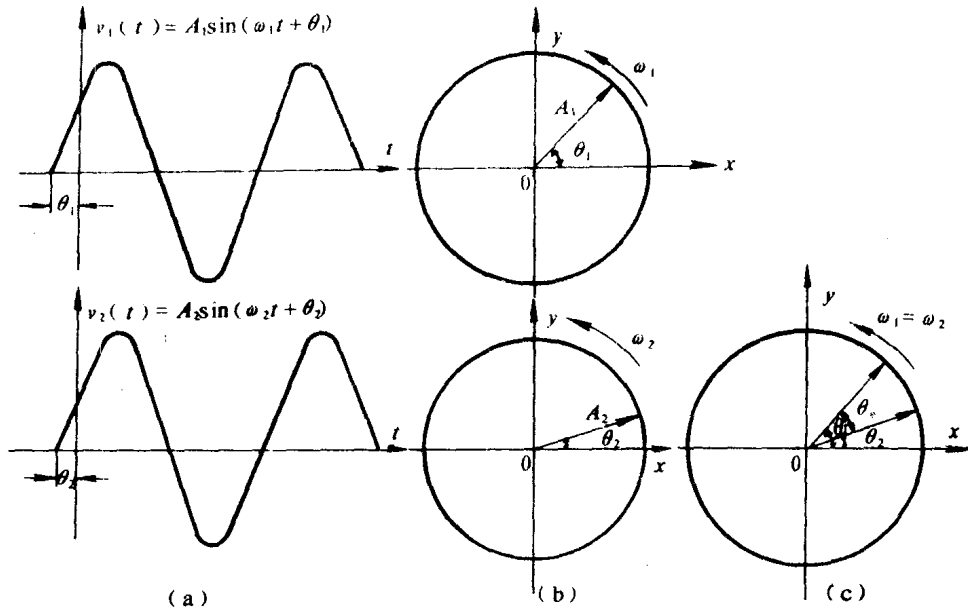


图 0-1 两个信号频率相等

在六十年代，维特毕 (Viterbi) 研究了无噪声锁相环路的非线性理论问题，同时发表了相干通信原理一书。继后在七十年代林特赛 (Lindsey) 和查利斯 (Charles) 进行了有噪声的一阶，二阶及高阶锁相环路的非线性理论分析，并且做了大量实验来充实其理论分析。但是还有很多物理现象和问题得不到解释，直到现在，世界各国的科技工作者还在对锁相技术的理论和应用进行广泛深入的研究。而且，目前锁相原理的应用已深入到许多学科中，例如生物物理学、生理学、原子物理学、流体力学、气象学、海洋学等等。

所谓锁相环路是一个实现相位自动锁定的控制系统，简称锁相环或环路。由鉴相器 (Phase Detector 或 PD)、环路滤波器 (Loop Filter 或 LF)、压控振荡器 (Voltage Control Oscillator 或 VCO) 等组成的闭合环路称为锁相环路如图 0-2 所示。鉴相器是对输入信

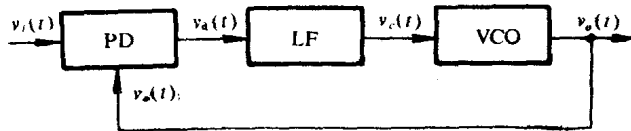


图 0-2 锁相环路方框图

号与压控振荡器输出信号的相位进行比较，它输出一个正比于两个输入信号相位差的误差电压，所以鉴相器是把相位差转化为电压的转换器。鉴相器输出的误差电压经过环路滤波器的平滑滤波作用后，去控制压控振荡器的振荡频率和相位，使它朝着减小两个信号的频率和相位差方向变化。当压控振荡器输出信号的频率等于输入信号频率、相位差等于常数时，环路达到锁定。在理想情况下，鉴相器输出相位差应保持恒定。但是，实际上环路受到噪声和输入信号寄生调制等因素的影响，会使相位同步产生误差。如果合理地设计环路参数可使这种误差达到很小。

这种锁相环路具有两个突出的特性：第一是窄带滤波特性；第二是宽带跟踪特性。

(1) 窄带滤波特性

环路对于输入信号而言，它可等效为一个以压控振荡器输出频率为中心的窄带带通滤波器。窄带特性的获得是由于当压控振荡器输出频率锁定到输入信号频率上时，位于信号频率附近的干扰成分将以低频干扰的形式进入环路，而绝大部分其它频率的干扰会受到环路滤波器低通特性的抑制，从而减少了对压控振荡器的干扰作用。因此，锁相环路好象一个带宽很窄的带通滤波器，可以近似认为锁相环路把低通滤波器的通带搬到高频上去了。因为，低通滤波器一般都由阻容元件组成(有时加入高增益的运算放大器)，所以带宽容易做得很窄。于是高频带通滤波器也可以做得很窄。例如，在几十 MHz、几百 MHz 的中心频率上可以实现几 Hz 的带宽，甚至更窄。这是在一般 RC 或 LC 滤波器中无法做到的。频率合成器技术就是利用这种特性来得到高稳定性和高精度的输出信号频率。

(2) 宽带跟踪特性

锁相环路不但有窄带滤波特性，而且当加宽环路带宽时，压控振荡器输出信号的频率和相位可以跟踪输入信号的频率和相位变化，表现出良好的跟踪性能。通常有两种不同的跟踪状态：(a) 调制跟踪环 适当地设计环路带宽，使得输入信号的调制频谱落在环路通带之内，这样压控振荡器输出信号的频率和相位能够很好地跟踪输入信号的频率和相位的变化。(b) 载波跟踪环 适当地把环路带宽做得窄一些，使得输入信号的调制频谱都落在环路带宽之外，这时压控振荡器输出信号的频率只跟踪输入信号的载频漂移，而与调制信号频率无关。

正是由于上述两个突出的特性，使得锁相技术在无线电领域中得到了广泛的应用。但是，过去由于电子元件和材料工艺的限制，使其制作复杂、成本较高。因此，仅在较高级的通信机、精密测量仪器以及电视机中采用。随着电子工业的发展和元器件集成化程度的提高，特别是近三十年来宇宙空间技术发展的需要，极大地推动了锁相技术的发展和运用。例如人造卫星、宇宙飞船上所装载的发射机功率受到限制，其发射功率是很小的(约 10 mW)，而地面接收距离则在几百或几千公里以上，因而能接收到的信号功率是极其微弱的，一般能接收到的信号功率在 $10^{-17} \sim 10^{-15}$ W 之间。加上发射信号源有径向加速度运动，所以接收到的信号有多卜勒频移和发射机振荡器的频漂存在。因此，若采用普通接收机，它的带宽就必须相当地宽，而噪声强度与接收机带宽成正比，这样使接收机收到的输入信号的信噪比是相当低的，大约在 -10 dB \sim -40 dB 之间。在这种情况下，普通的接收机就显得无能为力了。这时只有采用高频带宽极窄的窄带锁相跟踪接收机才能把深埋在噪声中的有用信号提取出来。可以毫不夸张地说，没有锁相技术的发展和运用，就不会有今天的宇宙航行和卫星通信。所以空间技术的发展，又促进了人们对锁相技术及其理论的进一步探讨。目前，锁相技术已经形成一门比较系统的理论科学。锁相技术的应用遍及整个无线电领域。应用范围最主要的概括起来有以下十大方面：

- ① 频率合成与频率变换；
- ② 自动频率调谐跟踪；
- ③ 模拟和数字信号的相干解调；
- ④ AM 波的同步检波；
- ⑤ 数字通信中的位同步提取；
- ⑥ 锁相稳频、倍频和分频；

- ⑦ 锁相测速与测距；
- ⑧ 锁相 FM(PM) 调制与解调；
- ⑨ 微波锁相频率源；
- ⑩ 微波锁相功率放大；

单环数字频率合成器方框图如图 0-3 所示的频率合成器就是利用一个高稳定性和高

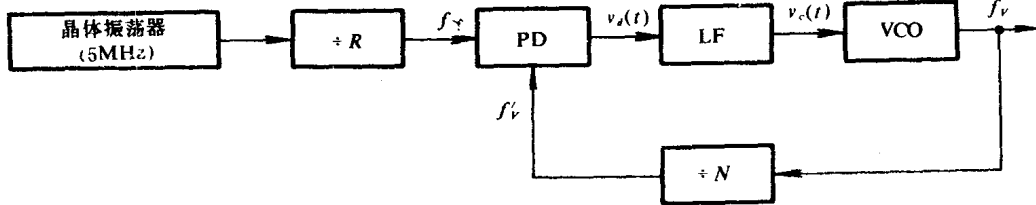


图 0-3 单环数字频率合成器方框图

精度的晶体振荡器作为标准频率输入,通过锁相环路的锁定技术,输出就可以得到成千上万个与晶体振荡器同样稳定性和精度的离散频率。例如图 0-3 中假定 $f_r = 1\text{kHz}$; N 在 00001~99999 之间可交,那 路锁定时, $f_v = f_r$, 压控振荡器输出可得到 $f_v = Nf_r = Nf_r$, 即可以得到 N 个离散的标准频率,频率步跳间隔是 $f_r = 1\text{kHz}$ 。若采用两个环路联接起来,可得到 100 Hz 频率步跳间隔;若采用五个环路联接起来,可得到 1 Hz 频率步跳间隔。这种频率合成器就可成为一个连续可变的高稳定度的标准信号源或本地振荡器。数字频率合成器输出频谱纯,易于集成化。使用中规模和大规模集成电路后,使其体积小、重量轻、可靠性高、频道数目多,是一种比较理想的标准信号源。目前,频率合成技术向两个方向发展:一个是微处理器引入频率合成器,使用和控制是可程序的。另一个是减小频率间隔,采用小数分频的数字频率合成器,它解决了单环数字频率合成器中高的鉴相频率与高的频率分辨力之间的矛盾,频率步跳间隔可达到 μHz 的数量级。

锁相环路种类繁多,大致可分类如下。

按输入信号要求分:

- ① 恒定输入环路——用于稳频、频率合成等系统；
- ② 随动输入环路——用于跟踪解调系统。

按环路组成部件分:

- ① 模拟锁相环路——环路部件全部采用模拟电路；
- ② 取样锁相环路——采用取样保持鉴相器的锁相环路；
- ③ 数字锁相环路——环路部件部分或全部采用数字电路；
- ④ 集成锁相环路——全部环路部件做在一片单块集成电路中。

那么,锁相环路与相同功能的其它电子电路相比有哪些优点呢?简述如下:

- ① 可以实现理想的频率控制

由于环路锁定时,环路输出频率与输入频率完全一致,能随输入信号频率变化而变化,没有剩余频差,只有相位误差。而且,相位误差也是极小的,所以能达到理想的无频差控制。

- ② 具有极高的选择性

众所周知,一个谐振回路选择性的好坏,可以用一个回路品质因数来表征。但锁相环

路虽然不用谐振回路,然而它有极高的等效品质因数,有极好的选择性。例如接收一个人造卫星发射的信号,其载波频率 $f_r = 108 \text{ MHz}$, 而窄带锁相跟踪接收机的噪声带宽 $B_L = \pm 3 \text{ Hz}$, 等效品质因数为

$$Q = \frac{f_r}{\Delta f} = \frac{108 \times 10^6}{6} = 18 \times 10^6$$

如此高的等效 Q 值是其它电路无法达到的。

③ 有良好的跟踪特性

锁相环路组成的锁相跟踪接收机可以接收调角(即调频与调相的统称)信号。它既可跟踪载波,也可跟踪调制信号,畸变和失真都是极小的,有极好的线性跟踪性能。

④ 改善调频解调器的噪声门限

用锁相跟踪接收机接收调角信号比普通的限幅鉴相接收机的噪声门限可改善 5 dB 左右。

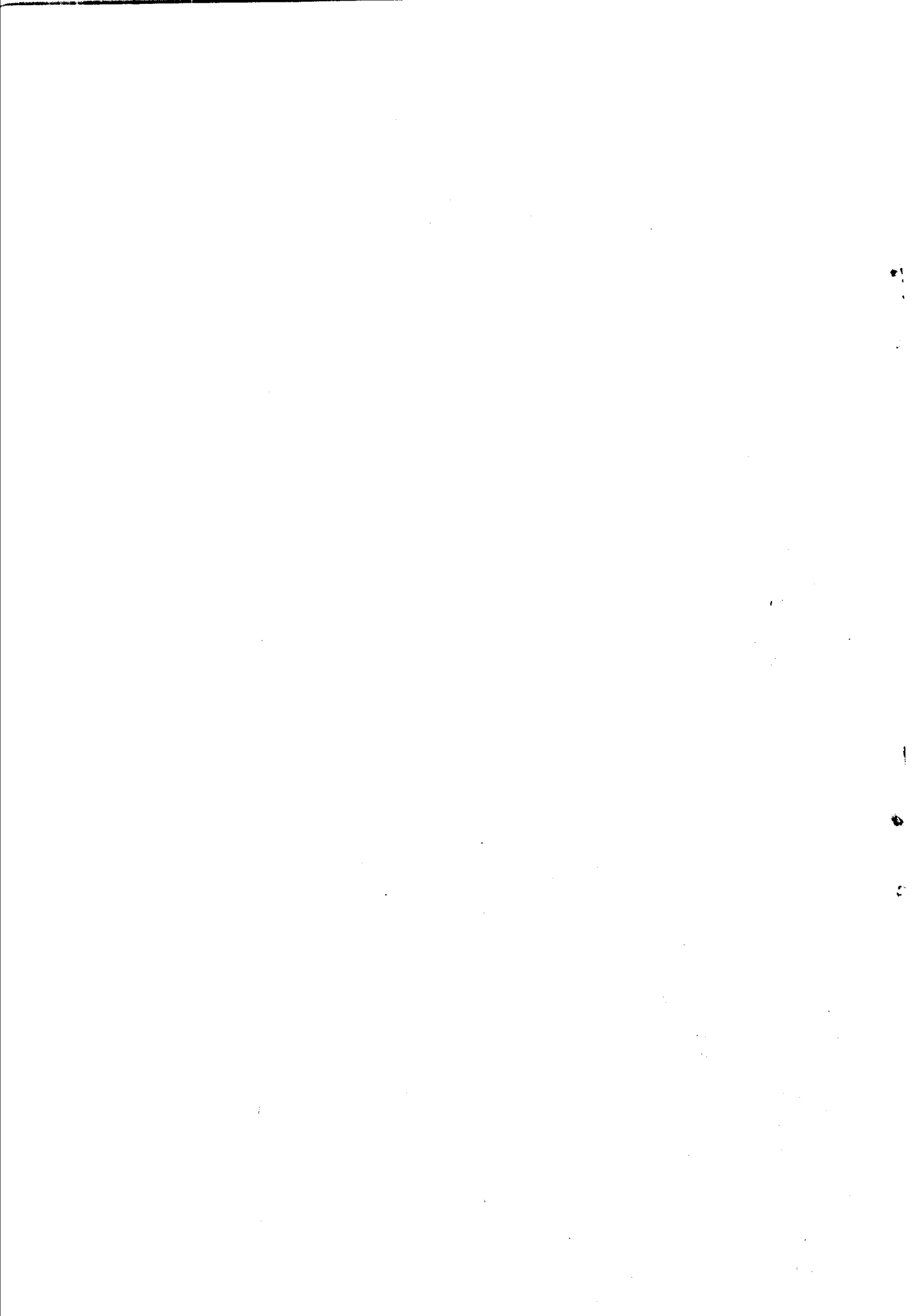
⑤ 集成锁相环路体积小、重量轻、可靠性高

应用锁相环路可以提高电子设备自动控制能力,同时也可提高设备和产品的精密度和自适应能力。所以我们认为那些能应用锁相环路的地方,应大力推广应用,使锁相与频率合成技术的应用更加普遍化。

解放以来,各种科学技术得到极其迅速地发展。早在五十年代就有许多科学工作者开展了对锁相技术的研究和应用。特别是人造卫星的发射和回收、卫星通信、中远程导弹的定点发射等技术的发展,都离不开锁相技术。我国在 1970 年 4 月 24 日成功地发射了第一颗人造卫星,地面站成功地对人造卫星发射信号的接收以及遥测遥控都证明锁相技术的研究和应用都达到了较先进的水平。

近年来发展速度更快,锁相环路组件逐步由分立元件向中、大规模集成电路发展。目前北京、上海、甘肃等许多地方的单位都能成批生产中、大规模集成的单片锁相环路和部件。如数字鉴相器、环路滤波器、压控振荡器、二十进制可预置可逆计数器以及集成锁相环路等等。锁相环路集成度的提高,使得体积大大缩小、可靠性大大提高、组装调试方便、便于整机工厂生产和应用。

《锁相与频率合成技术》是一本适合于高等院校工科电子类专业课的教材。通过本课程的学习,使得读者初步掌握锁相与频率合成技术的基本原理,熟悉锁相环路的分析方法,了解锁相和频率合成技术在无线电领域中的应用。为今后进一步学习同步控制系统理论和其它有关锁相与频率合成技术方面的理论打下基础。



第一章 锁相环路基本原理与主要部件

§1-1 概 述

锁相环路的用途极广、种类繁多、形式也多种多样，如平方环、载波提取环、位同步提取环等等。但是，各种锁相环路总是包含有三个最基本的部件：鉴相器、环路滤波器和压控振荡器。其它应用的一些锁相环路都是在这三个基本部件的基础上增加一些辅助部件组合而成的。如位同步提取锁相环就是在一般环路中增加了输入信号预处理部件组成的；频率合成器环路就是增加一个程序分频器组成的；锁相跟踪接收机环路中增加了一些混频器、限幅器、中频放大器、带通滤波器等组成的。因此，理论分析锁相环路的各种性能可以从基本锁相环路入手，然后结合具体应用，再把其它辅助部件影响考虑进去加以修正即可。本章首先阐述环路的基本原理，其次讨论环路主要部件的特性与具体电路，为学习以后各章的理论分析打下基础。

§1-2 锁相环路的工作原理

锁相环路实质上是一个相差自动调节系统。为了掌握环路的工作原理，理解环路工作过程中发生的物理现象，必须导出环路的相位数学模型和微积分方程。为此，首先必须了解组成基本锁相环路各部件的功能模型，然后串联起来就组成了锁相环路的相位数学模型，最后列出微积分方程。

§1-2-1 主要部件的功能模型

锁相环路由三个基本部件组成如图 1-1 所示。图中 $v_i(t)$ 和 $v_o(t)$ 分别表示环路的

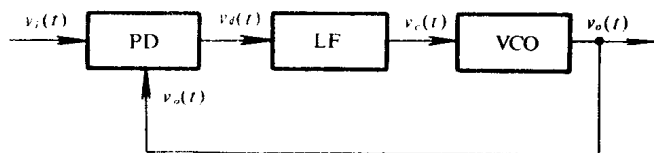


图 1-1 基本锁相环路的组成

输入、输出信号电压。现将三个基本部件的工作原理分述如下：

1. 鉴相器

鉴相器的任务是对它的两个输入信号进行相位比较。当环路锁定时，鉴相器输出正比于这两个输入信号相位差的直流电压 V_d 。

鉴相器的电路形式很多，有模拟的、取样的和数字的。作为原理分析，通常使用正弦特性的鉴相器。理由是正弦理论比较成熟，分析简单方便，实际上各种鉴相特性当信噪比降低时，都趋向于正弦特性。

原则上,任何一种理想的模拟乘法器都可以作为具有正弦特性的鉴相器,如图 1-2 所示. 输入信号 $v_i(t)$ 和压控振荡器的输出信号 $v_o(t)$ 分别加到乘法器的两个输入端. 设输入信号为

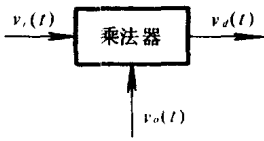


图 1-2 等效鉴相器
(乘法器)

$$v_i(t) = V_i \sin [\omega_i t + \theta_i(t)] \quad (1-1)$$

式中, V_i 为输入信号的振幅;

ω_i 为输入信号的角频率;

$\theta_i(t)$ 为输入信号以其载波相位 $\omega_i t$ 为参考的瞬时相位.

压控振荡器输出信号为

$$v_o(t) = V_o \cos (\omega_o t + \theta_o(t)) \quad (1-2)$$

式中, V_o 为压控振荡器输出信号的振幅;

ω_o 为压控振荡器固有角频率;

$\theta_o(t)$ 为压控振荡器输出信号以其固有振荡相位 $\omega_o t$ 为参考的瞬时相位.

一般情况下,两个输入信号的频率是不相同的. 但是,相位比较只有在相同频率情况下才有意义,所以为了适应鉴相器进行同频比相的需要,现统一以压控振荡器固有振荡相位 $\omega_o t$ 为参考. 故需重新定义 $v_i(t)$ 的瞬时相位. 现将输入信号瞬时相位改写为

$$\begin{aligned} [\omega_i(t) + \theta_i(t)] &= \omega_o t + [(\omega_i - \omega_o)t + \theta_i(t)] \\ &= \omega_o t + \theta_1(t) \end{aligned} \quad (1-3)$$

式中,

$$\theta_1(t) = (\omega_i - \omega_o)t + \theta_i(t) = \Delta\omega_o t + \theta_i(t) \quad (1-4)$$

这里 $\theta_1(t)$ 是以固有振荡相位 $\omega_o t$ 为参考的输入信号瞬时相位.

压控振荡器输出瞬时相位保持原来表示法,只是为了书写统一. 将 $\theta_o(t) = \theta_2(t)$ 代替,可写成

$$\omega_o t + \theta_o(t) = \omega_o t + \theta_2(t) \quad (1-5)$$

根据以上重新定义的瞬时相位, $v_i(t)$ 和 $v_o(t)$ 可以分别写成为

$$v_i(t) = V_i \sin [\omega_o t + \theta_1(t)] \quad (1-6)$$

$$v_o(t) = V_o \cos [\omega_o t + \theta_2(t)] \quad (1-7)$$

经过乘法器之后的输出信号电压为

$$\begin{aligned} v_d(t) &= K_m v_i(t) v_o(t) \\ &= K_m V_i \sin [\omega_o t + \theta_1(t)] V_o \cos [\omega_o t + \theta_2(t)] \\ &= \frac{1}{2} K_m V_i V_o \sin [2\omega_o t + \theta_1(t) + \theta_2(t)] \\ &\quad + \frac{1}{2} K_m V_i V_o \sin [\theta_1(t) - \theta_2(t)] \end{aligned}$$

式中 K_m 为乘法器的倍增系数,量纲为 $1/V$. 上式中的第一项是和频项,即 $2\omega_o$ 项. 因为鉴相器输出的高频分量 $2\omega_o$ 被环路滤波器的低通特性所抑制,所以乘法器实际的输出电压为

$$v_d(t) = \frac{1}{2} K_m V_i V_o \sin [\theta_1(t) - \theta_2(t)] \quad (1-8)$$

令 $K_d = \frac{1}{2} K_m V_i V_o$. 式中, K_d 为鉴相灵敏度,单位是 V/rad ;