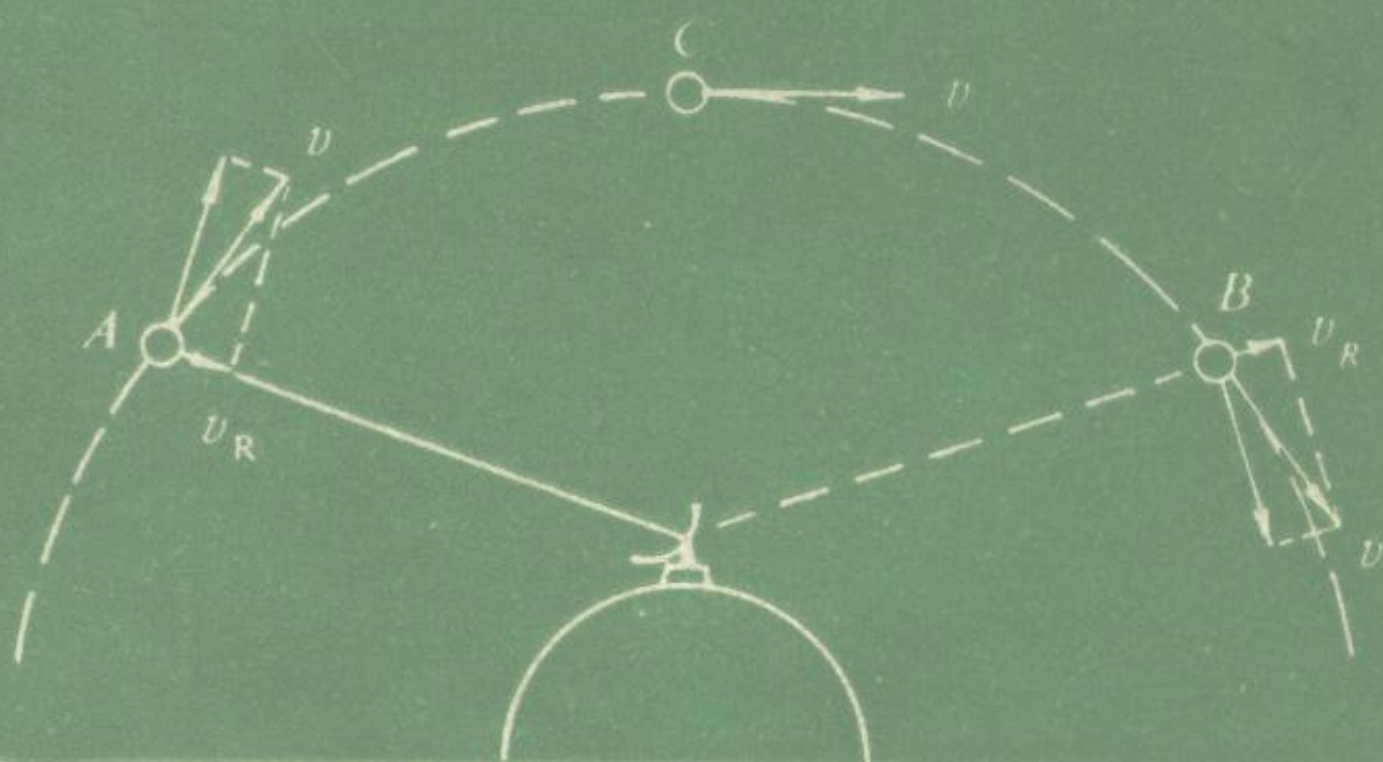
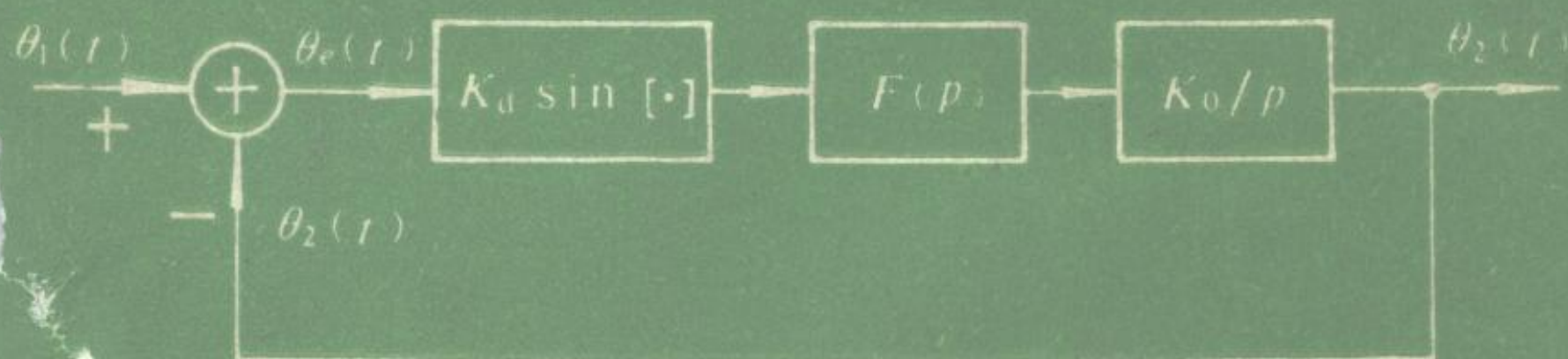


锁相环路原理及应用

陈世伟 编著



兵器工业出版社

锁相环路原理及应用

陈世伟 编著

兵器工业出版社

9110021

内 容 简 介

本书讲述锁相环路的原理及应用。对锁相环的线性与非线性性能、噪声作用下的环路性能作了较详细的分析和讨论；对环路的测量方法、环路部件、集成锁相环以及数字锁相环也作了适当的分析和介绍；对锁相环在相干解调技术、锁相接收机以及频率合成技术中的应用作了较详细的分析和讨论。

全书内容深入浅出、条理清楚、概念明确、联系实际，对新技术与新器件作了适当反映。在讲述原理各章附有思考题与习题。

本书可作为高等学校通信、雷达、导航、遥测遥控、测量仪器及无线电技术等专业的教材或参考书，也可供从事这些方面工作的工程技术人员参考。

D031/08

锁相环路原理及应用

陈世伟 编著

电子工业出版社出版发行

(北京市海淀区车道沟10号)

各地新华书店经销

北京市海淀区昊海印刷厂印装

开本：787×1092 1/16 印张：21.125 字数：517.9千字

1990年6月第1版 1990年6月第1次印刷

印数：1~3000 定价：14.80元

ISBN 7-80038-240-9/TN·7

前 言

锁相技术的迅速发展,使它在空间探测、卫星与导弹的跟踪测距、卫星通信、雷达、导航、仪器仪表、电视广播等许多方面得到广泛的应用,甚至深入到每个家庭之中。为适应教学的需要,作者结合多年教学和科研工作的体会以及搜集的一些资料,曾编写了《锁相原理及应用》的教材,经教学使用了三次。本书即是在此基础上修改补充而写成的。

本书共需授课约60学时左右。全书共分十二章。第一章说明锁相环是一个相位自动控制的反馈控制系统、锁相技术特点及发展简史,介绍有关锁相环路分析的基础知识。第二章介绍环路的组成及工作原理,环路基本方程及相位模型,分析了一阶环路工作过程和指标。第三章根据环路线性化理论,对环路传递函数、频率响应、稳定性理论以及环路线性跟踪性能等进行了较深入的分析。第四章根据非线性理论用相图法对不同性质输入信号时,环路的捕获性能作了较详细的分析,用描述函数法分析二阶环路稳定性和捕获性能,介绍了辅助捕捉方法。第五章较详细地分析了相加噪声作用下环路的性能、环路工作门限和跳周。第六章介绍了环路部件测量、静态测量、动态测量以及噪声测量的原理和方法。第七章介绍了多种鉴相器、压控振荡器,包括新近出现的微波压控振荡器的原理和电路。第八章较详细地介绍了多种集成鉴相器、压控振荡器及单片集成锁相环的工作原理和电路。附表介绍了中外集成锁相电路、频率合成器部件等部分产品。第九章介绍了早期数字锁相环路、目前发展中的全数字和以软件为基础的锁相环基本原理和特性。后面三章属锁相环的应用。第十章介绍锁相环用于调频、调相信号的解调、同步检波、抑制载波的PSK信号相干解调和位同步信号提取的工作原理和电路。第十一章介绍锁相接收机的原理和相位模型,分析中频和倍频级的影响、自动增益控制、限幅器的性能及设计举例。第十二章介绍了脉冲取样锁相环、数字式合成器锁相环的原理和相位模型,提高频率合成器性能的措施,新近发展的几种微波锁相频率源,分析了频率合成器的输出纹波、相位噪声对环路性能的影响及环路对它们的滤除能力,最后简要介绍了频率合成器的应用。讲原理部分各章均附有思考题与习题,以补充和巩固所学知识。学习本课程的学生必须具备《电路分析》、《信号与系统》、《脉冲与数字电路》以及《电子线路》等技术基础课的知识。

考虑到发展和应用的需要,原理及应用部分都编写了较多内容和作了较详细分析。书中打*号的内容可根据教学时数及要求灵活选用,也可作为学生进一步阅读的材料。

本书的编写得到了国防科工委指挥技术学院的院、部、系以及电子线路教研室有关领导大力支持和同志们的热情帮助,全国工科电子类教材编审委员、北京邮电学院谢沅清教授审阅了全书并提出了许多宝贵的意见,这里表示诚挚的感谢。

由于作者水平有限,书中难免存在一些缺点和错误,殷切希望广大读者批评指正。

作者

1990.2

目 录

第一章 绪论	(1)
§ 1-1 反馈控制系统	(1)
1-1-1 原理与组成	(1)
1-1-2 功能	(3)
1-1-3 分类	(4)
§ 1-2 锁相技术发展简史及其特点	(4)
1-2-1 锁相技术发展简史	(4)
1-2-2 锁相技术的特点	(6)
§ 1-3 锁相的基本概念与指标	(6)
§ 1-4 分析方法引论	(9)
§ 1-5 关于噪声的基本知识	(10)
1-5-1 统计描述	(11)
1-5-2 统计平均	(12)
1-5-3 时间平均	(13)
1-5-4 平稳随机过程的各态历经性	(14)
1-5-5 平稳随机过程的功率谱密度	(14)
1-5-6 线性系统对噪声的过滤性能	(16)
思考题与习题	(16)
第二章 锁相环路的基本原理	(18)
§ 2-1 锁相环路的组成及工作原理	(18)
2-1-1 鉴相器	(19)
2-1-2 压控振荡器	(20)
2-1-3 环路滤波器	(21)
§ 2-2 锁相环路的基本方程和相位模型	(21)
§ 2-3 锁相环路锁定的概念	(22)
§ 2-4 一阶锁相环路	(24)
2-4-1 一阶锁相环路的同步与捕捉	(24)
2-4-2 差拍状态与频率牵引现象	(25)
2-4-3 一阶锁相环路的频率特性	(27)
* § 2-5 一阶锁相环路方程的解析解	(28)
思考题与习题	(29)
第三章 锁相环路的线性分析	(31)
§ 3-1 锁相环路线性化的概念	(31)
3-1-1 跟踪过程的线性化处理	(31)
3-1-2 线性化锁相环路方程	(32)

§ 3-2 锁相环路的基本传递函数	(32)
3-2-1 传递函数的一般形式	(32)
3-2-2 各种滤波器的传递函数	(33)
3-2-3 实际锁相环路的传递函数	(36)
§ 3-3 锁相环路的频率响应	(37)
3-3-1 闭环频率响应	(37)
3-3-2 误差频率响应	(39)
§ 3-4 锁相环路稳定性的分析	(41)
3-4-1 稳定性的概念	(41)
3-4-2 劳斯-霍尔维茨准则	(43)
3-4-3 波特准则	(45)
§ 3-5 锁相环路的线性跟踪性能	(52)
3-5-1 输入相位阶跃 $\Delta\theta$	(54)
3-5-2 输入频率阶跃 $\Delta\omega$ (相位斜升)	(56)
3-5-3 输入频率斜升 Rf	(58)
3-5-4 输入正弦调频信号	(61)
3-5-5 输入正弦调相信号	(62)
思考题与习题	(63)
第四章 锁相环路的非线性分析	(66)
§ 4-1 概述	(66)
§ 4-2 相图法的基本概念	(67)
4-2-1 相图法	(67)
4-2-2 相图的特点	(68)
§ 4-3 锁相环路相图及其捕获性能	(70)
4-3-1 固定频率输入的高增益二阶环路	(71)
4-3-2 频率斜升输入的高增益二阶环路	(74)
4-3-3 固定频率输入的非理想二阶环路	(76)
4-3-4 二阶环路的牵引作用和捕获过程	(79)
* § 4-4 描述函数法及锁相环路捕获性能	(81)
4-4-1 基本概念	(81)
4-4-2 二阶锁相环路稳定性讨论	(83)
4-4-3 二阶锁相环路捕捉带与捕捉时间	(84)
§ 4-5 辅助捕捉方法	(91)
4-5-1 人工电调法	(92)
4-5-2 自动扫描法	(92)
4-5-3 鉴频器辅助捕获法	(93)
4-5-4 变带宽法	(94)
思考题与习题	(95)
第五章 有噪声锁相环路的性能分析	(97)

§ 5-1 概述	(97)
§ 5-2 噪声作用下的锁相环路相位模型	(98)
5-2-1 输入相加噪声的性质	(98)
5-2-2 存在相加噪声时的环路相位模型	(100)
§ 5-3 锁相环路对输入相加噪声的响应	(102)
5-3-1 环路输入等效相位噪声功率谱密度与方差	(102)
5-3-2 环路输出相位噪声方差	(103)
5-3-3 环路等效噪声带宽	(104)
5-3-4 输入信噪比与环路信噪比	(107)
* § 5-4 最佳环路	(108)
5-4-1 引言	(108)
5-4-2 维纳最佳环路及最佳环路传递函数	(108)
5-4-3 最佳环路滤波器	(111)
5-4-4 采用三阶环的必要性	(115)
* § 5-5 有输入相加噪声时环路的非线性分析	(117)
5-5-1 波顿准线性法	(117)
5-5-2 有相加噪声时的工作门限	(120)
5-5-3 环路跳周	(121)
思考题与习题	(127)
第六章 锁相环路测量	(130)
§ 6-1 锁相环路部件测量	(130)
6-1-1 鉴相器的测量	(130)
6-1-2 环路滤波器的测量	(131)
6-1-3 压控振荡器的测量	(132)
§ 6-2 锁相环路静态测量	(135)
6-2-1 V_d - Δf 关系、同步带及直流增益测量	(135)
6-2-2 环路捕捉带宽与捕捉时间的测量	(136)
6-2-3 环路稳态相位误差的测量	(137)
§ 6-3 锁相环路动态测量	(138)
6-3-1 闭环与开环频率特性的测量	(138)
6-3-2 自然谐振频率 ω_n 及阻尼系数 ζ 的测量	(141)
6-3-3 环路暂态性能的测量	(142)
§ 6-4 锁相环路噪声测量	(143)
6-4-1 等效噪声带宽 B_L 的测量	(143)
6-4-2 环路失锁门限的测量	(143)
6-4-3 环路跳周的测量	(144)
6-4-4 相位抖动、功率谱密度及输出信噪比测量	(144)
思考题与习题	(146)
第七章 锁相环路部件	(147)

§ 7-1 鉴相器	(147)
7-1-1 二极管平衡鉴相器	(148)
7-1-2 二极管环形鉴相器	(150)
7-1-3 平衡模拟乘法器	(152)
7-1-4 或门鉴相器	(155)
§ 7-2 压控振荡器	(157)
7-2-1 晶体压控振荡器	(158)
7-2-2 LC推挽压控振荡器	(161)
7-2-3 RC压控振荡器	(164)
7-2-4 微波压控振荡器	(165)
§ 7-3 限幅器	(169)
思考题与习题	(171)
第八章 集成锁相环路	(172)
§ 8-1 概述	(172)
§ 8-2 集成锁相环路的基本电路与原理	(173)
8-2-1 集成鉴相器	(173)
8-2-2 集成压控振荡器	(193)
§ 8-3 单片集成锁相环路	(198)
8-3-1 多功能集成锁相环路——XR-S200	(198)
8-3-2 部分多功能集成锁相环路——L562	(198)
8-3-3 通用多功能CMOS数字集成环路——J691	(202)
8-3-4 专用集成锁相环路	(204)
附录: 国内外集成锁相电路部分产品简介	(206)
思考题与习题	(209)
第九章 数字锁相环路	(210)
§ 9-1 具有中间模拟信号的数字锁相环路	(210)
9-1-1 鉴相器类型对数字锁相环路动态性能的影响	(210)
9-1-2 数字锁相环路的捕获过程	(213)
9-1-3 数字锁相环路的跟踪性能	(215)
§ 9-2 全数字和以软件为基础的锁相环路	(217)
9-2-1 全数字锁相环路中功能块的结构	(217)
9-2-2 全数字鉴相器	(218)
9-2-3 全数字环路滤波器	(221)
9-2-4 数字控制的振荡器	(225)
9-2-5 全数字锁相环路举例	(226)
思考题与习题	(229)
第十章 锁相环路在相干解调技术中的应用	(230)
§ 10-1 调频、调相解调器	(230)
10-1-1 调频、调相解调器电路组成	(230)

10-1-2	调频、调相波解调原理	(231)
10-1-3	用单片集成锁相环路组成解调电路	(233)
10-1-4	锁相鉴频器的门限	(233)
§ 10-2	同步检波器	(235)
10-2-1	普通调幅 (AM) 信号的同步检波	(233)
10-2-2	抑制载波的双边带 (DSB/SC) 信号的解调	(236)
§ 10-3	抑制载波的PSK信号相干解调器	(237)
10-3-1	平方环路	(237)
10-3-2	同相-正交环路	(241)
10-3-3	输出噪声相位方差	(243)
10-3-4	反调制环路	(247)
§ 10-4	位同步信号提取	(251)
10-4-1	数据转换跟踪环路	(252)
10-4-2	早-迟积分清除同步环路	(258)
10-4-3	全数字位同步锁相环路	(260)
第十一章	锁相接收机	(266)
§ 11-1	概述	(266)
11-1-1	多普勒测速的基本概念	(266)
11-1-2	锁相环路的作用	(267)
11-1-3	多普勒测速系统的基本形式	(268)
§ 11-2	锁相接收机的基本工作原理	(269)
11-2-1	基本工作原理及相位模型	(269)
11-2-2	中放、倍频级对环路的影响	(271)
11-2-3	自动增益控制 (AGC)	(274)
* § 11-3	带通限幅器的作用	(276)
* § 11-4	环路性能与误差分析	(279)
§ 11-5	载波锁相接收机设计举例	(281)
第十二章	频率合成	(285)
§ 12-1	概述	(285)
§ 12-2	脉冲取样锁相环路	(287)
12-2-1	环路组成及工作原理	(287)
12-2-2	正弦形取样保持鉴相器	(288)
12-2-3	环路的相位模型	(291)
12-2-4	取样锁相倍频器性能讨论	(292)
§ 12-3	取样鉴相数字式合成器锁相环路	(294)
12-3-1	环路组成	(294)
12-3-2	锯齿形取样保持鉴相器	(294)
12-3-3	环路相位模型	(296)
12-3-4	环路性能讨论	(297)

§ 12-4 电流型鉴频鉴相数字式合成器锁相环路.....	(299)
12-4-1 环路线性相位模型.....	(299)
12-4-2 捕捉范围与捕捉时间.....	(300)
* § 12-5 数字式频率合成器的发展.....	(301)
12-5-1 提高程序分频器的工作频率.....	(302)
12-5-2 双环和多环频率合成器的应用.....	(302)
12-5-3 小数分频频率合成器.....	(303)
12-5-4 集成频率合成器.....	(304)
§ 12-6 微波锁相频率源.....	(305)
12-6-1 S波段锁相频率源	(305)
12-6-2 X波段锁相频率源	(309)
12-6-3 毫米波锁相频率源.....	(310)
§ 12-7 频率合成器输出纹波.....	(311)
12-7-1 输出纹波电压的估算.....	(312)
12-7-2 寄生边带抑制比.....	(313)
§ 12-8 频率合成器的相位噪声.....	(315)
12-8-1 相位噪声的一般概念.....	(315)
12-8-2 合成器噪声的来源.....	(316)
12-8-3 输入噪声的谱密度.....	(317)
12-8-4 环路噪声响应.....	(322)
12-8-5 环路最佳参数选择.....	(323)
§ 12-9 频率合成器的应用.....	(324)
参考文献.....	(326)

第一章 绪 论

§1-1 反馈控制系统

1-1-1 原理与组成

在各种通信系统和电子设备中，其正常工作总是会受到扰动。为维持系统的正常工作，常常需要控制系统的某些参数，让它以一定精度保持在一个定值上，或者使之按一定的规律变化。通常，人们使用自动控制功能的反馈系统来完成这个任务。反馈系统的应用是很广泛的，机械、液压、热力、温度调节、电调节等系统中都可组成与使用反馈系统。例如，在电子线路课程中介绍的自动增益控制电路就是一种典型的反馈控制系统。当接收机采用这种电路时，尽管天线上感生的有用信号强度由于各种原因发生明显变化，接收机输出端的信号强度仍能维持基本不变。从而，不仅保证接收机各级电路的工作正常，还能获得良好的接收效果。

现在我们从反馈控制的角度剖析自动增益控制电路的工作过程。带有自动增益控制的接收机方框图，如图1-1所示。当天线上感生的信号强度（对于振幅调制信号，它的强度反映在载波信号电平的大小上）增大时，如果没有自动增益控制电路，那么，中频放大器的输出

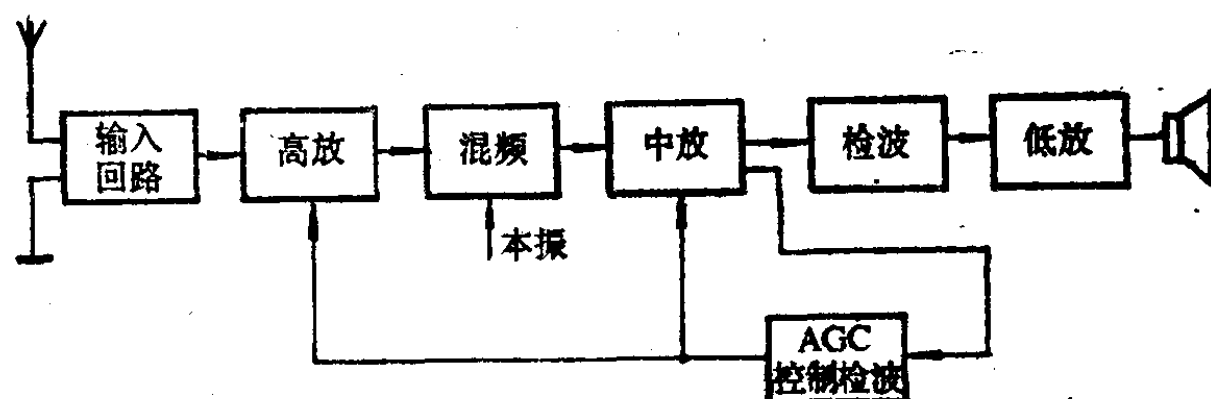


图1-1 带有自动增益控制接收机方框图

信号强度将随着增加。当天线感生的信号过强时，还有可能使放大器饱和，接收机不能正常工作。现在由于自动增益控制检波器输出电压中的直流分量（与中频放大器输出信号强度成正比）反馈加到高频和中频放大器上，使它们的增益减小，因而部分抵消了中频放大器输出信号强度的增加，从而达到接收机输出信号强度保持基本不变的目的。

实际上，为了保证接收弱信号时具有最大的增益，以获得足够的输出信号强度，一般都采用延迟式自动增益控制。这种自动增益控制电路与前述电路的区别在于它的自动增益控制检波器中附加了一个恒定的延迟电压。当天线上感生的信号强度比较微弱时，中频放大器输出的中频电压幅度小于延迟电压，自动增益控制检波器不工作。因此，没有反馈电压加到高频和中频放大器上，这时它们的增益保持不变，且为最大值；而当天线上感生的信号强度大于某一数值时，自动增益控制检波器才开始正常工作，并有与中频放大器输出信号强度成比例的控制电压反馈到高频和中频放大器上，使得增益下降，从而使接收机输出信号强度保持基本

不变。

实现上述延迟自动增益控制的组成方框图如图1-2所示。图中将接收机检波器前各级概括为一个可控增益放大器，而延迟作用则用一个门限鉴别器表示。在鉴别器上，设置一个相当于延迟电压的门限信号，用 e_r 表示。当自动增益控制检波器输出电压 v 小于 e_r 时，门限鉴别器无输出，相当于自动增益控制电路被切断；而当 v 大于 e_r 时，门限鉴别器有差值电压 v_r 输出，该电压作用于可控增益放大器，使其增益发生变化。

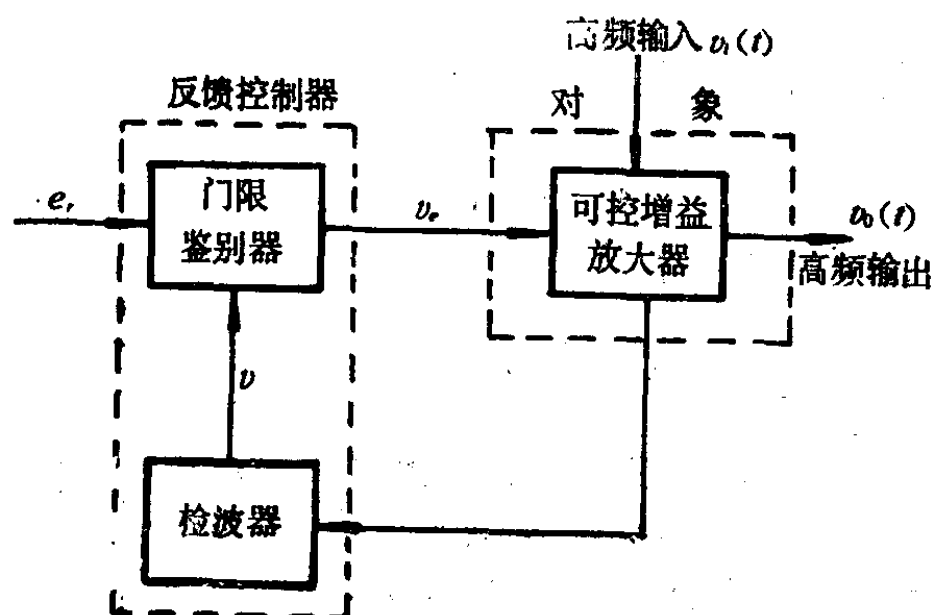


图1-2 延迟式AGC原理方框图

由此可见，在该电路中，通过把实际的中频信号输出量经自动增益控制检波器检出反映其信号强度的电压，并反馈到输入端与所要求的 e_r 进行比较，再利用它们的差值信号去连续地控制可控增益放大器，就可减小两者之间的误差，从而使电路的输出量趋近于我们所希望的数值。

在反馈控制系统中，将 e_r 称为输入量，将 v 与 e_r 进行比较的门限鉴别器称为控制器，可控增益放大器称为受控对象。如图1-2中的虚线方框所示。由于该系统是将输出信号电平反馈到输入端，和输入电平进行比较，以得到差值信号去控制放大器的增益，从而当感生在天线上的信号强度发生较大变化时，仍然保持输出信号电平稳定在所希望的数值上。因此，我们将这样的系统称为自动电平控制电路。

还有将输出信号的频率或相位反馈到输入端与输入信号的频率或相位进行比较的电路，这就是自动频率控制电路和自动相位控制电路。其原理方框图如图1-3和图1-4所示。

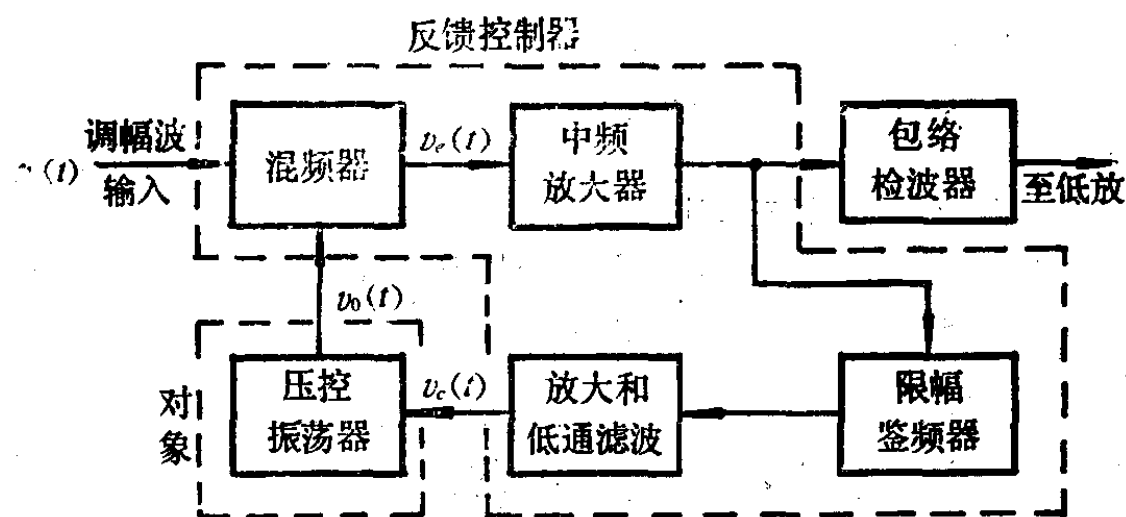


图 1-3 自动频率控制原理方框图

频率反馈电路中，压控振荡器(VCO)输出信号 $v_o(t)$ 反馈到输入端，与输入信号 $v_i(t)$ 在混频器中进行比较，得到一差频信号，鉴频器鉴别差频的大小，输出反映差频大小的误差电压，控制VCO的频率使其跟踪上输入信号频率的变化。

相位反馈电路中，VCO输出信号 $v_o(t)$ 反馈到输入端，与输入信号 $v_i(t)$ 在鉴相器中比较它们的相位，得到一比例于两信号相位差的误差电压，该电压对VCO调相，使输出信号相位跟踪上输入信号相位的变化。

由这些例子看出，在自动调节系统中，要自动调节某一参数，都是将输出量反馈到输入端，与给定值在控制器的比较装置中进行比较，得到一个差值信号（误差信号），然后对差值信号进行一定处理，让它以一定规律动作，再送到调节对象上，控制输出量稳定在所需数

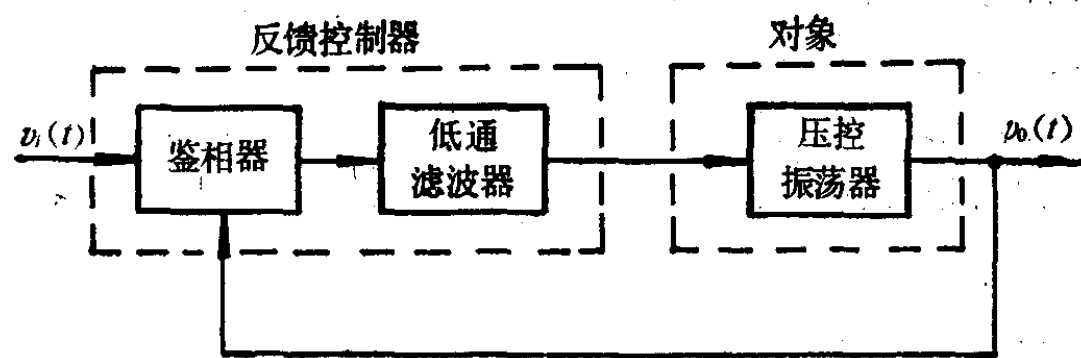


图1-4 自动相位控制原理方框图

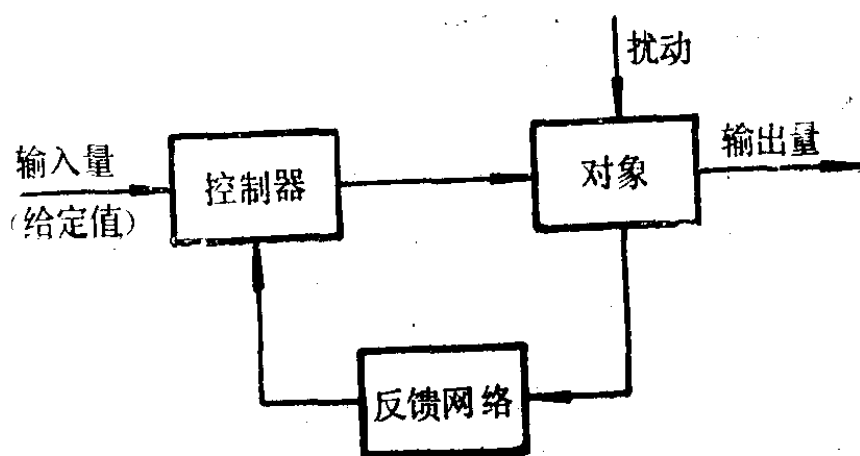


图1-5 反馈控制系统一般组成

象的另一输入量，统一用“扰动”表示。将图1-5改画成图1-6的形式，对反馈控制系统的组成与调节过程就更加清楚了。

1-1-2 功能

1. 极大地提高系统的控制精度

观察图1-7所示没有反馈的开环控制系统。系统的输出量只受输入量控制，而输出量本身对



图1-7 开环控制系统

元件精密度很高等极其苛刻的条件。而反馈系统则可利用输出量与给定值之间偏差（误差信号），使系统产生足够的调节量去抵消“扰动”的作用，保持输出量在一定精度范围内等于给定值。这就极大地提高了系统的控制精确度。即是说，反馈系统对于“扰动”很不敏感，与开环控制系统相比，使得我们对于给定的控制对象，有可能采用不很精密的、成本低的元件做成精密的控制系统。

2. 极大地提高控制系统的反应速度

一个控制系统大都是包含有储能元件的动态系统，系统的运动状态就是系统在输入控制

值上。不同的系统差别仅是需要比较和稳定的参数不同。因而，反馈控制系统一般由受控对象、控制器、反馈网络组成，如图1-5所示。误差信号经过必要运算处理，形成受控对象的输入信号，称为控制信号。受控对象的负荷变化，作用在对象上的内外扰动和系统参数无法预知的变化都会使对象输出量发生改变。反馈系统的作用正是要降低以至消除这种改变。因此，把负荷变化、参数变化、内外扰动当作对

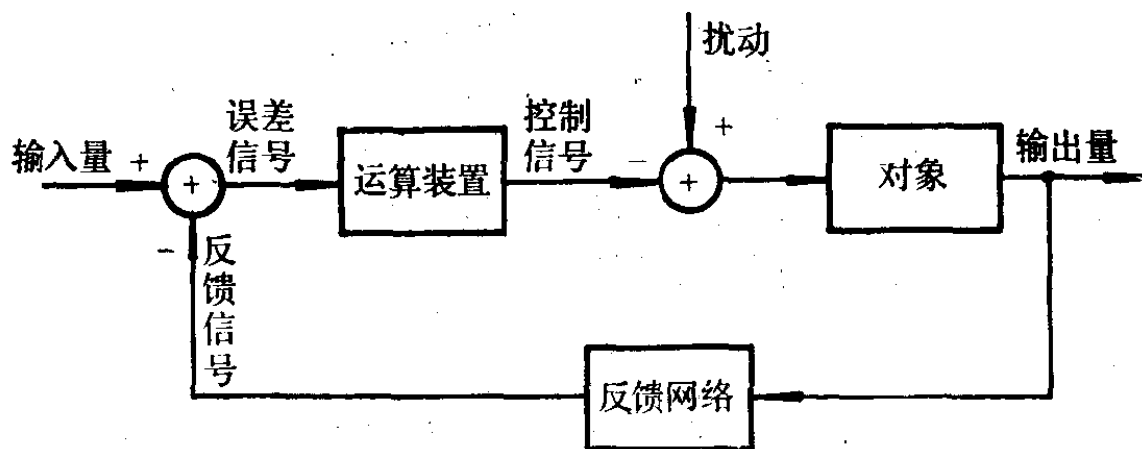


图1-6 反馈控制系统组成的另一种表示形式

系统的控制作用毫无影响。显然，有一个输入量，系统则对应地有一输出量。如果系统存在着“扰动”，输出量就会偏离控制值而变化，以致使系统失效。所以，系统要做到精确地控制是相当困难的，除非它满足“扰动”小，元

量作用下, 输出量随时间变化的动态过程。输出量从初始状态开始, 变化到稳定的输出总需要一定的时间, 这个时间长短就反应了系统的反应速度。系统的动态过程通常都用微分方程式加以描述。微分方程的一般解中的时间常数 τ 的大小即能反应系统的反应速度。可以证明, 若在开环控制系统上加上反馈电路, 就可能使时间常数比开环时小得多, 因而系统的反应速度就快得多。

除上述功能外, 它还能降低系统输入端传递到输出端的干扰与噪声、降低非线性失真、扩大系统线性动态范围等。由于这些优点, 使得反馈系统在现代工业、科学实验、工程技术等领域得到广泛应用。本书讲述的锁相环路就是应用极其广泛的反馈控制系统之一。

1-1-3 分类

按反馈系统输入输出量之间的关系, 可分为定值调节系统、随动系统与程序控制系统三类。

如图1-4系统, 给定值在工作过程中不变或随时间缓慢地变化。系统的基本任务就是在有“扰动”作用时, 使输出量以一定精度等于给定值。这种反馈系统称做定值调节系统。例如本课将要介绍的微波固态源、频率合成器的锁相环路, 即属于定值调节系统。

在图1-4中, 若输出量以一定精度随给定值变化, 这种系统叫随动系统。在这种系统中, 给定值是变化的输入量, 输出量以一定精度跟随输入量作位移、速度或加速度变化。例如本课程要介绍的作载波跟踪与调制跟踪用的锁相环路, 以及雷达天线控制系统、雷达搜索系统、武器的自动瞄准系统等等均属此类。

程序控制系统的给定输入量是按照预先制定的程序变化的。它的变化规律和随动系统中输入量变化规律的区别在于前者是一种预先确定的时间函数, 而后者是未知的。程序控制系统在工业上得到广泛应用, 例如程序控制的自动化车床等。本书介绍的数字式频率合成器, 既是一个定值调节系统, 也可看作是一个程序控制系统, 因为它的输出频率是受反馈支路中的程序分频器的程序所控制的。

§1-2 锁相技术发展简史及其特点

1-2-1 锁相技术发展简史

锁相原理在数学理论方面, 早在30年代无线电技术发展的初期就已出现。1930年已建立了同步控制理论的基础。1932年贝尔赛什 (Bellescize) 提出了同步检波理论, 第一次公开发表了锁相环路的数学描述, 用锁相环路提取相干载波来完成同步检波。早期的锁相环路采用电子管, 且价格昂贵, 只能用在实验装置中, 未得到广泛应用。

到了40年代, 电视接收机的同步扫描电路中, 开始广泛地应用锁相技术, 使电视图象的同步性能得到很大改善。

进入50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, 并首次发表了包含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问题。一种最简单的遥测方式就是信标跟踪。卫星上装一台低功率的连续波发射机, 地面接收到的信号频率, 由于卫星的径向运动而产生多普勒频移, 测量出多普勒频移大小, 就可以算出卫星的径向运动速度, 从而测定它的运行轨道。但是, 由于卫星上发射机功率小 (毫瓦量级), 而接收机相距几千乃至几万公里以上, 因而

接收到的信号异常微弱，加之存在多普勒频移及振荡器的频率漂移，接收机的带宽必须足够的宽才行。噪声强度是与带宽成正比的，这样在接收点的信号噪声功率比 (P_{si}/P_n) 必然很低，通常在 $-10 \sim -30\text{dB}$ 的数量级，即所需信号深深地埋在噪声之中，在此情况下，普通接收机是无能为力的，而只有采用具有锁相环路的窄带锁相跟踪接收机才能把深埋在噪声中的信号提取出来。所以空间技术的发展，促使人们对锁相环路理论及其应用的进一步探讨。

在60年代，维特毕 (Viterbi) 研究了无噪声锁相环路的非线性理论问题，并发表了“相干通信原理”一书。到七十年代林特赛 (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，并做了大量实验以充实理论分析。随着对锁相技术的理论和应用进行广泛深入的研究，目前，锁相技术已经成为一门比较系统的理论科学。

由于锁相环路具有许多优良特性，它可用于频率合成与变换、自动频率调谐跟踪、模拟和数字信号的相干解调、AM波信号的同步检波、数字通信中的位同步提取、锁相稳频、锁相倍频与分频、锁相测速与测距、锁相FM (PM) 调制与解调、微波锁相频率源以及微波锁相功率放大器等。所以，锁相技术的应用已遍及无线电领域，从空间探测、卫星与导弹的跟踪测距、雷达、导航、通信、计算机、激光到电子仪器。近年来，冶金、水文地质、电力、机械加工、生产自动化等方面都有广泛使用。甚至今天锁相环路已出现在每个家庭的电视接收机和立体声收录机中。随着半导体集成电路技术的迅速发展，从60年代后期起，已相继试制成功集成化的锁相环路部件及单片集成锁相环路。今天集成锁相环路的商品种类日益繁多，这将使锁相技术得到更加广泛的应用。

我国早在50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工作。特别是中远程导弹的定点发射、卫星的发射和回收、同步卫星的发射和定点等技术的发展，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，地面站对人造卫星发回的信号的接收以及遥测遥控都证明锁相技术的研究和应用达到了较先进的水平。我国第一颗人造卫星把“东方红”的乐曲传遍了全球，这极大地鼓舞了我国科学工作者攀登世界科学高峰的斗志。1984年4月8日，我国成功地发射了试验通信卫星，进入同步轨道正常运行。1986年2月1日又成功地发射了一颗实用通信广播卫星，准确定点于东经 103° 赤道上空。经定点试播，图象和声音质量都达到和超过国际5号卫星的水平。近年来除继续发射本国各类卫星外，我国还承接外国卫星的发送业务，亚洲卫星通信有限公司的“亚洲卫星一号”已确定1990年4月在中国发射。这些都充分说明，我国科学工作者和工程技术人员，对锁相技术的研究和应用达到了较先进的水平。

近年来，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、大规模集成电路的单片锁相环路和部件，如鉴相器、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。对锁相技术的理论和应用的研究也日趋深入、广泛，相应的论文、书籍的发表和出版也逐渐多起来。目前大多数高等院校已把锁相技术及应用，列入理工科无线电类专业及仪器仪表专业的研究生或本科高年级学生的专业课或选修课，以适应科学技术的飞速发展和我国现代化建设的需要。

目前，锁相环路的理论研究正日臻完善，应用范围遍及整个电子技术领域。现在锁相环路正向着集成化、数字化、多用途、系列化、高性能方向迅速发展，且商品化集成锁相环

路日益增多,为锁相技术应用提供了广阔前景。

1-2-2 锁相技术的特点

锁相环路与相同功能的其它电子电路相比有哪些特点(即优点)呢?因锁相环路能够有效地提取相位信息,对于研究信息提取和处理是相当有用的技术手段。锁相环路处于正常工作状态时,有如下基本特点:

1. 可以实现理想的频率控制

锁相环路是一个相差控制系统,即环路控制电压是由加到鉴相器上的输入信号与环路反馈信号之间的相位差所决定。而环路反馈信号的相位是由误差电压控制压控振荡器的频率变化而取得的。由于相位是频率对时间的理想积分,因此锁相环路包含有一个固有的积分环节,对于固定频差输入信号,只要它处于环路的锁定范围内,那么通过这个固定积分环节的作用,环路输出就无剩余稳态频差存在。而一般自动频率微调系统却存在剩余频差。

2. 良好的窄带载波跟踪特性

窄带跟踪指的是跟踪输入信号的载频的慢变化,例如多普勒效应引起的载漂移变化;窄带滤波器是指对于干扰与噪声,环路有相当好的窄带滤波作用。这是因为当压控器振输出;频率锁定在输入频率上时,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,而绝大部分干扰会受到环路滤波器的低通特性的抑制,从而减小了对压控振荡器的干扰作用,所以环路对干扰的抑制作用就相当于一个窄带的高频带通滤波器。其带宽可以做得很窄,例如接收人造卫星发射的信号,其载波频率 $f_T=1600\text{MHz}$,而窄带锁相接收机噪声带宽仅 $B_L=300\text{Hz}$,这是用任何通常的LC、RC和晶体滤波器所办不到的。

3. 良好的调制跟踪特性

锁相环路中的压控振荡器输出频率可以跟踪输入信号的瞬时频率变化,表现了良好的调制跟踪性能。应用此特性,可以解调调频、调相、移频键控等角度调制信号。

4. 门限性能好

环路存在着固有非线性,在噪声作用下,同样存在着门限效应。但锁相环路不象一般的非线性器件那样,门限取决于输入信噪比,而是由环路信噪比决定,一般环路通带总比环路输入端的前置通带窄得多,较高的环路信噪比可取得较低的门限性能。将环路设计成窄带,就可把淹没在噪声中的微弱信号提取出来。它用作调频解调器时,与一般限幅鉴频器相比,门限改善可达5dB。

5. 易于集成化

组成环路的部件易于集成化与数字化。环路集成化与数字化为减小体积、降低成本、增加可靠性、多用途提供了条件。

§1-3 锁相的基本概念与指标

所谓锁相就是通过相位反馈控制,使系统输出信号相位锁定在输入信号的相位上,我们用图1-8中旋转矢量说明相位锁定过程。

假定图中的环路输入信号为

$$v_i(t) = V_i \sin \theta_i(t)$$

在矢量图中以矢量 V_i 表示,它以角频率 $\omega_i(t) = d\theta_i(t)/dt$ 围绕着原点O反时针旋转。

环路输出信号为

$$v_o(t) = V_o \sin \theta_v(t)$$

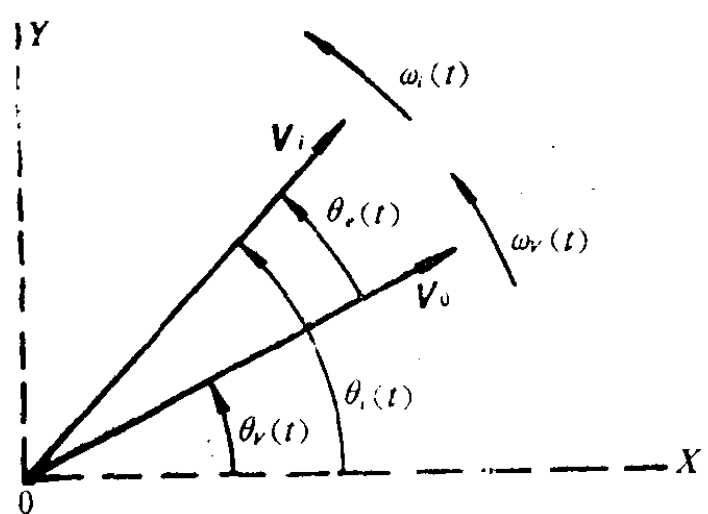


图1-8 描述锁相过程的矢量图

在矢量图上以 V_o 表示，它以角频率 $\omega_v(t) = d\theta_v(t)/dt$ 围绕着原点0反时针旋转。

若环路闭合之前 $\omega_i(t) > \omega_v(t)$ ，则说明 V_i 比 V_o 旋转得快，它们之间的相位差为

$$\theta_e(t) = \theta_i(t) - \theta_v(t) = \int_0^t [\omega_i(t) - \omega_v(t)] dt$$

然而，当环路闭合后，由于存在着相位差，鉴相器输出相位误差信号（电压），加到压控振荡器上，控制压控振荡器的频率 $\omega_v(t)$ ，使 $\omega_v(t)$ 与 $\omega_i(t)$ 之间频率差不断减小，即使 V_o 旋转速率加快，

以赶上 V_i 的旋转。随着频率差减小，相位误差的增长速度愈来愈慢。最终，若环路能控制到 $\omega_v(t) = \omega_i(t)$ ，即两矢量达到等速旋转，则相位误差 $\theta_e(t)$ 的变化必然满足

$$\begin{cases} \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{d\theta_e(t)}{dt} = \lim_{t \rightarrow \infty} \dot{\theta}_e(t) = 0 \\ \theta_{e\infty} - 2n\pi \approx 0 \quad (n \text{ 为正整数}) \end{cases} \quad (1-1)$$

这就是相位锁定的数学含义。显然，若无法满足上述关系，则环路处于失锁状态，环路相位误差是时间的增长函数。

由此可看出，环路相位误差随时间的变化是反映反馈系统相位调节的过程。环路相位误差变化有两种可能的情况：

第一种情况：当起始 $t \leq t_0$ 时， $\omega_v(t_0) \neq \omega_i(t_0)$ ，即两信号间存在固有频差

$$\Delta\omega_0 = \dot{\theta}_e(t_0) = \omega_i(t_0) - \omega_v(t_0)$$

假定环路由 $\dot{\theta}_e(t_0) = \Delta\omega_0$ 开始动作，经过足够长时间的反馈控制之后，可进入锁定。此过程可用 $\dot{\theta}_e(t)$ 和 $\theta_e(t)$ 时间波形图如图1-9说明。

显然，要严格地满足前述锁定的数学表达式是不可能的，一是时间要无限长，二是考虑到扰动的影响，永远也不可能满足。因此工程上认为，只要从时间 t_0 开始，到时间 t_a 满足下式就认为环路进入了相位锁定：

$$\begin{cases} |\dot{\theta}_e(t_a)| \leq \epsilon_{\Delta\omega} \\ |\theta_e(t_a) - 2n\pi| \leq \epsilon_{\theta} \end{cases} \quad (1-2)$$

式中， $\epsilon_{\Delta\omega}$ ， ϵ_{θ} 为工程上允许的频差与相位误差值。由 t_0 到 t_a 的相位调节过程称为环路的捕捉过程。

评价捕捉过程的两个性能指标是：环路的捕捉时间 t_p ；环路的捕捉带 $\Delta\omega_p$ 。

捕捉时间 t_p ，它是环路由起始时刻 t_0 到进入锁定状态的时刻 t_a 之间的时间间隔，即

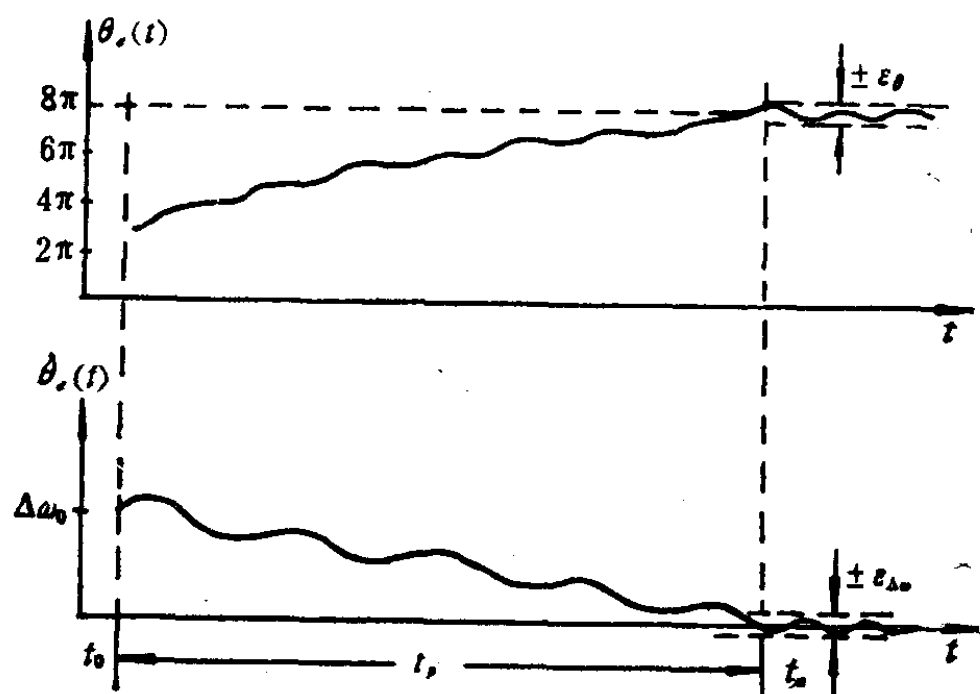


图1-9 锁定过程的 $\theta_e(t)$ 及 $\dot{\theta}_e(t)$ 波形