

# 鎖相技術

科學出版社

3.76

# 鎖 相 技 術

《鎖相技術》編譯組譯

35028/17

科學出版社

1972

## 内 容 提 要

本书介绍锁相技术在通信、雷达、遥控、遥测以及空间等方面的应用,全书共分九章,叙述了锁相环路的特性和原理、噪声性能、信号的跟踪和捕获、环路部件的工作和性能最佳化以及锁相接收机的应用及测试方法。

可供从事通信、雷达、遥控、遥测等方面工作的工人、工程技术人员以及有关研究、设计单位参考。

## 锁 相 技 术

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

\*

1971年4月第一版 1972年4月第二次印刷

定价: 0.39 元

## 毛主席语录

中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进水平。

学习有两种态度。一种是教条主义的态度，不管我国情况，适用的和不适用的，一起搬来。这种态度不好。另一种态度，学习的时候用脑筋想一下，学那些和我国情况相适合的东西，即吸取对我们有益的经验，我们需要的是这样一种态度。

## 译 者 序

遵照伟大领袖毛主席“洋为中用”的教导，我们翻译了《锁相技术》一书，供读者参考。

锁相技术在通信、雷达、空间以及未来在激光通信中的应用，标志着无线电技术有了很大的发展。由于锁相技术具有某些优点，所以成为提高无线电设备灵敏度和可靠性的一种比较有效的方法。这也就是它受到重视和日益被广泛应用的原因。

全书共分九章，在概述了锁相环路的特性和原理之后，介绍了噪声性能、信号的跟踪和捕获、环路部件的工作及其性能的最佳化，扼要地叙述了锁相接收机和锁相技术在其他方面的应用以及锁相环路的测试等。本书是描述锁相技术的基础参考书。

毛主席教导我们：“对于外国文化，……应当以中国人民的实际需要为基础，批判地吸收外国文化。”

应该指出，原书中有不少地方为资产阶级学者吹捧，从而贬低了广大劳动人民的才智。尽管作者煞费苦心大量引经据典，并作了许多假设，但对于如何解决锁相接收机的最佳跟踪和捕获，消除噪声，以及迅速和持久锁定等问题，仍未找到理想的答案。另外，我们对书中公式，数据和印刷上已发现的错误作了改正，但仍希望读者以辩证唯物的观点有分析，有批判地吸取书中有用的东西。

由于锁相技术是一门较新的学科，且译者水平有限，因此译文中错误之处在所难免，希广大读者提出宝贵意见。

09867

# 目 录

第一章 绪言 .....	(1)
1-1 锁相性质 .....	(1)
1-2 锁相环路的历史和应用 .....	(2)
1-3 其他应用 .....	(6)
第二章 环路原理 .....	(7)
2-1 基本传递函数 .....	(7)
2-2 二阶锁相环路 .....	(8)
2-3 其他类型环路 .....	(12)
2-4 根轨迹图 .....	(14)
第三章 噪声性能 .....	(19)
3-1 线性分析 .....	(19)
3-2 噪声门限 .....	(25)
第四章 跟踪和捕获 .....	(31)
4-1 线性跟踪 .....	(31)
4-2 同步性能 .....	(39)
4-3 捕获 .....	(44)
4-4 捕获的方法 .....	(56)
第五章 环路部件的工作原理 .....	(62)
5-1 限幅器 .....	(62)
5-2 鉴相器 .....	(66)
5-3 电压控制振荡器 .....	(74)
第六章 环路性能的最佳化 .....	(80)

第七章 锁相接收机·····	(88)
7-1 中频放大器的影响·····	(89)
7-2 自动增益控制·····	(102)
第八章 锁相的其他应用·····	(115)
8-1 跟踪滤波器·····	(115)
8-2 振荡器的稳定和提纯·····	(117)
8-3 倍频器和分频器·····	(118)
8-4 频率偏移环路·····	(119)
8-5 相关应答器·····	(120)
8-6 鉴频器·····	(123)
8-7 脉冲编码调制位同步·····	(133)
第九章 锁相环路的测量·····	(137)
9-1 静态测量·····	(137)
9-2 捕获·····	(140)
9-3 动态测量·····	(141)
9-4 噪声测量·····	(147)
附 录 I. 数学复习·····	(152)
I-1 网络分析·····	(152)
I-2 反馈·····	(159)
I-3 噪声基础知识·····	(162)
II. 专用符号·····	(168)
参考资料·····	(171)

# 第一章 绪 言

## 1-1 鎖相性质

锁相环路包括三个基本的部分(图 1-1):

1. 一个鉴相器 (PD);
2. 一个低通滤波器;
3. 一个电压控制振荡器 (VCO), 其频率由一外加电压控制。

鉴相器将一周期的输入信号的相位同电压控制振荡器的相位进行比较, 鉴相器的输出是它的两个输入信号之间的相位差的量度。这个电压差经过环路滤波器滤波后才加到电压控制

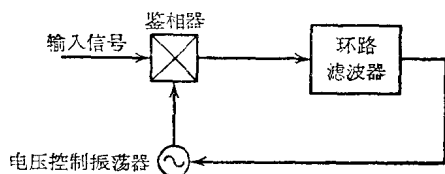


图 1-1 基本锁相环路

振荡器上, 电压控制振荡器上的控制电压将在减小输入信号和本振信号之间相位差的方向上, 改变这个频率。

当环路被锁定时, 控制电压使电压控制振荡器的频率恰好等于输入信号的平均频率。对于每一个输入信号的周期来说, 都有一个, 且只有一个振荡器输出的周期。在自动频率控制中, 锁相环路的应用显然是很普遍的。用这种方法可以实现理想的频率控制, 而普通的自动频率控制方法必然要引起某些频率误差。



为了保持锁定时所需的控制电压，通常必须使鉴相器具有非零的输出。因此，环路是在有某些相位误差的情况下进行工作的，但是，在设计得较好的环路中，这种误差实际上是很小的。

稍作一些说明，就可使我们对环路的工作有更好的了解。假定输入信号是由它的相位或频率来传送信息的话，那么，这种信号就必然由于迭加噪声而变坏。锁相接收机的任务就是恢复原来的信号，同时尽可能地消除噪声。

为了恢复信号，接收机利用了一个本振。本振频率非常接近于我们需要的信号频率。本振信号和输入信号的波形用鉴相器来互相比较，鉴相器的误差输出表示瞬时相位误差。为了抑制噪声，这个误差应在某一时间间隔内取平均值，然后将该平均误差用来控制振荡器的频率。

如果原来的信号具有很好的特性（频率稳定），则本振只要求很少的信息就能够跟踪，这个信息可以在一个长的时间间隔内取其平均值得来。因此，可以大量地消除噪声。输入到环路中的信号是带有噪声的信号，而电压控制振荡器的输出信号是提纯了的输入信号。因此，把环路看成一种通过信号而抑制噪声的滤波器是恰当的。

这种滤波器的两个重要的特性，是其带宽可以很窄并能自动跟踪信号频率。这两个特性可以算作是锁相接收机的主要用途。窄频带宽可以抑制大量的噪声，所以通常用锁相环路把深埋于噪声中的信号恢复过来。

## 1-2 锁相环路的 历史和应用

一种类似于相位锁定的装置已经存在了许多年。发电厂使发电机的平均频率保持接近于 60 周，因而电钟走得不快也

不慢。此频率用一种类似于锁相环路的装置来调节，其输入信号是日时间，它最终来自标准局或海军观测台。这个参考时间可与运转中的发电机驱动的电钟所指的时间相比较。比较装置实际上是一个鉴相器。不过没有使用“鉴相器”这个名词罢了。涡轮机和发电机构成一个电压控制振荡器。

相位（时间）误差信息可用来调节涡轮机的速度，其方向能使误差减小。滤波作用一部分来自旋转机械的惯性和系统负载的电气惯性。但是，滤波作用的大部分取决于速度调节的好坏。

在这个例子中，相位比较和频率调节都是间断进行的，干扰来自负载的变化而不是输入信号中的噪声，因此这个例子有点勉强并且不够典型。虽然如此，这种过程也能够按照锁相环路进行分析。

“相位锁定”<sup>[1]</sup> 1932 年论述了无线电信号的同步接收。超外差接收机早在 1920 年就出现了，但是为了寻找一种比较简单的技术，仍然不断进行研究，同步接收机或零拍接收机就是这种研究成果之一。

实质上，这种接收机不过是由一个本振，一个混频器和一个音频放大器所组成。在工作时，本振的频率必须调到恰好与输入信号的载波相同的频率，输入信号的载波即被变换成严格等于零的中频。混频器的输出含有解调信息，此信息包含在载波的边带中。干扰信号将不能与本振同步，并且，由于干扰信号引起的混频器的输出是一个差拍信号，该差拍信号可用一个音频滤波器来抑制。

本振的正确调谐是同步接收的关键，任何一点频率误差都会无可挽回地使信息发生畸变。而且，本振的相位必须与接收的载波相位基本一致。换句话说，本振应对输入信号进行相位锁定。

由于各种原因，这种简单的同步接收机一直没有得到广泛的应用。目前的锁相接收机几乎都利用了超外差的原理，其趋势是向高度复杂的程度发展。接收来自宇宙飞船发出的非常微弱的信号，就是这种接收机的一种最重要的应用。

第一次普遍应用锁相环路是在电视接收机的水平扫描和垂直扫描的同步方面<sup>[2]</sup>。电视图象的每一行和每一隔行半帧的开始用一个脉冲作为信号，这个脉冲与视频信息一起传送。在电视显象管上重建扫描光栅的一种非常原始的方法，是将这些脉冲取出，并且分别用来触发一对单扫描发生器。

一种稍微复杂一点的方法，是利用一对自由振荡的张弛振荡器来触发这些扫描发生器。采用这种方法，即使没有同步信号扫描也照样进行。张弛振荡器的自由振荡频率被调到略低于水平和垂直脉冲的速率。用视频信号中分离出来的同步脉冲提前触发张弛振荡器，这样使它们同步于行和半帧的速率。

在没有噪声时，这种电路可获得良好的同步效果，并且是非常适宜的。遗憾的是，噪声始终存在，而任何触发电路对噪声都特别敏感。有这样一种极端的情况，在信噪比坏到仅能提供勉强可以辨认的图象时，触发扫描就将完全失效。

通常噪声会引起扫描起始时间的摆动，并且偶然因不起动而失去同步。水平的摆动会降低水平清晰度并引起垂直线上出现锯齿形图象。严重的水平不起动，通常会引出一条窄的水平黑线的出现。

垂直摆动会引起图象明显的垂直移动。连续的两个半帧的交错行间扫描将发生相对移动，结果使图象进一步变坏。把这两个振荡器锁定到分离出来的同步脉冲上，就可大大减小噪声的起伏。不必每一个脉冲都去进行触发，用锁相技术来检查每一个振荡器和它们的一串同步脉冲之间的相对相

位，并且调节振荡器的频率使平均相位误差很小。因为它关系到许多个脉冲，所以偶而出现的足以破坏触发同步器的巨大噪声脉冲不能破坏锁相同步器。现代电视接收机的“飞轮”同步器就是真正的锁相环路。“飞轮”这个名词之所以被采用，多少是因为这种电路能够滑过噪声增强或信号微弱的时期。利用锁相可获得同步性能的重大改进。

锁相环路在空间的应用是从国外发射第一批人造卫星开始的。这些飞行器载有低功率（10 毫瓦）连续波发射机；接收的信号是相当弱的。由于多普勒频移和发射振荡器的漂移，接收信号的准确频率误差很大。最初利用频率为 108 兆赫时，多普勒频移就可能在  $\pm 3$  千赫范围内。以一个普通的固定调谐接收机为例，其带宽至少有 6 千赫，但信号本身却只占一个非常窄的频谱，可包含在大约 6 赫的带宽里。

接收机中的噪声功率与带宽成正比。因此，如果利用普通的技术，要花 1000 倍（30 分贝）的噪声代价，才能接收到信号（在技术已经向前发展的情况下，这个数字就显得十分惊人，发射频率已提高到 S 波段，使多普勒频移范围大约等于  $\pm 75$  千赫，而接收机带宽已小到 3 赫。采用普通技术的损失大约等于 47 分贝。）这种代价是我们受不了的，这就是要采用窄带锁相跟踪接收机的原因。

噪声可以用窄带滤波器来抑制，但是如果这种滤波器是固定的话，信号则几乎不能位于通带内。判定一个窄带滤波器是否可用，看它能否跟踪信号，锁相环路就能适应窄频带宽和跟踪这两者的要求。而且可以方便地得到非常窄的带宽（3—1000 赫的带宽在空间应用是个典型）；如有必要，改变带宽也很容易。

对于一个多普勒信号来说，需要确定飞行器的速度的信息是多普勒频移。一个锁相接收机较适用于恢复多普勒频率，

由于它在锁定时没有频率误差。

### 1-3 其他应用

下述锁相环路的应用,将在第八章中进一步讨论。

1. 跟踪运行的飞行器的一种方法,包括向飞行器发射一个相干信号、移偏该信号的频率及转发信号返回地面。飞行器上的这种“相干应答器”应该这样工作,使输入和输出频率恰好等于整数比  $m/n$  ( $m$  和  $n$  为整数),锁相技术常常用于实现相干性。

2. 锁相环路可以用作频率解调器,这样它可提供比一个普通鉴频器更优良的性能。

3. 含有噪声的振荡器可以封装在锁相环路中,并锁定到一个纯信号上。如果环路的带宽较宽,则振荡器本身的噪声被抑制,它的输出将大大提纯。

4. 可以利用锁相环路来建立倍频器和分频器。

5. 用锁相的方法可以得到脉冲编码调制 (PCM) 遥测传输的位同步。

今后,锁相环路将应用在激光通信中。激光的主要优点之一是它的相干性;然而除非能采用一个相干接收机(不是一个简单的功率检波器),否则相干的许多优点将丧失。对两个激光进行相位锁定的方法近来有了叙述<sup>[3]</sup>。

## 第二章 环路原理

### 2-1 基本传递函数

一个基本环路包含一个鉴相器、一个低通环路滤波器和一个电压控制振荡器。输入信号具有相位  $\theta_i(t)$ ，而电压控制振荡器输出信号具有相位  $\theta_o(t)$ （见图 2-1）。现在假定，环路

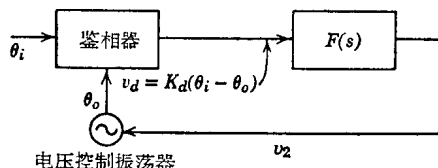


图 2-1 基本锁相环路方框图

是锁定的，鉴相器是线性的（这一假设在第三章中将证明是正确的、合理的）以及鉴相器的输出电压同它的两个输入信号之间的相位差成正比，即，

$$v_d = K_d(\theta_i - \theta_o) \quad (2-1)$$

其中， $K_d$  称为“鉴相器的增益系数”，并具有伏/弧度的量纲。

相位误差电压用低通环路滤波器来过滤。噪声和高频信号分量被抑制了，因而滤波器有助于确定环路的动态特性。滤波器的传递函数由  $F(s)$  给定。

电压控制振荡器的频率是用滤波后的误差电压  $v_2$  来控制的。电压控制振荡器偏离中心频率的频偏为  $\Delta\omega = K_o v_2$ ，其中  $K_o$  是电压控制振荡器的增益系数，其量纲为弧度/秒/伏。

由于频率是相位的导数，则电压控制振荡器的频偏可描述为  $d\theta_o/dt = K_o v_2$ 。取拉普拉斯变换，得到：

$$L \left[ \frac{d\theta_o(t)}{dt} \right] = s\theta_o(s) = K_o V_2(s) \quad (2-2)$$

所以

$$\theta_o(s) = \frac{K_o V_2(s)}{s}$$

换言之，电压控制振荡器输出的相位是与输入控制电压的积分成正比的。利用拉普拉斯算子就可以得到下列方程式：

$$V_d(s) = K_d[\theta_i(s) - \theta_o(s)] \quad (2-3)$$

$$V_2(s) = F(s)V_d(s) \quad (2-4)$$

$$\theta_o(s) = \frac{K_o V_2(s)}{s} \quad (2-5)$$

这些方程式的组合就成为基本的环路方程式：

$$\frac{\theta_o(s)}{\theta_i(s)} = H(s) = \frac{K_o K_d F(s)}{s + K_o K_d F(s)} \quad (2-6)^\dagger$$

$$\frac{\theta_i(s) - \theta_o(s)}{\theta_i(s)} = \frac{\theta_o(s)}{\theta_i(s)} = \frac{s}{s + K_o K_d F(s)} \quad (2-7)^\dagger$$

在处理之前，必须确定环路滤波器  $F(s)$ 。

## 2-2 二阶锁相环路

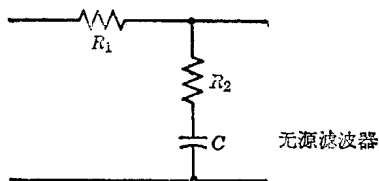
图 2-2 中用它们的传递函数表示两个广泛应用的环路滤波器。无源滤波器是很简单的，并且常常满足许多方面的应用。如第四章所述，有源滤波器虽然需要一个高增益的直流放大器，但却获得了良好的跟踪性能。采用无源滤波器的环路传递函数为：

† 表示重要公式。

$$H_1(s) = \frac{K_o K_d (s\tau_2 + 1) / (\tau_1 + \tau_2)}{s^2 + s(1 + K_o K_d \tau_2) / (\tau_1 + \tau_2) + K_o K_d / (\tau_1 + \tau_2)}$$

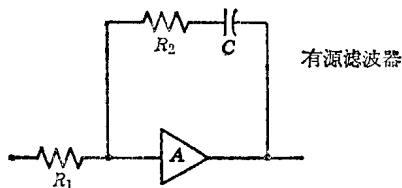
对于有源滤波器来说,如果放大器的增益很大,则环路传递函数为:

$$H_2(s) = \frac{K_o K_d (s\tau_2 + 1) / \tau_1}{s^2 + s(K_o K_d \tau_2 / \tau_1) + K_o K_d / \tau_1}$$



$$F_1(s) = \frac{sCR_2 + 1}{sC(R_1 + R_2) + 1} = \frac{s\tau_2 + 1}{s(\tau_1 + \tau_2) + 1}$$

$$\tau_1 = R_1C \quad \tau_2 = R_2C$$



$$F_2(s) = \frac{A(sCR_2 + 1)}{sCR_2 + 1 + (1 - A)(sCR_1)}$$

当  $A$  很大时

$$F_2(s) \approx \frac{sCR_2 + 1}{sCR_1} = \frac{s\tau_2 + 1}{\tau_1}$$

图 2-2 二阶环路中用的滤波器

这些传递函数可以改写为:

$$H_1(s) = \frac{s(2\zeta\omega_n - \omega_n^2/K_o K_d) + \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$$

$$= \frac{s\omega_n(2\zeta - \omega_n/K_o K_d) + \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2-8)^\dagger$$



$$H_2(s) = \frac{2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2-9)\dagger$$

其中用伺服系统的术语描述,  $\omega_n$  则是环路的“自然频率”,  $\zeta$  则是“阻尼系数”。显然, 如果在采用无源滤波器的环路中  $\omega_n/K_oK_d \ll 2\zeta$ , 则这两个传递函数是相同的。系数  $K_oK_d$  被称为“环路增益”; 它的量纲为(时间) $^{-1}$ , 即频率。

无源滤波器	有源滤波器
$\omega_n = \left(\frac{K_oK_d}{\tau_1 + \tau_2}\right)^{\frac{1}{2}}$	$\omega_n = \left(\frac{K_oK_d}{\tau_1}\right)^{\frac{1}{2}}$
$\zeta = \frac{1}{2} \left(\frac{K_oK_d}{\tau_1 + \tau_2}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\tau_2 + \frac{1}{K_oK_d}\right)$	$\zeta = \frac{\tau_2}{2} \left(\frac{K_oK_d}{\tau_1}\right)^{\frac{1}{2}}$

$$(2-10)\dagger$$

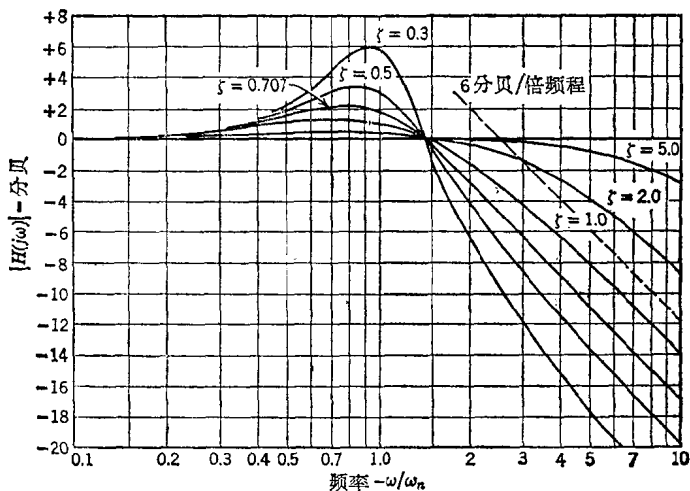


图 2-3 高增益二阶环路频率响应