

# 锁相环路

## 原理与应用

郑继禹 万心平 张厥盛 编

SUOXIANG HUANLU YUANLI YU YINGYONG

# 锁相环路原理与应用

郑继禹 万心平 张厥盛 编

人民邮电出版社

## 内 容 提 要

本书讲锁相环路的工作原理及其应用。对于线性及非线性模拟环的性能作了由浅入深的分析,并详细讨论了在噪声影响下环路的失锁门限及跳周等问题;对于取样环的分析,应用了 $Z$ 变换,并结合介绍了频率合成技术;对于数字环,用几种具体环路作了分析说明;对于环路部件、集成化及环路测量问题,书中也都作了介绍。书中还专有一章介绍锁相环路在通信中的应用。可供研制新型电子设备、精密测试仪器及从事通信工作的工程技术人员和大、专学校有关的师、生参考。

## 锁 相 环 路 原 理 与 应 用

郑继禹 万心平 张厥盛 编

•

人民邮电出版社出版

北京东长安街27号

河北省邮电印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

•

开本: 787×1092 1/32 1976年6月第一版

印张: 14 页数: 224 1976年6月河北第一次印刷

字数: 816千字 印数: 1—22,500册

统一书号: 15045·总2047-无613

定价: 1.30 元

# 毛 主 席 语 录

我们能够学会我们原来不懂的东西。我们不但善于破坏一个旧世界，我们还将善于建设一个新世界。

我们不能走世界各国技术发展的老路，跟在别人后面一步一步地爬行。我们必须打破常规，尽量采用先进技术，在一个不太长的历史时期内，把我国建设成为一个社会主义的现代化的强国。

教育必须为无产阶级政治服务，必须同生产劳动相结合。

## 前 言

无产阶级文化大革命和批林、批孔运动为我国工农业生产和科学技术的发展开辟了广阔的前景。“锁相技术”是近几年来随着我国电子工业的发展而迅速发展起来的一门技术。由于它的环路构成简单、性能良好，在许多新型电子设备、特别是在通信系统中，得到广泛的应用。

遵照毛主席“教育必须为无产阶级政治服务，必须同生产劳动相结合”的伟大教导，为了配合我国通信技术的发展和适应当前教育革命的需要，我们一面学习，一面搜集、整理有关资料，并在此基础上，于1973年编出了“锁相基础讲义”初稿，先后在我院及一些工厂和研究所进行试讲。《锁相环路原理与应用》这本书，是在此讲义的基础上听取了广泛的、来自生产实践的意见和要求，吸取了兄弟单位有关“锁相技术”的宝贵经验，于1974年编成的。本书内容的安排，力求使初学者阅读后，能对各种锁相环路的基本工作原理及其应用有个较明确的概念；对有一定实践经验的读者，在理论上也能有所帮助。

对本书的出版，我院领导十分重视。为了使本书更好地适应读者需要，组织了有我系领导及有关工厂、科研单位有实践经验的同志和专业人员参加的三结合审书小组，对书稿进行了认真的审定。在参加审稿工作中，陆心如、苏君宜、关树卿、杨士中、张盛久、宋景光、朱世洪、但森等同志提出了宝贵意见，在此表示衷心的感谢。

32430

但是，由于我们的理论水平有限，经验不足，在具体编写过程中对如何运用唯物辩证法、如何抓住主要矛盾阐明事物本质等方面，本书还不免存在缺点、错误，恳切希望读者批评指正。

编 者

于西北电讯工程学院

一九七四年八月

# 目 录

|                 |               |
|-----------------|---------------|
| 专用符号            | ( 1 )         |
| 绪论              | ( 9 )         |
| (一)锁相技术的发展      | ( 9 )         |
| (二)锁相环路的特性与应用   | ( 11 )        |
| (三)本书内容         | ( 20 )        |
| <b>第一章 基本原理</b> | <b>( 22 )</b> |
| 第一节 锁相环的组成      | ( 22 )        |
| 一、方框图           | ( 22 )        |
| 二、鉴相器           | ( 23 )        |
| 三、压控振荡器         | ( 26 )        |
| 四、环路滤波器         | ( 27 )        |
| 第二节 基本方程和相位模型   | ( 28 )        |
| 第三节 环路锁定的概念     | ( 31 )        |
| 第四节 一阶环路        | ( 33 )        |
| 一、锁定的建立过程和建立时间  | ( 34 )        |
| 二、差拍状态和频率牵引现象   | ( 37 )        |
| 三、频率响应          | ( 40 )        |
| 第五节 一阶环路的解析解    | ( 42 )        |
| 一、锁定状态          | ( 43 )        |
| 二、差拍状态          | ( 44 )        |

|                                     |        |
|-------------------------------------|--------|
| <b>第二章 线性性能分析</b> .....             | ( 46 ) |
| <b>第一节 线性化概念</b> .....              | ( 46 ) |
| 一、鉴相器的线性近似.....                     | ( 46 ) |
| 二、线性化环路方程.....                      | ( 47 ) |
| <b>第二节 环路传递函数</b> .....             | ( 48 ) |
| 一、传递函数的一般形式.....                    | ( 48 ) |
| 二、各种滤波器的传递函数.....                   | ( 49 ) |
| 三、实际环路的传递函数.....                    | ( 55 ) |
| <b>第三节 环路频率响应</b> .....             | ( 58 ) |
| 一、闭环频率响应.....                       | ( 58 ) |
| 二、误差频率响应.....                       | ( 60 ) |
| <b>第四节 环路的稳定性</b> .....             | ( 61 ) |
| 一、稳定性的一般概念.....                     | ( 61 ) |
| 二、稳定性判据.....                        | ( 62 ) |
| 三、几个具体环路的稳定条件.....                  | ( 65 ) |
| <b>第五节 线性跟踪</b> .....               | ( 68 ) |
| 一、输入相位阶跃 $\Delta\theta$ .....       | ( 69 ) |
| 二、输入频率阶跃 $\Delta\omega$ (相位斜升)..... | ( 70 ) |
| 三、输入频率斜升 $R$ .....                  | ( 71 ) |
| 四、输入正弦调频信号.....                     | ( 75 ) |
| 五、输入正弦调相信号.....                     | ( 78 ) |
| <b>第六节 过渡过程</b> .....               | ( 80 ) |
| 一、输入相位阶跃.....                       | ( 80 ) |
| 二、输入频率阶跃.....                       | ( 82 ) |
| 三、输入频率斜升.....                       | ( 83 ) |

### 第三章 非线性性能分析 ( 85 )

#### 第一节 相图法的基本概念 ( 86 )

##### 一、相图法 ( 86 )

##### 二、线性系统的相图 ( 87 )

##### 三、极限圈 ( 90 )

#### 第二节 固定频率输入的二阶环 (理想积分滤波器) ( 92 )

##### 一、相图及其特点 ( 92 )

##### 二、捕捉带 ( 99 )

##### 三、捕捉时间 ( 101 )

##### 四、快捕带 ( 107 )

#### 第三节 线性变化频率输入的二阶环 (理想积分滤波器) ( 109 )

##### 一、相图及其特点 ( 109 )

##### 二、频率变化速率 ( 116 )

##### 三、对起始频差的限制 ( 117 )

#### 第四节 固定频率输入的二阶环 (无源比例积分滤波器) ( 119 )

##### 一、相图及其特点 ( 119 )

##### 二、捕捉带与捕捉时间 ( 127 )

##### 三、牵引现象 ( 131 )

#### 第五节 捕捉过程时间图 ( 132 )

##### 一、从相轨迹图怎样作出时间图 ( 132 )

##### 二、捕捉全过程 ( 135 )

#### 第六节 捕捉方法 ( 137 )

##### 一、扫描法 ( 137 )

|                                           |                |
|-------------------------------------------|----------------|
| 二、变带宽法·····                               | ( 139 )        |
| 三、鉴频环路法·····                              | ( 140 )        |
| <b>第四章 环路的噪声分析·····</b>                   | <b>( 142 )</b> |
| 第一节 环路的噪声相位模型·····                        | ( 143 )        |
| 一、输入噪声的性质·····                            | ( 144 )        |
| 二、噪声相位模型·····                             | ( 146 )        |
| 第二节 线性分析·····                             | ( 149 )        |
| 一、输出噪声相位方差 $\theta_{\varphi_0}^2$ ·····   | ( 151 )        |
| 二、环路噪声带宽·····                             | ( 151 )        |
| 三、环路信噪比·····                              | ( 156 )        |
| 第三节 环路的失锁门限分析·····                        | ( 157 )        |
| 一、统计线性化的基本原理·····                         | ( 158 )        |
| 二、将准线性结果用于环路·····                         | ( 161 )        |
| 三、采用理想积分滤波器的环路失锁门限·····                   | ( 164 )        |
| 第四节 跳周·····                               | ( 167 )        |
| 一、一阶环路相差的稳态概率密度·····                      | ( 168 )        |
| 二、一阶环路的跳周平均时间·····                        | ( 176 )        |
| 三、高增益二阶环路的 $P(\theta_s)$ 及 $T_{av}$ ····· | ( 181 )        |
| 第五节 环路对杂波干扰的滤除能力·····                     | ( 182 )        |
| <b>第五章 锁相环在通信中应用·····</b>                 | <b>( 186 )</b> |
| 第一节 概述·····                               | ( 186 )        |
| 第二节 锁相环路调频解调器·····                        | ( 188 )        |
| 一、普通鉴频器的性能介绍·····                         | ( 189 )        |
| 二、锁相环路的鉴频原理·····                          | ( 193 )        |
| 三、门限性能·····                               | ( 198 )        |

|                                   |                |
|-----------------------------------|----------------|
| 四、限幅器对鉴频环路的影响·····                | ( 204 )        |
| 第三节 锁相接收机·····                    | ( 207 )        |
| 一、窄带跟踪环路的解调原理·····                | ( 208 )        |
| 二、中放、倍频级对环路的影响·····               | ( 212 )        |
| 三、自动增益控制 ( AGC ) ·····            | ( 216 )        |
| 四、设计考虑·····                       | ( 218 )        |
| 第四节 移相键控信号 ( PSK ) 的相干解调——        |                |
| 平方环与考斯脱斯环的分析·····                 | ( 225 )        |
| 一、一般介绍·····                       | ( 225 )        |
| 二、平方环与考斯脱斯环的分析·····               | ( 230 )        |
| 三、设计原则·····                       | ( 240 )        |
| 第五节 用锁相环提取数字同步信号·····             | ( 241 )        |
| 一、不归零的二进制随机序列的特征·····             | ( 242 )        |
| 二、提取位同步信号的环路组成及其部件的<br>要求·····    | ( 243 )        |
| 三、锁相环路同步器·····                    | ( 249 )        |
| <b>第六章 取样锁相环及其在频率合成技术中应用·····</b> | <b>( 252 )</b> |
| 第一节 取样锁相环路的基本原理·····              | ( 252 )        |
| 一、环路组成及工作过程·····                  | ( 252 )        |
| 二、取样鉴相器·····                      | ( 254 )        |
| 三、环路模型与性能·····                    | ( 262 )        |
| 第二节 $Z$ 变换及其在取样锁相环中的应用·····       | ( 265 )        |
| 一、 $Z$ 变换定义·····                  | ( 266 )        |
| 二、 $Z$ 变换的反变换·····                | ( 269 )        |
| 三、 $Z$ 变换的性质·····                 | ( 272 )        |
| 四、 $Z$ 变换的应用·····                 | ( 275 )        |

|                             |                |
|-----------------------------|----------------|
| 五、取样锁相环路线性性能分析·····         | ( 279 )        |
| 第三节 锁相式频率合成技术·····          | ( 286 )        |
| 一、一般介绍·····                 | ( 286 )        |
| 二、数字式频率合成器·····             | ( 290 )        |
| 三、合成器环路的寄生输出·····           | ( 297 )        |
| 四、合成器环路的设计步骤·····           | ( 306 )        |
| <b>第七章 数字锁相环的原理与应用·····</b> | <b>( 309 )</b> |
| 第一节 一种数字锁相环·····            | ( 310 )        |
| 一、环路的部件性能介绍·····            | ( 311 )        |
| 二、数字环的相位锁定过程·····           | ( 320 )        |
| 三、环路的基本方程及模型·····           | ( 323 )        |
| 四、环路的性能分析·····              | ( 327 )        |
| 五、应用举例·····                 | ( 334 )        |
| 第二节 另一种全数字锁相环·····          | ( 338 )        |
| 一、一阶环路的基本原理·····            | ( 338 )        |
| 二、一阶环路的性能分析·····            | ( 343 )        |
| 三、 $n$ 阶环路的组成方案·····        | ( 351 )        |
| 第三节 一种用作自位同步器的全数字环·····     | ( 354 )        |
| 一、基本原理·····                 | ( 354 )        |
| 二、方案举例·····                 | ( 357 )        |
| <b>第八章 环路主要部件与集成化·····</b>  | <b>( 367 )</b> |
| 第一节 概述·····                 | ( 367 )        |
| 第二节 电压控制振荡器·····            | ( 368 )        |
| 一、晶体压控振荡器( $VCXO$ )·····    | ( 369 )        |
| 二、 $LC$ 推挽压控振荡器·····        | ( 378 )        |

|                                             |         |
|---------------------------------------------|---------|
| 三、积分—施密特触发压控多谐振荡器·····                      | ( 380 ) |
| 四、射极定时压控多谐振荡器·····                          | ( 383 ) |
| 五、各种压控振荡器的比较·····                           | ( 386 ) |
| 第三节  鉴相器·····                               | ( 387 ) |
| 一、二极管平衡鉴相器·····                             | ( 388 ) |
| 二、二极管环形鉴相器·····                             | ( 391 ) |
| 三、平衡模拟乘法器·····                              | ( 396 ) |
| 四、双平衡模拟乘法器·····                             | ( 401 ) |
| 五、或门鉴相器·····                                | ( 402 ) |
| 六、异或门鉴相器·····                               | ( 404 ) |
| 第四节  单片集成锁相环·····                           | ( 406 ) |
| 一、方框图与线路图·····                              | ( 407 ) |
| 二、电路工作原理·····                               | ( 409 ) |
| 三、应用举例·····                                 | ( 413 ) |
| <b>第九章  环路测量</b> ·····                      | ( 416 ) |
| 第一节  静态测量·····                              | ( 416 ) |
| 一、同步范围内 $V_d$ 与 $\Delta f_0$ 的关系及同步带测定····· | ( 416 ) |
| 二、捕捉带、捕捉时间的测量·····                          | ( 419 ) |
| 三、稳态相位误差测量·····                             | ( 420 ) |
| 第二节  动态测量·····                              | ( 422 ) |
| 一、开环与闭环频率特性的测量·····                         | ( 422 ) |
| 二、阻尼系数 $\zeta$ 及自然谐振频率 $\omega_n$ 的测定·····  | ( 428 ) |
| 三、观察暂态特性·····                               | ( 429 ) |
| 第三节  噪声测量·····                              | ( 430 ) |
| 一、噪声带宽·····                                 | ( 430 ) |

|                |         |
|----------------|---------|
| 二、环路的失锁门限..... | ( 431 ) |
| 三、相位抖动.....    | ( 431 ) |

## 专 用 符 号

|                                    |                                 |
|------------------------------------|---------------------------------|
| $A$                                | 运算放大器放大量                        |
| $A/D$                              | 模拟-数字转换器                        |
| $AGC$                              | 自动增益控制                          |
| $a$                                | 衰减系数                            |
| $B$                                | 自位同步器输入数字信号位速率(赫)               |
| $B_s$                              | 位同步信号速率(赫)                      |
| $B_i$                              | 环路鉴相器前带通滤波器带宽(赫)                |
| $B_L$                              | 以无噪参数表示的环路噪声带宽(赫)               |
| $B'_L$                             | 以有噪参数表示的环路噪声带宽(赫)               |
| $b(K)$                             | 第 $K$ 个取样时刻数字滤波器输出              |
| $(CNR)_i$                          | 环路输入端载波噪声功率比( $dB$ )            |
| $(CNR)_o$                          | 带通限幅器输出端载波噪声功率比( $dB$ )         |
| $(CNR)_{2f_M}$                     | 解调器输入端二倍基带宽度内载波噪声功率比( $dB$ )    |
| $(CNR)_{2f_M T}$                   | 解调器门限值( $dB$ )                  |
| $D(T)$                             | 环路发生一次跳周的概率                     |
| $D/A$                              | 数字-模拟转换器                        |
| $E(\cdot)$                         | 均值符号                            |
| $f$                                | 频率(赫)                           |
| $f_s, f_c$                         | 二进制移频信号的最低与最高边界频率(赫)            |
| $f_i (i \text{ 取 } 1, 2 \cdots n)$ | 计数时钟单位时间内送出的计数脉冲, 即计数时钟的脉冲频率(赫) |
| $f_m$                              | 话音调制中最高音频频率(赫)                  |
| $F_i (= \frac{f_i}{f_s})$          | 归一化计数时钟脉冲频率                     |

|                                    |                                                              |
|------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| $FSK$                              | 移频键控信号                                                       |
| $F(S)$                             | 环路滤波器的归一化传递函数                                                |
| $g_i (i \text{ 取 } 1, 2 \cdots n)$ | 计数时钟脉冲频率(赫)                                                  |
| $g_m$                              | 压控振荡器恒流源跨导(毫安/伏)                                             |
| $G_i (= \frac{g_i}{g_n})$          | 归一化计数时钟脉冲频率                                                  |
| $G_n(S)$                           | 理想保持电路传递函数                                                   |
| $H(S)$                             | 闭环传递函数                                                       |
| $He(S)$                            | 误差传递函数                                                       |
| $H_o(S)$                           | 开环传递函数                                                       |
| $H_s(S)$                           | 统计线性化环路闭环传递函数                                                |
| $K$                                | 取样脉冲数                                                        |
| $K_H$                              | 环路高频总增益(1/秒)                                                 |
| $K'_H$                             | 统计线性化环路高频总增益(1/秒)                                            |
| $K_A$                              | 统计线性化环路鉴相等效增益                                                |
| $K_d$                              | 鉴相器线性增益(伏/弧度)                                                |
| $K_F$                              | 环路滤波器比例系数                                                    |
| $K_s$                              | 压控振荡器的控制增益(弧度/伏·秒)                                           |
| $K_{dc}$                           | 环路直流放大器增益                                                    |
| $K_{i1}(j\omega)$                  | 单调谐回路传递函数                                                    |
| $K_{i0}$                           | 单调谐回路谐振放大量                                                   |
| $K_v$                              | 环路直流总增益                                                      |
| $k$                                | 限幅抑制系数                                                       |
| $L$                                | 量化器输出最大量化电平数                                                 |
| $LPF$                              | 环路低通滤波器                                                      |
| $M$                                | 数字环中第 $n$ 个移位寄存器总计数和                                         |
|                                    | $(= \frac{\theta_{en}}{\Delta\omega/\omega_m})$ 稳态峰值相位误差的相对值 |

|                               |                                |
|-------------------------------|--------------------------------|
|                               | 程序分频器的可变分频比                    |
| $m$                           | 谐波次数, 倍频次数                     |
| $m_p$                         | 调频信号峰值调制指数                     |
| $n$                           | 脉冲序数; 正整数, 可取数字 0, 1, 2, 3 ... |
| $n(t)$                        | 环路输入窄带白高斯噪声电压(伏)               |
| $n_i(t), n_c(t)$              | 互为正交的白高斯噪声电压分量(伏)              |
| $n_1(t)$                      | 第一类杂波干扰电压(伏)                   |
| $N$                           | 预置分频器分频比                       |
|                               | 模 $2\pi$ 内状态数                  |
| $N_1, N_2, N_L, N_E$          | 固定分频比                          |
| $N_s$                         | 吞食计数器分频比                       |
| $N_T$                         | 环路总分频比                         |
| $NF$                          | 噪声系数(dB)                       |
| $P_1, P_2$                    | 二阶环路Z变换方程的根                    |
| $P_e$                         | 平均误码率                          |
| $P_n$                         | 环路输入端总噪声功率(瓦)                  |
| $P_{n'}$                      | 环路输出噪声功率(瓦)                    |
| $P_s$                         | 环路输入端信号载波功率(瓦)                 |
| $P_{s'}$                      | 环路输出信号功率(瓦)                    |
| $p(n)$                        | 噪声电压 $n(t)$ 的概率密度分布            |
| $P(\theta_e)$                 | 相位差 $\theta_e$ 的概率密度分布         |
| $P( \theta_e  < \theta_{e1})$ | 相位差 $\theta_e$ 的积分概率分布         |
| $p(\theta/R_c(t))$            | 后验概率密度分布                       |
| $PD$                          | 鉴相器                            |
| $PSK$                         | 移相键控信号                         |
| $PLL$                         | 锁相环路                           |