

锁相环路原理与应用

(修订本)

郑继禹 万心平 张厥盛 编著

人民邮电出版社

锁相环路原理与应用

(修 订 本)

郑继禹 万心平 张厥盛 编著

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。书中还重点介绍了锁相环路在通信中的应用,包括解调、同步、稳频等。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

2560/11

锁相环路原理与应用

(修订本)

郑继禹 万心平 张厥盛 编著

责任编辑:董乐前

*

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 1984年2月第 二 版
印张: 18 页数: 288 1984年2月河北第2次印刷
字数: 411 千字 印数: 22,501—29,500 册
统一书号: 15045·总2047—无613

定价: 1.95 元

再 版 前 言

近年来，锁相环路的研究日趋深入，应用更加广泛。本书再次与读者见面的时候，有必要反映一下近年来新的进展，但仍应保持原书的风格与深浅程度，不失原书通俗易懂、深入浅出、条理脉络清晰的特点，以适应原书读者对象的需要。

这次再版，各章均作了较多的增补。第一章加强了物理概念的解释。第二章补充了必要的控制理论基础内容，如伯德图、奈奎斯特稳定性准则、根轨迹法等。第三章除原书的相图法外，又用描述函数法的基本思想导出了正弦鉴相锁相环路捕捉带的一般公式。第四章增加了一节专门分析环中压控振荡器相位噪声的谱形与作用。以上三章都有分析三阶环性能的内容。第五章补充了假锁分析和快速PSK信号解调。第六章增写了调频解调器和数字式合成器的设计举例。第七章充实了全数字环中常用的随机徘徊滤波器的内容。第八章增写了鉴频—鉴相器；并对推挽负阻压控振荡器作了进一步的分析。第九章补述了相位抖动、谱密度与环路输出信噪比的测试方法。

作 者

一九八〇年十二月

前 言

“锁相技术”是近几年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。

为了配合我国通信技术的发展和适应当前教学工作的需要，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广泛听取了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。

为了使本书更好地适应读者需要，我院组织了有关领导同志及有关工厂、科研单位中有实践经验的同志和专业人员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。

对于本书存在的缺点、错误，恳切希望读者批评指正。

作 者

于西北电讯工程学院

一九七四年八月

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(分贝)
$(CNR)_{LO}$	带通限幅器输出端载波噪声功率比(分贝)
$(CNR)_2f_M$	解调器输入端二倍基带宽度内载波噪声功率比(分贝)
$(CNR)_2f_MT$	解调器门限值(分贝)
$D(T)$	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)
$\mathcal{F}$	傅里叶变换符号
f_s, f_h	二进制移频信号的最低与最高边界频率(赫)
$f_i(i取1, 2, \dots, n)$	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)
$F_i (= \frac{f_i}{f_n})$	归一化计数时钟脉冲频率
FSK	移频键控信号
$P(s)$	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
$G_A(s)$	理想保持电路传递函数
h_{-1}	与闪烁调频噪声有关的系数
h_0	与白调频噪声有关的系数
h_1	与闪烁调相噪声有关的系数
h_2	与白调相噪声有关的系数
$H(s)$	闭环传递函数
$He(s)$	误差传递函数
$H_0(s)$	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; 限幅抑制系数
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)
$K_A(\sigma)$	统计线性化环路鉴相器等效增益
K_d	鉴相器灵敏度(伏/弧度)
K_{d1}	电流型鉴相器灵敏度(安/弧度)
K_F	环路滤波器比例系数
K_0	压控振荡器的控制灵敏度(弧度/伏·秒)
K_d	环路直流放大器增益
$K_{i1}(j\omega)$	单调谐回路传递函数

K_1	单调谐回路谐振放大量
K_r	环路直流总增益
L	量化器输出最大量化电平数
LF	环路滤波器
M	数字环中第 n 个移位寄存器总计数和 ($= \frac{\theta_{em}}{\Delta\omega/\omega_m}$) 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_F	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)
$n_s(t), n_c(t)$	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 2π 内状态数
F_N	噪声系数 (分贝)
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_{s0}	环路输出信号功率 (瓦)
$p(n)$	噪声电压 $n(t)$ 的概率密度分布
$P(\theta_s)$	相位差 θ_s 的概率密度分布
$P(\theta_s < \theta_{s1})$	相位差 θ_s 的积分概率分布

$p(\theta/R_e(t))$	后验概率密度分布
PD	鉴相器
PSK	移相键控信号
PLL	锁相环路
$Q(x)$	量化器输出
R	频率变化速率(弧度/秒 ²)
$R_e(t)$	数字通信系统接收端接收信号
$R(\tau)$	相关函数
$\mathcal{L}$	拉普拉斯变换符号
s	微分符号或拉普拉斯算子, 边带抑制比
$S_0(t)$	对应数字“0”发射的高频载波信号
$S_1(t)$	对应数字“1”发射的高频载波信号
$S_i(t, \theta)$	受信道作用后, 与数字“0”或“1”对应的载波信号(i 取“0”或“1”)
$(SNR)_o$	解调器输出端信号噪声功率比(分贝)
$(SNR)_L$	环路信号噪声功率比(分贝)
$(SNR)_L^*$	统计线性化环路信号噪声功率比(分贝)
T	数字信号周期或码元宽度(秒)
T_s	跳周平均时间(秒)
T_F	频率锁定时间(秒)
T_θ	相位锁定时间(秒)
T_d	二进制移频信号的频率变换周期(秒)
$T_0(=\frac{2\pi}{\omega_0})$	周期(秒)
T_P	捕捉时间(秒)
$T_r(=\frac{2\pi}{\omega_r})$	参考信号周期(秒)
$T(k)$	第 k 个取样时刻的取样周期(秒)
t_s	同步保持时间(秒)

$t(k)$	取样时刻(秒)
t_{j0}	一阶环的频率牵引时间(秒)
$\overline{t_s}$	平均同步建立时间(秒)
VCO	压控振荡器
VCXO	晶体压控振荡器
$V(k+j)$	与“异或门”鉴相器输出门信号脉冲宽度相对应的平均电压值
V_{i0}	环路输入信号电压有效值(伏)
$v^*(t)$	样品电压(伏)
$v_c(t)$	压控振荡器的输入控制电压(伏)
$v_d(t)$	鉴相器输出误差电压(伏)
$v_i(t)$	环路输入信号电压(伏)
$v_m(t)$	调制信号(伏)
$v_o(t)$	压控振荡器输出电压(伏)
$v_s(t)$	从环路滤波器输出的解调信号(伏)
$W_R(f)$	单边噪声功率谱密度, 在通带内(B_i)等于 W_i (瓦/赫)
$w_{nc}(f), w_{ni}(f)$	单边基带噪声功率谱密度, 皆等于 $2W_i$ (瓦/赫)
$W_s(f)$	信号功率谱密度(瓦/赫)
$W_{n1,2}(f)$	单边噪声功率谱密度(瓦/赫)
$W_1(j\omega_1)$	环路对第一类杂波干扰滤除能力
$W_2(j\omega_2)$	环路对第二类杂波干扰滤除能力
$W_3(j\omega_3)$	环路对第三类杂波干扰滤除能力
x	$\left(=\frac{\omega_m}{\omega_n}\right)$ 相对调制频率, 量化器输入量
$Y(k)$	环路数字滤波器输入

$\mathcal{Z}$	z —变换符号
z	Z —变换算子
Z_i	输入阻抗
Z_o	输出阻抗
α	$\left(=\frac{1}{\tau_2}\right)$ 理想或比例积分滤波器时间常数倒数 数 $\{=(SNR)_L\}$ 环路信噪比
β	$\left(=\frac{1}{\tau_1+\tau_2}\right)$ 比例积分滤波器时间常数倒数 $\left(=\frac{\delta\dot{\theta}_e}{2\pi}\right)$ 相轨迹下降的斜率
$\beta_i(k)$	取样时刻进入环路的输入信号总相位 (弧度)
$\beta_o(k)$	钟取样脉冲相位(弧度)
γ	限幅器信号抑制系数
$\gamma_s \left(=\frac{\Delta\omega_s}{\Delta\omega_H}\right)$	归一化捕捉带
$\delta_T(t)$	单位脉冲函数
$\Delta \left(=\frac{2\pi}{N}\right)$	数字钟的相位阶跃量(弧度)
$\Delta\omega$	锁相接收机中总的载频漂移值(弧度/秒) 中放回路的离谐量 $\Delta\omega=\omega-\omega_i$, 差频 $\Delta\omega=\omega_1-\omega_i$
$\Delta\omega_L$	快捕带(弧度/秒)
$\Delta\omega_H$	同步带(弧度/秒)
$\Delta\omega_0$	固有频差(弧度/秒)
$\Delta\omega_P$	捕捉带(弧度/秒)

Δf_m	调频信号最大频率偏移 (赫)
Δf_r	调频信号总频率偏移均方根值 (赫)
ΔT	数字环中相位时间阶跃量 (秒)
$\Delta \theta$	数字环中相位阶跃量 (弧度)
e	失步系数
ξ	阻尼系数
ξ'	有噪阻尼系数
θ	随机相位 (弧度)
$\hat{\theta}$	估值相位 (弧度)
$\theta_i(t)$	输入信号以载波相位为参考的瞬时相位 (弧度)
$\theta_o(t)$	压控振荡器输出信号以 $\omega_0 t$ 为参考的瞬时相位 (弧度)
$\theta_1(t)$	以 $\omega_0 t$ 为参考的瞬时相位 (弧度)
$\theta_2(t)$	$=\theta_0(t)$
θ_e	相位差 $\theta_e = \theta_1 - \theta_2$ (弧度)
$\theta_1(k)$	在取样时刻 $t(k)$, 以钟信号相位 $\omega_0 t(k)$ 为参考的输入瞬时相位 (弧度)
$\theta_2(k)$	以 $\omega_0 t(k)$ 为参考的钟信号瞬时相位 (弧度)
$\theta_e(k)$	取样时刻的相位差 $\theta_e(k) = \theta_1(k) - \theta_2(k)$ (弧度)
$\theta_{ni}(t)$	环路等效输入噪声相位 (弧度)
$\theta_{no}(t)$	环路输出噪声相位 (弧度)
$\theta'_{nb}(t)$	压控振荡器内部噪声产生的环路输出相位抖动 (弧度)
$\theta_{n1}(t)$	环路输入端第一类杂波干扰电压的等效相位

	抖动 (弧度)
$\theta_{s.m}$	正弦调制输入下, 环路稳态峰值相差 (弧度)
$\theta_m(t)$	与调制信号 $v_m(t)$ 的时间积分成比例的相位偏移 (弧度)
$\theta_{s.\infty}$	稳态相差 (弧度)
$\theta_s(0)$	$t=0$ 的起始相差 (弧度)
$\dot{\theta}_s(0)$	每一 2π 周期内, $\theta_s=0$ 时瞬时频差值 (弧度/秒)
$\dot{\theta}_{s.0}$	起始频差值 (弧度/秒)
$\dot{\theta}_{s.\infty}$	极限圈中心位置频差值 (弧度/秒)
$\rho \left(= \frac{\Delta f_{L.m}}{f_M} \right)$	均方根调制指数 (弧度)
$\sigma^2 (= \overline{\theta_s^2})$	噪声相位差的方差值 (弧度 ²)
$\sigma_1^2 (= \overline{n^2(t)})$	噪声方差 (伏 ²)
τ	相关函数的自变量 漏脉冲宽度 (秒)
	异或门鉴相器输出门信号脉冲宽度 (秒)
τ_1, τ_2	时间常数 (秒)
ϕ_s	相移 (度)
$\Phi_m(\omega)$	话音调制下, 环路基带输入相位的相位功率谱密度 (弧度 ² /赫)
$\Phi_{n1}(\omega)$	线性化环路模型上, 等效的输入噪声相位功率谱密度 (弧度 ² /赫)
ω	角频率 (弧度/秒)
ω_d	VCO 输出信号中心角频率 (弧度/秒)
ω_1	环路输入信号载波角频率 (弧度/秒)

ω_p	压控振荡器瞬时角频率 (弧度/秒)
ω_c	滤波特性截止角频率 (弧度/秒)
ω_n	环路自然谐振角频率 (弧度/秒)
ω_T	增益临界角频率 (弧度/秒)
ω_ϕ	相位临界角频率 (弧度/秒)
ω_m	单音调制角频率 (弧度/秒)
ω_s	晶体串联谐振角频率 (弧度/秒)
ω_p	晶体并联谐振角频率 (弧度/秒)
ω_L	环路可锁定的最低界限角频率 (弧度/秒)
ω_H	环路可锁定的最高界限角频率 (弧度/秒)
ω_n'	有噪环路自然谐振角频率 (弧度/秒)
ω_{n0}	环路最佳自然谐振角频率 (弧度/秒)
ω_r	参考信号角频率 (弧度/秒)

目 录

专用符号	(1)
绪论	(1)
第一章 环路的基本原理	(14)
第一节 锁相环的组成	(14)
一、方框图	(14)
二、鉴相器	(15)
三、压控振荡器	(18)
四、环路滤波器	(19)
第二节 基本方程和相位模型	(21)
第三节 环路锁定的概念	(24)
第四节 一阶环路	(26)
一、锁定的建立过程和建立时间	(27)
二、差拍状态和频率牵引现象	(30)
三、频率响应	(32)
第五节 一阶环路方程的解析解	(36)
一、锁定状态	(36)
二、差拍状态	(38)
第二章 环路线性性能分析	(40)
第一节 线性化概念	(40)
一、鉴相器的线性近似	(40)
二、线性化环路方程	(41)
第二节 环路传递函数	(42)
一、传递函数的一般形式	(42)
二、各种滤波器的传递函数	(43)

三、实际环路的传递函数	(50)
第三节 环路频率响应	(55)
一、闭环频率响应	(55)
二、误差频率响应	(58)
第四节 环路的稳定性	(61)
一、稳定性的一般概念	(61)
二、稳定性判据	(64)
三、几个具体环路的稳定条件	(70)
第五节 线性跟踪	(73)
一、输入相位阶跃 $\Delta\theta$	(74)
二、输入频率阶跃 $\Delta\omega$ (相位斜升)	(75)
三、输入频率斜升 R	(77)
四、输入正弦调频信号	(80)
五、输入正弦调相信号	(83)
第六节 过渡过程	(85)
一、输入相位阶跃	(86)
二、输入频率阶跃	(89)
三、输入频率斜升	(91)
第七节 三阶环线性性能分析	(93)
一、稳态相差	(94)
二、根轨迹法基本概念	(95)
三、三阶环根轨迹及其特点	(99)
第三章 环路非线性性能分析	(101)
第一节 相图法的基本概念	(102)
一、相图法	(102)
二、线性系统的相图	(104)
三、极限圈	(106)
第二节 固定频率输入的二阶环 (理想积分滤波器)	(108)

一、相图及其特点	(108)
二、捕捉带	(115)
三、捕捉时间	(117)
四、快捕带	(128)
第三节 线性变化频率输入的 二 阶 环 (理 想 积 分	
滤波器)	(126)
一、相图及其特点	(126)
二、频率变化速率	(132)
三、对起始频差的限制	(134)
第四节 固定频率输入的 二 阶 环 (无 源 比 例 积 分	
滤波器)	(135)
一、相图及其特点	(135)
二、捕捉带与捕捉时间	(142)
三、牵引现象	(146)
第五节 捕捉过程时间图	(147)
一、从相轨迹图作出时间图	(147)
二、捕捉全过程	(151)
第六节 捕捉带的一般公式	(152)
第七节 辅助捕捉方法	(157)
一、扫描法	(158)
二、变带宽法	(160)
三、鉴频环路法	(161)
四、信号注入法	(162)
五、其它	(163)
第四章 有噪环路的性能分析	(165)
第一节 有相加噪声时的环路相位模型	(167)
一、输入相加噪声的性质	(168)
二、相加噪声相位模型	(170)
第二节 环路输入相加噪声的响应	(173)

• • •