

频率合成

理论、设计与应用

国防工业出版社

73.455
247
斗

DG 46 104

频 率 合 成

理论、设计与应用

〔英〕 V. F. 克罗帕 著
《频率合成》翻译组 译



4003763

内 容 简 介

本书全面地论述了频率合成的基本理论,并对设计与应用也作了一定的介绍。全书共分九章;前四章介绍频率合成的四种基本运算及其实现方法;第五章阐明了频率合成的数学理论;第六章简要地概述了锁相环路;第七章介绍了锁相频率合成;第八章叙述频率合成的应用;第九章讨论了关于频率合成器中的频率与相位抖动问题。

本书可供雷达、通信、遥控、遥测、测量仪器等专业技术人员和科研人员参考,也可供大专院校有关专业的师生参考。

Frequency Synthesis Theory, Design and Applications

V. F. Kroupa

格里芬 1973年版

*

频 率 合 成

理论、设计与应用

〔英〕V. F. 克罗帕 著

《频率合成》翻译组 译

图书在版编目(CIP)数据

北京市书刊出版业营业许可出字第974号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

山西新华印刷厂印装

850×1168¹/₃₂ 印张9³/₈ 235千字

1979年3月第一版 1979年3月第一次印刷 印数:00,001—21,000册

统一书号:15034·1747 定价:1.20元

译者序

随着我国电子工业的飞速发展，频率合成技术在雷达、通信、遥控遥测、电视广播和测量仪器等领域已得到日益广泛的应用。为此，遵照伟大领袖和导师毛主席关于“洋为中用”的教导，我们翻译了“频率合成”这本书。

频率合成技术根据其组成原理可以分为两类：一类是以滤波器为主的直接频率合成技术；另一类是以锁相环路原理为基础的锁相频率合成技术。本书在频率合成技术的整体设计方面作了较为系统的论述。提出了频率合成的数学理论，给出了设计例子，其中对谐波序列的产生、倍频、分频、混频、锁相环路原理等都作了详细的介绍。本书还简要地介绍了频率合成器的应用及频率合成器中相位与频率的抖动等问题。但对当前迅速发展的数字频率合成技术的介绍还不够，对频率合成器的性能指标也分析得不够深入。本书虽有这些不足之处，但仍然是有关频率合成方面的一本比较系统的技术参考书。

参加本书翻译工作的有：杨禄荣、张志明、汪震夏、毛士艺、聂大同、范仁周、张其善等同志，并由张其善和柳重堪同志负责全面的修改、校对和审核工作。在翻译过程中还得到了俞肇基、李邦复和戴显达等同志的支持和帮助，在此表示感谢。

由于译者水平有限，知识浅薄，翻译中的缺点和错误在所难免，诚恳地希望读者批评指正。

4005763

目 录

第一章 谐波频率的产生	11
1.1 一般非线性元件	11
1.2 理想开关	13
(A) 半波整流的正弦	15
(B) 两个理想开关的推-推连接	15
(C) 全波整流的正弦	15
(D) 两个理想开关的推-挽连接	16
1.3 半导体二极管	16
1.4 限幅器	19
1.5 再生开关	22
(A) 微分的方波	22
(B) 方波脉冲	23
(C) 微分的脉冲	24
(D) 任意的窄脉冲	24
1.6 谐波序列的调制	26
(A) 脉冲序列的幅度调制	27
(B) 脉冲序列的脉冲调制	27
(C) 脉冲序列的相位或位置调制	29
1.7 高频载波的调制	31
(A) 线性幅度调制	31
(B) 开关键控	32
(C) 相关调制	33
1.8 小结	36
附录 1.1	37
第二章 倍频器	41
2.1 理想的倍频器	41
2.2 二极管倍频器	42
(A) 等效二极管电路	43
(B) 非线性电阻的运用	45

(C) 非线性电容器(变容二极管)的运用	49
(D) 阶跃恢复二极管的运用	52
2.3 C类倍频器	56
2.4 倍频器中的信噪比和相位稳定度	61
(A) 信噪比的下降	62
(B) 倍频电路中所产生的附加噪声	64
(C) 温度和电源电压的变化所引起的相位漂移	64
2.5 小结	66
附录 2.1 电压激励晶体管倍频器的调幅增强	67
第三章 分频器	69
3.1 正弦振荡器的同步	69
3.2 张弛振荡器的同步	70
(A) 自激多谐振荡器	70
(B) 间歇振荡器	72
3.3 再生式分频器	72
3.4 参量分频器	74
3.5 计数式分频器	74
(A) 储能式计数分频器	74
(B) 串行工作计数式分频器	76
(C) 可变分频比计数式分频器	85
3.6 分频器中的相位不稳定性	89
(A) 再生式分频器	90
(B) 脉冲同步和计数分频器中的时间抖动	90
3.7 小结	92
附录 3.1 逻辑代数原理和逻辑集成电路	93
(A) 布尔代数	93
(B) 逻辑电平和符号	94
(C) 集成电路逻辑系——J-K触发器	95
第四章 频率混合	99
4.1 二极管混频器	99
4.2 晶体管混频器	105
4.3 开关混频器	109
(A) 并联和串联调制器	111
(B) 环形调制器	115

4.4 混频器中的互调制问题	118
(A) 互调制图	118
(B) 输出通带内的互调制分量的最小阶数	122
(C) 互调制分量的功率电平	123
4.5 小结	127
附录 4.1 一般互调制分量	128
第五章 频率合成	132
5.1 频率合成的数学理论	132
5.2 单一频率合成器	145
5.3 可变频率合成器	153
5.4 漂移消除系统	160
5.5 小结	165
第六章 锁相环路	168
6.1 基本方程	168
6.2 小信号特性	173
(A) 对寄生正弦波输入信号的响应	173
(B) 噪声性能	176
(C) 对相位和频率阶跃的响应	178
6.3 大信号特性	181
(A) 同步带	181
(B) 失锁频率	182
(C) 捕捉带	184
(D) 快捕带	186
(E) 建立时间	187
(F) 锁相捕获	188
(G) 锁相指示	190
6.4 鉴相器	191
(A) 开关式鉴相器	191
(B) 采样鉴相器	194
6.5 压控振荡器	197
(A) 晶体振荡器	198
(B) LC 振荡器	200
(C) RC 振荡器	201
6.6 小结	201
附录 6.1 一阶环路方程组的解	202

附录 6.2 锁相环路的稳定性	203
第七章 锁相频率合成器	209
7.1 锁相倍频器	209
(A) VCO 和环路选择性决定所需的倍频次数	209
(B) 辅助倍频器决定所需的倍频次数	211
(C) 分频器决定所需的倍频次数	212
7.2 锁相分频器	214
7.3 锁相混频器	216
(A) 两个频率的加或减	216
(B) 几个频率的加与减	219
7.4 锁相单一频率合成器	220
(A) 具有谐波发生器的频率合成器	220
(B) 在反馈支路中具有分频器的频率合成器	221
(C) 在反馈支路中具有混频器的频率合成器	221
(D) 逼近式频率合成器	223
7.5 数字频率合成器	226
(A) 带有前置分频器的数字频率合成器	227
(B) 反馈支路中具有混频器的数字频率合成器	227
(C) 具有级联锁相环路的数字频率合成器	228
(D) 设计特点	229
7.6 锁相十进可变频频率合成器	236
(A) 用锁相环的十进单元	236
(B) 输出电路	241
7.7 小结	242
附录 7.1 锁相环中的中频滤波器	244
第八章 频率合成器的应用	249
8.1 在测量技术中的应用	249
(A) 频率测量	250
(B) 相位测量	256
(C) 其他测量应用	257
8.2 通信中的应用	260
(A) 把频率合成器作为发射机激励器	260
(B) 频率合成器作为接收机的本机振荡器	264
(C) 收发信机中共用的频率合成器	268
8.3 在频率和时间标准中的应用	268

(A) 原子标准频率的变换·····	268
(B) 标准频率调节·····	269
8.4 小结·····	272
第九章 频率合成器中相位与频率的波动·····	274
9.1 正弦信号的小而频带有限的扰动·····	274
(A) 频带有限的正弦信号的迭加·····	274
(B) 窄带噪声·····	276
9.2 短期频率稳定度理论的原理·····	276
(A) 时间域和频率域特性·····	277
(B) 主要的专用公式·····	278
(C) 重要的噪声类型·····	280
9.3 频率合成器中的噪声·····	280
9.4 测量技术·····	284
(A) 多重周期技术·····	284
(B) 鉴相技术·····	286
(C) 离散寄生分量的测量·····	288
9.5 小结·····	289
附录 9.1 频率合成器输出相位噪声的谱密度·····	289

符 号 表

I. 符号意义

大写字母一般用于表示峰值、正弦量的幅度、傅里叶级数展开式的复值幅度、傅里叶级数和拉普拉斯变换，而下标的字母一般表示瞬时值或时间范畴。星号（*）表示共轭复数。字母符号上加一横线表示平均值。

A	幅度；运算放大器增益
a, c	交流
ADM	相加十进单元
AGC	自动增益控制
A_k^z	第 k 项连分数的近似分子
a_m	调幅度
AM	幅度调制；被调幅度
APC	自动相位控制
$A(t)$	幅度；慢变化的时间函数
AVC	自动音量控制
$B_1 < B < B_2$	混频输出滤波器的归一化通带
BCD	二—十进制代码
B_i	输入相位噪声带宽
B_k	第 k 项连分数近似分母
B_L	锁相环路的“环路噪声带宽”
BPF, BPF1	带通滤波器
BW	带宽
C	电容

CCIR	国际无线电咨询委员会
C_d	少数电荷的电容
CRT	阴极射线管
$C(v)$, C_v	随电压变化的电容量
d. c.	直流
D_1 , D_2	二极管
E , e	电压
E_B , E_0	偏置电压
$e_{a,b} = (\overline{e_{a,b}^2(t)})^{1/2}$	有效差拍电压
F	锁相环路滤波器
f	频率
FET	场效应晶体管
f_c	低通滤波器的截止频率
f_i	输入频率; 互调制频率
FM	频率调制
F_m	混频输出滤波器 (锁相环路反馈滤波器)
$F_M(s)$, $ F_M(\omega) $	中频滤波器的调制传递函数; 中频滤波器的衰减
$f_{p1} < f_p < f_{p2}$	输出滤波器通带
FR.DET	鉴频器
$F(s)$	锁相环路滤波器的传递函数
f_s	标准频率; 合成器输出频率
f_1 , f_2	混频器输入频率 ($f_1 < f_2$)
G , g	电导
G_d	正向偏置二极管的等效电导
HF	高频
HG	谐波发生器
$H(s)$, $H'(s)$	锁相环路的传递函数
I , i	电流

IC	集成电路
$I_{c,0}, I_{c,00}$	集电极电流的直流分量
I_{DC}	二极管电流的直流分量
I_{ES}	发射极饱和电流
IF	中频
IM, IM'	互调制信号的功率
$I_m(y), \bar{I}_m(y)$	修正的贝塞尔函数
i_p	峰值电流
I_r	二极管反向电流
j	虚数算子 $\sqrt{-1}$
$J_m(z)$	第一类贝塞尔函数
K	失谐函数, 锁相环路的增益
K'	锁相环路增益的变化
K_d	鉴相器增益
$K_0, K_0(v)$	压控振荡器增益
K_v	锁相环路的直流增益
L	电感; 变换损耗; 分频系数
LC	电感电容电路
LF	低频
L.O.	本机振荡器
lg	常用对数
HPF	高通滤波器
LPF	低通滤波器
OPF	输出滤波器
m_a	调幅度
m_p, m_{p0}	调相指数; 输出相位调制指数
MOSFET	金属氧化膜场效应晶体管
M.S., m.s.	均方
N	倍频或分频系数; 频率合成器的总倍频系

	数; 互调制频率的阶
n	开关混频器的常数; 倍频或分频系数; 任意整数
$n_c(t)$	噪声电压 (余弦分量)
N_i	输入频谱密度
$n_s(t)$	噪声电压 (正弦分量)
$n(t)$	噪声电压
P	功率
PD, P.DET	鉴相器
PLL	锁相环路
PLDM	锁相十进单元
P_N	噪声功率
P_{NA}	幅度噪声功率
P_{norm}	变容二极管倍频器的功率系数
P_{NP}	相位噪声功率
Q	谐振电路的品质因数; 变容二极管的品质因数 ($Q = \text{电抗}/\text{电阻}$)
Q, q	电荷
q	电子的电荷量; 矩形波微分后的衰减常数; 混频比; f_2/f_1 ; $f_2 > f_1$
q_d	二极管体内的总电荷; 以输入频率的低端去归一混频器输出频率的低端之值
q_h	以输入频率的低端去归一混频器输出频率的高端之值
R	电阻; 连分数的近似余数
r	混频器输入频率的低端频率 f_1 的 r 次倍频率
R_b, r_b	反向偏置二极管的等效电阻
r_{bb}'	集总基极电阻

RC	阻容网络
R_d, r_f	正向偏置二极管等效电阻
RF	射频
R.M.S., r.m.s.	均方根
R_r, R_f	级数的余项
$R_s, R_i(v)$	半导体二极管的体电阻; 信号发生器的内阻
$R_\varphi(\tau), R_\psi(\tau)$	随机相位的自相关; 频偏
R_0	LC 电路的串联谐振电阻
S, S_1, S_2	脉冲面积
s	拉普拉斯变换算子; 耦合系数和电路 Q 值的乘积; 混频器输入频率高端 f_2 的 s 次倍频
$\frac{S}{N}, \text{SNR}$	信噪比
$(\text{SNR})_L$	“环路信噪比”
SNR	信号与相位噪声比
$(\text{SNR})_{\text{SSB}}$	单边带信号与相位噪声比
SPD	采样鉴频器
SRD	阶跃恢复二极管
SSB	单边带
$S/S_p\text{SB}$	信号与寄生边带之比
$s(t)S(v)$	倒电容 (即 $1/C$); 时间函数; 电压函数
$S_\varphi(\omega), S_\varphi(f)$	双边相谱密度
$S'_\varphi(f)$	单边相谱密度
$S_{\varphi_{an}}(\omega)$	辅助振荡器相位噪声谱密度
$S_{\varphi_{in}}(\omega)$	输入相位噪声谱密度
$S_{\varphi_s}(\omega)$	总的相位噪声谱密度

$S_{\varphi_{xn}}(\omega)$	输出相位噪声谱密度
T	绝对温度; 周期持续时间; 时间延迟; 锁相环路滤波器的时间常数
t	时间; 变量
T_{L1}, T_{L2}	一阶、二阶环路的快捕时间
T_p	捕捉时间
T_1, T_2	锁相环路滤波器的时间常数; 晶体管
u	有理混频比 q 的整数分子
UHF	超高频
$u_i(t)$	干扰信号
u_m	整数
$u(t)$	输入波形; 周期性不连续函数
V, v	电压
v	有理混频比 q 的整数分母
V_B	偏置电压; 结击穿电压
V_C	开关信号的幅度
V_{CC}	集电极的直流电压
V_{CEsat}	集-射间饱和电压
VCO	压控振荡器
VCXO	压控晶体振荡器
VHF	甚高频
$v(i)$	电压, 电流函数
VLF	甚低频
V_P	变容二极管倍频器的偏置电压
V_0	偏置电压
$V_0, v_0(t)$	压控振荡器的输出电压
$v_2, V_2(s)$	压控振荡器的控制电压; 拉普拉斯变换
$v_{1,m}, v_{2,m}$	$V_{1,m}$ 的范围
$v_{3,m}, v_{4,m}$	$V_{1,m}$ 的范围

$V_{1,m}, V_{1,m}$	频率合成方程有解时有理数线上的间隔
x_{ai}	第 i 个辅助振荡器的归一化频率
X_0	频率合成器中辅助支路的归一化频率
$x_0, x_0^{(i)}$	转移载波的归一化频率; i 次十进模中转移载波的归一化频率
x'_0, x''_0	转移载波的分量
x_{0i}	整数 ($i = 0, 1, \dots, 9$)
X_1	整数, 归一化频率的分子, f_x/f_i
$X_1, X_2, \dots$	最大与最小质数的乘积
$X'_1, X_2, \dots$	仅仅是最大质数的乘积
$x_1, x_2, \dots$	仅仅是最小质数的乘积
$y(t), Y(s)$	因变数 (函数); 时间函数: ——; 拉普拉斯变换。
Y_1	整数, 归一化频率的分母, f_x/f_i
$y_1, y_2, \dots, y_r, \dots$	部分分频系数
$Y_2, Y_3, \dots$	部分分频系数
Z	阻抗; 混频器的匹配阻抗
$z_1, z_2, \dots, z_k$	最小质数的乘积
α	二极管常数 ($\alpha = n\lambda$)
α_F	正向短路电流增益 (共基极接法)
α_n	归一化幅度 (A_n/A_1)
α_R	反向短路电流增益 (共基极接法)
α_T	谐振电路的温度系数
$\alpha(t)$	归一化幅度
α_v	谐振电路的电压系数
α_+, α_-	归一化幅度
β_F, β_R	正向、反向短路电流增益 (共射极接法)
γ	杂质分布常数
γ_n	n 次谐波分量的相角

$\Upsilon(v)$	随电压变化的杂质分布特性
Δ	有限小的变量, 干扰幅度等等
δ	衰减系数, 阻尼系数
$\Delta f_{p\max}, \Delta f_{p\min}$	最大、最小捕捉频率
Δf_0	压控振荡器自由振荡的频率不稳定性的最大值; 多重周期技术引起的频率偏移
$\Delta\omega$	输入(参考)频率与压控振荡器自由振荡频率的差值
$\Delta\omega_H, \Delta\omega'_H$	同步带
$\Delta\omega_L, \Delta\omega'_L$	快捕带
$\Delta\omega_P, \Delta\omega'_P$	捕捉带
$\Delta\omega_{PO}$	失锁频率
$\Delta\omega_0$	压控振荡器自由振荡频率的不稳定性的最大值
ϵ	表示一组数的符号
ϵ	介电常数; 任意小量
ξ	锁相环路的阻尼系数
η	效率
Θ, Θ_H	电流通角, — — —, 半脉冲幅度
λ	二极管和晶体管的特性常数
ν	频率(调制的一, 等); 失谐
π	3.14159
Π	乘法倍数的表示符号
Σ	求和的符号
$\sigma^2[\Delta_i\varphi]$	累加相位的方差
τ	差分时间延迟; 时间间隔
τ_d	少数载流子的寿命
τ_H	半脉冲幅度外的脉宽
τ_1, τ_2	脉冲宽度; 传播延时