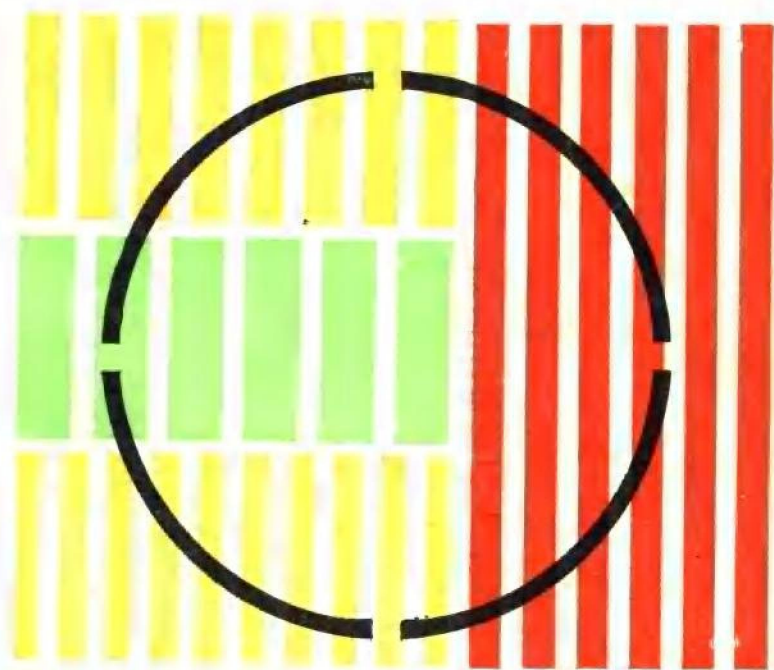


锁相频率合成

〔美〕威廉 F·依根 编著

张其善 柳重堪 梁钊 译



人民邮电出版社

WILLIAM F. EGAN
Frequency Synthesis
by Phase Lock
John Wiley & Sons, Inc.1981

内 容 简 介

本书重点介绍锁相频率合成技术的原理与设计。内容包括：频率合成的基本概念、调制与噪声、合成器的部件结构与分析、环路的辅助电路、大信号特性和频谱纯度等。

本书可供从事通信、测量、遥控遥测和雷达等专业的技术人员、科研人员以及高等院校师生参考。

锁 相 频 率 合 成

[美]威廉 F·依根 著
张其善 柳重堪 梁钊 译
责任编辑：董乐前

*

人民邮电出版社出版
北京东长安街27号
天津新华印刷一厂印刷
新华书店北京发行所发行
各地新华书店经售

*

开本：850×1168 1/32 1984年8月第一版
印张：10 12/32页数：166 1984年8月天津第一次印刷
字数：270千字 印数：1—5,300册
统一书号：15045·总2893—无6287
定价：1.55元

前 言

频率合成器的应用日益广泛。频率合成器应用于民用电台、高保真度接收机及其它通信、测试设备中，使得从许多频率中选择某一工作频率的操作变得极为简单而又精确。其应用之所以广泛，大概主要归因于两种趋向：一是由于通信频谱日益拥挤，二是由于计算机和微处理机的应用与日俱增。频谱拥挤要求有高精度的发射频率，以便于波道的密集分布；同时又要求选择频率十分容易，只有这样，才能有效地使用现有的波道；当用计算机或微处理机进行控制的时候，还要求能根据数字指令来选择频率。频率合成器正好能满足这些要求。此外，对于那些既使用过采用了频率合成技术的现代测试设备又使用过老设备的人们，就更为赞赏频率合成的另一优点，即用起来非常方便。然而，如果没有集成电路的同时发展，就很难满足上述要求。随着元器件的发展，也就产生了许多设计和分析的方法与技巧，这些正是本书要讲述的。

由于频率合成器的设计涉及到极为广泛的技术领域，本书的内容便只限于有关频率合成器设计的特殊概念，并阐明如何把各种技术领域的内容运用到合成器的设计中来。因此，本书用一整章的篇幅来讨论鉴相器这一关键部件。另一章则阐述合成器所特有的各种分频器。另一方面，对于在合成器设计中很重要的振荡器的参数给予了充分的注意，但不去讲述基本振荡器的设计。此外，本书还较详细地讲述了控制系统的分析方法，主要是波特图，而这些方法的基本原理则不是本书讲述的内容。

在频率合成器的专题范围内，本书着重强调了锁相频率合成器，然而也未忽略其它类型的合成器，如直接式和数字式频率合成器。对这些合成器的工作原理都进行了讲解，并讨论了设计和使用

方面的一些基本原则，但是着重强调了应用得也许是最为广泛的锁相技术。

为了使读者更好地理解本书未能详述的有关内容，便于查阅丰富的有用资料，以及参考别的处理方法，在书末附录的参考文献表中列举了大量的参考书目。书中的脚注通常由文献表中每一条款的第一部分组成，并在参考文献表中按英文字母顺序排列。

为了澄清概念，书中列举了大约四十道例题。此外，每一章后均有习题，全书总共约有七十道习题。为了便于自学，许多习题都与例题相仿。本书很适合于自学，它既可用作教科书，也可以作为参考书。读者对象是大学毕业的电气工程师，或学完了付氏变换、拉氏变换、数字电路及控制系统的大学高年级学生。本书不仅对频率合成设计师或未来的频率合成设计师有用，而且也有益于使用频率合成的系统工程师。书中讲述的许多概念，如频谱纯度的指标及其测量、非线性元件噪声的影响等，甚至对没有频率合成器的系统都有参考价值。

本书在讲述频率合成最重要的基本原理时，试图保持前后的连贯性。一开始先讨论频率合成的基本运算，即怎样对频率进行加减乘除。第二章说明如何把这些运算应用于三种基本的频率合成器中。第三章则更详细地阐述了最基本的锁相频率合成器。

在学完了前三章有关频率合成器的工作原理以后，我们便开始学习设计方法，使之满足系统要求。第四章考虑在一切振荡器中都存在着的噪声边带，研究如何描述这些噪声及其它不需要的分量，说明它们是怎样通过频率合成器的，以及怎样通过采用频率合成器的系统的。

整个第五章都研究鉴相器。对六种鉴相器进行了讨论和比较，讨论了采样对环路动态特性的影响以及它对传输噪声频率的影响。这些内容在锁相环路的文献中所见甚少，但对锁相频率合成器却极为重要。第六章讨论锁相合成器中所使用的各种分频器，包括前置分频器，吞脉冲分频器及可变分频器的实用电路形式。给出了按

一定的数字指令来获得合成频率的方法，还讨论了严格的定时参数。

实际中经常遇到的较为复杂的电路，如二阶环路、三阶环路、变频环路、数字相位技术以及分数N分频技术等等，都在第七章中讨论。对于带有积分器、低通滤波器或滞后超前滤波器的二阶环路也作了综述。同时，运用公式表、等效电路、波特图的研究以及瞬态响应的对比，对作为环路参数的函数的各种特性进行了比较。并讨论了如何把理论运用于非理想二阶环路的实际环路中去。

第八章从考察一个单环路的捕获过程入手，研究了合成器环路在获得锁定的过程中的非线性性能。对环路产生限幅振荡的可能性也作了说明。同时为采用三种不同类型鉴相器的二阶系统提供了大量公式。假锁是锁相合成器中最重要的问题之一。最常见的一种假锁与环路的采样性质有关，而且为合成器中的锁相环路所特有。对这种假锁以及由于相移过大而产生的假锁都进行了讨论。对捕获过程的计算机模拟也作了说明，并讨论了捕获过程的测试方法。第九章描述了为实现相位锁定而采取的许多捕获辅助技术，没有这些技术，相位锁定也可能难以实现，其中的一种方法还有助于改善频谱纯度。

最后，在第十章我们讲述频谱纯度，讨论如何获得一定的频谱纯度，频谱纯度的定义及其测量，各种频谱纯度测量之间的关系以及与设计指标的关系。

威廉 F·依根

1980年5月

目 录

符号	(1)
第一章 导论	(4)
1.1 频率的含意	(4)
1.2 频率合成的含意	(5)
1.3 频率与电压电流的相互转换	(6)
1.4 频率的数学运算	(9)
1.4.1 加法和减法——混频器	(9)
1.4.2 倍频器	(14)
1.4.3 分频器	(15)
习题	(16)
第二章 合成器的类型	(19)
2.1 数字(查表)合成器	(19)
2.2 直接合成器	(21)
2.3 锁相(间接)合成器	(27)
2.4 组合法	(30)
习题	(34)
第三章 锁相频率合成器, 单环路, 线性特性	(36)
3.1 频率合成部件概述	(36)
3.1.1 压控振荡器(VCO)	(36)
3.1.2 除N分频器($\div N$)	(41)
3.1.3 鉴相器	(41)
3.1.4 环路滤波器	(42)
3.2 环路工作原理	(43)
3.2.1 定性分析	(43)
3.2.2 数学描述	(46)

3.3	环路低通滤波器	(55)
3.4	同步带	(58)
3.5	暂态响应	(60)
附录3A	线性化网络的设计	(64)
3A.1	直线近似法	(65)
3A.2	连续近似法	(69)
	习题	(70)
第四章	调制、边带及噪声谱	(72)
4.1	调幅和窄带调频的频谱表示法	(73)
4.2	单边带信号分解成调幅及调频信号	(76)
4.3	本地振荡器在混频器中的调制效应	(79)
4.3.1	调频转移	(79)
4.3.2	调幅抑制	(80)
4.3.3	本振分量之间的混频作用	(81)
4.3.4	中频干扰	(82)
4.4	倍频信号的调制作用	(85)
4.5	分频信号的调制作用	(85)
4.6	振荡器的频谱	(95)
4.7	谱密度之间的关系	(98)
4.8	典型频谱形状	(103)
4.9	部件噪声	(107)
4.10	合成器输出端的噪声密度	(108)
	习题	(112)
第五章	鉴相器	(114)
5.1	鉴相器的种类	(114)
5.1.1	平衡混频器	(114)
5.1.2	高速采样电路	(116)
5.1.3	异或门	(119)
5.1.4	触发器	(121)
5.1.5	采样保持式鉴相器	(126)

5.1.6	鉴相鉴频器	(134)
5.2	采样电路对环路传递函数的影响	(143)
5.3	Z变换表示法	(152)
5.4	滤波器的位置	(157)
	习题	(157)
第六章	分频器	(159)
6.1	触发器	(159)
6.2	分频器种类	(164)
6.3	可预置分频器	(169)
6.4	前置分频器和吞脉冲分频器	(177)
6.5	其它的基数	(183)
6.6	预置和偏移	(183)
6.7	用于合成器的其它逻辑电路	(187)
6.8	注意事项	(187)
6.9	与模拟输入接口	(188)
	习题	(191)
第七章	较复杂的配置	(194)
7.1	合成器中的外差作用	(194)
7.1.1	输出信号上所产生的寄生耦合	(195)
7.1.2	环路上的寄生耦合	(196)
7.1.3	由寄生信号所引起的误计数	(198)
7.1.4	中频滤波器的影响	(200)
7.1.5	中频动态范围	(203)
7.2	高阶环路	(203)
7.2.1	一般二阶环路	(205)
7.2.1.1	滞后超前滤波器	(206)
7.2.1.2	滞后(低通)滤波器	(209)
7.2.1.3	积分型超前滤波器	(209)
7.2.1.4	几何解释	(209)
7.2.1.5	等效电路	(212)

7.2.1.6 暂态响应	(215)
7.2.2 具有积分型超前滞后滤波器的环路	(217)
7.2.3 两种响应之间的相似性	(226)
7.3 数字相位式合成器	(227)
习题	(234)
第八章 大信号特性	(237)
8.1 能获得锁定的单环路	(238)
8.1.1 最佳增益的形成	(239)
8.1.2 恒定的增益	(242)
8.2 非线性特性的表达式	(244)
8.2.1 一阶环路	(246)
8.2.2 二阶环路	(248)
8.2.2.1 正弦型鉴相器	(249)
8.2.2.2 三角型鉴相器	(251)
8.2.2.3 锯齿型鉴相器	(252)
8.2.2.4 一般鉴相器的特性	(255)
8.2.2.5 器件的饱和以及工作点的漂移所产生的影响	(256)
8.3 捕获过程	(258)
8.4 由相移所产生的假锁	(262)
8.5 由采样所产生的假锁	(265)
8.6 捕获的模拟	(267)
8.7 捕获的测试	(270)
附录8A 简单环路获得锁定的详细分析	(274)
附录8B 采用CSMP III的暂态模拟	(276)
习题	(279)
第九章 捕获辅助电路	(281)
9.1 鉴相器捕获辅助电路	(281)
9.2 搜索振荡器捕获辅助电路	(283)
9.3 改变环路参数以利于捕获	(286)
9.4 捕获辅助逻辑	(287)

9·4·1	鉴相鉴频器	(287)
9·4·2	分频器的保持逻辑	(288)
9·4·3	限制相位范围	(291)
9·4·4	减小鉴相器的线性范围	(292)
	习题	(294)
第十章	频谱纯度	(296)
10·1	噪声的抑制	(296)
10·2	注入锁定所产生的边带	(298)
10·3	将相位噪声密度转换为稳定度的方法	(299)
10·3·1	相位与频率偏移	(299)
10·3·2	阿仑方差	(301)
10·3·3	关于其它时域稳定度的计算	(306)
10·4	频率稳定度的测量	(306)
10·4·1	用鉴相器测量	(307)
10·4·2	用鉴频器测量	(308)
10·4·3	边带密度的测量	(310)
	习题	(311)
	参考文献	(312)

符 号

(某些符号有多种含义，下面没有把所有含义都给出，但根据内容即可明白它的意义。)

C	控制数
c	在周期单元中表示数量的下标
D-A	数模变换器
ΔB_c	关于载波的分贝数，这是指在频谱中心部分的功率
E_c	相对误差增益
E_n	第 n 周的相对频率误差
η	效率
F	最终计数；实际频率（与稳态有偏移的频率 f 相比）
f_I	中频，混频器的频率输出
f_L	本振频率
f_m	调制频率
f_{OSC}	振荡器频率
f_p	滤波器极点频率
f_{REF}	参考频率（见图3·7a）
f_s	采样频率；鉴相器反馈信号的频率（见图8·2）
f_S	信号频率；到混频器的较弱的输入频率
f_z	滤波器零频率
f_o	见下面关于 ω_0 的解释
f_1	VCO输出开环频率变化（见图3·7a）
G	正向环路增益；增益；电导
G_R	相对增益
H	反向环路增益
IF	中频；混频器的输出信号或其频率

I_m	虚部
K_F	正向增益 (单位: 秒 ⁻¹)
K_{LF}	环路滤波器增益常数 (无量纲)
K_φ	鉴相器增益常数 (单位: 伏/周或伏/弧度)
K_v	VCO增益常数 [单位: 赫/伏或 (弧度/秒) /伏]
$\xi(f_m)$	离频谱中心为 f_m 处的相对SSB电平
LO	本振: 通常为输入到混频器的较强信号
LSB	最低有效位比特。3LSB表示第三最低有效位比特
m	调制指数 = 以弧度计的峰值相移
MSB	最大有效位比特
O	偏移
ω	弧度频率
ω_H	最大同步频率 ($\frac{1}{2}$ 总的同步范围)
ω_L	环路增益为 1 的频率。对于良好的阻尼环路, 它接近于 3dB 闭环带宽。
ω_n	自然频率
ω_{OSC}	振荡器频率
ω_p	滤波器极点频率
ω_{PI}	最大捕获频率 ($\frac{1}{2}$ 总的捕捉带)
ω_s	采样频率; 鉴相器中反馈信号的频率 (见图8·2)
ω_S	最大锁住频率或锁定频率 ($\frac{1}{2}$ 总的锁定范围)
ω_z	滤波器零点频率
ω_0	环路速度常数。对 I 型环路, 当环路滤波器维持在它的低频增益时开环增益为 1 处的频率。对于 II 型环路, ω_0 为无穷大。
P	预置数; 功率
p	单边功率谱密度
PD	鉴相器
PM	相位调制器

φ	相位
r	表示以弧度为单位的量的下标
Re	实部
RF	无线电频率：通常指送到混频器的较弱输入信号或其频率
s	拉普拉斯复频率
S_φ	相位功率谱密度
S_f	频率功率谱密度
sec	秒
SSB	单边带
T_A	计数周期（平均时间）
T_s	采样周期
T_S	计数开始之间的时间，锁定或捕获时间
VCO	压控振荡器
VMP	模数可变的分频器
z	Z变换变量
ζ	阻尼系数
\sim	（标在字母之上）有效值即均方根值
$X _y$	在条件 y 下或关于 y 的变量 X
$X _{y_1}^{y_2}$	y 在 y_1 和 y_2 之间时的变量 X
\triangleq	定义为
$\angle x$	x 的角度或相位
\approx	低通滤波器
\approx	带通滤波器

第一章 导 论

通常，人们把频率看成是一些变量（如电压或电流）的参数，这些变量可以用来确定一个系统的状态。但是，在频率合成的讨论中，则是把频率本身作为一个状态变量。如同电压电流一样，频率可在电路中进行加、减运算，同时也可乘以或除以一个常数。还可以把频率转换成其它形式的变量或把其它变量转换为频率。上述这些运算与转换，是频率合成的基本过程。因此我们将在第一章中讨论它们。不过在这之前应当先简要地说明一下频率和频率合成的含意是什么。

1.1 频率的含意

若在一个给定的时间间隔内，信号是周期性的，我们就说该信号有一个瞬时频率，这个瞬时频率定义为在给定的时间间隔内两个重复点之间的时间的倒数。如果周期是连续变化的，我们仍可知道其瞬时频率。若信号是等幅正弦波，其瞬时幅度和相位之间有对应关系，则频率是相位对时间的导数。图1.1表示一段正弦波，其瞬时频率为 f_1 。从傅里叶变换的角度来看，真正的单一频率指的是 t_1 时刻之前和之后其持续时间均为无限的正弦波。一个持续时间有限的正弦电脉冲，其傅里叶频谱如图1.2所示。然而，只要能量集中在比所讨论的分辨率窄的频谱宽度内，同时我们仅对包含在波的持续时间内的时间感兴趣，那么就可以认为能量集中在单一频率上。

尽管某些过程最好用瞬时频率来理解，但还是需要知道用傅里叶分析来描述频率响应的各种影响。例如滤波器通常是用傅里叶分析来描述的，因此滤波器对信号的影响应由所讨论的信号频谱来确

定。通过讨论脉冲的傅里叶频谱与滤波器通带的关系即可知道该滤波器是否会使正弦脉冲产生失真。

利用解析信号^[1]的概念可更准确地定义瞬时频率，但是鉴于本书的目的，没有必要讨论得那么深。

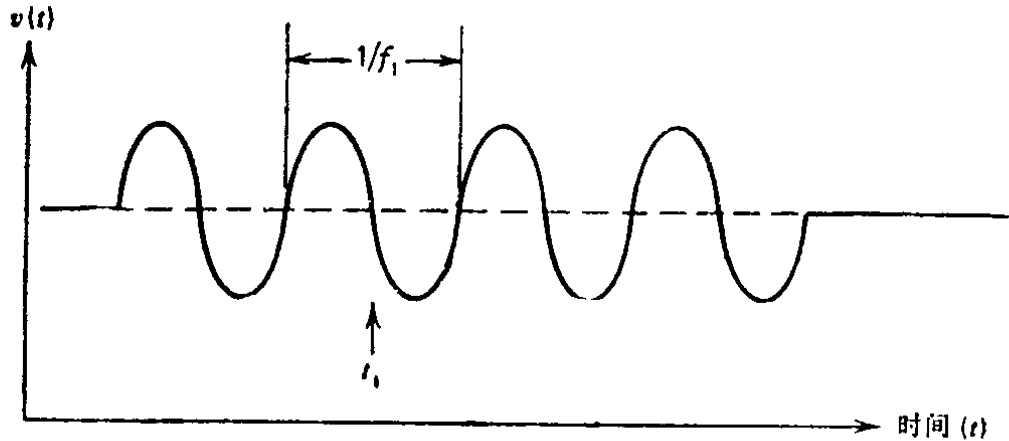


图 1·1 在一个区间内是周期的信号

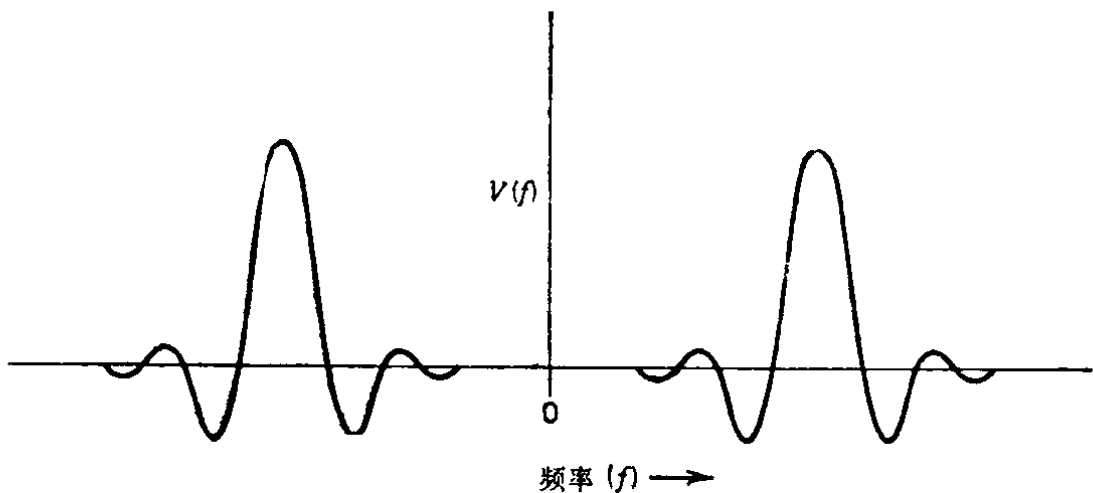


图 1·2 无线电信号的频谱

1·2 频率合成的含意

频率合成就是产生一个或若干个频率，这些频率恰为参考频率的倍数。通常，参考频率是非常准确的，而合成的频率在参考频率

[1] Bracewell, pp.268—271.

的分谐波的所有倍数的范围内是可以选择的；也就是说，输出频率由下式给定：

$$f_{\text{OUT}} = \frac{nf_{\text{REF}}}{M} \quad (1.1)$$

其中： n 和 M 都是数； n 从 N_{min} 变到 N_{max} ； M 是常数； f_{REF} 是参考频率。

1.3 频率与电压电流的相互转换

图1.3通过电路说明了将频率转换成电压或电压转换成频率的变换过程，其中的电路是用A到D的传递函数表示的。这些传递函数给出了各方框的输入变化与输出变化之比。

我们所要处理的变量（如图1.3中的 f_1 ， v_1 和 φ_1 ）总是表示从一个初始值或稳态值开始变化的。然而有时我们用大写字母 F 来强调所讨论的是不变化的实际频率。

利用鉴频器可以把频率转换成电压^[2,3]。而鉴频器可采用调谐

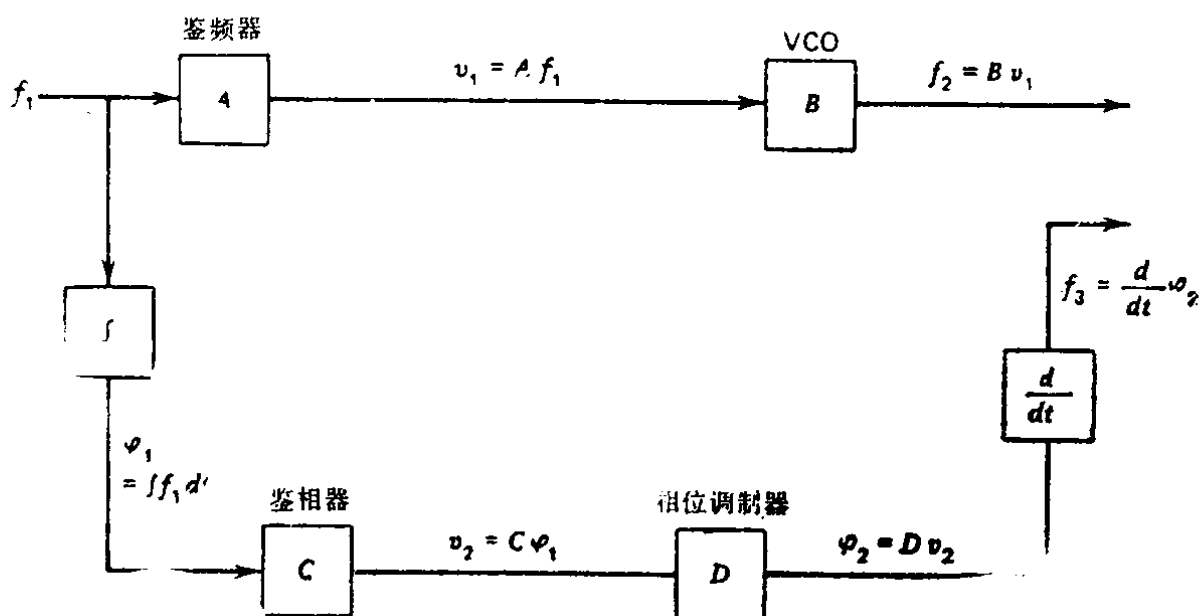


图 1.3 频率转换

[2] Manassewitsch, pp.407—412.

[3] Klapper, pp.37及186—190.

电路，以得到其幅度依赖于频率的信号，这就是鉴频过程，为的是得出与频率成比例变化的电压。此外，鉴频器还能产生与信号同步的等宽度脉冲，并可取这些脉冲的平均电压作为频率的度量，如图1·4所示。如果在某些工作点上，当输入频率每变化 $1Hz$ 时鉴频器输出电压增加 $2mV$ ，那么图1·3中的传递函数 A 就是一个等于 $2 \times 10^{-3}V/Hz$ 的增益常数。

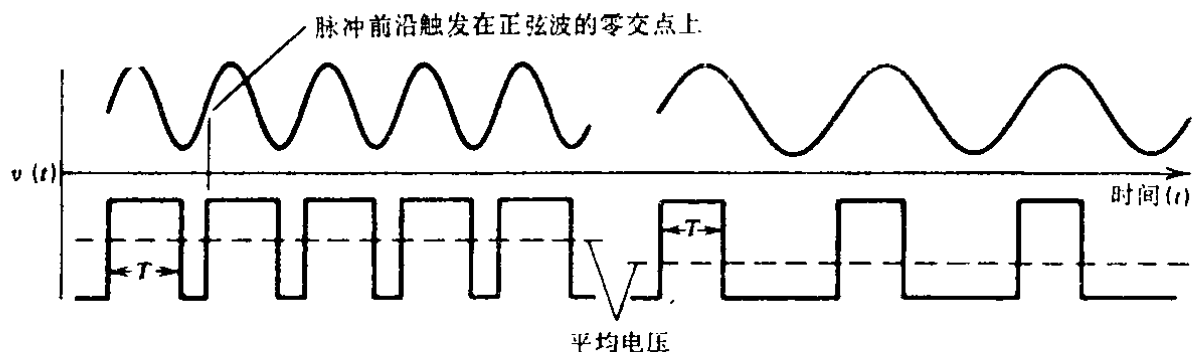


图 1·4 等脉冲宽度鉴频器波形

利用压控振荡器 (VCO) 可以把电压转换成频率。这里，调整电压改变变容二极管上的偏置，从而可以改变它的电容量及 VCO 的振荡频率。此外，如果把钇铁石榴石 (YIG) 球体置于磁场内，而且当球体构成振荡器的谐振电路的一部分时，电流可以通过改变磁场而控制频率。如果调整电压每增加 $1V$ 时，这种振荡器的频率减少 $3MHz$ ，则图1·3中的 B 就等于 $-3 \times 10^6 Hz/V$ 。

利用鉴相器可把相位 (频率的积分) 转换成电压。一个普通的鉴相器是由两个输入信号有 90° 相移的平衡混频器构成的。VCO和鉴相器都将在第三章讨论，而第五章则将全部用来讨论鉴相器。

利用相位调制器可以把电压转换成相位。当改变变容二极管的偏置，并使变容二极管调谐电路的中心频率或截止频率产生变化的时候，变容二极管调谐电路就能够改变相位。另外，相位正交的信号可以通过线性组合而产生所需要的相位。第三种方法用图1·5举例说明。其中，锁相环 (PLL) 用来把电压转换成相位。由于鉴相器 (PD) 的输出电压与相位成比例，同时由于锁相环总是迫使输出电压去抵消 V_{mod} ，从而VCO的相位将跟踪 V_{mod} 。