

频率调制技术

姜文潮 编

数字与模拟电子线路教学小丛书

频率调制技术

姜文潮 编



高等教育出版社

N761

2

高等教

N761/2

数字与模拟电子线路教学小丛书

频率调制技术

姜文潮 编

高等教育出版社

本书较系统地讲述了频率调制的基本理论和技术问题，全书分为四章。

本书内容包括三部分：第一章讲述调频信号的性质，在时域与频域中做了较全面的分析；第二和第三章分别讲述直接调频和间接调频的各种方法与电路技术，并对调频线性进行了分析，提出了电路设计要点；第四章讲述调频线性的测量原理与方法。书中物理概念较清楚，并做了较为严谨的数学分析，有较多的插图和公式，配有必要的例子。

本书可作为高等院校无线电技术及有关专业的高年级学生、研究生和教师的教学参考书，也可供从事有关专业工作的科技人员作为专题参考。对于频率调制技术有兴趣的读者，本书也是一本较好的自学读物。

本书经电工教材编审委员会电子线路编审小组委托梅都同志审阅，同意作为高等学校教学参考书出版。

责任编辑：李永和

数字与模拟电子线路教学小丛书

频率调制技术

姜文潮 编

*

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

北京市顺义县印刷厂印装

*

开本 787×1092 1/32 印张 6.5 字数 138,000

1985年7月第1版 1988年7月第1次印刷

印数 00,001—11,000

书号 15010-0562 定价 1.25 元

前 言

频率调制是现代传输信息的主要调制方式之一，它在调频通信、调频广播和电视伴音、电子仪器以及无线电电子工程的其他方面，都已获得广泛应用。虽然，在通信系统、信号分析、高频(非线性)电子线路等有关书籍中均涉及到频率调制的理论和技术问题，但它们限于各自的研究范围，对于“频率调制技术”这一专题，都显得不够系统和完整。笔者多年来从事与此有关的教学和科研工作，深感需要有一本专门研究频率调制技术及其基本理论的书。

《频率调制技术》作为一本专题书籍，它既要与有关教材相衔接，又应有自己的独立体系。在内容上，将频率调制的信号分析、调频方法与电路技术等方面融合起来研究，作出较为系统和完整的论述。它应作为理论联系实际桥梁，对解决工程技术问题提供理论基础和分析方法，并佐以必要的参考实例。

本书内容分为三部分。第一章讲述调频信号的性质，在时域与频域中做了较全面的分析；第二和第三章分别讲述直接调频和间接调频的各种方法与电路技术，并对调频线性进行了分析，提出了电路设计要点；第四章讲述调频线性的测量原理与方法。本书中有些内容与讲述方法，在已出版的有关书籍中还未曾出现过。如有不妥之处，请读者指正。

本书可作为高等院校无线电技术专业的高年级学生、研究生和教师的教学参考书，也可供从事有关专业科技人员

10A11/68/100 . . .

作为专题参考书。本书尽管有较多的数学分析，但由于注重物理概念的讲述，并设计了丰富的插图和必要的例子，因而它还可供对于频率调制技术有兴趣而且希望获得这方面知识的读者自学之用。

本书承北京邮电学院梅邨同志审稿，提出了宝贵意见。笔者还曾受到南京工学院无线电工程系谢嘉奎副教授的热情鼓励和支持。特此致谢。

姜文潮

1983年“五一”节

于南京工学院

目 录

第一章 调频信号的性质	1
§ 1-1 调频信号和调相信号	1
1-1-1 基本定义和时域表示式	2
1-1-2 调频与调相的关系	4
1-1-3 单音信号调制的时域表示式	6
§ 1-2 窄带调频——准线性频谱分析	8
1-2-1 窄带调频的条件和时域表示式	8
1-2-2 频谱函数	9
1-2-3 单音窄带调频的表示式和相量图	12
1-2-4 准线性调制	14
§ 1-3 宽带调频(单音信号调制).....	16
1-3-1 频谱分析	16
1-3-2 相量图	19
1-3-3 反相调频	22
1-3-4 频谱有效宽度	24
1-3-5 功率关系	29
1-3-6 调频与调幅的比较	30
1-3-7 调频与调相的比较	34
1-3-8 预加重和去加重	37
§ 1-4 宽带调频(复杂信号调制)	39
1-4-1 多频信号调制	39
1-4-2 周期性信号调制	42
1-4-3 方波调制	45
1-4-4 随机信号调制	48
1-4-5 频谱宽度的估算	53

§ 1-5 调频信号通过非线性网络的传输	54
1-5-1 “类傅里叶”级数分析	54
1-5-2 用滤波法恢复调频信号	56
1-5-3 非正弦调频信号	59
§ 1-6 调频信号通过线性滤波器的传输	61
1-6-1 准静态情况	62
1-6-2 幅频和相频特性均为直线的滤波器	67
§ 1-7 调频微分方程	70
§ 1-8 产生调频信号的方法	71
第二章 直接调频法	
§ 2-1 调频电路的性能指标和调频线性的分析	73
2-1-1 一般性能指标	73
2-1-2 调频线性的分析和非线性指标的定义	77
2-1-3 $\xi_n, \eta_n, \sigma_n, \delta_n$ 四个非线性指标的相互关系	83
§ 2-2 变容管调频电路	85
2-2-1 准静态调频	87
2-2-2 线性调频的条件	91
2-2-3 调频特性和非线性失真系数	93
2-2-4 电容变化指数 ν 的调整	95
2-2-5 电路设计	97
2-2-6 电路连接形式	103
2-2-7 电路实例	106
§ 2-3 电抗管调频电路	110
2-3-1 工作原理	111
2-3-2 性能分析	115
§ 2-4 方波调频	120
2-4-1 方波调频的基本方法	120
2-4-2 调频方波发生器电路	125
§ 2-5 三角波调频	130
2-5-1 三角波调频的原理与方法	130

2-5-2	界阈传感器(施密特触发器).....	135
2-5-3	压控开关、反相器和积分器.....	137
2-5-4	调频三角波发生器电路.....	139
2-5-5	波形变换网络.....	143
§ 2-6	锁相环调频.....	145
§ 2-7	模拟计算机调频.....	148
§ 2-8	频率负反馈系统.....	151
第三章 间接调频法		
§ 3-1	利用调相获得调频信号.....	156
§ 3-2	变容管失谐回路调相.....	158
§ 3-3	桥式调相.....	162
3-3-1	RC 桥式调相电路.....	162
3-3-2	RLC 桥式调相电路.....	167
§ 3-4	变跨导调相.....	170
§ 3-5	合成法(阿姆斯特朗法)调相.....	173
§ 3-6	变时延调相.....	177
§ 3-7	间接调频扩大频偏的方法.....	180
第四章 调频线性的测量方法		
§ 4-1	测量调频特性.....	183
§ 4-2	测量调频灵敏度特性.....	184
§ 4-3	测量非线性失真.....	187
附录 第一类贝塞尔函数表.....		
参考文献		196

第一章 调频信号的性质

§ 1-1 调频信号和调相信号

为了有效地传输信息，需要将代表信息的原始信号进行频率变换。通常是利用频率较高的电振荡，来“运载”较低频率的原始信号，这就是调制。用来“运载”原始信号的高频振荡称为载波；代表信息的原始信号称为调制信号。

载波通常是一个频率较高的简谐波，可以表示为

$$s_c(t) = A \cos(\omega_c t + \phi_0) \quad (1.1.1)$$

它的幅度 A 、角频率 ω_c 和初相位 ϕ_0 均为实常数。瞬时相位

$$\theta(t) = \omega_c t + \phi_0 \quad (1.1.2)$$

随时间 t 线性增大。已经知道，正弦量 $s_c(t)$ 可用角速度为 ω_c 的旋转相量来表示，因而，可以写成 $Ae^{j(\omega_c t + \phi_0)}$ 这样的指数形式。

已经知道，由调制信号控制高频载波的幅度时，称为幅度调制，调幅波的包络形状与调制信号成正比变化。相应地，由调制信号控制高频载波的相角时，称为角度调制。根据已调波的相角变化规律不同，有相位调制（简称调相，以 PM 表示）和频率调制（简称调频，以 FM 表示）两种。

调角波的一般形式为

$$s(t) = A \cos \theta(t) \quad (1.1.3)$$

式中，幅度 A 为恒定值，瞬时相位 $\theta(t)$ 随着调制信号而变化。

用符号 $\hat{s}(t)$ 表示 $s(t)$ 的指数形式,即

$$\hat{s}(t) = Ae^{j\theta(t)} \quad (1.1.4)$$

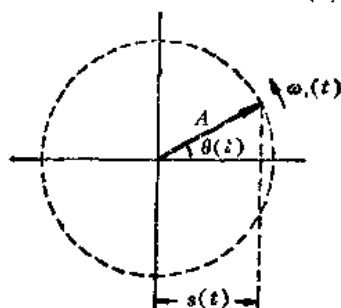


图 1.1.1 调角波的相量表示

它同样可以用一个长度为 A 的旋转相量来表示,但这时相量反时针方向旋转的角速度是一个时间变量 $\omega_c(t)$,如图 1.1.1 所示。由图 1.1.1 可见,相量在水平轴上的投影即是该调角波 $s(t)$ 。或者说,取 $\hat{s}(t)$ 的实部就是调角

波 $s(t)$,即

$$\begin{aligned} s(t) &= \operatorname{Re} \hat{s}(t) = \operatorname{Re} [Ae^{j\theta(t)}] \\ &= A \cos \theta(t) \end{aligned} \quad (1.1.5)$$

由于调角波的角频率 $\omega_c(t)$ 是一个时间变量,这就需要定义一个瞬时角频率

1-1-1 基本定义和时域表示式

定义 1 瞬时角频率

如果瞬时相位随时间 t 单调增大,在时间 $t \sim t + \Delta t$ 的平均角频率为

$$\omega_{av} = \frac{\theta(t + \Delta t) - \theta(t)}{\Delta t} \quad (1.1.6)$$

定义调角波的瞬时角频率为

$$\begin{aligned} \omega_c(t) &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \omega_{av} \\ &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\theta(t + \Delta t) - \theta(t)}{\Delta t} = \frac{d\theta(t)}{dt} \end{aligned} \quad (1.1.7)$$

瞬时角频率等于瞬时相位对时间的导数。反之，瞬时角频率的时间积分就是瞬时相位

$$\theta(t) = \int \omega_i(t) dt \quad (1.1.8)$$

定义 2 相位调制与调相信号

调角波的瞬时相位为

$$\theta(t) = \omega_c t + \phi_0 + \Delta\phi g(t) \quad (1.1.9)$$

时，称这种调角波的调制为相位调制，该调角波称为调相信号。

式(1.1.9)中， $\omega_c t + \phi_0$ 为载波的瞬时相位，它与 $g(t)$ 无关； $\Delta\phi$ 是最大相位偏移，即

$$\Delta\phi = K_F U_D \quad (1.1.10)$$

式中， U_D 是调制信号幅度， K_F 是由调相器决定的比例常数。 $g(t)$ 是归一化调制信号，它具有以下特性：

$$\left. \begin{aligned} |g(t)|_{\max} &= 1 \\ \overline{g(t)} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1.1.11)$$

调制信号 $g(t)$ 的平均值 $\overline{g(t)}$ 等于零的这一性质，将在 1-4-4 节中得到说明。

因此，调相信号可以写成

$$s_{PM}(t) = A \cos[\omega_c t + \phi_0 + \Delta\phi g(t)] \quad (1.1.12)$$

将式(1.1.9)代入式(1.1.7)；可得调相信号的瞬时角频率为

$$\omega_i(t) = \frac{d\theta(t)}{dt} = \omega_c + \Delta\phi \frac{dg(t)}{dt} \quad (1.1.13)$$

定义 3 频率调制与调频信号

调角波的瞬时角频率为

$$\omega_i(t) = \omega_c + \Delta\omega g(t) \quad (1.1.14)$$

时,称这种调角波的调制为频率调制,该调角波称为调频信号

式(1.1.14)中, ω_c 为载波角频率; $\Delta\omega$ 是最大角频率偏移(简称角频偏),即

$$\Delta\omega = K_F U_m \quad (1.1.15)$$

式中 U_m 是调制信号幅度, K_F 是由调频器决定的比例常数。

$g(t)$ 是归一化调制信号,它具有式(1.1.11)所示的特性。

为了写出调频信号的时域表示式,必须先求出调频信号的瞬时相位。将式(1.1.14)代入式(1.1.8)得

$$\begin{aligned} \theta(t) &= \int^t \omega_i(t) dt \\ &= \omega_c t + \phi_0 + \Delta\omega \int^t g(t) dt \end{aligned} \quad (1.1.16)$$

因此,调频信号可以写成

$$s_{FM}(t) = A \cos \left[\omega_c t + \phi_0 + \Delta\omega \int^t g(t) dt \right] \quad (1.1.17)$$

1-1-2 调频与调相的关系

式(1.1.12)和(1.1.17)分别为调相信号和调频信号的一般形式。比较式(1.1.9)与(1.1.16)可以看出,将调制信号 $g(t)$ 积分后对载波进行调相,就可以得到调频信号。再比较式(1.1.13)与(1.1.14)还可以看出,将调制信号 $g(t)$ 先微分再对载波进行调频,就可以得到调相信号。这些关系可以用图1.1.2来表示。

为了进一步说明这些关系,画出图1.1.3所示的波形图。假设调制信号 $g(t)$ 是三角波,如图1.1.3(a)所示。在调频时,瞬时角频率 $\omega_i(t)$ 与 $g(t)$ 成正比变化, $\omega_i(t)$ 的形状与 $g(t)$

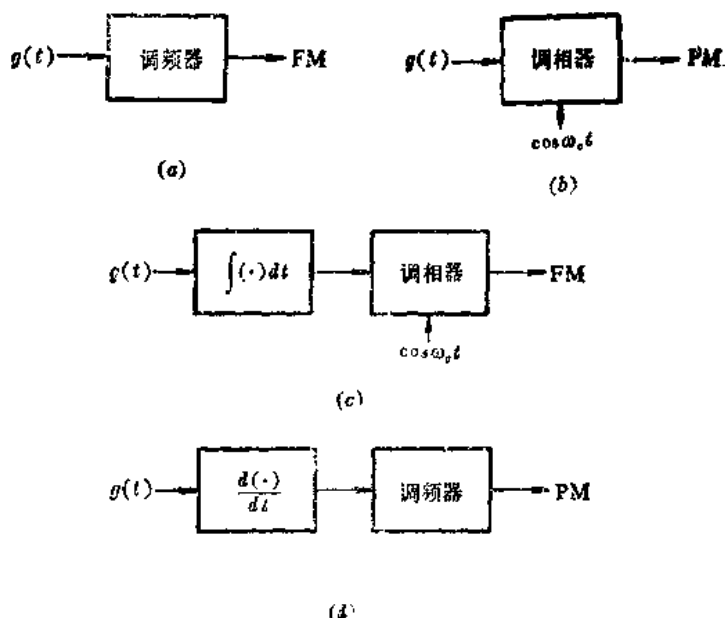


图 1.1.2 调频信号和调相信号的产生
(a), (c)——调频发生器; (b), (d)——调相发生器

一样,只是向上移了 ω_c ,如图 1.1.3 (b) 所示。图(c)是相应的调频信号波形, t 在 $0 \sim T/2$ 之间频率增高,而 t 在 $T/2 \sim T$ 之间频率减低。根据式(1.1.14),相对于 ω_c 的最大角频率偏移为 $\Delta\omega$ 。如果用三角波 $g(t)$ 来对载波进行调相,则由式(1.1.13)可知其瞬时角频率 $\omega_i(t)$ 的波形是方波,如图 1.1.3 (d)所示。图(e)是相应的调相信号波形,在 $0 \sim T/2$ 之间的角频率为 $\omega_c + \Delta\omega$,在 $T/2 \sim T$ 之间的角频率为 $\omega_c - \Delta\omega$ 。根据式(1.1.13),相对于 ω_c 的最大角频率偏移为

$$\Delta\omega = \Delta\phi \left| \frac{dg(t)}{dt} \right|_{\max} \quad (1.1.18)$$

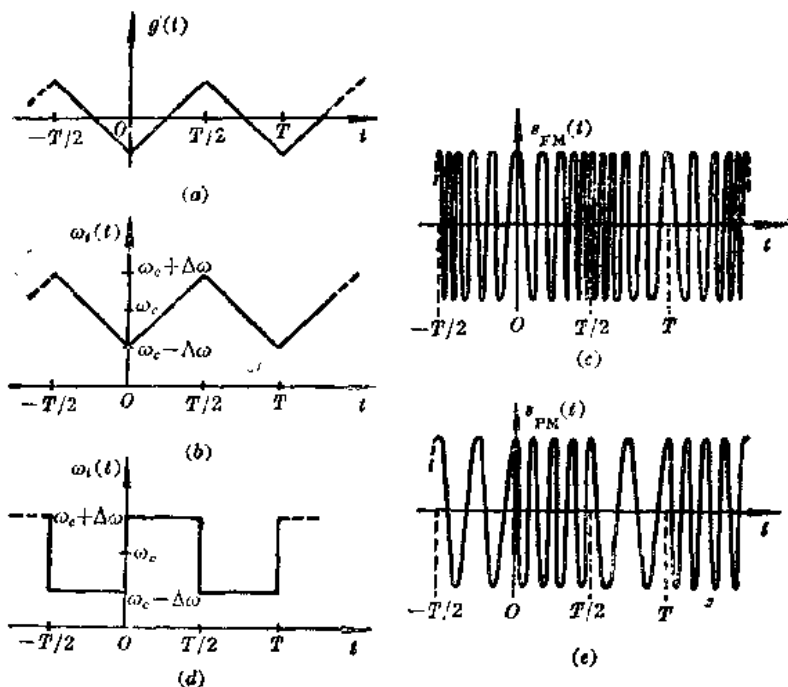


图 1.1.3 FM 和 PM 波形

(a) 调制信号；(b) 调频信号的瞬时角频率；(c) 调频信号波形；(d) 调相信号的瞬时角频率；(e) 调相信号波形

1-1-3 单音信号调制的时域表示式

单频正弦调制信号(简称单频信号或单音信号)

$$g(t) = \cos \Omega t \quad (1.1.19)$$

其积分为

$$\int^t g(t) dt = \int^t \cos \Omega t dt = \frac{\sin \Omega t}{\Omega} \quad (1.1.20)$$

将式(1.1.19)和(1.1.20)分别代入式(1.1.12)和(1.1.17)得

$$s_{PM}(t) = A \cos[\omega_c t + \phi_0 + \Delta\phi \cos \Omega t] \quad (1.1.21)$$

$$s_{FM}(t) = A \cos\left[\omega_c t + \phi_0 + \frac{\Delta\omega}{\Omega} \sin \Omega t\right] \quad (1.1.22)$$

对于调相信号, 将式(1.1.19)代入式(1.1.18)可得

$$\Delta\omega = \Delta\phi \Omega \quad (1.1.23)$$

对于调频信号, 根据式(1.1.16)可得最大相位偏移为

$$\Delta\phi = \Delta\omega \left| \int_{-\infty}^t g(t) dt \right|_{\max} \quad (1.1.24)$$

将式(1.1.20)代入上式得

$$\Delta\phi = \frac{\Delta\omega}{\Omega} \quad (1.1.25)$$

可见, 单音信号调制时, 不论是调频信号或调相信号, 它们的角频偏与最大相位偏移之间有着同样的关系。若令式(1.1.21)和(1.1.22)中

$$\Delta\phi = m_p \quad (1.1.26)$$

$$\frac{\Delta\omega}{\Omega} = m_f \quad (1.1.27)$$

则单音信号调制时的调相信号和调频信号可分别写成

$$s_{PM}(t) = A \cos[\omega_c t + \phi_0 + m_p \cos \Omega t] \quad (1.1.28)$$

$$s_{FM}(t) = A \cos[\omega_c t + \phi_0 + m_f \sin \Omega t] \quad (1.1.29)$$

式中, m_p 称为调相指数, m_f 称为调频指数, 它们都表示最大的相位偏移量。

当调制信号的幅度一定时, 调频信号和调相信号两者的调制指数(即最大相位偏移)和角频偏(即最大角频率偏移)与调制角频率 Ω 的关系, 分别示于图 1.1.4 (a) 和 (b)。

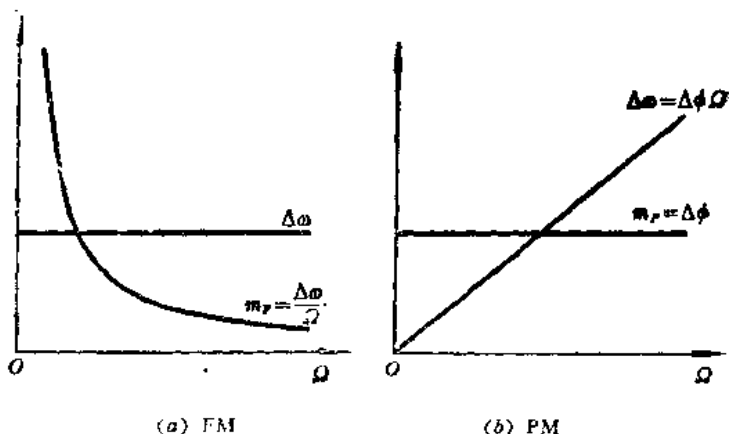


图 1.1.4 调频和调相时角频偏和调制指数随调制角频率的变化关系

§ 1-2 窄带调频——准线性频谱分析

角频偏 $\Delta\omega$ 很小时称为窄带调频 (缩写 NBFM), 现在来推导窄带调频的条件和时域表示式。

1-2-1 窄带调频的条件和时域表示式

根据式(1.1.17), 调频信号的一般表示式可以写成

$$s_{\text{FM}}(t) = A \cos\left[\omega_c t + \Delta\omega \int_0^t g(t) dt\right] \quad (1.2.1)$$

为了推导方便, 这里令 $\phi_0 = 0$ 。因为载波的初相位 ϕ_0 取决于坐标原点的选取, 所以, 令 $\phi_0 = 0$ 并不失去一般性。将式(1.2.1)用三角函数展开为

$$s_{\text{FM}}(t) = A \cos\omega_c t \cos\left[\Delta\omega \int_0^t g(t) dt\right]$$

$$-A \sin \omega_c t \sin[\Delta\omega \int' g(t) dt] \quad (1.2.2)$$

当满足下列条件时(即单音调频时, 下式 $m_f \leq 0.2$):

$$\Delta\omega \left| \int' g(t) dt \right|_{\max} \leq 0.2 \quad (1.2.3)$$

式(1.2.2)可近似表示为

$$s_{\text{NBPM}}(t) \approx A \cos \omega_c t - A \Delta\omega \int' g(t) dt \sin \omega_c t \quad (1.2.4)$$

这就是窄带调频信号的一般表示式。

类似地, 根据式(1.1.12), 当满足

$$\Delta\phi |g(t)|_{\max} = \Delta\phi \leq 0.2 \quad (1.2.5)$$

时(即单音调相时, 上式 $m_p \leq 0.2$), 窄带调相信号可写成

$$s_{\text{NBPM}}(t) \approx A \cos \omega_c t - A \Delta\phi g(t) \sin \omega_c t \quad (1.2.6)$$

写出调幅信号的表示式以作比较, 即

$$s_{\text{AM}}(t) = A \cos \omega_c t + \Delta A g(t) \cos \omega_c t \quad (1.2.7)$$

可以看出, $s_{\text{AM}}(t)$, $s_{\text{NBPM}}(t)$, $s_{\text{NBPM}}(t)$ 三者都有一个载波项和以 ω_c 为中心的边带。

1-2-2 频谱函数

如果

$$g(t) \longleftrightarrow G(\omega) \quad (1.2.8)$$

为一对傅里叶(Fourier)变换式, 则由时间积分性质得出①

$$\int' g(t) dt \longleftrightarrow \frac{1}{j\omega} G(\omega) \quad (1.2.9)$$

① 参阅[4]p.82式(1.119b)。