

高等学校试用教材

高频电子线路

下 册

(第二分册)

华中工学院无线电技术教研室编

张肃文 主编

人民教育出版社

内 容 提 要

本书系根据 1977 年 11 月在合肥召开的全国高等学校工科基础课电工、无线电类教材编写会议所通过的编写大纲编写的,并经 1978 年 12 月在武汉召开的审稿会议审查通过,作为高等学校无线电技术类专业的试用教材,也可供从事无线电技术工作的科技人员参考。

本书较详细地介绍了高频电子线路的基本原理和分析方法,引入了一些比较新的内容,注意理论联系实际,各章附有思考题与习题。

全书共十四章,分上、下两册出版。

上册六章,包括绪论、回路与器件的高频特性、高频小信号放大器、非线性电路的分析方法(第一分册)、高频功率放大器、正弦波振荡器(第二分册)。

下册八章,有振幅调制、振幅解调、变频、干扰与噪声(第一分册)、角度调制、调频信号的解调、脉冲与数字调制、频率合成与锁相技术(第二分册)。

本书由华中工学院无线电技术教研室张肃文、王筠、陆兆熊、姚天任分工执笔,张肃文为主编。

本书责任编辑 谭骏云

高等学校试用教材

高 频 电 子 线 路

下 册

(第二分册)

华中工学院无线电技术教研室编

张 肃 文 主 编

人 民 邮 电 出 版 社

新华书店北京发行所发行

天 门 县 印 刷 厂 印 装

开本 787×1092 1/32 印张 12 字数 280,000

1980 年 2 月第 1 版 1981 年 3 月湖北第 2 次印刷

印数 14,101—26,000

书号 15012·0240 定价 1.00 元

目 录

第十一章 角度调制	315
§ 11.1 概述	315
§ 11.2 调角波的性质	315
11.2-1 瞬时频率	315
11.2-2 调频波和调相波的数学表示式, 频移和相移	318
11.2-3 调频波的频谱与频带宽度	321
11.2-4 调频和调相的关系	328
§ 11.3 调频方法概述	334
11.3-1 直接调频原理	334
11.3-2 间接调频原理	335
§ 11.4 变容二极管调频	336
11.4-1 基本原理	336
11.4-2 电路分析	338
11.4-3 展宽频偏的方法	345
11.4-4 电路设计举例	347
§ 11.5 电抗管调频	353
*§ 11.6 三角波调频	362
*§ 11.7 方波调频	371
§ 11.8 晶体振荡器直接调频	377
§ 11.9 间接调频: 调相的实现	385
11.9-1 调相的方法	385
11.9-2 间接调频的实现	395
§ 11.10 用模拟计算机产生调频信号	397
11.10-1 调频微分方程式	397
11.10-2 用模拟计算机解调频微分方程式	398
11.10-3 初始条件	401
11.10-4 结论	402
*§ 11.11 可变延时时调频	403

附录 11.1	将 $(1+m\cos \Omega t)^7$ 展开成泰勒级数	405
附录 11.2	频偏较大时变容二极管调频电路的分析	405
附录 11.3	公式(11.8-6)的推导	406
参考资料		409
思考题与习题		409
第十二章	调频信号的解调	414
§ 12.1	概述	414
§ 12.2	相位鉴频器	418
12.2-1	引言	418
12.2-2	相位鉴频器的工作原理	418
12.2-3	相位鉴频器回路参数的选择	423
12.2-4	电容耦合相位鉴频器	426
§ 12.3	比例鉴频器	430
12.3-1	引言	430
12.3-2	比例鉴频器的工作原理	432
12.3-3	比例鉴频器的实际电路	435
§ 12.4	脉冲计数式鉴频器	438
12.4-1	引言	438
12.4-2	脉冲计数式鉴频器的工作原理	438
12.4-3	脉冲计数式鉴频器的实现方法	440
§ 12.5	符合门鉴频器	444
§ 12.6	晶体鉴频器	452
§ 12.7	限幅器	456
12.7-1	引言	456
12.7-2	二极管限幅器	458
12.7-3	场效应管与晶体管限幅器	461
12.7-4	差分对限幅器	464
§ 12.8	调频制的抗干扰性	465
12.8-1	引言	465
12.8-2	调频制抗干扰性能获得改善的原因	466
*12.8-3	调频解调的信号噪声比	470
12.8-4	调频制和调幅制信噪比的比较	476
12.8-5	调频中的门限效应	479

12.8-6 预加重-去加重技术	482
§ 12.9 自动频率微调 (AFC)	487
§ 12.10 利用 AFC 系统稳定调频波的中心频率	492
附录 12.1 式 (12.2-18) 的推导	499
参考资料	501
思考题与习题	501
第十三章 脉冲与数字调制	504
§ 13.1 概述	504
§ 13.2 抽样	509
13.2-1 抽样定理	509
13.2-2 抽样信号的频谱	515
13.2-3 带通信号的抽样	517
§ 13.3 模拟脉冲调制	520
13.3-1 脉冲振幅调制 (PAM)	520
13.3-2 脉冲宽度调制 (PWM)	523
13.3-3 脉冲位置调制 (PPM)	528
13.3-4 三种模拟脉冲调制的比较	531
§ 13.4 脉冲编码调制 (PCM)	533
13.4-1 引言	533
13.4-2 量化	534
13.4-3 编码	537
13.4-4 量化噪声	541
13.4-5 脉冲编码调制信号的频带宽度	545
13.4-6 脉冲编码调制的优缺点	547
§ 13.5 增量调制 (DM)	548
13.5-1 引言	548
13.5-2 增量调制的工作原理	549
13.5-3 增量调制信号的解调	552
*§ 13.6 最佳接收原理	552
13.6-1 引言	552
13.6-2 最佳接收原理	554
§ 13.7 振幅键控 (ASK)	558
13.7-1 振幅键控信号的产生	559

13.7-2 振幅键控信号的解调	562
§ 13.8 移频键控 (FSK)	563
13.8-1 移频键控信号的产生	563
13.8-2 移频键控信号的频带宽度	565
13.8-3 移频键控信号的解调	569
§ 13.9 移相键控 (PSK)	571
13.9-1 引言	571
13.9-2 绝对移相键控信号的产生与解调	572
13.9-3 相对移相键控信号的产生	573
13.9-4 相对移相键控信号的解调	579
13.9-5 移频键控与移相键控的简单比较	583
附录 13.1 调宽脉冲的频谱分析	583
附录 13.2 调位脉冲的频谱分析	585
参考资料	588
思考题与习题	588
第十四章 频率合成与锁相技术	591
§ 14.1 概述	591
§ 14.2 频率合成器的主要技术指标	592
§ 14.3 频率直接合成法	598
14.3-1 非相干式直接合成器	598
14.3-2 相干式直接合成器	600
14.3-3 频率漂移抵消法(外差补偿法)	602
§ 14.4 锁相环路的基本工作原理	603
§ 14.5 频率间接合成法(锁相环路法)	606
14.5-1 脉冲控制锁相法	607
14.5-2 间接合成制减法降频(模拟锁相环路法)	608
14.5-3 间接合成制除法降频(数字锁相环路法)	612
§ 14.6 锁相环路各部件及其数字模型	619
14.6-1 鉴相器	620
14.6-2 低通滤波器	628
14.6-3 压控振荡器 (VCO)	631
14.6-4 锁相环路的数学模型	633
*§ 14.7 锁相环路的分析	634

14.7-1 一阶锁相环路	634
14.7-2 二阶锁相环路	645
*§ 14.8 锁相环路的应用简介	652
14.8-1 窄带跟踪接收机(锁相接收机)	653
14.8-2 锁相环路的调频与解调	655
14.8-3 调幅信号的解调	657
14.8-4 振荡器的稳定与提纯	657
14.8-5 倍频器与分频器	658
14.8-6 相关应答器	659
附录 14.1 一阶环路方程的解(只求锁定状态)	662
附录 14.2 一阶环路在小扰动下的捕捉时间	664
参考资料	665
思考题与习题	665
习题答案(下册部分)	667
符号表	671

第十一章 角'度'调'制

§ 11.1 概 述

我们在第七章讨论振幅调制时已知, 高频振荡的振幅随调制信号的大小而线性地改变, 叫做振幅调制, 简称调幅。高频振荡振幅的这种变化携带着调制信号所反映的信息。本章则将讨论, 如何利用高频振荡的频率或者相位的变化来携带信息。

高频振荡的瞬时频率随调制信号的大小线性地改变, 叫做频率调制, 简称调频; 高频振荡的瞬时相位随调制信号的大小线性地改变, 叫做相位调制, 简称调相。无论调频还是调相, 都是使高频振荡的相角变化, 因此可统称之为角度调制, 简称调角。调角时, 高频振荡的振幅维持不变。

和振幅调制相比, 角度调制的主要优点是抗干扰性强。调频主要应用于调频广播、广播电视、通信以及遥测等; 调相主要应用于数字通信系统中的移相键控。

由于调频和调相有着密切的关系, 所以本章着重讨论调频而只略述调相。

§ 11.2 调角波的性质

调角时, 高频振荡的频率或相位是变化的。为此, 需要建立瞬时频率和瞬时相位的概念。

11.2-1 瞬时频率

所谓频率, 就是简谐振荡每秒钟重复的次数。我们应用频率的概念来观察图 11.2-1 所示的电压波形。它在 $0 < t < \frac{T}{2}$ 和

$-T < t < -\frac{T}{2}$ 等时间间隔内, 每秒重复 f_1 次; 而在 $\frac{T}{2} < t < T$ 和 $-\frac{T}{2} < t < 0$ 等时间间隔内每秒重复 f_2 次。因此, 该电压的频率是交替地变化的, 而在 $t = -T, -\frac{T}{2}, 0, \frac{T}{2}$ 各点是频率的突变点。

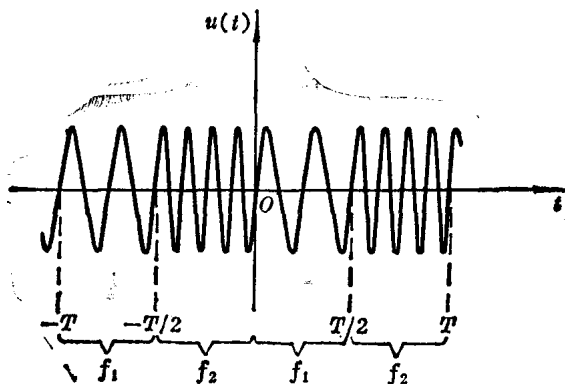
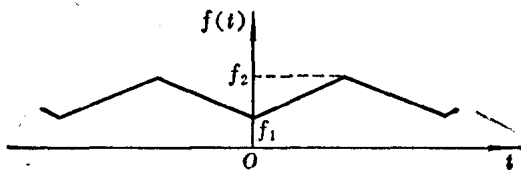
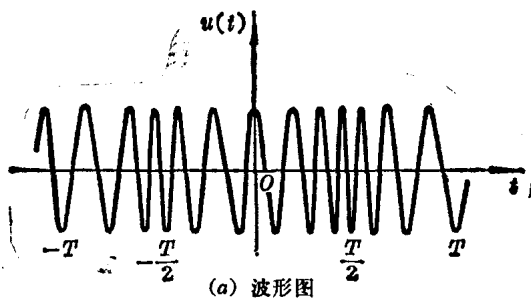


图 11.2-1 频率交替变化的简谐振荡



(b) 瞬时频率变化规律

图 11.2-2 频率连续变化的简谐振荡

让我们再看图 11.2-2(a) 所示的电压波形。在 $0 < t < T$ 这段时间内, 它并没有周期性地重复; 粗略看来, 其波形的疏密是变化的, 最密集处频率最高, 最稀疏处频率最低。每一瞬间的频率是各不相同的。那么, 怎样理解“每一瞬间的频率”即“瞬时频率”这个概念呢? 为此, 我们来研究表示简谐振动的旋转矢量图, 如图 11.2-3 所示。在该图中, 设矢量长度为 U , 围绕原点 O 反时针方向旋转, 角速度为 $\omega(t)$ 。 $t=0$ 时, 矢量与实轴之间的夹角即初相角为 θ_0 ; 时间为 t 时, 该夹角为 $\theta(t)$ 。矢量在实轴上的投影为

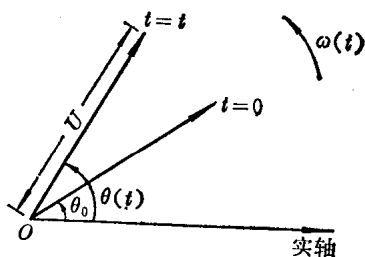


图 11.2-3 简谐振动的矢量表示

$$u(t) = U \cos \theta(t)$$

这是一个简谐振荡, 其相角 $\theta(t)$ 等于矢量在 t 时间内转过的角度与初相角 θ_0 之和, 即

$$\theta(t) = \int_0^t \omega(\tau) d\tau + \theta_0 \quad (11.2-1)$$

该式中, 积分 $\int_0^t \omega(\tau) d\tau$ 是矢量在 0 到 t 时间间隔内所转过的角度。将上式两边取微分, 得

$$\omega(t) = \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (11.2-2)$$

该式说明, 瞬时频率(即旋转矢量的瞬时角速度) $\omega(t)$ 等于瞬时相位对时间的变化率。式(11.2-1)和式(11.2-2)是角度调制中两个基本的关系式。

根据式(11.2-2)可以求出正弦波 $A \sin(\omega_0 t + \theta_0)$ 的瞬时频率为

$$\omega(t) = \frac{d\theta(t)}{dt} = \omega_0$$

这就是说, 正弦波的瞬时频率是一常数, 或者说, 在任何时间, 它的瞬时频率是相同的, 其值等于正弦波按常规所定义的频率。

11.2-2 调频波和调相波的数学表示式, 频移和相移

设调制信号为 $u_a(t)$, 载波振荡(电压或电流)为

$$a(t) = A_0 \cos \theta(t) \quad (11.2-3)$$

调频时, 载波的瞬时频率 $\omega(t)$ 随 $u_a(t)$ 线性地变化, 即

$$\omega(t) = \omega_0 + k_f u_a(t) \quad (11.2-4)$$

式中 ω_0 是未调制时的载波频率, 叫做中心频率;

$k_f u_a(t)$ 是瞬时频率相对于 ω_0 的偏移, 叫做瞬时频率偏移, 简称频率偏移或频移。

频移以 $\Delta\omega(t)$ 表示, 即

$$\Delta\omega(t) = k_f u_a(t) \quad (11.2-5)$$

$\Delta\omega(t)$ 的最大值叫做最大频移, 以 $\Delta\omega$ 表示, 即

$$\Delta\omega = k_f |u_a(t)|_{\max}$$

上式中, k_f 是比例常数。它表示单位调制信号所引起的频移, 单位是弧度/秒·伏。习惯上把最大频移称为频偏。

根据关系式(11.2-1)可以求出调频波的瞬时相位为

$$\begin{aligned} \theta(t) &= \int_0^t [\omega_0 + k_f u_a(\tau)] d\tau \\ &= \omega_0 t + k_f \int_0^t u_a(\tau) d\tau \end{aligned} \quad (11.2-6)$$

上式中设积分常数 $\theta_0 = 0$ 。

将式(11.2-6)代入式(11.2-3), 得

$$a(t) = A_0 \cos \left[\omega_0 t + k_f \int_0^t u_a(\tau) d\tau \right] \quad (11.2-7)$$

这就是由 $u_a(t)$ 调制的调频波的数学表示式。

如果用 $u_a(t)$ 对式(11.2-3) 表示的载波进行调相, 载波的瞬时相位 $\theta(t)$ 随 $u_a(t)$ 线性地变化, 即

$$\theta(t) = \omega_0 t + k_p u_\Omega(t) \quad (11.2-8)$$

式中 $\omega_0 t$ 表示未调制时载波振荡的相位;

$k_p u_\Omega(t)$ 表示瞬时相位中与调制信号成正比例地变化的部分, 叫做瞬时相位偏移, 简称相位偏移或相移。

相移以 $\Delta\theta(t)$ 表示, 即

$$\Delta\theta(t) = k_p u_\Omega(t) \quad (11.2-9)$$

$\Delta\theta(t)$ 的最大值叫做最大相移, 或称调制指数, 调相波的调制指数以 m_p 表示, 即

$$m_p = k_p |u_\Omega(t)|_{\max}$$

式中 k_p 是比例常数。它表示单位调制信号所引起的相移的大小, 单位是弧度/伏。

将式(11.2-8)代入式(11.2-3), 得到调相波的数学表示式为

$$a(t) = A_0 \cos[\omega_0 t + k_p u_\Omega(t)] \quad (11.2-10)$$

根据式(11.2-2), 可以求出调相波的瞬时频率为

$$\begin{aligned} \omega(t) &= \frac{d\theta(t)}{dt} \\ &= \omega_0 + k_p \frac{du_\Omega(t)}{dt} \end{aligned} \quad (11.2-11)$$

上式右边第二项表示调相波的频移, 以 $\Delta\omega_p(t)$ 表示, 即

$$\Delta\omega_p(t) = k_p \frac{du_\Omega(t)}{dt} \quad (11.2-12)$$

同样, 对于调频波, 式(11.2-6)右边第二项则表示调频波的相移, 以 $\Delta\theta_f(t)$ 表示, 即

$$\Delta\theta_f(t) = k_f \int_0^t u_\Omega(\tau) d\tau \quad (11.2-13)$$

$\Delta\theta_f(t)$ 的最大值即调频波的调制指数, 以 m_f 表示。

将以上结果列入表 11.2-1 中。从表 11.2-1 可以看出: 无论是调频还是调相, 瞬时频率和瞬时相位都在同时随着时间发生变

化。在调频时,瞬时频率的变化与调制信号成线性关系,瞬时相位的变化却与调制信号的积分成线性关系。在调相时,瞬时相位的变化与调制信号成线性关系,瞬时频率的变化却与调制信号的微分成线性关系。

表 11.2-1 调频波和调相波比较

调制信号为 $u_D(t)$; 载波振荡为 $A_0 \cos \omega_0 t$		
	调 频 波	调 相 波
数学表示式	$A_0 \cos \left[\omega_0 t + k_f \int_0^t u_D(\tau) d\tau \right]$	$A_0 \cos [\omega_0 t + k_p u_D(t)]$
瞬时频率	$\omega_0 + k_f u_D(t)$	$\omega_0 + k_p \frac{du_D(t)}{dt}$
瞬时相位	$\omega_0 t + k_f \int_0^t u_D(\tau) d\tau$	$\omega_0 t + k_p u_D(t)$
最大频移	$k_f u_D(t) _{\max}$	$k_p \left \frac{du_D(t)}{dt} \right _{\max}$
最大相移	$k_f \left \int_0^t u_D(\tau) d\tau \right _{\max}$	$k_p u_D(t) _{\max}$

若调制信号为

$$u_D(t) = U_D \cos \Omega t$$

未调制时载波频率为 ω_0 。

根据式(11.2-7)可以写出调频波的数学表示式为

$$a_f(t) = A_0 \cos \left[\omega_0 t + \frac{k_f U_D}{\Omega} \sin \Omega t \right] \quad (11.2-14)$$

根据式(11.2-10)可以写出调相波的数学表示式为

$$a_p(t) = A_0 \cos [\omega_0 t + k_p U_D \cos \Omega t] \quad (11.2-15)$$

式中下标 f 表示调频, p 表示调相, 以下同。

从上面两个数学表示式可以直接看出, 调频波的调制指数为

$$m_f = \frac{k_f U_D}{\Omega} \quad (11.2-16)$$

调相波的调制指数为

$$m_p = k_p U_a \quad (11.2-17)$$

将式(11.2-2)应用于式(11.2-14), 可求出调频波的最大频移为

$$\Delta\omega_f = k_f U_a \quad (11.2-18)$$

将式(11.2-2)应用于式(11.2-15), 可求出调相波的最大频移为

$$\Delta\omega_p = k_p \Omega U_a \quad (11.2-19)$$

对照上列四式可以看出: 无论调频还是调相, 最大频移与调制指数之间的关系都是相同的。若对于调频和调相, 最大频移都用 $\Delta\omega$ 表示, 调制指数都用 m 表示, 则 $\Delta\omega$ 与 m 之间满足以下关系:

$$\Delta\omega = m\Omega$$

或
$$\Delta f = mF \quad (11.2-20)$$

式中
$$\Delta f = \frac{\Delta\omega}{2\pi}, \quad F = \frac{\Omega}{2\pi}$$

综上所述, 调频波中存在着三个有关频率的概念: 第一个是未调制时或者说调制信号为零时的载波频率, 即调频波的中心频率 f_0 ; 第二个是最大频移 Δf , 它表示调制信号变化时, 瞬时频率偏离中心频率的最大数值; 第三个是调制信号频率 F , 它表示瞬时频率在其最大值 $f_0 + \Delta f$ 和最小值 $f_0 - \Delta f$ 之间每秒钟往返摆动的次数。由于频率的变化总是伴随着相位的变化, 因此 F 也表示瞬时相位在自己的最大值和最小值之间单位时间内往返摆动的次数。

11.2-3 调频波的频谱与频带宽度

为了求得调频波的频谱, 必须进行傅里叶变换。在调制信号 $u_a(t)$ 比较复杂时, 这种变换是相当困难的。但是, 用一个复杂信号 $u_a(t)$ 调频所得到的调频波的频带宽度, 决不会超过用一个简谐信号[其频率等于复杂信号 $u_a(t)$ 的最高频谱成分的频率]调频时所得到的频带宽度——[例 11.2-1]将证明这个结论。因此, 研

究简谐信号调频时的频谱和频带宽度，不仅简单而且也有实际意义。

现在来求式(11.2-14)所表示的调频信号的频谱。

为简单计，令 $A_0=1$ 。将式(11.2-14)展开得

$$a_f(t) = \cos \omega_0 t \cdot \cos(m_f \sin \Omega t) - \sin \omega_0 t \cdot \sin(m_f \sin \Omega t) \quad (11.2-21)$$

上式中，

$$\cos(m_f \sin \Omega t) = J_0(m_f) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n}(m_f) \cos 2n \Omega t \quad (11.2-22)$$

和

$$\sin(m_f \sin \Omega t) = 2 \sum_{n=0}^{\infty} J_{2n+1}(m_f) \sin(2n+1)\Omega t \quad (11.2-23)$$

这里 n 均取正整数。 $J_n(m_f)$ 是以 m_f 为参数的 n 阶第一类贝塞尔函数，其数值均有表或曲线可查。图 11.2-4 中画出了 $J_n(m_f)$ 随 m_f 变化的关系曲线，表 11.2-2 列出了部分贝塞尔函数值。

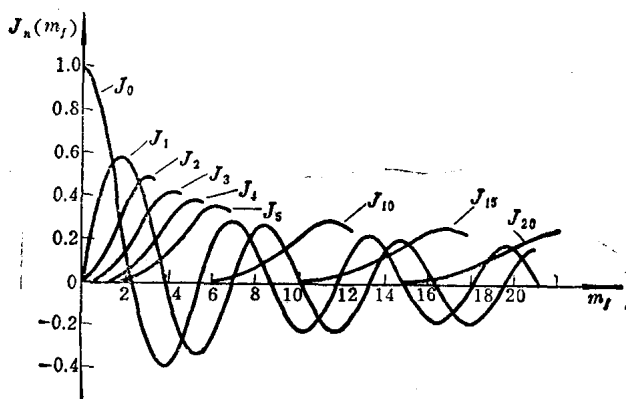


图 11.2-4 贝塞尔函数曲线

表 11.2-2 第一类贝塞尔函数表 (1% 以下之值未列出)

m_f	J_0	J_1	J_2	J_3	J_4	J_5	J_6	J_7	J_8	J_9	J_{10}	J_{11}	J_{12}	J_{13}	J_{14}	J_{15}	J_{16}
0.00	1.00																
0.25	0.98	0.12															
0.5	0.94	0.24	0.03														
1.0	0.77	0.44	0.11	0.02													
1.5	0.51	0.56	0.23	0.06	0.01												
2.0	0.22	0.58	0.35	0.13	0.03												
2.5	-0.05	0.50	0.45	0.22	0.07	0.02											
3.0	-0.26	0.34	0.49	0.31	0.13	0.04	0.01										
4.0	-0.40	-0.07	0.36	0.43	0.28	0.13	0.05	0.02									
5.0	-0.18	-0.33	0.05	0.36	0.39	0.26	0.17	0.05	0.02								
6.0	0.15	-0.20	-0.24	0.11	0.36	0.36	0.25	0.13	0.06	0.02							
7.0	0.30	0.00	-0.30	-0.17	0.16	0.35	0.34	0.23	0.13	0.06	0.02						
8.0	0.17	0.23	-0.11	-0.29	-0.10	0.19	0.34	0.32	0.22	0.13	0.06	0.03					
9.0	-0.06	0.24	0.14	-0.18	-0.27	-0.06	0.20	0.33	0.30	0.21	0.12	0.06	0.03	0.01			
10.0	-0.25	0.04	0.25	0.06	-0.22	-0.23	-0.01	0.22	0.31	0.29	0.20	0.12	0.06	0.03	0.01		
12.0	0.05	-0.22	-0.08	0.20	0.18	-0.07	-0.24	-0.17	0.05	0.23	0.30	0.27	0.20	0.12	0.07	0.03	0.01
15.0	0.01	0.21	0.01	-0.19	-0.12	0.13	0.21	0.03	-0.17	-0.22	-0.09	0.10	0.24	0.28	0.25	0.18	0.12

将式(11.2-22)和式(11.2-23)代入式(11.2-21),得

$$\begin{aligned}
 a_f(t) = & J_0(m_f) \cos \omega_0 t && \text{载频} \\
 & + J_1(m_f) \cos(\omega_0 + \Omega)t - J_1(m_f) \cos(\omega_0 - \Omega)t && \text{第一对边频} \\
 & + J_2(m_f) \cos(\omega_0 + 2\Omega)t + J_2(m_f) \cos(\omega_0 - 2\Omega)t && \text{第二对边频} \\
 & + J_3(m_f) \cos(\omega_0 + 3\Omega)t - J_3(m_f) \cos(\omega_0 - 3\Omega)t && \text{第三对边频} \\
 & + \dots && (11.2-24)
 \end{aligned}$$

从上式看出, 由简谐信号调制的调频波, 其频谱具有以下特点:

1) 载频分量上下各有无数个边频分量, 它们与载频分量相隔恰为调制频率的整数倍。载频分量与各次边频分量的振幅由对应的各阶贝塞尔函数值所确定。奇数次的上下边频分量相位相反。

2) 根据图 11.2-4 所示曲线可以看出, 调制指数 m_f 越大, 具有较大振幅的边频分量就越多 (图 11.2-5 也表明了这一点)。这与调幅波不同, 在简谐信号调幅的情况下, 边频数目与调制指数 m_a 无关。

3) 从图 11.2-4 所示曲线还可以看出, 对于某些 m_f 值, 载频或某边频振幅为零。利用这一现象可以测定调制指数 m_f 。[1]、[5]同

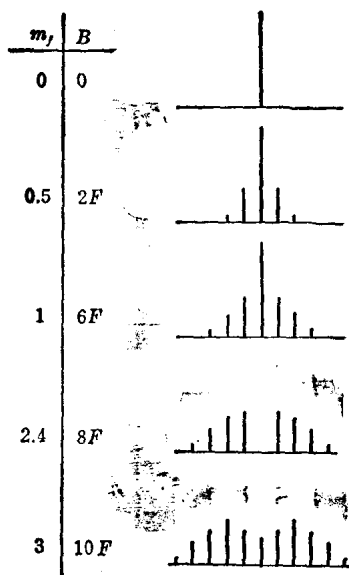


图 11.2-5 简谐信号调频时调频波的频谱图 (F 保持不变)