

常用电子测量仪器的使用与维修

中 册

(续)

(第七章至第十一章)

南京工学院无线电系仪表室编

1980.8.

第十章 频谱分析仪

10-1 测量用途

在无线电技术和其它电子技术中，应用着按各种不同规律随时间而变化的电压和电流信号。这些电压和电流大部分都是一种周期性函数，即在任意时间 t 的电压值或电流值，将与 $t + T$ 时间的电压值或电流值相同，其情形如图 10-1 所示。这里， T 表示电信号的周期。

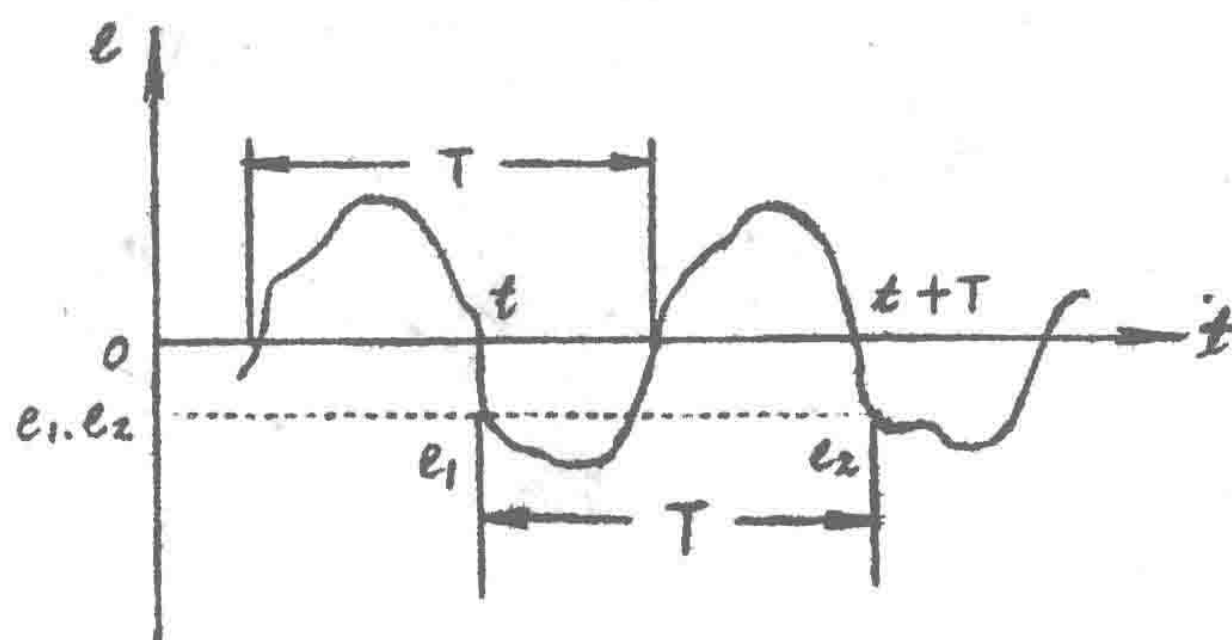


图 10-1 周期信号电压

其倒数为信号频率 f 即

$$f = \frac{1}{T} \quad (10-1)$$

最常见的周期性电信号是正弦波电压和电流。图 10-2 示出正弦波电压 e 随时间 t 而变化的波形。设正弦波信号电压的振幅为 E_m ，则其周期函数表示式可写为：

$$e = f(t) = E_m \sin(\omega t + \theta) \quad (10-2)$$

式中 ω ——角速率 ($\omega = 2\pi f$)；

θ ——相位角

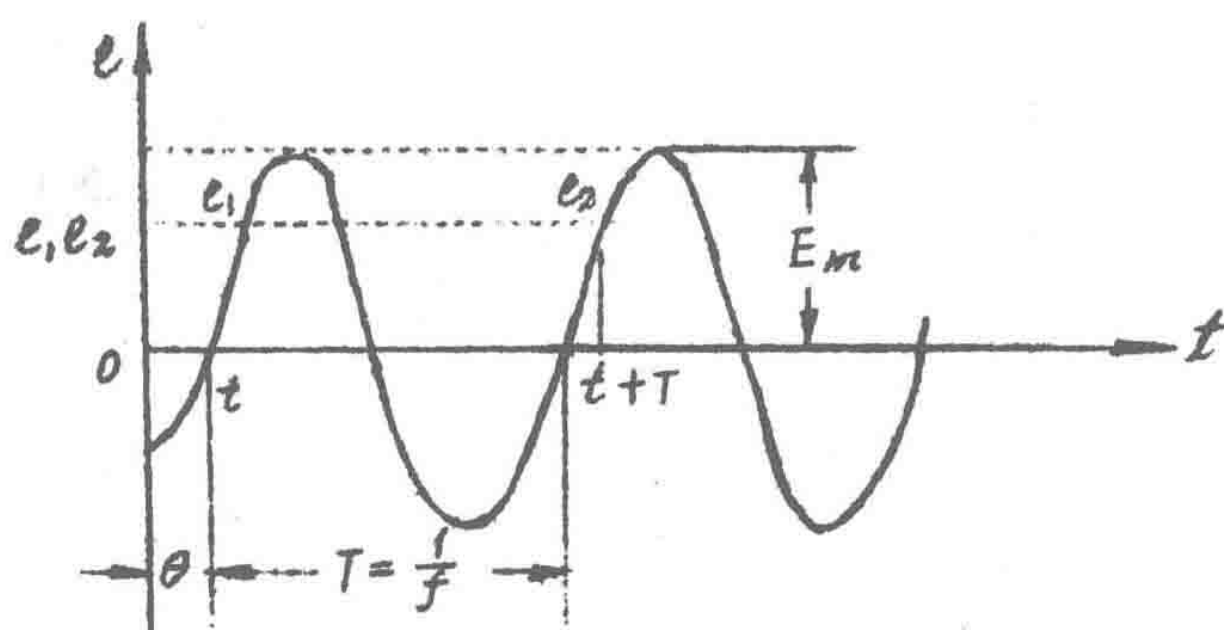


图 10-2 正弦波信号电压

如果将两个（或两个以上）频率不同但严格地成整倍数关系而相互之间有一定的相位关系的正弦波信号相迭加，其所形成的新信号的波形却是非正弦的。其情形如图 10-3 所示，这里频率较低的正弦波电压 e_a 称为“基波”，频率较高的正弦波电压 e_b 称为“谐波”。

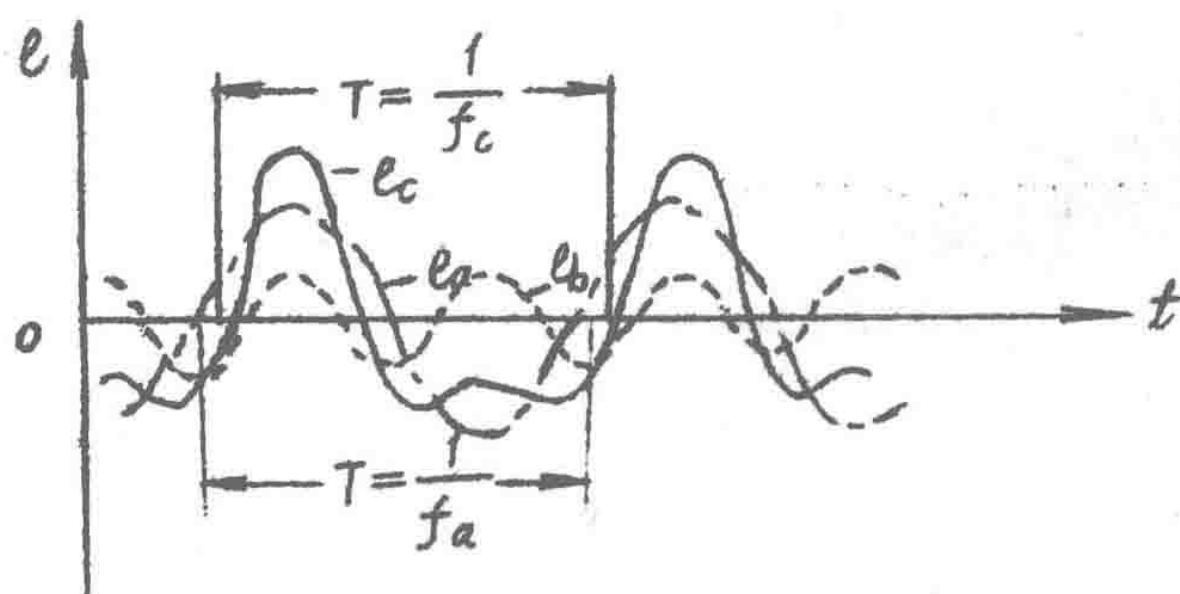


图 10-3 基波与二次谐波迭加的情形

而谐波的频率 f_b 为基波频率 f_a 的二倍，即 $f_b = 2f_a$ 。其所形成的新信号电压 e_c 的波形却是非正弦的，但是 e_c 的频率和基波的频率相同，即

$$f_c = f_a = \frac{1}{T}$$

因此，可以推想：在基波的信号上迭加适当数量的谐波信号。将能形成与基波同频的任意波形的周期性电信号；反之，任何波形的非正弦周期信号，也一定可以分析为基波与相应谐波分量的迭加。根据数学演算和实验测量的结果证明，这种推想是完全正确的，此即所谓周期性电信号的谐波分析。

周期性电信号的波形分析可以按时域法进行，也可以按频域法进行。时域分析是研究被测周期信号的幅度 A 随时间 t 而变化的情形，即以时间 t 为变量来分析信号波形的幅度—时间特性 $A(t)$ ，其情形如图 10-4 所示。例如使用电子示波器来观测信号的波形就是时域分析的最常用方法。频率分析是研究被测周期信号的频率分量（包括基波和谐波），即以频率 f 为变量来分析信号的幅度—频率特性 $A(f)$ ，其情形如图 10-5 所示。这里，各组成频率分量的振幅 A_0 、 M_1 、 M_2 、 M_3 、 M_4 ……依次排列，形成幅度频谱即离散频谱，每一根谱线 M_n 不一定比前面一根波幅小。

但就整个趋势来说，当谐波阶次 n 增大时， M_n 就愈来愈小。使用频谱分析仪来观测信号的频谱就是频域分析的最常用方法。实际上，周期信号的时域和频域特性，是从不同的角度对同一事物观测的结果。图 10-6 使用时间、频率和幅度的三维坐标，形象地表示一个非正弦周期信号的时域与频域特

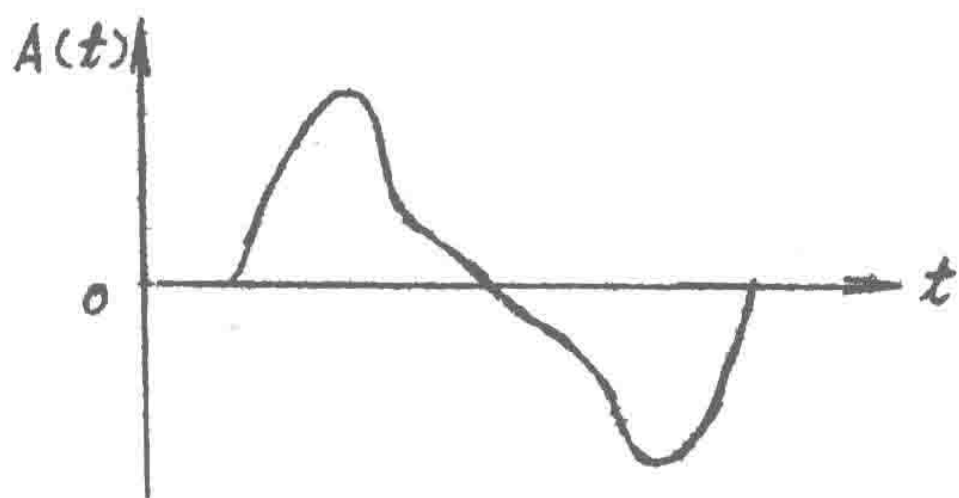


图 10-4 信号波形的 $A(t)$ 特性

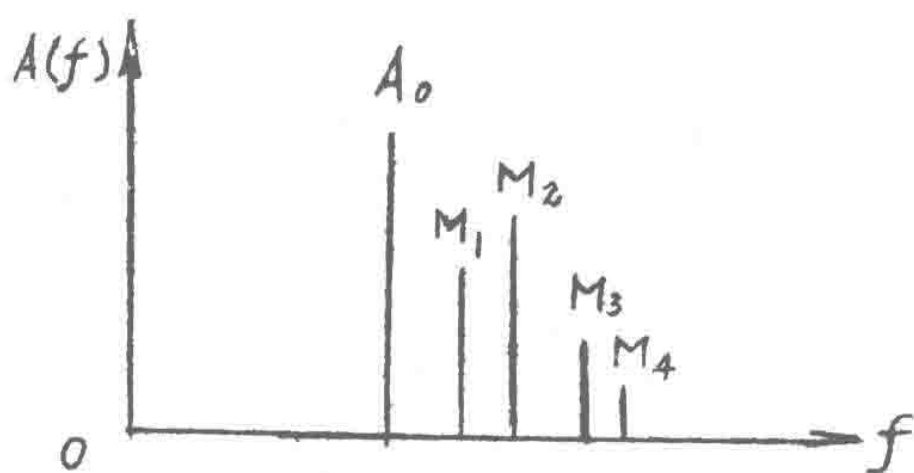


图 10-5 信号波形的 $A(f)$ 特性

性之间的关系。

频谱分析仪是一种采用电扫描的方法进行频率分量的选取，并能以模拟方式（诸如电表、示波管及X—Y记录仪等）或数字方式来显示被测信号的频域分析结果的常用电子测量仪器。它可分为两大类：一类是实时频谱分析仪，即在被测信号发生的实际时间内取得所需要的全部频谱信息，以进行分析及显示出其结果，诸如多通道滤波器式频谱仪，时基压缩式频谱仪，快速傅里叶变换或离散傅里叶变换分析仪等等。这类频谱分析，主要用于非重复性而持续时间很短的电信号的频谱分析，另一类是非实时频谱分析仪，即对被研究的周期性电信号通过多次取样过程，以完成频域的分析，它是采用扫频超外差方式来实现对某一段连续射频信号及周期信号的频谱分析。

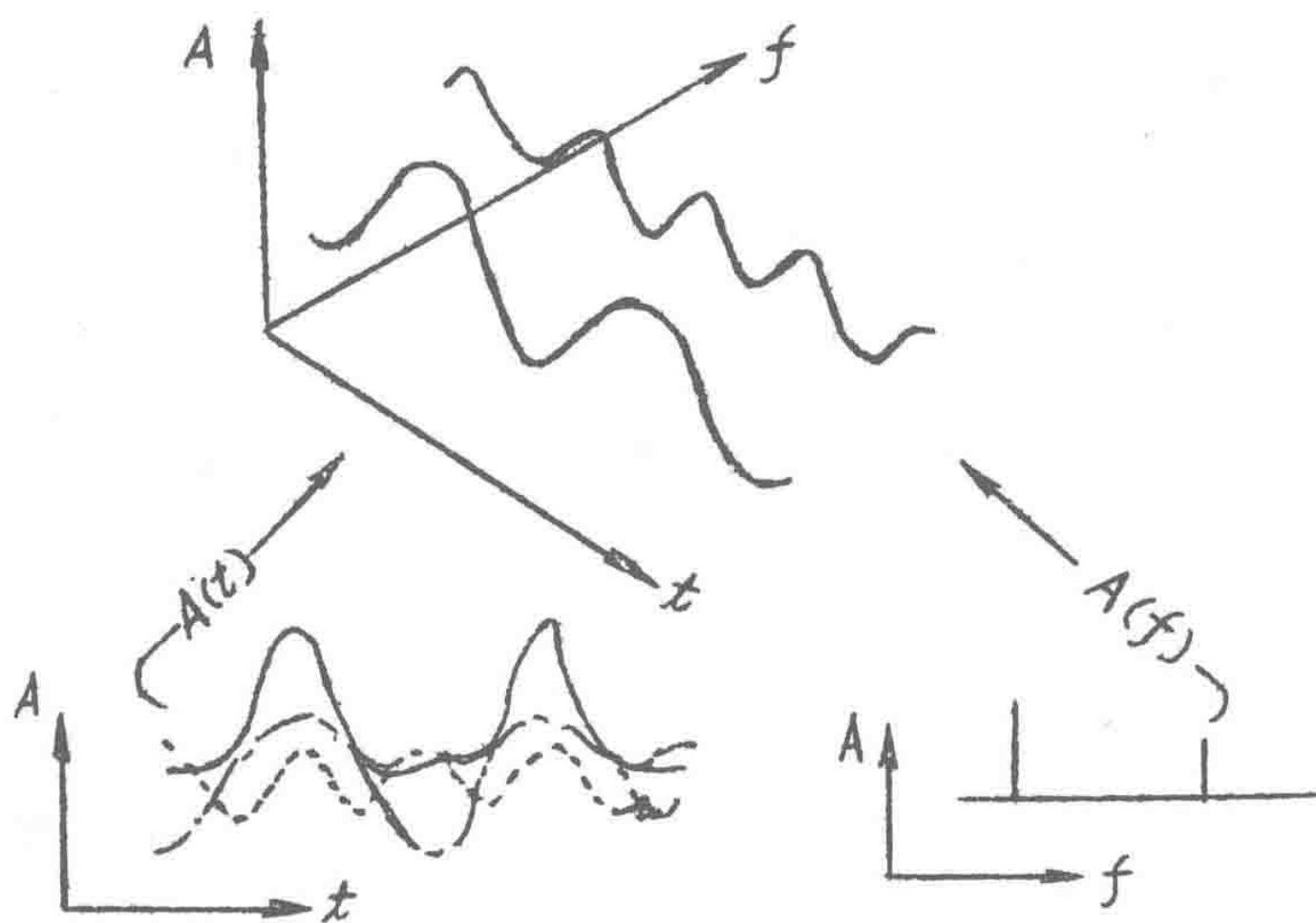


图 10-6 非正弦信号的
时域与频率特性的关系

国产 PFG—1B 型高频频谱分析仪和 BP—9 型宽频带频谱分析仪都是非实时频谱分析仪。它的主要用途是分析和测量各种波形电

信号的谐波分量和各种调制波信号（调幅、调频及脉冲调制的高频信号）的频谱，以及测定调幅系数、频率偏移等波形参数。也可以探测低电平信号的频率和测量信号发生器的频谱纯度与频谱宽度，以及估计键控信号的带宽等等。

近代研制的自动频谱分析仪（如美国HP公司产品8557A型频谱分析仪），是采用微处理器的电路结构，以实现高度自动化的频域分析。

10-2 基本原理

研究周期性信号的非实时频谱分析仪，其电路结构有两种方式，一种是扫频超外差式，另一种是射频调谐式，它的基本原理如下：

一、扫频式频谱分析仪

这是一种具有显式装置的扫频超外差式接收机。它基本上包括两种类型：扫前端式和扫中频式。前者的扫频范围可以做得很宽，能显示被测信号频谱的全景，所以又称为全景频谱仪（例如美国HP公司产品8555A型频谱分析仪，其频率范围为10MHz与8445B型跟踪预选器配合使用，可观测高达8GHz的满屏频谱图象）。但是，常用的频谱分析仪都是采用扫中频式的。诸如国产PFG-1B型高频频谱分析仪和BP-9型宽频带频谱分析仪等等。

扫频式频谱仪的基本工作原理如图10-7所示。这里，本机振荡器的扫频输出与输入信号的各个频率分量，通过混频器进行差拍，其所产生的中频经由窄带滤波器、检波器和视频放大器，如到示波管的垂直偏转系统，使屏幕上显示出相应的垂直谱线，其长短正比于各频率分量的振幅。频谱分析仪的本机振荡器是由锯齿波信号电压进行频率调制，使其产生相应的频率偏移即扫频宽度。锯齿波信号电压同

时又作为示波管的水平扫描电压。因此，屏幕上显示的时间基线也就成为线性的频率标尺。

在图10-7中，如果扫描信号电压对第一本振进行调频，则构成扫前端式频谱仪；如果扫描信号电压对第二本振进行调频，则构成扫中频式频谱仪。

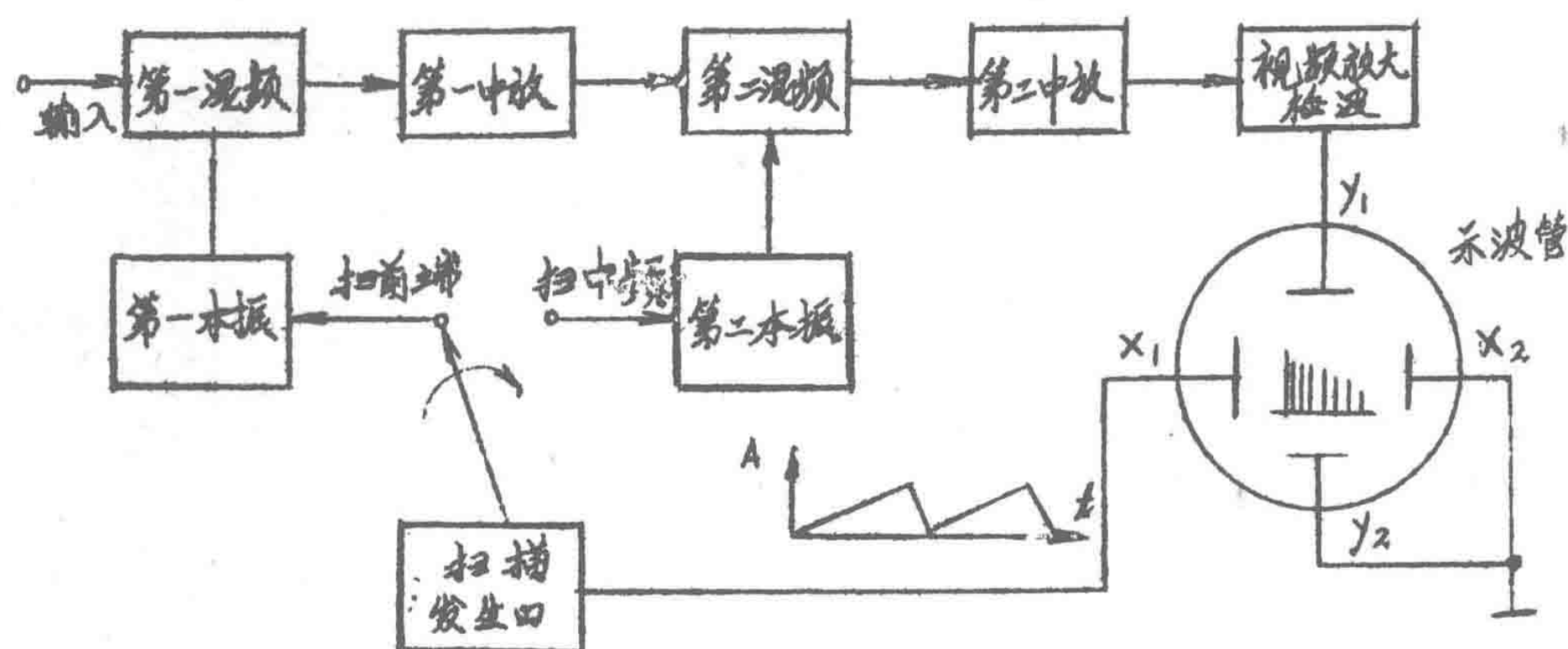


图107 扫频式频谱分析仪
的基本原理方框图

三 射频调谐式频谱分析仪

射频调谐式频谱分析仪简称TRF型频谱分析仪。它是采用“电调”滤波器(YIG)，将被测信号中各个频率分量取出来，再通过检波与放大后加到示波管的垂直偏转极，以显示出相应的谱线。其基本原理如图10-8所示。这里，扫描发生器受到扫描控制信号源的同步控制，因此，屏幕上显示的时间基线也就成为线性的频率标尺。

这种频谱仪的优点是结构简单，无假象，无多路响应。但跟外差式频谱仪相比，它的缺点是灵敏度和分辨力较低。

波形分析仪也是一种窄带超外差接收机，它与频谱仪的区别是：后者是采用电扫描的方法，而前者则用手动调谐以逐个地选出被测信号中的频率分量，然后测量其电压或电平的量值。诸如国产的BB4型波形分析仪和UD9型选频电平表等即是。

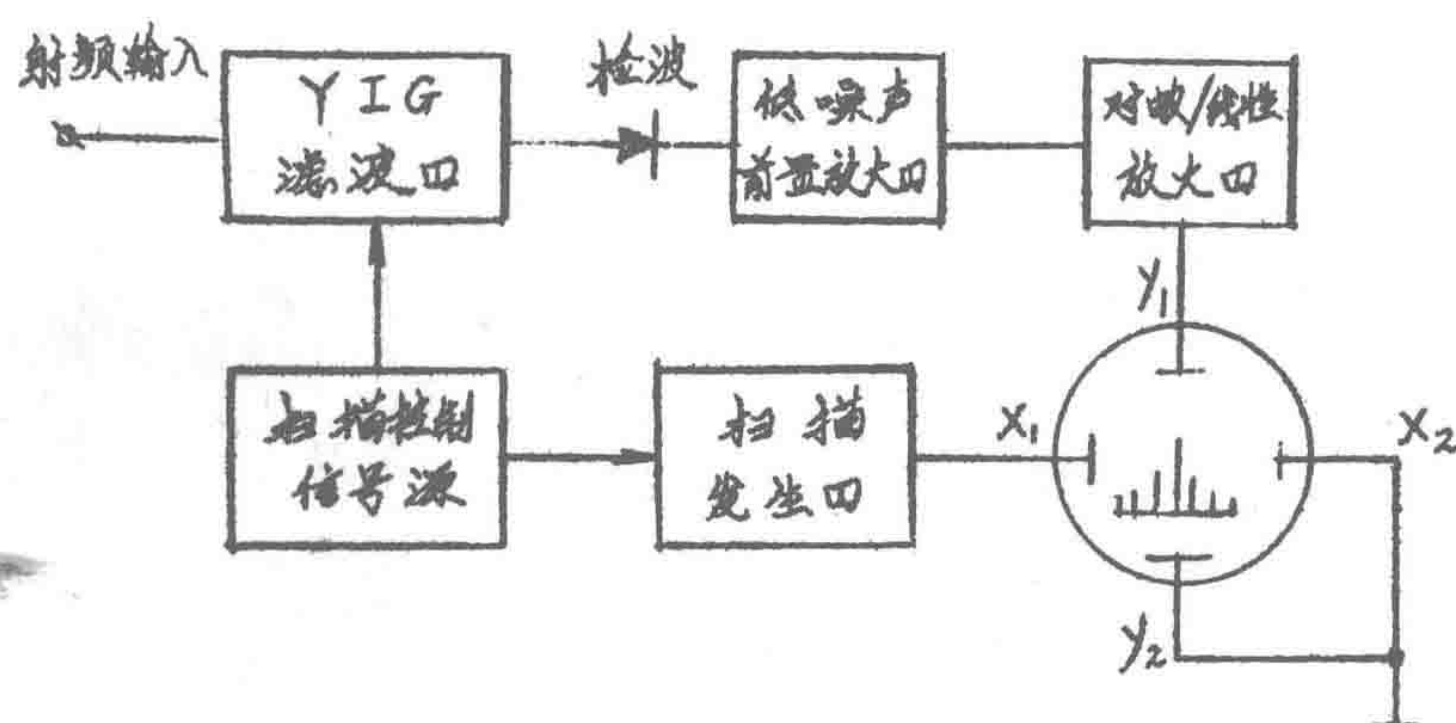


图 10-8 TRF型
频谱分析仪的基本原理方框图

10-3 技术性能

一、频率范围

这是指频谱分析仪能测定信号频率的范围。如国产BP-6型声频频谱记录仪的频率范围为 $20\text{ Hz} \sim 20\text{ KHz}$ ；PFG-1B型高频频谱分析仪的频率范围为 $3 \sim 30\text{ MHz}$ ，在使用附加低频扩展器后，可测定 $50\text{ Hz} \sim 3\text{ MHz}$ 的信号；BP-9型宽频带频谱分析仪的频率范围为 $10\text{ MHz} \sim 40\text{ GHz}$ ，所以，应根据被测信号的频率来选用相应的频谱仪。

二、灵敏度

这是指频谱分析仪显示微弱信号的能力。通常以仪器在增益最大

的条件下(所有的衰减器均扳置于0 db挡位,增益控制旋钮调至最大位置),能测定的最小信号电压值、功率值来表明或者以整机增益来表明。如BP-6型频谱仪的灵敏度为 $10\mu\text{V}$;BP-9型频谱仪的灵敏度为 -20db mw ,即 0.1mw ;PFG-1B型频谱仪的灵敏度为 $+80\text{db}/\mu\text{V}(10\text{mV})$,即 $1\mu\text{V}$ 的输入信号电压可放大一万倍变为 10mV 的电压量值,前两者的灵敏度表示方式比较明确,而后者的灵敏度表示方式应进行一些换算。例如PFG-1B型仪器所用的示波管13SJ38J,其Y轴偏转极灵敏度为 $14\text{V P-P}/\text{cm}$,即 $14/2.8 \approx 5\text{V}/\text{cm}$,而整机灵敏度应写成 $5 \times 10^{-4} = 0.5\text{mV}/\text{cm}$,即输入 0.5mV 的正弦波信号电压,在仪器示波器屏幕上可显示出1 cm长度的垂直谱线,如果可观测的最短谱线为0.2 cm,则最小输入信号电压为 $0.5 \times 0.2 = 0.1\text{mV} = 100\mu\text{V}$ 。

三 分辨率

这是指频谱分析仪的频率分辨能力。它有两种实际意义:一种是表明频谱仪能检测出来相邻谱线最小频率间隔的能力;另一种是表明频谱仪能检测出来被测信号最小频率变化的能力。例如,PFG-1B型高频频谱分析仪的分辨率为 50Hz ,可测 -45db ; 100Hz 以上,可测 -60db 。它表明频谱仪能检测出来相邻谱线最小频率间隔为 50Hz 时的信号电平为 -45db ;频率间隔为 100Hz 以上时的信号电平为 -60db 。或者表明被测信号的频率变化为 50Hz 时的衰减电平为 -45db ;频率变化为 100Hz 以上时的衰减电平为 -60db 。

四 幅度测量范围

频谱分析仪的幅度测量范围又称为动态范围，是指仪器示波管屏幕的幅度标尺所测定信号幅度比的范围，通常为60db。现代的频谱仪其动态范围可达80db（即0~80db），这主要取决于对放大器的性能及本机互调失真的程度。

五 扫频宽度

频谱分析仪的扫频宽度即扫频范围，决定仪器所能显示频谱的宽度。例如PFG-1B型高频频谱分析仪的扫频宽度为 $\pm 15\text{KHz}$ 。它能显示的频谱宽度为0~30KHz；BP-9型宽频带频谱分析仪的扫频宽度为 $\pm 200\text{MHz}$ ，它能显示的频谱宽度为0~400MHz。

六 选择性

为了提高频谱分析仪的分辨率。除了采用多次差频的方法以外，现代的频谱仪大都采用窄带的晶体滤波器以提高仪器的选择性。例如BP-6型频谱仪，其选择性有200Hz、100Hz和Hz三挡；而PFG-1B型频谱仪的选择性则有150Hz、30Hz和6Hz三挡。

七 测量准确度

频谱分析仪的电平测量准确度要求不高，一般为 $\pm 2\text{db}$ 。美国HP电子仪器公司的产品3580A低频频谱分析仪的测量准确度可达到 $\pm 0.3\sim 0.5\text{db}$ ；而HP 8568A型高频频谱分析仪的测量准确度可达到 $\pm 1\text{db}$ 。

10-10

10-4 PFG-1B型高频频谱分析仪

国产PFG-1B型高频频谱分析仪是一种全晶体管化的多用途的高频测量仪器(附有低频扩展器,可测量 $100\text{Hz} \sim 3\text{MHz}$ 的低频信号),它主要用来测量单边带发射机的互调失真和载漏。经校对其灵敏度后,还可用来分析和测定从 10MHz 频率范围内,各种波形电信号的谐波分量和各种调制信号的频谱,以及测定调幅度、频偏等电参数。在测量准确度要求不高($\pm 5\% \pm 30\text{Hz}$)的场合,也可作为探测低电平信号的频率和估计键控信号的信息带宽,等等。

一、 技术性能

(一) 测量频率范围

1. 主机: $3 \sim 30\text{MHz}$ 共分九个波段

- (1) $3 \sim 6\text{MHz}$; (2) $6 \sim 9\text{MHz}$; (3) $9 \sim 12\text{MHz}$
- (4) $12 \sim 15\text{MHz}$; (5) $15 \sim 18\text{MHz}$; (6) $18 \sim 21\text{MHz}$
- (7) $21 \sim 24\text{MHz}$; (8) $24 \sim 27\text{MHz}$; (9) $27 \sim 30\text{MHz}$

2. 附加低频扩展器: $100\text{Hz} \sim 3\text{MHz}$, 分五个波段

- (1) $0.9 \sim 3\text{MHz}$; (2) $0.3 \sim 0.9\text{MHz}$;
- (3) $0.16 \sim 0.3\text{MHz}$; (4) $100\text{Hz} \sim 0.16\text{MHz}$;
- (5) $100\text{Hz} \sim 3\text{MHz}$ 。

(二) 分辨率: 50Hz 可测“ -45dB ”; 100Hz 以上可测“ -60dB ”。

(三) 扫描时间: 0.3 、 1 、 3 、 10 、 30 秒。

(四) 扫频宽度: $0 \sim 20\text{kHz}$ 。

(五) 灵敏度:

$100\text{Hz} \sim 3\text{MHz}$, 不低于 $+92\text{dB}/\mu\text{V}(40\text{mV})$;

3 ~ 6 MHz 不低于 +50 dB / μ V (320 mV) ;

6 ~ 27 MHz 不低于 +80 dB / μ V (10 mV) ;

27 ~ 30 MHz 不低于 +90 dB / μ V (32 mV) ;

(六) 幅度测量范围:

0 ~ “-30 dB”, “-30 dB” ~ “-60 dB”

(七) 本机互调失真: ≤ -60 dB

本机 50 Hz 调制: ≤ -45 dB

(八) 电源电压: 220 V $\pm$ 10 %; 0.5 A .

三 电路结构

PFG-1B 型频谱仪是采用外差分析法的电路结构。由于被测频率较高, 且分辨率要达 50 Hz, 故采用三次差频的方法, 即包括变频 I、变频 II、变频 III 三组外差电路。此外, 还有晶体滤波器、60 KHz 放大器、检波、对数放大器、Y 放大器、锯齿波发生器、X 放大器、低频扩展器以及电源部分等等, 其电路结构方框图如图 10-9 所示。

被测高频信号 (3 ~ 30 MHz) 从主机“输入”插孔加到变频 I 的输入衰减器, 然后再注入调谐回路进行第一次选频。通过混频和滤波后, 输出 3 ~ 6 MHz 的高频信号, 加到变频 II 的调谐回路进行第二次选频。又通过混频和滤波后变为 760 KHz 的中频信号, 并由“中频增益”控制器和中频衰减器, 输出中频信号到变频 III 的混频器输入端。变频 III 的作用是使 760 KHz 的中频信号, 与 820 KHz $\pm$ 10 KHz 的调频信号, 通过混频器的差拍作用, 变为 60 KHz $\pm$ 10 KHz 的扫频信号, 作为调制信号的锯齿波, 通过 X 放大器后提供示波管的 X 轴偏转电压。变频 III 输出的 60 KHz 信号, 通过窄带晶体滤波器和 60 KHz 放大器的提纯与补偿, 再经由检波器和对

数放大器后，提供Y放大器的激励电压，以保证示波管屏幕上d b刻度的均匀性。被测信号的幅度频谱采用直观的示波管显示。

为了能观测与分析低于3 MHz的信号波形，PFG-1B型频谱仪附加有随机的低频扩展器。被测低频信号从低频扩展器的“输入”插孔加到输入衰减器，并通过调谐、带滤和直通等三种方法注入混频器。然后跟6 MHz的晶体振荡器输出进行差拍，变为3~6 MHz的高频信号，再由低频扩展器的“输出”插孔，引接已变换频率的信号电压到主机的“输入”插孔以进行测量。

PFG-1B型扫频仪的高压电源部分，是采用高频振荡的整流电路，以提供示波管用的+1500V、-1500V和-1650V直流电压。电源的低部分，由晶体管稳压电路提供+24V、+18V、+12V和-12V的直流电压，以及余波整流的+190V直流电压。

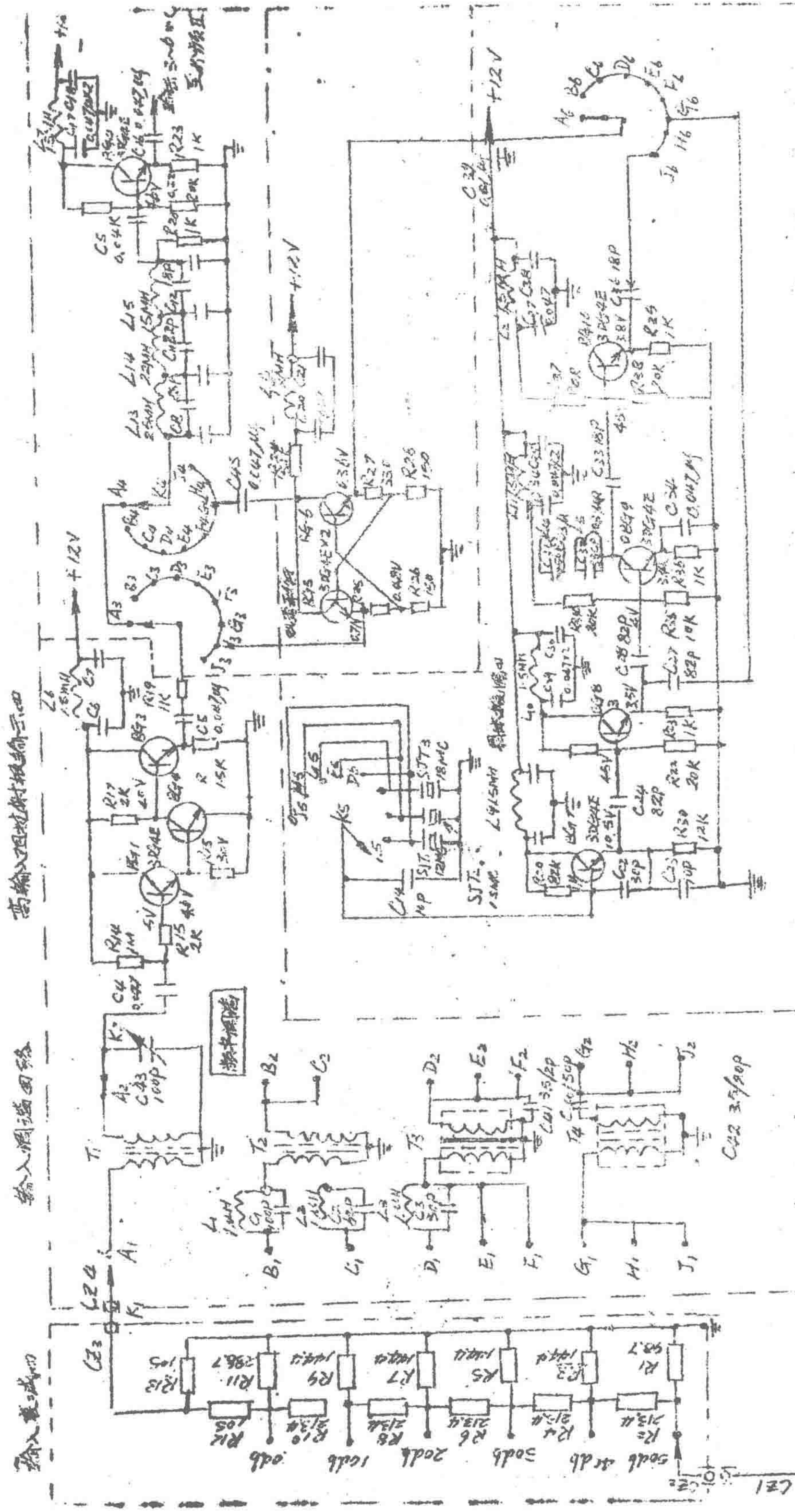
三 电路原理叙述

PFG-1B型频谱仪的各部分电路原理叙述如下：

1. 变频 I

PFG-1B型频谱仪的变频I部分，包括输入衰减器、输入调谐回路、阻抗变换器、混频器、晶体振荡器、低通滤波器和射极输出器，等等，其电路原理图如图10-10所示。

3~30 MHz的被测信号通过主机“输入”插孔CZ₁和CZ₂，加到输入衰减器(R₁~R₁₃)。衰减器的输入阻抗为75Ω，每挡衰减10db，共五挡(0~50db)，其输出经由CZ₃和CZ₄加到“输入调谐回路”。C₄₃为“频率调谐”电容器。输入调谐回路为变压器耦合式并联谐振回路，共分九个波段。其中L₁C₁、L₂C₂、L₃C₃组成谐波器，其谐振频率分别为16 MHz、



注: K₁ K₂ K₃ K₄ K₅ K₆ 是同轴波段开关

图 10-10 PFG-18 型频率计的变频 I 电路原理图

20 MHz 和 24 MHz，用以抑制本波段被测信号频率的二次谐波。以减少本机的三阶互调失真（指 $mf_1 \pm nf_2$ 中 $mf=3$ 的三次失真）。被测信号经过输入调谐回路的第一次选频后，由 C_1 和 R_{11} 耦合到 BG_1 的基极。这里 $BG_1 \sim BG_2$ 组成一种高输入阻抗的组合管射极输出器。它是三级采用 NPN 型和 PNP 型晶体三极管直接耦合的“互补式”射极跟随器电路，因此可以获得更高的输入阻抗和更低的输出阻抗及较大的动态工作范围。这对于提高仪器的稳定性与可靠性，都有很大的帮助。

射极输出器 BG_2 的输出高频信号，通过 C_2 和 R_{12} 以及波段开关 K_1 加到 BG_3 的发射极。 BG_3 和 BG_4 组成一种双三极管平衡混频器电路。来自波段开关 K_1 的晶体振荡器输出信号，加到 BG_3 的发射极与 3~30 MHz 的高频信号进行混频，并从两管公用集电极负载 R_{21} 上取得混频信号。变频 I 的作用是使 3~30 MHz 的被测信号，通过混频器与 12、15、18、24、30 MHz 的晶振频率，差拍为 3~6 MHz 的信号频率，然后通过 6 MHz 的低通滤波器加到变频 II，其选频作用由波段开关同步地进行如下：

波段

(1) 3~6 MHz，直通；

(2) 6~9 MHz，选用 12 MHz 晶振，混频为 6~3 MHz 输出；

(3) 9~12 MHz，选用 15 MHz 晶振，混频为 6~3 MHz 输出；

(4) 12~15 MHz，选用 18 MHz 晶振，混频为 6~3 MHz 输出；

(5) 15~18 MHz，选用 12 MHz 晶振，混频为 3~6 MHz

输出:

(6) 18~21 MHz. 选用15 MHz 晶振, 混频为3~6 MHz

输出:

(7) 21~24 MHz, 选用18 MHz 晶振, 混频为3~6 MHz

输出:

(8) 24~27 MHz, 选用倍频30 MHz, 混频为6~3 MHz

输出:

(9) 27~30 MHz, 选用倍频24 MHz, 混频为3~6 MHz

输出.

根据非线性器件的频率变换原理, 当两个频率不同的正弦电压同时作用于非线性器件(例如同时加到晶体三极管的基—射极之间), 就会在它的输出电流中(例如晶体三极管的集电极电流), 产生许多组合频率分量。设两个正弦电压的频率分别为信号频率 f_s 和本机振荡频率 f_L 。则组合频率 f_{pq} 为:

$$f_{pq} = |\pm p f_L \pm q f_s| \quad (10-3)$$

式中 p 、 q 为任意的正整数(0、1、2、3……)。如果用一种滤波器, 取出其中有用的差频分量($f_o = f_L - f_s$ 或 $f_s - f_L$), 而滤除其余无用的组合频率分量, 就可达到混频的目的。非线性器件有二极管、晶体三极管、场效应管和差分对等等。相应组成的混频器称为二极管混频器、晶体三极管混频器、场效应管混频器和差分对混频器等。

当 $f_{pq} = f_o = f_L - f_s$ 时, $p = q = 1$ 。如果 $|\pm p f_L \pm q f_s|$ 接近于 f_o , 这些频率分量也会通过滤波器电路而影响测量的结果。因此, 为了减少这种组合频率的干扰, 就减少 $|\pm p f_L \pm q f_s|$ 的频率分量, 目前广泛采用的平衡混频器电路, 利用平衡