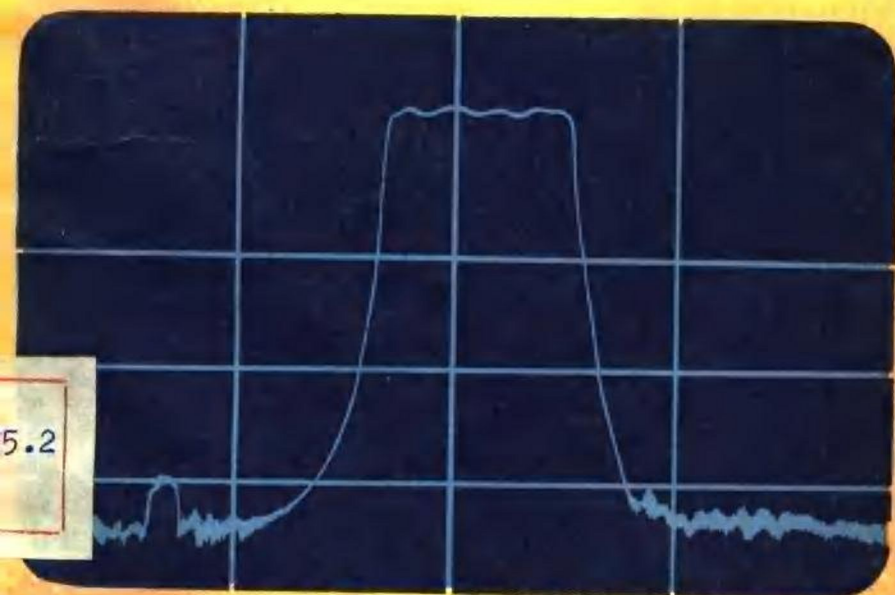


TUSHI CESHI YIQI

图示测试仪器

蒋焕文 编



中国铁道出版社

图示测试仪器

蒋焕文 编

中国铁道出版社出版

责任编辑 李骧

封面设计 翟达

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

中国铁道出版社印刷厂印

开本: 787×1092 $\frac{1}{4}$ 印张: 7.25 字数: 155 千

1982年12月第1版 1982年12月第1次印刷

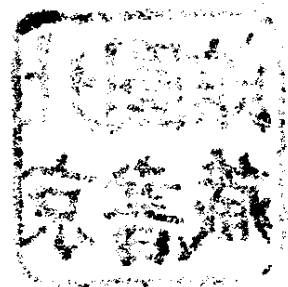
印数: 0001—7,000册 定价: 0.60 元

内 容 简 介

本书比较系统地阐述了几种图示测试仪器的的工作原理和主要问题，并结合典型产品，详细介绍了频率特性图示仪、频谱分析仪和半导体器件特性图示仪的工作特性、组成以及各单元电路的工作原理。本书还通过测试举例对图示仪的正确使用方法和检测作了具体介绍。

本书共分三章：第一章频率特性图示仪；第二章频谱分析仪；第三章半导体器件特性图示仪。

本书内容力求通俗实用，可供电子工业战线的广大工人、技术人员、大专院校电子专业的师生及一般从事无线电、电子技术工作者参考。



前 言

图示测试仪器属于显示仪器的范畴，通用示波器是最常见的显示仪器。从广义上来讲，示波器可看作是一种能够在直角坐标（或极坐标）中描绘函数图形的显示仪器，这样，示波测量的应用范围将可大大扩大。例如，利用扫频技术，就有可能利用示波器来观测系统的幅频特性，以及对信号进行频谱分析，这就组成了目前已被广泛应用的频率特性图示仪、频谱分析仪等研究频域响应的图示测试仪器。又如，示波器作为 X - Y 坐标图形的描绘仪，可以用来观测各种半导体器件的静态特性曲线，这就组成了各种半导体器件特性图示仪。

目前，图示测试仪器在电子测量技术中应用日益广泛，由于图示测试仪器具有直观、精确、调试过程简单而迅速，以及便于测试自动化等优点，因此，已成为现代化生产及电子设备管理和维修工作中所必不可少的基本测量仪器。

近几年来，我们看到一些介绍具体产品的小册子。但是，新的产品不断出现，无论从产品品种和性能方面都在发展，为适应这一情况，我们认为有必要编写一本比较全面和系统地阐述各种图示测量仪器的书。本书将在读者掌握一般通用示波器的基础上，比较系统地阐述频率特性图示仪、频谱分析仪和半导体器件特性图示仪的基本工作原理，电路组成和结构特点，并在此基础上结合典型产品详细介绍这些图

示仪的组成，主要电路和正确使用方法。

由于编者水平有限，书中难免有错误之处，希望广大读者批评指正。

编者 一九八一年二月
于北方交通大学

目 录

第一章 频率特性图示仪	1
1.1 概 述	1
1.2 获得扫频信号的方法	4
1.2.1 利用变容管扫频	5
1.2.2 磁调制扫频	18
1.3 图示仪的基本组成形式	32
1.3.1 变容管扫频图示仪	33
1.3.2 磁调制扫频图示仪	35
1.3.3 通用图示仪	37
1.4 频率标记	39
1.4.1 利用差频法获得频标	39
1.4.2 利用吸收电路获得频标	41
1.4.3 频率标尺	42
1.4.4 频率坐标测量板	45
1.5 幅值定标	51
1.5.1 幅值显示的两种方法	51
1.5.2 对数放大器	52
1.6 光栅增辉式图示方法	57
1.6.1 两种显示方法	57
1.6.2 光栅法的显示原理	58
1.6.3 比较器与增辉脉冲形成电路	63
1.6.4 电子电平刻度线和频率刻度线	67
1.6.5 总体组成	75

1.7 产品简介	77
1.7.1 BT-4型低频频率特性测试仪	77
1.7.2 BU401 型载频电平图示仪	89
1.7.3 BT-3型频率特性图示仪	100
1.8 使用图示仪应注意的问题	112
1.8.1 关于自激问题	112
1.8.2 关于中心频率滞后问题	117
1.8.3 注意过载而引起的不真实显示	118
第二章 频谱分析仪	120
2.1 概述	120
2.2 外差式频谱仪的工作原理	122
2.3 频谱仪的工作特性及其含义	123
2.3.1 频率分辨力	123
2.3.2 灵敏度与动态范围	124
2.3.3 扫频特性	124
2.3.4 动态分辨力和在扫频工作下的灵敏度	125
2.4 产品介绍	128
2.4.1 主要技术指标	129
2.4.2 组成方框图	129
2.4.3 使用方法	135
2.5 使用频谱仪应注意的问题	147
2.5.1 关于厩频	147
2.5.2 关于频谱仪饱和问题	149
第三章 半导体器件特性图示仪	150
3.1 晶体管特性的图示方法	150
3.1.1 工作原理	150
3.1.2 图示仪的基本组成	152
3.1.3 扫描频率的选择	153

3.1.4 负载线的显示	155
3.2 脉冲图示方法	157
3.2.1 从被测管的温升谈起	157
3.2.2 脉冲图示方法	160
3.3 阶梯波电压发生器	162
3.3.1 形成阶梯波的基本方法	162
3.3.2 利用《密勒》积分电路改善线性	167
3.3.3 利用自举电路改善线性	171
3.3.4 脉冲阶梯波电压的形成	175
3.4 脉冲形成电路	178
3.5 阶梯波放大器	181
3.5.1 基本原理	181
3.5.2 举 例	183
3.6 典型产品介绍	186
3.6.1 JT-1型图示仪	186
3.6.2 QT-2型图示仪	207
参考资料	222

第一章 频率特性图示仪

1.1 概 述

在电子电路测试中，经常需要测量频率特性。我们都知道，一个电路（或系统）的频率特性，可用它的幅频特性和相频特性两张曲线图来表示，一般，幅频特性用得更为经常，故若无特别说明，本章所提频率特性均指幅频特性。所以，所谓频率特性图示仪，实际上是指在示波管屏幕上直接显示幅频特性曲线的测试仪器。频率特性图示仪（简称图示仪）的用途是十分广泛的，例如，列车无线调度电台中接收机的高频和中频放大器的测试，电视接收机中图象中频放大器的测试，以及载波通信设备中各种滤波器的衰耗特性的测试等，都可利用图示仪来进行。

频率特性的测试方法大体上可分为两类：逐点测量法和扫频测量法。

逐点测量法就是用普通信号发生器作信号源，用电子电压表作指示器，其测试方框图如图 1—1 所示。

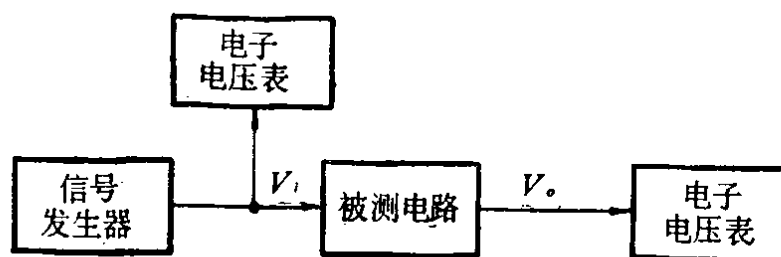


图 1—1 频率特性的逐点测量

测量步骤如下：逐点调节正弦信号发生器的频率（从待测电路低端频率开始，一直增加到高端频率），并记下相应

的输入电压 V_i 和输出电压 V_o 。(一般,使 V_i 保持不变)。然后,在直角坐标纸上,以频率为横坐标,以 V_o/V_i (或 $20\lg V_o/V_i$ [dB])为纵坐标,将指示器上读得的数据逐点连接起来,即可描绘出所测幅频特性曲线。这就是逐点测量法或称点频法。很明显,这种方法不仅操作繁琐、费时,而且有可能因取的点频数不够而漏掉被测频率特性曲线中的某些细节,即所得曲线不够精确。因此,逐点测量法远远不能适应现代化产生的需要。

另一类测试方法是扫频测量方法,与逐点测量法相比,扫频测量法可以大大简化测试过程,节省时间,从而给快速、自动测试提供了条件。在扫频测量法中,以扫频信号发生器作为信号源,所谓“扫频”,就是信号频率能够在一定范围内按一定规律作周期性的“扫动”,从而代替了信号频率的人工调节。为了能直接观察频率特性,用示波器代替了逐点测量法中的电子电压表,并由示波器来完成记录和描绘曲线的作用。

图 1—2 所示为利用扫频测量法测试频率特性的基本方框图。

扫频信号发生器实际上是一个频率可控的正弦振荡器,它的振荡频率受扫描发生器输出的扫描电压所控制。若扫描电压为锯齿波[图 1—2(a)],则扫频信号发生器的瞬时频率将随扫描电压的线性增加而由低到高扫动,而其振幅恒定不变[图 1—2(b)]。

频率在一定范围内扫动的扫频信号加到被测电路的输入端,例如,为一调谐放大器。由于调谐放大器对不同输入信号频率的增益不同,故其输出电压的振幅不再保持恒定,而其包络变化与被测电路的幅频特性曲线形状相对应[图 1—2(c)]。由峰值检波器检出这个输出信号包络,即图 1—2

(d)所示波形,称图形信号。很明显,它的形状与被测电路的幅频特性曲线形状相同。这个图形信号被加到示波器的《Y》通道输入端,使得电子射线在垂直方向的位移正比于谐振放大器的输出电压 V_o ,也就是正比于该放大器的电压增益 V_o/V_i (因为输入扫频信号振幅为定值)。

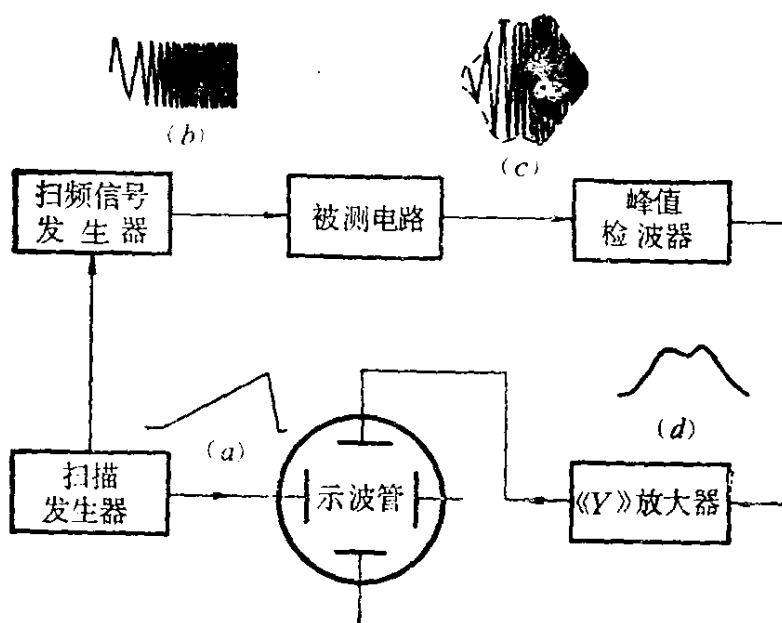


图 1-2 扫频测量法基本方框图

另一方面,由于扫频信号发生器在扫描电压作用下按扫描电压变化规律扫动,这样,扫频信号瞬时频率的变化与电子射线在水平方向的位移存在线性关系,也就是说,示波管屏幕上的水平轴已变换成线性频率坐标轴。结果,电子射线在图形信号电压与扫描电压同时作用下,将在屏幕上描绘出被测电路的幅频特性曲线图形。

从上可知,利用扫频测量法,可实现频率特性的自动或半自动测试,因此简单、敏捷、速度快、工作效率高。同时,由于扫频信号的频率是连续变化的,因此在示波管屏幕上显示的被测电路频率特性曲线是完整的,不会漏掉其中的细节。扫频测量法的另一个独特优点是可进行快速扫频,这

在逐点测量法中是难于实现的，因为依靠人工逐点转换频率是达不到快速的。快速扫频使我们有可能测量被测电路的动态频率特性，例如，测量滤波器的动态选择性曲线（详见第二章）。

目前，常把扫频信号发生器、示波器和检波器组成各种独立仪器，引出了各种名称，例如，频率特性测试仪，扫频仪、电平图示仪等等，我们在这里统称它们为图示仪。早期的图示仪，其测量精度不高，但随着示波管的不断进步以及电子电路的发展，比如，利用大屏幕的磁偏转式示波管和光栅增辉式的显示方法（详后），使得图示仪的测量精度大大提高，故已成为现代电子设备测量中的必备仪器。

1.2 获得扫频信号的方法

扫频测量的核心是扫频信号发生器，具有扫频功能的扫频振荡器又是扫频信号发生器的主要组成部分。获得扫频信号的方法很多，早期采用机械扫频*，进而采用电抗管扫频和磁调制扫频。由于变容二极管的出现和性能的不断提高，目前，变容二极管（变容管）扫频应用甚广。在获得较高频率的扫频信号时，由于磁调制扫频具有独特的优点，故目前仍被广泛采用。在更高的频段（GHz 量级），可采用所谓 YIG 扫频，YIG 是一种单晶铁氧体材料——钇铁石榴石的英文缩写。利用 YIG 磁调谐振器作成的扫频振荡器可提供频率范围很宽的扫频信号**。

不论采用哪一种扫频方法，对一个扫频振荡器都应满足如下基本要求：

* 所谓机械扫频就是利用电机通过传动机构直接带动决定振荡频率的可变电容器作周期性往返转动。例如，GV704 载频振荡器（东德 RFT 公司）就是机械扫频的一个例子。

** 见参考资料[1]P.169~175。

第一，具有足够宽的有效扫频宽度。所谓有效扫频宽度是指，在保证所要求的扫频特性的线性度和振幅平稳性的条件下，扫频信号的最大扫频范围；

第二，良好的扫频线性度。它是指扫频信号瞬时频率的变化规律和预定的扫频规律之间相吻合的程度。一般扫频线性度应优于 5 %；

第三，良好的振幅平稳性。一个理想的扫频信号应该是等幅的，实际上不可避免会产生寄生调幅。一般寄生调幅应优于 1 %。

上述要求是不难理解的，只有扫频宽度足够宽，才能描绘出被测电路的完整的幅频特性，而且只有振幅平稳性好，被测电路输出信号的包络才能表征该电路的频率特性。对扫频线性的要求也是很明显的，因为只有扫频信号的瞬时频率变化规律和扫描电压的变化规律相吻合，才能把示波管屏幕的水平轴变换成线性的频率轴。应该指出，当测试宽带放大器时往往需要对数扫频，即扫频规律和扫描规律之间具有对数关系。

下面，我们分别介绍几种常用的扫频方法。

1.2.1 利用变容管扫频

1. 变容管的压控特性

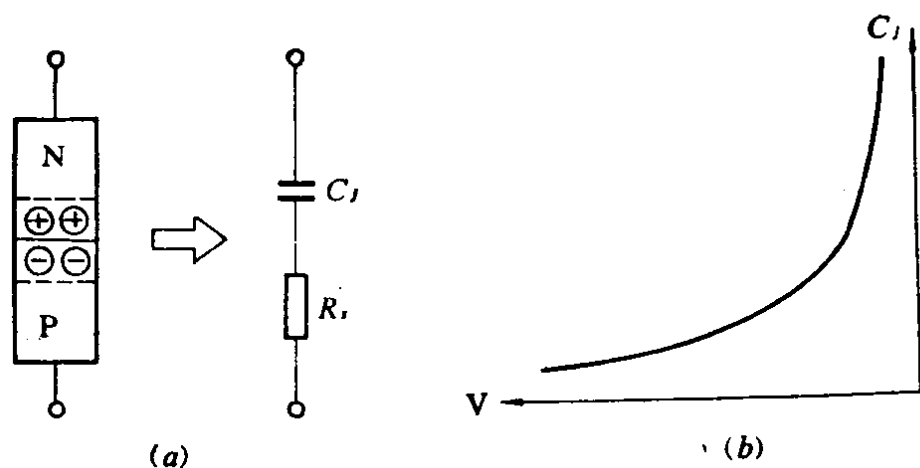
变容管实质上是一个PN结，当处于反向偏置时存在一个结电容 C_j （又称势垒电容），而且 C_j 将随反向电压 V 而变，这时，PN结的等效电路如图 1—3（a）所示。

其中 C_j 为结电容， R_s 为等效损耗电阻。

一个变容管具有下列特性（以2CC1A为例）：

优值（Q值） 200~500（ $f = 5 \text{ MHz}$, $V = -4 \text{ V}$ ）

C_j $85 \pm 25 \text{ pF}$ （ $f = 5 \text{ MHz}$, $V = -4 \text{ V}$ ）

图 1—3 (a) 变容管等效电路; (b) c_j - V 曲线

C_j 变化范围 219~47pF

温度系数 0.01~0.05%/°C

变容管的优值表征它的损耗大小, 定义为

$$Q = \frac{1}{2\pi f R_j C_j}, Q \text{ 是 } f \text{ 与 } V \text{ 的函数。正由于 } Q \text{ 值随 } f \text{ 和 } V \text{ 而}$$

变, 因而它是产生寄生调幅的主要原因。

变容管的电容 C_j 与反向电压 V 具有下列关系

$$C_j = C_0 \left(1 + \frac{V}{V_\phi} \right)^{-n} \quad (1-1)$$

式中 C_0 ——反向偏压为零伏时的变容管电容;

n ——电容变化指数, 其值取决于PN结的结构, 如

$$\text{突变结的 } n \approx \frac{1}{2};$$

V ——加于变容管二端的反向电压;

V_ϕ ——PN结的接触电位, $V_\phi \approx (0.6 \sim 0.7)$ 伏。

一个突变结的变容管的 C_j - V 曲线示于图 1—3 (b),

C_j 与变容管两端反向电压 V 的平方根成反比。

2. 变容管扫频振荡器的基本电路

利用变容管的电容 C_j 作为回路电容的一部分, 即可组

成变容管扫频振荡器电路，图 1—4 所示为 BT-4 型图示仪中所采用的扫频振荡器电路*。

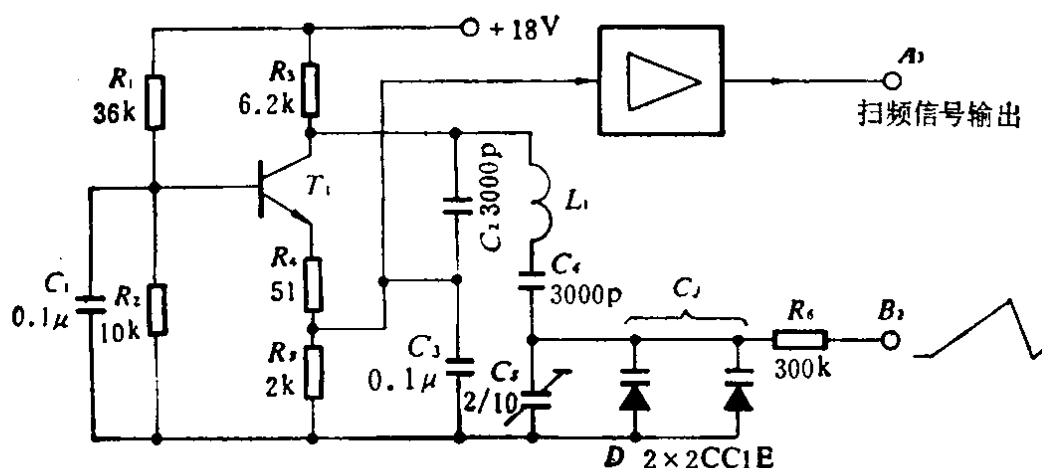


图 1—4 BT-4型图示仪的扫频振荡器电路

由三极管 T_1 组成改进型电容三点式振荡器**，振荡频率由 L_1 与 C_4 、 C_5 和 C_7 决定，其中 C_7 为二个变容管（2CC1E）并联的总电容。锯齿波电压加到 B_2 端经隔离电阻 R_6 加到变容管两端，以控制结电容 C_j ，从而使振荡器的振荡频率随锯齿波电压而变。改变锯齿波电压的重复周期可调节扫频速度，而改变锯齿波电压的振幅可调节扫频宽度。扫频振荡器的中心频率为 200kHz，最大扫频宽度为 5kHz。

3. 扫频振荡器的工作特性

对一个扫频振荡器来说，有三个主要工作特性——扫频线性度、振幅平稳性和扫频宽度，它们之间是相互矛盾的。下面我们来讨论如何改善变容管扫频振荡器的这三个工作特性。

（1）扫频线性度的改善

我们首先来讨论如何解决扫频宽度和扫频线性度之间的

* 在仪器产品目录中称“BT-4型低频频率特性测试仪”。

**见参考资料[5]，P.432~440。

矛盾，即在保证所需扫频宽度的条件下，如何改善扫频线性度。

在图 1—4 中，若 $C_j \gg C_5$ ，而 $C_j \ll C_4$ ，则扫频振荡器的振荡频率可写成

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_j}} = \frac{F(V)}{2\pi\sqrt{L_1}} \quad (1-2)$$

式中 $F(V) = \frac{1}{\sqrt{C_j}}$ ——变容管反向电压 V 的函数。

将式 (1—1) 代入式 (1—2)，比如采用突变结变容管，即 $n = \frac{1}{2}$ ，则

$$f \propto V^{-\frac{1}{4}*}$$

可知，外加控制电压 V (即加在变容管二端的反向电压) 与频率成非线性关系。一个理想的线性化方法是选用电容变化指数 $n = 2$ 的变容管。这种特殊要求的管子应从超突变结变容管中选用。

我们也可从电路上来进行线性化，在图 1—4 中， C_4 除了隔直流以外，还与 C_5 一起作为改善线性之用，仔细调整 C_4 、 C_5 和 C_j 的比值，可在一定扫频宽度内使频率与控制电压之间近似线性关系，这是最简单的线性化方法。

一种比较完善的扫频线性化方法如图 1—5 (a) 所示。线性变化的锯齿波电压首先经均衡电路变换成非线性的控制电压，后者加到变容管扫频振荡器进行扫频，这样，可以用控制电压的非线性来补偿变容管扫频的非线性，如图 1—5 (b)。

图 1—6 (a) 示出了一种均衡电路的原理图**，这个均

*当 $(V/V_0) \gg 1$ 时。

**见《G2022型扫频装置说明书》，西门子 (SIEMENS) 公司。

衡电路是采用分段逼近法来得到图 1—6 (b) 所示 $V_o - V_i$ 关系曲线。三极管 T_1 组成一级电流串联负反馈放大器, 后跟一个射极输出器 T_2 , 两级电压增益近似等于 R_c/R'_E , 其中 R'_E 为发射极等效电阻。在发射极电路中的六个二极管 ($D_1 \sim D_6$) 为开关管, 由 $R_7, R_8, R_9, \dots, R_{13}$ 和 W_1 组成的直流分压电路, 分别给每个二极管提供一个反向偏压 (如图中的 $V_1, V_2, \dots, V_6$)。设输入信号电压 V_i 随时间作线性增长, 则 T_1 发射极电位 V_e 跟随 V_i 增长, 当 $V_e \approx V_i < V_1$ 的时间内, 六个开关管全部截止, $R'_E = R_E$ 为最大, 则 T_1 的电压增益最小。在 $V_o - V_i$ 坐标中, $V_o - V_i$ 曲线的斜率就是电压增益, 故在 $V_i = 0 \sim V_1$ 范围内, 斜率最小 [图 1—6 (b) 中线段 1]。在 $V_1 < V_i < V_2$ 范围内, 开关管 D_1 导通, R'_E 变成 R_E 与 $(R_1 + R_7)$ 并联, 即 $R'_E < R_E$, 故电压增益提高, 如图 1—6 (b) 中线段 2, 以此类推。可见, $V_o - V_i$ 曲线是由若

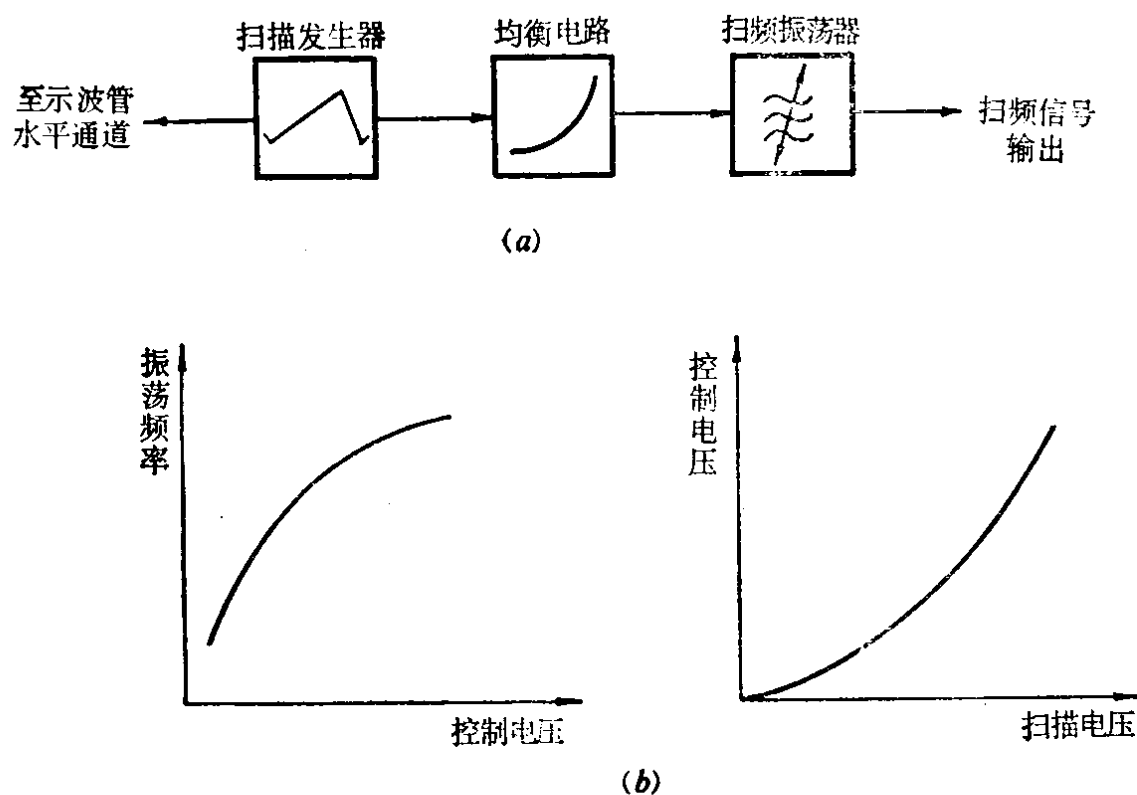


图 1—5 一种扫频线性化方法