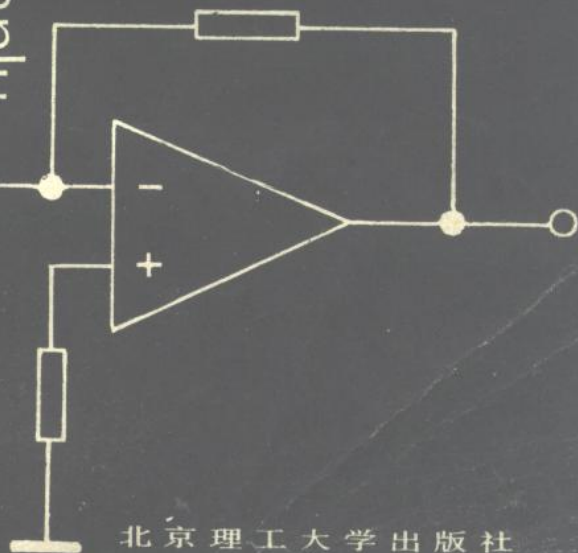


线性 电子线路 实验 指导书

● xianxing dianzixianlu
shiyanshizhidao shu



北京理工大学出版社

线性电子线路实验指导书

本书编写小组编

北京理工大学出版社

内 容 简 介

本书根据国家教委审定的教学大纲要求编写而成。内容包括常用器件测试及常用仪器使用，基本电路指标测试方法及实验技能训练，模拟集成电路应用实验，综合实验等四部分，共12个实验。书末有4个附录可供选用元器件参考。

本书内容循序渐进，加强了集成运放应用，注意培养学生独立工作能力，可作为高校电子类专业线性电子线路（或模拟电子线路，低电子线路）实验课教材（45学时），也可供夜大，电大，职大学员使用。

线性电子线路实验指导书

本书编写小组编

*

北京理工大学出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

北京理工大学出版社印刷厂印刷

*

787×1092毫米 32开本 6.375印张 138千字

1988年12月第一版 1988年12月第一次印刷

ISBN 7-81013-071-4/TN·4

印数：1-6000册 定价：1.30元

前 言

依据国家教委高等工业学校电子线路课程教学指导委员会制订的《电子线路(I)、(II)实验教学基本要求》，并考虑到近年来关于实验教学的改革形势，在北京工业学院电子工程系原《线性电子线路实验指导书》基础上结合几年来实验教学实践编写了本指导书。

为适应电子技术的发展形势，本书力图贯彻以集成电路为主的原则。在全部十二个实验中，有关模拟集成电路及其应用的实验占七个；并在其它几个实验中为集成电路实验作了实验方法等方面的预备性训练。

鉴于电子线路是一门实践性很强的技术基础课，实验教学又是整个教学过程中极其重要的一环，本书加强了有关实验基本技能训练的内容。为此，不但设置了各种常用仪器的操作和电路调整、测试等单项基本功训练，而且设置了从设计、安装到调整、测量的综合实验技能训练。

理论与实践相结合是本书所要遵循的又一条原则。因此，在书中一方面适当增加了实验原理的阐述，从而为实验电路提供必要的理论计算和工程设计公式，以及调整、测试所依据的物理概念；另一方面，所安排的大多数实验都包含有电路设计或计算、元件选择、电路安装（焊接或在面包板上插接）和调整、测试等实践内容。

为了培养学生独立思考和独立工作的能力，本书的多数实验都由学生根据要求自行组织。同时，还给出了一定数量的思考题给予适当的引导。

从实验电路的工程设计和安装需要出发，本书附录提供

了常用电阻器、电容器、半导体器件和模拟集成电路的有关资料。

本书所列的全部实验教学内容约需45学时完成。也可根据不同要求只选择其中的某些内容。

本书实验一、六由何产棣编写，实验二、三、五、十二由魏华编写，卞祖富为以上实验作了补充、修改和整理，实验四、七、八、九、十、十一由阎百兰编写。赵汝彭副教授在实验方案的确定及内容选择等方面给予了指导与帮助。

北方交通大学卢淦教授审阅了全部书稿，并提出了许多宝贵意见。北京工业学院电子技术教研室线性电子线路教学小组的全体同志对本书的编写给予了支持和帮助。在此一并表示感谢。由于编者水平所限，错误与不妥之处在所难免，恳请读者不吝指正。

编 者

1988.1.10

目 录

实验一	分立电子器件外特性的测试.....	(1)
实验二	实验仪器的操作训练.....	(21)
实验三	阻容耦合放大器的研究.....	(37)
实验四	负反馈放大器的研究.....	(47)
实验五	OCL 扩音器的设计与调试.....	(56)
实验六	集成运算放大器参数的测试.....	(77)
实验七	基本运算放大器的研究.....	(89)
实验八	积分、微分运算放大器的研究.....	(102)
实验九	有源滤波器的研究.....	(113)
实验十	对数与反对数运算放大器的研究.....	(124)
实验十一	电压比较器的研究.....	(134)
实验十二	直流稳压电源的研究.....	(142)
参考书目		(154)
附录 I	常用电阻器的种类、性能和规格.....	(155)
附录 II	常用电容器的种类、性能和规格.....	(158)
附录 III	常用半导体器件的型号与性能.....	(161)
附录 IV	常用模拟集成电路的型号与性能.....	(174)

实验一 分立电子器件外特性的测试

一、实验目的

1. 加深对晶体三极管 (BJT) 及场效应管 (FET) 外特性的理解。
2. 了解晶体管特性图示仪和 H 参数测试仪的工作原理。
3. 学习使用晶体管特性图示仪和 H 参数测试仪测量 BJT 和 FET 外特性的方法。

二、实验原理

1. 晶体管的静态特性曲线

若将晶体管 (BJT 或 FET) 的一个电极接地, 则可视它为一个双端口网络, 如图 1-1 所示。静态特性曲线就是描述该网络低频工作时输入电压、输入电流、输出电压、输出电流这四个变量之间相互关系的。要在一个平面坐标系内用图形表示四个变量之间的函数关系是困难的, 不过, 表示三个变量之间的函数关系则是办得到的, 只要以其中的一个变量作为参变量就可以了。这三个变量间的关系曲线称为一

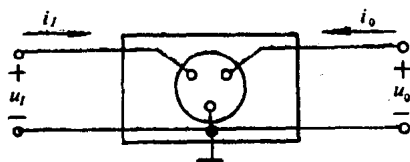


图 1-1 晶体管视为双端口网络

族曲线。因此，至少需要二族曲线才能全面表征四个变量间的关系*。

对 BJT 而言，最常用的是输入特性曲线

$$i_I = f_1(u_I, u_O) \quad (1-1)$$

和输出特性曲线

$$i_O = f_2(u_O, i_I) \quad (1-2)$$

对 FET 而言，最常用的是输出特性曲线

$$i_O = f_3(u_O, u_I) \quad (1-3)$$

和正向转移特性曲线

$$i_O = f_4(u_I) |_{u_O=C} \quad (1-4)$$

式(1-1)、(1-2)、(1-3)中括号内的第二个变量为参变量。四个变量的具体含意视接地组态和管子类型而定。例如，BJT 的共发组态（即发射极接地组态），因其基极为输入端，集电极为输出端，故 i_I 即为基极电流 i_B ， u_I 即为基-射电压 u_{BE} ， i_O 即为集电极电流 i_C ， u_O 即为集-射电压 u_{CE} 。余类推。

2. 晶体管的小信号参数

单个晶体管用来做放大器时，为了保证信号不失真地被放大，必须工作在放大区，这就要求它有合适的静态工作点。如果信号充分小，那么，信号只使得晶体管的电压与电流在静态工作点附近变动。晶体管的小信号参数正是表征晶体管在静态工作点附近性能的参数。 H 参数是小信号参数的

* 对 FET 而言，因其在源极接地和漏极接地组态时输入电流甚小，故若略去其影响，用一族曲线即能表征其它变量间的关系。

一种，由于在低频时易于测量，故是晶体管低频应用时常用的参数。

若选 i_I 、 u_o 为自变量， u_I 、 i_o 为因变量，则可由下式来描述图 1-1 的函数关系。

$$\left. \begin{aligned} u_I &= f_1(i_I, u_o) \\ i_o &= f_2(i_I, u_o) \end{aligned} \right\} \quad (1-5)$$

因为现在关心的是静态工作点 Q 附近的性能，所以对式 (1-5) 在 Q 点处取全微分得

$$\left. \begin{aligned} du_I &= \frac{\partial u_I}{\partial i_I} di_I + \frac{\partial u_I}{\partial u_o} du_o \\ di_o &= \frac{\partial i_o}{\partial i_I} di_I + \frac{\partial i_o}{\partial u_o} du_o \end{aligned} \right\} \quad (1-6)$$

若所加信号为正弦信号，且充分小，则可用信号相量来代替上式中的各个微分量，于是得

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_I &= h_i \dot{I}_I + h_r \dot{U}_o \\ \dot{I}_o &= h_f \dot{I}_I + h_o \dot{U}_o \end{aligned} \right\} \quad (1-7)$$

其中

$$\left. \begin{aligned} h_i &= \left. \frac{\partial u_I}{\partial i_I} \right|_Q \approx \left. \frac{\dot{U}_I}{\dot{I}_I} \right|_{Q, \dot{U}_o=0} \\ h_r &= \left. \frac{\partial u_I}{\partial u_o} \right|_Q \approx \left. \frac{\dot{U}_I}{\dot{U}_o} \right|_{Q, \dot{I}_I=0} \\ h_f &= \left. \frac{\partial i_o}{\partial i_I} \right|_Q \approx \left. \frac{\dot{I}_o}{\dot{I}_I} \right|_{Q, \dot{U}_o=0} \\ h_o &= \left. \frac{\partial i_o}{\partial u_o} \right|_Q \approx \left. \frac{\dot{I}_o}{\dot{U}_o} \right|_{Q, \dot{I}_I=0} \end{aligned} \right\} \quad (1-8)$$

h_i 称为输出交流短路时的输入电阻, h_r 称为输入交流开路时的电压反馈系数, h_f 称为输出交流短路时的正向电流放大倍数, h_o 称为输入交流开路时的输出电导。低频时, 略去PN结电容的影响, 则上述四个H参数均为实数。H参数一般只用于低频小信号工作时的BJT。不同的组态, H参数也不相同, 并以下标区别之。例如, 共发组态的H参数表示成 h_{ie} (有时也写成 r_{be}), h_{re} , h_{fe} (因与 β 定义相同, 故也可用 β 表示) 和 h_{oe} 。余类推。

FET 的小信号参数一般只用共源组态的, 且只有以下二个:

$$\left. \begin{aligned} g_m &= \left. \frac{\partial i_D}{\partial u_{GS}} \right|_Q \approx \left. \frac{I_D}{U_{GS}} \right|_{Q, U_{DS}=0} \\ r_{ds} &= \left. \frac{\partial u_{DS}}{\partial i_D} \right|_Q \approx \left. \frac{U_{DS}}{I_D} \right|_{Q, U_{GS}=0} \end{aligned} \right\} \quad (1-9)$$

其中 i_D 为漏极电流, u_{GS} 为栅源电压, u_{DS} 为漏源电压, g_m 称为跨导, r_{ds} 称为输出电阻。式(1-9)也可用微分方法由式(1-3)推出。

晶体管的小信号参数还可以根据它们的定义, 由特性曲线求得, 如图1-2所示。

3. 晶体管的漏(泄)电流和反向击穿电压

(1) 反向饱和电流 I_{CBO} 发射极开路时, BJT 的集电结反向饱和电流称为 I_{CBO} 。

(2) 穿透电流 I_{CEO} 基极开路时, 穿透 BJT 两个PN结的电流为 I_{CEO} 。

(3) BJT 的反向击穿电压 $U_{(BR)CBO}$ 和 $U_{(BR)CEO}$ 发射极开路, 当集电极电流达到某规定值(视管子型号定)时

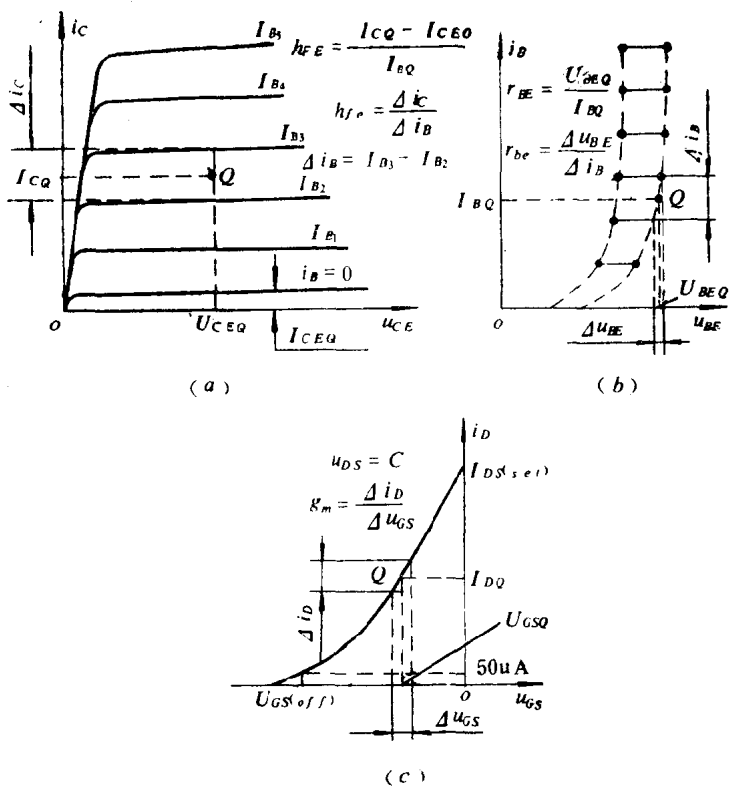


图 1-2 由特性曲线求小信号参数

- (a) 由输出特性求 h_{FE} 、 h_{fe} (b) 由输入特性求 r_{BE} 及 $r_{be}(h_{ie})$
 (c) 由转移特性求 FET 的 $I_{DS(sat)}$ 、 $U_{GS(off)}$ 和 g_m

加于集电极-基极间的反向电压即为 $U_{(BR)CBO}$ ；基极开路，当集电极电流达到某规定值时加于集电极-发射极间的反向电压即为 $U_{(BR)CEO}$ 。

(4) FET 的反向击穿电压 $U_{(BR)DS}$ 与 $U_{(BR)GSS}$ 在

栅源间加上使 FET 工作在截止区的电压，当漏极电流增长到某规定值时加于漏源间的电压即为 $U_{(BR)DS}$ ；漏源短路时，当漏极电流增长到某规定值时加于栅源间的电压即为 $U_{(BR)GSS}$ 。

4. FET 的饱和漏电流 $I_{DS(sat)}$ 和栅源截止电压 $U_{GS(off)}$ 、栅源阈值电压 $U_{GS(th)}$ 。

耗尽型 FET 在 u_{DS} 为规定值、 $u_{GS}=0$ 时的漏极电流即为 $I_{DS(sat)}$ ；耗尽型 FET 在 u_{DS} 为规定值，当漏极电流 i_D 下降到某规定值（一般为 $50\mu A$ ）时的栅源电压即为 $U_{GS(off)}$ （也称夹断电压 U_P ）；增强型 FET，在 u_{DS} 为规定值，当 i_D 为某规定值（一般为 $50\mu A$ ）时加于栅源间的电压即为 $U_{GS(th)}$ （也称开启电压 U_T ）。

5. 晶体管特性图示仪

静态特性曲线的测试方法有两种：逐点描述法和图示仪显示法。图 1-3 是逐点描述法的电路组成。调节电压源电压

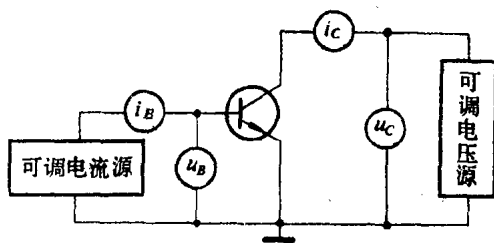


图 1-3 逐点描述法测试图

和电流源电流就可把各极电压、电流逐点地测量出来，将这些点标在相应的坐标系内，并把它们连成一条条光滑的曲线即成所测的静态特性曲线，这种方法显然是很繁琐的。

图示仪法是一种动态显示法，它可以自动地连续改变自

变量、断续改变参变量并自动地连续地测出因变量，同时将一族曲线完整地显示在屏幕上。图 1-4 是图示仪测试 BJT 共发输出特性的原理框图。集电极扫描电压发生器提供周期

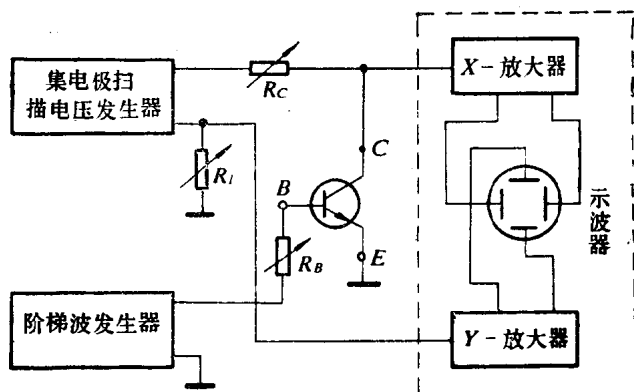


图 1-4 图示仪的工作原理

性连续变化的自变量 u_{CE} ，阶梯波发生器提供周期性断续变化的参变量 i_B ，分别相当于图 1-3 中的可调电压源和可调电流源。为了能正确地显示曲线，两者的波形必须在时间上严格地保持如图 1-5 所示的对应关系。

集电极扫描电压 u_{CE} 经 X 轴放大器加于示波管的 X 偏转系统，使电子束自左向右（或自右向左）扫描，同

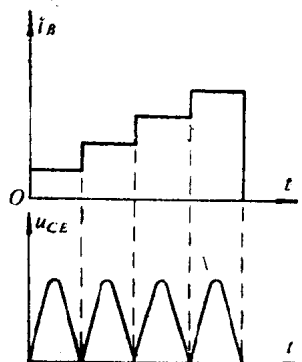


图 1-5 阶梯波与集电极扫描电压发生器的波形

时, 因变量集电极电流 i_c 由串接在集电极回路中的采样电阻 R_i 变换成电压, 再经 Y 轴放大器加于示波管的 Y 偏转系统, 使电子束在左右偏转的同时, 还上下偏转*。于是, 在一个扫描周期内, 便显示出一条特性曲线, 当电子束回归到原来的出发点时, 阶梯波便立即跳变到下一个梯级, 于是在下个扫描周期便又显示出一条曲线。如果在一个阶梯波周期内有五个梯级, 则屏幕上便显示有五条曲线组成的一族曲线。

电阻 R_B 相当于偏置电阻, 可用来调节阶梯波的幅度。电阻 R_C 称为功耗电阻, 也即是集电极负载电阻, 是用来限制被测管的功耗、保护晶体管的。

图 1-6 和图 1-7 分别为本实验用 JT-1 型晶体管特性图示仪的组成框图和面板图。仪器由四部分组成: 扫描电压发生器, 阶梯波发生器, 示波器和测试台。本仪器可测量晶体二极管、稳压管、晶体三极管 (BJT) 和场效应管 (FET) 等器件的静态特性曲线、反向击穿特性以及 BJT 的 I_{CBO} 和 I_{CEO} 等参数。

仪器的操作程序及使用注意事项如下:

(1) 开机, 预热 15 分钟。

(2) 根据被测管的类型和需要测试的项目, 调整面板上各旋钮到合适的位置, 同时把“测试选择”开关拨至“关”的位置, “峰值电压”旋钮调至零位置, 否则, 会使耐压较低的管子因突然加上过大的反向电压而击穿。

(3) 正确插入被测管, 将“测试选择”开关拨至左或右 (视被测管插在左方还是右方而定), 然后顺时针旋转“峰

* 关于示波器的原理, 请参看实验二。

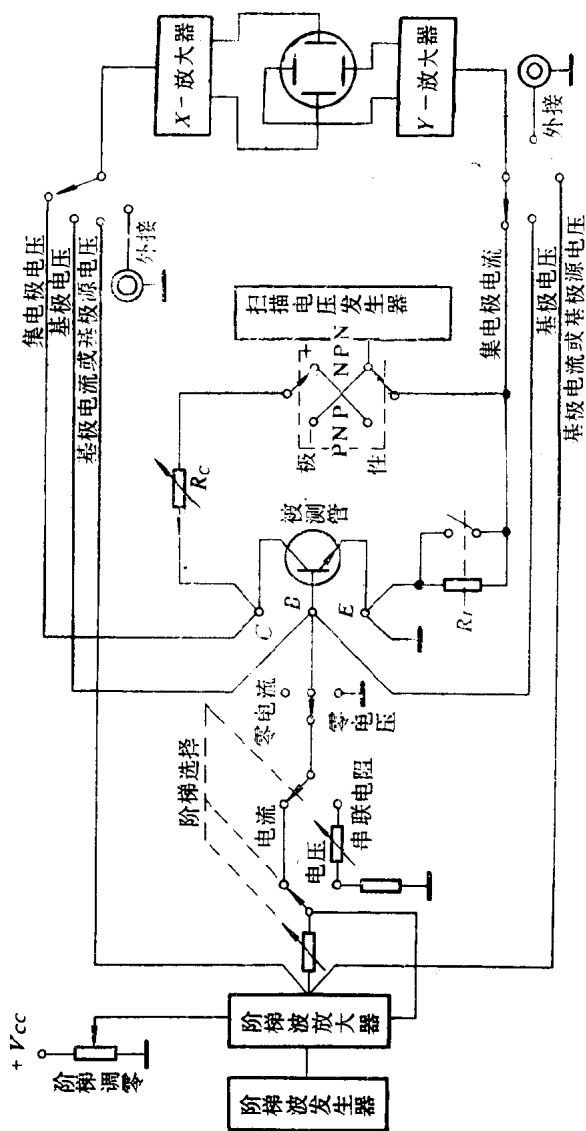


图 1-6 JT-1 型晶体管特性图示仪组成框图

JT-1 型晶体管特性图示仪

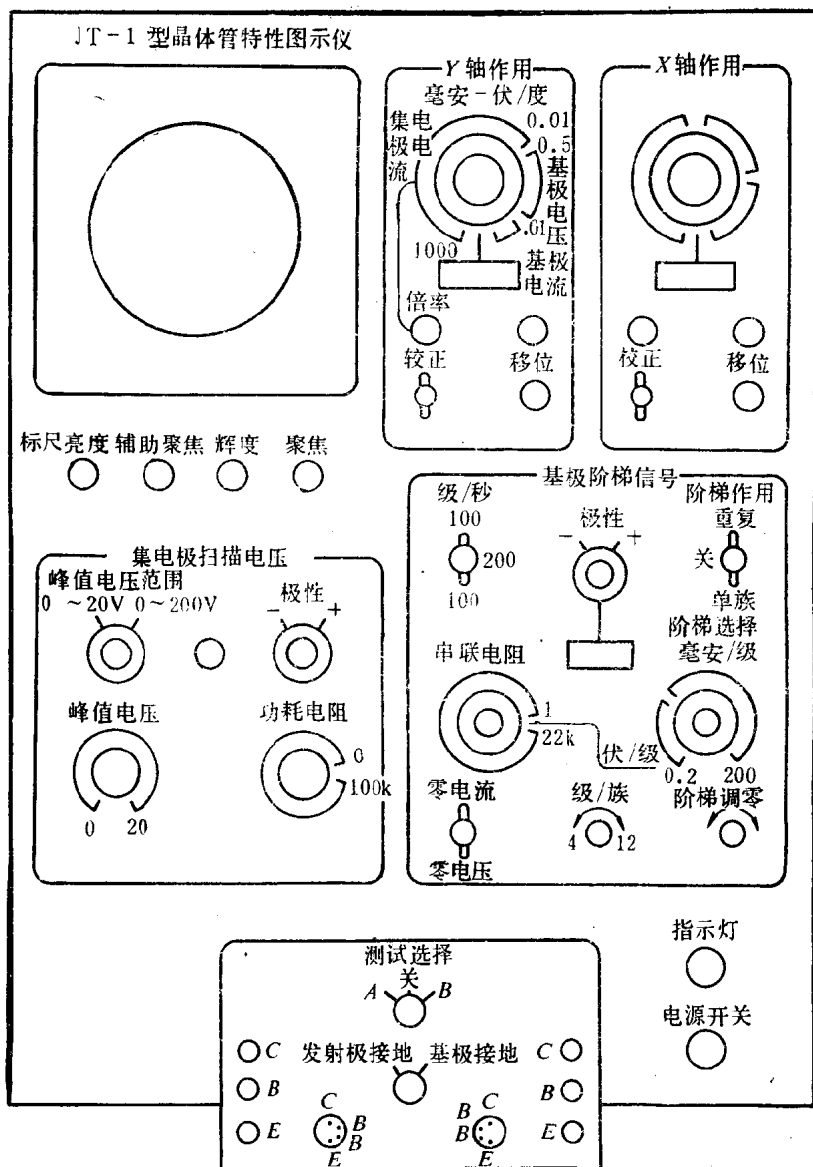


图 1-7 JT-1 的面板示意图

值电压”旋钮至屏幕上显示出令人满意的曲线为止。若曲线不够清晰，亮度太亮或太暗，可适当调节“辉度”、“聚焦”、“辅助聚焦”。如果曲线坐标原点不在屏幕上刻度尺坐标原点上，可调节X和Y“位移”旋钮使二者重合。

(4) 用透明描图纸描下曲线，或用照相机将曲线拍摄下来。

(5) 将“峰值电压”旋钮反时针旋至零，“测试选择”开关拨至“关”。若尚需进行其他项目的测试，则重复上述第(2)条及以后各项程序。整个测试完毕，取下被测管，关机。

上述程序中最重要的是第(2)条。下面讨论各旋钮位置确定的原则。

扫描电压与阶梯波的“极性”根据被测管的类型和组态选择。选择时应考虑本仪器对电压与电流正方向的规定：电压以接地的电极为参考点；电流以流入晶体管的方向为正方向。据此，“极性”可按表1-1来确定。

表 1-1 扫描电压与阶梯波的极性

管 型		组 态	扫描电压极性	阶梯波极性
NPN		共 发	正	正
		共 基	正	负
PNP		共 发	负	负
		共 基	负	正
JFET	N 沟道	共 源	正	负
	P 沟道		负	正