

项目二 简易助听器的分析与制作



简易助听器简介



项目综述

我国目前已进入人口老龄化社会，随着人口老龄化的加速，帮助老年人和听觉不灵敏者听到声音，改善听觉障碍，已成为越来越多人关心的问题。科学研究表明，佩戴专业适合的助听器可以有效缓解听损问题。

助听器实际上就是一个音频信号放大电路。音频信号放大电路能将微弱的声音信号放大，并通过扬声器发出悦耳的声音，在此基础上可制成助听器。音频信号放大助听电路组成框图如图2-1所示，从图2-1中可以看出，电路的核心是晶体管，电路的主要功能是电信号的放大。

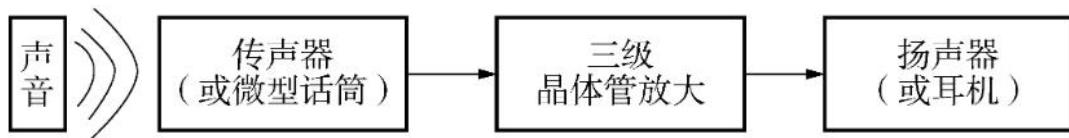


图2-1 音频信号放大助听电路组成框图

助听器主要由三个部分组成：传声器、放大器和耳机。传声器为声电转换器，将外界声音信号转变为电信号，然后输入放大器经放大后送至耳机，耳机再将放大后的电信号还原为声音。而其中的核心部分放大器一般多采用晶体管放大电路实现输入信号的放大。

简易助听器电路如图2-2所示，由 VT_1 、 VT_2 、 VT_3 构成三级音频放大电路。驻极体话筒 MIC 作为换能器，它可以将声波信号转换为相应的电信号，并通过耦合电容 C_2 送至前置低放进行放大。 R_1 是驻极体话筒 MIC 的偏置电阻，给话筒正常工作提供偏置电压。 VT_1 、 R_3 、 R_5 等元件组成一级电压放大电路，将经 C_2 耦合来的音频信号进行电压放大，放大后的音频信号经 R_4 、 C_1 加到电位器 R_P 上，电位器 R_P 用来调节音量。 VT_2 、 VT_3 组成电压电流放大电路，将音频信号进行再次放大，使音频信号有足够能量推动耳机发出声音。

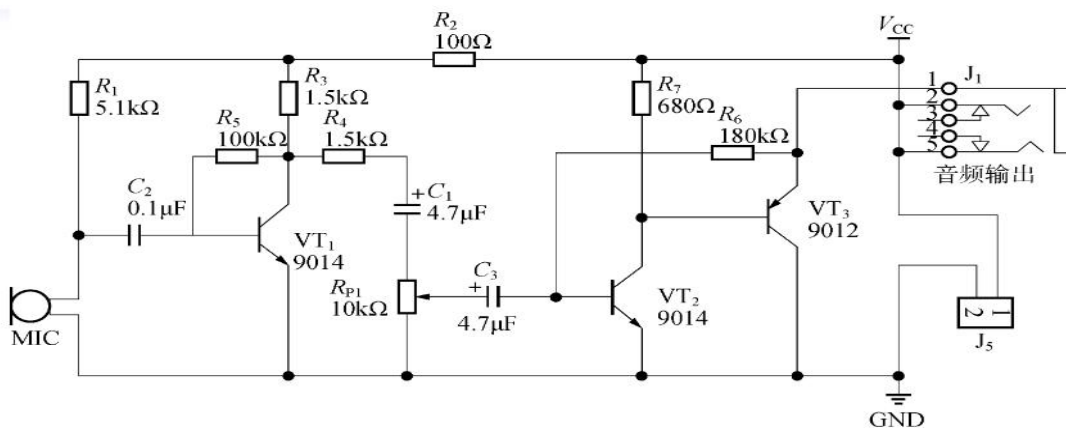


图2-2 简易助听器电路原理图



素质课堂

随着我国老龄化社会问题的日益凸显，积极应对人口老龄化已上升为国家战略，老年人的身体健康和生活质量，逐渐成为社会关心的问题。这就需要我们学以致用，用专业所学服务社会，以技术赋能人口老龄化国家战略，践行新时代青年一代的责任与担当。

技能目标

1. 能进行晶体管的识别、测试。
2. 能对放大电路动态参数进行分析、计算。
3. 能正确仿真基本放大电路、多级放大电路、负反馈放大电路。
4. 能进行助听器电路焊接与调试。



项目目标

素质目标

1. 理解“内因和外国相结合”的马哲观点，培养辩证思维。
2. 培养实事求是、勇于质疑的科学精神，树立良好的工作态度和职业道德。
3. 注重产品质量，激发技术为民的责任意识。

知识目标

1. 掌握晶体管的结构及电流放大特性。
2. 掌握晶体管基本放大电路的组成及分析方法。
3. 理解多级放大电路的耦合方式及应用。
4. 理解负反馈对放大电路性能的影响。



任务2.1 晶体管的认识与检测

多数载流子与少数载流子均参与导电的半导体晶体管称为双极型晶体管，简称为晶体管。晶体管是组成各种电子电路的核心器件。晶体管的问世使PN结的应用发生了质的飞跃，它在电路中主要起放大和电子开关作用。



任务描述

通过对晶体管的识别与检测，能根据外观判断其极性；会用万用表判别晶体管的引脚和质量优劣；利用仿真软件设计测试电路，验证、理解晶体管的伏安特性和放大作用，培养辩证思维能力。



知识准备

晶体管的种类很多，外形不同，但是它们的基本结构相同，都是通过一定的工艺在一块半导体基片上制成两个PN结，再引出三个电极，然后用管壳封装而成。因此，它是一种具有两个PN结的半导体器件。如图2-3所示是几种常见晶体管外形。

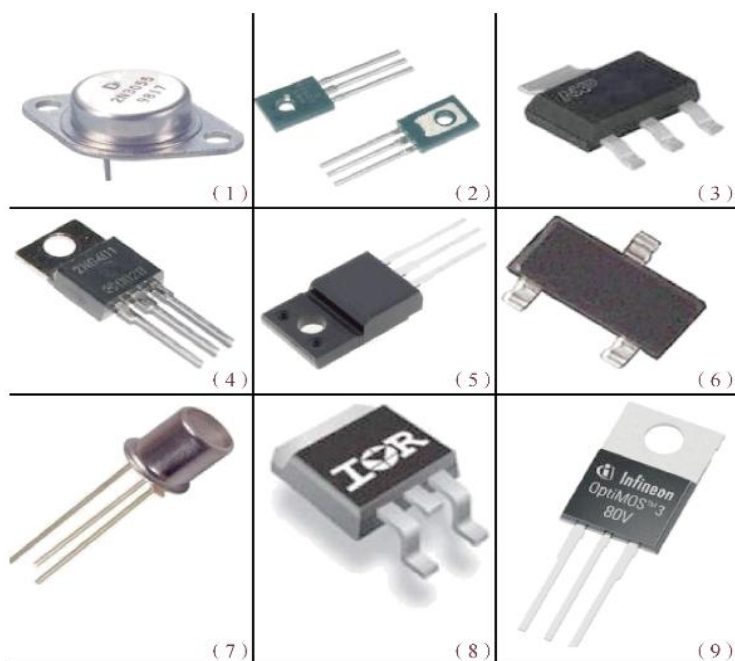


图2-3 常见晶体管外形

晶体管按所用材料不同，分为硅管和锗管；根据结构不同，分为NPN型和PNP型；按工作频率分有低频管、高频管和超高频管；按功率分有小功率管、中功率管和大功率管等。



晶体管按其结构分为 **NPN** 型和 **PNP** 型两类。晶体管的结构和图形符号如图2-4所示，它们都有三个区：集电区、基区、发射区。从这三个区引出的电极分别称为集电极 **c**、基极 **b**、和发射极 **e**。两个 **PN** 结：发射区和基区之间的 **PN** 结称为发射结 **J**，基区和集电区之间的 **PN** 结称为集电结 **J**。

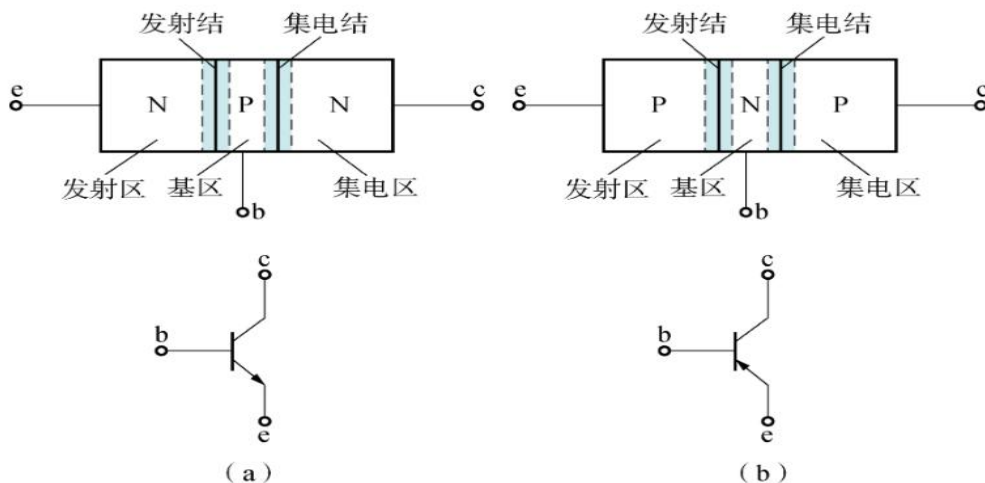


图2-4 晶体管的内部结构和图形符号

(a) NPN 型晶体管；(b) PNP 型晶体管

两种晶体管的图形符号用发射极箭头方向的不同加以区别，箭头方向表示发射结正偏时发射极电流的实际方向。

为使晶体管具有电流放大作用，采用了以下制造工艺：基区很薄且掺杂浓度低，发射区掺杂浓度高，集电结面积比发射结的面积大，但掺杂浓度低。因此在使用时晶体管的发射极和集电极不能互换。

晶体管种类很多，除上述按结构分为 **NPN** 型和 **PNP** 型外，按所用半导体材料可分为硅管和锗管；按工作频率可分为低频管和高频管；按功率大小可分为小功率管、中功率管和大功率管；按用途可分为放大管和开关管等。

NPN 型和 **PNP** 型晶体管的工作原理类似，仅在使用时电源极性连接不同而已。下面以 **NPN** 型管为例来分析讨论。



▲点睛

由于晶体管3个区内部结构上的差异，在使用中发射极和集电极是绝不能互换的。



晶体管具有电流放大作用，下面从实验入手来分析它的放大原理。

一、晶体管电流放大的外部条件

晶体管的电流放大作用首先取决于其内部结构特点，即发射区掺杂浓度高、集电结面积大，这样的结构有利于载流子的发射和接收。而基区薄且掺杂浓度低，以保证来自发射区的载流子顺利地流向集电区。

其次要有合适的偏置，即发射结正向偏置、集电结反向偏置。对于 NPN 型晶体管，必须保证集电极电位高于基极电位，基极电位又高于发射极电位，即 $V_C > V_B > V_E$ ；而 PNP 型晶体管则与之相反，即 $V_C < V_B < V_E$ 。

二、晶体管各电极上的电流分配关系



模拟动画 三极管的电流分配关系



由 NPN 型晶体管构成的电流分配测试电路如图2-5所示，该电路包括基射回路（又称输入回路）和集射回路（又称输出回路）两部分，发射极为两回路的公共端，因此称为共射电路。

电路中基极电源 U_{BB} 通过基极电阻 R_B 和电位器 R_P 给发射结提供正偏压 U_{BE} ；集电极电源 U_{CC} 通过集电极电阻 R_C 给集电极与发射极之间提供电压 U_{CE} 。

调节电位器 R_P ，可以改变基极上的偏置电压 U_{BE} 和相应的基极电流 I_B 。而 I_B 的变化又将引起 I_C 和 I_E 的变化。每产生一个 I_B 值，就有一组 I_C 和 I_E 值与之对应，晶体管三个电极的电流分配见表2-1。

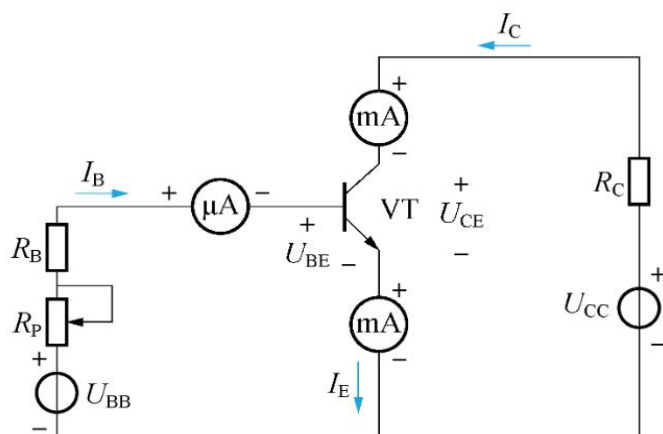


图2-5 由 NPN 型晶体管构成的电流分配测试电路

表2-1 晶体管三个电极的电流分配

I_B/mA	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05
I_C/mA	0.01	0.56	1.14	1.74	2.33	2.91
I_E/mA	0.01	0.57	1.16	1.77	2.37	2.96

分析表2-1测试结果可以得到以下结论。

发射极电流等于基极电流与集电极电流之和，即

$$I_E = I_B + I_C$$

(2-1)

该式表明，发射极电流等于基极电流与集电极电流之和。而又因为基极电流很小，则 $I_E \approx I_C$ ，也就是说发射极电流大部分流向集电极。

下面用载流子在晶体管内部的运动规律来解释上述结论。晶体管内部载流子的运动如图2-6所示。

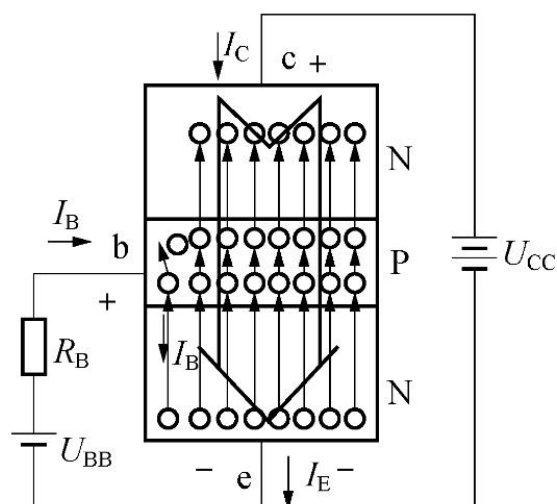


图2-6 晶体管内部载流子的运动

1. 发射极电流的形成

发射结正向偏置时，发射区和基区的多数载流子很容易越过发射结互相向对方扩散，但因发射区载流子浓度远大于基区的载流子浓度，因此通过发射结的扩散电流基本上是发射区向基区扩散的多数载流子，这就是发射极电流 I_E 。

2. 基极电流的形成

由于基区的掺杂浓度较低且做得很薄，因此从发射区注入基区的大量载流子，只有极少数不断地与基区中的少数载流子相复合，复合掉的载流子将由基极电源不断地予以补充，从而形成基极电流 I_B 。

3. 集电极电流的形成

由发射区扩散到基区的多数载流子因基区的杂质浓度低，被复合的机会很少，又因基区很薄，且集电结反偏，使得扩散到基区的载流子无法停留在基区，绝大多数载流子继续向集电结边缘进行扩散。集电区的掺杂浓度虽然低于发射区，但高于基区，且集电结的结面积较发射结大很多，因此这些聚集到集电结边缘的载流子将在结电场的作用下，统统收集到集电区，形成集电极电流 I_C 。

综上所述，从发射区扩散到基区的电子中只有很小一部分在基区复合，绝大部分到达集电区。也就是构成发射极电流 I_E 的两部分中， I_B 占比很小， I_C 占比很大。

三、晶体管的电流放大作用



模拟动画 三极管的电流传输关系



从表2-1可以看到，当基极电流 I_B 从 0.02mA 变化到 0.03mA ，即变化 0.01mA 时，集电极电流 I_C 随之从 1.14mA 变化到 1.74mA ，即变化了 0.6mA ，这两个变化量相比 $(1.74 - 1.14)/(0.03 - 0.02) = 60$ ，说明此时晶体管集电极电流 I_C 的变化量为基极电流 I_B 变化量的60倍。

由以上分析可知：基极电流 I_B 的微小变化，将使集电极电流 I_C 发生很大的变化，即基极电流 I_B 的微小变化控制了集电极电流 I_C 较大的变化，这就是晶体管的电流放大作用。



▲点睛

在晶体管放大作用中，被放大的集电极电流 I_C 是由电源 U_{CC} 提供的，并不是晶体管自身生成能量，它实际体现了用小信号控制大信号的一种能量控制作用。晶体管是一种电流控制器件。



素质课堂

晶体管放大电路的能量转化是内因，是能量的提供者，而放大条件是外因，保证能量转换能够进行。事物的发展都有其内在的和外在的原因，内部原因是事物发展变化的根本推动力，外部原因是事物发展变化的外部驱动力，外因必须通过内因才能发挥作用，任何事物的发展都是内外因相互作用的结果。

——内外因辩证关系原理



检验学习结果





晶体管各个电极上电压和电流之间的关系曲线称为晶体管的伏安特性曲线（简称特性曲线），它是晶体管内部特性的外部表现，是分析由晶体管组成的放大电路和选择晶体管参数的重要依据。晶体管的伏安特性曲线分为两部分：输入特性曲线和输出特性曲线。

晶体管在电路中的连接方式（组态）不同，其特性曲线也不同。NPN 型晶体管组成的共射特性曲线测试电路如图2-7所示。该电路信号由基极输入，集电极输出，发射极为输入、输出回路的公共端，故称为共射电路。此时所测得的特性曲线称为共射特性曲线。

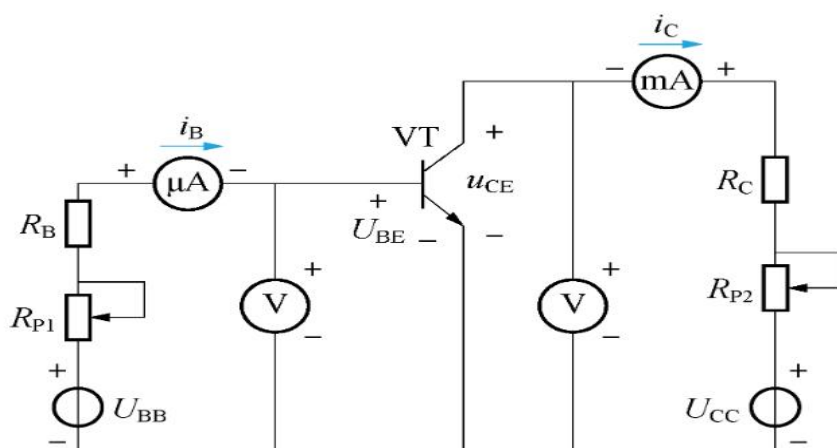


图2-7 NPN 型晶体管共射特性曲线测试电路

一、输入特性曲线



晶体管的共射输入特性曲线是指当晶体管的输出电压 u_{CE} 为常数时，输入电流 i_B 与输入电压 u_{BE} 之间的关系曲线，即

$$i_B = f(u_{BE})|_{u_{CE}=\text{常数}}$$

(2-2)

如图2-8所示为某硅 NPN 型晶体管的输入特性曲线，由图可知以下两点。

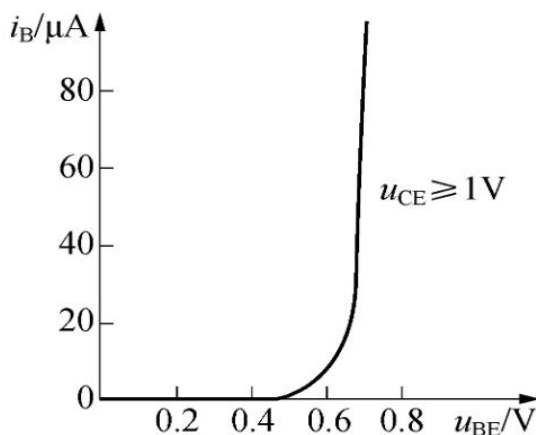


图2-8 硅 NPN 型晶体管共射输入特性曲线

(1) 晶体管输入特性与二极管特性类似，在发射结电压 u_{BE} 大于死区电压时才导通，导通后 u_{BE} 很小的变化将引起 i_B 很大的变化，而具有恒压特性， u_{BE} 近似为常数。

(2) 当 $u_{CE} = 1V$ 后，增大 u_{CE} 测得输入特性曲线与 $u_{CE} = 1V$ 时的输入特性曲线非常接近，近乎重合。在实际使用中，多数情况下满足 $u_{CE} \geq 1V$ ，因此通常用一根曲线表示。加在发射结上的正偏压 u_{BE} 基本上为定值，其中硅管为 $0.7V$ 左右，锗管为 $0.3V$ 左右（绝对值）。这一数据是检查放大电路中晶体管静态时是否处于放大状态的依据之一。

【例2.1】用直流电压表测量某放大电路中某只晶体管各极对地的电位分别是： $V_1 = 2V$ ， $V_2 = 6V$ ， $V_3 = 2.7V$ ，试判断晶体管对应各电极及管型。

【解】本题的已知条件是晶体管三个电极的电位，根据晶体管能正常实现电流放大的电位关系：NPN 型管 $V_C > V_B > V_E$ ，且硅型晶体管放大时 U_{BE} 约为 $0.7V$ ，锗型晶体管 U_{BE} 约为 $0.3V$ ；而 PNP 型晶体管 $V_C < V_B < V_E$ ，且硅型晶体管放大时 U_{BE} 约为 $-0.7V$ ，锗型晶体管 U_{BE} 约为 $-0.3V$ 。所以先找电位差绝对值为 $0.7V$ 或 $0.3V$ 两个电极，若 $V_B > V_E$ ，则为 NPN 型晶体管； $V_B < V_E$ ，则为 PNP 型晶体管。本例中， V_3 比 V_1 高 $0.7V$ ，所以晶体管为 NPN 型硅管，③脚是基极，①脚是发射极，②脚是集电极。

二、输出特性曲线



模拟动画 三极管的输出特性

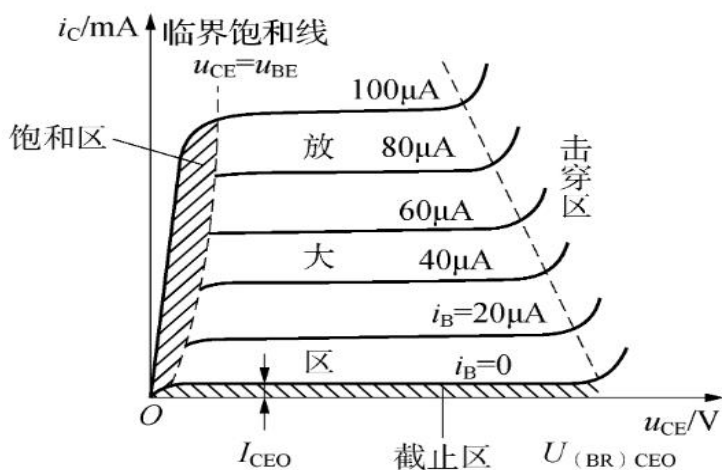


晶体管的共射输出特性曲线是指当管子的输入电流 i_B 为某一常数时，输出电流 i_C 与输出电压 u_{CE} 之间的关系曲线，即

$$i_C = f(u_{CE})|_{i_B=\text{常数}}$$

(2-3)

实测的共射输出特性曲线如图2-9所示，若取不同的 i_B ，则可得到不同的曲线，因此晶体管的输出特性为一曲线图，通常划分为三个区域，即截止区、放大区和饱和区。



1. 放大区

放大区是指 $i_B > 0$ ， $u_{CE} > 1V$ 的区域就是曲线的平坦部分。要使晶体管静态时工作在放大区（处于放大状态），发射结必须正偏，集电结必须反偏。

晶体管工作在放大区的特点是： i_C 只受控于 i_B ，与 u_{CE} 无关，呈现恒流特性。因此当 i_B 固定时， i_C 的曲线是平直的。且当 i_B 有一个微小变化时， i_C 将发生较大变化，体现了晶体管的电流放大作用。图2-9中曲线间的间隔大小反映出晶体管电流放大能力的大小。



▲点睛

注意：只有工作在放大状态的晶体管才有放大作用。放大时，硅管 $U_{BE} \approx 0.7V$ ，锗管 $U_{BE} \approx 0.3V$ ， $|U_{CE}| > 1V$ 。

2. 饱和区

饱和区是指 $i_B > 0$ ， $u_{CE} \leq 0.3V$ 的区域。工作在饱和区的晶体管，发射结和集电结均为正偏。此时， i_C 随着 u_{BE} 变化而变化，却几乎不受 i_B 的控制，晶体管失去放大作用。当 $u_{CE} = u_{BE}$ 时，集电结零偏，晶体管处于临界饱和状态。处于饱和状态的 u_{CE} 称为饱和压降，用 u_{CES} 表示。小功率硅管 u_{CES} 约为 $0.3V$ ，小功率锗管 u_{CES} 约为 $0.1V$ 。此时集电极之间呈现低电阻，相当于一个闭合的开关。

3. 截止区

截止区是指 $i_B = 0$ 曲线以下的区域。工作在截止区的晶体管，发射结零偏或反偏，集电结反偏，由于 u_{BE} 在死区电压之内 ($u_{BE} < U_{th}$)，因此处于截止状态。此时晶体管各极电流均很小（接近或等于零），e、b、c 极之间近似看作开路。此时， $u_{CE} \approx U_{CC}$ ，集电极之间呈现高电阻，相当于一个断开的开关。

2. 万用表检测晶体管

利用万用表检测晶体管的各引脚极性及管型。测试两引脚间正、反向电阻，判断各晶体管的管型与材料，并将测试结果填入表2-2中。



模拟动画 三极管的开关作用



此外，由于 PNP 管和 NPN 管电源电压极性和电流方向不同，二者的特性曲线是相反的。



▲点睛

晶体管的主要应用分为两个方面：一是工作在放大区，常用来构成各种放大电路；二是工作在饱和区和截止区，相当于开关的接通和断开，常用于开关控制和数字电路。实际应用中常通过测量 U_{CE} 值的大小来判断晶体管的工作状态。



检验学习结果



任务实施

一、任务要求

1. 学习查阅半导体器件手册的方法，熟悉晶体管的类型、型号及主要性能参数。
2. 能利用万用表检测晶体管的引脚极性和质量好坏。
3. 能熟练使用仿真软件进行电路验证，加深对晶体管电流放大作用的理解。
4. 培养辩证思维能力。

二、设备与器件

电脑、仿真软件、万用表、3DG6A、3AX31、9012、9013型晶体管各1个，型号未知的晶体管若干，电阻、导线若干。

三、任务内容及步骤

1. 识读晶体管的型号

根据晶体管上面标注的型号、封装外形，通过目测识别常见类型的晶体管引脚位置，如图2-15所示。查阅半导体手册，记录所给 3DG6A、3AX31、9012、9013型晶体管的型号等主要参数。

3DG6A _____

3AX31 _____

9012 _____

9013 _____

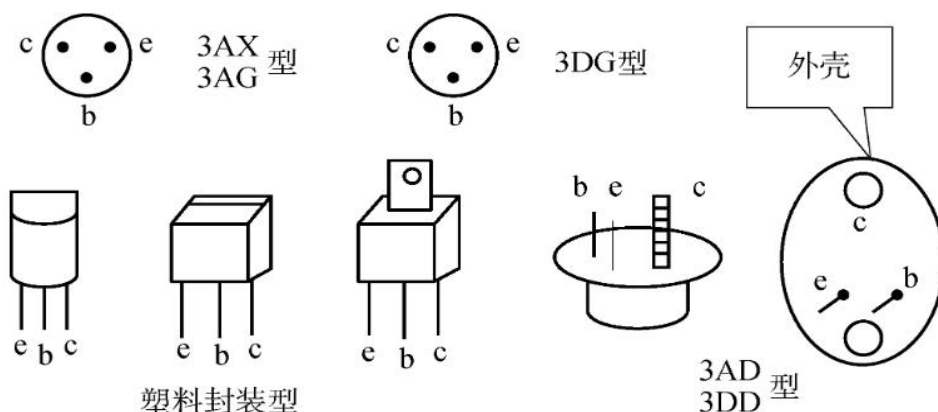


图2-15 常见晶体管引脚位置

2. 万用表检测晶体管

利用万用表检测晶体管的各引脚极性及管型。测试两引脚间正、反向电阻，判断各晶体管的管型与材料，并将测试结果填入表2-2中。

表2-2 万用表检测晶体管

型号	b、e间阻值		b、c间阻值		c、e间阻值		判断晶体管的管型、材料及好坏
	正向	反向	正向	反向	正向	反向	
3DG6A							
3AX31							
9012							
9013							

3. 仿真检测晶体管的电流放大作用与电流分配关系

使用Multisim仿真软件搭建如图2-16所示仿真测试电路。图2-16中 R_B 为150k Ω ， R_C 为2k Ω ，调节 R_P ，使 I_B 分别为20 μ A、40 μ A、60 μ A。对应测量 I_C 、 I_E 的值，填入表2-3

表2-3 晶体管电流放大作用与电流分配关系仿真验证记录表

$I_B(\mu A)$	20	40	60
$I_E(mA)$			
$I_C(mA)$			
$R_P(\Omega)$			
$\frac{I_C}{I_B}$			
由以上数据得出： I_E 、 I_C 、 I_B 的关系为 _____；			
晶体管电流放大的实质_____。			



四、巩固练习



五、任务评价

晶体管的认识与检测考核要求及评分参考标准见表2-4。

表2-4 晶体管的认识与检测考核要求及评分参考标准

项目	配分	考核要求	评分标准	自评20%	互评20%	师评60%	合计
常见晶体管的识别	10	能正确识别不同类型晶体管极性	目测识别不同类型晶体管极性，每错一处扣2分				
万用表检测晶体管的各引脚极性及管型	25	能使用万用表进行晶体管正反向电阻的测量； 能根据测量结果正确判断晶体管的极性、管型和质量	万用表测量晶体管正反向电阻，每错一处扣2分； 根据测量结果正确判断晶体管的极性、管型和质量，每错一处扣2分				
仿真检测晶体管的电流放大特性与电流分配关系	25	能正确使用仿真软件搭建电路； 能根据要求正确测量数据测试现象得出结论	正确使用仿真软件搭建电路，每错一处扣2分； 根据要求正确测量数据测试现象得出结论，每错一处扣5分				

巩固练习	10	能够正确完成巩固练习	每小题2分				
学习态度	10	积极参加学习，不迟到、早退；学习态度端正；团结协作，有敬	迟到、早退，一人次扣2分；学习态度不端正不得分				
安全文明操作	10	安全用电；遵守安全操作规程和劳动纪律	违反安全操作规程，扣5分；其余不达标酌情扣分				
7S管理规范	10	环境清洁，符合7S管理要求	工位不整洁，视情况扣分；7S管理不符合要求，扣5分				