

数字电表原理及万用表设计

数字万用表采用了集成电路和液晶数字显示技术，从根本上改变了传统的指针式万用表的电路和结构。与指针式万用表相比较，数字万用表具有很高的准确度和分辨力，显示清晰、直观，测量速率快，过载能力强，功能齐全，性能稳定，在科学研究、工业现场测试和生产生活中得到了广泛应用。

数字万用表是把电子技术、计算机技术、自动化技术与精密电测量技术密切地结合在一起的一种新型仪表。它由数字电压表与各种变换器组成的，其中直流数字电压表是数字万用表的基本组成部分，是数字万用表的核心。它把连续的被测模拟信号变换为不连续的数字数字信号，并自动显示出来。它可直接测量交、直流电压、电流、电阻和其他电参量。

数字电表以它显示直观、准确度高、分辨率强、功能完善、性能稳定、体积小易于携带等特点在科学研究、工业现场和生产生活中得到了广泛应用。数字电表工作原理简单，完全可以让同学们理解并利用这一工具来设计对电流、电压、电阻、压力、温度等物理量的测量，从而提高大家的动手能力和解决问题能力。

一、实验目的

1. 了解数字电表的基本原理及常用双积分模数转换芯片外围参数的选取原则、电表的校准原则以及测量误差来源。
2. 了解万用表的特性、组成和工作原理。
3. 掌握分压、分流电路的原理以及设计对电压、电流和电阻的多量程测量。
4. 了解交流电压、三极管和二极管相关参数的测量。
5. 通过数字电表原理的学习，能够在传感器设计中灵活应用数字电表。

二、实验仪器

ZKY-DEM-II 数字电表原理及万用表设计实验仪，主要由电源、实验板 1、实验板 2、实验板 3、改装表头和输入切换等部分组成。

下面分别对各部分做详细说明。

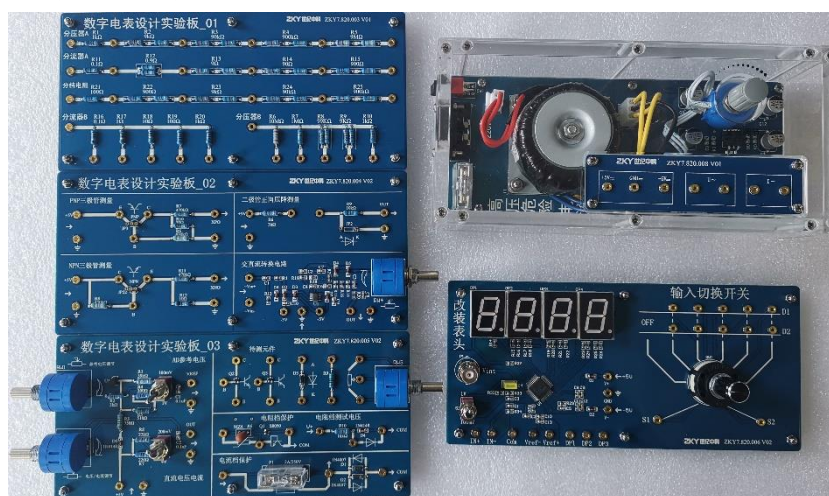


图 1 数字电表原理及万用表设计实验仪

1.1 电源

电源部分如图 2 所示，主要分为直流输出和交流输出两部分。直流输出部分分为+5V、GND 和-5V 三个接线端口。交流输出部分分为交流电压输出和交流电流输出，其中，交流电流输出部分暂时未使用。



图 2 电源

1.2 实验板 1

实验板 1 如图 3 所示，主要是由分压器 A、分压器 B、分流器 A、分流器 B 和分档电阻五个模块组成。



图 3 实验板 1

1.3 实验板 2

实验板 2 如图 4 所示，主要是由 PNP 三极管测量、NPN 三极管测量、二极管正向压降测量和交直流转换电路四个模块组成。这四个模块均需要直流+5V 供电。



图 4 实验板 2

1.4 实验板 3

实验板 3 如图 5 所示，主要是由 AD 参考电压、直流电压电流、电阻档测试电压、电阻档保护、电流档保护、待测元件等部分组成。其中 AD 参考电压和直流电压电流模块需要直流+5V 供电。



图 5 实验板 3

1.5 改装表头及输入切换

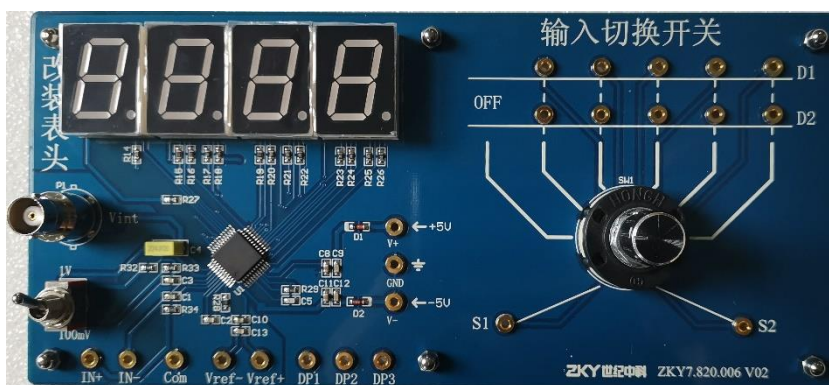


图 6 改装表头及输入切换

改装表头及输入切换如图 6 所示。改装表头部分由四个数码管（三位半）、ICL7107 芯片及对应的外围元件等组成。其中，将 ICL7107 的某些端口引出成开放式端口，便于外界的设置及测量。P₁ 接示波器观察积分波形。钮子开关 S₁ 为积分电阻 R_{int} 选择开关，将其拨向 1V 时，积分电阻 R_{int}=470kΩ；拨向 100mV 时，积分电阻 R_{int}=47kΩ。DP₁/DP₂/DP₃ 与地（GND）接通时，数码管的对应小数点点亮。

三、实验原理

1.6 数字电表原理

常见的物理量都是幅值大小连续变化的所谓模拟量，指针式仪表可以直接对模拟电压和电流进行显示。而对数字式仪表，需要把模拟电信号（通常是电压信号）转换成数字信号，再进行处理和显示。

数字信号与模拟信号不同，其幅值大小是不连续的，就是说数字信号的大小只能是某些分立的数值，所以需要进行量化处理。若最小量化单位为 Δ ，则数字信号的大小是 Δ 的整数倍，该整数可以用二进制码表示。设 $\Delta=0.1\text{ mV}$ ，我们把被测电压 U 与 Δ 比较，看 U 是 Δ 的多少倍，并把结果四舍五入取为整数 N 。一般情况下， $N \geq 1000$ 即可满足测量精度要求（量化误差 $\leq 1/1000=0.1\%$ ）。最常见的数字表头的最大示数为 1999，被称为三位半(3 1/2)数字表。如： U 是 Δ （0.1 mV）的 1861 倍，即 $N=1861$ ，显示结果为 186.1（mV）。这样的数字表头，再加上电压极性判别显示电路和小数点选择位，就可以测量显示 -199.9 ~ 199.9 mV 的电压，显示精度为 0.1 mV。

1.6.1 双积分模数转换器（ICL7107）的基本工作原理

双积分模数转换电路的原理比较简单，当输入电压为 U_x 时，在一定时间 T_1 内对初始电量为零的电容器 C 进行恒流（电流大小与待测电压 U_x 成正比）充电，这样电容器两极之间的电量 Q 将随时间线性增加，当充电时间 T_1 到后，电容器上积累的电量 Q 与待测电压 U_x 成正比；然后让电容器恒流放电（电流大小与参考电压 V_{ref} 成正比），这样电容器两极之间的电量 Q 将线性减小，直到 T_2 时刻减小为零。所以， T_2 也与 U_x 成正比。如果用计数器在 T_2 开始时刻对时钟脉冲进行计数，结束时刻停止计数，得到计数值 N_2 ，则 N_2 与 U_x 成正比。

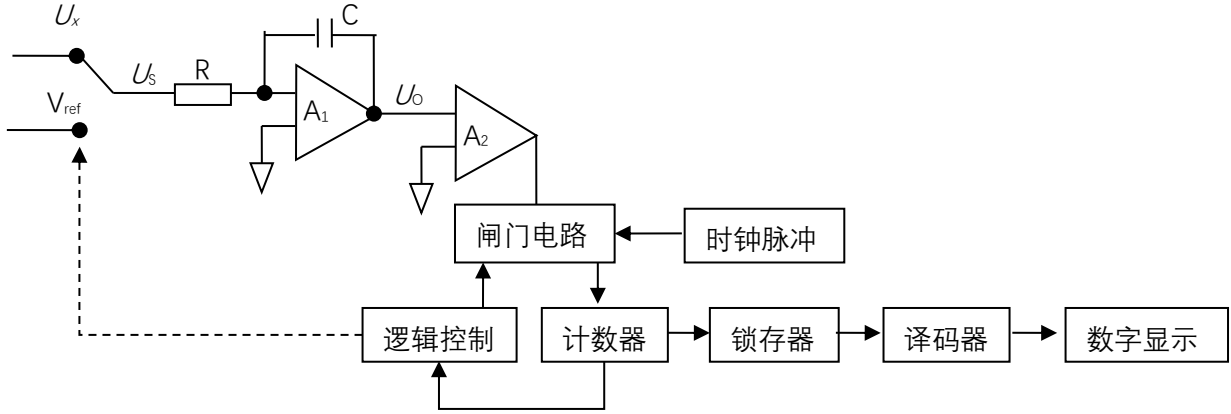


图 7 双积分 AD 内部结构图

双积分 AD 的工作原理就是基于上述电容器充放电过程中计数器读数 N_2 与输入电压 U_x 成正比构成的。现在我们以实验中所用到的三位半模数转换器 ICL7107 为例来讲述它的工作过程。ICL7107 双积分式 A/D 转换器的基本组成如图 7 所示，它由积分器、过零比较器、逻辑控制电路、闸门电路、计数器、时钟脉冲源、锁存器、译码器及显示等电路所组成。下面主要讲一下它的转换电路，大致分为三个阶段：

第一阶段，电压输入脚与输入电压断开而与地端相连，放掉电容器 C 上积累的电量，然后参考电容 C_{ref} 充电到参考电压 V_{ref} ，同时反馈给自动调零电容 C_{AZ} 以补偿缓冲放大器、积分器和比较器的偏置电压。这个阶段称为**自动校零阶段**。

第二阶段为**信号积分阶段**（采样阶段），在此阶段 U_s 接到 U_x 上使之与积分器相连，这样电容器 C 将被以恒定电流 U_x/R 充电，与此同时计数器开始计数，当计到某一特定值 N_1 （对于三位半模数转换器， $N_1=1000$ ）时，逻辑控制电路使充电过程结束，这样采样时间 T_1 是一定的。假设时钟脉冲为 T_{CP} ，则 $T_1=N_1 \times T_{CP}$ 。在此阶段积分器输出电压 $U_o=-Q_o/C$ （ U_o 与 U_x 极性相反）， Q_o 为 T_1 时间内恒流（ U_x/R ）给电容器 C 充电得到的电量，所以存在下式：

$$Q_o = \int_0^{T_1} \frac{U_x}{R} dt = \frac{U_x}{R} T_1 \quad (1)$$

$$U_o = -\frac{Q_o}{C} = -\frac{U_x}{RC} T_1 \quad (2)$$

第三阶段为**反积分阶段**（测量阶段）。在此阶段，逻辑控制电路把已经充电至 V_{ref} 的参考电容 C_{ref} 按与 U_x 极性相反的方式经缓冲器接到积分电路，这样电容器 C 将以恒定电流 V_{ref}/R 放电，与此同时计数器开始计数，电容器 C 上的电量线性减小，当经过时间 T_2 后，电容器电压减小到 0，由零值比较器输出闸门控制信号，停止计数器计数并显示出计数结果。此阶段存在如下关系：

$$U_o + \frac{1}{C} \int_0^{T_2} \frac{V_{ref}}{R} dt = 0 \quad (3)$$

将 (2) 带入上式得

$$T_2 = \frac{U_x}{V_{\text{ref}}} T_1 \quad (4)$$

从 (4) 式可以看出, 由于 T_1 和 V_{ref} 均为常数, 所以 T_2 与 U_x 成正比, 从图 2 可以看出。若时钟最小脉冲单元为 T_{CP} , 则 $T_1 = N_1 \times T_{\text{CP}}$, $T_2 = N_2 \times T_{\text{CP}}$, 代入 (4), 即有

$$N_2 = \frac{U_x}{V_{\text{ref}}} N_1 \quad (5)$$

测量的计数值 N_2 与被测电压 U_x 成正比。

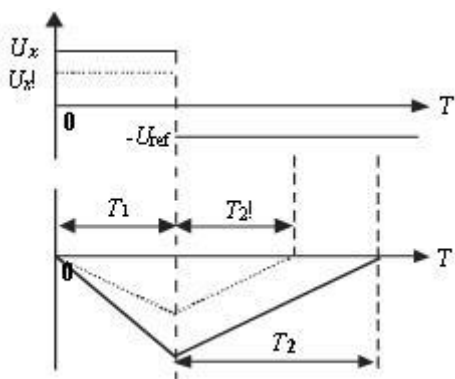


图 8 积分和反积分阶段曲线图

对于 ICL7107, 信号积分阶段时间固定为 1000 个 T_{CP} , 即 N_1 的值为 1000 不变。而 N_2 的计数随 U_x 的不同范围为 $0 \sim 1999$, 同时自动校零的计数范围为 $2999 \sim 1000$, 也就是测量周期总保持 4000 个 T_{CP} 不变。即满量程时 $N_{\text{max}} = 2000 = 2 \times N_1$, 所以 $U_{\text{max}} = 2V_{\text{ref}}$, 这样若取参考电压为 100mV, 则最大输入电压为 200mV; 若参考电压为 1V, 则最大输入电压为 2V。

1.6.2 ICL7107 双积分模数转换器引脚功能、外围元件参数的选择

ICL7107 芯片的引脚图如图 9 所示, 它与外围器件的连接图如图 10 所示。图 10 中它和数码管相连的脚以及电源脚是固定的, 所以不加详述。芯片的第 40 脚为模拟公共端, 称为 COM 端; 第 44 脚 $V_{\text{ref}+}$ (简称 $V_{\text{r}+}$) 和 43 脚 $V_{\text{ref}-}$ (简称 $V_{\text{r}-}$) 为参考电压正负输入端; 第 39 脚 $\text{IN}+$ 和 38 脚 $\text{IN}-$ 为测量电压正负输入端; C_{int} 和 R_{int} 分别为积分电容和积分电阻, C_{az} 为自动调零电容, 它们分别与芯片的 35、36 和 37 脚相连, 用示波器接在第 35 脚可以观测到前面所述的电容充放电过程, 该脚对应实验仪上示波器接口 P1; 电阻 R_1 和 C_1 与芯片内部电路组合提供时钟脉冲振荡源, 从 7 脚可以用示波器测量出该振荡波形, 时钟频率的快慢决定了芯片的转换时间 (因为测量周期总保持 4000 个 T_{CP} 不变) 以及测量的精度。下面分析一下这些参数的具体作用。

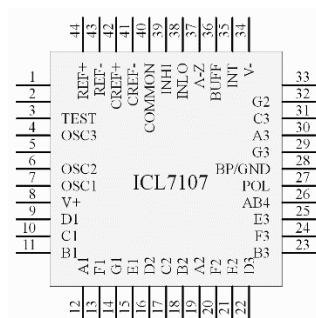


图 9 ICL7107 芯片引脚图

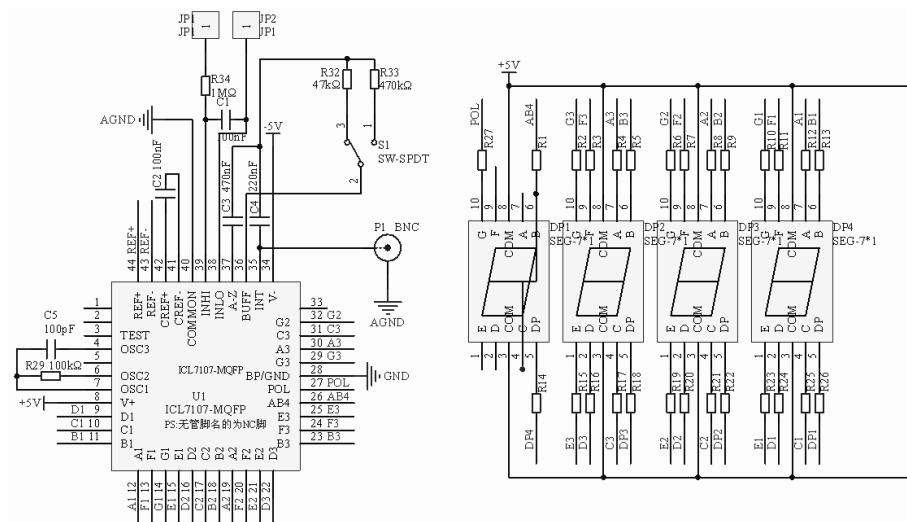


图 10 ICL7107 和外围器件连接图

R_{int} 为积分电阻,它是由满量程输入电压和用来对积分电容充电的内部缓冲放大器的输出电流来定义的。对于 ICL7107, 充电电流的常规值为 $I_{int}=4 \text{ uA}$, 则 $R_{int}=\text{满量程}/4\text{uA}$ 。所以在满量程为 200mV, 即参考电压 $V_{ref}=100 \text{ mV}$ 时, $R_{int}=50 \text{ k}\Omega$, 实际选择 47 k Ω 电阻; 在满量程为 2V, 即参考电压 $V_{ref}=1 \text{ V}$ 时, $R_{int}=500 \text{ k}\Omega$, 实际选择 470 k Ω 电阻。 $C_{int}=T_1 \times I_{int}/U_{int}$, 一般为了减小测量时工频 50 Hz 干扰, T_1 时间通常选为 0.1s (具体下面再分析), 又由于积分电压的最大值 $U_{int}=2 \text{ V}$, 所以: $C_{int}=0.2 \text{ uF}$, 实际应用选取 0.22 uF。

对于 ICL7107, 4 脚输入的振荡频率为: $f_0=1/(2.2 \times R_1 \times C_1)$, 而模数转换的计数脉冲频率是 f_0 的 4 倍, 即 $T_{CP}=1/(4 \times f_0)$, 所以测量周期 $T=4000 \times T_{CP}=1000/f_0$, 积分时间 (采样时间) $T_1=1000 \times T_{CP}=250/f_0$ 。所以 f_0 的大小直接影响转换时间的快慢, 频率过快或过慢都会影响测量精度和线性度。一般情况下, 为了提高在测量过程中抗 50Hz 工频干扰的能力, 应使 A/D 转换的积分时间选择为 50Hz 工频周期的整数倍, 即 $T_1=n \times 20\text{ms}$, 考虑到线性度和测试效果, 我们取 $T_1=0.1\text{s}(n=5)$, 这样 $T=0.4\text{s}$, $f_0=40\text{kHz}$, A/D 转换速度为 2.5 次/秒。由 $T_1=0.1=250/f_0$, 若取 $C_1=100 \text{ pF}$, 则 $R_1 \approx 112.5 \text{ k}\Omega$ 。

1.6.3 用 ICL7107A/D 转换器进行常见物理参量测量

1、直流电压测量的实现 (直流电压表)

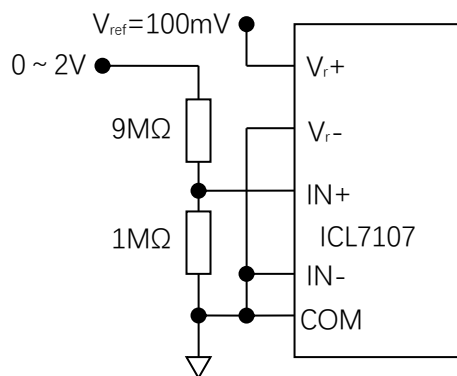


图 11

(1) 当参考电压 $V_{ref}=100\text{mV}$ 时, 选择 $R_{int}=47\text{k}\Omega$ 。此时采用分压法实现测量 0 ~ 2V 的直流电压, 电路图见图 11。

(2) 直接使参考电压 $V_{ref}=1\text{V}$, $R_{int}=470\text{k}\Omega$ 来测量 0 ~ 2V 的直流电压, 电路图如图 12。

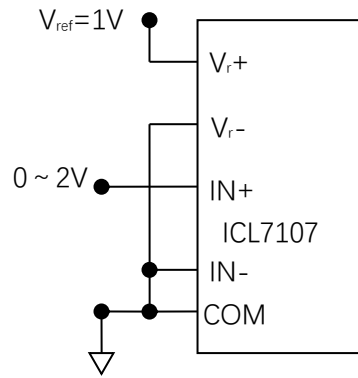


图 12

2、直流电流测量的实现（直流电流表）

直流电流的测量通常采用欧姆压降法，如图 13 所示，即让被测电流流过一定值电阻 R_i ，然后用 200mV 的电压表测量此定值电阻上的压降 $R_i \times I_s$ （在 $V_{ref} = 100mV$ 时，保证 $R_i \times I_s \leq 200mV$ ）。因为对被测电路接入了电阻，此测量方法会对原电路有影响，测量电流变成 $I_s = R_0 \times I_s / (R_0 + R_i)$ ，所以被测电路的内阻越大，误差将越小。

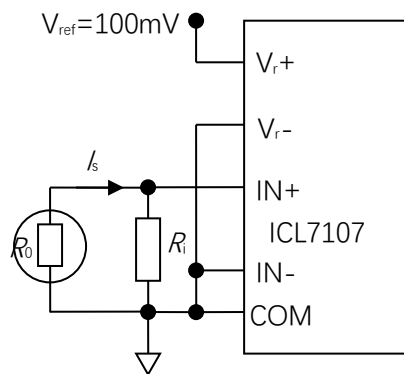


图 13

3、电阻值测量的实现

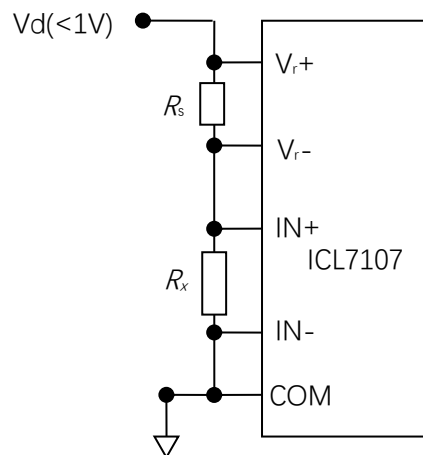


图 14

现在的数字万用表都采用比例法来测量电阻，比例法是测量电阻的一种新方法，它具有电路简单、准确度高优点，能充分发挥单片 A/D 转换器本身的优良特性，实现电阻到电压的转换，即使基准电压存在偏差或发生波动，也不会增加测量误差。

比例法测量电阻的原理如图 14 所示，被测电阻 R_x 与标准电阻 R_s 串联后接在 ICL7107 的 V_r+ 端和 COM 端之间。测试电压 $V_d(<1V)$ 与 V_r+ 相连， $IN+$ 与 V_r- 相连， $IN-$ 与 COM 相连。测试电压向 R_s 和 R_x 提供测试电流，然后以 R_s 两端的压降作为基准电压 V_{ref} ， R_x 两端的压降作为 ICL7107 输入电压 V_{in} 。由前面所讲述的 7107 的工作原理，存在：

$$V_{ref} = V_+ - V_- = \frac{V_d \times R_s}{R_s + R_x} \quad (6)$$

$$V_{in} = IN_+ - IN_- = \frac{V_d \times R_x}{R_s + R_x} \quad (7)$$

由前述理论 $N_2/N_1 = V_{in}/V_{ref}$ 有：

$$R_x = \frac{N_2}{N_1} R_s \quad (8)$$

所以从上式可以得出电阻的测量范围始终是 $0 \sim 2R_s\Omega$ 。

1.7 数字万用表设计

常用万用表需要对交直流电压、交直流电流、电阻、三极管 h_{FE} 和二极管正向压降的测量等，图 15 为万用表测量基本原理图。下面我们主要讲讲提到的几种参数的测量。

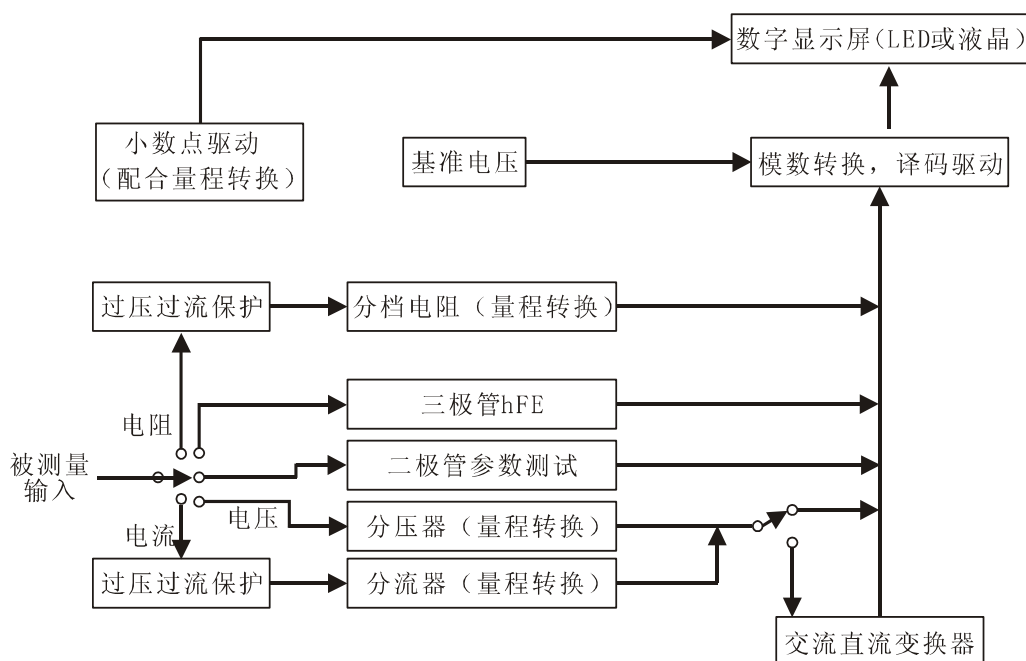


图 15 数字万用表基本原理图

本实验使用的 DEM- II 型数字电表原理及万用表设计实验仪，它的核心是由双积分模数 A/D 转换译码驱动集成芯片 ICL7107 和外围元件、LED 数码管构成。为了帮助同学们更好地理解其工作原理，我们在仪器中预留了 8 个输入端，包括 2 个测量电压输入端($IN+$ 、 $IN-$)、2 个基准电压输入端(V_{ref+} 、 V_{ref-})、3 个小数点驱动输入端 ($DP1$ 、 $DP2$ 和 $DP3$) 以及模拟公共端 (COM)。

1.7.1 直流电压量程扩展测量

在前面所述的直流电压表前面加一级分压电路(分压器), 可以扩展直流电压测量的量程。如图 16 所示,

电压表的量程 U_0 为 200 mV，即前面所讲的参考电压选择 100 mV 时所组成的直流电压表， r 为其内阻(如 10M Ω)， r_1 、 r_2 为分压电阻， U_i 为扩展后的量程。

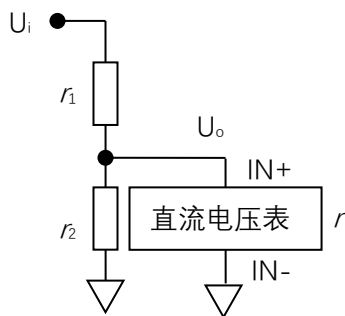


图 16 分压电路原理

由于 $r \gg r_2$ ，所以分压比为

$$\frac{U_0}{U_i} = \frac{r_2}{r_1 + r_2}$$

扩展后的量程为

$$U_i = \frac{r_1 + r_2}{r_2} U_0$$

多量程分压器原理电路见图 17，五档量程的分压比分别为 1、0.1、0.01、0.001 和 0.0001，对应的量程分别为 200 mV、2V、20V、200V 和 2000V。

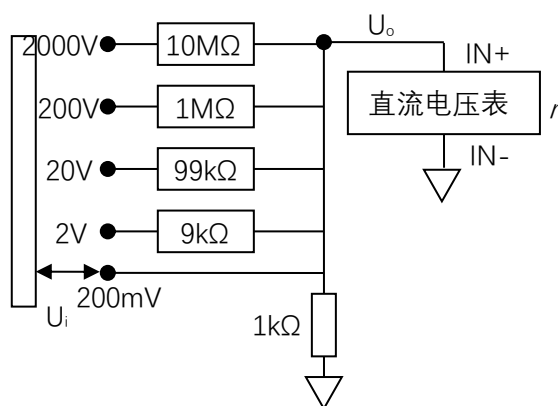


图 17 多量程分压原理

采用图 17 的分压电路（见实验仪中的分压器 B）虽然可以扩展电压表的量程，但在小量程档明显降低了电压表的输入阻抗，这在实际应用中是行不通的。所以，实际通用数字万用表的直流电压档分压电路（见实验仪中的分压器 A）为图 18 所示，它能在不降低输入阻抗（大小为 $R//r$ ， $R=R_1+R_2+R_3+R_4+R_5$ ）的情况下，达到同样的分压效果。

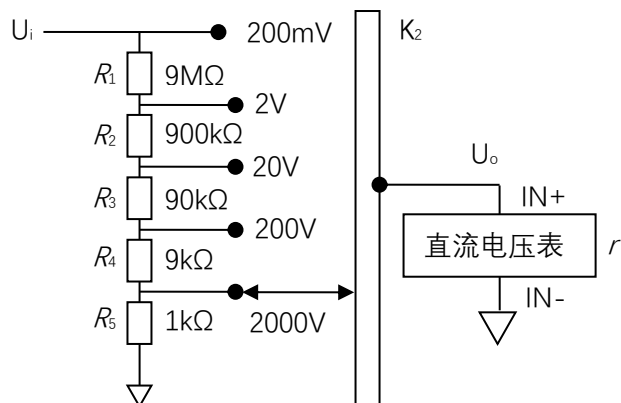


图 18 实用分压器原理

例如：其中 20V 档的分压比为：

$$\frac{R_3 + R_4 + R_5}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5} = \frac{100\text{k}\Omega}{10\text{M}\Omega} = 0.01$$

其余各档位的分压比也可按此方法算出。

实际设计时是根据各档的分压比以及考虑输入阻抗要求所决定的总电阻来确定各分压电阻的。首先确定总电阻：

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 = 10\text{M}\Omega$$

再计算 2000V 档的分压电阻：

$$R_5 = 0.0001R = 1\text{k}\Omega$$

然后 200V 档分压电阻：

$$R_4 + R_5 = 0.001R$$

$$R_4 = 9\text{k}\Omega$$

这样依次逐档计算 \$R_3\$、\$R_2\$ 和 \$R_1\$。

注意：尽管上述最高量程档的理论量程是 2000V，但通常的数字万用表出于耐压和安全考虑，规定最高电压量为 1000V。由于只重在掌握测量原理，所以我们不提倡大家做高电压测量实验。

在转换量程时，波段转换开关可以根据档位自动调整小数点的显示。同学们可以自行设计这一实现过程，只要对应的小数位 \$DP_1\$、\$DP_2\$ 或 \$DP_3\$ 插孔接地就可以实现小数点的点亮。

1.7.2 直流电流量程扩展测量（参考电压 100mV）

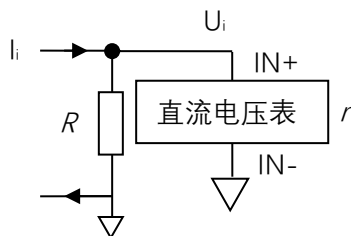


图 19 电流测量原理

电流测量原理：根据欧姆定律，用合适的取样电阻把待测电流转换为相应的电压，再进行测量。如图

19, 由于电压表内阻 $r \gg R$, 所以取样电阻 R 上的电压降为:

$$U_i = I_i R$$

若数字表头的电压量程为 U_o , 欲使电流档量程为 I_o , 则该档的取样电阻(也称分流电阻) $R_o = U_o / I_o$ 。若 $U_o = 200\text{mV}$, 则 $I_o = 200\text{mA}$ 档的分流电阻 $R_o = 1\Omega$ 。

多量程分流器原理电路见图 20。

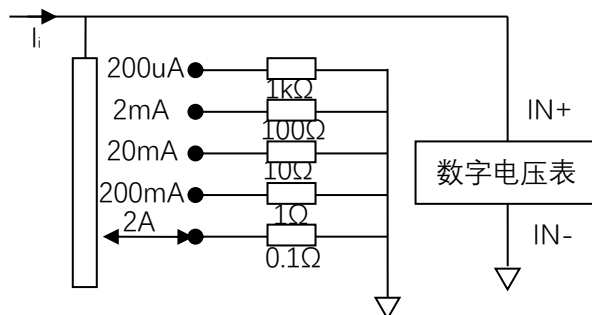


图 20 多量程分流器电路

图 20 中的分流器 (见实验仪中的分流器 B) 在实际使用中有一个缺点, 就是当换档开关接触不良时, 被测电路的电压可能使数字表头过载, 所以, 实际数字万用表的直流电流档电路 (见实验仪中的分流器 A) 为图 21 所示。

图 21 中各档分流电阻的阻值是这样计算的: 先计算最大电流 (默认 2A) 档的分流电阻 R_5 :

$$R_5 = \frac{U_o}{I_{m5}} = \frac{0.2\text{V}}{2\text{A}} = 0.1(\Omega)$$

同理, 下一档 (200mA 档) 的 R_4 为:

$$R_4 = \frac{U_o}{I_{m4}} - R_5 = \frac{0.2\text{V}}{0.2\text{A}} - 0.1\Omega = 0.9(\Omega)$$

这样依次可以计算出 R_3 、 R_2 和 R_1 的值。

图 21 中的 FUSE 是 2A 保险丝管, 起过流保护作用。两只反向连接且与分流电阻并联的二极管 D_1 、 D_2 为硅整流二极管, 它们起双向限幅过压保护作用。正常测量时, 输入电压小于硅二极管的正向导通压降 (约 0.7V), 二极管截止, 对测量毫无影响。一旦输入电压大于 0.7V, 二极管立即导通, 两端电压被钳制在 0.7V 内, 保护仪表不被损坏。

注意: 用 2A 档测量时, 若发现电流大于 1A 时, 应尽量减小测量时间, 以免大电流引起的较高温升而影响测量精度甚至损坏电表。

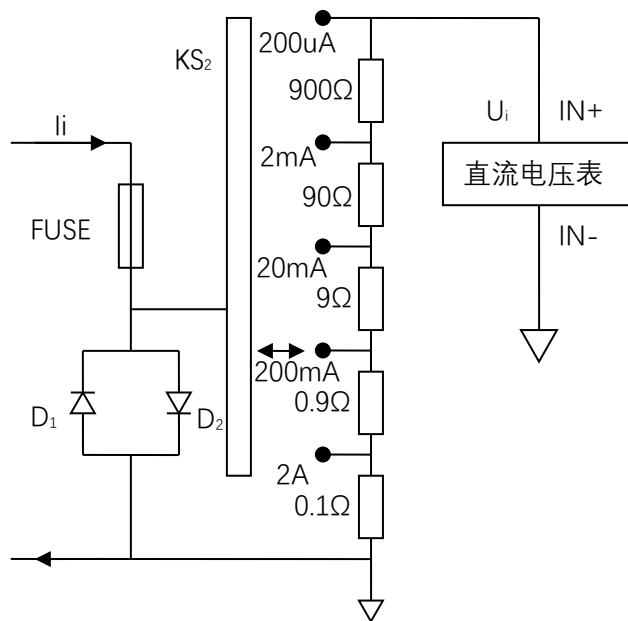


图 21 实用分流器原理

1.7.3 交流电压、交流电流测量(参考电压 100mV)

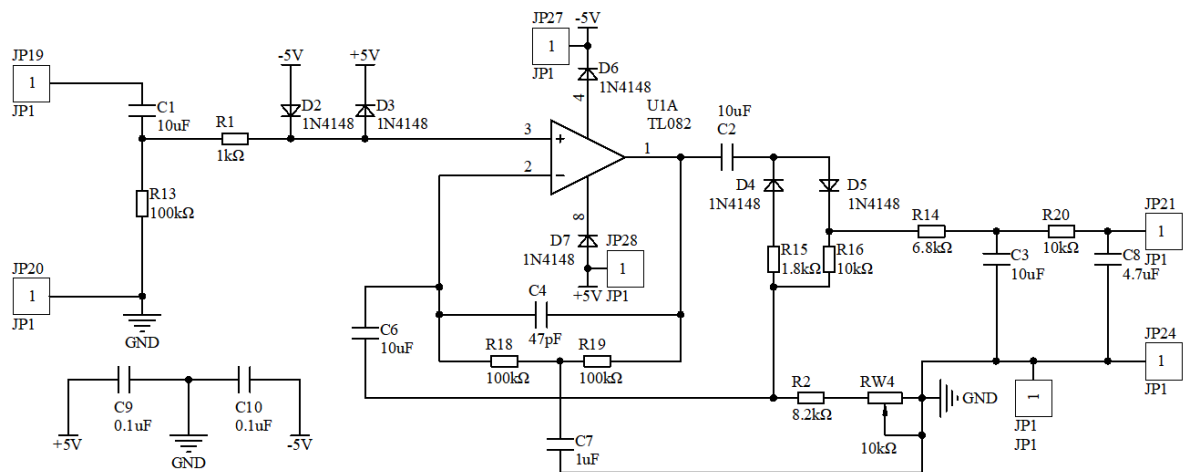


图 22

AC-DC 变换电路

数字万用表中交流电压、电流测量电路是在直流电压、电流测量电路的基础上，在分压器或分流器之后加入了交直流转换电路（即 AC-DC 变换电路），具体电路图见图 17。

该 AC-DC 变换器主要由集成运算放大器、整流二极管、RC 滤波器等组成，电位器 R_{W4} 用来调整输出电压高低，用来对交流电压档进行校准之用，使数字表头的显示值等于被测交流电压的有效值。实验中用图 23 所示的简化图代替。

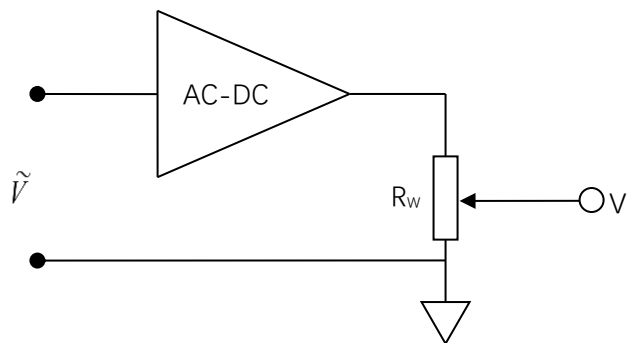


图 23 交直流电压转换简图

注意：同直流电压档类似，出于对耐压、安全方面的考虑，交流电压最高档的量限通常限定为 750V(有效值)。

1.7.4 电阻测量电路

数字万用表中的电阻测量采用的是比例测量法，其原理电路图见前面的图 14。

如前所述： $N_2=1000 \times R_x/R_s$ 。当 $R_x=R_s$ 时，数字显示将为 1000，若选择相应的小数点位就可以实现电阻值的显示。若构成 200 Ω 档，取 $R_s=100\Omega$ ，小数点定在十位上，即让 DP₁ 插孔接地，当 R_x 变化时，显示从 0.1 Ω ~ 199.9 Ω ；若构成 2k Ω 档，取 $R_s=1k\Omega$ ，小数点定在千位上，即让 DP₃ 插孔接地，当 R_x 变化时，显示从 0.001K Ω ~ 1.999K Ω ；其它档类推。

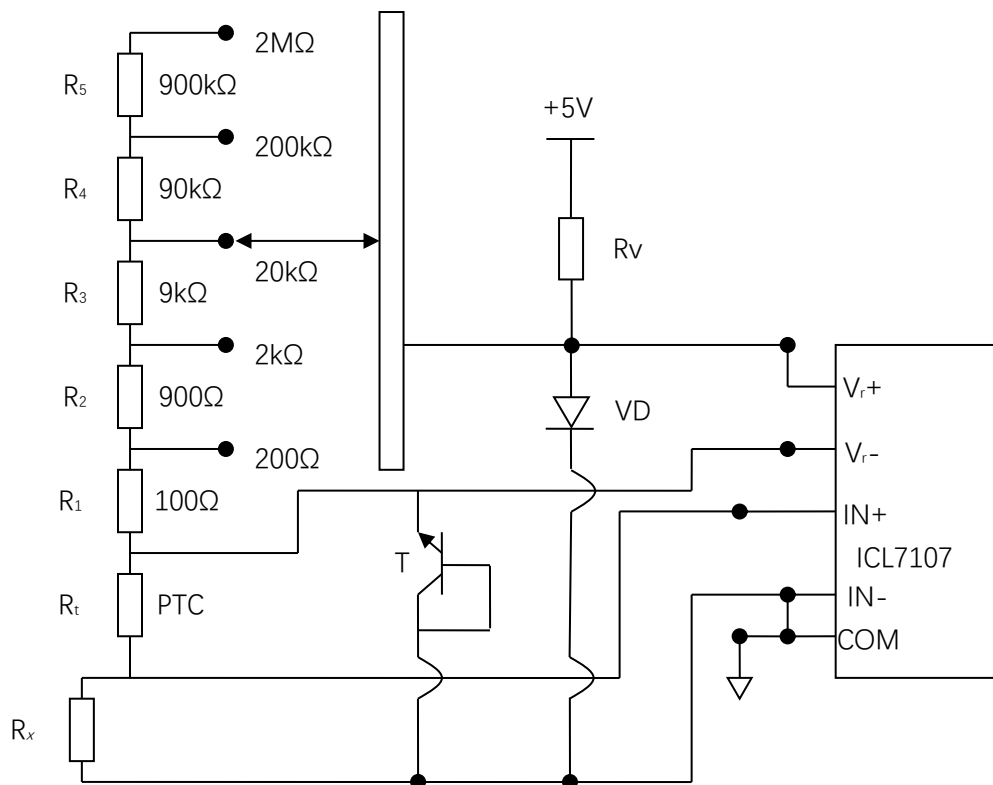


图 24 多档电阻测试图

数字万用表多量程电阻档电路如图 24 所示，测量前需选择 $R_{int}=470k\Omega$ 。由上述分析给电阻参数的选择如下：

$R_1=100\Omega$

$R_2=1k\Omega$ - $R_1=900\Omega$

$R_3=10k\Omega$ - R_1 - $R_2=9k\Omega$

$R_4=100k\Omega$ - R_1 - R_2 - $R_3=90k\Omega$

$R_5=1000k\Omega$ - R_1 - R_2 - R_3 - $R_4=900k\Omega$

图 24 中，为降低测试电压并减小测试电流，+5V 电压经过 R_v 和 VD 分压后，获得约+0.65V 的测试电压(即电阻档的开路电压)。由正温度系数(PTC)热敏电阻 R_t 与晶体管 T 组成了过压保护电路，以防误用电阻档去测高电压时损坏集成电路。当误测高电压时，晶体管 T 发射极将击穿从而限制输入电压的升高，同时 R_t 随着电流的增加而发热，其阻值迅速增大，从而限制了电流的增加，使 T 的击穿电流不超过允许范围。即 T 只是处于软击穿状态，不会被损坏，一旦解除误操作， R_t 和 T 都能恢复正常。

1.7.5 二极管正向压降的测量（参考电压 1V）

进行二极管正向压降测试的电路图如图，+5V 经过 R_6 ，PTC 向二极管提供 5V 的测试电压，使二极管 D_1 导通，测试电流（即二极管正向工作电流） $I_f \approx 1mA$ ，导通压降 V_f 输入到 IN+ 和 IN- 端，由于 V_f 的大小一般在 0~2V 之间，所以我们可以选择参考电压为 1V，此时选择 $R_{int}=470k\Omega$ ，这样可以直接测出 V_f 的值。

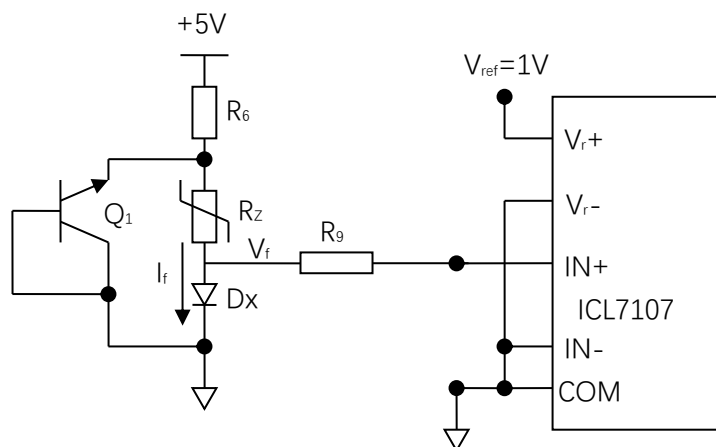


图 25 二极管正向压降测试图

如果想用 200mV 档测试，必需要对 V_f 分压才行，请同学们自己分析。

1.7.6 三极管参数 h_{FE} 的测量（参考电压 100mV）

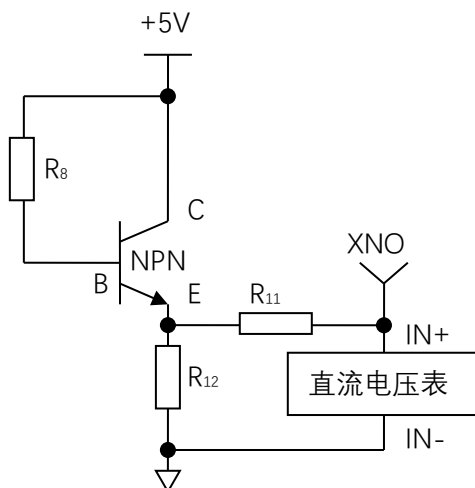


图 26 NPN 管测试电路

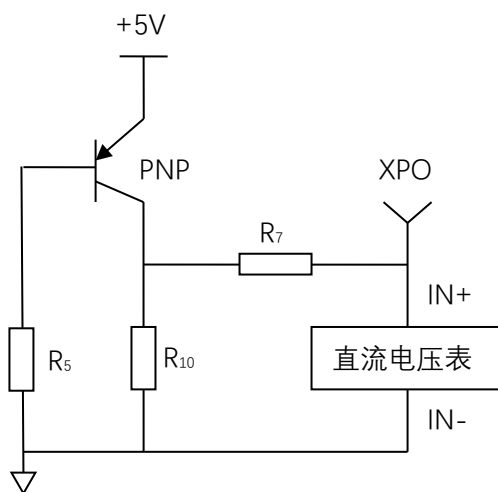


图 27 PNP 管测试电路

测量 NPN 管的 h_{FE} 大小的电路如图 26 所示, R_8 为三极管的基极偏置电阻, 可提供约 $10\mu A$ 的基极电流 I_B , R_{12} 为取样电阻, 这样输入直流电压表的电压为:

$$V_{IN} = V_{XNO} \approx h_{FE} \times I_B \times R_{12} = h_{FE} \times 10\mu A \times 10\Omega = 0.1h_{FE}(\text{mV})$$

若表头为 200mV 的量程, 则理论上测量范围为 $0 \sim 1999$, 但为了不出现较大误差, 实际测量范围限制在 $0 \sim 1000$ 之间, 测量过程中可以让小数点消隐(即不点亮)。测量 PNP 管的 h_{FE} 大小的电路如图 27 所示, 原理和测量 NPN 管的 h_{FE} 大小一样, 所以不再赘述。

测量 h_{FE} 时需注意以下事项:

(1) 仅适用于测量功率小于 1W 的晶体管。这是因为测试电压较低同时测试电流较小的缘故。倘若去测大功率晶体管, 测量的结果就与典型值差很大。被测三极管的封装要求为 T0-92。

(2) 当 $V_{IN} \geq 200\text{mV}$ 时, 仪表将显示过载, 应该立即停止测量。

四、实验内容与步骤

1.8 直流电压的测量

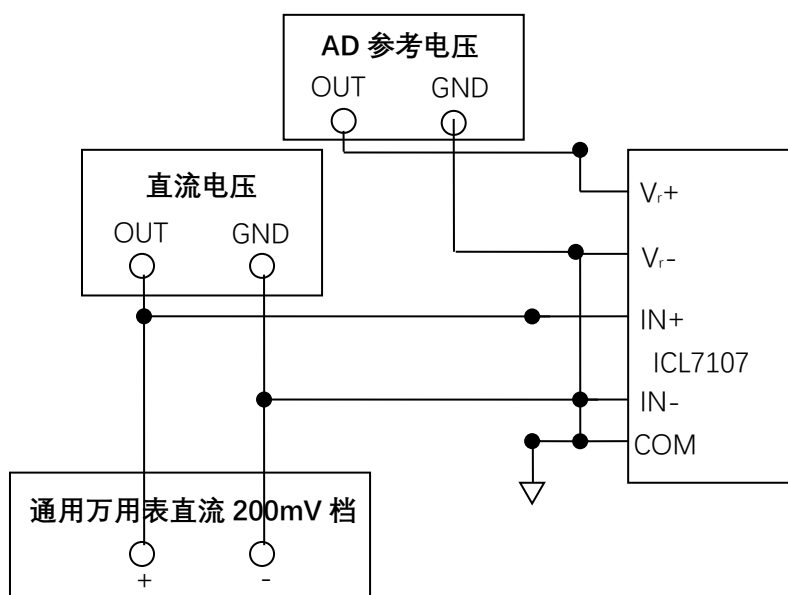


图 28 直流电压测量接线图

1.8.1 200mV 档量程的校准

1、将钮子开关 S_1 拨向 100mV，使积分电阻 $R_{int}=47k\Omega$ 。供电。调节 **AD 参考电压** 模块中的电位器（上旋减小，下旋增加，下同），同时用通用万用表 200mV 档测量其输出电压值，直到万用表的读数为 100.0mV 为止。

2、调节**直流电压电流**模块中的电位器，同时用万用表 200mV 档测量该模块电压输出值，使其电压输出值为 0~199.9mV 的某一具体值（例如：100.0mV）。

3、将 DP_3 与地（GND）接通，使 ICL7107 模块中第三个数码管的小数点点亮，显示 XXX.X。

4、按图 28 接线，观察数码管显示是否为前述 0~199.9 中那一具体值（例如：100.0mV）。若有些许差异，稍微调整 **AD 参考电压** 模块中的电位器使模块显示读数为前述那一具体值（例如：100.0mV）。

5、调节**直流电压电流**模块中的电位器，调节其输出电压，使模块输出电压为 199.9mV、180.0mV、160.0mV、.....20.0mV、0mV；并同时记录下万用表所对应的读数。再以模块显示的读数为横坐标，以万用表显示的读数为纵坐标，绘制校准曲线。

注意：在上面实验进行校准时，由于**直流电压电流**模块中的电位器精度不够，可能调整不到相应的值（如：100.0mV），可以调整到一个很接近的值；但是在稍微调整 **AD 参考电压** 模块中的电位器时，注意一定要使模块显示值与实际测量的直流电压电流模块中输出的电压值显示一样。在后面的校准实验中也同样遵循这一原则。

★若输入的电压大于 200mV，请先采用分压电路并改变对应的数码管小数位再进行实验。请同学们自行设计实验内容。注意在测量高电压时，务必在测量前确定线路连接正确，以避免事故。

1.8.2 2V 档量程校准（选做）

1、将钮子开关 S_1 拨向 1V，使积分电阻 $R_{int}=470k\Omega$ 。供电。调节 **AD 参考电压** 模块中的电位器，同时用通用万用表 2V 档测量其输出电压值，直到万用表的读数为 1.000V 为止。

2、调节**直流电压电流**模块中的电位器，同时用万用表 2V 档测量该模块电压输出值，使其电压输出值为 0~1.999V 的某一具体值（例如：1.000V）。

3、将 DP_1 与地（GND）接通，使 ICL7107 模块中第一个数码管的小数点点亮，显示 X.XXX。

4、按图 28 接线，观察数码管显示是否为前述 0~1.999 中那一具体值（例如：1.000V）。若有些许差异，稍微调整 **AD 参考电压** 模块中的电位器使模块显示读数为前述那一具体值（例如：1.000V）。

5、调节 **直流电压电流** 模块中的电位器，调节其输出电压，使模块输出电压为 1.999V、1.800V、1.600V、.....0.020V、0V；并同时记录下万用表所对应的读数。再以模块显示的读数为横坐标，以万用表显示的读数为纵坐标，绘制校准曲线。

★若输入的电压大于 2V，请先采用分压电路并改变对应的数码管小数位再进行实验。请同学们自行设计实验内容。多量程扩展实验将在后面进行详细说明。

1.9 直流电流的测量

1.9.1 20mA 档量程校准

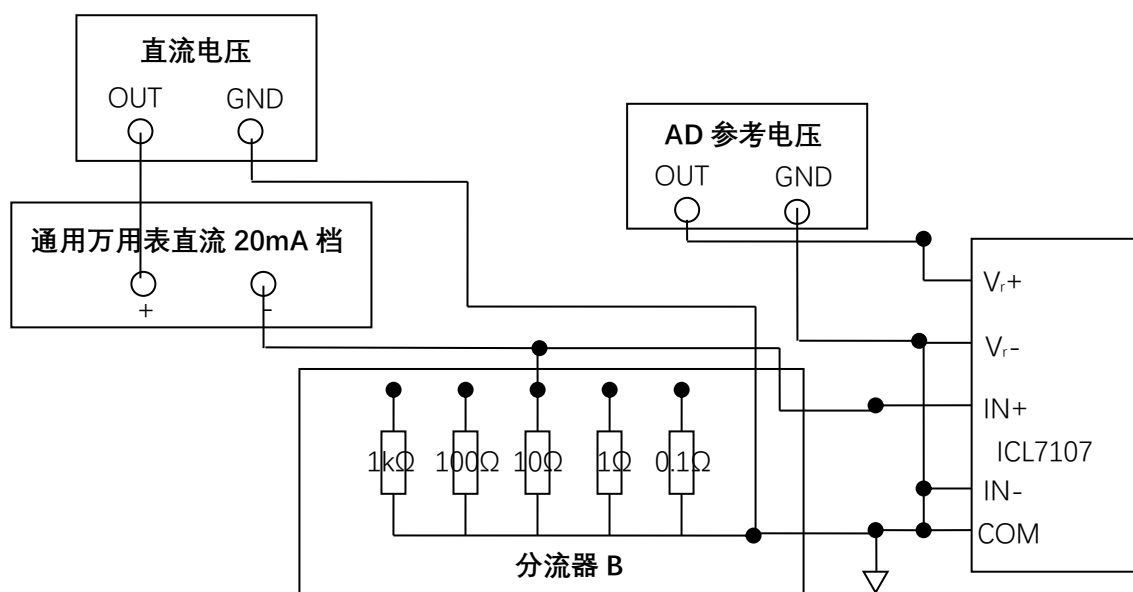


图 29 直流电流测量接线图

1、测量时先上旋 **直流电压电流** 模块中的电位器到底，使输出电流为 0。

2、将钮子开关 S_1 拨向 100mV，使积分电阻 $R_{in}=47k\Omega$ 。供电。调节 **AD 参考电压** 模块中的电位器，同时用万用表 200mV 档测量输出电压值，直到万用表的示数为 100.0mV 为止。

3、将 DP_2 与地（GND）接通，使 ICL7107 模块中第二个数码管的小数点点亮，显示 XX.XX。

4、按照图 29 接线。向右旋转调节 **直流电压电流** 模块中的电位器，使万用表显示为 0~19.99mA 的某一具体值（例如：10.00mA）。

5、观察模数转换模块中显示值是否为 0~19.99 中的前述的那某一具体值（如：10.00mA）。若有些许差异，稍微调整 **AD 参考电压** 模块中的电位器使模块显示数值为前述 0~19.99 中的那一具体值（如：10.00mA）。

6、调节 **直流电压电流** 模块中的电位器，调节其输出电流，使显示模块输出电流为 19.99mA、18.00mA、16.00mA、.....0.20mA、0mA；并同时记录下万用表所对应的读数。再以模块显示的读数为横坐标，以万用表显示的读数为纵坐标，绘制校准曲线。

1.9.2 2mA 档量程校准（选做）

1、若要进行 2mA 档校准，只需要把 **分流器 B** 中的电阻选用 100Ω，ICL7107 模块中数码管对应的显示为 X.XXX。同时把万用表的量程选择为 2mA 档，然后重复实验步骤 1~6 即可。

2、更高量程的输入请用 **分流电路 A** 来实现，同学们可以自行设计实验。

1.10 200mV 交流电压的校准（选做）

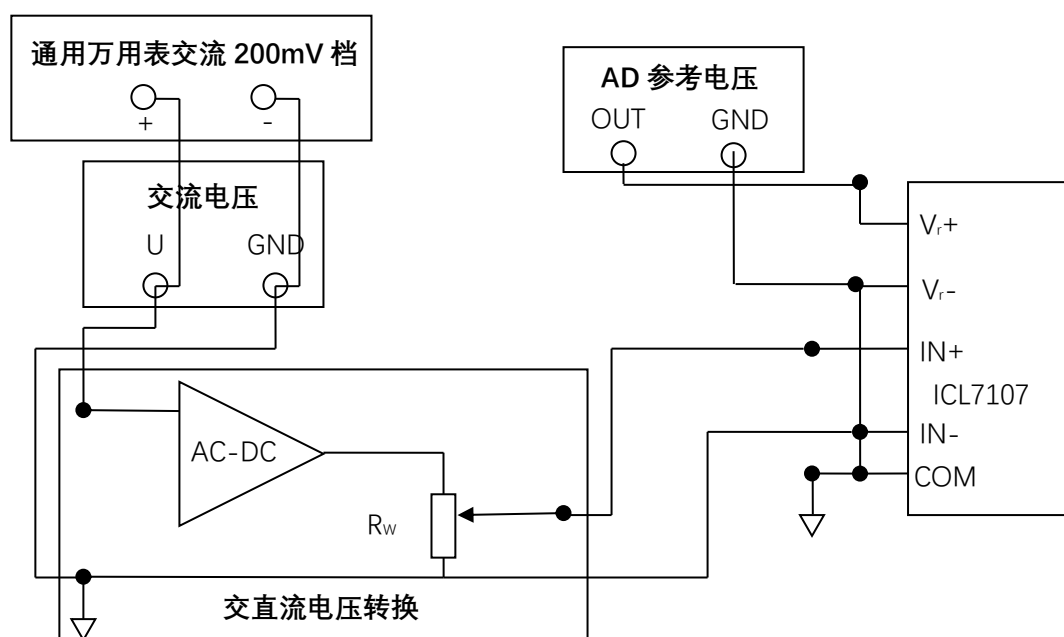


图 30 交流电压的测量

- 1、先进行 200mV 直流电压档量程的校准（参照直流电压的测量）。
- 2、调节交流电压电流模块的交流电压输出，用万用表测量，使之为 0 ~ 199.9mV 中的某一具体值（如：100.0mV）。
- 3、按照图 30 方式接线。供电。看模块的显示值是否为 0 ~ 199.9V 中的前述那一具体值（如：100.0mV）。若有差别，调节交直流电压转换模块中的电位器，使模块与万用表测量的值相同即可。
- 4、调节交流电压电流模块中的电位器，调节其输出电压，使模块输出电压为 199.9mV、180.0mV、160.0mV、.....20.0mV、0mV；并同时记录下万用表所对应的读数。再以模块显示的读数为横坐标，以万用表显示的读数为纵坐标，绘制校准曲线。
- 5、如果要测量大于 200mV 的交流信号，必需在交直流转换模块前加入分压器后在进行测量，与多量程直流电压测量一样。注意在测量高电压时，务必在测量前确定线路连接正确，以避免事故。

1.11 20mA 交流电流的测量（选做）

- 1、进行 200mV 交流电压的校准。
- 2、按图 31 方式接线。供电。
- 3、调节交流电压电流模块中的电位器，减小输出电流，使显示模块输出电压为 19.99mA、18.00mA、16.00mA、.....0.20mA、0mA；并同时记录下万用表对应的读数。再以模块显示的读数为横坐标，以万用表显示的读数为纵坐标，绘制校准曲线。
- 4、若需要测量更高量程的输入，需用分流器 A 来实现，请同学们自行设计实验。注意在测量大电流时，务必在测量前确定线路连接正确，避免伤亡事故。

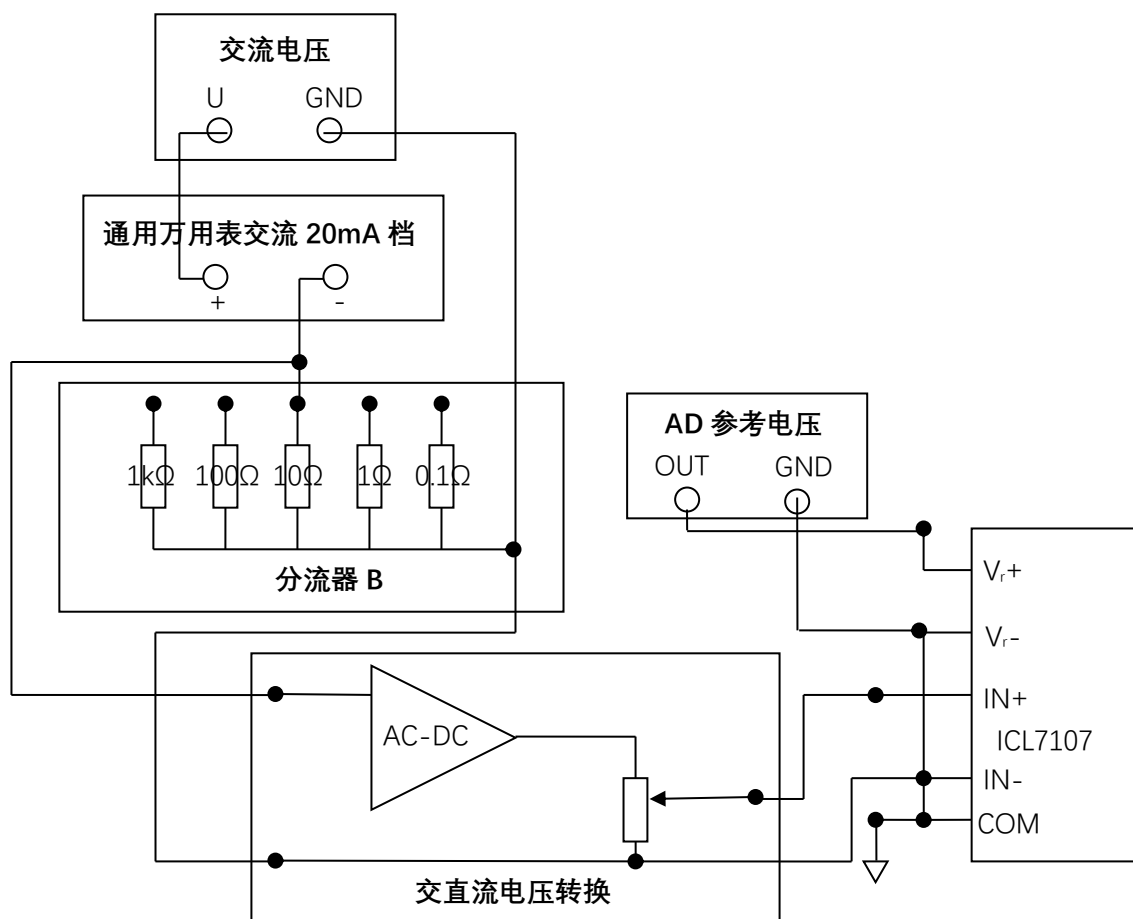


图 31 交流电流测量接线图

1.12 二极管正向压降的校准和测量（选做）

1、将钮子开关 S_1 拨向 1V，使积分电阻 $R_{int}=470k\Omega$ 。调节 **AD 参考电压** 模块中的电位器，同时用万用表 2V 档测量其输出电压值，直到万用表的示数为 1.000V 为止。

2、用万用表测量一个二极管的正向导通压降并记录下该值。

3、按照图 25 方式接线。在**待测元件**模块 A 和 K 插孔中插入二极管，供电。模块显示的值即为此二极管的正向导通压降。若与万用表测量值有些许差异，可以稍微调整 **AD 参考电压** 的输出与之相同即可。再进行其他二极管的正向导通压降测量。

1.13 三极管 h_{FE} 参数的测量（选做）

1、制作 200mV 直流数字电压表头并进行校准。

2、用万用表测量一个 NPN 管(Q2)的 h_{FE} 参数，并记录下该值。

3、按照图 26 方式接线。将小数点位与 GND 连接的线取掉，使小数点熄灭。供电，进行 NPN 三极管 h_{FE} 参数测量。

4、查看测量模块显示的值是否与万用表测量的值一致。若有些许差别，可以稍微调整 **AD 参考电压** 的输出与之相同即可。再进行其他 NPN 三极管 h_{FE} 参数测量。

6、用万用表测量一个 PNP 管(Q3)的 h_{FE} 参数测量，并记录下该值。

7、按照图 27 式接线。供电，进行 PNP 三极管 h_{FE} 参数测量。

8、查看测量模块显示的值是否与万用表测量的值一致。若有些许差别，可以稍微调整 **AD 参考电压** 的输出与之相同即可。再进行其他 PNP 三极管 h_{FE} 参数测量。

1.14 万用表设计实验（选做）

注：在此实验中应遵循直流电压的测量范围为 0~36 V；交流电压的测量范围为 0~200 mV；直流电流的测量范围为 0~2 A；交流电流的测量范围为 0~20 mA 的原则。其他量程作类推，了解实现的原理即可。

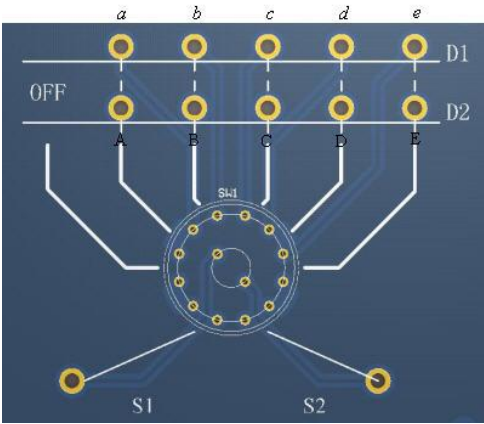


图 32 输入切换开关

输入转换开关模块如图 32 所示。通过拨动转换开关，可以使 S_2 插孔依次和插孔 A、B、C、D、E 相连并且相应的量程指示灯亮，同时 S_1 插孔依次与插孔 a、b、c、d、e 相连。 D_1 这组开关用于设计时控制模块小数点位的点亮， D_2 用于分压器、分流器以及分档电阻上，实现多量程测量。在进行多量程扩展时，注意任意小数点位均不能与地接通，不能点亮小数点位，然后把插孔 a、b、c、d、e 和 DP_1 、 DP_2 、 DP_3 连接组合成需要的量程（控制相应量程的小数点位），当拨动量程转换开关时， DP_1 、 DP_2 、 DP_3 中仅且只有一个通过 a、b、c、d、e 与 S_1 相连，从而对应的小数点将被点亮。具体的接线是： DP_1 -b、 DP_1 -e； DP_2 -c； DP_3 -a、 DP_3 -d。

1.14.1 设计制作多量程直流数字电压表

- 1、制作 200mV 直流数字电压表，并进行校准。
- 2、利用分压器扩展电压表头成为多量程直流电压表，参照图 18 和图 28。
- 3、对 200mV 档和 2V 档记录数据并作校准曲线。

$U_{改}$								
$U_{标}$								
$\Delta U = U_{改} - U_{标}$								

$U_{改}$ 为改装的表头测量值， $U_{标}$ 为实际标准值，以 $U_{改}$ 为横轴， $\Delta U = U_{改} - U_{标}$ 为纵轴，在坐标纸上作校正曲线(注意：校正曲线为折线，即将相邻两点用直线连接)。

1.14.2 设计制作多量程直流数字电流表

- 1、制作 200mV 直流数字电压表，并进行校准。
- 2、利用分流器设计多量程直流电流表，参照图 21 和图 29。
- 3、对 2mA 档和 20mA 档记录数据并作校准曲线。

$I_{改}$								
$I_{标}$								
$\Delta I = I_{改} - I_{标}$								

$I_{改}$ 为改装的表头测量值， $I_{标}$ 为串联在测量回路中标准电流表测量值，以 $I_{改}$ 为横轴， $\Delta I = I_{改} - I_{标}$ 为纵轴，在坐标纸上作校正曲线。

1.14.3 设计制作多量程电阻表（选做）

利用分档电阻原理实现多量程电阻测量，参照图 24。

1.14.4 设计制作多量程交流电压表（选做）

在多量程直流数字电压表的基础上再加入交直流电压转换模块，即可实现多量程的交流电压的测量。

五、注意事项

1. 严格按照实验步骤及要求进行实验。请遵循“先接线，再加电；先断电，再拆线”的原则。在加电前应确认接线已准确无误（特别是在测量高压或大电流时），避免短路造成伤亡事故。
2. 信号地和电源地应分开连接。
3. 虽然测量电路已加入保护电路，注意不要用电流档或电阻档测量电压，避免对仪器造成的损失。
4. 当数字表头最高位显示“1”而其余位都不亮时，表明输入信号过大，即超量程。此时应尽快换大量程档或减小(断开)输入信号，避免长时间超量程工作损坏仪器。
5. 出于对实验人员的安全考虑，被测量的电压信号不能高于 36V！

六、预习思考题

1. 改装电流表时需要连接分流电阻，分流电阻的大小如何来确定？
2. 改装电压表时需要连接分压电阻，分压电阻的大小如何来确定？

七、分析讨论题

1. 校准电表时，如果发现改装表的读数相对于标准表的读数都偏高或偏低，即总向一个方向偏，试问这是是什么原因造成的？