

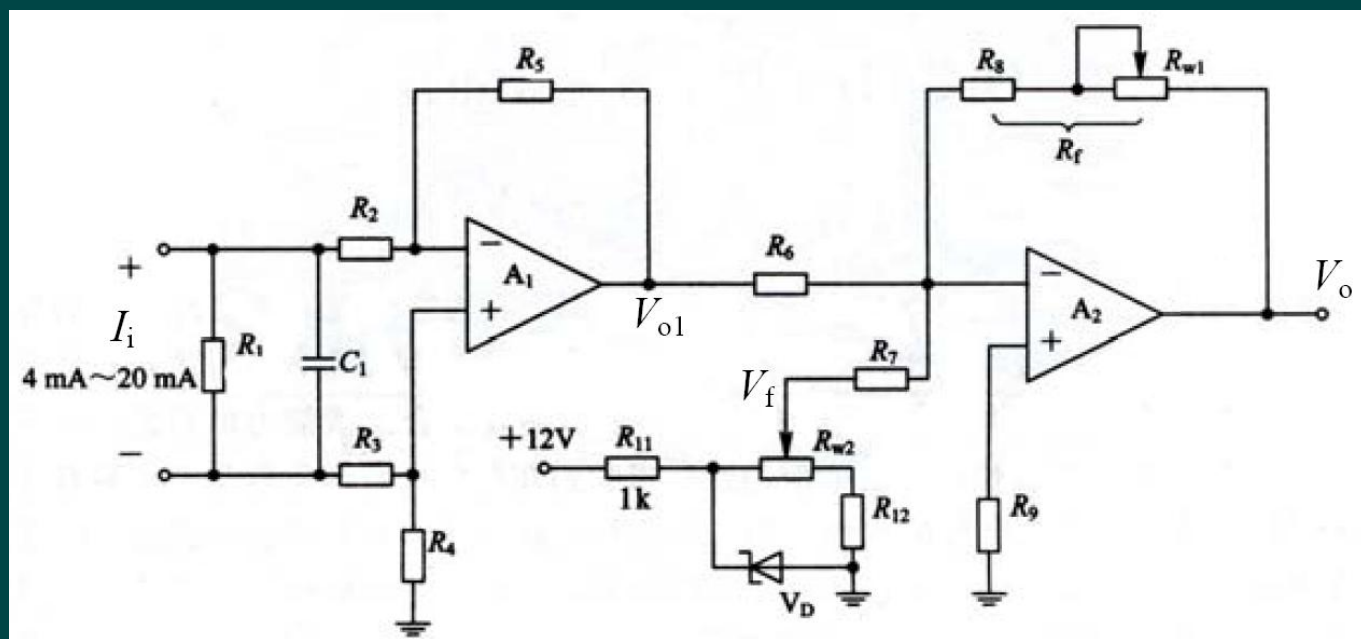


电子电路设计示例

I - V 转换电路设计

一、设计任务与要求

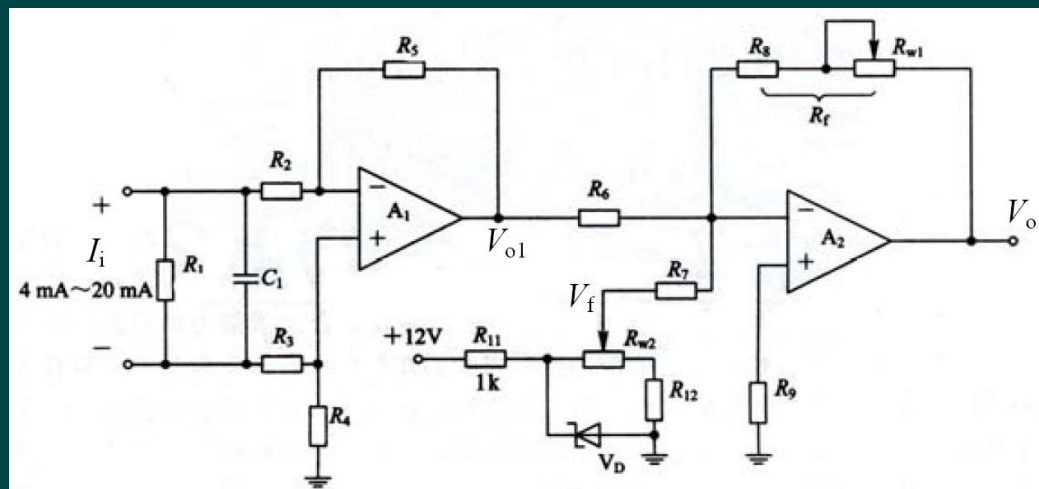
- ◆ 设计电流-电压转换电路，将 $4\sim 20\text{mA}$ 标准电流信号转换为 $0\sim 10\text{V}$ 的标准电压信号。要求：
- ◆ 1、参考如下电流-电压转换电路原理图，确定各元件值。
- ◆ 2、用Altium Designer 软件设计原理图和PCB图。



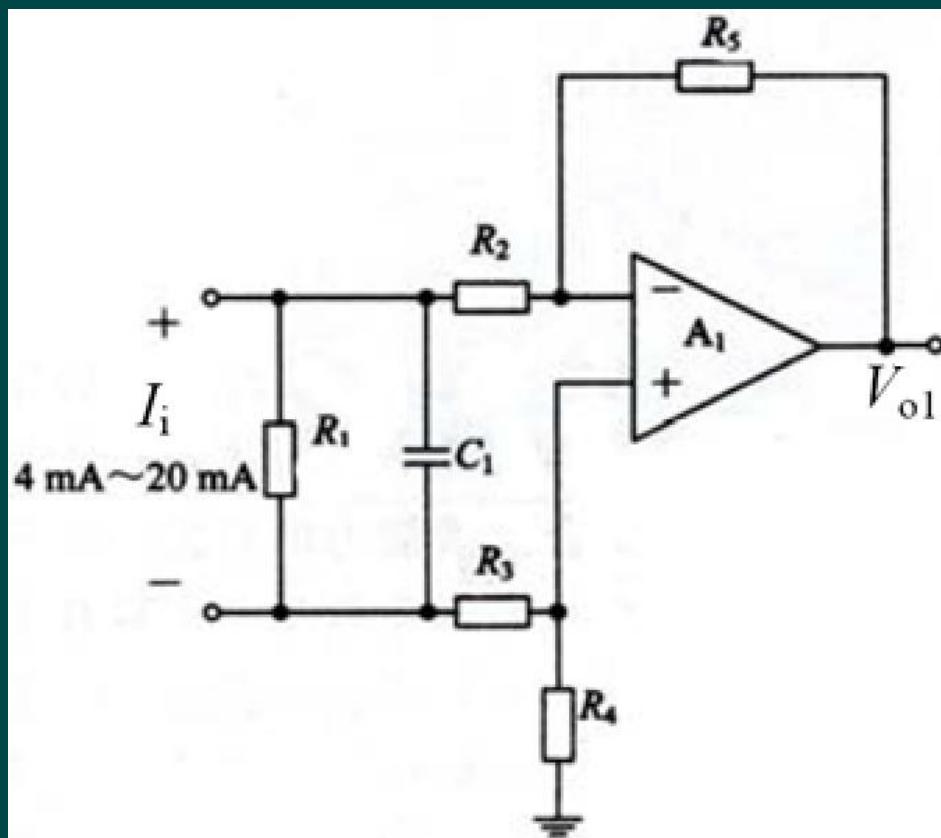
二、 I - V 转换电路原理及元件值确定

1、 I - V 转换电路原理

- ◆ 自动控制技术中，变送器输出的 $4\sim 20\text{mA}$ 标准电流信号通常需要转换成 $0\sim 10\text{V}$ 的电压信号后进行进一步处理。
- ◆ 4mA 为满量程的0%，对应输出电压的 0V ，
- ◆ 12mA 为满量程的50%，对应输出电压的 5V ，
- ◆ 20mA 为满量程的100%，对应输出电压的 10V 。



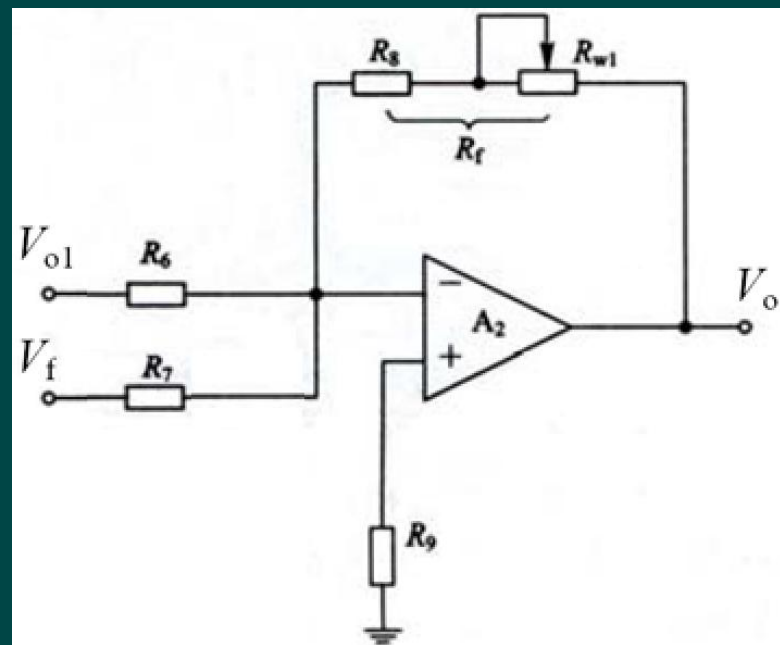
- ◆ 参考电路图中，电阻 R_1 跨接在电流源两端，对从上向下流经的 $4 \sim 20\text{mA}$ 输入电流 I_i 进行取样、转换为相应的电压。
- ◆ 运放 A_1 与电阻 R_2 、 R_3 、 R_4 、 R_5 构成差动放大器，若 $R_2 = R_3 = R_4 = R_5$ ，则运放 A_1 输出电压为 $V_{o1} = -I_i R_1$ 。



- ◆ 第二级电路为反相加法器电路，实现从 V_{o1} 的 $-(4 \sim 20\text{mA}) \times R_1$ 到 V_o 的 $0 \sim 10\text{V}$ 的电平变换。变换式如下：

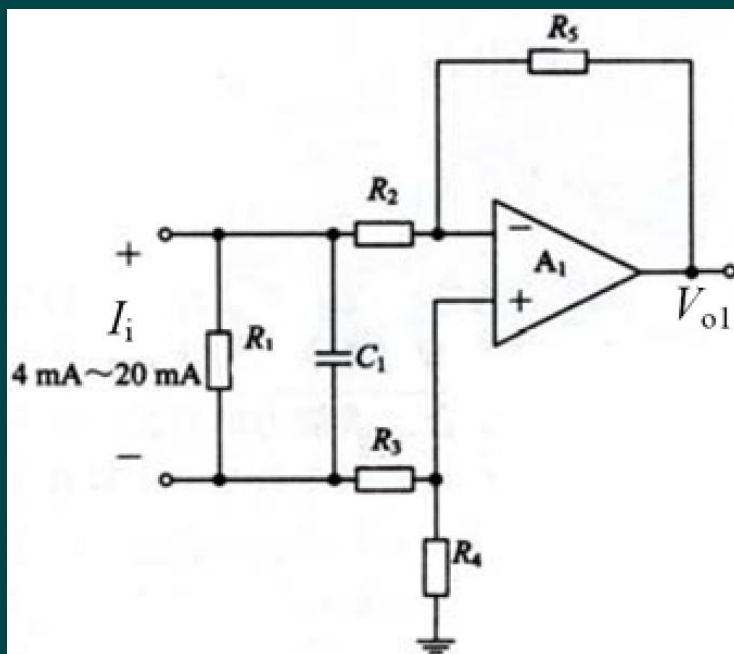
$$V_o = -\frac{R_f}{R_6} V_{o1} - \frac{R_f}{R_7} V_f = \frac{R_f}{R_6} I_i R_1 - \frac{R_f}{R_7} V_f$$

- ◆ 可以看出，只要合理选取 R_6 、 R_7 的阻值，调整 V_f 和 R_f ，就能使输入电流 I_i 从 $4 \sim 20\text{mA}$ 变化时，输出电压 V_o 相应的从 $0 \sim 10\text{V}$ 线性变化。



2、各元件值的确定

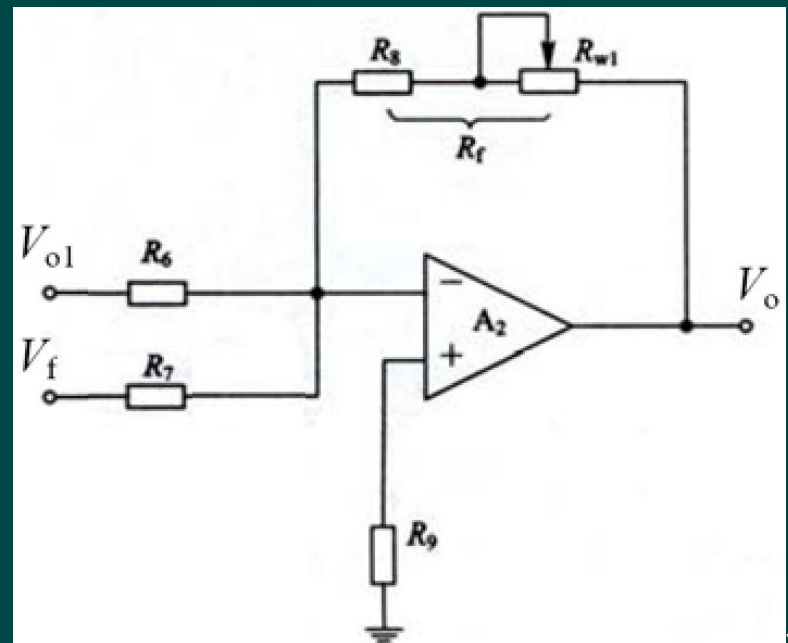
- ◆ 差动放大器的 4 个匹配电阻 R_2 、 R_3 、 R_4 、 R_5 可以预先取定，取为常用中等阻值 $10\text{k}\Omega$ 。
- ◆ 电阻 R_1 采用变送器标准负载：阻值 250Ω 、精度 0.1% 。由于输入电流为 $4\sim 20\text{mA}$ 时，电阻 R_1 上相应压降约为 $1\sim 5\text{V}$ 、最大功率为 0.1W ，因此，可以选用额定功率为 $1/4\text{W}$ 的电阻。



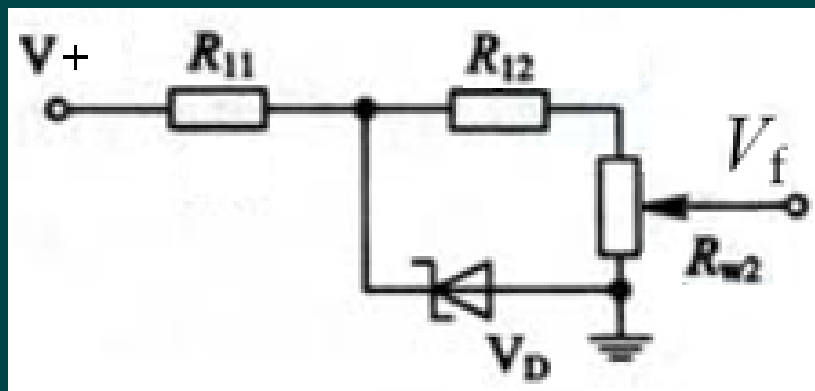
- ◆ 当 V_{o1} 从 $-1V$ 减小到 $-5V$ 、变化 $4V$ 时， V_o 需要从 $0V$ 增加到 $10V$ 、变化 $10V$ 。从 $V_{o1} \sim V_o$ 变换式可知，应使 R_f 等于 2.5 倍的 R_6 。取 $R_6=10k\Omega$ ，则 $R_f=25k\Omega$ 。 R_f 可由 $20k\Omega$ 固定电阻串联 $10k\Omega$ 电位器构成。
- ◆ 若取 $R_7=R_6=10k\Omega$ ，为了使得 $I_i=4mA$ 、 $V_{o1}=-1V$ 时， $V_o=0V$ ，应把 V_f 调为 $+1V$ 。

$$V_{o1} = - (4 \sim 20mA) \times R_1$$

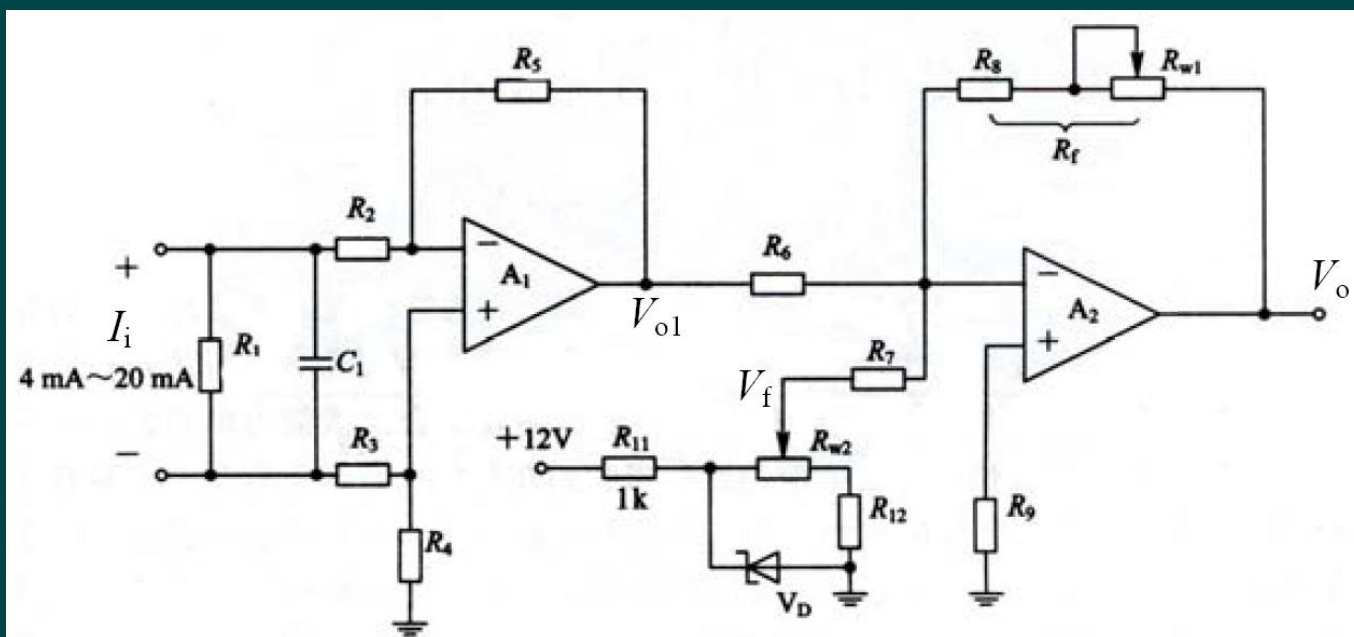
$$V_o = -\frac{R_f}{R_6} V_{o1} - \frac{R_f}{R_7} V_f$$



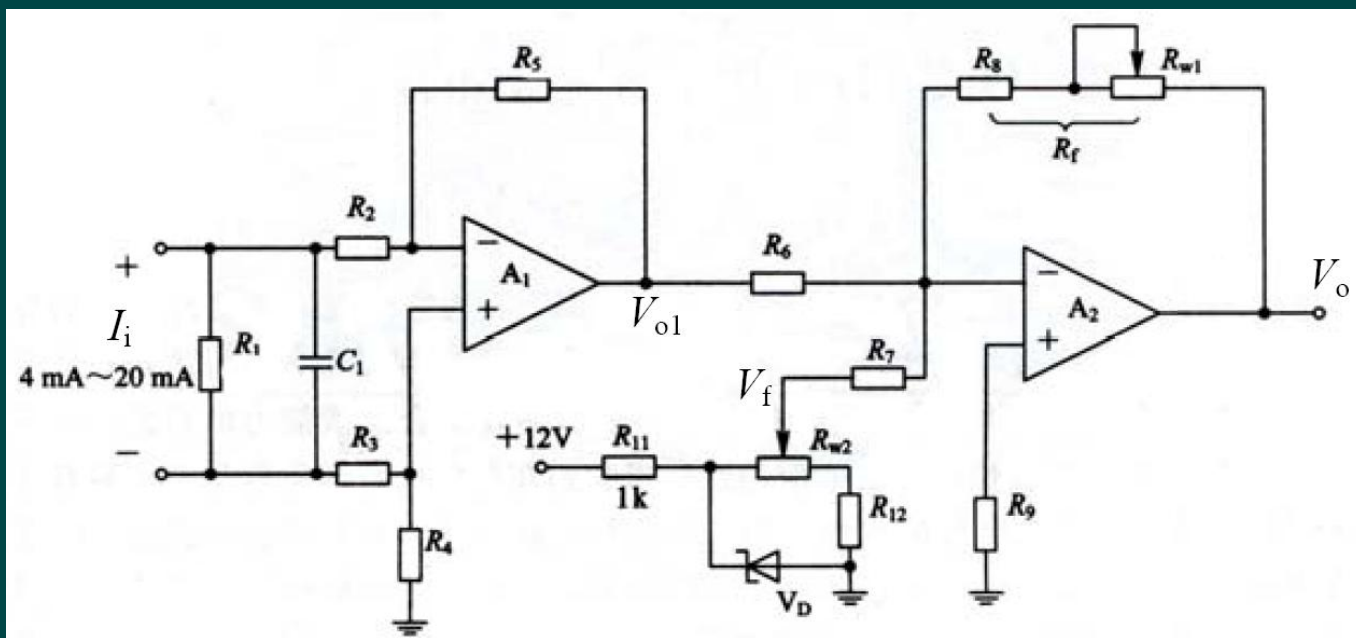
- ◆ 为了使得调整后的 V_f 不受电源电压变化影响， V_f 由稳压电路分压产生。
- ◆ 由于击穿电压在 $4\sim 7V$ 的稳压二极管温度系数最小、近似为零，这里选用 $5.1V$ 稳压管来实现稳压电路。
- ◆ 分压后要产生 $1V$ 左右的可调电压，分压电路可由上固定电阻串联下电位器构成。取流过分压电路电流为 $5mA$ ，则分压电路总电阻约为 $1k\Omega$ 。若取上固定电阻 $R_{12}=510\Omega$ ，下电位器 $R_{w2}=500\Omega$ ，则分压 V_f 将可在 $0\sim 2.5V$ 之间可调。



- ◆ 为避免运放A₂输出最大电压 +10V 时接近饱和，运放供电电源电压可取为 $\pm (12-13) \text{ V}$ 。
- ◆ 稳压电路的输入电压可与运放正电源电压共用。
- ◆ 设稳压管最小工作电流为 10mA，则稳压管限流电阻 $R_{11} = (13\text{V} - 5.1\text{V}) / (10\text{mA} + 5\text{mA}) \approx 527\Omega$ 、可取为标称值 510Ω ，此时 R_{11} 功率约为 0.12W。

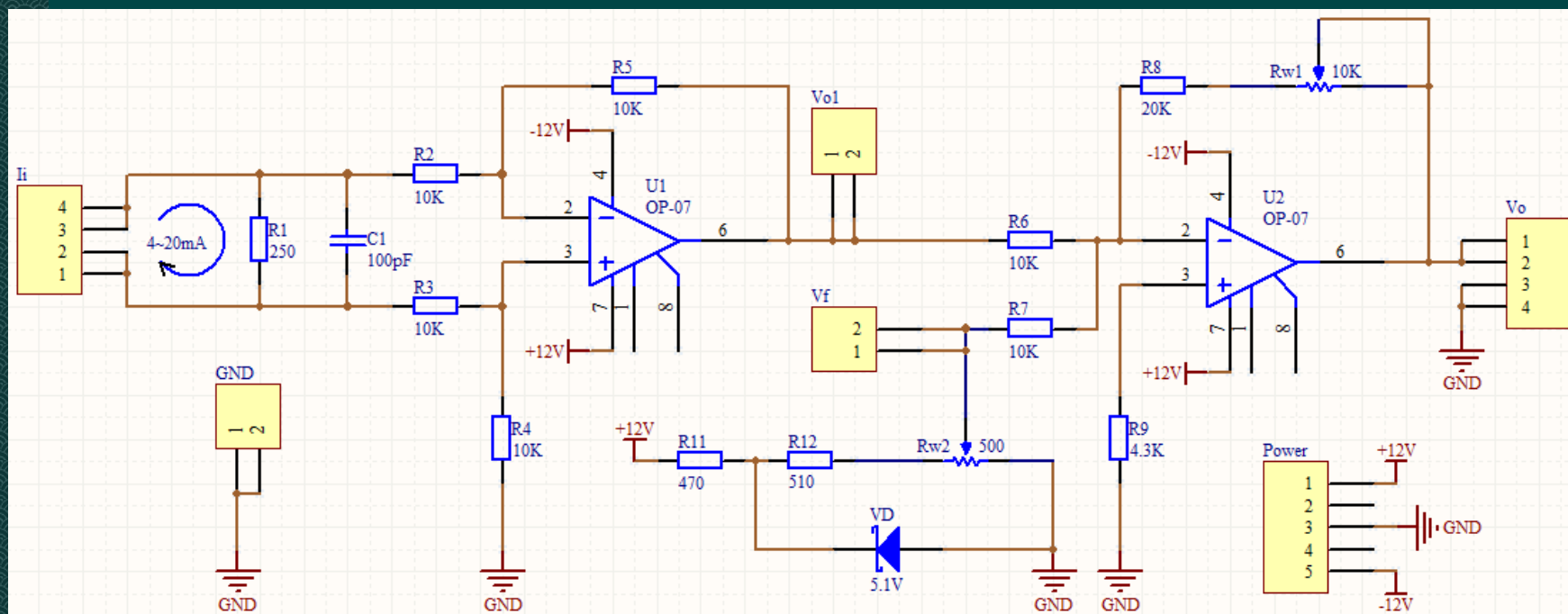


- ◆ 与电阻 R_1 并联的电容 C_1 主要作用是抑制高频干扰，可取为 **100pF**。
- ◆ 补偿电阻 $R_9 \approx R_6 \parallel R_7 \parallel R_f$ ，可取为 **4.3k Ω** 。
- ◆ 为了使得前后两级电路元器件归属比较清晰、易于调试检查，两个运放 A_1 、 A_2 都采用单运放。
- ◆ 为了提高电路的转换精度和温度稳定性，运放选用失调电压较小的 **OP07**。

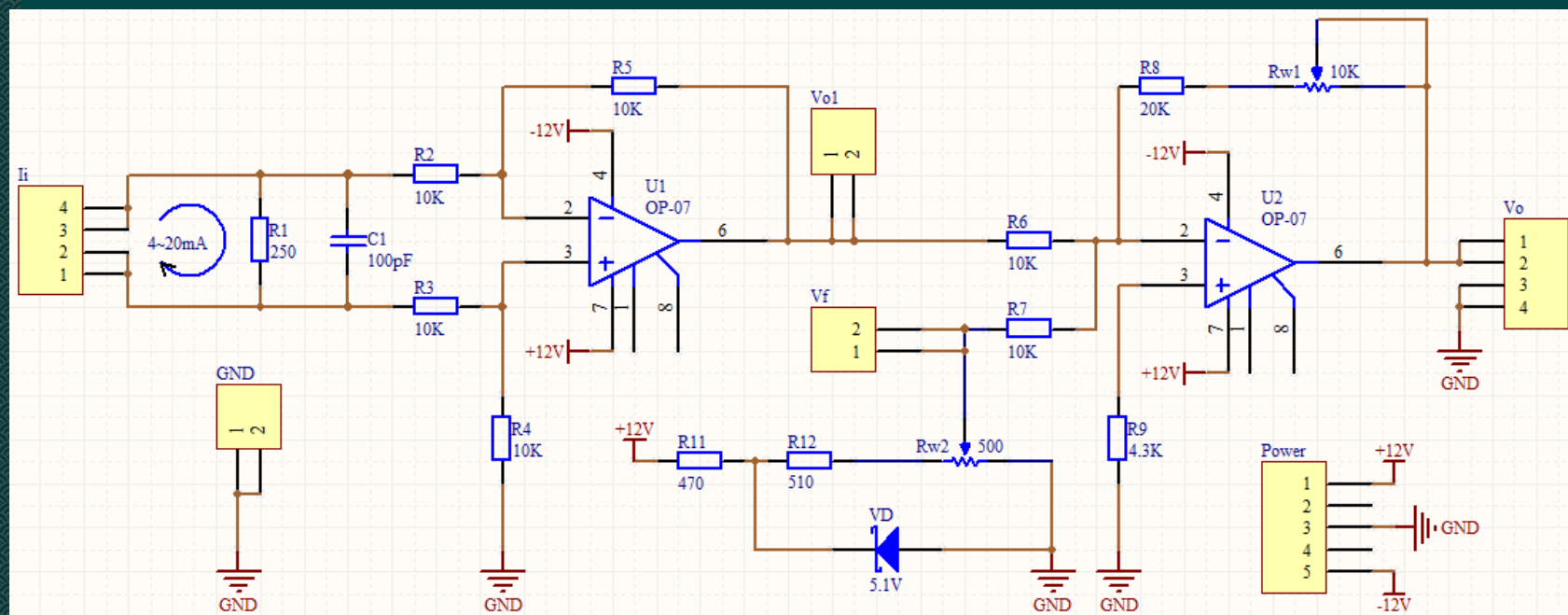


三、Altium Designer 电路原理图设计

按照前面的分析和计算，用 Altium Designer 软件绘制的 $I-V$ 转换电路原理图如下所示。这里不对具体设计步骤进行叙述，只对设计时要注意的地方进行说明。



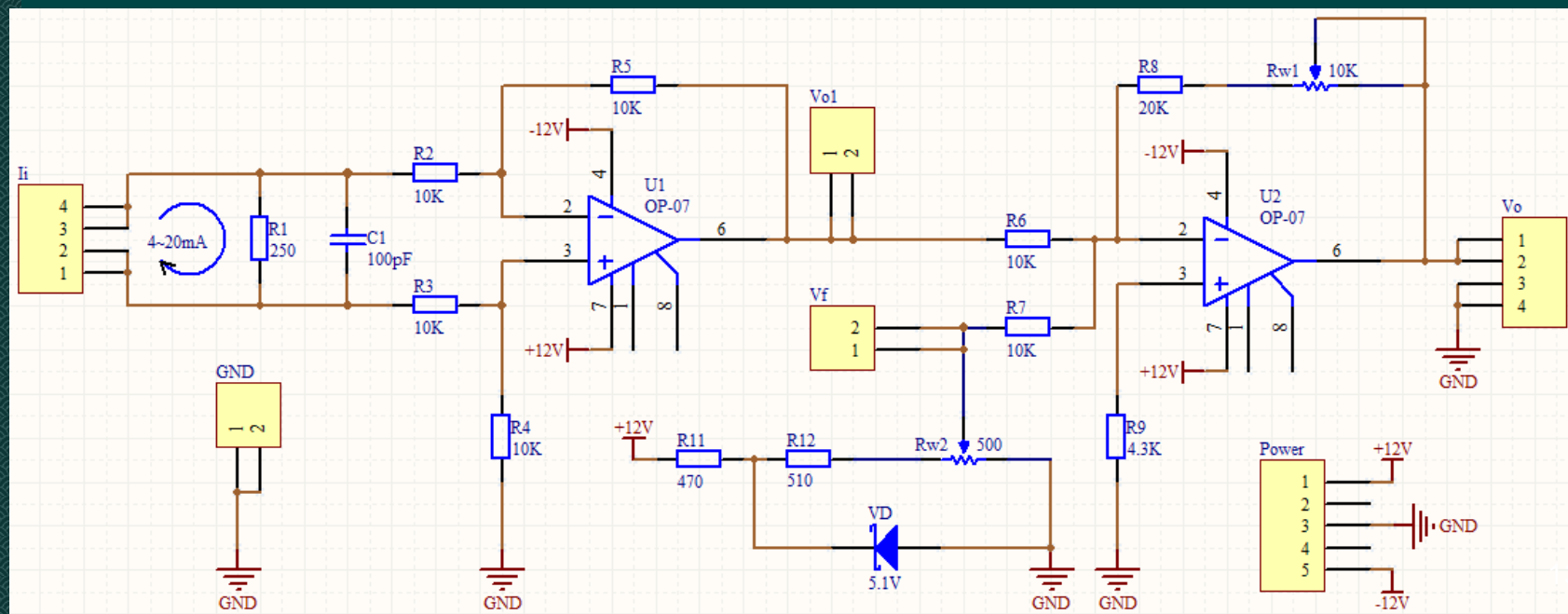
1、原理图设计时需指定各元器件的封装形式，以免 PCB 设计导入元件时有遗漏。为便于安装调试，本实验所有元件都采用双列直插封装。具体选用封装形式时需考虑实际元件的形状、尺寸、引脚间距等情况。本设计中各元件封装形式如下：
OP07 为 DIP8，1/4W电阻为 AXIAL0.4，瓷片电容为 RAD0.2，稳压二极管为 DIODE0.4，电位器为 VR5。



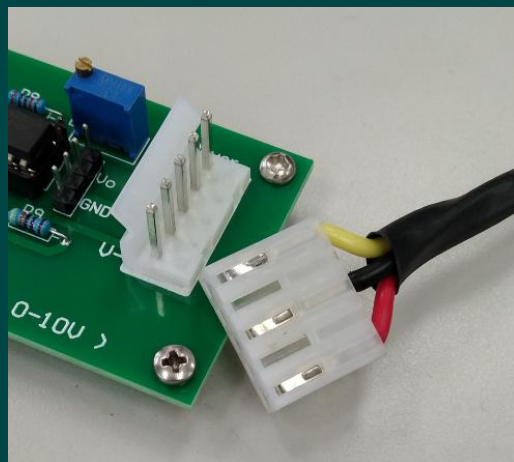
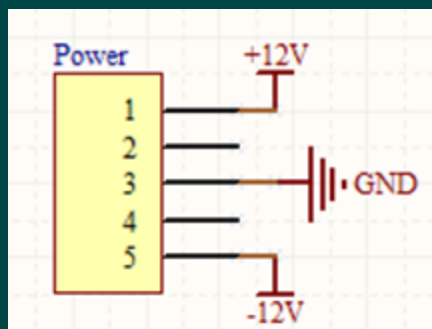
双击元件符号、打开元件属性窗口，窗口左下角的 **Footprint** 项即为元件封装选项。若没显示，可以添加；若已存在，可以删除和修改。

右图所示为电阻 R_1 属性窗口的封装选项等部分。

Models for R1 - Res2		
Name	Type	Description
RESISTOR	Simulation	Resistor
Res	Signal Integrity	
AXIAL-0.4	Footprint	Resistor; 2 Leads



2、原理图设计时还要考虑是否需要包含如下接插件：电源接口、输入输出接口、关键测试点、参考地测试点等。本设计中电源接口符号用的是5引脚的 **Header5**、封装为 **PowerPlug5**（如下左图），这是考虑实验室有现成的与 **PowerPlug5** 封装匹配的电连接（下图中带黑色护套3插头线。实际只用了3个引脚，分别为1、3、5脚）。

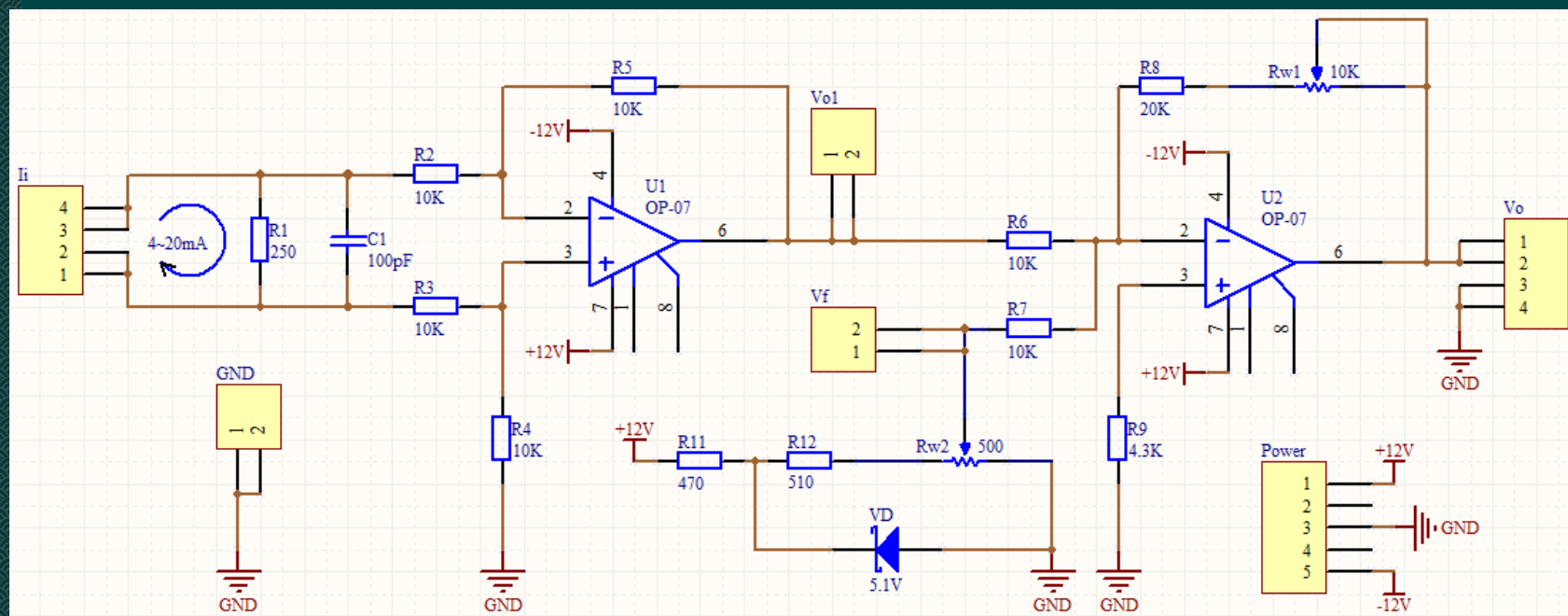


如果是单电源，可以用封装为 **PowerPlug2** 的2引脚接口，实验室有与 **PowerPlug2** 封装匹配的电源连接线。



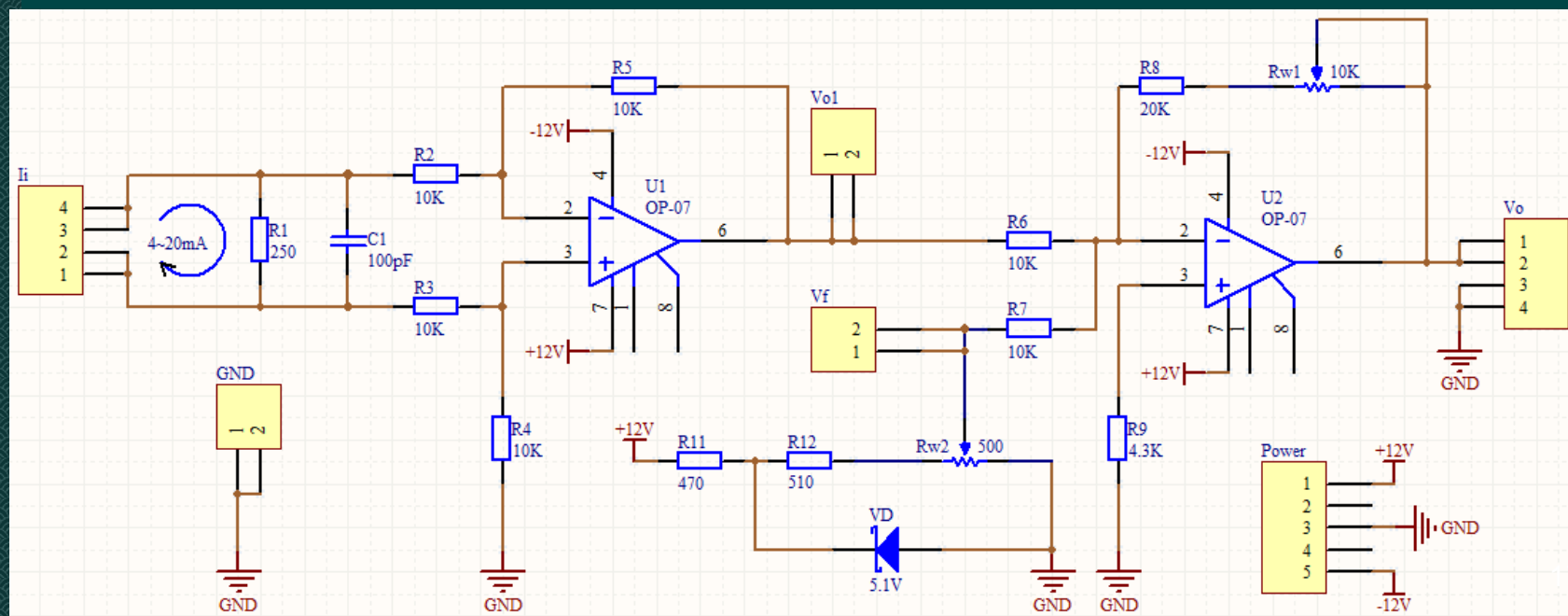
输入输出接插件需要考虑前后级电路的接口形式及测试连接。本设计中输入接插件用的是封装为 **SIP4** 的4引脚排针，中间两针可与 **4~20mA** 电流源输出的两芯杜邦头匹配连接。

图中的 **Vo1**、**Vf** 和 **GND** 接口分别为关键测试点和参考地测试点，封装都为 **SIP2** 的2引脚排针。

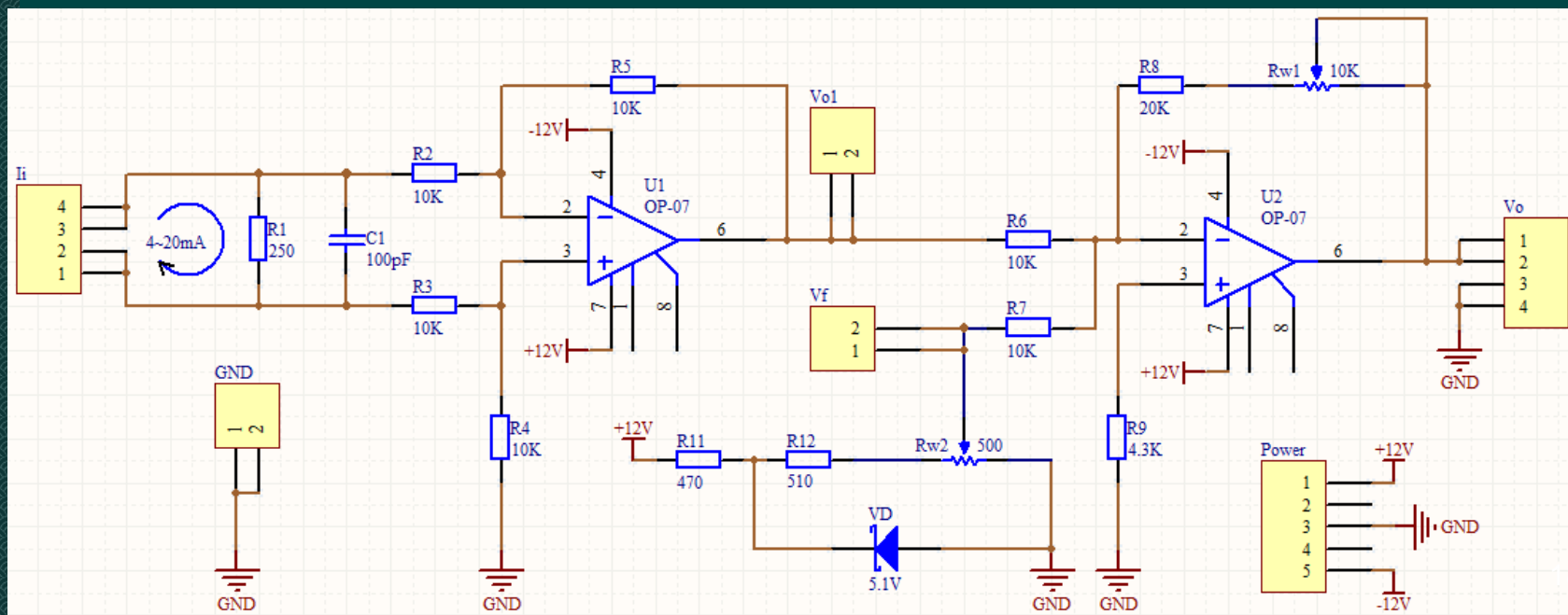


3、要注意，原理图设计时各元件的标号（Designator）不能重复，否则导入到 PCB 时会提示出错，因此标号通常不要隐藏。

4、绘制导线时要注意：导线端点有没有连到相应元件引脚的电气连接点上，该连通的交叉导线有没有连通节点，不该连通的交叉导线有没有多出连通节点导致短路。



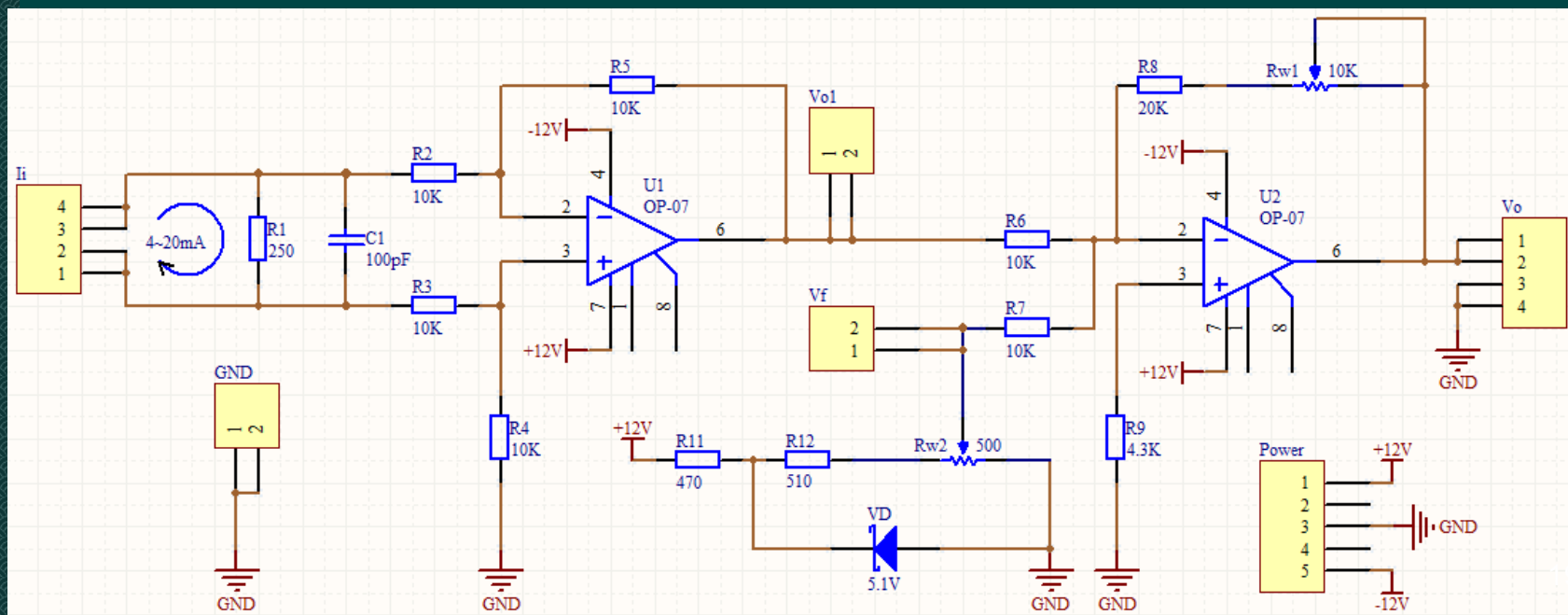
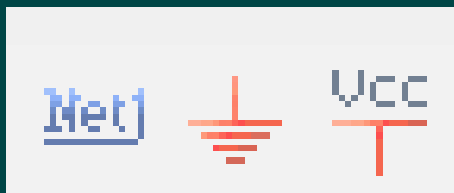
5、原理图设计时要善用网络标号（Net Label）。具有相同网络标号的引脚、导线、电源符号、地符号表示电气上是连通的，处于同一网络中。合理使用网络标号可以避免复杂的连线，使原理图更加简洁、容易理解。但也不要滥用网络标号，过度使用网络标号会使得元件比较孤立、电路连接关系不直观。



网络标号可分成两类：电源类网络标号、和普通网络标号。

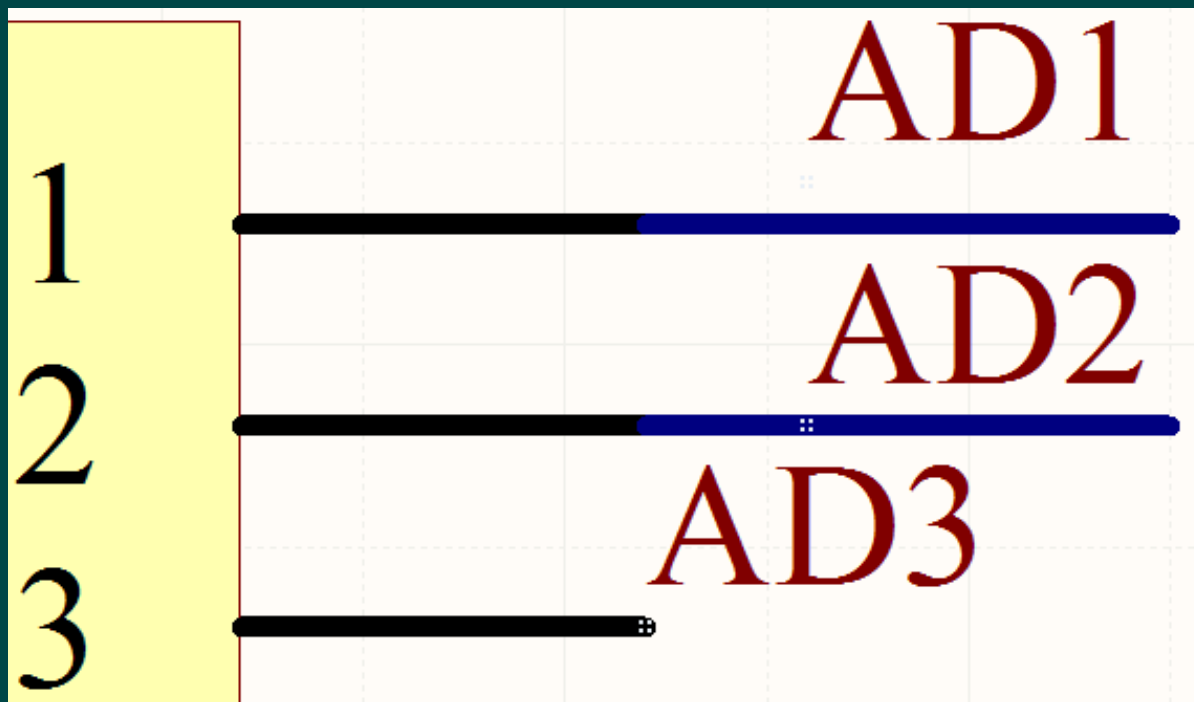
电源类网络标号一般带有专用符号，如 GND、+VCC、-VEE、+12V、-12V等。

下图为工具栏中与网络标号有关的工具图标，右边两个是地和电源网络符号，左边这个可以用来添加普通网络标号。

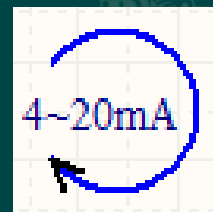


本设计中用了三个网络标号 GND、+12V 和 -12V。

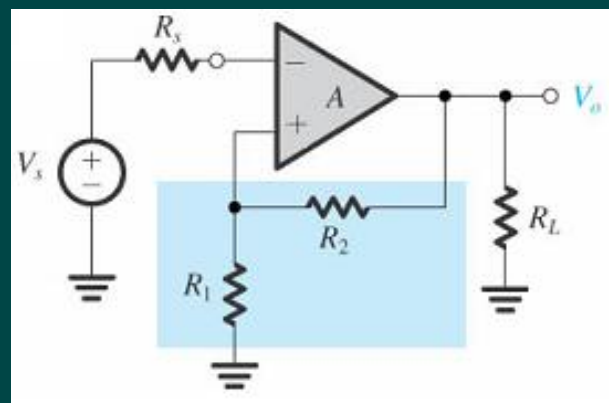
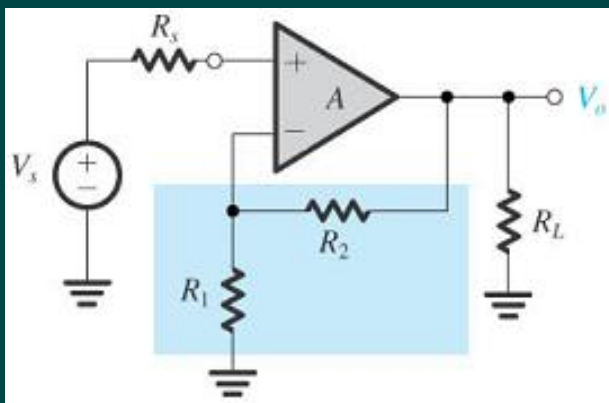
此外，要注意放置网络标号时网络标号左下角的电气节点要与相应元件引脚的电气节点重合、或在导线上。右下图网络标号 AD1 放置错误，AD2、AD3 放置正确。



6、原理图中有时还需要添加一些标注，这可以通过 Place — Text String / Drawing Tools 等实现。本设计中的 4~20mA 字样及圆弧箭头就是这样的标注。

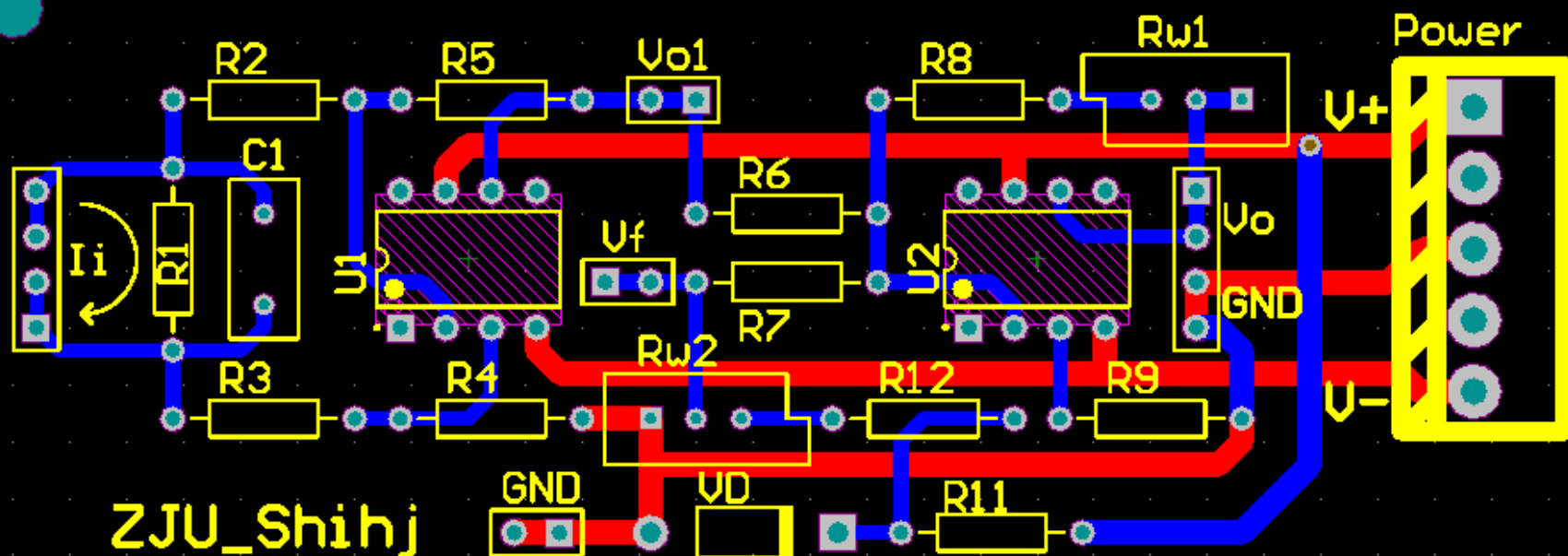


7、涉及运放应用电路设计时，要注意运放的同相端和反相端有没有接反。如下两电路图，只是互换了同相端和反相端，但左边是同相放大器、负反馈电路，右边是迟滞比较器、正反馈电路，功能完全不同。



四、Altium Designer 电路 PCB 设计

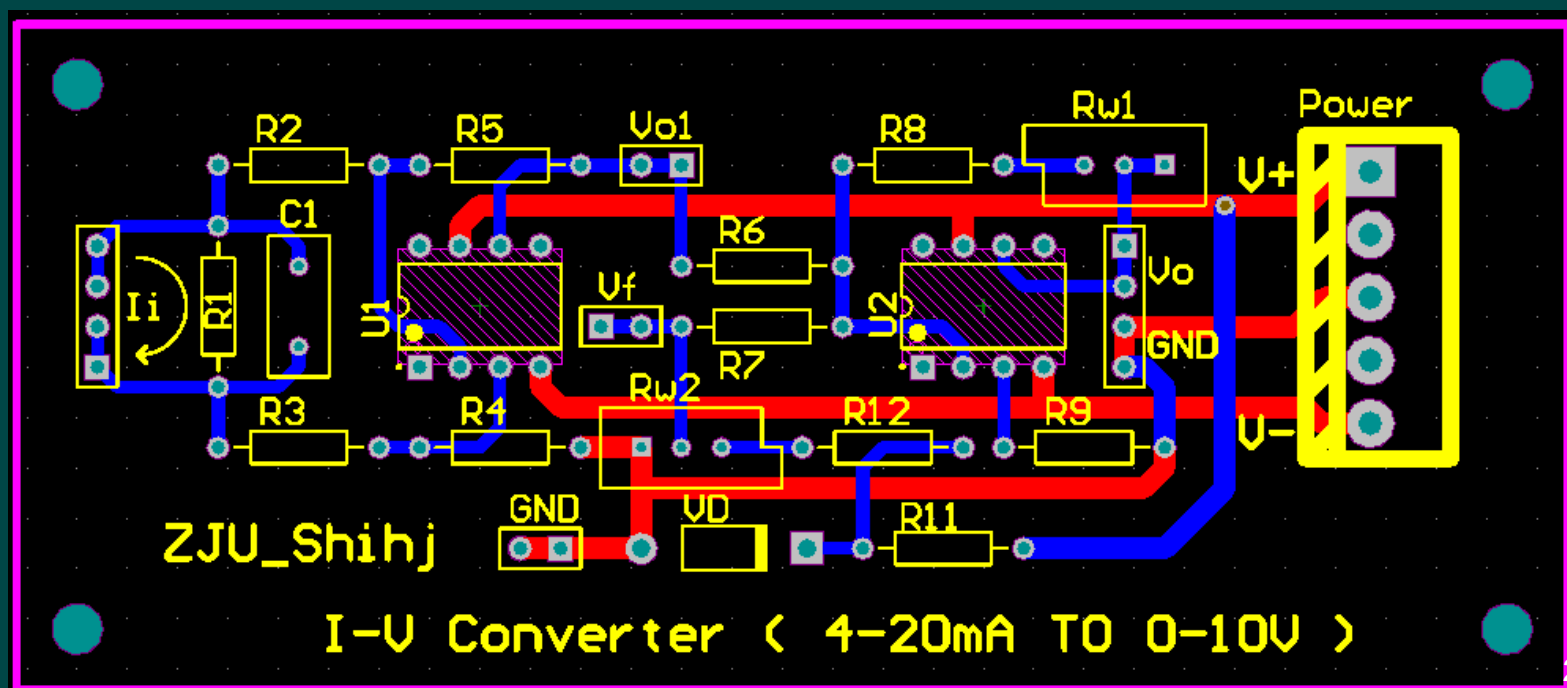
按照前面绘制的原理图经元件导入、布局、布线等步骤，设计完成的 **PCB** 图如下所示。这里不对具体设计步骤进行叙述，只对设计时要注意的地方进行说明。



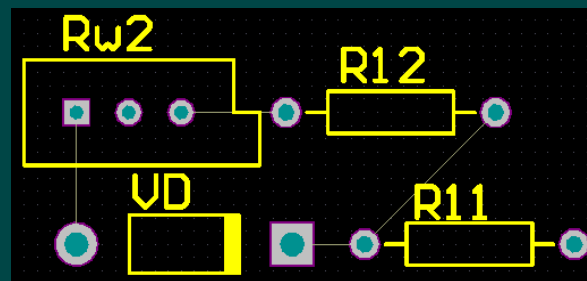
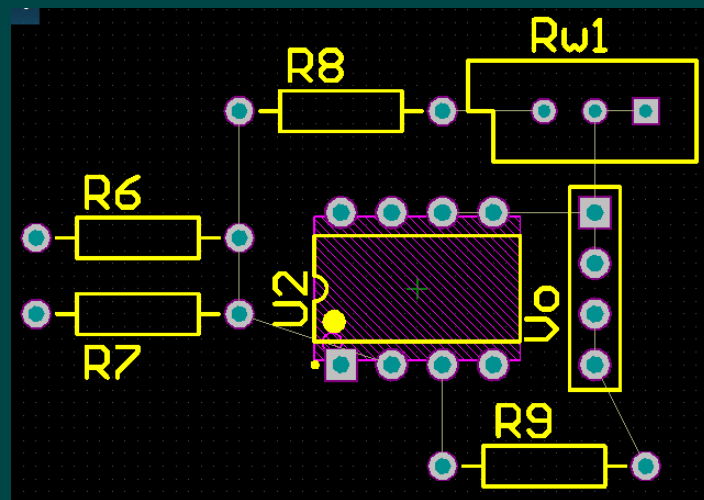
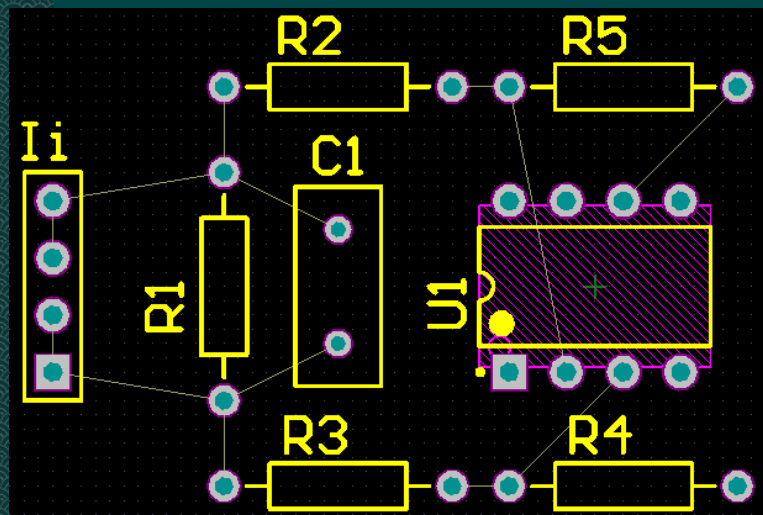
I-U Converter (4-20mA TO 0-10V)

1、PCB 设计导入元件后要注意是否所有元件都已导入。原理图设计时没有指定元件封装形式、或没有加载相应的元件封装库，都可能造成元件导入遗漏。

元件导入后要留意各元件封装是否与实际元件的外形、大小、引脚间距等相符。



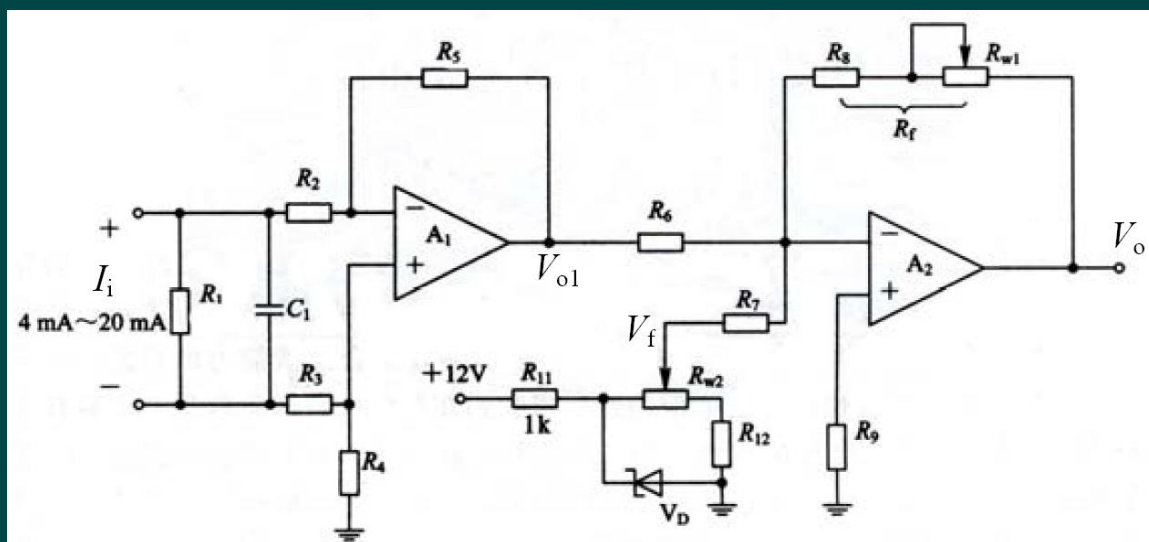
- 2、要注意各元件引脚是否都有表示连接关系的飞线。有的元件原理图符号中的引脚名称与 PCB 封装中的引脚名称不一致，这种情况在二极管中比较常见，譬如某二极管原理图符号引脚名为1、2，封装引脚名为A、K，这就会导致飞线缺失。一个解决办法是在原理图中对引脚名称进行编辑，使它与封装引脚名一致，然后更新。



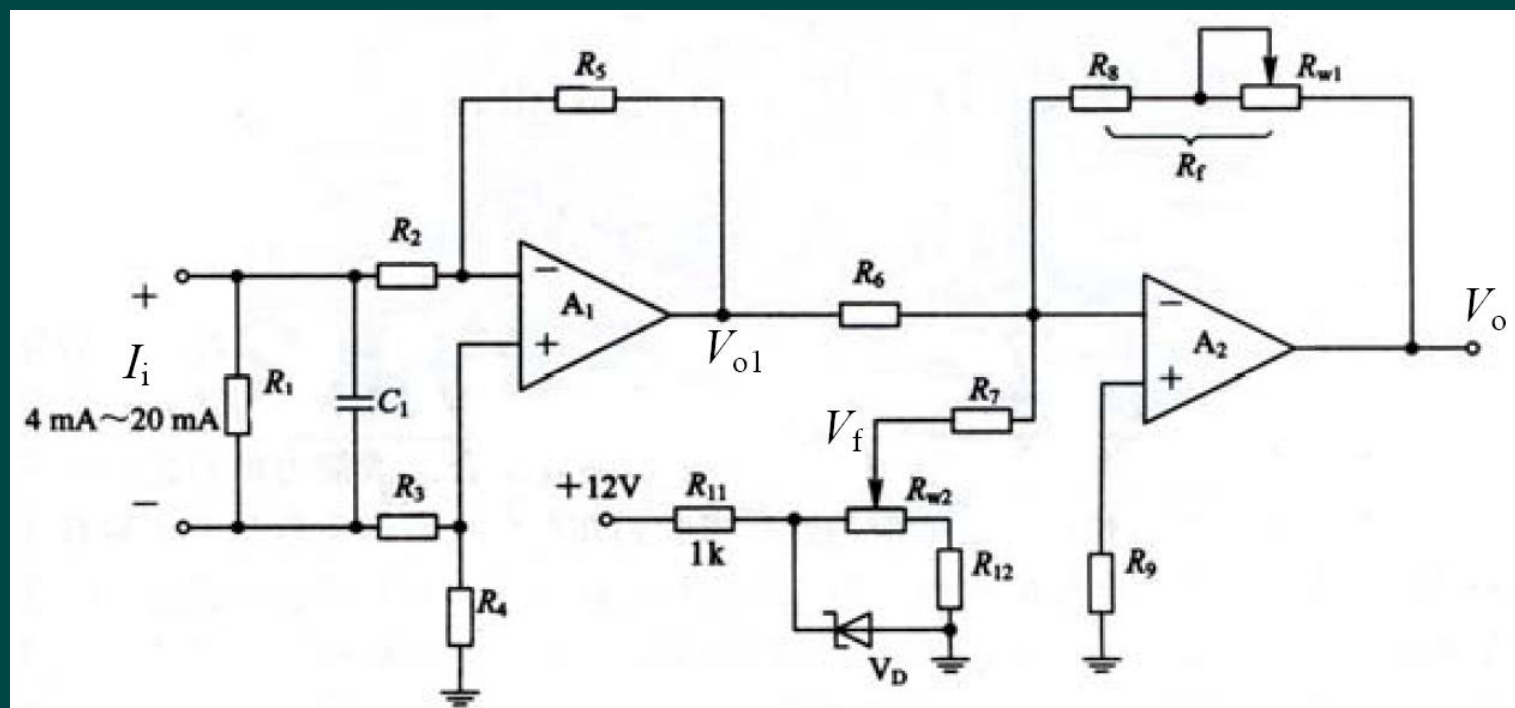
- 3、有的元件封装中的引脚排列顺序与原理图符号、或实际器件的引脚排列顺序不一致，也需要进行编辑修改。如实际的3296 电位器滑动端是中间脚，大部分双极晶体管基极是中间脚。还要注意双极晶体管其他两脚 C 和 E 有没有换错。


4、元件导入后不要急于布线，应该在布局上多下功夫，这对于布线和调试都是事半功倍的。布局前可把栅格（Grid）步进值调整为 50mil，这样可使布局后元件排列比较整齐。

布局原则一，同一基本单元电路有关元件放在一起。本设计可分成三个基本单元电路：输入与差动放大部分（ A_1 、 R_1 、 C_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 、 R_5 等）、反相加法器部分（ A_2 、 R_6 、 R_7 、 R_8 、 R_9 、 R_{w1} 等）、稳压分压部分（ V_D 、 R_{11} 、 R_{12} 、 R_{w2} 等）。



布局原则二，各基本单元电路相对位置基本按照电路原理的信号走向左右上下摆放。如第一级差动放大电路放在左边，第二级反相加法电路放在右边，因为差动放大的输出是反相加法的输入。

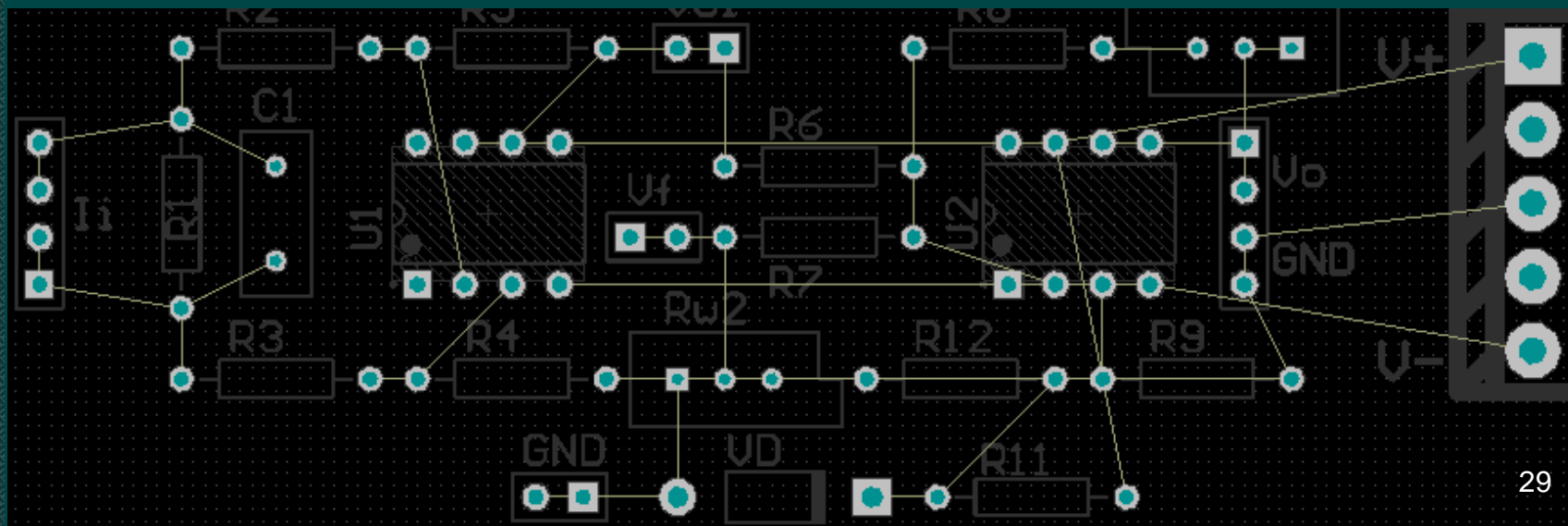
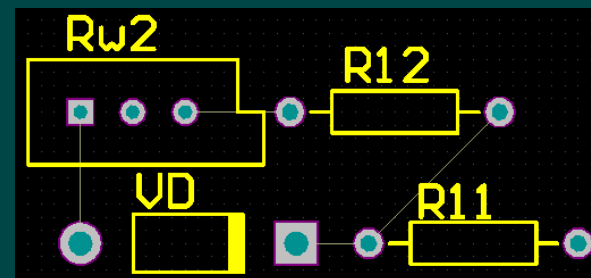
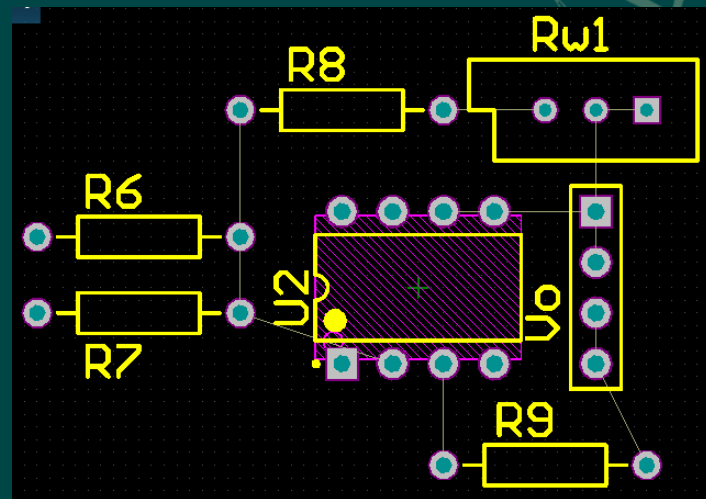
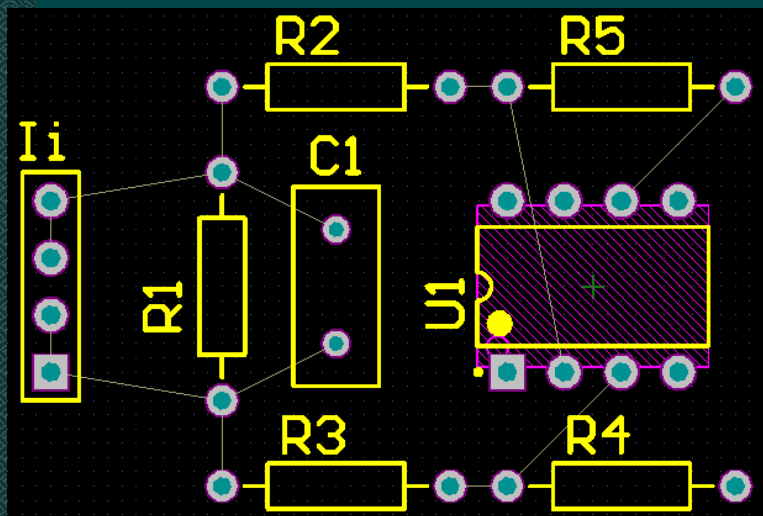




布局原则三，单元电路内部各元件相对位置基本按照电路原理图中相对位置布置。具体放置时注意飞线连接、是否需要元件进行旋转操作，以使走线尽可能合理。但务必注意不要对集成块等双排引脚元件进行镜像操作。

此外还需注意，各元件间距应适度紧凑，PCB 总图一般形成方形布局。

三个单元电路和整电路的布局、飞线如图所示，可以看出布局比较合理。

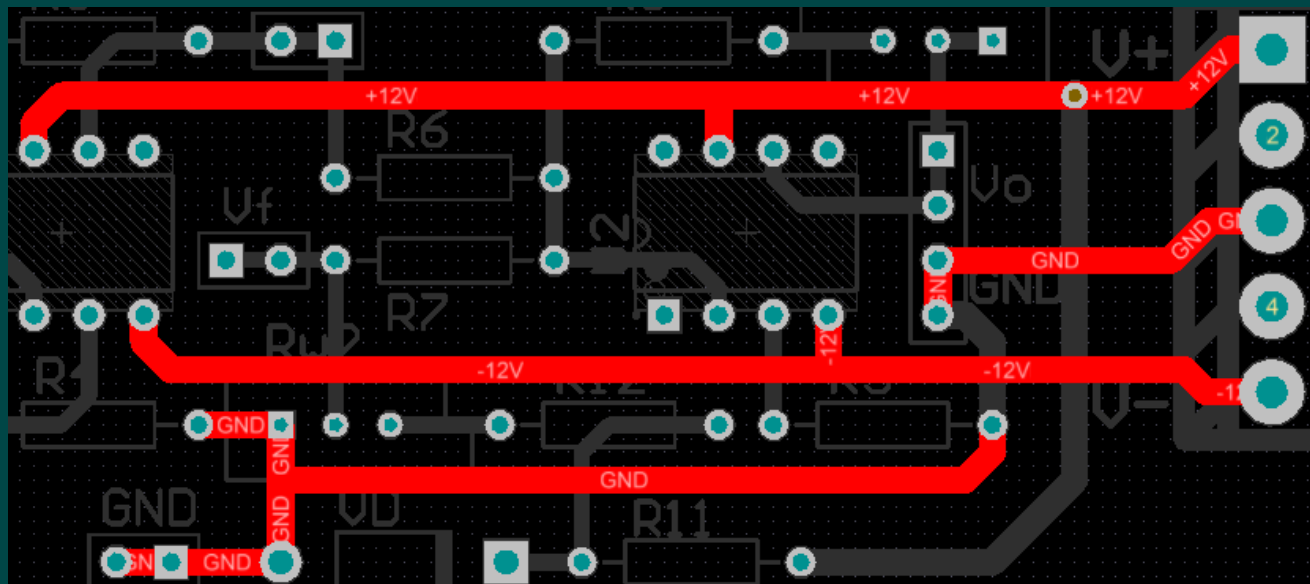
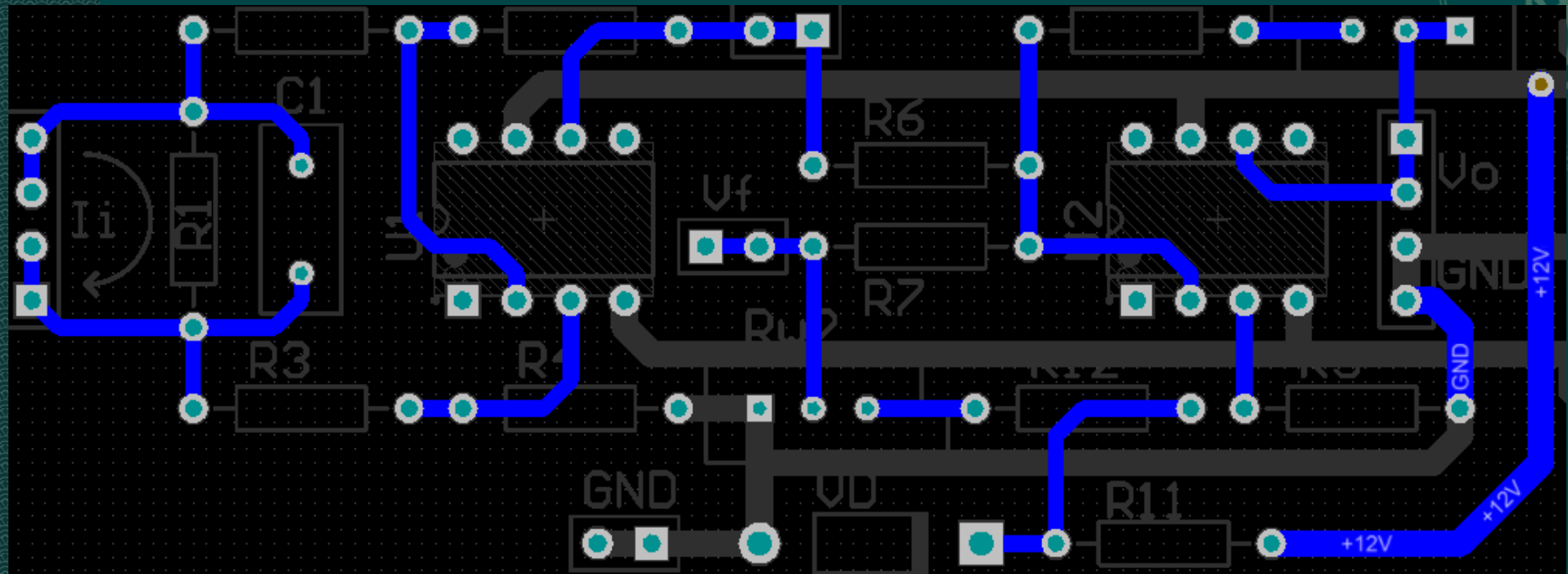


5、布局以后可以开始布线。Altium Designer 具有自动布线功能，但自动布线结果通常不太理想。本实验要求手工布线完成 PCB 设计。

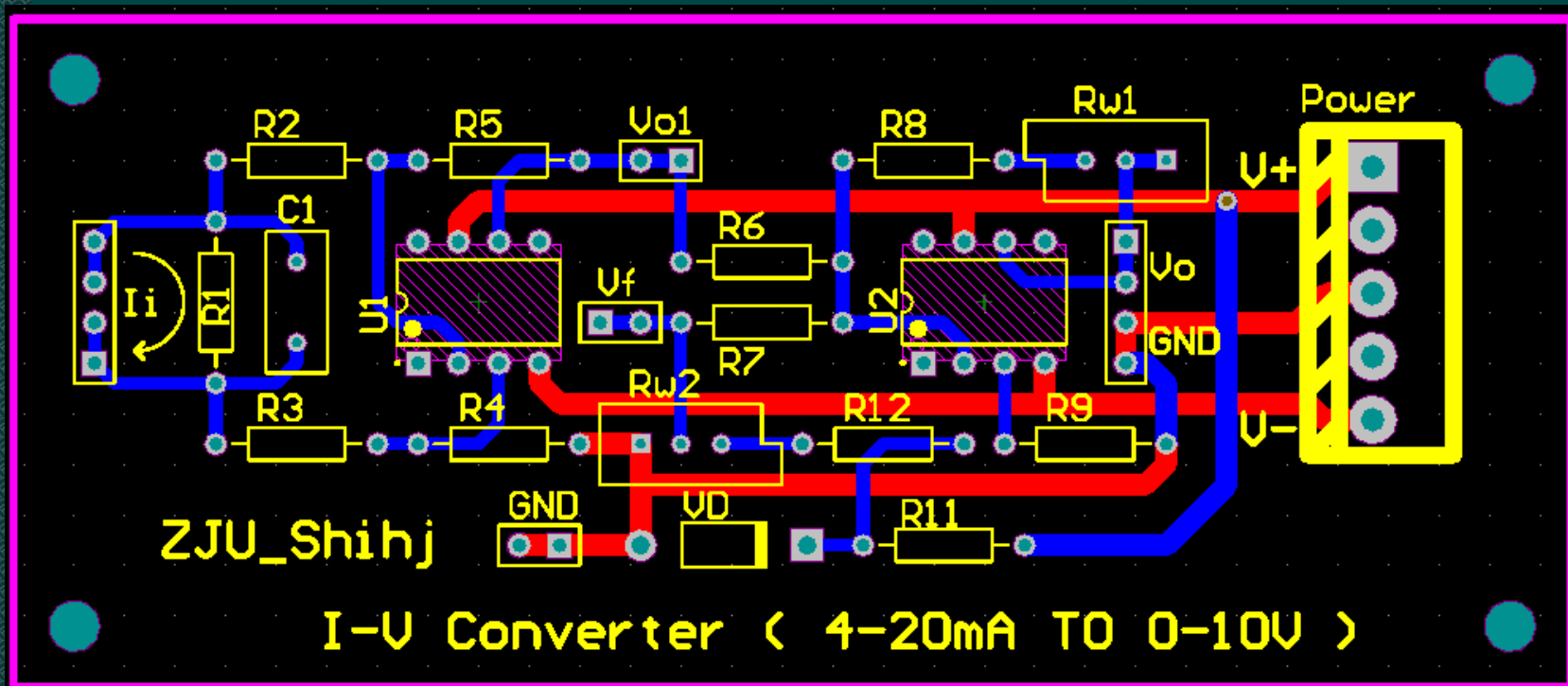
关于线宽，对于模拟电路在条件允许的情况下可以适当宽一点。如信号线 20mil ，电源线和地线 50 mil。

关于布线层，由于本设计比较简单，信号线都布在了底层，电源线和地线主要在顶层完成。

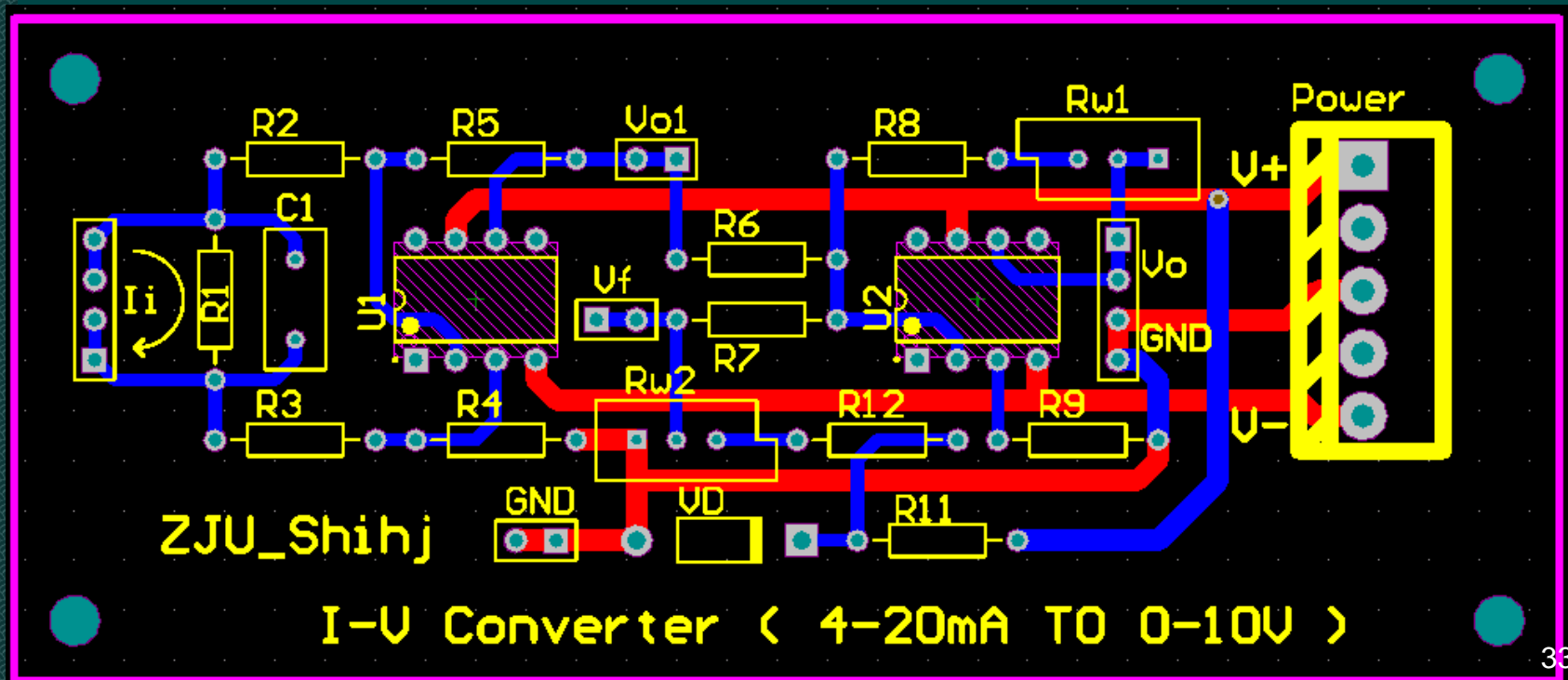
两个对角线焊盘的布线，一般不要走纯直角布线，中间应适当加 45 ° 倒角，但也不要走很长的大斜线。下面两图给出的是本设计的底层走线和顶层走线图。



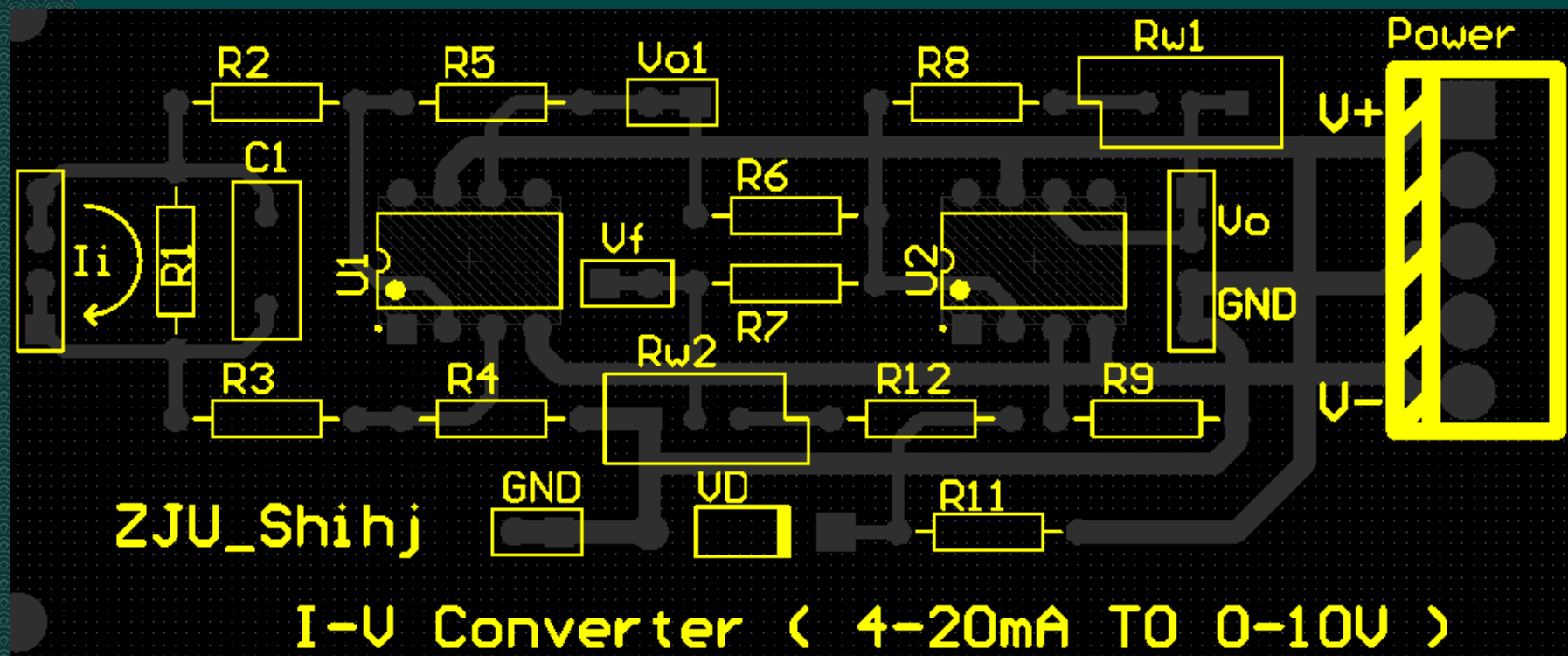
6、布局布线完成后，可以对各元件的标识位置及是否隐藏等进行调整。通常不要隐藏每个元件的标识号，各元件的值和型号是否显示自己决定，元件的封装名应该隐藏起来。标识的朝向一般就用两种，如向上和向左。标识相对元件符号的位置也应尽量统一。



PCB 图的丝印层 (Top Overlay) 还可以加其他标注, 这可以通过选择 Top Overlay, 然后 Place - String 实现。这些标注可以是表示电源电压正负连接提示的 $V+$ 、 $V-$ 、GND, 也可以是表示某一单元电路功能、或某一器件引脚功能的文字说明。另外还可以在电路板的合适位置标注整电路名称、作者标识、单位等。



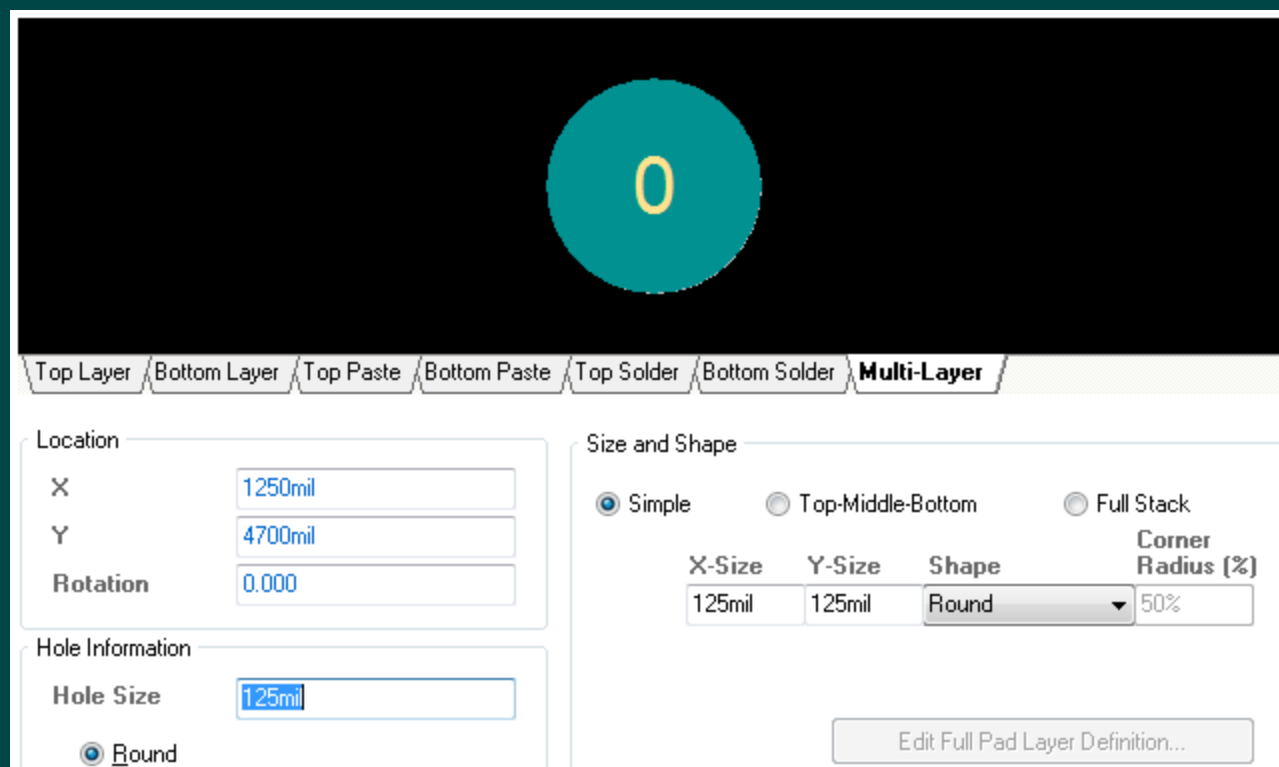
丝印层就是制版完成后印刷在电路板正面的白色文字。本设计的丝印层如下图。



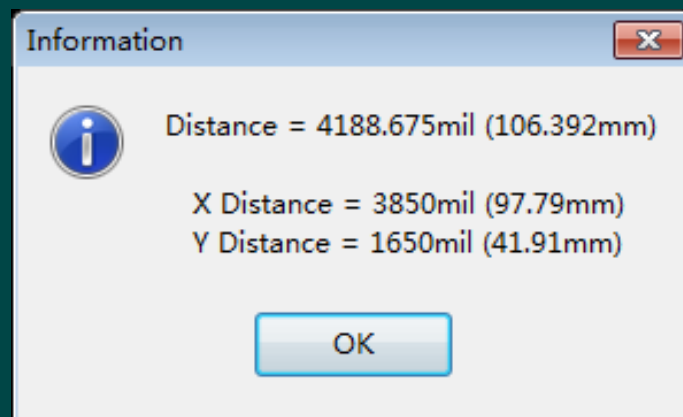
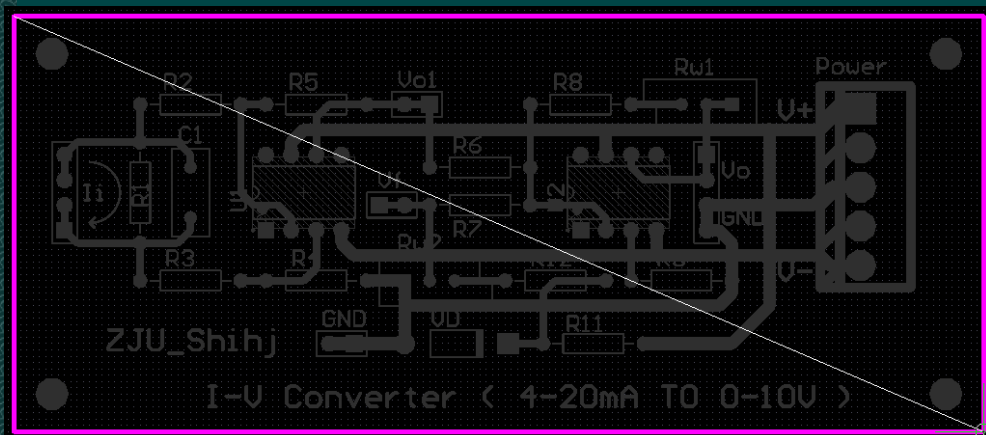
作者标识: Y67_01_XXXX, E67_06_XXXX,
S67_05_XXXX, E9A_12_XXXX

班次_桌号_学号后四位

7、这些完成后，通常还要在 PCB 板的四角打上安装孔。这可以通过放置内外径相同的 Pad、或在禁止布线层（Keep-Out Lay）上放置圆来实现。如果准备安装 3mm 螺丝，Pad 的内外径可以取为 125 mil。



最后，在禁止布线层（Keep-Out Lay）上画一个矩形框，这就是加工后实际拿到的电路板的边界。板的尺寸可以通过 Reports - Measure Distance，对禁止布线层矩形框拉对角线得知。（禁止布线层矩形框、板尺寸信息框）



宽不要超过 99mm、 高不要超过 49mm

送工厂加工时，只需把工程中的 *.PcbDoc （Protel PCB Document）文件发给工厂就可以了，没必要把原理图文件、甚至整个工程文件夹发给工厂。