

运算放大器基本特性实验

(物理实验技能版) 张翊凡

运算放大器 (Operational Amplifier), 简称为**运放** (Op Amp, OPA), 是一种特殊类型的放大器。经由恰当选取的外部元件, 它能够构成各种运算, 如放大、加、减、微分和积分。运算放大器的首次应用是在模拟计算机中。它实现数学运算的能力是将**高增益**与**负反馈**结合起来的结果 (会在实验原理部分讲述) ⁱ。

在学习和设计电路时, 可以将运算放大器作为一种黑盒子元件来看待, 无需了解其内部结构。它和其他元件如电阻器、电容器等构成的电路就是运算放大电路 (Op Amp Circuits)。合理设计的运算放大电路能实现上万种功能, 常用的有比例放大、求和放大、求差放大、积分/微分/指数/对数运算、跟随器、滤波器等。

本实验将介绍运算放大器的基本原理, 并通过 NI ELVIS II+ 电子学实验平台搭建基本的运算放大电路 (电压跟随器、反相放大器、同相放大器), 探究运算放大器的基本特性以及实际运算放大器与理想运算放大器的区别。

实验目的

- 1、初步了解运算放大器的基本原理 (高增益、负反馈、虚断虚短等);
- 2、初步掌握 NI ELVIS II+ 电子学实验平台的使用方法;
- 3、初步探究电压跟随器、反相放大器、同相放大器的搭建方法和效果;
- 4、初步探究实际运算放大器与理想运算放大器的区别及补偿方法。

实验原理

1. 运算放大器基本原理

1.1 运放的输入与输出

最常见的运放拥有 5 个接口, 符号如图 1 所示。 $+V_{CC}$ 是**正电源输入端**, $-V_{CC}$ 是**负电源输入端**, V_P 是**同相输入端**, V_N 是**反相输入端**, V_O 是**输出端**。

如果无需强调运放的电源, 可将运放的符号简化为 3 个接口, 即同相输入端、反相输入端与输出端, 如图 2 所示。

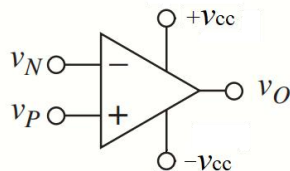


图 1: 完整的运放符号

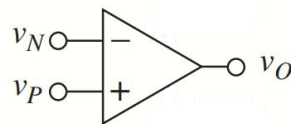


图 2: 简化的运放符号

运放一般需要使用正负双电源 (即一正一负且绝对值相等的两个电源) 供电, 如图 3 所示 (注: 图中接地符号并非代表真正接入大地, 而是表示将此处电势定义为 $0V$)。在一些情况下, 也可使用单电源供电, 但运放会失去一些功能。

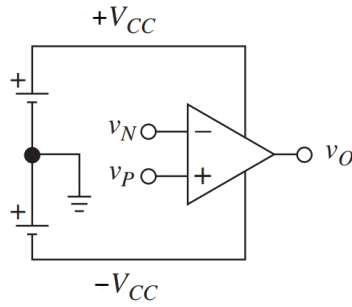


图 3: 运放的电源接法

1.2 运放的高增益

运放的两个输入端的电压差称为**差分输入电压** V_D (Differential Input Voltage):

$$V_D = V_P - V_N$$

其输出电压 V_O 与 V_D 成正比, 比值即为运放的**开环增益** a (Open-Loop Gain):

$$V_O = a \cdot V_D = a \cdot (V_P - V_N)$$

a 是一个很大的正数, 一般在 10 万以上, 而理想运放的 a 为**无穷大**。这即是说, 对**理想运放**而言, 只要 V_P 比 V_N 稍大一点, V_O 就能达到电压上限 (一般为 $+V_{CC}$); 只要 V_P 比 V_N 稍小一点, V_O 就能达到电压下限 (一般为 $-V_{CC}$)。由此可见, 要使 V_O 落在 $-V_{CC}$ 和 $+V_{CC}$ 之间, 则 V_P 与 V_N **必须相等**, 即 $V_D = 0$ 。

1.3 运放的负反馈

在运算放大电路中, 要让 V_O 落在 $-V_{CC}$ 和 $+V_{CC}$ 之间, 必须引入**负反馈**。负反馈的原理是将 V_O 与 V_N 之间建立连接 (一般用一个电阻或直接导线连接), 使得 V_O 的升高也会导致 V_N 的升高, 这样 V_D 就会降低, 导致 V_O 降低, 最后停留在一个稳定值 (此时应当满足 $V_D = 0$)。因此引入负反馈能够阻止 V_O 过分升高, 降低整个电路的增益。图 4 展示了负反馈使得输出电压稳定的一个例子。

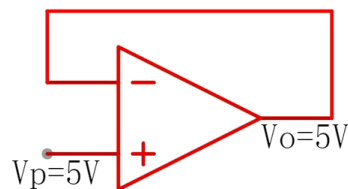


图 4: 负反馈使得 $V_O = 5V$

其原理为:

1. 输入 $V_P = 5V$, 则 V_O 开始上升;
2. 负反馈使得 V_N 同时开始上升, 保持 $V_N = V_O$;
3. 当 V_O 上升到 $5V$ 时, $V_N = V_P$, $V_D = 0$;
4. V_O 停止上升, 稳定在 $5V$ 。

上述电路又称为**电压跟随器**, 因为输出电压总是跟随输入电压。

1.4 运放的虚断与虚短

运放的输入电阻极高 (理想运放输入电阻为**无穷大**), 这表示流入运放两个输入端的电流 I_N 和 I_P 极小 (若是理想运放则为**零**)。因此理想运放的两个输入端之间相当于断路, 该现象称为**虚断**。

当理想运放处于**线性工作区** (即 V_O 落在 $-V_{CC}$ 和 $+V_{CC}$ 之间) 时, 必须满足

$V_N = V_P$ ，因此两输入端之间又相当于短路，该现象称为**虚短**。

利用虚断 ($I_N = I_P = 0$) 和虚短 ($V_N = V_P$)，可以计算任何运算放大电路中**输出电压与输入电压的关系式**。

虚断和虚短的前提是：**理想运放处于线性工作区**。

2. NI ELVIS II+ 电子学实验平台的使用方法

2.1 NI ELVIS II+ 电子学实验平台的简介

ELVIS (Educational Laboratory Virtual Instrumentation Suite) 是美国国家仪器公司 (National Instruments) 开发的一套集可调稳压电源 (Variable Power Supply, VPS)、数字万用表 (Digital Multimeter, DMM)、信号发生器 (Function Generator, FGEN)、示波器 (Oscilloscope, SCOPE) 等常用电子学仪器于一体的电子学实验平台ⁱⁱ。本实验使用 NI ELVIS II+ 版本，如图 5 所示。

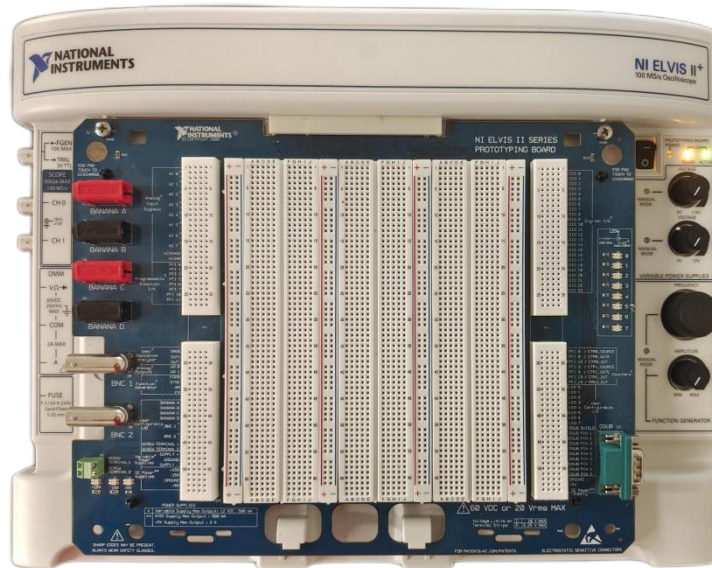


图 5: NI ELVIS II+ 电子学实验平台

2.2 ELVIS 的连接

如图 6 所示，ELVIS 的后面板从左到右分别为：**总开关、电源接口、USB 接口**。将电源适配器连接电源接口，数据线连接 USB 接口与电脑，打开总开关，启动 ELVIS。



图 6: ELVIS 的后面板

电脑端使用的软件为 NI ELVISmx，下载地址：www.ni.com/zh-cn/support/downloads/drivers/download.ni-elvismx.html。

ELVISmx 的界面如图 7 所示，包含了 ELVIS 提供的所有仪器功能。单击某一仪器，即可弹出该仪器的面板并开始使用。



图 7: ELVISmx 的软件界面

2.3 ELVIS 的面包板区

ELVIS 主面板上最大的白色区域为面包板区，可用于自由连接电路。面包板上**每一行的 4 小格或 5 小格**（如 1A~1E, 5F~5J）之间在内部相互连接，且**标有红色或蓝色长竖线的列上的所有小格**在内部相互连接（一般用于连接电源或地）。图 8 展示了面包板上各小格的连接模式（红线覆盖的小格互相连接，只划了部分红线，其它类推）。

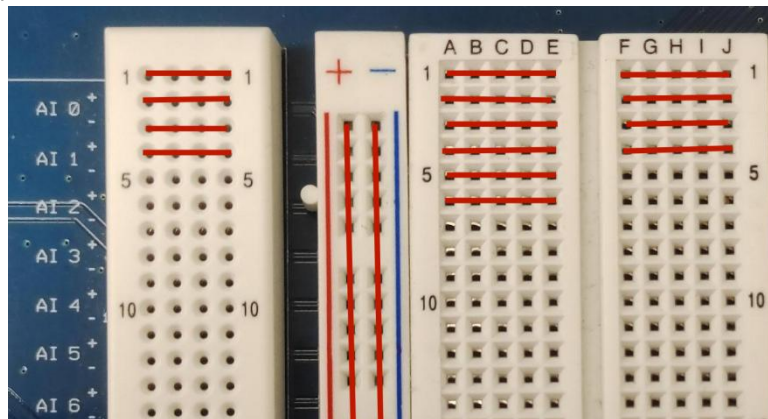


图 8: 面包板的内部连接模式

最左侧和最右侧的圆孔面包板是**终端条**（Terminal Strips P2/P3），不仅每行的 4 个小格互相连接，且每行与左侧/右侧底板上印字标识的接口连接。如图 8 中左侧终端条第 1 行的 4 个小孔互相连接，且连接 AI 0+接口。这些接口的具体功能会在具体使用到时讲述。

2.4 ELVIS 的控制区

ELVIS 的机身右侧是控制区，如图 9 所示。包含供电开关、可调电压旋钮和信号发生器旋钮。**打开供电开关以给面包板区供电，确保右侧 3 个指示灯全亮。**



图 9: ELVIS 的控制区（图片转置）

2.5 ELVIS 的仪表区

ELVIS 的机身左侧是仪表区，如图 10 所示。仪表区下层有信号发生器（FGEN）、示波器（SCOPE）、数字万用表（DMM）的接口，上层有用户自定义香蕉头（BANANA A-D）、自定义 BNC 接口（BNC 1-2）、自定义螺丝接口（SCREW TERMINAL 1-2）。每个自定义香蕉头、BNC 或螺丝接口都与终端条连接（第 38-47 行，其中每个 BNC 有正负两行）。用香蕉头或 BNC 连接线可连接上下两层，沟通面包板区与仪表区。

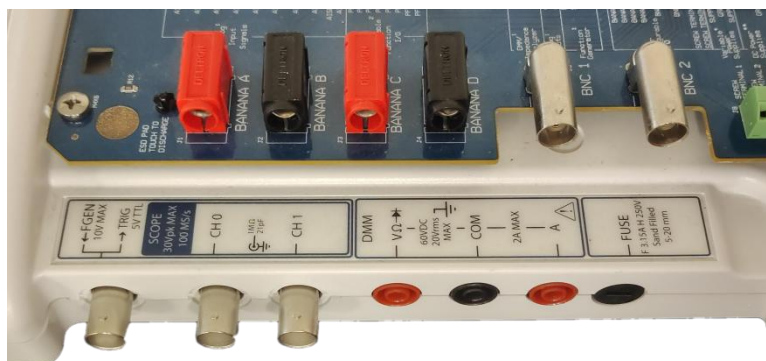


图 10: ELVIS 的仪表区（图片转置）

仪表区各仪表的使用方法将在具体实验过程中讲述。

本实验讲义未涉及的关于 ELVIS 使用方法的内容，请自行查阅用户手册ⁱⁱ。

实验内容

0. 熟悉 ELVIS 的使用方法

1. 电压跟随器电路
2. 反相放大器电路
3. 同相放大器电路
4. 运放的频率响应
5. 运放的输入偏移
- *6. 输入偏移的补偿（拓展内容）

器材： μ A741 运放、电阻（ 100Ω , $1k\Omega$, $10k\Omega$, $100k\Omega$ ）、NI ELVIS II+、各类连接线

注意：

点划线部分是实验预习时需要完成的部分

双划线部分是实验操作时的重要内容

粗实线部分是数据处理的要点

*为拓展内容，若时间不够可以跳过

0. 熟悉 ELVIS 的使用方法

这一部分是为了熟悉 ELVIS 的使用方法，目标是让 ELVIS 的数字万用表（DMM）测量其可调电源（VPS）的输出电压。

0.1 将 DMM 的测量端口接入面包板区的终端条

使用两根双香蕉头连接线，将仪表区下层 DMM 的 $V\Omega$ 接口与上层的 Banana A 接口相连，COM 接口与上层的 Banana B 接口相连。此时 DMM 即可测量终端条上 Banana A 和 Banana B 接口之间的电压。

0.2 将 VPS 接到 DMM

VPS 的输出端位于终端条第 48 到 50 行。48 行为 Supply+（可调电源正电压输出，范围 0V 到 12V），49 行为地（电压为 0V），50 行为 Supply-（可调电源负电压输出，范围 0V 到 -12V）。其中 Supply+和 Supply-相互独立，可以单独设置。

为了让 DMM 测量 Supply+的输出电压，DMM 的 COM 端（已连接到 Banana B）需要接地，V Ω 端（已连接到 Banana A）接到 Supply+。利用面包板线将 Banana A 连接 Supply+，将 Banana B 连接 Ground。

0.3 用 ELVISmx 软件实现控制和采集

ELVIS 实验平台的几乎所有控制和数据采集都可以在 ELVISmx 软件端完成。打开 ELVISmx 软件，在众多可选的仪器中打开“**Variable Power Supply**”和“**Digital Multimeter**”，随后可以最小化 ELVISmx 主界面。

在 Variable Power Supply 面板下方点击“Run”以开启 VPS，随后可调节右侧旋钮或直接输入值，调节 Supply+的电压到任意一个值（调节左侧则是 Supply-）。

在 Digital Multimeter 面板下方点击“Run”以开启 DMM，此时其面板应当能够显示测得的电压，且应当与 VPS 设置的 Supply+电压值相同（会有数 mV 的误差）。如果以上都正确，即可进入下一步实验。

注意：Supply+至少调到 0.4V 以上，否则电压不准。

1. 电压跟随器电路

1.1 搭建电压跟随器电路

电压跟随器（Voltage Follower）是运放最简单的应用电路，如图 11 所示，其输出电压 $V_{out} = V_{in}$ 。

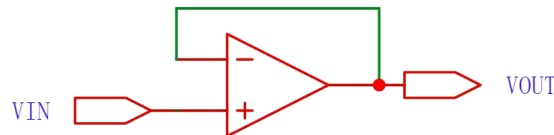


图 11：电压跟随器

使用美国德州仪器公司的 μ A741 运算放大器搭建电压跟随器电路。该运放的详情参数可参阅数据手册ⁱⁱⁱ。

该运放器件使用 DIP-8 封装，拥有 8 个引脚，引脚定义如图 12 所示（**注意圆点位置**）。本实验只需用到 5 个引脚（2,3,4,6,7）。1 脚和 5 脚可接外部电路用于偏移校零，8 脚为空脚，本实验中均不使用。

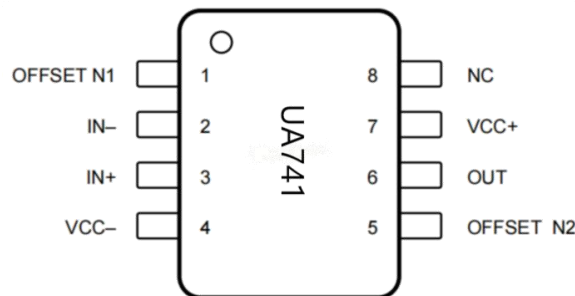


图 12： μ A741 运放的引脚定义

该部分使用 VPS 产生的电压（使用 Supply+或 Supply-其中之一）作为电压跟随器的 V_{in} ，用 DMM 测量其 V_{out} ，完整电路如图 13 所示。ELVIS 面包板区

连接方式如图 14 所示。

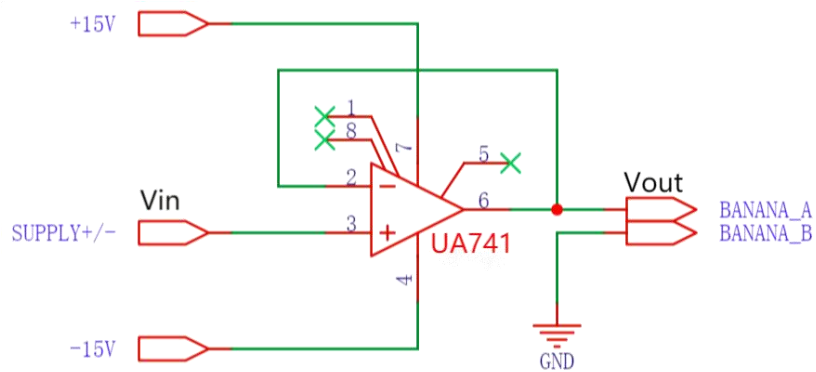


图 13: 电压跟随器实验完整电路图

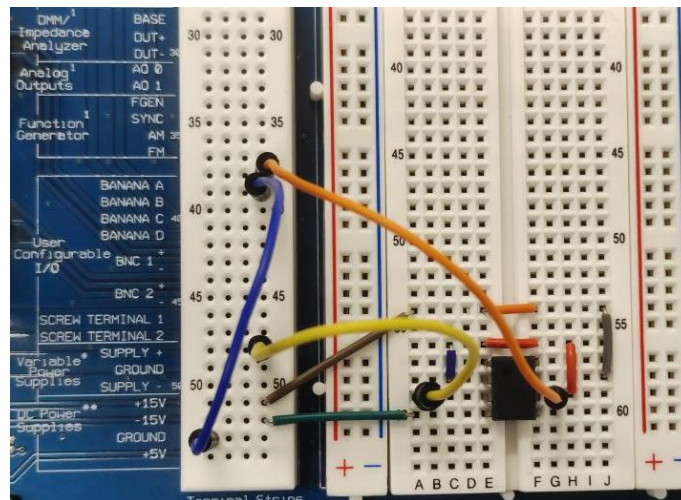


图 14: ELVIS 面包板区的接线方法

1.2 测量电压跟随器的输出电压

继续使用 ELVISmx 的 VPS 和 DMM 两个仪器，调节 VPS 的电压（即电压跟随器的 V_{in} ），通过 DMM 观察电压跟随器的 V_{out} 。

在 $V_{in} > 0$ 时记录 2 组 V_{out} ，在 $V_{in} < 0$ 时记录 2 组 V_{out} ；再将 V_{in} 接地，记录 $V_{in} = 0$ 时的 V_{out} 。测量结果是否符合预期？图 15 展示了一组数据截图。

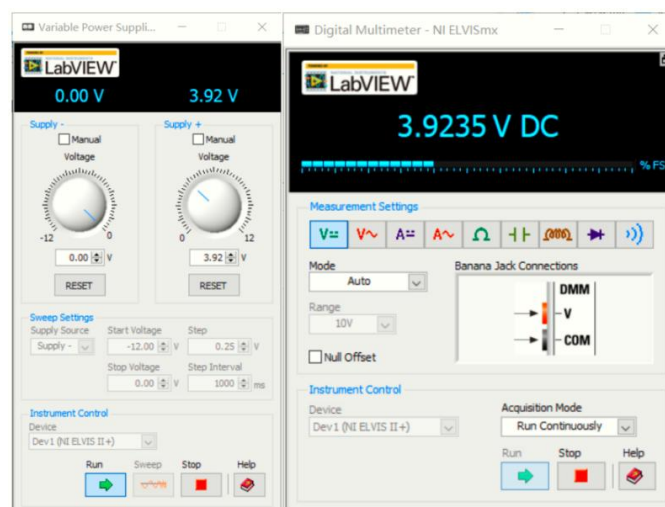


图 15: 电压跟随器的一组输入与输出电压

2. 反相放大器电路

2.1 搭建反相放大器电路

反相放大器 (Inverting Amplifier) 是最常用的运算放大电路, 如图 16 所示。请利用运放的虚断和虚短计算反相放大器输出电压 V_{out} 与输入电压 V_{in} 的关系。

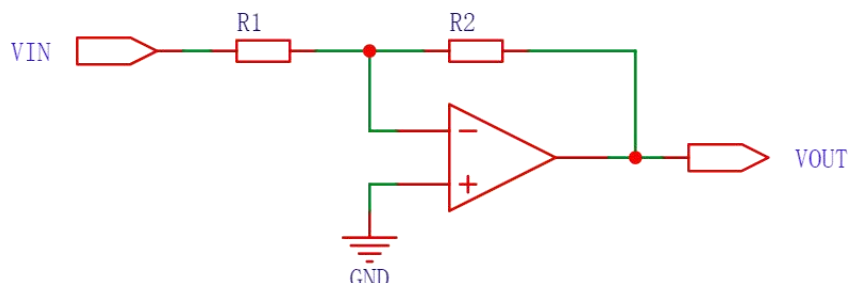


图 16: 反相放大器

实验中, R_1 取 $10k\Omega$, R_2 取 $20k\Omega$ (可由两个 $10k\Omega$ 电阻串联得到), 完整电路图如图 17 所示。

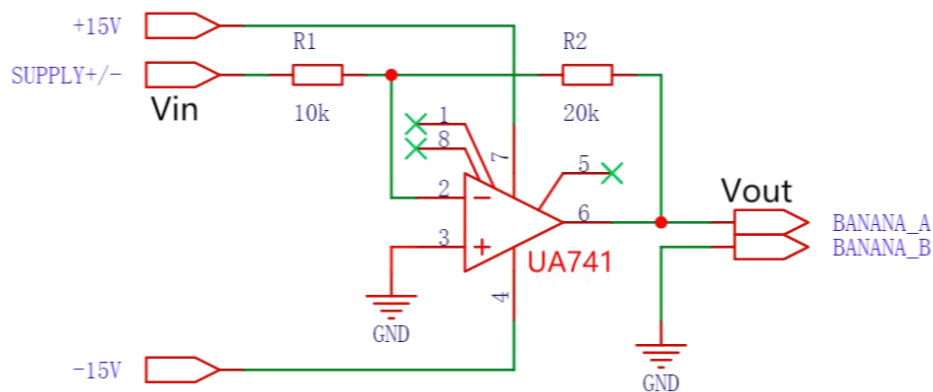


图 17: 反相放大器实验完整电路图

请在面包板上将电压跟随器修改为反相放大器电路。(提示: 注意 Supply 接口连接的位置。)

2.2 测量反相放大器的输入输出关系

使用 Supply +, 调节电压从 $2.00V$ 到 $10.00V$, 间隔 $2.00V$ 记录一组 V_{in} 与 V_{out} 的关系; 再换用 Supply -, 调节电压从 $-2.00V$ 到 $-10.00V$, 间隔 $2.00V$ 记录一组 V_{in} 与 V_{out} ; 最后将 V_{in} 接地 (即 $V_{in} = 0V$), 记录 V_{in} 与 V_{out} 。

利用得到的数据绘制 V_{out} 与 V_{in} 的关系曲线, 描述你观察到了什么不符合预期的现象。(提示: 一般运放的输出上限略低于 $+V_{cc}$, 输出下限略高于 $-V_{cc}$)

*对曲线的线性部分进行直线拟合, 并计算其斜率和截距, 及其不确定度。计算斜率与理论值的相对误差、截距与理论值的绝对误差, 分析其成因。(提示: 实验提供的电阻有 $\pm 1\%$ 的不确定度限值, Supply 有 $\pm 5mV$ 的不确定度限值。)

3. 同相放大器电路

3.1 搭建同相放大器电路

同相放大器 (Noninverting Amplifier) 是输出电压与输入电压成正相关的运算放大电路, 也很常用, 如图 18 所示。请计算同相放大器输出电压 V_{out} 与输入电压 V_{in} 的关系。

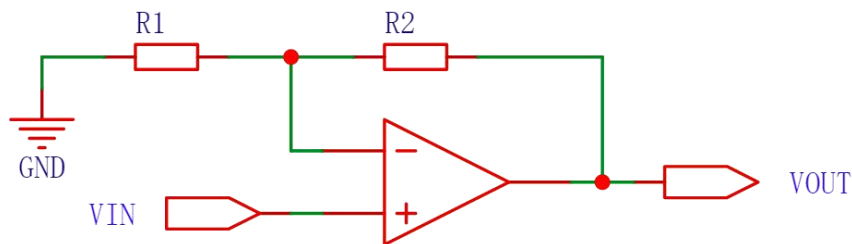


图 18: 同相放大器

R_1 取 $10\text{k}\Omega$, R_2 取 $100\text{k}\Omega$ 。请搭建同相放大器电路, 并用 1.00V 的 V_{in} 检验输出电压是否符合预期, 记录该 V_{out} 值。

3.2 利用同相放大器放大正弦输入信号

终端条上的 AI (Analog in) 接口可直接接入示波器, 而 FGEN 接口可直接连接信号发生器。因此可以利用信号发生器产生交流 V_{in} 信号, 用示波器观察交流 V_{out} 信号。

将 V_{in} 线从 Supply 换到 FGEN (第 33 行), 以通过信号发生器输入电压波形; 将 V_{out} 线从 Banana A 换到 AI 0+ (第 1 行), 以连接示波器; 将 AI 0- (第 2 行) 接地。 (这一段接线比较长, 可以使用长的面包板线)

打开 ELVISmx 的 Function Generator 控件, 设置产生频率 100Hz , 幅度 1.00V_{pp} (峰峰值) 的正弦波作为 V_{in} 。 (注意不要设置 Sweep 扫频了)

打开 ELVISmx 的 Oscilloscope 控件, 进行以下设置使之适配本次实验:

- 1: Channel 0 Settings 中, Source 选择 AI 0;
- 2: Trigger 中, Type 选择 Edge。

观察 V_{out} 输出 (自行调节时间档位和电压档位, 或点击 Autoscale 按钮)。记录图像 (可截屏保存), 读出 V_{out} 波形的频率和峰峰值并记录, 是否与预期相符?

4. 运放的频率响应

实际运放的频率响应并不是完美的, 在输入信号频率较高时, 运放的性能会下降。以下将研究 $\mu\text{A}741$ 运放的频率响应。

4.1 运放对小信号的频率响应

不改变电路连接, 将 Function Generator 的电压幅度调节至 0.10V_{pp} , 频率为 10 、 30 、 50 、 70 、 100 、 130 、 160 、 200 (单位均为 kHz)。对于每一个频率, 记录 V_{out} 波形的峰峰值, 并计算实际增益 a (V_{out} 与 V_{in} 峰峰值之比)。

计算 $\lg(a/a_0)$ 和 $\lg(f/f_0)$ ($a_0 = 11$, $f_0 = 1\text{kHz}$), 并作图观察两者的关系 (纵轴增益, 横轴频率), 请描述你观察到的图像。

由图像可知, 在频率较高时 a 与 f 之积会变成常数, 称为运放的**增益带宽积** (Gain Bandwidth Product, GBP 或 GBW)。请利用 200kHz 时增益和频率的乘积, 计算 $\mu\text{A}741$ 运放的增益带宽积。

4.2 运放对大信号的频率响应

不改变电路连接, 将输入频率调至 20kHz , 幅度为 0.2 、 0.4 、 0.6 、 0.8 、 1.0 (单位均为 V_{pp})。对每一个幅度, 观察 V_{out} 波形, 记录其峰峰值, 并绘制波形的大致形状。

运放的输出电压的变化率有一个最大值, 称为**压摆率** (Slew Rate)。请利用输入 1.0V_{pp} 时的波形计算 $\mu\text{A}741$ 运放的压摆率 (即 V_{out} 波形的斜率)。

5. 运放的输入偏移

只有理想运放才有严格的虚断和虚短。实际运放即使在线性工作区，虚断虚短也不严格成立（ $I_N \neq I_P \neq 0$ ， $V_N \neq V_P$ ）。

实际运放两输入端的电压差称为**输入失调电压** V_{OS} （Input Offset Voltage），**流入**两输入端的电流平均值称为**输入偏置电流** I_B （Input Bias Current），**流入**两输入端的电流之差称为**输入失调电流** I_{OS} （Input Offset Current）：

$$V_{OS} = V_N - V_P$$

$$I_B = (I_P + I_N) / 2$$

$$I_{OS} = I_P - I_N$$

图 19 展示了运放的输入偏移（ V_{OS} 、 I_N 、 I_P ）。

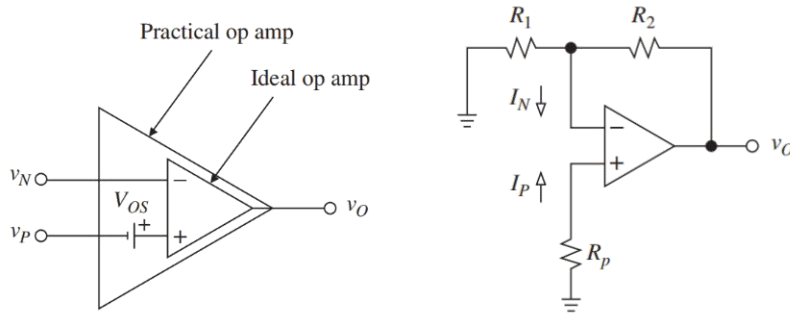


图 19：运放的输入偏移

5.1 测量 $\mu A741$ 运放的输入偏移

搭建如图 21 所示电路， V_{out} 连接 Banana A，用 Digital Multimeter 测量并记录 V_{out} 。

理解电路原理并计算 $\mu A741$ 的 V_{OS} 。（忽略 I_P 和 I_N 的影响）

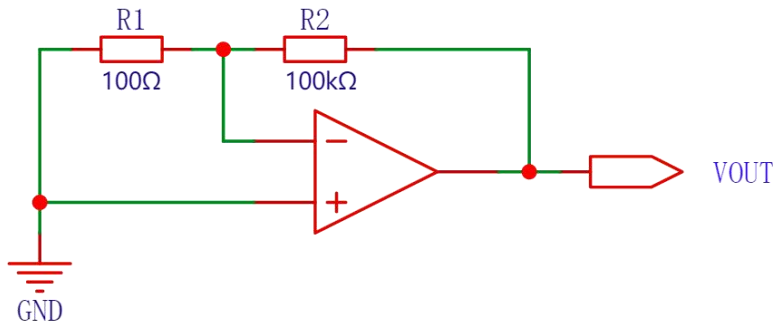


图 21：测量 V_{OS} 的电路

搭建如图 22 所示电路，测量 V_{out} 。

理解电路原理并计算 $\mu A741$ 的 I_P 。（忽略 I_N 的影响）

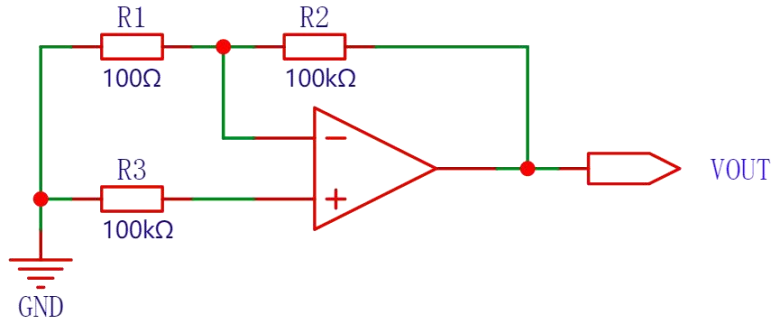


图 22：测量 I_P 的电路

搭建如图 23 所示电路，测量 V_{out} 。
理解电路原理并计算 $\mu A741$ 的 I_N 。

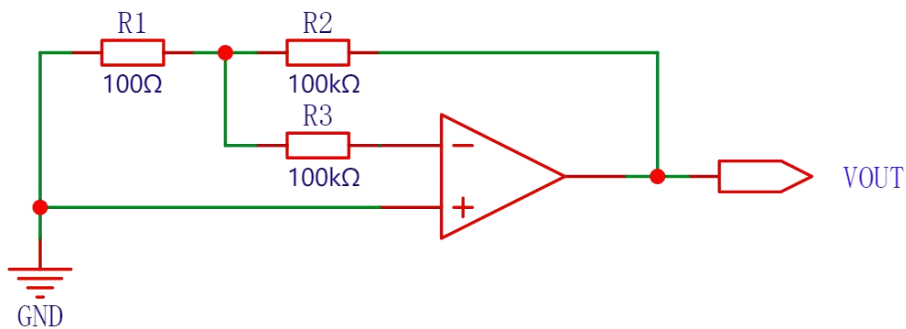


图 23：测量 I_N 的电路

计算 $\mu A741$ 的 I_B 和 I_{OS} 。（以上计算注意正负号）

*6. 运放输入偏移的补偿（拓展内容，视情况完成）

在实际使用过程中，若运放的输入偏移会对输出造成不可忽略的影响，则需要对输入进行补偿。最简单的补偿方法是在运放的同相输入端或反相输入端串联一个电阻，如图 24 所示（ R_P 和 R_N 只需使用其中一个）。

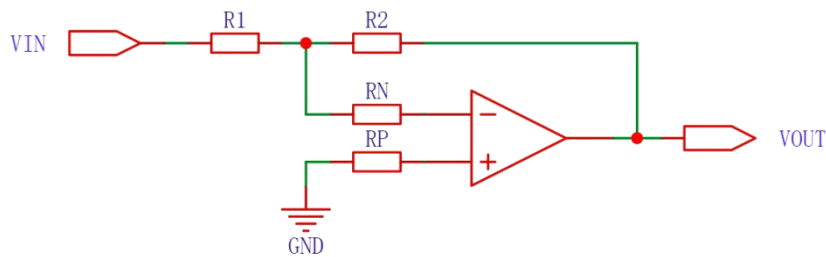


图 24：加入补偿电阻的反相放大器

补偿电阻的值可以通过 $V_{in} = 0$ 时 $V_{out} = 0$ 来计算，且不区分反相放大器还是同相放大器。

R_P 和 R_N 只需要且只能使用其中之一，可先进行以下计算：

如果使用 R_P ，则：

$$R_P = \frac{G \cdot V_{OS} + R_2 \cdot I_N}{G \cdot I_P}, \text{ 其中 } G = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

如果使用 R_N ，则：

$$R_N = -\frac{G \cdot V_{OS} + R_2 \cdot I_N}{G \cdot I_N}, \text{ 其中 } G = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

(可以尝试自行推导以上公式。)

计算结果中 R_P 和 R_N 只有一个是合理的，决定了该使用哪个，以及其阻值。
请计算该电路需要使用的补偿电阻类型及其阻值 ($R_1=100\Omega$, $R_2=100k\Omega$)，
利用电阻板得到该电阻，并接入电路。

电阻板的使用方式如图 25 所示，图中电阻板阻值为 $34.8k\Omega$ 。请将电阻板**放**
置于桌面上，不要放置在 ELVIS 上，以避免 ELVIS 对其造成电磁干扰。

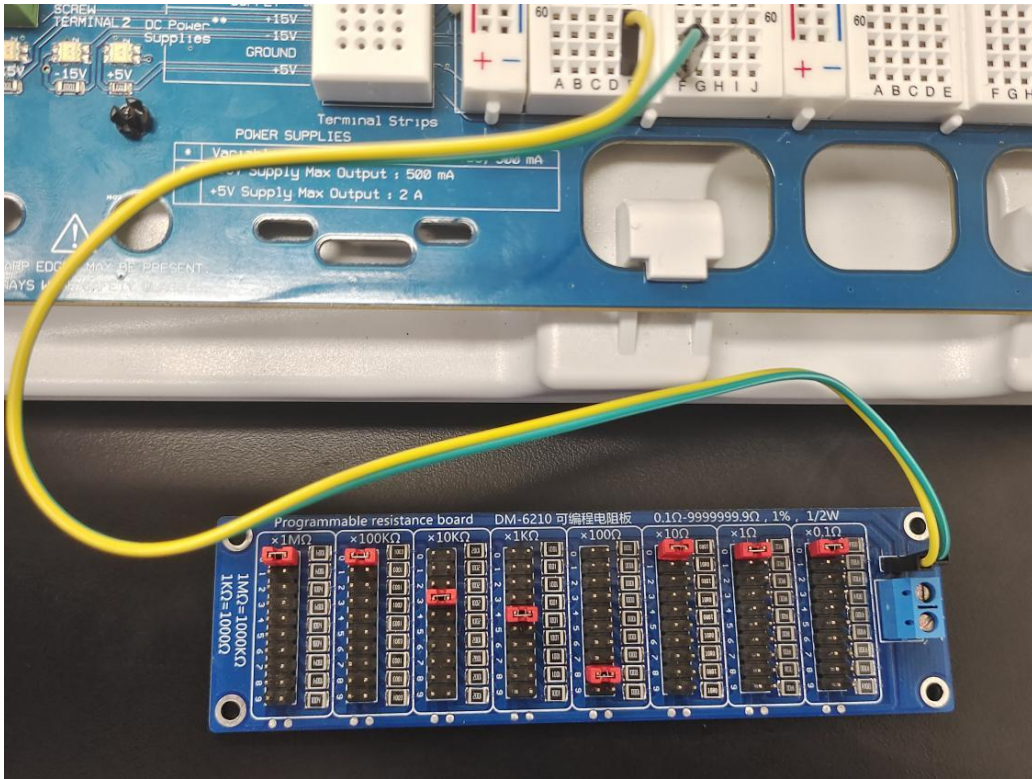


图 25: 电阻板的使用范例

将 V_{in} 端接地，记录 V_{out} 的电压。与未接补偿电阻（图 21）时相比， V_{out}
 降低了多少倍？

将电路连接为补偿后的同相放大器。将 Supply 进行分压后连接 V_{in} （分压电
阻 100Ω 和 $100k\Omega$ ），如图 26 所示。则实际的 V_{in} 是 Supply 的 $1/1001$ （可近似
 为 $1/1000$ ，即单位 V 直接改为 mV）。

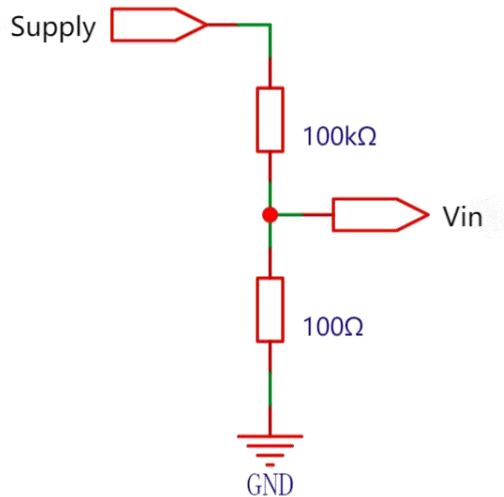


图 26: Supply 的分压器接法

调节 Supply 从-8.00V 到 8.00V，以 2V 为间隔记录 Vin 和 Vout。

绘制图像，探究加入补偿电阻后电路是否仍然具有同相放大器的功能。

思考题：

1: 电压跟随器的输出与输入相等，在电路中有什么实际应用？（提示：电压跟随器的 V_{in} 输入电流极小，而 V_{out} 有一定电流输出能力。）

2: 如果运放使用单电源供电（即 $-V_{cc}$ 接了 GND），会有什么变化？（提示：从输出电压的范围来考虑，分析 3 种基本运放电路有哪些无法实现？）

3: 单电源供电的电压跟随器可用于将电压为 $2V_{cc}$ 的单电源转换为 $\pm V_{cc}$ 的双电源，你能否设计出这个电路？（双电源的地和单电源的地是不同的）

4: 在半导体 PN 结特性测量实验中，需要测量流过 PN 结的微小电流。尝试利用运算放大器设计一个能将 $1\mu A$ 小电流转化为 1V 电压信号的电路。（提示：使用一个电阻对电流进行采样，将其转化为微小电压信号，再进行放大。）

实验报告指引：

- (1) 1.2 测量电压跟随器的输出电压：记录 5 组 V_{in} 和 V_{out} ；
- (2) 2.2 测量反相放大器的输入输出关系：记录 11 组 V_{in} 和 V_{out} ，绘图；
- (3) 3.1 搭建同相放大器电路：记录 $V_{in} = 1.00V$ 时的 V_{out} ；
- (4) 3.2 利用同相放大器放大正弦输入信号：记录 V_{out} 波形的频率和峰峰值；
- (5) 4.1 运放对小信号的频率响应：记录要求的频率和增益，按要求绘制图像，计算 GBW；
- (6) 4.2 运放对大信号的频率响应：记录要求的输入 V_{pp} 和输出 V_{pp} ，描述输出信号图像的变化，计算压摆率；
- (7) 5 运放的输入偏移：计算 V_{OS} 、 I_B 、 I_{OS} 。

ⁱ Sergio Franco. Design with Operational Amplifiers and Analog Integrated Circuits (Fourth Edition). McGraw-Hill Education. New York. 2017

（中文版：《基于运算放大器和模拟集成电路的电路设计》）

ⁱⁱ NI Educational Laboratory Virtual Instrumentation Suite II Series (NI ELVIS™ II Series) User Manual

ⁱⁱⁱ $\mu A741$ Datasheet