

学子专区— ADALM2000实验： 运算放大器用作比较器

Doug Mercer，顾问研究员；
Antoniu Miclaus，系统应用工程师

目标：

在本实验中，我们将运算放大器配置为开关模式，以实现电压比较器的功能。电压比较器电路的作用是通过输出电压的两个不同状态，表征两输入电压的相对状态。这种比较使用两个输入电压之差的正负，输出两个可能输出值中的一个，具体的输出值由规定的相减方式决定。

对于运算放大器比较器，我们可以将单输入 V_0 视为两输入信号 V_+ 和 V_- 之间的差异。而输出电压 V_0 可以获取两个可能值中的一个：

- ▶ $V_0 = V_{OH}$ （高），意味着 $V_+ > V_-$ ($V_0 > 0$)
- ▶ $V_0 = V_{OL}$ （低），意味着 $V_+ < V_-$ ($V_0 < 0$)

我们将阈值电压 V_{th} 当做输入电压 v_i 的特定值（或值），在该值时输出端开启（设置 $V_0 = 0$ ）。

需要考虑两种主要的电压比较器：

- ▶ 简单比较器：无反馈，只有一个阈值电压。
- ▶ 迟滞比较器：有正反馈和两个阈值电压。

材料：

- ▶ ADALM2000 主动学习模块
- ▶ 无焊面包板和跳线套件
- ▶ 三个10 kΩ电阻
- ▶ 一个20 kΩ电阻
- ▶ 一个OP97（低压摆率放大器随附新版本ADALP2000模拟部件套件）或OP37

简单比较器

背景知识：

将运算放大器配置为比较器，便可利用运算放大器的高固有增益和输出饱和效应，如图1所示。这基本上属于二元状态决策电路：如果正极(+)端口的电压大于负极(-)端口的电压，即 $V_{in} > V_{REF}$ ，输出会增高（在最大值时达到饱和）。相反，如果 $V_{in} < V_{REF}$ ，则输出走低。电路比较两个输入端的电压，根据相对值产生输出。与之前所有电路不同，输入和输出之间没有反馈；我们说电路是开环运行的。

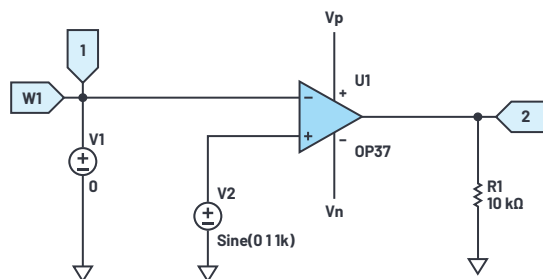


图1. 运算放大器用作比较器。

硬件设置：

比较器的使用方式不同，在以后的实验中我们会看到它的实际应用。在这里，我们将以常见配置使用比较器，生成具有可变脉冲宽度的方波。

首先关闭电源并组装电路。与求和放大器电路一样，使用第二个波形发生器输出作为直流源 V_{REF} ，将幅度更改为零，且将输出偏置降低到最低，以便您在实验期间可以从零开始调节。

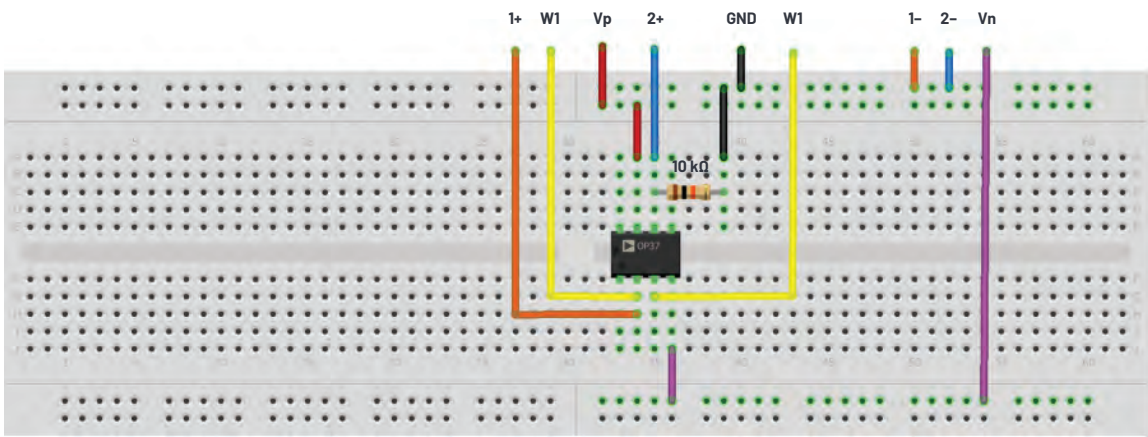


图2. 比较器面包板电路。

将波形发生器 V_{IN} 配置为频率 1 kHz 幅值 2 V 峰峰值正弦波。开启电源，在 V_{REF} 为 0 V 时，导出输出波形。

然后，缓慢增大 V_{REF} ，观察会发生什么情况。记录 $V_{REF} = 1\text{ V}$ 的输出波形。继续增大 V_{REF} ，直到超过 2 V，观察会发生什么情况。您能予以解释吗？

对三角输入波形重复以上步骤，在实验报告中记录观察到的结果。

步骤：

将第一个波形发生器用作 V_{IN} 源，向电路提供幅度 2 V 峰峰值、1 kHz 正弦波激励。向运算放大器提供 $\pm 5\text{ V}$ 电源电压。配置示波器，使通道 1 上显示输入信号，通道 2 上显示输出信号。

产生的波形如图 3 所示。

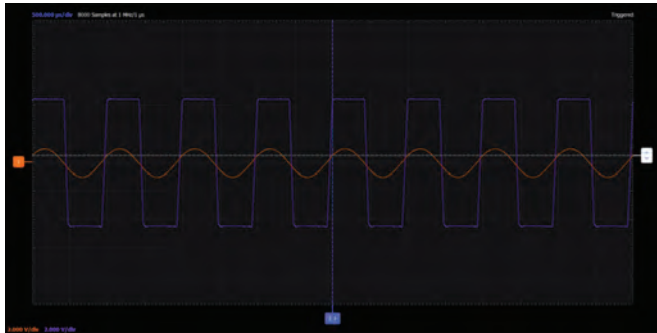


图3. 比较器波形。

迟滞比较器

迟滞是指系统的当前状态依赖于决定该状态量的先前值。输出值并不是对应输入的严格函数，它包含了一些滞后、延迟或过往依赖性。特别是，对输入变量降低的响应与对输入变量增高的响应是不同的。

在此配置中，包含两个阈值 V_{ThH} 和 V_{ThL} ，以及两个输出值 V_{OH} 和 V_{OL} 。阈值应该依赖于输出值，输出值反馈至输入，成为阈值中的一部分（正反馈）。通过电阻分压器，将输出电压的一部分反馈至同相输入。

分析迟滞比较器时，我们必须考虑迟滞的方向变换这个问题，以及在某些时刻，只有一个阈值保持活动这个事实。

输入信号触发输出变化，正反馈会维持这个变化。

同相迟滞比较器

背景知识：

请看图 4 所示的电路。

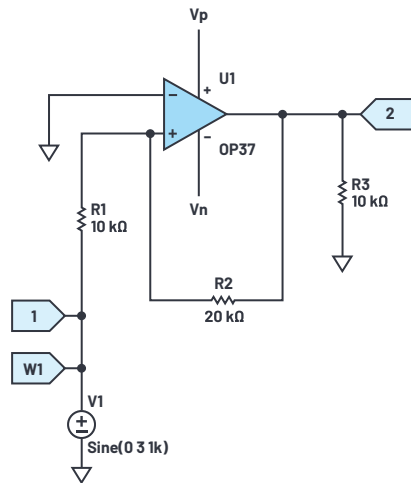


图4. 同相迟滞比较器。

在图 4 所示的同相迟滞比较器电路中， V_{IN} 被应用于运算放大器的同相输入。电阻 $R1$ 和 $R2$ 在比较器上构成分压器网络，通过同相输入上的部分输出电压提供正反馈，通过相同的电阻分压器提供 V_{IN} 。

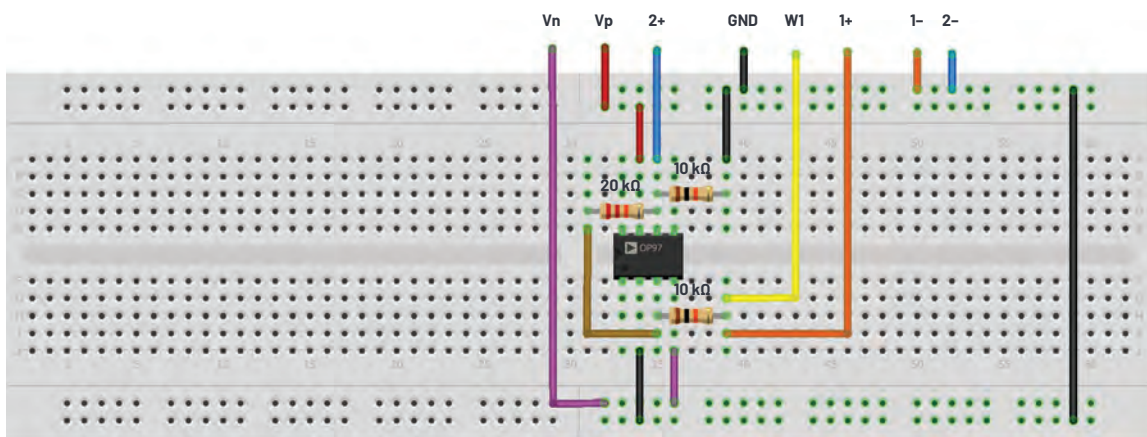


图5. 同相迟滞比较器面包板电路。

反馈量由使用的两个电阻的电阻比决定（在此情况下，比率为 $V/2$ ）。

我们可以使用以下公式计算阈值电压：

$$v_D = v^+ - v^- = \left(\frac{R1}{R1 + R2} \right) v_{OUT} + \left(\frac{R2}{R1 + R2} \right) V_{IN} - 0 \quad (1)$$

鉴于 $V_D = 0$ ， $V_{IN} \rightarrow V_{Th}$ ，我们可以得出以下阈值：

$$V_{ThL} = -\left(\frac{R1}{R2} \right) V_{OH} \quad (2)$$

$$V_{ThH} = -\left(\frac{R1}{R2} \right) V_{OL}$$

硬件设置：

为同相迟滞比较器构建以下面包板电路。

步骤：

将第一个波形发生器用作 V_{IN} 源，向电路提供幅度6 V峰峰值、1 kHz 正弦波激励。向运算放大器提供 ± 5 V电源电压。配置示波器，使通道1上显示输入信号，通道2上显示输出信号。

产生的波形如图6所示。

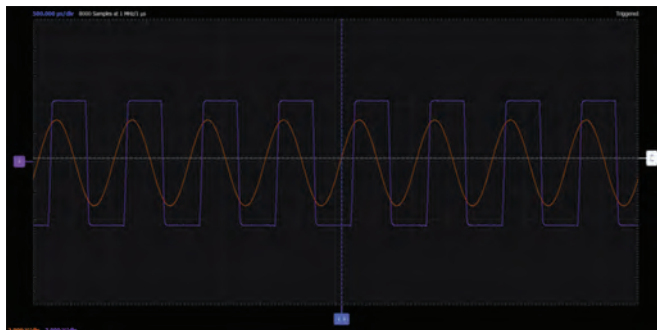


图6. 同相迟滞比较器波形。

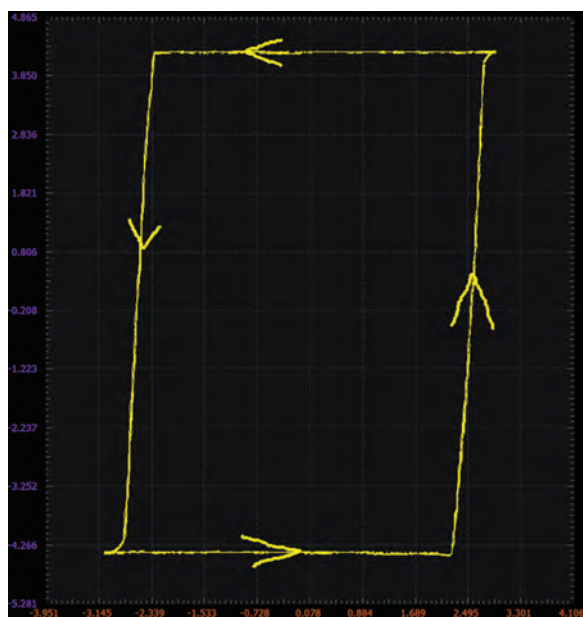


图7. 同相迟滞比较器XY图。

在图7中，您可以查看同相迟滞比较器的电压传输特性（图中箭头表示与阈值相关的信号的走向）。比较计算得出的阈值电压值与测量到的电压值。

反相迟滞比较器

背景知识：

请看图8所示的电路。

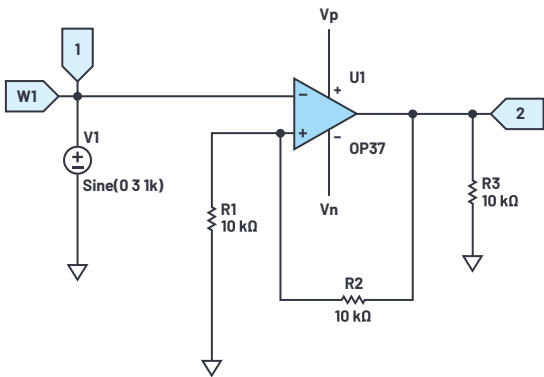


图8. 反相迟滞比较器。

在图8所示的反相迟滞比较器电路中， V_{in} 被应用于运算放大器的反相输入。电阻R1和R2在比较器上构成分压器网络，通过同相输入上的部分输出电压提供正反馈。

反馈量由使用的两个电阻的电阻比决定（在此情况下，比率为 $V/2$ ）。

我们可以使用以下公式计算阈值电压：

$$v_D = v^+ - v^- = \left(\frac{R1}{(R1 + R2)} \right) v_{OUT} - v_{IN} \tag{3}$$

鉴于 $V_0 = 0$ ， $V_{in} \rightarrow V_{Th}$ ，我们可以得出以下阈值：

$$\begin{aligned} V_{ThL} &= \left(\frac{R1}{(R1 + R2)} \right) V_{OL} \\ V_{ThH} &= \left(\frac{R1}{(R1 + R2)} \right) V_{OH} \end{aligned} \tag{4}$$

硬件设置：

为反相迟滞比较器构建以下面包板电路。

步骤：

将第一个波形发生器用作 V_{in} 源，向电路提供幅度为6 V峰峰值、1kHz正弦波激励。向运算放大器提供±5V电源电压。配置示波器，使通道1上显示输入信号，通道2上显示输出信号。

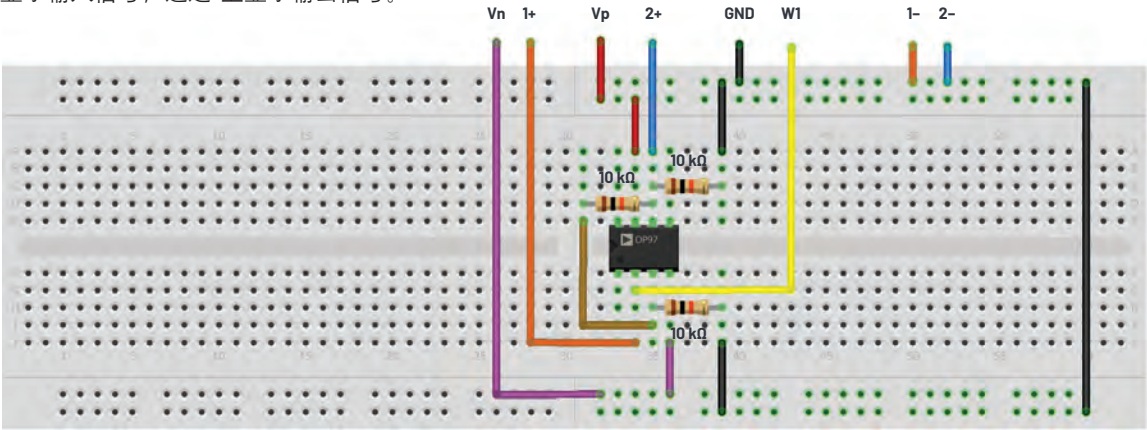


图9. 反相迟滞比较器面包板电路。

产生的波形如图10所示。

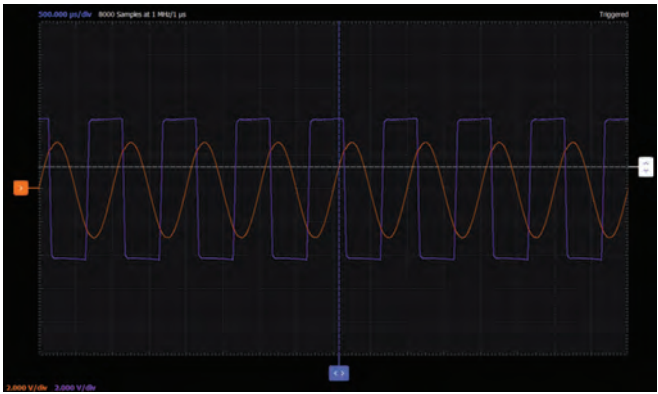


图10. 反相迟滞比较器波形。

在图11中，您可以查看同相迟滞比较器的电压传输特性（图中箭头表示与阈值相关的信号的走向）。比较计算得出的阈值电压值与测量到的电压值。

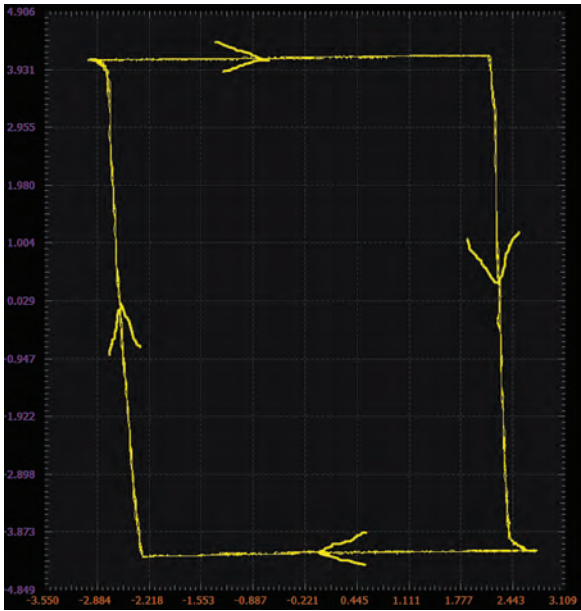


图11. 反相迟滞比较器XY图。

带不对称阈值的反相迟滞比较器

背景知识：

请看图12所示的电路。

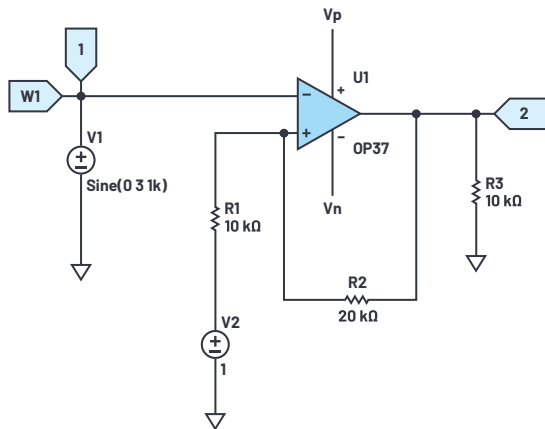


图12 带不对称阈值的反相迟滞比较器。

图12所示的带不对称阈值电路的反向比较器，使用了额外的基准电压 V_{REF} 。电阻R1和R2在比较器上构成分压器网络，通过同相输入上的部分输出电压提供正反馈，此外有部分 V_{REF} 通过相同的分压器。

我们可以使用以下公式计算阈值电压：

$$v_D = v^+ - v^- = \left(\frac{R1}{R1 + R2} \right) v_{OUT} + \left(\frac{R2}{R1 + R2} \right) V_{REF} - v_{IN} \quad (5)$$

鉴于 $v_D = 0$ ， $v_{IN} \rightarrow V_{Th}$ ，我们可以得出以下阈值：

$$\begin{aligned} V_{ThL} &= \left(\frac{R1}{R1 + R2} \right) V_{OL} + \left(\frac{R2}{R1 + R2} \right) V_{REF} \\ V_{ThH} &= \left(\frac{R1}{R1 + R2} \right) V_{OH} + \left(\frac{R2}{R1 + R2} \right) V_{REF} \end{aligned} \quad (6)$$

硬件设置：

为反相迟滞比较器构建以下面包板电路。

步骤：

将第一个波形发生器用作 V_{IN} 源，向电路提供幅度为6 V峰峰值、1 kHz正弦波激励，将第二个波形发生器用作2 V恒定基准电压。向运算放大器提供 ± 5 V电源电压。配置示波器，使通道1上显示输入信号，通道2上显示输出信号。

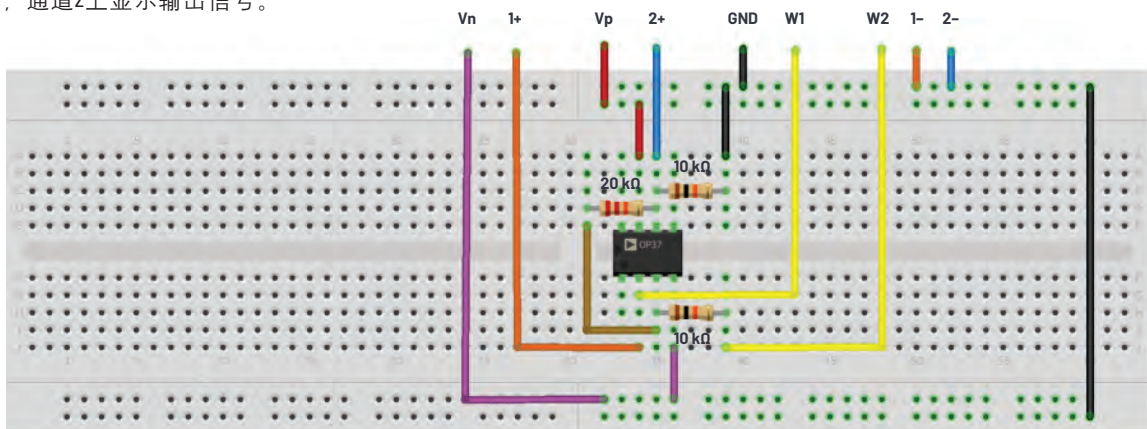


图13 带不对称阈值的反相迟滞比较器的面包板。

产生的波形如图14所示。

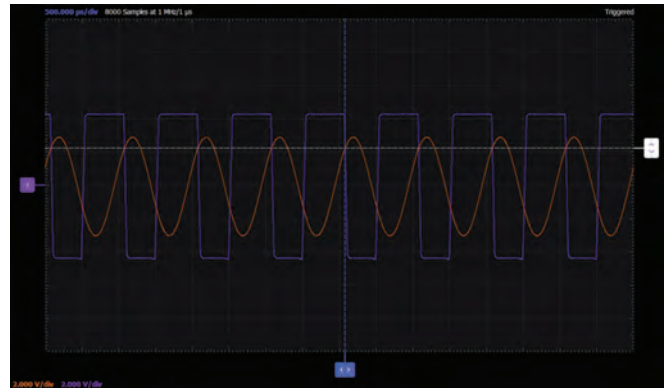


图14 带不对称阈值的反相迟滞比较器的波形。



图15 带不对称阈值的反相迟滞比较器的XY图。

在图15中，您可以查看同相迟滞比较器的电压传输特性（图中箭头表示与阈值相关的信号的走向）。比较计算得出的阈值电压值与测量到的电压值。

问题：

计算所有4个比较器设置（简单、同相迟滞、反向迟滞和不对称阈值）的阈值电压，比较计算得出的值与通过实验步骤得出的值。

额外实验

对于先完成实验，或者想要接受额外挑战的实验人员，看看您是否能够使用输出端的红色和绿色LED（来自上次实验）来修改比较器电路，使红色LED在负电压时亮起，绿色LED在正电压时亮起。将频率降低至1 Hz（或更低），以便看到它们实时开关。不要忘记，LED需要使用限流电阻，以便流经LED的电流不会超过20 mA。

您也可以对具备多个电压电平的电路实施上述示例实验，如图16中的电路所示。

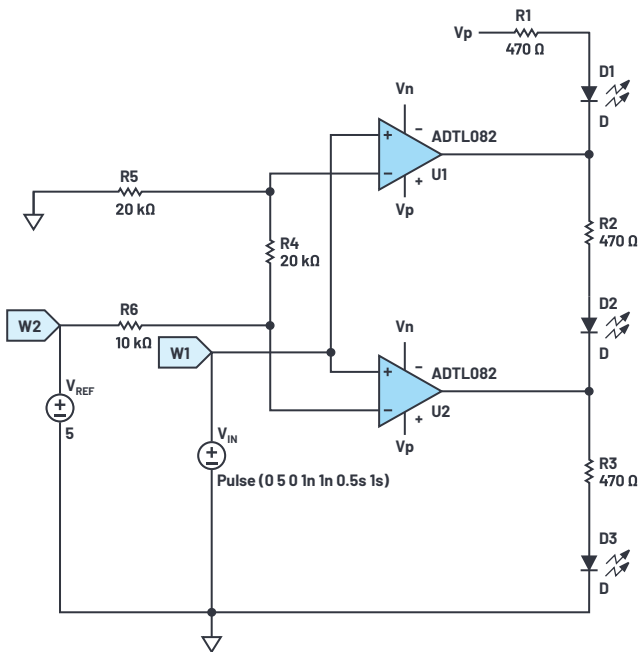


图16. 使用LED的电压电平指示器。

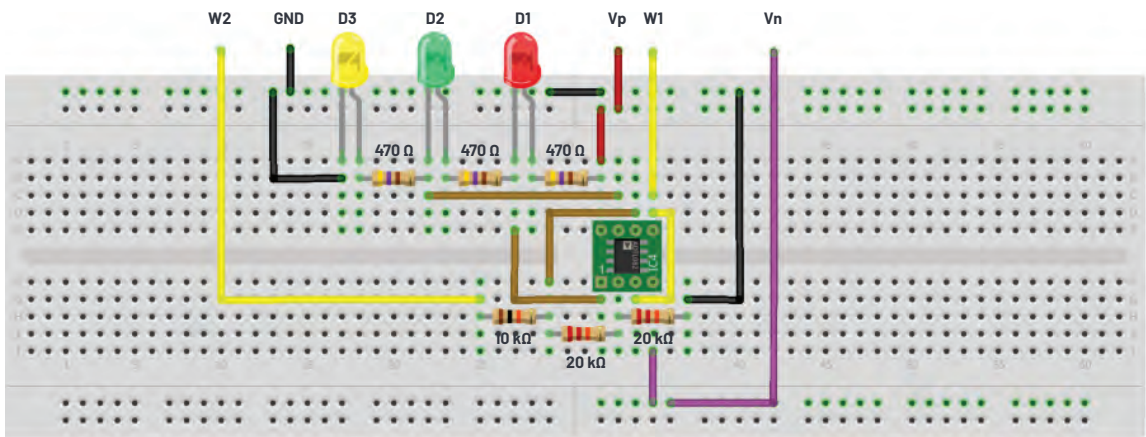


图17. 使用LED的电压电平指示器。

材料：

- ▶ ADALM2000主动学习模块
- ▶ 无焊面包板和跳线套件
- ▶ 三个470 Ω 电阻
- ▶ 一个10 k Ω 电阻
- ▶ 两个20 k Ω 电阻
- ▶ 三个LED（红色、绿色、黄色）
- ▶ 一个ADTL082（两个集成式运算放大器）

该电路使用一个分压器（R1、R2、R3）分别为两个比较器获取一个阈值。基于这些阈值和输入电压，一次亮起一个LED（D1、D2、D3）。

练习：

- ▶ 根据图16所示的电路，计算阈值电压。确定对于每个输入电压范围，哪个LED亮起。
- ▶ 构建面包板电路。向运算放大器提供 ± 5 V电源电压。使用信号生成器的第一个信道生成可变输入电压(V_{in})，使用第二个信道生成5 V恒定基准电压。

在0 V至5 V之间变换输入电压，观察LED的行为。

这种类型的电路也被称为窗口比较器。关于这种主题的应用，可以参考实验：[使用窗口比较器实施温度控制](#)。

您可以在[学子专区博客](#)上找到更多详细信息。



作者简介

Doug Mercer于1977年毕业于伦斯勒理工学院(RPI)，获电子工程学士学位。自1977年加入ADI公司以来，他直接或间接贡献了30多款数据转换器产品，并拥有13项专利。他于1995年被任命为ADI研究员。2009年，他从全职工作转型，并继续以名誉研究员身份担任ADI顾问，为“主动学习计划”撰稿。2016年，他被任命为RPI ECSE系的驻校工程师。联系方式：doug.mercer@analog.com。



作者简介

Antoni Miclaus现为ADI公司的系统应用工程师，从事ADI教学项目工作，同时为Circuits from the Lab®、QA自动化和流程管理开发嵌入式软件。他于2017年2月在罗马尼亚克卢日-纳波卡加盟ADI公司。他目前是贝碧思鲍耶大学软件工程硕士项目的理学硕士生，拥有克卢日-纳波卡科技大学电子与电信工程学士学位。联系方式：antoni.miclaus@analog.com。

