

学子专区——2019年5月 ADALM1000 SMU培训 主题17: 基本运算放大器配置

作者: Doug Mercer和Antoniu Miclaus

目标:

在本实验中, 我们将介绍一种有源电路——运算放大器(op amp), 其某些特性(高输入电阻、低输出电阻和大差分增益)使它成为近乎理想的放大器, 并且是很多电路应用中的有用构建模块。在本实验中, 你将了解有源电路的直流偏置, 并探索若干基本功能运算放大器电路。我们还将利用此实验继续发展使用实验室硬件的技能。

材料:

- ▶ ADALM1000硬件模块
- ▶ 无焊试验板和跳线套件
- ▶ 一个1 kΩ电阻
- ▶ 三个4.7 kΩ电阻
- ▶ 两个10 kΩ电阻
- ▶ 一个20 kΩ电阻
- ▶ 两个AD8541器件(CMOS轨到轨放大器)
- ▶ 两个0.1 μΩ电容(径向引线)

1.1 运算放大器基础知识

第一步: 连接直流电源

必须为运算放大器始终提供直流电源, 因此在添加任何其他电路元件之前, 最好配置这些连接。图1显示了无焊试验板上的一种可能的电源配置。我们将两根长轨用于正电源电压和地, 另一根用于可能需要的2.5 V中间电源连接。板上包括电源解耦电容, 其连接在电源和地(GND)轨之间。现在详细讨论这些电容的用途还为时过早, 只需知道它们用于降低电源线上的噪声并避免寄生振荡。在模拟电路设计中, 务必在电路中每个运算放大器的电源引脚附近使用小型旁路电容, 这被认为是良好实践。

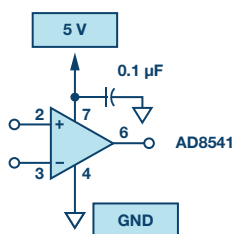


图1. 电源连接

将运算放大器插入试验板, 然后添加导线和电容, 如图1所示。为避免以后出现问题, 可能需要在试验板上贴一个小标签, 指示哪些电源轨对应5 V、2.5 V和地。导线应利用颜色加以区分: 红色为5 V, 黑色为2.5 V, 绿色为GND。这有助于保持连接的有序性。

接下来, 在ADALM1000板和试验板上的端子之间建立5 V电源和GND连接。使用跳线为电源轨供电。注意, 电源GND端子将是电路接地基准。有了电源连接之后, 可能需要使用DMM直接探测IC引脚, 确保引脚7为5 V且引脚4为0 V(地)。

注意, 使用电压表测量电压之前, 必须将ADALM1000插入USB端口。

单位增益放大器(电压跟随器):

第一个运算放大器电路很简单(如图2所示)。这称为单位增益缓冲器, 有时也称为电压跟随器, 它由转换函数 $V_{OUT} = V_{IN}$ 定义。乍一看, 它似乎是一个无用的器件, 但正如我们稍后将展示的那样, 其有用之处在于高输入电阻和低输出电阻。

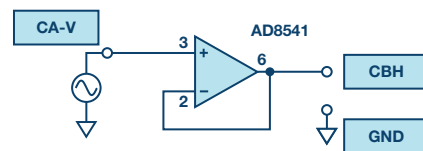


图2. 单位增益跟随器

使用试验板和ADALM1000电源, 构建图2所示的电路。请注意, 此处未明确显示电源连接。任何实际电路中都会进行这些连接(如上一步中所做的那样), 因此从这里开始, 原理图中没必要显示它们。使用跳线将输入和输出连接到波形发生器输出CA-V和示波器输入CB-H。

通道A电压发生器设置为1.0 V最小值和4.0 V最大值(3 V p-p, 以2.5 V为中心), 使用500 Hz正弦波。配置示波器, 使输入信号迹线显示为CA-V, 输出信号迹线显示为CB-V。导出所产生的两个波形图, 并将其包含在实验报告中, 注意波形参数(峰值和频率的基波时间周期)。你的波形应当确认其为单位增益或电压跟随器电路的说明。

缓冲示例:

运算放大器的高输入电阻（零输入电流）意味着发生器上的负载非常小；也就是说，没有从源电路汲取电流，因此任何内部电阻（戴维宁等效值）上都没有电压降。所以，在这种配置中，运算放大器的作用类似于缓冲器，屏蔽信号源免受系统其他部分带来的负载效应。从负载电路的角度看，缓冲器将非理想电压源转换成近乎理想的电压源。图3给出了一个简单的电路，我们可以用它来演示单位增益缓冲器的这个特性。这里，缓冲器插在分压器电路和某一负载电阻（10 kΩ电阻）之间。

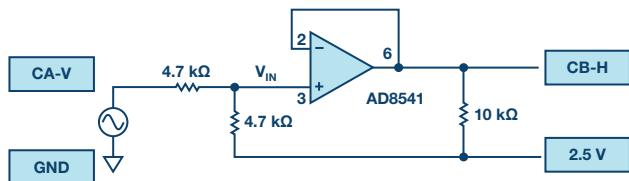


图3. 缓冲器示例

断开电源并将电阻添加到电路中，如图3所示（注意这里没有更改运算放大器连接，我们只是相对于图2翻转了运算放大器符号以更好地安排导线）。

重新连接电源，并将波形发生器设置为500 Hz正弦波、0.5 V最小值和4.5 V最大值（4 V p-p，以2.5 V为中心）。同时观察 V_{in} CA-V和 V_{out} CB-H，并在实验报告中记录幅度。使用示波器输入CB-H还能测量运算放大器引脚3上的信号幅度。

图形实例如图4所示。

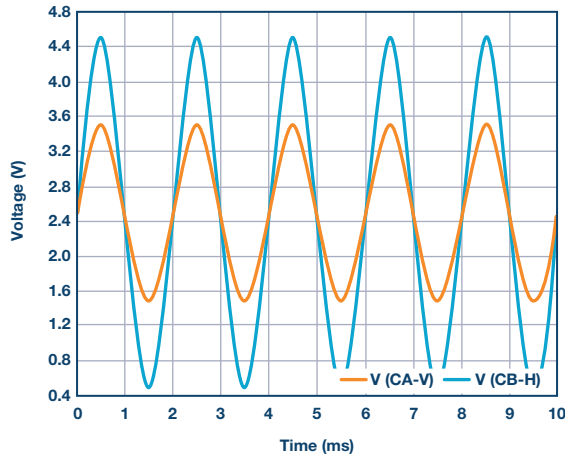


图4. 缓冲器曲线

移除10 kΩ负载，代之以1 kΩ电阻。记录幅度。现在移动引脚3和2.5 V之间的1 kΩ负载，使其与4.7 kΩ电阻并联。记录输出幅度如何变化。你能预测新的输出幅度吗？

简单放大器配置

反相放大器:

图5所示为常规反相放大器配置，输出端有10 kΩ负载电阻。

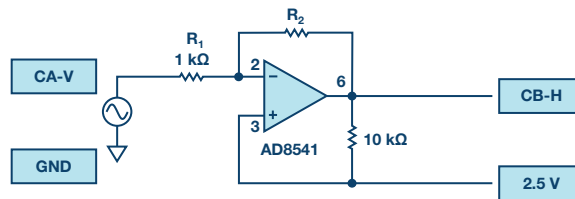


图5. 反相放大器配置

现在使用 $R_2 = 4.7 \text{ k}\Omega$ 组装图5所示的反相放大器电路。组装新电路之前，请记住断开电源。根据需要切割和弯曲电阻引线，使其平放在电路板表面，并为每个连接使用最短的跳线（如图1所示）。记住，试验板有很大的灵活性。例如，电阻 R_2 的引线不一定要将运算放大器从引脚2桥接到引脚6；你可以使用中间节点和跳线来绕过该器件。

重新连接电源并观察电流消耗，确保没有意外短路。现在将波形发生器调整为500 Hz正弦波，设置为2.1 V最小值和2.9 V最大值（0.8 V p-p，以2.5 V为中心），并再次在示波器上显示输入和输出。测量和记录此电路的电压增益，并与课堂上讨论的原理进行比较。导出输入/输出波形图，并将其包含在实验报告中。

图形实例如图6所示。

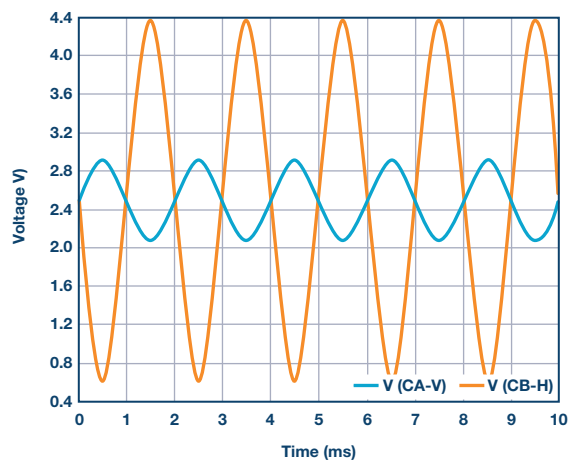


图6. 反相放大器曲线

趁此机会说一下电路调试。在课堂中的某个时候，你可能无法让电路工作。这并不意外，没有人是完美的。但是，你不应该简单地认为电路不工作必定意味着器件或实验仪器有故障。这基本上不是事实，99%的电路问题都是简单的接线或电源错误。即便是经验丰富的工程师也会不时出错，因此，学会如何调试电路问题是学习过程中非常重要的一部分。为你诊断错误不是助教的责任，如果你以这种方式依赖其他人，那么你就错过了实验的一个关键点，你将不大可能在以后的课程中取得成功。除非你的运算放大器冒烟，电阻上出现了棕色烧伤痕迹，或者电容发生爆炸，否则你的元器件很可能没问题。事实上，大多数器件在发生重大损伤之前都能容忍一定程度的滥用。当事情不妙时，最好的办法就是断开电源并寻找一个简单的解释，而不要急着责怪器件或设备。在这方面，DMM是一件十分有价值的调试工具。

输出饱和:

现在将图5中的反馈电阻R2从4.7 kΩ更改为10 kΩ。现在的增益是多少? 将输入信号的幅度缓慢增加至2 V, 仍然以2.5 V为中心, 并将波形导出到实验室笔记本电脑中。任何运算放大器的输出电压最终都会受电源电压的限制, 而在很多情况下, 由于电路中存在内部电压降, 实际限制要远小于电源电压。根据你的以上测量结果量化AD8541的内部压降。如果你有时间, 可尝试用OP97或OP27放大器替换AD8541, 并比较它能产生的最小和最大输出电压。

求和放大器电路:

图7所示电路是一个带有四个输入的基本反相放大器, 称为求和放大器。图7的配置与你在教科书中看到的略有不同, 因为ADALM1000只提供单个正电源电压。放大器的同相(+)输入连接到2.5 V, 即电源电压的一半, 而不是接地。这就改变了求和放大器方程式。输入电阻上出现的输入电压现在是相对于2.5 V (即所谓共模电平) 进行测量。它们应减去2.5 V, 因此0 V_{IN}变为-2.5 V, +3.3 V_{IN}变为+0.8 V。输出电压也应相对于+2.5 V电平来测量。为使常规方程式正确, 输出电压也将减去2.5 V共模电平。另一种思路是考虑所有输入均为2.5 V (或悬空) 的情况。任何输入电阻中都没有电流流动 (其两端的电压为0 V), 因此反馈电阻中也没有电流流过 (其电压为0 V)。输出电压将为2.5 V。

此电路使用四个数字输出PIO 0、PIO 1、PIO 2和PIO 3作为输入电压源。每个数字输出具有接近0 V的低输出电压或接近3.3 V的高输出电压。使用叠加 (并校正2.5 V共模电平), 我们可以证明V_{OUT}是V_{PIO0}、V_{PIO1}、V_{PIO2}和V_{PIO3}的线性和, 其中每个都有自己独特的增益或比例系数 (由1 kΩ反馈电阻除以各自电阻所得的比值设定)。

PIO 0值最高, 输出变化最小 (最低有效位), PIO 3值最低, 输出变化最大 (最高有效位)。请注意, PIO 3电阻由两个4.7 kΩ电阻并联而成。

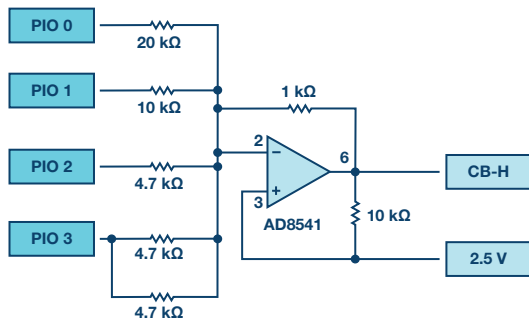


图7. 求和放大器配置

断开电源后, 修改反相放大器电路, 如图7所示。重新连接电源, 然后使用数字输出控件填写以下两个表格。在第一个表格中, 记录每个数字输出的低电压和高电压。在高阻模式下使用CB-H示波器输入来完成此任务。在第二个表格中, 记录PIO 0、PIO 1、PIO 2、PIO 3的所有16种1和0组合的输出电压。你还应确认, 当所有四位悬空或处于高阻(X)状态时, 输出电压确实为2.5 V。

表1. 低电压和高电压

数字引脚	低电压	高电压
PIO 0		
PIO 1		
PIO 2		
PIO 3		

表2. 输出电压

数字位	输出电压
P3、P2、P1、P0	
0000	
0001	
0010	
0011	
0100	

使用电阻值计算每个输入组合的预期输出电压, 并与测量值进行比较。

同相放大器:

同相放大器配置如图8所示。与单位增益缓冲器一样, 此电路具有 (通常) 较好的高输入电阻特性, 因此它可用于缓冲增益大于1的非理想信号源。

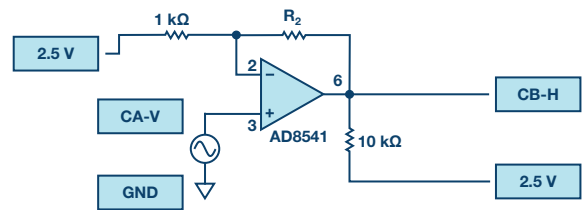


图8. 具有增益的同相放大器

组装图8所示的同相放大器电路。组装新电路之前, 请记得关闭电源。从R2 = 1 kΩ开始。

施加一个500 Hz正弦波, CA-V设置为2.0 V最小值和3.0 V最大值 (1 V p-p, 以2.5 V为中心), 并在示波器上显示输入和输出波形。测量此电路的电压增益, 并与课堂上讨论的原理进行比较。导出波形图并将其包含在实验报告中。

图形实例如图9所示。

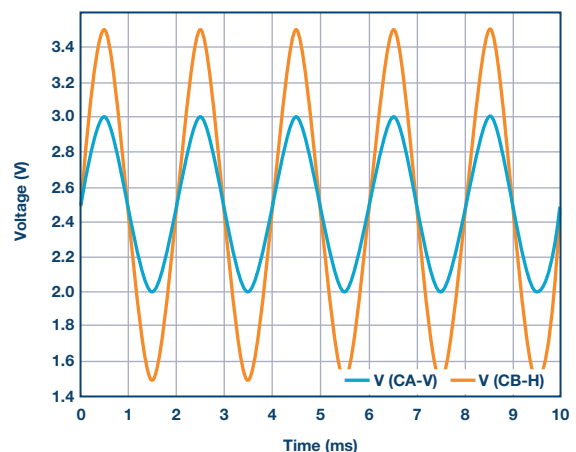


图9. 同相放大器曲线

将反馈电阻(R2)从1 kΩ增加到约4.7 kΩ。记住，你可能需要降低输入的幅度以防止输出饱和(削波)。现在的增益是多少?

增加反馈电阻，直到削波开始——也就是说，直到输出信号的峰值因为输出饱和而开始变平。记录这种情况发生时的电阻。现在将反馈电阻增加到100 kΩ。在你的笔记本中描述并绘制波形。此时的理论增益是多少?考虑此增益，输入信号必须小到什么程度才能使输出电压始终低于5 V?尝试将波形发生器调整为此值。描述所实现的输出。

最后一步强调高增益放大器的重要考虑因素。对于小输入电平，高增益必然意味着大输出。有时候，这可能导致意外饱和，原因是某些低电平噪声或干扰进行了放大，例如对拾取自电力线的杂散60 Hz信号的放大。放大器会放大输入端的任何信号……无论你是否需要!

运算放大器用作比较器

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10所示。这本质上是一个二元状态决策电路：如果“+”端子上的电压大于“-”端子上的电压， $V_{IN} > V_{REF}$ ，则输出变为高电平(在其最大值时饱和)。相反，如果 $V_{IN} < V_{REF}$ ，则输出变为低电平。电路比较两个输入端的电压，根据相对值产生输出。与之前的所有电路不同，输入和输出之间没有反馈；对于这种情况，我们说电路是开环运行的。

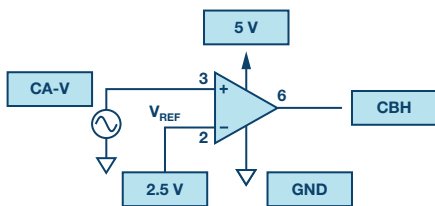


图10. 运算放大器用作比较器

比较器的使用方式不同，在以后的部分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。首先断开电源并组装电路。在反相输入 V_{REF} 上使用固定的2.5 V输出作为直流电源。

同样，在同相输入端配置波形发生器CA-V：500 Hz频率、2 V最小值和3 V最大值的三角波(以2.5 V为中心)。重新连接电源后，导出输入和输出波形。

图形实例如图11所示。

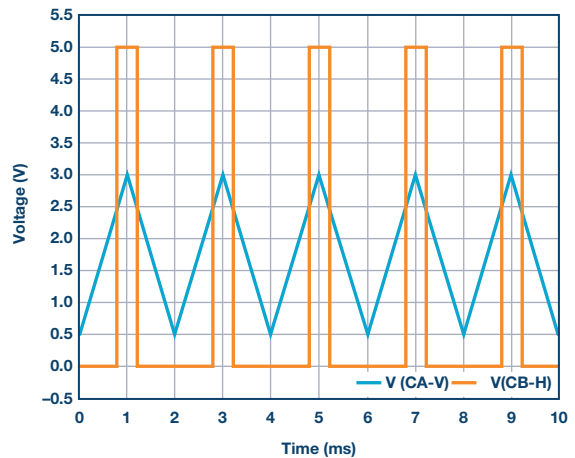


图11. 运放比较器曲线

现在通过增大(正移位)或减小(负移位)最小值和最大值来缓慢移动三角波的中心，并观察输出发生的情况。你能予以解释吗?

对正弦波和锯齿波输入波形重复上述步骤，并在实验报告中记录你的观察结果。

问题：

- ▶ 压摆率：如何测量和计算单位增益缓冲器配置的压摆率? 将其与OP97数据手册中列出的值进行比较。
- ▶ 求和电路：使用叠加导出图8电路的预期传递特性。根据 V_{IN0} 、 V_{IN1} 、 V_{IN2} 和 V_{IN3} 求出输出电压。将理想关系的预测与你的数据进行比较。
- ▶ 比较器：如果 V_{REF} 的极性反转会发生什么?

你可以在[学子专区博客](#)上找到问题答案。

Doug Mercer [doug.mercer@analog.com]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。



Doug Mercer

该作者的其他文章：

[ADALM1000 SMU培训，主题16：测量扬声器阻抗曲线](#)

学子专区——
2019年4月

Antoniu Miclaus [antoniu.miclaus@analog.com]现为ADI公司的系统应用工程师，从事ADI教学项目工作，同时为实验室电路®和QA流程管理开发嵌入式软件。他于2017年2月在罗马尼亚Cluj-Napoca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。



Antoniu Miclaus

该作者的其他文章：

[ADALM1000 SMU培训，主题16：测量扬声器阻抗曲线](#)

学子专区——
2019年4月