

# 精密电阻阵列 RES11A 搭配全差分运放的应用

Gary Zeng

## 摘要

本文介绍了 TI 最新推出的精密电阻阵列 RES11A，内含四个匹配度极高的电阻，组成了两组分压器，适用于搭配各种放大器以实现精确地增益放大。四个精密电阻封装在同一个小尺寸的封装内，相比于分离电阻器件，具有高比率的匹配精度和很好的长期稳定性。

## 内容

<b>1</b>	<b>精密电阻阵列</b>	<b>2</b>
1.1	电阻和精密电阻的参数特性	2
1.2	TI 精密电阻阵列 RES11A 系列	2
1.3	典型的全差分放大 FDA 电路	3
1.4	全差分运放的共模抑制比	4
1.5	运算放大器对于电阻的要求	5
<b>2</b>	<b>精密电阻阵列的典型应用</b>	<b>6</b>
2.1	精密电阻阵列搭配全差分运放	6
<b>3</b>	<b>仿真</b>	<b>7</b>
3.1	全差分运放 THS4551 使用理想电阻的电路仿真	7
3.2	全差分运放 THS4551 使用不理想电阻的电路仿真	8
3.3	全差分运放 THS4551 使用精密电阻的电路仿真	9
3.4	全差分运放 THS4551 使用不匹配电阻的电路仿真	10
<b>4</b>	<b>硬件实验测试</b>	<b>10</b>
4.1	使用分离电阻匹配网络的运放测试结果	10
<b>5</b>	<b>总结</b>	<b>11</b>
	<b>References</b>	<b>12</b>

## Figures

<b>Figure 1.</b>	<b>RES11A 的功能方框图</b>	<b>3</b>
<b>Figure 2.</b>	<b>RES11A 的其他比率的型号</b>	<b>3</b>
<b>Figure 3.</b>	<b>同相放大电路</b>	<b>3</b>
<b>Figure 4.</b>	<b>闭合全差分运放的反馈环路</b>	<b>4</b>
<b>Figure 5.</b>	<b>差分运放的 CMRR 和 <math>V_o</math> 的计算</b>	<b>4</b>
<b>Figure 6.</b>	<b>搭配运放的电阻阻值的影响</b>	<b>5</b>
<b>Figure 7.</b>	<b>运放的偏置电流</b>	<b>6</b>
<b>Figure 8.</b>	<b>TI 全差分放大器 THS4551 的应用框图</b>	<b>6</b>
<b>Figure 9.</b>	<b>TTHS4551 使用理想电阻的电路仿真</b>	<b>7</b>

<b>Figure 10.</b>	电阻理想状态的输出波形 .....	<b>7</b>
<b>Figure 11.</b>	<b>THS4551</b> 使用不理想电阻的电路仿真 .....	<b>8</b>
<b>Figure 12.</b>	电阻最坏状态的输出波形 .....	<b>8</b>
<b>Figure 13.</b>	<b>THS4551</b> 搭配精密电阻网络的电路仿真 .....	<b>9</b>
<b>Figure 14.</b>	使用精密电阻网络且输出波形放大 4 倍显示的波形 .....	<b>9</b>
<b>Figure 15.</b>	使用不匹配电阻且增益设置为 0.25 倍 .....	<b>10</b>
<b>Figure 16.</b>	使用不匹配反馈电阻且输出波形放大 4 倍显示的波形 .....	<b>10</b>
<b>Figure 17.</b>	使用不匹配电阻且增益设置为 0.25 倍的测试结果 .....	<b>11</b>
<b>Figure 18.</b>	使用精密电阻网络且增益设置为 0.25 倍的测试结果 .....	<b>11</b>
<b>Figure 12.</b>	电阻最坏状态的输出波形 .....	Error! Bookmark not defined.
<b>Figure 13.</b>	<b>THS4551</b> 搭配精密电阻网络的电路仿真 .....	Error! Bookmark not defined.
<b>Figure 14.</b>	使用精密电阻网络且输出波形放大 4 倍显示的波形 .....	Error! Bookmark not defined.
<b>Figure 15.</b>	使用不匹配电阻且增益设置为 0.25 倍 .....	Error! Bookmark not defined.
<b>Figure 16.</b>	使用不匹配反馈电阻且输出波形放大 4 倍显示的波形 .....	Error! Bookmark not defined.
<b>Figure 17.</b>	使用不匹配电阻且增益设置为 0.25 倍的测试结果 .....	Error! Bookmark not defined.
<b>Figure 18.</b>	使用精密电阻网络且增益设置为 0.25 倍的测试结果 .....	Error! Bookmark not defined.

## 1 精密电阻阵列

### 1.1 电阻和精密电阻的参数特性

电阻有几个重要的参数决定其性能：（1）标称值，标称值为 20℃时的设计阻值，但当温度低于或者超出这个温度时，阻值也会发生相应的变化；（2）容差，容差为交付时阻值偏离标称值的百分比范围，常见的容差范围为±0.005%到±15%；（3）电阻温度系数（TCP），温度系数是指在特定温度范围的电阻阻值的相对变化值，一般的单位为 ppm/℃；（4）工作电压，为最高直流电压或者是可以连续应用到电阻上的有效正弦交流电压；（5）额定功率，为温度低于 70℃时，电阻所能处理的最大功率，当温度高于 70℃时，电阻器所能承受的功率会降低；（6）工作温度，一般的电阻工作温度范围为 -40℃至 +125℃，超过此范围会导致电阻阻值变化、使用寿命缩短以及电阻损坏失效；（7）高频特性，根据电阻器结构设计、材料和工艺的不同，电阻器的高频特性各有差异，线绕电阻器的高频特性较差；（8）稳定性，受电，气候和温湿度以及机械应力因素影响，阻值也会发生变化。

精密电阻是指高精度，低温漂和高可靠性的电阻器，容差一般指±1%以下，温度系数 TCR 一般在 75ppm 以下。常见的精密电阻有金属薄膜电阻器，金属箔电阻器和功率合金电阻器。

而精密电阻阵列是将多个精密电阻放置到同一个封装当中，使得多个电阻具有相同的环境温度条件，相同的应力，可控的分布参数（分布电容和分布电感）以及高比率的匹配精度。

### 1.2 TI 精密电阻阵列 RES11A 系列

RES11A 系列是一颗内含两组匹配电阻分压器的芯片，每组分压器各含一个输入电阻和一个增益电阻。根据每组分压器的两个电阻的阻值比率不同，又分为多款芯片。例如，RES11A40 的电阻标称比率为 1: 4，即每组分压器的输入电阻为 1kΩ，增益电阻为 4kΩ。图 1 为 RES11A 系列的功能框图。

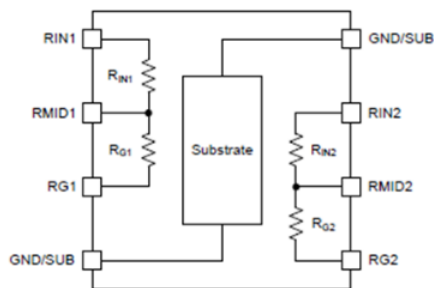


Figure 1. RES11A 的功能方框图

后续 TI 也会推出其他比率的精密电阻阵列：

器件型号	标称比率
RES11A10	1:1
RES11A15 <sup>(1)</sup>	1:1.5
RES11A16 <sup>(1)</sup>	1:1.667
RES11A20 <sup>(1)</sup>	1:2
RES11A25 <sup>(1)</sup>	1:2.5
RES11A30 <sup>(1)</sup>	1:3
RES11A40	1:4
RES11A50 <sup>(1)</sup>	1:5
RES11A90	1:9
RES11A00	1:10

Figure 2. RES11A 的其他比率的型号

### 1.3 典型的全差分放大 FDA 电路

运算放大器一般需要使用电阻作为反馈回路。例如，同相放大电路中使用单端运放、反馈电阻  $R_f$  和增益电阻  $R_g$  来进行信号放大：

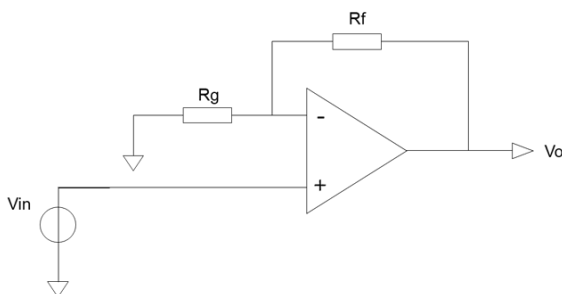


Figure 3. 同相放大电路

相应的增益为：

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{R_g + R_f}{R_g} = 1 + \frac{R_f}{R_g} \quad \text{公式 (1)}$$

而全差分运放有两个输出，两个输出都要工作在闭环状态，如图 4 所示：

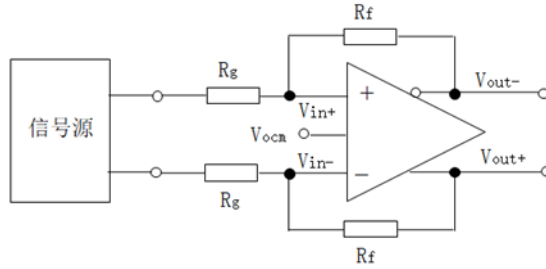


Figure 4. 闭合全差分运放的反馈环路

闭合全差分运放的环路需要两个一样的反馈环，如果这两个环路不匹配，会影响共模抑制比（CMRR）、二次谐波失真和稳定性。

#### 1.4 全差分运放的共模抑制比

运放的共模抑制比（Common-Mode Rejection Ratio, CMRR）是衡量运算放大器抑制共模信号干扰能力的关键参数。精密电阻对的精度和稳定性会影响共模抑制比，最终会影响输出电压。如下图 5 所示，我们通过差分电路来描述一下共模抑制比是如何影响输出的。

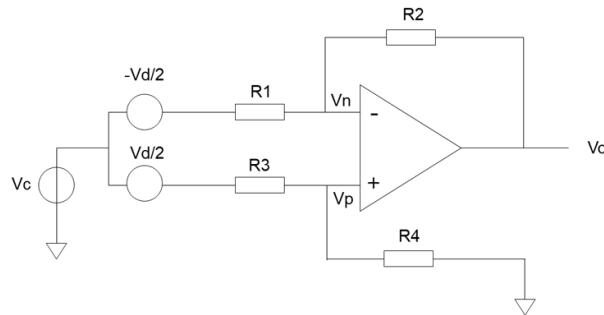


Figure 5. 差分运放的 CMRR 和 Vo 的计算

$$Vp = \frac{R4}{R3+R4} * (Vc + \frac{Vd}{2}) \quad \text{公式 (2)}$$

$$Vn = \frac{R2}{R1+R2} * (Vc - \frac{Vd}{2}) + \frac{R1}{R1+R2} * Vo \quad \text{公式 (3)}$$

$$Vo = Ad * Vid + Ac * Vic = Ad * (Vp - Vn) + Ac * (\frac{Vp+Vn}{2}) \quad \text{公式 (4)}$$

代入并按照  $R1=R3$ ;  $R2=R4$ ;  $Ad \gg Ac$  化简可得:

$$Vo = \frac{R2}{R1} * \frac{Ac}{Ad} * Vc + \frac{R2}{R1} * Vd = \frac{R2}{R1} * \frac{1}{CMRR} * Vc + \frac{R2}{R1} * Vd \quad \text{公式 (5)}$$

如上公式所示，输出电压其实是由两部分组成，即共模分量和差模分量。两组电阻的精度和匹配比例误差也会影响输出。

电阻阵列影响共模抑制比的匹配度定义为:

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right) CMRR = \frac{1}{2} * \left(\frac{R2}{R1} - \frac{R3}{R4}\right) * \left(\frac{R1}{R2}\right) \quad \text{公式 (6)}$$

仅考虑电阻阵列时的共模抑制比：

$$CMRR = \frac{\frac{1}{2}(G+1)}{\left(\frac{\Delta R}{R}\right)CMRR} \quad \text{公式 (7)}$$

采用 4 个相同阻值、匹配比例为±1%的电阻，在常温下只能保证 40dB 的共模抑制比，常温下可以通过校准，可以消除误差，但是在高低温宽温度范围内的校准则成本高昂。而 TI 的 RES11A 系列的比率容差最大值为±0.05%（±500ppm，25℃），常温下的共模抑制比提升为 66dB，而温度漂移最大值为±2ppm/℃。

## 1.5 运算放大器对于电阻的要求

搭配运算放大器使用的增益电阻和反馈电阻对于实现电路的功能和参数性能很重要，主要影响以下四个方面：1. 驱动能力和功耗；2. 噪声；3. 输出误差；4. 长期稳定性。

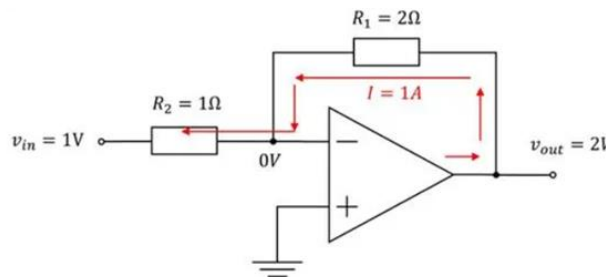


Figure 6. 搭配运放的电阻阻值的影响

关于驱动能力：如上图所示：如果 R2=1 欧姆，R1=2 欧姆，那么不考虑其他因素，流过反馈电阻 R1 的电流为 1A，这个电流是放大器输出的，而一般的放大器很难有这么大的驱动能力。

以 TI 的通用运放 LM2904 为例，其手册中的输出拉电流为 10mA<sub>min</sub>。若 LM2904 的供电为 3.3V，运放输出电压最大时的反馈电阻上的电流要大于 10mA，即反馈电阻 R1 至少要大于 330 欧姆。根据 LM2904 最大输出电压和输出拉电流的关系可以看到，在输出电流过大的情况下，运放最大的输出摆幅会下降。

噪声：在大于 1kHz 的区域中，电阻阻值过大也会带来热噪声问题，电阻两端开路时，它的热噪声有效值的计算公式是：

$$En = \sqrt{4kTRB} \quad \text{公式 (8)}$$

k 是玻尔兹曼常数，k=1.38\*10<sup>-23</sup>，T 是开尔文热力学温度，R 是电阻值，B 是系统等效噪声带宽。例如，当温度是 27℃（300 开尔文），10kΩ 的电阻，在 10MHz 的放大电路中，电阻两端的开路热噪声电压有效值是 40uV。而相同环境下，如果电阻是 20kΩ，则热噪声电压有效值是 58uV。

输出误差：电阻阻值过大会增大由偏置电流引起的失调电压，如 LM2904 的最大失调电流为 300nA。如果要求输出误差电压小于 1mV，那么 R1\*300nA<1mV，那么 R<3.33kΩ。

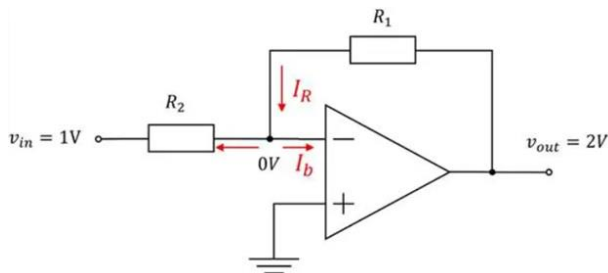


Figure 7. 运放的偏置电流

在差分放大器中，输入端的电阻（如反相端和同相端的输入电阻）若不匹配，会导致共模信号被部分转换为差模信号。例如，若同相端和反相端的电阻存在偏差，共模电压会因电阻差异产生差模误差电压，从而降低 CMRR。

外部电阻的标称容差（如 1%、0.1%）会直接影响电路的对称性和增益精度。高容差电阻可能导致差模增益与共模增益的偏差，从而降低 CMRR。

电阻的温度系数（如 ppm/°C）会导致温度变化时电阻值波动，进而影响差模增益和共模增益的平衡。例如，若反馈电阻和输入电阻的温度系数不同，温度变化可能引入共模误差。

长期稳定性：受各种应力因素的影响，电阻的阻值也会随着时间变化，这个参数叫做长期稳定性。长期稳定性较差的精密电阻会在后期对电路产生很大的误差，一般选用 1~10ppm 每 1000 or 2000 hours。

## 2 精密电阻阵列的典型应用

### 2.1 精密电阻阵列搭配全差分运放

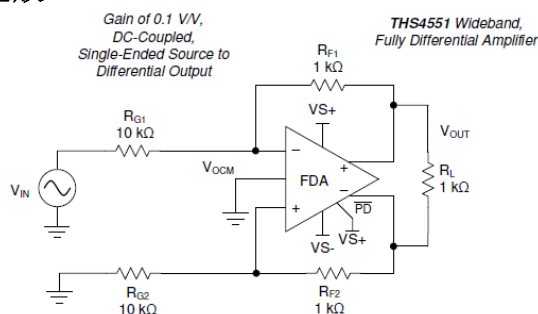


Figure 8. TI 全差分放大器 THS4551 的应用框图

图 8 全差分放大器 THS4551 使用了两组 10:1 的电阻网络，以实现 0.1 倍的信号衰减。增益电阻  $R_G$  和反馈电阻  $R_F$  的容差造成的不匹配会使得差分输出产生误差，增加失真和减少共模抑制比，输入偏置电压和输入偏置电流也会通过外部反馈电阻或者增益电阻产生输出误差。分离的电阻器由于 PCB 布局和板上温度的细微差别也会造成输出误差。研发人员一般选用  $\pm 0.1\%$  容差的电阻作为放大器的  $R_G$  和  $R_F$ 。

而 TI 目前推出的 RES11 系列电阻阵列包含两组（4 个）高匹配度的精密电阻，可以作为上图的两个  $R_g$  和两个  $R_f$ ，高精度和高匹配度的电阻阵列确保了增益的准确性，可以有效的抑制共模噪音。



### 3 仿真

#### 3.1 全差分运放 THS4551 使用理想电阻的电路仿真

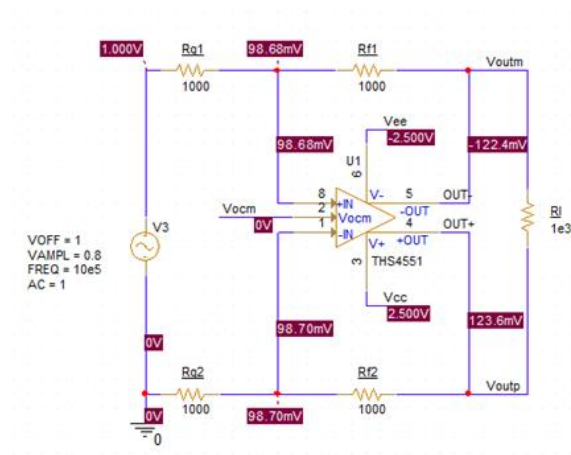


Figure 9. THS4551 使用理想电阻的电路仿真

使用 PSPICE 设计全差分运放 THS4551 的电阻匹配电路，设置输入输出增益为 1，使用误差为 1%的 1k $\Omega$  输入电阻和 1k $\Omega$  反馈电阻，电路增益设置为 1。输入信号是交流正弦信号，幅度 0.8V，频率为 1MHz，直流偏置为 1V。如果将电阻全部设置为没有 1%误差的理想状态，可以仿真得到如下图 10。

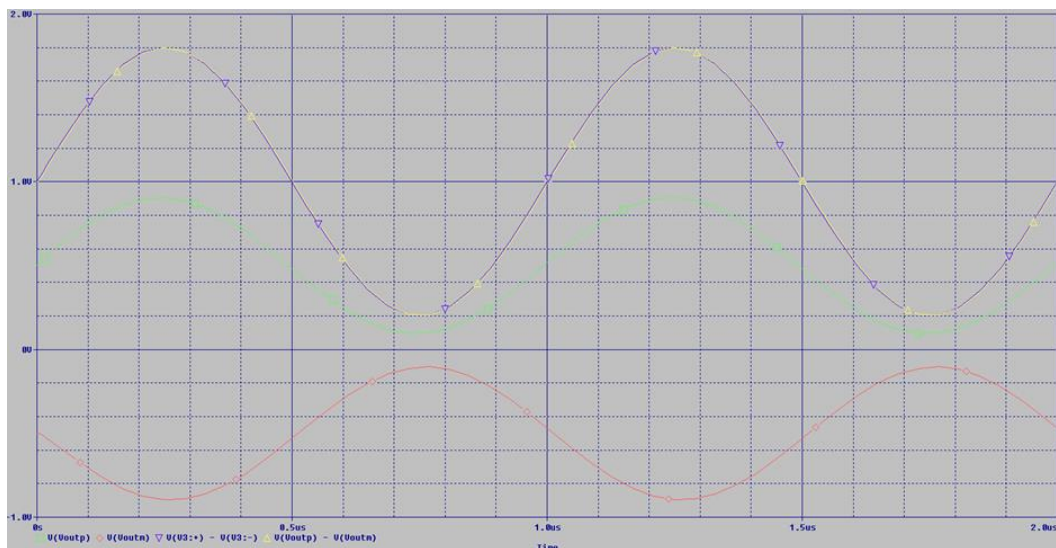


Figure 10. 电阻理想状态的输出波形

图 10 中的紫色波形是信号源产生的，绿色和橙色波形分别是输出负载单端的波形，黄色为差分输出的波形，可以看到失真非常小，可以忽略不计。

### 3.2 全差分运放 THS4551 使用不理想电阻的电路仿真

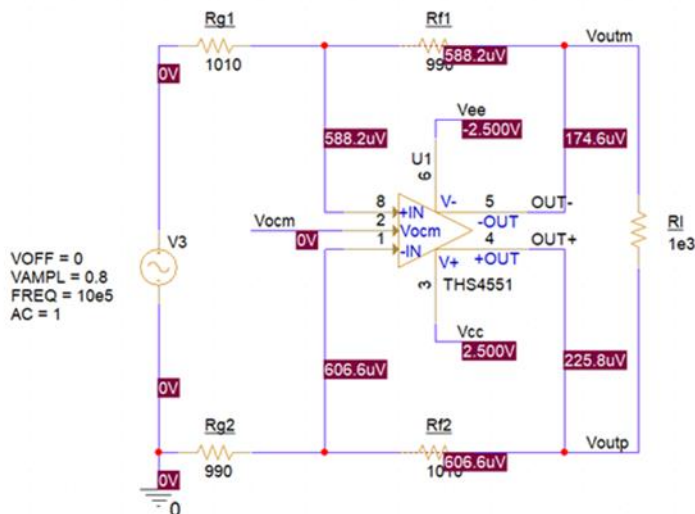


Figure 11. THS4551 使用不理想电阻的电路仿真

使用 PSPICE 设计全差分运放 THS4551 的电阻不匹配电路，设置输入输出增益为 1，使用误差为 1% 的 1k $\Omega$  输入电阻和 1k $\Omega$  反馈电阻，电路增益设置为 1。输入信号是交流正弦信号，幅度 0.8V，频率为 1MHz，直流偏置为 1V。如果将电阻全部设置为 1% 最大误差，切按照最恶劣的环境条件设置，则仿真原理图如上图 12 所示。

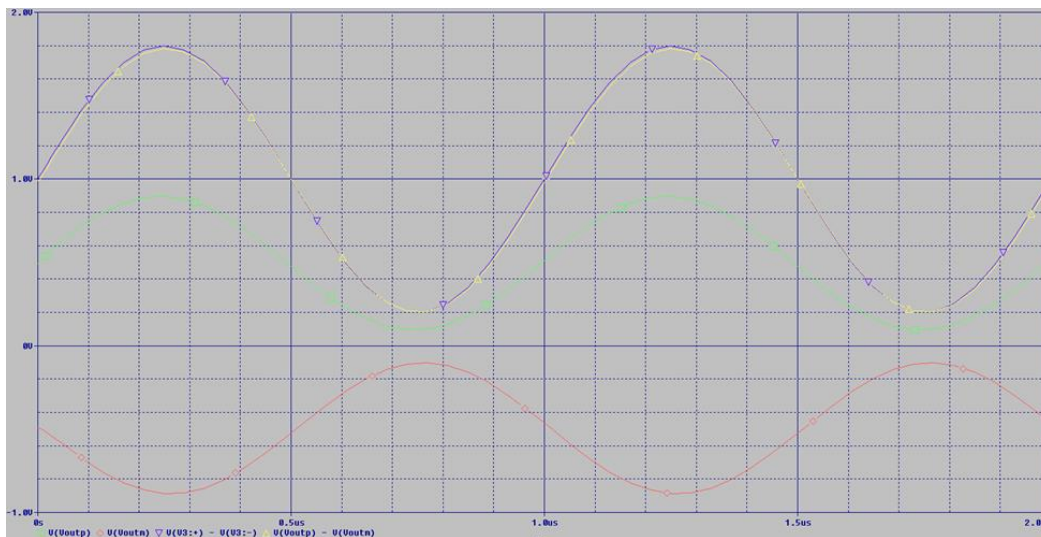


Figure 12. 电阻最坏状态的输出波形

对比图 11 和图 12 可以看到，图 12 中的输入输出波形之间出现了明显的失真，尤其是随着则色输入信号的增大，输出的黄色波形出现了明显的线性失真。这是因为单端输入的运放的共模输入为  $V_{in+}$  的一半，而  $V_{in+}$  为正弦信号，即输入共模电压在时刻变化，且随着信号的增大而增大。输入共模信号叠加到了运放的输出，导致输出幅度失真。



### 3.3 全差分运放 THS4551 使用精密电阻的电路仿真

RES11A40 是一款内部电阻比率为 1: 4, 输入电阻为  $1\text{k}\Omega$  的精密电阻网络, 将 RES11A40 反相使用, 搭配 THS4551 全差分运放, 就可以实现 0.25 倍的增益, 如下图 13 所示。

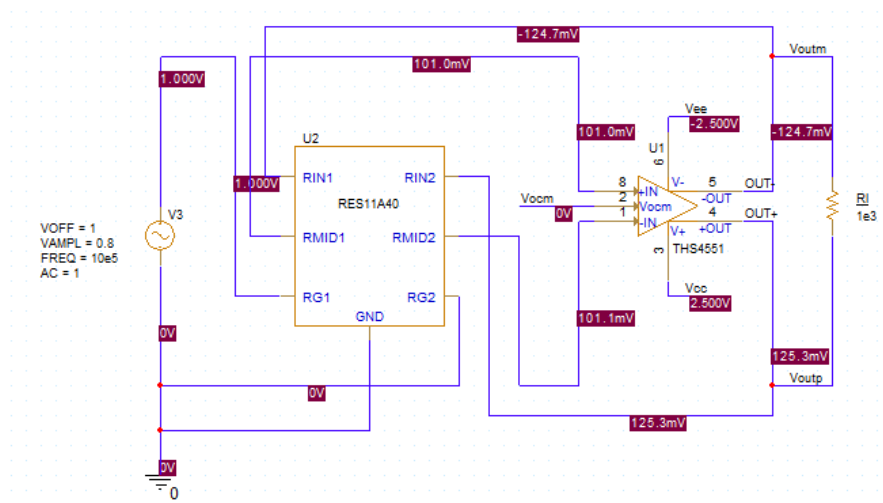


Figure 13. THS4551 搭配精密电阻网络的电路仿真

使用 PSPICE 设计全差分运放 THS4551 和精密电阻网络 RES11A40 的电路, 设置输入输出增益为 0.25 倍。输入信号是交流正弦信号, 幅度 0.8V, 频率为 1MHz, 直流偏置为 1V。为了更好地将输入输出波形进行直观的对比, 我们将输出的波形放大 4 倍, 得到的输入输出波形如下图 14 所示。

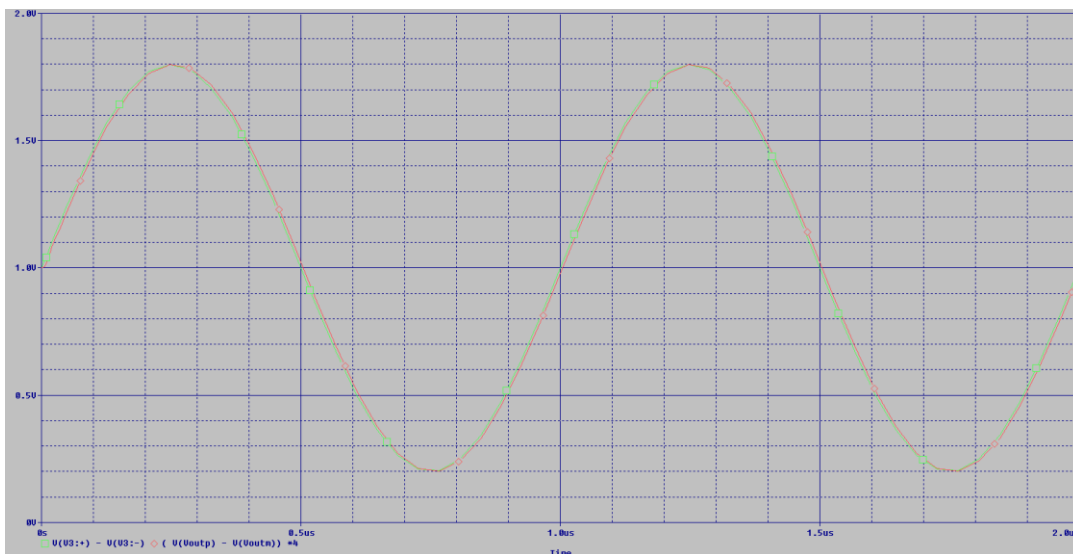


Figure 14. 使用精密电阻网络且输出波形放大 4 倍显示的波形

### 3.4 全差分运放 THS4551 使用不匹配电阻的电路仿真

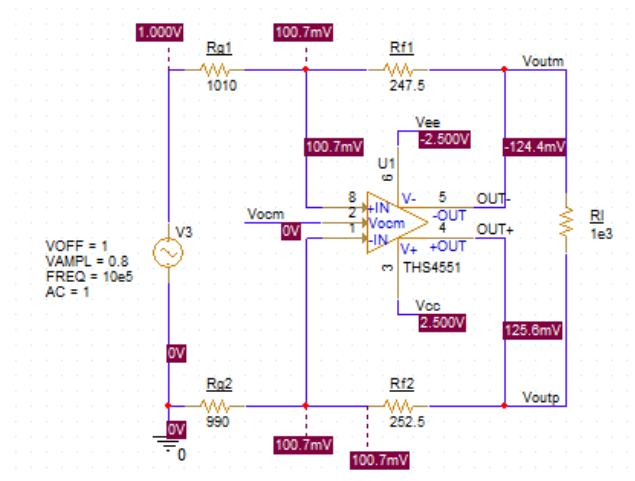


Figure 15. 使用不匹配电阻且增益设置为 0.25 倍

将反馈电阻设置为 250Ω，精度为 1%。同时将显示的输出信号放大 4 倍，得到如下图 16。

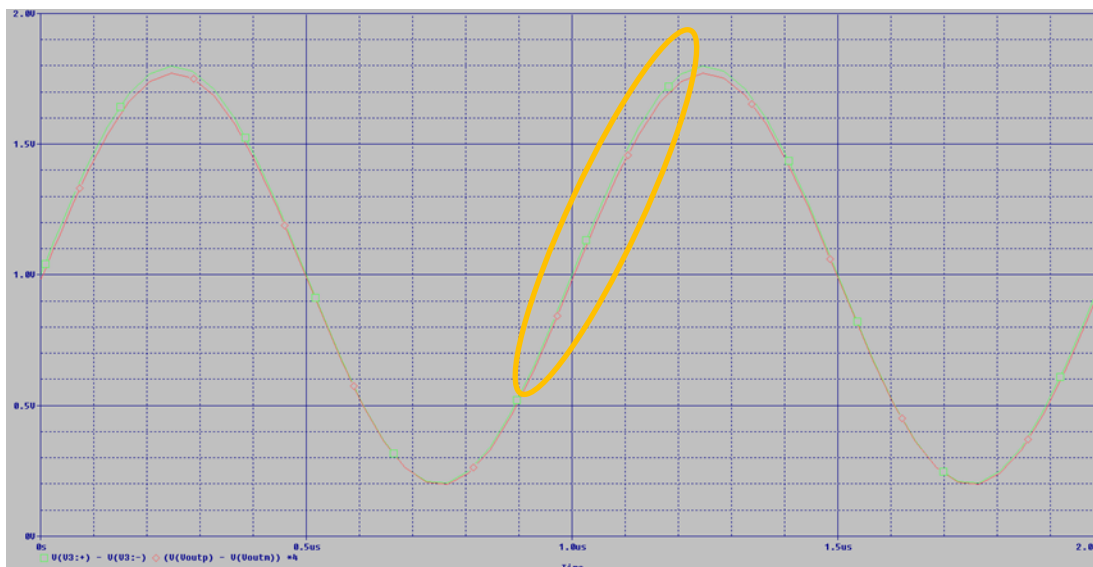


Figure 16. 使用不匹配反馈电阻且输出波形放大 4 倍显示的波形

对比图 16 和图 15 可以看到，使用精密电阻匹配网络的结果要明显好于分离电阻方案，随着输入信号的共模电压增大，图 14 的误差还是维持在很小的水平。

## 4 硬件实验测试

### 4.1 使用分离电阻匹配网络的运放测试结果

按照图 15 的仿真原理图搭建实际的硬件电路，同样在示波器显示端将输出信号放大 4 倍，可以得到图 17 所示的波形。

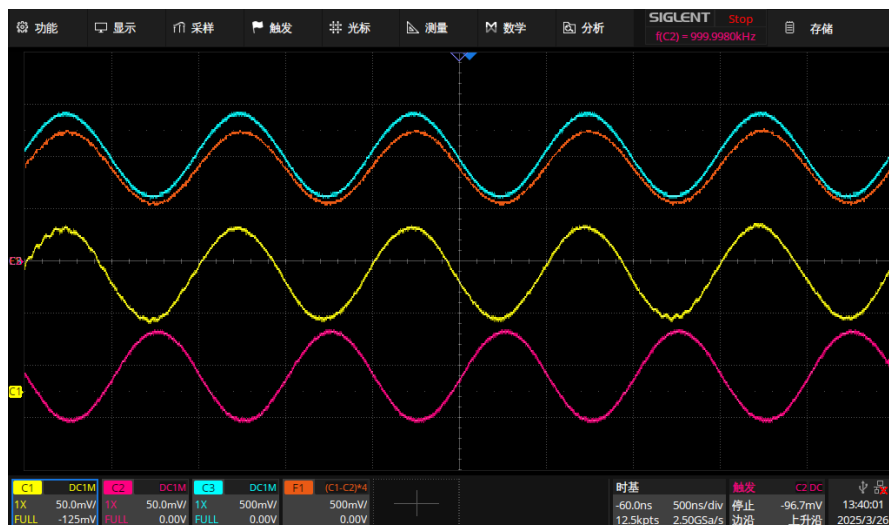


Figure 17. 使用不匹配电阻且增益设置为 0.25 倍的测试结果

上图中蓝色波形为输入的信号波形，黄色和红色波形为负载两端的波形，橙色波形为输出的差分信号。

按照图 13 的仿真原理图搭建实际的硬件电路，同样在示波器显示端将输出信号放大 4 倍，可以得到图 18 所示的波形。

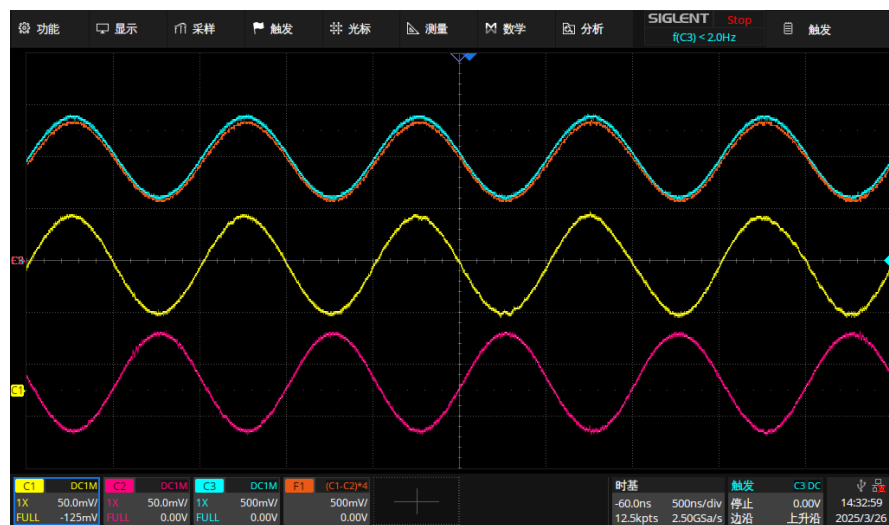


Figure 18. 使用精密电阻网络且增益设置为 0.25 倍的测试结果

对比图 17 和图 18 可以看到，使用精密电阻网络的运放输出对于输入共模信号的抑制能力要远远好于分离电阻的方案。

## 5 总结

本文介绍了 TI 最新推出的精密电阻网络 RES11A 芯片，它集成了两对匹配电阻对，比率精度达到了  $\pm 0.05\%$ ；在同一片 die 上共享同一制造工艺，确保了应力和 TCR 等特性的高度一致，拥有极低的比率漂移特性，可以减少校准需求。该芯片有着紧凑的 SOT23-8 封装，节省 PCB 的尺寸。该芯片适用于适用

于需要高 CMRR、低漂移的差分放大、仪器仪表和工业控制场景，尤其适合对尺寸、成本和长期可靠性敏感的系统。

## References

1. Optimizing CMRR in Differential Amplifier Circuits with Precision Matched Resist
2. RES11A datasheet.
3. THS4551 datasheet

## 重要通知和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、与某特定用途的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他安全、安保法规或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的相关应用。严禁以其他方式对这些资源进行复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。对于因您对这些资源的使用而对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，您将全额赔偿，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 销售条款](#)、[TI 通用质量指南](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款或 TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。除非德州仪器 (TI) 明确将某产品指定为定制产品或客户特定产品，否则其产品均为按确定价格收入目录的标准通用器件。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

版权所有 © 2025，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月