

学子专区—2017年6月 对电阻使用的经验法则说不

作者：Harry Holt

共享



摘要

按照许多年前老师的教导，我们会在运算放大器的两个输入端放上相等的阻抗。本文探究为什么会有这么一条经验法则，以及我们是否应当遵循这种做法。

老师的教导

如果您是在741运算放大器横行天下的时代长大的，那么平衡运算放大器输入端电阻的观念必定已扎根在您的脑海中。随着时间的流逝，由于不同电路技术和不同IC工艺的出现，这样做可能不再是对的。事实上，它可能引起更大直流误差和更多噪声，使电路更不稳定。我们以前为什么要那样做？什么变化导致我们现在这样做可能是错误的？

在二十世纪六十年代和七十年代，第一代运算放大器采用普通双极性工艺制造。为了获得合理的速度，差分对尾电流一般在10 μA到20 μA范围内。

而β值为40到70，故输入偏置电流在1 μA左右。然而，晶体管匹配度并不那么高，所以输入偏置电流不相等，导致输入偏置电流之间有10%到20%的偏差（称为“输入失调电流”）。

在同相接地输入端增加一个与输入电阻R1和反馈电阻R2的并联组合相等的电阻（图1中的R3），可以让阻抗相等。通过一些计算可以证明，误差降至 $I_{\text{offset}} \times R_{\text{feedback}}$ 。由于 I_{offset} 为 I_{bias} 的10%到20%，这将有助于降低输出失调误差。

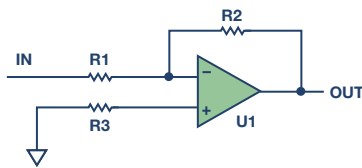


图1. 经典反相放大器

直流误差

为降低双极性运算放大器的输入偏置电流，许多运算放大器设计集成了输入偏置电流消除功能。OP07就是一个例子。输入偏置电流消除功能的增加使偏置电流大大降低，但输入失调电流可能为剩余偏置电流的50%到100%，所以增加电阻的作用非常有限。某些情况下，增加电阻反而可能导致输出误差提高。

噪声

电阻热噪声的计算公式为 $\sqrt{4kTRB}$ ，故1 kΩ电阻会有4 nV/√Hz的噪声。增加电阻会增加噪声。图2中，出人意料的是，虽然909 Ω补偿电阻是值最低的电阻，但由于从该节点到输出端的噪声增益，它给图2输出端贡献的噪声最多。R1引起的输出噪声为40 nV/√Hz，R2为12.6 nV/√Hz，R3为42 nV/√Hz。因此，请勿使用电阻。另一方面，如果运算放大器采用双电源供电，并且一个电源先于另一个电源上电，那么ESD网络可能发生闩锁问题。这种情况下，可能希望增加一定的电阻来保护器件。但若使用的话，应在电阻上放置一个旁路电容以减少电阻的噪声贡献。

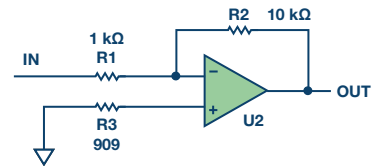


图2. 噪声分析

稳定性

所有运算放大器都有一定的输入电容，包括差模和共模。如果运算放大器连接为跟随器，并且在反馈路径中放入一个电阻以平衡阻抗，那么系统可能容易发生振荡。原因是：大反馈电阻、运算放大器的输入电容和PC板上的杂散电容会形成一个RC低通滤波器（LPF）。此滤波器会引起相移，并降低闭环系统的相位裕量。如果

降低得太多，运算放大器就会振荡。一位客户在一个1 Hz Sallen-Key 低通滤波器电路中使用AD8628 CMOS运算放大器。由于转折频率较低，电阻和电容相当大（参见图3）。输入电阻为470 k Ω ，所以客户在反馈路径中放入一个470 k Ω 电阻。此电阻与8 pF的输入电容（参见图4）一起提供一个42 kHz的极点。AD8628的增益带宽积为2 MHz，因此它在42 kHz仍有大量增益，并发生了轨到轨振荡。把470 k Ω 电阻换成0 Ω 跳线即解决了问题。因此，反馈路径中应避免使用大电阻。这里，何者为大取决于运算放大器的增益带宽。对于高频运算放大器，例如增益带宽积超过400 MHz的ADA4817-1，1 k Ω 反馈电阻就称得上是大电阻。务必阅读数据手册以了解其中的建议。

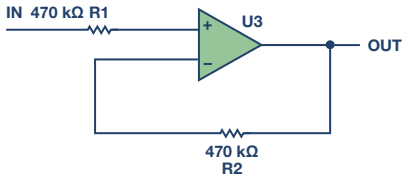


图3. 您所见

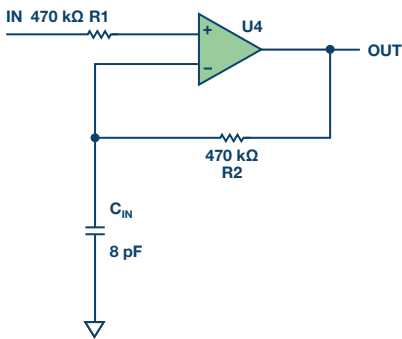


图4. 电子所见

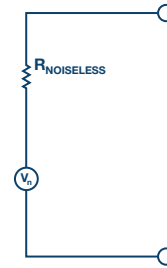
结语

多年来的实践会产生一些有用的经验法则。审核设计时，最好仔细检视这些经验法则，判定它们是否仍然适用。关于是否需要增加平衡电阻，如果是带有输入偏置电流消除功能的CMOS、JFET或双极型运算放大器，那么可能不需要增加。

读完本文后，您可能会意外提问是关于噪声的。

请回答以下三个问题：

- ▶ 问题1：以下哪个噪声是在电阻中产生的？
 - 爆米花噪声
 - 红噪声
 - 粉红噪声
 - 1/f噪声
 - 白噪声
 - 约翰逊噪声
 - 奈奎斯特噪声
 - 白噪声
- ▶ 问题2：室温(20°C)条件下，等效噪声带宽为20 kHz时，10 k Ω 电阻产生的均方根噪声是多少？



- ▶ 问题3：24位音频ADC的输入电压范围为2.5 V时，用此 V_{NOISE} 可以获得多少闪烁位？
- 您可以在[学子专区博客](#)上找到问题答案。

参考文献

- 1 KenShirriff, “了解硅电路：普遍使用的741运算放大器揭秘”，2015年。
- 2 “教程MT-038：运算放大器输入偏置电流”，ADI公司，2009年。

Harry Holt [harry.holt@analog.com]是ADI公司的资深应用工程师。过去四年在核心应用部门工作，此前六年在精密放大器部门工作。之前他曾在美国国家半导体公司工作了28年，从事各种产品的现场和工厂应用工作，包括数据转换器、运算放大器、基准源、音频编解码器和FPGA。他拥有圣何塞州立大学电气工程学士学位(BSEE)，并且是国家工程荣誉协会(Tau Beta Pi)终身会员和IEEE高级终身会员。



Harry Holt