

# 运算放大器输入过压保护：箝位与集成

作者：Daniel Burton

## 简介

高精度运算放大器可让系统设计人员能在调理信号（放大、滤波和缓冲）的同时保持原始信号的精度。当信息包含在变动极小的信号中时，信号路径上的运算放大器在工作时具有极低的直流和交流误差性能就显得极为必要。总系统精度取决于信号路径的精度保持程度。

在某些应用中，可能出现电源电压以外的电压驱动运算放大器输入的情况——这种情况称为过压情况。例如，假设运算放大器配置为+15 V正电源和-15 V负电源，则无论何时，只要输入引脚电压大于一个二极管压降+供电轨电压（比如±15.7 V），则运算放大器内部ESD保护二极管就可以正向偏置，开始传导电流。长时间（甚至短时间内）的过量输入电流——如果电流足够高的话——便可能会损坏运算放大器。这种损坏可能会导致电气规格参数偏离数据手册所保证的限值，甚至导致运算放大器永久性损坏。面对这种可能性，系统设计人员通常会在放大器输入端添加一个过压保护（OVP）电路。因此，难就难在引入OVP电路的同时不增加误差（损失系统精度）。

## 过压条件是如何发生的

很多不同的情况可能引起过压条件。考虑一个远程传感器位于现场的系统——比如炼油厂内的液体流动，并将信号通过电缆发送至另一个物理地点的数据采集电子设备。数据采集电子信号路径的第一级通常是配置为缓冲器或增益放大器的运算放大器。该运算放大器的输入暴露在外界环境下，因而可能受过压事件的影响——比如电缆损坏导致的短路，或者电缆与数据采集电子设备的错误连接。

类似地，可能导致过压条件的情形是：输入信号（通常在放大器输入电压范围内）突然接收到外部激励，导致瞬态尖峰超过运算放大器的电源电压。

可能导致输入过压条件的第三种情况来自运算放大器和信号路径上其它元件的上电时序。例如，如果信号源（比如传感器）在运算放大器之前上电，则信号源便可输出电压，而此时运算放大器电源引脚还没有上电。这会导致过压情况，有可能强制过量电流流经运算放大器输入并到达接地端（未上电电源引脚）。

## 箝位：一种经典的过压保护技术

图1所示是一种OVP（过压保护）的常用方法。当输入信号（ $V_{IN}$ ）幅度超过电源电压之一加上二极管正向电压，则二极管（ $D_{OVPP}$ 或 $D_{OVPN}$ ）将会正向偏置，电流将流至供电轨，过量电流可能会损坏运算放大器。本应用中，我们使用了ADA4077——一款精度极高的运算放大器，最大电源范围为30 V（或±15 V）。

箝位二极管是1N5177肖特基二极管，因为它们的正向导通电压等于大约0.4 V，这比运算放大器输入静电放电（ESD）保护二极管的正向导通电压低；因此，箝位二极管将在ESD二极管之前开始传导电流。过压保护电阻 $R_{OVP}$ 限制了流过箝位二极管的正向电流，使其保持在最大电流额定值以下，防止受到过量电流的损害。使用反馈回路电阻 $R_{FB}$ 是因为，同相输入上的任何输入偏置电流都会流过 $R_{OVP}$ 而产生输入电压误差——增加 $R_{FB}$ 值可消除误差，因为它会在反相输入端产生一个相似的电压。

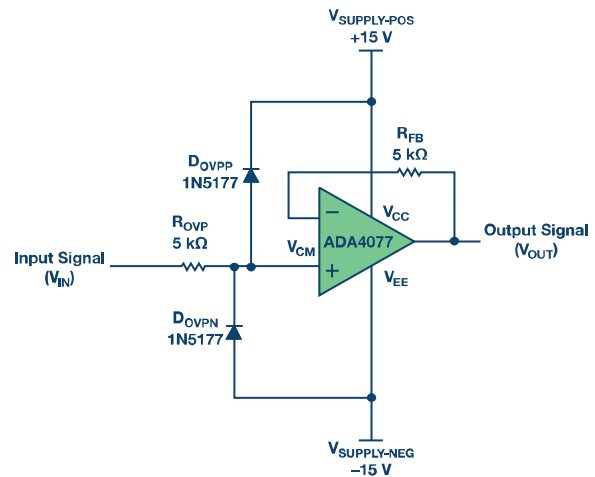


图1. 用于过压保护的经典箝位电路。

## 二极管箝位电路的权衡取舍——降低精度

虽然图1中的经典电路可以保护运算放大器输入端，但它会向信号路径上引入大量误差。精密放大器的输入失调电压（ $V_{OS}$ ）通常为微伏等级。例如，ADA4077在-40°C至+125°C的完整工作温度范围内的最大 $V_{OS}$ 为35  $\mu$ V。添加外部二极管和限流电阻会引入输入失调误差，该误差经常会比精密运算放大器的固有失调大好几倍。

反向偏置二极管具有反向漏电流，此漏电流从阴极流过阳极。

当输入信号电压 ( $V_{IN}$ ) 在供电轨之间的时候, 二极管 $D_{OVPP}$ 和 $D_{OVPN}$ 具有反向电压。当 $V_{IN}$ 为地电平时 (输入电压范围的中点), 经过 $D_{OVPN}$ 的反向电流大致等于经过 $D_{OVPP}$ 的反向漏电流。然而, 当 $V_{CM}$ 变为地电平以上或以下时, 其中一个二极管中流过的反向电流大于另一个二极管中流过的电流。例如, 当 $V_{CM}$ 等于运算放大器输入电压范围的最大值时—即离正电源 2 V (或本电路中的13 V) 时, 二极管 $D_{OVPN}$ 上的反向电压为 28 V。查阅1N5177二极管的数据手册可知, 这可能会导致反向漏电流接近100 nA。当反向漏电流从输入信号端( $V_{IN}$ ) 流过 $R_{OVP}$ 时, 它会在 $R_{OVP}$ 上造成电压降, 看上去就像信号路径上输入失调电压上升了。

另一个需要担心的地方是, 二极管反向漏电流随温度上升而呈指数上升, 导致箝位OVP电路的失调电压急剧上升。图2是一个不带外部过压电路的运算放大器, 以此作为对照基准, 该图显示了ADA4077在-13 V至+13 V输入电压范围内的失调电压测量值。在三个温度下进行测量: 25°C、85°C和125°C。注意在25°C时, 本测试中的ADA4077  $V_{OS}$ 仅达到了6  $\mu$ V; 哪怕在125°C,  $V_{OS}$ 也只有大约20  $\mu$ V。当我们把外部箝位OVP电路加入同一个ADA4077器件, 并在 $V_{IN}$ 端施加输入电压时, 可以看到如图3所示的结果。在室温下,  $V_{OS}$ 跳跃至30  $\mu$ V—是单个ADA4077信号路径误差的5倍。在125°C时,  $V_{OS}$ 超过15 mV—等于ADA4077 20  $\mu$ V的750倍之多! 精度下降了。

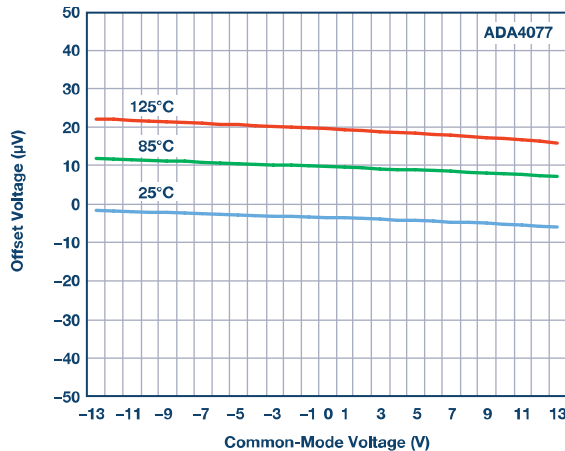


图2. 输入失调电压与ADA4077输入电压的关系。

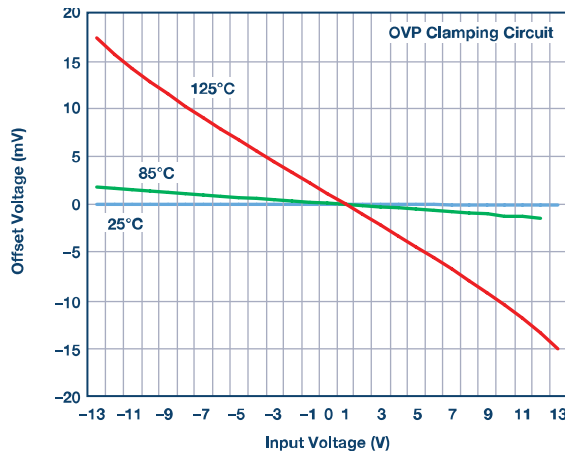


图3. ADA4077添加OVP箝位电路后输入失调电压与输入电压的关系。

在过压条件时, 5 k $\Omega$ 电阻很好地保护了箝位二极管和运算放大器, 但正常工作时, 若二极管在它两端有漏电流产生, 则会引入较多的失调误差 (更不要说来自电阻的约翰逊噪声了)。我们需要的是动态输入电阻, 它在额定的输入电压范围内工作时具有低电阻, 但在过压条件下具有高电阻。

满足要求的集成式解决方案

ADA4177是一款高精度运算放大器, 集成过压保护。集成式ESD二极管用作过压箝位, 保护器件。耗尽型FET位于ESD二极管之前, 与各个输入端串联连接。它们具有动态电阻, 会随着输入电压 ( $V_{CM}$ ) 超过电源电压而增加。随着输入电压上升, 内部FET的漏极-源极电阻 ( $R_{DS(on)}$ ) 增加, 从而限制了跟随电压的上升而呈指数增长的电流 (参见图4)。由于ADA4177在输入端采用耗尽型FET, 并且由于它不是一个串联保护电阻, 因此运算放大器不会在电阻两端产生箝位OVP电路那样的失调电压问题。

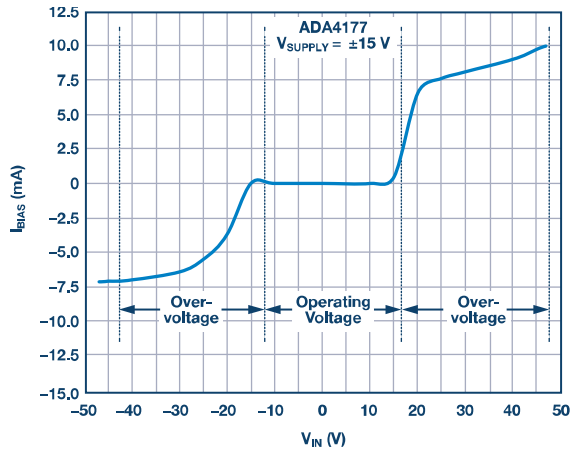


图4. ADA4177输入偏置电流随过压的增加而受限。

ADA4177输入可耐受电源电压以上最高32 V的电压。它将过压电流限制在10 mA至12 mA (典型值) 范围内, 从而不使用任何外部元件即保护了运算放大器。如图5所示, 哪怕在125°C时, 该被测单元的失调电压也只有40  $\mu$ V。该值为箝位电路在此温度下误差值的3%都不到。精度性能得到了保留!

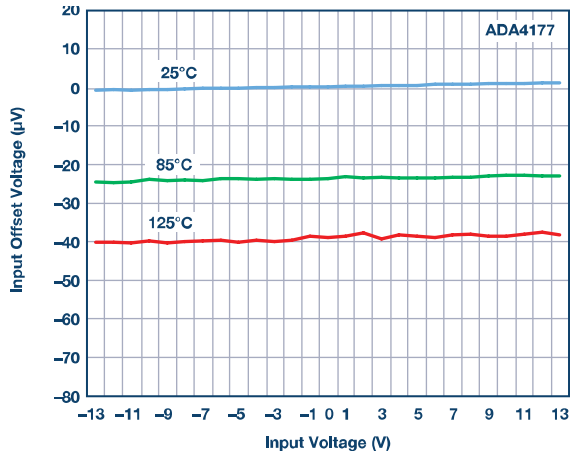


图5. ADA4177采用集成式OVP时输入失调电压与输入电压的关系。

这对系统性能而言意味着什么

分析输入电压的变化对信号路径精度的影响时，系统设计人员会考虑放大器的共模抑制比 (CMRR)。它表示输出端能抑制多少共模输入电压（或者通过了多少）。由于运算放大器通常配置为提供输入与输出之间的增益，因此我们以输入失调电压变化为参照归一化CMRR规格（即输出变化除以放大器闭环增益）。共模抑制比是一个正数值，以dB为单位，计算公式如下：

$$CMRR = 20 \log (\Delta V_{CM} / \Delta V_{OS})$$

从这个比值中可以看到，有必要保持V<sub>OS</sub>尽量低。ADA4177额定值在完整的工作温度范围内保证具有125 dB最小CMRR限值。通过本实验中被测单元的测试结果可以计算并对比箝位电路和ADA4177的CMRR。表1显示了使用经典箝位二极管电路时精度的极大损失，以及集成FET过压保护的ADA4177的出色CMRR性能。

表1. ADA4177与带箝位二极管的分立式OVP的CMRR对比

| 过压保护方法        | 25°C   | 85°C   | 125°C  |
|---------------|--------|--------|--------|
| ADA4177       | 143 dB | 145 dB | 142 dB |
| ADA4077和箝位OVP | 113 dB | 78 dB  | 58 dB  |

参考文献

Michael Arkin和Eric Modica。“[鲁棒的放大器提供集成过压保护](#)。”《模拟对话》，第46卷第1期，2012年。

视频：“[ADA4096-2输入过压保护放大器](#)。”ADI公司。

视频：“[ADA4177：集成OVP和EMI的运算放大器具有卓越的鲁棒性和精度](#)。”ADI公司。

欲了解更多有关ADA4177和ADA4077的信息，请参见产品页面和数据手册：[ADA4177](#)和[ADA4077](#)。

Daniel Burton [daniel.burton@analog.com] 是ADI公司的应用工程师。他拥有圣何塞州立大学的电气工程学士学位，其职业生涯大多从事检测和精密线性信号路径相关的职位。Dan于2010年加入ADI公司，并专注于精密放大器和基准电压源产品。



Daniel Burton