

差动放大器构成精密电流源的核心

作者: Neil Zhao, Reem Malik和Wenshuai Liao

许多应用利用精密电流源提供恒定电流,包括工业过程控制、仪器仪表、医疗设备和消费电子产品。例如,过程控制系统利用电流源提供电阻温度检测器(RTD)所需的激励电流;数字万用表利用电流源测量未知电阻、电容和二极管;长距离信息传输广泛使用电流源来驱动4 mA至20 mA电流环路。

精密电流源传统上采用运算放大器、电阻和其它分立器件构建,但存在尺寸、精度和温度漂移等方面的不足。现在,高精度、低功耗、低成本集成差动放大器¹(例如AD8276²)的出现,使得尺寸更小、性能更高的电流源变成现实,如图1所示。反馈缓冲器使用低失调、低偏置电流放大器,例如AD8538, AD8603, AD8605, AD8628, AD8655, AD8661, AD8663, OP177或OP177,具体取决于所需电流范围。

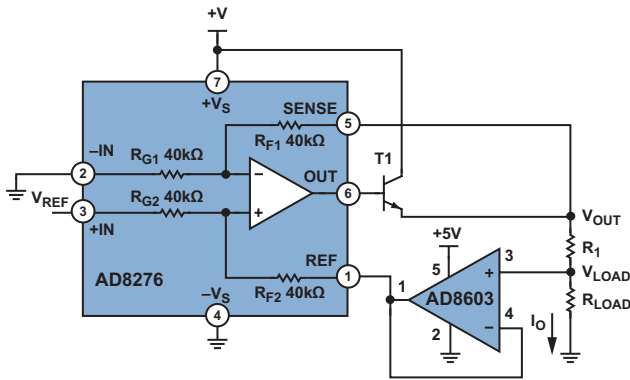


图1. 差动放大器和运算放大器构成精密电流源

输出电流可以通过下式计算:

$$I_O = V_{REF} \frac{\frac{R_{F2}}{R_{G2}} + \frac{R_{F1}}{R_{G1}} \times \frac{R_{F2}}{R_{G2}}}{R_I \left(1 + \frac{R_{F2}}{R_{G2}}\right) + R_{LOAD} \left(\frac{R_{F2}}{R_{G2}} - \frac{R_{F1}}{R_{G1}}\right)}$$

如果 $R_{G1} = R_{G2} = R_{F1} = R_{F2}$, 上式可简化为:

$$I_O = \frac{V_{REF}}{R_I}$$

最大输出电流受以下因素限制: 运算放大器输入范围、差动放大器输出范围以及差动放大器SENSE引脚电压范围。必须满足下列三个条件:

$$V_{LOAD} = I_O \times R_{LOAD} \text{ 在运算放大器输入范围内。}$$

$$V_{OUT} = I_O \times (R_{LOAD} + R_I) \text{ 在SENSE引脚电压范围 } 2 \times (-V_S) - 0.2 \text{ V 至 } 2 \times (+V_S) - 3 \text{ V 内。}$$

$$I_O \times (R_{LOAD} + R_I) + V_{BE} \text{ 在AD8276输出电压范围 } -V_S + 0.2 \text{ V 至 } +V_S - 0.2 \text{ V 内。}$$

SENSE引脚可以耐受几乎为电源两倍的电压,因此第二个限制条件相当宽松。2.5V至36V的宽电源电压范围使得AD8276成为许多应用的理想之选。A级和B级的最大增益误差分别为0.05%和0.02%,因此电流源精度最高可达0.02%。

配置变化

对于可以接受稍大误差的低成本应用,可以移除反馈缓冲器以简化电路,如图2所示。

如果 $R_{G1} = R_{G2} = R_{F1} = R_{F2} = R_I$, 则输出电流为:

$$I_O = V_{REF} \frac{2R_F + R_I}{R_I(2R_F + R_{LOAD})}$$

对于 $2R_F \gg R_{LOAD}$ and R_I , $I_O \approx \frac{V_{REF}}{R_I}$

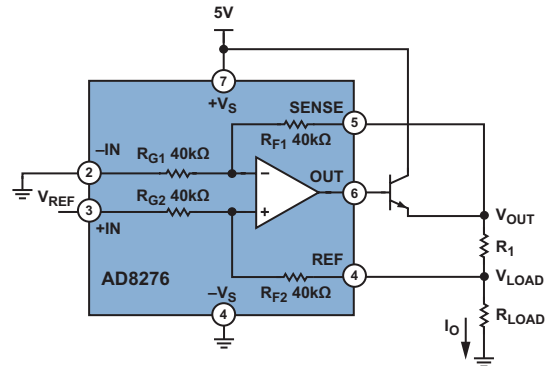


图2. 去掉反馈放大器的简化电路

如果所需输出电流小于AD8276的输出能力15 mA, 则可去掉升压晶体管, 如图3所示。如果低电流和降低精度均能接受, 则可采用更为简单的低成本配置, 如图4所示。

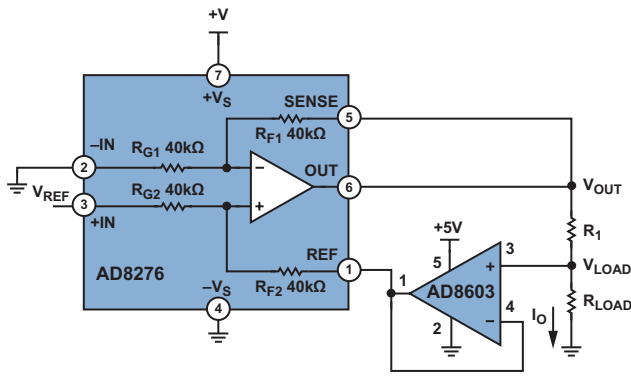


图3. 针对低电流应用的简化电路

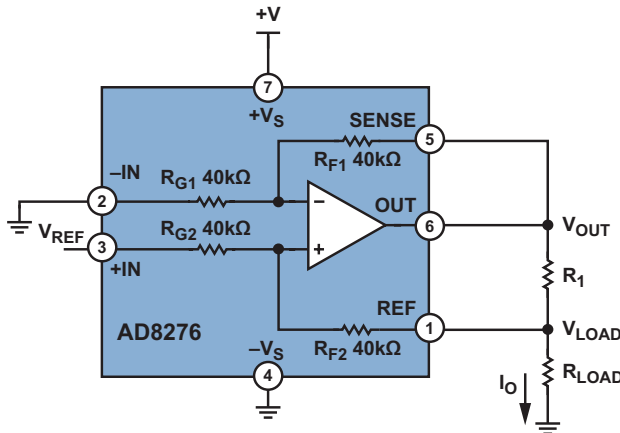


图4. 针对低成本、低电流应用的简化电路

图5所示的拓扑结构可以用于高电流、高精度应用，运算放大器输入范围无限制。

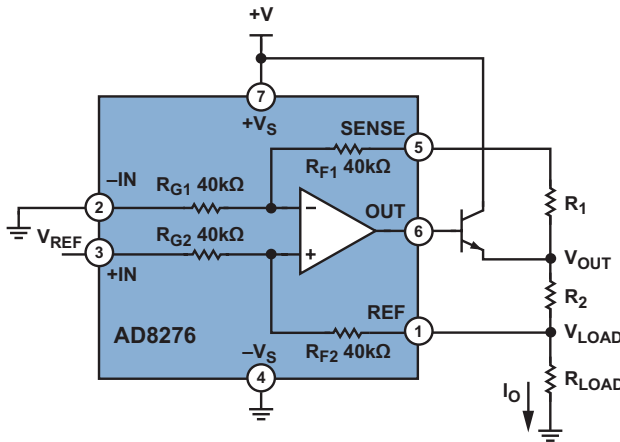


图5. 差动放大器和匹配电阻构成精密电流源

输出电流可以通过下式计算：

$$I_O = V_{REF} \frac{R_{F2} R_{F1} \left(\frac{R_{G1}}{R_{F1}} + 1 \right) + R_{F2} R_1 + R_{G1} R_2}{R_1 R_{G1} R_{G2} \left(1 + \frac{R_{F2}}{R_{G2}} \right) + R_{LOAD} (R_{G1} R_{F2} - R_{G2} R_{F1} + R_{G1} R_2 - R_{G2} R_1)}$$

如果完全匹配, $R_{g1} = R_{g2} = R_{f1} = R_{f2} = 40 \text{ k}\Omega$ 且 $R_1 = R_2$, 则输出电流为：

$$I_O = V_{REF} \left(\frac{1}{40 \text{ k}\Omega} + \frac{1}{R_2} \right)$$

外部电阻 R_1 和 R_2 应具有超高精度和匹配度，否则输出电流将随负载而变化，由此产生的误差无法通过软件来校正。

外围器件

输入电压 V_{REF} 可以是DAC输出、基准电压源或传感器输出。如果需要可编程电流源，推荐使用精密14位或16位DAC，如AD5640、AD5660、AD5643R和AD5663R等。至于基准电压源，要求更高性能时推荐使用精密基准源ADR42x和ADR44x；要求低功耗时推荐使用ADR36x；要求低成本时推荐使用AD158x和ADR504x；要求小尺寸时推荐使用集成运算放大器与基准电压源ADR82x。

基准电压源可以连接到AD8276的反相或同相输入端。如果使用同相输入，共模电压为 $\frac{V_{REF} + V_{LOAD}}{2}$ ，输出电流为 $I_O = V_{REF} \frac{2R_F + R_1}{R_1(2R_F + R_{LOAD})}$ 。如果使用反相输入，共模电压为 $\frac{V_{LOAD}}{2}$ 输出电流为 $I_O = -V_{REF} \frac{R_F + R_2}{R_F R_2}$ 。使用反相输入时，需要一个缓冲放大器；因此，建议使用同相输入，以简化电路。

晶体管选择

选择升压晶体管时，务必使 V_C 高于电源电压，并使 I_C 高于所需输出电流。推荐使用2N3904、2N4401和2N3391等低成本晶体管。电流较低时，无需使用晶体管。

实验基准结果和分析

使用图1电路测得的输入电压与输出电流的关系如图6所示。AD8276和AD8603采用+5 V电源供电。 R_1 的容差为0.1%。晶体管为2N3904。基准电压以0.01V步进从0.05 V扫描至1.20 V。输入范围受电源和AD8603输入范围的限制。

最大误差为0.87%，平均误差为0.10%。电流检测误差受外部电阻的限制。较高精度的电阻可以产生较高精度的电流源。

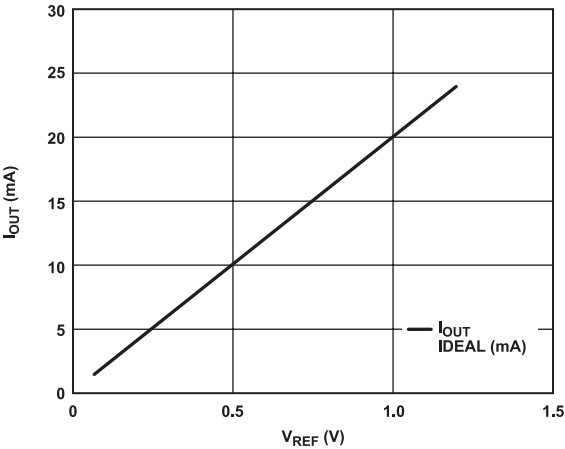


图6. 使用差动放大器和反馈放大器的测试结果

结束语

差动放大器AD8276具有低失调电压、低失调电压漂移、低增益误差、低增益漂移特性以及集成电阻，可以用来实现精确、稳定的电流源。宽电源电压范围（2.5 V至36 V）使其能支持各种各样的负载。节省空间的8引脚MSOP封装和低功耗特性，则使它非常适合电池供电的便携式系统。采用差动放大器实现精密电流源可以缩小PCB面积，简化布局，降低系统成本，提高可靠性。

参考文献：

(有关所有ADI公司器件的信息，请访问：www.analog.com)

- 1 www.analog.com/en/amplifiers-and-comparators/current-senseamplifiers/products/index.html



作者简介

Neil Zhao (neil.zhao@analog.com) 是ADI中国应用支持部门的一名现场应用工程师，工作时间已有一年半。他负责中国市场水平模拟产品的技术支持工作。2008年1月，Neil毕业于北京航空航天大学，并获得通信与信息系统硕士学位。他在《模拟对话》、EDN、《测井技术》、《电子测量技术》杂志上发表过文章。



Reem Malik (reem.malik@analog.com)是ADI公司位于美国马萨诸塞州威明顿市的集成放大器产品(IAP)部门的一名应用工程师。她为仪器仪表、工业和医疗领域的客户提供技术支持，主要负责差动放大器和可变增益放大器等产品。Reem于2003年和2008年分别获得伍斯特理工学院电子工程学士和硕士学位。她于2008年6月加入ADI公司。



Wenshuai Liao (wenshuai.liao@analog.com)是ADI公司位于中国北京的集成放大器产品(IAP)部门的一名营销工程师。Wenshuai获得清华大学光学工程硕士学位之后，曾在大唐电信集团任TD-SCDMA节点B RF工程师三年。他于2002年加入ADI公司。



附录：差动放大器

型号	共模范围 (V)	典型带宽 (MHz)	CMRR (dB)	增益范围	最小电源电压 (V)	最大电源电压 (V)	电源电流 (mA)	VosTC (μV/°C)	增益TC (ppm/°C)	温度范围	封装	千片订量 报价 (美元/)
AD8270	-Vs至+Vs	10	98	1.5	+5	+36	2.5	1.5	1	-40至+125	LFCSP	\$1.91
AD8271	-Vs-0.4至+Vs+0.4	15	80	1.5	+2.5	+36	2.6	2	2	-40至+85	MSOP	\$1.25
AD8273	±40	20	86	1.5	+5	+36	2.5	3	2	-40至+125	SOIC	\$1.67
AD8274	±3	10	86	1.5	+5	+36	2.6	3	0.5	-40至+85	MSOP, SOIC	\$1.05
AD8275	-13至+24	15	96	0.2	+3.3	+15	2.3	2.5	0.3	-40至+85	MSOP	\$1.60
AD8276	2 (-Vs)+0.2至2 (+Vs)-3	0.55	86	1	+2.5	+36	0.22	2	1	-40至+125	MSOP, SOIC	\$1.00