

电流输出电路技术为您的模拟工具箱添加多样性

作者: James Bryant

虽然诸如Howland电流源等电流镜和电路在教学时属于模拟电路部分, 仍然有相当一部分的工程师在定义精密模拟电路输出时倾向于从电压的角度来考虑问题。这很可惜, 因为电流输出可在多方面提供优势, 包括高噪声环境下的模拟电流环路信号 (0 mA至 20 mA和 4 mA至 20 mA), 以及在不借助光学或磁性隔离技术的情况下针对较大电位差进行模拟信号电平转换。本文总结了一部分现有技术, 并提供多款实用电路。

得到稳定的电流输出是极其简单的事情, 最简单的方法就是使用电流镜: 两个完全相同的晶体管——采用同一块芯片制造, 从而工艺、尺寸和温度都完全一致——如图 1 所示相连。两个器件的基极-射极电压相同, 因此流入集电极T2的输出电流等于流入集电极T1的输入电流。

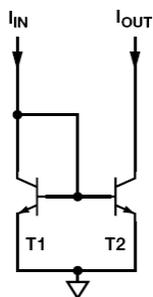


图 1. 基本电流镜

此分析假设 T1 和 T2 相同且等温, 并且它们的电流增益极高, 以至于可忽略基极电流。它还会忽略早期电压, 使集电极电流随集电极电压变化而改变。

可采用 NPN 或 PNP 晶体管组成这些电流镜。将 n 个晶体管并联组成 T2, 则输出电流为输入电流的 n 倍, 如图 2a 所示。若 T1 由 m 个晶体管组成, T2 由 n 个晶体管组成, 则输出电流将是输入电流的 n/m 倍, 如图 2b 所示。

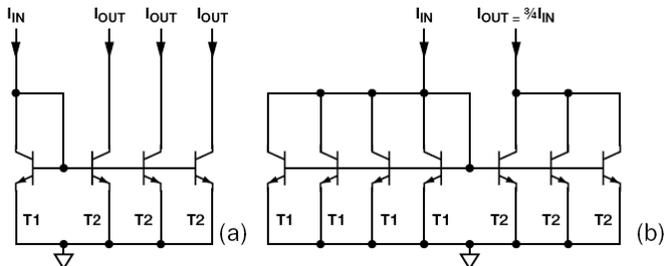


图 2. (a) 多级电流镜 (b) 非整数比例电流镜
可将 3 个 T2 集电极结合起来, 得到 $3I_{IN}$

若早期电压影响很大, 则可使用略为复杂的威尔逊电流镜降至最低。3 晶体管版本和 4 晶体管版本如图 3 所示。4 晶体管版本更为精确, 且具有更宽的动态范围。

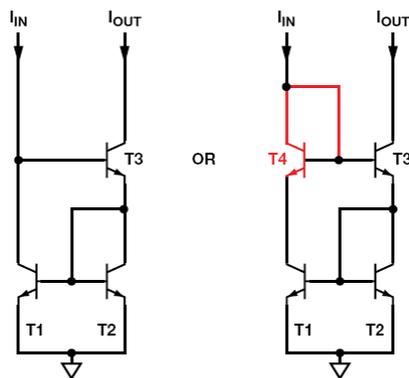


图 3. 威尔逊电流镜 T4 为可选器件, 但使用它可改善精度和动态范围

需要跨导放大器(voltage_in/current_out)时, 可使用一个单电源运算放大器、一个 BJT 或 FET (MOSFET 通常是最佳选择, 因为它不存在基极电流误差) 以及一个定义跨导值的精密电阻来组成, 如图 4 所示。

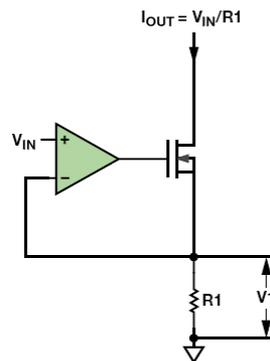


图 4. 跨导放大器 $V_{IN} - I_{OUT}$

该电路简单、价格不高。MOSFET 栅极上的电压可设置 MOSFET 中的电流和 R1, 使 R1 上的电压 V_1 等于输入电压 V_{IN} 。

若单芯片 IC 中需要用到电流镜, 则最好使用简单的晶体管电流镜。然而, 若采用分立式电路, 其匹配电阻高昂的价格 (价格高是因为需求量有限, 而非制造困难) 将使图 5 中的运算放大器电流镜成为最便宜的技术。该电流镜由跨导放大器和一个额外的电阻组成。

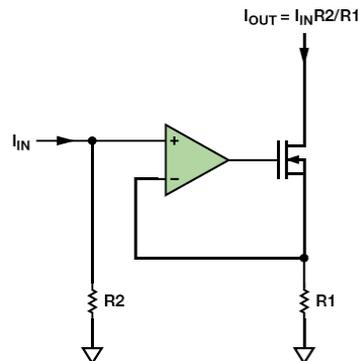


图 5. 运算放大器电流镜

电流镜具有相对较高、有时非线性的输入阻抗，因此它们必须由高阻抗电流源（有时亦称为*刚性*电流源）提供电流。若输入电流必须具有低阻抗吸电流能力，则需使用运算放大器。图6所示为两个低 Z_{IN} 电流镜。

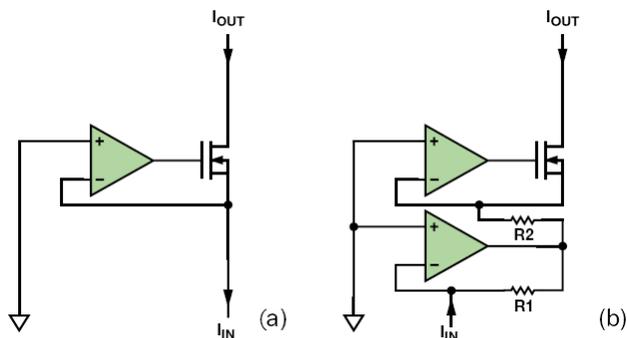


图 6. (a) 低 Z_{IN} 电流镜反相
(b) 低 Z_{IN} 电流镜同相

采用基本电流镜和电流源，则输入和输出电流极性相同。通常，输出晶体管的射极/源极直接或通过检测电阻接地，且输出电流从集电极/漏极流入负载，其他端子连接直流电源。这样做并非总是很方便，尤其当负载的一个端子需接地时。如图7所示，若电路采用其直流电源的射极/源极来构建，则不存在此问题。

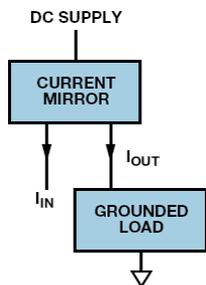


图 7. 接地负载电流镜

若电流或电压输入参考地，则必须使用电平转换。有多个电路可以实现；而图8中的系统在很多场合下都适用。这款简单的电路采用接地电流源驱动直流电源上的电流镜，从而驱动负载。注意，电流镜可能有增益，因此信号电流不需要像负载电流那么高。

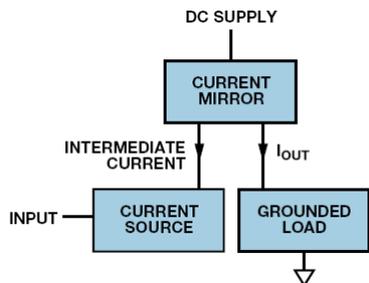


图 8. 电平转换电流镜

目前为止，我们讨论的电路都是单极性的——电流在一个方向上流动——但双极性电流电路也是可行的。最简单、使用最广泛的当数Howland电流泵，如图9所示。这款简单的电路有很多问题：它对电阻匹配的精度要求极高，以获得高输出阻抗；输入源阻抗会增加 $R1$ 电阻，因此它的数值必须非常低以最大程度降低匹配误差；电源电压必须比最大输出电压高得多；并且运算放大器的CMRR性能必须相对良好。

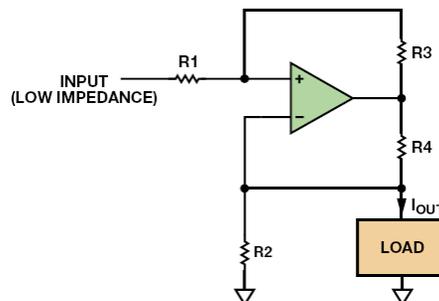


图 9. Howland 电流泵双极性电流输出

现在，高性能仪表放大器售价不高，因此使用一个运算放大器、一个仪表放大器和一个电流检测电阻组成双极性电流源极为方便，如图10所示。这类电路比Howland电流泵要更为简单，不依赖于电阻网络（除了集成仪表放大器的那种），且电压摆幅在每个电源的500 mV以内。

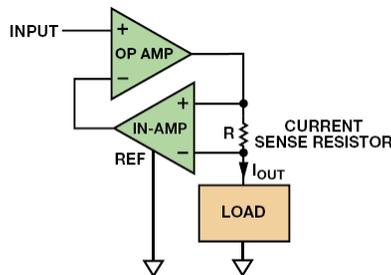


图 10. 双极性电流运算放大器

目前为止，我们讨论的电路都是具有精密电流输出的放大器。当然，它们能够与固定输入一同使用，提供精密电流源，但构建一个更简单的双端电流源也是可行的。低电流基准电压源ADR291具有10 μA 左右的待机电流，典型温度系数为20 $\text{nA}/^\circ\text{C}$ 。如图11所示，加入负载电阻后，则3 V至15 V电源范围内的基准电流为 $(2.5/R + 0.01)$ mA，其中R为负载电阻，单位是 $\text{k}\Omega$ 。

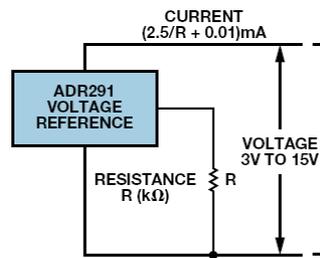


图 11. 双端电流源

若精度不是问题，且只要求刚性单极性电流源，则可以采用耗尽型JFET和一个电阻组成电流源。如图 12 所示，这种配置在温度发生变化时并不十分稳定，且对于给定的R值，各器件的电流可能有相当大的差异，但该配置简单而廉价。

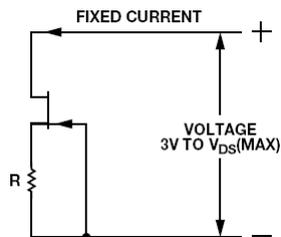


图 12. JFET 电流源

最近，我需要为某些LED设计电源。有一些工程师朋友认为我在设计供LED进行调光的可变电流源时会遇到一些困难。事实上，我只是简单地改装了笔记本电脑的“黑砖头”电源（花几美分从跳蚤市场买的）就搞定了。图 13 显示的是经过简单修改的电源电路，可为LED提供恒定电流。采用小输出电流，它可以固定输出电压正常工作。

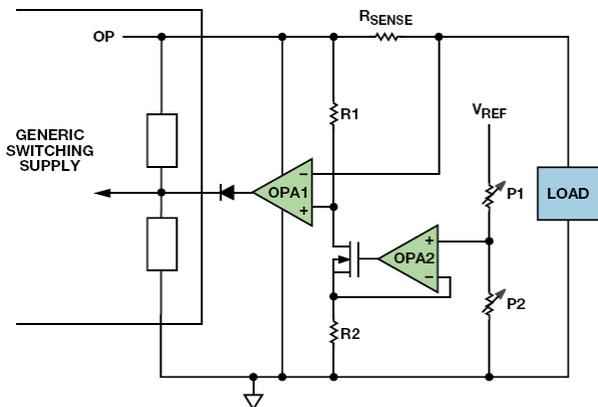


图 13. 修改黑砖头开关电源以提供限流输出

为了得到可变的电流，将基准电压——来自黑砖头或本地——施加于P1和P2所代表的电位计。OPA2和MOSFET通过R1输出小电流，在其上产生压降。负载电流流过检测电阻。若检测电阻上的电压由于负载电流超过R1上的压降而有所下降，那么OPA1输出将上升，覆盖砖头中的电压控制，并限制其输出电压，防止输出电流超过限值。

本文对于基本电流源构想的讨论并不等同于详细的应用笔记。某些电路要求进行进一步设计以限制发热或散热，从而确保放大器的稳定性以及不超过绝对最大额定值，并计算实际性能限值。有关这些电路的更详细分析，请参考优秀的电子教材，比如ADI网站，甚至维基百科。

参考文献

应用笔记AN-1208。利用数字电位计AD5292和运算放大器ADA4091-4构建可编程双向电流源。ADI公司，2013年。

电路笔记CN-0099。利用差动放大器AD8276和运算放大器AD8603构建高精度、低成本电流源。

电路笔记CN-0151。使用DAC、运算放大器和MOSFET晶体管构建多功能高精度可编程电流源。

Martin Murnane。应用笔记AN-968。电流源：方案与电路。ADI公司，2008年。

作者简介

James Bryant [james@jbryant.eu]从1982年起担任ADI欧洲地区的应用经理，拥有利兹大学物理与哲学学位。他是注册工程师(C.Eng.)、欧洲注册工程师(Eur. Eng.)、电机工程师协会会员(MIEE)以及对外广播新闻处(FBIS)会员。除了热衷钻研工程学外，他还是一名无线电爱好者，他的呼叫代号是G4CLF。

