

Application Note

使用电压基准的精密电流源和电流阱



Marcoo Zamora

摘要

电流源和电流阱是 LED 驱动器和传感器偏置等诸多应用中的常见电路。LM134 和 REF200 等常用电流基准旨在通过极少的外部元件来满足各种应用的需求，从而简化器件选择。但在部分时候，项目的要求会略高于这些器件能够满足的要求，或者项目中会设置限制因素，导致难以实现。对于这些情况，利用 TL431 等电压基准以及少量外部元件，可以形成具有高性能的简单电流偏置，从而灵活满足应用要求。德州仪器 (TI) 的 SBOA046 和 SLYC147 等其他应用手册中详细介绍了电流源和电流阱，但本应用手册将讨论之前未讨论过的其他常见电流源。

内容

1 精密电压基准.....	2
2 采用电压基准的电流阱.....	2
2.1 采用并联电压基准 ATL431LI (TL431 等效) 的电流阱.....	2
2.2 采用串联基准的电流阱.....	4
2.3 采用 REF3425 的电流阱.....	4
3 采用电压基准的电流源.....	5
3.1 采用 ATL431LI (TL431 等效) 的电流源.....	5
3.2 采用 LM4041-N 的电流源.....	6
3.3 采用串联电压基准的电流源.....	6
4 总结.....	7
5 参考资料.....	7
6 修订历史记录.....	8

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 精密电压基准

形成分立式精密电流基准的关键元件是精密电压基准。电压基准架构分为两种类型：并联和串联。并联基准的功能与齐纳二极管类似，串联基准的功能则与线性稳压器类似。串联基准是精密稳压器，通常能够提供比并联基准更高精度的电压。由于具有温度补偿的内部带隙，并联和串联基准能够提供不同级别的精度和架构，以满足大多数应用的要求。虽然理想的电流源可以向负载灌入和拉取电流，但通常会设置分立式电流源进行灌入或拉取。以下应用手册将讨论如何使用并联和串联基准来形成电流源和电流阱。

2 采用电压基准的电流阱

将晶体管、放大器和电压基准组合，可形成精密电流阱。图 2-1 显示了电流阱的基本概念，其中包含一个运算放大器，用于调节电阻器上的电压，以提供一个稳定的电流阱。在此配置中， V_X 表示并联或串联电压基准。 V_X 电压越低，此配置所需的余量就越小。在《使用电压基准进行设计的提示和技巧》中，详细介绍了该配置。电流阱通常用于 LED 驱动、电池放电、热电偶和传感器偏置等应用。

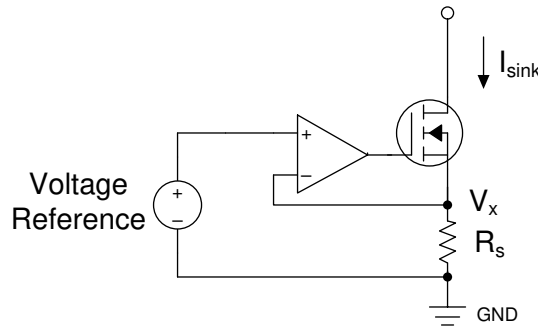


图 2-1. 电流阱方框图

2.1 采用并联电压基准 ATL431LI (TL431 等效) 的电流阱

并联基准支持固定电压和可调电压两种变体。最常见的可调并联基准是 TL431 和 LM4041-N，它们具有相似的功能，也具有不同的特性和功能，这些不同的特性和功能使其在不同的电流源和电流阱应用中更具优势。TL431 通过阴极和 REF 之间的反馈环路调节输出电压。而 LM4041-N 的反馈环路位于 FB 和阳极之间，因此 LM4041-N 的运行方式与 TL431 不同。

利用 TL431 器件可简化图 2-1 中的原理图——利用 TL431 的内部误差放大器省去额外的运算放大器。TL431 阴极和 REF 之间的反馈环路中可插入一个晶体管，使 R_S 两端的 V_X 调节为 V_{REF} 。这种采用 TL431 的集成适用于所有 431 型号产品，它们均采用图 2-2 中所示的相同架构。

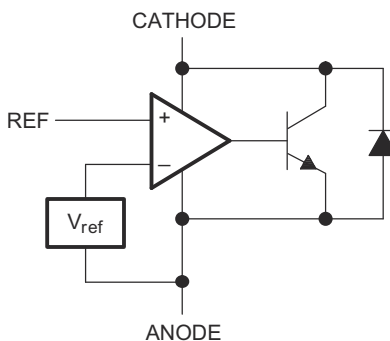


图 2-2. TL431 功能框图

图 2-3 是 ATL431LI 的原理图。该器件与 TL431 等效，其 $I_{KA(min)}$ 较低，因此可用于电流阱模式。该原理图在 LED 驱动器中较为常见，凭借其精度和带宽，确保可以使用极少的外部元件实现较高的精度。

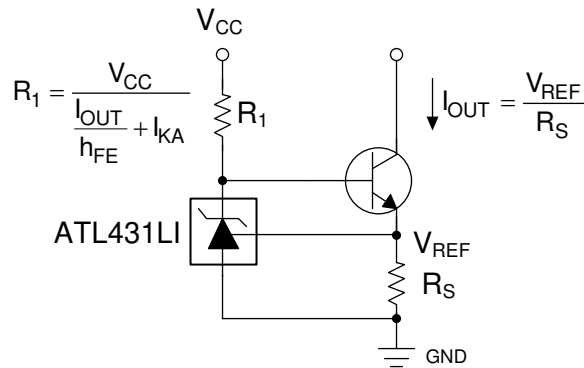


图 2-3. 采用 ATL431LI 的电流阱

- R_1 = 输入偏置电阻 (Ω)
- R_S = 电流检测电阻 (Ω)
- I_{OUT} = 输出电流源 (A)
- I_{KA} = 阴极电流 (A)
- V_{REF} = 内部反馈基准 (约为 2.5V)
- V_{CC} = 输入电源电压 (V)
- h_{FE} = 晶体管直流电流增益

晶体管的基极由 ATL431LI 控制。该器件可利用内部运算放大器的反馈，根据 R_S 两端的电压变化来改变基极电流。由于负载电流的唯一路径是流经 R_S ，因此控制 R_S 两端的电压即可控制流经负载的电流。通过在阴极和参考端之间放置一个偏置电容器，可以提高系统的稳定性，但这也降低电路的响应速度。此应用中的主要误差来源是 ATL431LI、 R_S 的精度，以及温度漂移。整个温度范围内的总误差约为 1% 至 2%，具体取决于 ATL431LI 的不同精度等级。

使用 ATL431LI 的主要优点在于：由于 ATL431LI 的 $I_{KA(min)}$ 较低，因此可以增大 R_1 的值，从而降低系统 I_Q 。在该电流阱应用中， I_{KA} 独立于 I_{OUT} ，这使得 I_{OUT} 精度不会太受到 I_{KA} 或 V_{CC} 变化的影响。ATL431LI 采用 X2SON 封装，与采用 SOT23-3 封装的 TL431 相比，尺寸要小得多。电流阱的典型应用是 LED 驱动，由于 ATL431LI 尺寸更小，因此在给定的 PCB 上可以安装更多的 LED。考虑到 TLV431 的 1.24V 带隙，在系统需要更大余量的情况下，也可以使用 TLV431 来代替 ATL431LI。

在图 2-3 等所示的电流阱应用中，只要了解了相关限制，NPN 管和 NMOS 管就可以相互替换使用。与 NMOS 管相比，NPN 管所需的余量电压更低，但由于基极电流，NPN 管的灌电流要求更高。当使用 NPN 管灌入 1A 及以上的大电流时，由于基极电流要求较高，就需要使用达林顿管。

2.2 采用串联基准的电流阱

图 2-1 表明形成精密电流阱时需要用到电压基准，而并联基准虽然可用于电流阱，但无法提供串联基准所能提供的高精度。REF3425 是一种高精度电压基准，可用于实现总误差为 0.1% 的电压基准，如图 2-4 所示。这种拓扑结构在为负载提供电压余量方面也具有额外的优势。余量取决于所使用晶体管的类型，如方程式 1 和方程式 2 所示。此余量是负载在保持稳定电流的同时可以具有的最大电压。例如，在 LED 驱动器等特定应用中，电压余量决定了串联 LED 的数量。使用 5V 电压轨时，当电压基准为 2.5V 时，可能难以串联两个红色 LED 或一个蓝色 LED。图 2-4 中使用分压器将 REF3425 电压降至 0.5V，从而增加余量。

$$V_{\text{headroom}} = V_{\text{DD}} - V_{\text{Rs}} - V_{\text{CE}} \quad (1)$$

$$V_{\text{headroom}} = V_{\text{DD}} - V_{\text{Rs}} - V_{\text{DS}} \quad (2)$$

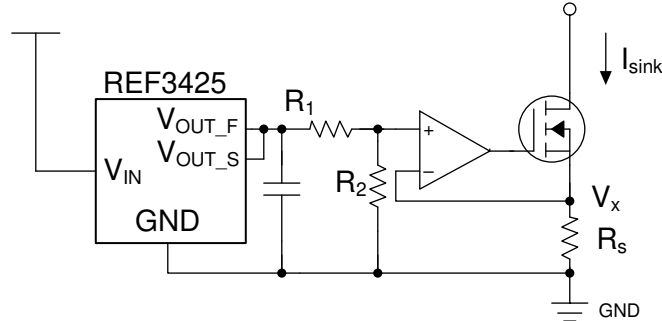


图 2-4. 采用带分压器的串联基准的电流阱

2.3 采用 REF3425 的电流阱

REF3425 等电压基准可作为单有源器件设计用于电流阱应用。通过 REF34 系列的强制和检测输出，REF3425 可以控制和调节 NPN，如图 2-5 所示。在此应用中，为确保实现适当调节，REF3425 的供电电压必须高于 $V_{\text{OUT}} (2.5\text{V}) + V_{\text{BE}} (0.7\text{V})$ 。

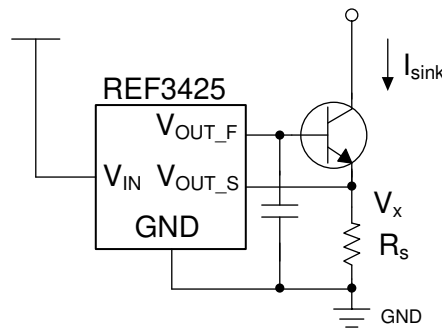


图 2-5. 采用 REF3425 的电流阱

3 采用电压基准的电流源

采用与电流阱相似的结构时，也可形成一个精密电流源。两者的主要区别在于电流源向负载提供电流，并使电流流向地，从而支持不同类型的应用。电流源可用于为电池、LED 驱动、温度传感器偏置和万用表充电。电流源的优势在于其负载参考端可直接连接到独立的地。通过将负载直接接地，可将负载电压直接与地进行比较，从而测量传感器的电压和电流。

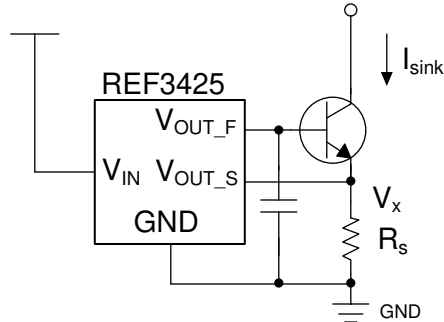


图 3-1. 采用电流源的温度传感器

3.1 采用 ATL431LI (TL431 等效) 的电流源

通过在 GND 侧连接负载，ATL431LI 也可以用作电流源。使用 ATL431LI 作为电流源的主要缺点是，电流的精度受到 ATL431LI 偏置电流和流经晶体管的电流的综合影响。为了获得更准确的电流阱， I_{R_s} 必须显著大于 I_{KA} 偏置电流。

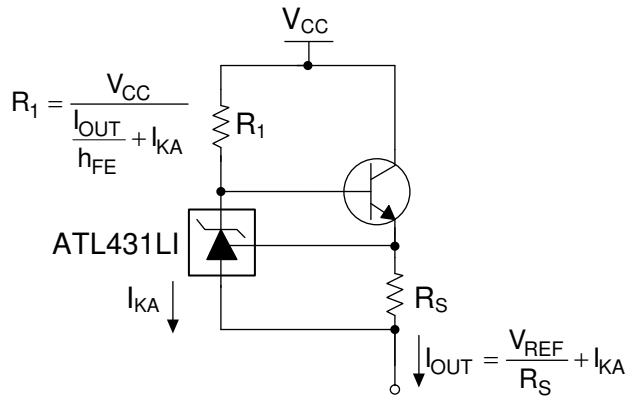


图 3-2. 采用 ATL431LI 的电流源

SLYT768 相关文档中对该应用电路进行了更详细的探讨，虽然相关探讨更侧重于 TLVH431，但其应用概念对 ATL431LI 和 TL431 同样适用。

3.2 采用 LM4041-N 的电流源

不同于 ATL431LI，TI 的 LM4041-N ADJ 由于其 FB 上的反馈电压相对于阴极设计，在电流源应用中更具优势。这使得电流源配置中的 LM4041-N ADJ 能够实现 I_{OUT} 独立于 I_{KA} 。LM4041-N ADJ 优于 ATL431LI 之处在于更高的精度和简化的原理图。

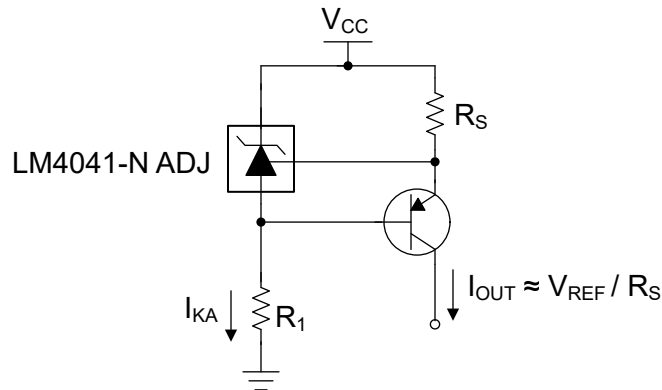


图 3-3. 采用 LM4041-N ADJ 的电流源

- R_1 = 输入偏置电阻 (Ω)
- R_S = 电流检测电阻 (Ω)
- I_{OUT} = 输出电流源 (A)
- I_{KA} = 阴极电流 (A)
- V_{REF} = 内部反馈基准 (约为 1.2V)
- h_{FE} = 晶体管直流电流增益

供应给负载的电流由 R_S 电阻器和 LM4041-N 控制，LM4041-N 会强制在该电阻器两端产生 1.2 伏的压降。PNP 管根据来自 LM4041-N 的反馈调节流经负载的电流。如果供应给负载的电流减小，LM4041 的内部运算放大器会通过从晶体管的基极消耗更多电流，将 R_S 两端的电压重新调整到正确值。 I_{OUT} 会因基极电流而减小，可使用 h_{FE} 计算基极电流。对于高精度应用，可以使用 PNP 达林顿管来减少基极电流消耗。

3.3 采用串联电压基准的电流源

串联电压基准可用于提高电流源的精度。SBVA001 和 SBOA046 相关文档中演示了如何将 REF102 用作电流源和电流阱。REF102 电流源应用可扩展到其他串联电压基准。

4 总结

5 参考资料

- 德州仪器 (TI), [电流源和电流阱的实现和应用](#), 应用手册。
- 德州仪器 (TI), [使用电压基准进行设计的提示和技巧](#), 电子书。
- 德州仪器 (TI), [适用于工业应用的高侧电流源](#), 模拟设计期刊文章。

6 修订历史记录

Changes from Revision * (June 2020) to Revision A (April 2026)	Page
• 更新了整个文档中的表、图和交叉参考的编号格式.....	2
• 更新了采用 LM4041-N ADJ 的电流源的图片并删除了多余的行项目。.....	6
• 添加了 <i>摘要</i> 部分.....	7

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 © 2026，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月