

# 如何使用自适应电源将 PLC 输出功耗降低一半

Ahmed Noeman, systems engineer, precision amplifiers

4-20mA 电流环路是控制系统的常见信号方案。现场变送器将传感器读数以 4-20mA 信号发送，而可编程逻辑控制器 (PLC) 的 4-20mA 输出则用于控制许多执行器。PLC 模块的通道数增加是一个主要的工业趋势，但这给 PLC 电流输出模块带来了功耗方面的挑战。

图 1 所示的 PLC 电流输出通道的输出级由电源电压 ( $V_S$ ) 供电，并连接到外部负载 ( $R_L$ )。如果指定的最大  $R_L$  为  $800\Omega$ ，并且假设余量电压 ( $V_H$ ) 为 4V，则为了驱动 20mA， $V_S$  需要  $\geq 20V$ 。

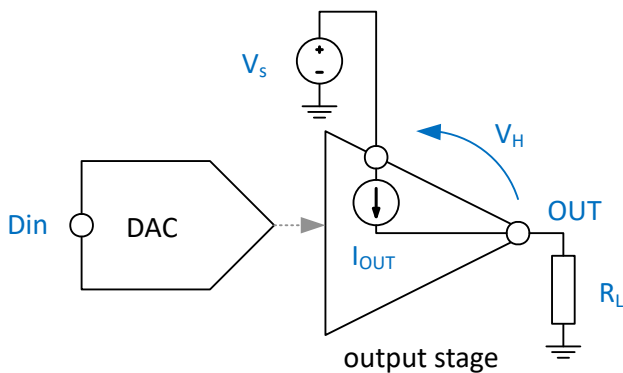


图 1. 输出级上的功率损耗。

如果将同一模块连接到小负载或短路状态，则通道内的功率损耗将为  $V_H \times 20mA = 0.4W$ 。这个功耗相当高。许多模块通过将最大负载限制在  $600\Omega$  来降低总功耗。制造商采用的另一种方法是对模块输出进行降额，即根据环境温度决定用户可以启用的通道数以及每个通道的最大电流。

方程式 1 计算输出级中的功率损耗。

$$P_{\text{loss}} = I_{\text{OUT}}(V_S - R_L I_{\text{OUT}}) \quad (1)$$

## 备注

实现自适应电源最便捷的方法是使用一款本身就支持自适应电源并集成了输出级的 DAC。TI 的单通道 DAC8771 和四通道 DAC8775 在每个通道上集成了一个降压/升压转换器， $V_S$  范围为 12V 至 36V，每个通道仅使用一个外部电感器即可产生正负可变电源（最大跨度为 36V）。

## 选择合适的 DC/DC 转换器

由于以下这些相互矛盾的要求，为自适应电源找到合适的 DC/DC 转换器具有挑战性：

- 在低负载 (4 -20mA) 下具有高效率。这通常在脉冲频率调制 (PFM) 模式下可以实现，因此 DC/DC 必须支持此模式。与强制脉宽调制 (PWM) 模式相比，效率预计可提高约 50%。
- 相对较高的峰值电流 (>0.5A) 以实现快速稳定。峰值电流除以去耦电容决定了输出的最大电压变化率。
- $V_{\text{OUT}}$  范围为 4V 至 24V，可根据输入电压通过降压或升压转换器实现。
- 使用相对较小的电感器来减小解决方案尺寸。需要较高的开关频率 ( $\geq 300kHz$ )。
- 采用小型封装。

满足这些要求的部分器件包括：

LMR516xx: 65V 输入，400kHz/1.1MHz 的 PFM 版本，0.6A/1A 输出电流

LMR544xx: 36V 输入，1.1MHz 的 PFM 模式，0.6A/1A 输出

LMR3650x: 3V-65V 输入，可调 200kHz-2.2MHz，0.1A/0.15A 输出（如果快速稳定不是关键要求）

### 控制 DC/DC 输出

非固定 DC/DC 转换器使用反馈节点，通过高增益放大器保持在恒定的参考电压电平。通过在转换器输出电压和反馈节点之间连接电阻分压器，您可以控制输出电压，如图 3 所示。

由于转换器保持 VREF 固定，您可以使用方程式 2 计算 VS。

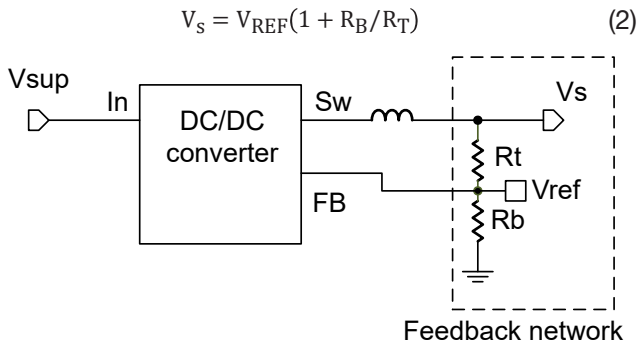


图 2. DC/DC 转换器的反馈网络。

改变输出电压需要改变反馈分压器。图 3 显示了改变分压器的三种不同方式：可变拉电流 (a)、可变灌电流 (b) 或使用可变电压源和电阻器 (c)。图 3 还显示了传递函数（作为控制变量的电流或电压与 VS 的关系）。

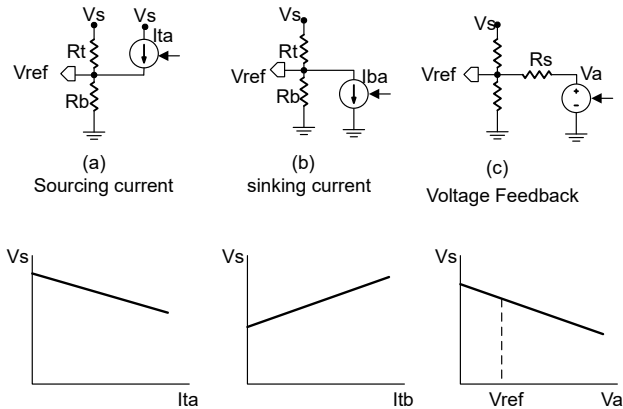


图 3. 自适应控制电路及其传递函数。

在每种情况下，对 VREF 节点应用基尔霍夫电流定律，得到情况 A 的传递函数：

$$I_{ta} + (V_S - V_{REF})/R_t = V_{REF}/R_b \quad (3)$$

重新排列方程式 3 后得到方程式 4：

$$V_S = (1 + R_t/R_b)V_{REF} - I_{ta}R_t \quad (4)$$

方程式 5 显示了情况 b 的类似计算：

$$V_S = (1 + R_t/R_b)V_{REF} + I_{ba}R_t \quad (5)$$

方程式 6 计算情况 c：

$$V_S = (1 + R_t/R_b + R_t/R_s)V_{REF} - R_t/R_s V_a \quad (6)$$

根据反馈引脚上的参考电压电平以及所选的电阻值，通过简单的计算就可以找到控制变量的合适范围，以实现所需的 VS 范围。

### 使用拉电流的示例电路

图 4 显示了使用运算放大器、PMOS 晶体管 M1 和电阻器构建的高侧电流源。公式 8 计算产生的电流为：

$$I_{ta} = (V_S - V_{OUT})/R_c \quad (7)$$

您需要考虑运算放大器的输入/输出和电源范围以及 M1 的最大栅源电压 (VGS)。通过移除运算放大器进一步简化电路，方程式 8 计算产生的电流为：

$$I_{ta} = (V_S - V_{OUT} + V_{th})/R_c \quad (8)$$

这种方法节省了功耗、成本和面积，但会因阈值电压 (Vth) 的变化而导致电流存在一定的不精确性。

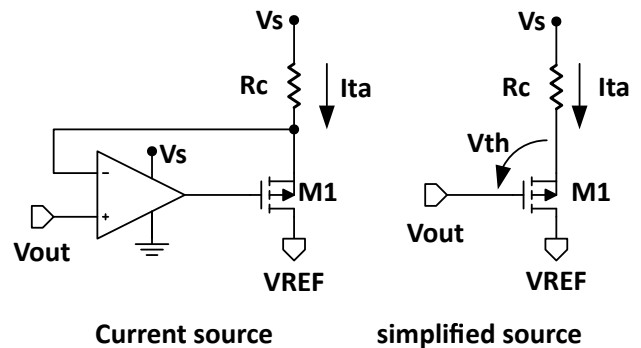


图 4. 电流源反馈电路。

TI XTR200 是一款 4-20 mA 电流变送器，其 VS 范围为 8V 至 60V，VH 为 3V。如果负载高达 800Ω，在 20mA 电流下，VOUT 最高可达 16V。该 VS 必须跟随输出变化。当



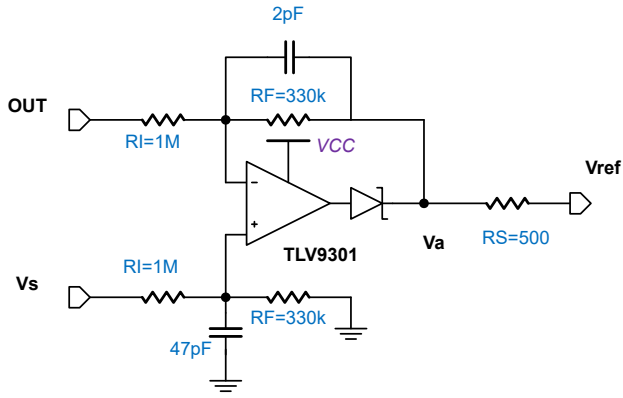


图 8. 差分放大器。

运算放大器输出端的二极管用于防止拉电流转换为灌电流，因此，如果运算放大器的输出电压低于反馈节点，环路将会断开。这样可以保持由  $R_t$  和  $R_b$  设定的  $V_S$  上限。反馈路径中的电容器对于包含 DC/DC 的整个大环路的动态稳定性至关重要。

图 9 是一个简化的整体电路图。

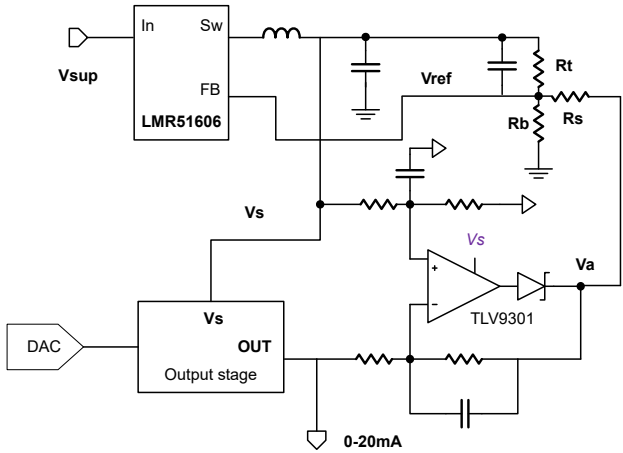


图 9. 采用差分放大器的自适应电源简化原理图。

**备注**

动态性能：输出级对 DAC 输出变化的响应通常很快。相比之下，DC/DC 转换器的响应要慢得多，因此  $V_S$  无法以相同的速度跟随输出。限制差分放大器的带宽有助于平滑此变化，并使转换器能够正常斜升。此外，如果 DAC 输出本身不支持压摆率控制，则有必要限制其压摆率。您必须将较大的 DAC 代码变化拆分为在较长时间内的较小变化，从而产生阶梯状的 DAC 输出，使 DC/DC 转换器能够建立稳定状态，而不会出现过冲或振荡。

**测量和性能**

图 10 展示了不同输出电流以及各种负载下的功率损耗。功率损耗的计算方法为 DC/DC 转换器的输入功率减去输出到负载的功率。功率损耗从未超过 180mW，这意味着节省了超过 50% 的功耗。

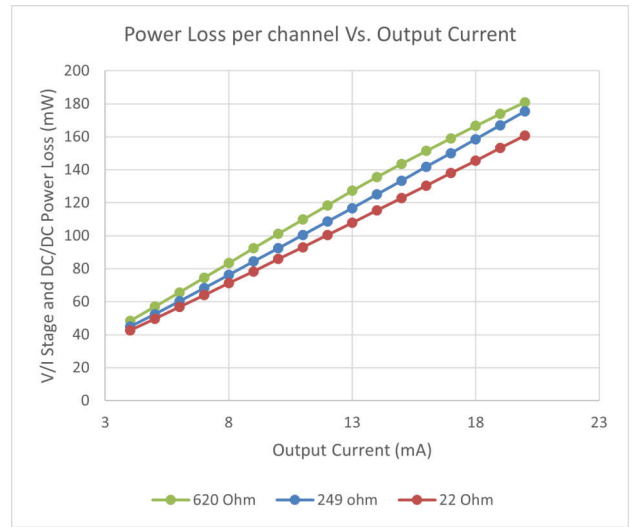


图 10. 功率损耗与输出电流之间的关系。

图 11 显示了不同电流和负载下的效率。DC/DC 转换器的效率计算方法为转换器的输出功率除以输入功率。效率范围在 75% 至 90% 之间。

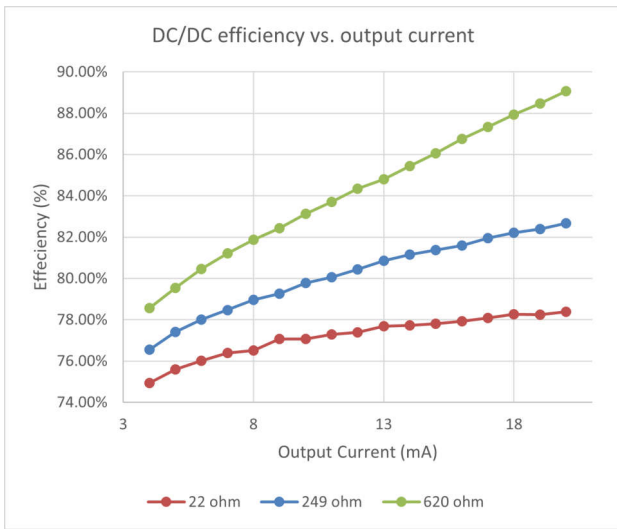


图 11. DC/DC 效率与输出电流之间的关系。

### 精度和噪声

使用高分辨率模数转换器测量 DC/DC 纹波对输出的影响，分别在 4mA 和 20mA 输出电流、带 640Ω 负载的条件下，各采集了 16,000 个样本。

表 1 总结了噪声计算结果及对应的精度水平。

输出	4mA	20mA	单位
平均值	4.019	20.17	mA
均方根 (RMS) 噪声	325	530	nA
峰值间噪声	2.78	3.51	μA
RMS 分辨率	18.2	17.5	位

表 1. 自适应电路的噪声性能。

结果表明，自适应电源技术不会影响输出级性能，并可支持 16 位输出分辨率。

### 稳定时间和动态性能

自适应电源环路的稳定时间和稳定性非常重要。图 12 显示，通过对输出级的输入进行简单的阶梯化处理，在 200μs 内将输入斜升至满量程，可以得到稳定的输出。

图 12 显示了 560Ω 负载上 10V 的阶跃，输出级的满量程输入电压经过七个阶跃斜升至 2.5V 的满量程。该图还显示了稳定时间小于 200μs。

下降沿较慢，因为去耦和输出电容器需要通过电路和外部负载放电。这不会影响性能，也不关键。

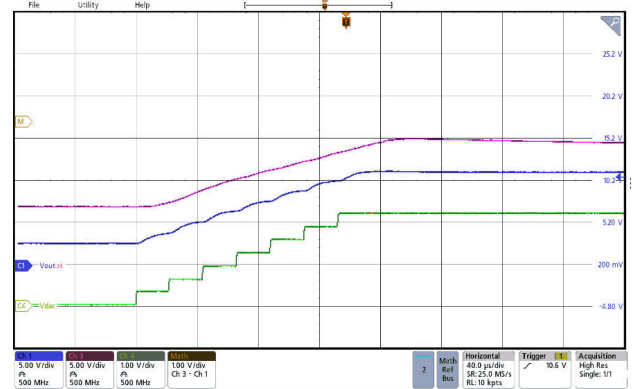


图 12. 输出级和自适应电源的稳定性能。

### 结语

测量结果表明，与固定电源方案相比，自适应电源技术可节省 50% 以上的功耗，从而带来了切实的收益。17.5 至 18.2 位的 RMS 分辨率证明了热管理改进不会以牺牲信号质量为代价。随着 PLC 模块不断在更小的封装尺寸内集成更多通道，本文介绍的技术已从优化策略转变为下一代工业自动化系统的实际必需品。

## 其他资源

- 请参阅 TI 开发人员会议演示文稿“[利用动态电压调节节省系统功耗](#)”。
- 查看[具有自适应电源管理功能、功耗低于 1W 的四通道模拟输出模块参考设计](#)。
- 如需详细了解前馈电容器在提高动态性能方面的作用，请阅读应用报告“[采用前馈电容器优化内部补偿直流/直流转换器的瞬态响应](#)”。

## 关于作者

**Ahmed Noeman** 是德州仪器 (TI) 的系统工程师，专注于为工业应用定义集成解决方案。Ahmed 在半导体领域拥有超过 20 年的经验，涉及系统设计、IC 设计和 IC 验证等领域。Ahmed 拥有埃及艾因夏姆斯大学的电气工程硕士学位和学士学位。

**重要声明:** 本文所提及德州仪器 (TI) 及其子公司的产品和服务均依照 TI 标准销售条款和条件进行销售。建议客户在订购之前获取有关 TI 产品和服务的最新和完整信息。TI 对应用帮助、客户的应用或产品设计、软件性能或侵犯专利不负任何责任。有关任何其它公司产品或服务的发布信息均不构成 TI 因此对其的认可、保证或授权。

所有商标均为其各自所有者的财产。

## 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