



Larry Spaziani

摘要

开关模式电源初级电流通常使用功率电阻器来检测。使用运算放大器放大电流检测信号能够降低成本并提高噪声性能和效率。本报告回顾了使用运算放大器电路的优势，并分析了选择适用运算放大器所需的设计标准。

内容

1 引言.....	2
2 电路设计.....	3
3 优势.....	4
4 选择运算放大器.....	5
5 结论.....	7
6 修订历史记录.....	7

插图清单

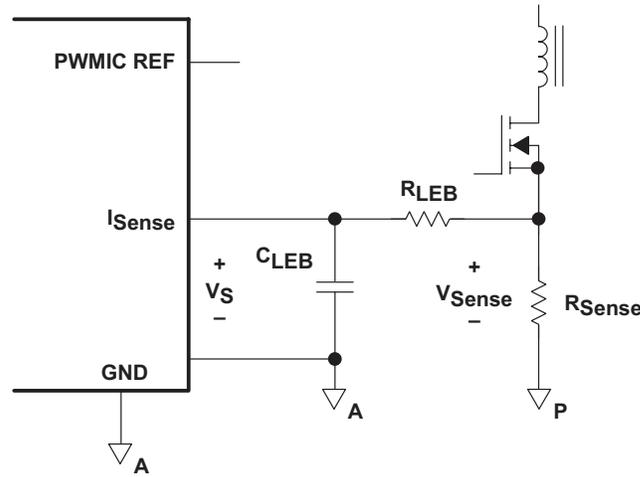
图 1-1. 用于感应初级侧开关电流的典型 R_{Sense} 方法和推荐的运算放大器方法.....	2
图 4-1. 电流感应波形.....	5

表格清单

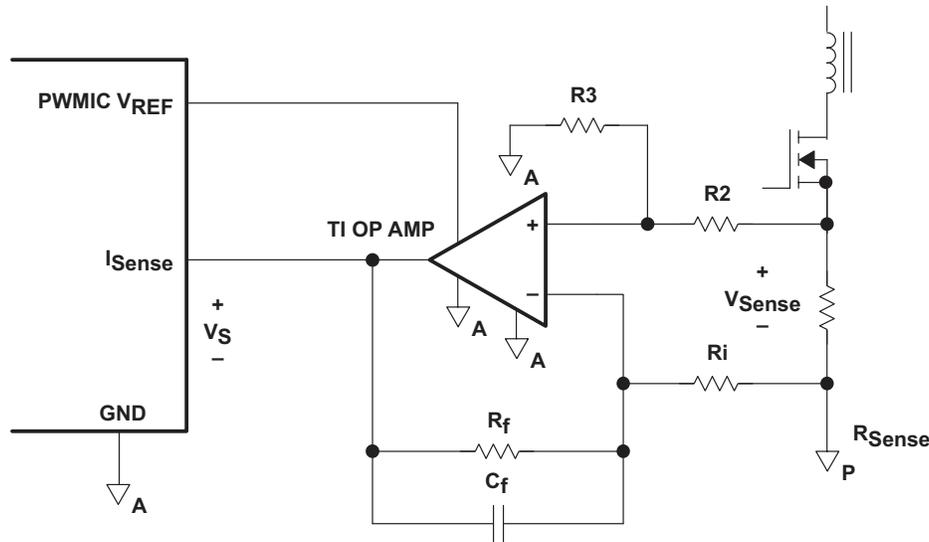
表 5-1. 推荐用于电流感应的德州仪器 (TI) 运算放大器.....	7
--------------------------------------	---

1 引言

开关模式电源几乎总是需要相关人员了解开关电流，通常在电源变压器的初级侧感应到开关电流。电源设计人员的电流感应解决方案¹回顾了多种感应开关电流的方法。在低功率开关模式电源中，较为常用的方法是使用感应电阻器。使用的感应电阻器通常是高功率、低电感电阻器，这会显著增加电源设计的成本和功耗。该电路如图 1-1 (a) 所示。



(a) Typical Rsense-Configured



(b) Amplifying a Small Signal Using a TI Differential Amplifier

图 1-1. 用于感应初级侧开关电流的典型 R_{Sense} 方法和推荐的运算放大器方法

为了克服这种功率电阻在成本和功耗方面造成的困难，推荐使用图 1-1 (b) 中的电路。使用由低功耗运算放大器和分立电阻器组成的差分放大器可带来多项优势，包括更低的功耗（效率）、抗噪性、成本和可编程性。

¹ 电源设计人员的电流感应解决方案，Bom Mammano，Unitrode 电源研讨会 SEM-1200，1997 年。

2 电路设计

开关模式电源通常通过 MOSFET 切换变压器初级侧的电流，并使用感应电阻器 (R_{Sense}) 测量初级电流，如图 1-1 (a) 所示。脉宽调制器 IC (PWM) 通常需要一个电流感应信号 (V_S) 以提供短路保护和/或用于电流模式控制。 V_S 的峰值取决于所使用的 PWM IC，但通常为 1V。

图 1-1 (a) 中感应电阻 R_{Sense} 的值根据初级侧电流峰值 (I_{Peak}) 和所需 V_S 值来选择。因此， R_{Sense} 由以下公式确定：

$$R_{sense} = \frac{V_s}{I_{peak}}$$

R_{Sense} 中的功耗基于初级侧电流 (I_{rms}) 的 RMS 值，其取决于峰值以及波形和占空比。功耗由以下公式得出：

$$P_{sense} = I_{rms}^2 \times R_{sense}$$

例如，设：

$$I_{Peak} = 6.67A$$

$$I_{rms} = 4A$$

$$V_S = 1V$$

这些值导致 R_{Sense} 为 0.15Ω ， R_{Sense} 中的功耗等于 2.4W。通常，在此应用中会使用 5W 额定电阻器。

使用图 1-1 (b) 中的电路可显著降低 R_{Sense} 的成本和功耗。首先，让我们回顾一下图 1-1 (b) 中的电路是如何工作的。该运算放大器电路配置为典型的差分放大器。该电路的工作原理是将差分感应信号 (V_{Sense}) 乘以运算放大器电路的差分增益。如果 R_f 为 R_3 且 R_i 为 R_2 ，则该增益由以下公式得出：

$$Gain = \frac{R_f}{R_i} \text{ and } V_s = V_{sense} \times \frac{R_f}{R_i}$$

根据前面的示例，假设设计目标是使用具有标准值的低功率感应电阻器，例如额定功率为 0.5W 的 0.01Ω 电阻器，并将该电阻器的功耗限制为不超过 0.25W。根据这些信息，可计算出该电路的增益。

$$P_{sense} = I_{rms}^2 \times R_{sense} = (4 A_{rms})^2 \times 0.01 \Omega = 0.16 W$$

$$V_{sense} = I_{peak} \times R_{sense} = 6.67 A_{pk} \times 0.01 \Omega = 66.7 mV$$

$$Gain = \frac{V_s}{V_{sense}} = \frac{1V}{66.7 mV} = 15$$

根据这些结果，在图 1-1 (b) 中，设 R_f 为 R_3 等于 $15k\Omega$ ， R_i 为 R_2 等于 $1k\Omega$ 。

3 优势

功耗和效率：

第二个示例中使用的感应电阻器 (R_{Sense}) 的功耗提高了 $2.4\text{W} - 0.16\text{W} = 2.24\text{W}$ ，这也会使效率显著提高。

电路板面积：

额定功率的降低导致感应电阻器小得多。例如，考虑以下来自 Vishay Dale (www.vishay.com) 的感应电阻器：**WSR-3 3-W** 表面贴装电阻器和 **WSL 1/2-W** 表面贴装电阻器。3W 器件需要的电路板面积是 1/2W 器件的六倍，并且还需要很大的覆铜区来散热。1/2W 电阻器与 SOT-23 运算放大器和感应电阻器相结合，可产生大致相同的电路板总面积。因此，在电路板面积方面没有明显的优势或劣势。

成本：

此设计中的成本权衡不仅仅是在高功率电阻器的成本和低功率电阻器加上运算放大器电路的成本之间做出权衡。关于成本，还需要考虑以下方面：

- 缩减的物料清单和减少的库存：定制或半定制电源设计通常为每个设计所需的特定峰值电流和感应电压选择感应电阻器。这可导致各个电源设计都需要唯一的值和额定功率，从而导致公司库存中有许多感应电阻器。借助一个标准组件（例如 $0.01\ \Omega$ 0.5W 电阻器），可通过更改运算放大器电路周围电阻器的增益来定制各个电源设计。批量购买同种电阻器也有助于降低成本。
- 穿孔构造和表面贴装：应将制造大型穿孔功率电阻器的成本与制造标准表面贴装组件（例如低功率感应电阻器、IC 和标准 SMD 电阻器）的成本进行比较。
- 热性能：应考虑因更高的功耗而产生的额外冷却成本。

可编程性：

开关模式电源的峰值电流会因微小的设计或输出规格变化或各种其他原因而发生变化。运算放大器电路的增益可轻松调整，如果无需更改感应电阻则可改变电路性能，从而为电源设计人员在可编程性方面提供便利。这些变化可能是由于控制回路的变化，或者是电源规格的变化引起的，例如输入电压范围或输出电压和电流的变化，所有这些都会影响初级侧峰值电流。

噪声性能：

该运算放大器设计的几个因素将提升感应到的电流信号抗噪性方面的性能：

- 小电感电阻器：额定功率越低的电阻器，其器件机身越小，并且几乎总是表面贴装器件。这导致串联电感显著减少，在电流信号上产生更少的振铃和噪声尖峰。
- 差分感应：电流信号的差分感应可准确测量初级侧电流，而接地变化（接地反弹）不会成为影响因素。在图 1-1 (a) 的电路中，情况并非如此，其中电流感应是单端的。
- 接地分离：PWM IC 经常使用感应电压 (V_S) 进行控制和限流保护。必须将 PWM IC 的模拟接地与感应电阻器的噪声电源接地隔离。图 1-1 (b) 的电路可让设计人员使用略微不同的接地。它还可让电源设计人员使用运算放大器缓冲信号，将感应电阻器放置在远离 PWM IC 的位置。运算放大器应以与 PWM IC 相同的模拟接地为接地基准。

4 选择运算放大器

通道大小和数量：

选择的运算放大器通常是单通道运算放大器，因为只需要一个。德州仪器 (TI) 提供采用 SOT-23、MSOP 8 引脚和 SOIC 8 引脚封装的单通道运算放大器。

轨到轨输入或输出：

运算放大器的输入信号是感应电压 (V_{sense})，有接地基准。但是， V_{sense} 的峰值电压通常非常低，不会接近运算放大器的正电源电压。因此，不需要轨到轨输入运算放大器。所有德州仪器 (TI) 的单电源 CMOS 运算放大器都能够接受低至接地的输入信号。

运算放大器的输出信号是 V_s 信号，通常在 0V 至 1V 之间摆动。进入 PWM IC 的负载电流通常非常小，因此不会明显限制对运算放大器的选择。几乎所有德州仪器 (TI) 的单电源 CMOS 运算放大器都能够在输出端摆动至接地。进入 PWM IC 的负载电流通常非常小，因此不会明显限制对运算放大器的选择。

为运算放大器供电：

建议从电源中使用的 PWM IC 的基准输出为运算放大器供电。该基准电压通常为 5.0V，但也可以更低。TI 提供可在低至 2.5V 的电源电压下工作的单通道运算放大器，例如 TLV2771。PWM IC (例如 UC384x 和 UCC380x 系列 PWM 控制器) 的基准输出通常能够提供几毫安的输出驱动，足以为许多运算放大器供电。运算放大器应接地至 PWM IC 使用的同一模拟接地。运算放大器所需的电流是 I_{CC} 电流和驱动电流。建议反馈电阻 (R_f) 的值在 10k Ω 和 100k Ω 之间，以限制驱动电流。

压摆率和增益带宽积：

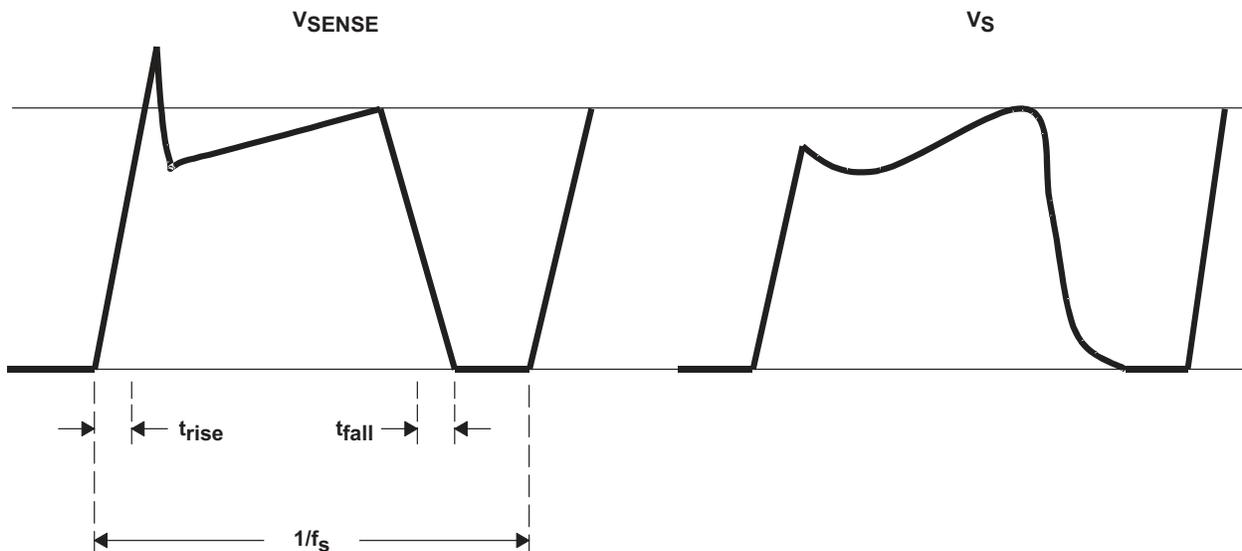


图 4-1. 电流感应波形

图 4-1 所示为 V_{Sense} (感应电阻器上的电流感应信号) 和 V_s (PWM IC 所需的滤波信号) 的示意图。 V_{Sense} 的前沿包含由电源中的寄生元件引起的尖峰，包括二极管的反向恢复和 MOSFET 的电容。该尖峰是不可取的，可使用反馈电容 C_f 将其滤除，如图 1-1 (b) 所示。滤波器时间常数通常设置为该尖峰上升时间的三到四倍。滤波器极必须设置得足够低以过滤前沿尖峰，但又不能太低而导致电流斜坡信号失真。因此，滤波器极必须设置得高于开关模式电源的开关频率 (f_s)。这可通过以下公式表示：

$$f_c = \frac{1}{2 \times \pi \times R_f \times C_f} = \frac{1}{8 \times \pi \times t_{rise}} \text{ and } f_c \geq 3 \times f_s$$

因此，对于 100ns 的上升时间 (t_r) 和 100kHz 的开关频率，该转角频率将设置为 400kHz。在本例中，限制因素是时间常数。

由于电路滤除 f_c 以上的频率，所用运算放大器的增益带宽 (GBW) 积可通过以下公式轻松计算：

$$GBW \geq fc \times \text{Gain} = fc \times \frac{Rf}{Ri}$$

前面的示例中增益设为 15，转角频率为 400kHz，由此计算得出所需运算放大器的 GBW 为 6MHz。

图 4-1 中波形的压摆率 (SR) 可由下降斜率决定，等于 $V_{\text{Peak}}/t_{\text{fall}}$ 。然而，电路的带宽明显受到极的 RC 时间常数的限制。可假定运算放大器的压摆率应超过滤波器时间常数的限制。因此，压摆率可由以下公式确定：

$$SR \geq \frac{V_{\text{peak}}}{\tau} = \frac{V_{\text{peak}}}{Rf \times Cf} = V_{\text{peak}} \times 2 \times \pi \times fc \quad \text{Volts/秒}$$

接着前面的示例，将通过以下公式得出 SR：

$$SR \geq V_{\text{peak}} \times 2 \times \pi \times fc = 1 \text{ V} \times 2 \times \pi \times 400 \text{ kHz} = 2.5 \text{ V}/\mu\text{s}$$

5 结论

使用运算放大器对开关模式电源中的电流感应信号进行差分放大，这在成本、可编程性、性能和功率方面具有优势。本文探讨了如何为该特定应用选择合适的运算放大器。表 5-1 中详细介绍了为该应用推荐的几种单电源运算放大器，并列出了重要参数。TLV2771 和 TLC081 分别非常适合 3.3V 和 5V 系统中的该应用。

表 5-1. 推荐用于电流感应的德州仪器 (TI) 运算放大器

运算放大器 P/N	电源电压 [V]	电源电流 [mA] (最大值)	压摆率 [V/us] (典型值)	GBW [MHz] (典型值)	SMD 封装
TLV2770 TLV2771	2.5 - 5.5	2.0	9.0	4.8	SOT - 23、SOIC - 8、MSOP - 8
TLV2361	2.0 - 5.0	2.5	3.0	7.0	SOT - 23
TLV2470 TLV2471	2.7 - 6.0	0.75	1.4	2.8	SOT - 23、SOIC - 8
TLV2231	2.7 - 10.0	1.2	1.6	2.0	
TLC081	4.5 - 16.0	2.5	16.0	10.0	MSOP - 8、SOIC - 8
TLC2201	4.6 - 16.0	1.5	2.5	1.6	SOIC - 8

6 修订历史记录

注：以前版本的页码可能与当前版本的页码不同

Changes from Revision * (March 2000) to Revision A (June 2021)

Page

- 更新了整个文档中的表格、图和交叉参考的编号格式。..... 2

重要声明和免责声明

TI 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、某特定用途方面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 产品的应用。严禁对这些资源进行其他复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。您应全额赔偿因在这些资源的使用中对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务, TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 TI 的销售条款 (<https://www.ti.com/legal/termsofsale.html>) 或 [ti.com](https://www.ti.com) 上其他适用条款/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。

邮寄地址: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265

Copyright © 2021, 德州仪器 (TI) 公司

重要声明和免责声明

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、某特定用途方面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功能安全、信息安全、监管或其他要求。

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 产品的应用。严禁对这些资源进行其他复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。您应全额赔偿因在这些资源的使用中对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 的销售条款](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款/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。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

邮寄地址：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265

Copyright © 2022，德州仪器 (TI) 公司