

电流检测技术在现今的生活与工作中都有广泛的应用，许多的系统中都需要检测流入和流出的电流大小，检测电流大小能够避免器件出错。所以我们今天的主角就是“开关模式电源的电流检测技术”。

## 基本知识谈

电流模式控制由于其高可靠性、环路补偿设计简单、负载分配功能简单可靠的特点，被广泛用于开关模式电源。电流检测信号是电流模式开关模式电源设计的重要组成部分，它用于调节输出并提供过流保护。图 1 显示了 ADI LTC3855 同步开关模式降压电源的电流检测电路。LTC3855 是一款具有逐周期限流功能的电流模式控制器件。检测电阻  $R_S$  监测电流。

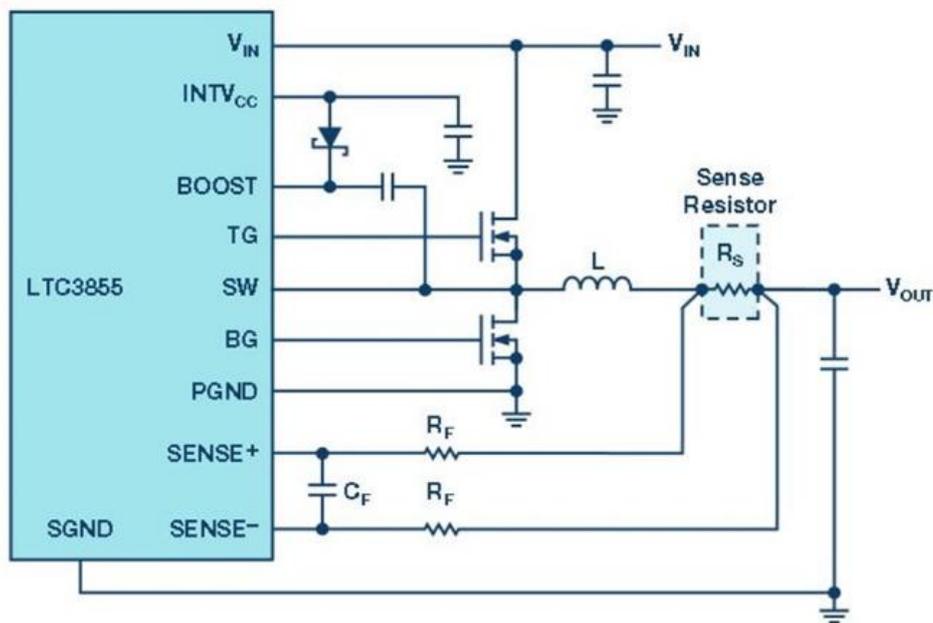


图 1. 开关模式电源电流检测电阻( $R_S$ )

图 2 显示了两种情况下电感电流的示波器图像：第一种情况使用电感电流能够驱动负载（红线），而在第二种情况下，输出短路（紫线）。

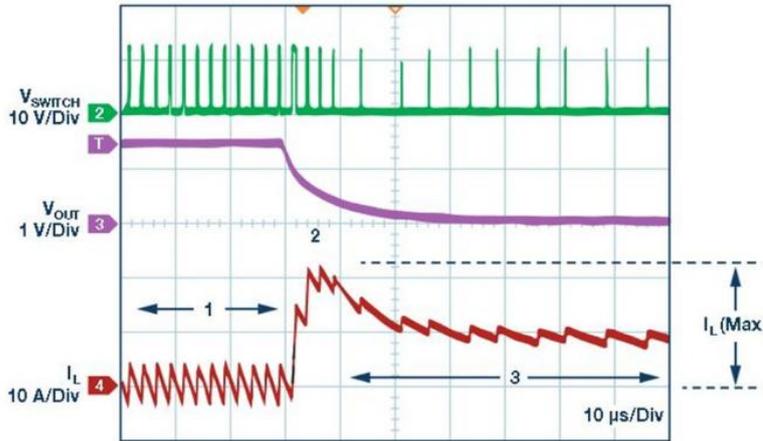


图 2. LTC3855 限流与折返示例，在 1.5 V/15 A 供电轨上测量

最初，峰值电感电流由选定的电感值、电源开关导通时间、电路的输入和输出电压以及负载电流设置（图中用“1”表示）。当电路短路时，电感电流迅速上升，直至达到限流点，即  $R_S \times I_{INDUCTOR} (I_L)$  等于最大电流检测电压，以保护器件和下游电路（图中用“2”表示）。然后，内置电流折返限制（图中数字“3”）进一步降低电感电流，以将热应力降至最低。

电流检测还有其他作用。在多相电源设计中，利用它能够实现精确均流。对于轻负载电源设计，它可以防止电流反向流动，从而提高效率（反向电流指反向流过电感的电流，即从输出到输入的电流，这在某些应用中可能不合需要，甚至具破坏性）。另外，当多相应用的负载较小时，电流检测可用来减少所需的相数，从而提高电路效率。对于需要电流源的负载，电流检测可将电源转换为恒流源，以用于 LED 驱动、电池充电和驱动激光等应用。

## 检测电阻放哪最合适？

电流检测电阻的位置连同开关稳压器架构决定了要检测的电流。检测的电流包括峰值电感电流、谷值电感电流（连续导通模式下电感电流的最小值）和平均输出流。检测电阻的位置会影响功率损耗、噪声计算以及检测电阻监控电路看到的共模电压。

### 放置在降压调节器高端

对于降压调节器，电流检测电阻有多个位置可以放置。当放置在顶部 MOSFET 的高端时（如图 3 所示），它会在顶部 MOSFET 导通时检测峰值电感电流，从而可用于峰值电流模式控制电源。但是，当顶部 MOSFET 关断且底部 MOSFET 导通时，它不测量电感电流。

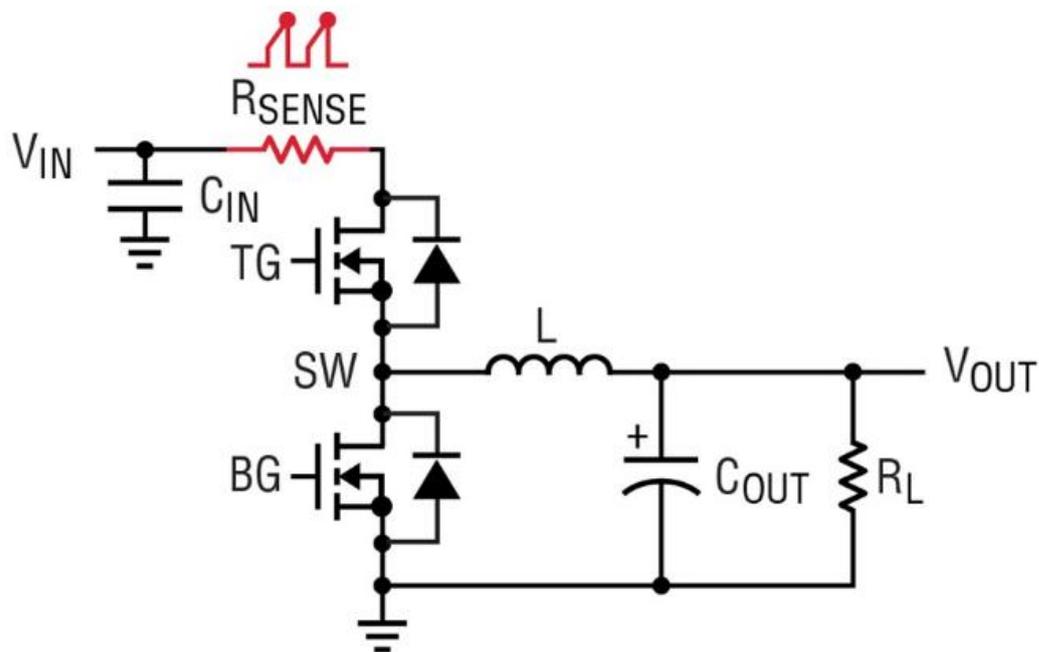


图 3. 带高端 RSENSE 的降压转换器

在这种配置中，电流检测可能有很高的噪声，原因是顶部 MOSFET 的导通边沿具有很强的开关电压振荡。为使这种影响最小，需要一个较长的电流比较器消隐时间（比较器忽略输入的时间）。这会限制最小开关导通时间，并且可能限制最小占空比（占空比 =  $V_{OUT}/V_{IN}$ ）和最大转换器降压比。注意在高端配置中，电流信号可能位于非常大的共模电压( $V_{IN}$ )之上。

#### 放置在降压调节器低端

图 4 中，检测电阻位于底部 MOSFET 下方。在这种配置中，它检测谷值模式电流。为了进一步降低功率损耗并节省元件成本，底部 FET  $R_{DS(ON)}$  可用来检测电流，而不必使用外部电流检测电阻 RSENSE。

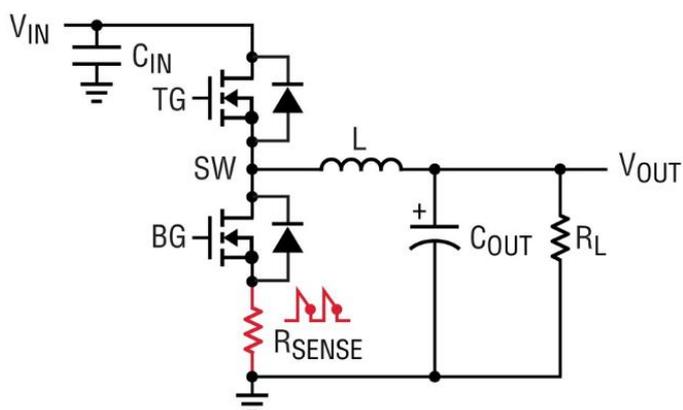


图 4. 带低端 RSENSE 的降压转换器

这种配置通常用于谷值模式控制的电源。它对噪声可能也很敏感,但在这种情况下,它在占空比较大时很敏感。谷值模式控制的降压转换器支持高降压比,但由于其开关导通时间是固定/受控的,故最大占空比有限。

### 降压调节器与电感串联

图 5 中,电流检测电阻  $R_{SENSE}$  与电感串联,因此可以检测连续电感电流,此电流可用于监测平均电流以及峰值或谷值电流。所以,此配置支持峰值、谷值或平均电流模式控制。

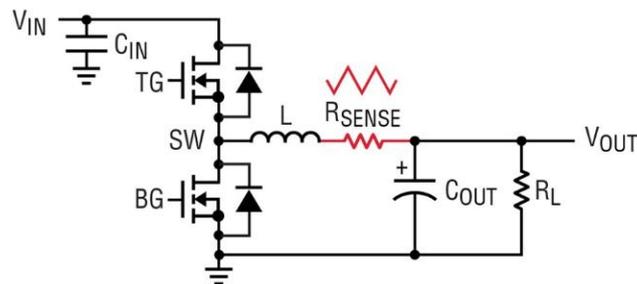


图 5.  $R_{SENSE}$  与电感串联

这种检测方法可提供最佳的信噪比性能。外部  $R_{SENSE}$  通常可提供非常准确的电流检测信号,以实现精确的限流和均流。但是,  $R_{SENSE}$  也会引起额外的功率损耗和元件成本。为了减少功率损耗和成本,可以利用电感线圈直流电阻(DCR)检测电流,而不使用外部  $R_{SENSE}$ 。

### 放置在升压和反相调节器的高端

对于升压转换器,检测电阻可以与电感串联,以提供高端检测 (图 6)。

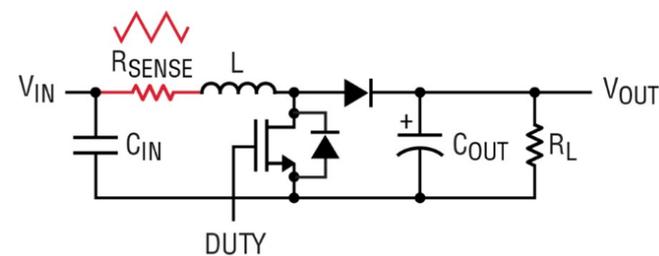


图 6. 带高端  $R_{SENSE}$  的升压转换器

升压转换器具有连续输入电流,因此会产生三角波形并持续监测电流。

放置在升压和反相调节器的低端

检测电阻也可以放在底部 MOSFET 的低端，如图 7 所示。此处监测峰值开关电流（也是峰值电感电流），每半个周期产生一个电流波形。MOSFET 开关切换导致电流信号具有很强的开关噪声。

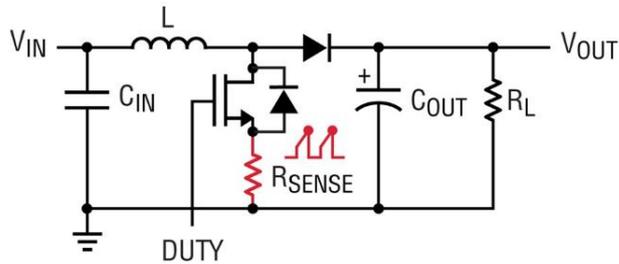


图 7. 带低端 RSENSE 的升压转换器

SENSE 电阻放置在升降压转换器低端或与电感串联

图 8 显示了一个 4 开关升降压转换器，其检测电阻位于低端。当输入电压远高于输出电压时，转换器工作在降压模式；当输入电压远低于输出电压时，转换器工作在升压模式。在此电路中，检测电阻位于 4 开关 H 桥配置的底部。器件的模式（降压模式或升压模式）决定了监测的电流。

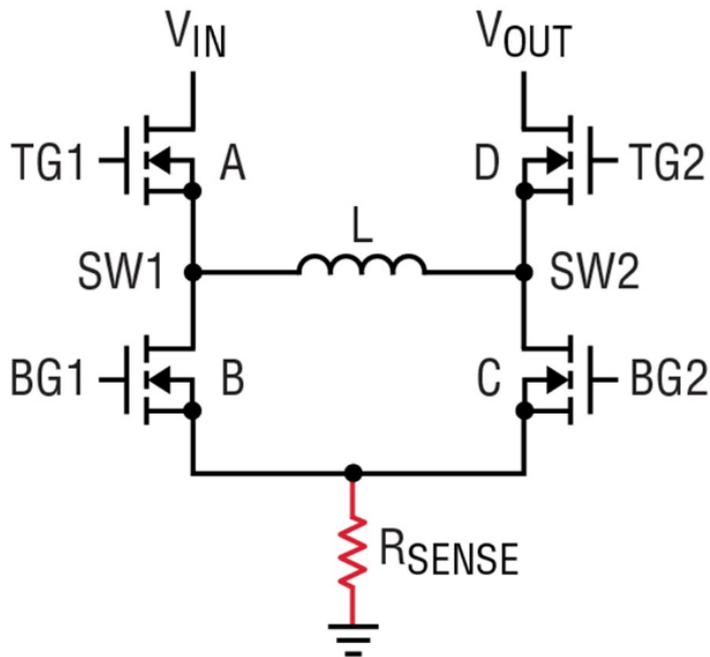


图 8. 带低端 RSENSE 的升压转换器

在降压模式下（开关 D 一直导通，开关 C 一直关断），检测电阻监测底部开关 B 电流，电源用作谷值电流模式降压转换器。

在升压模式下（开关 A 一直导通，开关 B 一直关断），检测电阻与底部 MOSFET (C) 串联，并在电感电流上升时测量峰值电流。在这种模式下，由于不监测谷值电感电流，因此当电源处于轻负载状态时，很难检测负电感电流。负电感电流意味着电能从输出端传回输入端，但由于这种传输会有损耗，故效率会受损。对于电池供电系统等应用，轻负载效率很重要，这种电流检测方法不合需要。

图 9 电路解决了这个问题，其将检测电阻与电感串联，从而在降压和升压模式下均能连续测量电感电流信号。由于电流检测 RSENSE 连接到具有高开关噪声的 SW1 节点，因此需要精心设计控制器 IC，使内部电流比较器有足够长的消隐时间。

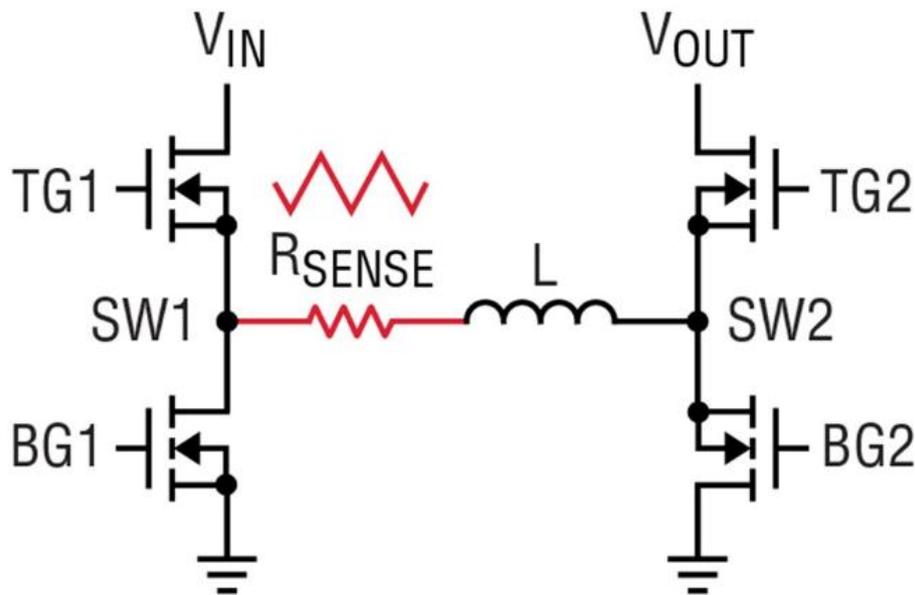


图 9. LT8390 升降压转换器，RSENSE 与电感串联

输入端也可以添加额外的检测电阻，以实现输入限流；或者添加在输出端，用于电池充电或驱动 LED 等恒定输出电流应用。这种情况下需要平均输入或输出电流信号，因此可在电流检测路径中增加一个强 RC 滤波器，以减少电流检测噪声。

## 电流检测方法使用说明书

开关模式电源有三种常用电流检测方法是：使用检测电阻，使用 MOSFET RDS(ON)，以及使用电感的直流电阻(DCR)。每种方法都有优点和缺点，选择检测方法时应予以考虑。

### 检测电阻电流传感

作为电流检测元件的检测电阻，产生的检测误差最低（通常在 1%和 5%之间），温度系数也非常低，约为 100 ppm/°C (0.01%)。在性能方面，它提供精度最高的电源，有助于实现极为精确的电源限流功能，并且在多个电源并联时，还有利于实现精密均流。

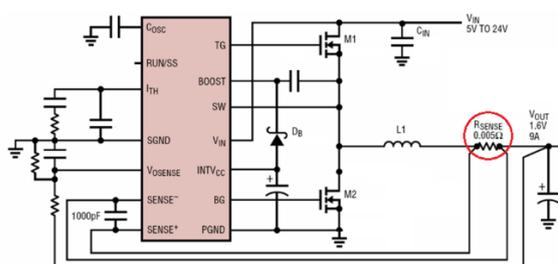


图 10. RSENSE 电流检测

另一方面，因为电源设计中增加了电流检测电阻，所以电阻也会产生额外的功耗。因此，与其他检测技术相比，检测电阻电流监测技术可能有更高的功耗，导致解决方案整体效率有所下降。专用电流检测电阻也可能增加解决方案成本，虽然一个检测电阻的成本通常在 0.05 美元至 0.20 美元之间。

选择检测电阻时不应忽略的另一个参数是其寄生电感（也称为有效串联电感或 ESL）。检测电阻可以用一个电阻与一个有限电感串联来正确模拟。

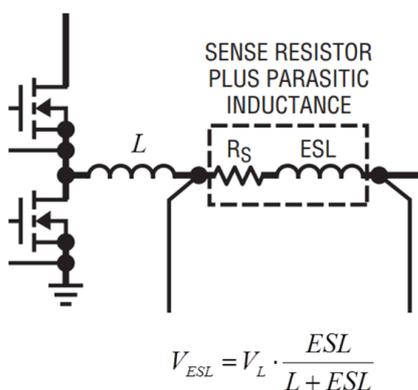


图 12. RSENSE ESL 模型

此电感取决于所选的特定检测电阻。某些类型的电流检测电阻，例如金属板电阻，具有较低的 ESL，应优先使用。相比之下，绕线检测电阻由于其封装结构而具有较高的 ESL，应避免使用。一般来说，ESL 效应会随着电流的增加、检测信号幅度的减小以及布局不合理而变得更加明显。电路的总电感还包括由元件引线和其他电路元件引起的寄生电感。电路的总电感也受到布局的影响，因此必须妥善考虑元件的布局，不恰当的布局可能影响稳定性并加剧现有电路设计问题。

检测电阻 ESL 的影响可能很轻微，也可能很严重。ESL 会导致开关栅极驱动器发生明显振荡，从而对开关导通产生不利影响。它还会增加电流检测信号的纹波，导致波形中出现电压阶跃，而不是预期的如图 13 所示的锯齿波形。这会降低电流检测精度。

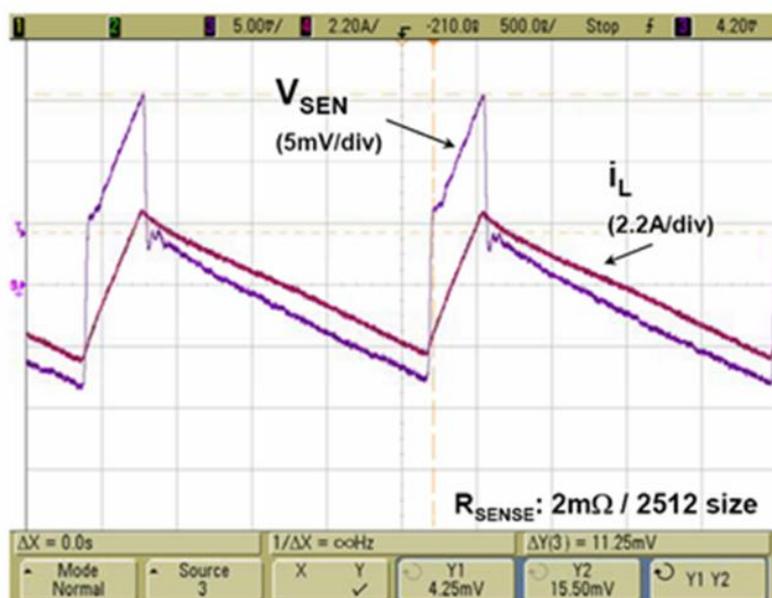


图 13. RSENSE ESL 可能会对电流检测产生不利影响

为使电阻 ESL 最小，应避免使用具有长环路（如绕线电阻）或长引线（如厚电阻）的检测电阻。薄型表面贴装器件是首选，例子包括板结构 SMD 尺寸 0805、1206、2010 和 2512，更好的选择包括倒几何 SMD 尺寸 0612 和 1225。

### 基于功率 MOSFET 的电流检测

利用 MOSFET RDS(ON)进行电流检测，可以实现简单且经济高效的电流检测。LTC3878 是一款采用这种方法的器件。它使用恒定导通时间谷值模式电流检测架构。顶部开关导通固定的时间，此后底部开关导通，其 RDS 压降用于检测电流谷值或电流下限。

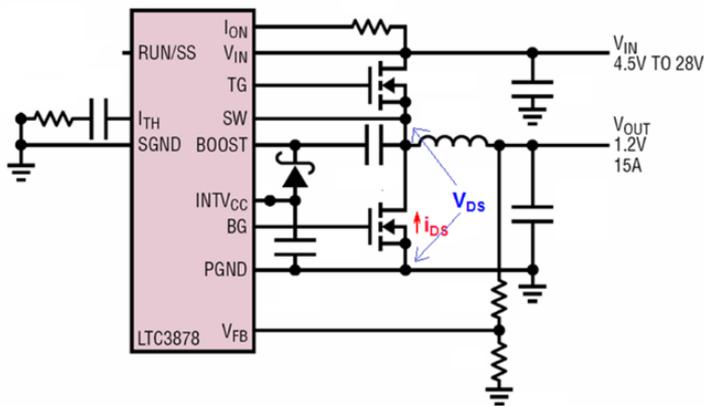


图 14. MOSFET RDS(ON)电流检测

虽然价格低廉，但这种方法有一些缺点。首先，其精度不高，RDS(ON)值可能在很大的范围内变化（大约 33% 或更多）。其温度系数可能也非常大，在 100°C 以上时甚至会超过 80%。另外，如果使用外部 MOSFET，则必须考虑 MOSFET 寄生封装电感。这种类型的检测不建议用于电流非常高的情况，特别是不适合多相电路，此类电路需要良好的相位均流。

#### 电感 DCR 电流检测

电感直流电阻电流检测采用电感绕组的寄生电阻来测量电流，从而无需检测电阻。这样可降低元件成本，提高电源效率。与 MOSFET RDS(ON)相比，铜线绕组的电感 DCR 的器件间偏差通常较小，不过仍然会随温度而变化。它在低输出电压应用中受到青睐，因为检测电阻上的任何压降都代表输出电压的一个相当大部分。将一个 RC 网络与电感和寄生电阻的串联组合并联，检测电压在电容 C1 上测量（图 15）。

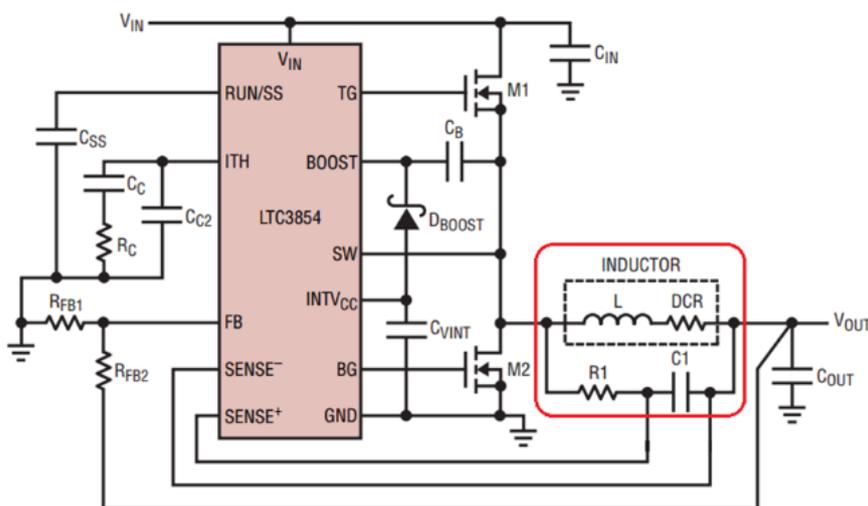


图 15. 电感 DCR 电流检测

通过选择适当的元件( $R1 \times C1 = L/DCR$ ), 电容 C1 两端的电压将与电感电流成正比。为了最大限度地减少测量误差和噪声, 最好选择较低的 R1 值。

电路不直接测量电感电流, 因此无法检测电感饱和。推荐使用软饱和的电感, 如粉芯电感。与同等铁芯电感相比, 此类电感的磁芯损耗通常较高。与  $R_{SENSE}$  方法相比, 电感 DCR 检测不存在检测电阻的功率损耗, 但可能会增加电感的磁芯损耗。

使用  $R_{SENSE}$  和 DCR 两种检测方法时, 由于检测信号较小, 故均需要开尔文检测。必须让开尔文检测痕迹(图 5 中的 SENSE 和 SENSE-) 远离高噪声覆铜区和其他信号痕迹, 以将噪声提取降至最低, 这点很重要。某些器件(如 LTC3855) 具有温度补偿 DCR 检测功能, 可提高整个温度范围内的精度。

Sensing Method	Sense Error @ 25°C (%)	Temperature Variation (%/°C)	Detects Inductor Saturation	Reliability/ Protection	Current & Thermal Balance	Component Cost	Supply Efficiency
$R_{SENSE}$	1 or 5	~0.01	Yes	Highest	Best	$R_{SENSE}$ (\$0.05 to \$0.20)	Baseline Value
Inductor DCR	≥10	~0.39	-	Medium	Medium	n/a	Higher
MOSFET $R_{DS(ON)}$	≥30	~0.8	-	Lower	Worst	n/a	Higher

表 1. 电流检测方法的优缺点

表 1 中提到的每种方法都为开关模式电源提供额外的保护。取决于设计要求, 精度、效率、热应力、保护和瞬态性能方面的权衡都可能影响选择过程。电源设计人员需要审慎选择电流检测方法和功率电感, 并正确设计电流检测网络。ADI LTpowerCAD 设计工具和 LTspice® 电路仿真工具等计算机软件程序, 对简化设计工作并获得最佳结果会大有帮助。

#### 其他电流检测方法

还有其他电流检测方法可供使用。例如, 电流检测互感器常常与隔离电源一起使用, 以跨越隔离栅对电流信号信息提供保护。这种方法通常比上述三种技术更昂贵。此外, 近年来集成栅极驱动器(DrMOS)和电流检测的新型功率 MOSFET 也已出现, 但到目前为止, 还没有足够的推断 DrMOS 在检测信号的精度和质量方面表现如何。