

Application Note

**BQ2575X 和 BQ2585X-Q1 系列 IC 的电感器选择**



Ethan Galloway

摘要

电感器选择是开关转换器的关键方面之一。正确选择电感器可以提高效率、降低温度并且减小转换器尺寸。本应用手册介绍了如何计算电感器损耗以及如何为您的应用选择合适的电感器。

内容

|                           |    |
|---------------------------|----|
| 1 简介.....                 | 2  |
| 2 电感器选型.....              | 5  |
| 2.1 占空比.....              | 5  |
| 2.2 电感选择.....             | 5  |
| 2.3 电感纹波和峰值电流.....        | 6  |
| 2.4 使用 BQ2575X 设计计算器..... | 6  |
| 3 电感器损耗.....              | 9  |
| 3.1 电阻损耗.....             | 9  |
| 3.2 磁损耗.....              | 10 |
| 3.3 电感器选择的一般规则.....       | 10 |
| 4 物料清单 (BOM) 评估.....      | 11 |
| 5 总结.....                 | 13 |
| 6 参考资料.....               | 14 |

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

## 1 简介

电感器是一个复杂的组件，以磁场的形式储存能量。该行为可用于开关转换器。在选择电感器时有许多因素。系统规格决定了电感器的物理尺寸、电感器的 DCR 及电感。电感器的选择对于提高效率、减小尺寸或者增加最大可用电流至关重要。

与专用降压或升压转换器不同，4 开关降压/升压转换器必须在更宽的  $V_{IN}$  和  $V_{OUT}$  范围内运行。电感器的大小必须能够应对降压和升压模式的最坏情况，以保持稳定性并确保可以处理开关电流。

对于降压、升压或降压/升压转换器，按以下要求选择电感器：

- 饱和电流 - 饱和电流是电感器磁场无法进一步增加的情况。饱和电流必须大于电感器中的峰值电流。
- IDC - 这是可以通过电感器的最大发热电流。电感器的最大直流电流规格必须大于电路的直流电流。此项以安培为单位。
- DCR - DCR 是电感器的直流电阻，通常以  $m\Omega$  为单位。
- 电感 (L) - L 是以  $\mu H$  为单位列出的电感器的值。

以下是直流/直流转换器的一些一般术语：

- 连续导通模式 (CCM) - 当电感器电流始终高于 0A 时。
- 不连续导通模式 (DCM) - 当电感器电流变为 0A 时会发生这种情况。BQ2575X 系列器件可进入脉冲频率调制 (PFM) 以提高此时的效率。

BQ2575X 降压-升压电路的示例电路如图 1-1 所示。

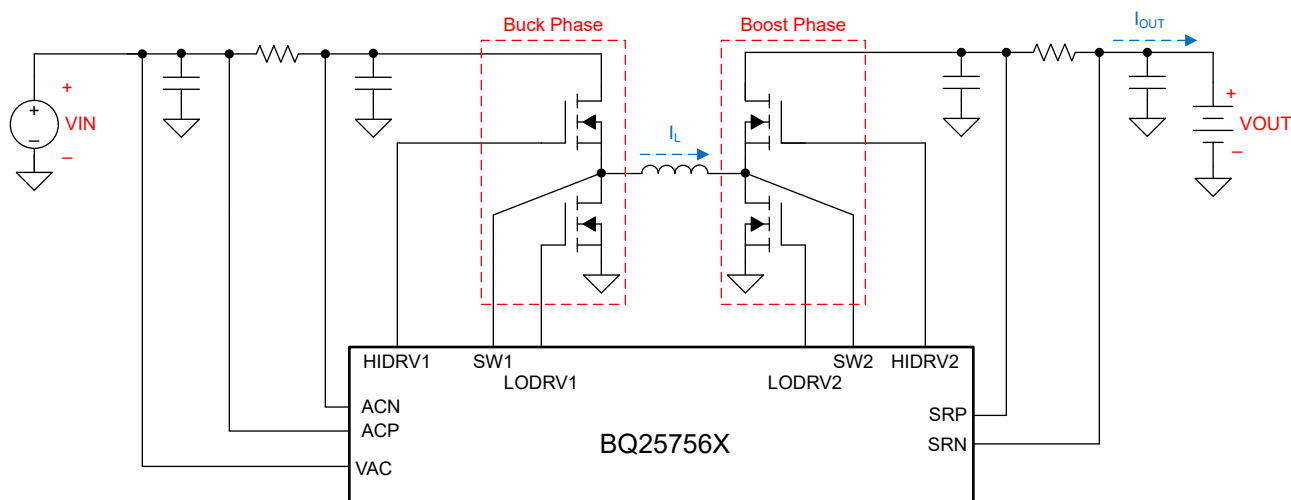


图 1-1. 简化的降压/升压转换器电路

在降压模式下，HIDRV1 和 LODRV1 发挥作用，将输入电压降至输出电压。HIDRV2 保持 ON 状态且 LODRV2 保持 OFF 状态。图 1-2 是  $V_{IN}=35V$ 、 $V_{OUT}=20V$ 、 $I_{OUT}=4A$ 、 $L=10\mu H$ ，且开关频率为 350kHz 时的开关波形示例：

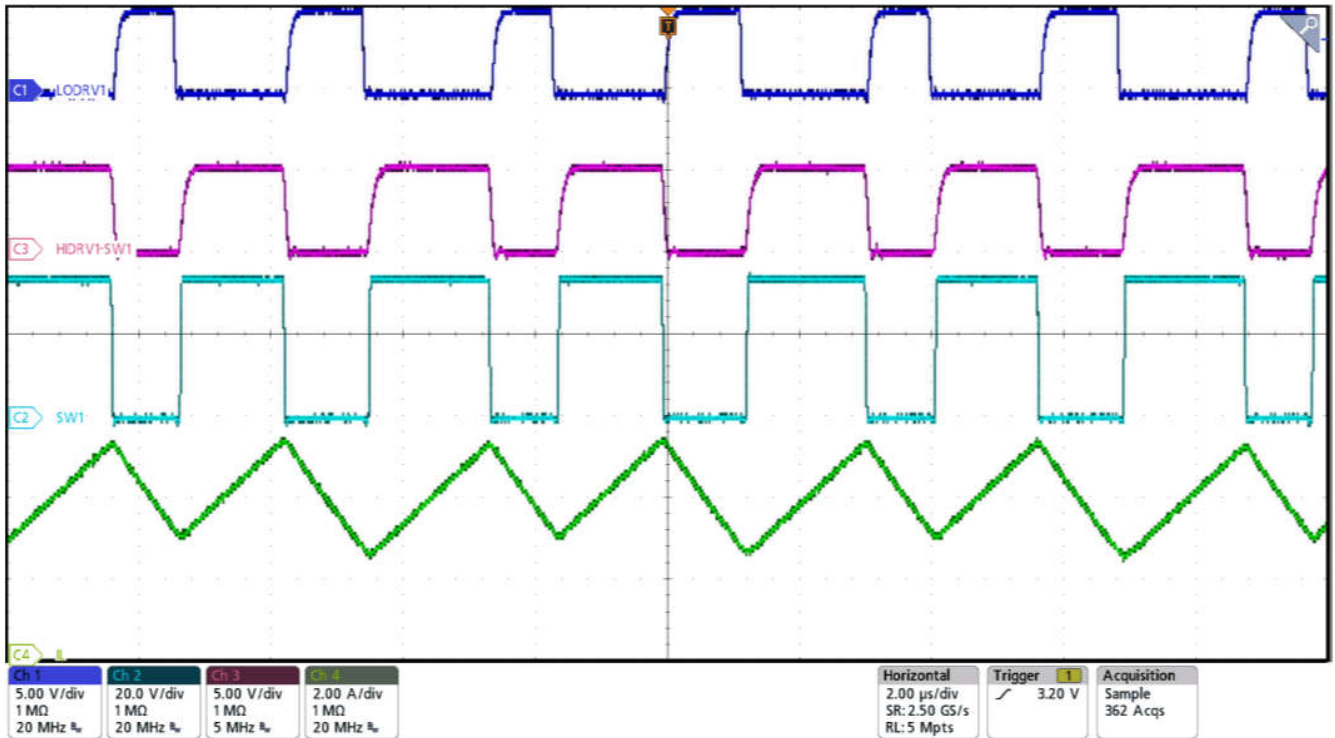


图 1-2. 降压模式下的 BQ25756

在升压模式下，HIDRV1 保持 ON 状态，LODRV1 保持 OFF 状态。HIDRV2 和 LODRV2 用于将输入电压升压至输出电压。图 1-3 是  $V_{IN}=25V$ 、 $V_{OUT}=40V$ 、 $I_{OUT}=4A$ ，且开关频率为 350kHz 时的开关波形示例：

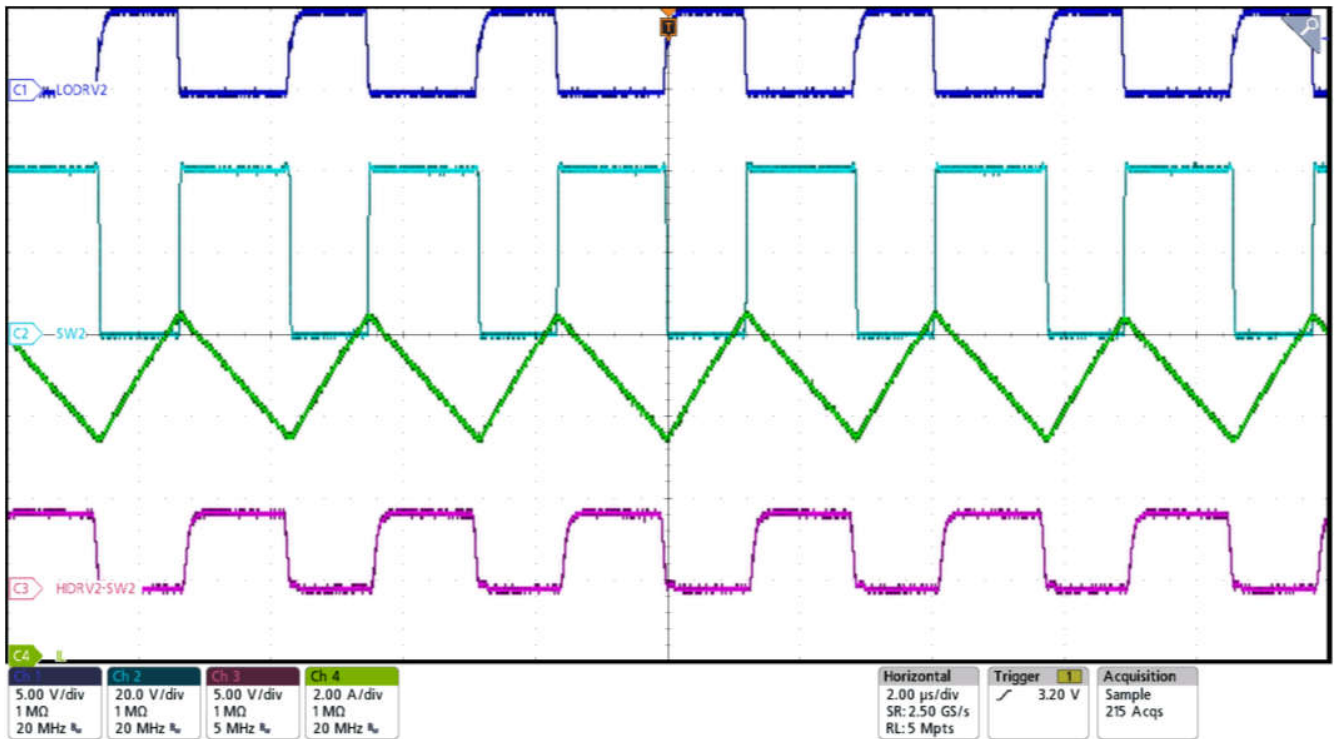


图 1-3. 升压模式下的 BQ25756

当  $V_{IN}$  约等于  $V_{OUT}$  时，IC 处于降压/升压模式。降压和升压相位会交错。这意味着降压相位会在 1 个时钟周期内切换。然后，升压相位切换 1 个时钟周期。

图 1-4 显示了  $V_{IN} = 35V$ 、 $V_{OUT} = 35V$ 、 $I_{OUT} = 4A$  且  $FSW = 350kHz$  时的降压/升压运行情况：

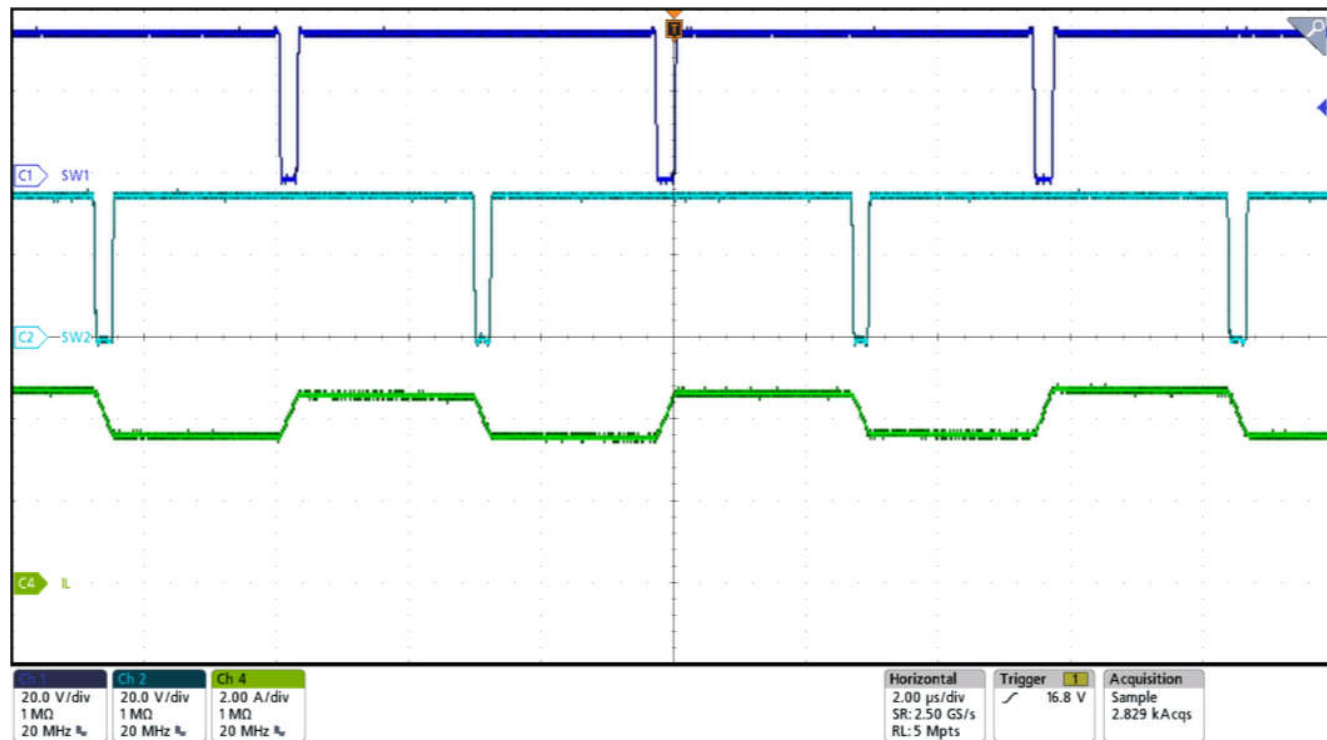


图 1-4. 降压/升压模式下的 BQ25756

交错降压和升压脉冲可实现从降压模式至升压模式的无缝转换。

## 2 电感器选型

要选择电感器，需要指定以下参数：

- 输入电压范围
- 最大输出电压
- 充电电流
- 最大可能 FSW

根据这些规格，可以计算以下参数：

1. 降压和升压模式下最差工作条件下的占空比
2. 降压模式下的最小电感
3. 升压模式下的最小电感
4. 电感器纹波电流

### 2.1 占空比

任何开关转换器设计的第一步都是计算占空比。占空比控制开关电流，从而控制电感和效率。需要找到升压模式和降压模式下最大电感器电流的点。

对于降压转换器，在最大输入电压到最低输出电压时可出现最大电感器电流。

$$D_{BUCK} = \frac{V_{OUT}}{V_{IN(MAX)} \times \eta} \quad (1)$$

对于升压转换器，在最小输入电压到最大输出电压时可产生最大电感器电流。

$$D_{BOOST} = 1 - \frac{V_{IN(MIN)} \times \eta}{V_{OUT}} \quad (2)$$

在上述公式中：

- $V_{IN(MAX)}$  = 最大输入电压
- $V_{IN(MIN)}$  = 最小输入电压
- $V_{OUT}$  = 所需的输出电压
- $D_{BUCK}$  = 降压模式下的最小占空比
- $D_{BOOST}$  = 升压模式下的最大占空比
- $\eta$  = 估计效率

### 2.2 电感选择

选择电感器的一个良好原则是，纹波电流应为输出纹波电流的 20% 到 40%，即  $0.2 < r_{ind} < 0.4$ 。

对于降压模式，[方程式 3](#) 可用于估算所需的电感：

$$L > \frac{V_{OUT} \times (V_{IN(MAX)} - V_{OUT})}{r_{ind} \times F_{SW} \times V_{IN(MAX)} \times I_{OUT}} \quad (3)$$

在上述公式中：

- $V_{IN(MAX)}$  = 最大输入电压
- $V_{OUT}$  = 所需的输出电压
- $F_{SW}$  = 开关频率
- $r_{ind} = \frac{\Delta I}{I_{OUT}}$  这是电感器纹波电流与最大输出电流之比。 $r_{ind}$  是特定应用的常量。 $R_{ind}$  仅定义为连续导通模式。

对于升压模式，[方程式 4](#) 可用于估算所需的电感：

$$L > \frac{V_{IN(MIN)}^2 \times (V_{OUT} - V_{IN(MIN)})}{F_{SW} \times r_{ind} \times I_{OUT} \times V_{OUT}^2} \quad (4)$$

在上述公式中：

- $V_{IN(MIN)}$  = 最小输入电压
- $V_{OUT}$  = 所需的输出电压
- $F_{SW}$  = 开关频率
- $r_{ind} = \frac{\Delta I}{I_{OUT}}$  这是电感器纹波电流与最大输出电流之比。 $r_{ind}$  是特定应用的常量。 $R_{ind}$  仅定义为连续导通模式。

## 2.3 电感纹波和峰值电流

可以通过两种情况来确定最大电感器电流：降压模式及升压模式。在应用手册的其余部分，用最大电感器电流。在降压模式下，最大电流出现在  $V_{IN(MAX)}$  处。方程式 5 用于计算最大开关电流，方程式 6 用于计算纹波电流。

$$I_{SW(MAX)} = \Delta I + I_{OUT} \quad (5)$$

$$\Delta I = \frac{(V_{IN(MAX)} - V_{OUT}) \times D_{BUCK}}{F_{SW} \times L} \quad (6)$$

在上述公式中：

- $V_{IN(MAX)}$  = 最大输入电压
- $V_{OUT}$  = 所需的输出电压
- $F_{SW}$  = 开关频率
- $D_{BUCK}$  = 降压模式下的最小占空比
- $L$  = 所选的电感器值
- $\Delta I$  = 最大交流纹波电流
- $I_{SW(MAX)}$  = 通过电感器的最大电流

在升压模式下，在  $V_{IN(MIN)}$  下出现最大开关电流。方程式 7 用于计算最大开关电流，方程式 8 用于计算纹波电流。

$$I_{SW(MAX)} = \frac{\Delta I}{2} + \frac{I_{OUT}}{1 - D_{BOOST}} \quad (7)$$

$$\Delta I = \frac{V_{IN(MIN)} \times D_{BOOST}}{F_{SW} \times L} \quad (8)$$

- $V_{IN(MIN)}$  = 最小输入电压
- $V_{OUT}$  = 所需的输出电压
- $F_{SW}$  = 开关频率
- $D_{BOOST}$  = 升压模式下的最大占空比
- $L$  = 所选的电感器值
- $\Delta I$  = 最大交流纹波电流

## 2.4 使用 BQ2575X 设计计算器

**BQ25756 设计计算器** 可用于所有 BQ2575X 和 BQ2585X-Q1 系列器件。该计算器可帮助进行电阻器编程、IC 设置和 BOM 选择。该计算器还可获取有关运行条件、BOM 和系统要求的用户输入，以评估功率损耗和效率。请注意，该计算器不考虑其他来源的功率损耗，例如磁芯损耗或铜走线损耗。

该计算器还包含热敏电阻鉴定选项卡，用于评估各种温度充电窗口的最小/典型/最大温度下降和上升阈值。此标签可用于选择所需应用的热敏电阻，但本部分重点介绍设计计算器中的电感器计算步骤。

若要使用该计算器，请忽略有关循环引用的警告，并填写黄色单元格。带红色选项卡的单元格包含有关相邻单元格的其他信息。红色单元格突出显示了可能有问题的单元格。

首先，在计算器中将输入电压范围、输出电压和最大输出电流输入

|    |                                          |        |  |
|----|------------------------------------------|--------|--|
| 5  | <b>Step 1: Operating Specifications</b>  |        |  |
| 6  | Input Voltage - Min, $V_{AC(min)}$       | 20 V   |  |
| 7  | Input Voltage - Nom, $V_{AC(nom)}$       | 25 V   |  |
| 8  | Input Voltage - Max, $V_{AC(max)}$       | 35 V   |  |
| 9  | Battery Voltage, $V_{BAT}$               | 16.8 V |  |
| 10 | Full Load Output Current, $I_{OUT(max)}$ | 5 A    |  |

图 2-1. 设计计算器第 1 步

其次，输入所需的开关频率。可使用计算器快速找到适用于给定频率的电阻值。*降压电压限制* 列出了仅用于降压的器件可能的最大输出电压。

|    |                                                     |                   |  |
|----|-----------------------------------------------------|-------------------|--|
| 12 | <b>Step 2: Switching Frequency</b>                  |                   |  |
| 13 | Desired Switching Frequency, $F_{DFW}$              | 250 kHz           |  |
| 14 | Recommended Switching Frequency Resistor, $R_{FSW}$ | 133.33 k $\Omega$ |  |
| 15 | Selected Switching Frequency Resistor, $R_{FSW}$    | 133 k $\Omega$    |  |
| 16 | Recognized Switching Frequency, $F_{SW}$            | 250.38 kHz        |  |
| 17 | Boost Duty Cycle Limitation                         | 94.37 %           |  |
| 18 | Buck Duty Cycle Limitation                          | 96.24 %           |  |
| 19 | Boost Output Voltage Limitation at $V_{AC(min)}$    | N/A V             |  |
| 20 | Boost Output Voltage Limitation at $V_{AC(nom)}$    | N/A V             |  |
| 21 | Boost Output Voltage Limitation at $V_{AC(max)}$    | N/A V             |  |
| 22 | Buck Voltage Limitation at $V_{AC(min)}$            | 19.25 V           |  |

图 2-2. 设计计算器第 2 步

第三，输入建议的电感器。本节可用于计算纹波电流及纹波电流百分比。

BQ2575X 和 BQ2585X-Q1 IC 可以支持 2.2 $\mu$ H 至 15 $\mu$ H 的电感器及 1.75m $\Omega$  至 60m $\Omega$  的 DCR。IC 可能的最大时间常数为 1.26 $\mu$ H/m $\Omega$ 。

|    |                                                            |                                |  |
|----|------------------------------------------------------------|--------------------------------|--|
| 24 | <b>Step 3: Filter Inductor</b>                             |                                |  |
| 25 | Maximum Average Inductor Current, $I_{L(MAX)}$             | 4.67 A                         |  |
| 26 | Selected Inductor Saturation Current, $I_{SAT}$            | 26 A                           |  |
| 27 | Minimum Inductance, L                                      | 0.79 $\mu$ H                   |  |
| 28 | <b>Selected Inductance, L</b>                              | <b>10 <math>\mu</math>H</b>    |  |
| 29 | Minimum Recommended Inductance                             | 2.20 $\mu$ H                   |  |
| 30 | Maximum Recommended Inductance                             | 15.00 $\mu$ H                  |  |
| 31 | Minimum Recommended Inductor DCR                           | 1.75 m $\Omega$                |  |
| 32 | Maximum Recommended Inductor DCR                           | 60.00 m $\Omega$               |  |
| 33 | <b>Selected Inductor DCR</b>                               | <b>12 m<math>\Omega</math></b> |  |
| 34 | Selected Inductor Time Constant                            | 0.83 $\mu$ H/m $\Omega$        |  |
| 35 | Maximum Inductor Time Constant                             | 1.26 $\mu$ H/m $\Omega$        |  |
| 36 | Pk-to-Pk Ripple Current at $V_{AC(min)}$ , $\Delta I_{L1}$ | 1.07 A <sub>pk-pk</sub>        |  |
| 37 | Pk-to-Pk Ripple Current at $V_{AC(nom)}$ , $\Delta I_{L2}$ | 2.20 A <sub>pk-pk</sub>        |  |
| 38 | Pk-to-Pk Ripple Current at $V_{AC(max)}$ , $\Delta I_{L3}$ | 3.49 A <sub>pk-pk</sub>        |  |
| 39 | $\Delta I_L$ as a % at $V_{AC(min)}$                       | 21.47 %                        |  |
| 40 | $\Delta I_L$ as a % at $V_{AC(nom)}$                       | 44.02 %                        |  |
| 41 | $\Delta I_L$ as a % at $V_{AC(max)}$                       | 69.78 %                        |  |
| 42 | Peak Inductor Current, $I_{L(PEAK)}$                       | 5.20 A                         |  |

图 2-3. 设计计算器第 3 步

### 3 电感器损耗

需要电感器制造商提供帮助来计算磁芯损耗。电感器有三个损耗源。总功率损耗可用[方程式 9](#) 表示：

$$P_{IND} = P_{CORE} + P_{DCR} + P_{ACR} \quad (9)$$

其中：

- $P_{CORE}$  = 电感器中磁芯损耗造成的损耗。磁芯损耗通常是电感器中的主要损耗源
- $P_{DCR}$  = 流经绕组的直流电流产生的损耗
- $P_{ACR}$  = 高频电流引起的趋肤效应和邻近效应损耗

计算所有形式的电感器损耗对于直流/直流转换器设计人员来说都不切实际。本部分旨在说明电感器中损耗的来源以及与功率损耗的关系。

#### 3.1 电阻损耗

下一部分提供了有关这些不同损耗之间关系的信息。这些变量之间的关系是最重要的，而不是电感器的实际磁损耗计算。

电阻损耗最容易着手，可以用[方程式 10](#) 表示：

$$P_{DCR} = I_{DC}^2 * R_{DCR} \quad (10)$$

其中：

- $P_{DCR}$  = 流经绕组的直流电流产生的损耗
- $I_{DC}$  = 电感器电流的直流分量
- $R_{DCR}$  = 电感器的直流电阻

在高频时，趋肤效应和邻近效应引起的损耗开始产生影响。在高频率下，导体中的涡流会导致电流仅沿导线外侧流动。这种现象称为“趋肤效应”。可使用[方程式 11](#) 计算趋肤效应：

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu}} \quad (11)$$

其中：

- $\rho$  = 导体电阻率
- $f$  = 频率分量
- $\mu$  = 导体的磁导率

铜的导电率  $\rho$  在 25°C 处为  $1.724 \times 10^{-6} \Omega \times \text{cm}$ ，在 100°C 处为  $2.3 \times 10^{-6} \Omega \times \text{cm}$ 。铜的相对磁导率为 1。

在 100°C，[方程式 11](#) 可以简化为[方程式 12](#)：

$$\delta = \frac{7.5 \text{ cm}}{\sqrt{f}} \quad (12)$$

$R_{ACR}$  与  $R_{DCR}$  成正比。如果导体是导线且导体厚度  $\gg \delta$ 、则[方程式 13](#) 可用于估算等效交流电阻。

$$R_{ACR} = \frac{h}{\delta} R_{DCR} \quad (13)$$

例如，假设一根 18awg 导线 (1.037mm) 的频率为 250kHz。穿透深度为 150 $\mu\text{m}$ 、 $R_{ACR}$  为 6.8 $R_{DCR}$ 。

需要针对  $\Delta I$  的所有频率分量计算趋肤效应和相应损耗。

最后，接近效应产生了第三种形式的损耗。电感器中的磁场会在磁芯材料及导线本身中引起涡流。在电感器的绕组中，即使导线未承载电流，这些涡流也会导致欧姆损耗。这些涡流还会导致导线中电流发生变化。大多数工程师无法计算邻近效应损耗。

### 3.2 磁损耗

磁损耗可以使用 [方程式 14](#) 中所示的 Steinmetz 公式计算：

$$P_{CORE} = K_{fe0} V_{CORE} \Delta B^\beta F_{SW}^\alpha = K_{fe0} V_{CORE} \left[ \frac{|\vec{B}_{CORE(SAT)}|}{I_{SW(MAX)}} \right]^\beta \Delta I^\beta F_{SW}^\alpha \quad (14)$$

其中：

- $K_{fe0} V_{CORE}$  = 常数，具体取决于磁芯材料
- $F_{SW}$  = 开关频率
- $\Delta I_{MAX}$  = 最大交流纹波电流
- $I_{SW(MAX)}$  = 通过电感器的最大电流
- $\alpha$  和  $\beta$  是曲线拟合参数。 $\alpha$  通常在 1 到 2 之间， $\beta$  通常在 2 到 3 之间。 $\alpha$  和  $\beta$  必须根据数据表中的滞后曲线进行拟合。

同样，计算电感器的磁损耗不在大多数工程师的讨论范围内。变量之间的关系是最重要的。 $P_{CORE}$  与  $\Delta I$  和  $F_{SW}$  成正比。但是， $\Delta I$  也与  $F_{SW}$  间接成正比，常数  $\beta$  通常大于  $\alpha$ 。这两个事实合起来意味着磁芯损耗随着频率的增加而降低。

### 3.3 电感器选择的一般规则

以下几种情况可帮助您选择电感器：

为了选择最小的电感器，请使用系统允许的尽可能高的频率。较高的频率可降低纹波电流，而较低的纹波电流允许使用较低值的电感器。与具有较大电感值的电感器相比，低值的电感器更小，并且具有更低的 DCR。请记住，较高的频率会降低电感器中的损耗，但会增加开关晶体管的损耗。

为了使系统更高效，可以使用频率较低、容值较大的电感器。较低频率会使功率晶体管中的损耗较小。需要更大电感来减少在较低频率下出现的增加的纹波电流。

理想系统需要平衡晶体管、电感器和系统尺寸之间的损耗。一般工程师必须将纹波电流保持在 20% 到 40% 之间。这在电感器损耗和开关 FET 损耗之间实现了最佳平衡，而无需计算电感器的磁芯损耗。

## 4 物料清单 (BOM) 评估

已经对几个 BOM 的效率和损耗进行了评估。

表 4-1. 物料清单

| BOM  | MOSFET    | 电感器                                            | 开关频率   |
|------|-----------|------------------------------------------------|--------|
| BOM1 | AONS66408 | SRP1050WA-100M ( 10 $\mu$ H、<br>20m $\Omega$ ) | 250KHz |
| BOM2 | AONS66408 | SRP1050WA-4R7M ( 4.7 $\mu$ H、<br>9m $\Omega$ ) | 250KHz |

这是采用不同电感器的 BOM 的效率。测试条件为：

- FSW=250kHz
- VIN = 48V
- VOUT = 8V、28V、48V

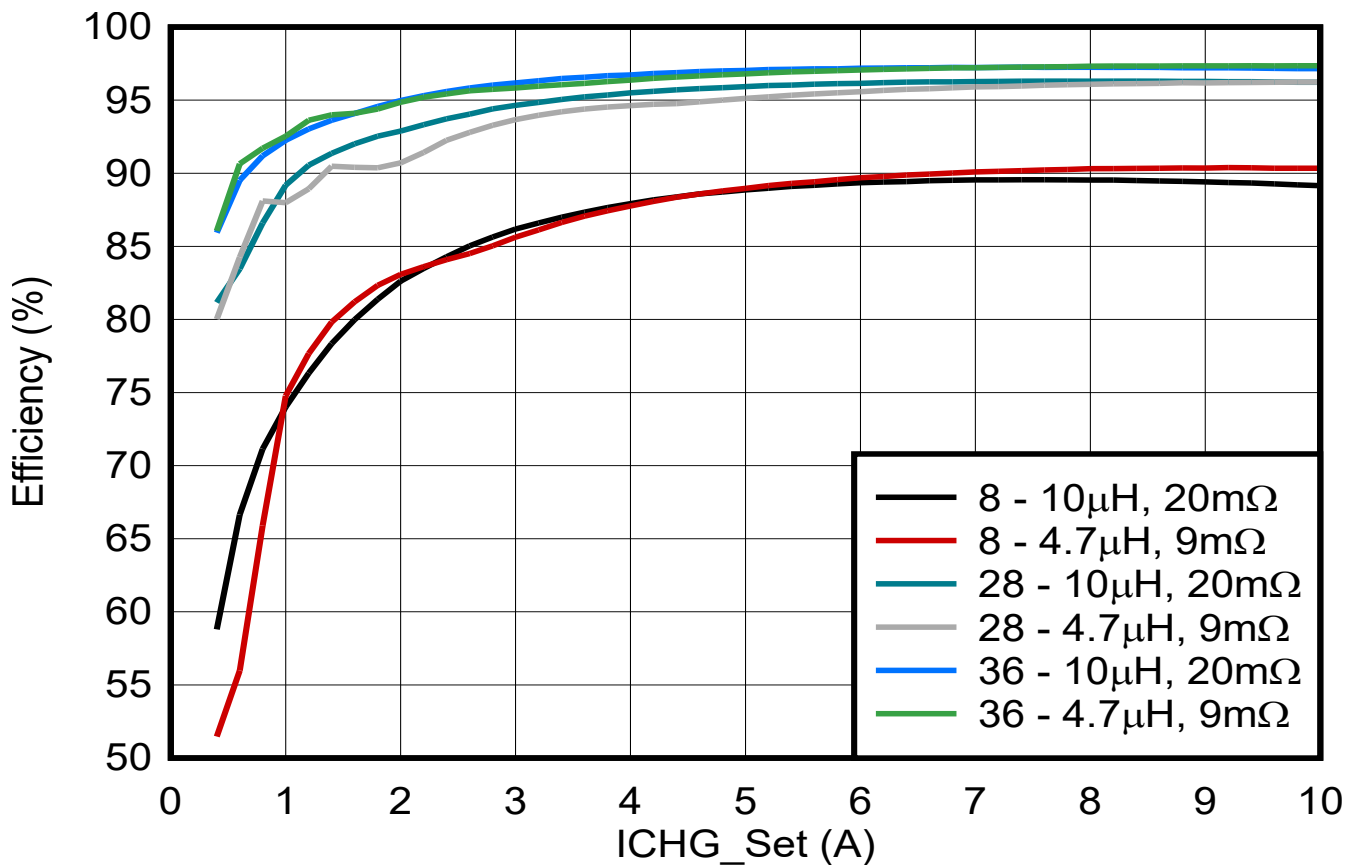


图 4-1. VIN = 48V 时 BOM1 与 BOM2 相比的效率

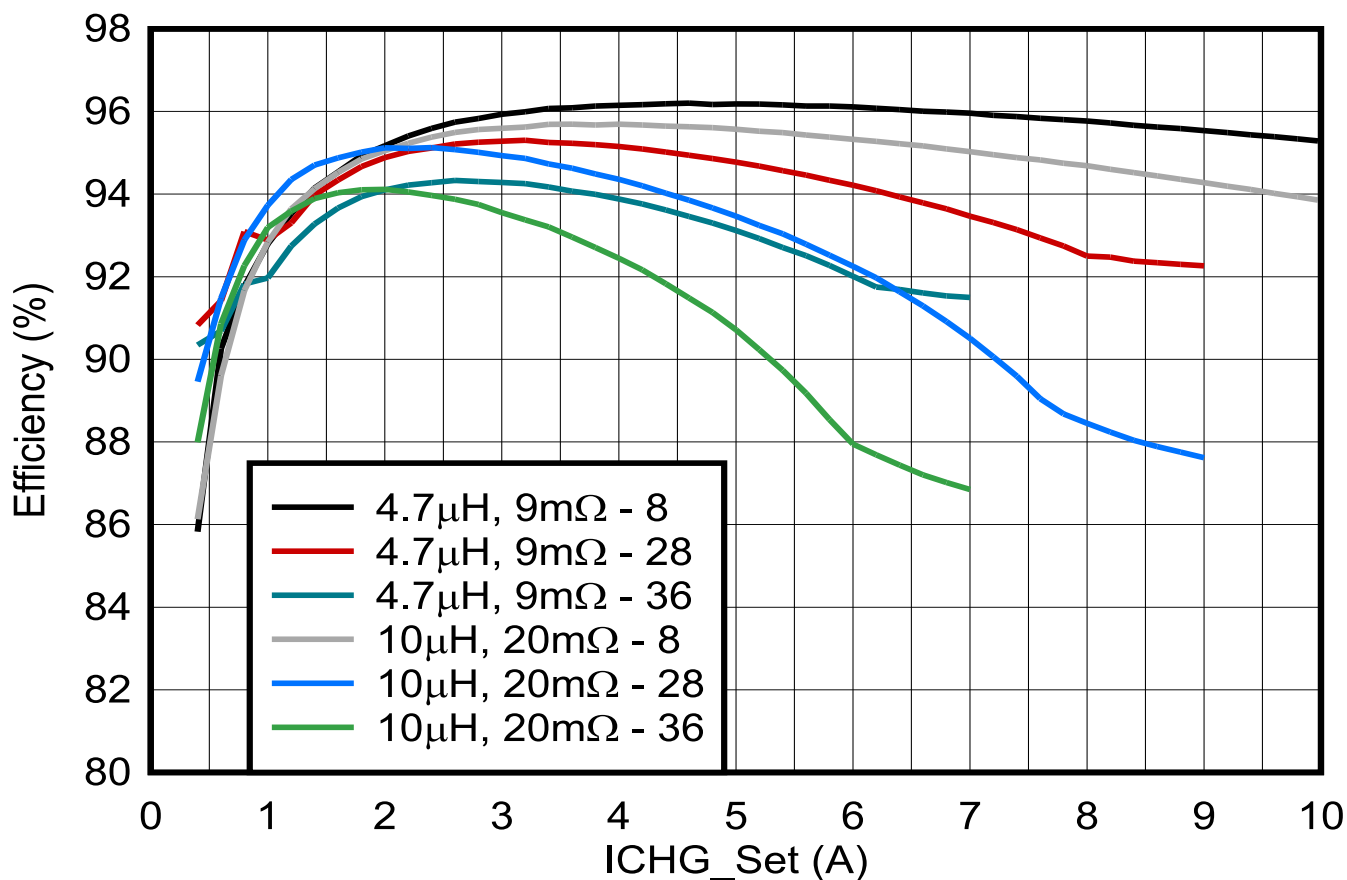


图 4-2. VIN = 12V 时 BOM1 与 BOM2 相比的效率

比较电感器之间的差异通常较困难。对于大多数电感器，改变电感也会改变电阻。这两个变量往往很难得出一般性结论。

从图 4-1 可以看出，电感器之间的损耗大致相同。4.7μH 电感器具有低得多的 DCR，但纹波电流较高。较高的纹波电流会导致更多的电感磁芯损耗。从图表上可以看出，高电感器磁芯损耗平衡了较低 DCR 产生的较低直流功率损耗。

图 4-2 会产生更显著的效果。从 12V 到 36V 需要较大的输入电流。在 12V 电压下，BQ25856-Q1 需要 21A 的输入来将 36V 输出电压保持在 7A 电流下。这是大量的直流电流，因此 DCR 损耗在这里占主导地位。这使得 4.7μH 电感器更加高效。

## 5 总结

选择电感器时需要考虑许多因素。电感器是复杂的元件，并非所有参数都能由普通的电源工程师计算得出。必须仔细考虑电感、DCR 和尺寸。

## 6 参考资料

- 德州仪器 (TI), [降压转换器电感器的选择](#) 应用报告
- 德州仪器 (TI), [波形审核：您的电感器是否饱和？](#) 技术文章
- 德州仪器 (TI), [适用于 BQ2575x 系列的 MOSFET 选择指南](#) 应用手册
- 德州仪器 (TI), [BQ2575X / BQ2585X-Q1 设计计算器](#) 工具
- 德州仪器 (TI), [降压转换器功率级的基本计算](#) 应用手册
- 德州仪器 (TI), [升压转换器功率级的基本计算](#) 应用手册
- 德州仪器 (TI), [4 开关降压/升压功率级的基本计算](#) 应用报告
- 欧洲无源元件研究所, [变压器和电感器中的绕组损耗](#) 文章

## 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