

### 摘要

此应用手册提供的公式用于计算升压转换器的功率级，该转换器基于具有集成式开关并在连续导通模式下运行的 IC 构建。本手册不会详细介绍升压转换器的功能（请参阅[参考文献 1](#)）或转换器补偿过程。如果需要更多详细信息，请参阅本文档末尾的参考文献。

对于没有说明的公式，请参阅[第 8 节](#)。

### 内容

|                        |   |
|------------------------|---|
| 1 升压转换器的基本配置.....      | 2 |
| 1.1 功率级必要参数.....       | 2 |
| 2 计算最大开关电流.....        | 2 |
| 3 电感器选型.....           | 4 |
| 4 整流器二极管选型.....        | 4 |
| 5 输出电压设置.....          | 5 |
| 6 输入电容器选择.....         | 6 |
| 7 输出电容器选型.....         | 6 |
| 8 用于计算升压转换器功率级的公式..... | 7 |
| 9 参考文献.....            | 9 |
| 10 修订历史记录.....         | 9 |

## 1 升压转换器的基本配置

图 1-1 显示了升压转换器集成开关后的基本配置。通常，较低功耗的转换器会将二极管替换为集成到转换器中的第二个开关。如果是这种情况，除了二极管的功率耗散公式之外，本文档中的所有公式都适用。

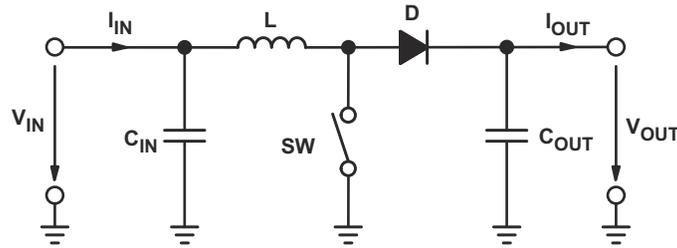


图 1-1. 升压转换器功率级

### 1.1 功率级必要参数

在计算功率级时需要使用以下四个参数：

1. 输入电压范围： $V_{IN(min)}$  和  $V_{IN(max)}$
2. 标称输出电压： $V_{OUT}$
3. 最大输出电流： $I_{OUT(max)}$
4. 用于构建升压转换器的集成电路。这是必要的，因为必须从数据表中找到某些用于计算的参数。

如果已知这些参数，就可以计算功率级。

## 2 计算最大开关电流

计算开关电流的第一步是确定最小输入电压的占空比  $D$ 。使用了最小输入电压，因为这会产生最大开关电流。

$$D = 1 - \frac{V_{IN(min)} \times \eta}{V_{OUT}} \quad (1)$$

$V_{IN(min)}$  = 最小输入电压

$V_{OUT}$  = 所需输出电压

$\eta$  = 转换器效率，例如估计为 80%

由于转换器还必须提供耗散的能量，因此效率需添加到占空比计算中。与没有效率因子的公式相比，此计算提供了更真实的占空比。

可以使用估算系数（例如 80%）（在最坏的情况下，这种升压转换器效率是有可能的），也可以参阅所选转换器数据表的典型特性部分（参考文献 3 和 4）。

计算最大开关电流的下一步是确定电感器纹波电流。在转换器数据表中，通常会指定一个特定的电感器或一系列电感器，与 IC 配合使用。因此，要么使用建议的电感器值来计算纹波电流，要么使用建议范围中间的电感器值进行计算，如果数据表中没有给出，请使用本应用手册 [电感器选型](#) 部分中计算得出的值。

$$\Delta I_L = \frac{V_{IN(min)} \times D}{f_s \times L} \quad (2)$$

$V_{IN(min)}$  = 最小输入电压

$D$  = 方程式 1 中计算得出的占空比

$f_s$  = 转换器的最小开关频率

$L$  = 选定的电感器值

现在，必须确定所选 IC 是否能够提供最大输出电流。

$$I_{\text{MAXOUT}} = \left( I_{\text{LIM}(\text{min})} - \frac{\Delta I_{\text{L}}}{2} \right) \times (1-D) \quad (3)$$

$I_{\text{LIM}(\text{min})}$  = 集成开关电流限制的最小值 (在数据表中给出)

$\Delta I_{\text{L}}$  = 使用 [方程式 2](#) 计算的电感器纹波电流

$D$  = 使用 [方程式 1](#) 计算的占空比

如果所选 IC 计算出的最大输出电流值  $I_{\text{MAXOUT}}$  低于系统要求的最大输出电流, 则必须使用另一个具有更高开关电流限制的 IC。

仅当  $I_{\text{MAXOUT}}$  的计算值略小于所需值时, 才有可能将所选 IC 与具有更高电感的电感器配合使用 (电感值仍在建议范围内)。较高的电感可降低纹波电流, 从而增加所选 IC 的最大输出电流。

如果计算得出的值高于应用的最大输出电流, 则系统中的最大开关电流计算方式为:

$$I_{\text{SW}(\text{max})} = \frac{\Delta I_{\text{L}}}{2} + \frac{I_{\text{OUT}(\text{max})}}{1-D} \quad (4)$$

$\Delta I_{\text{L}}$  = 使用 [方程式 2](#) 计算的电感器纹波电流

$I_{\text{OUT}(\text{max})}$  = 应用中需要的最大输出电流

$D$  = 使用 [方程式 1](#) 计算的占空比

这是峰值电流, 是电感器、集成开关和外部二极管必须承受的电流。

### 3 电感器选型

数据表通常会提供建议的电感器值范围。对于这种情况，建议从该范围中选择电感器。电感器值越高，最大输出电流就越高，因为纹波电流较小。

电感器值越低，解决方案尺寸就越小。请注意，电感器的额定电流必须始终高于方程式 4 给出的最大电流，因为电流会随着电感的降低而增加。

对于未提供电感器范围的器件，以下公式可以很好地估算合适的电感器：

$$L = \frac{V_{IN} \times (V_{OUT} - V_{IN})}{\Delta I_L \times f_S \times V_{OUT}} \quad (5)$$

$V_{IN}$  = 典型输入电压

$V_{OUT}$  = 所需输出电压

$f_S$  = 转换器的最小开关频率

$\Delta I_L$  = 电感器预估纹波电流，见下

电感器纹波电流不能通过方程式 1 计算，因为电感器是未知的。电感器纹波电流的合理估算值为输出电流的 20% 至 40%。

$$\Delta I_L = (0.2 \text{ to } 0.4) \times I_{OUT(max)} \times \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} \quad (6)$$

$\Delta I_L$  = 预估的电感器纹波电流

$I_{OUT(max)}$  = 应用中需要的最大输出电流

### 4 整流器二极管选型

为了降低损耗，应使用肖特基二极管。所需的正向电流额定值等于最大输出电流：

$$I_F = I_{OUT(max)} \quad (7)$$

$I_F$  = 整流器二极管的平均正向电流

$I_{OUT(max)}$  = 应用中需要的最大输出电流

肖特基二极管的峰值电流额定值比平均额定值高得多。因此系统中的较高峰值电流不是问题。

必须检查的另一个参数是二极管的功率耗散。它必须处理：

$$P_D = I_F \times V_F \quad (8)$$

$I_F$  = 整流器二极管的平均正向电流

$V_F$  = 整流器二极管的正向电压

## 5 输出电压设置

几乎所有转换器都使用电阻分压器网络设置输出电压（固定输出电压转换器会集成该网络）。

利用给定的反馈电压  $V_{FB}$  和反馈偏置电流  $I_{FB}$ ，可以计算分压器的值。

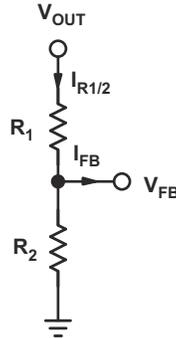


图 5-1. 用于设置输出电压的电阻分压器

流经电阻分压器的电流应至少为反馈偏置电流的 100 倍：

$$I_{R1/2} \geq 100 \times I_{FB} \quad (9)$$

$I_{R1/2}$  = 流经电阻分压器并到达 GND 的电流

$I_{FB}$  = 数据表提供的反馈偏置电流

这会使电压测量增加小于 1% 的误差。电流也会高得多。电阻值较小的唯一缺点是，电阻分压器中的功率损耗较高，但精度会略有提高。

根据上述假设，电阻器的计算方法如下：

$$R_2 = \frac{V_{FB}}{I_{R1/2}} \quad (10)$$

$$R_1 = R_2 \times \left( \frac{V_{OUT}}{V_{FB}} - 1 \right) \quad (11)$$

$R_1$ 、 $R_2$  = 电阻分压器，请参阅图 5-1。

$V_{FB}$  = 数据表中的反馈电压

$I_{R1/2}$  = 流经电阻分压器至 GND 的电流，计算公式为方程式 9

$V_{OUT}$  = 所需输出电压

## 6 输入电容器选择

数据表中通常会提供输入电容器的最小值。由于开关电源的峰值电流要求，这个最小值对于稳定输入电压是必要的。最佳做法是使用低等效串联电阻 (ESR) 陶瓷电容器。电介质材料应是 X5R 或性能更好的材料。否则，电容器会因直流偏置或温度损失大部分电容 ( 请参阅参考文献 7 和 8 )。

如果输入电压噪声较大，则可以增加该值。

## 7 输出电容器选型

妥善做法是使用 ESR 较低的电容器，尽可能减小输出电压的纹波。如果电介质材料为 X5R 或性能更好的材料，则陶瓷电容器是不错的选择 ( 请参阅参考文献 7 和 8 )。

如果转换器具有外部补偿机制，则可以使用高于数据表中建议的最小值的任何电容值，但必须针对所使用的输出电容调整补偿。

对于内部补偿转换器，应使用建议的电感值和电容值，或者遵循数据表中的建议，根据应用调整输出电容器，比率为  $L \times C$ 。

利用外部补偿，可以通过以下公式来调节输出电容值，以获得所需的输出电压纹波：

$$C_{\text{OUT(min)}} = \frac{I_{\text{OUT(max)}} \times D}{f_s \times \Delta V_{\text{OUT}}} \quad (12)$$

$C_{\text{OUT(min)}}$  = 最小输出电容

$I_{\text{OUT(max)}}$  = 应用的最大输出电流

$D$  = 使用方程式 1 计算的占空比

$f_s$  = 转换器的最小开关频率

$\Delta V_{\text{OUT}}$  = 所需输出电压纹波

输出电容器的 ESR 会增加一些纹波，可通过以下公式计算得出：

$$\Delta V_{\text{OUT(ESR)}} = \text{ESR} \times \left( \frac{I_{\text{OUT(max)}}}{1-D} + \frac{\Delta I_L}{2} \right) \quad (13)$$

$\Delta V_{\text{OUT(ESR)}}$  = 由于电容器 ESR 而导致的额外输出电压纹波

ESR = 使用的输出电容器的等效串联电阻

$I_{\text{OUT(max)}}$  = 应用的最大输出电流

$D$  = 使用方程式 1 计算的占空比

$\Delta I_L$  = 根据方程式 2 或方程式 6 计算的电感器纹波电流

## 8 用于计算升压转换器功率级的公式

$$\text{Maximum Duty Cycle: } D = 1 - \frac{V_{IN(\min)} \times \eta}{V_{OUT}} \quad (14)$$

$V_{IN(\min)}$  = 最小输入电压

$V_{OUT}$  = 所需输出电压

$\eta$  = 转换器效率，例如估计为 85%

$$\text{Inductor Ripple Current: } \Delta I_L = \frac{V_{IN(\min)} \times D}{f_S \times L} \quad (15)$$

$V_{IN(\min)}$  = 最小输入电压

$D$  = 方程式 14 中计算得出的占空比

$f_S$  = 转换器的最小开关频率

$L$  = 选定的电感器值

$$\text{Maximum output current of the selected IC: } I_{MAXOUT} = \left( I_{LIM(\min)} - \frac{\Delta I_L}{2} \right) \times (1-D) \quad (16)$$

$I_{LIM(\min)}$  = 集成开关电流限制的最小值 (在数据表中给出)

$\Delta I_L$  = 使用方程式 15 计算的电感器纹波电流

$D$  = 使用方程式 14 计算的占空比

$$\text{Application specific maximum switch current: } I_{SW(\max)} = \frac{\Delta I_L}{2} + \frac{I_{OUT(\max)}}{1-D} \quad (17)$$

$\Delta I_L$  = 使用方程式 15 计算的电感器纹波电流

$I_{OUT(\max)}$  = 应用中需要的最大输出电流

$D$  = 使用方程式 14 计算的占空比

$$\text{Inductor Calculation: } L = \frac{V_{IN} \times (V_{OUT} - V_{IN})}{\Delta I_L \times f_S \times V_{OUT}} \quad (18)$$

$V_{IN}$  = 典型输入电压

$V_{OUT}$  = 所需输出电压

$f_S$  = 转换器的最小开关频率

$\Delta I_L$  = 电感器预估纹波电流，请参阅方程式 19

$$\text{Inductor Ripple Current Estimation: } \Delta I_L = (0.2 \text{ to } 0.4) \times I_{OUT(\max)} \times \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} \quad (19)$$

$\Delta I_L$  = 预估的电感器纹波电流

$I_{OUT(\max)}$  = 应用中需要的最大输出电流

$$\text{Average Forward Current of Rectifier Diode: } I_F = I_{OUT(\max)} \quad (20)$$

$I_{OUT(\max)}$  = 应用中需要的最大输出电流

$$\text{Power Dissipation in Rectifier Diode: } P_D = I_F \times V_F \quad (21)$$

$I_F$  = 整流器二极管的平均正向电流

$V_F$  = 整流器二极管的正向电压

$$\text{Current Through Resistive Divider Network for Output Voltage Setting: } I_{R1/2} \geq 100 \times I_{FB} \quad (22)$$

$I_{FB}$  = 数据表提供的反馈偏置电流

$$\text{Value of Resistor Between FB Pin and GND: } R_2 = \frac{V_{FB}}{I_{R1/2}} \quad (23)$$

$$\text{Value of Resistor Between FB Pin and } V_{OUT}: R_1 = R_2 \times \left( \frac{V_{OUT}}{V_{FB}} - 1 \right) \quad (24)$$

$V_{FB}$  = 数据表中的反馈电压

$I_{R1/2}$  = 流经电阻分压器至 GND 的电流，计算公式为[方程式 22](#)

$V_{OUT}$  = 所需输出电压

$$\text{Minimum Output Capacitance, if not given in the data sheet: } C_{OUT(min)} = \frac{I_{OUT(max)} \times D}{f_S \times \Delta V_{OUT}} \quad (25)$$

$I_{OUT(max)}$  = 应用的最大输出电流

$D$  = 使用[方程式 14](#) 计算的占空比

$f_S$  = 转换器的最小开关频率

$\Delta V_{OUT}$  = 所需输出电压纹波

$$\text{Additional Output Voltage Ripple due to ESR: } \Delta V_{OUT(ESR)} = ESR \times \left( \frac{I_{OUT(max)}}{1-D} + \frac{\Delta I_L}{2} \right) \quad (26)$$

ESR = 使用的输出电容器的等效串联电阻

$I_{OUT(max)}$  = 应用的最大输出电流

$D$  = 使用[方程式 14](#) 计算的占空比

$\Delta I_L$  = 根据[方程式 15](#) 或[方程式 19](#) 计算的电感器纹波电流

## 9 参考文献

1. 了解开关模式电源中的升压功率级 (SLVA061)
2. 使用 TPS61030 进行电压模式升压转换器小信号控制环路分析 (SLVA274)
3. TPS65148 数据表 (SLVS904)
4. TPS65130 和 TPS65131 数据表 (SLVS493)
5. Robert W. Erickson: *Fundamentals of Power Electronics*, Kluwer Academic Publishers, 1997
6. Mohan/Underland/Robbins: *Power Electronics*, John Wiley & Sons Inc., Second Edition, 1995
7. *Improve Your Designs with Large Capacitance Value Multi-Layer Ceramic Chip (MLCC) Capacitors* by George M. Harayda, Akira Omi, and Axel Yamamoto, Panasonic
8. *Comparison of Multilayer Ceramic and Tantalum Capacitors* by Jeffrey Cain, Ph.D., AVX Corporation

## 10 修订历史记录

| Changes from Revision C (January 2014) to Revision D (November 2022)           | Page |
|--|------|
| • 更新了整个文档中的表格、图和交叉参考的编号格式.....   | 1    |
| Changes from Revision B (July 2010) to Revision C (January 2014)               | Page |
| • 将图 5-1 中的 $V_{IN}$ 更改为 $V_{OUT}$ .....                                       | 5    |
| Changes from Revision A (April 2010) to Revision B (July 2010)                 | Page |
| • 将 $I_{OUT(max)} \times (1 - D)$ 更改为： $I_{OUT(max)} \times D$ ，在方程式 12 中..... | 6    |
| • 将 $I_{OUT(max)} \times (1 - D)$ 更改为： $I_{OUT(max)} \times D$ ，在方程式 25 中..... | 7    |
| Changes from Revision * (November 2009) to Revision A (April 2010)             | Page |
| • 向方程式 6 添加了 $V_{OUT}/V_{IN}$ (典型值) .....                                      | 4    |
| • 向方程式 19 添加了 $V_{OUT}/V_{IN}$ (典型值) .....                                     | 7    |

## 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