

# 简易 DC-DC 系统设计方法

Present by leehying

**摘要：**本文以非隔离低压 Boost 型 DC-DC 转换器为例，从最基本的设计指标出发，浅要阐述了元器件选型的依据，功率级传输函数的获得，电流模控制中电流环路的分析与设计方法，及闭环系统的稳定性分析。

**关键词：**DC-DC；Boost；低压；非隔离

## 1 引言

由于本人涉世不深，对当今先进的设计方法知之甚少。故此文仅以传统设计方法为蓝本，着重从理论上对低压 DC-DC 转换器的系统设计方法作一浅薄的论述，还请经验人士多多指正。此篇为所计划的整篇文章的开头，若各位觉得尚有参考价值，本人将继续撰写后续章节。

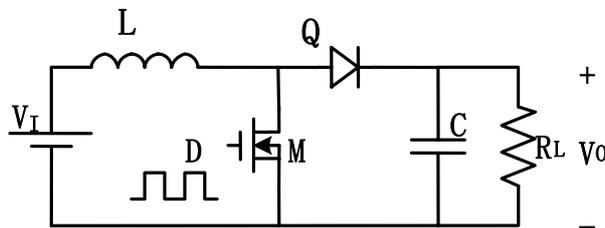


图 1、Boost 功率级拓扑

## 2 指标定义与元件选型

本文只作为设计实例，不针对产品开发，因而系统关键指标只作粗略选取，见表 1。由这些指标提供的信息可以帮助选择功率级各个元器件。

表 1、系统关键指标

Item	$V_{in}/V$	$f_s/kHz$	$\eta$ (效率)	$V_{out}/V$	$I_{o-max}/mA$
Value	3.6	500	90%	5	300

### 2.1 电感选择

通常认为电感的感抗不随流过其的电流变化，称这个区域为电感的线性区；若电流过大，电感将进入饱和区，感抗随电流增大显著减小，从而不能承受电压，输入电压将直接施加到功率开关管上，可能导致开关管损坏。当然可以选择饱和电流足够大的电感，但成本必将增加，因此可以根据系统的最大负载来选取电感。以本例 300mA 为例，流过电感的最大平均电流为

$$i_{L-avg-max} = \frac{V_{out} \cdot I_{o-max}}{\eta \cdot V_{in}} \approx 463mA \quad (1)$$

要确定最大电感电流还需知道电流纹波，通常系统会定义负载轻载阈值，当小于这个阈值后使系统进入 PFM、DCM 或其它提高效率的模式，但此阈值之上应保持工作于 CCM。本例取此阈值为 50mA，对应  $i_{L-avg-min} \approx 77mA$ ，则电流纹波应满足

$$\frac{1}{2} \Delta i_L = \frac{1}{2} \frac{V_{in}}{L} \cdot \frac{V_o - V_{in}}{V_o} \cdot \frac{1}{f_s} \leq i_{L-avg-min} \quad (2)$$

由式(2)得 $L > 13\mu\text{H}$ ，留余量取 $22\mu\text{H}$ 即可，对应的纹波峰峰值约为 $92\text{mA}$ ，从而电感峰值电流为 $463 + 92/2 = 509\text{mA}$ ，选取电感饱和电流大于此值即可。在以上因素限定下，选择ESR尽量小的电感即可，本例假设电感ESR为 $r_L = 600\text{m}\Omega$ 。

## 2.2 输出电容选择

输出电容由输出电压纹波定义，以1%的精度要求为例，则纹波峰峰值为 $50\text{mV}$ 。图2给出了输出电压明细，可知纹波由两部分组成， $v_{rp1}$ 由电容ESR( $r_C$ )决定， $v_{rp2}$ 决定于负载大小。两个纹波都在最大负载时出现最大值，假设两个纹波各占一半，即 $25\text{mV}$ ，则有

$$v_{rp1-\max} = (i_{L-\text{btm}-\max} - I_{o-\max}) \cdot r_C = (463 - 92/2 - 300) \cdot r_C \leq 25 \quad (3)$$

$$v_{rp2-\max} = \frac{I_{o-\max}}{C} \cdot \frac{V_{in}}{V_{out}} \cdot \frac{1}{f_s} = \frac{300}{C} \cdot \frac{3.6}{5} \cdot \frac{1}{500k} \leq 25 \quad (4)$$

由式(3)得 $r_C < 214\text{m}\Omega$ ，由式(4)得 $C > 17.3\mu\text{F}$ ，这两个条件是很好满足的，取电容值为 $22\mu\text{F}$ ，并假设 $r_C = 30\text{m}\Omega$ 。

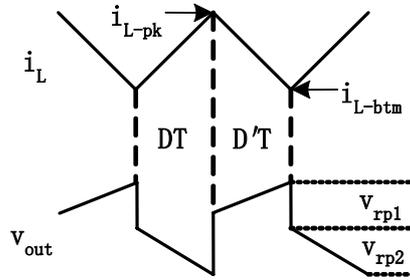


图2、电感电流和输出电压波形明细

## 2.3 功率开关管选择

以非同步整流为例，整流管为肖特基二极管，由最大电感电流可以确定其耐流要求，耐压大于 $V_{out}$ ，并留有余量即可。选择合适的肖特基管，设其前向压降 $V_F = 0.3\text{V}$ ，导通电阻 $R_F = 20\text{m}\Omega$ 。

功率开关管的选择需要满足电流能力、损耗大小和耐压等要求，同样电流能力只要大于电感最大电流，耐压大于 $V_{out} + V_F$ ，并留有余量即可。功率开关管允许的最大损耗需要结合系统效率要求，作损耗分析获得。

- 1) 整流管损耗之一，由于整流管只在D'T阶段内导通，流过其的平均电流为 $D' \cdot i_{L-\text{avg}}$ ，则由整流管前向压降产生的损耗为

$$P_{d-D} = V_F \cdot D' \cdot i_{L-\text{avg}} \quad (5)$$

- 2) 整流管损耗之二，设流过整流管电流的均方值为 $i_{RF-\text{rms}}^2$ ，则由其导通电阻产生的损耗为

$$P_{d-RF} = i_{RF-\text{rms}}^2 \cdot R_F \quad (6)$$

- 3) 电感ESR损耗，设电感电流的均方值为 $i_{L-\text{rms}}^2$ ，则其产生的损耗为

$$P_{d-rL} = i_{L-\text{rms}}^2 \cdot r_L \quad (7)$$

- 4) 输出电容ESR损耗，设流过 $r_C$ 的电流均方值为 $i_{rC-\text{rms}}^2$ ，则其产生的损耗为

$$P_{d-rC} = i_{rC-\text{rms}}^2 \cdot r_C \quad (8)$$

5) 功率开关管导通损耗，设其导通电阻为 $r_{DS}$ ，流过其的电流均方值为 $i_{DS-rms}^2$ ，则其产生的损耗为

$$P_{d-rDS} = i_{DS-rms}^2 \cdot r_{DS} \quad (9)$$

6) 功率管开关损耗，包括三部分：导通时间内的电压电流交迭损耗、关断时间内的电压电流交迭损耗和对功率 NMOS 漏极电容的充放电损耗，对应式(10)中从左到右三项[1]

$$P_{d-SW} = \frac{1}{2} V_{on-pk} \cdot I_{on-pk} \cdot t_{on} \cdot f_s + \frac{1}{2} V_{off-pk} \cdot I_{off-pk} \cdot t_{off} \cdot f_s + \frac{1}{2} C_d \cdot V_{in}^2 \cdot f_s \quad (10)$$

式(10)中 $V_{on-pk}$ 、 $I_{on-pk}$ 、 $V_{off-pk}$ 、 $I_{off-pk}$ 分别为导通过程中功率管漏源最大电压、最大电流，关断过程中的最大电压、最大电流，这里对这两个过程中的电压电流变化作了线性化近似； $t_{on}$ 、 $t_{off}$ 为功率管的导通和关断时间，若用分立器件可从SPEC中查到； $C_d$ 为从功率管漏极对地看到的总电容。

7) 功率管驱动损耗，包括两部分：功率管栅驱动损耗和驱动电路内部损耗，这里忽略了驱动电路内部损耗，只给出栅驱动损耗为[1]

$$P_{d-DRV} = \frac{1}{2} C_g \cdot V_{drv}^2 \cdot f_s \quad (11)$$

式(11)中 $C_g$ 为功率管栅极对地看到的电容， $V_{drv}$ 为栅驱动高电平，通常 $V_{drv} = V_{out}$ 。(注：式(10)、(11)不同参考文献表述不尽相同，请慎用，请指正)。将与功率管相关的损耗归类为

$$P_{d-MOS} = P_{d-rDS} + P_{d-SW} + P_{d-DRV} \quad (12)$$

以上仍然忽略了整流管反向恢复损耗，驱动电路内部损耗，电感磁损耗，控制电路功耗等，结合式(5)~(12)可得总的损耗为

$$P_d = P_{d-D} + P_{d-RF} + P_{d-rL} + P_{d-rC} + P_{d-MOS} = P_o \cdot \frac{1-\eta}{\eta} \quad (13)$$

通常最大效率在典型负载下设计，取典型负载 $I_o = 200mA$ 。(6)~(9)式中的均方电流计算式参考[2]，附录中有其MATLAB计算代码。借助MATLAB计算得到分配给 $P_{d-MOS}$ 的功耗为-6mW，负号表示按照以上选取的元件、参数不能达到90%的效率。又由计算结果知电感ESR和整流管前向压降产生的损耗最大，前向压降能改进的裕度很小，为了达到90%的效率必须选用低ESR的电感，若去 $r_L = 300m\Omega$ ，此时留给 $P_{d-MOS}$ 的功耗为18.3mW，考虑到忽略的损耗，设最终 $P_{d-MOS}$ 为10mW。

由式(9)~(11)知与功率开关相关的损耗，主要取决于其导通电阻、开启和关闭时间、漏极和栅极电容，可借助MATLAB计算找到各个参量的折中，MATLAB计算代码见附录。这里给出一组满足以上要求的典型值见表2。

表 2、典型功率开关管参数

Item	$r_{DS}/m\Omega$	$t_{on}/ns$	$t_{off}/ns$	$C_d/pF$	$C_g/pF$
Value	150	1	10	60	200

以上结合损耗分析，获得了在给定指标下，对功率开关管的参数要求，分析过程同样适用于片上功率管的参数定义。

## 参考文献

- [1] Volkan Kursun, Siva G. Narendra, Vivek K. De, Eby G. Friedman, "Low-Voltage-Swing Monolithic dc-dc Conversion", IEEE Transactions On Circuits And Systems- II : Express Briefs. Vol.51. NO.5, May 2004
- [2] Marian K. Kazimierczuk, Dariuaz Czarkowski Wright, "Applicaton of the Principle of Energy Conservation to Modeling the PWM Converters", in Proc. 2nd IEEE Conf. Control Applicatons,

Sep.13-16, 1993, pp.291-296