

AP3765 系统设计方案及应用注释

作者：孙俊杰
系统工程部

1. 概述

AP3765 使用频率调制方式(PFM)实现断续导通模式(DCM)的反激式开关电源的设计。频率调制的原理不同于脉宽调制(PWM),所以变压器设计也有所不同。AP3765 通过使用原边调节(PSR)可以提供比较精确的恒压,恒流(CV/CC)控制。

AP3765还可以通过PFM工作模式和全新的超低启动电流技术实现超低的待机功耗。AP3765 的系统方案能够满足待机功耗低于30mW 的5星级充电器标准。

图1是AP3765 典型应用电路图。

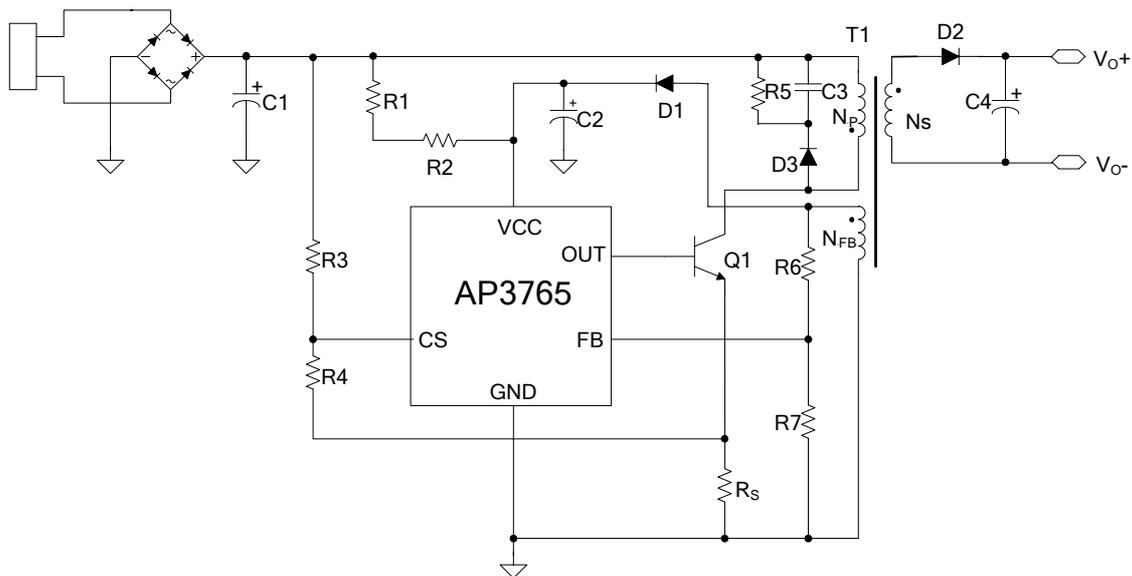


图 1. AP3765 典型应用图

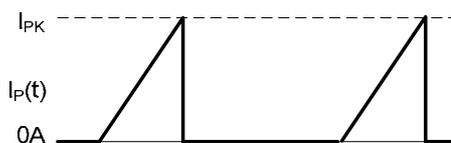


图 2. 原边电流波形

2. 工作状态描述

2.1 原边恒定峰值电流

如图 1 所示,原边电流 $I_p(t)$ 通过电流检测电阻 R_s 来检测。电流以如下速率线性上升:

$$\frac{di_p(t)}{dt} = \frac{v_g(t)}{L_M} \quad (1)$$

如图 2 所示,当电流 $I_p(t)$ 上升到 I_{pk} 时,开关管 Q1 关断,恒定峰值电流如下:

$$I_{pk} = \frac{V_{CS}}{R_s} \quad (2)$$

每个周期贮存在磁化电感 L_M 中的能量为:

$$E_g = \frac{1}{2} \cdot L_M \cdot I_{pk}^2 \quad (3)$$

因此, 从输入到输出转换的功耗为:

$$P = \frac{1}{2} \cdot L_M \cdot I_{pk}^2 \cdot f_{sw} \quad (4)$$

f_{sw} 是开关频率, 当峰值电流 I_{pk} 恒定时, 输出功率取决于开关频率 f_{sw} 。

2.2 恒压控制

AP3765用FB引脚检测辅助绕组电压, 并工作在恒压模式 (CV) 调整输出电压。假设在D2导通期间, 副边绕组是主绕组, 辅助绕组是从绕组, 辅助绕组电压为:

$$V_{AUX} = \frac{N_{AUX} (V_o + V_d)}{N_s} \quad (5)$$

V_d 是二极管的正向压降电压, N_{AUX} 是辅助绕组匝数, N_s 是副边绕组匝数。

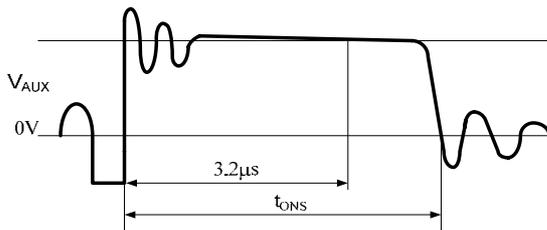


图3. 辅助绕组电压波形

输出电压与副边电压相差一个二极管正向压降而不同, 二极管正向压降取决于流过的电流, 如果副边电压总是在固定的副边电流检测, 输出电压和副边电压的差值固定于 V_d 。对于AP3765, 电压检测点在D2导通时间的 $3.2\mu s$ 处, 这意味着在固定的副边电流点检测副边电压。AP3765的恒压回路控制功能产生一个D2的关断时间去调节输出电压。

2.3 恒流控制

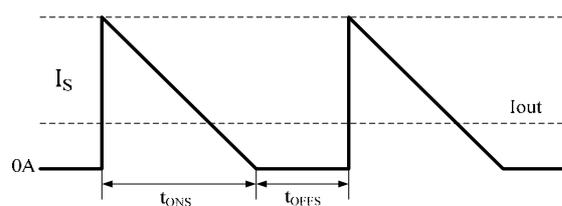


图4. 副边电流波形

在恒流操作时, AP3765的恒流控制功能将D2的导通时间和关断时间保持固定的比例, 这种功能是通过内置的电容器充电来实现的。固定比例是:

$$\frac{t_{ONS}}{t_{OFFS}} = \frac{4}{3} \quad (6)$$

输出恒流和副边峰值电流的关系如下:

$$I_{out} = \frac{1}{2} \times I_{pks} \times \frac{t_{ONS}}{t_{ONS} + t_{OFFS}} \quad (7)$$

D2开通的一瞬间, 原边电流传递到副边的电流峰值为:

$$I_{pks} = \frac{N_p}{N_s} \times I_{pk} \quad (8)$$

因此输出恒流电流如下:

$$I_{out} = \frac{1}{2} \times \frac{N_p}{N_s} \times I_{pk} \times \frac{t_{ONS}}{t_{ONS} + t_{OFFS}} = \frac{2}{7} \times \frac{N_p}{N_s} \times I_{pk} \quad (9)$$

2.4 前沿消隐 (LEB)

当开关管开通时, 在检测电阻上会产生一个开通尖峰, 为了避免开关脉冲的误终止, 一个750ns的LEB内置于IC中, 在这期间, 电流检测比较器被禁止, 门驱动不能被关断。

2.5 电流连续模式 (CCM) 保护

无论是CV还是CC模式, AP3765都设计成工作在电流断续模式 (DCM)。为避免工作在连续模式, AP3765在每个周期检测FB输入电压的下降沿, 如果在 t_{ONS} 结束时没有检测到FB引脚有0.075V下降沿, AP3765将停止工作。

2.6 过压保护 (OVP) 和开路保护 (OCP)

如图5, AP3765包含了过压和开路保护电路。如果FB电压超过8V (正常检测电压的100%), AP3765会进入过压保护模式。但是, 如果在 t_{ONP} 结束时未在FB输入端检测到0.075V上升沿或在 t_{SAMPLE} 结束后未检测到大于0.075V的高电压, AP3765将进入开路保护模式。当AP3765进入过压保护或开路保护模式后会每隔18ms发出一个错误检测脉冲直到故障消除。

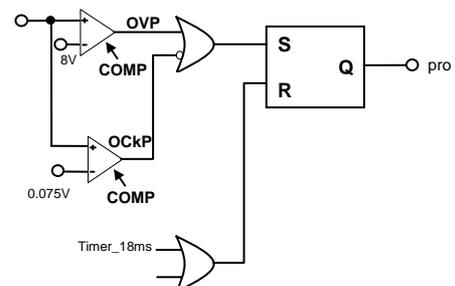


图5. OVP和OCP功能块

3. 设计规范

3.1 低待机功耗设计

为了兼顾低待机功耗和空载输出电压过冲,需要仔细选择假负载电阻 R8。为了实现待机功耗低于 30mW 时具有可以接受的空载输出过冲电压, R8 的推荐值为 5.1kΩ 到 10kΩ。启动电阻(R1+R2)在空载或轻载时的损耗也需要仔细考虑。考虑到待机功耗低于 30mW 和小于 3 秒的启动延迟时间, R1 和 R2 的总阻值推荐为 10MΩ 到 13MΩ。相应地推荐使用 1μF 到 1.5μF 偏置电容 C2。

3.2 变压器设计

图1显示的是一个由AP3765 控制的带有3个绕组的反激变换器。3个绕组分别为原边(N_p), 副边(N_s)和用于偏置电源和输出电压检测的辅助绕组(N_A)。AP3765从FB脚检测辅助绕组的反馈电压,

由VCC脚引入电源。图6给出了设计过程中各参数的相对理想状态下的工作波形。参数术语的命名如下:

V_{dri}---简化的原边开关管的驱动信号

I_p---原边电流

I_s ---副边电流

V_s---副边电压

t_{sw}---开关周期

f_{sw}---开关频率

t_{onp}---原边导通时间

t_{ons}---副边导通时间

t_{off}---关断时间

I_{pk}---原边峰值电流

I_{pks}---副边峰值电流

V_{ds}---输出电压 V_O 与输出整流管正向导通压降之和

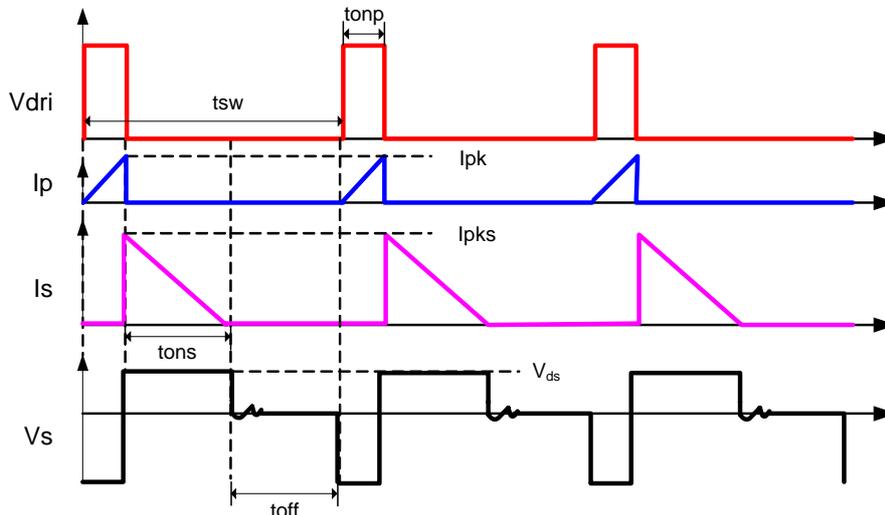


图6. 工作波形图

4. 设计步骤:

第一步. 为AP3765反激变换器选择适当的I_{PK}

1-1. 计算变压器的最大匝比

计算变压器的最大匝比应该是设计的第一步,这保证在任何条件下,特别是在最小输入电压和满载时系统都工作在断续状态。

如果在最小输入电压和满载时系统能满足公式(10),则在任何条件下系统都工作在断续状态。

$$t_{sw} \geq t_{ONP} + t_{ONS} \quad (10)$$

对原边电流而言,

$$t_{ONP} = I_{pk} \frac{L_p}{V_{indc}} \quad (11)$$

其中L_p是原边绕组电感量, V_{indc}是整流后的直流输入电压。

当V_{indc}为最小值时,可以得到最大的t_{ONP}。因此

$$t_{ONP_MAX} = I_{pk} \frac{L_p}{V_{indc_min}} \quad (12)$$

对副边电流而言,

$$t_{\text{ONS}} = I_{\text{pks}} \frac{L_s}{V_s} \quad (13)$$

在公式(13)中, L_s 是副边绕组电感量。

$V_s = V_o + V_d$, V_d 是副边整流二极管的正向导通压降。

对于公式(13), 在恒压(CV)模式, V_s 是恒定的电压, 所以 t_{ONS} 在不同输入电压下是恒定的。

在反激变换器中, 当原边开关三极管导通时, 能量被存储在励磁电感 L_p 中, 因此, 存储的能量可以表示为:

$$P_{\text{in}} = \frac{1}{2} L_p I_{\text{pk}}^2 f_{\text{SW}} \quad (14)$$

则,

$$t_{\text{SW}} = \frac{L_p I_{\text{pk}}^2}{2P_{\text{in}}} \quad (15)$$

用公式(15), (12) 和(13)替换公式(10)中的 t_{SW} , t_{ONP} 和 t_{ONS} ,

$$\frac{L_p I_{\text{pk}}^2}{2P_{\text{in}}} \geq I_{\text{pks}} \frac{L_s}{V_s} + I_{\text{pk}} \frac{L_p}{V_{\text{indc_min}}} \quad (16)$$

因为峰值电流与原边电感量及副边电感量有如下关系:

$$I_{\text{pks}} = n_{\text{ps}} \times I_{\text{pk}} \quad (17)$$

$$L_s = \frac{L_p}{n_{\text{ps}}^2} \quad (18)$$

其中 n_{ps} 是原边绕组与副边绕组的匝比。

合并公式(16), (17), (18), 则

$$\frac{I_{\text{pk}}}{2P_{\text{in}}} \geq \frac{1}{V_s n_{\text{ps}}} + \frac{1}{V_{\text{in}}} \quad (19)$$

因为,

$$P_{\text{in}} = \frac{V_o I_o}{\eta} \quad (20)$$

这里 η 是系统的效率。

在最大负载时, 系统会工作在 CV 和 CC 状态的边界。 I_o 可以表示为

$$I_o = \frac{1}{2} \times \frac{t_{\text{ONS}}}{t_{\text{SW}}} I_{\text{pks}} \quad (21)$$

则 I_{pks} 定义为

$$I_{\text{pks}} = k I_o \quad (22)$$

在 AP3765 的设计中,

$$k = \frac{2t_{\text{SW}}}{t_{\text{ONS}}} = 3.5 \quad (\text{在恒流模式, } t_{\text{ONS}} \text{ 和 } t_{\text{OFFS}} \text{ 的比值是 } 4:3) \quad (23)$$

因此, 可得到

$$n_{\text{ps}} \leq V_{\text{indc_min}} \left(\frac{k \times \eta}{2V_o} - \frac{1}{V_s} \right) \quad (24)$$

所以, 最大的原副边匝比 N 为

$$N \leq V_{\text{indc_min}} \left(\frac{k \times \eta}{2V_o} - \frac{1}{V_o + V_d} \right) \quad (25)$$

由于以上计算都是基于忽略系统精度的理想情况, 所以 k 由经验值 3.85 来替代理论值 3.5。

1-2. 计算原边峰值电流和电流采样电阻

根据输出电流计算出 I_{pk} :

$$I_{\text{pk}} = \frac{I_{\text{pks}}}{n_{\text{ps}}} = \frac{k \times I_o}{n_{\text{ps}}} \quad (26)$$

这里, $k=3.85$, n_{ps} 是 n_{MAX} 的计算值。

在 AP3765 中, 内部参考电压为 0.5V。如果检测电压 V_{CS} 达到 0.5V, 功率管会被关断, t_{ONP} 结束。

$$R_{\text{CS}} = \frac{0.5V}{I_{\text{pk}}} \quad (27)$$

所以 R_{CS} 可由公式(27)得出, 并从标准系列电阻中选出实际值。在 R_{CS} 确定后, I_{pk} 可以根据选定的 R_{CS} 进行修正。

至此, I_{pk} 和 R_{CS} 已经设计好了。

第二步. 设计变压器**2-1. 计算原边电感量 L_p**

原边电感量 L_p 与存储能量相关。 L_p 应该足够大以存储足够的能量，因此可以从系统中得到 P_{O_Max} 。

由公式(20)，可给出最大功率为：

$$P_O = \frac{1}{2} L_p I_{pk}^2 f_{sw} \eta \quad (\eta: \text{系统效率}) \quad (28)$$

则， L_p 可从下面公式中得出

$$L_p = \frac{2P_O}{I_{PK}^2 f_{sw} \eta} \quad (29)$$

这里，为得到最好的系统综合性能，推荐的满载最佳开关频率 f_{sw} 为 50kHz 到 60kHz。

2-2. 重新计算原副边匝比--- n_{ps}

由公式(26)，原副边匝比可以重新计算

$$n_{ps} = \frac{k \cdot I_O}{I_{pk}} \quad (k=3.85) \quad (30)$$

2-3. 计算原边，副边和辅助绕组的匝数

首先，要确定合理的磁芯类型和 ΔB ，然后分别计算出 3 个绕组的匝数。

原边绕组匝数：

$$N_p = \frac{L_p I_{pk} 10^4}{A_e \times \Delta B} \quad (L_p: \text{mH}, I_{pk}: \text{mA}, A_e: \text{mm}^2, \Delta B: \text{GS}) \quad (31)$$

副边绕组匝数：

$$N_s = \frac{N_p}{n_{ps}} \quad (32)$$

辅助绕组匝数：

$$N_A = \frac{N_s V_A}{V_S} \quad (33)$$

这里， V_A 取典型值 20V， V_S 等于 $V_O + V_d$ 。
磁芯选定后， A_e 可自动得到。

第三步. 选择整流二极管和原边开关管**3-1. 选择副边和辅助绕组的整流二极管**

副边最高反向电压：

$$V_{dr} = V_O + \frac{V_{indc_max} N_s}{N_p} \quad (34)$$

辅助绕组最高反向电压：

$$V_{dar} = V_A + \frac{V_{indc_max} N_A}{N_p} \quad (35)$$

在公式(34)和(35)中，应该使用最大直流输入电压。

3-2. 选择原边开关管

$$V_{dc_max} = V_{dc_spike} + V_{indc_max} + \frac{V_S N_p}{N_s} \quad (36)$$

注意不同的吸收电路， V_{dc_spike} 也是不一样的。

5. 设计举例

规格：

输入电压： 85V_{AC}-265V_{AC}

输出电压： $V_O=5V$

输出电流： $I_O=0.7A$

系统效率： 75%

开关频率： $f_{sw}=60kHz$

副边绕组整流管正向导通电压： $V_d=0.4V$

辅助绕组整流管正向导通电压： $V_{da}=1V$

辅助绕组反馈电压： $V_a=20V$

磁芯： EE16 ($A_e=19.2mm^2$)

$\Delta B: \Delta B=2450GS$

$V_{dc_spike}=100V$ (包含吸收电路)

输出导线： 28AWG, 1.5m 长, 0.214 Ω /m

副边整流管占空比： $D_{ons} = 4/7$

反馈电阻： $R_6=36.5k, R_7=9.1k$

设计步骤：

第一步. 设计合理的 AP3765 反激电路的 I_{pk}

1-1. 计算变压器最大匝比

$$N_{MAX} = V_{indc_min} \left(\frac{k \times \eta}{2V_O} - \frac{1}{V_O + V_d} \right) (k \approx 3.85) \quad (37)$$

$$V_{indc_min} = V_{inac_min} \times \sqrt{2} - 40 \quad (\text{当 } I_O=0.7A, \text{ 设置: } V_{indc} \text{ 下降到大约 } 40V) \quad (38)$$

$$N_{MAX} = 8.3 \quad (39)$$

1-2. 计算原边峰值电流和电流采样电阻

$$I_{pk} = \frac{I_{pks}}{N} = \frac{k \times I_O}{N} \quad (40)$$

$$I_{pk_max} = 325\text{mA} \quad (41)$$

电流采样电阻,

$$R_{CS} = \frac{0.5V}{I_{pk}} \quad (42)$$

$$R_{CS} \approx 1.538\Omega \quad (\text{Set: } R_{CS} = 1.54\Omega) \quad (43)$$

重新计算原边峰值电流,

$$I_{pk_max} = 325\text{mA} \quad (44)$$

第二步. 设计变压器
2-1. 计算原边电感量---Lp

$$L_p = \frac{2P_o}{I_{pk}^2 f_{sw} \eta} \quad (45)$$

$$L_p = 1.47\text{mH} \quad (46)$$

2-2. 重新计算原副边匝比---N

$$N = \frac{k \cdot I_O}{I_{pk}} \quad (k \approx 3.85) \quad (47)$$

$$N = 8.3 \quad (48)$$

2-3. 计算原边, 副边和辅助绕组的匝数

原边绕组匝数,

$$N_p = \frac{L_p I_{pk} 10^4}{Ae \times \Delta B} \quad (49)$$

$$N_p = 102 \text{ N} \quad (50)$$

副边绕组匝数,

$$N_s = \frac{N_p}{N} \quad (51)$$

$$N_s = 12\text{T} \quad (52)$$

辅助绕组匝数,

$$N_A = \frac{N_s V_A}{V_S} \quad (53)$$

$$N_A = 44\text{T} \quad (54)$$

第三步. 选择整流管和原边开关管
3-1. 选择副边和辅助绕组的整流管

副边最大反向电压,

$$V_{dr} = V_O + \frac{V_{indc_max} N_s}{N_p} \quad (55)$$

$$V_{dr} = 49.1\text{V} \quad (56)$$

辅助绕组最大反向电压,

$$V_{dar} = V_A + \frac{V_{indc_max} N_A}{N_p} \quad (57)$$

$$V_{dar} = 181.8\text{V} \quad (58)$$

3-2. 选择原边开关管

$$V_{dc_max} = V_{dc_spike} + V_{indc_max} + \frac{V_S N_p}{N_s} \quad (59)$$

$$V_{dc_max} = 520.9\text{V} \quad (60)$$

第四步. 选择合理的反馈电阻 R6 和 R7

$$V_{FB} = 4\text{V} = V_a \times \frac{R7}{R6 + R7} \quad (\text{设: } R7=9.1\text{k}\Omega, R6=36.5\text{k}\Omega) \quad (61)$$

设计结论

1. 计算最大原边峰值电流和 R _{CS}			
I _{pk} =	325	mA	原边峰值电流
R _{CS} =	1.54	Ω	电流采样电阻
2. 设计变压器			
L _p =	1.47	mH (±8%)	原边电感
N=	8.3	原副边匝比	
N _p =	102	T	原边绕组匝数
N _s =	12	T	副边绕组匝数
N _A =	44	T	辅助绕组匝数
3. 选择整流管和原边开关管			
V _{dr} =	49.1	V	副边最大反向电压
V _{dar} =	181.8	V	辅助绕组最大反向电压
V _{dc_max} =	520.9	V	原边开关管电压
4. 选择反馈电阻			
R ₆ =	36.5	kΩ	反馈电阻
R ₇ =	9.1	kΩ	反馈电阻