

高效率星载 TWTA 用 EPC 预稳电路的设计与仿真

杨富花^{①②} 苏小保^① 张万君^{①②}

^①(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

^②(中国科学院研究生院 北京 100039)

摘要: 该文对星载 EPC 预稳电路的高效率问题进行了详细的研究, 提出了提高效率的方法, 着重介绍了一种提高效率的有效方法——零电压软开关方法, 并给出了其仿真结果。仿真结果表明, 软开关方法对减少开关交流损耗, 提高电路效率有着显著的影响。

关键词: 电子功率调节器; 开关损耗; 零电压软开关

中图分类号: TN124, TN86

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)10-2537-04

Design and Simulation on High Efficiency in Pre-regulation Stage of EPC Used in Spaceborne TWTA

Yang Fu-hua^{①②} Su Xiao-bao^① Zhang Wan-jun^{①②}

^①(Institute of Electronics, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

^②(Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: The efficiency problem on pre-regulation stage of EPC used in spaceborne TWTA is studied in details. Some advice on how to improve the efficiency is given and the simulation results of Zero-Voltage-Switching circuit (ZVS) are presented. The simulation results show that ZVS has a great effect on the improvement of the circuit efficiency.

Key words: Electronic Power Conditioner (EPC); Switching loss; Zero-voltage-switching circuit

1 引言

行波管放大器(Traveling Wave Tube Amplifier, TWTA)具有宽频带、高增益、高效率等优点, 被广泛应用于微波通信、雷达和电子对抗等技术领域中。星载 TWTA 是为满足星载使用要求而发展起来的 TWTA 的一个分支, 是各类卫星(通讯卫星、导航定位与军事测绘卫星等)、星-星、星-地大功率转发器的核心部件。

星载 TWTA 由空间行波管(Traveling Wave Tube, TWT)和电子功率调节器(Electronic Power Conditioner, EPC)组成。EPC 由指令电路、遥测电路、变换器及保护电路等功能模块组成, 主要为 TWT 正常工作提供从一次母线电压到多路高电压(上千伏)输出的隔离匹配, 以及完成系统对 TWTA 各种遥控、遥测信号接口。DC-DC 变换器是 EPC 的重要组成部分。EPC 可以直接由单级隔离 DC-DC 变换器组成, 由于输入的母线电压不稳定, 因此必须保证在输入的母线电压有较大变化的情况下, 输出电压仍能保持稳定。这种电路效率会比较高, 但是实现电压的稳定性会有一定的难度^[1]。所以, 在 EPC 的设计中, 通常由两级拓扑来输出所要求的高压, 即先通过预稳电路对母线馈入的直流电压实施预稳压, 且升压到一稳定值, 然后再通过隔离 DC-DC 变

器输出行波管所需要的高压。预稳电路是一个 boost 升压变换器, 设置此电路的目的主要有两个: 一是使后面的主逆变电路的输入稳定, 有利于主逆变控制电路的设计; 二是降低高压变压器的变压比, 以减少变压器的匝数和体积。这种情况下, 通过合理的设计, 效率和稳定性都能得到保证, 比单级拓扑容易实现^[2]。

星载器件在空间运行时, 一般用太阳能电池供电, 由于供电能力的限制, 卫星分配给 TWTA 的能耗有严格限制, 因此高效率是必备条件。在 EPC 的两级拓扑结构中, 要想实现星载 EPC 的高效率, 必须保证两级电路(预稳电路和主逆变电路)中每一级电路的效率都要高。为此, 本文对预稳电路的效率进行了探讨, 提出了高效率的实现途径, 着重介绍了零电压软开关方法, 并进行了仿真, 给出了采用此方法后的仿真结果。

2 预稳电路的效率探讨

2.1 预稳电路的效率分析

某型号星载 TWTA 用 EPC 预稳电路的组成如图 1 所示, 该电路工作在电流连续模式下, 由功率开关电路、控制电路、滤波电路和采样电路组成。其中, 损耗主要发生在功率开关电路中, 其损耗大小直接决定了预稳电路效率的高低。

作为开关使用的 MOS 管的功率损耗主要来自 3 个方面：导通损耗、截止损耗和开关损耗。一般截止损耗与其他两项

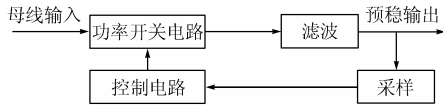


图 1 预稳电路组成框图

相比要小得多，可以忽略。通过对开关变换器连续状态下的分析^[3,4]，计算损耗如下：

设开关周期为 T ，开关管导通时间为 T_{on} ，二极管的导通时间为 T_{off} ，由于工作在电流连续模式，则 $T_{off} + T_{on} = T$ 。在开关管和二极管导通时间内，其电流平均值均为输入电流 I_i 。设开关管的饱和压降为 V_{ces} ，二极管的导通压降为 V_d ，通常两者相同，均为 V_{ces} ，则导通损耗功率 P_{dc} 可以表示为

$$P_{dc} = V_{ces} I_i \frac{T_{on}}{T} + V_{ces} I_i \frac{T_{off}}{T} = V_{ces} I_i \quad (1)$$

在图 2 所示的情况下，开通时，开关器件的电流上升和电压下降同时进行，关断时，电压上升和电流下降同时进行。电压、电流波形的交叠产生了开关损耗。开通时，开关管电流从零(由于漏电流非常小，可以忽略)上升到 I_i 的同时，其电压从最大值 V_o 下降到饱和压降 V_{ces} ，设开通时间为 t_{on} ，则导通过程的损耗为： $\int_0^{t_{on}} i v dt = \frac{1}{6} I_i V_o t_{on} + \frac{1}{3} I_i V_{ces} t_{on}$ ，导通时的平均损耗功率为： $\frac{I_i V_o t_{on}}{6T} + \frac{I_i V_{ces} t_{on}}{3T}$ 。同理，设关断时间为 t_{off} ，关断时的平均损耗功率为 $\frac{I_i V_o t_{off}}{6T} + \frac{I_i V_{ces} t_{off}}{3T}$ 。

设 $t_{on} = t_{off} = t_s$ ，则总开关损耗功率 P_{ac} 为

$$P_{ac} = \frac{I_i V_o t_{on}}{6T} + \frac{I_i V_{ces} t_{on}}{3T} + \frac{I_i V_o t_{off}}{6T} + \frac{I_i V_{ces} t_{off}}{3T} \\ = \frac{I_i V_o t_s}{3T} + \frac{2I_i V_{ces} t_s}{3T} \quad (2)$$

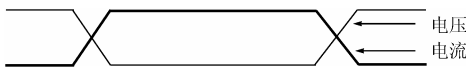


图 2 电压和电流动态变化曲线

然而，实际电路中，器件开通时会有开通电流尖峰，器件关断时会有电压尖峰，故实际开关损耗要大于以上计算出的值，在此取为 $1.5P_{ac}$ 。因此，总损耗功率 P_{loss} 为

$$P_{loss} = P_{dc} + 1.5P_{ac} = V_{ces} I_i + \frac{I_i V_o t_s}{2T} + \frac{I_i V_{ces} t_s}{T} \quad (3)$$

设输入功率为 P_{in} ，输出功率为 P_o ，则效率 η 为

$$\eta = \frac{P_o}{P_{in}} = \frac{P_{in} - P_{loss}}{P_{in}} = \frac{V_i I_i - V_{ces} I_i - \frac{I_i V_o t_s}{2T} - \frac{I_i V_{ces} t_s}{T}}{V_i I_i} \\ = \frac{V_i - V_{ces} - V_{ces} t_s f - \frac{V_o t_s f}{2}}{V_i} \quad (4)$$

其中 f 为开关频率， $f = 1/T$ ， V_i 为输入电压， V_o 为输出电压。

2.2 高效率预稳电路的设计

由式(4)可见，若想提高效率，可以采取以下方法：

- (1) 增大开关周期，即减小开关频率；
- (2) 使用导通压降小的二极管和开关管；
- (3) 尽量减小开关管的导通和关断时间；
- (4) 采用软开关技术，降低交流开关损耗。

以上方法中，虽然减小开关频率能提高效率，但是，受限于火箭的运载能力，对星载 EPC 的体积、重量方面提出了严格的限制，要求实现小体积、轻重量，开关频率的减小会导致 EPC 体积、重量的加大，所以要在全面权衡后选择合适的开关频率；选择器件时，应注意选择导通压降低的肖特基二极管和 VMOS 场效应管，以减少导通损耗；设计良好的驱动电路，使开关管能快速开通，快速关断，以减少开关过程中的损耗。在设计中，应全面考虑以上因素，使得电路能以较高效率工作在较高的频率下。

某型号 TWTA 用 EPC 输入母线电压大小为 $28 \pm 3V$ ，在设计预稳电路的输出时，综合考虑后续电路的拓扑结构和元器件的降额及选用等因素，将输出电压设计为 $50V$ ，通过选择合适的器件，开关管和二极管的导通压降为 $0.7V$ 。开关管的驱动信号由 SG1525 产生，电路的开关频率 $f = 200kHz$ ，开通和关断时间 $t_s = 0.3\mu s$ 。当母线电压为 $28V$ 时，由式(4)可以计算出效率为

$$\eta = \frac{28 - 0.7 - \frac{0.7 \times 0.3}{5} - \frac{50 \times 0.3}{2 \times 5}}{28} \times 100\% = 91.99\%$$

受限于 EPC 前级系统的输出，本电路母线输入电压大小为 $28 \pm 3V$ ，电压波动幅度不是很大，图 3 给出了效率随输入母线电压的变化曲线，可以看出，效率随输入电压的升高而增大。

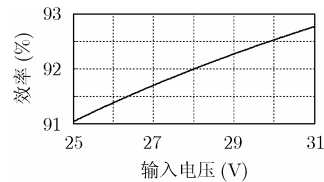


图 3 效率随输入电压的变化曲线

在电路开关频率、元器件参数均相同的条件下，如果采用软开关技术将交流开关损耗降为原来的 30%，则电路的效率为

$$\eta = \frac{28 - 0.7 - (0.7 \times 0.3 / 5 + 50 \times 0.3 / (2 \times 5)) \times 30\%}{28} \times 100\% = 95.85\%$$

因此, 在相同的条件下, 采用软开关技术可以将效率提高近 4 个百分点, 是减少开关损耗的一种有效的方法, 以下将对其进行重点介绍。

3 零电压软开关电路

3.1 硬开关电路仿真结果与分析

图 4 所示是未采用软开关时的功率开关电路原理图。针对以上的电路参数, 使用 PSPICE 进行仿真。其中, 开关管选择用 IRF150, 模型采用 MOS3 半经验模型, 其参数为

. model IRF150 NMOS(Level=3, Gamma=0, Delta=0, Eta=0, Theta=0, Kappa=0.2, Vmax=0, Xj=0, Tox=100n, Uo=600, Phi=.6, Rs=1.624m, Kp=20.53μ, W=.3, L=2μ, Vto=2.831, Rd=1.031m, Rds=444.4k, Cbd=3.229n, Pb=.8, Mj=.5, Fc=.5, Cgso=9.027n, Cgdo=1.679n, Rg=13.89, Is=194E-18, N=1, Tt=288n)

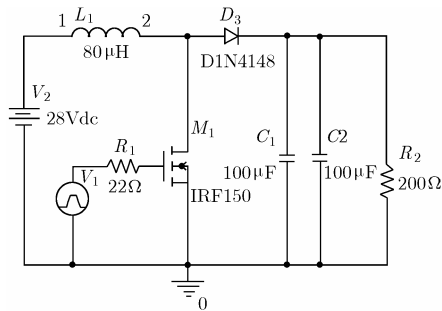


图 4 硬开关电路原理图

开关管的驱动信号是由脉宽调制芯片 SG1525A 产生的, 它可以直接驱动 MOS 场效应晶体管。芯片 SG1525 的频率是由外接的电阻 R_i 、电容 C_i 决定的, 而模型中直接设定所需频率参数就可以。为保证电路的连续模式工作, 选取电感值为 $80\mu\text{H}$ 。

图 5 给出了硬开关的仿真波形, 从中可以看出, 开关过程中电压和电流存在相互重叠的部分, 即有交流开关损耗存在; 而且, 存在开通电流尖峰, 这是因为开关器件在很高的电压下开通时, 储存在开关器件结电容中的能量将以电流形式全部耗散在该器件内, 频率越高, 开通电流尖峰越大, 可能会引起器件过热。为了减小开关损耗和开通电流尖峰, 可以采用零电压软开关技术。

3.2 零电压软开关电路仿真结果与分析

零电压软开关是利用电容与电感谐振, 使开关器件中电压按正弦或准正弦规律变化, 为开关器件提供零电压开关的条件^[5]。电路原理图如图 6 所示, L_r 为谐振电感, C_r 为谐振电容。

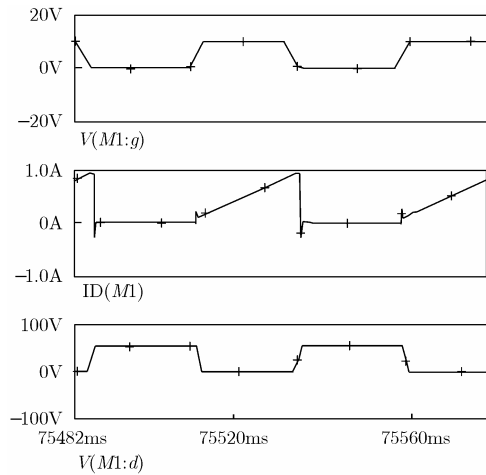


图 5 硬开关电路仿真波形

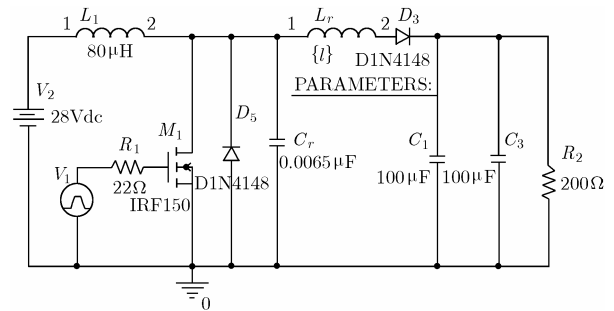


图 6 零电压电路原理图

其工作过程如下: 开始, 开关管导通, 输入电流经开关管续流, 谐振电容电压为零, 谐振电感电流为零。关断开关管时, 输入电流从开关管中转移到谐振电容中, 给电容充电, 电压从零开始线性增加, 电容限制了电压的上升率, 使开关管实现了零电压关断。当电容电压上升到输出电压时, 二极管导通, L_r 与 C_r 开始谐振工作, 谐振电感电流从零开始增加, 经过 $T_r/4$ 后, 电流等于 I_i , 此时谐振电容电压达到最大值。此后, 电感电流大于 I_i , C_r 开始放电, 其电压开始降低, 当减小到零时, 开关管的反并联二极管导通, 将开关管的电压箝位为零, 此时开通开关管, 则为零电压开通。之后, 开关管开通, 输入电流流经开关管, 此时加在谐振电感两端的电压为 $-V_o$, 电流线性减小, 当减小到零时, 由于二极管的阻断作用, 电流不能反方向流动。然后, L_r 与 C_r 停止工作, 输入电流经开关管续流, 负载由输出滤波电容提供能量。

使用软件 PSPICE 来仿真零电压软开关电路, 电路主要元件参数为: 电感 L_1 为 $80\mu\text{H}$, 电容 C_1, C_3 为 $100\mu\text{F}$, 电阻 R_2 为 200Ω , 谐振电感 L_r 为 $60\mu\text{H}$, 谐振电容 C_r 为 6500pF , 仿真波形如图 7 所示。

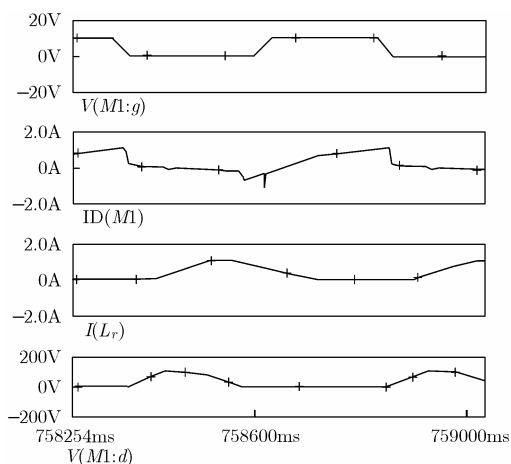


图 7 零电压电路仿真波形

从图 7 的仿真波形可以看出, 开关管两端电压在开通与关断时幅值很小, 接近于零, 减小了交流开关损耗, 而且, 开关管的开通电流尖峰也有所减少。故采用软开关技术, 在提高效率的同时, 还减缓了开关过程的电压、电流的变化速率, 减小了电磁干扰。但是, 也应该看到, 在谐振过程中, 谐振电压峰值会达到 100V, 因此在选择器件时, 应该选择耐压高的开关管。

值得注意的是, 为了要在不同负载和不同输入电压下得到要求的稳定输出电压, 必须采用脉冲频率调制方法。对于特定的负载和输入电压, 为了达到预期的效果, 必须选取合理的谐振频率, 仿真过程中可以通过对谐振电感或者电容进行参数扫描来实现。

4 结束语

针对星载 EPC 电路的高效率问题, 对预稳级电路进行了详细分析, 并通过 PSPICE 仿真验证了零电压软开关理论分析的正确性。零电压软开关的实现不仅会降低电路开关损耗, 提高电路的效率, 而且会降低开通电流尖峰, 减少电磁干扰。因此, 对 EPC 设计者来说, 它是一种理想的参考方案。

参考文献

- [1] Gules R and Barbi I. A high efficiency isolated DC-DC converter with high-output voltage for TWTA telecommunication satellite application. Power Electronics Specialists Conference, Vancouver, Canada, 2001, 4: 1982-1987.
- [2] Barbi I and Gules R. Isolated DC-DC converters with high-output voltage for TWTA telecommunication satellite applications. *IEEE Trans on Power Electronics*, 2003, 18(4): 975-984.
- [3] 张占松, 蔡宣三. 开关电源原理与设计. 北京: 电子工业出版社, 2004: 27-40.
- [4] Abraham I. Pressman(著). 王志强(译). 开关电源设计(第二版). 北京: 电子工业出版社, 2005: 17-22.
- [5] 阮新波, 严仰光. 直流开关电源的软开关技术. 北京: 科学出版社, 2000: 99-106.

杨富花: 女, 1981 年生, 硕士生, 研究方向为高效率高可靠性星载 TWTA 用 EPC 的设计。

苏小保: 男, 1963 年生, 研究员, 现从事微波电子学、低温等离子体及应用等方面的研究。

张万君: 男, 1965 年生, 博士后, 主要研究方向为物理电子学。