

## 星载 EPC 的抗干扰分析与设计<sup>1</sup>

刘红民 张锐 阴和俊

(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

**摘要:** 气象卫星星载行波管放大器 TWTA 的抗干扰能力是其可靠性的一个重要参数。为空间行波管 TWT 提供电源及控制的 EPC 的抗干扰性对整个 TWTA 的抗干扰能力起主要影响。该文以 EPC 中预稳电路为例, 利用开关电源的小信号模型分析了电路对稳态干扰的响应、运用 PSPICE 进行瞬态干扰分析, 给出了 PID(Proportional-Integral-Differential) 参数最优设计方法, 实际结果满足要求。

**关键词:** EPC, 干扰抑制, 稳态干扰, 瞬态干扰, PID

**中图分类号:** TN124 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2004)02-0303-04

## Analysis and Design on Disturbance Depression in EPC Used in Spaceborne TWTA

Liu Hong-min Zhang Rui Yin He-jun

(Institute of Electronics, Chinese Academic of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract** Disturbance depression is very important to the reliability of spaceborne TWTA and the Electronic Power Controller (EPC) is responsible for the disturbance depression of it. In this paper, based on small signal model and PSPICE, the responses to static and transit disturbance in the pre-regulation stage of EPC are analyzed. And the design for PID is given, the results are satisfactory.

**Key words** EPC, Disturbance depression, Static disturbance, Transit disturbance, PID

### 1 前言

气象卫星星载行波管放大器 (TWTA) 由空间行波管 (TWT) 和电子功率调节器 (EPC) 构成, EPC 的特性的好坏对 TWT 有显著的影响<sup>[1]</sup>, EPC 的抗干扰性将决定整个 TWTA 的抗干扰特性。我们研制的气象卫星的 EPC 由三级开关电源组成, 其中预稳压级为其它两级开关电源提供工作和控制电压。EPC 的干扰主要来自直流母线上的瞬态和稳态干扰, 按照对 TWTA 的技术条件的定义<sup>[2]</sup>, 瞬态干扰为大信号干扰, 稳态干扰为小信号干扰。由于电路工作条件的不同, 预稳压级的输出对直流母线上的干扰的响应是整个 EPC 抗干扰特性的关键。本文以预稳压级为例来说明抗干扰的设计方法。

预稳压级是由 PWM(Pulse-Width-Modulation) 控制器 SG1525 构成的电压闭环开关电源, 对其稳态抗干扰特性采用连续状态下变换器的小信号模型进行分析和设计。采用连续状态下变换器的小信号模型的优点是得到参数的解析表达式, 物理意义明确, 设计时可以调整参数以控制电路特性的变化。对于瞬态干扰的研究是将从小信号模型中得到的参数带入预稳压级的 PSPICE 模型中, 求出其瞬态响应曲线。在所得的参数中选取同时满足抑制稳态干扰和瞬态干扰的一组最优参数作为实际元件数值的参考值。

### 2 预稳压级连续状态下小信号模型

预稳压级的电路框图如图 1 所示, 电路型式为 Boost, 工作在电流连续模式下。在图 1 中,

<sup>1</sup> 2002-10-22 收到, 2003-02-28 改回  
中科院知识创新工程项目资助课题 (kgcx2-404)

由自控理论可知 SG1525 的误差放大器的 PID 参数对整个预稳压级的闭环频率响应特性有很大的

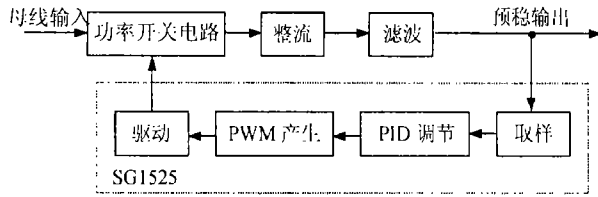


图 1 预稳压级电路框图

影响, 决定了整个电路的抗干扰特性。当电路其它元件的参数固定后, 可以方便地调节 PID 参数从而控制整个预稳压级的闭环频率响应特性。SG1525 的误差放大器开环频率响应曲线如图 2 所示 [3], 由其可以得到误差放大器的开环传递函数。

由图 1 和开关变换器的连续状态下的小信号标准模型 [4], 我们可以建立预稳压级连续状态下  $s$  域小信号模型, 如图 3 所示。

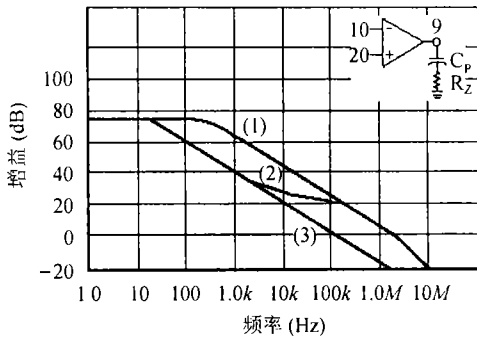


图 2 SG1525 误差放大器开环频率响应曲线  
(1)  $C_p = 0, R_z = 20k\Omega$  (2)  $C_p = 1.0nF, R_z = 20k\Omega$  (3)  $C_p = 1.0nF, R_z = 0$

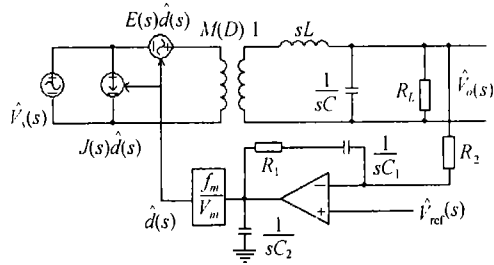


图 3 预稳压级连接状态下小信号模型

图 3 中  $\hat{V}_s(s), \hat{d}(s), \hat{V}_{ref}(s)$  和  $\hat{V}_o(s)$  分别为输入电压、占空比、参考电压和输出电压的扰动量。  $R_1, R_2, C_1$  和  $C_2$  构成 PID 参数。其它量的含义如下:  $E(s)\hat{d}(s) = V_o(1 - sL/R_L)\hat{d}(s)$  为受  $\hat{d}(s)$  控制的电压源,  $V_o$  为稳态输出电压。  $J(s)\hat{d}(s) = \frac{V_o}{R_L(1-D)^2}\hat{d}(s)$  为受  $\hat{d}(s)$  控制的电流源。  $M(D) = 1/(1 - D)$  为在稳态, 占空比为  $D$  时的直流增益。  $f_m/V_m$  中,  $V_m$  为锯齿波峰值,  $f_m = 1$  为所用的 PWM 的 AC 传递函数特性。  $R_L LC$  二阶电路的传递函数为:  $H_e(s) = 1/(1 + sL/R_L + s^2 LC)$ 。因此有

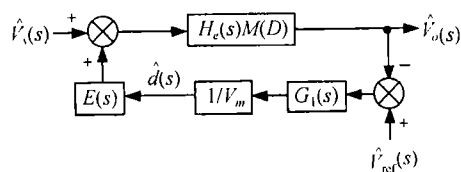


图 4 预稳压级系统框图

$$\hat{V}_o(s) = H_e(s)M(D)[\hat{V}_s(s) + E(s)\hat{d}(s)] \quad (1)$$

由式 (1) 我们得到用传递函数表示的预稳压级的系统框图如图 4 所示。其中  $G_1(s)$  是 SG1525 的误差放大器的闭环传递函数。

在实际工作中参考电压恒定不变, 因此有  $\hat{V}_{ref}(s) = 0$ 。由式 (1) 和图 4 得到:

$$\hat{V}_o(s) = \{[H_e(s)M(D)]/[1 + (1/V_m)E(s)G_1(s)H_e(s)M(D)]\} \hat{V}_s(s) \quad (2)$$

令  $H_e(s)M(D) = G_o(s), (1/V_m)E(s)G_1(s) = F(s)$ , 则将式 (2) 转化为标准的系统传递函数表达式 (3), 将图 4 转化为标准的系统框图 5。

$$\hat{V}_o(s) = \{G_o(s)/[1 + F(s)G_o(s)]\} \hat{V}_s(s) \quad (3)$$

其中  $G_o(s)$  是系统的开环传递函数,  $G_o(s)/[1 + F(s)G_o(s)]$  是系统的闭环传递函数。

### 3 预稳压级连续状态 PSPICE 模型

在 PSPICE 中画出预稳压级的电路原理图后, 预稳压级的 PSPICE 模型由仿真软件自动建立。模型中开关场效应管的型号为 IRF843, 开关二极管的型号为 MUR890。PSPICE 采用的是空间状态法, 优点是得到大信号的响应特性及波形, 可以方便地在计算机上实现仿真, 缺点是物理意义不明确。

### 4 参数分析及设计

利用小信号模型物理意义明确和 PSPICE 仿真的优点, 先在小信号模型中求得 PID 参数, 然后再将其代入 PSPICE 进行仿真, 从而得到预稳电路对稳态干扰和瞬态干扰抑制理论上最优的一组 PID 参数。由于已经建立了系统的小信号标准传递函数 (3) 式和系统框图 (图 5), 其小信号模型的计算可以方便地利用 Matlab 中的 SimuLink 工具箱在计算机上完成并画出对应 PID 参数下的小信号 Bode 图, 不仅精度高, 计算速度也快。

由于电路分布参数的存在和模型的准确性的影响, 用计算机计算和仿真得到的最优参数并不是实际的最优参数。用计算得到的结果作为实际参数设计和调整的依据, 可以对电路的

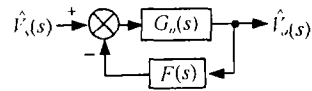


图 5 预稳压级标准系统框图

参数特性有直观的认识, 提高设计和调整效率, 从而实现电路实际抗干扰最优, 这就是我们对参数进行分析及设计时所用的方法。

电路实验和仿真参数如下:  $L = 3.2\text{mH}$ ,  $R_L = 77\Omega$ ,  $C = 400\mu\text{F}$ ,  $D = 0.22$ ,  $V_S = 28\text{V}$ ,  $V_o = 36\text{V}$ ,  $V_m = 5\text{V}$ ,  $C_2 = 1\text{nF}$ 。稳态扰动是频率为  $5\text{Hz} \sim 150\text{kHz}$ , 幅值为  $1\text{V}$  的正弦扰动。瞬态干扰是时间为  $0.1\text{ms}$ , 幅值为  $4\text{V}$  的脉冲干扰。

在给定 PID 的变化范围后, 经过计算和仿真, 分别得到预稳压级电路的闭环响应曲线簇和瞬态响应曲线簇。在这两簇曲线中找到两条对应的最佳曲线, 从而得到 PID 的理论上的最佳值, 图 6(a) 和图 7(a) 就是这两条响应曲线。综合仿真计算下稳态扰动和瞬态干扰的系统响应, PID 的取值为:  $(R_1 + R_2)C_1$  和  $R_2C_1$  的值在  $1.3 \times 10^{-4}$  和  $4.9 \times 10^{-6}$  左右为最佳,  $R_1$ ,  $R_2$  和  $C_1$  分别取  $28\text{k}\Omega$ 、 $15\text{k}\Omega$  和  $330\text{pF}$ 。根据仿真的 PID 值, 实际电路中保持  $C_1 = 330\text{pF}$  不变, 在  $28\text{k}\Omega$  和  $15\text{k}\Omega$  附近调整  $R_1$  和  $R_2$  的值是达到实际最优的有效方法。在兼顾稳态干扰抑制和瞬态干扰抑制的条件下, 在一定的允许误差范围内, 取  $R_1 = 22\text{k}\Omega$  和  $R_2 = 10\text{k}\Omega$  时电路实际抗干扰最优。

图 6 和图 7 分别给出了系统抗干扰的仿真和实际结果对比图。图 6 为小信号 (稳态干扰) 系统的幅频特性曲线 (Bode 图)。图 6(a) 是由 Matlab 根据式 (3) 计算得到, 图 6(b) 是系统实际抗稳态干扰特性。在图 6 中, 仿真的结果要远优于实际情况, 这是由于仿真中忽略了电路的分布电容、漏感和分布电感。在低频段, 实测与仿真相差不大; 在高频段, 分布参数开始起作用, 实测与仿真相差较为明显, 电路的分布参数对高频小信号性能的影响很大。图 7 为预稳压电路的大信号响应曲线图。图 7(a) 为用 PSPICE 仿真得到的电路时域特性曲线, 图 7(b) 是系统实际瞬态干扰抑制特性。大信号仿真与实测的幅值比较接近, 但分布参数的影响使得实际电压变化出现了尖峰, 而仿真的电压变化则是平滑的。图 7(b) 中输出超前于输入是由于示波器的同步电平不同和通道延时造成的。

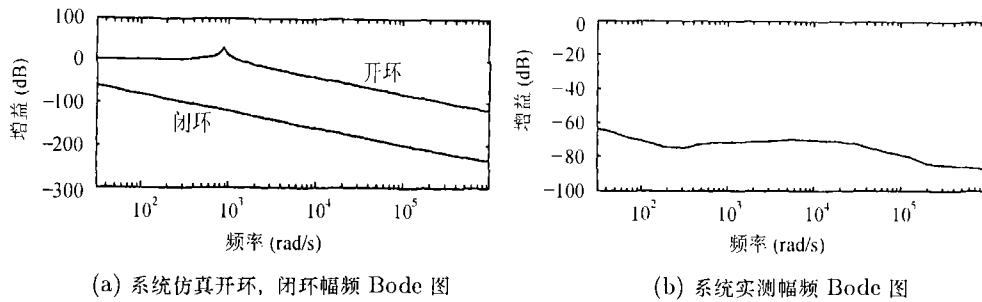


图 6 系统仿真, 实测幅频 Bode 图

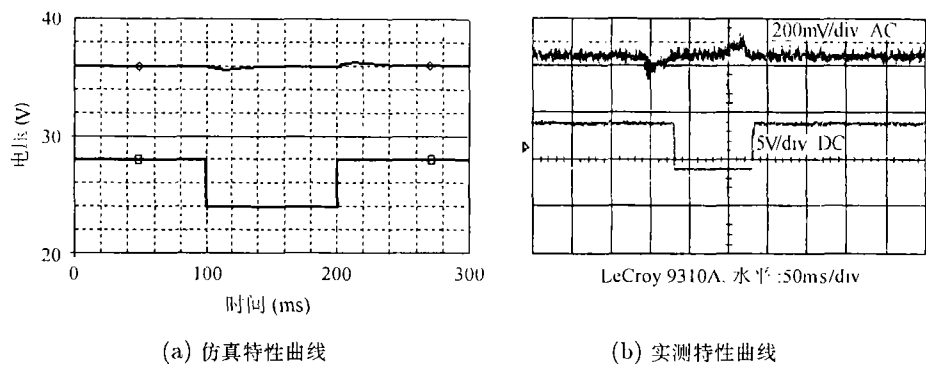


图 7 系统瞬态干扰抑制特性图

## 5 结论

本文以气象卫星 EPC 预稳电路为例, 提出了一种 EPC 抗干扰分析与设计的方法, 它包括 3 个方面的内容: (1) 建立电路的小信号模型使我们对影响电路的抗干扰特性的电路参数有一定的了解。(2) 利用 Matlab 计算和 PSPICE 仿真得到理论上的抗干扰的 PID 最优值。(3) 以理论 PID 最优值为依据设计和调整电路的实际 PID 参数, 使 EPC 预稳电路实际抗干扰特性达到最优。按上述方法设计的 EPC 的抗干扰特性满足实际要求, 说明我们所用的方法是可行的。仿真和计算值的差异不仅取决于模型的有效性和全面性, 同时也取决于计算方法的精确性。设计中所用的电路建模和仿真是有效的, 它不仅确定了元件数值的选取范围, 减小了盲目性, 同时也给出明确的物理意义, 使我们能够预先了解电路特性, 对电路设计和实现有实际指导意义。

## 参 考 文 献

- [1] 程煜烽, 王兆申. 星载行波管放大器杂波谱抑止的研究. 电子与信息学报, 2002, 24(1): 103-107.
- [2] 中国空间技术第五研究所. C 频段 4.5W 行波管放大器技术条件, 1998, 5.
- [3] Linfinity Microelectronics Inc. SG1525A/SG2525A/SG3525A, Regulating Pulse Width Modulator, 1996.
- [4] 张占松, 蔡宣三. 开关电源的原理与设计. 北京: 电子工业出版社, 1998: 303-312

刘红民: 男, 1964 年生, 博士生, 从事空间行波管放大器可靠性先进技术研究方面的工作。

张 锐: 男, 1960 年生, 博士, 副研究员, 从事空间行波管放大器可靠性先进技术研究方面的工作。

阴和俊: 男, 1963 年生, 博士生导师, 研究员, 从事电磁场方面的研究工作。