

doi: 10.7690/bgzdh.2015.05.019

## 基于 FPGA 的扰流片伺服控制系统电流环设计

介党阳, 胡昭琳, 刘敬明, 杨欢, 郭涛

(北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

**摘要:** 为提高固体小型火箭发动机推力矢量控制中扰流片摆动响应能力, 开展了扰流片控制伺服驱动系统电流环设计。采用 FPGA 的硬件逻辑电路, 通过注入 3 次谐波的 SPWM 调制实现对电机的桥路驱动, 实现了  $i_d = 0$  电流环数字化闭环控制, 控制周期不大于 50  $\mu\text{s}$ 。电流跟踪试验结果表明, 该方法实现的电流环控制具有较好的动态响应能力。

**关键词:** 扰流片; 电流环; FPGA; 矢量控制

**中图分类号:** TP273 **文献标志码:** A

## Design of Current Circle Based on FPGA for Spoiler Servo Control System

Jie Danyang, Hu Zhaolin, Liu Jingming, Yang Huan, Guo Tao

(Beijing Institute of Aerospace System Engineering, Beijing 100076, China)

**Abstract:** In order to improve response capacity of a certain type solid rocket motor thrust vector control (TVC) system, optimal design of spoiler servo control system was developed. Using FPGA hardware logic, motor drive module was carried out by injecting triple period harmonic wave to SPWM modulation, and digital closed-loop current control of  $i_d = 0$  was achieved in the control period of not more than 50  $\mu\text{s}$ . Current tracking experimental results show that the current control method realized better dynamic response.

**Keywords:** spoiler; current circle; FPGA; vector control

### 0 引言

扰流片推力矢量控制 (thrust vector control, TVC) 技术广泛应用于飞行器的姿态调整和弹道修正领域, 如俄罗斯的 N-73 导弹就是采用这种控制方式<sup>[1-2]</sup>。扰流片通常安装在发动机的喷口端面, 根据驱动指令快速、精确地摆动到预定位置, 通过控制喷管流场的阻塞面积在喷管内表面产生不均匀的压力场, 从而产生气动力改变飞行器的飞行姿态。

扰流片的摆动动态响应特性影响到气动力建立快速性, 制约着飞行器的位姿调整响应速度, 因此对扰流片的伺服驱动性能提出了较高的设计要求。通常在高性能的伺服驱动系统加入电流环控制, 其目的是实现电流矢量的快速跟踪。对电流环输出要求为谐波分量尽量小, 响应速度快, 应避免较大的处理时间。目前位置环和速度环已经较为容易实现数字化, 而电流环仍是以模拟电路为主, 其数字化的难点主要在于对电流信号高频采样及数据处理对 A/D 变换器和处理器提出了较高要求, 并因此引起了伺服系统时序设计的复杂<sup>[3]</sup>。

传统的伺服驱动技术采用基于数字信号处理器 (digital signal processing, DSP) 或基于嵌入式微处

理器 NIOS II 或 Microblaze 的可编程门阵列 (field-programmable gate array, FPGA) 等通过在主程序中由 C 语言实现, 这样的方式虽然较容易实现对伺服电机的矢量控制, 但是无法实现较短的电流控制周期, 通常仅能达到毫秒级<sup>[4]</sup>。高伺服性能的永磁同步电机控制要求在电机调制的每一个脉宽调制周期同步地实现对电机电流的控制, 如采用 20 kHz 的 PWM 调制周期, 电流环的控制周期在 50  $\mu\text{s}$  以内。采用单片处理器专门来做矢量控制会弥补这个缺陷, 但会造成系统庞大, 成本增加, 系统集成度降低。笔者采用基于 FPGA 的硬件逻辑语言 (very-high-speed integrated circuit hardware description language, VHDL) 实现电流环的数字化, 仅用 1 块 FPGA 处理器即可实现电流、速度和位置三环控制。

### 1 扰流片结构布局

图 1 为一种典型的扰流片推力矢量结构布局方案, 在固体发动机的喷口端面布置 4 组扰流片组件, 图示为扰流片均伸入喷管流场的状态, 此时阻塞面积最大。其中, 扰流片 1 和扰流片 3 用以控制飞行器的俯仰姿态, 扰流片 2 和扰流片 4 用来控制飞行

收稿日期: 2015-01-03; 修回日期: 2015-02-19

作者简介: 介党阳(1984—), 男, 河南人, 博士, 工程师, 从事运载火箭发射技术、机器人技术研究。

器的偏航方向姿态。

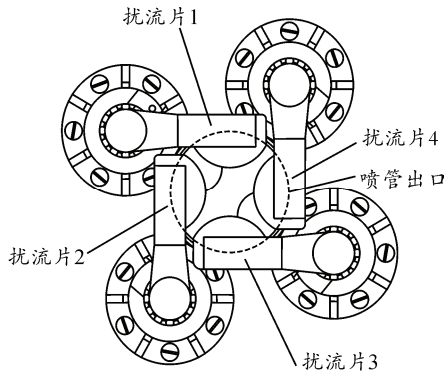


图 1 扰流片在喷管出口布局

固体小火箭在轨飞行时，上层控制器根据惯性组件等提供的位姿信息，经过姿控或制导单元解算出扰流片的驱动指令，并按时序要求周期地为扰流片伺服系统提供动作指令。扰流片伺服控制系统的任务接收上层控制器发出的位移指令，并以最快的速度跟踪上位指令。

扰流片伺服控制系统采用位置、速度和电流三闭环控制，其中电流环是最内环，其作用是提高系统的快速性，抑制电流扰动且通过跟踪期望电流实现对力矩的输出控制。

## 2 基于 FPGA 的伺服矢量控制

在各种伺服电机矢量控制方法中， $i_d=0$  控制因其简单易行得到了广泛的应用，其主要优点：在一定转矩输出的情况下，所需的定子电流最小，可以大大降低铜耗，提高效率，此外由于直轴电流为零，消除了直轴电枢反应，不会导致其永磁体去磁<sup>[5-6]</sup>。

基于 FPGA 的伺服系统矢量控制框图如图 2。

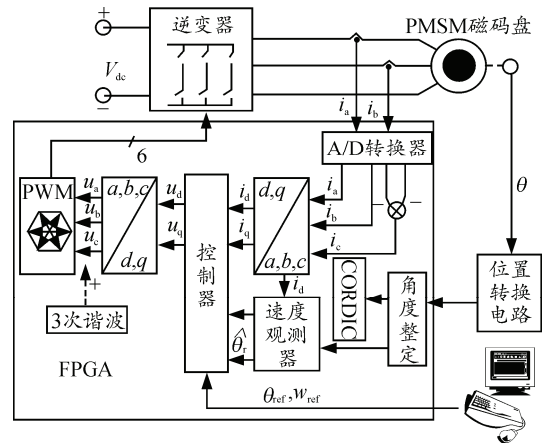
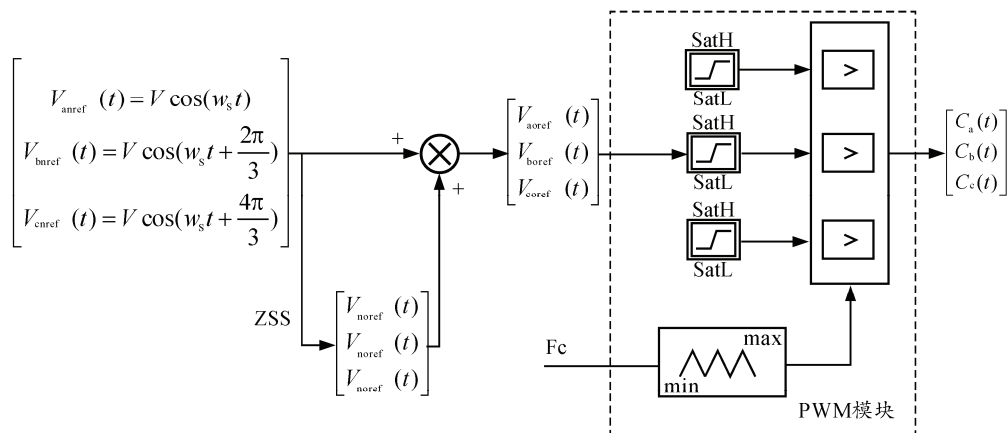


图 2 基于 FPGA 的 PMSM 矢量控制框图

在相同直流母线电压  $V_{DC}$  下，SVPWM 调制（空间电压矢量）和注入 3 次谐波的 SPWM 调制实质是一样的，均能有效地扩展逆变器输出基波相电压的线性范围，更好地利用电源电压<sup>[7]</sup>。笔者采用注入 3 次谐波的 SPWM 调制方式实现对电流环的闭环控制，正弦余弦的数字化实现采用 CORDIC 算法<sup>[8]</sup>。

### 2.1 注入 3 次谐波的 SPWM 调制

所谓 3 次谐波注入法，是指在正弦型调制波的基础上人为叠加 3 的整数倍次谐波作为最终调制波，从而达到降低合成调制波峰值的目的。采用 SPWM 调制方式时，逆变器的输出的三相线电压  $V_{anref}$ 、 $V_{bnref}$ 、 $V_{cnref}$  的电位差为  $2\pi/3$ ，即便是在调制波中含有 3 次谐波或 3 的整数倍次谐波时，在输出电压的线电压中这些谐波也会相互抵消掉，不会影响负载平均电流。3 次谐波注入的原理图如图 3。



SatH: PWM输出的最大饱和值; SatL: PWM输出的最小饱和值; min: 载波的最小值; max: 载波的最大值;  $F_c$  决定选择载波频率的系统时钟频率，且  $f = F_c / (max - min)$

图 3 注入 3 次谐波的 SPWM 原理

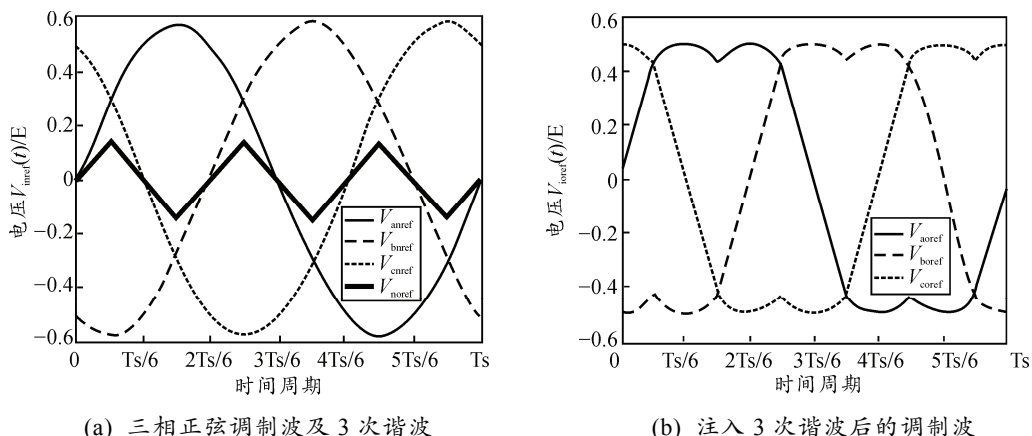


图 4 3 次谐波及注入 3 次谐波后的调制波

关于零序分量的选取由下式决定：

$$ZSS: \begin{cases} \forall t \quad V_{noref}(t) = \frac{1}{2}V_{jref}(t) \\ |V_{jref}(t)| = \min(|V_{anref}(t)|, |V_{bnref}(t)|, |V_{cnref}(t)|) \end{cases} \quad (1)$$

图 4(a) 给出了 3 次谐波注入时的调制波形，由图 4(b) 可以看出注入 3 次谐波后的三相调制波峰值被削平。注入 3 次谐波后的电压：

$$V_{ioref} = V_{inref} + V_{noref} \quad (2)$$

由式 (2) 可以得到  $V_{ioref}$  的最大值为  $V_{inref}$  的 1.154 7 倍，因此相当于提高了母线电压的 15.47% 的利用率。注入 3 次谐波的调制波  $V_{iohref}$  经过限幅后与载波进行比较，得出逆变器中桥臂的开关状态  $C_i(t)$ ，最终实现对伺服电机的驱动。

### 2.2 PI-Antiwindup 电流调节器的设计

参考电流指令通常比较大，且电流环的控制周期短 (50  $\mu$ s)，当采用传统的 PI 调节器的时候，积分器就有可能引入较大的误差值，且积分的惯性作用会使这个误差一直持续较长的时间，从而导致过大的超调。因此在设计 PI 调节器时，采用反饱和的 PI 调节器 (称为 PI-Antiwindup)<sup>[9]</sup>，当积分器超出限制值时产生一个积分削弱项使积分器退出饱和。其具体实现见下式：

$$\begin{cases} u[n] = k_p e[n] + i[n] \\ i[n] = i[n-1] + k_i e[n] - k_c e_{pi}[n] \\ e_{pi}[n] = u[n] \text{ if } u[n] \neq u_s[n], \text{ else } e_{pi}[n] = 0 \\ \text{while, } \begin{cases} u[n] \geq u_{max} \Rightarrow u_s[n] = u_{max} \\ u[n] \leq u_{min} \Rightarrow u_s[n] = u_{min} \\ \text{otherwise, } u_s[n] = u[n] \end{cases} \end{cases} \quad (3)$$

其中： $u[n]$ 为 PI 调节器输出； $e[n]$ 为电流误差； $e_{pi}[n]$ 为补偿误差信号； $i[n]$ 为积分项。

## 3 电流环实验

### 3.1 硬件系统搭建

扰流片伺服控制系统的硬件采用 FPGA 作为主控制器，内部嵌入 32 位 NIOS II 软核处理器，通过 Avalon 总线实现对各功能模块的读写和访问。NIOS II 软核处理器实现与上层控制模块的通讯、位置融合以及对传感器信息的滤波等功能，注入 3 次谐波的 SPWM 模块、电机转子位置解码、A/D 采集由 FPGA 内部的硬件逻辑实现，具体方式是采用 VHDL 硬件编程语言生成模块 IP 核，通过 Avalon 总线与 NIOS II 软核处理器进行数据交换。伺服系统硬件系统功能框图如图 5。

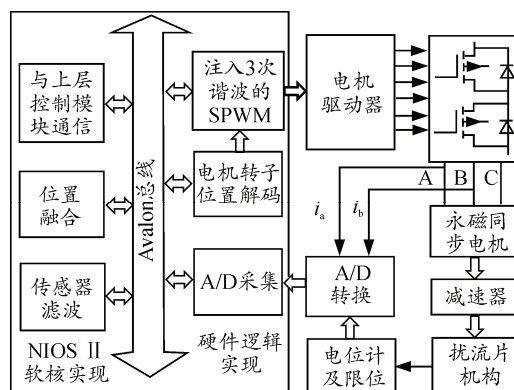
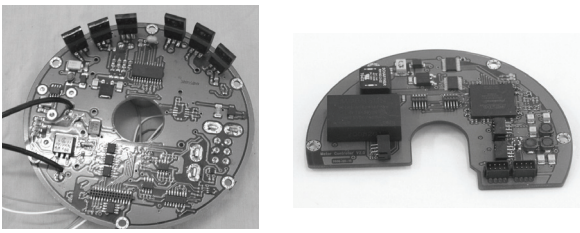


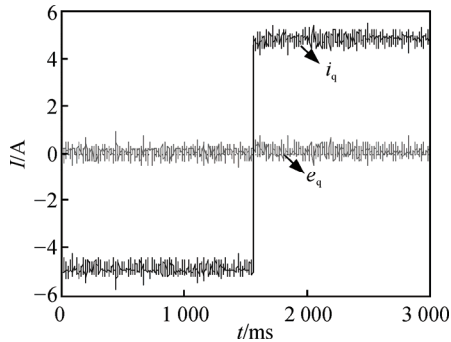
图 5 伺服系统硬件功能框图

伺服控制系统的电路板如图 6，通过连接器进行桥接，嵌入到固体发动机尾段结构壳体内。电机驱动板采用功率 MOSFET 搭成逆变器桥路，驱动器选用 IR 公司的 IR2130，具备过流保护功能。

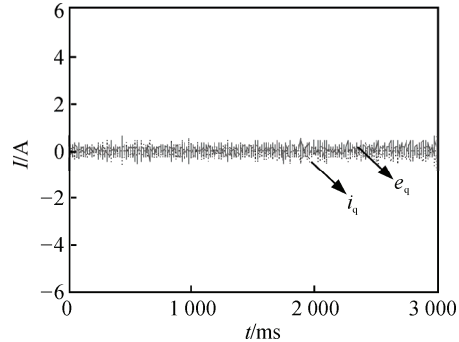


(a) 电机驱动板 (b) FPGA 控制板

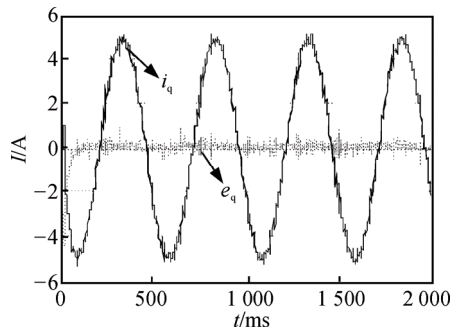
图 6 控制及驱动电路板



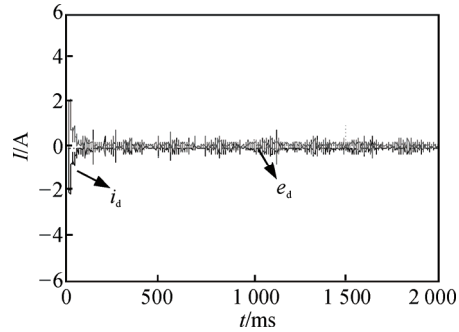
(a)  $i_q$  与  $i_{qref}$  阶跃响应曲线



(b) 阶跃响应时的  $i_d$  曲线



(c)  $i_q$  与  $i_{qref}$  正弦响应曲线 ( $f=2\text{ Hz}$ )



(d) 正弦响应时的  $i_d$  曲线

图 7 电流阶跃响应曲线

可以看出,该试验很好地实现了  $i_d=0$  的控制要求,在初始误差较大情况和 PI 调节器作用下,在 60 ms 内实现了  $i_d=0$  的控制要求。

#### 4 结论

笔者针对扰流片式推力矢量控制要求,对扰流片伺服控制系统的电流环具体实现进行了深入讨论,提出了基于 FPGA 的伺服矢量控制方法,通过注入 3 次谐波的 SPWM 调制和 PI-Antiwindup 电流调节器等手段实现了伺服系统电流环的闭环控制,电流跟踪试验验证了本方法电流环具有较好的动态响应能力,可在 60 ms 内实现了  $i_d=0$  的控制要求。

#### 参考文献:

[1] 沈昭烈, 吴震. 空空导弹推力矢量控制系统[J]. 战术导弹控制系统, 2002, 37(2): 1-6.

#### 3.2 $i_d=0$ 电流跟踪试验

在电流环跟踪试验中,分别采用阶跃响应(-5 A, 5 A)和正弦响应(频率 2 Hz, 5 A)2 组曲线作为输入指令,伺服控制系统的电流环对上述两组曲线进行跟踪试验。试验结果如图 7 所示,图 7(a) 和 (b) 为阶跃响应的试验结果,图 7(c) 和 (d) 为正弦响应的试验结果。

[2] 谢勇强, 李舜. 推力矢量控制在空空导弹中的应用分析[J]. 科学技术与工程, 2009, 20(增刊 9): 6109-6113.  
 [3] 崔业兵, 陈雄, 周长省, 等. 扰流片推力矢量控制系统动态特性研究[J]. 推进技术, 2013, 34(8): 1030-1034.  
 [4] 刘鹏. 基于 DSP 的空空导弹数字伺服系统[J]. 航空兵器, 2013(3): 18-20.  
 [5] 唐任远. 现代永磁电机理论与设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002: 30-82.  
 [6] 李志民, 张禹杰. 同步电机调速系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001: 25-73.  
 [7] 李峰. 矢量控制系统中优化 PWM 控制策略[D]. 天津: 天津大学, 2003: 18-32.  
 [8] Andrea R. A Survey of CORDIC Algorithms for FPGA Based Computers[J]. IEEE Trans on Computers, 1999, 42(3): 425-430.  
 [9] Shin H B. New Antiwindup PI Controller for Variable-Speed Motor Drives[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 1998, 45(3): 445-450.