

# 基于 FPGA 的卫星天线用交流伺服系统设计研究

王 阳, 王 中, 黄声华

(华中科技大学, 武汉 430074)

**摘要:** 现场可编程逻辑阵列 (FPGA) 有可靠性高、速度快等优点, 同时可以把 FPGA 设计生成 ASIC 电路, 从而大大减少系统成本。目前 FPGA 已经开始应用于交流伺服系统。提出了一种基于 FPGA 的卫星天线伺服系统的设计方法, 分析了系统的结构和功能, 通过实验证明了这种方法的正确性和实用性。

**关键词:** 可编程逻辑阵列; 交流伺服系统; 模块设计; 卫星天线; 实验; 永磁同步电动机

## Design of Satellite's Antenna AC Servo System Based on FPGA

WANG Yang, WANG Zhong, HUANG Sheng-hua

(Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**ABSTRACT:** Field programmable gate array (FPGA) has many advantages such as high reliability, high speed and so on. The FPGA design can be also transferred to ASIC circuit and the system cost reduces largely. FPGA has been successfully used in AC servo system. This paper presents a design method of satellite's antenna AC servo system and analyzes the structure and function of the system. The correctness and practicality of the method are proved by experimentation.

**KEY WORDS:** FPGA, AC servo system; Module design; Satellite antenna; Experiment; PMSM

## 0 引言

基于 FPGA 的设计方法已经应用于一些高性能的交流伺服场合。文献[1]采用 CORDIC 算法实现坐标变换, 完成电流环 SPWM 波的产生。文献[2]采用状态机的方法生成 PWM 波并在 FPGA 内部构成了转速环和位置环。这种技术已经成功应用于 IR 公司的 IRMCK202 等电机控制专用芯片上。本文针对卫星天线的伺服驱动; 主电路采用单电源供电的线性放大电路。采用线性放大电路有谐波含量小、电磁干扰小等优点, 适合于卫星天线等需要高精度、低转速的场合。这样电流闭环已经用硬件构成, FPGA 控制器需要完成的功能是转换接口、转速闭环、位置闭环等功能, 而不需要构成数字电流环。FPGA 控制器和线性放大电路之间采用 D/A 转换输出接口, 硬件结构简单、可靠性高。按照这种思路和模块化的设计思想, 设计了控制器的各个功能模块, 并在 Altera 公司的

EP1C12 FPGA 中对所有模块进行了布局布线。

## 1 FPGA 控制器功能分析和结构

系统的整体结构框图如图 1 所示。

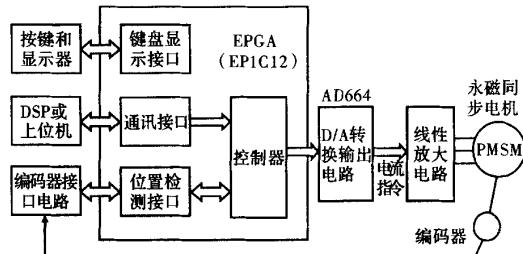


图 1 卫星天线伺服系统整体结构框图

以采用混合式光电编码器作为位置检测元件构成转速闭环为例, FPGA 控制器先根据混合式编码器的 A、B、Z 信号计算出电机转子的位置角和转速; 位置角通过查正弦表得到数字电流指令的相位值; 电机实际转速和给定转速相比较之后通过转速调节器得到数字电流指令的幅值, 最后通过 D/A 转换接口把数字电流指令的幅值和相位值

转换成模拟电流指令。D/A 转换接口可以由 2 片 D/A 转换器构成, 一片输出电流指令的相位值, 另一片输出电流指令的幅值。模拟电流指令再通过单电源线性放大电路放大之后加到永磁同步电机的定子上。

根据上面的功能分析, FPGA 控制器的主要功能模块可以划分成转速和位置检测模块、D/A 转换接口模块、转速调节器模块、时钟模块、查表模块、键显接口模块等。其基本结构和相互连接关系如图 2 所示。由于采用硬件方式实现, 所有模块都是同步并行执行, 系统可以达到很高的运行速度。

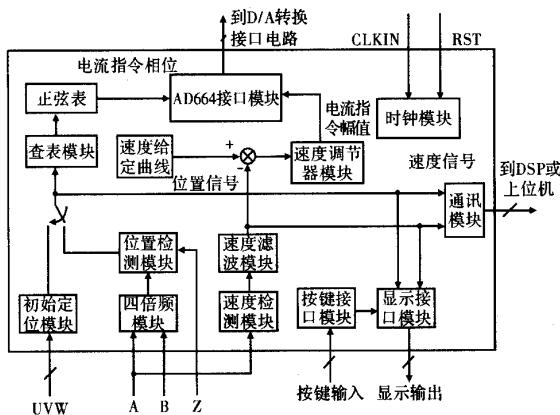


图 2 FPGA 控制器功能模块结构示意图

## 2 硬件功能模块设计

### 2.1 转速检测模块

转速检测模块用来计算电机转速。针对 FPGA 内部的时钟频率很高而卫星天线伺服电机的转速很低(一般在 20 r/min 左右)的特点, 选用 T 法来测速。FPGA 控制器 T 法测速的原理是: 计算两次 A 脉冲(或 B 脉冲)上跳沿(或下跳沿)之间的高频脉冲的个数, 对脉冲数值求倒数并乘上一个比例系数就得到电机的转速。T 法测速的原理示意图如图 3 所示。其数学公式表达为:

$$\omega_e = \frac{K_t}{C_{nt1} - C_{nt2}} \quad (1)$$

式中,  $C_{nt1}$  和  $C_{nt2}$  表示高频计数脉冲计数器两次计数值,  $K_t$  是比例系数, 要根据计数脉冲的频率、电机转速等参数综合整定。

T 法测速适合低速情况。采用 FPGA 编程实现 T 法测速需要注意: (1)由于计数器的位数有限, 必须设置电机的最低转速, 低于这个转速时, 转速就按 0 来处理。(2)在计数器位数一定的情况下

下, 电机的转速精度(对应高频脉冲的频率)和转速范围(对应计数器的位数)是一对矛盾, 实际中要根据需要进行协调。(3)由于用到了除法运算, 所需要的系统资源(LEs)的数量很大, 在满足精度的前提下要尽量减少除法的位数, 以节省 FPGA 内部资源。

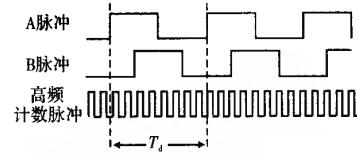


图 3 T 法测速的原理示意图

### 2.2 位置检测模块

位置检测模块用来检测电机的位置值。为了提高位置的分辨精度, 需要把混合式光电编码器的 A、B 两路正交脉冲信号 4 倍频。

位置检测模块的基本原理就是采用计数器来计脉冲数。计数器采用 4 倍频之后的脉冲做计数时钟, Z 脉冲作为清零脉冲, 计数器的输出就是电机的位置值, 其位数由编码器的分辨率决定。

还需要注意初始定位的问题。上电瞬间由于编码器没有脉冲输出, 需要用 U、V、W 信号做初始定位, 大致确定转子位置区间, 当电机运行后再切换到准确的位置值。

### 2.3 D/A 接口模块

D/A 接口模块是 FPGA 控制器数字电流指令的输出口。它的输出时序要符合接口 D/A 芯片的操作时序。本系统采用 2 片 12 位并行 D/A 转换器 AD664 作为 D/A 转换接口。由于其操作时序较为复杂, 并且 2 片 D/A 的数据线同接在数据总线上, 故采用状态机来设计这个模块。状态机的内容请参见文献[4]。

### 2.4 转速调节器模块

转速调节器一般采用 PI 调节器。根据 FPGA 的结构特点, 选用增量式 PI 调节器算法来设计这个模块。增量式 PI 调节器算法的表达式是:

$$O(n) = O(n-1) + k(1 + \frac{T_s}{\tau})e(n) - ke(n-1) \quad (2)$$

式中,  $e(n)$  表示转速差,  $O(n)$  表示转速调节器的输出,  $\tau$  表示积分时间常数,  $T_s$  表示采样周期,  $k$  表示比例调节系数。上式也可以改写成下面的形式。

$$O(n) = O(n-1) + k_1 e(n) - k_2 e(n-1) \quad (3)$$

图 4 给出了 PI 调节器的结构框图。图中的  $Z^{-1}$  (延时环节) 在 FPGA 中等效为 D 触发器, 加法器和乘法器可以直接用 Verilog HDL 语言来描述。为了防止溢出, 设置了输出饱和限制。PI 调节器的参数值 ( $k_1$  和  $k_2$ ) 整定比较复杂, 需要根据电机参数通过实验来整定。

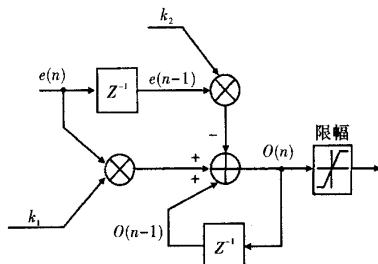


图 4 PI 调节器结构图

### 3 实验结果

FPGA 控制器的各个模块均用 Verilog HDL 语言描述, 经过编译和仿真综合之后, 生成 FPGA 网表, 最后在 EP1C12 FPGA 中进行布局布线和时序分析。全部开发过程都在 Altera 公司的 Quartus II 5.1 软件开发环境中完成。转速闭环恒速运行时系统资源的使用情况如表 1 所示。

表 1 转速闭环恒速运行时 FPGA 内部资源使用情况

资源名称	使用情况	使用率
逻辑单元 (LEs)	1850/12060	15%
引脚 (PINs)	43/173	25%
存储单元 (MEM bits)	33072/239616	14%
锁相环 (PLLs)	0/2	0%

转速闭环恒速运行的转速波形如图 5 所示。采用软起动方式。电机的起动过程平滑, 最后转速稳定在 20 r/min, 转速精度高。

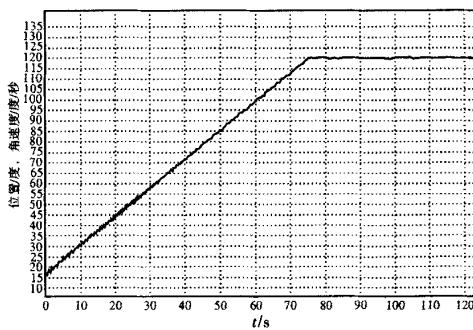


图 5 转速闭环恒速运行的转速波形

### 4 结 论

本文针对卫星天线伺服系统的特点, 设计了 FPGA 控制器加单电源线性放大电路的控制结构。FPGA 控制器内部集成了转速检测模块、位置检测模块、D/A 输出接口模块、转速调节器模块。采用 FPGA 构成控制电路, 大大减小了硬件的数量和 PCB 板的面积, 提高了抗干扰能力, 并且可以转换成 ASIC 电路, 从而大大减少系统成本, 这是目前电机控制的一个新的发展方向。

### 参考文献

- [1] Zhou Zhaoyong, Li Tiecai; Takahashi T, et al. FPGA Realization of a High-performance Servo Controller for PMSM. Applied Power Electronics Conference and Exposition [C]. 2004. APEC'04. Nineteenth Annual IEEE.
- [2] Takahashi T; Goetz J. Implementation of Complete AC Servo control in a Low Cost FPGA and Subsequent ASSP Conversion. Applied Power Electronics Conference and Exposition [C]. 2004. APEC'04. Nineteenth Annual IEEE.
- [3] Tzou Ying-yu, Kuo Tien-sung. Design and Implementation of all FPGA-based Motor Control IC for Permanent Magnet AC Servo Motors. Industrial Electronics, Control and Instrumentation [C]. 1997. IECON 97. 23rd International Conference on.
- [4] 夏宇闻. Verilog 数字系统设计教程 [M]. 北京: 航空航天大学出版社, 2003.
- [5] 任爱锋, 初秀琴, 常存, 等. 基于 FPGA 的嵌入式系统设计 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2005.

作者简介: 王 阳 (1985-), 女, 硕士研究生, 从事电机控制系统研究。

## 如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



### HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

### CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



### 13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



## 关于易迪拓培训:

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于2006年整合合并微波EDA网([www.mweda.com](http://www.mweda.com)),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和ADS、HFSS等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

## 我们的课程优势:

- ※ 成立于2004年,10多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养,更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果,又能免除您舟车劳顿的辛苦,学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲,结合实际工程案例,直观、实用、易学

## 联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波EDA网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>