

# 经纬仪自适应控制系统设计

The Adaptive Control System Design of 0-E Theodolite

(长春光学精密机械与物理研究所) 张玉良 张淑梅 杜璧秀

ZHANG Yu-liang ZHANG Shu-mei DU Bi-xiu

**摘要:** 针对 TMS320F2812DSP 在控制方面的优越性和光电经纬仪对控制系统的高度集成化需求,本文开发了一套 DSP+FPGA 结构的高性能的 PWM 全数字化控制系统。在此硬件平台基础上,设计了一种基于自适应控制理论的零相差自适应控制系统,这种自适应控制系统对改善具有未知恒定或缓慢时变参数系统的动态性能有很明显的作用。

**关键词:** 经纬仪; DSP2812; 自适应控制

**中图分类号:** V557 **文献标识码:** A

**Abstract:** According to the advantage of TMS320F2812DSP in the control and the special need of 0-E Theodolite in the aspect of the control system's high integration, the author empowered a set of PWM pure-digital control system with high performance. With the hardware platform, the author designed a kind of zero phase error adaptive control system based on adaptive tracking control theory. The adaptive control system has improved the dynamic capability especially when the parameter is unknown or changing by time.

**Key words:** 0-E Theodolite; DSP 2812; Adaptive Control

## 1 引言

以往经纬仪伺服系统的控制器大都采用 PC104 作为处理器,但是 PC104 体积庞大、接口复杂、可靠性低、维修不方便而且造价昂贵,这些缺点都给经纬仪伺服控制带来了困难。考虑到 DSP 在各项控制领域的成熟应用以及光电经纬仪对控制系统的高度集成化需求,特别是 TMS320F2812DSP 在电机控制方面的优越性,本文开发了一套 DSP2812+FPGA 结构的高性能的 PWM 全数字化控制系统硬件平台。

针对以往自适应系统多采用与控制对象等阶的模型,其自适应系统结构相对复杂,不易在工程应用中实现这种缺点,本文设计了一种零相差自适应控制系统,这种自适应控制系统不仅较以往的自适应控制系统结构简单,而且在控制性能上也得到了很大改善。

## 2 系统硬件平台设计

DSP 采用 TI 公司的 TMS320F2812,最高速度可达 150MIPS,可以在单个指令周期内完成 32x32 位的乘累加运算,具有适合于 PWM 波电机控制的事件管理器,采用低电压供电 (3.3V 外设、1.8V 内核),完全能够满足跟踪系统的控制要求。FPGA 选用 Cyclone 公司的 EP1C12Q240C8,作为整个伺服控制器的时序和逻辑控制核心,EP1C12Q240C8 具有 256 个管脚,提供 12060 个逻辑单元和 173 个 I/O 口,可以内嵌 4K 的 RAM。FPGA 主要负责 DSP 与其它接口实现总线通讯,即总线仲裁,除了 1000Hz 的时统信号通过 FPGA 的 IO 口传递以外,其它外围数据都通过 FPGA 传递到 DSP 总线上。

本系统中目标跟踪所需要的电视脱靶量数据和编码器数据都是通过四路串口芯片 ST16C654 传递的。ST16C654 是一个高性能的串口芯片,支持 RS232 和 RS422 方式通讯,波特率达到

460.8kb,最高通讯速率达到 1.5Mbps,具有 64 字节 FIFO,支持中断方式数据查询。

DSP 通过事件管理器的捕获单元 CAP1 来分别捕获 1000Hz 的时统中断信号,用此中断周期作为采样周期并进行控制运算。整个系统硬件结构图如图 1 所示。

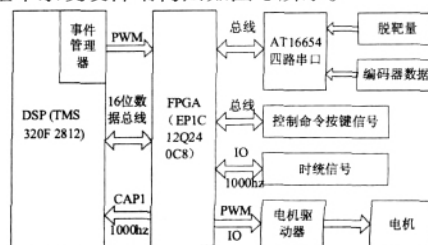


图 1 经纬仪伺服控制系统硬件接口图

## 3 系统设计与仿真分析

设被控对象为 SISO 系统:

$$D_p(p)y_p(t) = N_p(p)u(t) \quad (1)$$

其中:  $D_p(p) = p^n + \sum_{i=0}^{n-1} \alpha_i p^i$

$$N_p(p) = \sum_{i=0}^m \beta_i p^i; m \leq n-1$$

其中  $p = \frac{d}{dt}$  表示微分算子,  $y_p(t)$  是被控对象的输出,  $u(t)$  是控制输入。  $N_p(p)$  是 Hurwitz 多项式, 保证对象是最小相位系统。  $\alpha_i, \beta_i$  均为未知常数或者慢时变参数。

零相差模型为:

$$y_m(t) = R(t) \quad (2)$$

其中,  $y_m(t)$  是参考模型的输出,  $R(t)$  为系统的参考输入, 是分段连续的。

引入状态过滤器为:

$$C(p) = \left( \sum_{i=0}^{n-1} c_i p^i \right) \quad (3)$$

$c_i (i=0, \dots, n-2)$  为任意正常数,  $c_{n-1}=1, C(p)$  且为一 Hurwitz 多项式, 以使状态变量过滤器是渐近稳定的。

张玉良:助理研究员

令  $y_p(t)$ 、 $u(t)$  和  $y_m(t)$  的过滤值如下:

$$y_{pf}(t) = \frac{y_p(t)}{C(p)}$$

$$u_f(t) = \frac{u(t)}{C(p)}$$

$$y_{mf}(t) = \frac{y_m(t)}{C(p)}$$

解得等价反馈得等价反馈系统为:

$$\begin{cases} \varepsilon_f = \sum_{i=0}^n \alpha_i p^i y_{pf}(t) + u + u_i - N_p(p) u_f(t) = -w \\ v = \varepsilon_f \end{cases} \quad (4)$$

其中:  $\varepsilon_f = y_{mf}(t) - y_{pf}(t)$  为广义误差。

由于前向环节传递函数为 1, 其严格正实自动满足, 则只要设计自适应输入使:

$$\int_0^t w \varepsilon_f d\tau \geq -\gamma_0^2 \quad (5)$$

即反馈通道满足 Popov 不等式, 我们可

以得到渐近稳定的自适应系统。求解可得如下二类自适应律:

a) 积分自适应律

$$k_i(\varepsilon_f, t) = -\int_0^t A_i p^i y_{pf} \varepsilon_f d\tau + k_i(0);$$

其中: 常数  $A_i > 0; i=0 \sim n$

$$g_i(\varepsilon_f, t) = -\int_0^t B_i p^i u_f \varepsilon_f d\tau + g_i(0);$$

其中: 常数  $B_i > 0; i=0 \sim m$

$$f_0(\varepsilon_f, t) = -\int_0^t C_0 u \varepsilon_f d\tau + f_0(0);$$

其中: 常数  $C_0 > 0$

b) 比例+积分自适应律

$$k_i(\varepsilon_f, t) = -\int_0^t A_{ii} p^i y_{pf} \varepsilon_f d\tau - A_{pi} p^i y_{pf} \varepsilon_f + k_i(0)$$

其中: 常数  $A_{ii}, A_{pi} > 0; i=0 \sim n$

$$g_i(\varepsilon_f, t) = -\int_0^t B_{ii} p^i u_f \varepsilon_f d\tau - B_{pi} p^i u_f \varepsilon_f + g_i(0)$$

其中: 常数  $B_{ii}, B_{pi} > 0; i=0 \sim m$

$$f_0(\varepsilon_f, t) = -\int_0^t C_{i0} u \varepsilon_f d\tau - C_{p0} u \varepsilon_f + f_0(0)$$

其中: 常数  $C_{i0}, C_{p0} > 0$

这样设计能够针对任何分段连续的输入  $R(t)$  有:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \varepsilon_f = \lim_{t \rightarrow \infty} (y_{mf} - y_{pf}) = 0$$

由上式可以看出, 由于引入了状态过滤器, 自适应律中包含  $y$  过滤后的变量, 这就解决了对对象输出  $y$  的各阶导数一般不可能全部获得的问题。

综合上述可得零相差自适应跟踪控制系统方框图如图 2 所示。

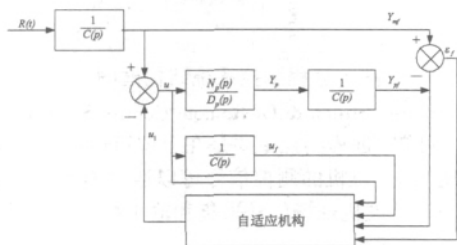


图 2 零相差自适应跟踪控制系统原理方框图

为检验该自适应控制的跟踪性能, 取单输入单输出被控对象, 用 MATLAB 进行了数字仿真。选取 2 阶被控对象的模型为:

$$(p^2 + \alpha_0 p + \alpha_1) y_p(t) = \beta_0 u(t)$$

其中, 假设  $\alpha_0, \alpha_1, \beta_0$  的值是恒定未知或者缓慢时变的。参考输入信号运用幅值为  $\pm 1$  的周期性方波信号。自适应律中各个系数的选择如下:

(1) 状态观测器中系数的选择

状态观测器  $C(p) = (\sum_{i=0}^{n-1} c_i p^i)$ ,  $c_{n-1}=1; c_i (i=0, \dots, n-2)$  的值可以选择, 要使  $C(p)$  为一胡尔维茨多项式。

(2) 积分自适应律中各系数及各初值的选择如下:

a) 初值为零时积分项系数的选择

初值为零时, 积分自适应律中各系数可选为大于零的正数。

b) 初值不为零时积分项系数的选择

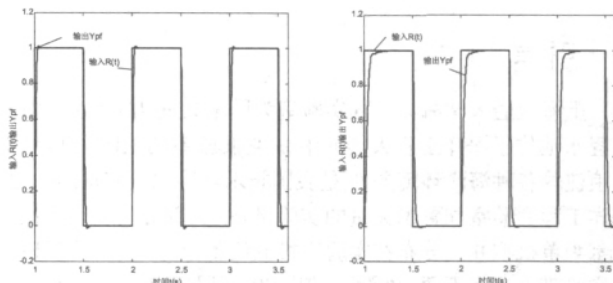
积分自适应律中各系数都选为比较小的正数。初值的选择非常关键, 经过多次反复实验, 能得到一组能够达到满意跟踪性能的值。这些初值, 改变任何一个, 都会对输出产生很大的影响, 因此这些值的选择是很重要的。

(3) 比例加积分自适应律中系数的选择

比例加积分自适应律中比例项的系数可以为零, 即成为积分自适应律, 也可以都选为比较小的正数, 而积分项的系数选择也都为大于零的正数即可。

仿真结果如图 3 和图 4 所示。其中, 图 3 为方波输入时参数未知时, 采用积分自适应律和比例加积分自适应律的输入输出结果。图 4 为方波输入时, 其中参数  $\alpha_0$  在 2 秒时变化为  $\alpha_0' = \alpha_0 + \Delta \alpha_0$ , 采用积分自适应律和比例加积分自适应律的输入输出结果。

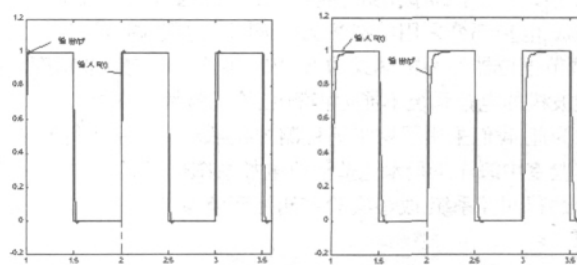
从仿真结果可以看出, 本文提出的零相差自适应跟踪控制系统, 采用积分自适应律和比例加积分自适应律能够实现对输入信号的跟踪。



(a) 积分自适应律

(b) 比例+积分自适应律

图 3 方波输入时的仿真结果



(a) 积分自适应律

(b) 比例+积分自适应律

图 4 参数变化时方波输入的仿真结果

## 4 结论

本文从实际课题背景需要出发, 设计了基于 DSP2812 的经纬仪复合控制系统, 并在某型号经纬仪中得到了很好的应用。并且给出了系统的硬件结构图, 进行了系统自适应控制律设计、仿真和实验结果分析。本文无抄袭, 作者全权负责版权事宜。

本文作者创新点: 本文开发了基于 DSP 的控制系统硬件平台, 同时设计了能够实际应用的零相差自适应控制器, 改善了经纬仪的动态性能, 提高了经纬仪的跟踪精度。 (下转第 91 页)



个与超声传感器谐振频率相同的方波信号作为超声发射的载波信号,这样用单片的 P1.5 端口置位、复位操作就可以生成伪随机码调制信号,从而简化了系统的硬件结构。

在实际应用中 PRBS 编码的恰当选择对系统的抗干扰能力有很大的影响,决定 PRBS 编码性质的两个参数是 PRBS 编码的长度  $N_p$  以及码元宽度  $T_p$ 。为确保调制信号能够顺利通过超声换能器发射出来, $T_p$  必须满足:

$$\frac{1}{3T_p} \leq B/2 \quad (5)$$

式中,  $B$  为超声换能器的带宽。此外,码元宽度太小了难以获得正确的波形,太大了则发射时间变长,“余振”过长增大检测的盲区。经实验比较,本文选取码元宽度为  $T_p=0.35\text{ms}$ 。

编码长度  $N_p$  越大则处理的增益也就越大,但  $N_p$  越大造成测距的盲区也就越大,经实验检测取  $N_p=10$  比较合适。

在实际应用中还应注意,发送 PRBS 编码调制信号时,由于超声传感器余振导致的“拖尾”现象,处于两个“1”码之间的“0”码会受到影响,该“0”码空间被挤压而变短。因此为避免出现码片模糊导致误读,在 PRBS 编码发送时,位于两个“1”码之间的单独“0”码的时长需要比正常的码元宽度长。同样,在回波处理中,用于计算互相关函数的发送信号的包络也做了相应的修改。具体操作方法是:发送时在会受到挤压的“0”码位置额外插入一个“0”码,而接收时对该“0”码和前面的“1”码均按照 1.5 个码元宽度计算,这样既保证总时长一致,又考虑了“1”码的“拖尾”影响。

## 4 小结

本系统是针对车载应用而开发设计的,经实验证明本系统结构简单、工作稳定、数据可靠,在车辆倒车、搜索泊车位等行驶速度较低的情况下是可以满足实际要求的。而且,由于单片机、多通道 AD 转换器件在接口和速度上都具备良好的扩展性,PRBS 编码的选择和相关法的应用能够有效降低各个通道之间的干扰,系统可以很方便地改进成为多超声通道的传感器。

本文作者的创新点为:(1) 根据车载超声系统所处的特殊环境,针对实时感知车辆环境的需求,设计了一套超声传感器系统,软硬件结构紧凑、系统可靠性高。(2) 系统结构层次明晰,不管是在硬件模块上,还是在算法选择上都让系统具备良好的可扩展性,稍作改动就可以达到多通道并行工作的效果。(3) 本系统采用检测回波算法便于在便携系统中快速实现,满足了车载系统的实时性要求,具有较强的抗噪声干扰的能力,保证了数据的稳定性。

作者对本文版权全权负责,无抄袭。

## 参考文献

- [1] 自动泊车系统轻松入位 7 种超前主流车载配置. 汽车之家, 2009 年第四期
- [2] 董子和,李永辉. 超声波测距系统的建立及其在汽车防撞系统的应用. 汽车电器 1997 年第 1 期
- [3] 严宏穗,宋进,陈敏贤. 超声波测距在智能机器人开发中的应用. 机电一体化,2001(5)
- [4] 孙丽明. TMS320F2812 原理及其 C 语言程序开发. 北京:清华大学出版社,2008
- [5] Analog Device, Inc. AD7656 -1/AD7657 -1/AD7658 -1 Datasheet Rev 0,2008.
- [6] 廖一. 基于超声的障碍检测与识别技术研究.[硕士学位论文]. 长沙:国防科学技术大学,2006.
- [7] 靳霖霖,曾迎生. 相关算法在实时超声检测系统中的应用研究.

微计算机信息,2010,7-2.

[8] 潘仲明. 大量程超声波测距系统研究.[博士学位论文]. 长沙:国防科学技术大学,2006.

作者简介:朱晓宇(1984.12-),男,汉族,国防科技大学机电工程与自动化学院在读硕士研究生,主要研究方向超声传感器;曾迎生(1966.09-),男,汉族,博士,国防科技大学机电工程与自动化学院副教授,主要研究方向为模式识别、传感器信息处理。

**Biography:** ZHU Xiao-yu (1984.12-), male, Han, College of Mechanical Engineering and Automation, National University of Defense Technology, master, majoring in ultrasonic sensor. Zeng Ying-sheng (1966.09-), male, Han, College of Mechanical Engineering and Automation, National University of Defense Technology, associate professor, doctor, majoring in pattern recognition, signal process.

(410073 湖南 长沙 国防科技大学机电工程与自动化学院)

朱晓宇 曾迎生

(College of Mechanical Engineering and Automation, National University of Defense Technology, ChangSha 410073, China) ZHU Xiao-yu ZENG Ying-sheng

通讯地址:(410073 湖南 长沙 国防科技大学机电工程与自动化学院) 朱晓宇

(收稿日期:2010.11.08)(修稿日期:2011.02.08)

(上接第 47 页)

## 参考文献

- [1] 葛兵,高慧斌,高策. 经纬仪坐标变换中的偏差分析[J]. 微计算机信息,2007,4-3:195-196.
  - [2] Tomizuka, M. Zero Phase Error Tracking Algorithm for Digital Control. 1985 ASME Winter Annual Meeting, Miami Beach, Nov. 1985
  - [3] Landau, I. D. Adaptive Control—the Model Reference Approach, Marcel Dekker, New York, 1979
  - [4] 刘廷霞,王伟国,李博. 水平式经纬仪静态指向修正模型的比较与改进[J]. 光学精密工程,2010,18(6):1374-1379.
  - [5] Narendra. K. S., A. M. Annaswamy, and R. P. Singh. A general approach to the stability analysis of adaptive systems. Int. J. Control. 1985, 41:193-216
  - [6] 张宁,沈湘衡,杨亮. 利用动态靶标谐波特性评价光电经纬仪的跟踪特性[J]. 光学精密工程, 2010,18(6):1286-1294.
- 作者简介:张玉良,男,汉族,出生于 1980 年 3 月,在中国科学院长春光学精密机械与物理研究所从事科研工作,主要从事伺服控制系统研究。

**Biography:** ZHANG Yu-liang, male, Han nationality, borned in March of 1980, work in Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, engage in reaserch of servo-control system.

(长春光学精密机械与物理研究所) 张玉良 张淑梅 杜璧秀

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics) Zhang Yu-liang Zhang Shu-mei Du Bi-xiu

通讯地址:(130033 吉林 吉林省长春市东南湖大路 3888 号长春光机所光电测控部伺服组) 张玉良

(收稿日期:2010.11.20)(修稿日期:2011.02.20)

欢迎订阅 欢迎刊登广告