

文章编号: 1671-7848(2007)02-0192-04

## 电视导引头伺服稳定平台数字控制器的研制

武文杰, 李奇, 杨海峰

(东南大学自动控制系统, 江苏南京 210096)



**摘 要:** 针对电视导引头系统对快速性要求高的特性, 设计了一种基于 DSP 的高速数字控制器。以 CCD 摄像机作为位置环反馈传感器, 以液浮式速率陀螺作为速度环反馈传感器, 采用随动平台速率陀螺稳定方案的伺服稳定跟踪平台结构, 给出了伺服控制器的软硬件设计, 分析了针对该系统的三环 PID 控制算法的设计及调试方法。实验结果表明, 该控制器动静性能良好, 可满足系统的要求。

**关键词:** 数字控制器; 陀螺稳定平台; 伺服跟踪系统; 电视制导; DSP; 双闭环 PID  
**中图分类号:** TP 275 **文献标识码:** A

## Design of the Digital Controller for Servo Stabilized Tracking Platform in TV Guidance Seeker

WU Wen-jie, LI Qi, YANG Hai-feng

(Department of Automation, South-eastern University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** Aiming at the TV guidance seeker characteristic, a high speed digital controller based on DSP is designed. The constitution of the servo stabilized tracking platform is presented by using adopts CCD vidicon as position closed-loop sensor and gyro as rate closed-loop sensor. The hardware and software design of the platform controller is given. The double closed-loop control-method is discussed in details. The experimental results show that both of static and dynamic performances of the controller are good.

**Key words:** digital controller; gyro stabilized platform; servo tracking system; TV guidance; DSP; double closed-loop PID

### 1 引言

电视导引头技术是精确制导武器的关键技术。其功能是在人工参与条件下, 发现、识别、锁定目标, 自动跟踪目标并输出导引信号。电视导引头系统由光学系统、伺服稳定跟踪平台、视频跟踪处理器、操控台、供电部分、接口部分和导引头壳体组成, 各部分协调工作。伺服稳定跟踪平台主要用于隔离扰动, 以保证视轴在惯性空间内的稳定; 实现导引头的自动/手动搜索、目标自动跟踪。

导引头伺服系统区别于其他伺服系统的最重要特征在于, 它要克服导体在空气中受气流影响, 而容易发生的高频抖动, 为摄像头提供一个相对稳定的平台, 因此对系统的快速性要求非常高。

本文从平台结构、控制器的软硬件设计等方面采取相应措施, 使系统能满足上述性能要求。

### 2 伺服稳定跟踪平台的结构

伺服稳定跟踪平台采用速度陀螺随动平台稳定方案<sup>[1]</sup>, 即将光学镜头摄像机与陀螺仪均安装在由

力矩电机驱动的框架上, 以使摄像机和陀螺仪速度一致, 且都处于受电机直接推动的框架上, 系统精度高、快速性好。该平台由伺服控制板和方位、俯仰、横滚三个正交的驱动轴组成, 如图 1 所示。

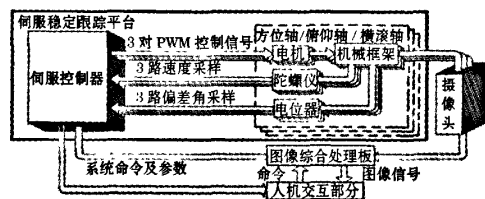


图 1 伺服稳定跟踪平台的结构

Fig.1 Structure of the servo stable tracking platform

每轴包括机械框架、速率陀螺仪、直流电机和高精度电位器。速率陀螺仪测量摄像头在相应轴向上的运动速率; 电机用于驱动光学镜头运动; 电位器用于指示视轴相对于三个轴的偏差角, 以便调整弹体姿态以及使镜头在框架的限定区域工作。

### 3 伺服控制板的硬件设计

系统须克服高频振动, 这要求伺服周期为  $\mu\text{m}$  级,

收稿日期: 2006-05-12; 收修定稿日期: 2006-07-08

作者简介: 武文杰(1982-), 女, 河北唐山人, 研究生, 主要研究方向为控制理论与控制工程等; 李奇(1963-), 男, 教授, 博士生导师。

因此，选用 TI 公司的 DSP 芯片 TMS320LF2407A 作为主控芯片。系统需完成以下功能：

- ① 对速率陀螺信号和电位器的采集和转换，由此得到系统各个框架相对于惯性空间的速率及限位信号。
- ② 与视频图像跟踪模块通信，完成系统命令及位置像素误差的接收，以便实现视频跟踪控制。
- ③ 控制力矩电机驱动系统各个框架，使作为最内框负载的摄像机的视轴在惯性空间保持稳定。
- ④ 系统运行数据的实时运算处理、控制算法实现和控制量的输出。
- ⑤ 与上位工控机的通信，以便上位机对导引头的运行状态进行实时监控。

系统结构框图，如图 2 所示。

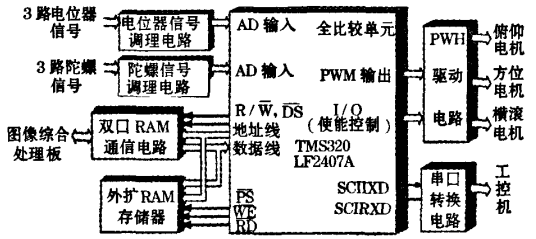


图 2 伺服稳定平台控制板硬件结构

Fig.2. Structure of the control board for servo stable tracking platform

1) 陀螺、电位器信号调理部分 控制板采用 DSP 的片内模数转换(ADC)模块对陀螺、电位器输出的模拟信号进行模数转换，其处理范围为 0~3.3 V，而陀螺仪的输出电压为 -15~+15 V，电位器输出电压为 0~5 V，故需进行电压调整。本设计采用 2.5 V 参考电源芯片 ISL6002BIB825 为 DSP 提供精密参考电源基准，采用精密运放 TLC2274 对 6 路信号进行调理。6 路信号调理电路相似，以方位陀螺信号为例，如图 3 所示。

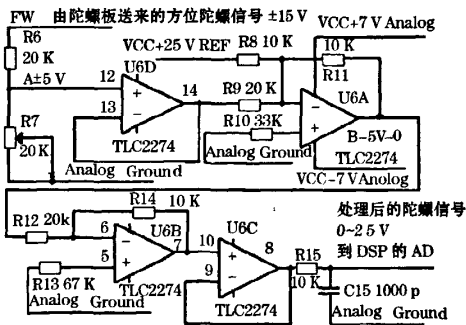


图 3 陀螺信号调理电路

Fig.3 Gyro-signal adjusting circuit

通过对信号进行串联分压、一级跟随、叠加移位、增益调整、低通滤波，使输出电压为 0~2.5 V，满足片内 ADC 要求。同时，设计中把 DSP 的 VREFHI 给定为 2.5 V，VERFLO 给定为 0 V，从而不

会因信号调理损失精度。

2) PWM 功率驱动电路部分 本设计采用 LF2407A 片的两个事件管理(EVM)模块自带的三对 PWM 和三个 I/O 引脚作为 PWM 控制信号及使能信号，经功率放大后控制三个直流电机。系统选用 ST 公司的智能功率驱动芯片 L6203，其输入信号 IN1 和 IN2 与 LF2407A 的两个 PWM 控制脚相连，用于控制 H 桥的 4 个桥臂上 DMOS 晶体管的通断，实现电机的正反转；ENABLE 引脚与 LF2407A 的 I/O 引脚相连，用于控制使能；CBOOT1 和 CBOOT2 引脚用于连接电位提升电容，以控制 H 桥上桥臂功率管的有效通断。PWM 驱动电路，如图 4 所示。

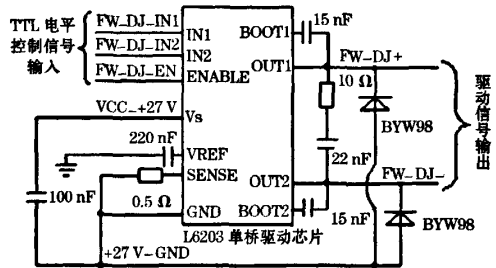


图 4 PWM 驱动电路

Fig.4 Circuit of PWM driving

3) 双口 RAM 及隔离电路部分 为了提高通信速率，本设计选用双端口 RAM 与视频图像跟踪模块通信。双口通信部分硬件设计，如图 5 所示。

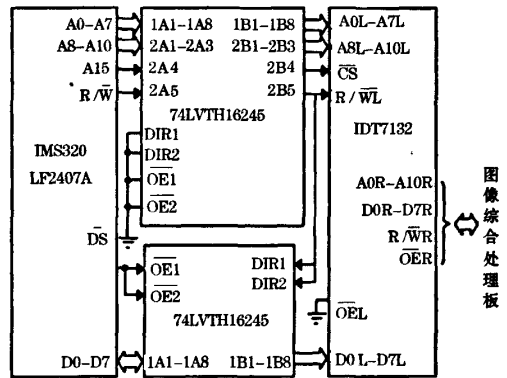


图 5 双口 RAM 通信部分硬件设计

Fig.5 Hardware design for DP RAM

双口 RAM 大多是高电平为 5 V 的标准，而伺服稳定平台选用的是 3.3 V 的控制系统。不同电源电压的逻辑器件接口时需考虑门限电平、容限电压、电流互串三个问题。本系统选用 5 V 供电的双端口 RAM IDT7132，用两片 5 V 容限 3.3 V 供电的电平转换逻辑器件 SN74LVTH16245 实现对双端口 RAM 的地址及控制信号、数据信号的隔离连接。用 DSP 的外部数据存储选通信号 DS 作为 16245 的输出允许，用隔离后的读写信号控制数据隔离芯片

16245 的数据传输方向，以避免数据线冲突。本设计将 2 K 的双口 RAM 映射到 DSP 的最高地址区 (F800-FFFF)。实现方式为：将地址线和数据线对应相连，以 DSP 的 A15 作为双口 RAM 的片选信号。

#### 4 系统控制结构分析与软件设计

1) 系统控制结构分析 平台采取经典速度、位置双闭环 PID 控制策略<sup>[2]</sup>。位置环的误差由图像综合处理板提供；速度环的给定由系统命令或者位置环的输出提供；反馈由陀螺仪信号经调理后提供。单轴的伺服稳定跟踪控制结构，如图 6 所示。

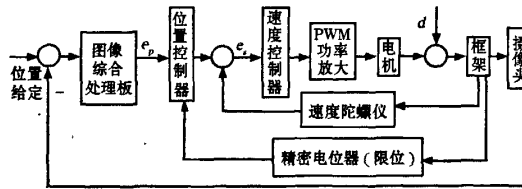


图 6 单轴伺服控制结构

Fig.6 Structure of servo control for each axis

这种结构将位置伺服与速度伺服分开层次，非常适合导引头系统。位置环误差由图像处理产生，每 40 ms 才能更新一次误差，能满足跟踪要求；但若每 40 ms 更新一次电机控制电压，将导致系统不能克服高频振动，因此本文采取位置环和速度环独立更新的方法。速度环采用陀螺作为反馈装置，每 100 μs 更新一次，使系统能够克服高频振动。

2) 系统软件结构设计 系统控制部分需要两个定时中断，一个定时采样速度陀螺仪和精密电位器的值，得到速度环的反馈；另一个定时通过双口 RAM 与图像综合处理板通信，得到位置环的误差。此外，还需要一个串口接收中断不定时接收工控机的命令。系统的软件结构为：主程序完成系统的初始化；中断 1 每 100 μs 产生一次，按顺序完成 6 路 AD 采集、速度 PID 的计算、PWM 更新以及数据采集；中断 2 每 20 ms 产生一次，完成双口 RAM 通信、位置 PID 更新；中断 3 当工控机有命令下达时产生。中断 1、中断 2、中断 3 的优先级依次降低。设计采取可嵌套式中断。

本文设计采用一片 DSP 顺序控制三个轴运动，使用 CC 4.12 编译器的 C 语言 + 汇编语言开发环境。主程序采用 C 语言，中断程序用汇编编写，提高代码效率。

#### 5 双环 PID 算法设计与实现

1) 针对本系统的 PID 公式及其参数调节方法

位置环和速度环都采用改进的位置型数字 PID 控制算法，该算法的数学描述为

$$u(n) = K_p \{ e(n) + K_i \sum_{j=0}^n e(j) + K_D [e(n) - e(n-1)] \} \quad (1)$$

式中， $K_p$ ， $K_i$ ， $K_D$  分别为比例、积分、微分系数； $u(n)$  为第  $n$  个伺服计算周期的控制量； $e(j)$  为第  $j$  个伺服计算周期的误差输入。

为减少 DSP 工作量，对式(1)做如下变换：

$$\begin{cases} u(n) = K_1 e(n) + K_2 E(n) + K_3 [e(n) - e(n-1)] \\ E(n) = \begin{cases} E_{max}, & \text{当 } E(n-1) + e(n) > E_{max} \\ E(n-1) + e(n), & \text{当 } E_{min} < E(n-1) + e(n) < E_{max} \\ E_{min}, & \text{当 } E(n-1) + e(n) < E_{min} \end{cases} \end{cases} \quad (2)$$

式中， $E(n-1)$  为上次累计误差； $K_1 = K_p$ ； $K_2 = K_p * K_i$ ； $K_3 = K_p * K_D$ ； $E_{max}$  和  $E_{min}$  为累计误差的最大及最小限幅值。

为使系统平滑稳定地运行，本设计采取带限幅的 PID 控制：

$$U_{real}(n) = \begin{cases} U_{max}, & \text{当 } u(n) > U_{max} \\ u(n), & \text{当 } U_{min} < u(n) < U_{max} \\ U_{min}, & \text{当 } u(n) < U_{min} \end{cases} \quad (3)$$

单环的参数调节过程为：给定单位阶跃信号或方波信号，先取  $K_2 = K_3 = 0$ ， $K_1$  由 1 逐渐增大，直到系统首次出现震荡；设这时  $K_1 = K_0$ ；然后取  $K_1 = 0.75 K_0$ ，此时系统的阶跃响应时间很短，但存在静态误差。逐渐增大  $K_2$ ，使系统达到无静差并基本无震荡，这其中也要考虑  $E_{max}$  和  $E_{min}$  的取值；最后适当调节  $K_3$  值以增加系统稳定性。

在系统调试中，首先调节速度内环，再调节位置外环。系统正常运行情况下，位置环的误差是由图像综合处理板提供的。在调试过程中，首先脱离图像综合处理板，用陀螺的积分信号作为位置环反馈，调节系统动、静态精度，得到合适的 PID 参数；然后标定图像综合处理板提供的误差单位与陀螺积分单位之间的比例关系，做线性调整后即可获得视频跟踪下的 PID 参数。

2) 双环 PID 的实现 速度环的入口参数是速度给定量，它可以是位置环 PID 输出，也可由命令参数(如自动搜索、手动搜索等)转换而来。速度环的输出值控制 DSP 全比较单元的比较值<sup>[3]</sup>，从而控制 PWM 波形的占空比，并由此控制电机转速。系统采用单极性 PWM 控制<sup>[4]</sup>，用速度环输出值的正负来控制电机的正反转，用速度环输出的绝对值来控制电机的转速。

(下转第 219 页)

参考文献 (References):

[1] 季绍波, 曲刚. 基于系统复杂性的企业变数工程 [A]. 第一届信息系年会 [C]. 北京: 清华大学出版社, 2005. (Ji Shaobo, Qv Gang. Variety engineering based on organizational systematic complexity [A]. 1st Conference of CNAIS [C]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.)

[2] Lawrence P R, Lorsch J W. Organization and environment [M]. Boston: Harvard University, 1967.

[3] Miller D. Strategy making and structure: analysis and implications for performance [J]. Academy of Management Journal, 1987, 30(1): 7-32.

[4] Walters B A, Bhuian S N. Complexity absorption and performance: a structural analysis of acute-care hospitals [J]. Journal of Management, 2004, 30(1): 97-121.

[5] Duncan R B. Characteristic of organizational environments and perceived environment uncertainty [J]. Administrative Science Quarterly, 1972, 17(3): 313-327.

[6] Sharfman M P, Dean J W. Conceptualizing and measuring the organizational environment: a multidimensional approach [J]. Journal of Management, 1991, 7(4): 681-700.

[7] 王益谊, 席西民, 毕鹏程. 组织环境的不确定性研究综述 [J]. 管理工程学报, 2005, 19(1): 46-50. (Wang Yiyi, Xi Youmin, Bi Pengcheng. Organizational environmental uncertainty: a literature review [J]. Journal of Industrial Engineering and Engineering Management,

2005, 19(1): 46-50.)

[8] 方卫国, 周泓. 不确定性环境中组织结构的设计 [J]. 管理科学学报, 2000, 3(2): 9-14. (Fang Weiguo, Zhou Hong. Organizational structure design under environment of uncertainty [J]. Journal of Management Sciences in China, 2000, 3(2): 9-14.)

[9] Wiener N. Cybernetics [M]. MA: MIT Press, 1961.

[10] Ashby R. An introduction to cybernetics [M]. London: Chapman and Hall, 1956.

[11] Beer S. The heart of enterprise [M]. Chichester: John Wiley & Sons, 1979.

[12] Watson R, Zinkhan G, Pitt L. Object-orientation: a tool for enterprise design [J]. California Management Review, 2004, 46(4): 89-110.

[13] Lewis G J, Stewart N. The measurement of environmental performance: an application of Ashby's law [J]. System Research and Behavioral Science, 2003, 20(1): 31-52.

[14] Beer S. Diagnosing the system for organizations [M]. Chichester: John Wiley & Sons, 1985.

[15] Espejo R, Watt J. Information management, organization and managerial effectiveness [J]. The Journal of the Operational Research Society, 1988, 39(1): 7-14.

[16] Laudan L. Science and values: an essay on the aims of science and their role in scientific debate [M]. Berkeley: University of California Press, 1984.

[17] Hair J F, Anderson R E, Tatham R L, et al. Multivariate data analysis with readings [M]. New York: Macmillan, 1991.

(上接第 194 页)

位置环的入口参数为位置给定量, 它由命令参数转换而来; 位置环的输出为速度环的给定。必须通过标定使得位置环的输出信号与速度环的陀螺反馈信号相匹配, 并用限幅来保证速度给定量不超过陀螺测速的范围。另外, 根据系统控制要求, 摄像机镜头只能在框架两侧边界之间。当镜头已经到了边界, 而且根据 PID 的计算结果, 欲使镜头继续向外运动, 这时将速度给定量设为 0 值。

6 系统测试结果

1) 速度环测试结果 在给定幅值为 20 %/s, 频率为 5 Hz 的矩形波情况下测得, 上升时间 10 ms, 最大超调量小于 15 %, 震荡次数小于 1 次, 实际测量的方位轴的陀螺信号, 如图 7 所示。

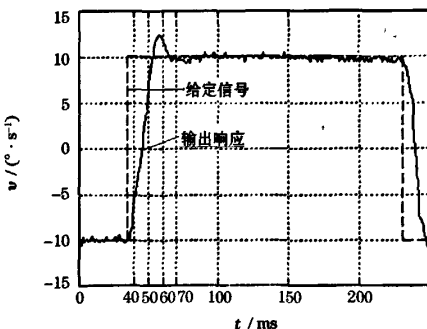


图 7 速度环方波响应

Fig. 7 Rate closed-loop response to square-wave

2) 位置环测试结果 在脱离图像综合处理板的情况下, 用陀螺积分测试, 在位置给定为幅值为 8.4°, 频率为 1.25 Hz 的情况下测得: 系统的过渡时间为 80 ms, 最大超调量小于 15 %, 震荡次数小于 2 次, 达到要求。实际测量的方位轴陀螺信号的积分值, 如

图 8 所示。

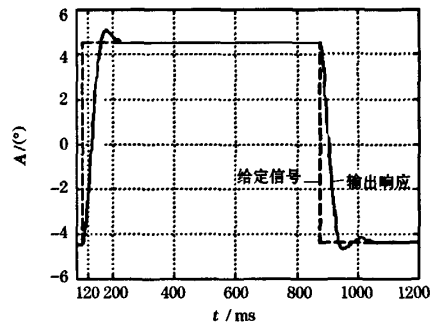


图 8 位置环方波响应

Fig. 8 Position closed-loop response to square-wave

7 结 语

本文设计了电视导引头伺服稳定平台控制器。在硬件上给出了伺服控制器的设计电路; 在软件上讨论了软件结构的设计; 在算法上, 研究了双闭环控制器的设计及调试方法。应用结果表明, 该伺服控制器能够满足实际系统的动、静态要求, 达到了预期的指标。

参考文献 (References):

[1] Downs J, Smith S, Schwickert J, et al. High performance gimbale control for self-protection weapon systems [C]. Florida: SPIE, 1998.

[2] 赵长德, 张煜, 陈科. 具有 C196 微控制器的瞄准线稳定与自动跟踪系统 [J]. 清华大学学报, 1998, 38(11): 34-38. (Zhao Changde, Zhang Yi, Chen Ke. Sight line stabilizing and auto-tracking control system with C 196 MCU [J]. Tsinghua University Transaction, 1998, 38(11): 34-38.)

[3] 张雄伟. DSP 芯片的原理与开发应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2003. (Zhang Xiongwei. DSP's principle and development [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2003.)

[4] 秦继荣, 沈安俊. 现代直流伺服控制技术及其系统设计 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1999. (Qin Jirong, Shen Anjun. Modern direct current servo control technology and system design [M]. Beijing: Machine Industry Press, 1999.)