

## 三轴陀螺稳定平台控制系统设计与实现

杨蒲, 李奇

(东南大学 自动化研究所, 南京 210096)

**摘要:** 针对高精度光电导引系统快速隔离扰动、稳定视轴的要求, 设计了以速率陀螺为核心构成的三轴陀螺稳定平台。结合某型号电视导引头设计过程, 详细介绍了该三轴陀螺稳定平台的结构组成、主要元器件选型, 以及软硬件实现。分析了陀螺稳定平台的隔离扰动原理, 设计了多闭环复合控制结构, 给出了系统各组成部分的模型, 合理简化后建立了系统数学模型, 并按照频域分析法设计了控制算法。对于陀螺信号噪声问题, 设计了小波阈值滤波方法, 有效地消除了反馈信号的噪声, 提高了系统控制精度。整机测试表明, 该陀螺稳定平台满足了导引头系统设计指标要求, 具有较高的跟踪精度; 能够在实验室条件下, 进行多种电视跟踪模拟实验, 为实际设备的研制提供了真实有效的数据。

**关键词:** 稳定平台; 速率陀螺; DSP; 伺服控制

**中图分类号:** U666.1      **文献标识码:** A

## Design and realization of control system for three-axis gyro stabilized platform

YANG Pu, LI Qi

(Research Institute of Automation, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** In view of the requirements of isolating disturbances and stabilizing optical axis of high-precision photoelectric guidance system, a three-axis stabilized platform system centering on the rate gyro was designed. Based on the design process of a TV guidance header, the mechanical structure constitution, main components selection and software and hardware realization were introduced. The disturbance-isolation theory of the stabilized platform was analyzed and the control structure including multiple closed-loops was designed. Each part of the control system was modeled, and then by simplifying their equations, the whole system model was founded and the control method was designed according to the frequency domain analysis method. To eliminate the gyro's noise signal, a wavelet threshold filter was proposed, which can depress the feedback noise signal effectively and improve the control precision. The testing results on the equipment show that the gyro stabilized platform system meets the presetting performance demands and has higher tracking precision. Many kinds of TV tracking simulation experiments can be implemented in the laboratory, and this provides real and effective data for the development of practical equipments.

**Key words:** stabilized platform; rate gyro; DSP; servo control

电视成像导引设备作为惯导武器的核心部分, 对武器命中目标的精度起着十分重要的作用。由于导弹在飞行过程中, 受到发动机和空气阻力等因素的影响, 弹体始终处于剧烈震动摇摆中, 这将造成电视导引头成像系统摄取图像的清晰度下降, 甚至无法锁定目标图像, 导致电视跟踪器不能正常工作, 因此如何在运动条件下获得清晰的图像成为电视成像制导武器系统中的一个关键问题。利用陀螺“空间测度机”的特点构成陀螺稳定平台, 即有效隔离了弹体波动对系统成像的影响, 保证了视轴的稳定, 又可获得满意的跟踪精度<sup>[1]</sup>。本文以自行开发的某小型高精度三轴电视导引头为背景, 具体介绍了系统中三轴陀螺稳定平台的控制系统设计与数字实现。实际测试表明, 该系统能够快速精确的消除扰动, 具有良好的稳定性能。

### 1 稳定平台机械结构设计

根据电视跟踪系统总体设计要求, 陀螺伺服稳定平台要完成两大任务: ① 在运动过程中, 实时隔离导引头外扰动,

收稿日期: 2006-05-08; 修回日期: 2007-02-06

作者简介: 杨蒲(1977—), 男, 博士生, 主要研究方向为伺服跟踪控制系统、智能控制、变结构控制。E-mail: yangpu2000@tom.com

联系人: 李奇(1963—), 男, 教授, 博士生导师。E-mail: liq\_kj@js.gov.cn

稳定视轴；② 完成导引头目标的快速准确跟踪。为了实现规定的各主要功能，伺服稳定平台采用了以支架式底座为主体的三轴正交的框架式结构。如图1所示，稳定平台由空间上互相垂直的三个框架构成，其中内框为方位框，中框为俯仰框，外框为横滚框，分别控制导引头的方位、俯仰和横滚运动。其中，由于外框的负载最大，因此外框的强度和刚度是设计的难点，不能简单的靠增加零部件尺寸来改善机械特性。为此，稳定平台系统设计了支架式底座结构，支架与头罩之间为滑动配合，这样既提高了支架的刚性，又改善了整个稳定平台的机械特性。

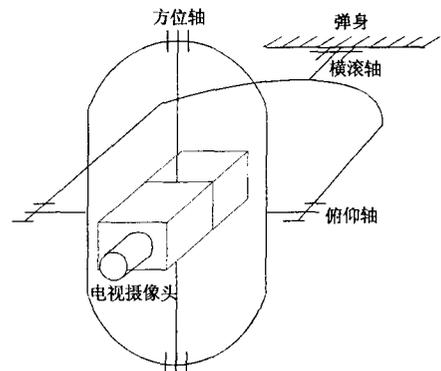


图1 三轴稳定平台的结构示意图  
Fig.1 Three-axis stabilized turntable layout

通常情况，根据陀螺的安装位置不同，稳定平台系统可分为进动陀螺、伺服连接以及随动平台方式几种类型<sup>[2]</sup>，其特征与优缺点见表1。本系统采用了随动平台方式，它是将光学镜头、摄像机和速率陀螺均安装在稳定平台的内框上，系统工作时，速率陀螺测量载体在空间三个轴向的转动角速度，经处理后反馈到电机上，控制力矩电机转动，使光轴快速对准目标。这种方式精度高，系统快速性好。虽然不利之处是陀螺装在内框架上，平台小型化比较困难，但随着陀螺技术的进步，目前市场上已有多种性能良好，体积尺寸较小的不同型号陀螺可供选择。

表1 不同类型平台的系统性能  
Tab.1 Performance of different kinds of platforms

	进动陀螺方式	伺服连接方式	随动平台方式
定义	摄像设备与陀螺固定连接	摄像设备与陀螺分开连接	摄像机和陀螺均安装在内框上
优点	电路简单，结构紧凑	结构灵活，易于小型化	精度高，快速性好
缺点	同等精度的情况下，陀螺需要较大的角动量	测量时会引入附加相角，精度很难保证	结构小型化困难

陀螺实际安装的时候，需要十分注意陀螺的安装方式，一定要保证各陀螺敏感轴与各自框架轴线的水平，并且相互之间保持垂直，以免造成陀螺敏感轴方向上的误差和各轴系之间的耦合效应。本系统方位和俯仰轴系的陀螺均安转在方位内框上，有效避免了外框尺寸过大，从而保证负载框具有较小的转动惯量。同时，每个框架都有一个独立的直流力矩电机直接驱动，这种驱动方式省去了减速机构，有效地消除了齿轮间隙误差问题。由于其耦合刚度高，增大了系统的机械共振频率，因而有利于提高系统的频带响应和定位精度。

## 2 稳定平台控制系统设计

### 2.1 稳定平台隔离扰动原理分析

运动载体在飞行过程中，无论受到哪个方向的外力干扰，都会造成位于内框上的摄像头晃动，影响图像的稳定性，以至系统无法实现精确跟踪。根据刚体卡尔丹角坐标变换和矢量分解原理<sup>[3]</sup>，可以得到稳定平台各框架运动方程：

$$\omega_r = \omega_x, \quad \omega_p = \cos \theta_r \omega_y + \sin \theta_r \omega_z, \quad \omega_a = \sin \theta_p \omega_x + \cos \theta_p \cos \theta_r \omega_z - \cos \theta_p \sin \theta_r \omega_y \quad (1)$$

其中， $\theta_r$ 、 $\theta_p$ 、 $\theta_a$ 分别为横滚角、俯仰角、方位角， $G_r$ 、 $G_p$ 、 $G_a$ 分别为横滚、俯仰和方位三个单自由度速率陀螺， $\omega_r$ 、 $\omega_p$ 、 $\omega_a$ 分别为扰动角速度 $\omega$ 耦合到外、中、内框转轴的分量， $\omega_x$ 、 $\omega_y$ 、 $\omega_z$ 分别为扰动角速度 $\omega$ 沿载体坐标系三个轴的分量。

由式(1)可知，当陀螺稳定闭环系统正常工作时，各框架速率陀螺可以提前敏感出各自转轴方向上扰动角速度分量，并给予快速补偿，即 $\dot{\theta}_r = -\omega_r$ ， $\dot{\theta}_p = -\omega_p$ ， $\dot{\theta}_a = -\omega_a$ 。这样便使得稳定平台在横滚、方位和俯仰各方向上角速度和均为零，即消除了载体扰动角速度 $\omega$ 对系统的影响，始终保持视轴的稳定。

### 2.2 伺服控制系统结构设计

稳定平台控制系统由方位、俯仰、横滚三个框架的分系统组成。三个分系统的控制结构基本相同，图2为方位轴控制系统结构图。

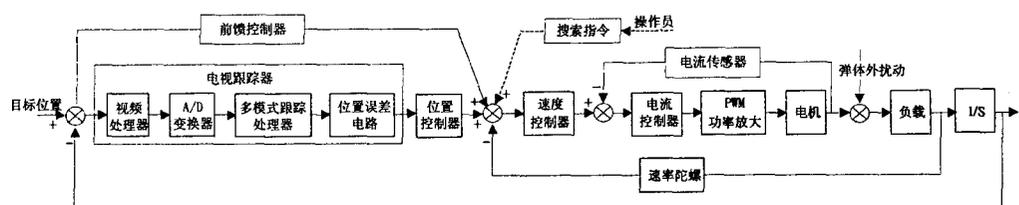


图2 方位轴控制系统结构图  
Fig.2 Configuration of azimuth axis control system

由图 2 可以看出, 由速率陀螺构成的速度闭环形成了系统的内回路, 加上电视跟踪器构成的位置外回路, 共同组成了导引头的主要控制系统。陀螺稳定平台控制系统工作于两种方式: 在未锁定目标前, 稳定平台先处于搜索状态, 即陀螺速度闭环接收操作员通过操作台给定的自动或人工搜索指令信号, 控制电机转动, 完成对目标的准确搜索与发现。当确定并锁定目标后, 平台系统进入自动跟踪状态, 速度闭环只接收电视跟踪器产生的目标跟踪位置误差信号, 即陀螺速度闭环按照位置控制器的输出值, 使导引头视轴始终跟踪目标。一旦系统受到外扰动, 陀螺稳定平台能够迅速把扰动消除在速度闭环内, 保证导引头跟踪过程中视轴的始终稳定, 有效起到了隔离扰动的作用。此外, 在陀螺速度环内部, 还添加了一个由模拟控制器和模拟传感器构成得电流内环, 它可以充分减小电流波动对速度闭环的影响, 提高控制力矩的线性度, 从而提高了陀螺速度闭环的稳定隔离精度。由于系统存在多闭环反馈回路, 必然加大了整个系统的响应速度, 因此控制系统还引入了前馈控制器, 它可以提前预测目标位置, 补偿系统的动态滞后, 并且不影响原控制系统的稳定性。

### 2.3 伺服控制算法设计

根据导引头整体设计方案, 陀螺速度闭环的控制要求是响应速度快和隔离扰动效果好。本系统, 采用连续系统频域响应法设计数字调节器。首先, 根据系统物理、机械和电路原理<sup>[4]</sup>, 对稳定平台系统中的各组成部分进行建模, 其中直流力矩电机模型  $G_m(s)$ 、PWM 放大电路模型  $G_p(s)$  和速率陀螺模型  $G_g(s)$  分别为:

$$G_m(s) = K_e / [s(T_e T_m s^2 + T_m s + 1)], \quad G_p(s) = K_p / (T_p s + 1), \quad G_g(s) = K_g s \quad (2)$$

其中,  $K_e$  为电机反电动势比例系数,  $T_e$  为电机电气时间常数,  $T_m$  为电机机械时间常数;  $K_p$  为 PWM 电路放大系数,  $T_p$  为 PWM 放大电路时间常数,  $K_g$  为速率陀螺增益系数。

考虑到电机本身的电磁过渡过程时间比机电过渡过程时间要快数百倍, 因此可以忽略电磁时间常数, 简化电机模型为一阶惯性环节。同时, 由于本系统 PWM 放大电路的调制频率为 20 kHz, 远大于电机的截止频率, 因此可以把 PWM 放大电路看成一个放大环节。这样, 根据式 (2), 系统工作在自稳定状态时 (即输入信号为零), 弹体扰动量  $M_t$  对系统输出角  $\theta_{out}$  的影响可表示为:

$$\frac{\theta_{out}}{M_t} = \frac{T_m s + 1}{T_m s + 1 + K_s K_e K_p K_g} \quad (3)$$

当  $K_s K_e K_p K_g \gg 1$  时,  $\theta_{out}/M_t$  稳态值趋近于 0, 即弹体扰动量  $M_t$  对系统输出角  $\theta_{out}$  几乎没有影响。因此, 为达到满意的平台稳定效果, 应该在保证动态品质的基础上尽量增加控制器增益  $K_s$ 。同时, 速度环的增益与调速范围和转矩波动系数均成正比, 却与最低平稳速度成反比, 因此, 为了增加调速范围和减小转矩误差, 也必须增加环路总的放大系数。根据系统设计目标和原系统的开环传递函数, 速度控制器采用有差调节, 校正后速度环的开环幅频特性采用 0-2-1-2 型, 速度闭环调节器的传递函数为:

$$D_s(s) = K_s(0.033s + 1)(0.003 + 1) / [(0.384s + 1)(0.0025s + 1)] \quad (4)$$

理想的前馈调节器应该是速度闭环传递函数的逆, 即  $D_q(s) = D_s(s) / (1 + D_s(s))$ , 以实现完全补偿。但实际中, 前馈通路中存在纯微分环节和一阶微分环节, 完全补偿法势必造成前馈网络中充满噪声信号, 以致放大器不能正常工作, 因此, 通常采用部分补偿法来设计前馈调节器。

## 3 陀螺伺服稳定平台系统的实现

### 3.1 主要元器件选型

#### ① 伺服电动机

伺服电动机的优劣将直接影响到被控对象能否达到预期的运动状况。为提高控制精度和机械谐振频率, 本系统选用了低速大扭矩宽调速电动机, 它是在过去的军用低速直流力矩电动机基础之上发展起来的一种新型电动机, 具有高转矩、高加速度, 高热容量, 可以直接与负载耦合连接等突出特点。根据平台框架设计和计算, 方位电机的负载最小, 俯仰电机其次, 横滚电机的负载最大。以方位电机为例, 其负载包括变焦光学镜头、摄像机、陀螺等元器件, 方位框架几何尺寸约为 120 mm × 80 mm × 30 mm, 总质量为 2.5 kg。根据给定运动参数可以计算得到方位框的总动量矩为 0.012 kg·m<sup>2</sup>/s, 从而选定了型号为 60LY008 的永磁式直流力矩电机, 该电机连续堵转力矩为 0.3 N·m。

#### ② 速率陀螺

陀螺是感测旋转的一种惯性敏感器。通常情况下, 陀螺稳定平台多采用积分陀螺稳定法和速率陀螺稳定法两种方法<sup>[6]</sup>, 前者输出值为陀螺所在轴系的空间角度值, 后者则为陀螺所在轴系的空间角速度值。本方案选用了 KT-H 型单自由度液

浮速率陀螺。这种陀螺体积小, 功耗低, 无需温度控制, 耐冲击振动, 可靠性高, 主要技术参数为: 速度分辨率为  $0.003 (^{\circ})/s$ , 测速范围为  $\pm 0.003 \sim \pm 120 (^{\circ})/s$ , 启动时间小于  $30 s$ 。

### 3.2 系统硬件实现

稳定跟踪平台控制系统硬件主要包括伺服控制板、操控台、速率陀螺、直流力矩电机和上位工控机, 其中伺服控制板在系统硬件中处于核心地位。DSP 控制器选用 TI 公司生产的专用 DSP 芯片 TMS320LF2407, 该芯片采用高速 CPU, 含有高达 32KB 的 FLASH 程序存储器和 192KB 的可扩展外部存储器, 同时内置 10 位高性能 ADC 数模转换器, 其转换时间能够达到  $500 ns$ , 可以提供多达 16 路的模拟输入。此外, 它还包括两个事件管理模块 (EVM), 非常便于实现对多个电机的数字化控制。伺服控制板硬件组成框图如图 3 所示。

为保证传输速率, DSP 控制器采用片上外部数据接口扩展双端口 RAM 与视频图像跟踪模块通信, 接收图像跟踪模块传来的目标像素位置误差信号。这就需要解决的一个问题是, 如

何解决两侧处理器同一时间访问双端口 RAM 的同一地址空间的情况。这个问题采用查询法解决, 即两侧处理器约定在某些特定地址写入标志字节作为已写入标志和已读取标志。其实质上就是一个两侧处理器在通信过程中查标志, 置标志的过程。伺服控制板通过 RS-232 串行接口与上位工控机保持通信, 用于实现数据采集、显示和保存。由于 DSP 控制器内包括一个异步串行接口 (UART), 因此选用了电平转换逻辑器件 SN75LV4737A 完成 RS-232 电平和 UART 电平的转换。

伺服控制板需要控制三个框架的直流力矩电机, 由于 DSP 内包含两个事件管理模块, 共有 6 对 PWM 信号输出引脚, 因此选用 EVMA 中的两对引脚分别控制横滚和俯仰电机, 选用 EVMB 中的一对引脚控制方位电机。系统电机驱动功率单元采用了 ST 公司的智能功率驱动芯片 L6032。它是采用 DMOS 技术的全桥功率驱动集成芯片, 具有 TTL 兼容接口, 能方便地与主控芯片接口。此外, 为了保证电机电枢电流不出现断续现象, 系统采用了 H 桥双极 PWM 控制模式, 这样即使电动机不转, 电枢电压瞬时值也不等于零, 而且正、负脉冲电压的宽度相等, 电枢回路中流过一个交变的电流, 可使电动机发生高频颤动, 有利于减小静摩擦。

### 3.3 系统软件实现

稳定平台控制系统程序采用 DSP TMS320LF240X 的专用开发环境编写, 主要包括主程序、中断子程序和串口通信协议定义等几部分。系统主程序主要任务是完成控制系统初始化, 通过双端口 RAM 不断读取来自视频图像跟踪模块或上位工控机模拟控制软件发来的命令, 并作相应的数据处理。中断服务子程序包括时钟一周期中断和时钟二周期中断两种中断程序: 时钟一周期中断每隔  $50 ms$  产生一次, 用于接收主程序的自动搜索、人工搜索和自动跟踪等命令; 时钟二周期中断每隔  $20 ms$  产生一次, 主要完成采集和处理各框架上精密电位器和陀螺的输出电压值。设计中, 两种中断服务子程序既有共同性, 也有特殊性。共同性是指两种中断都必须确定是哪一个中断源获得了响应、中断现场的保存与恢复和中断的初始化。特殊性是指建立中断优先级、嵌套与被嵌套和具体的中断任务。对于本系统, 时钟二周期中断可以打断主程序的执行, 也可以嵌套时钟一周期中断, 但时钟一周期中断不能嵌套时钟二周期中断。

## 4 陀螺信号处理

速率陀螺作为速度闭环的反馈测量元件, 是确保控制效果的关键一环, 而其输出信号精度却受到自身零点漂移和外界环境干扰等很多因素的影响。我们在系统调试过程中发现, 来自速率陀螺信号的采样值不稳定, 根本达不到 10bit 的精度。为了提取有用的信号, 保证稳定环路的输出精度, 必须对陀螺输出信号进行滤波预处理。由于陀螺信号噪声具有不稳定性 and 随机性的特点, 采用传统以 Fourier 变换为核心的数字滤波算法并不能收到好的效果。因此, 本系统采用了小波阈值去噪滤波算法<sup>[7]</sup>, 同时在对小波系数估计中, 采用了软、硬阈值折中的方法, 收到了比一般软阈值或硬阈值好的效果。其主要实现步骤如下:

① 对陀螺输出信号  $\omega(t)$  进行小波变换, 得到一组小波系数  $d_{j,k}$ 。设信号离散采样后得到  $N$  点离散信号  $\omega(n)$ , 其小波变换为:

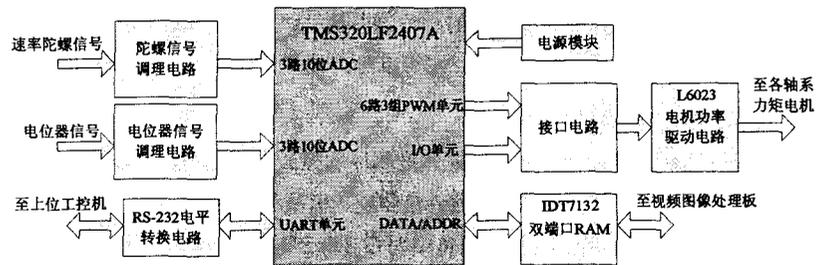


图3 伺服控制板硬件组成框图

Fig.3 Hardware architecture of servo control board

$$d_{j,k} = 2^{j/2} \sum_{n=0}^{N-1} \omega(n) \phi(2^j n - k), \quad j = J, J-1, \dots, J-M \quad (5)$$

由于式(5)的计算量比较大,且 $\phi(t)$ 一般没有显示表达式,因此运算时采用 Mallat 快速分解算法<sup>[8]</sup>,可以得到简化的小波变化递归实现方法:

$$s_{j-1,k} = \sum_l h_{l-2k} s_{j,l}, \quad d_{j-1,k} = \sum_l g_{l-2k} s_{j,l} \quad (6)$$

其中,  $h$  和  $g$  分别为对应于尺度函数和小波函数的低通和高通滤波器,  $\{s_{j,k}\}_{k \in Z}$  为不同尺度空间下的尺度系数。

② 对小波系数  $d_{j,k}$  进行阈值处理,等到一组新的估计小波系数 (EWC)  $\hat{d}_{j,k}$ 。阈值估计方法采用软、硬阈值折中法,其规则为:

$$\hat{d}_{j,k} = \begin{cases} \text{sign}(d_{j,k}) \cdot (|d_{j,k}| - \alpha\lambda), & |d_{j,k}| \geq \lambda \\ 0 & |d_{j,k}| < \lambda \end{cases}, \quad (7)$$

其中,  $\lambda$  是阈值;  $\alpha$  为调节因子,且  $0 \leq \alpha \leq 1$ 。由上式可知,当  $\alpha=0$  时,原式即为硬阈值估计法,其缺点为  $\hat{d}_{j,k}$  在  $\lambda$  处不连续,因此利用  $\hat{d}_{j,k}$  重构的信号会产生振荡;当  $\alpha=1$  时,原式即为软阈值估计法,其缺点为 EWC 的绝对值总比原系数小  $\lambda$ ,造成重构信号与真实信号之间有固定偏差。而由式(7)估计所得的  $|\hat{d}_{j,k}|$  介于  $|d_{j,k}| - \lambda$  与  $|d_{j,k}|$  之间,使得 EWC 更趋近于真实值,因此只要适当选择  $\alpha$  的大小,就可获得很好的去噪效果。

③ 最后,由 EWC 进行小波重构,得到估计信号  $\hat{\omega}(n)$  即为去噪后的信号。小波重构递推公式为:

$$s_{j+1,k} = \sum_l h_{k-2l} s_{j,l} + \sum_l g_{k-2l} \hat{d}_{j,l} \quad (8)$$

实际应用时,以 10 ms 为周期进行一次解算,小波滤波器采用了 Daubechie-5 小波基,分解最大尺度选为 6 级,阈值  $\lambda$  采用了 Stein 无偏风险估计准则(sure 阈值),这样每一尺度上的阈值不同,有利于减小计算误差。图 4 为给定值为正弦信号时的小波滤波输出值。从图中可以看出小波阈值滤波方法有效的去出了噪声信号,保留了有效信号。经过滤波,陀螺原始信号方差可降至 45%左右。虽然理论上小波滤波算法中的分解尺度越大,滤波效果越好,但是在实验中发现,尺度越大,计算量越大,势必造成计算误差增大,也会使计算输出时间增大,造成实际应用效果反而不好。因此实际应用中,应该在保证目标精度的前提下,尽量减小计算量,选用合适的分解尺度。此外,滤波算法中调节因子  $\alpha$  的选择也影响到小波滤波效果的好坏,经过多次试验,  $\alpha$  为 0.5 时可以获得较好的效果。

### 5 系统测试结果

利用自行编制的上位机测试软件,在导引头上对陀螺稳定平台的性能进行实际测试。陀螺速度闭环的控制要求是响应速度快和隔离扰动效果好,因此本系统设计目标要求为:① 速度阶跃响应时间小于 20ms;② 最大超调量小于 15%;③ 在位置环开环,速度环给定值为零的情况下,对稳定平台施加正弦型外扰动(10°, 0.5 Hz),监视图像看不出明显变化。

图 5 中给出了当速度给定值从 0 (°)/s 跃变为 10 (°)/s 时,陀螺速度闭环运行效果。由图中可以看出,速度阶跃响应时间可以控制在 20 ms 的范围内,曲线上升速度非常快,最大超调量在 10%左右。图 6 为系统在位置环开环,速度环给定值为零的情况下,对导引头方位方向施加幅度为 10°, 频率为 0.5 Hz 的正弦扰动时的位置输出图。图 6 中虚线为扰动量曲线,实线为方位轴系位置输出曲线。从图 6 可以看出,在扰动量作用下,位置变化量非常小,输出误差控制在  $\pm 0.2^\circ$  的范围内,人眼观察监控图像看不出任何明显变化,说明陀螺稳定平台起到了良好的隔离扰动效果,达到了目标设计要求。

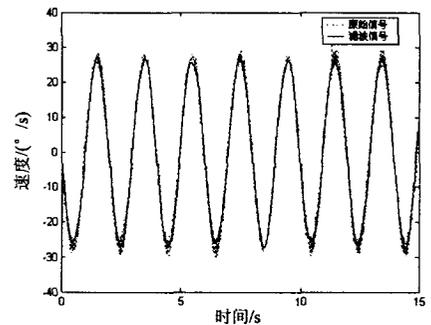


图 4 陀螺信号滤波图  
Fig.4 Noise signal filtering of gyro

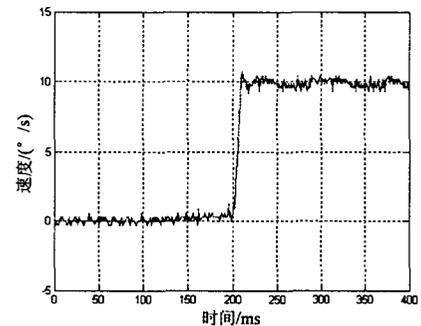


图 5  $\omega_0 = 10$  (°)/s 时速度环响应  
Fig.5 Rate response at  $\omega_0 = 10$  (°)/s

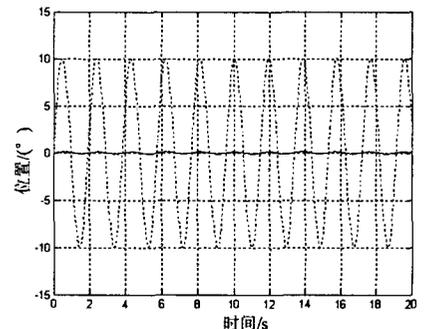


图 6 稳定平台隔离扰动图  
Fig.6 Disturbances isolation of stabilized platform

## 6 结论

在光电伺服跟踪系统中,陀螺伺服稳定平台技术是保证系统实现的一种有效方法。本文以实际应用为背景,详细介绍了陀螺稳定平台系统的设计与实现,并将其应用于某小型导引头设计中,针对系统中机械结构设计、控制系统元器件选型、电路设计、信号处理等关键部分进行了详细的分析与研究。系统联机调试表明,由速率陀螺构成的伺服稳定平台系统满足了导引头设计要求,达到了良好的性能,为同类设备的研制与开发提供了一套有效的方法。

### 参考文献(References):

- [1] Walter R, Danny H, Donaldson J. Stabilized inertial measurement system(SIMS)[J]. Proceedings of SPIE, 2002, 47(24): 57-68.
- [2] 吴金中. 电视导引系统的视轴稳定跟踪技术[J]. 战术导弹技术, 2002, 1(1): 34-38.  
WU Jin-zhong. Optical axis stabilization and tracking technology of TV guidance systems[J]. Tactical Missile Technology, 2002, 1(1): 34-38.
- [3] WANG Hai, REN Shun-qing, WANG Chang-hong. Research on identifying the dynamic error model of strapdown gyro on 3-axis turntable[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2005, 12(6): 630-640.
- [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, 2002.  
QING Ji-rong, SHEN An-jun. Modern DC servo control technology and system design[M]. Beijing: China Machine Press, 2002.
- [5] Deneffeh R, Christ M. Development of a modular system for a high dynamic drive system[J]. VDI Berichte, 2005(1904): 231-245.
- [6] Felix G Gyro technology: What is on the horizon?[C]//Proceedings of the Institute of Navigation and 2005 National Technical Meeting. San Diego, United States: Institute of Navigation, 2005: 939-950.
- [7] Fourati W, Kammoun F, Bouhlel M S. Medical image denoising using wavelet thresholding[J]. Journal of Testing and Evaluation, 2005, 33(5): 364-369.
- [8] Angel P, Morris C. Analyzing the Mallat wavelet transform to delineate contour and textural features[J]. Computer Vision and Image Understanding, 2000, 80(3): 267-288.

(上接第170页)

## 5 结论

本文从工程应用的角度提出的导弹惯性测量单元模拟器的设计方案,研发的模拟器目前已在某型号各种仿真实验中得到了应用,可实现如下用途:

- a) 可模拟导弹各种工作状态下的三轴陀螺和三轴加速度计的输出,输出信号为脉冲形式,12路输出各自独立互不干扰,可应用于对弹上应用软件进行调试及验证系统接口交联情况<sup>[4]</sup>;
- b) 通过导弹惯性测量单元模拟器可预置各种硬件故障,考核导航和对准软件的性能;
- c) 应用导弹惯性测量单元模拟器可进行导弹稳定回路的设计仿真和制导回路的设计仿真。该项技术进一步工程优化,可以推广应用到其它战术导弹的仿真试验中。

所研发的模拟器使用了 CPLD 器件,极大方便了电路的修改,根据需要改变脉冲宽度等,可满足各种型号的导弹惯性测量单元模拟仿真需求。

### 参考文献(References):

- [1] 徐剑芸. 一种惯性测量组件实时测温电路的研究及设计[J]. 中国惯性技术学报, 2002, 11(6): 72-75.  
XU Jian-yun. The study and design of a real-time temperature measurement circuit of an inertia measurement unit[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2002, 11(6): 72-75.
- [2] 刘放, 陈明, 罗兴文, 等. 虚拟仪器技术在捷联惯导系统软件测试中的应用[J]. 计算机技术与应用, 2003(3): 34-36.  
LIU Fang, CHEN Ming, LUO Xing-win, etc. The application of virtual instruments in the software test of strapdown inertial navigation system[J]. Computer Technology and Application, 2003(3): 34-36.
- [3] 黄正谨. CPLD 系统设计技术入门与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2002. 34-36.
- [4] 刘柱, 陈勤, 高伟, 等. 捷联惯导系统仿真器的设计[J]. 应用科技, 2004(7): 40-42.  
LIU Zhu, CHEN Qin, GAO Wei, etc. Design of strapdown inertial system's emulator[J]. Applied Science and Technology, 2004(7): 40-42.