

doi: 10.7690/bgzd.2013.11.018

## 基于 dSPACE 的光电稳瞄半实物仿真系统设计

胥青青, 纪明, 郭新胜, 刘召庆, 李红光, 李超

(西安应用光学研究所, 西安 710065)

**摘要:** 为了提高光电稳瞄控制系统的设计能力, 提出一种以 dSPACE 作为硬件平台的设计方法。介绍了 dSPACE 实时仿真平台的原理、配置和稳瞄接口电路, 建立了稳瞄伺服控制系统的模型, 并针对该模型设计了速率稳定回路、位置回路和跟踪回路控制器。试验结果证明: 隔离度达到 2.1%, 120° 阶跃时间小于 1.2 s, 满足瞄准线稳定的要求。

**关键词:** dSPACE; Matlab; 稳瞄; 半实物仿真

**中图分类号:** TJ02 **文献标志码:** A

## Design of Stabilized Sighting Semi-Physical Simulation System Based on dSPACE

Xu Qingqing, Ji Ming, Guo Xinsheng, Liu Zhaoqing, Li Hongguang, Li Chao

(Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** In order to improve the stabilized sighting system design capabilities, hardware platform based on dSPACE was proposed. The principle, configuration, and interface circuit of dSPACE real-time simulation platform were introduced. The model of servo control system was constructed. The controllers of rate stabilization, position slave and tracking loop were designed. Experimental results show that isolation reached 2.1% and 120 degrees step response is less than 1.2 s, which meets the requirements of line of sight stability.

**Key words:** dSPACE; Matlab; stabilized sight; semi-physical simulation

### 0 引言

光电稳瞄系统利用光电传感器采集图像, 利用精密机械结构和伺服控制保证光电传感器视线稳定, 从而实现武器系统对目标的搜索、瞄准、识别、跟踪功能。光电稳瞄控制系统是其关键组成部分, 具有隔离载体扰动, 保持光电传感器瞄准线 (line of sight) 在惯性空间稳定指向的能力。

光电稳瞄已广泛应用在军事上的制导、火控、侦察及光电对抗技术领域, 以及公安、消防、体育及环境监控等民用领域<sup>[1]</sup>。随着军用武器装备需求的不断发展, 对光电稳瞄的稳定性能提出了更高的要求, 瞄准线的高精度稳定已成为制约光电稳瞄系统性能的关键。而光电稳瞄伺服控制系统则是保证瞄准线高精度稳定的重要环节。

dSPACE 实时仿真平台 (digital signal processing and control engineering) 是由德国 dSPACE 公司开发的一套基于 Matlab/Simulink 的控制系统开发及测试的工作平台, 拥有高速计算能力的硬件系统, 包括处理器、I/O 等, 还拥有方便易用的实现代码生成/下载和试验/调试的软件环境<sup>[2-3]</sup>。笔者结合 dSPACE 半实物仿真平台的特点, 建立了以 dSPACE 作为控制器的稳瞄控制硬件平台, 设计了稳瞄的控制系统, 实现了稳瞄的稳定、随动和跟踪功能, 为

新型控制算法优化与快速实现提供了有力保证, 为提高光电稳瞄伺服控制系统的性能奠定了基础。

### 1 基于 dSPACE 的伺服控制平台

#### 1.1 dSPACE 半实物仿真平台

dSPACE 提供了实时快速原型及硬件在回路仿真的一体化解决途径。快速控制原型 (rapid control prototyping) 是指在开发的初期阶段, 快速地建立控制对象及控制器模型, 并对整个控制系统进行多次、离线及在线的试验来验证控制系统软、硬件方案的可行性; 硬件在回路仿真 (hardware in the loop simulation) 是指已设计完的控制器投入生产后, 在投放市场前必须对其进行详细的测试。如果按传统的测试方法, 用真实的对象或环境进行测试, 无论是人员、设备还是资金都需要较大的投入, 而且周期长, 不能进行极限条件下的测试, 试验的可重复性差, 所得测试结果可记录性及可分析性都较差<sup>[4]</sup>; 因此, 在产品上市前, 采用真实的控制器, 被控对象或者系统运行环境部分采用实际的物体, 部分采用实时数字模型来模拟, 进行系统的仿真测试。

dSPACE 实时仿真系统为这 2 种应用提供了协调统一的一体化解决途径, 既可以实现快速控制原型, 又可以实现硬件在回路仿真。

收稿日期: 2013-05-16; 修回日期: 2013-06-26

作者简介: 胥青青 (1981—), 男, 陕西人, 博士, 高级工程师, 从事控制系统设计和半实物仿真研究。

针对光电稳瞄伺服控制系统，产品开发初期可使用快速控制原型仿真论证方案的合理性和可行性；在产品集成阶段，可采用硬件在回路仿真，将实物接入 dSPACE 实时仿真系统，进行算法优化和测试，最终将成型的算法和参数移植到嵌入式处理器。

### 1.2 dSPACE 配置

笔者使用的 dSPACE 实时仿真系统核心采用 DS1005 PPC 板，处理器为 POWER PC750GX，933 MHz，DS1005 PPC 处理器板在 I/O 管理能力及数字运算能力都非常强，利用 Matlab/Simulink 及 dSPACE 的实时接口库 (RTI-1005MP) 可轻松完成对 DS1005 的编程<sup>[5]</sup>。在 Matlab/Simulink 环境下，无需写任何一行代码就可以增减并设置与 DS1005 板相连的所有 I/O 板。代码的生成、编译和下载简化为鼠标的轻轻一点。对于那些直接用手编写的基本 C 函数，dSPACE 提供用来进行初始化和访问 I/O 的基本 C 函数。在调试器、编译器和下载软件的帮助下，同样可以完成代码向 DS1005 板的下载。

笔者采用的扩展板卡有：A/D 转换板 DS2002、D/A 转换板 DS2103、数字 I/O 板 DS4003 和串口板 DS4201S。A/D 转换板 DS2002，具有 32 路 A/D，最高 16 位分辨率和±10 V 输入电压范围，采样时间 5 μs；D/A 转换板 DS2103，具有 32 路并行 D/A 通道，14 位分辨率和±10 V 输出电压范围；数字 I/O 板 DS4003，具有 96 条双向 IO；DS4201S 串口板为 4 通道串口板，支持 RS323/RS422/RS485 3 种类型收发器，具有 16 字节输入和输出 FIFO，4 通道独立硬件中断，波特率可编程，最高可达 115.2 k<sup>[6]</sup>。

### 1.3 dSPACE 与稳瞄接口电路

以 dSPACE 实时仿真系统的控制板为核心，针对稳瞄特殊接口，设计外围接口电路，可快速地构建起稳瞄伺服控制系统，利用其与 Matlab/Simulink 无缝连接的巨大优势，快捷地实现对稳瞄伺服控制系统算法的验证，同时也可以实现对稳瞄性能的测试。dSPACE 和稳瞄接口电路如图 1 所示。

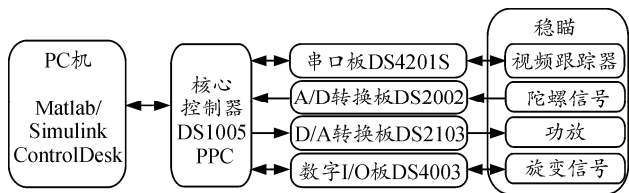


图 1 dSPACE 和稳瞄接口电路

DS1005 PPC 板负责整个 dSPACE 的运算，其标准 UART RS232 可以作为 dSPACE 和视频跟踪器

的接口；多通道 A/D 转换板 DS2002 负责稳瞄速率陀螺模拟信号的采集；D/A 转换板 DS2103，用于输出驱动器所需的控制信号；选用 AD 公司的 AD2S83 设计了旋转变压器接口电路，采用数字 I/O 板 DS4003 完成旋转变压器位置信号的读取。

DS1005、DS2002、DS2103、DS4003 和外围接口电路组合在一起构成了一个紧凑且功能强大的应用于机载光电稳瞄伺服控制系统的 dSPACE 实时仿真平台，为基于 dSPACE 实时仿真平台的稳瞄伺服控制系统提供了强大的硬件平台支持。

## 2 建模与控制器设计

稳瞄伺服控制系统的控制结构是一个典型的三环路控制<sup>[6-7]</sup>，如图 2 所示。

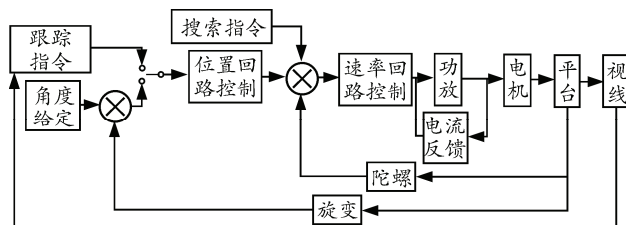


图 2 三环路控制框图

电流回路用于改善控制对象特性，增加转矩平稳性，内部包含 PWM 驱动模块，输出直接控制电机转动，电流控制回路采用模拟电路实现，带宽约 1.2 kHz。速率稳定回路采用挠性速率陀螺作为反馈，完成平台在惯性空间的稳定，同时跟踪位置控制回路指令，速率稳定回路保证稳定平台在转动过程中的速度稳定，并隔离载机扰动。位置控制回路有 2 种工作方式，采用跟踪器偏差量作为位置给定的跟踪回路和采用旋转变压器作为反馈元件的随动回路。跟踪回路保证稳瞄内部的光电传感器实时稳定地指向机动目标，随动回路保证稳瞄精确的随动于外部设备。

### 2.1 系统模型

电流回路各环节如图 3 所示，其中： $R$  和  $L$  分别为电机绕组的电阻和电感； $C_m$  为电机力矩系数； $C_e$  为电机反电动系数； $J$  为负载和电机总的转动惯量； $M_d$  为扰动力矩。

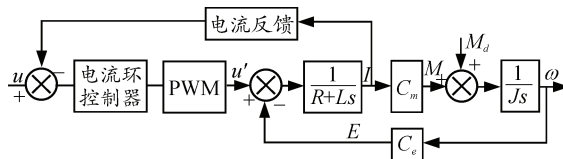


图 3 电流回路

由已知参数，经过理论推导和适当简化，求得电流环、电机和负载部分的开环传递函数为

$$G_m(s) = 23 \frac{1}{(s/232.5+1)(s/8.5+1)} \quad (1)$$

未校正时，系统前向通道增益为 26 dB，在低频和中频段分别存在一个一阶转折点。

速率陀螺处于速率稳定环的反馈部分，通常视为二阶振荡环节，传递函数为

$$G_g(s) = K_g \frac{234\,500}{s^2 + 211.4s + 234\,500} \quad (2)$$

式中， $K_g$  为陀螺标度因子， $K_g = 0.083 \text{ mv}/((^\circ)/\text{s})$ 。

### 2.2 速率稳定回路

稳瞄速率稳定回路由速率陀螺、PWM 驱动器、电机、负载和速度控制器构成。陀螺敏感轴和光电传感器视轴平行，当有外界扰动作用于视轴时，通过陀螺测量视轴相对惯性空间的速度，与速度命令形成误差信号，经过速率稳定回路控制形成控制电压，通过 PWM 驱动器控制力矩电机，力矩电机产生驱动力矩，带动视轴反向转动，消除速度误差，进而保证视轴的惯性空间稳定。由于稳瞄要保证在载体运动的情况下，完成对目标的捕获和精密跟踪，因此稳瞄速度回路必须有效地隔离载体运动，克服摩擦力矩对视轴稳定的影响。保证速度回路在惯性空间稳定的核心是速度回路具备较高的带宽和较高的隔离度，同时还需具备适当的稳定裕度。

设计的速率稳定回路控制器为

$$G_c(s) = 1400 \frac{(0.067s+1)^2(0.012s+1)}{s^2(0.0045s+1)} \quad (3)$$

将式 (3) 加入到系统中，得到速率稳定回路开环 Bode 图如图 4 所示。

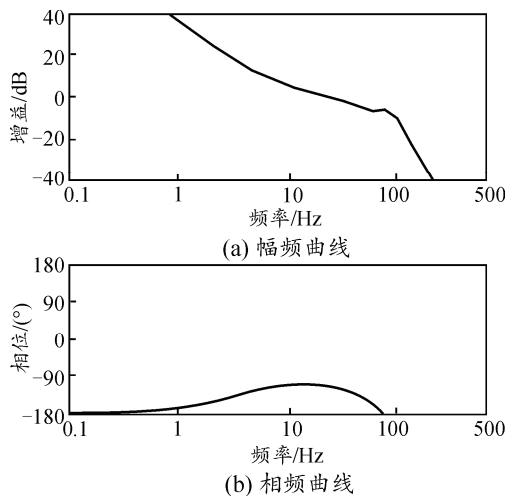


图 4 速率稳定回路开环 Bode 图

速率稳定回路剪切频率为 20 Hz，相位裕度

63°，幅值裕度 6.3 dB。在 1 Hz 处速率稳定回路前向通道的增益为 36 dB。

### 2.3 位置回路

稳瞄随动回路以旋转变压器为反馈元件，旋转变压器测量稳瞄相对于载机的角度，反馈给位置控制器，控制速率稳定回路运动。典型的随动回路运动有 2 种，一种是连续平稳地扫描某一个区域，另一种是跟随外部设备快速掉转；因此，对随动位置回路的要求是快速、无静差并且超调小。

设计的随动位置控制器为：

$$G_{pos}(s) = 9.42 \frac{(0.106s+1)(0.079s+1)}{s(0.0397s+1)} \quad (4)$$

随动位置回路开环 Bode 图如图 5 所示。

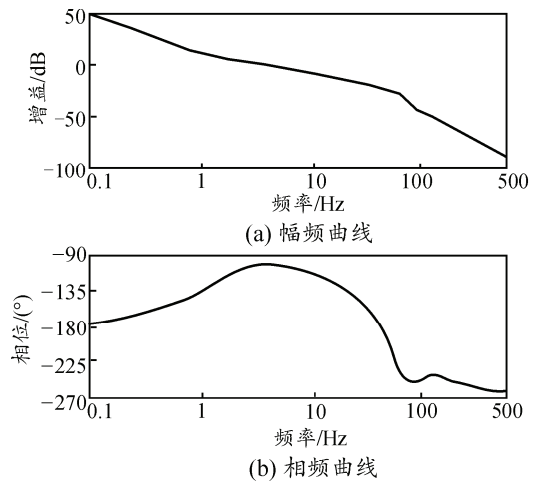


图 5 位置随动回路开环 Bode 图

随动位置回路剪切频率为 4 Hz，相位裕度 81°，幅值裕度 25 dB，裕度储备较为充足。

跟踪回路由图像传感器(电视或红外热像仪)获取目标图像，传递给视频跟踪器，视频跟踪器测量目标和视轴之间的空间角偏差量，反馈给跟踪控制器，跟踪控制器根据偏差量的大小及方向控制速率稳定回路产生相应运动，使视轴对准目标，从而完成对目标的跟踪<sup>[8-11]</sup>。

由于图像传感器和视频跟踪器在对图像的采集和处理存在滞后，这就造成了稳瞄跟踪回路具有较大的延迟环节，通常典型的视频跟踪器传递函数为：

$$G_t(s) = Ke^{-\tau s} \quad (5)$$

其中： $K$  为跟踪器增益； $\tau$  为延迟时间。其频率特性为  $G_t(j\omega) = e^{-j\omega\tau}$ ，幅频特性是和  $\omega$  无关的常数，其值恒为 1；而相频特性  $\angle G_t(j\omega) = -\omega\tau$ ，说明延迟环节引起的相角损失与  $\omega$  和  $\tau$  成正比。从理论上分析，跟踪控制器和随动控制器的控制对象均为速率稳定回路闭环系统，其不同之处在于：随动回路反馈采

用旋转变压器，采样频率可以很高，而且没有采样和处理延迟；跟踪回路反馈采用光闭环，跟踪器的延迟将使系统的相位裕量降低，对跟踪系统的带宽、跟踪精度等性能造成不利的影 响；因此，跟踪回路控制器的设计在提供足够的增益和带宽的同时，还需要补偿跟踪器延迟损失的相位。

设计的跟踪控制器为

$$G_{\text{tik}}(s) = 4.7 \frac{(0.025s + 1)^2(0.22s + 1)}{s(0.01s + 1)^2} \quad (6)$$

跟踪回路开环 Bode 图如图 6 所示。

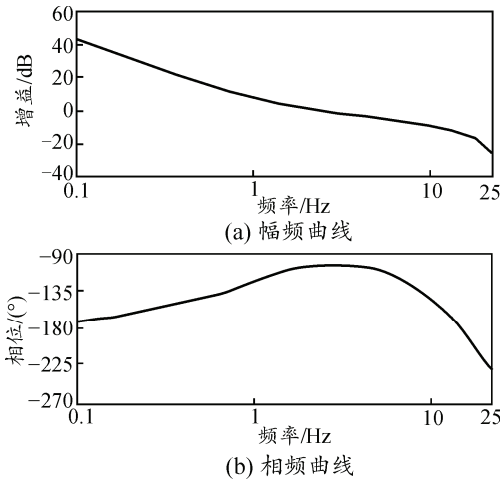


图 6 跟踪回路开环 Bode 图

跟踪回路开环剪切频率 2.38 Hz，相位裕度 76°，幅值裕度 12 dB。

### 3 实验

将设计好的控制器在 Simulink 下和 dSPACE 的实时接口库 RTI(real-time interface)进行连接，生成 dSPACE 硬件所需的代码，下载到实时硬件中运行。用 ControlDesk 与实时控制器进行交互，调整参数、显示状态、保存过程数据并绘制响应曲线等。

#### 3.1 隔离度测试

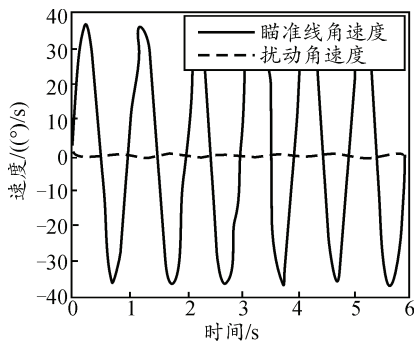


图 7 隔离度曲线

将稳瞄安装在摇摆台上，稳瞄工作在速率稳定模式下，给摇摆台输入 6，1 Hz 的命令，输入信号

峰值角速度为 37.7 (°)/s，采用 dSPACE 采集速率陀螺的输出信号，输出信号峰值角速度为 0.79 (°)/s 隔离度达到了 2.1%，隔离度曲线如图 7 所示。

#### 3.2 随动回路阶跃

稳瞄工作在位置模式下，输入一个 120°的阶跃信号，稳瞄响应曲线如图 8 所示，上升时间 1.2 s，超调量较小。

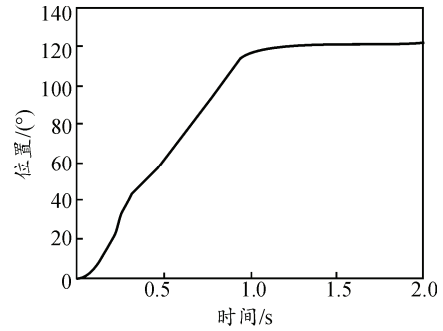


图 8 随动回路阶跃响应曲线

### 4 结论

通过仿真确定控制器参数，再到实际系统中进行验证，极大地发挥了半实物仿真的特点，大大缩短了稳瞄调试时间，使得稳瞄伺服控制设计方法迈上了一个新的台阶。同时，基于 Matlab 的强大功能，也较容易实现和验证各种先进控制理论算法，为光电稳瞄性能提升打好了基础。

#### 参考文献：

- [1] 纪明. 基于控制通道融合的瞄准线组合稳定技术[J]. 火力与指挥控制, 1999, 12.
- [2] 马培蓓, 吴进华, 纪军. dSPACE 实时仿真平台软件环境及应用[J]. 系统仿真学报, 2004, 4.
- [3] 沈悦明, 陈启军. dSPACE 快速控制原型在机器人控制中的应用[J]. 机器人, 2002, 11.
- [4] 李迪凡, 朱玉琴, 李泽华. 多管火箭炮水平平台与基准管轴线一致性光电检测系统[J]. 兵工自动化, 2012, 31(3): 22-23.
- [5] dSPACE\_Standard\_2004.pdf[Z]. 恒润科技有限公司. 2004.
- [6] dSPACE I/O 板卡[Z]. 恒润科技有限公司, 2004.
- [7] 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.
- [8] 黄忠霖. 控制系统 Matlab 计算及仿真[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.
- [9] 张璟玥, 纪明, 王惠林. 机载稳瞄控制系统模型及仿真分析[J]. 应用光学, 2006, 27(6): 491-496.
- [10] 黄一, 吕俊芳, 卢广山. 机载光电跟瞄平台稳定与跟踪控制方法研究[J]. 飞机设计, 2003(3): 38-42.
- [11] David J H, James D. Modern control methods applied to a line of sight stabilization and tracking system[C]. Proceedings of the American Control Conference, 1987: 149121498.