

光电跟踪系统高精度伺服控制系统设计

刘宏伟^{1,2}, 李 强^{2*}, 袁锦春², 夏仰球²

[1. 上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200240;

2. 国家机床产品质量检验检测中心(四川), 四川 成都 610200]

Design of a High-Precision Servo Control System for Optoelectronic Tracking Systems

LIU Hongwei^{1,2}, LI Qiang^{2*}, YUAN Jinchun², XIA Yangqiu²

[1. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. National Machine Tool Production Quality Inspection and Testing Center (Sichuan),
Chengdu 610200, China]

Abstract: [Objective] Laser communication, laser tracking and measurement, and anti-unmanned aerial vehicle system require high servo performance in optoelectronic tracking systems. However, the existing solutions based on industrial computers or commercial controllers are often constrained by closed technology, limited potential for secondary development, and large physical footprints, thereby failing to meet the demand for miniaturization and integration. There is a strong need for a more portable and efficient servo control system. [Methods] This paper designed an embedded integrated servo controller based on a microcontroller, which adopted the synergistic architecture of field programmable gate array and STM32, and offered high customizability and flexible interface expansion. At the same time, a switching control algorithm incorporating a smoothing factor was introduced to improve the traditional proportional integral derivative (PID) control, which effectively optimized the overshoot and dynamic tracking error of the optoelectronic tracking turntable. [Results] Based on the designed servo control system and the improved servo control algorithm, the design of a high-precision servo control system for optoelectronic tracking system was realized, which solved the problems of the limitations of the encoder feedback rate on the servo frequency as well as the insufficient number of interfaces of commercial control board. And the experiments were carried out on a two-axis turntable. The experimental results showed that compared with the traditional PID control,

the proposed switching PID control incorporating a smoothing factor resulted in a 23.36% reduction in the overshoot and a 59.2% reduction in the sine tracking error. [Conclusion] The servo control system designed in this paper can meet the demand of miniaturization and integration of the modern optoelectronic tracking system and has good expandability, and the proposed algorithm can effectively reduce the overshoot of the system and improve the dynamic performance of the system.

Key words: switching control; servo controller; embedded; optoelectronic tracking system

摘 要: [目的] 激光通信、激光跟踪和测量以及反无人机系统等对光电跟踪系统的伺服性能要求较高,而现有基于工控机或商用控制器的方案普遍存在技术封闭、难以二次开发以及体积庞大等问题,难以满足小型化和集成化需求,亟需更便携高效的伺服控制系统。[方法] 本文基于微控制器设计了一种嵌入式集成化伺服控制器,该控制器采用现场可编程门阵列与 STM32 的协同架构,具备良好的可定制性与接口扩展性。同时,引入带平滑因子的切换控制算法,对传统比例积分微分(PID)控制进行改进,有效优化了光电跟踪转台的超调量与动态跟踪误差。[结果] 基于所设计的伺服控制系统与改进的伺服控制算法,实现了光电跟踪系统高精度伺服控制系统的设计,解决了编码器反馈速率对伺服频率的限制以及商用控制板接口数量不足的问题。在双轴转台上开展试验,结果表明,相比于传统 PID 控制,采用所提带平滑因子的切换 PID 控制,使超调量减小了 23.36%,正弦跟踪误差减小了 59.2%。[结论] 本文所设计的伺服控制系统能满足现代光电跟踪系统小型化、集成化的需求,并具有良好的可拓展性,所提算法能有效减小系统超调量,提升系

基金项目: 四川省国防科技工业领域 XX 项目(J0024)

XX Project in Defense Science and Technology Industry Field of
Sichuan Province(J0024)

统动态性能。

关键词: 切换控制;伺服控制器;嵌入式;光电跟踪系统

0 引言

光电跟踪系统通过计算目标脱靶量,结合对双轴转台的精确伺服控制,使脱靶量减小为0,实现对目标的实时精确跟踪,被广泛应用于激光通讯^[1]、激光跟踪测量^[2]以及反无人机系统等领域。伺服控制系统直接影响光电跟踪系统的性能。

国内外学者对伺服控制系统进行了大量研究。天津大学岳凤发^[3]、中科院王威立^[4]通过PC/104工控机设计了光电跟踪伺服控制系统,采用此类工控机的优势在于方案成熟、无需电路设计且研发调试时间较短,但是系统体积较大、不利于集成与便携。随着商业控制器性能的逐渐提高,较多学者采用商用控制器,如可编程多轴控制器^[5]、倍福^[6]等实现伺服控制系统的设计,但是不可避免地存在体积大、技术封锁等问题,不利于系统小型化、集成化与二次开发。

由于嵌入式伺服控制系统具有体积小、集成度高的优势,国内外学者开始采用嵌入式方案,使用STM32/现场可编程门阵列(Field-Programmable Gate Array, FPGA)以及数字信号处理器(Digital Signal Processor, DSP)等微处理器进行伺服控制系统的设计。东南大学姬伟等^[7]采用DSP进行跟踪转台伺服控制系统的设计。DSP具有运算速度快的优势,被广泛应用于数字信号处理领域与单独的控制领域,但是在光电跟踪领域,多轴编码器以及脱靶量信号传输导致所需通讯接口数量较多,单一DSP难以满足跟踪控制接口数量需求。王一程等^[8]仅使用一片FPGA芯片,设计出了跟踪系统的伺服控制系统。相较于DSP, FPGA具有更高的并行运算能力,可以有效提高系统的实时性。此外, FPGA通过硬件电路编程可自定义各类通讯接口,可以有效避免接口数量不足的问题,但是FPGA开发难度较大,增加了技术门槛,不利于系统的二次开发。

编码器数据采集是伺服控制的重要环节,直接决定控制性能的上限。嵌入式伺服控制系统需要自主设计编码器解析算法,实现编码器数据的

实时采集。位置编码器可分为增量式与绝对式两种,相较于增量式编码器,绝对式编码器每个位置有固定的编码值,能返回转台绝对位置,更便于伺服控制。绝对式编码器的通讯标准有同步串行接口(Synchronous Serial Interface, SSI)协议、双向同步串行接口(Bidirectional SSI, BiSS)协议等,BiSS协议由于其通信速度优势,被广泛应用于高精度伺服控制领域^[9]。BiSS协议可以通过官方芯片BiSS Master进行解码,但是成本较高^[10]。单片机进行BiSS解码会受到性能限制,可能导致数据延迟和数据缺失问题^[11]。王希远、陈佳文等^[12-13]通过FPGA实现了对BiSS协议的解析,可见FPGA应用于BiSS协议解码更具优势。

伺服控制算法是影响光电跟踪伺服控制性能的决定性因素,众多学者提出了很多先进控制方法,如模型预测控制^[14]、深度学习^[15]、自抗扰控制^[16]、滑模控制^[17-20]、模糊内模控制^[21-22]以及切换控制^[23]等。比例积分微分(Proportional Integral Derivative, PID)控制由于不依赖被控对象的建模准确性,在工程实践中应用广泛。但在跟踪控制领域,由于系统快速性的要求,单纯采用PID控制无法解决超调量和快速性之间的矛盾。郭超勇等^[24]通过采用自适应增益控制的方式,在保证快速性的基础上,减小了超调量,但是在切换过程中,会出现输出抖动问题。太原理工大学牛志刚等^[25]提出了一种平滑因子切换,有效解决了输出抖动问题。本文在自适应增益控制的基础上进行改进,通过切换控制结合平滑因子提高伺服控制跟踪性能。

为了满足光电跟踪伺服控制系统小型化、集成化的需求,本文设计了一种STM32与FPGA相结合的伺服控制器。采用FPGA对BiSS协议进行解析,解决通讯接口数量限制问题。采用STM32作为主控芯片,增加系统可拓展性。此外,引入带平滑因子的切换PID控制,优化控制系统的超调量和动态误差,并通过仿真验证了所提控制算法的有效性,通过试验验证了自研伺服控制器性能的优越性。

1 系统工作原理

当被跟踪目标发生移动时,脱靶量模块计算出被跟踪目标的脱靶量,粗跟踪模块根据脱靶量

控制双轴转台实现对目标的快速跟踪。粗跟踪模块主要由双轴转台与伺服控制器组成,双轴转台本体主要包括俯仰轴电机、方位轴电机、绝对式光电编码器、转台 U 型架以及轴系结构等,如图 1 所示。伺服控制器与驱动器通过背板与双轴转台固定。

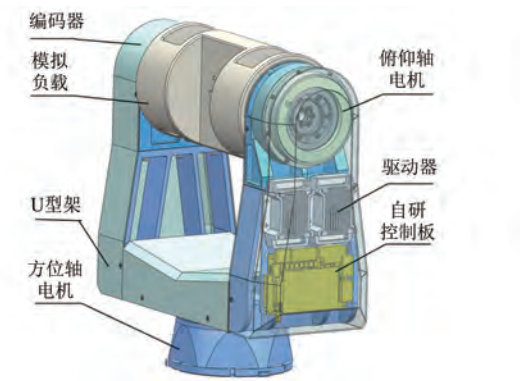


图 1 双轴转台本体模型

Fig. 1 Model of the dual-axis turntable body

2 系统方案设计与硬件设计

本文以 STM32 与 FPGA 双核架构为基础,设计了包含数据采集模块、主控模块和上位机软件的伺服控制系统,控制系统硬件实物图如图 2 所示。数据采集模块对脱靶量数据、双轴编码器数据进行实时处理。主控模块对双轴电机进行实时精确控制,对系统进行总控。上位机软件实时显示系统状态,进行二次开发时对新功能进行调试。

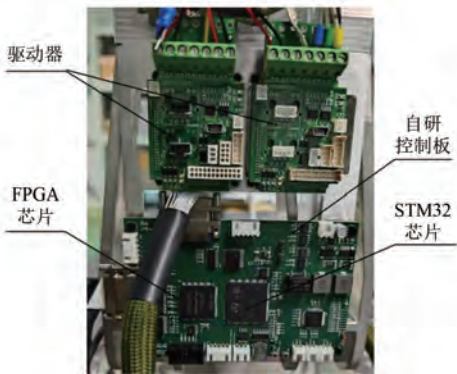


图 2 控制系统硬件实物图

Fig. 2 Hardware diagram of the control system

主控模块采用 STM32H743 芯片作为控制核心,通过商用驱动器驱动电机运动。一方面通过驱动器产生时钟信号,得到编码器数据;另一方面通过驱动器驱动无刷电机运行电流环,可以简化

伺服控制设计流程。驱动器产生时钟信号发送给编码器,FPGA 通过与驱动器编码器接口并联的方法获取实时的编码器值,并通过串行外设接口 (Serial Peripheral Interface, SPI)将采集到的信息实时传输至 STM32。STM32 通过脉宽调制 (Pulse Width Modulation, PWM)控制方式传输电流指令值至驱动器。驱动器根据电流指令值及编码器值进行电机驱动和换向。控制系统原理图如图 3 所示。

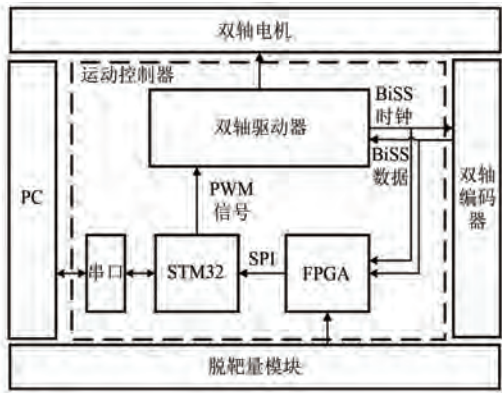


图 3 控制系统原理图

Fig. 3 Schematic diagram of the control system

3 转台驱动控制器软件设计

转台驱动控制器软件由数据采集模块、主控模块和上位机软件组成。数据采集模块实现编码器 BiSS 协议解析、脱靶量数据采集等功能;主控模块实现电机伺服控制、外部通讯等功能;上位机软件实现人机命令交互、数据实时监测等功能。

3.1 数据采集

在控制无刷电机时,驱动器根据编码器信号进行电机换向,控制器根据编码器信号进行伺服控制,因此编码器信号需同时提供给驱动器和控制器。传统方法通常将编码器连接至驱动器,再由控制器通过控制器区域网络 (Controller Area Network, CAN) 协议读取编码器数据,但其通信速率最高仅为 2 kHz,限制了伺服控制性能的上限。为此,本文提出一种基于 FPGA 并联接入驱动器编码器接口的方案,实现了编码器数据在驱动器与控制器之间的同步采集,有效提升了系统的响应速度与控制精度。

数据采集过程如图 4 所示,驱动器向编码器发送时钟信号,编码器同步发送数据信号返回驱

动器,FPGA 从中并入,得到差分数据信号与时钟信号,经过差分转单端芯片,传入到 FPGA 进行 BiSS-C 解码,解码后放入先进先出(First In First Out, FIFO)存储器中进行暂存;脱靶量直接传入到 FPGA 中,放入 FIFO 中进行暂存。SPI 模块从两个 FIFO 中读取最新数据,放入到协议帧的数据位,结合帧头、循环冗余校验(Cyclic Redundancy Check, CRC)、错误位和帧尾,形成一帧完整的数据包,通过 SPI 以 5 Mbits 的频率发送给主控芯片。

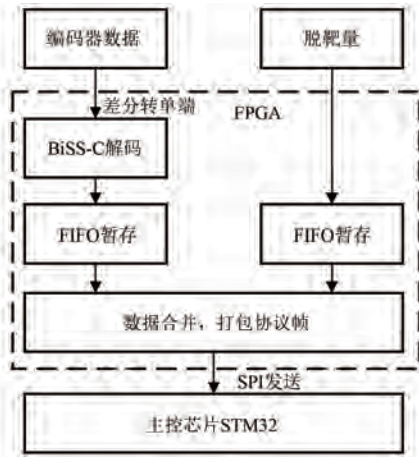


图4 数据采集流程图

Fig. 4 Flowchart of data collection

3.2 主控模块

主控模块框架如图5所示,主要由上位机通讯、控制状态机、FPGA 数据解析和电机伺服算法组成。四个任务分别按照设定的频率进行实时调度。

上位机通讯功能实现人机命令的解析和数据的实时传输。FPGA 数据解析实现编码器与脱靶量的数据解析。控制状态机实现转台的控制状态切换,如上下使能、运动以及停止等。电机伺服算法由位置规划环、位置阶跃环、位置正弦环和速度环组成。位置规划环根据当前位置与指定位置七段式规划输出位置点,再进行位置环控制。位置阶跃环直接进行位置环控制。位置正弦环根据设定幅值与频率,输出正弦曲线位置点,再进行位置环控制。速度环输出指令通过 PWM 发送至驱动器,由驱动器执行电流环。

伺服控制算法是影响伺服控制系统性能的决定性因素,传统 PID 控制难以解决系统快速性与超调量之间的矛盾。在传统 PID 控制中,比例系



图5 主控模块框架图

Fig. 5 Framework diagram of master control module

数 K_p 越大,系统刚性越大,系统响应速度越快,但是会导致超调量增大。在控制初始阶段,控制误差较大时,积分系数 K_i 的累计作用也会使超调量增大,影响系统性能。

本文在 PID 控制的基础上,引入切换控制,在保证系统快速性的条件下,减小了超调量。切换控制结构如图6所示,在控制误差较大时,采用快速 PID 控制,增大 K_p ,使系统的控制误差快速减小;在控制误差较小时,采用稳定 PID 控制,减小 K_p ,使得系统超调量减小,并通过 K_i 提高稳态精度,减小系统的稳态误差。



图6 切换控制结构图

Fig. 6 Structure diagram of switching control

但是在切换控制中,快速 PID 控制和稳定 PID 控制之间的切换会引起输出抖动等不稳定问题^[25]。针对此问题,本文在切换控制输出后引入平滑因子,通过一组过渡曲线实现两种控制方式之间的无缝切换。过渡曲线表达式为

$$\alpha(e) = \begin{cases} \alpha(e) = 0, & |e| \leq x_1 \\ \alpha(e) = \frac{\exp(|e|\rho) - \exp(x_1\rho)}{\exp(x_2\rho) - \exp(x_1\rho)}, & x_1 < |e| \leq x_2 \\ \alpha(e) = 1, & |e| \geq x_2 \end{cases} \quad (1)$$

式中: α 为切换因子; e 为控制误差; x_1 、 x_2 为切换

控制的分界点,当 $|e| \leq x_1$,采用稳定 PID 控制,当 $|e| \geq x_2$,采用快速 PID 控制; ρ 为切换系数, ρ 越大,随着 e 增大快速 PID 控制器的影响越大。

3.3 上位机软件

上位机软件采用 Qt Creator 开发。鉴于数据传输对实时性要求较高,若在传输过程中发送控制指令,可能导致数据延迟问题。为此,本文采用数据串口与命令串口分离的双串口通信方式,有效提高了通信的实时性与稳定性。数据串口传输上位机所需数据,命令串口实现上、下位机交互。为了保证在数据快速传输过程中不影响命令交互,本文采用数据线程与命令线程双线程的形式,有效提高上位机的执行效率。

上位机软件包含状态数据显示、参数设置、状态切换、数据保存、数据绘图以及协议帧打包与解析等功能,与主控模块通过串口以设定好的数据帧格式进行数据交互,指令包如表 1 所示。

表 1 上位机指令包

Tab. 1 Host computer command packet			
字节位数	功能	命令字	命令含义
4	包头	0x0d000721u	帧头
1	电机 ID	0x01/0x02	俯仰轴/方位轴
2	包长度	2 byte	数据包包长
1	命令	0x01-0x07	设置命令
/	数据	/	数据
1	循环冗余校验	/	CRC

软件运行流程如图 7 所示。上位机连接到串口之后,开始命令和数据两个子线程,命令线程发送用户设定命令、显示系统状态以及将数据线程解析的下位机编码器数据进行绘图等。

4 仿真与试验

4.1 伺服算法仿真

本文基于 Matlab/Simulink 对光电跟踪系统俯仰轴的伺服算法进行仿真。通过扫频仪对转台的俯仰轴进行扫频,得到俯仰轴速度开环响应曲线,如图 8 所示。

通过 Matlab 中的系统辨识工具箱对系统开环响应函数进行曲线拟合,辨识系统为 3 阶系统,得到拟合效果为 99.27%,系统速度开环传递函数 $G(s)$ 为

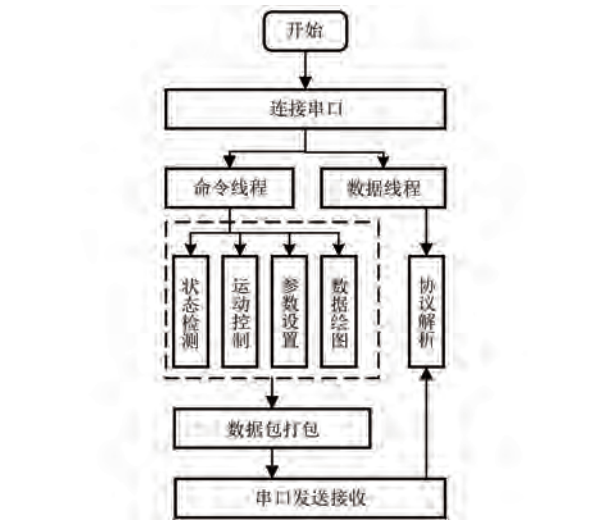


图 7 软件运行流程图

Fig. 7 Software operation flowchart

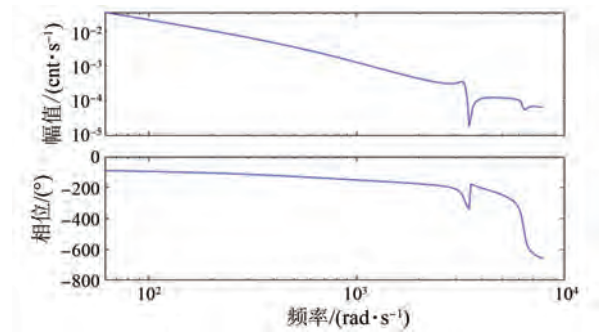


图 8 俯仰轴速度开环响应曲线图

Fig. 8 Diagram of velocity open-loop response curves of pitch axis

$$G(s) = \frac{-260.83s^2 + 297\,213.22s + 6\,293\,204\,295.63}{s^3 + 3\,649.32s^2 + 2\,579\,378.274s + 27\,255\,715.453}$$
(2)

将 $G(s)$ 作为被控对象,带平滑因子的切换 PID 控制作为位置环,进行闭环伺服控制。伺服控制框图如图 9 所示。其中 f_{cn} 为平滑因子切换, f_{cn2} 为系统传递函数。

输入幅值为 5° 的阶跃信号,得到采用传统 PID 控制和切换 PID 控制的仿真阶跃响应曲线如图 10 所示。两种控制器参数如表 2 所示。

由图 10 可知,采用传统 PID 控制时,超调量为 18%,调节时间为 282 ms (2% 允许公差带);采用切换 PID 控制时,超调量为 2.16%,调节时间为 168 ms。结果表明,切换 PID 控制在保证快速性的同时,有效减小了超调量。

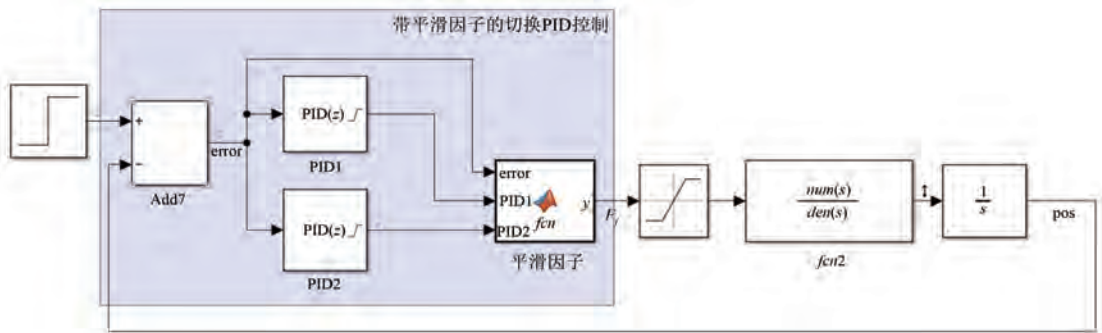


图 9 伺服控制框图

Fig. 9 Servo control block diagram

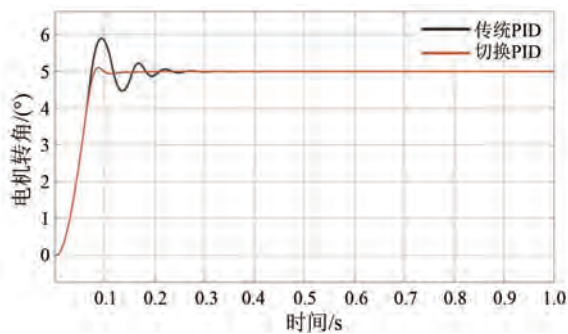


图 10 仿真阶跃响应曲线

Fig. 10 Simulated step response curves

表 2 控制器参数

Tab. 2 Controller parameters

参数名称		参数值
切换 PID 控制	K_{p1}	0.8
	K_{i1}	0
	K_{d1}	0.03
	K_{p2}	0.3
	K_{i2}	0.1
	K_{d2}	0.01
	x_1	0.5
	x_2	0.1
	ρ	1
传统 PID 控制	K_p	0.8
	K_i	0.225
	K_d	0.008

4. 2 试验验证

光电跟踪平台是一个复杂的光机系统,本文研究目标为伺服控制部分,因此采用一种简化的方法验证系统的动静态性能。整个系统包括俯仰轴和方位轴,由于双轴工作原理相同,本文以俯仰轴为例,对本文研制的控制器与改进算法的性能进行验证。为了抵消转台方位轴对俯仰轴的影响,用螺栓将方位轴固定在大理石平台上。在光电跟踪平台实际工作过程中,俯仰轴会挂载相机模块、测距模块等,本试验采用配重转轴的方式模拟实际情况。试验平台如图 11 所示,驱动器选用商用驱动器,主控芯片为 STM32H743,使用型号为 EP4CE22E22C8 的 FPGA 进行数据采集,并通过背板连接到双轴转台上。转台本体采用 26 位绝对式圆光栅编码器、连续堵转电流为 3.5 A 的直流无刷力矩电机。

响,用螺栓将方位轴固定在大理石平台上。在光电跟踪平台实际工作过程中,俯仰轴会挂载相机模块、测距模块等,本试验采用配重转轴的方式模拟实际情况。试验平台如图 11 所示,驱动器选用商用驱动器,主控芯片为 STM32H743,使用型号为 EP4CE22E22C8 的 FPGA 进行数据采集,并通过背板连接到双轴转台上。转台本体采用 26 位绝对式圆光栅编码器、连续堵转电流为 3.5 A 的直流无刷力矩电机。

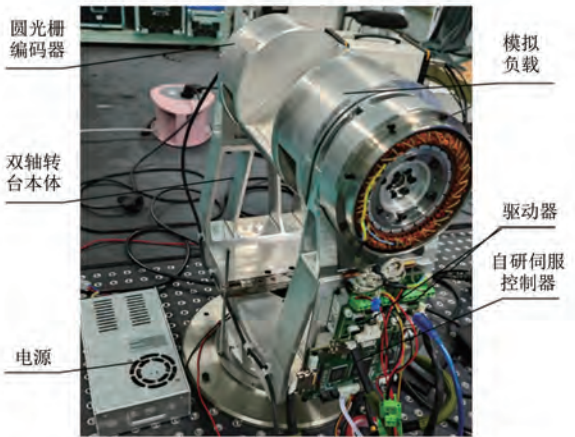


图 11 光电跟踪系统试验平台

Fig. 11 Experimental platform of optoelectronic tracking system

为了证明本文所提方案应用于光电跟踪系统的可行性,设计了阶跃响应试验和正弦跟踪试验,分析系统的静态与动态性能。

4. 2. 1 阶跃响应试验

为了验证切换 PID 控制相比于传统 PID 控制的优越性,采用幅值为 5°的阶跃信号作为俯仰轴的输入,分析控制系统在时域的响应特性和稳态精度。设置位置环频率为 4 kHz、电流环频率

为 20 kHz。试验阶跃响应曲线如图 12 所示,阶跃响应下的性能对比如表 3 所示。

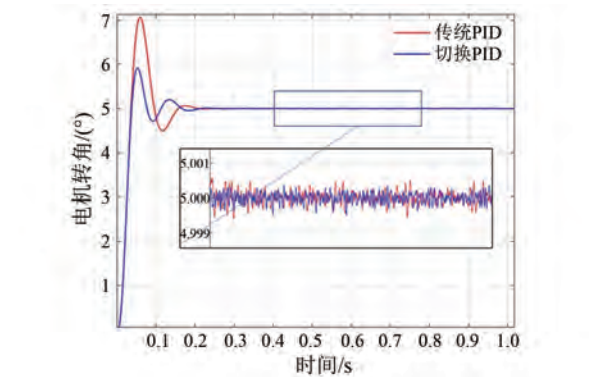


图 12 试验阶跃响应曲线
Fig. 12 Experimental step response curves

表 3 阶跃响应下的性能对比

Tab. 3 Performance comparison under step response		
控制方法	超调量/%	调节时间/ms
传统 PID 控制	41.36	251
切换 PID 控制	18	213

由图 12 和表 3 可知,采用传统 PID 控制时,为了补偿系统的静差,需要采用较大的 K_i , 因此产生了 41.36% 的超调量,调节时间为 251 ms;而采用切换 PID 控制时,超调量只有 18%,并且调节时间为 213 ms。试验结果表明,切换 PID 控制相比于传统 PID 控制在保证快速性的同时,减小了超调量。

4.2.2 正弦跟踪试验

为了验证系统的动态跟踪性能,采用幅值为 5°、频率为 1 Hz 的正弦位置信号作为俯仰轴的输入,记录反馈数据。正弦跟踪响应曲线如图 13 所示,误差曲线如图 14 所示。

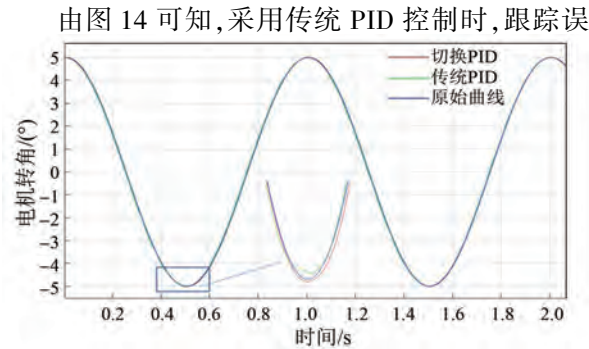


图 13 正弦跟踪响应曲线
Fig. 13 Sine tracking response curves

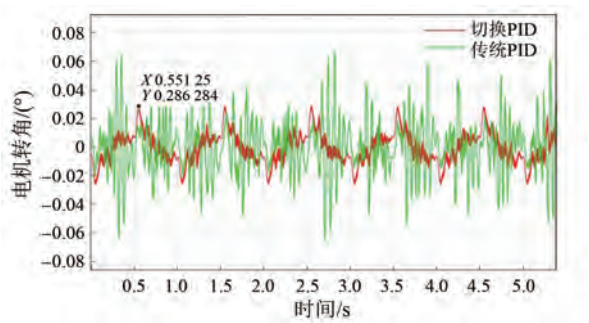


图 14 正弦跟踪误差曲线
Fig. 14 Sine tracking error curves

差范围为-234.5~247.0 角秒;采用切换 PID 控制时,跟踪误差范围为-92.1~104.3 角秒,正弦跟踪误差减小了 59.2%。

5 结语

本文针对光电跟踪控制系统对伺服跟踪控制系统小型化与集成化的需求,提出了一种基于 FPGA 与 STM32 协同工作的高性能运动伺服控制方案,有效解决了传统商用控制器和工控机难以实现小型化的问题,并在此基础上构建了自主研发的嵌入式伺服控制系统,实现了对转台的高效运动控制。此外,针对传统 PID 控制存在的快速性与超调量之间的矛盾,引入带平滑因子的切换 PID 控制,使超调量减小了 23.36%,正弦跟踪误差减小了 59.2%。本文所提方案不仅可以应用于光电跟踪平台,也为其他小型化控制器方案设计提供借鉴。

利益冲突声明

所有作者声明不存在利益冲突。
All authors disclose no relevant conflict of interests.

作者贡献

刘宏伟、李强进行了方案设计、仿真与论文撰写,刘宏伟、袁锦春进行了试验研究,刘宏伟、李强、夏仰球参与了论文的审核与修改。所有作者均阅读并同意了最终稿件的提交。
The scheme design, simulation and paper writing were carried out by Liu Hongwei and Li Qiang. The experimental study was conducted by Liu Hongwei and Yuan Jinchun. The manuscript was reviewed and revised by Liu Hongwei, Li Qiang and

Xia Yangqiu. All authors have read and approved the final version of the manuscript for submission.

参考文献

- [1] 王文杰, 徐伟, 朴永杰, 等. 卫星星间激光通信粗跟踪转台控制系统[J]. 光学精密工程, 2021, 29(12): 2797-2805.
WANG W J, XU W, PIAO Y J, et al. Control system for coarse tracking turntable of laser communication between satellites [J]. Optics and Precision Engineering, 2021, 29(12): 2797-2805.
- [2] 董登峰, 周维虎, 纪荣祎, 等. 激光跟踪仪精密跟踪系统的设计[J]. 光学精密工程, 2016, 24(2): 309-318.
DONG D F, ZHOU W H, JI R Y, et al. Design of precise tracking system of laser tracker [J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(2): 309-318.
- [3] 岳凤发. 光电跟踪伺服系统摩擦补偿控制及改进KCF跟踪算法研究[D]. 天津: 天津大学, 2019.
YUE F F. Research on friction compensation control and improved kernelized correlation filters tracking algorithm of opto-electronic tracking system [D]. Tianjin: Tianjin University, 2019.
- [4] 王威立. 基于Compax3的数据融合高精度光电跟踪伺服控制系统研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2012.
WANG W L. Study on the high precision electro-optical tracking servo control system based on Compax3 and data fusion [D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2012.
- [5] 漆海霞, 张铁民, 邢航, 等. 多类型伺服的混合二轴伺服控制平台[J]. 微特电机, 2013, 41(10): 61-63+69.
QI H X, ZHANG T M, XING H, et al. Research of two-axis mixed servo control platform based on multi-servo [J]. Small & Special Electrical Machines, 2013, 41(10): 61-63+69.
- [6] 牛宝良, 董亨. 基于TwinCAT的数字伺服控制系统设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016, 14(2): 306-310.
NIU B L, DONG H. Design of digital servo control system based on TwinCAT [J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2016, 14(2): 306-310.
- [7] 姬伟, 李奇, 杨海峰, 等. 精密光电跟踪转台的设计与伺服控制[J]. 光电工程, 2006, 33(3): 11-16+72.
- [8] 王一程, 汪海兵, 赵长德, 等. 基于FPGA的光电跟踪控制系统设计[J]. 电光与控制, 2009, 16(3): 54-57.
WANG Y C, WANG H B, ZHAO C D, et al. Design of a FPGA-based controller for opto-electronic tracking system [J]. Electronics Optics & Control, 2009, 16(3): 54-57.
- [9] XIANG Q J, LI L J, ZHU L S, et al. A realization method of cooperative robot servo based on BiSS-C encoder [C]//2020 Chinese Automation Congress, Shanghai, 2020.
- [10] 董海涛, 黄伟诚, 姚作芳. 伺服电机 BiSS 协议编码器解码装置设计与应用[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2024, 52(12): 77-84+111.
DONG H T, HUANG W C, YAO Z F. Design and application of servo motor BiSS protocol encoder decoding device [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2024, 52(12): 77-84+111.
- [11] JIN H Y, PARK J W, JEON J W. Implementation BiSS communication of encoder system without slave module [C]//2018 19th IEEE/ACIS International Conference on Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking and Parallel/Distributed Computing, Busan, 2018.
- [12] 王希远, 成荣, 朱煜, 等. 基于FPGA的BiSS-C协议编码器接口技术研究及解码实现[J]. 液晶与显示, 2016, 31(4): 386-391.
WANG X Y, CHENG R, ZHU Y, et al. Research and realization of BiSS-C protocol encoder interface based on FPGA [J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2016, 31(4): 386-391.
- [13] 陈佳文, 刘晴晴, 邵春江. 异步 BiSS-C 协议的 FPGA 解码[J]. 微电子学与计算机, 2024, 41(2): 101-107.
CHEN J W, LIU Q Q, SHAO C J. FPGA decoding of asynchronous BiSS-C protocol [J]. Microelectronics & Computer, 2024, 41(2): 101-107.
- [14] 李东亮, 缪仲翠, 王志浩, 等. 基于模型预测的多电机弱磁同步控制策略研究[J]. 电机与控制应用, 2019, 46(11): 7-12.

- LI D L, MIAO Z C, WANG Z H, et al. Synchronous flux weakening control strategy of multi-motor system based on model prediction [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2019, 46(11): 7-12.
- [15] 曹美禾, 宋琳, 孙军, 等. 深度学习及其在电机控制中的研究现状与展望[J]. *电机与控制应用*, 2023, 50(5): 1-9.
- CAO M H, SONG L, SUN J, et al. Research and prospect on deep learning and its application in motor control [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2023, 50(5): 1-9.
- [16] 郭伟, 罗力成, 陆江燕, 等. 基于线性自抗扰控制的永磁同步电机无传感器控制[J]. *电机与控制应用*, 2023, 50(8): 1-8.
- GUO W, LUO L C, LU J Y, et al. Sensorless control of permanent magnet synchronous motor based on linear active disturbance rejection control [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2023, 50(8): 1-8.
- [17] 王栋栋, 刘旭东. 基于迭代滑模和扰动观测器的永磁同步电机转速控制[J]. *电机与控制应用*, 2022, 49(6): 1-8.
- WANG D D, LIU X D. Speed control of permanent magnet synchronous motor based on iterative sliding mode and disturbance observer [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2022, 49(6): 1-8.
- [18] 主父冠峰, 王树波. 永磁同步电机自适应非奇异快速终端滑模控制[J]. *控制理论与应用*, 2025, 42(4): 855-863.
- ZHUFU G F, WANG S B. Adaptive non-singular fast terminal sliding mode control of permanent magnet synchronous motor [J]. *Control Theory & Applications*, 2025, 42(4): 855-863.
- [19] 李迎杰, 刘曙光, 刘旭东. 基于非奇异终端滑模观测器的无刷直流电机无传感器控制[J]. *电机与控制应用*, 2023, 50(3): 1-7.
- LI Y J, LIU S G, LIU X D. Sensorless control of brushless DC motor based on non-singular terminal sliding mode observer [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2023, 50(3): 1-7.
- [20] 居敏花, 张执. 一种直流电机自适应连续终端滑膜控制的传感器技术[J/OL]. *控制工程*, 2025-02-26. <https://doi.org/10.14107/j.cnki.kzgc.20240785>.
- JU M H, ZHANG Z. A sensor technology for adaptive continuous terminal synovial control of DC motor [J/OL]. *Control Engineering of China*, 2025-02-26. <https://doi.org/10.14107/j.cnki.kzgc.20240785>.
- [21] 王维强, 程梁, 曾晓松, 等. 模糊内模控制的永磁无刷直流电机控制研究[J]. *电机与控制应用*, 2019, 46(6): 49-54.
- WANG W Q, CHENG L, ZENG X S, et al. Research on permanent magnet brushless DC motor drive based on fuzzy internal model control [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2019, 46(6): 49-54.
- [22] 孔令军, 张晓, 李晓迅, 等. 并联型有源电力滤波器直流侧电压模糊内模控制方法[J]. *电工技术学报*, 2011, 26(增刊1): 224-228.
- KONG L J, ZHANG X, LI X X, et al. Research on DC-side voltage fuzzy internal model of shunt active power filter [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2011, 26(S1): 224-228.
- [23] 杨东晓, 曹信一, 申强. 基于PID切换控制的弹道修正引信滚转角控制方法[J]. *北京理工大学学报*, 2025, 45(2): 137-143.
- YANG D X, CAO X Y, SHEN Q. Trajectory correction fuse roll angle control based on PID switching control missile [J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2025, 45(2): 137-143.
- [24] 郭超勇, 刘继奎, 程俊波, 等. 卫星激光通信粗跟踪系统复合控制策略[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(4): 946-953.
- GUO C Y, LIU J K, CHENG J B, et al. Compound control strategy of satellite laser communication coarse tracking system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(4): 946-953.
- [25] 牛志刚, 张建民. 应用于直线电机的平滑切换模糊PID控制方法[J]. *中国电机工程学报*, 2006, 26(8): 132-136.
- NIU Z G, ZHANG J M. Method of smooth-switch fuzzy PID for linear motor control [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2006, 26(8): 132-136.

收稿日期:2025-05-21

收到修改稿日期:2025-06-23

作者简介:

刘宏伟(1999-),男,硕士研究生,研究方向为超精密检测仪器、高精度转台及精密电机运动控制,2337707035@qq.com;

*通信作者:李强(1995-),男,硕士,工程师,研究方向为超精密检测仪器、高精度转台,1111q21@qq.com。