

程控双轴姿态转台伺服控制系统设计及应用

肖支才, 侯鹏森, 刘玄冰, 代飞扬
(海军航空大学 岸防兵学院, 山东 烟台 264001)

摘要: 针对自主研发的程控双轴姿态转台伺服控制系统, 阐述了其运动控制系统的基本工作原理; 针对传统转台转速慢、精密度差、系统动态性能和稳定性不佳等问题, 设计了基于位置环、速度环和电流环三闭环控制的数字控制器; 完成了控制系统控制算法的软件实现, 利用 LabWindowsCVI 交互式编程平台研发了转台控制软件, 可以对串口设置、PID 设置、驱动器设置等参数进行任意更改, 使系统操作简便、可移植性强; 最后对系统开展位置和速度跟踪性测试, 测试结果表明系统性能达到预期, 具有超调小、响应快、跟踪精度高和鲁棒性好等特点, 满足系统设计的要求, 具有良好的应用价值。

关键词: 伺服系统; 数字 PID 控制器; 复合控制器; 三环控制

Design and Application of Programmable Two-axis Attitude Turntable Servo Control System

XIAO Zhicai, HOU Pengsen, LIU Xuanbing, DAI Feiyang

(College of Coast Defence Arm, Naval Aeronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: Aiming at the servo control system for self-developed programmable dual-axis attitude turntable, the basic principle of its motion control system is elaborated. Aiming at the problems of slow speed, poor accuracy, poor system dynamic performance and stability for traditional turntables, a digital controller based on three closed-loop control of position loop, speed loop and current loop is designed. The software algorithm of the control system is completed. Using the LabWindows CVI interactive programming platform to develop the turntable control software, you can change the serial port settings, PID settings, driver settings and other parameters arbitrarily, and the system is easy to operate and migrate. Finally, the position and speed tracking test of the system was carried out. The test results show that the performance of the system reaches the expected characteristics of small overshoot, fast response, high tracking accuracy and strong robustness. The system meets the design requirements and has good application value.

Keywords: server system; digital PID controller; compound controller; three loop control

0 引言

双轴转台是一种用于高精度运动测试的数字化设备, 广泛应用国防工业、航空航天工业等众多领域^[1], 它是惯导、陀螺测试系统的关键设备之一, 可用于惯导、陀螺、加速度计等惯性器件的测试和标定, 其对系统稳定性和动态性能有着较高的要求。

双轴转台的控制系统是一个复杂的伺服控制系统, 它能够控制转台以给定速度在规定时间内运动到给定位置处, 而伺服驱动器控制策略和控制算法的好坏直接影响到双轴转台的控制精度^[2]。目前常用的控制方法有 PID 控制、复合控制等, 文献 [3] 针对三环控制系统, 对位置环参数采用了改进遗传算法进行优化, 系统较好地实现了位置伺服; 文献 [4] 采用模糊自整定 PID 控制器对转台伺服控制系统进行设计, 经验证系统具有超调小、响应快、精度高和鲁棒性好等特点; 文献 [5] 在三环控制结构的基础上, 采用神经网络对各环 PID 参数进行优化; 文献 [6] 对速度环的

设计采用了滑膜控制器, 并加入了非线性扩张状态观测器 (NESO), 有效提高系统的抗干扰性能。本文介绍的程控双轴转台的运动控制系统采用系统采用基于三闭环控制的数字控制器, 三闭环从外之内依次为“位置环、速度环和电流环”, 通过对 PID 参数进行整定, 可以提高转台的动态性能和静态性能, 实现高精度控制^[7]。

1 系统结构及原理

程控双轴转台的电气控制系统是一种典型的反馈闭环控制系统, 主要由控制装置、执行机构、放大元件、反馈元件、测量元件和校正元件等部分组成^[8], 其中, 直流伺服驱动器和直流伺服电机作为执行机构, 圆同步感应器和解码芯片作为角位置和角速率反馈元件。

三闭环控制系统三闭环采用全数字 PID 算法, 由主计算机控制器实现位置物理量的运动控制和管理。直流伺服驱动器采用 PWM 方式驱动直流电机转动, 内嵌电流传感器产生电流反馈, 构成 PI 电流闭环, 可恒扭矩和恒功率输出控制。

收稿日期: 2021-09-26; 修回日期: 2021-11-29。

作者简介: 肖支才(1977-), 男, 湖北汉川人, 博士, 副教授, 主要从事飞行器控制与测试方向的研究。

通讯作者: 侯鹏森(1998-), 男, 河南滑县人, 硕士, 主要从事飞行器控制与测试方向的研究。

引用格式: 肖支才, 侯鹏森, 刘玄冰, 等. 程控双轴姿态转台伺服控制系统设计及应用[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(4): 103-108.

直流伺服驱动器的控制接口为速度模拟电压指令信号，需要外部提供速度 A/B 脉冲反馈信号，才能构成速度闭环，这个反馈信号由解码器/数字解码芯片提供。圆同步感应器圆盘无缝地固定在主轴和俯仰轴的转动轴承上，与两个轴同步转动，其输出的 sin 和 cos 两路正交信号经高精度仪表放大器不失真地放大后，送给高精度宽带分解器/数字解码芯片，产生与转台角位置角度的 12 位分辨率 A/B 信号送给直流伺服驱动器的速度反馈端，构成速度闭环。位置信号还可由位置寄存器直接读出，通过串行总线接口实时地发送给主计算机控制器，控制器上的用户软件通过读取这个当前位置信号，并与与目标指令位置相比较，误差值经过数字滤波处理后产生位置控制信号，发送给电机驱动器构成位置闭环。图 1 为三闭环伺服控制系统原理框图。

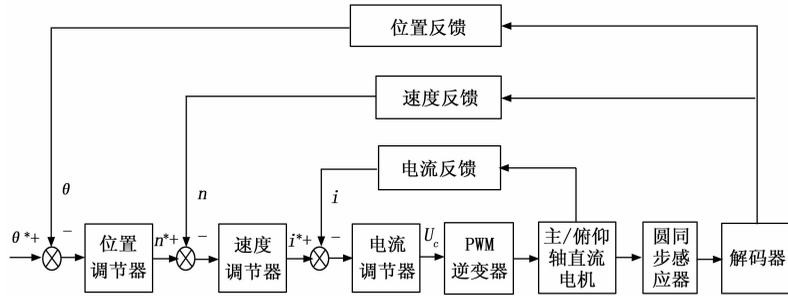


图 1 三闭环伺服控制系统原理框图

程控双轴姿态转台电气控制系统有两个独立的控制回路，分别是主轴控制回路和俯仰轴控制回路，两个控制回路都由同一块控制板进行控制，主要实现角度和角速度的测量解算控制，解算出来的角度信号和角速度信号分别通过数字接口和 A、B 角增量脉冲信号送出。因为驱动器本身具有电流、速度双闭环控制，A/B 脉冲作为转台对应的速度反馈信号形成速度闭环控制，角度信号通过转台控制器形成角度闭环控制。两个回路的伺服驱动器通过驱动信号电缆与台体内的直流电机相连，以控制电机的转动。

2 控制系统数字控制器设计

PID 控制器是连续系统控制理论中一种发展成熟、应用广泛的控制方法，其在实际工程实践中占有至关重要的地位^[9]，大多数控制回路都采用了 PID 控制，其有着原理简单、结构灵活、鲁棒性好、参数整定方便等优点。目前数字 PID 控制器已经完全取代模拟 PID 控制器^[10]，常用的数字控制器设计方法有直接法和间接法。本论文介绍的双轴转台运动控制器采用间接法设计，首先设计出系统连续传递函数，然后通过双线性变换法离散化设计数字控制器。

2.1 电流环控制器设计

在三闭环伺服控制中，电流环起到了调节电流、保护电机和抗干扰等作用。在一般情况下，电流要比速度变化的快，因此对电流环调节进行设计时，常忽略感应电动势的影响，常用采用无静差输出的 PI 调节。同时，电流环一般只与 PWM 逆变器和电机参数有关，可以将 PWM 逆变器近似看作一阶惯性环节 $K_i/(T_i s + 1)$ ^[11]，其中 K_i 为 PWM

装置的放大倍数， T_i 为 PWM 装置的时间常数，得到电流环的闭环控制如图 2 所示。

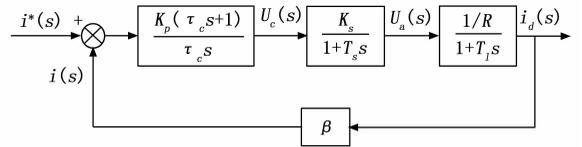


图 2 电流环控制结构图

其中： τ_c 为积分时间常数， K_p 为比例系数， K_i 为积分系数，且有 $K_i = K_p/\tau_c$ 。 T_l 为电枢回路电磁时间常数，且有 $T_l = L/R$ ， β 为电流环反馈系数。从图中可以看出电流环控制对象是 PWM 逆变器和电机电枢回路这两个惯性环节的叠加，电流采样电路设计为一个低通滤波器，也可将其近似看作一阶惯性环节^[1]。由此求得图中的开环传递函数为：

$$P(s) = \frac{K_p K_i \beta (\tau_c s + 1)}{\tau_c s R (T_s s + 1) (T_l s + 1)} \quad (1)$$

选择 $\tau_c = T_l = L/R$ 可以使得电流调节器的零点与被控对象的大时间常数对消，考虑到电流环主要功能是加快电流的跟随效应，因此可以将电流环校正成 I 型系统。经过简化后的电流环开环传递函数为：

$$P(s) = \frac{K_I}{s(T_s s + 1)} \quad (2)$$

其中： $K_I = K_p K_i \beta / \tau_c R$ 。对应的电流环闭环传递函数为：

$$W_c(s) = \frac{P(s)}{1 + P(s)} = \frac{K_I/T_s}{s^2 + s/T_s + K_I/T_s} \quad (3)$$

为了使超调量 $\sigma \leq 5\%$ ，令阻尼比 $\xi = 0.707$ ，同时设定 PWM 逆变器输出电压与初始电压相等，有 $K_s = 1$ ，求得 $K_I T_s = 0.5$ ，最终得到电流调节器的设计参数公式：

$$\begin{cases} K_p = K_I R \beta \tau_c = R \beta \tau_c / 2 T_s = L \beta / 2 T_s \\ K_i = K_p / \tau_c = R \beta / 2 T \end{cases} \quad (4)$$

可以看出，由双惯性环节的控制对象构成的复杂系统经闭环控制后，简化为一个惯性环节，加快了电流的跟随作用^[12]。

2.2 速度环控制器设计

直流电机控制系统通常为双闭环结构，除了前面提到的电流环作为内环，还将速度环作为外环^[12]。电流环在速度环中等效为：

$$\frac{I_d(s)}{U_i^*(s)} = \frac{P(s)}{\beta} \approx \frac{1/\beta}{1/K_i T_s + 1} \quad (5)$$

速度环的作用是控制转速跟随给定电压值的变化，将速度调节器的输出作为电流环的输入便可以得到速度电流双闭环结构，见图 3。

其中， α 为速度环反馈系数， K_n 为速度调节器比例系数， τ_n 为积分时间常数， J 为转动惯量。图中可以看出，速度调节器采用了 PI 调节器，这是由于速度环要求实现速度无静差，因此扰动点后设计了一个积分环节，整个速度环的开环传递函数需要有两个积分环节，但同时其前向通道已经

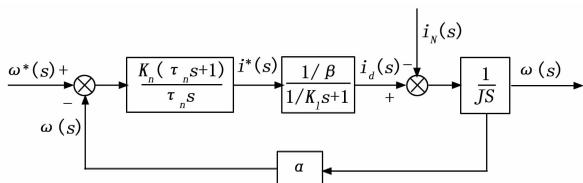


图 3 速度环控制结构图

有了一个惯性环节, 那么积分环节只能涉及到速度调节器中, 所以采用了 PI 调节器^[13]。考虑到速度环要求具有高动态抗扰性, 因此可以将速度环校正为典型 II 型系统, 得到双闭环系统的开环传递函数为:

$$W_n(s) = \frac{K_n(\tau_n s + 1)}{\tau_n s} = \frac{K_n \alpha (\tau_n s + 1)}{\tau_n \beta J s^2 (s/K_I + 1)} \quad (6)$$

根据文献 [14] 可以得到速度调节器的设计参数公式:

$$\begin{cases} \tau_c = h/K_I \\ K_n = (h + 1)\beta J K_I / 2h\alpha \end{cases} \quad (7)$$

式中, h 为中频带宽, 结合系统的动态性能要求, 取 $h = 5$ 时, 系统动态响应最快^[14]。

2.3 位置环控制器设计

在双闭环控制的最外环加入位置环, 便可以实现三闭环伺服控制。位置环的作用是实现高精度的位置控制, 因此在设计时要尽可能保证输入位置信号能被准确复现, 同时不希望出现超调和振荡, 因此一般位置调节器采用比例调节器^[15]。跟电流环类似, 位置环也要求具有良好的跟随性能, 因此位置环的设计可以参考电流环的设计, 将系统校正为典型 I 型系统。

考虑到位置环截止频率远小于速度环时间常数的倒数, 可以将其简化为一阶惯性环节和积分环节的组合, 速度环的开环传递函数可近似等效为:

$$G_n(s) = \frac{K_w}{s(T_w s + 1)} \quad (8)$$

其中: T_w 为等效惯性环节时间常数, K_w 为速度环放大倍数。得到位置环的开环传递函数为:

$$W_\theta(s) = \frac{K_p K_w}{s(T_w s + 1)} \quad (9)$$

其中: K_p 为位置调节器比例系数。通过分析式 (9), 为了使系统超调量为零, K_p 需要很小, 但如果 K_p 过小, 会影响系统动态响应性能, 降低了系统的跟随性能。因此, 为了加强位置环的跟踪特性, 可以采用增加前馈环节的复合控制^[16]。

采用比例加前馈控制的复合控制系统结构原理如图 4 所示。

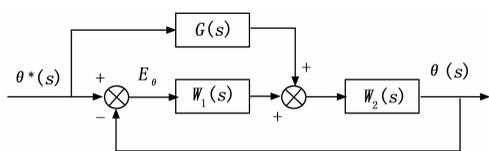


图 4 复合控制结构图

图中, $W_1(s)$ 为比例控制器, $W_2(s)$ 为控制对象, $G(s)$ 为前馈补偿器, 很容易求出其闭环传递函数:

$$\frac{\theta(s)}{\theta^*(s)} = \frac{W_1(s)W_2(s) + G(s)W_2(s)}{1 + W_1(s)W_2(s)} \quad (10)$$

设计前馈补偿器的传递函数为 $G(s) = \frac{1}{W_2(s)}$, 则误差传递函数为:

$$\frac{E_\theta(s)}{\theta^*(s)} = 1 - \frac{\theta(s)}{\theta^*(s)} = 1 - \frac{W_1(s)W_2(s) + G(s)W_2(s)}{1 + W_1(s)W_2(s)} = 0 \quad (11)$$

系统无稳态误差。

由图 4 可以得到位置环的传递函数为:

$$W_\theta(s) = K_p E_\theta(s) + G(s)\theta^*(s) \quad (12)$$

取其差分方程得到位置环控制器的数学表达式为:

$$W_\theta(k) = K_p E_\theta(k) + \frac{1}{K_w} [\theta^*(k) - \theta^*(k-1)] + \frac{T_w}{K_w} [\theta^*(k) - 2\theta^*(k-1) + \theta^*(k-2)] \quad (13)$$

式中, $E_\theta(k)$ 为位置给定值与实际输出值之间的偏差, $\theta^*(k)$ 为 k 时刻的位置采样值。

3 控制系统的软件设计

3.1 系统总体架构

程控双轴姿态转台控制系统软件的主要功能是实现对主轴和俯仰轴两个控制回路的数字控制, 同时对转台工作状态的实时监测与信息反馈。工作时, 上位机通过 RS232 串口向驱动器发送控制指令, 同时接受来自测速模块的信息, 控制平台执行闭合、闲置、运行、停止、归零等操作, 并将监测到的状态信息反馈至上位机。

从功能上来看, 程控双轴姿态转台控制系统软件主要由通信模块、控制模块和数据处理模块 3 部分组成, 3 个模块采用串口通信进行信息交互, 完成对转台主轴和俯仰轴的运动控制以及速度信息和位置信息的数据采集与处理。图 5 为系统软件流程图。

3.2 通信模块

上位机与测速模块、数字驱动器之间均采用串口通信。直流伺服驱动器通过 RS422 串口接受来自上位机发出的控制指令, 波特率为 9 600 bps, 同时上位机读取主轴和俯仰轴的位置、工作状态以及故障信息。每次返回的故障信息为一个 13 位的字符串, 数字驱动器发送某类错误保护, 则将其对应的 1 变为 0。例如, 返回“# 000001000” + 0x0D + 0x0A, 则表示驱动器发生失速保护; 上位机与测速模块只进行单向通信, 只读取主轴和俯仰轴的速度信息和位置信息, 表 1 为测速模块串口协议。

3.3 控制模块

控制模块是控制转台运动的核心模块, 主要实现电流环、速度环、电流环三闭环的数字程序调节。前面介绍, 该控制模块的电流环和速度环采用 PI 算法, 位置环采用比例加前馈控制的复合控制算法。具体工作步骤为, 控制模块接收来自上位机的位置控制指令, 首先进行位置计算与调节, 随后进行速度环 PI 调节, 主要完成测速与调速的功能, 最后进行电流环的 PI 调节, 速度环的输出作为电流环

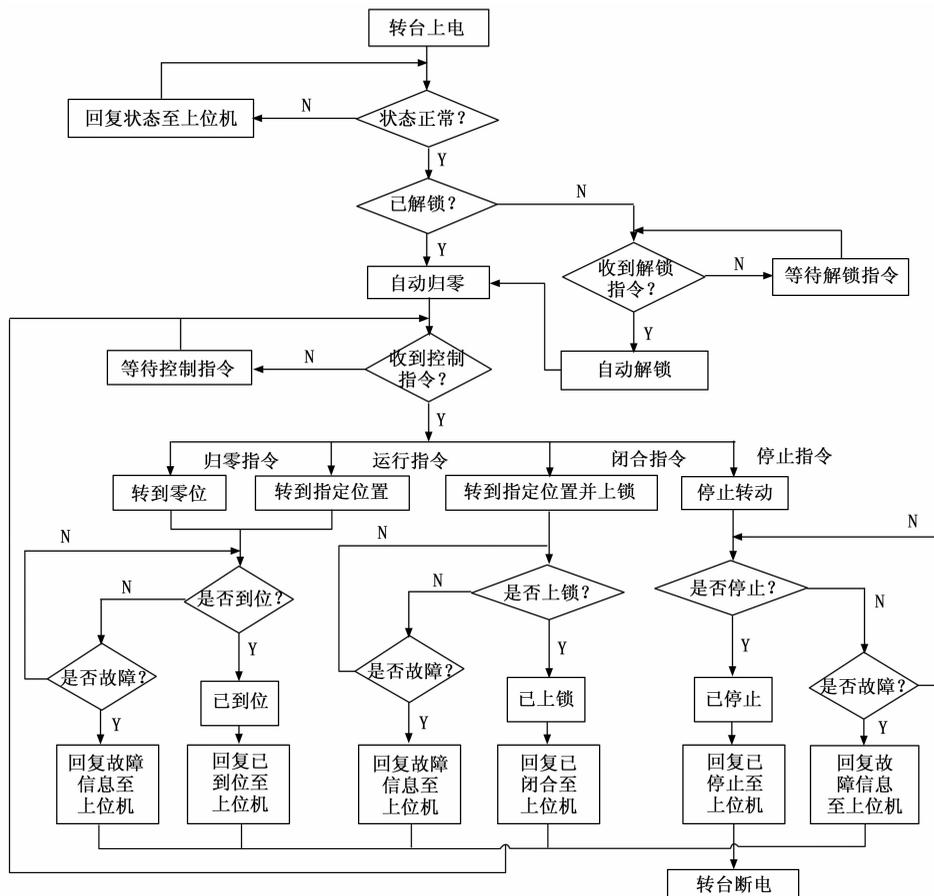


图 5 系统软件流程图

表 1 测速模块串口协议

串口数据发送位数	11 位
串口波特率设置	115 200
串口发送周期	10 ms
位置数据存放位	0~3
速度数据存放位	4~7
零位信号存放位	8
奇偶校验位	9
结束位	10

的给定值，电流环当前状态下的电流值作为反馈，最终输出 PWM 波占空比的控制量，该量被送至直流伺服电机控制电机，通过改变电机电枢两端的电压，改变电机的速度，以此控制电机的运动。图 6 为控制模块程序流程图。

3.4 数据处理模块

由于直流伺服驱动器的控制接口为速度模拟电压指令信号，需要外部提供速度 A/B 脉冲反馈信号，该信号需经过 A/D 转换为数字信号，作为速度指令传输至驱动器，最终构成速度闭环，但经 A/D 转换后的数字信号将会出现噪声，因此需要进行滤波处理。每采集一次速度值，上位机都会给出相应的估计值 X ，将采集到的速度值与估计值做差，设定在 100 (°/s) 范围内为有效值，剔除不在此范围的无效值，之后对采取中值滤波的方法，对采集到的速

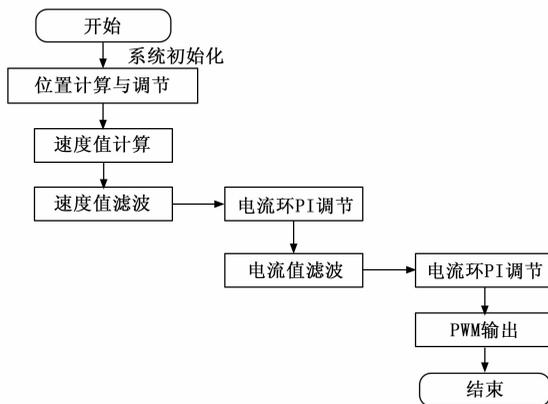


图 6 控制模块程序流程图

度值进行平滑处理。

4 实物平台验证

4.1 平台介绍

双轴姿态转台由机械台体和电气控制系统组成，其中机械台体为 U-T 结构，台式 T 型主轴（即 Z 轴）为航向环，U 型俯仰轴（即 X 轴）为姿态环，用于转台引入北向基准，见图 7。

机械台体主要由主轴、俯仰轴、U 形座、底座、工作台面、角编码器和垫铁等部件组成。同时，台体上安装 3

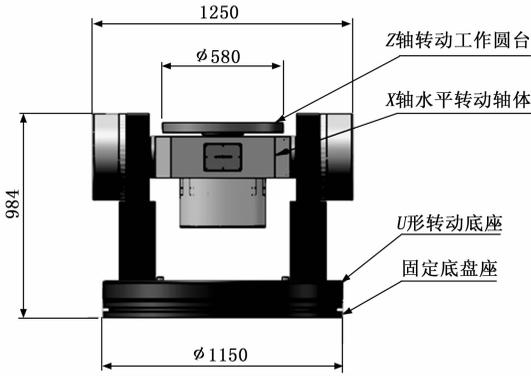


图 7 转台外形正视图

个直流伺服电机、2 个圆感应同步器, 2 块前置放大板, 它们的接口信号通过电缆与电气控制系统连接。

电气控制系统包含控制器和驱动器两个机箱。控制器机箱内置高性能稳压线性多路输出电源, 多功能信号处理板和 CPU 主板等部件, 共同构成了一个嵌入式计算机控制系统。

驱动器机箱内装有主轴和俯仰轴直流伺服驱动器。主轴直流伺服驱动器与俯仰轴直流伺服驱动器通过驱动信号电缆与台体内的直流电机相连, 以控制电机的转动。

4.2 系统性能测试

系统设计主要性能指标见表 2。

表 2 系统部分性能指标

角位置测量精度/(°)	2×10^{-3}
测角重复性/(°)	2×10^{-3}
速率精度/(10°/s)	0.2(°/s)
速率平稳性/(10°/s)	0.2(°/s)
主轴速率范围/(°/s)	$\pm 0.01 \sim \pm 100$
俯仰轴速率范围/(°/s)	$\pm 0.01 \sim \pm 100$

为了验证转台性能指标是否满足设计要求以及伺服控制系统控制策略的有效性, 对其开展速度和位置跟踪测试。

测试以主轴作为对象, 利用基于 LabWindows CVI 2013 开发的测试软件开展测试, 测试软件交互面板见图 8 和图 9。



图 8 系统管理软件主界面

测试前, 将经参数整定得到的控制器代入到实际系统中, 通过软件依次输入位置给定值。图 10 是在设定采样时间为 0.01 s, 转台速率为 10°/s 的情况下, 依次输入 90°、180°、

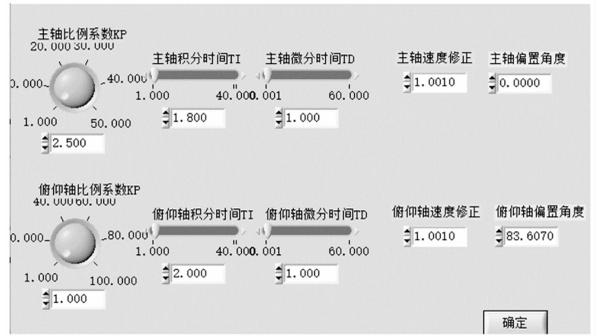


图 9 软件参数设置界面

270°、360°共 4 个角度, 得到角位置跟踪测试结果见图 10。

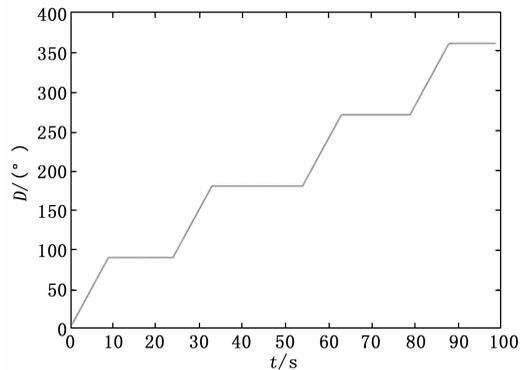
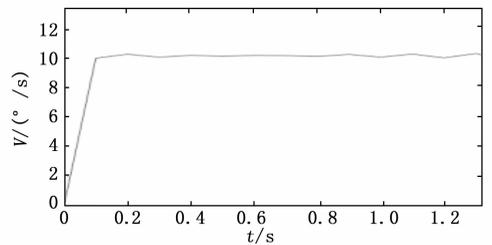
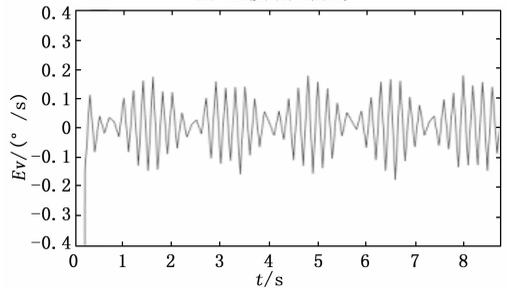


图 10 主轴角位置跟踪测试结果

速度跟踪测试结果见图 11, 从图 11 (a) 可以看出, 速度响应曲线能够快速平稳地上升到给定值处, 上升时间为 0.12 s, 速度误差在 $-0.2 \sim 0.2$ (°/s) 范围内, 速率精度为 10.05 (°/s)。按照 10 s 为间隔计算转速误差, 连续进行 4 个周期的测量, 将 4 次测量值计算均方差为速率平稳性误差为 10.03 (°/s)。均满足系统设计要求。



(a) 速度响应曲线



(b) 速度误差曲线

图 11 主轴速度跟踪测试结果

为了研究位置闭环的控制性能是否达到系统设计要求,

在控制速率不变的情况下,对 4 个测试角度分别开展 6 次测试。以 90°为例,从图 12 (a) 可以看出,角位置响应曲线与理想曲线基本吻合,显示出系统的位置控制具有良好的跟踪性能。图 (b) 展示了在系统到达并维持给定位置值时的角度误差,角位置测量精度为 -8.31×10^{-4} (°),通过对角度控制重复误差求均方根得到该控制角度下的角位置重复精度为 -8.35×10^{-4} (°),与表 1 比照,均满足系统设计的要求。

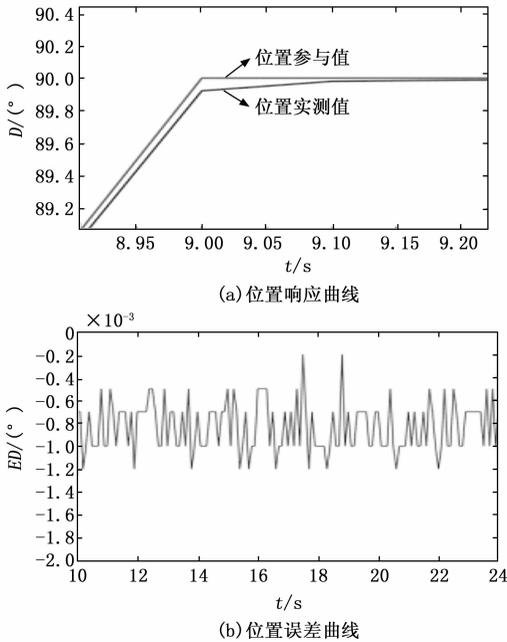


图 12 给定值为 90°时主轴位置跟踪测试结果

其它测试角度的结果与 0°转到 90°时类似,经计算后均满足系统设计的要求,不再赘述。

5 结束语

本文以自主研发的程控双轴姿态转台伺服控制系统为研究对象,采用基于位置环、速度环、电流环三闭环控制器的数字化设计,其中电流环和速度环采用 PI 控制,位置环采用比例加前馈控制的复合控制;利用 LabWindows CVI 交互式编程平台研发了转台控制软件,完成控制算法的软件实现;最后对转台开展实物验证,结果表明系统性能达到预期。但本文针对运动控制器的设计也有不足,只采用了传统控制策略,尤其在位置环控制器的设计上可以采用更为先进的控制方法,如模糊 PID 控制、神经网络控制、滑

膜变控制等,这也是系统需要改进的地方。整体来看,本系统满足程控双轴姿态转台高精度、高稳定性、高数字化设计要求。

参考文献:

[1] 王 健. 高精度双轴光电转台运动控制系统的设计及应用 [D]. 南京:东南大学,2019.

[2] 林 森,于 宁. 双轴转台运动控制系统 [J]. 中国科技信息,2018 (24): 91-92.

[3] 袁海宵,王慧贞. 基于无刷直流电动机伺服系统的位置环设计 [J]. 电力电子技术,2011,45 (4): 52-54,84.

[4] WU Y M, WANG J J, CUI G Z, et al. Implementation of turntable servo control system based on fuzzy self-tuning PID [J]. Advanced Materials Research, 2011: 383-390.

[5] HAO J, ZHANG W X, LING, M Q. Research on PID control algorithm of BP network based on two axis digital control turntable [C] //2010 IEEE 10th International Conference on Computer and Information Technology, IEEE, 2010: 2233-2238.

[6] 赵鑫昌. 基于 DSP 的机电执行器控制系统研制 [D]. 北京:北京工业大学,2020.

[7] 李世站. 高精度二维转台控制方法研究 [D]. 西安:西安工业大学,2014.

[8] 雷 巍. 小型两轴光电转台控制系统设计与实现 [D]. 成都:电子科技大学,2015.

[9] 卢志刚,吴 杰,吴 潮. 数字伺服控制系统与设计 [M]. 北京:北京机械工业出版社,2007.

[10] 孙跃光,林怀蔚. 数字 PID 控制器参数的整定与仿真研究 [J]. 科技创新导报,2012 (17): 4-5.

[11] ZHOU K. Relationship between space-vector modulation and three-phase carrier-based PWM: a comprehensive analysis I [J]. IEEE Trans. Electron., 2002, 49 (1): 27-39.

[12] 王 刚. 直流电机伺服控制技术研究与实现 [D]. 大连:大连理工大学,2013.

[13] 董 恒,王 辉,黄科元. 永磁同步电动机驱动系统数字 PI 调节器参数设计 [J]. 电气传动,2009,39 (1): 7-10.

[14] 王伟华,肖 曦. 永磁同步电机高动态响应电流控制方法研究 [J]. 中国电机工程学报,2013,33 (21): 117-125.

[15] 姜飞荣. 永磁同步电机伺服控制系统研究 [D]. 杭州:浙江大学,2006.

[16] 王新华,刘金琨. 微分器设计与应用 [M]. 北京:电子工业出版社,2010.

[17] 王新华,刘金琨. 微分器设计与应用 [M]. 北京:电子工业出版社,2010.

[18] 王新华,刘金琨. 微分器设计与应用 [M]. 北京:电子工业出版社,2010.

[19] 王新华,刘金琨. 微分器设计与应用 [M]. 北京:电子工业出版社,2010.

[20] 王新华,刘金琨. 微分器设计与应用 [M]. 北京:电子工业出版社,2010.

[21] 任 磊,韦 微,龚春英,等. 电力电子电路功率器件故障特征参数提取技术综述 [J]. 中国电机工程学报,2015,35 (12): 3089-3101.

[22] 殷 实,谭国俊. 一种基于卡尔曼滤波算法的 MMC 系统故障诊断策略 [J]. 电工技术学报,2016,31 (19): 74-84.

[23] 王德成,林 辉. 一种 SVM 不平衡分类方法及在故障诊断中的应用 [J]. 电机与控制学报,2012 (9): 48-52.

[24] 丁石川,厉雪衣,杭 俊,等. 深度学习理论及在电机故障诊断中的研究现状与展望 [J]. 电力系统保护与控制,2020,48 (8): 172-187.

[25] 杨忠林,吴正国,李 辉. 基于直流侧电流检测的逆变器开路故障诊断方法 [J]. 中国电机工程学报,2008,28 (27): 18-22.

[26] 汤天浩,孙今英,韩金刚. 一种多电平逆变电路新的组合方式 [J]. 电工技术学报,2008,23 (3): 49-55.

[27] 吴国秋. 基于自适应 LS-SVM 的雷达 T/R 组件热管冷却故障诊断系统设计 [J]. 计算机测量与控制,2019,27 (7): 97-100,106.

(上接第 55 页)

[21] 任 磊,韦 微,龚春英,等. 电力电子电路功率器件故障特征参数提取技术综述 [J]. 中国电机工程学报,2015,35 (12): 3089-3101.

[22] 殷 实,谭国俊. 一种基于卡尔曼滤波算法的 MMC 系统故障诊断策略 [J]. 电工技术学报,2016,31 (19): 74-84.

[23] 王德成,林 辉. 一种 SVM 不平衡分类方法及在故障诊断中的应用 [J]. 电机与控制学报,2012 (9): 48-52.

[24] 丁石川,厉雪衣,杭 俊,等. 深度学习理论及在电机故障