DOI:10. 20033/j. 1003-7241. (2026)07-0047-05

一种大跨度轻型十字滑台控制系统设计

郭耀文, 马孟星, 沈　勇

(云南民族大学 电气与信息工程学院, 昆明 650504)

摘　要:针对某科研系统对大跨度二维轻型目标运动平台的应用需求,设计一种基于十字滑台结构的轻型框架及其网络化多轴运动控制系统,以满足平台在大行程范围内的手动控制、预定轨迹运行和第三方计算机随动控制要求。平台机械部分采用三根同步带滑台线性导轨模组搭建二自由度运动平台,其中两根 8 500 mm 模组上下安装,一根 3 000 mm 模组固定在横向两根模组滑台上,从而形成大跨度轻型十字滑台结构。控制系统以 ZMC304E 运动控制器为核心,通过 EtherCAT 总线连接三套伺服驱动器和伺服电机,实现三轴运动控制及横向两个运动轴的电气同步。上位机与下位机软件分别采用 C#和 ZBASIC 开发,实现手动控制、预定轨迹运行和网络随动控制等功能。以电机编码器反馈和上位机定时采样数据为依据,分别开展位移精度测试和动态特性测试,对三轴在不同位移指令及指定测试速度下的运行误差、速度和加速度变化进行记录与分析。实验结果表明,系统纵向有效行程为 0~2 250 mm,横向有效行程为 0~7 850 mm,运行速度为 0~1 800 mm/s,位移误差控制在 0. 1~1 mm 之间,加速度可达到 100 000 mm/s^2,平台运行稳定可靠,能够满足科研系统对大跨度、轻量化和多轴协同运动控制的技术需求。

关键词:大跨度;轻型十字滑台;运动控制器;两自由度;多轴运动控制;线性导轨模组;伺服控制

中图分类号: TP273;TP23　　**文献标志码**: A　　**文章编号**: 1003-7241(2026)07-0047-05

Design of a large span light cross slide control system

Guo Yaowen, Ma Mengxing, Shen Yong

(School of Electrical and Information Engineering, Yunnan Minzu University, Kunming 650504, China)

Abstract: In response to the application requirements of a certain research system for a large-span, two-dimensional, lightweight target motion platform, this project aims to design a lightweight frame based on a cross-slide structure, along with a networked multi-axis motion control system, to meet the platform's requirements for manual control, pre-programmed trajectory operation and third-party computer-controlled tracking across a wide range of motion. The mechanical component of the platform utilises three synchronous belt slide linear guide modules to construct a two-degree-of-freedom motion platform. Two 8 500 mm modules are mounted vertically, whilst a 3000 mm module is fixed to the slides of the two lateral modules, thereby forming a large-span, light cross-slide structure. The control system is centred on a ZMC304E motion controller, which connects three sets of servo drives and motors via an EtherCAT bus to achieve three-axis motion control and electrical synchronisation of the two lateral axes. The host and subordinate computer software were developed in C# and ZBASIC respectively, implementing functions such as manual control, pre-programmed trajectory operation and networked follow-up control. Based on feedback from the motor encoders and data sampled at regular intervals by the host computer, displacement accuracy tests and dynamic characteristic tests were conducted. The operational errors, speed and acceleration variations of the three axes under different displacement commands and specified test speeds were recorded and analysed. The experimental results indicate that the system has an effective longitudinal travel range of 0-2 250 mm and an effective lateral travel range of 0-7 850 mm, with an operating speed range of 0-1 800 mm/s. Displacement error is controlled within 0. 1-1 mm, and acceleration can reach 100 000 mm/s^2. The platform operates stably and reliably, meeting the technical requirements of research systems for large-span, lightweight and multi-axis coordinated motion control.

Keywords: large span; light cross slide; motion controller; two degrees of freedom; multi-axis motion control; linear guide module; servo control

十字滑台结构作为典型的送料结构,广泛运用于数控加工和电子加工设备中,其结构大多数由两个直线运动单元组成,具有加工精度要求高的特点[1-2]。

目前,已有不少学者对各种十字滑台结构进行研究分析,如王志伟等[3]基于 TRIZ 创新理论对数控十字滑台托板-滑块和工作台进行了创新设计,提高了滑台高速运动时的稳定性;杨春旺等[4]设计了一种多工位十字滑台,提高汽车白车身焊接过程中机器人的利用率;何雨来[5]设计了一种新型的十字滑台浮动机构,提高了产品装配效率同时保护产品工件质量。但是,目前的研究大多针对小跨度、运行速度要求不高但精度要求高的应用场景。在以送料运输的大型机械和设施为主导的制造业领域,例如港口

收稿日期:2024-12-16;**录用日期**:2025-02-26

作者简介:郭耀文(1999—),男,硕士研究生,研究方向为工业自动化。

通信作者:沈　勇(1965—),男,教授,研究方向为工业控制。

引用本文:郭耀文, 马孟星, 沈勇. 一种大跨度轻型十字滑台控制系统设计[J]. 自动化技术与应用, 2026,45(7):47-50,153. (Guo Yaowen, Ma Mengxing, Shen Yong. Design of a large span light cross slide control system[J]. Techniques of Automation and Applications, 2026,45(7):47-50,153.)

机械、钢铁行业等,大跨度物料运输较为常见,针对十字滑台送料结构在大跨度场景的应用研究较少。

某科研系统需要 1 个大跨度二维运动平台用于控制 1 个轻型目标,需要具有基本的手动控制功能、能够运行预定目标轨迹、能够使用第三方计算机通过网络收发数据进行随动控制。为此设计基于十字滑台结构的大跨度轻型框架以及平台控制系统。本文重点介绍平台的机械结构以及网络多轴运动控制系统硬件及软件的实现。

1 运动平台方案设计

运动平台机械结构如图 1 轻型滑台简化模型所示。以平行地面为 x 轴向右为正向,垂直地面为 y 轴向上为正向,建立直角坐标系,令 x 轴方向为横向,y 轴方向为纵向[7]。采用三根模组搭建二维运动平台,其中横向两根模组上下安装,纵向一根模组固定在横向两根模组滑台上,由此共同构成二维平面的大跨度轻型框架结构。

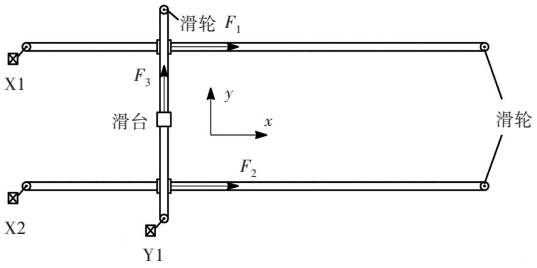


图 1 轻型滑台简化模型

Fig. 1 Simplified model of the light cross slide

控制部分方案设计如下:

由于平台主要应用于目标的运动规划,对运动精度要求较高,选择运动控制器并通过编程实现对系统的控制。

根据二维运动要求,滑台需要在横向与纵向上运动,而根据滑台机械结构,横向有两个运动轴,因而在实际运动过程中,需要控制两个横向运动轴同步运行。

关于执行器的选择,首先考虑采用两台伺服电机控制 3 个运动轴,其中横向运动轴通过联轴器、连接杆机械同步由一台伺服电机控制,纵向运动轴由另一台伺服电机控制。该方案使用机械方式实现横向两个运动轴的运行同步节约硬件成本,同时便于软件编写,但实际运行过程中,由于联轴器间隙、电机安装位置等影响,横向两个运动轴传动刚性较差,运行时同步特性不好,因此选择 3 台伺服电机控制 3 个轴,3 个运动轴分别由一台伺服电机控制,其中横向两个运动轴采用电气同步控制。

图 1 中 X1、X2、Y1 分别代表横向伺服电机 1、横向伺服电机 2、纵向伺服电机,横向伺服电机 X1、X2 分别输出力 F_1、F_2 带动纵向模组横向运动,纵向伺服电机 Y1 输出力 F_3 带动滑台纵向运动。 控制系统总体设计框架如图 2 所示。

采用基于 PC 机和运动控制器的网络化运动控制系统,运动控制器是系统的控制核心,上位机提供人机交互界面(UI 界面), Wi-Fi 通信用作远程控制,EtherCAT 总线用作下位系统运动控制器与各轴驱动系统间的实时通信和自动化控制。轴驱动系统主要由各轴伺服驱动器控制伺服电机从而实现对十字滑台横轴与纵轴的运动控制。系统控制方案如图 3 所示。

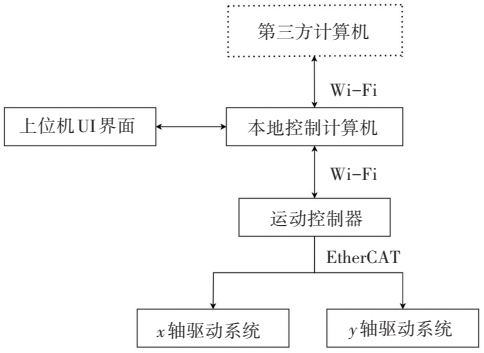


图 2 控制系统总体设计框架

Fig. 2 Overall design framework of the control system

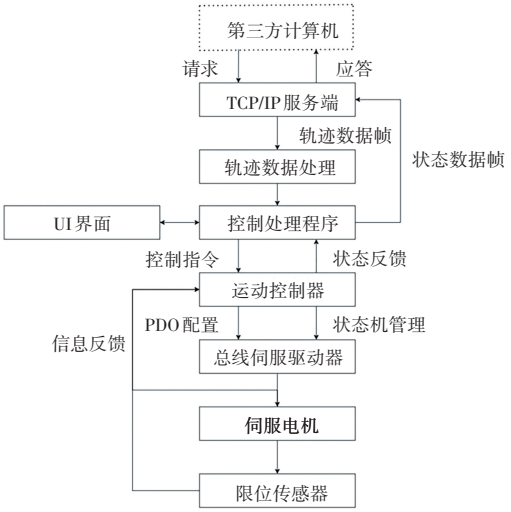


图 3 系统控制方案

Fig. 3 Control scheme of the system

系统控制方案设计主要包含硬件和软件 2 个方面。其中硬件设计核心是运动控制器经工业网络控制总线驱动器并根据驱动器反馈的电机位置、故障等信息以及传感器反馈限位信息监控系统的运行。

软件设计主要包含下位机控制程序和上位软件两方面。其中下位控制程序设计采用运动控制器编程软件进行开发,驱动器配置采用 SDO 方式修改伺服驱动器对象字典配置 PDO 映射关系。控制逻辑上采用有限元状态机的思想,梳理各个运行状态以及状态转移条件使用状态机进行管理,同时为上位软件控制预留相应寄存器接口。

上位机软件设计采用 Visual Studio 进行开发,为实现预定轨迹数据输入接口约定. CSV 文件格式,为实现网络随动控制以 Wi-Fi 技术作为数据传输手段,以 TCP/IP 协议作为通信协议,建立 TCPIP 服务端并约定数据帧格式。使用运动控制器厂商提供的上位程序动态库方法完成上位机与运动控制器之间的数据交互。

2 轻型框架结构设计

轻型框架由三根模组构成,其中横向两运动轴由两根 8 500(mm)模组构成,模组选用 RXP60-8500 型铝合金同步带滑台线性导轨模组,纵向运动轴由一根 3 000(mm)模组构成,模组选用 RXP45-3000 型铝合金同步带线性导轨滑台模组,模组都采用铝合金材质,所构造的系统框架具有大跨度轻型的特点。

通过 3 个直线运动单元的组合运动,在平面的工作范围产生两个自由度水平与垂直方向运动,在平面内既可以两轴单独运动,也可以两轴配合完成直线插补、PT 运动等其他复杂平面内运动[9-10]。

3 控制系统设计

3.1 硬件设计

运动控制器选用 ZMC304E,此控制器本体支持 4 轴运动控制,支持直线、圆弧等插补,支持同步跟随功能,满足框架所需的插补以及同步跟随需求。ZBASIC 编程软件支持多文件多任务编程。此控制器也自带以太网通信和 EtherCAT 接口,ECAT 最快 0.5 ms 刷新周期满足框架通信要求[11]。

运动执行器选用国产品牌步科伺服电机和总线伺服驱动器,其中 8 500 模组伺服电机选用 SMC80S-0075-30YAK-5LSU 型伺服电机,伺服电机驱动器选用 FD425P-EA-000 型总线驱动器;3 000 模组伺服电机选用 SMC60S-0040-30YBK-5LSU 型伺服电机,伺服电机驱动器选用 FD415P-EA-000 型总线驱动器。其中 3 000 模组由于垂直安装,所选伺服电机带抱闸功能。驱动器支持 CoE(Ci A402 协议),EtherCAT 通讯速率达 100 Mbps,满足框架通信要求,采用伺服控制满足框架运动轨迹规划控制精度要求[12]。

3.2 软件设计

3.2.1 运动控制器的软件设计

下位软件设计主要是使用运动控制器厂商软件 ZDevelop 作为 PC 端程序的开发调试,程序以 ZBASIC 为编程语言,连接到运动控制器通过对伺服驱动器的信号输入实现对各个伺服电机轴的控制[13]。

设计思路主要运用有限元状态机的思想,设计手动状态、自动状态、停止状态,为产生绝对坐标系设计回零状态,为急停设置急停状态等,各个状态使用状态机来进行管理。部分状态转移图如图 4 所示。

各状态转移条件使用运动控制器寄存器来实现,上位机可以使用运动控制器厂商提供上位程序动态库所提供的方法对寄存器进行读取与写入,进而改变下位的运行状态实现控制。

3.2.2 上位机软件设计

上位软件设计主要是设计人机友好界面,并能对运动平台进行手动控制、按预定轨迹运行以及网络随动控制。

基于 C#编程开发计算机端实时人机交互软件,如图 5 所示。

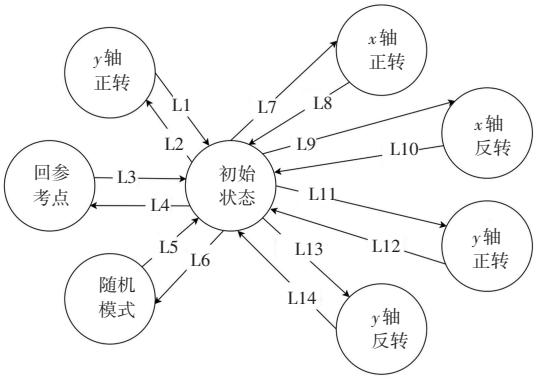


图 4 部分状态转移图

Fig. 4 Partial state transition diagram

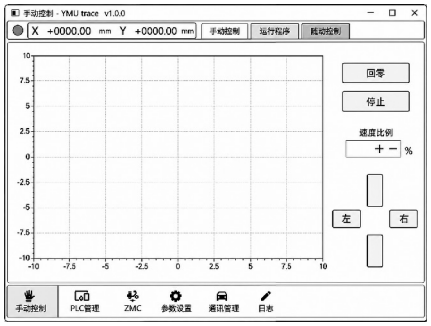


图 5 计算机人机交互界面

Fig. 5 Human-Computer interaction interface of the computer

预定轨迹将坐标速度信息按照约定.CSV 文件格式写入.CSV 文件,上位软件通过对.CSV 文件处理进行预定轨迹运行。

CSV 文件格式如下:1)每行只能且必须写前 3 列内容;2)第 1 行写明前 3 列每列的物理含义,默认为 x 轴坐标、y 轴坐标、速度,后面不用再写;3)将预定轨迹按照从第 1 点到第 n 点的顺序将 x 轴、y 轴坐标信息以及运行至该点速度在.CSV 文件中按从上到下的顺序写好;软件建立了 TCPIP 服务端,用户可通过 TCPIP 客户端建立连接,按照约定数据帧格式发送数据进行网络随动控制,上位软件操作流程如图 6 所示。

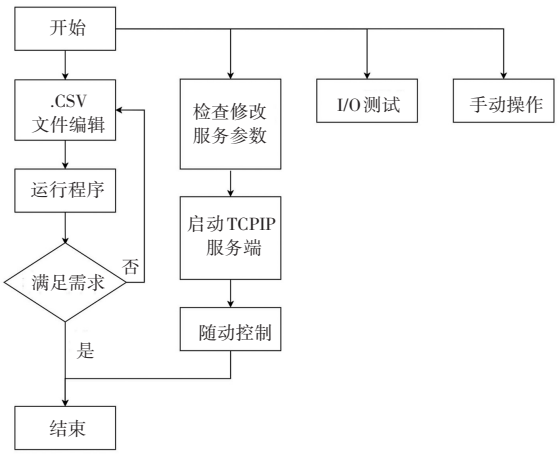


图 6 上位软件操作流程图

Fig. 6 Operation flow chart of the upper-computer software

4 实验验证

4.1 系统精度

使用电机编码器测试系统的精度。框架分别在横向与纵向依次正向移动50 mm,正向移动200 mm,负向移动150 mm,负向移动100 mm[14-15]。现场测量对比得到测试结果如表1所示。

表1 位移测试数据

Tab. 1 Displacement test data

轴号	方向	指令位移/mm	实际位移/mm	误差/mm
Axis0	+	50	49.8	0.2
Axis0	+	200	199.6	0.4
Axis0	−	150	149.8	0.2
Axis0	−	100	100.3	0.3
Axis1	+	50	50.3	0.3
Axis1	+	200	200.4	0.4
Axis1	−	150	149.7	0.3
Axis1	−	100	100.1	0.1
Axis2	+	50	49.5	0.5
Axis2	+	200	199.8	0.2
Axis2	−	150	149.7	0.3
Axis2	−	100	100.2	0.2

由测量结果可知,大跨度轻型框架实际位移与目标位移的误差值在0.1~1 mm之间,定位精度以及加速度特性满足系统设计要求。

4.2 动态特性

上位机通过定时器测试框架动态特性。拟定运动平台3个运动轴分为别Axis0、Axis1、Axis2,其中Axis0、Axis2为横向运动轴,Axis1为纵向运动轴,测试速度为1 000 mm/s,框架依次左右上下运行,定时器每5 ms记录一次Axis0-Axis2的实时速度,并通过对速度进行时间的微分得出加速度。Axis0-Axis2局部动态特性曲线如图7-9所示。

由测量结果可知,加速度特性各轴都达到100 000 mm/s^{2}以上,测试过程中,框架运行稳定可靠,加速度特性达到系统设计要求。

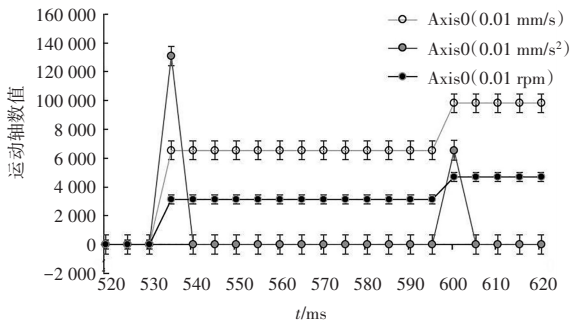


图7 Axis0局部动态特性曲线图

Fig. 7 Local dynamic characteristic curve of axis0

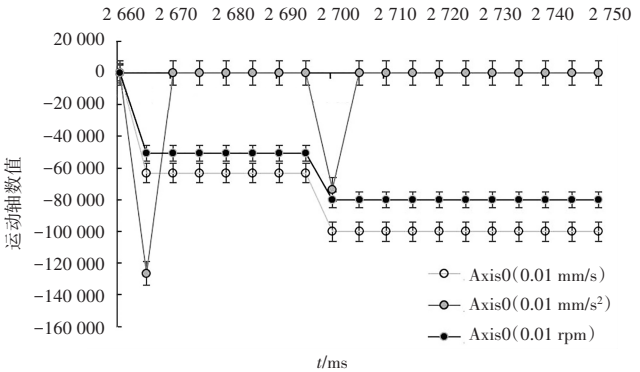


图8 Axis1局部动态特性曲线图

Fig. 8 Local dynamic characteristic curve of axis1

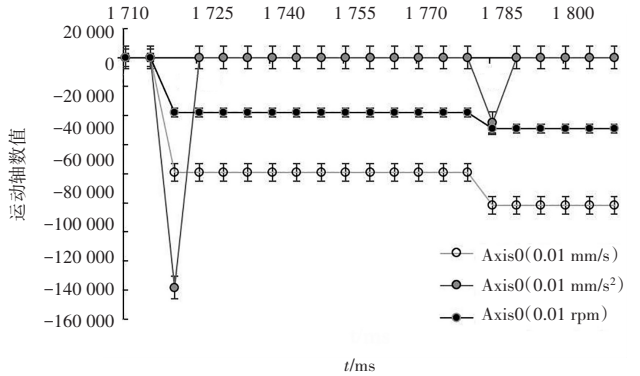


图9 Axis2局部动态特性曲线图

Fig. 9 Local dynamic characteristic curve of axis2

5 结论

该大跨度轻型框架已经完成验收,并在科研系统中使用,控制系统纵向为0~2 250 mm,横向为0~7 850 mm,运行速度为0~1 800 mm/s,位移精度为0.1~1 mm,加速度为0~100 000 mm/s^2。各项性能指标满足科研系统提出的技术要求。该框架降低硬件成本同时保证了设备运行的可靠性,对于具有大跨度轻型多轴运动控制特征的控制系统设计具有一定的借鉴意义。

参考文献

[1]户佩佩, 朱振伟. 步进电机和伺服电机在十字滑台控制中的应用[J]. 轻工科技, 2016, 32(3):53-54.
[2]王秀明. 基于实训装置送料部件(十字滑台)的装配与调试[J]. 现代制造技术与装备, 2021, 57(10):157-159.
[3]王志伟, 汪文津, 于明, 等. 基于TRIZ理论的数控十字滑台结构创新设计与性能分析[J]. 天津城建大学学报, 2023, 29(4): 268-273.
[4]杨春旺, 韩有泉, 闫晓阳, 等. 一种多工位十字滑台的设计与分析[J]. 机械工程师, 2014(8):66-67.
[5]何雨来. 汽车动力总成自动化装配线中十字滑台浮动机构应用浅析[J]. 汽车实用技术, 2020(5):194-196, 208.
[6]马鹏举, 兰小龙, 王文杰, 等. 精锻机专用控制系统的设计与实现[J]. 锻压技术, 2023, 48(2):149-160.
[7]熊娟, 张荣, 詹文赞, 等. 基于机器视觉的大轴激光清洗控制系统研发[J]. 机床与液压, 2022, 50(13):97-101.
[8]张继伟. 基于PLC的数控机床电气设备电压稳态控制研究[J]. 自动化技术与应用, 2024, 43(6):46-49.

(下转第153页)