

终端光学组件及反射镜架控制系统的开发

邵忠喜, 付云忠, 富宏亚, 王炳成

(哈尔滨工业大学 机电工程学院, 150001 哈尔滨)

摘 要: 终端光学组件及反射镜架是激光约束核聚变装置中的重要组成部分, 具有运动轴数量多且分散的特点, 为实现该设备的运动控制, 采用分布式控制的思想, 建立了以倍福嵌入式 PC 和总线端子为底层控制器, 以 EtherCAT 网络为通讯的控制系统结构. 控制软件在 VC++ 和 TwinCAT 的环境中开发, 对于机械系统要求的特殊功能均编制成 PLC 功能模块, 并在下位机中运行, 包括电机上下电锁紧功能、自动上下电功能、某个运动轴的手动跟随功能、单向定位功能. 其中单向定位控制功能的应用将重复定位精度控制在 $3\mu\text{rad}$ 以内. 这种分布式控制系统具有结构简单、成本低廉、通讯速度快等特点, 在实际工程应用中稳定、可靠.

关键词: 分布式控制系统; EtherCAT; 单向定位; 手动跟随

中图分类号: TP394.1; TH691.9

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2013)01-0067-05

Development of terminal optical module and reflector mount control system

SHAO Zhongxi, FU Yunzhong, FU Hongya, WANG Bingcheng

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Harbin Institute of Technology, 150001 Harbin, China)

Abstract: Terminal optical module and reflector mount are the important components of laser-driven inertial confinement fusion (ICF) device, having the characteristic of owning much and scattered motion axes. The control system that can achieve the motion control of this device is built upon the thought of distributing control. The system contains Beckhoff embedded PC and bus terminals as underlying controller and EtherCAT as the communication network. Software of the control system is developed under the VC++ and TwinCAT environment. The special functions required by mechanical systems are all be programmed to the PLC function block and work in the clients, such as the function of motor lock when power up and down, the motor's automatic power-up, certain moving axis' manual follow, one-way positioning, and so on. Among these functions, one-way poisoning can make sure the repeat location accuracy within $3\mu\text{rad}$. The control system has the characteristics of simple construction, low cost and fast communications speed. It can keep stable and reliable in the practical engineering applications.

Key words: distributed control systems; ether CAT; one-way positioning; manual follow

激光惯性约束核聚变(ICF)是激光科学和核科学交叉衍生的科学,受到许多发达国家的重视,是国际科学研究的热点问题. 主机装置靶场光电系统中终端光学组件的主要功能是控制相应的机构完成频率转换、谐波分离、聚焦传输、焦斑控制以及光束取样等任务,电动反射镜架的主要功能

是控制相应的机构完成激光束的准直引导和光束近场调整^[1]. 系统要求的运动精度高,由靶场瞄准定位控制系统引入的误差小于 $\pm 30\mu\text{m}$,并且运动机构多且分散:系统共有 6 个束组,每个束组中有 8 个终端光学组件及反射镜架,每个终端光学组件需要控制 7 个电机,反射镜架需要控制 4 个电机,每个电机都有正负限位,某些高精度运动轴需要用长度计做反馈进行闭环控制,以上这些对终端光学组件及反射镜架的电控系统提出了很高要求. 为解决这个问题,本文采用分布式控制系统

收稿日期: 2012-02-13.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51005060).

作者简介: 邵忠喜(1978—),男,博士,助理研究员;

富宏亚(1963—),男,博士生导师.

通信作者: 邵忠喜, shaozhongxi78@163.com.

的设计方案^[2]:一个终端光学组件及反射镜架一套电控系统,一个倍福嵌入式 PC 控制一个束组,即每个倍福 PC 控制 6 套电控系统,光电系统整体需要 6 个倍福 PC. 数据通讯方式选用 EtherCAT 工业自动化实时以太网总线的方式,人机界面用 VC++ 开发,下位机程序在 TwinCAT 环境中开发,将任务要求的特殊功能设计到下位机控制程序中,例如电机上下电锁紧功能、电机自动上下电功能、运动轴的手动跟随功能、单向定位功能. 将这种控制系统的设计方案应用到主机装置靶场光电系统的建设中,工程实践证明该控制系统方案是可行的,系统的可靠性、稳定性均满足要求^[3].

1 控制系统结构及功能

根据物理实验的要求,靶场系统需要将 48 束激光从真空靶室的南北两极以不同角度入射靶室,并经反射镜模块、三倍频模块、聚焦透镜模块精确引导至靶点,以此为基础设计终端光学组件

及反射镜控制系统. 该系统控制电机数量多、位置分散,且电机与驱动器之间的距离不易过长. 因此,采用由网络总线构成的集散式控制系统,通过 EtherCAT 工业自动化实时以太网总线进行数据交换,每个控制柜作为分布式控制网络的一个终端来控制一路光的运动部件(一个终端光学组件及反射镜架),6 个控制柜为一个束组,每个束组中有一台嵌入式 PC 作为中央处理单元,在通讯网络中具有唯一的 AMS Net,用于接收远程控制指令并与下位控制器通信. 单束组终端光学组件及反射镜架控制系统结构见图 1 所示. 嵌入式 PC 通过 EtherCAT 网络通信从上面管理层直接获取信息,拓扑结构类似于树状,一方面,确保在最短的时间内实时地发送命令信号给远程执行器,进行过程控制^[4]. 另一方面,通过分散的总线智能端子将远程控制器的位置、状态、诊断信息等传到中央单元,并协调相关的顺序^[5]. 控制系统人机界面用 VC 语言开发,系统功能设计成 TwinCAT 的 PLC 功能模块形式.

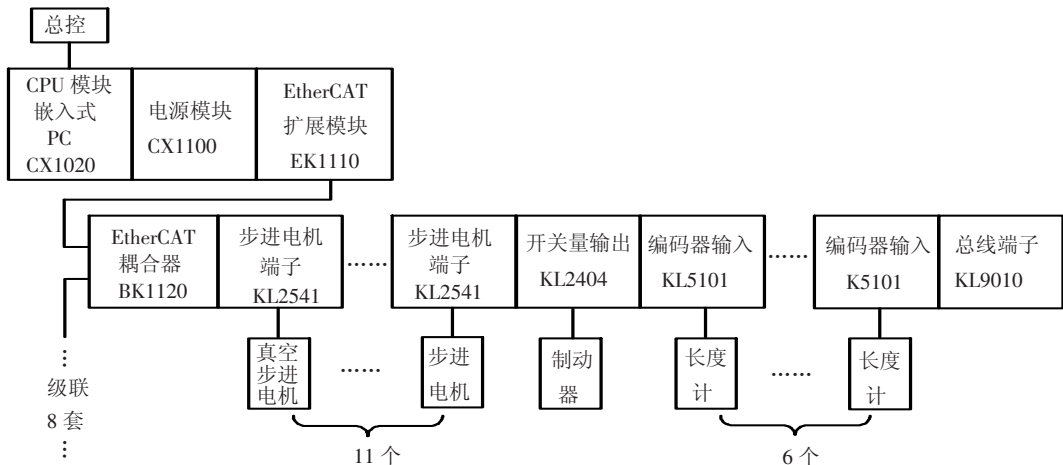


图 1 单束组控制系统结构

倍频模块和透镜模块处于真空环境,采用真空步进电机作为执行件,选用总线端子 KL2541 作为真空电机的控制器. 透镜模块的负载较大,增加制动器防止电机失去动力后透镜移动. 为保证透镜的定位精度,要求透镜具有电机上下电锁紧功能,即电机与制动器具有上下电的时序关系,上电时电机先于制动器上电,下电时制动器先于电机下电. 对于运动精度高的运动轴配置总线端子 KL5101 接收高精度长度计(分辨率 0.05 μm)的位置反馈信号,与步进电机构成闭环控制系统.

2 通信方式

该控制系统采用 EtherCAT 实时以太网现场总线通讯技术,这种技术具有通讯速度快、硬件设计简单、传送距离远、信息可靠的特点. EtherCAT

优化了系统结构,使原来传统的现场总线四层循环结构改善为仅有两层的结构——PLC 运算循环及 EtherCAT 总线循环. 相对于传统的现场总线系统,底层 I/O 的响应时间大大缩减,最多仅需两个 PLC 循环周期就可以实现数据的刷新. EtherCAT 打破了传统现场总线的通讯瓶颈,解放了 CPU 性能,从而大大提高了控制系统性能. 从主站到系统最末端的所有从站设备均实现 EtherCAT 通讯,系统中无需再有协议转换,一个通讯系统满足了主控、I/O、伺服驱动,甚至功能性安全等需要数据交换的所有设备的通讯需求.

3 软件功能及关键技术

3.1 软件功能

控制软件采用模块化设计思想(见图 2 所

示),按功能需求主要分为两大类^[6]:实时性模块和非实时性模块. 实时性模块在倍福 PC - CX1020 中运行,执行与运动控制密切相关的任务,例如电机自动上下电控制、手动跟随、单向定位、运动控制、上下电时序控制等功能^[7]. 其中电

机自动上下电控制是指电机运动时电机先上电后运动,电机停止后自动下电,防止电机长时间供电产生热量影响晶体变形精度. 非实时性任务包括软件初始化、系统配置、通讯功能、参数显示、故障诊断等模块.

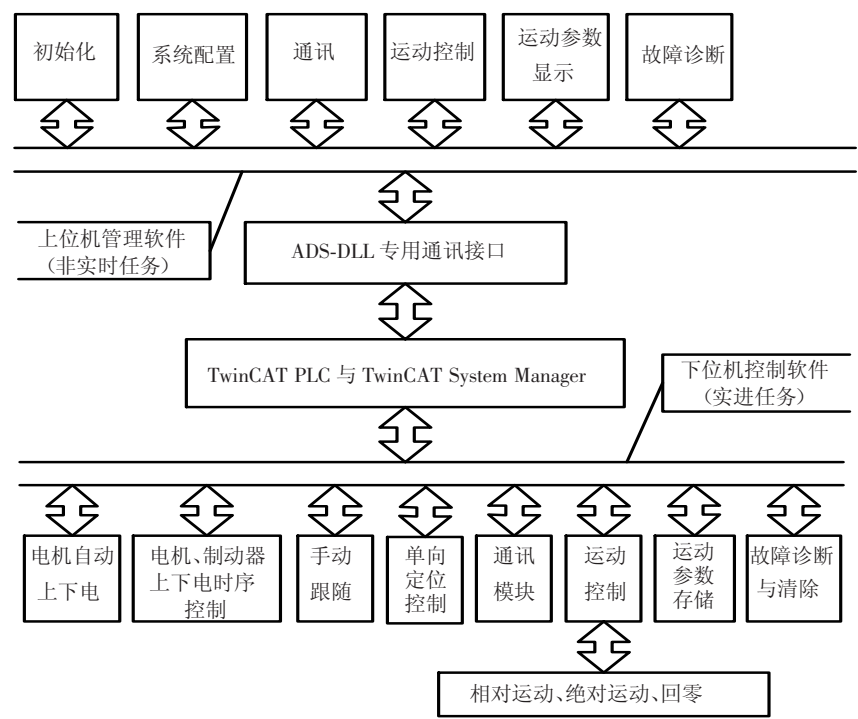


图 2 软件结构

实时性功能模块基于倍福的 TwinCAT 环境开发,为保证系统可靠、稳定运行,优化了程序结构,采用 PLC 功能循环计算的处理方式,程序代码压缩到 520 行,增强了代码的可靠性和可读性. 这种 PLC 程序结构中的每个功能模块关联紧密、功能集中,便于功能模块的维护和改造,程序流程见图 3 所示.

3.2 关键技术

3.2.1 单向定位控制技术

终端光学组件及反射镜架为内外框的有轴式串联机构,晶体安装于内框且负载较大,特别是反射镜架机构负载重达 80 kg,要达到激光盲打重复定位 3 μ rad 的精度要求,难度较大. 即使满足重复定位精度的要求,设备经过长时间运行,精度势必会降低. 提高设备精度有两种方法:一是硬件方法,即提高设备零部件的加工、制造、装配精度. 这种方法不仅受到加工机床精度等级的制约,而且随着加工精度的提高,零件制造成本呈指数级别增加. 二是软件方法,这种方法在不增加硬件设备的前提下实现了设备的高精度定位,有利于降低设备成本.

基于以上分析,为消除机械系统误差,本文采

用第二种精度提高方案. 根据设备的运动方式为点到点的运动的特点,应用单向定位控制技术用于提高设备的重复定位精度. 单向定位功能见图 4 所示^[8],设定方向为 $\overrightarrow{DA}$,当从起点 A 运动到终点 B 时,运动方向与定位方向相反,运动部件先多走一段过冲量 l ,到达 C 点后再反向运动到 B 点完成定位. 当从起点 D 运动到终点 B 时,运动方向与定位方向相同,需要在距离 B 点的 l 处停一下,再向前运动到 B 点完成定位. 为实现运动部件的快速定位,本文将单向定位控制方案进行简化,当运动方向与定位方向相同时,直接运动到终点,在距离终点 l 的位置不再停留,从而简化了控制流程. 定位方向和过冲量由软件参数设定,本文设定负向为定位方向,过冲量的设定值要大于机械系统的反向间隙,如果该值设置的较小,反向定位时易出现欠行程的现象,影响重复定位精度. 经试验测定过冲量 l 设置为 0.3 mm. 改进后的单向定位控制流程见图 5 所示.

单向定位技术的应用使开环控制运动轴的重复定位精度在 3 μ rad 以内. 见图 6 所示,某开环控制的镜架在有、无单向定位控制技术的对比试验,记录数据点为 21 个,数据分析见表 1 所示. 采

用单向定位技术后重复定位精度指标提高 4 倍以上,满足激光盲打的要求。

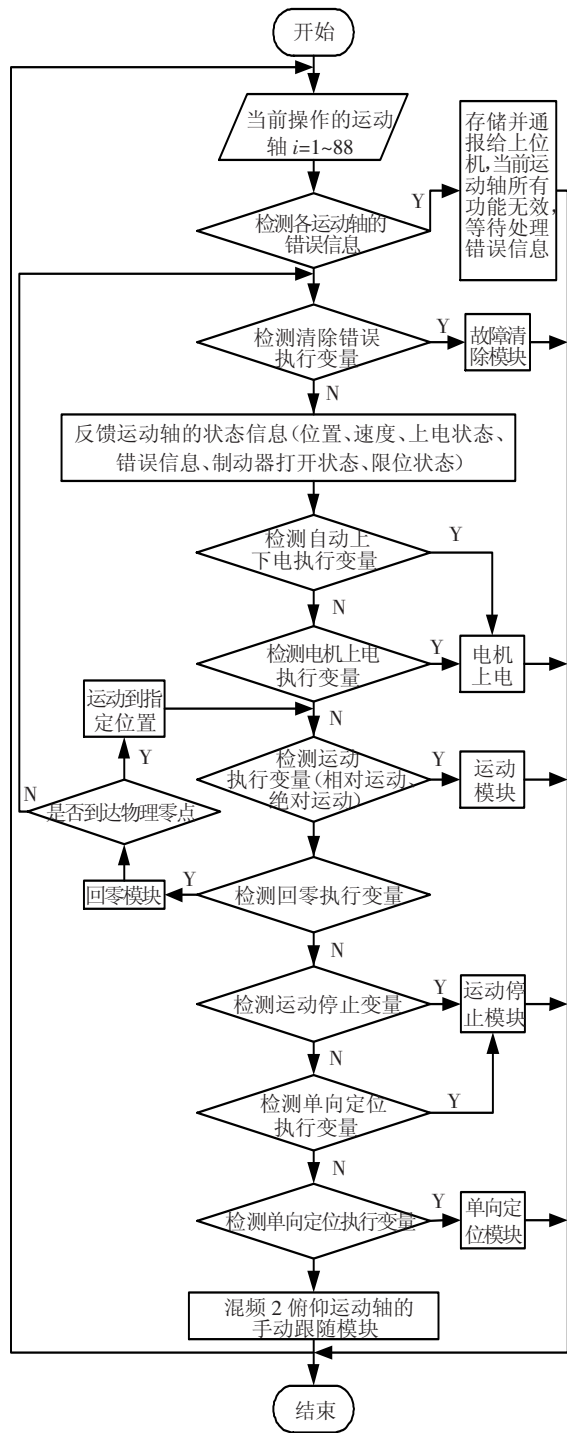


图 3 下位机 PLC 程序流程图

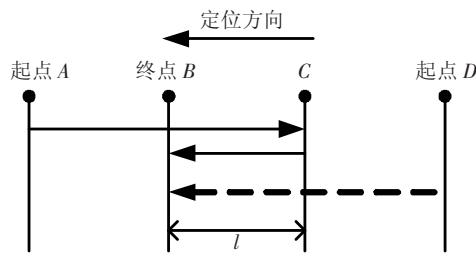


图 4 单向定位控制

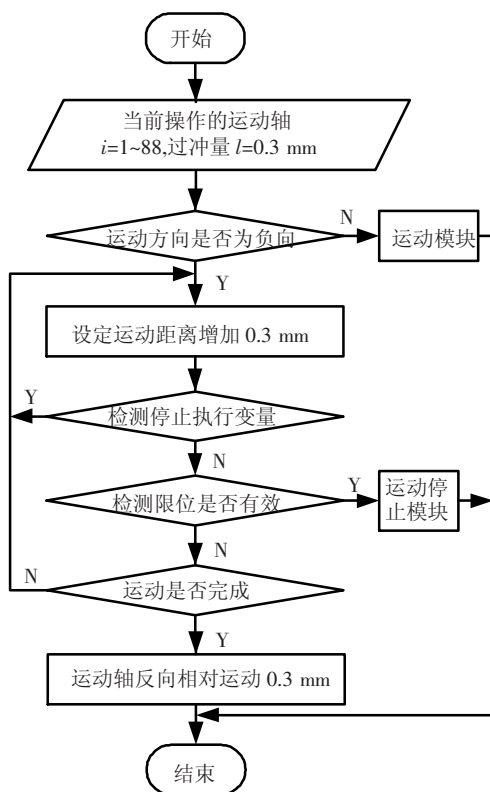
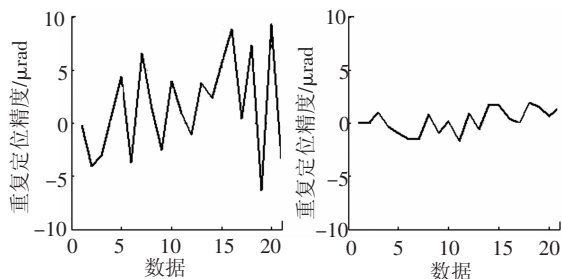


图 5 单向定位程序流程图



(a) 无单向定位重复定位精度 (b) 单向定位重复定位精度

图 6 重复定位精度对比实验

表 1 实验数据分析

实验条件	数据分析		
	平均值/ μrad	标准差/ μrad	极差/ μrad
无单向定位	3.45	4.87	9.30
单向定位	0.22	1.18	1.94

3.2.2 手动跟随技术

手动跟随任务要求镜架进行跟随运动时其姿态保持不变,跟随范围为 $20 \sim -10 \text{ mm}$,而反馈长度计的测量最行程为 12 mm ,显然长度计无法满足镜架全行程跟随运动的要求,因此将手动跟随机构设计如图 7 所示.当手轮传动机构锁紧时,长度计反馈镜架 AC 的位置,步进电机驱动机构前后移动使镜架产生绕 C 点的旋转运动.当锁紧机构松开、电机上电时,手动旋转手轮使得 C 点移动到 C' 点,长度计检测镜架位置的改变量为 $l = |CC'| - |BB'|$,并将该数值实时反馈给控制系

统,控制系统命令步进电机跟随手轮运动,使镜架产生整体移动的效果,同时将镜架移动距离累加并记录显示. 丝杠螺距为 1 mm,设定跟随误差为 2 mm足可以保证电机的可靠跟随运动,而不至于导致电机的跟随误差过大,手动跟随功能的程序流程图 8 所示.

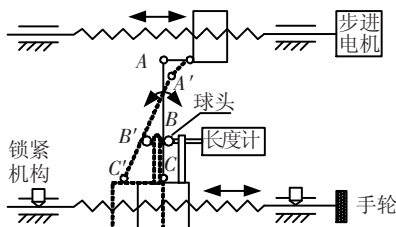


图7 手动跟随模块

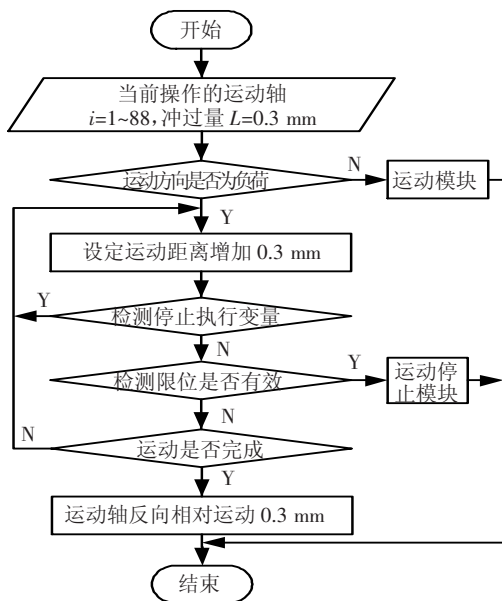


图8 手动跟随程序流程图

4 结 论

根据终端光学组件及反射镜架系统运动轴数量多且分散的特点,融合计算机技术、通讯技术、自动化技术设计了基于倍福的分布式控制系统,该控制系统具有可靠性高、维护容易等特点^[9-10]. 将单向定位技术、手动跟随技术应用其中,单向定位运动可以将开环运动轴的重复定位精度提高到 3 μrad 以内,手动跟随模块可以实现某旋转运动轴的整体移动的功能. 该方案已成功应用于激光惯性约束核聚变靶场光电系统,各项指标满足任务要求.

参考文献

- [1] 富宏亚, 韩振宇, 王红亮. 基于 PLC 和组态软件的分布式光学组件控制系统[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39(11): 1745 - 1747.
- [2] RAAFAY AM, OSAMAA, FAISAL S S, *et al.* Human machine interface using OPC (OLE for process control) [C]//Student Conference on Engineering Sciences and Technology. Karachi, Pakistan: Institute of Electrical and Electronics Engineering, 2004: 35 - 40.
- [3] 邵忠喜, 张庆春, 白清顺, 富宏亚. 高精度大口径光栅拼接装置控制算法研究[J]. 光学精密工程, 2009, 17(1): 158 - 165.
- [4] BRENNAN R W, FLETCHER M, NORRIE D H. An agent-based approach to reconfiguration of real-time distributed control systems[J]. IEEE, Transactions On Robotics And Automation, 2002, 8, 18 (4).
- [5] YU Z G, HUANG Q, LI J X, *et al.* Distributed control system for a humanoid robot [C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronic and Automation. Harbin, China: [s. n.], 2007.
- [6] LIAN F L, MOYNE J, TILBURY D. Network design consideration for distributed control systems[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2002, 10 (2): 297 - 307.
- [7] LEITAO P. A bio-inspired solution for manufacturing control systems [C]//Innovation in Manufacturing Networks, the Eighth IFIP International Conference on Information Technology for Balanced Automation Systems. Porto, Portugal. Boston: Springer-Verlag, 2008: 303 - 314.
- [8] Alfrío Dos Santos Sã, Raimundo José, Araújo Macêdo. An adaptive failure detection approach for real-time distributed control systems over shared ethernet [C]//Proceedings of COBEM 2005, 18th International Congress of Mechanical Engineering. [S. l.]: [s. n.], 2005: 6 - 11.
- [9] 侯宏录, 张户昌, 田进寿, 等. 条纹相机远程控制系统设计[J]. 西安工业大学学报, 2010, 30 (2): 121 - 125.
- [10] REN Shengle, LU Hua, WANG Yongzhang, *et al.* Development of a PLC-based tension control system[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2007, (20): 266 - 271.

(编辑 苗秀芝)