

稳定新经典撕裂模的 ECCD 可控镜极向电机控制系统

钱静 张洋 张立元 李波 王晓洁 徐昂东 刘海庆 张晓东

(中国科学院等离子体物理研究所 合肥 230031)

摘要 主动控制新经典撕裂模是托卡马克稳定运行的一个重要环节。为开展利用电子回旋电流驱动 (ECCD) 主动控制 EAST 托卡马克装置放电中新经典撕裂模的研究, 设计并实现了一套 ECCD 可控镜极向电机控制系统。文中描述了该电机运动控制系统实验测试平台的工作原理和硬件配置, 介绍了基于 LabVIEW 和 ACSPL+ 语言的电机运动控制系统的设计。该系统实现了直接读写底层伺服电机驱动器的运动参数, 具有软件功能强, 操作使用简便, 扩展性好等优点, 初步满足了实验研究需求。实验测试表明, 电机位移精度为 $5\ \mu\text{m}$ 的情况下, 可控镜转角精度可达 0.5° , 且电机运动控制系统的最小系统响应时间在 50ms 以内。

关键词 EAST 托卡马克; 电子回旋电流驱动 ECCD; 新经典撕裂模; 电机运动控制

中图分类号 TL62, TL65

Poloidal motor control system of ECCD steerable mirror to stabilize NTMs in Tokamak

QIAN Jing ZHANG Yang ZHANG Liyuan LI Bo WANG Xiaojie XU Handong LIU Haiqing

ZHANG Xiaodong

(Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract [Background]: Active control of the Neoclassical tearing modes (NTMs) is one of the key research for steady Tokamak operation. [Purpose]: In order to study active stabilization of the NTMs by electron cyclotron current drive (ECCD) in Experimental Advanced Superconducting Tokamak (EAST), a poloidal motor motion control system is designed and set up of the ECCD steerable mirror. [Methods]: In the paper, the work principle and hardware configuration are briefed of the newly-built test platform. Design of the control system based on LabVIEW and ACSPL+ is also described. The system can direct read and write motion parameters of the servo driver at low level, while it has such advantages as complete functions and easy usage and high scalability. [Results]: Test results of the control system show that the motor location resolution is about $5\ \mu\text{m}$ and the steerable mirror rotating angle resolution is 0.5° and the minimal system response time is within 50 ms. [Conclusions]: It can satisfy the preliminary need of experimental research on active NTMs control.

Key words EAST Tokamak, Electron Cyclotron Current Drive, Neoclassical tearing modes, Motor motion control

实验型先进超导托卡马克 (Experimental Advanced Superconducting Tokamak, EAST) 是一个具有非圆截面的全超导托卡马克等离子体放电装置^[1]。新经典撕裂模 (Neoclassical tearing modes, NTMs) 是获得高约束托卡马克运行的主要障碍之一^[2]。NTMs 控制是托卡马克稳定运行

的一个重要环节。近年来, 国内外各大托卡马克装置都开展了 NTMs 控制方面的实验研究, 例如美国的 DIII-D 上采用电子回旋电流驱动 (ECCD) 的方式进行了 NTMs 的控制实验。在德国 ASDEX-U 上开展了 NTMs 实时反馈控制的实验研究。较为普遍的用于稳定 NTMs 的控制策略是

基金名称项目(批准文号 EAST 全金属壁长脉冲运行下的破裂预测及主动避免实验研究) 资助

第一作者: 钱静, 女, 1975 年出生, 就职于中国科学院合肥物质科学研究院等离子体物理研究所, 任高级工程师。

通讯作者: 张洋, E-mail: zhangyang@ipp.ac.cn

收稿日期: 20XX-00-00, 修回日期: 20XX-00-00

在磁岛位置处沉积电子回旋电流驱动/电子回旋共振加热 (ECCD/ECRH) 以补偿由 NTMs 导致的自举电流缺失的部分^[3]。目前, EAST 利用 ECCD/ECRH 主动控制 NTMs 时所采用的电流驱动抑制策略是, 通过调节 ECCD 天线终端的可控反射镜的转角, 将等离子体中的 ECCD 沉积位置实时移动到磁岛处^[4], 并且当等离子体条件改变时, 能够保持 ECCD 沉积位置和磁岛的对齐。因此, EAST 装置放电的每炮期间, ECRH 天线系统的可控镜转动机构必须不断改变微波入射角以逐步缩小 ECCD 沉积位置和指定磁岛之间的距离。

ECRH 系统天线的可控镜转动机构是控制微波发射位置的关键机构, 负责将微波发射到等离子体中的实验指定区域^[5]。该微波发射天线采用准光学原理设计, 天线的每组通道包括一个固定的聚焦镜和一个可控的反射镜, 并采用一段不锈钢波导传输微波到真空室中, 然后通过位于真空室中的固定镜聚焦和可控镜反射后, 精确馈入到等离子体内部的实验所需共振层位置^[6]。在该可控镜转动机构中, 极向 (水平) 电机驱动可控镜镜面以镜叉为支点转动, 环向 (竖直) 电机驱动镜叉转动从而转动可控镜镜面, 两个方向的转动合成即可实现可控镜在指定范围内的任意角度变化, 进而保证控制微波波束馈入到等离子体内指定位置^[7]。在该可控镜转动机构中, 驱动控制参数到微波发射参数之间的转换分两步完成: 驱动电机位移到可控镜转角的转换; 可控镜转角到微波发射角的变换。其中驱动电机位移到可控镜转角的关系是通过直接将可控镜转动机构分解成极向和环向的两个独立的平面连杆机构, 利用几何方法, 分别分析得到极向驱动电机位移与可控镜极向转角的函数关系式和环向驱动电机位移与可控镜环向转角的函数关系式。因此, 通过快速精确地电机运动控制可以实现快速精确地控制可控镜的转动, 从而最终实现 ECCD 沉积和磁岛位置的持续对齐。

根据以前的仿真估算和实验数据分析^[2], 为了成功稳定和抑制 NTMs, ECCD 沉积位置和磁岛的径向距离不能大于 20mm, 即 ECRH 天线可控镜旋转的角度精度不能超过 1° 。根据实时控制的需求, 可控镜转动的完全控制周期应该尽可能的小, 期望的完全控制周期是在 50ms 以内。目前, 对于 NTMs 主动控制的需求, ECRH 天线可控镜的运动控制主要存在以下不足:

(1) 无法同时满足电机运动高精度和快响应两个性能指标, 也即实现毫米量级微行程范围内的高

速位移和精密定位。

(2) 电机运动模式单一, 电机运动参数被封装且难以修改, 无法满足灵活的物理实验研究的需求。核聚变装置上 NTMs 主动控制研究需要探索不同的控制策略, 底层电机的运动模式必须予以匹配, 并通过不断的实验摸索, 对运动参数和控制模式进行优化, 以最终满足未来聚变反应堆条件下的控制需求。

(3) 无法将可控反射镜转动过程中的实时运动数据与等离子体放电时间同步, 不利于后期实验数据的分析。

为了满足在全超导托卡马克 EAST 装置上开展 NTMs 实时反馈控制研究的需求和解决上述不足之处, 本文搭建了 ECCD 可控镜极向电机运动控制的实验测试平台, 其中采用了一款往复式定子永磁的零背隙线性电机作为可控镜的极向驱动电机, 驱动可控镜镜面以镜叉为支点进行快速精确地转动。根据 NTMs 主动控制研究的需求, 基于 LabVIEW^[8] 和运动控制器 ACSPL+^[9] 语言开发了电机运动控制系统, 发展了 5 种电机运动模式, 并在该实验平台上进行了相关的电机运动控制实验测试。

1 可控镜极向电机运动控制测试平台

EAST 稳定新经典撕裂模的 ECCD 可控镜极向电机运动需要实现毫米量级微行程范围内的高速位移和精密定位, 这就要求电机运动控制系统的速度和加速度足够大, 运动平稳, 定位精度高, 停留时间准确, 可靠性强, 并且能够自动控制。由此, ECCD 可控镜极向电机控制系统的测试平台按照硬件功能可主要划分为运动执行单元、运动控制单元、运动控制传感器和网络设备, 系统主要硬件如图 1 所示。

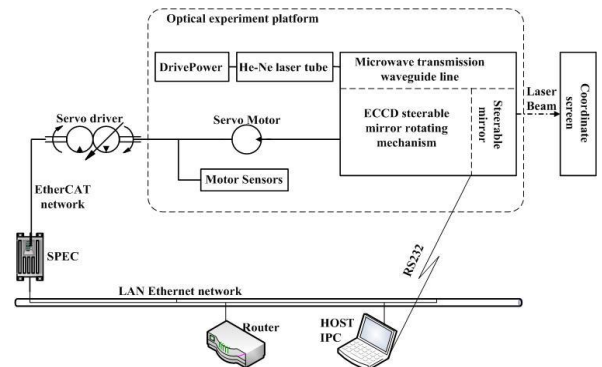


图1 系统主要硬件

Fig.1 Main hardware in the system

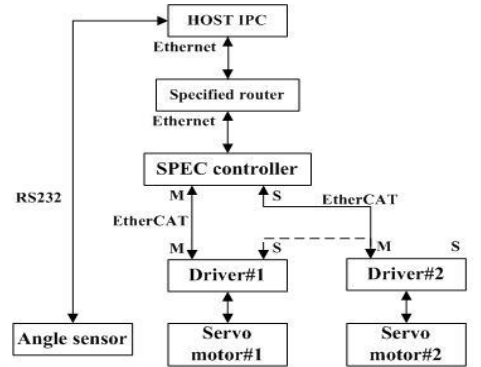
1.1 主要功能单元的硬件组成

运动执行单元主要包括 ECRH 系统天线的可控反射镜转动机构和可控反射镜极向驱动电机。其中, ECRH 系统天线的可控反射镜转动机构主要由镜框、推杆、镜叉、环向推杆和极向推杆组成。可控镜的极向电机采用一款定制的往复式定子永磁的线性伺服电机, 它具有大推力、零背隙、高刚性、尺寸小和易维护的特点, 可实现带载高速位移和精密定位。该极向电机的电机位移和可控镜极向转角之间具有确定的函数关系^[6]。

运动控制单元自下而上分别有伺服驱动器、运动控制器和基于 PXIE 的工控机。伺服驱动器是 MaxLink 公司^[10]的 MT-6/25-230 EC 驱动器, 它具有伺服频率响应高达 kHz 量级的电流环、速度环和位置环控制模式, 智能的自动调谐和调相模式, 防震算法和非线性位置控制算法, 并且可识别 MHz 量级的电机反馈信号。它通过连接上层控制器的串口或 CAN 总线接口, 可采用多种命令和变量进行驱动器的功能配置。运动控制器采用以色列 ACS 公司的 SPEC 控制器, 它可利用第三方驱动器的调节工具, 并具有强大的网络管理能力。作为运动控制系统的人机交互接口, 上位机必须具备可靠性和实时性, 同时配备双网口, 因此选用 NI 公司的机箱 PXIE-1092 和主控器 PXIE-8861。

运动控制传感器主要有集成在电机定子线圈里的霍尔传感器和热电偶、安装在电机定子外侧的非接触式线性光栅和光电感应开关、安装在反射镜背面的角度传感器。其中, 霍尔传感器提供启动期间电机沿着定子磁轨的相对位置, 防止启动期间电机励磁时电机可能出现的前冲。热电偶用于监测电机定子线圈温度。非接触式线性光栅提供分辨率达 $1\ \mu\text{m}$ 的电机位置反馈信号, 采用的是雷尼绍公司的 RGH24X 系列光栅, 其光栅读数头输出具备行业标准的数字方波且其光学滤波系统确保了极好的信号稳定性。2 个欧姆龙高速光电感应开关安装在电机定子外侧, 输出信号接伺服驱动器与 SPEC 控制器互连的快速光隔离可编程数字输入端子。SPEC 控制器使用该信号设置电机位移的安全范围和作为位置参考, 且该信号在驱动器和 SPEC 之间的传播延迟时间仅 $1\ \mu\text{s}$ 。基于电容微型摆锤原理的角度传感器具有重量轻、高抗振性、全范围精度为 0.1° 和响应时间为 10ms 的特点, 用于检测可控镜的实际极向转角。由图 2 中所示的系统通讯拓扑结构中可见, 顶层的工

控机通过串口和 RS232 通讯协议直接读取角度传感器通信模块传送来的可控镜极向转角数据。工业实时以太网 EtherCAT 是德国 Beckhoff 公司研发的一种将以太网与现场总线技术相结合的工业总线, 它满足伺服运动控制系统对稳定性、快速响应、同步性和精度等方面的要求, 被越来越多地应用到了运动控制领域^[11]。因此, SPEC 控制器和伺服驱动器之间的通信采用 EtherCAT 总线。ECCD 可控镜极向电机运动控制系统中, 主要网络设备有千兆以太网路由器、上位机千兆以太网接口、SPEC 千兆以太网接口、SPEC 百兆 EtherCAT 接口及其控制器和伺服驱动器 EtherCAT 接口及其控制器。通过 STP-CAT5e 网线和路由器配置, 前三者构成了上位机和 SPEC 之间通讯的局域千兆以太网。SPEC 和伺服驱动器都有 EtherCAT 主站接口和从站接口。通过 STP-CAT5e 网线和配置本地 EtherCAT 控制器, SPEC 和伺服驱动器建立了工业实时以太网。目前, 极向电机伺服驱动器的 EtherCAT 主站接口和 SPEC 控制器 EtherCAT 主站接口互连, 其中, 极向电机驱动器是 EtherCAT 网络中的主站点, SPEC 是极向电机驱动器的直接上级单元。今后, 环向电机伺服驱动器, 即图 2 中的驱动器#2, 可接入 SPEC 的 EtherCAT 从站接口, 成为星型拓扑网络中的一个从站点; 也可接入极向驱动器 EtherCAT 从站接口, 成为线型拓扑网络中的一个从站点, 如图 2 中的虚线所示。



Note: M --- EtherCAT Master port; S --- EtherCAT Slave port

图2 系统通讯拓扑结构图

Fig.2 System communication topology

1.2 可靠性设计

为保证准直测量的准确可靠, 可控镜转动机构及其极向电机固定安装在一个气浮精密隔震光学实验平台上。同时, 在可控镜转动机构的微波传输波导管内同心安装了氦氖激光管, 该激光管连续输出光斑直径仅 1mm 的激光, 以模拟传导

到ECRH天线发射端的微波波束。为了避免电机可能出现的过冲等行为损害电机和可控镜转动机械结构的性能,不仅在电机与极向拉杆的联接结构中安装机械限位块,而且在电机安全位移范围的左右极限位置处各安装了1个频率响应为kHz量级的光电感应开关。此外,按照电气安全标准,搭建了伺服驱动器的本地电气控制线路,该线路中包括单相断路器、线路滤波、交流接触器、带隔离和断路保护的电源适配模块、公用接地柱等,可以有效保障驱动器和电机的运行安全。除了从硬件上能切断电机及其驱动器电路的本地开关,上位机电机运动控制程序设计了通过软件远程强行终止电机运动的功能。此外,为保障设备和实验人员的人身安全,极向电机控制系统的所有设备接到同一个保护地(PE)。

针对高速位移电机系统存在的振动问题,预先调试电机运行参数的优化配置,并合理设置驱动器控制循环中的各项控制系数,得到能满足控制需求的经优化的电机运动参数。例如,根据NTMs主动控制的实验要求,电机总行程为几十毫米量级,设定电机运动经优化的加速度为 10^4 m/s^2 量级,急动度为 10^5 m/s^3 量级。考虑托卡马克装置实验的复杂现场环境,在ECCD可控镜极向电机运动控制的实验测试平台中,信号传输和检测尽量选用抗电磁噪声干扰的器件。例如,极向电机的引出电源线缆中加装了用作干涉滤波器的铁氧体磁芯,能抑制电路中的高频寄生噪声。电机位置反馈信号采用光栅和光电感应传感器,并以数字信号的形式传送给伺服驱动器。PXIE工控机、SPEC控制器以及伺服驱动器之间仅有数字信号传输。

2 软件系统

上位机安装SPEC运动控制器的软件包后,则具有了SPEC控制器的用户模式驱动(UMD)、COM库和C库等。其中,UMD提供了上位机和SPEC控制器之间的通讯。COM库支持上位机操作SPEC控制器、上位机和SPEC控制器之间通讯的应用程序开发,使得应用程序免于开发复杂的控制器通讯和同步的底层功能。同时,SPEC控制器具有专用的编程语言ACSPL+及终端命令。本系统在顶层的上位机上利用SPEC的UMD、COM库和ACSPL+语言,基于Windows 10操作系统和NI LabVIEW 2019编程环境开发了电机运动控制程序。同时,开发了8个存放在SPEC程序缓存中的本地ACSPL+程序。作为SPEC控制

器的MPU实时任务,本地ACSPL+程序的执行频率为1kHz,保证了上位机、SPEC和伺服电机及其驱动器之间的实时控制与响应。

2.1 上位机程序设计与实现

上位机电机运动控制程序为实验人员提供SPEC和上位机的以太网工况、SPEC与伺服电机及其驱动器之间的工业实时以太网工况,根据实验人员的控制命令和参数设置驱动电机执行相应的运动,同时获取电机运动数据和状态等信息。上位机程序的设计着眼于NTMs主动控制实验研究的需求,以功能齐全、操作简便和人机交互友好为原则,其主要功能模块包括:①Ethernet及EtherCAT网络及其设备状态信息的获取;②电机遍历行程和左右极限位置的信息获取;③规划运动轨迹所需的零点位置确定;④加载经优化的电机运动参数;⑤上位机规划电机运动路径;⑥电机运动实时数据的获取、存储和曲线显示;⑦可控镜转角数据获取;⑧运动控制器软急停按钮的调用;⑨五种运动模式的选择和实现。其中,五种运动模式是根据NTMs主动控制策略而确定的五种电机运动模式,包括点到点运动(PTP Mode)、快速点到点运动(FPTP Mode)、步进运动(Step Mode)、双模式步进运动(Step2Modes)和往返运动(Back & Forth Mode)。可控镜转角数据获取包括自动搜索上位机全部可用的串口资源、确认上位机和角度传感器的通讯状态以及读取角度数据。

上位机程序运行时的人机接口界面(HMI)设计以便于实验人员操作和在线监测数据为准则,划分为8个显示页面,页面名称和主要内容如图3所示。显示界面中,会隐藏部分主要功能模块,比如主要功能模块③,而部分主要功能模块则可能在多个显示页面中出现,比如主要功能模块⑦。功能模块⑧的显示界面由UMD提供,仅供用户调用而无法修改。由图3可见,对应5种电机运动模式的参数设置和数据显示分别设计了相应的页面,而5种电机运动模式的实时运动数据随时间的演化图则在同一个页面“Picture Interface”中显示。

上位机程序的主流程如图4所示。图4中,检查UMD是否处于运行状态以及生成运动控制器软急停按钮属于Ethernet及EtherCAT网络及其设备状态信息的获取。当UMD未运行或/和生成运动控制器软急停按钮失败时,程序直接终止。角度传感器的角度数据用于实验室测试时验证电机是否按照上位机控制命令驱动可控镜转动了指

定的角度，因此角度传感器工况及其和上位机的通讯状态不影响后续操作的进行。规划运动轨迹所需的零点位置包括电机运动的新零点和可控镜转动的新零点，判断依据是当模拟微波的激光沿水平方向入射到坐标屏幕时，电机所在位置和可

控镜的所在位置就是它们各自运动的新零点。此外，在控制电机执行任何运行模式前，都必须先执行电机运动全行程和左右极限位置的信息获取、规划运动轨迹所需的零点位置的确定以及加载经优化的电机运动参数这三个步骤。

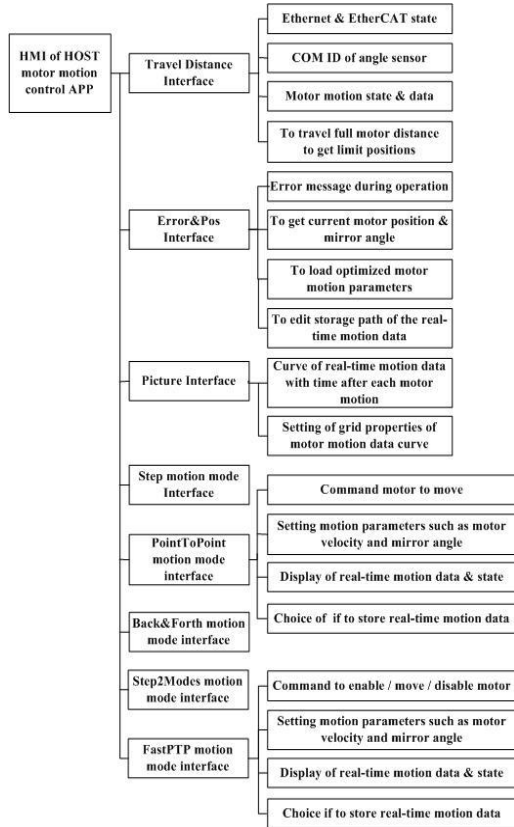


图 3 上位机电机运动控制程序的软件界面

Fig.3 HMI of Host motor motion control program

本系统上位机程序开发是基于 LabVIEW、SPEC 控制器 COM 库以及 ACSPL+语言。LabVIEW 调用 SPEC 控制器 COM 库的步骤如下图 5 所示。图 5 中，第 4 步后，根据所选用的通讯通道和需要执行的任务，在数据流中添加合适的 SPEC 控制器 COM 库中 Channel 对象的属性和方法。本系统采用千兆以太网接口作为上位机和 SPEC 之间的通讯通道。第 6 步 Channel 对象方法函数的输入变量分别是第 5 步设置的 Channel 对象属性和 SPEC 的以太网 IP 地址，本系统专用路由器设置 SPEC 以太网 IP 地址为“10.0.0.200”。这时，建立了上位机和 SPEC 之间的通讯通道。如果上位机要操作伺服电机及其驱动器，则在第 7 步添加该电机所对应轴号的 Channel 对象属性。目前，这里是唯一的一个主轴，轴号设置为 0。第 7 步后，通过调用 SPEC 控制器 COM 库中的属性和方法，设置规划电机运动轨迹所需要的电机运动参数、发送控制命令、获取电机

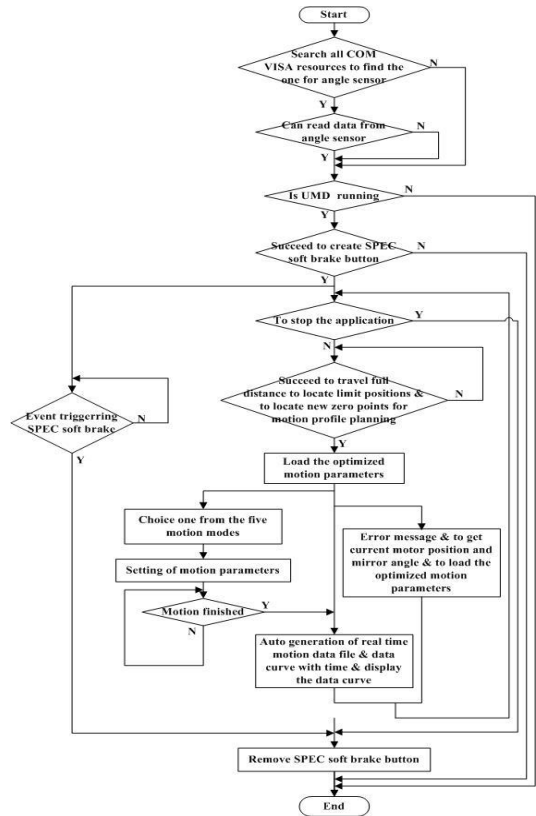


图 4 上位机电机运动控制程序的主流程

Fig.4 Main flowchart of Host motor control program

实时运动数据和状态等等。在全部操作和通讯完毕后，第 8 步调用 Close Reference 控件，关闭与之前打开的 ActiveX 对象相关联的 RefNum。

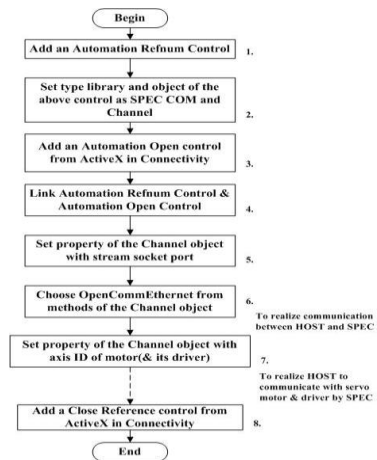


图 5 LabVIEW 调用 SPEC 控制器 COM 库的步骤

Fig.5 Steps to call SPEC COM library in LabVIEW

上位机程序的显示界面采用多线程并行, 为了避免在多个不同的显示页面中同时发送不同的电机运动控制命令而造成电机运动错误甚至发生故障, 设计了一个表征显示页面状态的数组变量 `TabStateArray` 来控制涉及电机运动控制的显示页的切换。该数组的所有元素初始值都是-1; 当某显示页处于命令执行状态, 则相应的元素为 0; 当某显示页处于命令执行完毕状态, 则相应的元素为 1。只有当所有显示页的 `TabStateArray` 元素都非 0 时, 才可切换到某个显示页下执行电机运动控制。此外, 在同一个显示页面中, 电机运动控制命令的开始和停止/完毕是一对互斥量, 确保了程序执行的逻辑顺序和电机运动控制命令执行的完整性。

2.2 运动控制器的本地程序设计

上位机程序可以不开发和调用 SPEC 控制器的本地 ACSPL+程序, 而是完全利用 COM 库和 UMD 实现通过 SPEC 控制电机的运动, 但这样会受到

Windows 操作系统的制约, 无法充分利用伺服电机及其驱动器的快速响应特性。上位机程序通过 COM 库中的相关函数和 ACSPL+终端命令直接调用 SPEC 本地 ACSPL+程序段, 则 SPEC 的 MPU 会以 1kHz 的时钟频率严格定时且并行执行多个本地程序。按照上位机所调用的本地程序命令序列, SPEC 的 MPU 以 20kHz 的时钟频率控制伺服驱动器及其电机的运动, 使得 SPEC 和伺服电机及其驱动器的快速响应性能相匹配。因此, 本系统开发了 8 个 SPEC 本地程序, 分别放置在 8 个程序缓存中, 实现的主要功能有: 遍历电机行程以获取极限位置信息、点到点运动模式控制、快速点到点运动模式控制、步进运动模式控制、双模式步进运动模式控制、往返运动模式控制、显示和获取电机实时运动状态和数据。图 6 是运动控制器本地程序中遍历电机行程以获取极限位置信息的功能实现流程, 其中的 `buf2` 指运动控制器的 #2 程序缓存。

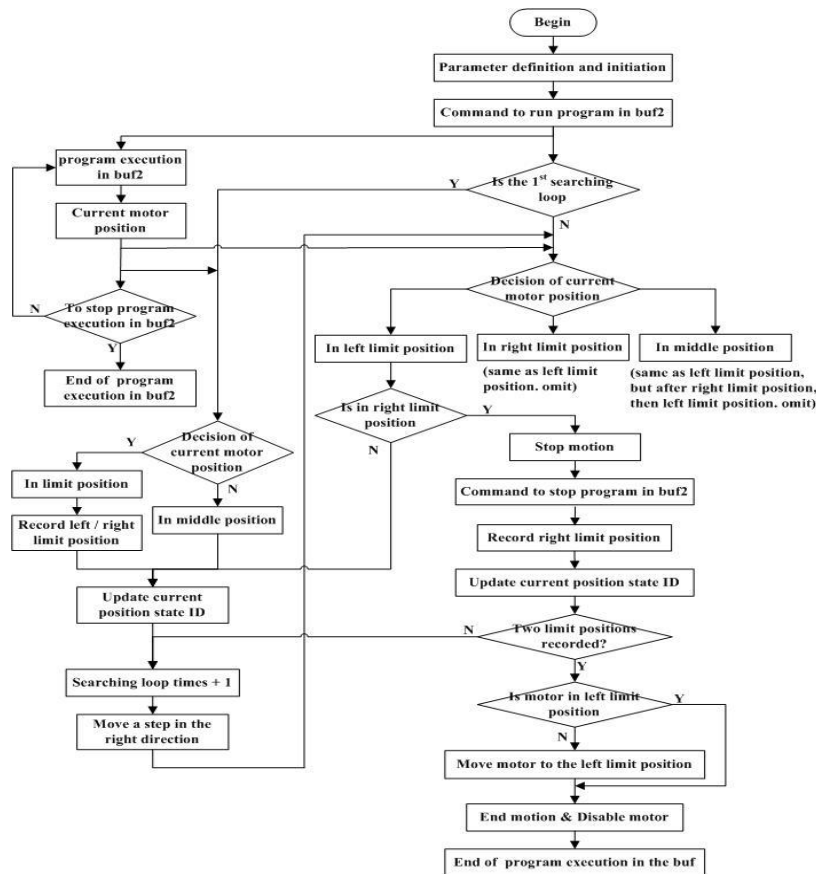


图 6 SPEC 控制器本地程序中遍历电机行程以获取极限位置信息的功能实现流程

Fig.6 Flowchart of travel motor full distance for limit location in SPEC local programs

上位机需要快速读写本地程序中的多个电机运动参数时, 则本地程序必须设置这些参数为全局变量。比如, 读取电机实时位置 `position`, 则在本地理

序中定义为 `global real position`。比如, 读取某次电机运动的实时运动数据包时, 则需要定义一个全局变量数组, 类似 `global real dataArray (5)(5000)`。

该数组表示包括 5 个电机运动参数以及在本次运动中的 5000 个实时数据样本。由于伺服驱动器的控制环频率是 5kHz，因此这个数据包最多只能保留 1000ms 时间段内的数据，数据间隔为 1ms。本次电机运动时间如果小于 1000ms，则该数据包中存在无效运动数据。本地程序检测到电机已被成功禁用时，会标记该时间点。上位机读取本次电机运动的实时数据包后，会舍弃该时间点之后的数据。本次电机运动时间如果超过 1000ms，则会产生数据溢出，这会造成上位机无法读取到本次电机运动的任何实时运动数据。因此，必须合理设置实时运动数据包的数组长度，一般分析 NTMs 主动控制时某种电机运动模式相应运动轨迹的可能最大时间并以该时间作为数组长度的设置依据。

为方便实验人员了解电机运动状态，同时尽量不影响系统响应速度，专门设计并开发了实时获取电机运动状态的本地程序。通常关注的电机运动状态参数主要有：电机当前位置、位置偏差（指当前位置和设定位置的差距）、当前速度、当前加速度、电机是否在运动和电机是否运动到位等。上位机程序利用 SPEC 控制器 MPU 可并行执行本地程序的特性，同时调用本地电机运动模式控制程序和本地电机运动状态获取程序。上位机通过 COM 库函数读取这些运动参数数据，并在上位机程序运行界面中显示。上位机程序运行界面中的电机运动数据刷新周期受操作系统和程序时间循环的制约，一般远超过 1ms。

SPEC 控制器具有可识别数字信号状态的通用输入变量 IN。本系统中，电机左右极限位置采用 2 个高速光电感应开关进行限位。电机运行到光电感应开关处，则开关输出高电平，否则输出低电平。SPEC 通用输入变量 IN0.21 和 IN0.20 分别对应左右光电感应开关的输出信号，因此能反映电机是否到达左右极限位置，比如，IN0.21=1 时表示电机到达左极限位置，而 IN0.21=0 时表示电机离开左极限位置。本地程序直接读取 IN0.21 和 IN0.20，并根据其数值变化判断电机是否到达极限位置以及判断是否换向。

3 极向电机运动控制系统测试

为开展利用 ECCD 可控镜进行主动 NTMs 控制的研究和实验验证控制策略，在实验室搭建了 EAST 装置 ECRH 天线系统发射微波的模拟平台，同时搭建了包括伺服电机及其驱动器、运动控制器、PXIE 工控机和网络设施的运动控制平台。可控反射镜转动机构固定在光学实验平台的机架上，将一只

可连续输出激光束的氦氖激光管安装在微波传输波导管内，以模拟传导到天线发射端的 EC 波束，同时保证该激光管射出的光束与波导管同圆心。该激光管发出的激光束经可控镜反射后，发射到电机运动控制系统实验装置前方固定的坐标屏幕上，投影出一个直径为 1mm 的红色光斑，通过标记该光斑的中心位置就得到激光在坐标屏幕上的投影位置，进而得到 EC 波束沉积位置。在该实验模拟平台上测试的重点在于验证系统控制逻辑功能、安全设计及错误处理；实测可控镜极向电机的 5 种运动模式，获取并分析了实验数据；同时测量模拟系统非真空条件下带载时的转动精度和时间响应。

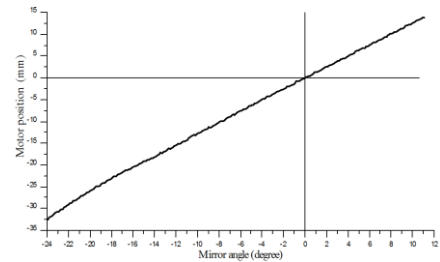


图 7 电机遍历行程时可控镜转角和电机位移的数据图

Fig.7 Mirror angle vs. motor position curve in whole distance

图 8 所示是电机遍历行程时，电机实际步长随时间的变化曲线。可见，电机按照设置的 125 μm 步长进行运动并且电机位移精度设置为 5 μm 时，全行程中实际步长的绝对误差不超过 3 μm 。图中电机位移突变到 58 μm 左右的点是必须过零点位置的设置所造成的，是正常的位移变化量。电机运动的步长是 125 μm 时，对应的可控镜转角是 0.15 $^\circ$ ；步长是 408 μm 时，对应可控镜转角为 0.5 $^\circ$ 。电机位移变化值固定为 125 μm 时，对应的可控镜转角实测值在 -0.1 $^\circ$ ~0.4 $^\circ$ 之间变化。可控镜转角的主要测量误差来自于机械机构以及角度传感器和位置传感器之间的频响差。实际可控镜的转角精度为 0.5 $^\circ$ 。

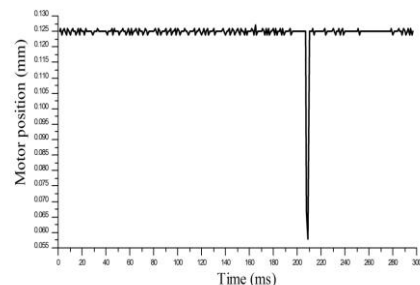


图 8 电机遍历行程时实际步长随时间的演化图

Fig.8 Motor real step vs. time curve in whole distance

图 9 是电机执行双模式步进运动模式时的实时位置数据随时间的变化图。电机在优化的电机运动参数下且速度设置为 100m/s, 先以步长为 400 μm 和步进间隔为 50ms 从 800 μm 处运动到 1600 μm 处, 然后以步长为-400 μm 和步进间隔为 50ms 从 1600 μm 处返回到 400 μm 处。上位机电机运动控制程序在获取到电机运动完毕状态信息时, 会自动从运动模式界面跳转到 Picture 界面并显示类似图 9 的电机位移随时间的变化曲线。

从上位机的电机运动控制程序发出电机运动指令到电机运动完毕, 直到上位机获取到电机反馈的运动已到位状态和实时运动数据的整个过程所花费

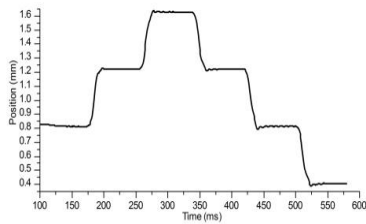


图 9 Step2Modes 运动时电机位移随时间的演化图
Fig.9 Motor position vs. time curve in Step2Modes

4 结语

通过电子回旋电流驱动 ECCD 主动稳定新经典撕裂模, 为了以高精度驱动位于磁岛中心处的局部 EC 驱动电流, 采用了具有可控镜的 EC 波束注入角进行实时控制^[12]。为了利用 ECCD 稳定 NTMs 的主动控制研究和实验验证的需求, 搭建了 EAST 装置 ECRH 天线系统发射微波的模拟平台和相应的电机运动控制平台。考虑到定位精度和快速系统响应之间的平衡, ECCD 可控镜极向驱动电机的定位精度设置为 5 μm , 可控镜转角精度为 0.5°, 最小的系统响应时间 t_{sys} 是 50ms, 解决了 ECRH 天线可控镜的运动控制对于 NTMs 主动控制需求存在的不足, 实现了预期的要求。

目前, 伺服驱动器的上级控制器信号接口没有配置模拟量输入端子, 角度传感器数据无法和电机运动数据精确对时, 造成一定的误差。后期可考虑伺服驱动器配置具有模拟量输入端子的上级控制器信号接口, 以提高可控镜角度测量的准确度。今后, 由于需要添加环向电机的运动控制, 即发展多电机

的时间作为整个极向电机控制系统的系统响应时间 t_{sys} 。当电机以快速点到点模式进行运动时, 该系统响应时间 t_{sys} 可达到最小值。图 10 所示, 在优化的电机运动参数下, 且速度设置为 100m/s, 以快速点到点模式从 -408 μm 处运动到 0 μm 处时的电机位移随时间的变化曲线。由图 10 中的实时数据曲线可见, 电机在 29.5ms 时到达设定的终点位置, 但因为惯性而存在 7 μm 的超调量。经过伺服驱动器的自动调节, 在 38ms 时基本稳定在设定的终点位置处。上位机获取到电机运动已到位信息和实时运动数据时, 可控镜转动角度为 0.5°, 系统响应时间 t_{sys} 小于 50ms。

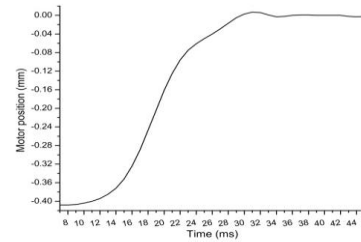


图 10 FPTP 运动时电机位移随时间的演化图
Fig.10 Motor position vs. time curve in FPTP

的同步驱动控制, 为保证运动控制系统的实时性以及提高与等离子体放电时的其它系统实验数据进行时间校准时的时间精度, 上位机的电机运动控制程序应基于 Linux 操作系统和运动控制器 C 库进行开发。

致谢 感谢 XXXX。

参考文献

- 1 S. Wu. An overview of the EAST project [J]. Fusion Eng. Des. 2007, 82: 463–471. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2007.03.012.
- 2 Y. Zhang,* X. G. Wang, X. J. Wang, *et al.* Design of Control System for Suppression of Neoclassical Tearing Modes with Electron Cyclotron Heating and Current Drive on EAST. FUSION SCIENCE AND TECHNOLOGY, 2016, 70: 62–72. DOI: 10.13182/FST15-138.
- 3 LIANG Shaoyong, XIAO Bingjia, ZHANG Yang, *et al.*

基金名称项目(批准文号 EAST 全金属壁长脉冲运行下的破裂预测及主动避免实验研究) 资助

第一作者: 钱静, 女, 1975 年出生, 就职于中国科学院合肥物质科学研究院等离子体物理研究所, 任高级工程师。

通讯作者: 张洋, E-mail: zhangyang@ipp.ac.cn

收稿日期: 20XX-00-00, 修回日期: 20XX-00-00

- Real-Time Detection for Magnetic Island of Neoclassical Tearing Mode in EAST Plasma Control System[J]. Plasma Science and Technology, 2016, 18(2): 197-201. DOI: 10.1088/1009-0630/18/2/17
- 4 R. J. La Haye, S. Günter, D. A. Humphreys, *et al.* Control of neoclassical tearing modes in DIII-D [J]. PHYSICS OF PLASMAS, 2002, 9(5): 2051-2060. DOI: 10.1063/1.1456066.
- 5 XU Handong, WANG Xiaojie, LIU Fukun, *et al.* Development and Preliminary Commissioning Results of a Long Pulse 140 GHz ECRH System on EAST Tokamak [J]. Plasma Science and Technology, 2016, 18(4): 442-448. DOI: 10.1088/1009-0630/18/4/19.
- 6 胡泽凯, 吴杰峰, 李波, 等. EAST ECRH 天线平面镜转动机构参数计算与验证[J], 核聚变与等离子体物理, 2015, 35(4): 350-355. DOI: 10.16568/j.0254-6086.201505011.
- HU Zekai, WU Jiefeng, LI Bo, *et al.* Calculation and determination of parameters on plane mirror's rotating mechanism in EAST ECRH antenna [J]. Nuclear Fusion and Plasma Physics, 2015, 35(4): 350-355.
- 7 张立元, 王晓洁, 吴大俊, 等. EAST ECRH 系统天线转动镜面空间连杆驱动机构分析[J]. 机械设计与研究, 2015, 31(5): 5-8. DOI:10.13952/j.cnki.jofmdr.2015.0173.
- ZHANG Liyuan, WANG Xiaojie, WU Dajun, *et al.* Analysis of Space Linkage Driving Mechanism for EAST ECRH System Launcher Rotating Mirror [J]. Machine Design and Research, 2015, 31(5): 5-8.
- 8 江建军, 孙彪. LabVIEW 程序设计教程 [C]. 北京: 电子工业出版社, 2012.
- JIANG Jianjun, SUN Biao. LabVIEW Programming Course [C]. BeiJing: Publishing House of Electronics Industry, 2012.
- 9 MaxTune Servo Drive User Manual, Revision 4.01 [EB/OL]. : <https://acsmotioncontrol.com/>.
- 10 SPiiPlus Command & Variable Reference Guide, July 2017, Document Revision: 2.40 [EB/OL]. : <http://www.pbasystems.com/>
- 11 李春木, 章明众, 郑新武, 等. EtherCAT 总线在伺服运动控制系统中的应用[J]. 机电工程, 2011, 28(11): 1336-1338.
- LI Chunmu, ZHANG Mingzhong, ZHENG Xinwu, *et al.* Application of EtherCAT fieldbus in servo motion control system [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2011, 28(11): 1336-1338. DOI:1001-4551(2011)11-1336-03.
- 12 JT-60SA Research Plan, Research Objectives and Strategy, Version 4.0 2018, September, JT-60SA Research Unit.

基金名称项目(批准文号 EAST 全金属壁长脉冲运行下的破裂预测及主动避免实验研究) 资助

第一作者: 钱静, 女, 1975 年出生, 就职于中国科学院合肥物质科学研究院等离子体物理研究所, 任高级工程师。

通讯作者: 张洋, E-mail: zhangyang@ipp.ac.cn

收稿日期: 20XX-00-00, 修回日期: 20XX-00-00