

# 质子治疗旋转机架控制系统设计与实现

丁廷洋, 龚时华, 邓建春, 马海, 孙恺文

(华中科技大学 机械科学与工程学院, 武汉 430074)

**摘要:** 旋转机架是质子治疗设备中的关键部件, 其主要功能是对治疗头、束流输运线等关键部件进行承重, 并旋转至一定角度实现质子束对肿瘤特定角度的照射; 针对在放疗过程中终端控制旋转机架运动的控制需求, 提出了一种质子治疗旋转机架控制系统设计方法; 基于 Socket 通信技术开发了总控室的服务端程序和工控机的客户端程序, 并运用 MFC 类库设计了服务端与客户端的人机交互界面; 在此基础上, 在客户端程序中开发了基于 S7.Net 库的 PLC 上位控制模块; 为保证医护平台在机架运动过程中的水平, 在 PLC 程序中设计了一种同步运动控制模型, 实现机架和医护平台的同步运动; 现场实验结果表明: 该系统可以终端控制旋转机架以 0.1~1 rpm 在  $-180^{\circ}$ ~ $180^{\circ}$  范围内运动, 以及控制气动踏板的伸出和退回, 还会实时监控机架旋转角度和旋转速度, 适用于化疗过程中的工作环境, 并验证了设计的同步运动控制模型可以实现旋转机架和医护平台同步运动。

**关键词:** 质子治疗; 控制系统; SOCKET; S7.Net; 同步运动

## Design and Implementation of Control System for Proton Radiotherapy Rotating Frame

DING Tingyang, GONG Shihua, DENG Jianchun, MA Hai, SUN Kaiwen

(School of Mechanical Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** The rotating frame is the key component of proton therapy equipment. Its main function is to support the weight of key components such as a therapeutic head and beam transport line, and to rotate to a certain angle to realize the irradiation of proton beam at a specific angle of tumor. Aiming at the control requirements of terminal control rotating frame movement during radiotherapy, a design method of proton therapy rotating frame control system is proposed. Socket communication technology is used to develop the server program of main control room and client program of industrial computer, and the human-computer interaction interface between server and client is designed using MFC class library. On this basis, the PLC upper control module based on S7.Net library is developed in the client program. In order to ensure the level of the medical platform in the process of frame motion, a synchronous motion control model is designed in the PLC program to realize the synchronous motion of the frame and medical platform. The field test results show that the system can control the movement of the rotating frame in the range of  $-180^{\circ}$ ~ $180^{\circ}$  and the speed of 0.1~1 rpm, and control the extension and retraction of the pneumatic pedal. It also monitors the rotation angle and speed of the frame in real time. The system is applied in the working environment during chemotherapy. It is also verified that the designed synchronous motion control model can realize the synchronous motion of the rotating frame and medical platform.

**Keywords:** proton radiotherapy; control system; SOCKET; S7.Net; synchronous rotation

## 0 引言

质子治疗装置是国际上新型治愈肿瘤的大型医疗设备, 是一套极其精密复杂的系统, 涉及加速器物理、磁铁、真空、治疗学、机械、辐射防护、软件等多个学科领域, 综合性较强。旋转机架是质子放疗设备中的关键部件, 其具有结构大的特点主要功能是对治疗头、束流输运线等关键部件进行承重, 承载重量从 100~200 吨不等。除此之外, 质子治疗装置在进行放疗时, 一般会从多个角度对肿瘤组

织进行放射。因为质子治疗如果只用一个照射方向, 则皮肤与肿瘤间的正常细胞会受到较大的肿瘤辐射剂量, 从而形成不同程度的伤害。所以为减少这部分损害带来的负面影响和增加治疗的焦皮比值, 目前的治疗疗程采取从不同方向照射的方案, 将总剂量分成多个辐射方向, 使得肿瘤前部的正常细胞仅受到 1/3 左右的相对剂量, 而肿瘤后的正常细胞基本上不会受到损伤。其中旋转机架的作用就是支撑质子束流从不同的角度照射至病灶的机械结构, 因此

收稿日期:2022-12-13; 修回日期:2023-03-02。

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0105306)。

作者简介:丁廷洋(1999-),男,在读硕士。

引用格式:丁廷洋,龚时华,邓建春,等. 质子治疗旋转机架控制系统设计与实现[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(11):159-166.

几乎所有的质子治疗中心都配置了多台旋转机架且对旋转精度要求很高。

质子治疗旋转机架仅自带本地控制系统,因此工作人员只能在机架周围进行人为操作控制。为了满足与治疗头等设备的联合调试的需求,需要工作人员在总控制室终端远程控制质子治疗旋转机架,并对旋转机架的运行状态进行实时跟踪。同时,旋转机架周围环境存在高压和强辐射等因素的危险,会对工作人员的身体造成伤害。因此,亟需为工作人员提供更安全的且适用于化疗过程的操作环境。目前,针对质子治疗系统的终端控制问题,文献 [1] 中利用 Pcaspy 实现了远程控制计算机到上海质子治疗装置中控室内,基于 EPICS 控制系统的接入并通过远程控制界面实现了对质子注入器的实时状态进行监控,以及对质子注入器的重要参数进行远程设置的功能。美国 ProBeam 质子治疗系统是监控扫描治疗头动态峰值的关键。该系统终端控制治疗关键参数,使所有功能都通过一个集成用户控制台实现,让用户能够直观且高效地完成工作<sup>[2]</sup>。

同时,由于医护平台与旋转机架连接在一起,旋转机架在运动状态下及旋转至一定角度时,医护平台会随旋转机架一起旋转,无法使医生在平台上工作。因此需要开发一种同步运动控制模型,实现机架和医护平台的同步运动。沈荣<sup>[3]</sup>等提出了基于继电器方法的 PID 自整定方法,使系统反应迅速,超调量小。刘青正<sup>[4]</sup>等在传统 PID 控制算式的基础上引入了同步偏差调节项构成新的 PID 闭环同步控制器,并验证了算法的有效性。张德政<sup>[5]</sup>等运用交叉耦合控制策略,分别设计 4 台转向电机的位置补偿器。

针对以上问题,本文以质子治疗旋转机架作为控制对象,基于 C/S 模式开发一套从总控服务端到工控机客户端,再由工控机客户端到 PLC 控制器控制电机驱动器的质子治疗旋转机架控制系统。同时,为了满足旋转机架运动状态下医护平台水平的需求,设计了旋转机架电机和医护平台踏板电机的同步运动模型。其中的系统总控服务端在 TCP 协议的基础上采用了 Socket 通信接口和多线程架构实现与工控机客户端的通信。而工控机客户端则基于 S7.Net 库对 PLC 控制器发送指令。最后通过质子治疗旋转机架的现场试验验证了该控制系统能够满足质子治疗过程中的控制需求。

## 1 旋转机架控制系统整体设计

集中控制方式曾广泛应用于工业控制系统中,所有的功能都在一个处理模块中实现,然而由于放射治疗对其控制系统功能和性能的要求十分严格,若采用集中控制方式会使得系统的可靠性和功能扩展能力受到很大的限制,并且会导致系统监控对象过于复杂和庞大,使系统的运行速度和可维护性受到一定的影响<sup>[6-7]</sup>。因此,质子治疗控制系统采用主从分布式控制方式,把系统模块分为 9 个子系统模块,分别为加速器系统、束流系统、机架系统、图像引

导系统、治疗头系统、治疗床系统、附件系统、安全系统以及总控制台。每个子模块都具有自主处理能力,并由总控制中心通过系统网络实现集中下发指令和实时监控。这种控制方式符合放射治疗控制系统的功能和性能要求,也为未来进行功能模块扩展提供了便利。

### 1.1 旋转机架控制系统架构

本文着眼于研究总控制室到机架系统的控制系统。控制系统的硬件配置结构如图 1 所示,由总控服务端、上位工控机客户端、PLC 控制器和伺服驱动器所组成。首先,总控服务端与工控机客户端之间以 TCP/IP 协议为基础,采用了 Socket 通信接口和多线程架构直接通讯,并在设计的人机交互界面上提供了参数设置、人机接口、数据显示和故障诊断等功能。而工控机客户端则采用以太网的方式连接 PLC 控制器,并基于 S7.Net 库实现发送运动控制指令和读取机架状态数据的功能。PLC 控制器根据上位机发出的运动指令通过 IO 模块分别向机架驱动器和踏板驱动器输出脉冲和方向信号,驱动器通过接收的脉冲频率和数量控制伺服电机运行的速度和角度,伺服电机上的编码器将角度、速度信息反馈到 PLC 控制器,再由上位工控机读取数据发送回总控服务端。

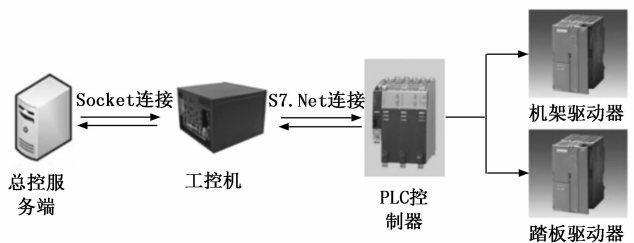


图 1 控制系统硬件配置结构图

### 1.2 需求分析

对于总控系统的控制软件,包含有“治疗”模式和“物理师”模式两种模式。“治疗”模式是根据治疗排程,完成病人质子治疗的整个过程。“物理师”模式类似于治疗模式,但可以重复导入治疗计划文件执行流程,且治疗时的特定参数与指标可以超越,是用于 QA 目的,物理师结合临床经验,用真实的治疗计划数据,验证治疗过程的质量,不影响真实的病人治疗数据。其中模式之间是互斥性的,一种模式执行完成后,另一种模式才可以执行,不能混乱。执行过程中,不能被另一种模式中断。

在进行质子治疗过程中,为了实现旋转机架运行状态的实时跟踪,软件界面上应当显示机架的实时状态,包括机架的当前角度和当前速度,踏板的状态等关键信息。质子治疗设备一般从多个角度对肿瘤组织进行放射,各角度放射剂量总和达到所需剂量即可,这样皮肤和肿瘤之间的正常组织细胞只需接受较低的放射量,大大降低了放疗给患者所带来的额外伤害,因此,软件需能够控制旋转机架以目标速度转动到目标角度,以保证质子束能从各个角度

对肿瘤进行照射, 同时, 软件应当设置机架的步进功能。在医护平台上, 还有一个气动踏板装置, 踏板用于给医生提供站立位置, 因此软件需要能够控制踏板的伸出或缩回, 满足治疗过程的功能需求。为了保证工作人员和设备的安全, 软件应当设置急停功能, 避免发生意外事故。在下位机 PLC 控制器中, 需设计一种同步运动控制模型, 使驱动机架旋转的电机和驱动医护平台旋转的电机保持同步运动状态, 以保证医护平台在工作时的水平。

## 2 旋转机架控制系统关键技术

### 2.1 SOCKET 通信原理

Socket 可以看成是两个网络应用程序进行通信时, 各自通信连接中的端点, 用一个 IP 地址和一个端口号标识<sup>[9]</sup>。其中, 服务端至少需要创建两个 Socket 对象, 一个负责监听客户端的连接请求, 另一个则负责与客户端的通信, 这个 Socket 是在收到客户端连接时创建。客户端通过创建一个 Socket 对象来初始化一个到服务端的 TCP 连接, 其中必须指定要连接的服务端的 IP 地址和端口<sup>[10]</sup>。

如图 2 所示, Socket 的通信基本流程为: 总控制室先启动并初始化服务端程序。程序运行后会先利用 Bind 函数绑定固定端口, 再调用 Listen 函数在端口处监听客户端的连接请求。一旦接收到客户端的连接请求, 服务端程序就会立即调用 Accept 函数接受客户端的连接请求, 达到与客户端进行连接的目的<sup>[11]</sup>。检测到客户端连接无误, 程序将继续进行, 否则将重复以上步骤。在服务端程序运行期间, 工控机将启动客户端程序。客户端程序启动后会先调用 Connect 函数向服务端递交连接请求。服务端收到请求并与客户端成功连接后, 就可以实现向客户端发送命令的功能。最后客户端将读取命令并回应服务端, 一次服务端与客户端的交互就此结束。

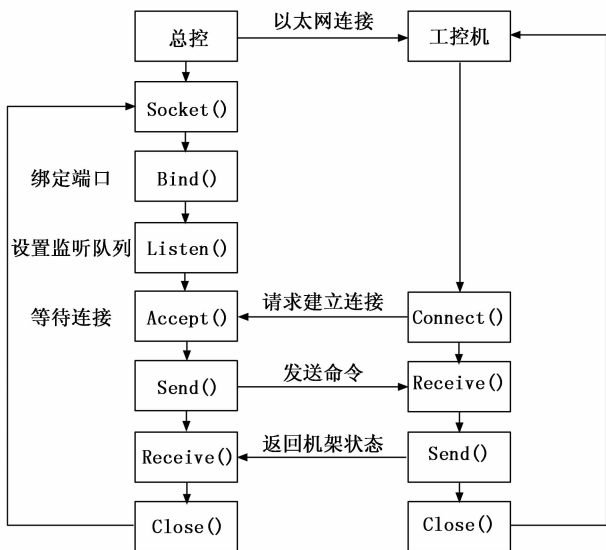


图 2 旋转机架控制系统通信流程图

### 2.2 S7.Net

S7.Net 是一个 PLC 驱动程序, 完全用 C# 编写, 适用于 Siemens PLC 和以太网连接。在控制 PLC 过程中, 系统使用规定的构造函数, 使用 S7.Net 创建驱动程序。读取数据主要使用 S7.Net 中以下几种方法。由于约定传送旋转机架和气动踏板位置信息分别为一个字节, 主要使用的方法是 ReadBytes, 该方法从确定的内存位置读取最多 200 个字节 (协议的实际限制)。而控制旋转机架转动速度和转动角度, 以及控制气动踏板伸缩的这些参数则是创建一个结构写入 PLC, 主要使用 WriteStruct 方法, 该方法将程序中的结构写入指定的 DB 中。此外, 软件在执行的每个方法上使用 S7.Net 库中的错误处理的方法, 以在运行驱动程序时捕获错误信息。

PLC 内部数据的传统读写方式是利用触摸屏组态, 和 HMI 建立连接并传输数据。而 S7.Net 提供了另一种连接方式, 可以利用 C# 读写 PLC 内部的数据。与传统方式相比, 使用 S7.Net 可以做出比 WinCC 更强大的界面, 可以对数据更好的利用, 可以更高频率获取 PLC 数据。

### 2.3 PLC 同步运动控制模型

图 3 为旋转机架双电机驱动示意图, 在大多数工作情况下, 为了保证医护平台处于水平状态, 需将控制机架和踏板的电机设置为反向同步运动模式。

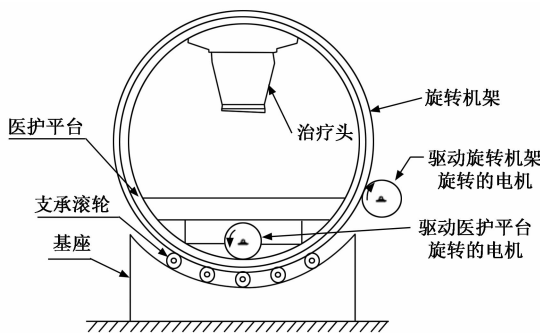


图 3 旋转机架双电机驱动示意图

#### 2.3.1 同步运动控制模型组成

本同步运动控制模型采用主从式结构的同步系统, 利用 PROFINET 方式实现主轴和从轴间的同步运动。这个过程需要运用两台 PLC 进行操作, 使它们通过 PROFINET 进行连接, 分别负责驱动旋转机架运动的电机作和驱动医护平台旋转的电机的运动控制。其中驱动旋转机架运动的电机轴作为引导轴, 负责其运动的 PLC1 作为主控制器, 并采用 Ethernet 的方式与上位机进行交互; 驱动医护平台旋转的电机轴作为跟随轴, 负责其运动的 PLC2 为从控制器。模型结构简图如图 4 所示。

该模型使用的 PLC1 和 PLC2 控制器均采用当今广泛使用的西门子 S7-1500PLC 控制器。其使得用户程序可通过运动控制指令启动引导轴和跟随轴的运动控制工作, 也可以根据运动控制指令的输出参数实时反映运行中作业的状态。

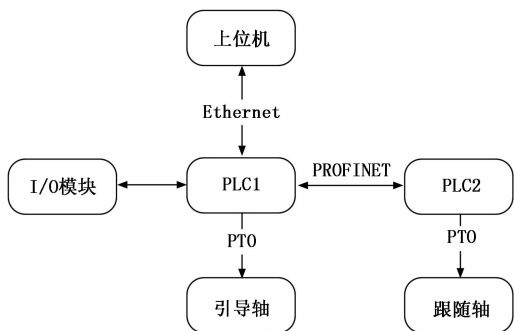


图 4 模型结构简图

除此之外，其还可以使用工艺数据块在运行期间访问运动轴的状态信息及更改特定的组态参数。

### 2.3.2 同步运动控制模型原理

同步运动控制操作原理如图 5 所示，将驱动旋转机架运动的电机作为跟随轴和驱动医护平台旋转的电机作为引导轴相关联。启动主控制器 PLC1 后，PLC1 会将上位机输入的运动控制指令解码转换成速度指令来控制引导轴运动，然后将速度指令转码成指定的脉冲信息。脉冲信息再通过 PROFINET 传递至从控制器 PLC2，最后由 PLC2 控制跟随轴与引导轴同步运动。因此以上操作过程被称为同步操作过程，按以下 3 个阶段实现：第一阶段是将跟随轴与主值进行同步；第二阶段是跟随轴按照同步操作功能跟随引导轴的位置进行同步运动；第三阶段则是超驰同步操作，主动同步操作会被跟随轴上的运动控制工作超驰。在进行同步操作过程中，由引导轴提供同步操作的主值，本文系统中引导轴和跟随轴的耦合主值为 1 144：500。

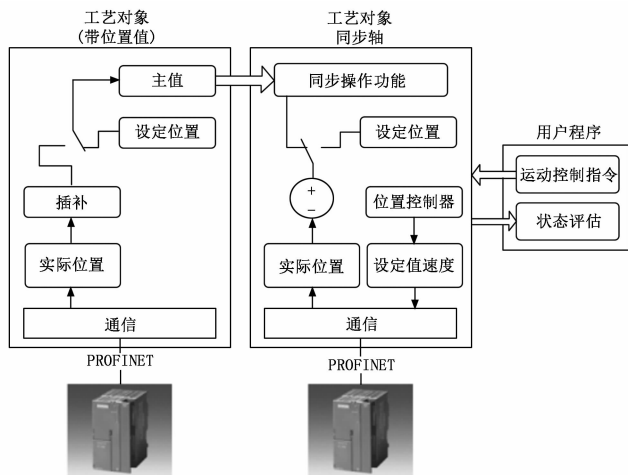


图 5 同步运动控制模型

## 3 系统软件设计

### 3.1 接收和发送消息约定

总控系统是所有子系统基于 TCP 协议直接通讯，因此约定消息头，发送固定消息体，不需要消息尾，通过解析数据包根据标识属性来进行业务处理。约定消息头为 16 字节。其中 1~4 字节约定传递 8 888 作为消息开始的标识，5

~8 字节约定为消息的总长度。9~12 字节约定为数据内容的长度。13~16 字节作为补位，后期考虑用于标识消息类型，如图片、文本、文件等。17 字节开始为数据内容，数据内容应遵循约定的数据格式。

质子治疗控制系统属于医疗软件系统，对数据的实时性有较高要求，为了减少数据传递的大小并易于解析，故约定数据格式类型为 Json 格式。数据内容包括 6 个字段，如表 1 所示，分别为 MessageId、DeviceId、SessionId、ActionCode、ActionType 和 Data。其中 MessageId 是消息唯一 Id，一般取 GUID 或 UUID（保证唯一即符合条件），消息发送必须有回复，MessageId 作为消息回复确认的标识，一来一回表示一个完整的消息周期。DeviceId 是设备 Id，用来标识子系统，每个子系统都应该有一份初始配置，记录其他子系统的设备 ID，或者约定使用子系统的标识，例：TCS、GNT 等。SessionId 是会话 Id，消息传递之间各端的会话 Id，通讯开始时交换 SessionId，一次完整的会话通讯中需要保持一致，不允许改变，每次通讯需要验证该会话是否存在，作为预留字段。ActionCode 是动作编码，每次数据交互都有特定的意义，为每个需要通讯的业务场景进行编码，标识动作内容，固定 4 个字符长度 1 000~9 999 共 9 000 个 Code。ActionType 是动作类型，一共分为 5 个：Inform（通知）、Command（指令）、Exception（异常）、Confirm（消息确认）、Heartbeat（心跳），用编号代替，与动作编码配合使用。Data 是消息的具体内容，需要序列化，根据不用业务场景内容也不同，等待接口确定后，可具体约定。

表 1 数据内容字段信息

名称	必要	类型	说明
MessageId	必要	String	消息 ID
DeviceId	必要	String	设备 ID
SessionId	非必要	String	会话 ID
ActionCode	必要	Int	动作编码
ActionType	必要	Enum	动作类型
Data	必要	String	消息内容

### 3.2 总控服务端和工控机客户端

MFC 通信功能基于 Socket 接口编程实现，为多线程架构，分为界面线程和工作线程。前者用来独立地处理用户输入和响应用户事件，后者用于后台任务。总控服务端主要负责监听客户端的连接与断开，在界面线程创建套接字，获取工控机的 IP 地址和端口号，在工作子线程完成接收数据工作，在检测到连接成功的前提下会采用一问一答式与工控机交换信息，提高系统效率。

如图 6 所示，左侧为总控服务端工作流程，右侧为工控机客户端工作流程。其主要工作流程是：总控服务端开启 Socket 服务，调用 Socket 类中的 Listen（）方法负责监听，同时调用 Accept（）方法等待工控机发送连接请求。

工控机客户端调用 Connect () 方法每隔 100 ms 向服务端发送连接申请。成功连接后, 程序设置了 100 ms 时钟函数, 总控服务端每隔 100 ms 调用 Send () 方法向客户端发送询问当前状态指令, 以获取旋转机架实时状态, 并且设置旋转机架工作模式, 发送运动指令。并对工控机客户端返回的数据进行处理, 在界面上显示出当前角度、当前速度和踏板位置等关键信息。

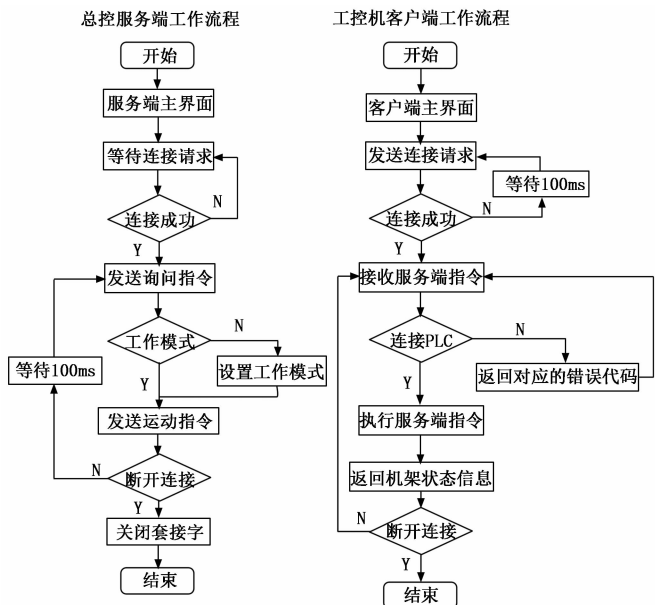


图 6 通信功能工作流程图

总控服务端界面如图 7。在收到工控机返回工作模式设置完成之后, 工作人员便可以在服务端界面上设置设定角度和设定速度, 以及踏板位置, 程序则会将会数据打包发送给工控机, 工控机程序解包数据, 将各个参数写入 PLC, 并且启动电机时会向 PLC 发送一个上升沿, 缓冲 0.5 s 之后, 再给 PLC 一个下降沿, 模拟一次 0.5 s 按键动作。控制踏板运动时, 设置按钮关闭, 待踏板运动完成之后, 按钮才会重新亮起, 防止发生意外事故。此外, 软件在执行的每个方法上使用 S7. Net 库中的错误处理的方法, 以在运行驱动程序时捕获错误信息, 并返回错误代码。



图 7 服务端界面

工控机客户端界面如下图 8 所示。界面上方为手动连接 Socket 和 PLC 部分, 在 Socket 连接区中设置总控服务端

IP 地址和端口号, 在 PLC 中设置 PLC 的 IP 地址和 PLC 类型。界面下方则是本地机架控制部分, 用于本地调试从工控机到 PLC 控制器的控制功能。右侧则是显示工控机客户端收到的消息, 用于调试总控服务端到工控机客户端的 Socket 通信功能。



图 8 客户端界面

### 3.3 下位机 PLC 同步运动模型

如图 9 所示, 该 PLC 控制系统主要设置有手动模式和自动模式两种工作模式, 由两档选择开关进行选择。手动模式主要用于调试系统在自动模式下的控制功能, 其中有控制气动踏板功能, 设置机架的运动模式, 有增量转动和连续转动功能, 同时, 可以控制机架运动速度和设定目标角度; 自动模式则是实际正常工作所使用的控制程序, 其中控制机架和气动踏板的电机有两种控制方式, 分别为同步转动和异步转动, 大多数情况下都需要使用同步转动, 这样可以在机架运动或者倾斜一定角度时, 医护平台始终保持水平, 保证医生在医护平台上操作的安全性。

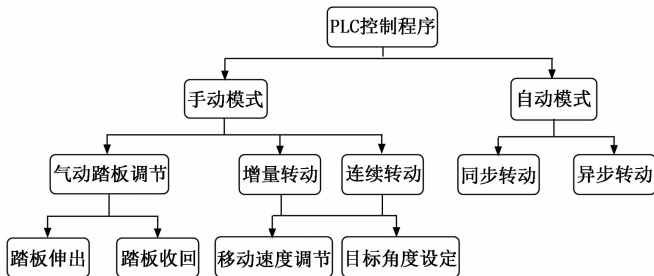


图 9 PLC 功能控制框

如图 10 所示, 首先将驱动旋转机架运动的电机作为引导轴, 将驱动医护平台旋转的电机作为跟随轴, 通过运动控制指令“MC\_GearIn”, 在跟随轴和引导轴之间启动齿轮传动操作, 通过参数“Jerk”、“Acceleration”和“Deceleration”定义同步的跟随轴的动态行为, 使用参数“Ratio-Numerator”和“RatioDenominator”将传动比指定为两个整数之间的关系 (分子/分母), 其中分子的符号决定跟随轴转动方向。在满足上述要求之后, 在“Master”和“Slave”参数中指定引导轴、跟随轴, 在参数“Execute”的上升沿开始作业。跟随轴将与引导轴的主值同步。如果“InGear”参数的值为 True, 跟随轴会同步并与引导轴同步运动, 完成了机架与医护平台的同步运动模式。

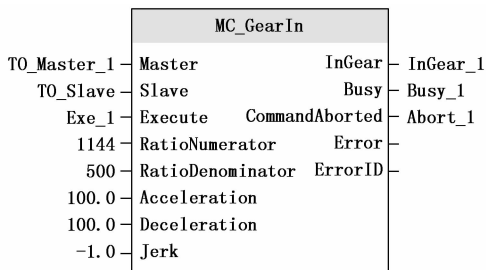


图 10 同步运动控制程序块

图 11 则表示跟随轴和引导轴启动同步运动模式的信号时间图。首先使用“Exe\_1”，初始化“MC\_GearIn”作业。然后给“Exe\_1”一个上升沿信号，启动“MC\_GearIn”作业，同时“Busy\_1”信号变为 True，表示作业正在运行。最后跟随轴将与引导轴进行同步，“InGear\_1”则会在时间①处发出跟随轴已同步并与引导轴同步运动的信号。

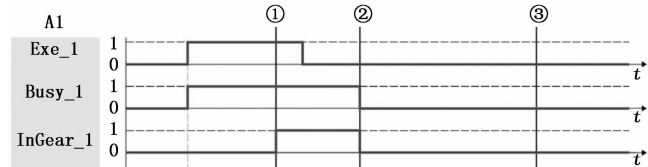


图 11 同步运动信号时间图

### 4 实验结果与分析

#### 4.1 旋转机架控制系统实现

质子治疗设备旋转机架现场图如图 12 所示。系统调试完成后，将软件服务端下载至控制室计算机中，软件客户端下载至工控机中，通过网线连接，用博图软件将算法上传至 PLC 中。首先将客户端软件与 PLC 进行连接，连接成功后将服务端与客户端通过 Socket 连接。界面如图 13 所示，连接成功后，服务端将会每隔 100 ms 给客户端发送询问状态指令，当客户端返回状态信息时。首先根据返回的状态信息，检测旋转机架的工作模式，与设置的工作模式不同则向工控机发送更改工作模式指令，工控机则控制 PLC 重新设置旋转机架的工作模式。



图 12 现场试验控制电机图

在总控制室使用服务端程序远程进行了多次测试。首



(a) 服务端界面实现



(b) 客户端界面实现

图 13 软件实现情况

先测试控制旋转机架在运动范围内的运动功能。设置旋转机架以 6°/s 的运动速度旋转至 180 度，再以同样的速度旋转至 0 度，之后继续设置旋转机架以 6°/s 的运动速度旋转至 -180 度，再以同样的速度旋转至 0 度。实验过程中软件显示旋转机架都是在规定时间内加速到设定速度，运动一段时间再以相同加速度减速，精准停在设定角度。结果表明该系统可以终端控制旋转机架以 0.1~1 rpm 在 -180°~180°范围内运动。

然后是测试控制旋转机架的步进功能。设置步进速度为 2°/s，步进角度为 2 度，服务端不断向客户端发送以步进速度旋转步进角度的命令，软件显示旋转机架以设定速度精准旋转了步进角度。结果表明该系统可以终端控制旋转机架以步进速度旋转步进角度。

最后则是测试控制气动踏板伸出和收回的功能。在控制室使用服务端程序分别发送踏板伸出、踏板收回指令。通过传感器检测出踏板都能够伸出和收回至目标位置，同时在踏板伸出或收回过程中服务端程序都不能中断或下发下一个命令，保证医生在踏板上工作的安全。结果表明该系统可以终端控制气动踏板的伸出或收回。

通过系统实践测试，Socket 服务端界面中的所有功能均能运行正常，满足质子治疗过程的控制需求。旋转机架可以根据用户自定义设定目标角度和设定速度进行旋转。其中旋转机架运动范围可覆盖 -180°~180°，旋转机架转速能达到 0.1~1 rpm，且自由可调，满足质子治疗过程中的常规转速。气动踏板也可以通过界面上的伸出或收回按钮进行运动控制。

#### 4.2 同步运动控制模型实现

使用 Scout 软件测试驱动旋转机架运动的电机和驱动医护平台运动的电机的速度数据，将测得的两电机的设定速度和实际速度数据进行处理，转换为机架转速和踏板转速，

处理结果如表 2 所示。表中机架和踏板的设定速度和实际速度的速度偏差几乎为 0, 将表中机架和踏板的实际速度画成图 14 所示的速度时间图, 可以看出, 踏板电机和机架电机在 1 144: 500 的耦合比下进行反向同步转动, 速度曲线几乎一样, 速度偏差几乎为零。据此可以判断同步运动控制模型实现了旋转机架和医护平台的反向同步运动, 符合质子治疗过程的控制要求。将机架和踏板的实际速度的差值作为误差, 如图 15 误差分析图所示, 机架和踏板的速度误差在  $-0.015 \sim 0.01$   $^{\circ}/s$ , 相对误差为  $0.01\% \sim 0.1\%$ , 同步性能较好, 验证了 PLC 同步控制技术在旋转机架自动模式的要求下的可行性。

表 2 双同步电机速度时间表

时间/s	机架转速/ $(^{\circ}/s)$		踏板转速/ $(^{\circ}/s)$	
	设定速度	实际速度	设定速度	实际速度
3	0.715 8	0.716 0	0.709 0	0.716 9
6	1.898 1	1.895 3	1.893 1	1.896 0
9	3.074 3	3.075 0	3.069 3	3.074 7
12	4.253 1	4.255 1	4.255 1	4.260 4
15	5.434 0	5.434 7	5.465 0	5.434 3
18	6.008 8	6.000 8	6.014 0	5.996 4
21	5.987 2	5.979 2	5.997 2	5.978 2
24	4.890 7	4.890 3	4.896 8	4.892 6
27	3.711 2	3.710 2	3.711 0	3.716 0
30	2.533 8	2.530 2	2.535 4	2.531 8
33	1.351 5	1.350 1	1.368 1	1.349 0
36	0.172 5	0.171 1	0.164 5	0.172 1
39	0.000 1	0.000 0	0.000 0	0.000 0

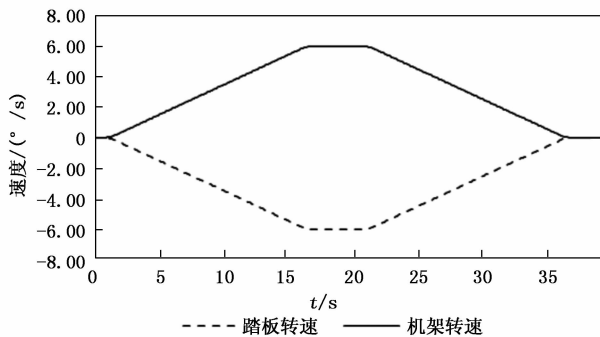


图 14 同步电机速度时间图

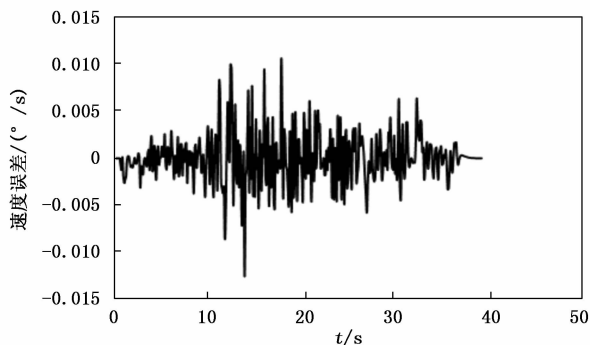


图 15 误差分析图

## 5 结束语

本文针对质子治疗设备旋转机架的控制需求, 开发了一套基于 Socket 和 S7.net 的质子治疗旋转机架终端控制系统。服务端总控室和客户端工控机成功连接, 以及客户端工控机与 PLC 控制器连接后, 先进行设置工作模式和检测机架状态等预处理, 然后服务端总控室实时监控旋转机架状态, 按照治疗方案不断地向客户端工控机发送运动指令, 控制旋转机架完成任务。通过现场试验表明该系统实现了终端控制旋转机架运动, 实时监控机架状态, 适用于化疗过程中的工作环境。

同时, 采用西门子 S7-1500PLC 控制器设计了一种同步运动模型, 采用主从式结构, 利用 PROFINET 方式实现旋转机架和医护平台间的同步运动。通过测试驱动旋转机架运动的电机速度和驱动医护平台运动的电机速度的实验, 验证了在 1 144: 500 的耦合比下, 机架电机和踏板电机同步转动能够保证医护平台在机架工作状态下保持水平。

## 参考文献:

- [1] 张根灿. 上海质子治疗装置注入器远程控制系统的构建 [D]. 上海: 中国科学院大学 (中国科学院上海应用物理研究所), 2018.
- [2] VarianR. PROBEAM 紧凑型质子治疗解决方案 [EB/OL]. (2017-11-29). <https://www.varian.com/zhans/oncology/products/treatment-delivery/probeamcompact-proton-therapy-solution>.
- [3] 沈荣, 涂朴, 黄晨, 等. 履带式排爆机器人底盘双电机速度同步控制研究 [J]. 电子设计工程, 2019, 27 (5): 86-90.
- [4] 刘青正, 段长超, 韩震宇, 等. 双电机同步运动控制器的设计与实现 [J]. 制造业自动化, 2020, 42 (6): 103-106.
- [5] 张德政, 汪步云, 杨鸥, 等. 全向重载 AGV 多轴协同运动控制研究 [J]. 计算机测量与控制, 2022, 30 (4): 91-97.
- [6] 张耿旭. 加速器治疗头控制系统的设计与开发 [D]. 广州: 广东工业大学, 2012.
- [7] 张中元. 医用电子直线加速器上位机管理控制系统的设计与实现 [D]. 淄博: 山东理工大学, 2011.
- [8] 谷鹏飞. 质子治疗旋转机架研究现状及前景 [J]. 科技资讯, 2018, 16 (33): 221-222.
- [9] 何进, 谢松巍. 基于 Socket 的 TCP/IP 网络通讯模式研究 [J]. 计算机应用研究, 2001 (8): 134-135.
- [10] 陈雅静. 基于 Socket 网络编程的远程物流防伪系统的设计 [J]. 电子设计工程, 2013, 21 (1): 153-156.
- [11] 薛哲, 张功学, 何凯, 等. 基于 Socket 通信的 AGV 上位机控制系统 [J]. 现代机械, 2021 (5): 99-102.
- [12] 袁帅. 质子治疗旋转机架的关键技术分析 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
- [13] 胡玉莹. 质子治疗头扫描控制系统设计与实现 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.

- [14] 孙恺文, 龚时华, 蔡俊琼. 大惯量质子治疗旋转机架定位控制技术 [J]. 电气传动, 2023, 53 (3): 77-81.
- [15] 吴 军. 上海先进质子治疗装置旋转机架优化设计 [D]. 上海: 中国科学院上海应用物理研究所, 2015.
- [16] LIN S, BOEHRINGER T, CORAY A, et al. More than 10 years experience of beam monitoring with the Gantry 1 spot scanning proton therapy facility at PSI [J]. Medical Physics, 2009, 36 (11): 5331-5340.
- [17] PEDRONI E, BOHRINGER T, CORAY A, et al. A novel gantry for proton therapy at the Paul Scherrer Institute [C] // AIP Conference Proceedings. AIP, 2001, 600 (1): 13-17.
- [18] PEDRONI E, MEER D, BULA C, et al. Pencil beam characteristics of the next-generation proton scanning gantry of PSI: design issues and initial commissioning results [J]. European Physical Journal Plus, 2011, 126 (7): 66.

(上接第 136 页)

的测试系统, 基于嵌入式结构半导体芯片信息测试系统平台在嵌入式结构体系的支持下, 建立了 LeNet 网络模型, 又联合 SMTExecutor 执行结构, 获取了大量的半导体芯片信息测试对象。整个设计过程中, Deflate 机制、LZ4 机制同时对线程池进行控制, 这就使得量化测试条件的有效性得到了保障, 既生产了完整的配置文件, 也实现了对命令词语句的精准识别。该系统的应用, 切实实现了对半导体芯片信息平均压缩比的有效控制, 可使其长时间保持在低水平状态, 对于解决数据导入过程中, 因半导体芯片信息平均压缩比较大而引起的信息测试时间过长的问题, 可以起到一定的促进性影响作用。

#### 参考文献:

- [1] 成元虎, 黄立波, 崔益俊, 等. 基于 RISC-V 的嵌入式多指令集处理器设计及实现 [J]. 电子学报, 2021, 49 (11): 2081-2089.
- [2] 曹永吉, 张恒旭, 施啸寒, 等. 规模化分布式能源参与大电网安全稳定控制的机制初探 [J]. 电力系统自动化, 2021, 45 (18): 1-8.
- [3] 于晓军, 刘志远, 吴建云, 等. 基于无线同步信息的继电保护分布式智能测试系统 [J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50 (11): 121-129.
- [4] 田锦明, 朱慧敏, 纪林海, 等. 基于 LabVIEW 的便携式引擎传感器性能测试系统 [J]. 仪表技术与传感器, 2022, 471 (4): 58-63.
- [5] 吕绪浩, 史红伟. FlexRay 通信网络的车载信息终端嵌入式系统设计 [J]. 机械设计与制造, 2022, 375 (5): 216-219.
- [6] 李福阳, 李俊娥, 刘林彬, 等. 智能变电站嵌入式终端安全测试方法研究 [J]. 电力建设, 2021, 42 (2): 126-136.
- [7] 蔡 靖, 周云鹏, 程晓宇, 等. 基于 EEMD 和 LeNet-5 的脑电信号情绪识别 [J]. 电子技术应用, 2022, 48 (5): 98-103.
- [8] 鲁 军, 张源鑫, 冯凯旋, 等. MSMA 自感知执行器结构与信号处理研究 [J]. 电机与控制学报, 2021, 25 (5): 131-138.

- [19] PEDRONI E, BEARPARK R, BOHRINGER T, et al. The PSI Gantry 2: a second generation proton scanning gantry [J]. Zeitschrift fur medizinische Physik, 2004, 14 (1): 25-34.
- [20] SAFAI S, BULA C, MEER D, et al. Improving the precision and performance of proton pencil beam scanning [J]. Translational Cancer Research, 2012.
- [21] NEGRAZUS M, GABARD A, GEORGE D, et al. The Fast Ramped Bending Magnets for the Gantry 2 at PSI [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2008, 18 (2): 896-898.
- [22] GABARD A, NEGRAZUS M, VRANKOVIC V, et al. Magnetic Measurements and Commissioning of the Fast Ramped 90° Bending Magnet in the PROSCAN Gantry2 Project at PSI [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2010, 20 (3): 794-797.

- [9] 曲大鹏, 张建坤, 吕国鑫, 等. 命名数据网络中带宽时延感知的拥塞控制机制 [J]. 计算机科学与探索, 2022, 16 (5): 1076-1086.
- [10] 刘宁春, 郜 帅, 侯心迪, 等. 一种信息中心移动自组网中的数据访问控制机制 [J]. 北京邮电大学学报, 2021, 44 (2): 54-60.
- [11] 石娟娟, 花泽晖, 沈长青, 等. 广义瞬时速度同步化分步解调变换及其对旋转机械振动信号分析 [J]. 振动与冲击, 2021, 40 (24): 1-11.
- [12] 王 淋, 巨云涛, 吴文传, 等. 面向频率稳定提升的虚拟同步化微电网惯量阻尼参数优化设计 [J]. 中国电机工程学报, 2021, 41 (13): 4479-4490.
- [13] 李铁成, 任江波, 刘清泉, 等. 基于深度学习的智能录波器配置数据自动化映射方法 [J]. 电测与仪表, 2022, 59 (9): 76-83.
- [14] 毕秀丽, 闫武庆, 邱雨檬, 等. 基于 Shamir 秘密共享方案的文件图像篡改检测和修复方法 [J]. 计算机研究与发展, 2022, 59 (6): 1356-1369.
- [15] 何洪流, 张锐锋, 付 宇, 等. 配电网新型一二次融合系统测试平台设计与研究 [J]. 电子器件, 2022, 45 (5): 1225-1229.
- [16] 张晓庆, 刘德喜, 祝大龙, 等. DC-40 GHz 通用化 BGA 封装的射频微系统测试技术研究 [J]. 电子技术应用, 2021, 47 (1): 2-6.
- [17] 刘浩芳, 朱艺颖, 刘 琳, 等. 新能源机组的电网强度适应性及暂态响应特性测试方案 [J]. 电力系统自动化, 2022, 46 (21): 179-185.
- [18] 张红梅, 严海兵, 张向利. 结合半波高斯量化与交替更新的神经网络压缩方法 [J]. 计算机工程, 2021, 47 (5): 80-87.
- [19] 郝 颖, 冬 雷, 王丽婕, 等. 基于数学形态学去噪的光伏发电限电异常数据识别算法 [J]. 中国电机工程学报, 2022, 42 (21): 7843-7855.
- [20] 雷 萌, 郭 鹏, 刘博嵩. 基于自适应 DBSCAN 算法的风电机组异常数据识别研究 [J]. 动力工程学报, 2021, 41 (10): 859-865.