

基于 EPICS 的质子注入器远程控制 及监测系统的构建

张根灿^{1,2} 蒋舸扬¹ 李德明¹ 刘永好¹

1 (中国科学院上海应用物理研究所 嘉定园区 上海 201800)

2 (中国科学院大学 北京 100049)

摘要 质子注入器的远程监控是保证质子治疗装置提供稳定束流输出的重要手段。为实现上海质子治疗示范装置的远程监控及装置的整体调试, 本文利用质子注入器技术文档给出的网络通信协议, 在 Linux 环境下, 采用 Python 程序开发了质子注入器远程控制系统。该程序实现了质子注入器远程控制系统到为调试质子治疗装置而自行开发的基于实验物理和工业控制系统(Experimental Physics and Industrial Control System, EPICS)的控制系统内的接入。该远程控制及监测系统为质子治疗装置的智能远程整体调试及在线监控提供了软件基础。

关键词 质子注入器, Python, 远程控制系统, 实验物理和工业控制系统

中图分类号 TL99

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2018.hjs.41.030402

Construct of remote control and monitor system for proton injector based on EPICS

ZHANG Gencan^{1,2} JIANG Geyang¹ LI Deming¹ LIU Yonghao¹

1(Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Jiading Campus, Shanghai 201800, China)

2(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract [Background] Remote control and monitor system of the proton injector is a key component to guarantee stable beam current output for proton therapy facility, hence building such a system is important to the remote control and debug for Shanghai advanced proton therapy (SAPT) demonstrating facility. [Purpose] This study aims to realize the remote control of proton injector and access the remote control system of the proton injector to the control system of SAPT based on experimental physics and industrial control system (EPICS). [Methods] According to the network communication protocol of the proton injector, Python programming language was applied to implement the remote control system of the proton injector under the Linux system. Meanwhile, Python toolkit PCASpy was adopted to access it to the control system of SAPT based on EPICS. [Results & Conclusion] Working parameters of proton injector can be obtained and modified remotely by this remote control system of the proton injector, it provides a fundamental framework for remote intelligent debugging of the SAPT and monitor the status of the proton injector.

Key words Proton injector, Python, Remote control system, EPICS

恶性肿瘤已逐渐成为威胁人类生命健康的第一要素^[1]。质子治疗可以使其 Bragg 峰直接作用于肿瘤, 相比传统的放射线治疗, 质子治疗大大减少了治疗过程中对肿瘤周围正常组织的损伤, 已成为世

界各国肿瘤治疗的最新技术^[2]。上海质子治疗示范装置是我国首台国产相关设备, 其建成将填补我国在该领域的空白。该装置主要由质子注入器、同步加速器、束流运输线、治疗头等组成。其中, 质子

第一作者: 张根灿, 男, 1992 年出生, 2015 年毕业于杭州电子科技大学, 现为硕士研究生, 研究领域为加速器控制

通信作者: 蒋舸扬, E-mail: jianggeyang@sinap.ac.cn

收稿日期: 2017-09-21, 修回日期: 2017-12-19

First author: ZHANG Gencan, male, born in 1992, graduated from Hangzhou Dianzi University in 2015, master student, focusing on accelerator control

Corresponding author: JIANG Geyang, E-mail: jianggeyang@sinap.ac.cn

Received date: 2017-09-21, revised date: 2017-12-19

注入器产生持续稳定的高品质束流是该装置正常工作的前提条件。因此实现完善可靠控制系统的构建是其各系统稳定协调运行的基础^[3]。

质子注入器自带的控制系统是基于 LabVIEW 的本地控制, 无法进行远程控制。而构建质子注入器的远程控制系统可以实现对其实时远程监测和控制, 实现质子治疗装置多系统联调和运行。因此, 开发适用于质子注入器的远程控制及监测系统是提升该设备实用性与人性化的系列工作中的重要一环。当前, 质子注入器自带的控制系统有两种工作模式(本地和远程)。在本地模式下, 只能在质子注入器自带的控制系统界面上对质子注入器进行控制。在远程模式下, 本地控制计算机通过以太网利用 TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol) 协议实现与远程控制计算机的通信, 进而实现在远程控制界面上对质子注入器的工作状态进行实时显示及控制。但该远程控制系统需要自行开发, 这也是本文需要完成的工作。

鉴于此, 本文提出了基于实验物理和工业控制系统(Experimental Physics and Industrial Control System, EPICS)的质子注入器远程控制及监测系统。该系统可通过 TCP/IP 协议实现在线实时的对注入器运行状态量进行获取以及修改, 及时地了解质子注入器的运行状况, 实现稳定的束流输出^[4]。

1 EPICS 介绍

EPICS 是一个一整套的开源软件工具、库和应用程序。目前被广泛地应用于粒子加速器、望远镜以及大科学装置的分布式实时控制系统的开发^[5-6]。

EPICS 的图形界面绘制工具有 EDM (Extensible Display Manager)、MEDM、DM2K 以及 EDD/DM^[7]。本文中远程控制系统界面所采用的绘制工具为 EDM, 它是由美国橡树岭实验室(Oak Ridge National Laboratory, ORNL)负责开发的 OPI 软件工具, 用来实现对 IOC 实时数据库中的数据进行控制和监测^[8]。

2 系统描述

质子注入器主要由离子源、射频四级场(Radio Frequency Quadrupole, RFQ)、漂移管直线加速器(Drift Tube Linac, DTL)、束散器(Debuncher, DEB)以及其中的真空系统、冷却系统等组成。离子源、RFQ、DTL 和 DEB 由独立控制机柜进行控制(每个控制机柜内含三个 Group3 控制模块)。机柜负责状态参数采集, 通过光纤传输到质子注入器本地控

制计算机, 实现设备工作状态实时显示及本地参数调整(图 1)^[9]。

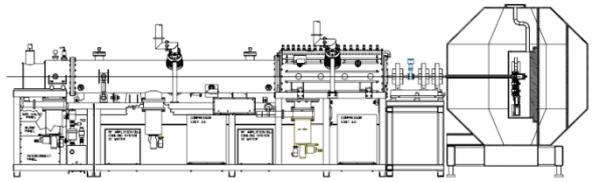


图 1 质子注入器结构示意图

Fig.1 Schematic diagram for the structure of proton injector

为了实现对质子治疗装置各个部分的整体控制, 及时掌握系统的整体状态, 根据质子注入器远程通信协议实现其本地控制计算机与远程控制计算机之间的通信, 设计出远程控制系统, 同时将远程控制计算机的控制系统接入到质子治疗装置自行开发的基于 EPICS 的控制系统内。图 2 为质子注入器控制机柜、本地控制主机和远程控制主机三者之间的通信过程。

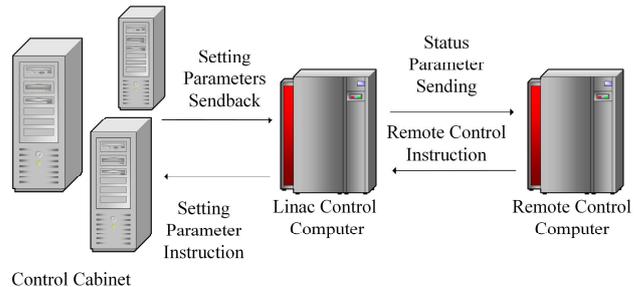


图 2 质子注入器控制系统通信过程

Fig.2 Communication process of the proton injector control system

3 系统设计

上海质子治疗示范装置现有一套自行开发的基于 EPICS 的控制系统, 该系统可实现质子治疗装置各个设备的控制。为了方便装置的整体调试, 需要开发质子注入器远程控制系统, 同时将其接入现有控制系统。

本远程控制系统采用 C/S (Client/Server) 架构, 实现质子注入器本地控制计算机与远程控制计算机的一对一通信, 进而实现远程控制计算机对质子注入器工作状态的获取及运行参数的修改。

本地控制系统与远程控制系统的交互利用 Socket 的两个端口 (PERIODIC 和 EVENT 端口) 实现不同类型的数据发送。为实现在通信过程中消息的异步收发, 减少对系统资源的占用, 在 Socket 中嵌入 Select 模型。具体的发送数据类型以及发送端口见表 1。

表 1 远程控制系统通信数据类型
Table 1 Remote control system communication data type

Comm.Type	Port	Comm.Timing
Analog Data	PERIODIC	250 ms
Digital Data	PERIODIC	250 ms
Setting Parameters	EVENT	On Demand
Tube Condition Data	EVENT	On Demand
Tube Fault Data	EVENT	On Demand
Comm.Check Receiving	EVENT	3 s
Comm.Check Sending	EVENT	3 s

其中 Analog Data Packet 和 Digital Data Packet 由本地控制系统通过 PERIODIC 端口每隔 250 ms 发送给远程控制系统；Setting Parameters Packet 由远程控制系统在需要改变参数时通过 EVENT 端口发送给本地控制系统；Tube Condition Data Packet 和 Tube Fault Data Packet 在远程控制系统需要的时候由本地控制系统通过 EVENT 端口发送给远程控制系统；Comm.Check Receiving Packet 和 Comm.Check Sending Packet 通过 EVENT 端口实现本地控制系统和远程控制系统的交替发送实现检查本地和远程控制系统之间的连接状态。

此外，本地控制计算机与远程控制计算机在运行过程中有大量的数据需要交换，所有发送的数据包都采用统一的格式，方便接收数据的解析。具体的数据包格式见表 2。

表 2 通信数据包格式
Table 2 Communication data packet format data type

	Length 4 Byte	Data type
1	Equipment ID (sender)	Integer
2	Equipment ID (receiver)	Integer
3	Packet ID	Integer
4	Year on sending	Integer
5	Month	Integer
6	Date	Integer
7	Hour	Integer
8	Minute	Integer
9	Second	Integer
10	Message type ID	Integer
11	Total number of blocks	Integer
12	Block number of this packet	Integer
13	Byte length of TRANSFER DATA	Integer
14	Reserved	Integer
15	Reserved	Integer
16	Reserved	Integer
17	...	
...	TRANSFER DATA	
M-1	...	
M	End of packet	Integer

表 2 中的每一行代表数据包中的一个字段，每一条字段的分别表示数据包的发送方和接收方的 ID；第三个字长度都为 4 Byte (32 bit)。其中第一和

第二个字段实现对发送数据包的计数；第 4-9 个字段用来记录数据包发送的时间（年、月、日、时、分、秒）；第 10 个字段对应于表 1 中不同的通信数据类型；当传输的数据超过规定的长度时，需要对数据部分进行分块，第 11、12 个字段分别用来记录总的的数据块数和当前是第几个数据块，第 17 到倒数第二个字段全部为传输的数据，其中通过 PERIODIC 端口传输的数据包，该部分最大长度为 10 KB，通过 EVENT 端口的为 250 KB，最后一个字段为数据包的结束标识。

4 系统实现

4.1 系统开发环境的建立

注入器远程控制系统的开发主机为运行 Linux 的 PC 机，安装系统为 64 位的 CentOS 7 系统，安装 EPICS Base、extensionsTOP、EDM。

4.2 数据传输的实现

远程控制计算机和本地控制计算机之间的数据传输采用 Socket 常见的面向连接的 TCP 协议的数据流套接字模型，确保数据传输的可靠性^[10]。

图 3 为利用 Socket 进行数据传输的示意图。

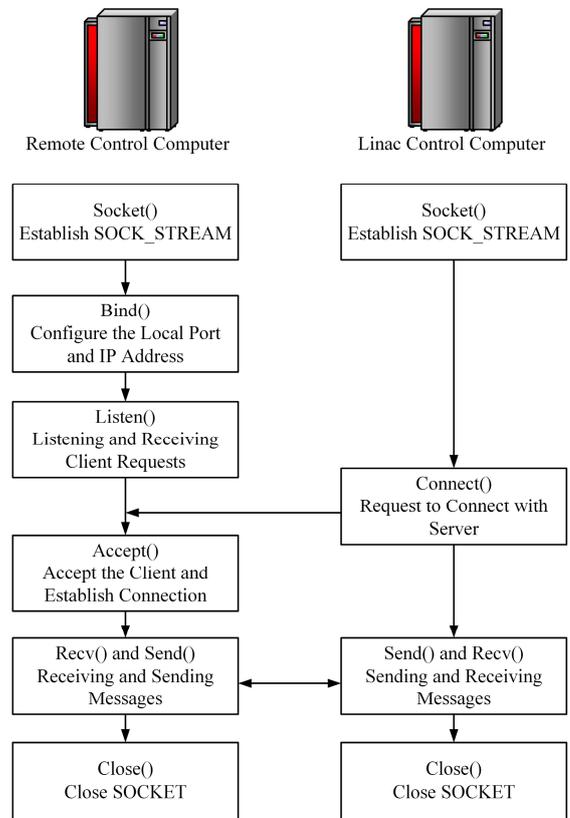


图 3 通过 SOCKET 传输数据流程图
Fig.3 Flow chart of data transmission via SOCKET

首先启动远程控制计算机,它通过调用 Socket() 建立一个流式套接字,然后调用 Bind()为该套接字配置本地端口和 IP,再调用 Listen()监听和接收本地控制计算机的连接请求。当启动本地控制计算机后,本地控制计算机调用 Connect()向其发出连接请求之后,其通过调用 Accept()接受本地控制计算机的请求。一旦连接建立,本地控制计算机和远程控制计算机通过 Recv()和 Send()来完成数据收发^[11]。

4.3 异步通信的实现

套接字 Select 模式是一种比较常见的 I/O 模型,其能使 Socket 应用程序同时对多个套接字进行管理。通过调用 select()函数检查当前各个套接字的状态,并根据该函数的返回值,判断该套接字可读可写性,然后调用 Socket 接口,完成数据的收发。该模型在消除了多线程 I/O 模型在多线程的创建、销毁和切换时效率低和内存消耗大的缺点同时实现了数据的异步收发。

Select 多路复用单线程模型^[12]比阻塞 I/O 多线程模型具有占用资源少、逻辑清晰、高效灵活等优点。因此为了实现异步 I/O,本文采用 Select 多路复用单线程模型。

4.4 与 EPICS 控制系统对接

Python 的第三方工具包 PCASpy 提供了 Python 程序与 EPICS 的接口。PCASpy 不仅提供了与 EPICS 便携式通道访问服务器的低级别 Python 连接,还提供了必要的高级抽象,以简化服务器工具编程^[13]。

在程序中根据 EPICS 文档中提到的 PV 格式进行 PV 定义,在程序中继承 PCASpy 提供 Driver() 类实现重写 write()、read()、setParam()和 getParam() 实现对 PV 赋值、读取当前值、设置当前值且更新 PV 值和返回当前值。同时在程序发主程序里写入如图 4 所示的程序,实现程序与 EPICS 之间的交互,可以利用 EPICS 的指令对 PV 值进行设置、读取或监视。

```
if __name__ == '__main__':
    server = SimpleServer()
    server.createPV(prefix, pvdb)
    driver = myDriver()

    while True:
        server.process(0.1)
```

图 4 控制系统程序与 EPICS 之间交互代码

Fig.4 Interaction code between control system and EPICS

4.5 控制界面

注入器远程控制界面包括参数设置界面,RFQ、DTL、DEB 和 ICU 的状态显示界面。利用参数设置界面,可以实现对注入器的灯丝电流、气压等对注入器状态影响较大的一些参数进行设置;通过 RFQ、DTL、DEB 和 ICU 的状态显示界面可以实现对注入器的 300 多个状态量进行实时监控。

EPICS 提供了丰富的图形界面绘制工具,EDM 自带的图形化的监视、控制和图表等控件,只需通过将控件的 PV 与和数据库中的记录名称相互绑定即可,不需要进行额外的编程,操作简单。

本文中的控制界面使用 EDM 绘制。利用将程序中定义的状态量名称与 EDM 控件的 PV 值进行绑定,实现控件的 PV 值随着状态值实时更新,通过 EPICS 定义的 CA 协议访问控件的 PV 值实现控制界面上注入器的状态值的实时变化。

图 5 为质子注入器的参数设置界面。该界面显示当前设置值和系统实时返回值。通过该界面,用户可以实现对质子注入器 Filament Current、Arc Voltage、Gas Pressure、Pierce Anode Voltage、Einzel Lens Voltage、DBC Relative Phase、Extraction Voltage、Magnet Current 等参数进行远程设置与修改。当修改值超过系统规定范围时,系统自动对用户进行提醒。

图 6 为质子注入器中 DEB 参数状态显示界面,通过该界面,用户可获得 DEB 的 S&H Delay 等 25 个模拟量及 Mux A3 等 48 个状态量的实时情况。因此可实现 DEB 的全面实时状态监控。

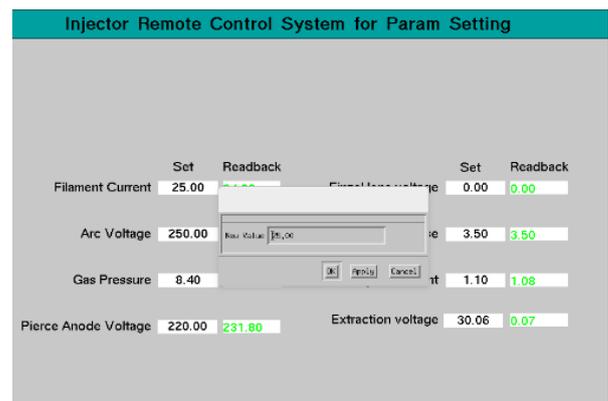


图 5 质子注入器参数设置界面

Fig.5 Interface of parameter setting for proton injector

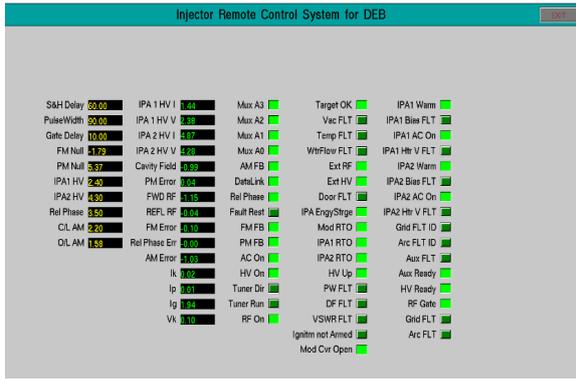


图 6 DEB 状态显示界面
Fig.6 Interface of DEB parameter status

5 结语

本文实现了质子注入器的远程控制系统，在 Linux 环境下，利用 Python 编程技术及 PCASpy 工具包提供的接口接入到质子治疗装置自行开发的基于 EPICS 的控制系统内，实现了对质子注入器的远程控制。通过该系统可进行对注入器工作参数的远程获取与修改，为质子治疗装置的智能远程整体调试及在线监控提供了软件基础。

参考文献

- 戴旭东. 恶性肿瘤的危害及预防[J]. 实用肿瘤学杂志, 1994, (3): 70-72.
DAI Xudong. The harm and prevention of malignant tumor[J]. Journal of Practical Oncology, 1994, (3): 70-72.
- 唐劲天, 左宗焕. 质子治疗肿瘤的现状与发展趋势[J]. 中华肿瘤杂志, 2001, 23(1): 7-10.
TANG Jintian, ZUO Zonghuan. Current status and development trend of proton therapy for tumor[J]. Chinese Journal of Oncology, 2001, 23(1): 7-10.
- 于春蕾. ADS 注入器 II 强流质子 RFQ 加速器控制系统的研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.
YU ChunLei. Study of the control system of the high intensity proton RFQ for ADS injector II[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014.
- 赵籍九, 尹兆升. 粒子加速器技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2005: 429-430.
- ZHAO Jijiu, YIN Zhaosheng. Particle accelerator technology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2005: 429-430.
- EPICS homepage[ED/OL]. [2017-04-06]. <http://www.aps.anl.gov/epics/>.
- 冯利文, 林林, 王芳, 等. 基于 EPICS 的 ERL 加速器控制系统[J]. 核电子与探测技术, 2013, 33(7): 787-790.
FENG Liwen, LIN Lin, WANG Fang, *et al.* EPICS based computer system for ERL accelerator[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2013, 33(7): 787-790.
- EDM homepage[ED/OL]. [2017-04-06]. <http://ics-web.sns.ornl.gov/edm/>.
- Sinclair J, Kasemir K, Johnson A. Extensible display manager for EPICS[ED/OL]. [2017-04-06]. <http://www.aps.anl.gov/epics/docs/USPAS2007/lectures/EDM.pdf>.
- PULSAR 7 radiotracer system description and specification[ED/OL]. [2017-05-10]. <http://www.accsys.com/pulsar.html>.
- 郭东升, 田秀华. Linux 环境下基于 Socket 的网络通信[J]. 软件导刊, 2009, 8(1): 116-118.
GUO Dongsheng, TIAN Xiuhua. The Socket-based network communication in Linux environment[J]. Software Guide, 2009, 8(1): 116-118.
- 张允刚, 刘常春, 刘伟, 等. 基于 Socket 和多线程的远程监控系统[J]. 控制工程, 2006, 13(2): 175-177.
ZHANG Yungang, LIU Changchun, LIU Wei, *et al.* Remote monitoring system based on Socket and multi threading[J]. Control Engineering of China, 2006, 13(2): 175-177.
- 王华伟. 基于异步多线程机制的实时通信研究[J]. 铁路通信信号工程技术, 2017, 14(3): 18-22.
WANG Huawei. Study on asynchronous multithreading mechanism-based real time communication[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2017, 14(3): 18-22.
- PCASpy homepage[ED/OL]. [2017-05-10]. <http://pcaspy.readthedocs.io/en/latest>.