



·高功率微波技术·

## 硼中子俘获治疗实验装置射频功率源系统\*

荣林艳<sup>1,2</sup>, 慕振成<sup>1,2</sup>, 周文中<sup>1,2</sup>, 万马良<sup>1,2</sup>, 谢哲新<sup>1,2</sup>, 王博<sup>1,2</sup>, 刘美飞<sup>1,2</sup>,  
李健<sup>2</sup>, 徐新安<sup>2</sup>, 张辉<sup>1,2</sup>, 李松<sup>1,2</sup>, 欧阳华甫<sup>1,2</sup>, 傅世年<sup>1,2,3</sup>

(1. 散裂中子源科学中心, 广东东莞 523803; 2. 中国科学院高能物理研究所, 北京 100049; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 中国科学院高能物理研究所建造了一台基于加速器的硼中子俘获治疗 (BNCT) 实验装置。射频功率源系统为 352.2 MHz 射频四极加速器 (RFQ) 提供高频功率, 使束流离开 RFQ 时, 其能量达到 3.5 MeV。BNCT 射频功率源系统主要包括速调管功率源、数字低电平控制系统、射频传输系统。本文介绍了 BNCT 射频功率源系统, 主要包括物理需求、系统组成、关键设备、安装和调试。目前该装置已进行动物实验, 加速器打靶束流功率 4.3 kW, 加速器射频功率源系统运行稳定。

**关键词:** 硼中子俘获治疗; 速调管功率源; 低电平控制系统; 功率传输系统

中图分类号: TL503.2

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202133.200307

## RF power source system for boron neutron capture therapy test facility

Rong Linyan<sup>1,2</sup>, Mu Zhencheng<sup>1,2</sup>, Zhou Wenzhong<sup>1,2</sup>, Wan Maliang<sup>1,2</sup>, Xie Zhixin<sup>1,2</sup>, Wang Bo<sup>1,2</sup>, Liu Meifei<sup>1,2</sup>,  
Li Jian<sup>2</sup>, Xu Xin'an<sup>2</sup>, Zhang Hui<sup>1,2</sup>, Li Song<sup>1,2</sup>, Ouyang Huaifu<sup>1,2</sup>, Fu Shinian<sup>1,2,3</sup>

(1. Spallation Neutron Source Science Center, Dongguan 523803, China;

2. Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** An accelerator-based boron neutron capture therapy (BNCT) experimental facility has been built by Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences. The radio frequency (RF) power source system provides 352.2 MHz pulse power for radio-frequency quadrupole (RFQ) cavity and the beam energy reaches 3.5 MeV through RFQ cavity. The RF power source system includes klystron power source, digital low-level RF (LLRF) control system, and RF transmission system. This paper will introduce the BNCT RF system including physical requirements, system composition, key equipment, installation and commissioning work. At present, the therapy facility operates for animal tests with the target beam power higher than 4.3 kW. The RF power source system runs stably and reliably in the long-term operation.

**Key words:** boron neutron capture therapy (BNCT); klystron power source; low-level RF control system; RF transmission system

据统计, 恶性肿瘤是我国第二位死亡原因, 占死亡总数的 22.32%, 而全球每年癌症死亡人数则高达约 630 万人。因此, 癌症有效的诊断和治疗方案的开发需求很大<sup>[1]</sup>。而现有的治疗手段如手术、化疗或普通放疗对人体或有损伤或有副作用。质子或重离子治疗虽可克服常规放疗的剂量毒性问题, 但装置造价及维护昂贵、体积庞大、经济性差、难以规模化且治疗的人数极为有限<sup>[2]</sup>。

基于加速器的硼中子俘获治疗则具有靶向精确、副作用低、适应性广、体积较小、费用合理、一次性解决等优点<sup>[3]</sup>, 可广泛建造于人口密度稠密的医院, 加速器中子源以安全性高、公众接受度高、成本相对较低、慢化处理简单等特点<sup>[4-5]</sup>。其原理是通过加速器提供的质子束打靶产生中子, 这些中子经过慢化, 达到治疗需要的能量, 通过适形控制照射病灶, 这些通过人体部位的中子, 与事先吸收了含硼药物的癌细胞中的硼元素发生核反应, 产生阿尔法粒子和锂离子, 杀死癌细胞, 实现药物导向的重离子精准放射治疗<sup>[6]</sup>。本文介绍了 BNCT 射频功率源系统, 主要包括物理需求、系统组成、关键设备、安装和调试。

\* 收稿日期: 2020-11-13; 修订日期: 2021-04-26

基金项目: 广东省引进创新创业团队项目 (2017ZT07S225)

作者简介: 荣林艳 (1984—), 女, 硕士, 从事加速器射频技术研究。

## 1 射频功率源系统设计方案

中国科学院高能物理研究所建设了我国首台基于加速器的 BNCT 实验装置, 该装置中子源是由一台射频四极场(RFQ)加速器提供强流质子束, 质子束经束流传输线, 打靶产生高通量的中子, 装置框图如图 1 所示。加速器设计的最终束流输出功率为 35 kW, 即束流能量为 3.5 MeV, 脉冲流强为 30 mA, 平均流强为 10 mA, 束流占空比为 33.3%<sup>[2]</sup>。

中心频率 352.2 MHz 的射频功率源系统除了提供足够的功率补偿 RFQ 腔耗外, 还必须对束流负载效应进行补偿, 以保证 RFQ 加速电场稳定。

射频功率源系统主要由数字低电平控制系统(LLRF)、速调管功率源系统、和相应的射频功率传输系统组成, 总体框图如图 2 所示。数字低电平控制系统主要负责 RFQ 加速腔中高频场幅度、相位稳定性的控制、腔体谐振频率的控制和联锁保护。数字低电平控制系统输出的 352.2 MHz 射频信号经固态放大器(SSA)推动速调管输出合适的射频功率。速调管功率源系统除了补偿 RFQ 腔耗外, 还必须提供足够的功率以保证 RFQ 中的加速电场水平。选用 WR2300 型波导器件传输射频功率。速调管功率源输出的射频功率经环行器后通过魔 T 进行 2 次功率分配分成 4 路再经由 4 个高功率耦合器将射频功率耦合进 RFQ 加速腔。射频系统主要参数指标如表 1 所示。

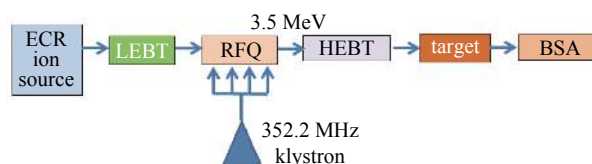


Fig. 1 Diagram of the BNCT experimental facility

图 1 BNCT 实验装置框图

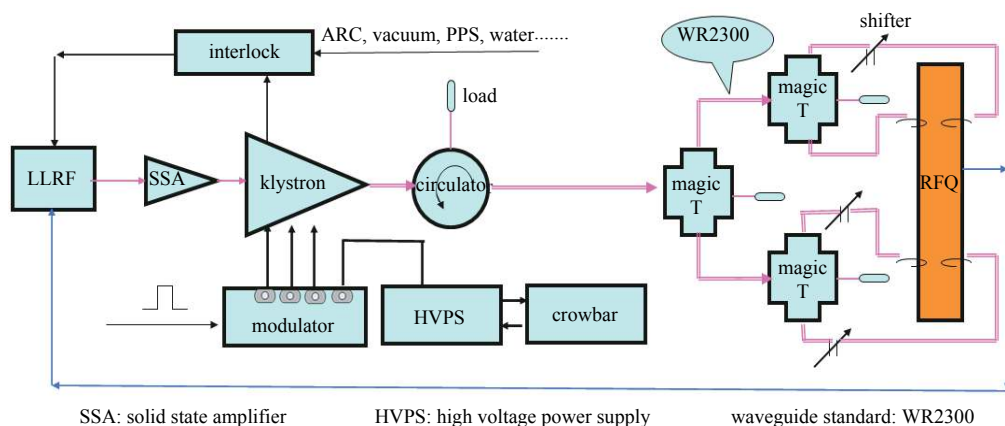


Fig. 2 Diagram of the BNCT RF power source system

图 2 BNCT 射频功率源系统组成框图

表 1 BNCT 射频功率源系统主要设计指标

Table 1 The requirement of BNCT RF power source system

RF frequency/MHz	beam loading/kW	cavity loss/kW	duty factor/%	amplitude stability/%	phase stability/(°)
352.2	105	420	33.3	±1	±1

## 2 射频功率源系统工程实现

### 2.1 低电平控制系统

低电平控制系统主要用于实现加速腔的幅度、相位、谐振频率控制功能, 从而使束流获得稳定加速。低电平控制板主要硬件包括 4 路模数转换器(ADC), 4 路数模转换器(DAC), 1 块可编程逻辑门阵列(FPGA)芯片, 2 块数字信号处理器(DSP)芯片。ADC 采样频率、FPGA 时钟频率以及 DAC 的时钟频率均为中频信号频率的 4 倍。FPGA 主要负责逻辑控制, DSP 主要完成数字控制组件和工控机之间的通信和相关参数的计算, 然后将计算结果回传给 FPGA。数字控制组件与 LLRF 本地上位机采用用户数据报协议(UDP)进行数据传输, 脉冲时序作为 DSP 中断触发信号, 当 DSP 收到此中断信号后将数据上传到本地上位机, 数据上传的频率可通过上位机监控软件进行设置。LLRF 本地监控软件为 Windows 操作系统环境下的 C#应用程序, 并嵌入基于 EpicsSharp 库文件的实验物理及工业控制系统(EPICS)服务器程序模块将 C#本地监控软件的变量和曲线数据转化为 EPICS PV 变量并发布到 EPICS CA 网络中, 实现 LLRF 通过 EPICS 进行远程控制<sup>[7]</sup>。

幅相控制环路的关键技术是数字正交 I/Q 解调及数字信号处理<sup>[8]</sup>。从腔体里耦合出来的 352.2 MHz 射频信号



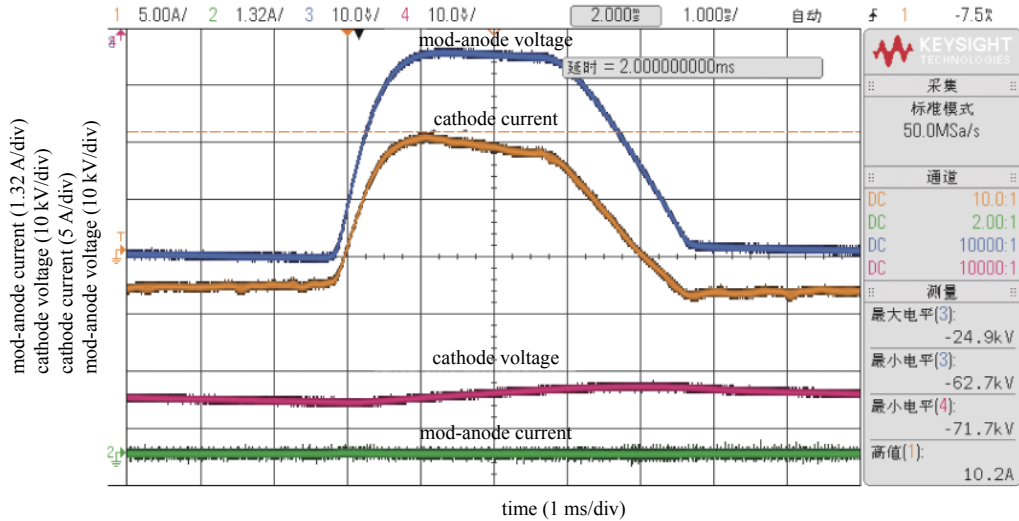


Fig. 4 High voltage wave form of klystron  
图 4 速调管高压波形图

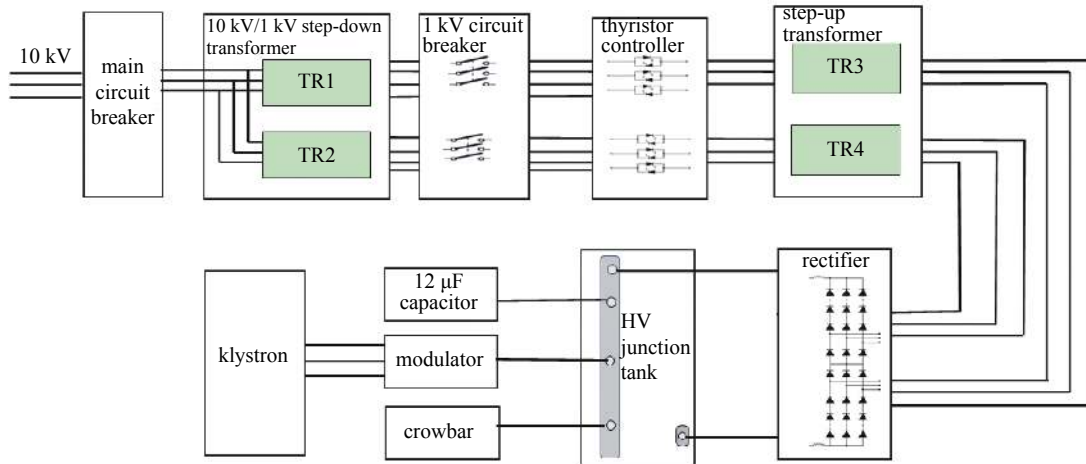


Fig. 5 Schematic diagram of klystron HV system  
图 5 速调管高压系统框图

有的高压器件都浸在高压绝缘油中,并浮接于负的高压电位。高压四极管型号为 TH5186 四极管,它可工作于 100 kV,作用相当于一个可变的高压电阻,与线路中的其他高压电阻相连共同构成可调阻值的高压分压器。在速调管阴极负高压恒定的情况下,通过控制调制器中 TH5186 四极管的栅极电压,来调整速调管调制阳极的电压,从而调整速调管电子束电流,控制占空比和输出功率幅度的大小。

### 2.2.3 监控及保护系统

为了提供人身和设备的安全保障,设计了基于可编程逻辑控制器(PLC)、FPGA 的监控连锁保护系统。该系统实时监测水冷、高压电源、撬棒、速调管、灯丝电源、聚焦电源、环形器等所有设备工作状态,同时根据速调管要求实现开关机程序控制、故障连锁逻辑程序,并实现故障定位、状态显示。连锁保护系统分为功率源系统连锁保护、人身保护(PPS)、机器保护(MPS)、RFQ 腔体保护。整个射频功率源系统的连锁结构框图如图 6 所示。

功率源系统分为高压连锁保护和高频连锁保护。其中高压连锁保护分为快保护和慢保护。速调管打火引起的快速保护主要由撬棒实现。撬棒保护系统是一种高电压、大电流、快速的保护装置,当速调管内部发生高压打火,高压能量必须在几微秒内从速调管内部转移走。通过导通闸流管撬棒来完成这种高压能量的转移。撬棒闸流管采用的是 8 间隙双端闸流管 CX2098B,每个间隙通过的最大电压是 12.5 kV。在储能电容和闸流管间的高压电缆上嵌入一个宽带的电流传感器来监测速调管阴极电流,这个传感器紧挨着闸流管放在撬棒油箱内,它的次级会产生 1 V/1 A 的放电正信号电压,这个正脉冲作为触发信号用来控制闸流管的导通。高压慢保护连锁信号均接入 PLC 做逻辑,当高压连锁动作时会自动切断可控硅控制电路,关断速调管阴极高压。

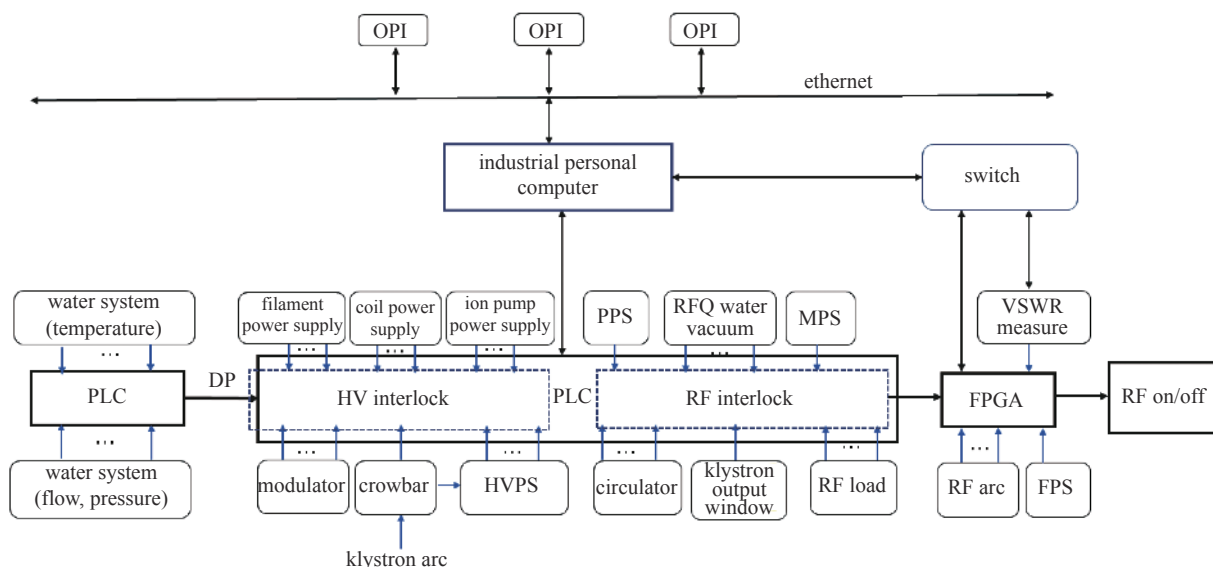


Fig. 6 Schematic diagram of interlock protection for RF power source system

图 6 射频功率源系统连锁保护框图

功率源的高频连锁分为快速保护和慢速保护，慢速保护信号(如速调管输出窗风节点、负载温度保护等)进入 PLC 作保护逻辑，快速保护信号(如 VSWR 保护、弧光保护)接入基于 FPGA 的快速保护板。高频快保护系统的作用是当功率源系统或者加速器运行发生故障时，自动快速切断射频信号，保障功率源和加速器的运行安全。例如当速调管、环形器或者加速腔中发生弧光放电，或功率传输系统中各个驻波比监测点的 VSWR 瞬时增大，高功率射频连锁保护系统将在几  $\mu\text{s}$  内切断数字低电平控制系统模拟组件射频信号的输出。驻波比保护系统有两种连锁保护切断 RF 激励的方式，当高频脉冲期间发现驻波比过大时，将在  $1 \mu\text{s}$  内切断该脉冲后续的功率，到下一个脉冲恢复功率，实现脉内保护；在  $1 \text{ s}$  以内，脉内保护次数超过设定次数，系统将永久性的切断脉冲，直到人工进行复位<sup>[12]</sup>。

监控连锁组合中的 PLC 控制器接收从中控传来的 PPS 保护信号。PPS、RFQ 腔体的真空及水冷信号均为常闭节点信号，这些信号经过 PLC 的与逻辑后，直接扇出给低电平控制系统中上变频的砷化镓开关，用于关断 RF 信号的输出，接收到连锁信号后射频电压幅度直接降为零，同时砷化镓开关关断 RF 的输出，实现双重保护。

### 2.3 功率传输系统

高功率速调管产生的高频电磁能量由封闭的 WR2300 波导管来使其定向地输送到 RFQ，尽可能地防止或减少泄漏<sup>[13]</sup>。整个功率馈送系统由全高及半高直波导、弯波导、大功率环形器、魔 T、全高半高转换节、大功率移相器、吸收负载、双向定向耦合器、大功率耦合器等组成。

大功率环形器主要用于保护速调管，使速调管所产生的正向高频功率能顺利通往 RFQ 腔，而把从 RFQ 腔来的反射功率送往环形器的吸收负载，不使它通往速调管，以避免当 RFQ 腔或波导系统里存在大的反射功率时损坏速调管。我们采用的是铁氧体“Y”型三端口环形器，可允许正向通过高频功率为  $1.3 \text{ MW}$ 。

大功率移相器用来改变功率传输系统的电长度，通过调整大功率移相器的电长度，从而使得四路功率馈送系统获得最佳相位匹配，相同输出功率实现加速腔腔压最大化。为调束实验的方便，在四路功率馈送系统中有 3 路安装了大功率移相器。通过步进电机带动移相器调谐杆传动来控制传输系统的电长度，步进电机的运动参数通过功率源系统的工控机进行操控。

## 3 系统联调及测试结果

BNCT 射频功率源系统于 2019 年 11 月完成速调管功率源系统的整机联调工作。2019 年 12 月完成与 RFQ 系统对接后，展开了高频系统与 RFQ 腔体联调工作，调试中通过对移相器、低电平控制系统等相关参数进行调整，对 RFQ 加速腔进行低功率排气老练等手段，解决了耦合器出气及二次电子效应问题，随后进行了 RFQ 加速腔的高功率 RF 老练工作，2020 年 5 月完成重复频率  $50 \text{ Hz}$ ，RF 脉冲宽度  $2 \text{ ms}$ ，RF 占空比  $10\%$  的老练工作。在此基础上进行了出束调试，RF 功率源在速调管阴极高压  $71 \text{ kV}$  的情况下入腔正向功率  $490 \text{ kW}$ ，打靶束流平均功率约  $4.3 \text{ kW}$ ，并在此束流功率下 BNCT 实验装置开展了动物实验，速调管输出功率、打靶平均功率、束流流强曲线如图 7 所示。

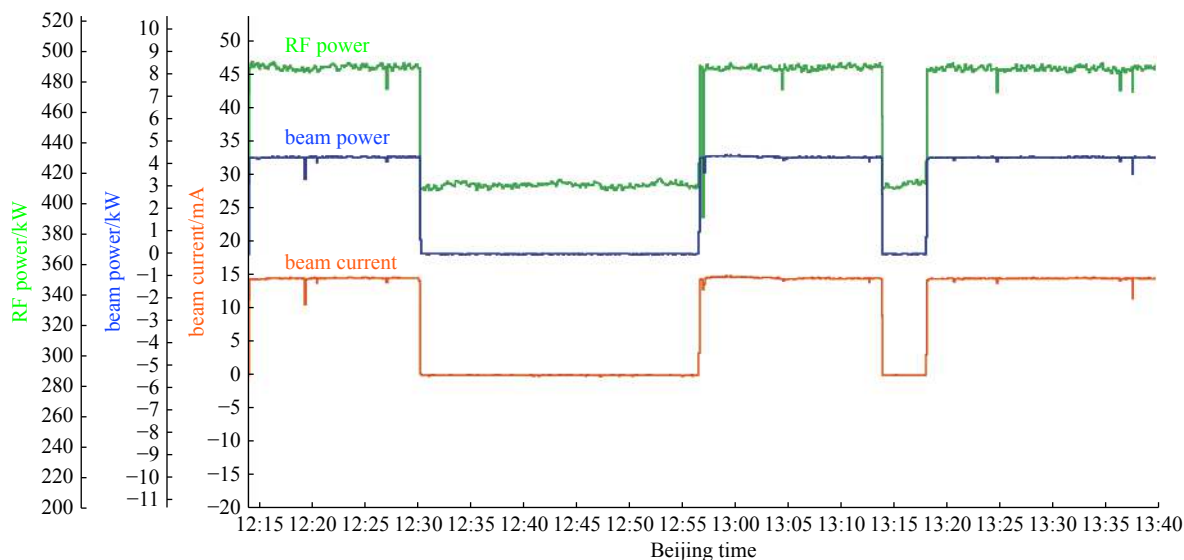


Fig. 7 Curves of RF power, beam power and beam current

图 7 射频功率、打靶束流功率、束流流强曲线

## 4 结 论

BNCT 射频功率源系统已按计划完成现场安装、各分系统和整机调试工作,并进行了出束打靶实验,峰值流强为 15.6 mA,打靶束流平均功率超过 4.3 kW。在出束过程中低电平采用了自动跟频出束的方法,无需对加速器的水温进行动态调谐,同时也避开了水冷调谐慢等问题。从近半年加速器老练及出束运行情况看,BNCT 射频功率源系统运行稳定。下一阶段束流调试将逐步提升束流峰值流强、占空比来进一步提升打靶功率。射频功率源系统也将根据调束需求,调整功率输出参数。

## 参考文献:

- [1] 王淼,童永彭. 硼中子俘获治疗的进展及前景[J]. 同位素, 2020, 33(1): 14-26. (Wang Miao, Tong Yongpeng. The progress and prospect of boron neutron capture therapy[J]. *Journal of Isotopes*, 2020, 33(1): 14-26)
- [2] 欧阳华甫,肖永川,刘盛进,等. BNCT加速器设计和调试[J]. 白城师范学院学报, 2020, 34(2): 1-9. (Ouyang Huaifu, Xiao Yongchuan, Liu Shengjin, et al. Designing and commissioning of BNCT accelerator[J]. *Journal of Baicheng Normal University*, 2020, 34(2): 1-9)
- [3] 林作康,杨璞,赵乾坤,等. AB-BNCT中子靶物理设计分析[J]. 原子能科学技术, 2020, 54(5): 804-810. (Lin Zuokong, Yang Pu, Zhao Qiankun, et al. Analysis of physical design for AB-BNCT neutron target[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2020, 54(5): 804-810)
- [4] Aleynick V, Burdakov A, Davydenko V, et al. BINP accelerator based epithermal neutron source[J]. *Applied Radiation and Isotopes*, 2011, 69: 1635-1639.
- [5] Liang Lu, Tao He, Wei Ma, et al. Research on an accelerator-based BNCT facility[C]//Proc of 9th International Particle Accelerator Conference. 2018: 1024-1027.
- [6] 田永顺,胡志良,童剑飞,等. 基于3.5 MeV射频四极质子加速器硼中子俘获治疗装置的束流整形体设计[J]. 物理学报, 2018, 67: 142801. (Tian Yongshun, Hu Zhiliang, Tong Jianfei, et al. Design of beam shaping assembly based on 3.5 MeV radio-frequency quadrupole proton accelerator for boron neutron capture therapy[J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67: 142801)
- [7] 张玉亮,谢哲新,荣林艳,等. 中国散裂中子源直线射频低电平远程控制软件研制[J]. 强激光与粒子束, 2018, 30: 115101. (Zhang Yuliang, Xie Zhixin, Rong Linyan, et al. Software development of CSNS linac LLRF remote control system[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2018, 30: 115101)
- [8] 慕振成,李刚,李健,等. 强流质子RFQ加速器高频数字低电平控制系统[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(2): 433-437. (Mu Zhencheng, Li Gang, Li Jian, et al. Digital low-level RF control system for high intensity proton RFQ accelerator[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(2): 433-437)
- [9] 李健,徐新安,慕振成,等. 中国散裂中子源直线射频功率源系统的研制[J]. 强激光与粒子束, 2016, 28: 085101. (Li Jian, Xu Xin'an, Mu Zhencheng, et al. Linac RF power source development for China spallation neutron source[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2016, 28: 085101)
- [10] Rong Linyan, Mu Zhencheng, Li Jian, et al. Design and performance of the LLRF control system for CSNS linac[J]. *Radiation Detection Technology and Methods*, 2020, 4(2): 196-202.
- [11] Zhang Zonghua, Li Jian, Xu Xinan. The RF-system for a high current RFQ at IHEP[C]//Proc of APAC. 2004: 753-755.
- [12] 谢哲新,慕振成,荣林艳,等. 中国散裂中子源直线加速器高功率自动老炼平台研制[J]. 原子能科学与技术, 2019, 54(3): 564-570. (Xie Zhixin, Mu Zhencheng, Rong Linyan, et al. Development of high-power automatic conditioning platform for china spallation neutron source linac accelerator[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2019, 54(3): 564-570)
- [13] 周祖圣,何大勇,刘焯,等. ADS注入器 I 高频四极场功率源系统研制[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27: 085106. (Zhou Zusheng, He Dayong, Liu Rong, et al. Development of RFQ power source for ADS injector I[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27: 085106)