

高流强 RFQ 质子加速器研制

傅世年¹, 关遐令²

(1. 中国科学院 高能物理研究所, 北京 100049; 2. 中国原子能科学研究院, 北京 102413)

摘要:在国家“973”计划洁净核能项目的支持下,中国科学院高能物理研究所与中国原子能科学研究院合作,建成了我国首台高流强质子加速器。它是1台四翼型结构的射频四极(radio-frequency quadrupole, RFQ)加速器,这种先进加速结构可为来自离子源的低能强流束提供周期性强聚焦,并同时在纵向对束流进行聚束和加速。我国建成的这台RFQ加速器束流能量为3.5 MeV,脉冲流强达46 mA,束流工作比大于7%。本文将介绍这台RFQ加速器的物理设计、研制、调试和出束实验的结果。

关键词:强流质子束;射频四极加速器;加速器驱动的次临界系统

中图分类号:TL53 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-6931(2009)S0-0159-06

Development of High Intensity RFQ Proton Accelerator

FU Shi-nian¹, GUAN Xia-ling²

(1. *Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*
2. *China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China*)

Abstract: The first high intensity proton radio-frequency quadrupole (RFQ) accelerator with four-vane structure was built in collaboration between Institute of High Energy Physics and China Institute of Atomic Energy under the support of the accelerator-driven clean nuclear energy program in the State Key Basic Research Project in China. The advanced accelerating structure can provide a periodical strong focusing to the low-energy high-current beam from an ion source, while bunching and accelerating the beam in longitudinal direction. The RFQ accelerates proton beam of 46 mA pulse current to 3.5 MeV at more than 7% duty factor. The physics design, experimental study and beam commissioning of the RFQ are introduced in this paper.

Key words: high intensity proton beam; radio-frequency quadrupole accelerator; accelerator driven subcritical system

近年来,我国核电事业进入了新一轮快速发展期。《2050年我国的能源需求》研究报告根据对国家中长期能源发展形势和前景的分析

指出,到2050年,我国的核电占一次能源总量的比重要提高到12.5%(占电力装机容量的20%)。但我国核能大规模可持续发展将会遇

到铀资源匮乏、长寿命放射性废物的环境安全等难题。加速器驱动的次临界系统(Accelerator Driven Subcritical System, ADS)是新一代的裂变核能装置,由于其在安全性、资源利用率、核废物处理等方面的综合优越性,国际原子能机构把它列入新型核能系统,称之为“新出现的核废物嬗变及能量产生的核能系统”。这个新型系统集成强流质子加速器和带有散裂靶的次临界反应堆为一体,其技术复杂,有大量物理、技术与工程问题有待研究,美国、俄国、欧洲、日本、韩国、印度等均制定了 ADS 长期发展规划,并启动了前期关键技术开发研究,其强流质子加速器方面的研发主要集中在中低能段,包括离子源与 RFQ 加速器^[1-4]。

20 世纪 90 年代后期,在我国召开了关于 ADS 的香山科学会议和几次院士咨询会议。会议认为,有必要在我国部署 ADS 的基础研究,攻克一些关键技术,为我国将来发展 ADS 奠定技术基础^[5]。1999 年底,科技部将“加速器驱动洁净核能系统的物理及技术基础研究”列入国家“973”计划项目,为我国 ADS 的长远发展计划启动了基础研究工作。强流质子加速器低能端的 RFQ 加速器作为关键技术,成为我国“973”计划 ADS 项目的一个重要子项目。

除洁净能源应用外,RFQ 加速器还可在国家重大需求中得到应用,如在航天领域,它可用于太空飞行器电子器件可靠性研究、宇航员太空辐照环境地面模拟研究;在医学领域,可应用于质子治癌、重离子治癌、硼中子俘获治疗;在国家安全方面,可用于质子照相、白光中子源、海关爆炸物及放射性检测等。特别是它将用于国家“十一五”十大科学工程之一的中国散裂中子源项目(CSNS)之中^[6]。

RFQ 加速器这种先进加速结构可为来自离子源的低能强流束提供周期性强聚焦,并同时在纵向对束流进行聚束和加速。它可有效控制由于低能强流束空间电荷效应导致的束流发射度的增长与束晕的形成,以避免束流在中高能段的损失。由于束流损失产生的感生放射性妨碍人们对加速器的手工维护,束流损失控制成为强流质子加速器的关键技术问题。RFQ 加速器是中高能强流质子加速器的必要部分。

但强流 RFQ 加速器的结构特殊,对束流有害的射频场模式与工作模式的频率间隔小,加速结构复杂,曲面的精度要求较高,加速腔体温度控制要求严格,无论是物理设计、研制工艺、测量调试还是稳定运行,均有一系列技术挑战。在我国建成的这台强流质子 RFQ 加速器输出能量为 3.5 MeV,脉冲流强达 46 mA,工作比超过 7%,束流传输效率高达 93%。本文将介绍这台强流质子 RFQ 加速器在物理设计、研制与调试中的一些主要成果,并报告加速器运行调束的结果。

1 RFQ 加速器的物理设计

在开始设计前,一些参数必须预先给定。选择注入粒子的能量为 75 keV,射频频率为 352 MHz。考虑到 RFQ 的机械加工有很高的技术难度,物理设计应尽可能降低加工难度。同时,ADS 对加速器装置运行的稳定性也有很高要求。从这两个因素考虑,且为了调试的方便和运行的可靠,保持 RFQ 翼间电压 V 沿整个装置不变,选择为 1.8 倍 Kilpatrick 系数。在电极调制被忽略的情况下,RFQ 单位长度上的分布电容取决于电极头曲率半径与平均孔径之比(ρ/R_0),保持翼间电压为常数最容易的办法是保持 ρ/R_0 为常数。为了缩短翼顶调制曲面数控加工时间以控制加工期间温度变化产生的加工误差,决定采用成形刀具,即电极头曲率半径 ρ 为常数。这样就应保持 R_0 不变。其结果是,除了出入口,RFQ 腔体的横截面尺寸不沿纵向位置变化,这对简化加工难度大有好处。在 V 和 R_0 不变的情况下,聚焦系数 B 应基本不变。至此,在动力学设计中随纵向变化的物理参数便仅有调制系数 $m(z)$ 和同步相位 $\varphi(z)$ 。当然,其它参数值的选取仍是动力学设计的重要内容。在这样的给定条件下开始粒子动力学设计,其设计目标是将束流损失控制到最低点,这意味着 RFQ 加速器要有很高的束流传输效率。严格控制束流损失是强流质子加速器的关键物理与技术问题,因束流损失在加速结构上所产生的感生放射性将妨碍人们对机器及时的手工维护,特别是较高能量的质子束所带来的对设备的活化,必须认真对待。RFQ 加速结构的基本材料是无氧铜,在其最高束流

能量 3.5 MeV 以下,存在的活化反应为 $^{65}\text{Cu}(p,n)^{65}\text{Zn}$,其反应阈能 $E_{th} = 2.16 \text{ MeV}$, ^{65}Zn 的半衰期 $T_{1/2} = 244 \text{ d}$ 。在加速过程中,绝大部分束流损失应控制在这个反应阈能之下。

从粒子动力学上看,RFQ 加速器的结构可为 4 段,即径向匹配段(RMS)、成形段(SH)、平滑聚束段(GB)和加速段(AC)。其中最重要的是 GB 段,因在该段内存在 1 个横向瓶颈,它是束流传输效率的关键。RFQ 的结构设计一般从这里开始。美国 Los Alamos 国家实验室开发的以位置 z 为独立变量的 Parmteqm 程序考虑了由圆顶电极引入的高阶多极效应和镜像电荷的作用^[7],有利于精确计算粒子损失,这对强流加速器设计是非常必要的。俄国新开发的设计程序 Lidos. RFQ 的物理模型以时间 t 为独立变量^[8],因而计算空间电荷力时,Lidos. RFQ 更为准确。Lidos. RFQ 还包含 Mont-Carlo 法计算电极加工公差以及分段时极间电压相对变化带来的扰动等功能,此外,Lidos. RFQ 还可给出共振耦合间隙最佳位置,以满足参考粒子通过共振耦合间隙时的射频场为零,从而把间隙对粒子的微扰降到最低。在设计中,充分发挥二者的优点,将其结合起来,取长补短。在加速器结构参数设计中采用更加灵活和合理的 Lidos. RFQ 程序。表 1 列出这台 RFQ 加速器的一些主要设计参数。图 1 为多粒子模拟中不同能量段束流损失的情况。可见,绝大部分束流损失均在低能端,而总的束流损失不超过 2%,达到了控制束流损失的设计目标。

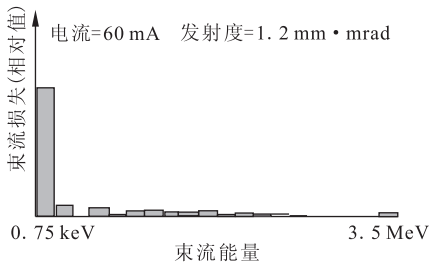


图 1 加速器中不同能量段中的束流损失(相对值)
Fig. 1 Beam loss at different beam energy

在理想情况下,束流传输效率可达 98% 以上,但实际上,腔体加工与安装必然有误差,注

表 1 RFQ 物理设计参数
Table 1 RFQ physics design parameters

设计参数	设计值
注入能量 W_{in}	75 keV
输出能量 W_{out}	3.534 MeV
rms 输入发射度 ϵ_n	$0.2 \pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$
频率 f	352.2 MHz
脉冲流强 I	50 mA
平均半径 R_O	2.93 mm
极顶半径 ρ	2.93 mm
翼间电压 V	66.46 kV
加速器全长 L	4 753.8 mm
峰值表面电场 E_S	32.93 MV/m
调制系数 m	1.0~1.96
最小半径 a	2.93~1.89 mm
聚焦系数 B	5.935~5.989
同步相位 φ	$-90^\circ \sim -29.7^\circ$
腔体功率损耗 P_c	420 kW
束流功率损耗 P_b	170 kW
RF 功率总损耗 P_T	590 kW
工作比	6%

入束流的发射度、匹配程度也会不同于设计参数。因此,考虑各种误差因素后,加速器实际运行的束流传输效率必然低于此值。例如,在束流匹配不佳的情况下,束流传输效率下降的情况如图 2 所示,图中以注入束流的 β 函数偏离设计值的相对值作为横坐标。

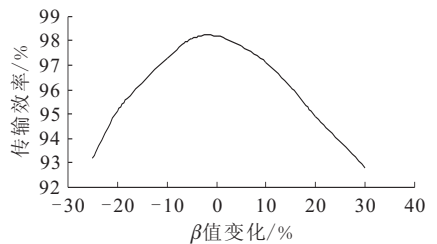


图 2 注入束流不匹配导致的束流传输效率的下降
Fig. 2 Beam transmission rate dependence on beam mismatching condition

除粒子动力学设计外,腔结构设计也是十分关键的物理课题。它包括射频结构的二维、

三维设计以及水冷结构设计。采用 SUPERFISH 和 MAFIA 开展了腔体结构的电磁场分析。对具有高发热的三维结构,包括端头的底切结构、耦合单元结构、真空栅网结构、二极模稳定杆等进行了仔细的设计研究。还用 ANSYS 程序设计了水冷通道的位置、尺寸、流量等基本参数,以确保在高功率运行下,腔体的热形变得到有效控制。还设计了功率耦合器以及 WR2300 半高波导与同轴波导间的门扭式转换器,其回波损耗 $RL = -20\lg(|S_{11}|)$ 最小点对应的工作频率为 352.2 MHz,回波损耗小于 -41 dB,达到设计目标,如图 3 所示。

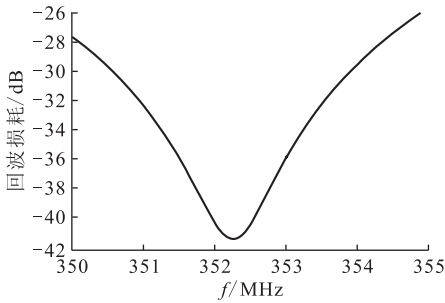


图 3 半高波导与同轴波导间的门扭式转换器回波损耗设计

Fig. 3 Return loss of designed door-knob transformer between half-height waveguide and coaxial line

2 RFQ 实验测量

除物理设计计算外,还在 RFQ 腔体的研制过程中,进行了一系列实验测量研究,这对保证加工质量、降低加工误差、调整加速器场分布、实现 RFQ 高的传输效率是非常重要的。

腔体共约 4.8 m 长,对于射频频率为 352 MHz 的腔体,加速器长度 L 与波长 λ 的比值近似于 5,腔体的频率误差导致的场分布误差与此比值的平方成正比,即:

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{1}{8} \left(\frac{L}{\lambda} \right)^2 \frac{\Delta \omega}{\omega} \quad (1)$$

因此,在 L/λ 很大的 RFQ 中,场分布对局域频率误差非常敏感。为此,采用分段共振耦合的结构,将 4.8 m 长的腔体分为两段,使得由于频率误差引起的场分布误差下降 4 倍。但两段并非均分,其准确位置由同步粒子在分段处受到的电场作用力为零的条件来决定。分段后虽可很大程度上减轻加工或安装误差对场的

影响,但还需对加工和安装误差进行补偿。在 4 个象限沿纵向分别安装了 16 个调谐器,这 64 个调谐器用于腔体整体的频率调谐和场分布调整。场分布调整的目标包括纵向分布调整和 4 个象限间的调整,通过纵向分布调整,达到设计的场分布,即为常数的平整场分布;通过象限间的场分布调整,达到平衡 4 个象限场的大小,降低对束流产生偏转作用的二极模场分量。

但作为象限间弱耦合的四翼型结构,色散较小,二极模与四极工作模式的频率间隔小于 2 MHz,有害的二极模极易混入工作模式中。为此,采用二极模稳定杆结构,在 RFQ 入口端、段间耦合单元以及 RFQ 出口端设计了二极模稳定杆,通过调整杆的长度,实现对二极模频率的移动,而不改变四极模的频率。

二极模稳定杆的长度与二极模移动的关系示于图 4。实验中观察到,当在第 1 象限和第 3 象限的二极模稳定杆的插入深度增长时,第 2、4 象限的二极模频率不断下降,而四极模与第 1、3 象限的二极模频率基本不变。当插入深度为 15 cm 时,第 2、4 象限的二极模与工作四极模的频率间隔大于 7 MHz,满足设计要求。还发现,二极模稳定杆在移动二极模频率的同时,还改变了二极模场分量的大小,但不改变场沿纵向的分布。欲调整纵向场的分布,需改变调谐器的插入深度。采用小球微扰法,让介质小球移动穿过腔体的 4 个象限,分别测量各象限的纵向场分布,计算出二极模和四极模的分布,在 LabView 平台上建立的程序会给出 64 个调谐器的调整量,以指导场的调整。由于共振耦

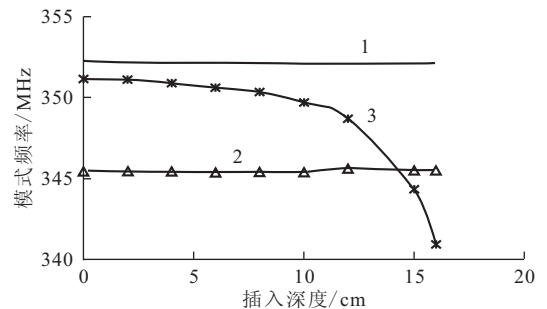


图 4 模式频率变化与第 1 象限和第 3 象限的二极模稳定杆的插入深度的关系

Fig. 4 Mode frequency variation as insertion depth of dipole stabilizer rods in the first and third quadrants
1——工作四极模;2——1-3 二极模;3——2-4 二极模

合单元的扰动,场在此处会出现跳变,编制的程序能够很好地解决此问题,在几个调整循环后达到设计场分布,其四极模场的平整度在 2% 以内,而二极模分量的最大值不超过 2%。测量得到腔体的无载品质因子 $Q_0 = 9\ 100$,与三维电磁场模拟结果 $Q_0 = 9\ 362$ 十分接近。

除 RFQ 腔体的研制外,高功率射频源系统也是 RFQ 加速器的主要装置。从欧洲核子中心(CERN)无偿得到了 1 套 352 MHz 的射频功率源系统,它原来在 LEP-II 上以 CW 的模式工作,总 CW 输出功率高达 1.2 MW。为了适应 RFQ 的脉冲工作模式,对射频源进行了改造,使其既能以 CW 运行,又能在较宽的工作比范围内输出方波脉冲。RFQ 运行在高功率、高束流负载状态下,需对腔体频率、相位和场幅进行严格的实时控制。为此,研制了 1 套数字低电平 I/Q 控制系统,通过对腔体冷却水温度的精确控制(精度达 0.01 °C),实现了腔体的精确调谐,保证了加速器运行的稳定性。

3 束流测量

束流诊断系统用于测量加速器束流参数。根据项目验收要求,在 RFQ 加速器入口与出口设计了束流变压器(ACCT),测量束流脉冲流强。在 RFQ 后的束流传输线上,设计了多丝靶,在分析磁铁后面测量束流能谱。为了保证束流通过分析磁铁的位置准确,降低束流在丝靶上的流强以确保丝不会被强流束损坏,在分析磁铁前面安装了两个准直狭缝。第 1 个狭缝实际上是 1 个靶,它将 97% 以上的束流挡住,承受绝大多数束流功率,因此,需很好的水冷。为避免铜材被质子轰击后产生的放射性,采用铝材,设计了微翼型缝靶,以达到很高的热传导能力。

在完成所有系统的研制安装和调试后,对加速器进行了真空和射频高功率老练。真空老练十分顺利,加速器上几百个焊接与连接处未出现漏真空的情况,经过几个小时的老练,加速器腔体便达到 10^{-5} Pa 的高真空。射频老练的脉冲功率为 436 kW,在 50 Hz 重复频率下脉冲长度达 1.4 ms。

图 5 示出加速器入口与出口束流测量结果。

输入流强读数为 426 mV(上面波形读数),对应流强为 49.7 mA(即 $426 \times 0.116\ 76$),输出流强读数为 397 mV(下面波形读数),对应流强为 46.4 mA(即 $397 \times 0.116\ 76$)。束流传输效率(输出流强与输入流强之比)达 93%,束流脉冲工作比达 7.15%(即 50 Hz 重复频率,1.43 ms 脉冲长度),平均流强达 3.3 mA,超过设计值(3 mA)。利用分析磁铁,测得这台 RFQ 加速器的输出束流能量为 3.54 MeV,束流能谱如图 6 所示。可见,测量结果与模拟计算符合较好。

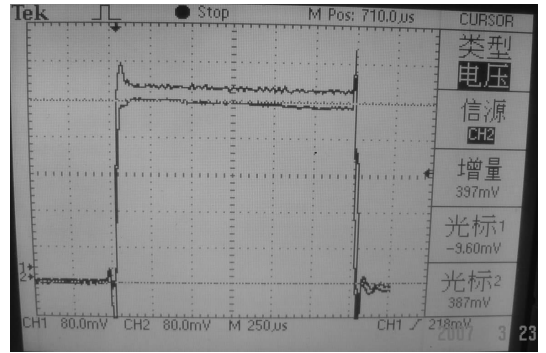


图 5 RFQ 入口(上)与出口(下)脉冲流强测量结果
Fig. 5 Measured beam pulse current at entrance (upper) and exit (lower) of RFQ

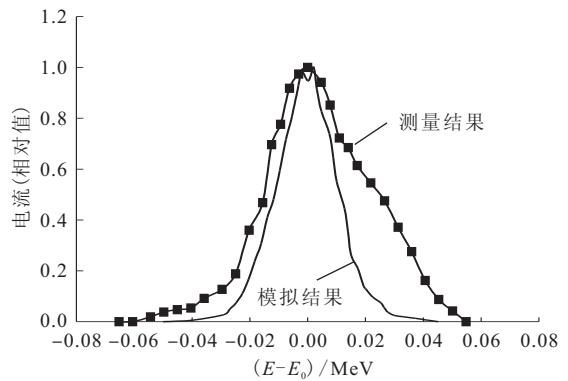


图 6 束流能谱

Fig. 6 Beam energy spectra in measurement and dynamics simulation

4 结语

本项目所研制的强流质子 RFQ 加速器,是为在我国开发新型洁净核能源而开展的关键技术研究。这台四翼型 RFQ 加速器达到了国家“973”计划设定目标,其束流能量为 3.5 MeV,平均流强为 3.3 mA,束流传输效率

高达 93%。在国家“973”计划的第 2 轮支持下,将进一步提高其工作比,并利用它进行强流束实验测量,对束晕形成和发射度增长开展深入细致的研究。

参考文献:

- [1] YOUNG L M. Operations of the LEDA resonantly coupled RFQ[C] // Proceedings of 2001 Particle Accelerator Conference. Chicago: [s. n.], 2001: 309-313.
- [2] FERDINAND R, BEAUVAIS P Y, DUPERRIER R, et al. Status report on the 5 MeV IPHI RFQ[C] // Proceedings of the XX International Linac Conference. Monterey, CA: [s. n.], 2000: 551-553.
- [3] RATTI A, DIGENNARO R, GOUGH R A, et al. The design of a high current, high duty factor RFQ for the SNS[C] // Proceedings of European Particle Accelerator Conference. Vienna, Austria: [s. n.], 2000: 495-497.
- [4] CHOI B H, JOO P K, KIM K R, et al. High power proton linac program in Korea [C] // Proceedings of the XXI International Linac Conference. Gyeongju, Korea: [s. n.], 2002: 26-28.
- [5] DING Dazhao. The conceptual study of accelerator driven radiological clean nuclear power system (AD-RCNPS) in China [C] // Proceedings of JAERI-Conference 99-003. Japan: Japan Atomic Energy Research Institute, 1998: 132-140.
- [6] FU Shinian, FANG Shouxian, WEI Jie. China spallation neutron source linac design[C] // Proceedings of LINAC 2006. Knoxville, Tennessee, USA: [s. n.], 2006: 222-226.
- [7] CRANDALL K R. RFQ design codes, LA-UR-96-1836[R]. USA: Los Alamos National Laboratory, 1996.
- [8] BONDAREV B, DURKIN A, IVANOV Y, et al. The Lidos. RFQ designer [C] // Proceedings of 2001 Particle Accelerator Conference. Chicago: [s. n.], 2001: 2 947-2 949.