

# 中国散裂中子源加速器装置

王生 傅世年\* 屈化民 张旌 马力 董海义 董岚 金大鹏  
康玲 康文 刘华昌 李健 李晓 欧阳华甫 齐欣  
孙虹 沈莉 唐靖宇 王庆斌 徐韬光

(1. 中国科学院高能物理研究所 100049; 2. 散裂中子源科学中心 523803)

## 一、中国散裂中子源

物质结构决定了物质性质,中子和X射线都是人类探索物质微观结构的有力手段,相互补充。相比于X射线,中子不带电、具有磁矩、穿透性强,能分辨轻元素、同位素和近邻元素,且有对样品的非破坏性等独特优势,使得中子散射成为研究物质静态微观结构和动力学机制的理想探针之一。中子散射技术在材料科学技术、物理、生命科学、化学化工、资源环境、新能源等领域的研究和应用发挥着X射线无法取代的作用。

中子散射研究需要高通量的中子,能产生高通量中子的先进的中子源主要包括核反应堆和散裂中子源。核反应堆是一种稳定连续的中子源,通常使用 $^{235}\text{U}$ 作为核燃料,每次裂变产生一个有效中子,释放180 MeV的热量。堆芯中产生的热量必须及时带出,以保证核反应堆的正常运行。由于堆芯散热条件的限制,反应堆中子通量在20世纪6、70年代就达到饱和。散裂中子源是通过加速器装置提供的高能质子轰击靶体产生中子,通过原子的核内级联和核外级联等复杂的核反应,每个质子可以产生20~40个中子,每个中子产生所释放的热量约为核反应堆四分之一。与核反应堆中子源相比,散裂中子源具有许多独特的性能,更高的脉冲通量,丰富的高能短波中子,优越的脉冲时间结构,低本底,且不使用核燃料,只产生极少量活化产物。随着强流加速器技术的发展,百千瓦到兆瓦级束流功率的散

裂中子源成为国际公认的、新一代高通量、宽波段、高效安全的中子源。

进入21世纪,美、日、欧等发达国家认识到能提供更高中子通量和中子利用效率的散裂中子源在现代科学技术中的重要地位,把建设高性能散裂中子源作为提高科技创新能力的重要举措,相继斥巨资建设新一代的散裂中子源。在美国,总投资14亿美元、设计束流功率为1.4 MW的散裂中子源(SNS)已经开始运行。2006年4月28日,SNS产生出第一束中子,其升级工程也同时启动。在日本,总投资约18亿美元的强流质子加速器研究联合装置(J-PARC)已于2009年上半年投入正式运行,其中一台能量为3 GeV的快循环同步加速器将提供1 MW质子束流用于驱动散裂中子源。在英国,已成功运行20余年的散裂中子源(ISIS)投资约3亿美元升级改造其质子加速器和建设第二靶站。位于瑞典的欧洲散裂中子源(ESS)于2014年秋动工,造价18.4亿欧元,由欧洲17国共同修建,预计2027年向用户开放。

中国散裂中子源(CSNS)束流功率设计指标为100 kW,是继英国散裂中子源、美国散裂中子源和日本散裂中子源之后,全世界第四台脉冲型散裂中子源,是国家“十一五”期间重点建设的十二大科学装置之首,可以为国内外科学家提供世界一流的中子科学综合实验装置。CSNS与我国已建成的绵阳研究堆(CMRR)和中国先进研究堆(CARR)相互补充,共同为我国中子散射用户提供全方位的研究和应用服务(图1)。

\* 通讯作者, fusun@ihep.ac.cn



图1 中子科学的研究领域

CSNS装置主要包括:一台80 MeV负氢离子直线加速器、一台1.6 GeV快循环质子同步加速器、一个靶站和3台谱仪及相应的配套设施,如图2所示。CSNS加速器产生高能质子轰击重金属钨靶,通过原子的核内级联和核外级联等复杂的核反应,产生高通量的中子射向样品,在中子与样品作用后,通过围绕样品的谱仪“收集”被散射的中子,并对散射后中子能量、动量和自旋进行分析,得到样品原子/分子的位置及其运动模式。

CSNS一期工程加速器提供100 kW的打靶质子束,脉冲中子通量大于 $2 \times 10^{15}/\text{cm}^2/\text{s}$ ,围绕靶站建

设了20个中子通道。在经费有限的情况下,采用“一次设计,分步实现”的方式,根据我国目前科学研究和技术应用的重点,一期工程先建设三台谱仪,即通用粉末衍射仪、小角散射仪和多功能反射谱仪,未来再逐步增加对应的各种谱仪。CSNS建设国家投资18.67亿元人民币,地方政府无偿提供土地,配套建设了“七通一平”以及办公楼与实验室,另外提供5亿元人民币的资金支持。

## 二、CSNS加速器

加速器是散裂中子源的基本组成部分,它决定整个装置的主要性能指标,其运行稳定性决定了整个装置的使用效率。CSNS采用较低能量的负氢离子加速器后接质子快循环同步加速器设计方案,对束流功率为百千瓦量级的装置而言,比一次性将束流加速到引出能量的1.6 GeV的全能量直线加速器加储存环组合(如美国的散裂中子源SNS)结构的设计方案造价更低,并且易于升级,但快循环的强流质子同步加速器的技术难度更大。

CSNS加速器是我国首次建设的一台大型强流质子加速器,面临很多的技术挑战,特别是快循环

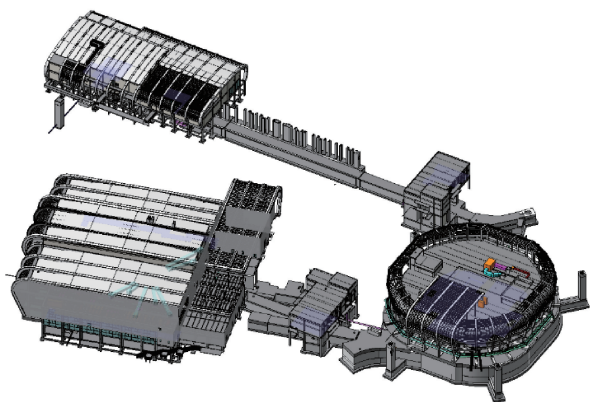


图2 CSNS装置构成示意图

同步加速器所涉及的众多关键技术,在国内没有任何积累。在加速器物理方面,束流损失控制是核心问题,空间电荷效应和束流集体不稳定性是束流损失控制的关键因素,磁聚焦结构、注入/引出系统和束流准直系统的设计都直接与之相关,工作点的选择、注入束流在相空间的涂抹、高频俘获效率等也需要统筹考虑,才能保证强流高功率下的束流损失控制在可接受的水平。在加速器技术方面,强流负氢离子源、高精度中能漂移管直线加速器(DTL)都是国内首次研制,工作在25 Hz谐振状态下的高功率磁铁电源系统,对于磁场的高精度实时控制提出了严峻挑战。MW级谐振电源谐波补偿技术,高重频铁氧体加载高频腔,带屏蔽大孔径陶瓷真空盒等,都需要样机预研来攻克技术难关。为了有效控制工程建设的技术、资金与工期风险,在工程尚未启动前,在中科院和广东省的部分经费支持下,一边开展物理与技术设计,一边围绕强流质子加速器的关键技术进行攻关,在6多年时间里,开展了二十多项关键技术的预制研究,逐个突破了技术难关,一系列关键样机达到国际先进或领先水平。这使得我们可以最大限度地减少国外采购,不仅节省了工程经费,还培育了我国相关企业的创新能力,提高了高精尖技术水平。

表1列出了CSNS加速器主要设计参数,图2展示了CSNS加速器的布局。

表1 CSNS加速器主要设计参数

打靶束流功率 [kW]	100
质子能量 [GeV]	1.6
平均流强 [uA]	62.5
脉冲重复频率 [Hz]	25
直线加速器能量 [MeV]	80
直线加速器射频频率 [MHz]	324
宏脉冲流强 [mA]	15
宏脉冲工作比(%)	1.0
RCS 周长 [m]	228
RCS 谐波数	2
RCS 磁聚焦结构	四折对称
RCS 名义 Betatron Tunes (H/V)	4.86/4.78
RCS 自然色品	-4.0/-8.2
RCS 接受度 [mm-mrad]	540

### 三、直线加速器

直线加速器产生的负氢离子通过注入区的碳膜被剥离掉两个电子而转换为质子注入到快循环同步质子加速器中。之所以采用负氢离子直线加速器,是因为对于平均流强很高的强流质子同步加速器,负氢离子剥离是目前最可行的注入方式。粒子在相空间中的密度是保持不变的,而负氢离子剥离注入的过程可以打破这个限制,在多圈注入时提高同步加速器中累积的粒子数,同时避免束流发射度(发射度是指束流在相空间中的面积,表征了束流横向尺寸和前进角度信息)的增加。注入的负氢离子在通过剥离膜后转换为质子,两者在相空间中是相互独立的,新注入的粒子可以占据原注入粒子的相空间位置,从而达到多圈注入累积更多粒子的目的。

直线加速器的起点是前端系统,主要包括负氢离子源(IS)、低能输运线(LEBT)、射频四极加速器(RFQ)及中能输运线(MEBT)四部分,其既要为整个加速器提供负氢束流,也要为束流进入漂移管直线加速器(DTL)做准备。

负氢离子源是提供负氢离子束流的装置,主要由放电室腔室、引出电极、偏转磁铁、50 kV加速电极以及相应的真空腔室和绝缘陶瓷环组成。整个装置放置于相对于地面电势为-50 kV的高压平台上。装置中通过阴极和阳极之间的电场将氢气电离,形成等离子体放电,产生负氢离子,并被处于高电势的电极引出并加速至百分之一的光速(50 keV)后进入低能传输段。离子源引出的束流在横向水平和垂直方向是不对称的,需要进行聚焦和匹配。LEBT中螺线管组成的磁聚焦结构,通过水平和垂直两个方向的耦合作用,使两个方向的发射度进行平均,从而实现与下游RFQ接受度的匹配。同时,采用磁聚焦结构实现空间电荷中和,这样可以避免由于低能束中的强空间电荷作用引起的发射度增长。在LEBT的末端安装有一台切束器,束流经过切束器时将被切割成快循环同步加速器(RCS)注入时要求的束流时间结构,这是国际上首次将静电切

束器安装在空间电荷中和的LEBT中。

负氢离子束流从LEBT进入到射频四极加速器后,将由百分之一光速加速至约百分之八光速(3 MeV)。RFQ在加速器物理上很有特色,通过单一的射频电场同时实现了束流的加速、纵向群聚和横向聚焦等作用。CSNS的RFQ加速器采取四翼型结构(图3),由两个物理腔通过共振耦合单元链接在一起,腔体的谐振频率为324 MHz。RFQ的入口和前段主要进行横向匹配和聚束,其同步相位很小,而在RFQ后段采用较大的同步相位以得到较高的加速效率。除了加速束流以外,RFQ把束流聚成了一串相邻的微束团,束团的时序和相位决定了下游的漂移管直线加速器的时间结构。

束流在通过RFQ进入到DTL之间还需要经过一个中能束流传输线,对束流进行横向和纵向匹配。由于粒子经过MEBT时,能量仍然很低并且没有空间电荷中和,需要尽量控制发射度增长并最大限度减小束流损失。MEBT中的聚束器是RFQ与DTL纵向匹配的关键部件,为了让RFQ“聚拢”的微

束团更好地和下游的加速结构匹配,聚束腔把束团进一步压缩和调制,从而提高加速效率,同时减少加速过程中的束流损失。

来自RFQ的3 MeV负氢离子束流经过MEBT中能传输线后进入到漂移管直线加速器中,DTL负责将脉冲流强为15 mA的负氢离子从3 MeV加速到80 MeV(图4)。DTL的工作频率同样为324 MHz,轴上平均加速电场约为3 MV/m,总长约35米。腔体内共有153个含电四极磁铁的全无氧铜漂移管和构成FFDD周期性聚焦结构的电聚焦四极磁铁(EMQ)聚焦元件,漂移管安放在轴向位置,束流粒子从其中心孔道通过,沿轴线的正向前进。当粒子运动到两漂移管之间时,高频纵向电场使粒子加速,而当电场反向时,粒子正好运动到漂移管中,屏蔽电场对粒子的作用。为了保证粒子在加速间隙得到持续加速,单元的长度随粒子的速度增加而逐渐增加,保证同步粒子出现在两个连续的加速间隙中心时,高频场相位变化为 $2\pi$ 。

CSNS-DTL所有关键部件全部为自主研发。

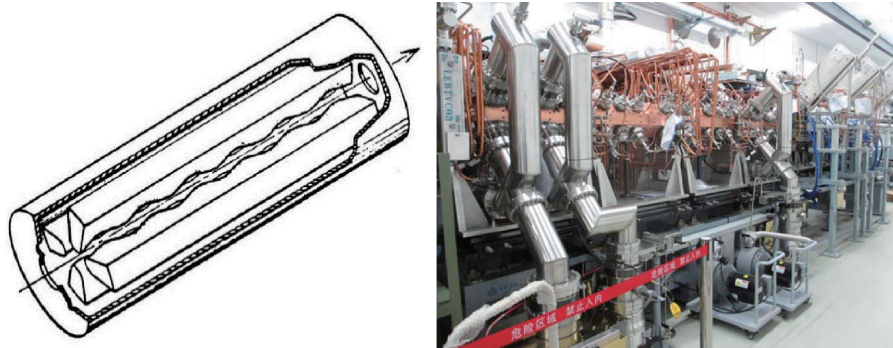


图3 四翼型RFQ结构和CSNS-RFQ加速器

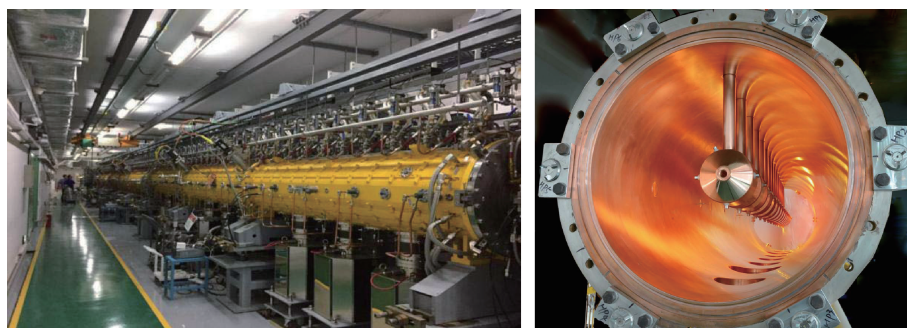


图4 CSNS直线隧道和DTL加速器

在研制过程中,突破了一系列的关键技术难点和挑战,研究成果达到国内领先,国际先进水平,大量的先进技术都属于国内首次采用。DTL腔体的加工和电镀是国内首次进行的大尺寸高频谐振腔高导电无氧铜电镀,对镀层的结合力,致密性,电导率,表面光洁度等都有很高的要求。含有四极聚焦透镜全无氧铜漂移管的研制是另一项关键技术,结构复杂空间紧凑,需要近300多道工序,加工和测量精度要求都很高。此外,利用激光干涉仪校准激光跟踪仪实现超高精度准直测量,漂移管横向安装精度为 $\pm 0.05$  mm,达到国际先进水平,自主研发的高精度电场测量系统的测试精度也达到国际先进水平。

CSNS直线加速器中的RFQ和4个DTL由高功率速调管功率源提供脉冲功率,峰值功率3 MW。速调管功率源由直流高压电源、固态调制器、撬棒、速调管、功率传输系统及其他配套设备所组成,速调管通过将直流电子束中的动能转换为射频功率来放大RF信号。

#### 四、快循环同步加速器

负氢离子被直线加速器加速到80 MeV后,被注入到快循环同步加速器(RCS)中。负氢离子在RCS注入区时被碳剥离膜剥离掉两个电子而转换为质子,注入的质子束经累积达到每脉冲质子数 $1.56 \times 10^{13}$ 。注入到RCS的质子经过20 ms的加速过程,能量由80 MeV增加到1.6 GeV并引出,重复频率25 Hz。RCS磁聚焦结构为四折对称结构,周长228米,主要设备包括二极磁铁、四极磁铁、铁氧体加载高频腔、注入和引出系统以及束流测量等设



图5 直线射频324MHz速调管

备。RCS有四个11米的长直线节分别用来安装束流涂抹注入、横向束流准直系统、快引出和射频加速的设备。

负氢离子剥离注入的方法避开了刘维定理的限制,可以在多圈注入时不增加束流发射度,从而避免了较大的束流损失。RCS采用相空间涂抹注入方案,它对于减小环中的空间电荷效应影响,增加累积流强及减小束流损失是非常重要的环节。注入系统的设计在水平和垂直两个方向上均采用移动凸轨的涂抹方案,利用RCS中一个长11米的直线节完成了注入系统磁铁的布局。这样束流的横向涂抹不会受到RCS加速器弯转二极磁铁的影响,布局对全环的磁聚焦结构影响最小,并且在注入过程中可以独立地进行横向和纵向的操作,也易于将来的升级。

空间电荷效应是强流质子加速器的关键问题,通过适当的凸轨变化,对注入束流在一定的RCS环接受度中进行相空间涂抹以得到合适的束流分布,可以让束流在相空间分布更均匀,从而大大减弱空间电荷效应的影响。注入系统中两对水平涂抹磁铁和两对垂直涂抹磁铁用作束流相空间的涂抹,中间两对较高磁场的水平偏转磁铁组成一个凸轨系统让理想轨道局部凸起,质子束在经过注入系统的局部凸轨后又回到理想轨道上。负氢离子运动在另一轨道上,但在凸轨磁铁的中央位置与注入系统的凸轨相切。剥离膜安放在切点处,负氢离子穿过剥离膜时,大部分的负氢离子失去两个电子变为质子后,在凸轨磁铁的作用下沿凸轨运动,进入RCS的接受度之内。而没有转换为质子的束流,则在经过次剥离膜后几乎全部转换为质子,并被送往废束站。

质子注入RCS后,沿着中心轨道做回旋运动,并被不断地加速,在近两万圈后引出。质子在每次通过RCS直线节上的铁氧体加载高频腔时,都感受到一个交变电场,交变电场的方向与质子的运动方向相同,可获得加速所需的能量而持续加速。RCS中共有8台铁氧体加载腔,提供峰值165 kV的电压,将束流能量由注入时的80 MeV提高到1.6 GeV。

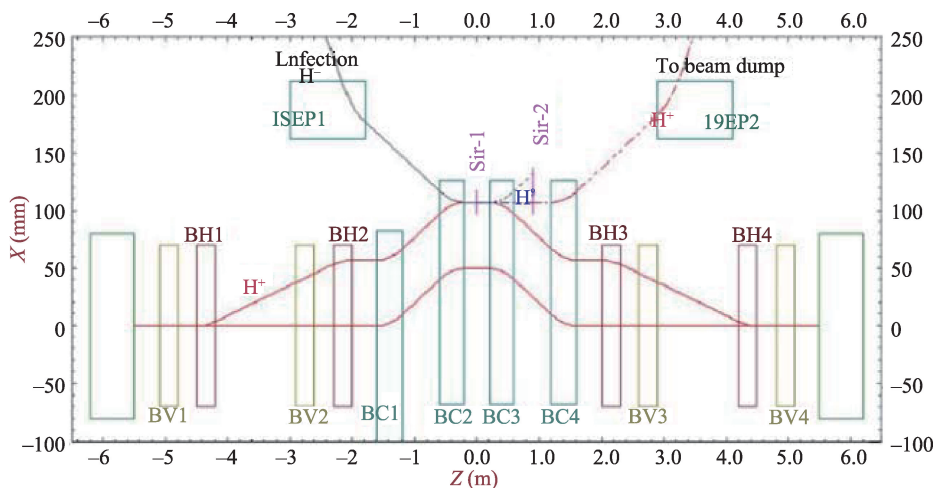


图6 RCS注入系统元件布局

不同于电子同步加速器，质子的速度在加速的过程中有明显的变化，CSNS-RCS中质子的回旋频率从注入时的511 kHz增加到引出前的1.22 MHz，腔体谐振频率必须跟随质子回旋频率变化。RCS高频系统采用在技术上相对成熟和可靠的铁氧体加载同轴谐振腔方案(图7)，谐波数为2，腔长2.7 m，结构为两段单端短路的铁氧体加载同轴传输线，每个腔共有两个加速间隙和56片铁氧体大环，最大工作磁通密度将达到230 Gs。铁氧体材料的相对导磁率可随着腔体8字形偏流绕组产生的外加直流偏置磁场的强度而改变，故谐振腔的电感也将随偏流磁场的变化而改变。

在RCS加速器中质子想要加速到1.6 eV的引出能量，除了持续地获得高频加速电场的加速能量



图7 铁氧体加载腔

以外，还需要稳定地保持在RCS中心轨道运动。RCS加速器中心轨道由4个长直线节联结4个弧区构成，因此在RCS的弧区时，需要使粒子受到一个偏转力进行偏转，同时粒子在沿着中心轨道运动时会因为各种原因使粒子偏离中心轨道，因此还需要使粒子受到一种聚焦力，使其返回到中心轨道上来而不致丢失，此即为轨道稳定性条件。各种类型的加速器磁铁提供了这些不同需求的磁场力，这种磁场力就是通常所说的洛仑兹力，常见的磁铁包括二极磁铁、四极磁铁、校正磁铁、螺线管磁铁以及特种磁铁(图8)。二极磁铁有两个平行磁极，即N极和S极，可以在一定的空间区域内产生均匀磁场，运动的带电粒子在其中的运动轨迹为一条弧线，即轨道偏转，按其在加速器中使束流轨道弯转的用途，这种磁铁也称为弯转磁铁。四极磁铁有四个磁极，N、S极交替，磁极的标准极面是双曲线，双曲线的顶点共圆，其圆的直径即为磁铁孔径。这种磁铁产生的磁场为均匀梯度磁场，其作用是使被加速的带电粒子束以轨道中心为轴线聚焦，按其用途，这种磁铁常被称为聚焦磁铁。二极磁铁与四极磁铁的磁场一般图像如下所示。校正磁铁有二极、四极、六极、八极等各种类型，以校正中心轨道畸变，横向振荡频率，以及各种非线性磁场畸变，进一步提高加速器束流品质，或使束流满足某种特殊需求。

CSNS-RCS总体布局为四折对称的拓扑结构，

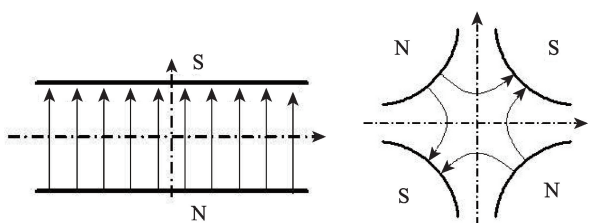


图8 二极磁铁与四极磁铁磁场一般图像

包含四个弧区和四个长直线段。分全环磁铁包括24台二极磁铁、16组共48台四极磁铁、16台六极磁铁以及若干校正磁铁。图9是CSNS-RCS一个典型的磁铁单元照片,包括2种四极磁铁(蓝色,组成三透镜聚焦结构)、交流六极磁铁(绿色)、水平与垂直二极校正磁铁(桔红色)、校正四极磁铁(浅蓝色)。

由四极磁铁和偏转磁铁构成的同步加速器的聚焦布局结构称为磁聚焦结构或称为Lattice,它对

束流的横向运动甚至纵向运动有关键性的影响。束流在RCS中要旋转近两万圈,因此,各种非理想聚焦结构形成的磁场误差及高阶场效应对束流的横向运动产生重要的影响。为了避免或者减小束流的直接损失或者束流品质的变坏,一方面需要尽可能地降低危险的高阶场分量,另一方面在选择环的工作点(水平和垂直方向的自由振荡频率)时要尽量避开低阶的共振线,特别是那些具有超周期结构的低阶共振线(图10,图11)。工作点的选择非常重要,RCS设计的名义工作点区域为(4.86, 4.78),可以避开主要低价结构共振。同时Lattice保持了在较大范围调整工作点的能力。可以调整工作点至(5.3, 4.8)区域、(4.8, 4.3)区域、(5.8, 4.8)区域,水平和垂直工作点可以产生0.5或一个整数的分离。

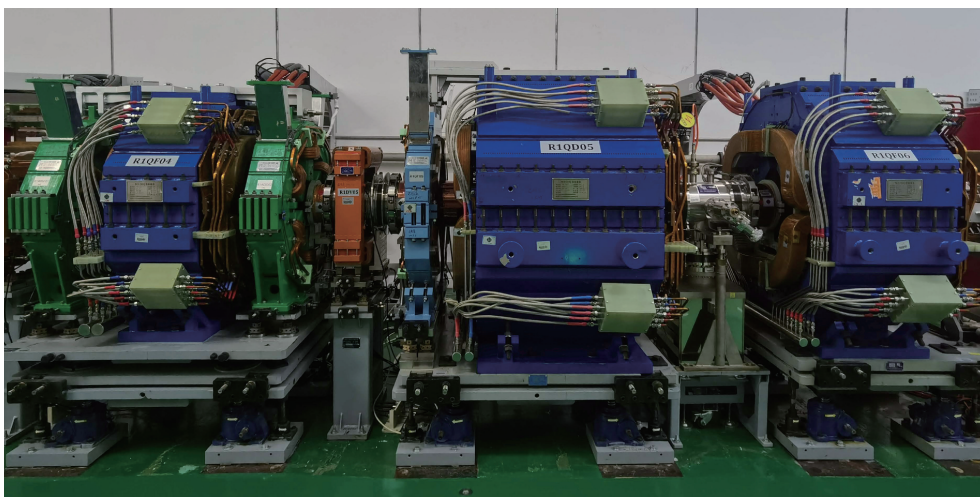


图9 RCS 磁铁单元

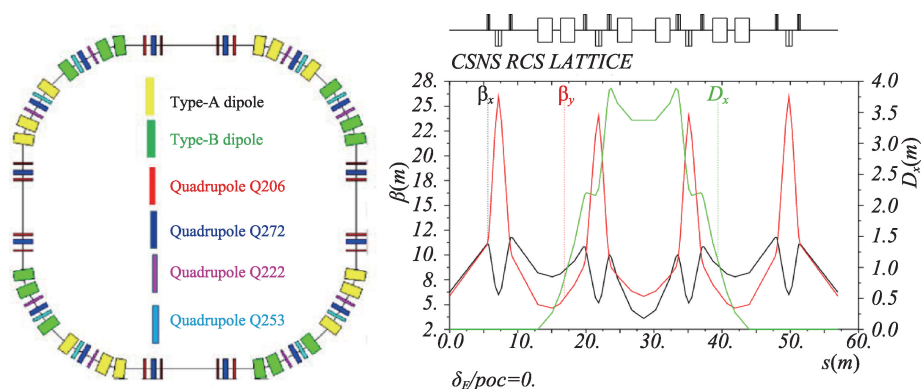


图10 RCS 磁铁分布和束流光学参数

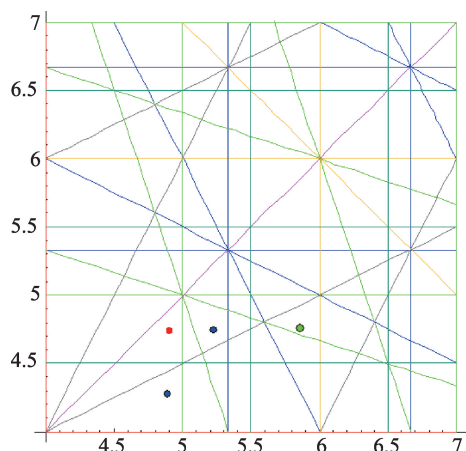


图 11 RCS 结构共振线图和工作点选择

考虑到 RCS 作为一台快循环同步加速器,设计时二极磁铁与四极磁铁为谐振工作模式,二极磁铁最高场强不宜太高。作为一台强流质子同步加速器,磁铁孔径较大,考虑到边缘场效应,二极磁铁有效磁长度不宜太短。综合考虑,最后确定二极磁铁的有效长度为 2.1 m,最高场强 0.98 T,每块二极磁铁偏转角度为  $15^\circ$ 。RCS 二极磁铁与四极磁铁由带直流偏置的 25 Hz 正弦交流励磁,属于中国国内首次进行的大型加速器交流磁铁的设计与制造,也是 CSNS 加速器磁铁系统中最关键、技术难度最高的部分。随着磁场的增大,磁铁端部出现局部饱和的程度也越来越严重,需要进行倒角。磁铁的励磁电流是带直流偏置的 25 Hz 正弦交流电,涡流发热以及振动问题,给磁铁制造带来前所未有的技术难题。交流电流会感应出涡流,尤其是在磁铁的端部,涡流的效应更加明显。涡流产生的损耗不仅浪费能量,其产生的高温还会破坏迭片之间的环氧胶性能,因此需要在磁铁的端部进行开缝处理,用来切断涡流回路,减小损耗。制造工艺难题也是很大的挑战,CSNS 加速器磁铁从开始进行磁铁样机研制到最后一台磁铁安装就位,前后历时 8 年之久。在此期间,解决了环主磁铁的全部工艺难题,包括中空水冷多股铝绞线的制作工艺、振动引起的铁芯散片问题以及抗辐射环氧胶的开裂难题等,实现了设备的全部国产化与自主知识产权,显著提升了国内相关的工业企业磁铁研制水平,也为其他大型加

速器项目的成功实施提供了参考借鉴。

CSNS 主磁铁电源系统是国内首次研制兆瓦级超大功率谐振电源系统。根据对电源技术要求及负载参数的分析,主磁铁电源系统中二极磁铁电源设备具有功率大、电压高、电流大,交、直流混合等特点。其输出最高电流达 2320 A,输出最高电压达到了 6000 V,平均功率高达 2.7 MW。受到磁场饱和的影响,励磁电流与磁场存在严重的非线性关系,采用了谐波注入等措施对相关效应进行了有效补偿。

束流在 RCS 加速器运动时,将要损失掉的粒子首先表现为束晕,处于束流发射度的外沿,束晕进一步发展会超出环的横向接收度,而打在真空壁或真空中的元件上。所以要在束晕粒子在到达环的横向接收度的限制之前通过束流的准直将其清除掉,以控制束晕粒子的随机丢失。CSNS-RCS 在环中一段长直线节,安装了束流横向准直器,对束晕粒子进行阻挡和“切除”,使束流损失局域化在准直器上,并得到很好的屏蔽。该准直系统采用可变孔径结构,由 1 个主准直器和 4 个次准直器组成。主准直器由四个 0.17 mm 薄钨片刮束器组成,四个刮束器对称分布,每个刮束器有独立的驱动装置,可以独自运动改变束流孔径的大小,驱动装置采用电机驱动丝杠传动结构,通过控制程序反馈和补偿,使刮束器实现了在线高精度调节。次级准直器是由 4 个铜吸收器组成,4 个吸收器呈对称分布,结构与主准直器类似。在准直器周围设计足够厚度的铁屏蔽和混凝土屏蔽,将电机、编码器,电磁刹车等电子元器件放置屏蔽体外,降低了电子元器件所受的辐射剂量,提高了维护的方便性和安全性。

束流在 RCS 加速器中持续加速到 1.6 GeV 后引出打靶,CSNS-RCS 采用单圈快引出的方法,在每一个 20 ms 的加速周期结束后,一次性引出环中能量为 1.6 GeV 的两个束团。CSNS-RCS 的引出系统采用了 8 块冲击磁铁加一块切割磁铁的设计,冲击磁铁设计为垂直偏转,配合水平偏转的 Lambertson 型切割磁铁。冲击磁铁组必须在束团间隙之内建



立起引出所需的脉冲梯形磁场,对束流进行快速地偏转,使其偏离中心轨道而进入Lambertson磁铁,实现束流的快速引出。为了保证束流引出的高效率和减小对引出束流品质的破坏,冲击磁铁的脉冲梯形磁场顶宽保持550 ns以上,上升时间须快于250 ns。因为磁场的上升时间很短,束流孔径要求又比较大,所以不能采用金属真空盒或镀膜陶瓷真空盒作为束流管道,而是将磁铁整体放入大的真空箱内,真空压力小于 $2.0 \times 10^{-8}$  Torr。冲击磁铁选择镍锌铁氧体块(Ni-Zn ferrite blocks)制作磁铁铁芯,这种材料具有极好的高频特性,磁响应快,起始磁导率高,饱和磁感应强度大,矫顽力、剩磁和损耗低,真空出气率小,非常适合用作真空内的快脉冲磁铁。脉冲磁铁峰值磁场为0.55 Gs,对应的峰值电流为6 kA。为了降低磁铁的边缘漏场对循环束流的影响,冲击磁铁下游的直流Lambertson磁铁采用了双屏蔽板的设计方案。

## 五、CSNS 加速器控制及束流测量

加速器本身是一个复杂的大科学装置,涉及到加速器物理、磁铁、电源、真空、高频、控制、辐射防

护等十几个子系统,加速器控制系统属于大型分布式控制系统,其被控设备数量多、分布广、接口多样(图12)。为满足机器运行需求,加速器控制系统需要在硬件和软件层面实现整个加速器装置快速、可靠的信息交互,此外,系统还应具有良好的可用性、可扩展性、可维护性,具有一定的实时性(亚秒、10毫秒量级)。控制系统采用了基于EPICS的架构,系统总体上可分为三层:操作员接口和信息显示层、数据库和服务层以及前端控制层。

为了满足加速器调试和运行需求,CSNS加速器控制系统设计了一套运行管理系统(RMS: Run Management System),用于可靠便捷切换束流目标和安全建立控制区域。定时系统是装置的全域性控制系统,定时系统采用目前国际上先进的基于事件(event)的数字定时构架,主要功能可以概括为三个方面:时序触发、时钟同步和高精度时间戳。机器保护系统由常规机器保护系统(NMPS: Normal Machine Protection System)和快速保护系统(FPS: Fast Protection System)组成。常规机器保护系统覆盖整个加速器和靶站谱仪区域,响应时间要求为小于30毫秒。快速保护系统主要接入了直线电源、直

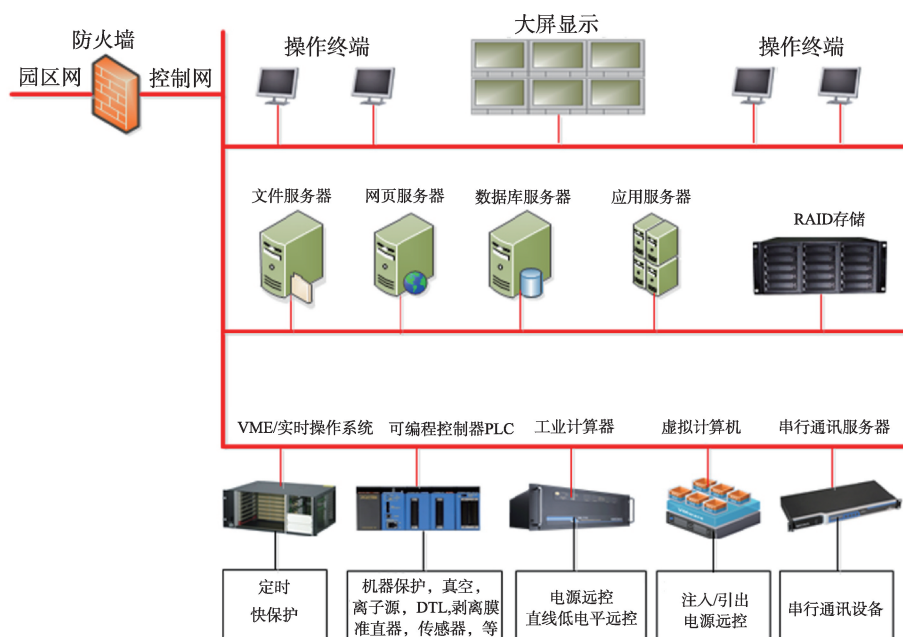


图12 CSNS 加速器控制系统总体框图

线高频和全部束流损失探测器的信号,响应时间要求为小于10微秒。控制网络采用两层拓扑架构方案,核心层采用双冗余核心交换机,具备万兆带宽互联能力,并进行虚拟化配置,接入层采用具备千兆带宽接入端口的交换机,并支持VLAN功能。

加速器上布置了一系列束流探测装置,它们就像加速器的“眼睛”,可以“看到”束流在加速器中运动的状态,用于加速器调试、运行监控以及帮助确定事故位置。束流探测器主要对束流流强、位置、剖面、相位(能量)、发射度、束团纵向长度、束流损失等参数进行测量。根据各加速结构和束流输运线上束团(负氢离子或质子)不同时间结构对探测器的带宽需求,CSNS设计安装了不同类型的束流变压器以精确测量宏脉冲平均流强(BCT)、回旋束流平均流强(DCCT)以及打靶窄脉冲的电荷量(ICT和FCT),并根据测量结果计算束流通过率或传输效率。此外,快束流变压器(FCT)不仅可以测量脉冲束流的相位,还可以通过后期数据处理进行顶降补偿,兼顾宏脉冲流强测量的功能。CSNS-Linac和RCS上设计和安装了多个束流位置探测器(BPM),用来进行轨道矫正,控制束流损失。充有Ar/N<sub>2</sub>混合

气体的电离室是CSNS的主要束损探头,当束流损失发生时会产生大量的伽马射线,伽马射线入射到电离室探测器中产生电信号,进而得到束流损失大小的信息。此外还有电离室型BLM(ionization-chamber type BLM, ICBLM)具有耐辐照性,动态范围大,易维护等优点;配有光电倍增管的闪烁体型BLM(fast BLM, FBLM)则具备信号响应快,灵敏度高等优点。整个束流线共有168个电离室型BLM,有15个闪烁体型BLM,用于精细调节加速器。在CSNS加速器多个位置上都安装有剖面测量装置,用来对束流的横向分布以及发射度等信息进行监测。当丝扫过束流时,束流轰击在丝上产生二次电子,通过在不同位置收集此二次电子的信息即可重建束流在真空管道中的分布信息。在直线加速器后端,研发了一套基于光信号采集的残余气体电离型束流剖面探测装置(IPM),用以对直线加速器束流横向分布信息进行实时测量。壁电流探测器(WCM)通过测量束流在真空管道上感应出来的同频电信号,可对束流的纵向束团形状和束流的稳定性进行观测,对测量数据进行处理后可进一步计算得到纵向发射度以及束团的强度信息等。



图13 CSNS园区鸟瞰图

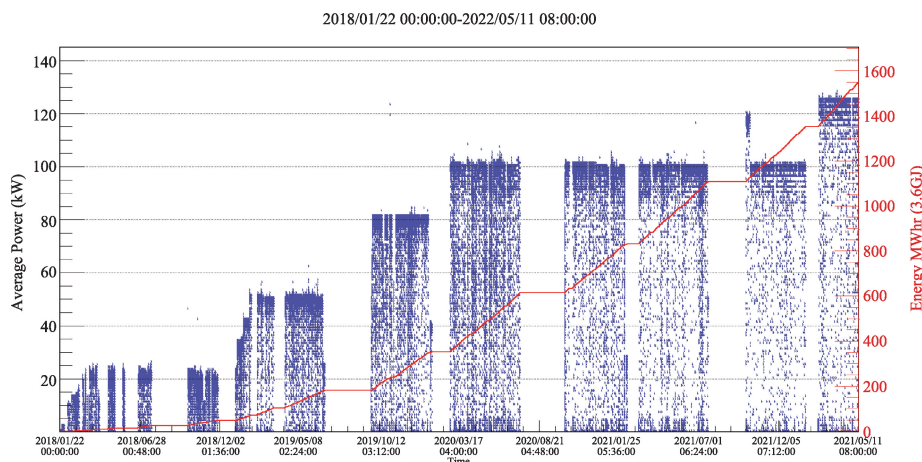


图14 CSNS加速器运行功率和时长统计

## 六、总结

中国散裂中子源质子加速器建设工期历时约6年,2017年8月28日实现加速器首次打靶并产生中子,2017年11月09日达到束流功率10 kW的验收指标并于2018年2月10日实现稳定供束运行,2018年8月23日完成国家验收。2020年春节期间,CSNS加速器按计划进行了新一轮的束流调试工作,在前期大量准备工作的基础上,经过近一个月的精心调试,于2020年2月28日达到束流功率100 kW,圆满完成了CSNS加速器的设计指标。根据国际同类装置的调试运行经验,在CSNS可行性研究报告中承诺在项目验收之后3年内达到100 kW设计指标。由于加速器快速高效的调试工作,CSNS达到设计指标时间比原计划提前一年半。此成绩的取得,得益于高质量的工程建设,同时离不开前期精心的调束准备工作,离不开团队数年如一日的艰苦努力。

加速器设备研制经费约6亿多元人民币,工程按质量、按工期、缩经费,自主设计建成我国的第一台高能量、高功率质子加速器,设备国产化率大于94%。作为用户装置,CSNS建成后验收后,运行稳

定可靠,加速器供束效率长期保持在94%上下,在2021年将潘宁源更换为RF离子源后,整台机器的稳定性可靠性明显提升,近期供束率一度达到99%。与此同时,加速器的束流功率也稳步提升,目前已经超过设计指标25%,稳定运行在125 kW提供用户运行。

接下来,已获国家批准立项的CSNS二期工程(CSNS-II)项目即将启动。它将提升5倍打靶束流功率,到500 kW。由于RCS环能量固定、重复频率固定,功率的提升完全源自于流强的提升。为避免空间电荷效应引起的束流损失,需要采用超导腔将直线加速器的能量提升到300MeV,并同时在环中增加磁合金加载的二次谐波腔。升级工程面临一些新的束流物理问题与工程技术挑战,目前,加速器升级的详细设计方案和关键技术的预制研究已基本完成。

从当初提出建设散裂中子源到它现在的用户运行,历时近20年,近200名研究人员与技术人员全程或分时段参与了它的加速器方案设计、预制研究、机器建造与调试运行,对CSNS的成功建设做出了卓越的贡献,取得了非凡的成就,在此向他们表达衷心的感谢。