

## 第二讲 散裂中子源和高功率质子加速器\*

唐靖宇<sup>†</sup> 傅世年

(中国科学院高能物理研究所 邮编 100049)

**摘要** 文章介绍了与散裂中子源相关的高功率(几十千瓦到几兆瓦)质子加速器的发展状况,比较了不同类型的加速器组合的优缺点和它们的应用范围,并着重介绍该类型加速器所研究的主要加速器物理和加速器技术问题,其中很多都是当今国际粒子加速器领域的前沿问题.文中还简单地介绍了中国散裂中子源(CSNS)计划的加速器概念设计方案.

**关键词** 散裂中子源,高束流功率加速器,空间电荷效应,束流损失

### Spallation neutron sources and high power proton accelerators

TANG Jing-Yu<sup>†</sup> FU Shi-Nian

(Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** A review is presented of high power (from tens of kW to several MW) proton accelerators used in spallation neutron sources. Different combinations of accelerators are compared with regard to their different applications. Major problems concerning accelerator physics and technology are also discussed, including many at the frontiers of research. As an example, the Chinese Spallation Neutron Source project and its accelerator system are briefly described.

**Keywords** spallation neutron source, high power proton accelerator, space charge effect, beam loss

## 1 引言

中子散射的应用和散裂中子源相对反应堆中子源的优点已在另一篇文章中介绍了[物理, 2005, 34(10):731],本文主要介绍对不同要求的散裂中子源的加速器方案选择以及高功率质子加速器(High Power Proton Accelerator, HPPA)的特点和关键性技术. HPPA 是散裂中子源的核心部分,它提供产生中子所需要的高功率质子束;无论是在工程造价中所占的份额还是需要克服的技术困难,它都是任何一个散裂中子源项目中最为突出的.

同时, HPPA 也在诸如高能物理研究中(中微子工厂、介子工厂等)、加速器驱动核能装置(ADS)方面扮演极为重要的角色. 图 1 为用于不同目的

HPPA 及其发展趋势.

## 2 国际散裂中子源的现状

早期的散裂中子源利用的是在高能物理和核物理领域内难以继续发挥作用的质子加速器,如美国 Argonne 实验室的 ZGS 增能器<sup>[1]</sup>、美国 Los Alamos 实验室的 LAMPF<sup>[2]</sup>和日本 KEK 的 PS 增能器,而瑞士 PSI 实验室则将一台回旋加速器改造为连续波散裂中子源 SINQ<sup>[3]</sup>. 1980 年代以前的质子加速器,受到当时加速器理论和技术的限制,平均束流功率都

\* 国家自然科学基金(批准号 10075065)、中国科学院知识创新工程资助项目

2004-10-21 收到

<sup>†</sup> 通讯联系人. Email: tangjy@mail.ihep.ac.cn

表 1 国际散裂中子源一览表\*

| 名称              | 现状           | 加速器类型                       | 平均束流功率/MW  | 重复频率/Hz   |
|-----------------|--------------|-----------------------------|------------|-----------|
| 美国 LANSCE ,LANL | 运行( 1977 年 ) | 800 MeV LINAC + AR          | 0.08       | 20        |
| 日本 KENS ,KEK    | 运行( 1980 年 ) | 20 MeV LINAC + 500 MeV RCS  | 0.002      | 20        |
| 美国 IPNS ,ANL    | 运行( 1981 年 ) | 50 MeV LINAC + 450MeV RCS   | 0.0075     | 30        |
| 英国 ISIS ,RAL    | 运行( 1985 年 ) | 70 MeV LINAC + 800 MeV RCS  | 0.16       | 50        |
| 瑞士 SINQ ,PSI    | 运行( 1996 年 ) | 72 MeV + 590 MeV Cyclotrons | 0.9        | C. W.     |
| 美国 SNS          | 建造( 2006 年 ) | 1 GeV LINAC + AR            | 1.4( 5 )   | 60        |
| 日本 J - PARC     | 建造( 2007 年 ) | 180 MeV LINAC + 3 GeV RCS   | 0.6( 1 )   | 25        |
| 美国 LANSCE II    | 计划           | 800 MeV LINAC + AR          | 0.16       | 30        |
| 欧洲 ESS          | 计划           | 1.33GeV LINAC + 2AR         | 5 + 5      | 16.7 , 50 |
| 奥地利 AUSTRON     | 计划           | 130 MeV LINAC + 1.6 GeV RCS | 0.5        | 50        |
| 中国 CSNS         | 计划           | 70 MeV LINAC + 1.6 GeV RCS  | 0.1( 0.2 ) | 25        |

注 :LINAC——直线加速器 ;RCS——快循环同步加速器 ;AR——累积环

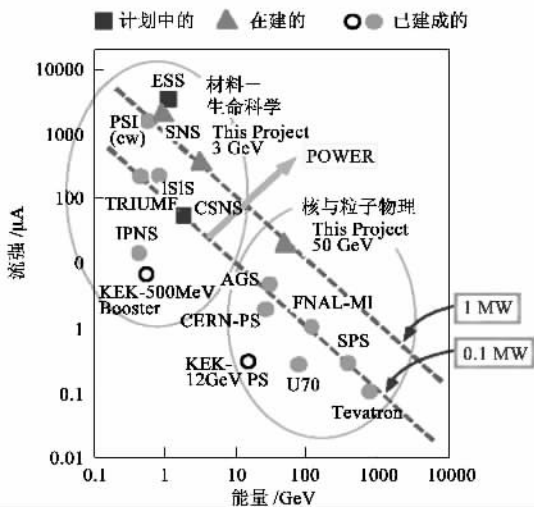


图 1 已建成、在建和计划中的 HPPA

束流的非控损失率设计在 1 W/m( 对应 1 GeV 的质子能量的流强为 1 nA/m )以内 ,而不论是采用什么样的加速器组合 ,高功率束流所需要的功率源系统也得到了较大的发展. 表 1 给出了国际上正在运行的、正在建造的和计划中的散裂中子源和所采用的加速器类型.

### 3 用于散裂中子源的加速器类型的比较

粒子加速器是利用高频电场( 或高压静电场 )将带电粒子加速到接近光速的大型装置 ,为了在加速和传输过程中保证由大量粒子组成的束流团不至于大量损失掉 ,还需要很复杂的磁铁系统对束流进行聚焦和导向.

从散裂中子源对中子的产额的要求可以看到质子的能量应该在 0.6—3 GeV ,若能量太低或能量太高 ,质子产生中子的散裂过程效率不高( 见图 2 ) ,而综合各种因素最佳的质子能量约为 1.1 GeV. 为了有效地利用中子能量 ,散裂中子源还要求质子加速器提供重复频率为几十赫兹、脉冲宽度为几毫秒或更短的脉冲束. 质子的能量与平均流强的乘积代表束流本身所具有的功率( 简称束流功率 ) ,即在不考虑核反应的情况下 ,该束流能产生同量的热功率 ,该束流功率是在加速过程中由高频电磁场的能量转换来的. 通常认为 ,可以获得高束流功率的加速器类型有 :直线加速器( Linear Accelerator ,LINAC )、快循环同步加速器( Rapid Cycling Synchrotron ,RCS )、强流回旋加速器、固定场交变梯度同步加速器( Fixed Field Alternate Gradient Synchrotron ,FFAG ). 一般说

较低. 而在 1980 年代中期建成的英国 RAL 实验室的 ISIS<sup>[4]</sup>首次将平均束流功率突破 100 kW ,为下一代 MW 级的质子加速器的设计和建造奠定了基础. 自 1990 年代以来 ,散裂中子源、中微子工厂和加速器驱动的反应堆等方面的发展需求极大地推动了强流高功率质子加速器的发展. 欧盟、美国和日本几乎同时酝酿建造平均束流功率达 MW 量级的散裂中子源 ,美国的 SNS<sup>[5,6]</sup> 和日本的 J - PARC ( JSNS )<sup>[7-9]</sup> 先后在 1999 年和 2001 年得到批准建造 ,预计将分别于 2006 年和 2007 年出束 ,而欧盟的 ESS<sup>[10-11]</sup> 计划由于各种原因暂时被搁置. MW 级的质子加速器不单纯是平均流强方面提高了一个量级 ,而且在很多设计理念上与十 kW 或百 kW 级的质子加速器有显著的不同 ,其中的关键之一是要将

来,利用同步加速器可以较容易地获得 GeV 级的能量,但提高重复频率和平均流强不容易,利用直线加速器可以较容易地获得较高的脉冲流强和平均流强,提高能量则造价高昂;回旋加速器可以较容易地获得较高的平均流强,但能量很难达到 GeV 以上,且只能是连续束,难以满足散裂中子源对峰值流强的要求;另外,还有一种近年来有复活趋势的 FFAG,可以较容易地提高重复频率,但要达到散裂中子源的强流要求还有较大的困难. 高能加速器的一个特点是必须采用多级加速器的组合,例如同步加速器通常都采用低能量直线加速器作为其注入器,高能直线加速器则对不同的能量段采用不同的加速结构,而为了得到较短脉冲的束流,还必须在直线加速器后加累积储存环(Accumulator Ring,简称 AR)以对束流进行纵向压缩.

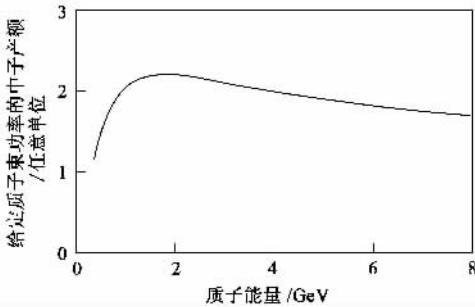


图2 中子产额与质子能量的关系

从散裂中子源加速器的选型看,为了得到百 kW 级的束流功率,低能量直线加速器与快循环同步加速器的组合在造价上要明显优于高能直线加速器与累积环的组合,主要原因是高能直线加速器非常昂贵;后者则在 MW 级的加速器选型上有优势,因为流强更高时要克服空间电荷效应的影响,作为注入器的直线加速器能量不能太低(如 400 MeV 或更高),同时 MW 级快循环同步加速器的高频系统、磁铁系统、真空系统和束流准直系统都较累积环复杂许多,参见表 1.

## 4 HPPA 的加速器物理问题

HPPA 的加速器物理问题主要集中在空间电荷效应和由它引起的束流集体不稳定性、束流外围的稀少粒子(简称束晕)等造成的束流损失,因为在高束流功率加速器中,稍大的束流损失都会导致束流通道区域的放射性剂量太高而无法进行加速器系统的正常维护,直接损坏加速器的设备(束流的热功

率甚至可以烧毁某些设备)或导致其寿命显著缩短(如采用有机绝缘材料的设备绝缘性能变坏). 无论是直线加速器加累积环的组合还是低能直线加速器与快循环同步加速器的组合,所碰到的许多问题是类似的,只是程度有所不同. 在 HPPA 中,主要研究的加速器物理问题可分为:在直线加速器中加速结构的选择、纵向和横向聚焦设计、束晕的控制、束流聚焦器和斩波器的物理设计等等;在环中有磁聚焦结构的设计、注入的  $H^-$  剥离和相空间涂抹、注入束流的纵向相空间俘获(RCS 还有加速的问题)、束晕粒子和未俘获粒子的准直、束流阻抗和束流集体不稳定性、非线性磁场造成的粒子运动的稳定区缩小和共振引起的束流损失、引出系统的物理设计等等. 下面就几个主要物理问题作扼要的介绍.

(1) LINAC 低能段加速器(RFQ)的物理设计: RFQ(Radio Frequency Quadrupole Linac)加速器要将从离子源引出的连续束流(实际为重复频率为几十赫兹的宏脉冲,但相对 RFQ 的高频频率它可以看作是连续的)聚成束团,然后加速到几个 MeV 的能量,这里涉及到复杂的利用高频电场对束流的纵向聚焦、横向聚焦和加速效率问题,同时还需要考虑空间电荷效应的影响,电磁场的分布和高频热损耗的分布都是很关键的问题,因为涉及到的机械加工精度非常高,物理设计还应给出合理的加工误差要求.

(2) LINAC 中高能段的物理设计:在 LINAC 的不同能量段,为了获得较高的加速效率,常采用不同的加速结构,如 DTL、SDTL、CCDTL、CCL 等,甚至采用超导型腔体,同时也需要在适当的能量处进行高频频率的倍频. 不同的加速结构的物理设计也有明显的不同,但同样是研究束流的加速效率、束晕的产生、加速腔参数变化对束流的影响、不同加速段之间的匹配和束流损失控制等.

(3) RCS 和 AR 的相空间涂抹注入:从 LINAC 引出的束流注入到 AR 或 RCS 环中时,为达到多圈注入(几十甚至几百圈)而没有大的束流损失的目标,需采用  $H^-$  通过剥离膜转换为质子的方法,以避免在注入束流线与环的交点处采用如静电偏转板或切割磁铁等带来的束流损失. 同时,为了减小环中空间电荷效应的影响, LINAC 注入到环中的束流密度不仅不能采用简单的粒子累积而增加,而且还必须减小,因为束流需要在环中回转很多圈,不像在 LINAC 中的一次性通过,这就需要采用将注入束流涂抹到一个较大的发射度中的方法以稀释束流密度. 相空间涂抹通常是通过一个较为复杂的凸轨

(即将正常环的闭合轨道在剥离膜处凸出来)系统来完成的,改变凸轨磁场使凸轨随时间变化,就可以将注入束流填充到发射度椭圆内的不同相点上,这其中还必须考虑空间电荷效应的影响和水平-垂直-纵向等三个方向的耦合作用。通常都要求通过相空间涂抹得到一个相空间分布较为均匀的束流。

(4) RCS 和 AR 中的空间电荷效应:即使通过相空间涂抹的方法得到较大的平均束流包络(或相空间发射度),但因为在注入阶段和加速的初始阶段束流能量较低,空间电荷效应仍起到非常重要的作用:它造成束流在环中运行的自由振荡频率向下漂移(频移),导致部分束流甚至束流整体穿越重要共振线而发生较大的束流损失。这一方面需要通过限制累积的总粒子数和采用较大的涂抹发射度来对频移进行控制,另一方面还必须对空间电荷力造成的色散和包络函数失配进行校正。另外,空间电荷力的非线性还会导致束晕的产生,其水平与垂直方向作用的相关性也会导致束流在这两个方向上运动的耦合作用(即发射度)的增加。

(5) RCS 和 AR 中的束流集体不稳定性:束流本身的电磁场与周围的环境(主要是真空室,也包括高频腔体、真空阀门和波纹管、相位探针、某些插入元件如引出冲击磁铁、真空中的剩余气体等)有相互作用,通常称为耦合阻抗,在环中累积的粒子数达到一定的水平后,该阻抗可能导致束流的整体损失(即所谓的束流集体不稳定性)。因此,必须研究各种不同类型的不稳定性发生的阈值水平和减小其引发电阻抗的措施,通常也会导致加速器造价的增加。

## 5 HPPA 的加速器技术问题

HPPA 的某些关键技术问题是发展这类型的加速器的主要限制,如  $H^-$  离子源、强流 RFQ 的加工工艺、超导直线加速器的腔体和高功率耦合器、RCS 的磁铁工艺和谐振型电源、RCS 的高梯度高频加速腔、RCS 的陶瓷真空室和 RF 屏蔽等等,其中的特别困难的或研发经费较多的甚至需要国际合作。下面简单介绍其中的几种关键性技术。

(1)  $H^-$  离子源:MW 级的散裂中子源需要高流强( $>50$  mA)、高占空比( $>5\%$ )、低发射度(归一化发射度约为  $0.1 \pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$ )、寿命长和高可靠性的  $H^-$  离子源,如为了达到 ESS 要求的流强不小于 65 mA、占空比不小于 10% 的  $H^-$  离子源,欧盟内部约有十多个实验室在进行联合攻关。另外,铯蒸汽对提高  $H^-$  的产额有利但却容易造成 RFQ 中的打火,

应尽量避免。如图 3 所示为一种 RF 体源。

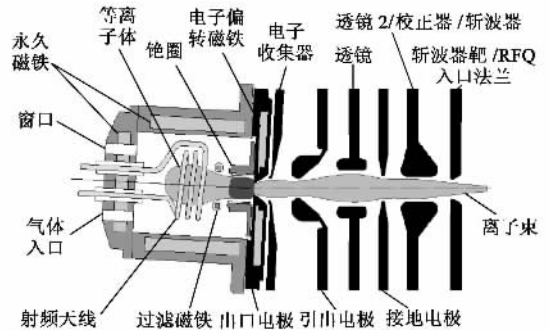


图3 RF体源与低能传输段

(2) RFQ 加速器的腔体设计和加工工艺:RFQ 加速器利用射频四极场同时完成束流的纵向聚束和加速以及横向聚焦等任务(见图4),强流高能量 RFQ 对加工的机械公差要求特别高(如在 1.2 m 长的无氧铜工艺段上,公差要小于  $\pm 20 \mu\text{m}$ )、水冷系统和功率耦合馈入器的设计和加工也比较困难。相对于用于连续波的 RFQ 加速器(用于 ADS 等),散裂中子源的脉冲运行机制对水冷和功率耦合的要求相对低一些。

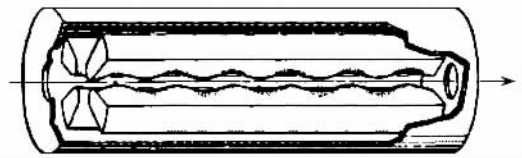


图4 集横向聚集、纵向聚束与加速于一体的 RFQ 加速器示意图

(3) 超导 LINAC:在采用全能量直线加速器与累积环组合的情况下,为了减小加速器运行的费用,高能加速段采用超导加速腔是个非常有吸引力的选择。强流超导 LINAC 有几个重要技术困难需要解决,如脉冲模式下的 Lorentz 失谐、高功率 RF 耦合器、超导腔的高加工精度、复杂的多级(最低到 2K)低温技术等。

(4) RCS 磁铁和电源:RCS 对磁场的快时间变化要求和大孔径给磁铁和电源系统的设计和建造带来困难。磁铁除了尺寸大、重量大和低频机械振动外,为了克服涡流效应带来的发热、磁场分布变坏和功率损失等问题,磁铁的薄矽钢片装配、冷却和边缘场修补以及线圈的绞线与通水钢管结合的结构<sup>[8]</sup>(见图5)等工艺,还有线圈不同匝之间和线圈与线圈之间的近 10 kV 的感应电压也必须有工艺设计上

的保证,这些都使磁铁系统的研制与常规磁铁相比要困难得多.为了解决快循环磁铁中大量无功能量的转换,必须采用较为复杂的交直流叠加的怀特网络型谐振电源,而且对输出电流跟踪控制有较高的要求.

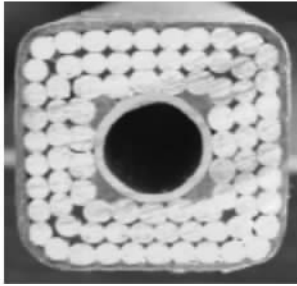


图5 单匝导线剖面

(5) RCS 射频系统: RCS 需要较高的总加速电压以达到快加速的要求,快速变频的低 Q (品质因数)腔难以获得很高的单腔加速电压,因而需要数量众多的 RF 腔体,这一方面会增加射频系统的造价,另一方面也会增加对加速器直线节的要求.传统的铁体加载腔难以得到  $10 \text{ kV/m}$  以上的加速梯度,频率低于  $2 \text{ MHz}$  加速梯度更小,而采用新近发展的磁合金加载腔技术(图 6),可以获得相对较高的加速梯度,但因其 Q 值更低,对射频功率源和水冷系统的要求则更高.至于射频功率源,除了低 Q 腔要求的高功率外,束流负载本身也消耗很高的射频功率.大尺寸磁合金环的筛选、Q 值调整、加工工艺、水冷、腔体和功率源的匹配,以及高功率(平均功率  $300 \text{ kW}$  或更高)射频发射机及同步跟踪,都是较为困难的关键性技术.



图6 经过水切割的磁合金环

(6) RCS 真空系统:快变化磁场带来的另一个

问题(同样是涡流效应引起的)是,磁铁真空盒不能采用金属真空盒而只能采用陶瓷结构的,同时,为了减小耦合阻抗,在陶瓷真空盒上还要增加纵向导电带进行 RF 屏蔽,这可以采用在真空室内安装导电笼子(ISIS 方法),或在陶瓷真空盒上镀导电带(J-PARC 方法,见图 7)的方法.大型陶瓷真空盒的加工、焊接(或粘接)和镀导电带都有较高的技术难度.

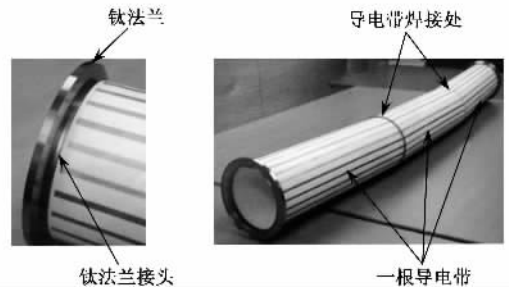


图7 陶瓷真空室和 RF 屏蔽导电带、法兰

## 6 CSNS 的加速器系统

中子散射有着非常广阔的应用前景,被认为是 21 世纪物质结构和动力学研究的极为重要的手段,国内有一些课题组利用反应堆中子源做中子散射实验,目前,我国还没有散裂中子源,这已经成为制约我国在许多世界前沿研究领域发展的瓶颈.为了满足我国前沿重要领域基础研究和高新技术开发研究的迫切需要,推动和提升我国众多学科的创新研究的研究水平,增强我国科技创新研究参与国际竞争的能力,迫切需要尽快建设中国散裂中子源(CSNS)这一重大科技基础设施和大科学装置. CSNS 项目始于 2000—2001 年,2002 年中国科学院知识创新工程批准了 CSNS 的前期研究工作,目标是建造一台束流功率为  $100\text{—}200 \text{ kW}$  的散裂中子源,分二期进行,由中国科学院物理研究所和高能物理研究所牵头进行.从 2002 年 7 月至 2004 年 4 月该项目组完成了 CSNS 的概念设计和关键技术的调研工作<sup>[12]</sup>,目前正在进行技术设计和预制研究工作. CSNS 工程建设为 6 年,其中前 2 年为技术设计和预研阶段,后 4 年为工程建造阶段.如能在近期获得批准并开始正式预研,到 2010 年建成出束时,CSNS 在大多数指标上超过目前世界上亮度最高的 ISIS 而成为当时世界第三的散裂中子源.表 2 给出 CSNS 加速器系统的基本参数,图 8 显示了 CSNS 的布局.

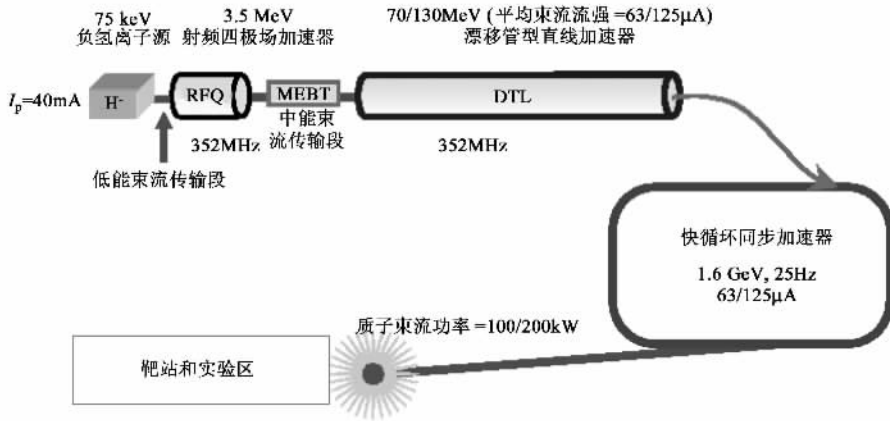


图8 CSNS 的布局示意图

表2 CSNS 加速器的基本参数

|                                       | CSNS - I     | CSNS - II    |
|---------------------------------------|--------------|--------------|
| 束流功率/kW                               | 100          | 200          |
| 重复频率/Hz                               | 25           | 25           |
| 平均流强/mA                               | 62.5         | 125          |
| 束流能量/GeV                              | 1.6          | 1.6          |
| LINAC 引出能量/MeV                        | 70           | 130          |
| 射频频率/MHz                              | 352.2        | 352.2        |
| 峰值流强/mA                               | 15—20        | 25—35        |
| 占空比/%                                 | 0.5          | 0.5—1.0      |
| RCS 周长/m                              | 238.8        | 238.8        |
| 超周期数                                  | 4            | 4            |
| 累积粒子数/ $10^{13}$                      | 1.56         | 3.12         |
| 环接收度/ $\mu\text{m} \cdot \text{mrad}$ | 450          | 450          |
| RF 谐波数                                | 2            | 2, 4         |
| RF 频率范围/MHz                           | 0.92—2.3     | 1.2—2.3      |
| RF 电压/kV                              | 162          | 150          |
| 长直线节/m                                | $8 \times 7$ | $8 \times 7$ |

## 7 散裂中子源及 HPPA 的发展前景

随着正在建造的 MW 级的散裂中子源——美国 SNS 项目和日本 J-PARC 项目的接近完成,国际散裂中子源的发展将有一个质的飞跃。而总束流功率达到 10 MW 的欧洲 ESS 项目还在等待时机重新启动,它的成功不仅要求在高功率质子加速器甚至在靶站的设计上都需要新的突破。已运行 20 年的英国 ISIS 装置也在寻求将其升级以达到 1 MW 的束流功率,第一步将束流功率从 160 kW 增加到 240 kW 的工作已在进行之中。散裂中子源的发展与高能物

理、ADS 等的发展一起必将促进 HPPA 的发展,反过来也一样。在中国,CSNS 的建造不仅将有力地推动中国中子散射技术的发展,同时也将极大地推动中国 HPPA 的发展。

### 参 考 文 献

- [1] Carpenter J M, Price D L. IEEE Trans. Nucl. Sci., 1975, NS-22(3):1768
- [2] Lawrence G P *et al.* IEEE Trans. Nucl. Sci., 1985, NS-32(5):2662
- [3] Bauer G S. SINQ Status Report Oct. 1990. Proc. ICANS XI, Vol. 1, KEK, 1990. 41
- [4] Rees G H, Status Report on ISIS. PAC 1997, Washington, D. C., March, 1987
- [5] NSNS Collaboration, NSNS Conceptual Design Report. NSNS-CDR-2/V1, Martin Marietta Energy Systems, Inc., Oak Ridge Natl. Lab., Oak Ridge, Tenn., 1997
- [6] Holtkamp N, Status of the SNS Project, PAC 2003. Portland, Oregon USA, May 2003
- [7] The Joint Project for High-Intensity Proton Accelerators. KEK Report 99-4, JHF-99-3 and JAERI-Tech 99-056, 1999
- [8] Accelerator Technical Design Report for J-PARC, J-PARC 03-01, March 2003
- [9] Yamazaki Y. The JAERI-KEK Joint Project for the High-Intensity Proton Accelerator. J-PARC, PAC 2003, Portland, Oregon USA, May 2003
- [10] ESS: A Next Generation Neutron Source for Europe. Vol. III: ESS Technical Study, November 1996
- [11] The ESS project: Volume III. Technical Report, May 2002
- [12] 中国散裂中子源(CSNS)概念设计-加速器方案设计与关键技术研究. IHEP-CSNS-Report/2004-01, 2004-07 [Conceptual Design of CSNS Accelerators and Key Technology Studies, IHEP-CSNS-Report/2004-01, 2004-07 (in Chinese)]