

北京散裂中子源快循环同步环磁聚焦结构设计

王生¹⁾ 秦庆 唐靖宇 方守贤

(中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

摘要 快循环同步环(RCS)是北京散裂中子源(BSNS)的一个重要组成部分,其物理设计对加速器的性能和造价起到决定性作用.文章研究了能满足北京散裂中子源RCS要求的几种磁聚焦结构,给出了一个三折结构的详细设计,并比较分析了其他可供选择的磁聚焦结构.

关键词 北京散裂中子源 快循环同步环 磁聚焦结构

1 引言

北京散裂中子源(BSNS)是平均束流功率为100—200kW的短脉冲散裂中子源,并保留束流功率升级到500kW的潜力.对于短脉冲散裂中子源,加速器方案一般有两种构架可选择:1)采用较低能量的直线加速器(Linac)加较高能量的快循环同步环(RCS);2)全能量的直线加速器加累积环(AR).对于BSNS这样束流功率为数百kW级的散裂中子源,采用低能直线加快循环同步加速器的方案,可以减少加速器的总造价和运行费用.

BSNS加速器由80MeV的直线加速器、最高能量为1.6GeV的RCS和直线加速器到RCS的束流传输线组成.直线加速器的80MeV束流注入到RCS中,经过累积和加速,产生动能1.6GeV,功率100kW以上的质子束流.表1给出了束流的主要参数.

表1 BSNS/RCS主要束流参数

参数	数值
束流功率/kW	100—200
注入束流动能/GeV	0.08
引出束流动能/GeV	1.6
重复频率/Hz	25
每脉冲质子数	1.56×10^{13} — 3.12×10^{13}
注入束磁刚度/T·m	1.320
引出束磁刚度/T·m	7.8670

RCS要满足束流的注入、积累、加速及引出的要求,并满足束流准直的要求,使不可控束流损失控制在1W/m以下. RCS的磁聚焦结构(Lattice)设

计应满足这些基本的要求. 本文仔细研究了满足BSNS/RCS要求的Lattice结构及相关的束流动力学,并对几种Lattice结构进行了仔细的比较.

2 磁聚焦结构设计

2.1 不同磁聚焦结构的特点和BSNS/RCS设计要求

强流质子快循环环和累积环多采用FODO或三合一磁铁组(Triplet)/二合一磁铁组(Doublet)结构^[1]. FODO结构包络变化较平滑,四级铁梯度相对较低,易于进行色品校正并具有较好的动力学孔径,为目前运行和建造中的大多数RCS和AR所采用. Triplet/Doublet结构易于产生不间断的长直线节,有利于注入/引出系统、束流准直和射频系统等元件排列和优化.

BSNS/RCS磁聚焦结构设计的基本要求有: 1)避免穿越临界能量; 2)大的动量接受度; 3)较大的动力学孔径; 4)65m—80m的消色散长直线节,以满足注入、引出、射频腔及束流准直的空间要求; 5)工作点的选取要避免低阶结构共振线. 优化目标为: Lattice易于调节,色品、闭轨等校正容易; 较小的偏转和四级磁铁孔径,较小的直线节包络; 周长不大而直线节所占比例(直线节长度/周长)较大; 较少的磁铁数目和电源数; 真空盒种类少; 磁铁能耗少; 尽量降低对注入、引出系统硬件的要求等.

1) E-mail: wangsh@ihep.ac.cn

2.2 一个三折混合结构的 Lattice 设计

根据 BSNS/RCS 的设计要求和 FODO 及 Triplet/Doublet 的结构特点, 弧区选择 FODO 而长直线节采用 Triplet/Doublet 的混合结构是一种好的选择, 可以利用两种结构的优点, 兼顾弧区和长直线节的不同需求. 下面给出直线节为 Triplet, 弧区为 FODO 的三折对称 Lattice 设计.

图 1 给出了三折结构的一个超周期的磁铁排列. 直线节中间为两组 Triplet 磁铁, 通过两端半组 Triplet 磁铁过渡到弧区的 FODO 单元, 中间形成一长两短的直线节. 长、短直线节的长度均可根据硬件系统的要求进行调整, 这里给出的长直线节的长度为 10m, 短直线节的长度为 7.5m, 全环共有 75m 的消色散直线节, 可以满足注入、引出、射频及束流准直系统对消色散直线节的要求. 弧区由 4 个 FODO 单元组成, 每块偏转磁铁的偏转角度为 15° . 弧区消色散, 保证直线节内色散为 0, 还要提供 1.5m 的空间用来安放初级动量准直器. 初级动量准直器需要安放在色散函数和水平包络函数比值 D_x/β_x 较大的地方, 以提高准直效率. 弧区偏转磁铁和四级铁之间的标准距离为 1m. 为满足初级动量准直器的空间要求, 将聚焦四级铁和偏转铁之间的距离增加到 1.5m, 这样可提供几个安放初级动量准直器的候选位置, 又不破坏 FODO 单元的对称性.



图 1 直线节(上)和弧区(下)的磁铁排列

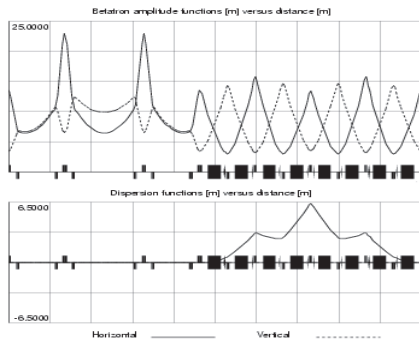


图 2 RCS 一个超周期的束流包络函数和色散函数

图 2 是 RCS 环一个超周期的束流包络函数和色散函数分布. 根据目前磁铁设计制造的工艺水平, 二极铁的强度小于 1T, 四极铁磁场梯度小于 5.5 T/m. 直线节最大包络函数为 23m, 弧区最大包络函数为 16m, 最大色散函数为 6.5m. 最大色散函数偏大, 是这个

Lattice 的主要缺点. 利用 Triplet 的特点, 长、短直线节的包络函数均很小, 利于硬件系统的设计和制造. 表 2 是 Lattice 主要参数.

表 2 Lattice 主要参数

参数	数值
周长/m	228
横向接受度/ $\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$	480
长直线节长度/m	$10 \times 3 + 7.5 \times 6$
超周期数	3
弧区最大 $\beta/\text{m}(x/y)$	16.0/16.0
弧区最大 D_x/m	6.5
横向振荡频率 ν_x/ν_y	4.88/4.8
自然色品 ξ_x/ξ_y	-5.43/-4.43
临界能量 γ_t	3.9
动量压缩因子 α_p	0.0373
二极铁/四极铁数目	24/51
二极铁/四极铁电源套数	1/6

2.3 结构共振线和工作点的选择

对于三折超周期对称结构, 结构共振线 $pQ_x \pm qQ_y = 3n$, p, q, n 为整数, 比一般的非结构共振线更加危险, 选择工作点时必须避开四阶, 至少是三阶以下的结构共振线. 并且对于 RCS, 由于低能量时很强的空间电荷效应, 会造成很大的频移. BSNS/RCS 在注入时, 空间电荷效应导致的最大频移将超过 0.3, 因此所选工作点附近应有一块没有低阶结构共振线的干净区域, 以避免穿越结构共振线造成的束流损失. 表 2 中给出的工作点 $Q_x/Q_y = 4.88/4.80$ 是三折结构的一个较好区域, Lattice 本身的工作点调节也很灵活, 两个方向均可在 ± 0.5 范围内灵活调节, 不会对束流的包络函数造成大的扰动. 水平工作点由直线节的 3—4 套四极铁电源调节, 弧区的两套独立电源可参与垂直工作点的调节.

3 色品校正和动力学孔径

如表 2 中所列, 虽然自然色品不是很大, 但为了减小频散, 特别是低能量时的频散, 色品校正还是必要的. 由于弧区采用 FODO 单元, 使得色品校正易于进行. 每个弧区安排 8 块六极铁, 分为四组进行色品校正, 并控制二阶及三阶色品. 在引入六极子的情情况下, 包络函数在有动量分散时变化非常小. 如图 3 所示, 图中给出了一阶色品校正到 -1 时, 动量分散分别为 0 和 $\pm 1\%$ 时一个超周期内水平和垂直方向包络函数的变化. 在目前不考虑高阶场和安装准直公差的情况下, 二维 (不考虑纵向) 1000 圈的跟踪结果表明对动量分散为 $\pm 1\%$ 的粒子, 动力学孔径大于 $5\sigma_x \times 5\sigma_y$, σ_x 和

σ_y 为水平和垂直方向的束团尺寸。

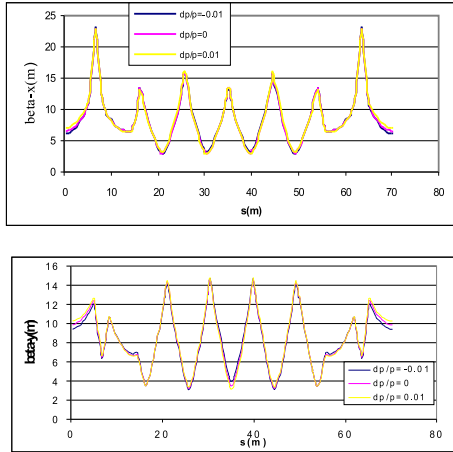


图 3 动量分散为 0 和 $\pm 1\%$ 时水平和垂直方向包络函数的变化

4 其他可供选择的 Lattice 方案

与上述 Lattice 结构相近的另一个方案是, 保持弧区的结构不变, 将直线节的聚焦结构改为 Doublet, 优点是全环四级铁数目由 51 减少到 39, 周长可减少 10%. 缺点是虽然长直线节仍可保持较小的包络函数, 但短直线节处最大包络函数会增加一倍左右, 这可能导致 RF 腔铁氧体盘片的内孔径增大, 因而引起 RF 腔 Q 值的下降。

对另一个重要的可供选择的 Lattice 方案也进行了仔细的研究和比较. 如图 4 所示, 直线节和弧区均采用

用 Triplet 结构, 两块长偏转铁放在两组 Triplet 之间的长直线节中. 优点是偏转铁间隙小, 长直线节处束流包络函数小. 缺点则是色品校正相对困难, 动量分散不为零的粒子的包络函数在引入色品校正六极子后扰动较大。

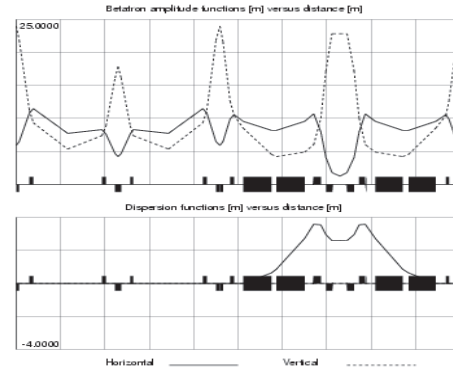


图 4 直线节和弧区均采用 Triplet 结构 Lattice 的一个超周期的束流包络函数和色散函数

5 小结

本文简单介绍了 BSNS/RCS 磁聚焦结构的几个主要选择. 通过比较几种磁聚焦结构的特点, 给出了弧区采用 FODO 单元而长直线节采用 Triplet 的混合结构的磁聚焦结构, 很好地满足了 BSNS/RCS 的要求, 并给出了色品校正的结果, 讨论了工作点的选择问题. 同时给出了另外两种可供选择的 Lattice 方案。

参考文献 (References)

- 1 WEI J et al. Proceedings of EPAC 2000, 2000, 978—980

Lattice Design for the BSNS Rapid Cycling Synchrotron

WANG Sheng¹⁾ QIN Qing TANG Jing-Yu FANG Shou-Xian

(Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100049, China)

Abstract Rapid Cycling Synchrotron (RCS) is a key component of the Beijing Spallation Neutron Source (BSNS), and an optimal lattice design is essential for the assessment and the future operation. Based on the comparison of several types of lattice structure, a FODO/Triplet hybrid structure is presented. Two alternative lattices are also given, and the merits and the demerits of each lattice are discussed.

Key words Beijing spallation neutron source, rapid cycling synchrotron, lattice

1) E-mail: wangs@ihep.ac.cn