

文章编号: 1007-4627(2017)04-0735-05

HIAF-BRing 中极化质子加速研究

尹彬^{1,2}, 李德民¹, 杨建成², 盛丽娜², 张小虎²

(1. 郑州大学物理工程学院, 郑州 450001;

2. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000)

摘要: 为了更深入地研究核子性质, 中国科学院近代物理研究所将在强流重离子加速器装置(HIAF)上利用极化质子束开展实验。HIAF 增强器 BRing 能够提供最大能量 9.3 GeV/u 的极化质子束, 在加速过程中极化束流会遇到多次退极化共振, 需要特殊设计才能使束流保持较高的极化度。利用退极化共振强度模拟程序 DEPOL, 研究了 BRing 加速过程中不同退极化共振对束流极化度的影响。结果表明, 加速过程遇到的两种退极化共振将会使束流完全退极化; 在 BRing 电子冷却段加入 Full Siberian Snake 可以使质子束在加速时保持较高的极化度。

关键词: 自旋; 极化; 退极化共振; Siberian Snake

中图分类号: TL5 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.34.04.735

1 引言

极化束流是指粒子自旋排列有序, 矢量和在某一量子化轴线上呈现一定方向性的束流。由于用极化束做实验所得信息量远比仅用非极化束流多, 且观测对某些核结构较为敏感, 因此广泛应用于核结构的研究中。目前, 包括美国布鲁克海文国家实验室、德国于利希研究中心在内的国际知名实验室都已多次利用极化束流开展实验。中国科学院近代物理研究所也计划在强流重离子加速器装置(HIAF)^[1]上利用极化质子开展相关实验。

HIAF 是中国科学院近代物理研究所提出的“十二

五”国家重大科技基础设施建设项目, 是一台束流指标领先、学科用途多的重离子科学研究装置。其总体布局如图 1 所示。由强流超导离子源 SECR、强流超导离子直线加速器 iLinac、增强器 BRing、高精度环形谱仪 SRing、低能核结构谱仪、低能辐照终端、电子-离子复合共振谱仪、放射性束流线、外靶实验终端以及相关配套设施构成。建成后, HIAF 将在 BRing 中对极化质子束加速, 这将是我国首次在环形加速器上加速极化质子, 因此本文将对极化质子在 BRing 中的加速方案进行研究。表 1 为 BRing 质子模式的主要参数。

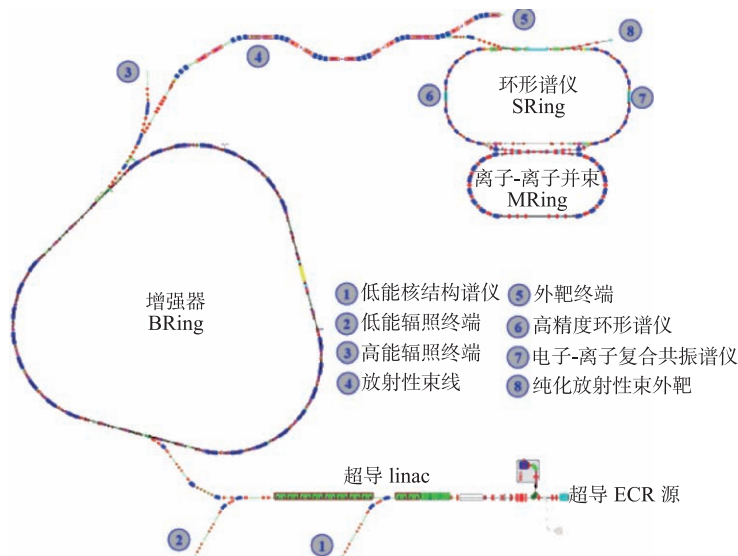


图 1 (在线彩图) HIAF 总体布局

收稿日期: 2016-11-25; 修改日期: 2017-04-29

作者简介: 尹彬(1994-), 男, 河南南阳人, 硕士研究生, 从事粒子物理与原子核物理研究; E-mail: yinbin@impcas.ac.cn.

表 1 BRing 质子模式主要参数

参数	数值
最大磁刚度	34 T·m
工作点 v_x/v_y	11.45/8.42
注入质子能量	54 MeV/u
引出质子最高能量	9.3 GeV/u
注入质子发射度	5.0 π mm·mrad
最大高频电压	180 kV

2 极化动力学

通常极化束流在某一方向的极化度可表示为

$$P = \langle S \rangle = \left| \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_i \right|, \quad (1)$$

S_i 表示第 i 个粒子的自旋。当有外磁场作用时，粒子的自旋进动由 Thomas-BMT 方程^[2]表述：

$$\frac{dS}{dt} = \frac{e}{\gamma m} S \times [G\gamma B_{\perp} + (1+G) B_{\parallel}], \quad (2)$$

式中： γ 是洛伦兹因子； G 是核子的反常磁矩因子（质子的 G 值为 1.7928）； B_{\perp} 和 B_{\parallel} 分别表示垂直和平行于粒子运动方向的磁场。公式 (3) 给出粒子速度变化满足的洛伦兹方程：

$$\frac{dv}{dt} = \frac{e}{\gamma m} v \times B_{\perp}, \quad (3)$$

对比式 (2) 和 (3) 可以看出，当垂直磁场为主导场时，每一个运动周期内自旋将进动 $G\gamma$ 次，即自旋工作点等于 $G\gamma$ 。

3 退极化共振

在环形加速器中，当自旋进动频率与扰动磁场频率相等时，将会发生退极化共振。通常情况下对极化度保留影响最大的退极化共振主要有 2 种^[2]：(1) 由于磁铁的安装误差、场误差等原因，自旋在束流的每个运动周期都会受到固定的扰动。此时自旋工作点 $\nu_{sp} = n$ ，其中 n 为整数，这类退极化共振称为非理想共振；(2) 由聚焦场引发的自旋扰动场，自旋进动随垂直 Betatron 振荡受到扰动，此时自旋工作点 $\nu_{sp} = nP \pm \nu_y$ ， n 为整数， P 为加速器的超周期， ν_y 是垂直方向的 Betatron 工作点，这类退极化共振称为固有共振。

在 BRing 中，极化质子束从 54 MeV/u 加速到 9.3 GeV/u。加速过程中束流要经历多次退极化共振。本文使用 DEPOL 程序^[3]模拟计算了加速过程中极化质子束遇到的固有共振和非理想共振的强度，结果如图 2

所示。结果表明，极化质子在加速过程中将会遇到很多退极化共振，且部分退极化共振强度较大，可能会使束流严重退极化。

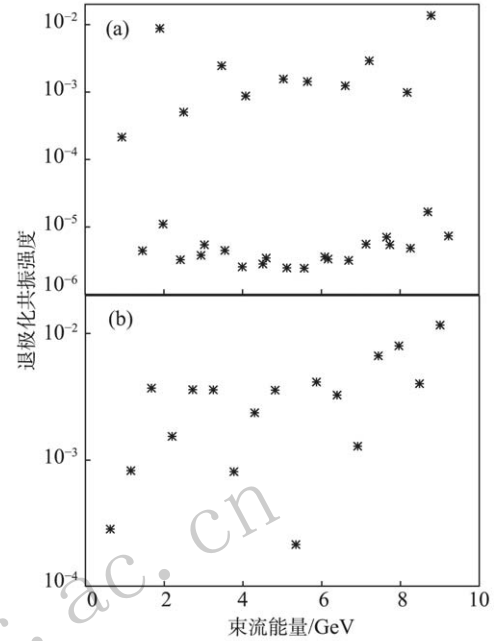


图 2 HIAF-BRing 中固有共振强度 (a) 和非理想共振强度 (b) 的计算

当极化束流经过一个退极化共振时，极化度的变化满足 Froissart-Stora 方程^[4]：

$$P_y(\infty) = \left(2e^{-\frac{\pi|\epsilon|^2}{2\alpha}} - 1 \right) P_y(-\infty), \quad (4)$$

其中 $P_y(-\infty)$ 和 $P_y(\infty)$ 分别表示束流经过共振前后的极化度， $\alpha = d\nu_{sp}/d\theta$ 表示自旋工作点随轨道弯转角度的变化率， ϵ 为退极化共振强度。假定束流初始极化度为 80%，得到 BRing 中极化质子在加速过程中极化度的变化如图 3 所示，两种不同类型退极化共振对束流极化度的影响如图 4 所示。

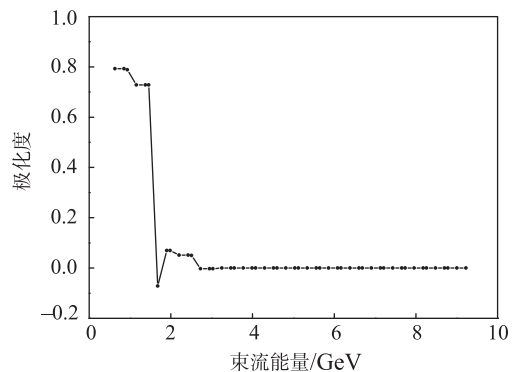


图 3 BRing 中质子极化度随能量变化

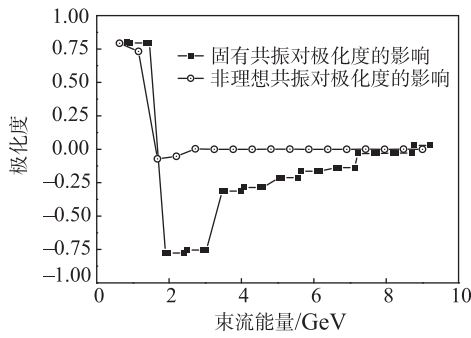


图 4 不同类型共振对极化度的影响

结果表明, BRing 中固有共振和非理想共振均严重影响束流极化度的保留。当极化质子加速至 3 GeV 后, 束流将完全退极化。因此在加速极化质子束时, 克服这两种退极化共振尤为重要。

4 Siberian Snake

Siberian Snake^[5] 磁铁可以使粒子的自旋方向发生偏转, 从而改变自旋工作点, 使其不再满足退极化共振条件。对于有一组 Siberian Snake 磁铁的环, 极化束流的自旋工作点满足

$$\cos \pi \nu_{sp} = \cos \frac{s\pi}{2} \cos G\gamma\pi, \quad (5)$$

s 为 Snake 磁铁的强度, 取值范围由 0 到 100% 表示极化方向在 Snake 磁铁中旋转 0° 到 180° 。图 5 表示了不同强度 Snake 磁铁对自旋工作点的作用情况。

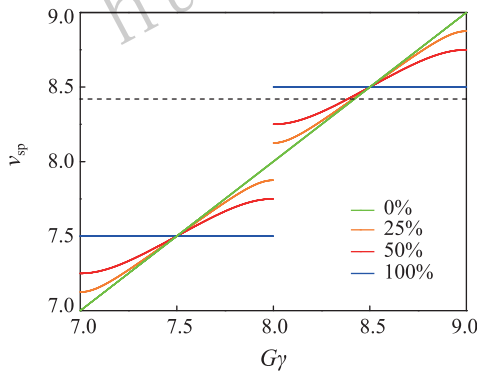


图 5 (在线彩图) 不同强度 Siberian Snake 对自旋工作点的影响
虚线表示 BRing 的垂直 betatron 工作点。

从图 5 中可以看出, Snake 磁铁可以使自旋工作点的取值在接近整数时出现 $\pm s/2$ 的间隙, 从而有效地克服了非理想共振。当垂直 betatron 工作点在间隙范围内时, 固有共振和非理想共振都将被克服。BRing 的垂直 betatron 工作点接近半整数, 因此选择在 BRing 中

加入 Full Siberian Snake($s=100\%$) 来克服这两种退极化共振。

目前, 常用的 Siberian Snake 磁铁主要有 2 种: 利用纵向磁场改变极化方向的螺线管和利用横向磁场改变极化方向的螺旋二极铁。根据公式 (2), 在 BRing 的加速能量范围内, 纵向场对于束流极化的影响较为明显, 因此计划采用在 BRing 中加入螺线管的方法克服退极化共振。螺线管的纵向积分场强与极化旋转角度 θ 满足

$$\int B_{\text{long}} \cdot dl = \frac{mc\beta\gamma}{(1+G)e} \cdot \theta. \quad (6)$$

因此, BRing 中加速极化质子所需安装 Full Siberian Snake 螺线管的最大积分场强为 38.24 T·m。

5 螺线管的补偿

Siberian Snake 螺线管可以有效地保留束流的极化度, 但其引入水平和垂直方向的耦合将严重影响束流的稳定性, 因此进行螺线管的解耦合变得十分有必要。我们将所需螺线管分为完全相同的两段, 在中间加入若干四极铁作为补偿段, 补偿段的传输矩阵满足^[6]

$$M_{\text{COMP}} = \begin{pmatrix} M_{2 \times 2} & 0 \\ 0 & -M_{2 \times 2} \end{pmatrix}, \quad (7)$$

包括两个螺线管在内整体的传输矩阵满足

$$M_{\text{SOL}} \times M_{\text{COMP}} \times M_{\text{SOL}} = \begin{pmatrix} A_{2 \times 2} & 0 \\ 0 & B_{2 \times 2} \end{pmatrix}, \quad (8)$$

从而实现了螺线管耦合效应的补偿。在 BRing 中, 将 Snake 螺线管放在电子冷却段, 并采用 6 块四极铁补偿螺线管的耦合效应, 详细的位置和结构如图 6 所示。

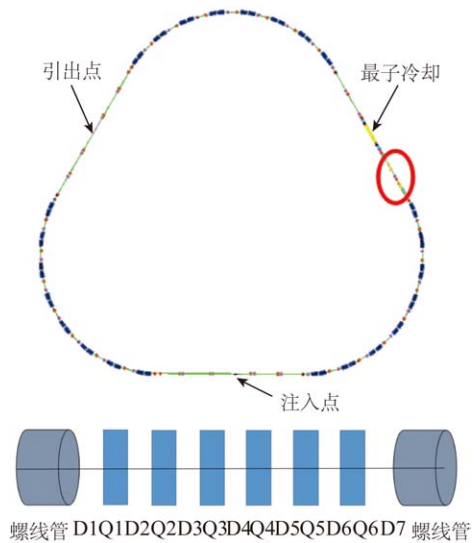


图 6 (在线彩图) Snake 螺线管及其补偿部分在 BRing 中的具体位置(圆圈部分)和详细结构

表 2 和图 7 则分别给出了耦合补偿段各元件的具体参数和束流包络。含补偿段在内的整个 Full Siberian Snake 结构的横向传输矩阵为

$$M = \begin{pmatrix} -0.05 & -14.29 & 0 & 0 \\ 0.07 & -0.95 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.06 & 14.30 \\ 0 & 0 & -0.07 & 0.95 \end{pmatrix} \quad (9)$$

结果表明, 6 台孔径为 150 mm×120 mm 的四极磁铁可以很好地补偿 Snake 螺线管引起的横向耦合效应。

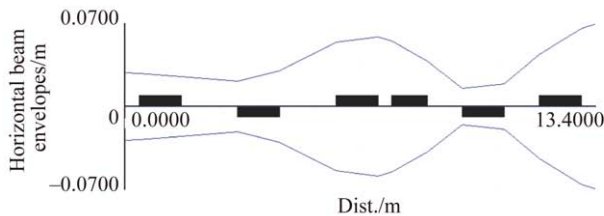


表 2 补偿段元件的参数

元件	类型	长度/m	K/m^{-2}
D1	漂移节	0.4	0
Q1	四极铁	1.2	0.233
D2	漂移节	1.6	0
Q2	四极铁	1.2	-0.340
D3	漂移节	1.6	0
Q3	四极铁	1.2	0.340
D4	漂移节	0.4	0
Q4	四极铁	1	0.340
D5	漂移节	1	0
Q5	四极铁	1.2	-0.327
D6	漂移节	1	0
Q6	四极铁	1.2	0.237
D7	漂移节	0.4	0

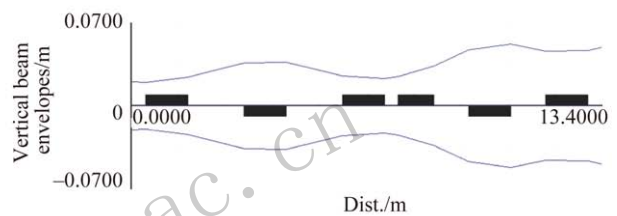


图 7 耦合补偿段的水平和垂直束流包络

6 结论

我们主要研究了 HIAF-BRing 中的退极化共振并设计了极化质子的加速方案。计算结果表明, BRing 中存在很强的固有共振和非理想共振, 且由于垂直 betatron 工作点接近半整数, 因此我们将采用加入 Full Siberian Snake 螺线管的方案来克服退极化共振。同时, 结合 BRing 参数计算了所需 Snake 螺线管的积分场强以及螺线管耦合补偿段的详细结构和安装位置, 这为未来在 HIAF 中利用极化质子束开展实验提供了基础。

参考文献:

[1] YANG Jiancheng, XIA Jiawen, XIAO Guoqing, *et al.* Nucl

Instr Meth B, 2013, **317**: 263.

[2] ALEKSEEV I, ALLGOWER C, BAI M, *et al.* Nucl Instr Meth A, 2003, **499**: 392.
 [3] COURANT E D, RUTH R D. The Acceleration of Polarized Protons in Circular Accelerators[C]. BNL Report 1980, No. 51270.
 [4] BAI M, ROSER T, AHRENS L, *et al.* Phys Rev Lett, 2006, **96**: 174801.
 [5] HUANG H, AHRENS L, BAI M, *et al.* Phys Rev ST, 2004, **7**: 071001.
 [6] SAYED H. Compensation Techniques in Accelerator Physics[D]. USA: OldDominion University, 2011: 92.

Study on Acceleration of Polarized Beam at HIAF-BRing

YIN Bin^{1,2,1)}, LI Demin¹, YANG Jiancheng², SHENG Li'na², ZHANG Xiaohu²

(1. *Physical Science and Technology College, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;*

2. *Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China*)

Abstract: In order to explore the nucleon properties in details, the polarized proton will be used for some special experiments at HIAF project in Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences (IMP,CAS). The maximum energy of 9.3 GeV/u for Polarized protons will be provided in the Booster Ring(BRing) at HIAF. The polarized beam experiences depolarizing resonances many times during acceleration process, so it's necessary to suppress those resonances to keep polarizability well by special design. In this paper, the code DEPOL is used to simulate the influence of depolarizing resonances process in BRing. According to the results, the beam's polarization has been destroyed completely by the depolarizing resonances in the acceleration process. And the Full Siberian Snake is chosen in the Electron Cooler part of BRing to preserve the beam's polarization during the acceleration, and its strength and location of the Siberian Snake are also presented here.

Key words: spin; polarization; depolarizing resonance; Siberian Snake

<http://www.npr.ac.cn>

Received date: 25 Nov. 2016; **Revised date:** 29 Apr. 2017

1) E-mail: yinbin@impcas.ac.cn.