

可变参数磁压缩系统设计*

刘初玉¹⁾ 王芳 王尔东 全胜文 郝建奎 鲁向阳 张保澄 赵夔

(北京大学重离子物理研究所重离子物理教育部重点实验室 北京 100871)

摘要 北京大学30MeV超导加速器包含3个RF加速单元:自主研发的1.5cell DC-SC(直流-超导)注入器,经过升级的3.5cell DC-SC注入器,以及1.3GHz 2×9cell Telsa型超导加速腔.为充分利用该装置上高品质电子束,计划压缩1.5cell注入器出口电子束用于产生相干THz光,以及压缩2×9cell超导加速腔出口电子束产生红外自由电子激光.通过理论计算及模拟计算相结合设计了一套可变参数磁压缩系统,该系统可以同时满足两个RF加速单元后束团压缩的要求.

关键词 磁压缩装置 动量压缩因子 束团长度 发射度 能散

1 原理依据

图1是由4块完全一致的二极铁所组成的磁压缩系统^[1].第2块与第3块二极铁之间距离 d 的大小不影响系统的动量压缩因子.

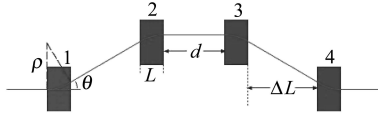


图1 磁压缩系统示意图

参考粒子在该系统中所走的路径长度 s 由下式给出^[2]:

$$s = 4\rho\theta + \frac{2\Delta L}{\cos\theta} + d, \quad (1)$$

式中 ρ 为二极铁偏转半径, θ 为二极铁偏转角, ΔL 为第1块与第2块二极铁间距.加上粒子偏转半径与能散关系 $\rho(\delta) = \rho(1 + \delta)$,系统一阶动量压缩因子可以表示为

$$R_{56} = \left. \frac{ds}{d\delta} \right|_{\delta=0} = -\frac{4L}{\cos\theta} - \frac{2L^2\Delta L}{\rho\cos^3\theta} + 4\rho\theta, \quad (2)$$

式中 L 为二极铁有效长度.

粒子纵向相空间坐标满足下面关系:

$$\delta(l) = \delta_0 + \left. \frac{d\delta}{dl} \right|_{\delta=0} l + \frac{1}{2} \left. \frac{d^2\delta}{dl^2} \right|_{\delta=0} l^2 + \dots = \delta_0 + \alpha l + \frac{1}{2} \beta l^2, \quad (3)$$

其中, δ_0 是非相关能散, α 是能量-位置一阶关联, β 是能量-位置二阶关联(并非Twiss参数).在忽略二阶效应的情况下, $\frac{1}{\alpha} = 0$ 表示纵向相椭圆竖立或者最大的束团压缩,因为 α 是纵向能量位置分布的斜率.

经过RF单元后粒子的能量增益为

$$\Delta E = E_{cav} \cos(\varphi + 2\pi l/\lambda), \quad (4)$$

式中 φ 是偏离峰值相位, E_{cav} 是RF单元最大能量增益, λ 是射频波长.

因此, α 和 β 表示成为

$$\alpha = -\frac{E_{cav} \sin\varphi}{E_0} \frac{2\pi}{\lambda}, \quad (5)$$

$$\beta = -\frac{E_{cav} \cos\varphi}{E_0} \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2.$$

经过图1所示的磁压缩系统(无色散)后,束团纵向坐标有如下转换关系:

$$l' = l + R_{56}\delta + T_{566}\delta^2, \quad (6)$$

$$\delta' = \delta.$$

综合式(3)和式(6),可以将经过磁压缩系统后的一阶、二阶能量位置关联系数 α' 和 β' 表示成之前的 α 和 β ,忽略二阶的情况下有:

$$\alpha' = \frac{\alpha}{1 + R_{56}\alpha}, \quad (7)$$

2006-10-11 收稿

* 国家自然科学基金(10276001)资助

1) E-mail: unco@pku.edu.cn

前面提到最大压缩时 $\frac{1}{\alpha'} = 0$, 那么最优 R_{56} 为

$$R_{56} = -\frac{1}{\alpha} = \frac{E_0}{E_{cav}} \frac{\lambda}{\sin \varphi} \frac{3}{26\pi}, \quad (8)$$

设定 RF 加速单元纵向加速场 $E_{cav} = 12.5 \text{ MeV}$, 1.5cell 注入器和主加速器的有效加速长度分别为 0.17, 2m, 那么在两个 RF 单元出口处磁压缩系统最优 R_{56} 与偏离峰值相位的关系分别为

$$(R_{56})_1 = \frac{0.07 + 2.0875 \cos \varphi}{2.0875 \sin \varphi} \frac{3}{26\pi}, \quad (9)$$

$$(R_{56})_2 = \frac{5 + 25 \cos \varphi}{25 \sin \varphi} \frac{3}{26\pi}.$$

图 2 给出了两个 R_{56} 值随 φ 的变化关系图. 其中实线和虚线条分别表示主加速器出口及 1.5cell 注入器出口束团要求的最佳 R_{56} 随加速相位的变化. 从图中可以看出, 对于注入器和主加速器出口的电子束的最佳动量压缩因子有相互重合的范围 (0.08—0.14), 可以通过调节电子束在二者的加速相位使其对于磁压缩的设计要求一致, 这样可以设计一个能同时满足二者压缩要求的磁压缩系统. 这就是北京大学可变参数磁压缩系统的设计依据.

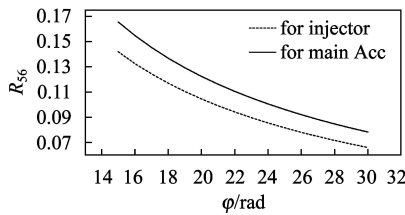


图 2 最佳 R_{56} 值随加速相位的变化

2 系统设计及模拟计算

为了配合北京大学超导加速器实验室利用注入器

低能电子束产生相干 THz 光以及利用超导加速器提供的 30MeV 电子束产生红外自由电子激光的要求, 提出了如下的磁压缩系统, 并且使用工具 ELEGANT^[3] 验证了其压缩效果: $L=20\text{cm}$, $\Delta L=40\text{cm}$, $d=20\text{cm}$, 系统总长度为 1.8m.

磁压缩系统理论设计值与实际效果会存在一些偏差, 引起偏差的因素主要有系统色散的影响、相干同步辐射效应以及束团能量位置关联的非线性, 而通过束流模拟可以考虑这些因素, 使得结果更接近实际效果. 下面考察了电子束在主加速器中加速相位为 20° 时理论设计和模拟计算的偏差.

利用式 (9) 可以计算理论上束团压缩所要求的最佳磁压缩系统动量压缩因子 $R_{56} = -0.122\text{m}$.

取二极铁偏角为 17.48° , 利用 ELEGANT 进行的束流模拟^[4] 结果见图 3—5. 图 3 是电子束纵向相空间在压缩过程中由倾斜到直立的变化过程, 这是束团高能粒子追赶低能粒子的结果. 图 4 则直观地给出了束团长度的变化过程, 可见束团长度并不是单调减小. 图 5 反应了压缩过程电子束横向发射度的变化, 其总的效果是导致发射度的变差, 但这种变差尚在可接受的范围. 图 6 给出的是相干同步辐射所引起的能散变化. 压缩前后电子束参数列于表 1 中.

从以上的模拟结果可知: 当二极铁偏角取 17.48° 时对束团的压缩效果最佳, 此时磁压缩系统利用式 (2) 计算得到的动量压缩因子为 -0.099m . 造成该动量压缩因子与理论计算值之间差异的原因是: 电子束在主加速器入口已存在一定的能量位置关联, 而且电子束在磁压缩系统内部非正入射 (或出射) 二极铁时会产生色散效应, 这二者都使得束团更容易被压缩, 所以在可变参数磁压缩系统 R_{56} 值略小于理论计算值时束团压缩达到最佳效果. 相同的规律也会在对注入器的束流压缩时出现.

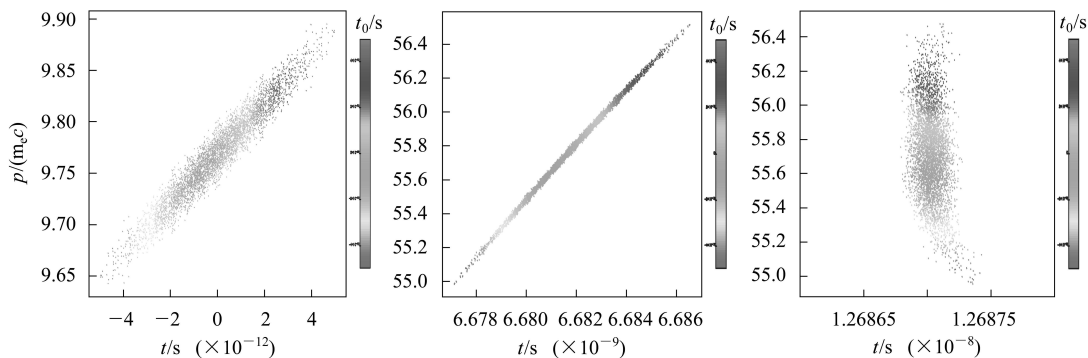


图 3 主加速器入口、出口及磁压缩出口束团纵向相图

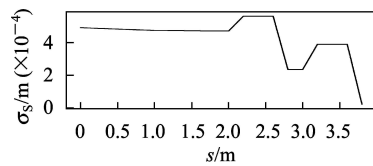


图4 束团长度变化

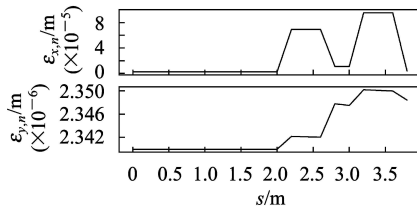


图5 压缩过程电子束横向发射度变化

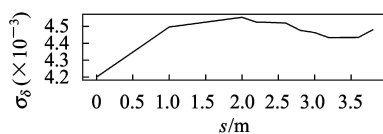


图6 相干同步辐射所引起的能散变化

表1 束流参数变化表

property	initial beam	beam after acc	final beam
length	0.491mm(3.85ps)	0.471mm(3.69ps)	0.0237mm(186fs)
current	26amps	27.1amps	537.6amps
E spread	0.42%	0.455%	0.448%
emit, x	2.235mm·mrad	2.235mm·mrad	3.73mm·mrad
emit, y	2.34mm·mrad	2.34mm·mrad	2.35mm·mrad
X, rms	0.324mm	0.888mm	1.32mm
Y, rms	0.328mm	0.903mm	0.0765mm
beta x	0.459m	12.39m	31.62m
beta y	0.449m	12.26m	0.0758m
alpha x	1.53	-3.84	-6.26
alpha y	1.48	-3.78	-0.123

3 真空扁盒及磁铁设计^[5]

假定通过调节两个RF单元的加速相位使其 R_{56} 值在 -0.11m 附近, 所对应的二者加速相位分别为 19° , 22° . 此时, 通过对磁压缩系统二极铁偏角在一特定值附近作微调, 可以同时满足二者对于束团压缩的要求. 这个角度特定值的确定使用的是ELEGANT模拟办法.

通过模拟(方法同前)得到: 当主加速器的加速相位为 22° 时, 二极铁偏角取 16.6° 时束团达到最佳压缩效果. 所以可以合理推断: 二极铁偏角取 16.6° 时的可变参数磁压缩系统可以同时满足1.5cell注入器^[6]及主加速器加速相位分别为 19° , 22° 时束团压缩的要求.

考虑模拟计算与实际之间的误差及增加系统的实用性, 设计真空扁盒的角度接受度为 12° — 20° . 在磁铁偏角取最小值及最大值时, 参考粒子的径迹(一半)如图7所示.

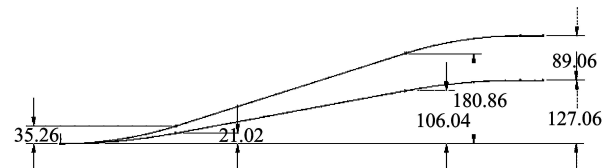


图7 电子径迹范围(单位mm)

将扁盒分成两个部分: 磁铁加电流时电子所经过的偏转段及磁铁消磁后电子所经过的直线段. 为了满足真空扁盒的角度接受度, 并且同时考虑束团在磁铁内部偏转时产生的色散, 将直线段内部尺寸设计为 $1.8\text{cm} \times 2.6\text{cm}$, 偏转段内部尺寸设计为 $1.8\text{cm} \times 13.3\text{cm}$. 为了保证扁盒能够保持 $133.33 \times 10^{-8}\text{Pa}$ 的超高真空^[7], 并且其壁厚能够承受大气压力, 取扁盒壁厚为 2mm , 扁盒总的厚度为 2.2cm .

为了保证磁压缩系统偏角在 12° — 22° 之间连续可调, 从而实现可调参数磁压缩, 在四块二极铁处真空扁盒必须完全处于二极铁的好场区内, 那么根据二极铁的有效长度及真空扁盒的尺寸, 设定第2, 3块二极铁参数如下: 好场区 14cm , 磁感应强度均匀性好于 0.1% , 极间距 2.4cm . 同样第1, 4块磁铁参数如下: 好场区 6cm , 其他参数与第2, 3块铁相同. 可变参数磁压缩系统参数列于表2.

表2 可变参数磁压缩系统设计参数

	parameter	value
magnet	B_{max}	$1873 \times 10^{-4}\text{T}$
	bend angle	12° — 22°
	bend effective length	20cm
	drift length between magnets 1, 2 and 3, 4	40cm
	drift length between magnets 2, 3	20cm
	magnet gap	2.4cm
	good field of 2, 3	14cm
	good field of 1, 4	6cm
	field uniformity	0.1%
	chamber	inner size(straight part)
inner size(deflective part)		$1.8\text{cm} \times 13.3\text{cm}$
thickness of the wall		0.2cm
vacuum level		133.3310^{-8}Pa

参考文献(References)

- 1 LIU Chu-Yu, XIA Guo-Xing, ZHUANG Jie-Jia et al. High Power Laser and Particle Beams, 2006, **18**(1): 139—142 (in Chinese)
(刘初玉, 夏国兴, 庄杰佳等. 强激光与粒子束, 2006, **18**(1): 139—142)
- 2 Bazarov I V. Memo on Chicane for ERL Phase I, ERL02. Dec, 2001, Cornell University
- 3 Borland M. Unpublished Program. <http://www.aps.anl.gov/asd/oag/oagPackages.shtml#elegant>
- 4 http://pbpl.physics.ucla.edu/Research/Experiments/Beam_Manipulation/ATF_Compressor/
- 5 Rotela E et al. Mechanical Design of a Flexible Bunch Compressor for APS LINAC, PAC 2001, Proceedings of the 2001. 4041
- 6 HAO Jian-Kui, QUAN Sheng-Wen, XIANG Rong et al. High Power Laser and Particle Beams, 2002, **14**(3): 456 (in Chinese)
(郝建奎, 全胜文, 向荣等. 强激光与粒子束, 2002, **14**(3): 456)
- 7 Walters D R et al. Flexible and Telescopic Vacuum Chambers for the APS Bunch Compressor, PAC 2001. Proceedings of the 2001. 2150

Chicane Compressor for PKU-SCAF with Changeable Parameter^{*}

LIU Chu-Yu¹⁾ WANG Fang WANG Er-Dong QUAN Sheng-Wen HAO Jian-Kui
LU Xiang-Yang ZHANG Bao-Cheng ZHAO Kui

(MOE Key Laboratory of Heavy Ion Physics, Institute of Heavy Ion Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract The PKU-SCAF comprises three RF units: the 1.5cell injector which is developed all by ourselves, the upgraded 3.5cell injector, and the 1.3GHz 2×9cell Telsa style main accelerator. To take full advantage of the high quality electron beam of PKU-SCAF, we decide to compress the electron bunch out of 1.5cell injector for coherent THz and the bunch from main accelerator for FEL. For compressing the bunch, we design a chicane compressor with changeable parameter for PKU-SCAF which can serve for the two kinds of compression.

Key words chicane bunch compressor, momentum compaction factor, bunch length, emittance, energy spread

Received 11 October 2006

* Supported by NSFC (10276001)

1) E-mail: unco@pku.edu.cn