

回旋加速器中的空间电荷效应和束晕

欧阳华甫

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

摘要 在考虑束团内粒子之间的空间电荷相互作用力的条件下,对日本理化研究所(RIKEN)现有的一台注入器(加速常数为 $K70$ 的 AVF 型回旋加速器)中束团的演变过程进行了模拟计算. 模拟结果表明,束团的形变、束晕现象同样发生在回旋加速器中,不过,其产生机制不同于直线加速器. 它不是由共振和混沌引起,而是由于粒子的排斥运动和束团内粒子的涡流运动引起的.

关键词 AVF 型回旋加速器 束团 动力学方程 空间电荷效应 束晕 涡流

1 引言

强流、高能加速器因可用于核废料的处理、氙的生产、钷的嬗变、核物理实验以及作为洁净核能的驱动装置而受到广泛重视^[1]. 在设计强流加速器时,必须考虑到粒子之间的空间电荷相互作用力. 在等时性回旋加速器中,相对于空间电荷力横向分量的作用^[2,3],空间电荷力的纵向分量对束流传输性质的影响起主导作用^[4-6]. 空间电荷力的横向分量只具有弱化聚焦的效果,但空间电荷力的纵向分量对束团的作用则具有累积效果,这是因为在等时性回旋加速器中在纵向不存在聚焦. 因此,相对于空间电荷力横向分量,空间电荷力的纵向分量在束流更小的情况下就对束流的传输性质产生严重影响. 而且,由于粒子的纵向运动与径向运动之间的强耦合作用^[7-9],粒子纵向运动的任何变化都会对其径向运动产生影响. 实际上,根据文献[4]可知,由于粒子之间相互作用力以及来自高频电场力的存在,粒子在束团内作涡流运动. 众所周知,束团的径向尺寸与粒子的引出效率紧密相关,因此,对束团粒子在回旋加速器中演变过程的研究具有实际的意义.

日本理化研究所已建议利用现有加速器设施建立一个放射性同位素生产工厂. 该工厂的目的是要在整个原子质量范围内提供高流强的放射性同位素^[10]. 理化研究所现拥有的加速器设施包括:两台注入器(一台重离子直线加速器和一台加速常数为 $K70$ 的 AVF 型回旋加速器),一台加速常数为 $K540$ 的主环回旋加速器(RRC:RIKEN Ring Cyclotron). 在此基础上,再建一台超导主环回旋加速器(SRC),一台双环结构的储存环

(MUSES: Multi-Use Experimental Storage-rings)以及一台电子直线加速器. 束流从现存的 RRC 注入到 SRC, 轻核可以加速到 500MeV/u 的能量, 重核则可以加速到 150MeV/u 的能量. 希望对其中的一台注入器^[11] (加速常数为 K70 的 AVF 型回旋加速器) 进行升级改造后, 注入器能在更高流强下运行. 为此, 就必须在考虑空间电荷效应的前提条件下, 进行束流动力学方面的研究. 本文借助测量所得到的实际的磁场分布, 对束团在注入器中的传输演变进行了模拟跟踪计算.

2 不考虑空间电荷力时粒子的运动

在研究束团粒子在实际加速器中的运动之前, 让我们首先对不考虑空间电荷力时粒子的运动进行简单的讨论. 从文献[9]中不考虑空间电荷力时粒子的动力学方程及方程中各参数的表达式可以看出, 粒子在三个方向的运动几乎都是简谐振动. 粒子在纵向(即方位角方向)的 β 振荡和径向的 β 振荡具有相同的振荡频率 Q_r , 但两者之间有 90° 相位差. 尽管粒子在垂直方向的运动独立于纵向和径向的运动, 可纵向的运动与径向的运动相互耦合. 而且, 粒子在水平面上的运动轨迹基本上是一个圆. 当然, 由于各个粒子的初始条件不同, 各粒子的运动轨迹(圆)的圆心和半径也不同. 综合粒子在垂直方向的 β 振荡运动, 那么粒子则是在一个个圆柱的表面上作快速运动. 在等时性回旋加速器中, 因为粒子在纵向和径向的 β 振荡的振荡频率 Q_r 绝对大于 1, 即, 在一个回旋周期内, 粒子所完成的 β 振荡次数大于 1. 所以, 在一个回旋周期内, 粒子水平面上所经历的轨迹应大于一个圆的周长. 这样, 在束流的传输过程中, 粒子在束团中的分布在不同圈内会稍有不同. 不过, 由于所有粒子的运动都由相同的动力学方程决定, 束团内粒子分布的拓扑性质不会发生变化.

3 考虑空间电荷力时粒子的运动

当回旋加速器的束流强度大到 1mA 时, 束团内的粒子数将会非常地大, 要对如此多的粒子进行模拟计算, 所需要的机时和内存都将难以容忍. 在实际中甚至是难以实现的. 在下面的模拟计算中, 仅仅对粒子数为 500 的束团进行了模拟跟踪. 为了反映空间电荷力对束团传输演变的影响, 特意把束团的电荷密度选择为与实际的电荷密度相一致. 同时假定处于同一圈或不同圈内的各个束团相隔很远. 这样, 在模拟计算时, 就可以只考虑束团内粒子之间的相互作用力, 而不考虑束团之间的相互作用.

模拟计算时, 所模拟的粒子为 N^{5+} , 且粒子的初始能量和实际的注入能量一致(为 20keV/nucleon); 磁场在加速器中的分布则由实际测量值给出; 图 1 给出了平均磁场强度的测量值的径向分布(由符号 \bullet 表示). 粒子在加速器中每一圈加速两次, 且加速电极的电压为 47kV ; 束团中心粒子的加速相位被选为 0. 初始时, 动量散度为 0 的 500 个粒子随机地分布在一长方体内, 并让长方体在径向的尺寸与在垂向的尺寸相同.

在图 1 中, 除给出了平均磁场强度的测量值的径向分布外, 还给出了束团的中心粒子(即同步粒子)在该磁场分布下, 粒子在每一圈中半径的平均值(由符号 \times 表示). 从图中

可以看出,两条曲线重合的非常好.沿着该曲线,粒子 N^{5+} 可以在注入器中从初始能量 20keV/nucleon 加速到能量 7MeV/nucleon.

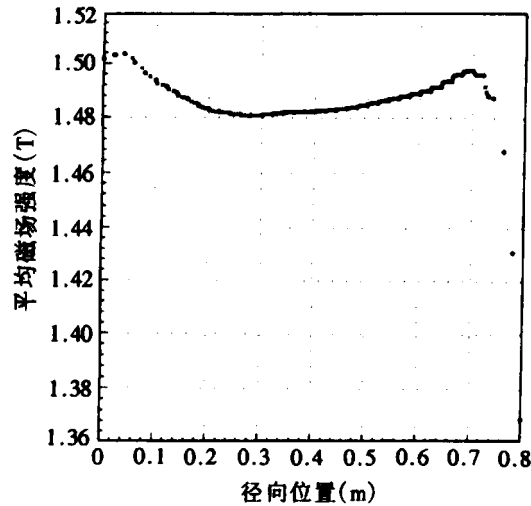


图 1 磁场强度分布及粒子运动

·平均磁场强度的测量值的径向分布;

×在该磁场分布下,束团中心粒子在回旋加速器中每圈半径的平均值的分布.

图 2 显示的是束团粒子在加速器中前几十圈的加速演变过程.所模拟的粒子仍为 N^{5+} ,束团中的粒子数为 500 个,束团的粒子密度为 $2 \times 10^6/\text{mm}^3$.图中仅给出了束团在水平面上的形状,因为束团的径向尺寸与回旋加速器中束流的引出效率紧密相关.并且,空间电荷力的纵向分量仅对粒子的径向运动有很大的影响,而对粒子在垂向的运动的的影响则不是很严重,这一性质也可以从文献[9]中考虑空间电荷力时粒子的动力学方程看出.图 2 的一个明显的特点是:由于束团的丝化,粒子在束团中的分布由初始的长方形发展成银河系形,最终形成一个半径比束核大得多的束晕.尽管束晕粒子的数量比起束核粒子的数量来说所占的比例不大,但束晕的半径却比束核大得多,因而很容易损失掉.尤其在强流,高能加速器中,束晕的损失会引起加速器的辐射激活而降低加速器件的寿命.因此,束晕的形成和损失严重阻碍着强流加速器束流的进一步提高.在模拟计算中还发现,束团的电荷密度越大,束团的丝化变形和束晕的形成就越快.不过,束团最后大小似乎与束团的密度无关而只决定于束团的粒子数.另外,束晕的形成速度还与加速电极的电压有关.加速电压越高,束晕的形成就越快.这一结果可以从束团内粒子的涡流运动^[4]以及粒子向外的排斥运动得到很好的解释.同时,这一结果也与文献[10,11]所得到的一致.

正如引言中所提到的那样,根据文献[4]可知,由于粒子之间电荷相互作用力以及来自高频电场力的存在,粒子将在束团内作涡流运动,并且粒子涡流运动的速度与该粒子所在位置的电场成正比.另一方面,由于粒子之间的相互排斥作用,一些粒子(因为粒子初始分布的不均匀性,这些粒子不一定来自束团的外层)有可能获得足够的能量而从束团的主体逃离出来.一旦成功,这些粒子所受到的空间电荷力将变小,这样一来,这些粒子的涡流运动速度也将减慢.显然,束团内部的粒子的涡流运动速度比束团外部的粒子的涡

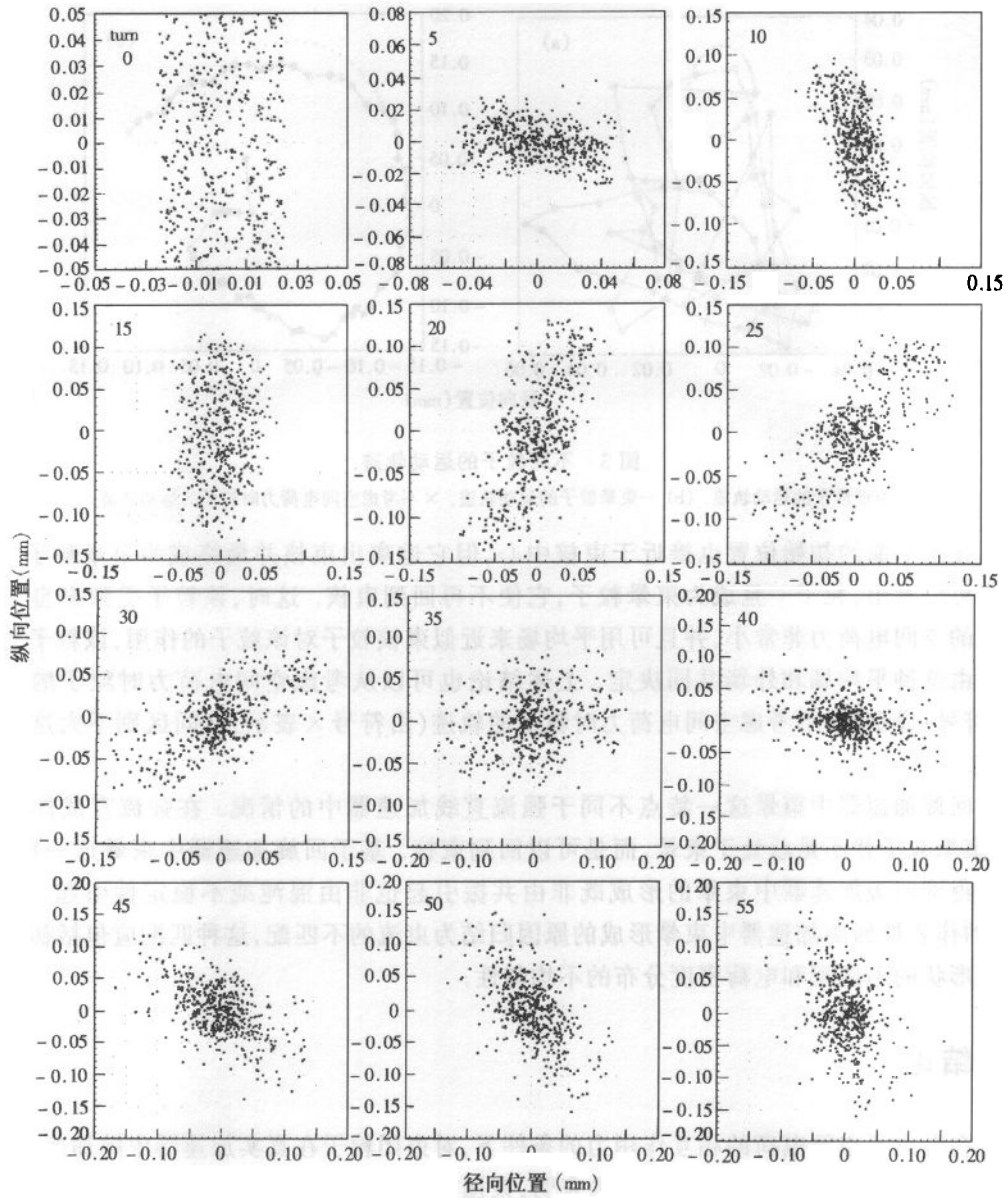


图 2 束团粒子在加速器中前几十圈的演变.

流运动速度要快. 正是由于束团粒子的向外运动以及由此引起的涡流运动速度的差异导致了束团的丝化和束晕的最后形成.

为进一步说明束团粒子在加速器中的运动. 在图 3(a)和(b)中,两个典型粒子(不同的初始条件)的运动轨迹被跟踪. 图 3(a)和(b)只记录了粒子在每一圈的初始位置. 从图中可以看出,图 3(a)中粒子的运动几乎是无规则的而且局限于束核区. 显然,粒子在束核的运动由空间电荷力主宰,这是因为束核粒子的密度比较大的缘故. 为便于比较,图 3(a)中也给出了粒子在相同初始条件下,但不考虑空间电荷力时的轨迹. 图 3(b)中的粒子,虽

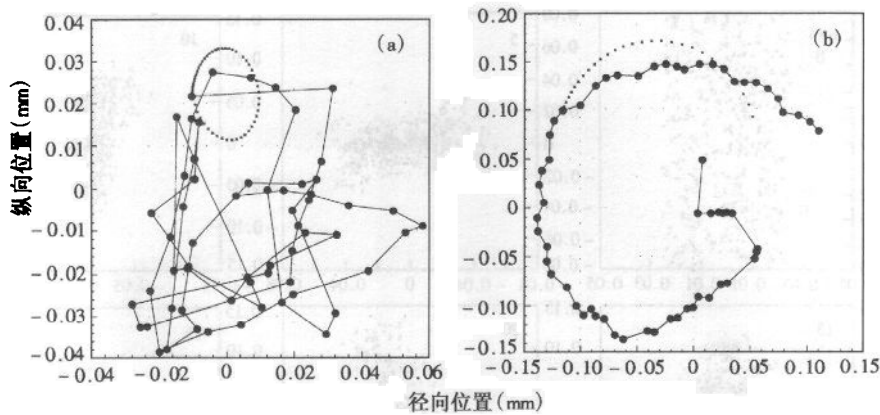


图 3 不同粒子的运动轨迹

(a) 一束核粒子的运动轨迹. (b) 一束晕粒子的运动轨迹. \times 不考虑空间电荷力时粒子的运动轨迹.

然其在水平面的初始位置也接近于束核中心,但它逃离出束核并最终成为束晕粒子.从图中可以看出,粒子一旦成为束晕粒子,它便不再回到束核.这时,该粒子受到来自束核粒子的空间电荷力非常小,并且可用平均场来近似束核粒子对该粒子的作用,该粒子的运动则由这种平均场和外场共同决定.上述结论也可以从考虑空间电荷力时粒子的轨迹(由符号 \cdot 表示)与不考虑空间电荷力时粒子的轨迹(由符号 \times 表示)之间区别不大这一点得出.

回旋加速器中束晕这一特点不同于强流直线加速器中的情况.在强流直线加速器中,束晕粒子并不是总处于束晕,而是可以回到束核.基于回旋加速器中束晕这一特点,可以得到回旋加速器中束晕的形成既非由共振引起也非由混沌或不稳定性引起.文献[5]的作者把回旋加速器中束晕形成的原因归结为束流的不匹配,这种匹配应包括初始时束团形状的不匹配和电荷密度分布的不均匀性

4 结论

在考虑了空间电荷的相互作用力的条件下,对束团粒子在真实加速器中的加速、传输演变进行了模拟跟踪计算.模拟结果表明,束团的丝化变形以及束晕现象同样也出现在回旋加速器中,并也有可能成为强流回旋加速器中束流损失的一个主要原因之一.因此,在强流回旋加速器的设计时,必须考虑到束流的空间电荷效应.与强流直线加速器所不同的是,回旋加速器中的束晕现象不是由共振或混沌引起的,而是由于粒子的向外排斥运动和束团内粒子的涡流运动引起的.文献[5]的作者认为可以通过调整束团初始时的形状及电荷密度分布均匀性来避免束晕现象的发生.在模拟计算中还发现,加速电极的电压越高,上述特点就越明显.尽管以上模拟计算有助于我们对束团粒子在真实加速器中传输演变的理解,但要更全面、更准确地把握束团在加速器中演变过程,就必须对更多的束团粒子进行模拟跟踪计算.因此,在模型改进以及计算程序等方面仍有许多工作可做.

参考文献(References)

- 1 Prome M. Proc. of the XVIII Int. Linear Accel. Conf. , 26 - 30 August, 1996, Geneva, Switzerland, CERN 96 - 07,9
- 2 Reiser M. IEEE Trans. , 1966, NS - 13:171
- 3 Reiser M. Theory and Design of Charged Particle Beams, John Wiley & Sons, INC. , 1994
- 4 Gordon M M. Proc. 5th Int. Conf. on cyclotrons and their Application, Oxford, 1969, 305
- 5 Adam S. IEEE Trans. Nucl. Sci. , 1985, 32,2507
- 6 Adam S. Proc. 14th Int. Conf. on Cyclotrons and their Application, Cape Town, 1995, 466
- 7 Hagedoorn H L, Verster N F. Nucl. Instr. and Meth. , 1962, 18:201
- 8 Kleeven W J G M, Hagedoorn H L, Batygin Y K. Particle Accelerators, 1989, 24:187
- 9 OUYANG Hua-Fu. High Energy Phys. and Nucl. Phys. 2001,25(6):561(in Chinese)
(欧阳华甫. 高能物理与核物理,2001,25(6):561)
- 10 Yano Y et al. Proc. 14th Int. Conf. on Cyclotrons and Their Applications, Cape Town, 1995, 590
- 11 Goto A et al. Proc. 12th Int. Conf. on Cyclotrons and Their Applications, 1989, 439

Effects of the Space Charge Forces and the Beam Halo in a Cyclotron

OUYANG Hua-Fu

(Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100039, China)

Abstract With the space charge forces considered, simulations of the evolution of the beam bunch in the K70 AVF cyclotron, which is an injector of the K540 RIKEN Ring Cyclotron (RRC), are carried out. The result shows that the deformation of the bunch and the formation of beam halo also take place in a cyclotron. But the mechanism of the formation of the beam halo in a cyclotron is different from that in a linear accelerator.

Key words AVF cyclotron, beam bunch, dynamic equation, space charge effects, beam halo, vortex motion