

# 利用模拟方法研究 RFQ 加速器中 正、负离子束同时加速的动力学问题<sup>\*</sup>

邢庆子<sup>1,1)</sup> 林郁正<sup>1</sup> 傅世年<sup>2</sup> 方守贤<sup>2</sup>

1 (清华大学工程物理系 北京 100084)

2 (中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

**摘要** 在以时间为自变量的 PARMTEQ 程序的基础上, 添加了一束相反电荷的束流进行动力学计算, 同时考虑了正、负离子束加速的空间电荷效应和束团间的作用. 并针对特定结构参数的 RFQ 加速器, 给出了双束加速的动力学模拟过程和结果. 模拟计算的目的在于研究正、负离子束在 RFQ 加速结构中同时加速所引起的动力学问题. 结果表明, 正、负离子束同时加速有助于克服径向空间电荷效应, 但在流强较大时, 双束加速时, 将会在纵向出现明显的异性电荷之间的“捕捉”(trap)现象, 从而导致纵向粒子损失数目的增加. 因此, 为实现双束加速, 必须专门重新设计 RFQ 加速器, 使其传输效率高于单束, 才能体现出双束加速的优越性.

**关键词** 双束加速 PARMTEQ 程序 空间电荷效应 RFQ 加速器 洁净核能

## 1 引言

随着中子科学在 21 世纪的发展及应用<sup>[1]</sup>, 散裂中子源、加速器驱动放射性洁净核能系统、中微子工厂以及  $\mu$  介子对撞机的研究, 对质子直线加速器的流强和功率提出了更高的要求. 强流质子直线加速器中的一个重要问题是束流损失问题. 为了能对机器进行手工维护, 减少束损产生的放射性, 束流损失率在中高  $\beta$  段应该低于  $10^{-6}/\text{m}$ . 强流束高密度核的外围弥散着少量粒子, 称之为束晕. 它们的振幅很大, 最容易丢失在器壁上. 束晕的形成与各种参数不匹配有关, 也与强非线性空间电荷力有关, 而在低能区束流的空间电荷效应较强. 因此, 如何有效地控制低能端的空间电荷效应, 成为强流质子直线加速器的一个关键问题.

为了抑制低能端的发射度增长和束晕的形成, 降低空间电荷效应, 人们提出了正、负离子束同时加速的方案, 以减少每一个束团中的电荷数. 从离子

源引出的等流强的正、负离子连续束, 经混束磁铁混合成为中性束, 再经匹配后进入 RFQ 加速器. 正、负离子束在 RFQ 的成形段中逐渐分离, 在纵向相距  $180^\circ$  高频相位, 然后被同时加速和聚束. 在混束磁铁到 RFQ 成形段结束之前, 等流强的正、负离子束混合可使空间电荷效应基本上获得中和, 从而减少发射度的增长和束流的损失. 使用正、负离子束同时加速, 每个束团的电荷量只需是单束加速时每个束团的二分之一, 即能保证平均流强与单束加速相同, 在一定程度上削弱了空间电荷效应. 经加速后的正、负离子束团, 经过偏转磁铁进行分离后可一并使用, 也可分别使用.

人们已经做了一些关于双束加速的实验工作. 美国 Los Alamos 中子科学中心可以将平均电流为  $1.25\text{mA}$  的  $\text{H}^+$  和  $70\mu\text{A}$  的  $\text{H}^-$  同时加速到  $800\text{MeV}$ <sup>[2]</sup>, 北京大学也做过在弱流情况下, 不等流强正、负离子同时在 RFQ 中加速的实验<sup>[3]</sup>. 韩国的多用途装置 KOMAC 项目, 将采用双束加速方案<sup>[4]</sup>. 但是, 强流

2003-09-22 收稿

<sup>\*</sup> 国家重点基础研究规划项目(G1999022600)资助

1) E-mail: xqz98@mails.tsinghua.edu.cn

(总流强在几十 mA 甚至上百 mA) 情况下等流强正、负离子束同时加速的实验工作尚没有进行过, 很多方案只是停留在设计阶段. 若要在强流双束加速的实验中获得高的传输效率, 必须进行认真的预研, 研究清楚正、负离子束在 RFQ 加速器中的动力学行为及其中可能出现的问题. 本文作者用 Visual C++ 语言改写了国际通用的 RFQ 设计和单束动力学模拟程序——PARMTEQ (Phase And Radial Motion in Transverse Electric Quadrupole linacs)<sup>[5]</sup>, 增加了对带相反电荷的两种束流进行动力学模拟计算的功能, 考虑了两种束流的空间电荷效应及束团之间的作用. 同时, 增加了读入 RFQ 结构参数的功能, 使得程序可以对其他程序设计的结构进行模拟计算. 本文针对洁净核能项目四翼型 RFQ 加速器结构参数<sup>[6]</sup>, 给出了双束模拟的动力学结果.

## 2 双束加速的动力学模拟

为同时模拟正、负离子的动力学行为, 首先需要修改 PARMTEQ 程序使其产生两种束流的初始分布, 然后考虑两种电性粒子在外场下的运动, 特别是, 要正确描述两种电性粒子的空间电荷相互作用. 本节简要介绍这方面的工作.

我们编写了可以针对不同电荷态的离子求解 RFQ 接受度的程序<sup>[7]</sup>, 计算结果表明, 在 RFQ 入口处, 正、负离子束有着相同的接受度和匹配参数. 因此, 在横向四维相椭球内, 负离子可以按照和正离子相同的分布来产生 (模拟中使用椭球内均匀分布). 程序中产生两个分别带正、负电荷的同步离子, 它们参与除空间电荷作用外的动力学计算, 初始相位分别为  $-\pi/2$  和  $-3\pi/2$ , 因此正、负离子的初始相位区间分别选取为  $(-3\pi/2, \pi/2)$  和  $(-5\pi/2, -\pi/2)$ , 在  $360^\circ$  范围内均匀分布. 同时, 需要增加记录离子电荷符号的数组  $qsign(np)$ , 其中  $np$  为离子的序号, 若带正电荷则  $qsign(np)$  为 1, 带负电荷则  $qsign(np)$  为 -1.

使用时间为自变量来进行粒子动力学的计算, 每个宏粒子的六维坐标可写为  $(x, \dot{x}, y, \dot{y}, z, \dot{z})$ , 在动力学计算中使用“漂移段/薄透镜/漂移段” (drift/thinlens/drift) 方法. 考虑到离子电荷的符号, 在薄透镜近似下, 利用每个时间步长  $dt$  中心处的电场  $E_x, E_y$  和  $E_z$ , 可以求出离子经过  $dt$  后新的速度  $\dot{x}, \dot{y}$  和  $\dot{z}$ :

$$V_i = V_{i0} + \frac{E_i \cdot q \cdot qsign(np) \cdot dt}{\gamma m_0},$$

$$i = x, y, z, \quad (1)$$

其中  $V_{i0}$  ( $i = x, y, z$ ) 和  $\gamma$  分别为该段时间步长  $dt$  开始时离子的速度和相对论因子,  $q$  为单个离子所带的电荷数,  $qsign(np)$  为第  $np$  个离子的电荷符号,  $m_0$  为离子的静止质量.

空间电荷作用的计算使用 2D PIC 方法<sup>[8]</sup>, 在每个加速单元中, 正同步离子到达该单元的中点时计算一次空间电荷作用, 求出空间电荷作用后新的速度  $\dot{x}, \dot{y}$  和  $\dot{z}$ :

$$V_i = V_{i0} + \frac{E_i \cdot q \cdot qsign(np) \cdot \Delta t}{m_0 \gamma^3}, \quad i = x, y,$$

$$V_z = V_{z0} + \frac{E_z \cdot q \cdot qsign(np) \cdot \Delta t}{m_0 \gamma}.$$

(2)

其中  $V_{i0}$  ( $i = x, y, z$ ) 和  $\gamma$  分别为计算空间电荷作用之前离子的速度和相对论因子,  $E_x, E_y$  和  $E_z$  为离子受到的空间电荷力,  $\Delta t$  为离子在一个加速单元中经历的时间. 在求空间电荷力  $E_x, E_y$  和  $E_z$  的过程中, 由于正、负离子束团 RMS 尺寸不同, 正、负离子的坐标变换也不同, 因此分别求出所有正离子和所有负离子对某一离子的作用力, 两者之和即为该离子受到的总的空间电荷力. 在分配电荷的过程<sup>[9]</sup>中, 仍要考虑电荷被分配到网格的离子的电荷符号.

在考虑相邻束团的作用时, 由于 RFQ 中的加速单元参数是缓慢变化的, 可以近似认为, 前后  $N$  个加速单元中的束团 (包括正、负离子) 分布相同, 这样, 在初始化场表时, 纵向第一层电荷环在场点处的电场值, 只需加上前后  $N$  个加速单元网格中相应的电荷环 (带相同电荷) 在该场点处的电场值. 如果离子分布在网格区域外, 计算它受到的空间电荷力时, 则将网格区域内的所有电荷看作一个点电荷来进行计算, 点电荷的电荷量为网格区域内所有正、负离子电荷量的总和.

单束加速时, 纵向网格总长度只需取正离子相振荡稳定区的宽度, 双束加速时, 由于相邻正、负离子束团在纵向  $z$  的间距为一个加速单元的长度, 因此在 PIC 方法中纵向网格总长度要比单束大很多, 这样, 才能将待计算的正、负束团中的所有离子包括进去. PARMTEQVC 中将纵向网格数目由原来的 40 增大到了 400, 纵向网格间隔也可随加速单元长度的不同而变化.

## 3 双束加速的动力学过程

对于洁净核能项目 RFQ 加速器<sup>[6]</sup>, 使用

PARMTEQVC 程序进行了正、负氢离子束同时加速的动力学模拟计算,图 1 给出了 RFQ 的结构参数随纵向坐标  $z$  的变化曲线,其中  $B$  为聚焦力因子,  $X$  为聚焦作用参数,  $A$  为加速作用参数,  $W$  为同步粒子动能,  $\phi$  为同步粒子相位,  $m$  为调制因子,  $R0$  为平均孔径,  $a$  为最小孔径. 动力学模拟计算的有关数据见表 1.

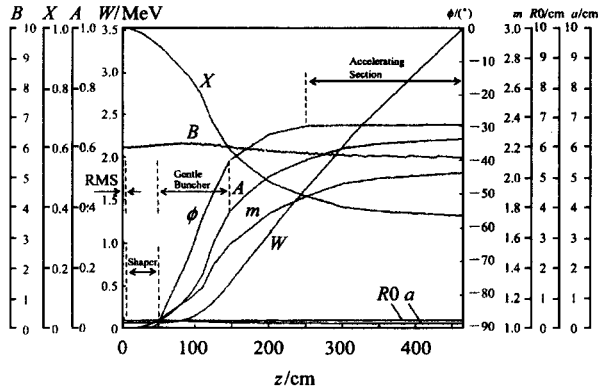


图 1 洁净核能项目 RFQ 结构参数<sup>[6]</sup>

表 1 双束动力学模拟有关数据

模拟粒子数(正离子)	$10^4$
模拟粒子数(负离子)	$10^4$
正负离子 Twiss 参数	
$\alpha_x$	1.79
$\beta_x$	5.96cm/rad
$\epsilon_{x,total}$	0.00952cm $\cdot$ rad
$\alpha_y$	1.79
$\beta_y$	5.96cm/rad
$\epsilon_{y,total}$	0.00952cm $\cdot$ rad
注入相宽	180°
注入能散	0MeV/Charge

图 2 给出了有、无空间电荷作用两种情况下,在 RFQ 中不同位置处正、负氢离子束团的纵向相图,所有图中横坐标均为离子相对正、负同步离子中点处的纵向坐标  $\Delta_z$ ,纵坐标均为离子相对正同步离子的纵向速度  $\Delta_z$ ,每一个深色点表示一个正离子,浅色点表示一个负离子,深色和浅色封闭曲线所围区域分别为正、负离子纵向相振荡稳定区.

在 RFQ 的匹配段(前 6 个加速单元)和成形段初期(第 7 个加速单元开始),正、负离子束流混合在一起,纵向相空间仅有微小变化,空间电荷效应基本获得中和(见图 2(a),(b));

在成形段(第 7 至第 93 个加速单元)中(见图 2(b),(c)),正、负离子开始逐渐分开并聚束到各自

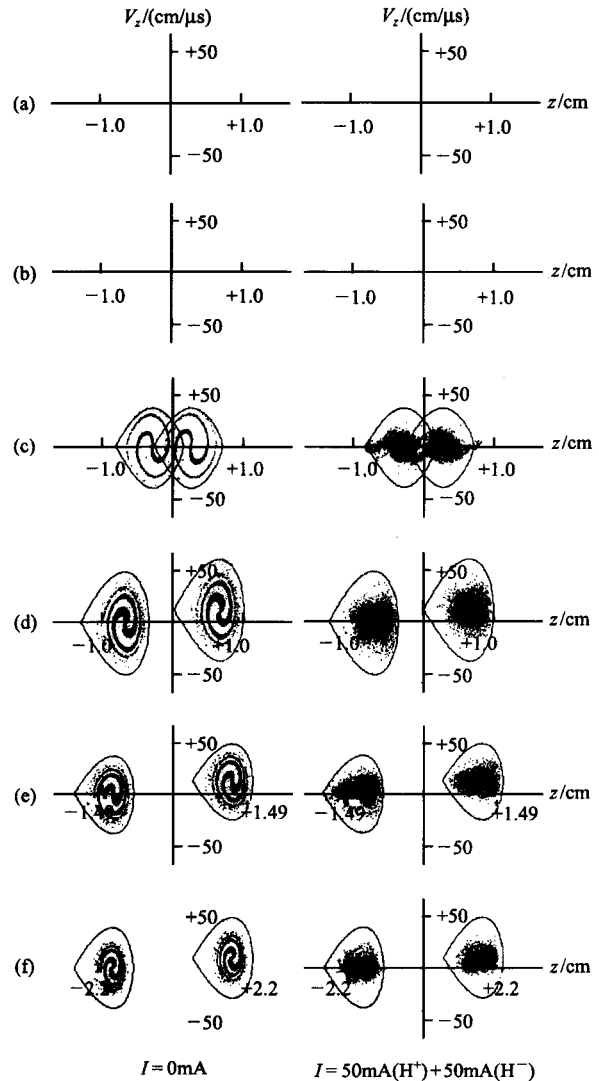


图 2 洁净核能项目 RFQ 中正、负离子束同时加速的纵向相图

(a) cell 1 (RFQ 入口处);(b) cell 7(成形段开始处);(c) cell 94 (慢聚束段开始处);(d) cell 215(慢聚束段结束处);(e) cell 272 (加速段开始处);(f) cell 342(加速段结束处).

的 bucket 中,相邻的正、负离子束团在相位上相差 180°,在纵向间距基本不变. 到成形段结束处正、负离子 bucket 仍没有完全分开,此时可以看到明显的“捕捉”现象,即在正离子束团的中心处有一小部分负离子,同样,在负离子束团的中心处也有一小部分正离子. 离子由于空间电荷作用被带有相反电荷的束团“捕捉”,离开了自己的 bucket,从而导致最终在纵向丢失掉. 分析表明,在最后纵向丢失的所有粒子中,有 97% 的粒子是在这一阶段被“捕捉”的粒子,离子在纵向的“捕捉”导致了双束加速传输效率的下降;

在慢聚束段中(第 94 至第 215 个加速单元,见

图 2(c),(d)),正、负离子束团距离缓慢拉开并继续聚束,到慢聚束段结束处正、负离子 bucket 完全分开,被“捕捉”的粒子此时已经丢失;

在慢聚束段结束后(第 215 至第 342 个加速单元),随加速单元长度的增大,正、负离子束团纵向距离越来越大,两者相互作用越来越小,正、负离子束团长度逐渐增加,但相宽不变,能散略有增大,直至加速到最终能量(见图 2(d),(e),(f)). 由于参与模拟计算的负离子束团领先于正离子束团一个加速单元(即负离子多经历了一个加速单元的加速),因此负离子束团的纵向平均速度要略大于正离子束团,如图 2(d),(e),(f)所示. 而在慢聚束段结束之前,同步离子在相邻加速单元中速度相差不大,因此正、负离子束团速度无明显差别,如图 2(a)–(c)所示.

#### 4 双束加速的模拟结果及分析

图 3 给出了双束加速时,每个加速单元中正、负离子束团的横向和纵向发射度变化. 图 4 给出了每个加速单元中正、负离子束团在横向和纵向损失的粒子数. 可以看出,在第 150 至第 200 个加速单元之间,正、负离子束团的横、纵向发射度均有较大的增加,由于纵向的“捕捉”,纵向发射度在这一区间增加得更加明显,因此在纵向要丢掉更多的粒子(粒子能量与同步粒子能量相差超过一定值后判断为纵向丢失). 随着粒子的丢失,横、纵向发射度均减小. 在 RFQ 的出口,正、负离子束团的横、纵向发射度基本相同.

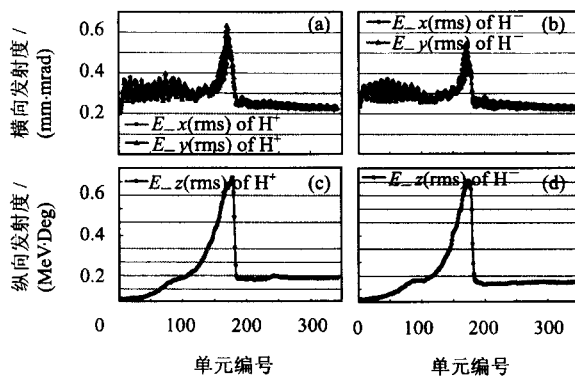


图 3 双束加速发射度计算结果

- (a) 正离子横向发射度;(b) 负离子横向发射度;  
(c) 正离子纵向发射度;(d) 负离子纵向发射度.

图 5 给出了双束加速时,每个加速单元中处在正离子 bucket 中的负离子的数目,以及处在负离子

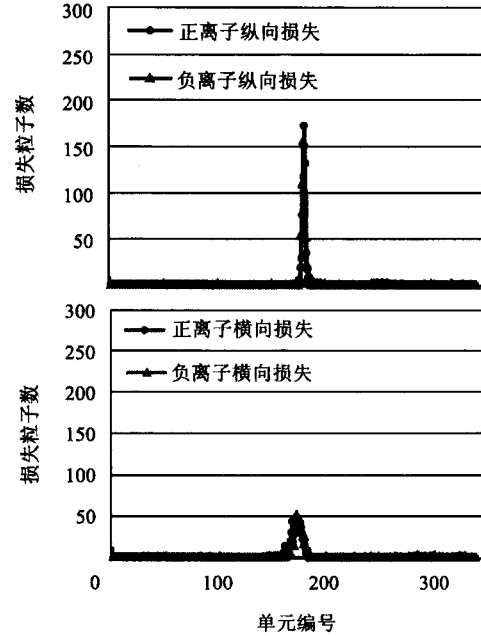


图 4 双束加速损失离子数计算结果

bucket 中的正离子的数目. 在 RFQ 开始的几个加速单元中,bucket 的高度为 0,因此统计数目为 0;在成形段的初期,bucket 高度逐渐由 0 开始增长时,由于正、负离子 bucket 有比较多的重合部分,因此统计数目最多;正、负离子 bucket 逐渐分离后统计数目开始下降,但在第 100 至 150 个加速单元中存在一个平台,这个平台包含了大部分的纵向被“捕捉”的离子数目. 随着被“捕捉”的离子的丢失以及正、负离子 bucket 在纵向继续分离,统计数目减少至 0.

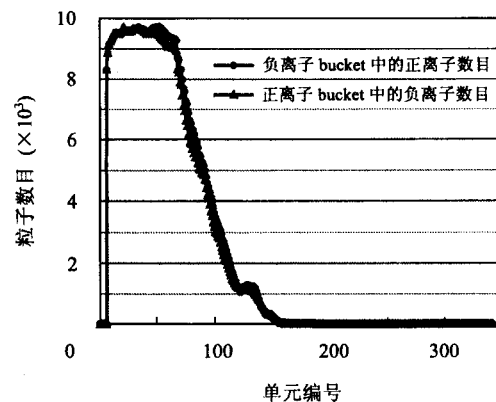


图 5 双束加速过程中被“捕捉”离子数目的统计

#### 5 结论

本文在洁净核能项目 RFQ 加速器结构参数的基础上,研究了在强流(100mA)情况下,进行正、负

离子同时加速的动力学过程及其中可能出现的问题. 该 RFQ 加速器是针对单束加速设计的, 设计流强为 60mA (传输效率模拟结果为 98.9%), 当流强增加到 100mA 时传输效率下降到 91.0%; 直接使用该结构进行双束加速 (50mA  $H^+$  和 50mA  $H^-$ ), 将会在纵向出现明显的异性电荷之间的“捕捉”(trap)现象, 导致传输效率下降到 89.0%. 因此, 若使用正、负离子同时加速, 必须重新设计 RFQ 加速器, 使其

传输效率高于单束, 才能体现出双束加速的优越性. 在最近的一次新的设计里, 我们减慢了成形段中同步相位的变化, 从而减慢了 bucket 收缩的速度, 减少了被“捕捉”离子的数目, 获得了更高的传输效率 (94.8%). 由于篇幅有限, 该部分工作将后续发表.

感谢罗紫华、关退龄、郁庆长、张华顺、欧阳华甫、徐韬光等老师对本论文工作的指导, 以及 Kenneth R. Crandall 在本文作者学习 PIC 方法时给予的帮助.

## 参考文献 (References)

- 1 FANG Shou-Xian, FU Shi-Nian. The Foreland and Future of Science (Volume 5). Beijing: Chinese Environmental Science Press, 2002. 194—206 (in Chinese)  
(方守贤, 傅世年. 科学前沿与未来 (第五集). 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 194—206)
- 2 Hardy L. Accelerator Reliability—Availability. In: Proc. of EP-AC2002. Switzerland: CERN, 2002. 149—153
- 3 YU Jin-Xiang, CHEN Jia-Er, REN Xiao-Tang et al. Atomic Energy Science and Technology, 2001, **35**(1): 34—39 (in Chinese)  
(于金祥, 陈佳洱, 任晓堂等. 原子能科学技术, 2001, **35**(1): 34 ~ 39)
- 4 Han J M, Cho Y S, Yoon B J et al. Design of the KOMAC  $H^+ / H^-$  RFQ Linac. In: C. E. Eyberger. Proc. of the XIX International LINAC Conference. Springfield, VA, U.S.A: National Technical Information Service, 1998. 774—776
- 5 Crandall K R, Stokes R H, Wangler T P. RF quadrupole beam dynamics design studies. In: Proc. of the 1979 LINAC Conference. New York: U.S. Government Printing Office, 1980. 205—216
- 6 GUAN Xia-Ling, LUO Zi-Hua, FU Shi-Nian. Beam dynamic characteristics of the 3.5MeV RFQ Accelerator in ADS. In: Report in IHEP, CAS. 2002 (in Chinese)  
(关退龄, 罗紫华, 傅世年. 与 ADS 相关的 3.5MeV RFQ 加速器的束流动力学特性. 见: 中科院高能所内部报告. 2002)
- 7 XING Qing-Zi et al. HEP & NP, 2003, **27**(7): 628 (in Chinese)  
(邢庆子等. 高能物理与核物理, 2003, **27**(7): 628)
- 8 XING Qing-Zi, LIN Yu-Zheng, FU Shi-Nian. Application of PIC Method in z-Code & t-Code Simulations of RFQ Accelerator. Nucl. Tech., to be published (in Chinese)  
(邢庆子, 林郁正, 傅世年. PIC 方法在 RFQ 加速器 z-Code 和 t-Code 模拟程序中的应用研究. 核技术, 待发表)
- 9 Hockney R W, Eastwood J W. Computer simulation using particles. London: IOP Publishing Ltd., 1988. 18—23

## Study of Simultaneous Acceleration of Positive and Negative Ion Beams by Dynamic Simulation in RFQ\*

XING Qing-Zi<sup>1,1)</sup> LIN Yu-Zheng<sup>1</sup> FU Shi-Nian<sup>2</sup> FANG Shou-Xian<sup>2</sup>

1 (Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

2 (Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract** An additional beam with opposite charge state is added into the dynamic simulation of the t-Code program PARMTEQ. The space charge effect and multi-bunch effect during the positive and negative ion beams acceleration are considered. The result is given for a four-vane type RFQ accelerator. The purpose of simulation is focused on the investigation of possible dynamic problems caused by two-beam acceleration in RFQ structure. Two-beam acceleration is prior to diminish the transverse space charge effect, but “trap” between opposite charge state ions in longitudinal position appears when the beam current is large, which is the main cause of the increasing number of longitudinal loss. Therefore new RFQ structures should be designed specially for two-beam acceleration to obtain higher transmission rate than single beam acceleration.

**Key words** two-beam acceleration, PARMTEQ, space charge effect, RFQ accelerator, clean nuclear power

Received 22 September 2003

\* Supported by Major State Basic Research Development Program (G1999022600)

1) E-mail: xqz98@mails.tsinghua.edu.cn