

文章编号: 1007-4627(2012)04-0358-06

强流脉冲束在静电加速管中传输研究及模拟计算

李超龙¹, 石海泉¹, 吕建钦²

(1. 华东交通大学基础科学学院, 江西 南昌 330013;

2. 北京大学核物理与核技术国家重点实验室, 北京 100871)

摘要: 为了研究强流脉冲束流在静电加速管中的传输, 采用矩阵法分析了非强流脉冲束流与强流脉冲束流在静电加速管中的传输矩阵, 编写了束流在静电加速管等元件中传输的计算程序 ACCT。用优化方法实现给定的光学条件, 用迭代方法计算强流脉冲束流的空间电荷效应对束流传输的影响以获得自洽解。在不同束流流强条件下, 利用 ACCT、TRACE-3D 和 TRANSPORT 等程序进行了模拟计算, 并对模拟结果进行了比较分析。模拟结果表明, 提高加速电压比, 可以增强静电加速管的聚焦能力、减少束流损失和提高传输效率。

关键词: 强流脉冲束; 静电加速管; 空间电荷效应; 迭代方法; 模拟计算

中图分类号: TL501⁺.5; TL503.2; O242.1

文献标志码: A

1 引言

在加速器的束流传输中, 静电加速管是静电加速器的关键部件, 起着传输和加速离子的作用, 它的优劣直接影响到静电加速器的性能和质量, 在一定程度上决定了加速粒子所能达到的最高能量。

强流脉冲束流在静电加速管中传输时, 束流的空间电荷效应显著, 需要考虑空间电荷效应对束流传输的影响。在束流传输过程中, 带电粒子的运动状态使空间电荷场发生变化, 空间电荷效应又使粒子的运动状态发生变化, 最后, 应当达到一种自洽的结果。关于脉冲束在静电加速管中传输的计算程序, 目前国内外主要有 PARMILA、TRACE-3D、PARMTEQ 和 TRANSPORT 等^[1-6]。综观而言, TRANSPORT 程序只能进行非强流脉冲束的传输计算, TRACE-3D、PARMILA 和 PARMTEQ 等程序能够进行强流束的传输计算, 但是在计算强流束的空间电荷效应时都不经过迭代计算, 所得结果不自洽^[7-12]。为获得强流脉冲束流在静电加速管中传输计算的自洽解, 本文采用迭代方法计算了空间

电荷效应对束流传输的影响。

2 非强流脉冲束的传输矩阵

在考虑静电加速管的传输矩阵时, 常常把静电加速管分成 3 部分: 入口膜片、均匀加速场和出口膜片。把以上 3 个部分的矩阵依次相乘, 即可得到均匀场加速管的总矩阵。当计算非强流脉冲束的传输时, 不需要考虑空间电荷效应, 可把静电加速管分为 3 个部分: 入口膜片、均匀场加速区和出口膜片。静电加速管的 3 部分传输矩阵如下:

(1) 入口膜片矩阵

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \alpha_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\text{式中 } \alpha_1 = \frac{1-\eta^2}{4L\xi_1}.$$

(2) 出口膜片矩阵

收稿日期: 2012-04-23; 修改日期: 2012-06-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(21063007); 江西省科技支撑计划资助项目(2010BGB00602); 江西省教育厅科研项目(GJJ11677)

作者简介: 李超龙(1976—), 男, 江西上饶人, 讲师, 硕士, 从事核技术及应用研究; E-mail: clljpx@126.com

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \alpha_2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_2 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中 $\alpha_2 = \frac{\eta^2 - 1}{4L\xi_2}$ 。

(3) 均匀场加速区矩阵

$$\begin{bmatrix} 1 & \alpha_3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/\eta & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \alpha_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/\eta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \alpha_4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/\eta^2 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中： $\alpha_3 = \frac{2L}{\eta + 1}$ ； $\alpha_4 = \frac{L \ln \eta^2}{\eta^2 - 1}$ 。

其中： L 为加速管的长度； $\eta = \sqrt{V_2/V_1}$ ， V_1 和 V_2 分别为加速管入口处和出口处的规范化电势； $\xi_1 = 1 + R_1(\eta^2 - 1)/\pi L$ ， $\xi_2 = 1 - R_2(\eta^2 - 1)/\pi L\eta^2$ ， R_1 和 R_2 分别为入口和出口膜片的半径。

3 强流脉冲束的传输矩阵

当计算强流脉冲束的传输时，需要考虑空间电荷效应，把静电加速管的均匀场加速区均分成若干个区间以便进行迭代计算，静电加速管的 3 部分传输矩阵如下^[13-18]：

(1) 入口膜片矩阵

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \alpha_5 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_5 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中 $\alpha_5 = \frac{(1 - V_r)\pi L}{4L[\pi L + R(V_r - 1)]}$ 。

(2) 出口膜片矩阵

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \alpha_6 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_6 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中 $\alpha_6 = \frac{(V_r - 1)\pi L V_r}{4L[\pi L V_r - R(V_r - 1)]}$ 。

(3) 均匀加速区间 $[z_{i-1}, z_i]$ 矩阵

$$\begin{bmatrix} \theta_1 & \theta_3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \theta_2 & \theta_4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \theta_5 & \theta_7 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \theta_6 & \theta_8 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \theta_9 & \theta_{11} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \theta_{10} & \theta_9 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中： $\theta_1 = \cosh(k_x l_i)$ ； $\theta_2 = \frac{k_x \sinh(k_x l_i)}{\eta_i}$ ；

$\theta_3 = \frac{\sinh(k_x l_i)}{k_x}$ ； $\theta_4 = \frac{\cosh(k_x l_i)}{\eta_i}$ ；

$\theta_5 = \cosh(k_y l_i)$ ； $\theta_6 = \frac{k_y \sinh(k_y l_i)}{\eta_i}$ ；

$\theta_7 = \frac{\sinh(k_y l_i)}{k_y}$ ； $\theta_8 = \frac{\cosh(k_y l_i)}{\eta_i}$ ；

$\theta_9 = \cosh(k_\tau l_i)$ ； $\theta_{10} = \frac{m_0 \gamma_0 \tilde{\beta}_0^3 c^3 \eta_i k_\tau \sinh(k_\tau l_i)}{\omega}$ ；

$\theta_{11} = \frac{\omega \sinh(k_\tau l_i)}{m_0 \gamma_0 \tilde{\beta}_0^3 c^3 \eta_i k_\tau}$ ，

其中： $V_r = V_2/V_1$ 为加速电压比； R 为加速管的半径； $\eta_i = \sqrt{V_i/V_{i-1}}$ ， V_i 和 V_{i-1} 分别为粒子在 z_i 和 z_{i-1} 处的规范化电势； $l_i = 2L_i/(\eta_i + 1)$ 为加速区间 (z_{i-1}, z_i) 的等效长度； m_0 为粒子的静止质量； $\tilde{\beta}_0 = (\beta_{0i-1} + \beta_{0i})/2$ ， β_{0i} 和 β_{0i-1} 分别为粒子在分点 z_i 和 z_{i-1} 处的相对速度； c 为光速； γ_0 为相对论因子； ω 为脉冲重复角频率；

$k_x = \sqrt{2Q\mu_x/p_{0i-1}v_{0i-1}}$ ， $k_y = \sqrt{2Q\mu_y/p_{0i-1}v_{0i-1}}$ ，

$k_\tau = \sqrt{Q\mu_z v_{0i-1}(\eta_i^2 + \eta_i + 1)/3m_0 \gamma_0 \tilde{\beta}_0^3 c^3 \eta_i^2}$ ，

p_{0i-1} 和 v_{0i-1} 分别为粒子在分点 z_{i-1} 处的动量和速度， $Q = \sqrt{3qIT/8\pi\epsilon_0 XYZ}$ ， q 为粒子的带电量， I 为脉冲束的平均流强， T 为脉冲重复周期， X 和 Y 为脉冲束团的横向椭圆截面半轴长度、 Z 为脉冲束团

的纵向长度， μ_x 、 μ_y 和 μ_z 为脉冲束团的在 x 、 y 和 z 3 个方向的形状因子。

4 程序计算方法

当计算束流在静电加速管中的传输时，先采用优化方法计算非强流脉冲束流的传输，按照要求调整元件的参数；然后采用迭代方法计算强流脉冲束的传输。下面分别对优化和迭代方法予以介绍。

4.1 优化方法

直接寻优法优点是不需要计算目标函数的导数，又有较快的收敛速度。对于正定的二次函数，当利用直接寻优法寻优时，一般经过 n 次迭代就可以达到极小点。但是迭代过程中可能会出现这样的情况：在某轮迭代中， n 个搜索方向线性相关，以致于即使对于正定的二次函数，经过 n 次迭代也达不到极小点，甚至无限次的迭代也达不到极小点。这是因为此方法不能保证每次迭代后所选用的 n 个搜索方向都是线性无关的，特别是当自变数很多时更容易出现这种问题。

ACCT 使用改进的直接寻优法，保证在每次迭代时所取的 n 个向量线性无关。ACCT 使用优化方法的计算步骤为：

- Step 1 给定控制容许误差 $\epsilon > 0$ ，初始点 x_0 ，设 e_1, e_2, \dots, e_n 分别为 n 个坐标轴上的单位方向；
- Step 2 令 $p_i = e_{i+1}, i=0, 1, \dots, n-1$ ；
- Step 3 沿 e_1, e_2, \dots, e_n 各方向作一维搜索，求出最优步长 a_i 和最优点 x_{i+1} ，使得 $f(x_i + a_i p_i) = \min f(x_i + a p_i), x_{i+1} = x_i + a_i p_i$ ，其中 a 为迭代步长；
- Step 4 令 $p_n = (x_n - x_0) / \|x_n - x_0\|$ ，作一维搜索 $p_n = p_{n+1}, i=0, 1, \dots, n-1$ ；
- Step 5 作一维搜索 $f(x_n + a_n p_{n-1}) = \min f(x_n + a p_{n-1})$ ，令 $x_{n+1} = x_n + a_n p_{n-1}$ ；
- Step 6 若 $\|x_{n+1} - x_0\| < 0$ ，则 $x^* = x_{n+1}$ ，停，否则转 Step 7；
- Step 7 令 $x_0 = x_{n-1}$ ，转 Step 3。

4.2 迭代方法

对于静电加速管，在计入空间电荷效应时，要计算其束流包络，必须首先算出其传输矩阵，而传输矩阵又是束包络的函数。由于，运动方程是自耦

合的，既不能先算出传输矩阵，也不能先算出束包络，因此很难精确地算出其自洽解，通常需要在计算机上采用逐步迭代方法求出其近似解。

ACCT 使用雅克比迭代法，这种迭代法的优点明显，计算公式简单，每迭代一次只需计算一次矩阵和向量的乘法，且计算过程中原始矩阵 A 始终不变，比较容易并行计算；缺点是收敛速度较慢。ACCT 使用迭代方法的基本步骤为：

- Step 1 输入方程组的阶数 n ，系数矩阵 A ，右端常数矩阵 b ，最大迭代次数 N_{max} 以及容许误差 ϵ ；
- Step 2 $k=0$ ；
- Step 3 对 $i=0, 1, 2, \dots, n-1$ ，计算：

$$x_i^{(k+1)} = \frac{1}{a_{ii}} \left(b_i - \sum_{j=1, j \neq i}^n a_{ij} x_j^{(k)} \right)$$

$$i=1, 2, \dots, n; k=0, 1, 2, \dots$$

$$d = \max |x_i^{(k+1)} - x_i^{(k)}|,$$
- Step 4 $d < \epsilon$ 成立，转 Step 6，否则继续；
- Step 5 $k \leq N_{max}$ 成立， $k=k+1$ ，转 Step 3，否则转 Step 7；
- Step 6 输出 $x_i^{(k+1)}, i=0, 1, 2, \dots, n-1$ ；
- Step 7 结束。

5 模拟计算

分别用 TRANSPORT、TRAC-3D 和 ACCT 计算由漂浮空间和静电加速管组成的束流传输线系统(如图 1 所示)，质子束流的初始能量为 35 keV。

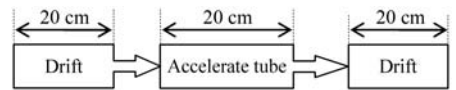


图 1 束流传输线

比较 TRANSPORT、TRACE-3D 和 ACCT 模拟计算之间的差异。TRANSPORT 计算强流脉冲束的传输时不考虑空间电荷效应，TRACE-3D 计算强流脉冲束的传输时考虑空间电荷效应但不采用迭代方法，ACCT 计算强流脉冲束的传输时考虑空间电荷效应并采用迭代方法。表 1 和表 2 分别列出了 ACCT、TRACE-3D 及 TRANSPORT 程序模拟计算的结果，模拟结果均能精确到小数点后第 3 位，有利于减小 ACCT 迭代计算的误差。可以看出，不考虑空间电荷效应时的模拟值比考虑空间电荷效应时的模拟值小，束流流强小的模拟值比束流流强大

的模拟值小，ACCT 的自洽解比 TRACE-3D 的非自洽解略小。

表 1 束流流强 20 mA 的束流包络模拟值

束流线 Z/cm	ACCT		TRACE-3D		TRANSPORT	
	X/cm	Y/cm	X/cm	Y/cm	X/cm	Y/cm
0.0	0.099 5	0.099 6	0.099 5	0.099 6	0.099 5	0.099 6
10.0	0.411 9	0.413 8	0.412 2	0.414 1	0.411 1	0.411 3
20.0	0.806 1	0.814 9	0.807 3	0.816 0	0.798 2	0.805 0
30.0	1.100 0	1.108 0	1.106 0	1.113 6	1.048 0	1.056 8
40.0	1.393 8	1.401 1	1.404 6	1.411 3	1.297 8	1.308 7
50.0	1.791 0	1.793 8	1.812 0	1.813 7	1.597 6	1.608 9
60.0	2.188 1	2.186 6	2.219 3	2.216 0	1.897 4	1.909 0

表 2 束流流强 40 mA 的束流包络模拟值

束流线 Z/cm	ACCT		TRACE-3D		TRANSPORT	
	X/cm	Y/cm	X/cm	Y/cm	X/cm	Y/cm
0.0	0.099 5	0.099 6	0.099 5	0.099 6	0.099 5	0.099 6
10.0	0.414 9	0.416 5	0.415 2	0.416 8	0.411 1	0.411 3
20.0	0.818 2	0.825 9	0.819 4	0.827 0	0.798 2	0.805 0
30.0	1.159 8	1.164 4	1.165 7	1.170 0	1.048 0	1.056 8
40.0	1.501 3	1.502 9	1.512 0	1.513 0	1.297 8	1.308 7
50.0	2.000 0	1.991 3	2.020 7	2.010 9	1.597 6	1.608 9
60.0	2.498 6	2.479 7	2.529 5	2.508 9	1.897 4	1.909 0

ACCT 和 TRACE-3D、TRANSPORT 程序一样，在运行过程中可直观地进行图形显示。程序可以避免处理大量数据，它可以将计算结果以束流

包络线方式显示出来，束流包络线如图 2 至图 4 所示。根据这些图形可以直接判断出计算结果是否满足要求，从而确定如何修正各元件的参数。

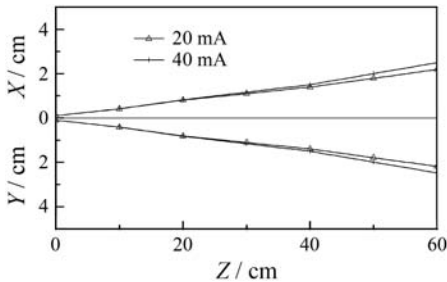


图 2 ACCT 模拟束流包络曲线

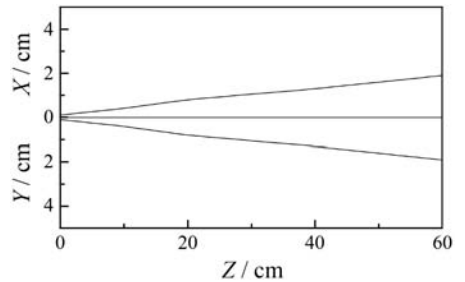


图 4 TRANSPORT 模拟束流包络曲线

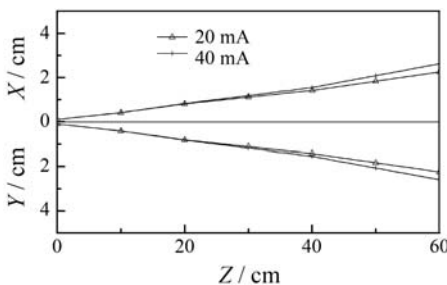


图 3 TRACE-3D 模拟束流包络曲线

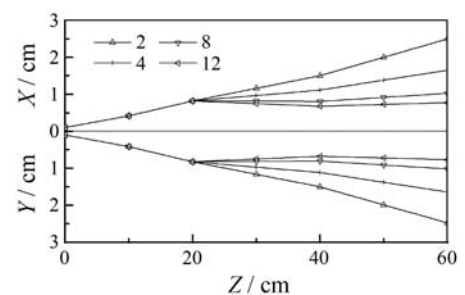


图 5 ACCT 模拟 40 mA 时不同电压比束流包络曲线

从图 2 至图 4 可以看出,束流包络曲线横向发散显著,束流传输效率不理想。图 5 给出了 ACCT 模拟束流流强 40 mA 时不同加速电压比条件下束流包络曲线图。由图 5 可知,随着加速电压比增大,束流横向包络缩小,说明静电加速管的聚焦能力增大。为提高束流传输效率,可以通过提高加速电压比增强静电加速管的聚焦能力来约束强流束流包络的横向发散。

6 结论

本文介绍了束流在静电加速管中的传输矩阵与 ACCT 程序的计算方法,这种计算方法可以应用到强流加速器的其他元件。用 ACCT、TRACE-3D 和 TRANSPORT 分别模拟了束流在由漂浮空间和静电加速管组成的束流传输线系统中的传输。从上述模拟结果可以看出,对于强流脉冲束在静电加速管中的传输,横向空间电荷效应的影响明显,不能忽略;束流流强越大,横向空间电荷效应越大,束流包络曲线横向扩张越大;提高加速电压比可以增强静电加速管的聚焦能力,进而提高束流传输效率。

空间电荷效应可以分为横向空间电荷效应和纵向空间电荷效应。横向空间电荷效应的主要表现是束流的横向扩张。当然,纵向空间电荷效应对束流的发射相图也会产生影响,这将是下一步理论分析与模拟计算的研究课题。

参考文献 (References):

[1] DRAGT A J. Physics of High Energy Particle Accelerators [C]// Carrigan R A. AIP Conference Proceeding. New York: Am Inst Phys, 1987(87): 147.

[2] YASUDA K, HATASHITA M, HATORI S, *et al.* Nucl Instr and Meth B, 2003, **210**: 27.

[3] WATT F, RAJTA I, VAN KAN J A, *et al.* Nucl Instr and Meth B, 2002, **190**: 306.

[4] CRANDALL K R, RUSTHOI D P. TRACE-3D Documentation; LA-UR-97-886[R]. USA: Los Alamos National Laboratory 1997.

[5] WANG Houwen. High Power Laser and Particle Beam, 1998, **10**(2): 287(in Chinese).
(王厚稳. 强激光与粒子束, 1998, **10**(2): 287.)

[6] MAO Naifeng, XIAO Meiqin, LI Zenghai. Atomic Energy Science and Technology, 1986, **20**(6): 117(in Chinese).
(茅乃丰, 肖美琴, 李增海. 原子能科学技术, 1986, **20**(6): 117.)

[7] HARUNORI T, BILLEN J H. Parmila: LA-UR-98-4478 [R]. USA: Los Alamos National Laboratory 1998.

[8] DING Furong, SHI Ping, WANG Yao, *et al.* Nuclear Physics Review, 2004, **21**(1): 34(in Chinese).
(丁富荣, 史平, 王尧, 等. 原子核物理评论, 2004, **21**(1): 34.)

[9] ZHU Kun, WANG Shengli, YIN Quanmin. Nuclear Physics Review, 2001, **18**(2): 101(in Chinese).
(朱昆, 王胜利, 尹全民. 原子核物理评论, 2001, **18**(2): 101.)

[10] ZHANG Cong, ZHAO Hongwei, HE Yuan. Nuclear Physics Review, 2010, **27**(4): 434.

[11] LI Chaolong, SHI Haiquan, LU Jianqin. Nuclear Physics Review, 2011, **28**(4): 448(in Chinese).
(李超龙, 石海泉, 吕建钦. 原子核物理评论, 2011, **28**(4): 448.)

[12] LI Chaolong, SHI Haiquan, AI Jianfeng, *et al.* High Power Laser and Particle Beam, 2010, **22**(1): 176(in Chinese).
(李超龙, 石海泉, 艾剑峰, 等. 强激光与粒子束, 2010, **22**(1): 176.)

[13] LU Jianqin, LI Jinhai, LI Chaolong. Science Technology and Engineering, 2002, **2**(4): 11(in Chinese).
(吕建钦, 李金海, 李超龙. 科学技术与工程, 2002, **2**(4): 11.)

[14] LU Jianqin, LI Jinhai, LI Chaolong. High Power Laser and Particle Beam, 2003, **15**(7): 717.

[15] ZHAO Zhuo, LU Jianqin. Chinese Physics C, 2008, **32**(3): 209.

[16] LI Jinhai, LI Chaolong, LU Jianqin. High Energy Physics and Nuclear Physics, 2003, **27**(7): 645.

[17] LI Jinhai, L U Jianqin. High Energy Physics and Nuclear Physics, 2004, **28**(9): 998.

[18] LI Jinhai, L U Jianqin. High Energy Physics and Nuclear Physics, 2005, **29**(7): 695.

Research and Simulation of Intense Pulsed Beam Transfer in Electrostatic Accelerate Tube

LI Chao-long^{1, 1)}, SHI Hai-quan¹, LU Jian-qin²

(1. Basic Science School, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China;

2. State Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: To study intense pulsed beam transfer in electrostatic accelerate tube, the matrix method was applied to analyze the transport matrixes in electrostatic accelerate tube of non-intense pulsed beam and intense pulsed beam, and a computer code was written for the intense pulsed beam transporting in electrostatic accelerate tube. Optimization techniques were used to attain the given optical conditions and iteration procedures were adopted to compute intense pulsed beam for obtaining self-consistent solutions in this computer code. The calculations were carried out by using ACCT, TRACE-3D and TRANSPORT for different beam currents, respectively. The simulation results show that improvement of the accelerating voltage ratio can enhance focusing power of electrostatic accelerate tube, reduce beam loss and increase the transferring efficiency.

Key words: intense pulsed beam; electrostatic accelerate tube; space-charge effect; iteration method; simulation calculation

Received date: 23 Apr. 2012; **Revised date:** 6 Jun. 2012

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(21063007); Supporting Program for Science and Technology of Jiangxi Province (2010BGB00602); Research Project of Department of Education of Jiangxi Province (GJJ11677)

1) E-mail: cljpx@126.com