文章编号:1005-0523(2012)04-0052-05

强流束在三圆筒单透镜中的传输研究

李超龙,石海泉,刘正方,吕 珂,朱丽华,邱万英

(华东交通大学基础科学学院,江西 南昌 330013)

摘要:强流脉冲束在三圆筒单透镜中的传输是一个相当复杂的问题,因为不同类型的粒子束分布产生不同的空间电荷场,而在束流运动过程中,空间电荷场也在不断地变化,而且粒子运动的轨迹与空间电荷势又是相互依赖的,因此需要求得一个自洽的解。对于强流脉冲束在三圆筒单透镜中的传输,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。采用矩阵法分析非强流脉冲束流与强流脉冲束流在三圆筒单透镜中的传输矩阵,采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,并编写了束流在三圆筒单透镜等元件中传输的计算程序。程序在进行模拟计算时,可以直观地显示束流相图、束流包络线等图形。

关键词:强流脉冲束;三圆筒单透镜;空间电荷效应;模拟计算

中图分类号:TL501.5 **文献标志码**:A

关于强流脉冲束在三圆筒单透镜中传输的计算程序,目前国内外主要有PARMILA[1-2],TRACE-3D[3],PARMTEQ[4-6],TRANSPORT[7-9]等程序,TRANSPORT程序只能进行非强流脉冲束的传输计算,TRACE-3D、PARMILA,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[10-13]。这些程序有的不能计算强流脉冲束的传输,有的计算强流脉冲束的传输时没有经过迭代不能获得自洽解[14]。本文采用矩阵法分析了非强流脉冲束流与强流脉冲束流在三圆筒单透镜中传输的矩阵,并编写了束流在三圆筒单透镜等元件中传输的计算程序TELS。TELS计算束流在三圆筒单透镜中的传输时,先计算非强流脉冲束流的传输,采用优化方法自动调整元件参数获得最优的元件参数;然后计算强流脉冲束的传输,采用迭代方法计算强流脉冲束流的空间电荷效应可以获得自洽解;最后根据控制参数显示束流发射相图和束流包络曲线等图形。

1 三圆筒单透镜的矩阵法

束流传输系统的设计与研究有矩阵法和轨迹方程法2种数值计算方法。一是矩阵法。根据束流传输理论,束流可用一个六维相空间椭球来描述,传输元件对束流运动的作用可以用传输矩阵算子表示。矩阵法就是根据给定的初始束流相空间椭球,通过计算传输矩阵算子,设计束流传输系统使得传输后的束流相空间椭球符合要求。二是轨迹方程法。采用对带电粒子在电磁场中的运动方程直接积分的方法来设计束流传输系统。积分中,各个传输元件所产生的电磁场是预先给定的,它既可以是实验测量值,也可以是数值计算结果。该文采用矩阵法分析脉冲束流在三圆筒单透镜中的传输。

非强流脉冲束在三圆筒单透镜中的传输时,不需要计算空间电荷效应,把三圆筒单透镜的场作用区均匀分成若干个区间,每个区间$[z_{i-1}, z_i]$的传输矩阵为

收稿日期:2012-05-25

基金项目:江西省科技支撑计划项目(2010BGB00602);江西省教育厅科研项目(GJJ11677);华东交通大学科研基金项目(09JC04)

作者简介:李超龙(1976—),男,讲师,硕士,研究方向为粒子动力学及材料物理。

中国知网 https://www.cnki.net

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\dfrac{\eta_{i+1}^2\eta_i^2-2\eta_i^2+1}{4\eta_i^2 d_i} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\dfrac{\eta_{i+1}^2\eta_i^2-2\eta_i^2+1}{4\eta_i^2 d_i} & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{1}$$

其中：$\eta_i^2=\sqrt{V_i/V_{i-1}}$；$V_i$ 和 V_{i-1} 分别为分点 z_i 和 z_{i-1} 处的电位；d_i 为第 i 个区间长度。

强流脉冲束在三圆筒单透镜中的传输时，需要考虑空间电荷效应，把三圆筒单透镜的场作用区均匀分成若干个区间，每个区间 $[z_{i-1},z_i]$ 的传输矩阵为

$$\begin{bmatrix} \cosh(k_x\ell_{ie}) & \dfrac{\sinh(k_x\ell_{ie})}{k_x} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \dfrac{k_x\sinh(k_x\ell_{ie})}{\eta_i} & \dfrac{\cosh(k_x\ell_{ie})}{\eta_i} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cosh(k_y\ell_{ie}) & \dfrac{\sinh(k_y\ell_{ie})}{k_y} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dfrac{k_y\sinh(k_y\ell_{ie})}{\eta_i} & \dfrac{\cosh(k_y\ell_{ie})}{\eta_i} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cosh(k_\tau\ell_{ie}) & \dfrac{\omega\sinh(k_\tau\ell_{ie})}{m_0\gamma_0\tilde{\beta}_0^3c^3\eta_i k_\tau} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dfrac{m_0\gamma_0\tilde{\beta}_0^3c^3\eta_i k_\tau\sinh(k_\tau\ell_{ie})}{\omega} & \cosh(k_\tau\ell_{ie}) \end{bmatrix} \tag{2}$$

式中：cosh 和 sinh 分别为双曲余弦、正弦函数；$\ell_{ie}=2L_i/(\eta_i+1)$ 为第 i 个区间实际长度 L_i 的等效长度；m_0 为粒子的静止质量；$\tilde{\beta}_0=(\beta_{0i-1}+\beta_{0i})/2$，$\beta_{0i}$ 和 β_{0i-1} 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；$k_x=\sqrt{2Q\mu_x/p_{0i-1}v_{0i-1}}$，$k_y=\sqrt{2Q\mu_y/p_{0i-1}v_{0i-1}}$，$k_\tau=\sqrt{Q\mu_z v_{0i-1}(\eta_i^2+\eta_i+1)/3m_0\gamma_0\tilde{\beta}_0^3c^3\eta_i^2}$，$p_{0i-1}$ 和 v_{0i-1} 分别为粒子在分点 z_{i-1} 处的动量和速度，$Q=\sqrt{3qIT/8\pi\varepsilon_0XYZ}$，$q$ 为粒子的带电量，X、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，T 为脉冲重复周期，I 为脉冲束的平均流强，μ_x、μ_y 和 μ_z 为脉冲束团的在 x、y 和 z 三个方向的形状因子；ω 为脉冲重复角频率。

2　优化方法

最优化计算是加速器粒子动力学设计的重要手段，它不但能够使设计方案更加合理，而且可以大大节省计算时间。TELS使用直接寻优优化方法，直接寻优方法不需要计算目标函数的导数，它们适合于这样一些问题：目标函数非常复杂，或者根本写不出其解析式，故很难计算其导数。直接寻优方法属于共轭梯度法，因此有较快的收敛速度。直接寻优方法的计算步骤为

Step 1　给定控制容许误差 $\varepsilon>0$，初始点 x_0，设 $e_1,e_2,\cdots,e_n$ 分别为 n 个坐标轴上的单位矢量；

Step 2　取初始坐标矢量系 $p_i=e_{i+1}$，其中 $i=0,1,\cdots,n-1$；

Step 3　沿 e_1，e_2，$\cdots$，e_n 各方向作一维搜索，在求出最优步长 a_i 和最优点 x_{i+1}，使得：$f(x_i+a_ip_i)=\min f(x_i+ap_i)$，$x_{i+1}=x_i+a_ip_i$，其中 a 为迭代步长；

Step 4　令坐标矢量 $p_n=(x_n-x_0)/\|x_n-x_0\|$，作一维搜索 $p_n=p_{n+1}$；

Step 5　作一维搜索 $f(x_n+a_np_{n-1})=\min f(x_n+ap_{n-1})$，令 $x_{n+1}=x_n+a_np_{n-1}$；

Step 6　若 $\|x_{n+1}-x_0\|<0$，则 $x^*=x_{n+1}$，停，否则转Step 7；

中国知网　https://www.cnki.net

Step 7 令 $x_0=x_{n-1}$，转Step 3。

3 迭代方法

迭代方法是数值计算中一类典型方法，应用于方程求根，方程组求解，矩阵求特征值等方面。其基本思想是逐次逼近，先取一个粗糙的近似值，然后用同一个递推公式，反复校正此初值，直至达到预定精度要求为止。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 $\boldsymbol{A}$，右端常数矩阵 $\boldsymbol{b}$，最大迭代次数 N 以及容许误差 ε；

Step 2 $k=0$；

Step 3 对 $i=0,1,2,\cdots,n-1$，计算：

$$x_i^{(k+1)}=\frac{1}{a_{ii}}(b_i-\sum_{j=1,j\neq i}^{n}a_{ij}x_j^{(k)}) \qquad (i=1,2,\cdots,n;\ k=0,1,2,\cdots)$$

$$d=\min\left|x_i^{(k+1)}-x_i^{(k)}\right|$$

Step 4 若两次计算最小差值 $d<\varepsilon$ 成立，转Step 6，否则继续；

Step 5 若迭代次数 $k\leqslant N$ 成立，$k=k+1$，转Step 3，否则转Step7；

Step 6 输出 $x_i^{(k+1)}$ $(i=0,1,2,\cdots,n-1)$；

Step 7 结束。

4 模拟算例

如图1所示，模拟过程中采用由漂浮空间和三圆筒单透镜组成的束流传输系统，粒子的初始能量为35 keV，质量数和电荷数均为1。

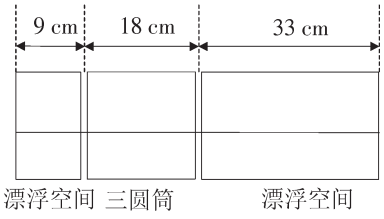


图1 束流传输系统

Fig.1 Beam transfer system

用TELS比较了TRANSPORT和TRACE-3D程序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，TELS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、表2给出了TELS、TRACE-3D和TRANSPORT程序模拟计算结果，TELS得到的结果均能精确到小数点后第3位，TELS的模拟数值介于TRACE-3D模拟数值和TRANSPORT模拟数值之间，表1、表2中 X、Y 为束流包络横向椭圆截面半轴长度。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。

表1 束流流强30毫安的模拟值

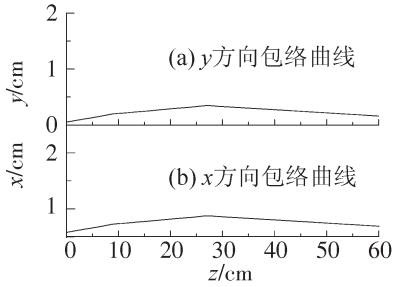
Tab.1 Simulation value of beam current 30 mA

系统元件	TELS模拟值		TRACE-3D模拟值		TRANSPORT模拟值	
	X/cm	Y/cm	X/cm	Y/cm	X/cm	Y/cm
离子源	0.099 5	0.099 6	0.099 5	0.099 6	0.099 5	0.099 6
漂浮空间	0.390 5	0.391 9	0.392 0	0.393 4	0.372 9	0.372 8
三圆筒	0.680 7	0.689 5	0.688 3	0.697 4	0.573 3	0.577 3
漂浮空间	0.309 8	0.313 4	0.321 6	0.324 3	0.228 9	0.227 7

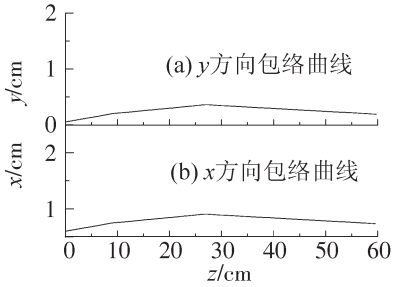
中国知网 https://www.cnki.net

表2　束流流强40毫安的模拟值
Tab.2　Simulation value of beam current 40 mA

系统元件	TELS模拟值		TRACE-3D模拟值		TRANSPORT模拟值	
	X/cm	*Y*/cm	*X*/cm	*Y*/cm	*X*/cm	*Y*/cm
离子源	0.099 5	0.099 6	0.099 5	0.099 6	0.099 5	0.099 6
漂浮空间	0.397 8	0.399 2	0.399 3	0.400 6	0.372 9	0.372 8
三圆筒	0.720 4	0.729 4	0.728 4	0.737 4	0.573 3	0.577 3
漂浮空间	0.377 8	0.375 1	0.391 9	0.387 6	0.228 9	0.227 7

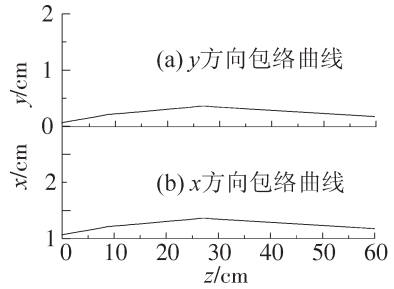


(a) 束流流强30 mA

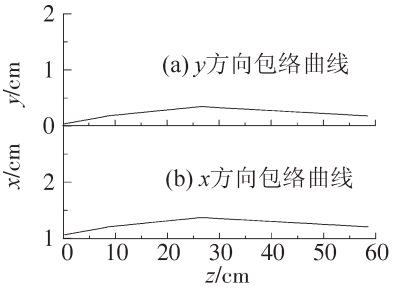


(b) 束流流强40 mA

图2　TELS模拟计算结果
Fig.2　Simulation results of IELTS



(a) 束流流强30 mA



(b) 束流流强40 mA

图3　TRACE-3D模拟计算结果
Fig.3　Simulation results of TRACE-3D

TELS和TRACE-3D与TRANSPORT程序一样，在运行过程中可直观地显示束流传输线系统中任意一个元件的发射相图，运行结束时，可以显示束流包络曲线，如图2至图4所示。其中x和y为束流包络横向椭圆截面的两个半轴长度，z为束流包络轴向方向长度。可以看出，考虑空间电荷效应时的束流包络曲线比不考虑空间电荷效应时的束流包络曲线大，并且随束流流强增大，束流包络曲线增大。

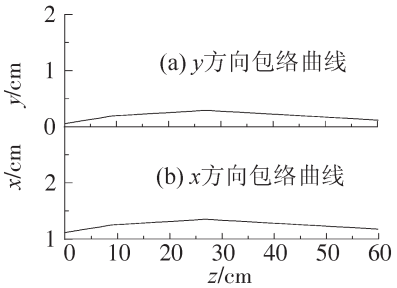


图4　TRANSPORT模拟计算结果
Fig.4　Simulation results of TRANSPORT

5　结论

提出了一种新的求解强流脉冲束流的空间电荷效应的迭代方法。从上述理论分析及模拟算例分析可以得到以下结论：

1）TELS的模拟值介于TRACE-3D模拟数值和TRANSPORT模拟数值之间，结果合理。

2）束流流强越大，束流的空间电荷效应越大，迫使束流横向扩张越大，束流包络曲线越大。

中国知网　https://www.cnki.net

3）对于强流脉冲束在三圆筒单透镜中的传输，空间电荷效应的影响明显，不能忽略。

4）计算空间电荷效应时用迭代法逐次逼近，直到前后两次计算结果满足所要求的精度为止，其计算结果是自洽的。

参考文献：

[1] HARUNORI T，BILLEN J H. Parmila[R]. New Mexico：Los Alamos National laboratory，2005：153.
[2] LLOYD M Y，JAMES H B. Parmela documentation[R]. New Mexico：Los Alamos National laboratory，2003：697.
[3] CRANDALL K R，RUSTHOI D P. TRACE-3D documentation[R]. New Mexico：Los Alamos National laboratory，1997：306.
[4] SCHIKORRW M. Assessments of the kinetic and dynamic transient behavior of sub-critical systems（ADS）in Comparison to Critical Reactor Systems[J]. Nuclear En-gineering and Design，2001，210(1)：95-123.
[5] GALAMBOS J，DANILOV S，JEON D，et al. ORBIT-A ring in jection code with space charge[C]//Proc of the 1999 Particle Accelerator Conferenee，1999：3143-3145.
[6] WANG H W. An achromatic isochronous magnetic deflecting system for intense beam[J]. High Power Laser and Particle Beams，1998，10(2)：287-290.
[7] LI J Q，MO Y L，ZHANG Y，et al. Study on finite size macro particles space-charge fields[J]. High Power Laser and Particle Beams，2002，14(1)：134-138.
[8] YANG J J，ZHANG T J，AN S Z，et al. A two-dimension beam dynamics simulation code base on PIC method[J]. High Energy Physics and Nuclear Physics，2007，32(8)：769-773.
[9] MAO N F，XIAO M Q，LI Z H. TRANGSPORT-EM—a program used for calculating beam line[J]. Atomic Energy Science and Technology，1986，20(6)：117-119.
[10] FENG Y Z，QIN B，FAN M W. Numerical simulation of space charge effect with boundary element method Poisson solver [J]. High Power Laser and Particle Beams，2008，20(10)：1719-1723.
[11] LÜ J Q，LI J H，LI C H. Lie algebraic analysis for the nonlinear transport of intense pulsed beams[J]. Science Technology and Engineering，2002，2(4)：11-15.
[12] LÜ J Q，LI J H，LI C H. Nonlinear transport of intense beams in dipole magnets—Lie algebraic analysis[J]. High Power Laser and Particle Beams，2003，15(7)：717-720.
[13] LI J H，LI C L，LÜ J Q. Lie algebraic analysis for the nonlinear transport in electrostatic quadrupoles[J]. High Energy Physics and Nuclear Physics，2003，27(7)：645-648.
[14] LI C L，SHI H Q，AI J F，et al. Intense pulsed beam nonlinear transport in solenoidal lenses [J]. High Power Laser and Particle Beams，2010，22(1)：176-180.

A Study of Intense Pulsed Beam Transfer in Three-tube Einzel Lenses

Li Chaolong，Shi Haiquan，Liu Zhengfang，Lv Ke，Zhu Lihua，Qiu Wanying

（School of Basic Science，East China Jiaotong Universty，Nanchang 330013，China）

Abstract：The transfer of intense pulsed beams in three-tube einzel lenses is a very complicated issue，because particle beam distributions of different types may cause different space-charge fields while particle trajectories and space charge potentials are mutually dependable with changes of space-charge fields in the process of particle beam motion. So，it is necessary to solve the problem by getting self-consistent solutions. Space-charge effects on the intense pulsed beam transfer should be considered，because when the intense pulsed beam is transferred in the three-tube einzel lenses，the space-charge effects of intense pulsed beam is obvious. The paper uses the matrix method to analyze the transfer matrix of non-intense pulsed beams and intense pulsed beams respectively in three-tube einzel lenses，and by using the iteration calculates the space-charge effects of the intense pulsed beam on the transfer of particle beams. Through designing a calculation program for the particle beam transfer in three-tube einzel lenses，we can clearly show the beam phase diagram and the envelope curve.

Key words：intense pulsed beam；three-tube einzel lenses；space-charge effect；simulation calculation

中国知网 https://www.cnki.net