

束晕-混沌控制中的粒子跟踪模拟研究*

廖高华¹⁾ 翁甲强¹⁾ 成丽春²⁾ 方锦清³⁾

¹⁾广西师范大学物理与信息工程学院, 桂林 541004)

²⁾桂林电子工业学院信息材料科学与工程系, 桂林 541004)

³⁾中国原子能科学研究院, 北京 102413)

(2004 年 4 月 21 日收到, 2004 年 5 月 15 日收到修改稿)

运用 PIC 程序研究了强流离子束中粒子的横向运动, 发现了不加控制时束晕粒子并非一直处于晕区和施加非线性控制后粒子的横向运动被限制在一定的范围内形成环状, 以及均方根半径的变化近似成为周期运动等性质. 根据观察到的均方根半径及其变化率的规律性, 提出了一种新的自适应控制器. 用该控制器不仅能在很短的时间内完全控制住束晕, 而且不需要对增益因子进行精确计算, 也能在系统参数改变的情况下取得较好的控制效果.

关键词: 束晕-混沌, 粒子跟踪, 数值模拟, 自适应控制

PACC: 0545, 4265J, 2990

1. 引 言

加速器驱动的放射性洁净核能系统(ADS)是新一代更安全、更干净的核能系统^[1], 开发 ADS 的关键技术之一是强流中能加速器^[2-5]. 这种加速器的性能指标要求比非强流加速器高得多, 一般超过数十甚至上百倍. 由于强流离子束会产生束晕现象, 而束晕粒子容易打到加速器壁和其他部件上, 造成超标的放射性剂量甚至损坏加速器的元件等, 因此对其进行控制势在必行. 自文献[6]提出利用非线性控制方法对束晕-混沌进行控制以来, 人们已找到了几种对束晕-混沌进行控制的有效方法^[6-12]. 不过, 有关的研究均是从统计的角度对全体粒子的整体行为进行的, 并未深入研究加入控制器后单个粒子的运动. 本文通过对各个粒子的运动进行模拟跟踪, 从微观层次了解束晕-混沌控制前后粒子运动行为的变化, 结果发现粒子的运动变化具有某些规律性. 根据这些规律性的启发, 本文提出了一种新的控制器. 模拟结果表明, 新控制器能在很短的时间内达到控制目的, 而且不需要对增益因子进行精确的计算, 也能在系统参数改变的情况下取得较好的控制效果.

2. 强流离子束粒子运动模拟模型

在如图 1 所示的周期性聚焦系统中, 离子自生场 $\Phi(r, s)$ 满足 Poisson 方程^[6, 11]

$$\frac{\partial^2}{\partial r^2} \Phi(r, s) = -4\pi q n_0(r, s), \quad (1)$$

式中 $n_0(r, s)$ 为粒子密度函数, q 为离子所带电量.

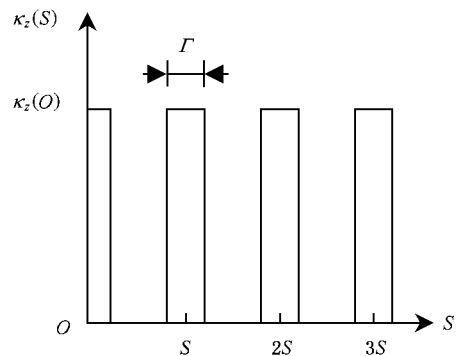


图 1 周期性聚焦磁场

在 Larmor 坐标系下, 离子横向方向的标准化运动方程为^[13]

$$\frac{d^2 x}{ds^2} + k_z(s)x + \frac{K}{2qN} \frac{x}{r} \frac{\partial}{\partial r} \Phi(r, s) = 0, \quad (2)$$

* 国家自然科学基金(批准号: 10247005)资助的课题.

$$\frac{d^2 y}{ds^2} + k_z(s)y + \frac{K}{2qN} \frac{y}{r} \frac{\partial}{\partial r} \Phi(r, s) = 0, \quad (3)$$

式中 $k_z(s)$ 为外聚焦场, K 为导流系数, N 为总离子数. 离子运动时所受的空间电荷力 $F_{sc} = -q\nabla\Phi(r, s)$, 所受的外场聚焦力 $F_{ext} = k_z(s)$.

本文采用延迟反馈控制器对束晕-混沌进行控制, 控制器的形式^[10]为

$$G = g[r_{rms}(t - S) - r_{rms}(t)], \quad (4)$$

式中 r_{rms} 为均方根半径, g 为增益因子, S 为一个聚焦单元的周期长度. 根据文献[6], 作多粒子模拟时粒子所受的径向受力方程可表为

$$F_r = F_{ext} - q\nabla\Phi(r, s) + G. \quad (5)$$

通过对以上各式作数值求解, 就可以实现对各个粒子在各种条件下的模拟跟踪.

3. 粒子跟踪模拟的结果

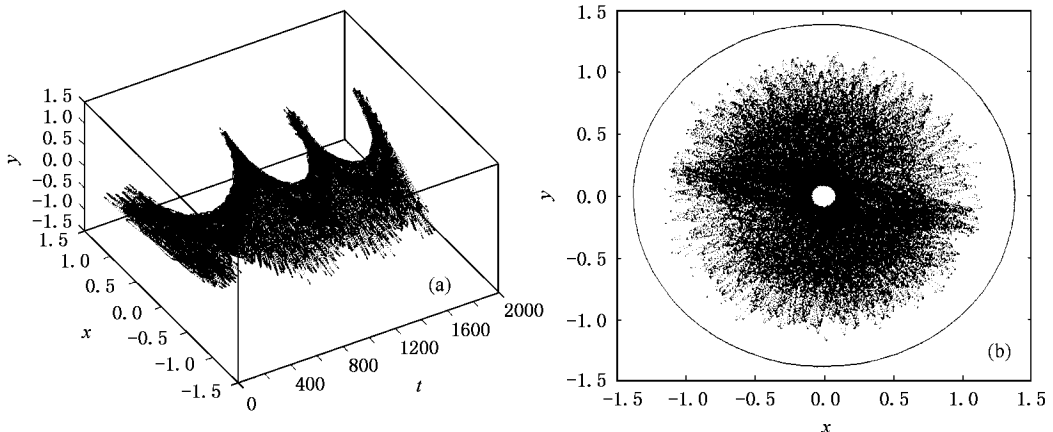
本文模拟时系统各参数的取值为: 真空相移 $\sigma_0 = 115^\circ$, 调谐衰减因子 $\eta = 0.8$, 失匹配因子 $M = 1.5$, 填充因子 $\Gamma = 0.4$, 控制器增益因子 $g = 2.3$. 离子束粒子数取为 5×10^4 个, 程序运行总演化时间取为 1800 个周期. 计算得到束流匹配半径 a_m 为 0.7891642, 导流系数 K 为 0.9032079. 为考察粒子的运动, 本文按习惯将半径大于 $1.75a_m$ 的区域定为晕区, 把进入该区域的粒子称为束晕粒子.

模拟跟踪 5×10^4 个粒子, 让离子束一直运行至 1800 周期为止. 结果发现, 在只有聚焦磁场的作用时, 有 45621 个粒子一直处于核内, 占 91.24%, 跑到晕区的仅有 4379 个, 只占 8.76%. 而且在这些到过

晕区的粒子中, 有 825 个(约占访问晕区粒子的 18.84%) 返回核区后就一直呆在核内, 直至第 1800 周期模拟结束. 另外的 3554 个(约占总粒子数的 7.11%), 也不是稳定地存在于晕区, 而是在晕区和核区之间作杂乱的运动, 测量结果表明平均处于晕区的只有总粒子数的 0.1% 左右. 这些情况, 反映了聚焦磁场对束粒子的运动有着强烈的约束作用, 但还达不到抑制束晕的要求. 要消除束晕, 还必须另加控制设施. 下面以上述三种情况各任取一个粒子为例对束晕控制前后的运动特征作进一步的说明, 并借此了解控制所起的作用.

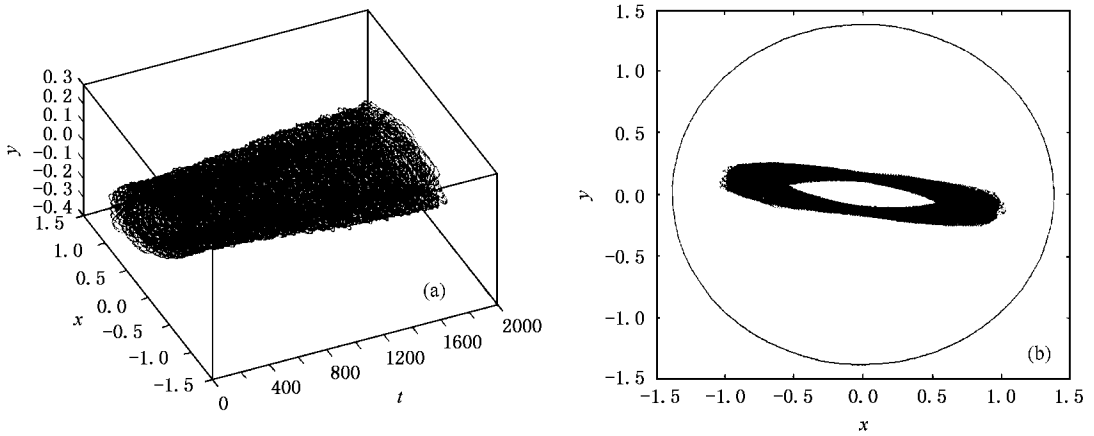
第一类粒子(即在 1800 周期内都处于核区的粒子), 以初始坐标 (x, y) 取 $(1.02539372, -0.11123756)$ 的粒子为例. 跟踪模拟作出的控制前该粒子的横向运动位置随时间的演化及其在横截面上的投影如图 2 所示(图 2(b)中的圆为晕区和核区分界线). 从图 2 可以看到, 该粒子在聚焦通道中运行时横向运动杂乱, 粒子不断振动, 而且其振动方向不断绕中心轴线旋转. 图 3 是该粒子在采用(4)式的控制器控制后的横向运动情况图. 由图 3(a)可以看到, 该粒子经控制后的运动被压缩到一个较小的空间范围, 而且运动变得较为有序. 由图 3(b)可进一步看到, 这时粒子的空间位置在横截面上的一个较小的范围内投影成环状, 并且其横向振动方向不断绕轴线旋转.

为进一步了解粒子绕轴旋转的情况, 本文测算了该粒子于控制前、后在加速器通道中绕轴旋转一周所用的时间 T , 并作出 T 随粒子绕轴转动圈数的变化曲线, 所得结果如图 4 所示(图中 n 表示粒子



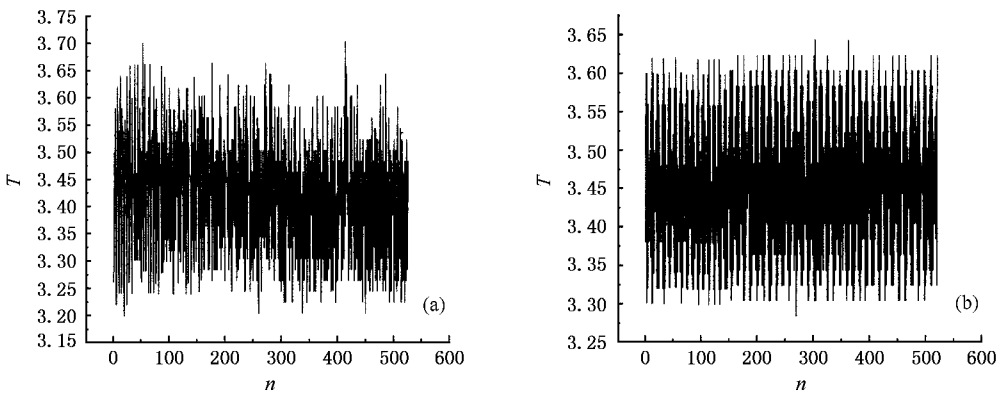
(a) 束核粒子的横向运动位置随时间的演化 (b) 束核粒子的位置在横截面上的投影

图 2 控制前束核粒子的横向运动情况



(a)束核粒子的横向运动位置随时间的演化 (b)束核粒子的位置在横截面上的投影

图3 控制后束核粒子的横向运动情况



(a)控制前

(b)控制后

图4 控制前后束核粒子的转动时间变化曲线

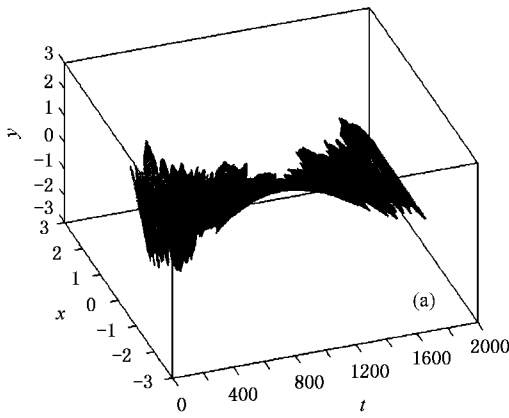
转动圈数)。从图 4(a)可以看到,控制前粒子转动一周所用的时间变化较大,是一种混沌状态,而图 4(b)则显示,经控制后粒子的运动被限制在一定范围内,变化范围大约在 3.25—3.7 之间,并且转动一周的时间变化较为规则。

第二类粒子(即频繁在晕区和核区之间运动的粒子)以初始坐标取 $(-0.31187904, -0.57195467)$ 的粒子为例,该粒子于第 147.9 周期开始进入晕区。图 5 为所作出的该粒子转化成束晕粒子后的横向运动位置随时间的演化及其在横截面上的投影图(投影图中的圆外为晕区)。从图 5(a)可以看到,该束晕粒子在聚焦通道中运行时,其横向运动十分杂乱,但总的来说仍与束核粒子相似,也在横向方向不断振动,而且其振动方向不断绕中心轴线旋转。图 5(b)除显示粒子在控制前其横向运动的振动方向发生旋转外,还清楚地显示了束晕粒子并不总是处于

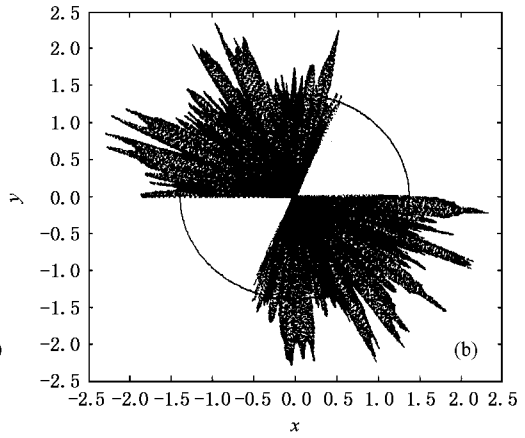
束晕区域,它在振动过程中不时回到束核,通过与其他粒子交换能量,其运动状态不断变化,过一段时间后又离开束核进入晕区。由于粒子之间的相互作用,这种现象无疑加剧了束核的不稳定性。

图 6 是该束晕粒子在控制后的横向运动情况图。由此图可以看到,束晕粒子也与束核粒子一样,经控制后的运动被压缩到一个较小的空间范围,粒子的位置在横截面上的投影在一个较小的范围内形成环状,而且其横向振动方向不断绕轴线旋转。图 7 给出了该粒子在有无施加束晕控制的条件下,粒子绕轴线转动时间的变化特征。从图 7(a)可以看到,控制前粒子转动一周所用的时间变化较大,而经控制后则变化较小。控制后的情况大体与第一类粒子的一样,也被限制在 3.25—3.7 之间的一个时间范围,且其绕轴线转动快慢一致。

第三类粒子(进入晕区后又返回核区且长期呆

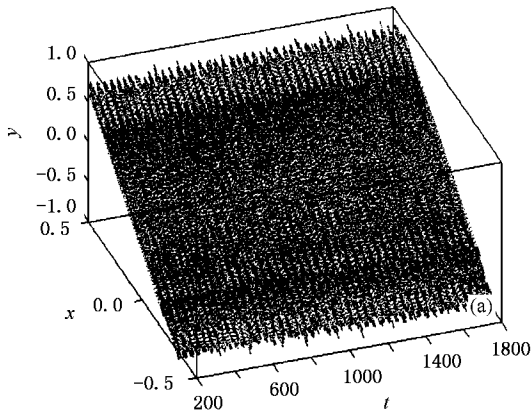


(a)粒子的横向运动位置随时间的演化

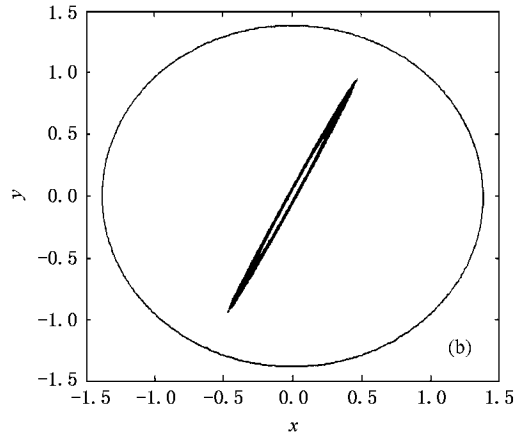


(b)粒子的位置在横截面上的投影

图5 第二种类型的粒子控制前的横向运动情况

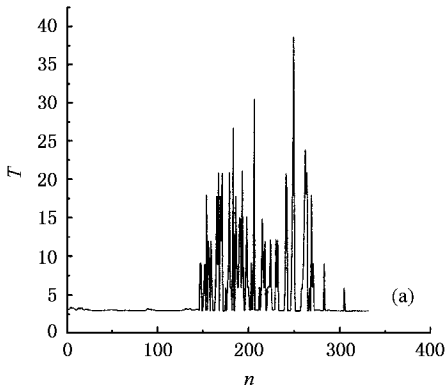


(a)粒子的横向运动位置随时间的演化

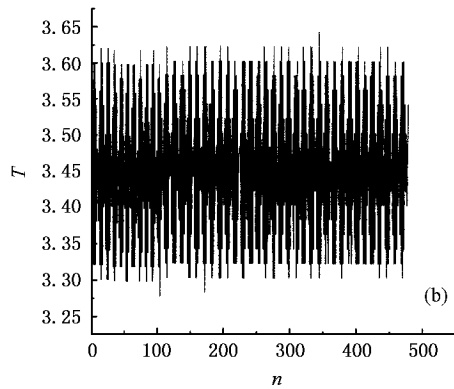


(b)粒子的位置在横截面上的投影

图6 第二种类型的粒子控制后的横向运动情况



(a)控制前

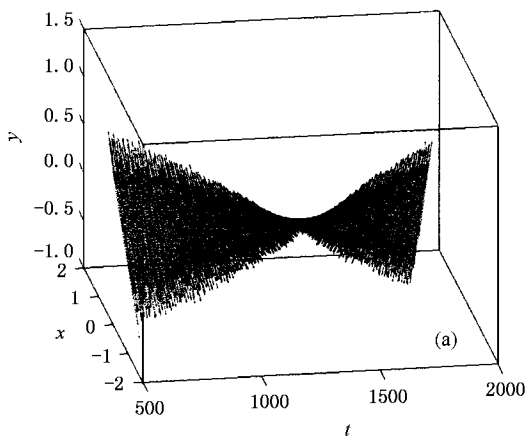


(b)控制后

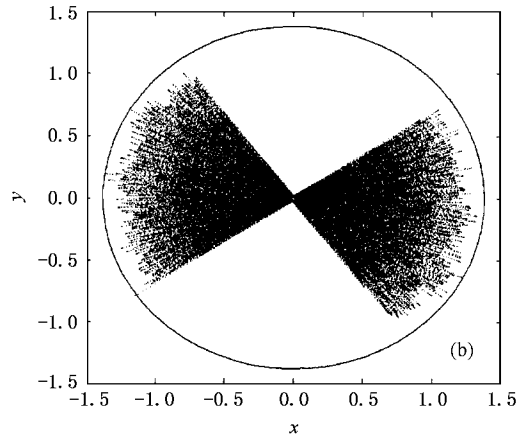
图7 第二种类型的粒子控制前后的转动时间变化曲线

在核区的粒子),以初始坐标为(0.55545300, 0.94536436)的粒子为例.该粒子于第536.96周期

进入晕区,成为束晕粒子,但运行到第537.02周期时又返回束核,并且保持在核内运动直到第1800周

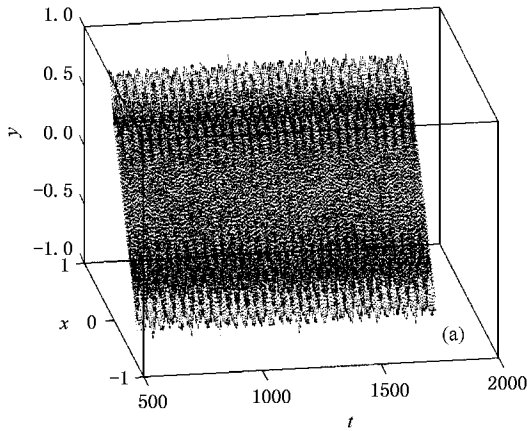


(a)粒子的横向运动位置随时间的演化

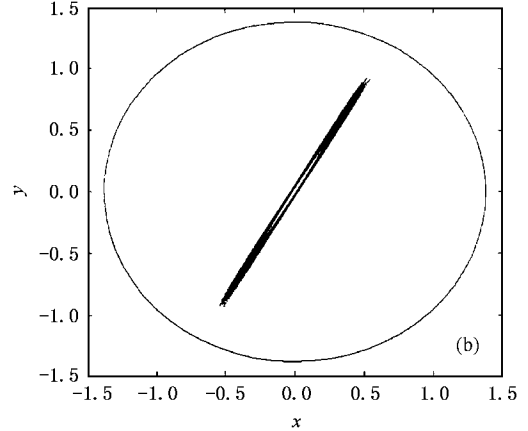


(b)粒子的位置在横截面上的投影

图 8 第三种类型的粒子控制前的横向运动情况

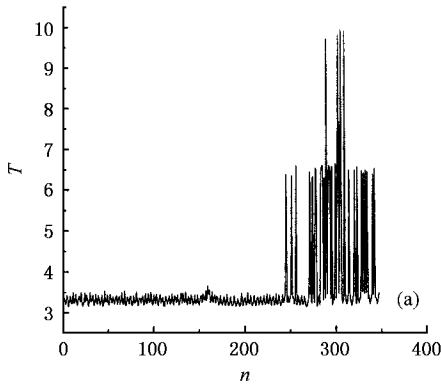


(a)粒子的横向运动位置随时间的演化

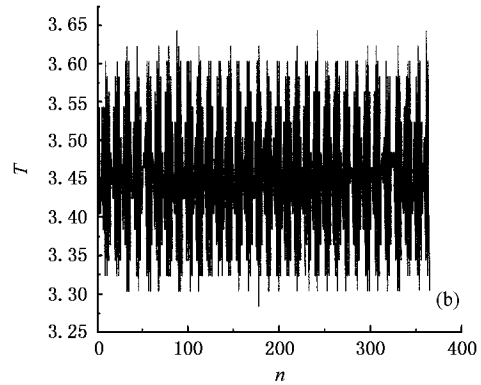


(b)粒子的位置在横截面上的投影

图 9 第三种类型的粒子的横向运动情况



(a)控制前



(b)控制后

图 10 第三种类型的粒子的转动时间变化曲线

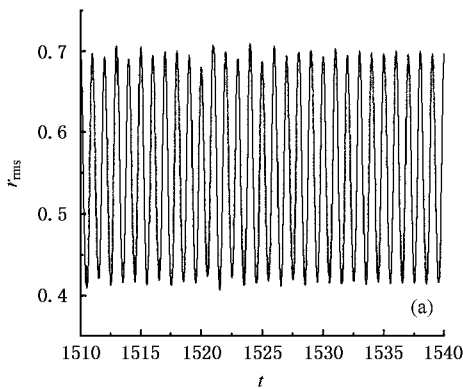
期运行结束. 这一粒子在不加控制时的运动情况如图 8 所示, 加控制时的运动情况如图 9 所示, 绕轴转

动情况则如图 10 所示. 从图 8 到图 10, 与前面两类粒子比较可以看到这类粒子在控制后的空间位置在

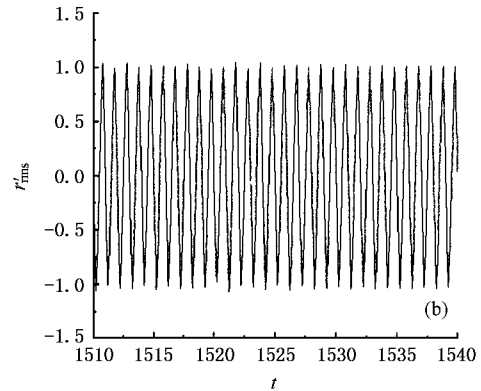
横截面上的投影也形成不大的环形区域,其运动特征与前面两类粒子相似,经控制后粒子绕轴线转动的时间范围也在 3.25—3.7 之间。

从以上三类粒子运动的模拟跟踪,不难看出在强流离子束的传输过程中,各粒子在多种力的作用下运动状态变化的一些规律性。粒子的横向运动总的来说可以分解为绕轴线的旋转和在垂直于轴线方向的振动。如果只有聚焦磁场的作用而不加入控制器对束晕进行非线性控制,则两种运动均十分复杂,是一种混沌行为。整个传输过程,不断有粒子因横向振动加剧而进入晕区形成束晕现象。由于这一原因,束晕存在再生性,所以,如果按传统采用机械的方法刮除晕粒子,则束晕的消除只是暂时的,过一会

又会有新的束晕产生。粒子跟踪模拟,还揭示了束晕粒子并非一直处于晕区,而是频频返回核区,有的甚至在交换能量之后可以长期呆在核区,重新成为束核粒子。从这点看,利用机械刮除法,粒子一旦进入晕区就将其刮除,对束流本身也是一个损失。如果采用非线性控制器对束晕进行控制,则粒子被控制在核内作类似环状的较规则的横向运动,因而消除了由于偶然机会获得足够横向能量跑到晕区的可能,从而达到了抑制束晕产生的目的。由此可见,非线性控制方法是较好的一种控制方法。关于控制器的选取问题,本文除用延迟反馈控制器控制外,也采用小波函数控制器^[8,9]控制束晕,所得结论与上述一致。



(a) 均方根半径随时间的变化



(b) 均方根半径变化率随时间的变化

图 11 控制后均方根半径及均方根半径变化率随时间的变化

4. 控制方法的改进及模拟结果比较

在束晕控制的模拟研究中,当前大部分控制器在控制时均需对增益因子进行精确的计算。个别情况虽不需进行精确的计算,例如对于外加磁场自适应控制器的控制^[11,12],但该控制器只能在某些特定参数下才起作用,灵活性较差。另外,上述这些控制器^[6-12]要完全、稳定地控制束晕所需的时间一般较长,进行间隔控制也需先连续控制 100 周期以上才能实施。这无疑将会大大增加控制代价。通过前面对单个粒子的研究,我们发现粒子在控制后被限制在一定范围内作比较有规律的运动。由于这一原因,反映全体粒子运动的均方根半径及均方根半径的变化率必然也呈现出规律性(图 11)。由图 11 可以看到,均方根半径的变化率呈现的规律性比均方根半径更强。既然用均方根半径作控制变量可得到

较好的控制效果,用均方根半径变化率作控制变量也许可得到更好的结果。由此启示,本文尝试改用均方根半径变化率 \dot{r}_{rms} 作为控制变量并运用施控方式构造如下控制器:

$$G = k \cdot \dot{r}_{rms} \quad (6)$$

对束晕进行控制。式中增益因子 k 作自适应变化,满足 $\dot{k} = k_0 \dot{r}_{rms}$ 。为便于比较,本文对系统参数的选取与文献 [11] 相同,结果发现利用本文方法能很快将束晕控制住。

表 1 列出了利用本文的自适应方法达到完全控制束晕所需的周期数和其他控制器所需的周期数。从它可以看出,利用自适应控制器进行束晕-混沌控制时,束晕在几周期甚至一周之内就被控制住。对于各种初始分布来说,控制住的时间均比其他方法的短。表 2 列出了不同初始分布的离子束经本文的自适应控制后束晕强度最大值 H_{max} 、粒子横向位置的最大值与匹配半径的比值 r_{max}/a_m 、横向动量平

方和的最大值 P_{\max}^2 和 x 方向的最大发射度与初始发射度的比值 $e_{x\max}$ 等表示束晕特征的量的变化情况. 从此表可以看到, 对不同初始分布, 离子束经自适应控制后衡量束晕特性的各物理量都得到了改善. 表

3 列出了本文的自适应控制器和其他控制器在调谐衰减因子 η 变化时对发射度的控制情况. 可以看到, 自适应控制器在这方面的性能远优于其他两种控制器.

表 1 束晕被完全控制所需的周期数

周期数 控制器	初始分布	K-V 分布	水袋分布	抛物形分布	3-sigma 分布
	小波函数		10.64	36.54	5.12
延迟反馈		0.64	48.48	78.5	未能完全控制
自适应		0.4	0.58	0.72	5.42

表 2 不同初始分布离子束经自适应控制后束晕特性的变化

初始离子分布形式	增益因子 g	H_{\max} 有/无	r_{\max}/a_m 有/无	P_{\max}^2 有/无	$e_{x\max}$ 有/无
3-sigma 高斯分布	5	0.000/0.135	1.713/5.184	0.756/2.571	1.036/2.869
全局高斯分布	5	0.005/0.154	3.000/5.669	0.888/3.051	1.039/2.903
水袋分布	5	0.000/0.111	1.486/4.235	0.622/2.154	1.041/2.861
K-V 分布	4	0.000/0.146	1.130/5.193	0.622/2.979	1.001/2.818
抛物形分布	5	0.000/0.159	1.603/5.181	0.861/3.031	1.015/2.912

表 3 η 变化时三种控制器对相对发射度的控制比较

控制器	e_x η									
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	
小波函数	失控	2.491	1.272	1.013	1.000	0.962	失控	1.002	1.001	
延迟反馈	失控	失控	失控	失控	失控	失控	1.074	1.002	1.001	
自适应	1.004	1.017	1.003	1.013	0.9983	1.001	1.002	1.001	1.001	

为减小控制代价, 本文进一步尝试采用间隔周期控制的形式, 每隔 5 周期只测量一次均方根半径的变化率, 结果仍能取得较好的控制效果. 为便于测量, 本文又改用最大半径的变化率为控制变量, 结果也同样达到了控制目的. 由此可见, 本文所采用的自适应控制法与以往的方法相比, 在很多方面均具有优越性.

5. 结 论

通过以上数值模拟, 本文观测到了强流离子束中的粒子在控制后表现出的一些规律性: 粒子的横向运动被压缩到一个环形状的空间区域, 粒子的横向振动方向不断绕加速器通道中心轴旋转以及经控

制后其旋转一周的时间被控制在一定的变化范围内等. 模拟也进一步说明了束晕-混沌运动是一个相当复杂的运动过程, 晕区的粒子频频返回核内, 进一步加剧了束核的不稳定性. 随着周期数目的增加, 束晕-混沌会变得越来越严重, 最终造成危害. 在束晕控制中, 利用传统的机械刮除法并不能抑制核内的粒子继续逃逸出来形成束晕再生现象, 只有研究外加控制器进行束晕-混沌控制才可从根本上消除束晕.

本文根据离子运动的特点, 设计了自适应反馈法对束晕-混沌现象进行控制, 达到了较好的控制效果. 该控制器不需对增益因子进行严格的计算, 并且具有控制速度快、控制量小、控制效果好、抗干扰能力强等特点, 从而具有较好的应用前景.

- [1] Rubbia C 1994 *AIP Conf. Proc.* **346** 44
- [2] Gluckstern R L 1994 *Phys. Rev. Lett.* **73** 1247
- [3] Lagniel J M 1994 *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Rev. A* **345** 46
- [4] Jameson R A 1994 *Proceedings of the 4th european particle accelerator conference* (Singapore : World Scientific Publishing Company) p 1177
- [5] Gluckstern R L and Fedotov A V 1998 *Phys. Rev. E* **58** 4997
- [6] Fang J J and Chen G R 2000 *High Power Laser and Particle Beams* **12** 647 (in Chinese) [方锦清、陈关荣 2000 强激光与粒子束 **12** 647]
- [7] Fang J Q 2000 *Nature* **22** 63 (in Chinese) [方锦清 2000 自然杂志 **22** 63]
- [8] Fang J Q , Gao Y , Weng J Q , Luo X S and Chen G R 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 435 (in Chinese) [方锦清、高 远、翁甲强、罗晓曙、陈关荣 2001 物理学报 **50** 435]
- [9] Gao Y , Weng J Q , Fang J Q and Luo X S 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 1440 (in Chinese) [高 远、翁甲强、方锦清、罗晓曙 2001 物理学报 **50** 1440]
- [10] Zhu L W , Weng J Q , Gao Y and Fang J Q 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 1483 (in Chinese) [朱伦武、翁甲强、高 远、方锦清 2002 物理学报 **51** 1483]
- [11] Fang J Q and Chen G R 2003 *Progress in Physics* **23** 321 (in Chinese) [方锦清、陈关荣 2003 物理学进展 **23** 321]
- [12] Gao Y , Luo X S and Weng J Q 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 4137 (in Chinese) [高 远、罗晓曙、翁甲强 2004 物理学报 **53** 4137]
- [13] Qian Q , Davidson R C and Chen C 1995 *Phys. Rev. E* **51** 50

Simulation study on single particle in controlling halo-chaos^{*}

Liao Gao-Hua¹⁾ Weng Jia-Qiang¹⁾ Chen Li-Chun²⁾ Fang Jin-Qing³⁾

¹⁾ College of Physics and Information Technology , Guangxi Normal University , Guilin 541004 , China)

²⁾ Department of Information Materials Science and Engineering , Guilin University of Electronic Technology , Guilin 541004 , China)

³⁾ China Institute of Atomic Energy , Beijing 102413 , China)

(Received 21 April 2004 ; revised manuscript received 15 May 2004)

Abstract

In this paper , we adopt the Particle-in-Cell (PIC) program to study the transverse movement of particles in high-intensity beam. It is found that the transverse movement of halo particles is not always in halo region. The movement is restricted in a narrow region after the beam is controlled. Changes of root-mean-squared radius are nearly periodic. According to the regulation and variation of root-mean-squared radius , a new self-adaptive controller method is put forward. This research demonstrates that the halo can be completely controlled by the controller quickly. There is no need to precisely calculate the coefficient of controller , and the controller can work well even if the system parameters are changed.

Keywords : halo-chaos , particle track , simulation , self-adaptive control

PACC : 0545 , 4265J , 2990

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10247005).