

周期聚焦磁场对强流离子束的束晕控制效果研究* Comparison on the Effects of Controlling Beam Halo-Chaos in Two Different Periodic Focusing Channel

杨翠云¹, 刘海英¹, 翁甲强²

YANG Cui-yun¹, LIU Hai-ying¹, WENG Jia-qiang²

(1. 桂林师范高等专科学校物理与信息技术系, 广西桂林 541002; 2. 广西师范大学物理科学与技术学院, 广西桂林 541004)

(1. Department of Physics and Information Technology, Guilin Normal College, Guilin, Guangxi, 541002, China; 2. College of Physics Science and Technology, Guangxi Normal University, Guilin, Guangxi, 541004, China)

摘要:采用粒子-束核模型,通过编制多粒子(PIC)程序,模拟研究对数函数控制器对初始分布为 K-V 分布的强流离子束在正弦波和三角波两种周期聚焦磁场作用下控制束晕-混沌的效果。结果表明,在这两种周期聚焦磁场中对数函数控制器均能对束晕进行有效控制,但是在三角波磁场中的控制效果好于正弦波磁场。

关键词:束晕 正弦波 三角波 对数函数控制器 周期聚焦磁场

中图分类号: O545 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-9164(2011)01-0048-04

Abstract: Beams that have Kapchinsky-Vladimirsky (K-V) distribution propagating in two different periodic focusing channels are studied using the PIC program and the logarithm function controller. The simulation results show that the halo-chaos can be controlled effectively in the sinusoidal wave periodic focusing channel and the triangular wave periodic focusing channel, but the controlling effects in the latter channel are better than in the former one.

Key words: halo, sinusoidal wave, triangular wave, logarithm function controller, periodic focusing channel

强流离子束在核能和核科学研究等领域有重要的应用,从 20 世纪末开始,一直是国内外研究的热点课题。强流离子束在加速器管道中传输时会产生束晕-混沌现象^[1~15]。由于打到器壁上的束晕离子不仅对设备造成损害,而且超标的放射性剂量还将危害人身安全,为此人们从理论上提出控制束晕-混沌的非线性方法^[7]和一些具体的控制器^[8~15]。在这些具体的方法中,控制变量大致分为两大类,一类是以均方根半径(或最大半径)为控制变量,一类是以小区域内的离子数占总离子数的比值作为控制变量。对于前者,由于离子束的均方根半径难以探测,使得该方法难以实施。而以小区域的离子数为控制信息的对数函数控制器具有实施的可能性,但是之前的研究只针对方波磁场^[15],其他波形的磁场未见报道。因此

本文研究对数函数控制器在正弦波和三角波两种常见聚焦磁场的作用下控制束晕-混沌的有效性。

1 理论模型及数值模拟方法

1.1 理论模型

模拟研究采用的模型为粒子-束核模型^[3~6],该模型被广泛应用于研究强流离子束的束晕-混沌形成机制及其控制方法。该模型考虑一束横截面为圆形的离子束在周期性的聚焦磁场通道中运动时,在 Larmor 坐标系下,对于满足 Kapchinsky-Vladimirsky (K-V) 分布的离子束,可用无量纲的包络方程

$$\frac{d^2 r_b}{ds^2} + \kappa_z(s)r_b - \frac{K}{r_b} - \frac{1}{r_b^3} = 0 \quad (1)$$

描述离子束半径的变化,而单离子沿 x 方向和 y 方向的运动方程则分别为

$$\frac{d^2 x}{ds^2} + \kappa_z(s)x + \frac{q}{\gamma_b^3 \beta_b^2 m c^2} \frac{\partial \Phi^s(x, y, s)}{\partial x} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{d^2 y}{ds^2} + \kappa_z(s)y + \frac{q}{\gamma_b^3 \beta_b^2 m c^2} \frac{\partial \Phi^s(x, y, s)}{\partial y} = 0, \quad (3)$$

收稿日期:2009-06-12

修回日期:2010-09-14

作者简介:杨翠云(1972-),女,讲师,主要从事非线性物理研究。

* 国家自然科学基金项目(10765002),广西教育厅科研项目(200807XL239)和校级科研项目(GLSZ2008011)资助。

(1)~(3)式中 $s=vt$, v 为束的轴向速度, K 为广义导流系数, $\kappa_z(s)$ 表征周期聚焦磁场通道对离子的聚焦强度, 满足 $\kappa_z(s+S)=\kappa_z(s)$, S 为聚焦磁场的周期, $\beta_b = \frac{v}{c}$, $\gamma_b = \frac{1}{\sqrt{1-\beta_b^2}}$ 为相对论因子, c 为真空光速, q 和 m 分别表示离子的电量和静止质量, $\Phi'(x, y, s)$ 为自生场的势函数, 它满足 Poisson 方程

$$\nabla^2 \Phi'(x, y, s) = -\frac{q}{\epsilon_0} \iint f(x, y, x', y'; s) dx' dy', \quad (4)$$

其中 $f(x, y, x', y'; s)$ 为在非相对论四维相空间内的横向离子分布函数, ϵ_0 为真空介电常数。

自生场的非线性效应使离子和束核不断地发生能量交换, 使部分粒子获得较大的能量跑到束核外面成为束晕离子。在该模型里, 单离子运动除受自生场力 $F_r = -q\nabla\Phi'(x, y, s)$ 的作用外, 还受到外加聚焦力 $F_{ext} = \kappa_z(s)$ 的作用, 即

$$F_r = F_{ext} + F_{sc}, \quad (5)$$

根据文献[7]提出的非线性控制策略, 将非线性控制器 G 加到(5)式的右边, 使 F_r 修改为

$$F_r = F_{ext} + F_{sc} + G. \quad (6)$$

加入 G 就可以改变离子的径向受力。只要施力适当, 就可以减小离子的横向速度或能量, 从而使原来横向分布较松散的离子向轴心靠拢, 达到抑制束晕产生的目的。

1.2 数值模拟参数

通过编制多粒子(PIC)模拟程序对(2)~(6)式进行数值模拟计算, 可以获得束晕-混沌的控制效果。模拟系统采用的参数为: 离子数 50000 个, 模拟周期取到 2000, 调谐衰减因子 $\eta=0.8$, 失匹配因子 $M=1.5$, 填充因子 $\Gamma=1.0$, 真空相移 $\phi_0=100^\circ$, 由此可以算出无量纲化的匹配半径 $a_m=0.8462844$, 广义导流系数 $K=0.7853982$ 。

对数函数控制器函数形式为 $G=g\ln(1-\lambda)$, 其增益因子 g 在三角波磁场中取 50.0, 在正弦波磁场中取 86.0。

2 结果及分析

2.1 在正弦波磁场控制下的效果

从图 1~4 可以看出, 在正弦波聚焦磁场中, 施加控制前, 离子束的相对发射度急剧增大, 晕度的均值约在 3% 左右, 横向动量的平方和在 0.50 和 0.95 之间变化, 均方根半径在 0.62~0.87 间变化; 控制后离子束的相对发射度的最大值也没有超过 1.002, 晕度很快就降为零, 并一直保持在无晕度状态, 横向动量

平方和的平均值也有所下降, 变化范围在 0.3~0.7, 均方根半径变化的幅度相差不大。从这些物理量的变化可以看出, 控制后离子束的品质得到较好的改

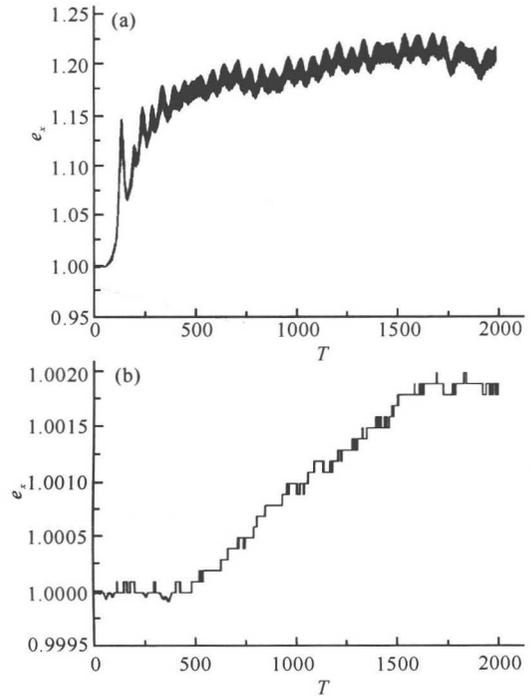


图 1 正弦波磁场下, 无控制(a)和有控制(b)的相对发射度 (e_r) 演化曲线

Fig. 1 Relative emittance growth e_r versus times (a) without and (b) with control in sinusoidal wave focusing channel

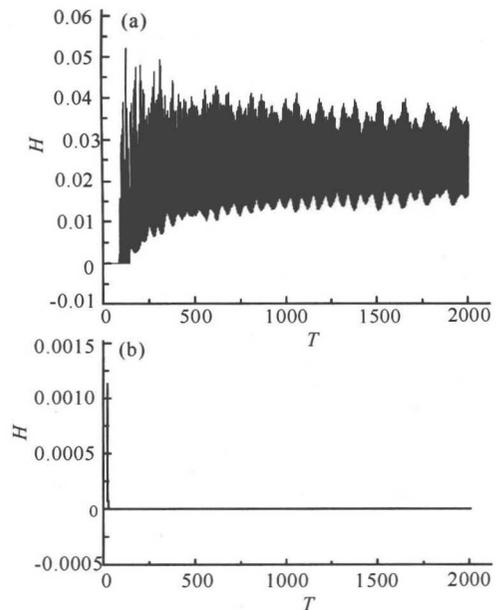


图 2 正弦波磁场下, 无控制(a)和有控制(b)的晕度 (H) 演化曲线

Fig. 2 Halo-chaos strength factor H versus times (a) without and (b) with control in sinusoidal wave focusing channel

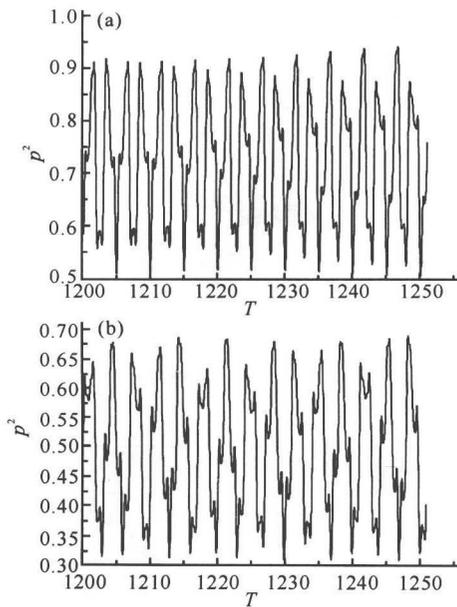


图3 正弦波磁场下,无控制(a)和有控制(b)时横向动量平方和(p^2)的平均值的演化曲线

Fig. 3 Root square momentum p^2 versus times (a) without and (b) with control in sinusoidal wave focusing channel

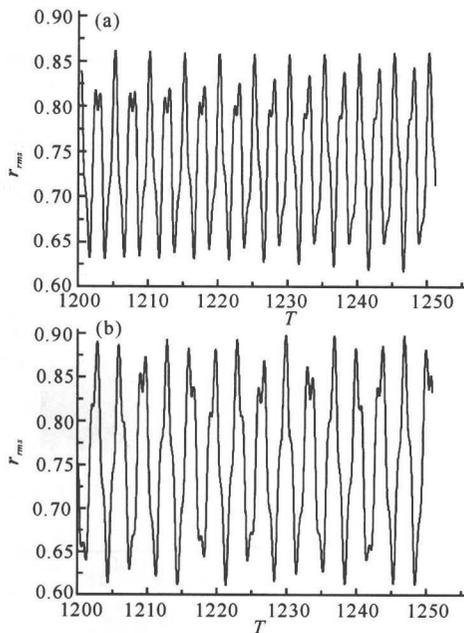


图4 正弦波磁场下,无控制(a)和有控制(b)的均方根半径(r_{rms})演化曲线

Fig. 4 Mean root-square radius r_{rms} versus times (a) without and (b) with control in sinusoidal wave focusing channel

善,相对发射度大为降低,有效抑制了离子束的束晕及其再生现象。

2.2 在三角波磁场控制下的效果

从图5~8可以看出,在三角波聚焦磁场中,施加控制前,离子束的相对发射度急剧增大,晕度的均值在2%左右,横向动量的平方和在0.37和0.72之间

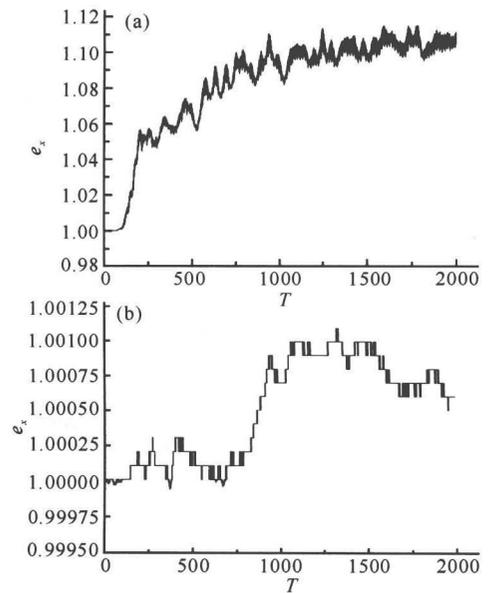


图5 三角波磁场下,无控制(a)和有控制(b)的相对发射度(e_x)演化曲线

Fig. 5 Relative emittance growth e_x versus times (a) without and (b) with control in triangular wave focusing channel

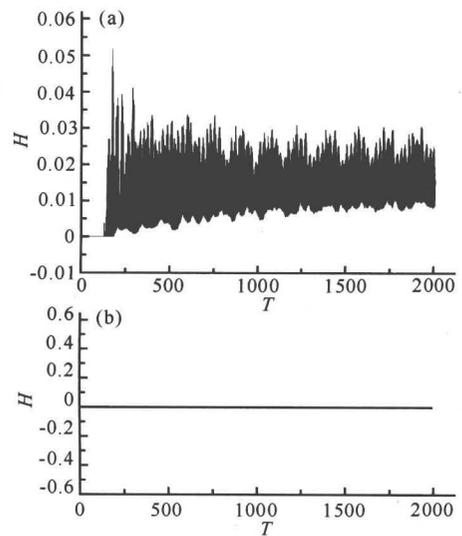


图6 三角波磁场下,无控制(a)和有控制(b)的晕度(H)演化曲线

Fig. 6 Halo-chaos strength factor H versus times (a) without and (b) with control in triangular wave focusing channel

变化,均方根半径在0.65~0.92间变化。控制后离子束的相对发射度的最大值也没有超过1.001,离子束一直保持在无晕度状态,横向动量平方和的平均值也有所下降,最大值为0.47,变化范围约为原来的1/4,而均方根半径的变化幅度在控制后略有缩小。从这些物理量的变化可以看出,控制后离子束的品质得到较好的改善,相对发射度约为1.000,很好地抑制了离子束的束晕及其再生现象。

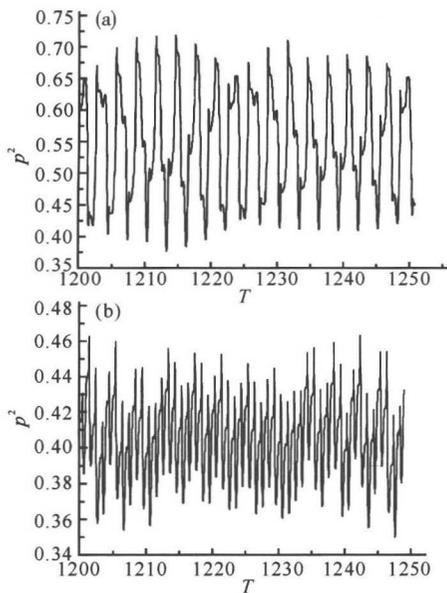


图7 三角波磁场下,无控制(a)和有控制(b)的横向动量平方和 (p^2) 平均值的演化曲线

Fig. 7 Root square momentum p^2 versus times (a) without and (b) with control in triangular wave focusing channel

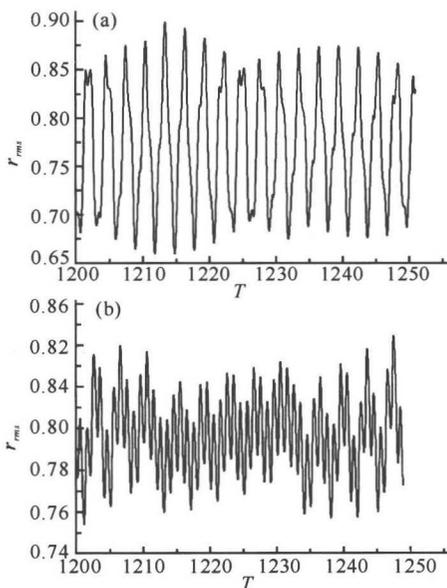


图8 三角波磁场下,无控制(a)和有控制(b)的均方根半径 (r_{rms}) 演化曲线

Fig. 8 Mean root-square radius r_{rms} versus times (a) without and (b) with control in triangular wave focusing channel

3 结束语

从本文的模拟结果可以看出,使用以小区域内的离子数与总离子数的比值为控制变量的对数函数控制器,除了能够在方波聚焦磁场中有效控制束晕-混

沌外^[15],还能够在正弦波聚焦磁场和三角波聚焦磁场中进行有效控制,但是从统计量来看,在三角波磁场中的控制效果要好于正弦波磁场的控制效果。本文的结果可以为强流加速器的设计提供参考。

参考文献:

- [1] 方锦清,陈关荣.束晕-混沌的复杂性理论与控制方法及应用前景[J].物理学进展,2003,23(3):321-388.
- [2] Allen J C K, Chan K C D, Colestock P L. Beam-Halo measurements in high-current proton beams[J]. Phys Rev Lett, 2002, 89(21):214802.
- [3] Gluckstern R L. Analytic model for halo formation in high current ion linacs[J]. Phys Rev Lett, 1994, 73(9): 1247-1250.
- [4] Fink Y, Chen C, Marable W P. Halo formation and chaos in root - mean - square matched beams propagating through a periodic solenoidal focusing channel[J]. Phys Rev E, 1997, 55(6):7557-7564.
- [5] Chen C, Davidson R C. Nonlinear resonances and chaotic behavior in a periodically focused intense charged-particle beam[J]. Phy Rev Lett, 1994, 72(14):2195-2198.
- [6] Wang Tai, Sen F. Particle-core study of halo dynamics in periodic-focusing channels[J]. Phys Rev E, 2000, 61(1): 855-861.
- [7] 方锦清.强流加速器驱动的洁净核能系统中的一个关键问题-束晕-混沌的物理机制及控制对策[J].自然杂志, 2000, 22(2):63-69.
- [8] 方锦清,高远,翁甲强,等.小波函数反馈法实现对强流束晕-混沌的有效控制[J].物理学报, 2001, 50(3):435-439.
- [9] 朱伦武,翁甲强,高远,等.强流加速器中束晕-混沌的延迟反馈控制[J].物理学报, 2002, 51(7):1483-1488.
- [10] 高远,罗晓曙,翁甲强.强流束晕-混沌的外部磁场开关控制[J].物理学报, 2004, 53(12):4131-4137.
- [11] Yu Haijun, Bai Long, Weng Jiaqiang, et al. Control of beam halo-chaos using real Morlet wavelet function in a periodic-focusing channel[J].强激光与粒子束, 2008, 20(6):1017-1021.
- [12] 余海军,白龙,翁甲强,等.Full-Gauss分布束的束晕-混沌模拟控制[J].原子能科学技术, 2009, 43(1):27-30.
- [13] 余海军,翁甲强.周期聚焦磁场中束晕-混沌的简单函数控制[J].物理与工程, 2008, 18(6):7-10.
- [14] 刘萍,翁甲强,廖高华,等.以离子数比为变量的束晕-混沌模拟研究[J].原子能科学技术, 2006, 40(4):460-464.
- [15] 杨翠云,翁甲强,刘海英,等.以小区域内的离子数为控制信息实现束晕的有效控制[J].物理学报, 2008, 57(11):6883-6887.

(责任编辑:韦廷宗)