

负指数函数控制器实现束晕-混沌的有效控制*

Control of Beam Halo-chaos by Negative Exponent Function

杨翠云¹,翁甲强²,刘海英¹,姚惠伶¹

YANG Cui-yun¹,WENG Jia-qiang²,LIU Hai-ying¹,YAO Hui-ling¹

(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. 广西师范大学物理与信息工程学院,广西桂林 541004)

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

摘要:根据控制束晕-混沌的非线性策略,提出一种负指数函数控制器,并运用该控制器和多粒子(PIC)模拟程序研究初始分布为 Kapchinsky-vladimirsky(K-V)分布的强流离子束在加速器通道中的传输过程。结果表明,使用该控制器能够消除束晕-混沌及其再生现象,达到对束晕-混沌的有效控制,而且将真空相移的取值范围从 90°拓宽到 161°。

关键词:强流离子束 束晕-混沌 负指数函数控制器

中图分类号:O545 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-9164(2009)03-0286-04

Abstract: The negative exponent function controller is proposed based on the strategy of controlling halo-chaos, and a Kapchinsky-Vladimirsky (K-V) high-current ion beam through an accelerator channel is studied using the particle-in cell procedure (PIC). Simulation results show that the halo-chaos and its regeneration can be eliminated effectively, and the vacuum phase advance's value can be extended from 90° to 161°.

Key words: high current ion beam, halo-chaos, negative exponent function controller

强流离子束在国民经济的各个领域都有重要的应用和诱人的发展前景^[1,2],如核材料的生产,工业用途和医用,其中加速器驱动的洁净核能源系统(ADS)是目前各国政府都极力关注的课题,并为之注入大量的研究资金,以解决核能源的有效利用及其核废料的处理问题。但是强流离子束在加速器管道中传输时会产生束晕-混沌现象^[3~6],打到器壁上的束晕离子所产生的超标放射性剂量,不仅对工作人员的人身安全造成危害,而且也容易损坏仪器设备,对其进行控制成为设计强流加速器必须解决的关键问题之一。文献[7]提出了束晕-混沌的非线性控制策略并给出几种具体的控制器函数,对束晕具有初步的控制效果,但

是不能实现束晕为零的预期目标。为了得到更好的控制效果,高远、朱伦武等^[8~10]采用小波函数控制器、延迟反馈控制器取得了理想的控制效果。但是使用小波函数器和延迟反馈控制器进行控制时,模拟系统真空相移的取值在 105°~120°区间及其附近不能实现有效控制^[11,12],使得真空相移的取值扩展到 90°以外出现不连续的情况。本文根据控制束晕-混沌的非线性策略,提出一种负指数函数控制器,该控制器形式比小波函数控制器简单,在实现有效控制束晕-混沌的前提下,拓宽了真空相移的取值范围。

1 负指数函数控制器

粒子-束核模型被广泛用于研究束晕-混沌现象的产生机制和控制方法。在该模型里,考虑一束圆柱形的离子束在周期性聚焦磁场中运动,可用无量纲化的包络方程^[4~6]

收稿日期:2008-08-01

修回日期:2008-11-27

作者简介:杨翠云(1972-),女,讲师,硕士,主要从事非线性物理研究工作。

* 国家自然科学基金项目(10765002),广西教育厅科研项目(200807LX239)资助。

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

描绘离子束半径的变化,用单粒子运动方程

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

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

描述离子的动力学行为。在(1)~(3)式中, r_b 为离子束的包络半径, K 为归一化的导流系数(表征束流的自生场强度), $z = \beta_b ct$ 为轴向坐标, $s = z/S$,为无量纲化的轴向坐标,而 $v = \beta_b c$ 为束粒子的平均轴向速度, $\kappa_z(s)$ 表示周期性聚焦磁场的强度,满足 $\kappa_z(s) = \kappa_z(s + S)$, S 为聚焦通道的周期长度, q 为离子带电量, m 为离子静止质量, c 为真空中的光速, $\beta_b = v/c$, $\gamma_b = 1/\sqrt{1 - \beta_b^2}$ 为相对论因子, $\Phi(x, y, s)$ 为空间电位,满足泊松方程

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}\right)\Phi(x, y, s) = -4\pi q n(x, y, s), \quad (4)$$

$n(x, y, s)$ 为离子束的初始密度分布函数。

单离子所受的空间电荷力为

$$F_r = -q \nabla \Phi(x, y, s), \quad (5)$$

$r = (x^2 + y^2)^{1/2}$ 为径向坐标。

根据文献[7]提出的控制束晕-混沌的非线性控制策略,即在方程(5)的右边加上一非线性控制器,使方程变为

$$F_r = -q \nabla \Phi(x, y, s) + G, \quad (6)$$

通过改变离子的径向受力,以减小径向的速度或能量,抑制离子远离轴线方向的运动,使原来分布较松散的离子向轴线靠拢,从而达到控制束晕的目的。

控制器的选择恰当与否将决定束晕的控制效果,我们选择负指数函数

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda x} \quad (7)$$

作为控制器函数, λ 为常数,取 $\lambda = 5.0$,则相应的控制器为

$$G = g[f(r_{rms}) - f(a_m)]. \quad (8)$$

(8)式中, $r_{rms} = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i^2 + y_i^2)\right)^{1/2}$ 为离子束的均方根半径,是反映离子集体行为的统计物理量,作为控制器的反馈变量; a_m 为离子束的匹配半径; g 为增益因子, $g = 3.0$ 。当 $r_{rms} \rightarrow a_m$ 时, G 自动撤销,这就达到了控制束晕-混沌的目的。

2 数值模拟与结果分析

2.1 模拟参数

运用多粒子(PIC)模拟程序对初始分布为Kapchinsky-vladimirsky(K-V)分布的离子束进行模

拟研究,模拟系统的总离子数取为50000个,演化周期取到2000,真空相移取为 100° ,调谐衰减因子 $\eta = 0.8$,填充因子取为0.8,失匹配因子 $M = 1.5$ 。由所取参数可以算出匹配半径 $a_m = 0.8462844$,导流系数 $K = 0.7853982$ 。

2.2 束晕-控制模拟结果及分析

从图1可以看到,无控制时,离子束在周期性的聚焦磁场通道中运动,其晕度 H (即半径处于 $1.75a_m$ 外的所有离子数与参与模拟的总离子数的比值的平均值)在0.04左右;而实施控制后,离子束在运行过程中晕度始终为零,即所实施的控制能够很好地消除束晕及其再生现象。

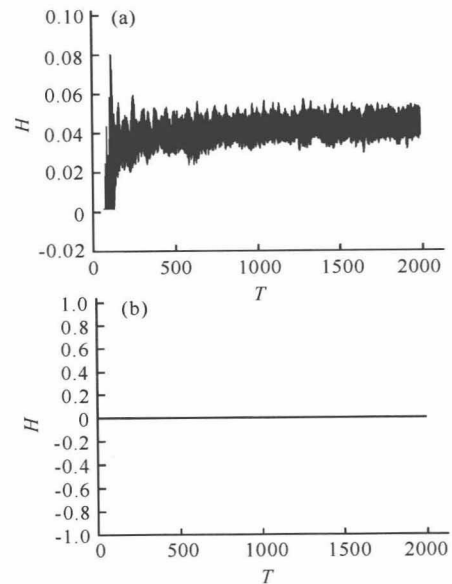


图1 晕度 H 随时间 T 的演化曲线

Fig. 1 Halo-chaos strength factor H versus time T

(a)无控制;(b)有控制。(a)Without control;(b)Control.

为反映出均方根发射度在加速器通道中运行时的变化情况,取均方根发射度与初始发射度的比值作为分析比较的物理量并命名为相对发射度。从图2可以看出,无控制时,相对发射度急剧增大,其最大值在1.6~1.7之间,而控制后其最大值没有超过1.022,说明实施控制后束流被控制在较小的相空间内运动,束流的稳定性得到明显的增强。

从图3(a)可以看出,没有实施控制的情况下,均方根半径的变化幅度较大,变化范围在0.6~0.8之间。实施控制后,变化幅度只有原来的1/4,而且其最大值也没有超过0.6。

从图4可以看到,离子束中离子的横向动量平方和的平均值随时间的演化情况。实施控制后,横向动量平方和的平均值的变化幅度明显减小,约为控制前的1/4,变化中心也由1.3下降到0.8。可见,实施控制后,离子由于获得较大的速度而逃到束核外成为束

晕离子的可能性大为降低,从而有效地抑制了束晕的形成。

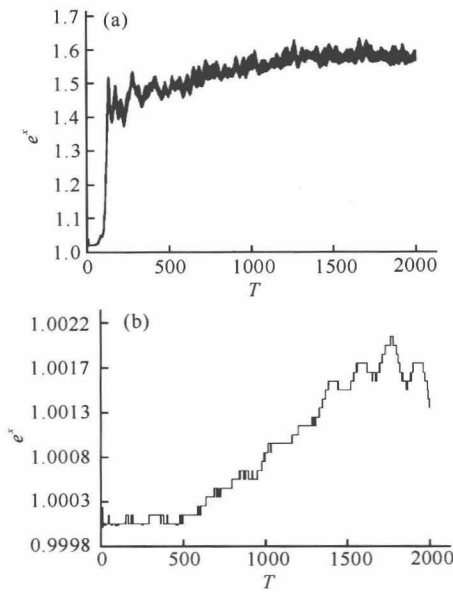


图2 相对发射度 e^x 随时间 T 的演化曲线

Fig. 2 Relative emittance growth e^x versus time T

(a)无控制;(b)有控制。(a)Without control;(b)Control.

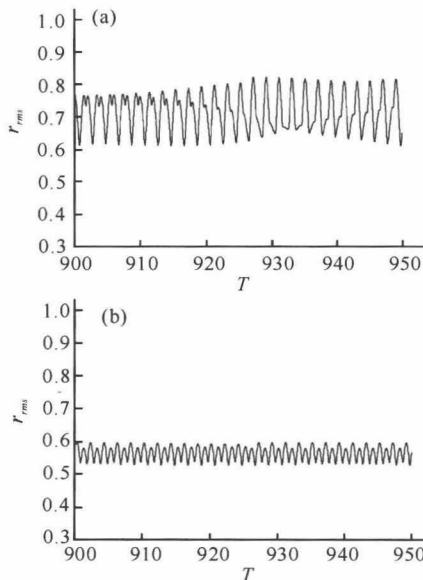


图3 均方根半径 r_{rms} 随时间 T 的演化曲线

Fig. 3 Mean root square r_{rms} versus time T

(a)无控制;(b)有控制。(a)Without control;(b)Control.

2.3 不同真空相移模拟结果与分析

真空相移 $O_0 > 90^\circ$ 时,束流可能发生非线性共振,产生强烈的不稳定性^[1]。为了避免非线性共振,往往把真空相移的取值设计为小于 90° ,由束流强度公式^[1,13] $I = \frac{\epsilon\sigma_0}{S} \frac{I_0}{2} (\beta_b\gamma_b)^3 \frac{1-\eta^2}{\eta}$ 可以知道,真空相移的取值限制了束流强度增大。从表1的结果可以看出,当真空相移在 $90^\circ \sim 115^\circ$ 内取值时(其他参数同2.1),使用负指数函数控制器控制束晕-混沌,始终没

有束晕离子出现;当真空相移在 $116^\circ \sim 161^\circ$ 取值时,有束晕离子出现,但是经过一段时间后,束晕也能被控制住;当真空相移大于 161° 后,束流失控。可见,使用负指数函数控制器,真空相移的取值可以从 90° 拓宽到 161° ,这有利于束流强度的提高。

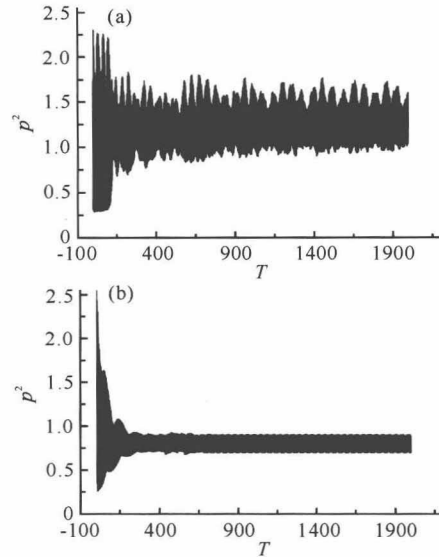


图4 横向动量平方和的平均值 p^2 随时间 T 的演化情况

Fig. 4 Root-square momentum p^2 versus time T

(a)无控制;(b)有控制。(a)Without control;(b)Control.

表1 真空相移变化时,实施控制后的晕度大小及其被控制住所需的周期数

Table 1 The halo-chaos strength factor and the periods which the halo-chaos can be controlled versus the vacuum current phase advance

O_0	H	控制住所需的周期数 T The periods when the halo is keeping zero
$90^\circ \sim 115^\circ$	0.00	0.0
116°	0.02	1.56
120°	0.04	1.6
125°	0.08	4.6
130°	0.12	10.5
135°	0.16	12.5
140°	0.19	17.5
145°	0.29	27.5
150°	0.39	36.6
155°	0.47	47.5
160°	0.60	78.6
161°	0.63	287.5
162°		失控 Out of control

3 结束语

本文的模拟结果表明,形式较简单的负指数函数控制器能够有效地消除束晕-混沌及其再生现象,而且真空相移的取值的范围也从 90° 拓宽到 161° ,有利于束流强度的提高,这对强流离子加速器的设计有一

定的参考意义。

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] 丁大钊.放射性洁净核能系统[J].科技导报,1997,3:32-34.
- [3] 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.
- [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] Allen C K,Chan K C D,Colestock P L. Beam-halo measurements in high-current proton beams [J]. Phys Rev Lett,2002,89(21):214802-1~4.
- [7] 方锦清,陈关荣.非线性反馈控制强流加速器中的束晕-混沌现象[J].强激光与粒子束,2000,12(5):647-651.
- [8] 高远,翁甲强,方锦清,等.强流加速器中束晕-混沌的小波间隔反馈控制[J].物理学报,2001,50(8):1440-1446.
- [9] 高远,翁甲强,罗晓曙,等.强流加速器中束晕-混沌的小波函数控制研究[J].广西师范大学学报:自然科学版,2001,19(1):7-12.
- [10] 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.
- [11] 廖高华,翁甲强,成丽春,等.真空相移对束晕-混沌控制影响的一些研究[J].广西师范大学学报:自然科学版,2004,22(1):6-9.
- [12] 刘萍.以离子数为控制变量的束晕-混沌控制与拓宽真空相移取值范围的研究[D].桂林:广西师范大学,2005.
- [13] 陈银宝,黄志斌.周期性聚焦结构中强流束的共振与束晕形成[J].核科学与工程,2000,20(1):70-77.

(责任编辑:韦廷宗 邓大玉)

科学家用光学材料验证广义相对论效应

广义相对论是爱因斯坦于1915年建立的引力理论,将引力描述成因时空中的物质与能量而弯曲的时空,以取代传统对于引力是一种力的看法。自此观点建立,狭义相对论和万有引力便只是广义相对论在特殊情况下的特例:狭义相对论是在没有重力时的情况;万有引力定律则是在距离近、引力小和速度慢时的情况。在广义相对论建立之初,爱因斯坦提出了三项实验检验:一是水星近日点的进动,二是光线在引力场中的弯曲,三是光谱线的引力红移。

最近美国科学家研究证明了一种被称为“连续指数光子阱”(CIPTs)的新材料,能完美担当一个宽带或无辐射光学腔洞的作用。这种CIPTs能缓慢地以类似黑洞、引力透镜的方式来捕捉光,这等同于在实验室的光学材料中制造时空弯曲与光传播的效果。利用这种CIPTs科学家验证了光与物质在时空中的效应诚如广义相对论中所言。这项成果不但验证了广义相对论所作的预测,同时有助于生产能弯曲光线和其他形式电磁辐射的新型人工光学材料;在人工光学材料与天体力学之间架起了桥梁,直接产生了一个新领域——特异材料中的天体力学。作为专门设计的光学介质,CIPTs可以模仿复杂引力场内天体运动的周期、准周期以及混沌振荡,使得在实验室环境下测查天体物理现象变为可能。

(据科学网)