

强流加速器中束晕-混沌的延迟反馈控制

朱伦武¹⁾ 翁甲强¹⁾ 高远²⁾ 方锦清³⁾

¹⁾ 广西师范大学物理与电子科学系 桂林 541004)

²⁾ 广西工学院电子信息与控制工程系 柳州 545000)

³⁾ 中国原子能科学研究院 北京 102413)

(2001 年 11 月 5 日收到 2001 年 12 月 24 日收到修改稿)

摘要分析了延迟反馈法运用于束晕-混沌控制的理论可行性并实现了 5 种不同的初始质子分布情形下强流加速器中束晕-混沌的有效控制. 控制律为线性, 反馈量小, 有利于技术实现和降低控制代价, 可为强流加速器的工程实现提供参考.

关键词: 束晕-混沌, 强流加速器, 延迟反馈

PACC: 0545, 4265J, 2990

1. 引 言

强流离子束在工业生产、科研等诸多领域有着极为广阔的应用发展前景, 诸如洁净核能系统、放射性药物生产、高功率微波源、高功率自由电子激光等. 然而, 强流离子束在加速器通道中传输时会产生束晕-混沌现象, 导致散射的离子打在加速器器壁或其他结构上, 造成设备损坏和产生超标的放射性剂量, 同时引起束流的损失, 制约着束流功率的提高. 因此, 研究束晕-混沌的形成机理以及对其实现有效控制是研制新一代加速器的关键问题. 自 20 世纪 90 年代以来, 科学工作者不断探索束晕-混沌的形成机理并寻求控制的方法^[1-5]. 与此同时, 混沌控制的研究正方兴未艾^[6-10]. 鉴于束晕-混沌是一种非线性极强、对外界干扰极为敏感的时空混沌, 方锦清从混沌的控制策略出发, 提出了非线性控制方法, 即在离子径向受力方程等号右边加上一个非线性控制器 G , 使径向力成为

$$F_r = -q\nabla\phi(r, s) + G,$$

并选取了一些非线性函数构造控制器 G 进行反馈控制, 取得了初步的控制效果^[11, 12]. 高远等人在此基础上, 采用小波函数构造控制器

$$G = -g \frac{2}{a} \left[\left(1 - \frac{2}{a} r_{\text{rms}}^2 \right) \exp(-r_{\text{rms}}^2/a) - \left(1 - \frac{2}{a} a_m^2 \right) \exp(-a_m^2/a) \right],$$

达到了较理想的控制效果^[13, 14]. 但从实用角度来看, 小波函数控制器形式复杂, 在工程实现上有一定难

度. 此外, 有两个控制参数, 对参数调节的要求较高. 本文运用延迟反馈法进行控制, 也达到了良好的控制效果. 因本文的控制律为线性, 工程上较易实现, 所以该法更具有应用前景.

2. 延迟反馈法

延迟反馈法是控制混沌的一种有效方法, 由 Pyragas 于 1993 年提出^[15]. 其主要思想是巧妙地利用系统本身的输出信号的一部分经时间延迟后, 再与原来的输出信号相减, 作为控制信号反馈到系统中去, 即受控系统为

$$\begin{cases} \frac{dy}{dt} = F(y, x) + F(t), \\ \frac{dx}{dt} = G(y, x), \end{cases}$$

其中 $F(t)$ 为施加于系统的反馈信号; y 为输出量, 也是我们要控制的变量; x 为描述系统的其余变量; $F(t) = K[y(t-\tau) - y(t)]$, $y(t-\tau)$ 为延迟信号, 延迟时间 τ 与所需的某个不稳定周期时间相同. 通过参数 K 和 τ 的调节, 对系统提供一个微扰力, 即可实现对系统的控制. 当 $y(t-\tau) = y(t)$ 时, $F(t) = 0$, 因而这种微扰不改变系统的解.

3. 延迟反馈法运用于束晕-混沌的控制

3.1. 简要的理论分析

强流离子束在直线加速器的周期性聚焦磁场通

道中运动,当其分布满足 Kapchinsky-Vladimirshy(K-V)分布时,其无量纲包络半径满足包络方程^[5]

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

其中 r_b 为束包络半径; s 为轴向坐标, $s = z = \beta_b ct$, $\beta_b c$ 为束粒子的平均轴向速度; $k_z(s)$ 为表征周期聚焦磁场强度的周期函数, $k_z(s + S) = k_z(s)$, S 为一个 PFC 周期长度; K 为归一化导流系数, 表征束自生场强度.

当束流匹配时, 包络方程存在周期解 $r_b(s + S) = r_b(s)$, 而当束流失匹配时, 方程展示出混沌行为^[4]. 上述周期解失去稳定性而成为一条不稳定轨道. 例如, 当调谐衰减因子 $\eta = 0.8$, 失匹配因子 $M = 2$, 真空相移 $\sigma_0 = 115^\circ$, 取积分步长为 0.01 时, 可得系统的李亚普诺夫指数为 0.002, 图 1 给出束包络相空间中系统的混沌吸引子的图像, 图 2 为束包络半径的时间演化. 运用延迟反馈法, 使受控系统为

$$\begin{cases} \frac{dr_b}{ds} = \rho + G, & (1) \\ \frac{d\rho}{ds} = -k_z(s)r_b + \frac{K}{r_b} + \frac{1}{r_b^3}, & (2) \end{cases}$$

其中 G 为 $G(s) = g[r_b(s - z) - r_b(s)]$, g 为增益因子, z 为延迟量, 如前所述, z 应取为与所需的某个不稳定周期相同. 这里可考虑不稳定周期解 $r_b(s + S) = r_b(s)$, 取 $z = S$. 对于上述系统, 取 $g = 0.01$ 时, 受控系统的李亚普诺夫指数为 -0.0043 , 由受控前的正值转变为负值, 实现了周期解 $r_b(s + S) = r_b(s)$ 的稳定. 图 3 为在相空间中给出不稳定周期解 $r_b(s + S) = r_b(s)$ 经控制被稳定的情况, 图 4 反映出

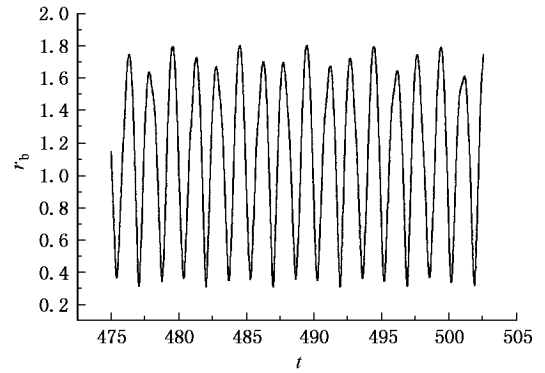


图 2 无控制时束包络半径的演化

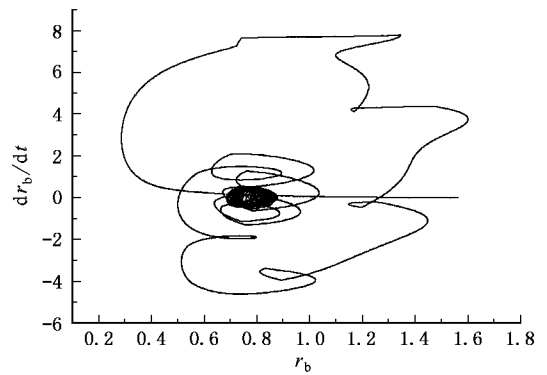


图 3 有控制时束包络相空间中系统状态演化轨迹

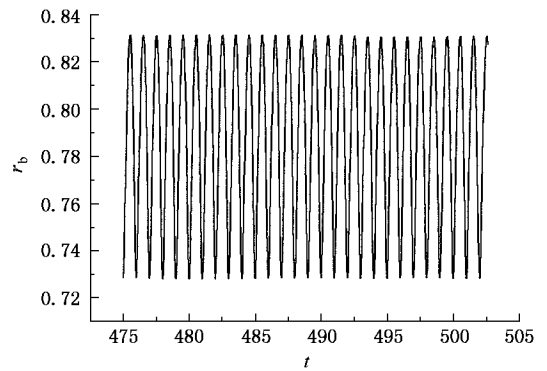


图 4 有控制时束包络半径的演化

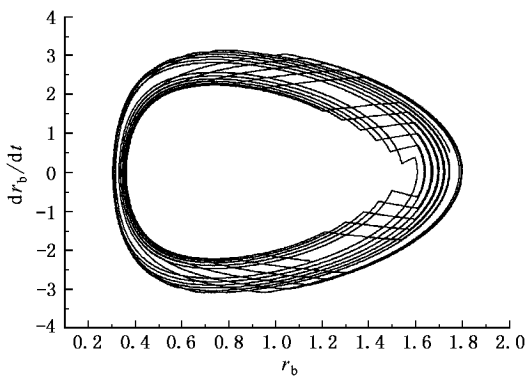


图 1 无控制时束包络相空间中系统状态演化轨迹

包络半径经控制后由混沌运动转变为周期运动.

3.2. 模拟研究中的运用

以上的分析指出, 延迟反馈法可实现束核半径的混沌运动向周期运动的转变并趋于稳定. 由于混沌运动的束核与离子的相互作用是束晕-混沌形成的主要机理^[11], 因而运用延迟反馈法以稳定束核的运动将有效地抑制束晕-混沌现象.

延迟反馈法运用于实际的束晕-混沌控制需要

解决两个问题,其一是如何选择控制变量,其二是如何施加反馈。

文献 [13] 提出采用离子的均方根半径 r_{rms} 作为控制变量,其主要原因是因为离子束在加速器通道中运动涉及大量离子的行为,必须采用能够反映离子集体行为的统计物理量作为控制变量,才能使控制律能针对束流的宏观行为进行有效控制。

此外,对于 K-V 分布,包络方程是束包络半径的精确微分方程,也可认为是均方根意义上的束半径的演化的唯象模型^[5],此模型中 $r_b/\sqrt{2}$ 就是均方根半径 r_{rms} ,因而选择 r_{rms} 作为控制变量与上述理论分析一致。因此本文采用 r_{rms} 作为控制变量。

文献 [12] 提出的施加控制的方式是在离子径向所受电场力方程等号右边加上控制器 G ,使径向力变为

$$F_r = -q\nabla\phi(r, s) + G,$$

在 G 的作用下,离子束的半径会产生相应的变化,相当于 G 加在方程 (1) 上。因此,运用延迟反馈法也可采用此施控方式,此时

$$G(s) = g[r_{\text{rms}}(s - S) - r_{\text{rms}}(s)].$$

4. 多粒子数值模拟及结果

模拟系统采用 50000 粒子,系统参数为:调谐衰减因子 $\eta = 0.8$,失匹配因子 $M = 2$,真空相移 $\sigma_0 = 115^\circ$ 。由此可计算出束匹配半径 $r_{\text{b0}} = 0.7891642$ 和导流系数 $K = 0.9032079$ 。总共演化 1500 个 PFC 周期。

与文献 [13] 一致,本文采用束晕强度因子(简称晕度) H 、束的最大半径 r_{max} 、单个 PFC 周期内单离子横向动量平方和的平均值 P^2 、单个 PFC 周期内离子束 x 方向和 y 方向的平均发射度 e_x 和 e_y 等束的统计量以描述束晕-混沌的控制效果。

为考察控制效果,本文对有无控制两种情况下束的统计量进行了分析和比较。略去控制的暂态过程并让束流充分稳定,从第 1000 个 PFC 周期开始选取 $H, r_{\text{max}}, P^2, e_x$, 并取其中的最大值进行比较和分析,且就不同的初始分布列于表 1。

表 1 不同初始分布离子束经延迟反馈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} 控制有/无	r_{max}/a_m 控制有/无	P_{max}^2 控制有/无	$e_{x\text{max}}$ 控制有/无
3-sigma 高斯分布	2.3	0.000/0.135	1.911/5.184	0.883/2.571	1.157/2.869
全局高斯分布	2.3	0.008/0.154	3.036/5.669	1.024/3.051	1.155/2.903
水袋分布	2.3	0.000/0.111	1.687/4.235	0.769/2.154	1.207/2.861
K-V 分布	2.3	0.000/0.146	1.135/5.193	0.867/2.979	1.001/2.818
抛物形分布	2.3	0.000/0.159	1.747/5.181	0.933/3.031	1.067/2.912

由表 1 可以看出,控制律对各种分布均有很好的控制效果,除全高斯分布外,束晕强度的最大值在控制后转变为零,全高斯分布的最大束晕强度也在控制后转变为一个很小的值(10^{-3} 数量级),这说明,束晕-混沌得到了有效抑制。束的最大半径在控制后减小为无控制时的 $1/3$ — $1/4$,横向动能减小为无控制时的 $1/3$ 左右,束核与离子的横向能量交换大为减弱,离子杂乱的散射状态得以明显改观。发射度在控制后减小为无控制时的 $1/2$ — $1/3$,束流更加紧密和稳定。

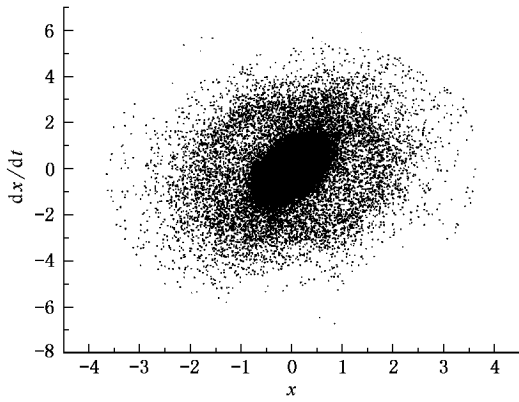
为了直观起见,图 5 至图 9 给出初始分布为 3-sigma 高斯分布的束流在上述实验条件下的一些结果,并就有无控制两种情况加以比较。

图 5 给出 1000 PFC 周期横截面上的离子相图。由图 5 可明显看出,经控制后,离子的运动空间范围大为减小,横向运动速度大大降低,两翼旋转的结构

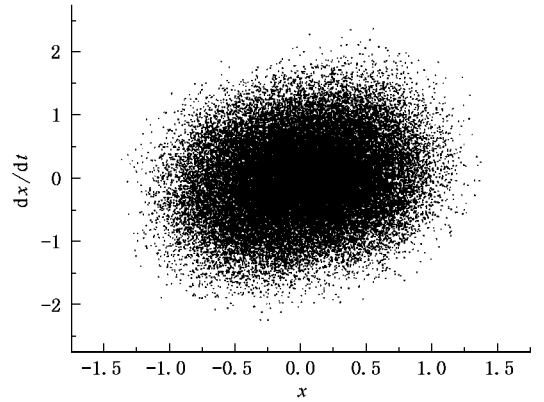
也被消除,离子在相空间中的面积大为缩小,约为无控制时的 $1/8$,这与发射度减小一致。

图 6 给出单个 PFC 周期内离子横向动量平方和的平均值 P^2 的演化情况。由图 6 可以看出,无控制时,离子的横向动能处于激烈变化的状态,其无量纲能量约在 1.8 至 3.0 之间,变化幅度达 1.2,而且杂乱无章,反映出离子系统的高度不稳定,离子处于激烈的散射状态。经控制后,横向能量大大减小,变化范围也大为减小,仅在 0.7 至 1.0 之间,变化幅度仅有 0.3,变化也较为缓和并有规律。

图 7 给出束的最大半径演化情况。无控制时,束的最大半径急剧增加且随束流在加速器通道中行进而不断增大,并最终可能打在加速器壁上。控制后,最大半径降至一较小值并保持较为恒定的状态,消除了束晕范围的继续扩大,束晕的再生现象得以消除。

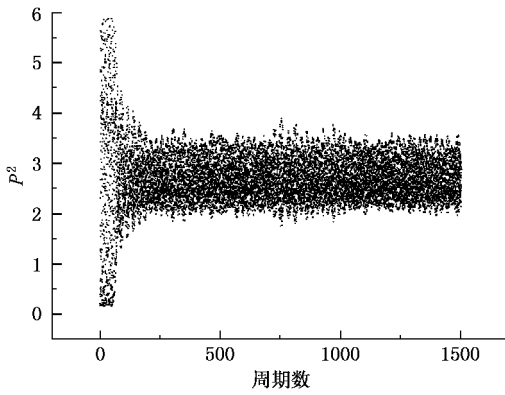


(a) 无控制

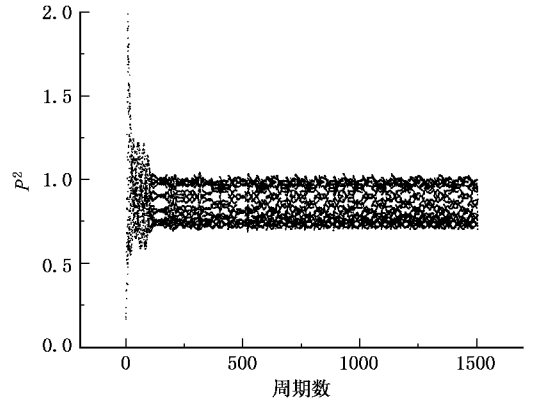


(b) 有控制

图 5 有无延迟反馈控制条件下 1000PFC 周期横截面上的离子分布相图

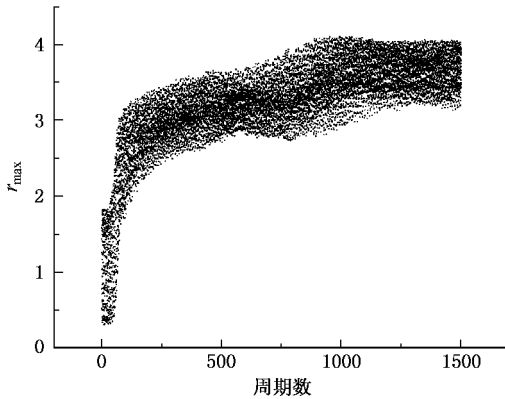


(a) 无控制

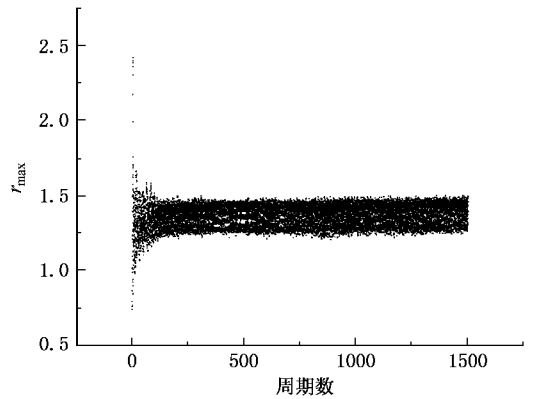


(b) 有控制

图 6 有无延迟反馈控制条件下离子横向动量平方与平均值的演化比较



(a) 无控制



(b) 有控制

图 7 有无延迟反馈控制条件下束的最大半径演化比较

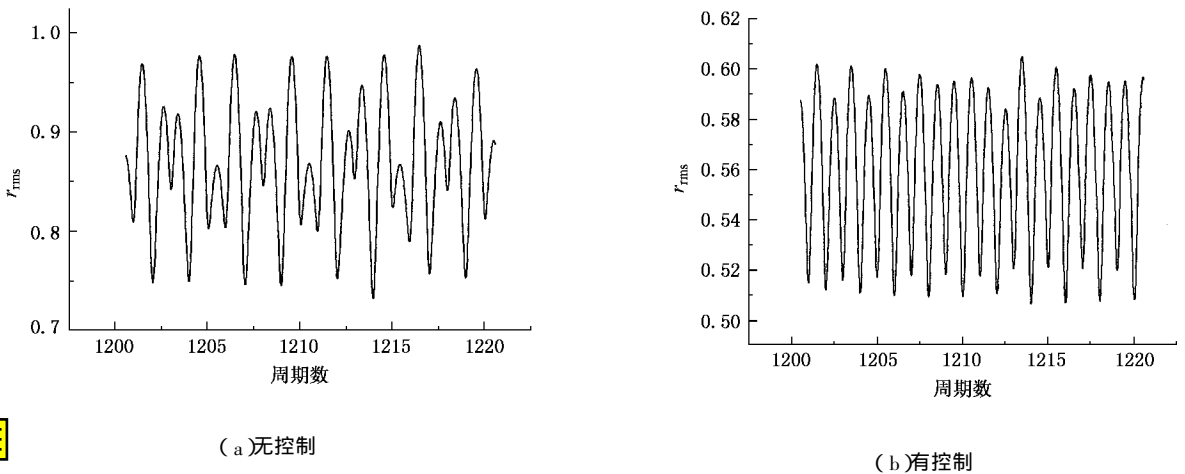


图 8 有无延迟反馈控制条件下均方根半径演化比较

图 8 为均方根半径的演化. 无控制时均方根半径处于混沌运动状态, 经控制后, 均方根半径变化还不能认为是严格的周期运动, 但变化相对平稳和有规律, 振荡中心有了明显的下降, 变化范围也大为减

少, 其运动是趋向周期解 $r_b(s+S) = r_b(s)$ 的. 通过抑制均方根半径的混沌运动以减少束核与离子的相互作用, 从而有效控制束晕的控制思想在这里得到了体现.

出于工程上的考虑, 图 9 给出反馈量的施加情况. 由图 9 可看出, 反馈量在束流趋向稳定的过程中趋向于零, 施加的反馈是一种微扰, 这意味着在工程中仅需很低的能耗就可实现束晕-混沌的控制, 对降低控制代价很有意义.

5. 结 语

延迟反馈法运用于束晕-混沌的控制很有成效, 而且, 用同一个延迟反馈控制器和同一个控制参数即可实现对 5 种不同离子分布的控制. 该法简单易行, 从技术上、控制代价上可供工程上借鉴.

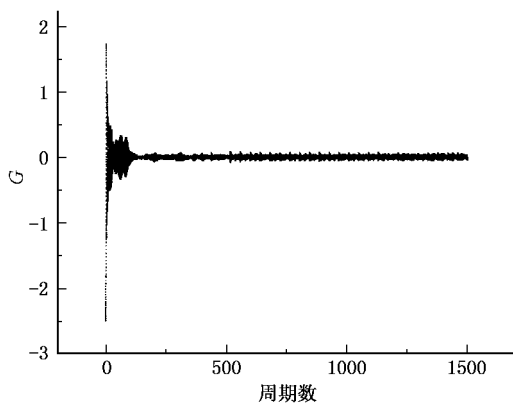


图 9 反馈量的施加情况

- [1] Gluckstern R L 1994 *Phys. Rev.* **73** 1247
- [2] Chen Y B and Huang Z B 2000 *High Energy Phys. and Nucl. Phys.* **24** 560 [in Chinese] 陈银宝、黄志斌 2000 高能物理与核物理 **24** 560]
- [3] Gluckstern R L and Fedotov A V 1998 *Phys. Rev. E* **58** 4997
- [4] Fink Y 1997 *Phys. Rev. E* **50** 7557
- [5] Chen C P 1994 *Phys. Rev. Lett.* **72** 2195
- [6] Wu W G and Gu T X 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 1221 [in Chinese] [伍维根、古天祥 2000 物理学报 **49** 1221]
- [7] Tang G N, Luo X S and Kong L J 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 30 [in Chinese] [唐国宁、罗晓曙、孔令江 2000 物理学报 **49** 30]
- [8] Zhang J S 2001 *Chin. Phys.* **10** 97
- [9] Luo X S, Fang J Q, Wang L H, Kong L J and Jiang F 1999 *Acta Phys. Sin. (Overseas Edition)* **8** 895
- [10] Li Z and Han C Z 2001 *Chin. Phys.* **10** 494
- [11] Fang J Q 2000 *Nature* **22** 63 [in Chinese] [方锦清 2000 自然杂志 **22** 63]
- [12] Fang J Q, Chen G R, Zhou L L and Huang J J 2001 *Prog. Nature Sci.* **11** 113 [in Chinese] [方锦清、陈关荣、周刘来、黄继杰 2001 自然科学进展 **11** 113]
- [13] 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]

- [14] Gao Y , Weng J Q , Fang J Q and Luo X S 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 1440 [学报 50 1440]
1440 (in Chinese) 高 远、翁甲强、方锦清、罗晓曙 2001 物理 [15] K. Pyragas 1993 *Phys. Lett. A* **180** 99

Control of beam halo-chaos by delayed self-controlling feedback

Zhu Lun-Wu¹⁾ Weng Jia-Qiang¹⁾ Gao Yuan²⁾ Fang Jin-Qing³⁾

¹⁾ (*Department of Physics and Electronic Science , Guangxi Normal University , Guilin 541004 , China*)

²⁾ (*Department of Electronic Information and Control Engineering , Guangxi University of Technology , Liuzhou 545000 , China*)

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

(Received 5 November 2001 ; revised manuscript received 24 December 2001)

Abstract

The delayed self-controlling feedback method is used to control beam halo-chaos in high-intensity accelerator effectively under five different initial distributions of protons. A brief theoretic analysis is presented. This method, considering its linear controller and weak feedback, has the advantage in technology realizability and cost saving. It can be a good reference in the application to high-intensity accelerators.

Keywords : halo-chaos , high-intensity accelerator , delayed self-controlling feedback

PACC : 0545 , 4265J , 2990