

文章编号 :100124322 (2004) 0921205205

强流束晕混沌的外部磁场自适应控制^x

高 远¹, 罗晓曙², 方锦清³, 翁甲强²

(1. 广西工学院 电子信息与控制工程系, 广西 柳州 545006;

2. 广西师范大学 物理与信息工程学院, 广西 桂林 541004; 3. 中国原子能科学研究院, 北京 102413)

摘 要: 研究了强流质子束在周期聚焦磁场通道中束晕混沌的外部磁场自适应控制方法, 给出了磁场控制方程。将该方法应用在多粒子模型中, 实现了对 4 种不同初始分布质子束的束晕混沌的有效控制, 得到了消除束晕及其再生现象的理想结果。在强流加速器系统中, 由于外部磁场是可测和可调的物理量, 因此该控制方法有利于实验研究, 可为强流质子加速器中周期聚焦磁场的设计和实验提供参考。

关键词: 强流质子束; 周期聚焦磁场通道; 束晕混沌; 混沌控制; 自适应控制

中图分类号: O415. 5

文献标识码: A

强流离子加速器有着许多重要的应用, 诸如产生洁净核能^[1]、生产放射性药物、促使放射性废物嬗变和促使重离子聚变等等。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。这会产生两个有害的结果: 一是引起束流的损失, 制约了束流功率的提高, 另一个是导致散射的离子打在加速器器壁或其它结构上, 造成设备损坏和产生严重的放射性剂量超标, 污染环境并危害人体健康。因此研究束晕混沌的形成机制和控制问题是研制新一代加速器的关键问题。自 20 世纪 90 年代以来, 科学工作者在不断探索束晕混沌形成机制的同时^[2~6], 也在不断寻求其控制的方法^[7,8]。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, 我国学者从混沌的控制策略出发, 在系统内部某个变量可测的基础上, 近年提出了非线性控制方法^[8~10], 包括小波函数控制反馈方法^[9,10], 随后又研究了延迟反馈控制方法^[11], 均取得了较理想的控制效果。

本文探索在系统外部实施控制策略, 将控制器与外部的物理量如周期性聚焦磁场建立直接的控制联系, 达到对束晕混沌的有效控制, 这不仅具有重要的应用价值, 而且在实验工程上易于实现。我们从强流束的束包络演化方程出发, 且考虑离子束的分布几何因子, 导出了周期性聚焦通道中外部磁场的自适应调整控制方程, 并提出了实施外部磁场自适应调整控制的具体策略。我们还将该方法应用于宏观多粒子模型中, 取质子束最大半径 r_{\max} 作为控制反馈变量, 进行模拟控制研究。研究结果表明: 该方法能有效实现 4 种初始分布不同离子束的束晕混沌控制, 并获得了无束晕再生现象的理想结果。

1 基本理论

在周期性螺旋聚焦磁场通道中, 质子束包络方程为^[3]

$$\frac{d^2 r_b}{ds^2} + H(s) r_b - \frac{gK}{r_b} - \frac{(4g)^2}{r_b^3} = 0 \quad (1)$$

式中 g 是束分布几何因子, 它可定义为

$$g = 0.5 r_b^2(s) / r_{\text{rms}}^2 \quad (2)$$

K2V (Kapchinskij-Vladimirskij) 分布束是初始空间分布为均匀分布的圆柱型束, 它对应于 $g = 1$ 时的特殊情形^[3~6]; r_b 是束流包络径向半径, $H(s)$ 是对称周期性聚焦磁场强度, 它满足 $H(s) = H(s + S)$, S 是聚焦场的周期。图 1 是占空比为 0.8, 磁场强度为 H_0 的周期性聚焦磁场的结构示意图, 该周期性磁场已略去其边缘效应。 K 是束流的导流强度系数。通过如下无量纲化简^[6]

$$s/S \rightarrow s, \quad S^2 H(s) \rightarrow H(s), \quad (4gS)^{-1/2} r_b \rightarrow r_b, \quad SK/4 \rightarrow K \quad (3)$$

可得到无量纲包络方程

$$\frac{d^2 r_b}{ds^2} + H(s) r_b - \frac{K}{r_b} - \frac{1}{r_b^3} = 0 \quad (4)$$

^x 收稿日期: 2003210230; 修订日期: 2004202220

基金项目: 国家自然科学基金资助课题(10247005); 广西自然科学基金资助课题(0135063); 广西“新世纪十百千人才工程”专项基金资助课题(2002226); 广西工学院科学研究基金资助课题(030108)

作者简介: 高远(1975—), 男, 硕士, 讲师, 主要从事混沌控制与同步研究; E2mail: gxgaoyuan@163.net。

式(4)可化为一阶形式

$$\begin{cases} \frac{dr_b}{ds} = \\ \frac{d}{ds} = -H(s)r_b + \frac{K}{r_b} + \frac{1}{r_b^3} \end{cases} \quad (5)$$

当质子束包络与周期聚焦系统匹配时,束流处于静态(稳恒态), $r = r_{b0} = \text{常数}$,所以 $dr_b/ds = 0$ 和 $d^2r_b/ds^2 = 0$,束包络半径对应一个匹配半径 r_{b0} ,它是控制目标。选取下面的参数:质子束包络非匹配因子 $M = 2.0$ (即初始条件 $r_b(0)/r_{b0} = 2.0$)时,周期内束粒子运动的相移 $= 115^\circ$,周期聚焦场的占空比 $= 0.4$,调谐衰减因子取 $= 0.8$,聚焦场强度 $H_0 = 10.07$ 。我们可计算得到束匹配半径 $r_{b0} = 0.789$,束导流系数 $K = 0.903$ 。在这些参数下,质子束处于强流状态,且束包络的演化呈混沌状态。我们取积分步长 $s = 0.02$,初始条件 $r_b(0) = 1.578$, $\dot{r}_b(0) = 1.0$,采用四阶龙格2库塔法求解方程(5),该方程演化为具有正的李亚普洛夫指数,其大小为 0.02 。图2示出了包络半径演化相图,它是单涡卷混沌吸引子。

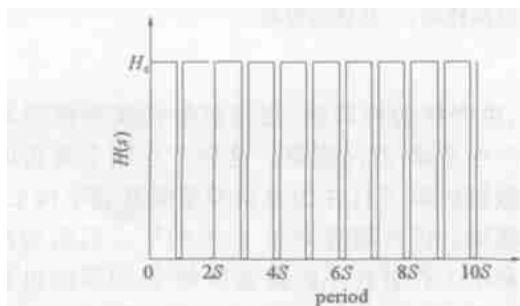


Fig. 1 Periodic focusing field

图1 周期性聚焦磁场示意图

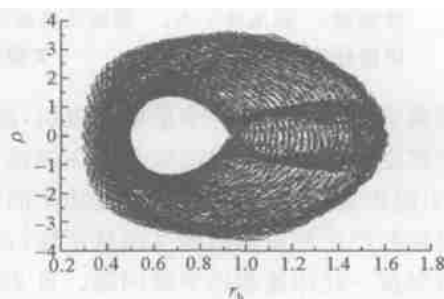


Fig. 2 Single scroll chaotic attractor

图2 单涡卷混沌吸引子

2 控制方法

对于质子束,当 $dr_b/ds = 0$ 且 $d^2r_b/ds^2 = 0$ 时,由(4)式可得

$$-H(s)r_{b0} + K/r_{b0} + 1/r_{b0}^3 = 0 \quad (6)$$

假定对于任意半径 r_b ,存在一个控制方程,使得 $H(s)$ 调整成 $H(s)$ 时,都能满足

$$\begin{cases} \frac{dr_b}{ds} = 0 \\ \frac{d}{ds} = -H(s)r_b + K/r_b + 1/r_b^3 = 0 \end{cases} \quad (7)$$

由式(6)和式(7)可得周期性聚焦磁场调整的自适应控制方程为

$$H(s) = \frac{1}{r_b} [H(s)r_{b0} + K(\frac{1}{r_b} - \frac{1}{r_{b0}}) + (\frac{1}{r_b^3} - \frac{1}{r_{b0}^3})] \quad (8)$$

对于非K2V分布的离子束,在调节参数时,应考虑分布几何因子 g 的作用。在相同的控制目标情况下,周期性聚焦磁场调整的自适应控制方程可修正为

$$H(s) = \frac{1}{r_b} [H(s)r_{b0} + g^{-1}K(\frac{1}{r_b} - \frac{1}{r_{b0}}) + g^{-2}(\frac{1}{r_b^3} - \frac{1}{r_{b0}^3})] \quad (9)$$

当质子束初始分布为K2V分布时,取 $g = 1$,式(9)又变为式(8)的形式。利用式(9)可得,在聚焦磁场受自调整控制的条件下,质子束包络半径的演化方程式(5)式变为

$$\begin{cases} \frac{dr_b}{ds} = \\ \frac{d}{ds} = -H(s)r_b + \frac{K}{r_b} + \frac{1}{r_b^3} \end{cases} \quad (10)$$

由式(9)可知,当包络半径 $r_b = r_{b0}$,应有 $H(s) = H(s)$ 。

采用上述的有关参数和初始条件,当包络方程式(5)自由演化1000个积分步数后,再加上(9)式的自适应控制。图3是在有控制条件下,包络半径与控制目标相对误差(距离)的时间演化图。由图3可看出,包络演化

不到 4 000 个积分步数, r_b 与 r_{b0} 之间的相对误差稳定地趋近于零, 这说明达到了控制目标。图 4 示出了在控制条件下, 磁场强度大小的调整变化情况。由图 4 可见, 在实现控制目标后, 磁场幅度趋于一稳定数值, 且该数值非常接近原初始磁场强度值 10.07。

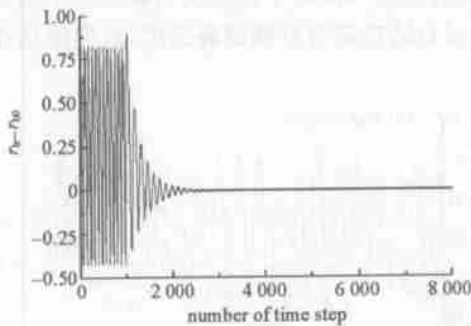


Fig. 3 Evolution of the relative distance between envelope radius and the object
图 3 包络半径与控制目标相对误差的演化

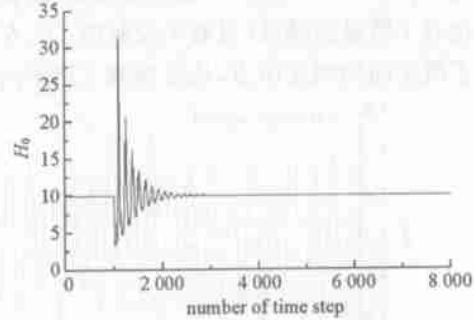


Fig. 4 Evolution of the magnetic field magnitude
图 4 磁场大小的调整变化

3 控制方法在多粒子模型中的数值模拟

3.1 模拟参数

多粒子模拟系统采用 50 000 个质子, 相关参数取: 调谐衰减因子 $\eta = 0.6$, 真空相移 $\theta = 115^\circ$, 由此可计算出束匹配半径仍为 $r_{b0} = 0.789$, 导流系数 $K = 0.903$, 质子束初始半径的失匹配因子 $M = 2$ 。对于质子束初始分布为 K2V 分布情形, 取周期聚焦场的占空比 $\alpha = 0.4$, 选取聚焦场强度 $H_0 = 10.07$, 对于其它分布束, 取周期聚焦场的占空比 $\alpha = 0.6$, 聚焦场强度 $H_0 = 20.14$ 。采用模拟周期性聚焦磁场通道中多粒子运动的程序, 对各种分布离子束进行 2 000 个周期的连续模拟控制, 控制的聚焦周期 $S = 0.5$, 积分步长为 0.01。为了满足实验中控制变量的可观测性, 应用式(9)起控时, 我们选择质子运动的最大横向半径 r_{max} 代替束包络半径 r_b , 用它作为控制反馈变量; 为了反馈变量的一致性, 取 r_{max} 的单周期延迟量 $r_{max}(s - S)$ 代替式(2)中的均方根半径 r_{rms} , 来实现计算几何因子 g 。在整个控制过程中, 每经历一个周期 S , 就对下一周期磁场强度大小自适应调整一次。

3.2 数值模拟结果与分析

采用束晕强度因子(简称晕度, 它是位置大于 $1.75 r_{b0}$ 的质子数与束质子总数的比值) H , 单周期内质子束 x 方向、 y 方向的最大平均发射度 $x_{av\ max}$ 和 $y_{av\ max}$, 单周期内质子的横向截面动量平方平均值 P_{av}^2 , 束的最大半径 r_{max} 等统计量来描述束晕混沌的控制效果^[9], 计算结果如表 1 所示。

表 1 四种不同初始分布的质子束在有/无磁场自适应调整控制条件下的结果比较

Table 1 Comparison of properties of the beam halo chaos for four types of initial proton distribution before and after applying the external magnetic field adaptive control. B/A is short for before/after.

initial proton distribution	H_{max} B/A control	r_{max}/r_{b0} B/A control	P_{av}^2 B/A control	$x_{av\ max}$ B/A control
K2V	0.136/0	4.374/1.114	2.974/0.924	2.640/1.010
water2bag	0.157/0	4.985/1.327	17.024/3.332	7.432/1.523
parabola	0.166/0	4.917/1.723	12.570/3.162	5.436/1.804
3 2sigma Gauss	0.140/0	4.674/1.702	10.793/2.645	5.488/1.976

从表 1 可见, 采用式(9)进行磁场强度自适应控制, 可以得到如下结果: (1) 控制后最大晕度 H_{max} 转变为零, 这也就说明晕度 H 在控制后可全部为零, 而且没有束晕的再生现象, 这是对束晕进行控制的一个理想结果; (2) 质子的横向截面动量平方平均值 P_{av}^2 有控制后减少到原来的 $1/5 \sim 1/3$, 即质子在横向的能量被大大减少了; (3) r_{max} 与 r_{b0} 的比值在 1 000 个周期的演化后压缩到原来的 $0.37 \sim 0.256$, 大大地减少了质子散射半径。这表明直接通过自适应调整聚焦磁场强度, 可调节外部聚焦磁场作用力大小, 实现有效抵消质子的径向斥力, 减少质子横向的能量, 从而抑制质子向外散射, 破坏束晕混沌产生的主要机制, 从而达到控制效果; (4) 无论质子束 x 方向的最大平均发射度, 还是 y 方向的最大平均发射度, 在加控制后都大大地减少了, 在控制 1 000

个周期后,最大平均发散度比不加控制时的一半还小,这说明质子束被约束得更加紧密了。该方法通过聚焦通道磁场强度的直接调整,就可实现对四种不同初始分布的强流束束晕混沌的很好控制,且控制反馈变量 r_{\max} 存在可观测性,所以该方法易于在实验工程上实现。

图5是质子束初始分布为 32σ 高斯分布条件下,质子运动的最大半径 r_{\max} 的演化图。由图5比较可见,不加控制时,质子束最大半径的变化剧烈,振荡幅度较大;加控制后,最大半径的变化幅度有了明显减少,振荡中心也有了明显的降低(只有无控制的 $1/4$ 左右)。说明通过自适应调节外部磁场强度,改变磁场作用力,有效抵消了质子间的相互斥力,从而抑制了质子向外散射。

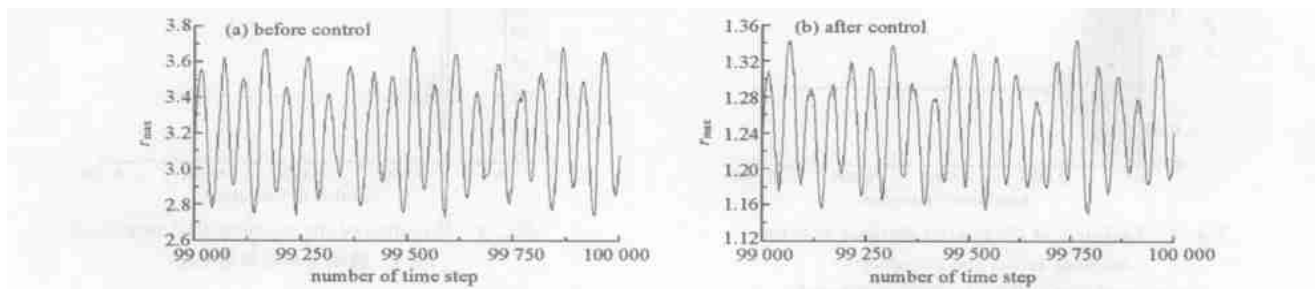


Fig. 5 Evolution of maximum proton beam radius

图5 质子运动的最大半径与有无自适应参数控制的演化比较

图6(a)和(b)分别是质子束初始分布满足抛物线分布时,在有、无聚焦磁场参数自适应调整控制条件下,于周期 $p = 1600$ 处,束横截面上的质子分布相图。由图6可见,不加控制时,质子的分布比较松散,很不均匀,束晕现象明显;有控制时,空间分布截面被明显压缩,只剩原来的 $1/16$ 左右,且质子束的发射度值也由原来的 51450.3 控制到 1.7698 ,这就是说,在参数调整控制下,束晕现象得到了基本消除,质子分布的均匀性得到很好的改善。

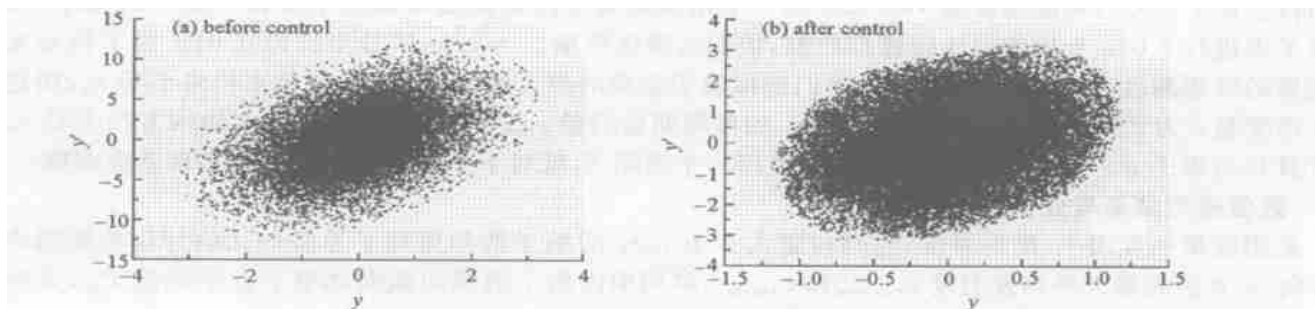


Fig. 6 Proton distribution diagram in the (y, y) space periodic section ($p = 1600$)

图6 有无自适应参数条件下,在 $p = 1600$ 处横截面上的质子在 (y, y) 空间的分布相图

4 结束语

在强流质子束的束包络方程基础上,提出了在周期性聚焦磁场通道中,束晕混沌的外部聚焦磁场自适应调整控制方法。该方法能对4种不同初始分布质子束的束晕混沌现象进行有效控制,且消除了束晕及其再生现象,提高了质子束的紧密度和均匀性,得到了较为理想的控制效果。该方法的主要优点是:反馈变量 r_{\max} 具有可观测性,它与外部周期性聚焦磁场之间建立直接控制联系,通过自适应调节磁聚焦磁场强度大小,就可实现对强流束中束晕混沌的控制,避免了控制器难以寻找和实现的困难。所以该方法物理意义明确,易于实施,研究结果为实用强流质子直线加速器中周期聚焦磁场的设计和调试提供了参考。

参考文献:

- [1] 丁大钊. 放射性洁净核能系统[J]. 科技导报, 1997, 3: 32—34. (Ding D Z. Radioactive clean nuclear power apparatus. *Science and Technology Review*, 1997, 3: 32—34)
- [2] Lee S Y. Space charge dominated beam and applications of high brightness beam[M]. Woodbury, New York: AIP Press, 1996. 1—100.
- [3] Fink Y, Chen C, Marabl W P. Halo formation and chaos in root2mean2square matched beams propagating through a periodical focusing channel[J]. *Phys Rev E*, 1997, 55(6): 7557—7562.

- [4] Chen C, Davidson R C. Nonlinear properties of the Kapchinskij-Vladimirskij equilibrium and envelope equation for an intense charged-particle beam in a periodic focusing field[J]. *Phys Rev E*, 1994, **49**(6): 5679—5687.
- [5] Gluckstern R L. Analytic model halo formation in high current ion linacs[J]. *Phys Rev Lett*, 1994, **73**(9): 73.
- [6] Chen C, Davidson R C. Nonlinear resonances and chaotic behavior in a periodic focused intense charged-particle beam[J]. *Phys Rev Lett*, 1994, **72**(14): 2195—2198.
- [7] 方锦清, 陈关荣, 周刘来, 等. 强流质子束在周期聚焦通道中束晕混沌的物理机制及其非线性控制策略[J]. 自然科学进展, 2001, **11**(2): 113—120. (Fang J Q, Chen G R, Zhou L L, et al. Physical mechanism of beam halo-chaos formation for high-current proton beam in a periodic-focusing channels and a nonlinear control strategy. *Progress in Nature Science*, 2001, **11**(2): 113—120)
- [8] 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. (Fang J Q, Chen G R. Nonlinear feedback control of halo-chaos in high-intensity linacs. *High Power Laser and Particle Beam*, 2001, **12**(5): 647—651)
- [9] 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—440. (Fang J Q, Gao Y, Weng J Q, et al. Controlling beam halo-chaos using wavelet function feedback method. *Acta Physica Sinica*, 2001, **50**(3): 435—440)
- [10] 高远, 翁甲强, 方锦清, 等. 强流加速器中的束晕混沌的小波间隔反馈控制[J]. 物理学报, 2001, **50**(8): 1440—1444. (Gao Y, Weng J Q, Fang J Q, et al. A method of multi-periodical interval control beam halo-chaos by wavelet feedback control function. *Acta Physica Sinica*, 2001, **50**(8): 1440—1444)
- [11] 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—1489. (Zhu L W, Weng J Q, Gao Y, et al. Control of beam halo-chaos by delayed self-controlling feedback. *Acta Physica Sinica*, 2002, **51**(7): 1483—1489)

Control of beam halo-chaos via exterior magnetic field self-adaptive control

GAO Yuan¹, LUO Xiao-shu², FANG Jin-qing³, WENG Jia-qiang²

(1. Department of Electronic Information and Control Engineering,

Guangxi University of Technology, Liuzhou 545006, China;

2. Institute of Physics and Information Engineering, Guangxi Normal University, Guilin 541004, China;

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

Abstract: This paper presents the magnetic field parametric self-adaptive method for controlling the beam halo-chaos in the periodic focusing channel. The method is applied to the multi-particle model with the periodic focusing magnetic field channel. The PIC simulation results show that beam halo-chaos for four different kinds of initial proton beams can be controlled effectively, respectively. The beam halos and its regeneration can be eliminated. This method is easy to realize in experiment. The research offers a valuable reference for the design of the periodic focusing channels in the high-current linear proton accelerators.

Key words: High-current proton beam; Periodic focusing channel; Halo-chaos; Chaos control; Self-adaptive control