

文章编号: 100124322(2004)0921191204

# 束晕混沌的神经网络自适应控制<sup>X</sup>

黄国现<sup>1</sup>, 罗晓曙<sup>1</sup>, 方锦清<sup>2</sup>

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

**摘 要:** 理论分析了强流离子束在周期磁场聚焦通道中传输时产生的束晕混沌动力学行为, 给出了近似反映实际聚焦磁场的余弦函数形式。然后利用神经网络方法对非线性复杂系统控制的优越性, 提出前馈反馈神经网络方法对强流离子束中束晕混沌进行自适应控制。通过适当选择的神经网络控制结构和线性反馈系数以及自适应调整神经网络的权系数, 可将强流离子束的包络半径达到束匹配半径的控制目标, 且束包络的抖动大小明显减少, 束晕混沌现象得到了明显的抑制。

**关键词:** 束晕混沌; 强流离子束; 神经网络自适应控制

**中图分类号:** O415.5; TL501.5

**文献标识码:** A

强流离子加速器是洁净核能开发系统的重要组成部分<sup>[1]</sup>。强流加速器中的离子束在磁场周期聚焦通道传输中, 由于带电粒子的强空间电荷等非线性效应产生了束晕混沌现象, 使散射离子打击在加速器器壁上并溢出, 这不仅引起束流的损失, 制约了束流功率的提高, 而且还产生了超标的放射性剂量并引起结构元件的损坏, 对环境和人身安全造成极大的危害。自 20 世纪 90 年代以来, 科学工作者在不断探索束晕混沌的形成机理的同时, 也在不断寻求束晕混沌的控制方法<sup>[2~6]</sup>。鉴于束晕混沌是一种非线性极强、对外界干扰较为敏感的时空混沌, 文献[6~8]从一般的混沌控制策略出发, 提出了非线性反馈控制方法, 实现了对束晕混沌的有效控制。而以往的研究大多是在周期性方波聚焦磁场下进行的, 为了更接近加速器聚焦磁场的实际情况, 本文对加速器聚焦磁场进行了分析, 给出了近似反映实际聚焦磁场情形的余弦函数的曲线形式。同时鉴于神经网络对非线性复杂系统的控制具有许多优越性, 我们研究了用该方法对束晕混沌进行控制, 目标是将强流离子束的包络半径控制到束匹配半径。研究表明, 该方法能实现对强流离子加速器中束晕混沌的有效控制。

## 1 K<sub>2</sub>V 分布下束晕混沌的分析和数值结果

### 1.1 简要的理论分析

强流离子束在周期性螺旋管磁场聚焦通道(简称 PFC)中运动, 当圆形的质子束粒子满足 K<sub>2</sub>V 分布时, 在 PFC 中水平方向运动的束包络无量纲方程为<sup>[8]</sup>

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + k_z(t)x - \frac{K}{x} - \frac{1}{x^3} = 0 \quad (1)$$

式中:  $x(t)$  为束的无量纲束包络半径;  $k_z(t)$  为周期函数, 它表征周期磁场聚焦通道对质子束的磁聚焦强度,  $k_z(t) = k_z(t + T)$ ,  $T$  为一个聚焦场 PFC 的周期长度;  $K$  为归一化束流导流系数, 表征束自生场强度。当束流匹配时, 包络方程存在周期解  $x(t) = x(t + T)$ , 而当束流失匹配时, 方程展示出混沌行为<sup>[7]</sup>。

由文献[8]可知, 当系统参数调谐衰减系数  $\gamma = 0.8$ , 失匹配因子  $M = 2$ , 真空相移  $\phi_0 = 115^\circ$  时, 可计算出束匹配半径  $r_b = 0.789$  和导流系数  $K = 0.903$ 。此时包络方程(1)为

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + k_z(t)x - \frac{0.903}{x} - \frac{1}{x^3} = 0 \quad (2)$$

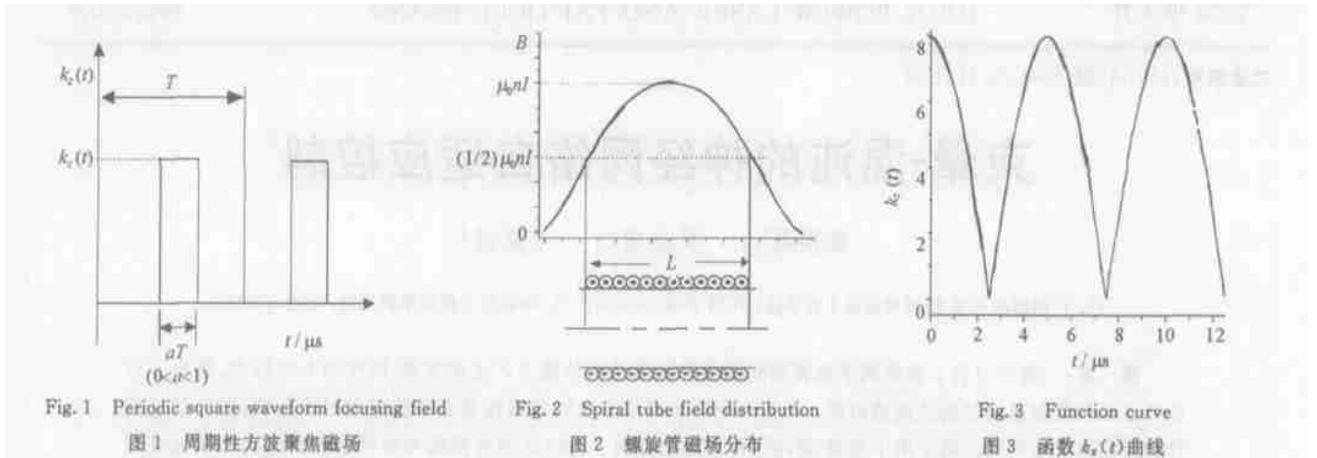
### 1.2 磁聚焦强度 $k_z(t)$ 的确定

在周期性磁聚焦强度  $k_z(t)$  的选取上, 文献[9]取如图 1 所示形式的函数, 它们都是周期性方波聚焦磁场。而加速器周期性聚焦磁场的实际情况与螺旋管聚焦磁场相似, 其磁感应强度为<sup>[10]</sup>

X 收稿日期: 2003212203; 修订日期: 2004203203

基金项目: 国家自然科学基金资助课题(10247005, 70070147); 广西“新世纪十百千人才工程”入选专项基金资助课题(2002226)

作者简介: 黄国现(1974—), 男, 硕士生, 工程师, 主要从事非线性控制等研究。



$$B = \frac{1}{2} \mu_0 n I (\cos \theta_1 - \cos \theta_2) \tag{3}$$

式中： $\mu_0$  为真空磁导率； $n$  为单位长度线圈数； $I$  为通电电流； $\theta_1$  和  $\theta_2$  分别是螺旋管中心线上的点到两端的连线与中心线的夹角。图 2 为磁感应强度分布曲线图，该曲线具有正弦或余弦函数的曲线特点。根据以上分析，我们构造一函数  $k_z(t)$

$$k_z(t) = A_m / \cos 2 f t / \tag{4}$$

式中： $A_m$  为磁感应强度幅值， $f = 1/T$ 。图 3 表示当  $A_m = 8.0, f = 0.001$  的曲线，该曲线能很好地反映实际螺旋管磁感应强度分布特点。此时包络方程 (2) 变为

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + A_m / \cos 2 f t / x - \frac{0.903}{x} - \frac{1}{x^3} = 0 \tag{5}$$

研究表明，当方程 (5) 中  $A_m, f$  取不同的值时，将产生不同程度的束晕混沌现象。

### 1.3 数值结果

为了便于数值计算，令  $\hat{U} = y, t = z(t)$ ，则有  $\ddot{x} = \hat{U}, \hat{U}(t) = 1$ ，方程 (5) 变为

$$\begin{cases} \hat{U} = y \\ \ddot{x} = - A_m / \cos 2 f z / x + 0.903 / x + 1 / x^3 \\ \hat{U} = 1 \end{cases} \tag{6}$$

我们对参数  $A_m, f$  取不同的值，当初值为  $x_0 = 0.2, y_0 = 0.7, z_0 = 0.01$ ，时间步长为  $t = 0.001$  时，对系统进行计算机模拟，得出相应的相图，如图 4 所示。

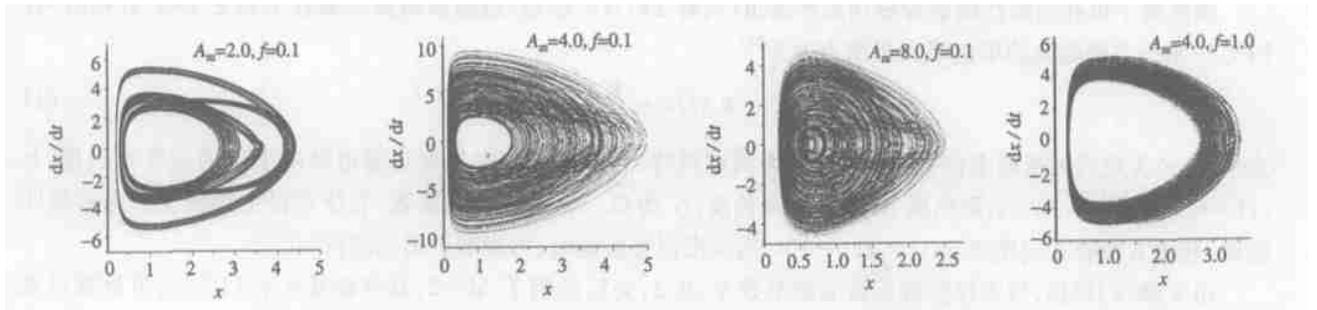


Fig. 4 Phase diagram with different parameters  
图 4 不同参数的相图

由以上结果可知， $A_m$  越大，越容易产生束晕混沌现象； $f$  越大，越不容易产生束晕混沌现象。

## 2 束晕混沌的神经网络控制

人工神经网络具有超高维、自学习、自适应、自组织、并行处理等众多独特的性能和优点，使其在许多实际应用领域中得到广泛应用<sup>[11]</sup>。由于前馈神经网络具有能以任意精度实现非线性映射、并行分布式信息处理、学习和自适应能力、易用多变量系统等特点<sup>[11]</sup>，因而它在非线性系统的控制中具有独特的优点。本文研究的控制对象是一种非线性极强、对外界干扰较为敏感的时空混沌系统，同时选取与实际情形近似的聚焦磁场  $k_z$

( $t$ )，它对系统产生不同程度的束晕混沌现象，在此情况下我们采用神经网络控制方法进行束晕混沌控制的研究。选取了神经网络直接自适应控制类型，它是直接根据对象的知识来调整控制其内部参数，使得对象的输出误差尽量小。系统在选定的聚焦磁场  $k_z(t)$  下进行演化，束包络半径  $x(t)$  的延时量作为控制器的输入量，并利用前馈多层神经网络 (EBP) 进行训练，将得到的控制量  $u(t)$  反馈到系统中。其控制方法的控制结构如图 5 所示，图中  $u(t)$  的形式为

$$u(t) = gf[w, b, r_b, x(t-1), x(t-2), \dots, x(t-\tau)] \tag{7}$$

式中： $w, b$  为神经网络内部结构权值和阈值； $x(t)$  为输出信号； $x(t-\tau)$  是延时信号； $r_b$  是神经网络控制器的输入期望值，即为束匹配半径； $g$  为线性反馈系数。神经网络输入层和隐含层取对数 S 型激活函数，输出层取双曲正切 S 型函数激活函数，两类均为连续可微的非线性函数。

在控制过程中，进行在线自适应控制，取某一时刻  $t$  延时包络半径  $x(t-\tau)$  作为网络的输入信号，控制器产生的反馈微扰力  $u(t)$  加到方程 (5) 的右端，这时受控的质子束包络方程变为

$$\frac{d^2x}{dt^2} + A_m / \cos 2 ft / x - \frac{0.903}{x} - \frac{1}{x^3} = u \tag{8}$$

当束包络半径  $x(t)$  大于匹配半径  $r_b$  时，对系统进行控制。只要选择合适的神经网络结构和控制参数，可实现对束晕混沌的有效控制。

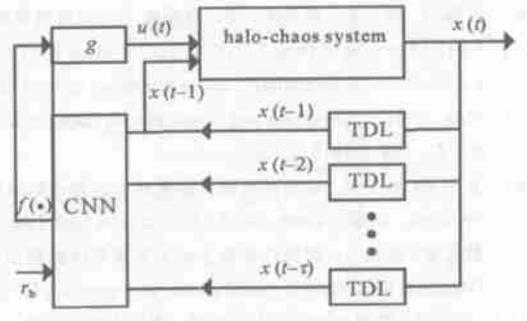


Fig.5 Neural network controller

图 5 神经网络控制器

### 3 控制数值仿真

在系统产生束晕混沌的前提下，取参数  $A_m = 8.0, f = 0.1 (T = 10)$ ，并利用神经网络对其进行控制，选择神经网络结构为  $N_{2,5,1}^3$ ，线性反馈系数  $g = 30$ ，延时反馈量  $\tau = 7$ ，匹配半径  $r_b = 0.789$ ，用计算机进行数值仿真，计算出有无控制的均方差，图 6 是有无控制的时间波形和相图。

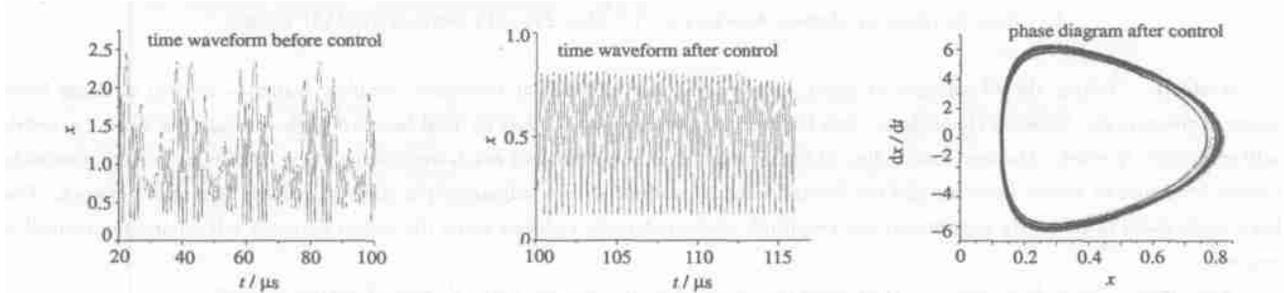


Fig.6 Time waveform and phase diagram before and after control

图 6 有无控制的时间波形和相图

控制结果表明，无控制的均方差为 0.2267，控制后变为 0.0411；加入控制后，有控制的均方差约为无控制时的 1/5，基本上将离子束的包络半径控制到匹配半径，而且其包络抖动明显减少，同时明显抑制了束晕混沌现象。

### 4 结论

本文研究了质子束在磁场周期聚焦通道中传输所产生的束晕混沌现象，对于不同的参数，将产生不同程度的束晕混沌。提出采用神经网络自适应方法对质子束包络方程中的束晕混沌进行控制，并用计算机进行数值计算和仿真。结果表明，选择控制器中合适的神经网络结构和适当的控制参数，可以实现对强流加速器的束晕混沌的很好控制，成功地抑制了束晕混沌现象及其产生的不良后果。这种方法为强流加速器的束晕混沌的有效控制提供了新的方案，对于实验有参考意义。

### 参考文献：

[1] 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[J]. 自然杂志, 2000, 22(2): 63—69. (Fang J Q. A key problem of radioactive

- clean nuclear power apparatus driven by high intensity accelerator. *Nature*, 2000, **22**(2): 63—69)
- [2] 方锦清, 赵耿, 周刘来, 等. 束晕混沌的非线性反馈离散控制[J]. 强激光与粒子束, 2002, **14**(6): 933—937. (Fang J Q, Zhao G, Zhou L L, et al. Nonlinear feedback discrete control of halo chaos. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, **14**(6): 933—937)
- [3] Fang J Q, Chen G R, Zhou L L. Complexity analysis and control strategy for beam halo chaos in ADS[J]. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 2002, **12**(5): 917—930.
- [4] Fang J Q, Chen G R. Controlling halo chaos via wavelet based feedback[J]. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2002, **7**(3): 165—175.
- [5] 方锦清, 陈关荣. 束晕混沌的复杂性理论与控制方法及其应用前景[J]. 物理学进展, 2003, **23**(3): 321—388. (Fang J Q, Chen G R. Complexity theory of beam halo chaos and its control methods with prospective applications. *Progress in Physics*, 2003, **23**(3): 321—388)
- [6] 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运动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)
- [7] Fink Y. 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.
- [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 Beams*, 2000, **12**(5): 647—651)
- [9] 黄志斌, 陈银宝. 周期性聚焦系统中束晕形成的模拟研究[J]. 原子能科学技术, 1999, **33**(5): 385—391. (Huang Z B, Chen Y B. Halo formation in breathing round beams in a periodic focusing channels. *Atomic Energy Science and Technology*, 1999, **33**(5): 385—391)
- [10] 王以炳. 普通物理学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1993. (Wang Y B. Common physics. Beijing: Tsinghua University Press, 1993)
- [11] 徐丽娜. 神经网络控制[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1999. (Xu L N. Neural network control. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 1999)

## Control of beam halo chaos using neural network self adaptation method

HUANG Guoxian<sup>1</sup>, LUO Xiaoshu<sup>1</sup>, FANG Jinqing<sup>2</sup>

(1. College of Physics and Information Engineering, Guangxi Normal University, Guilin 541004, China;

2. China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275281, Beijing 102413, China)

**Abstract:** Taking the advantages of neural network control method for nonlinear complex systems, control of beam halo chaos in the periodic focusing channels of high intensity accelerators is studied by feed forward back propagating neural network self adaptation method. The envelope radius of high intensity proton beam can reach the matched beam radius by selecting suitable control structure of neural network and the linear feedback coefficient, and adjusting the right coefficient of neural network. The beam halo chaos is obviously suppressed and amplitude shake is largely reduced when the neural network self adaptation control is applied.

**Key words:** Beam halo chaos; High intensity proton beam; Neural network self adaptation control