

CNIC-01764

IAE-0210

束晕-混沌的神经网络自适应控制^①

方锦清

(中国原子能科学研究院,北京,102413)

黄国现 罗晓曙

(广西师范大学物理与信息工程学院,桂林,541004)

摘 要

首先研究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,采用的周期磁场聚焦强度形式为与实际相近的余弦函数形式。然后利用神经网络方法对非线性复杂系统控制的优越性,提出前馈反传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,同时束晕-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

^① 国家自然科学基金资助项目: Nos. 70431002, 10247005, 70070147, 19807080。

Control of Beam Halo-Chaos Using Neural Network Self-adaptation Method^①

FANG Jinqing

(China Institute of Atomic Energy, Beijing, 102413)

HUANG Guoxian LUO Xiaoshu

(College of Physics and Information Engineering,
Guangxi Normal University, Guilin, 541004)

ABSTRACT

Taking the advantages of neural network control method for nonlinear complex systems, control of beam halo-chaos in the periodic focusing channels (network) of high intensity accelerators is studied by feed-forward back-propagating neural network self-adaptation method. The envelope radius of high-intensity proton beam is reached to the matching beam radius by suitably selecting the control structure of neural network and the linear feedback coefficient, adjusted the right-coefficient of neural network. The beam halo-chaos is obviously suppressed and shaking size is much largely reduced after the neural network self-adaptation control is applied.

Key words: Beam halo-chaos, Periodic focusing network, High intensity proton beam, Neural network self-adaptation control

^① The project is sponsored by NNSF of China. Nos:70431002,10247005,70070147,19807080.

引言

强流离子加速器是洁净核能开发系统的重要组成部分^[1],它在激光、国防等各个领域有着广泛的应用前景。由于强流加速器中的离子束在磁场周期聚焦元件组成的束流输运网络中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,制约着束流功率的提高,而且导致放射性剂量超标和损坏结构元件等严重不良后果,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。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[2]从一般的混沌控制^[3]策略出发,提出了非线性反馈控制方法,以及文献[4~7]利用小波函数反馈控制法和文献[8,9]利用延时反馈法,实现了对束晕-混沌的有效控制。鉴于神经网络对非线性复杂系统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,本文束晕-混沌的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-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回旋管磁场聚焦通道(简称PFC)中运动,当圆形的质子束粒子满足K-V分布时,在PFC中水平方向运动的束包络无量纲方程为^[10]

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

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,它表征束自生场强度。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^[11]。

当系统参数为:调谐衰减系数 $\eta = 0.8$,失匹配因子 $M = 2$,真空相移 $\sigma_0 = 115^\circ$ 时,可计算出束匹配半径 $r_b = 0.7891642$ 和导流系数 $K = 0.9032079$ 。此时包络方程(1)为:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + k_z(t)x - \frac{0.9032079}{x} - \frac{1}{x^3} = 0 \quad (2)$$

1.2 磁聚焦强度 $k_z(t)$ 的确定

强流加速器中的离子束在运行中因产生束晕-混沌现象而导致不良后果,为了解决这一问题,采用磁场聚焦方法,即在加速器管道外每隔一定的距离套上通电回旋管,用来抑制离子束的散射。对于磁聚焦强度 $k_z(t)$ 的选取,文献[12]取如图1所示方波形式的函数,文献[10]取 $k_z(t)$ 的平均值 $\bar{k}_z(t)$ 。而回旋管磁场聚焦通道中,如图2所示的实际一段有限长通电回旋管中的磁感应强度大小由式(3)决定^[13]。

$$B = \frac{1}{2} \mu_0 n I (\cos\beta_1 - \cos\beta_2) \quad (3)$$

式中: μ_0 为真空磁导率; n 为单位长度线圈数; I 为通电电流。图3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 $k_z(t)$

$$k_z(t) = A_m |\cos 2\pi ft| \quad (4)$$

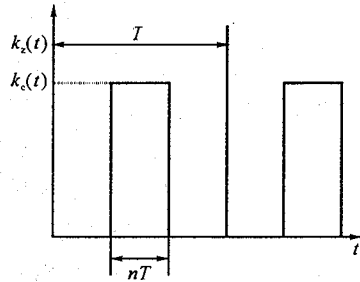


图1 周期性聚焦磁场 $k_z(t)$ 的剖面图

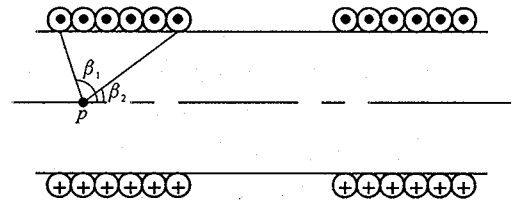


图2 通电磁场回旋管图

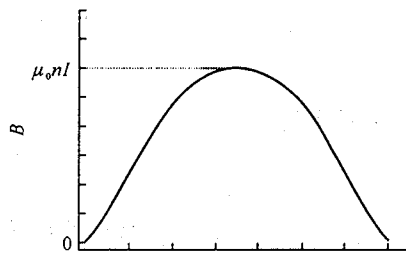


图3 通电回旋管磁感应强度 B 分布图

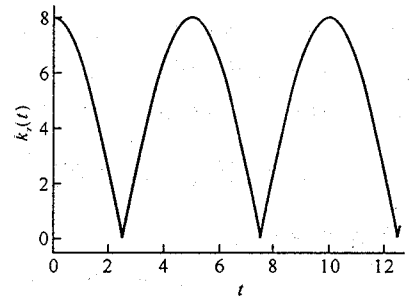


图4 磁场周期函数 $k_z(t)$ 的曲线

图4表示当 $A_m=8.0, f=0.001$ 的曲线,该曲线能很好地反映一段有限长的回旋管磁感应强度大小分布特点。其中 A_m 为磁感应强度幅值, $T=1/f$ 为相邻两个回旋管之间的距离。此时包络方程(2)变为

$$\frac{d^2 x}{d^2 t} + A_m |\cos 2\pi f t| x - \frac{0.903\ 207\ 9}{x} - \frac{1}{x^3} = 0 \quad (5)$$

研究表明,当方程(5)中取不同的 A_m, f 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 $\dot{x}=y, t=z(t)$, 则有 $\dot{x}=y, \dot{z}(t)=1$, 方程(5)变为

$$\begin{cases} \dot{x} = y \\ \dot{y} = -A_m |\cos 2\pi f z| x + \frac{0.903\ 207\ 9}{x} + \frac{1}{x^3} \\ \dot{z} = 1 \end{cases} \quad (6)$$

我们对参数 A_m, f 取不同的值,初值为 $x_0=0.2, y_0=0.7, z_0=0.01$, 时间步长为 $\Delta t=0.001$, 对系统进行计算机模拟, 得出相应的相图, 如图5所示。

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。

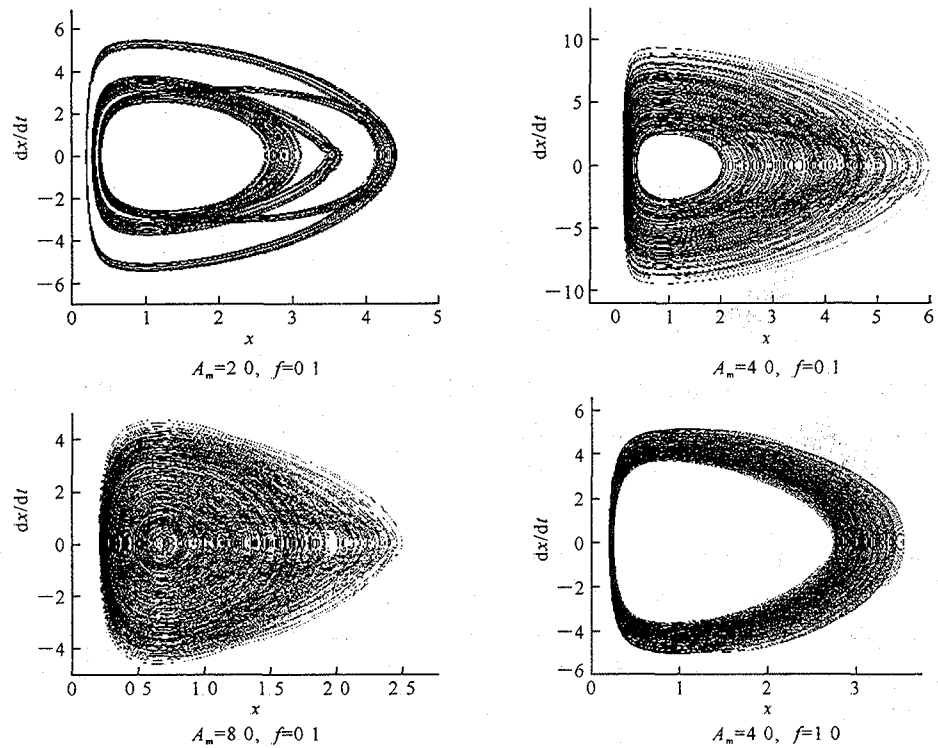


图5 不同参数 A_m, f 的相图

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如系统辨识、自动控制、故障诊断、模式识别中得到广泛应用^[14]。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^[15],因而它在非线性系统的控制中具有独特的优点。在控制方法上有直接逆动态控制、间接自校正控制、模型参考自适应控制、PID内模控制、前馈反馈控制、预测控制、自适应评判控制多种控制结构^[15~17]。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,我们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的内部参数,使得对象的输出误差尽量小。并利用前馈多层神经网络(EBP)进行训练。其控制方法的控制结构如图6所示,图6中函数 f 形式取为:

$$f(t) = f[w, b, r_b, x(t-1), x(t-2), \dots, x(t-\tau)]$$

$$u(t) = gf(t)$$

(7)

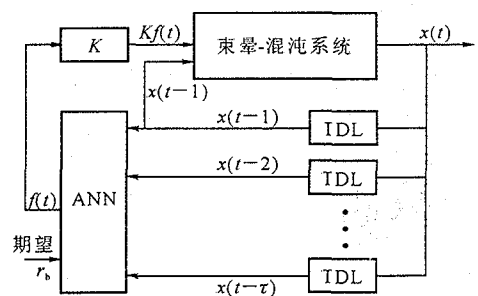


图6 神经网络控制器

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, 即这时受控的质子束包络方程变为:

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + A_m |\cos 2\pi ft| x - \frac{0.903\ 207\ 9}{x} - \frac{1}{x^3} = u \quad (8)$$

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。

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 $N_{2,5,1}$, 线性反馈系数 $g=30$, 延时反馈量 $\tau=7$, 匹配半径 $r_b=0.789\ 164\ 2$, 用计算机进行数值仿真, 计算出有无控制的均方差, 并描绘包络位移曲线和相图, 如图 7 所示。

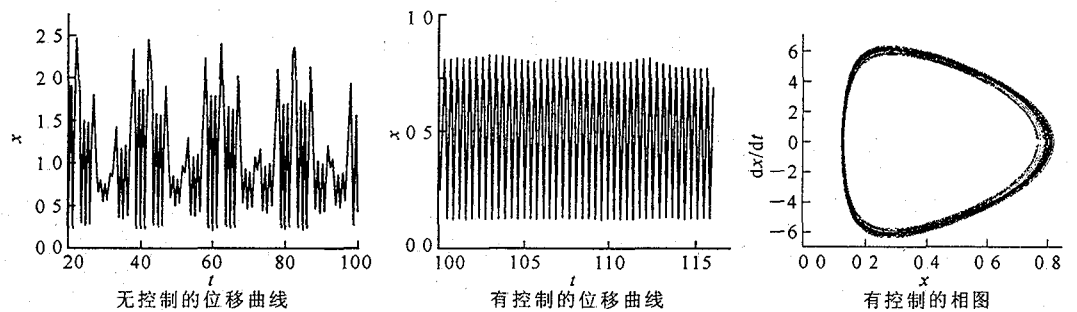


图 7 对包络位移的控制数值结果

控制结果表明, 无控制的均方差为 0.226 7, 控制后变为 0.041 1, 只有无控制时均方差的 1/5 倍多, 加入控制后, 基本上将离子束的包络半径控制在匹配半径上, 而且其包络抖动大小明显减少, 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元件组成的束流运输网络中传输所产生的束晕-混沌现象, 对于不同的参数, 产生不同程度的束晕-混沌。并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, 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, 较好地抑制了因束晕-混沌现象而产生的不良后果。这种方法为强流加速器束晕-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. 自然杂志, 2000, 22: 63
- 2 方锦清. 自然科学进展, 2001, 11: 113
- 3 方锦清. 物理学进展, 1996, 16: 137
- 4 方锦清, 高远, 翁甲强, 陈关荣, 罗晓曙. 小波函数反馈法控制束晕-混沌. 研究通信, 2001, 22(6): 368
- 5 方锦清, 高远, 翁甲强, 罗晓曙, 陈关荣. 小波函数反馈法实现对强流束晕-混沌的有效控制. 物理学报, 2001, 50(3): 0435~05
- 6 Fang J Q, Gao Y, Weng J Q, Chen G R, Luo X S. Nature, 2000, 22: 38(in Chinese)[方锦清, 高远, 翁甲强, 陈关荣, 罗晓曙. 自然杂志, 2000, 22: 38]
- 7 高远, 翁甲强, 方锦清, 罗晓曙. 强流加速器中束晕-混沌的小波间隔反馈控制. 物理学报, 2001, 50(08): 1440~07
- 8 朱伦武, 翁甲强, 高远, 方锦清. 强流加速器中束晕-混沌的延时反馈控制. 物理学报, 2002, 51(07): 1483~06
- 9 朱伦武, 翁甲强, 高远, 方锦清. 控制束晕-混沌的延时反馈法. 广西师范大学学报(自然科学版), 2002, 20(06): 9~13
- 10 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. 强激光与粒子束, 2000, 12(5): 647~651
- 11 Fink Y. Phys. Rev. E, 1997, 50: 7557
- 12 黄志斌, 陈银宝. 周期性聚焦系统中束晕形成的模拟研究. 原子能科学技术, 1999, 33(5): 385~391
- 13 王以炳. 普通物理学. 北京: 清华大学出版社, 1993. 3
- 14 谭文, 王耀南, 刘祖润, 周少武. 非线性系统混沌的神经网络控制. 物理学报, 2001, 51(11): 2463~04
- 15 徐丽娜. 神经网络控制. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1999. 5
- 16 史忠科. 神经网络控制理论. 西安: 西北工业大学出版社, 1997. 11
- 17 李学桥等. 神经网络·工程应用. 重庆: 重庆大学出版社, 1996. 8