

强流束晕-混沌的模糊逻辑控制研究

高远^{1,2}, 袁海英², 谭光兴², 罗文广²

(1. 武汉理工大学 信息工程学院, 湖北 武汉 430070;

2. 广西工学院 电子信息与控制工程系, 广西 柳州 545006)

摘要:以周期性磁场聚焦传输通道中的 K-V(Kapchinskij-Vladimirskij)分布离子束为例,引入带偏置的升余弦函数近似刻画实际磁场,理论分析了通道中强流离子束的束晕-混沌动力学行为。针对束晕-混沌的控制问题,提出了束晕-混沌的模糊逻辑控制方法。模糊控制器采用 Mamdani 推理系统,其输出作为控制因子线性调整外部磁场强度。用模糊相平面法分析了控制系统的稳定性。仿真结果显示:在控制条件下,混沌变化的束包络半径被稳定控制;将该方法应用于多粒子模型,消除了束晕及其再生现象,束的品质获得较大提高。该模糊控制方法具有不依赖束输运数学模型、控制器简单、磁场调节呈线性关系、易于工程实现等优点。

关键词:强流离子束;周期聚焦磁场;束晕-混沌;模糊控制

中图分类号:O415.5;TL501

文献标志码:A

文章编号:1000-6931(2012)02-0223-06

Control of Beam Halo-Chaos Using Fuzzy Logic Controller

GAO Yuan^{1,2}, YUAN Hai-ying², TAN Guang-xing², LUO Wen-guang²

(1. Institute of Information Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

2. Department of Electronic Information and Control Engineering, Guangxi University of Technology, Liuzhou 545006, China)

Abstract: Considering the ion beam with initial K-V distribution in the periodic focusing magnetic filed channels (PFCs) as a typical sample, a fuzzy control method for controlling beam halo-chaos was studied. A fuzzy proportional controller, using output of fuzzy inference as a control factor, was presented for adjusting exterior focusing magnetic field. The stability of controlled system was proved by fuzzy phase plane analysis. The simulation results demonstrate that the chaotic radius of envelope can be controlled to the matched radius via controlling magnetic field. This method was also applied to the multi-particle model. Under the control condition, the beam halos and its regeneration can be eliminated effectively, and that both the compactness and the uniformity of ion beam are improved evidently. Since the exterior magnetic field can be rather easily adjusted by proportional control and the fuzzy logic controller is independent to the mathematical model, this method has adaptive ability and is easily realized in experi-

ment. The research offers a valuable reference for the design of the PFCs in the high-current linear ion accelerators.

Key words: high-current ion beam; periodic-focusing magnetic filed; beam halo-chaos; fuzzy control

强流离子束在洁净核能的开发利用、放射性药物生产、核废物嬗变及重离子裂变等诸多方面有着重要的应用和发展潜力。强流离子束在加速器传输通道中会产生束晕-混沌现象,这不仅降低束流功率,且有损加速器的结构性元件,对环境产生超标的放射性污染,因此有必要对强流束晕-混沌现象进行有效控制。迄今,人们不仅探索了束晕-混沌的形成机制^[1-4],而且还提出了一些控制方法^[5-9]。文献[5-8]设法构造非线性反馈控制器,实施外力控制,控制器形式及控制因子的选择是关键。文献[9]从工程实现的角度出发,借助束输运理论的粒子-束核数学模型,推导出外部聚焦磁场的调节控制器,以实现**对强流束晕-混沌的控制**,磁场控制器形式较复杂,实现较困难。因此,针对强流束晕-混沌的控制问题,有必要研究利于工程实现的控制方法和策略。

考虑磁场的边缘效应,本文首先引入带偏置的升余弦函数代替以往研究所用的周期方波函数来刻画实际周期性聚焦磁场,并借助束流包络及单离子的传输动力学方程分析束晕-混沌的产生机制。鉴于模糊控制技术具有控制器不依赖被控对象数学模型的精确描述,设计简单,适用于许多非线性系统控制等特点,同时束晕-混沌是一种非线性极强的时空混沌,所以本文从混沌控制的策略出发,以周期性磁场聚焦通道中的 K-V 分布离子束为例,研究强流束晕-混沌的模糊控制方法,并基于 Mamdani 模糊推理系统设计用于磁场比例调节的模糊控制器。

1 粒子束输运模型及其混沌特性

根据束传输相空间动力学中的粒子-束核模型,对于处于周期聚焦磁场通道中初始空间为均匀分布的 K-V 分布离子束,其包络的无量纲动力学方程的形式^[3-4]为:

$$\frac{d^2r_b}{ds^2} = -\kappa(s)r_b + \frac{K}{r_b} + \frac{1}{r_b^3} \tag{1}$$

式中: $s = v_0 t$, v_0 为束流的轴向速度; r_b 为束包络半径; K 为束流的导流强度系数; $\kappa(s)$ 为周期为 S 的周期性磁场强度,满足关系 $\kappa(s) = \kappa(s + S)$ 。对于 K-V 分布离子束,按照粒子-束核模型,单离子径向运动的无量纲方程^[4]可表示为:

$$\begin{cases} \frac{d^2r}{ds^2} = -\kappa(s)r + \frac{K}{r_b^2}r & |r| \leq r_b \\ \frac{d^2r}{ds^2} = -\kappa(s)r + \frac{K}{r} & |r| > r_b \end{cases} \tag{2}$$

其中: r 为离子偏离束中心的径向运动半径。当 $dr_b/ds = 0$ 和 $d^2r_b/ds^2 = 0$ 时,束包络半径对应 1 个匹配半径 r_{b0} 。

由于聚焦通道中周期性磁场的实际情况与螺线管聚焦磁场类似^[10],并考虑磁场的边缘效应,本文引入具有偏置的升余弦函数来刻画实际的周期性聚焦磁场,即:

$$\kappa(s) = \kappa_0 (|\cos 2\pi ft| - b) \tag{3}$$

式中: κ_0 为磁场强度的幅度; b 为无磁场区域调节因子; f 为磁场变化频率,该磁场的周期为 $S = 0.5/f$ 。当 $\kappa_0 = 12.07$ 、 $b = 0.2$ 、 $f = 0.5$ Hz 时,聚焦磁场 $\kappa(s)$ 如图 1 所示。

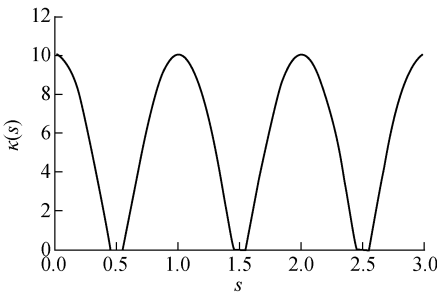


图 1 聚焦磁场示意图
Fig. 1 Sketch of focusing field

选取以下参数:束导流系数 $K = 0.903\ 2$, 周期性聚焦场的幅度 $\kappa_0 = 12.07$, $b = 0.2$, 频率 $f = 0.5$ Hz, 可计算得到束匹配半径 $r_{b0} = 0.707\ 8$ 。在这些参数情况下,取积分步长 $\Delta s = 0.02$,失匹配的初始条件 $r_b(0) = 1.415$, $\rho(0) = 0.5$, $r(0) = 0.4$, $v(0) = 0.4$,采用四阶龙格-库

塔算法求解式(1)和(2)。由于束包络方程的最大 Lyapunov 指数计算为 2.247 4,因此束包络的演化呈混沌状态。图 2 示出包络半径演化的单涡卷混沌吸引子。图 3 为单离子径向运动的混沌吸引子图。由以上可知,当束流失匹配时,束核与离子间发生非线性相互作用,通过能量交换而产生混沌现象,使得一些离子无规则径向运动的能量增大,从而导致这些离子径向逃逸并在束核周围形成有害的束晕现象。

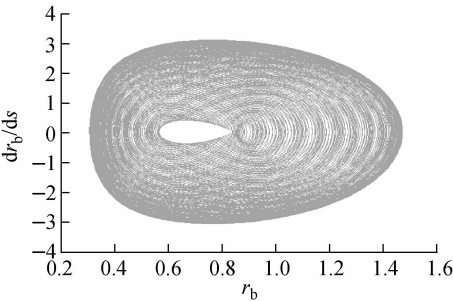


图 2 包络半径的单涡卷混沌吸引子
Fig. 2 Single scroll chaotic attractor of envelope

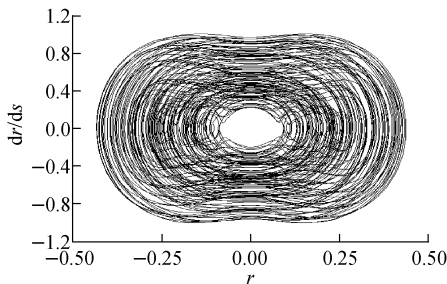


图 3 离子径向运动的混沌吸引子
Fig. 3 Single scroll chaotic attractor of ion

2 束晕-混沌的模糊控制方法

2.1 模糊控制的原理及描述

针对周期聚焦通道中强流束晕-混沌的控制问题,文献[5]采用负反馈非线性外力控制器 u 作用于方程(1),即:

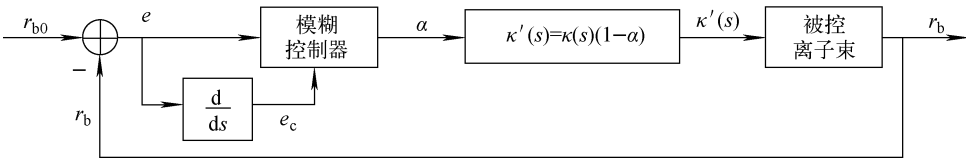


图 4 模糊控制原理图
Fig. 4 Scheme of fuzzy control

$$\frac{d^2 r_b}{ds^2} = -\kappa(s)r_b + \frac{K}{r_b} + \frac{1}{r_b^3} + u \quad (4)$$
其中,控制器 u 的函数形式选择很重要。在工程中, u 的作用体现在对磁场参数 $\kappa(s)$ 的调节实现。模糊控制技术因具有控制器设计简单,不要求知道被控对象精确的数学模型,且控制具有较强自适应性等优点,因此,本文研究外部磁场的模糊控制方法实现控制强流束晕-混沌。图 4 为模糊控制原理图,其中,基于 Mamdani 模糊推理系统的模糊控制器^[11]描述如下。

1) 两输入单输出的结构,输入变量分别为 $e = r_{b0} - r_b, e_c = de/ds = -dr_b/ds$,所对应的模糊语言变量分别为 E 和 E_c ;输出变量是 $\kappa(s)$ 的比例调节控制因子 α ,对应的模糊语言变量为 C 。

2) E, E_c 和 C 的模糊集均为 {负大(NB),负小(NS),零(Z),正小(PS),正大(PB)}。

3) E, E_c 和 C 的论域分别为 $\{-1, -0.5, 0, 0.5, 1\}, \{-3, -1.5, 0, 1.5, 3\}, \{-40, -20, 0, 20, 40\}$ 。

4) e, e_c 和 α 的隶属函数采用 Z 型、Sigmoid 型及三角形函数相结合,相关输入、输出的隶属函数波形如图 5 所示。

5) 建立的模糊推理规则列于表 1。该表反映了当误差绝对值向增大的方向变化时,可根据误差大小分别实施较强或一般的反馈控制作用,以抑制动态误差;而当误差向绝对值减小的方向变化时,可采取保持等待措施,其相当于实施开环控制,这符合专家控制的负反馈设计思想。当输入 e, e_c 到模糊控制器,根据表 1 进行模糊推理得到模糊输出。模糊推理运算包括模糊输入子集的直积运算和模糊合成运算。由表 1 可见,控制规则语句共有 25 条,各语句间是“或”的关系,每条规则语句分别满足:

- 语句 1:if E is NB and E_c is NB then C is NB
...
语句 25:if E is PB and E_c is PB then C is PB

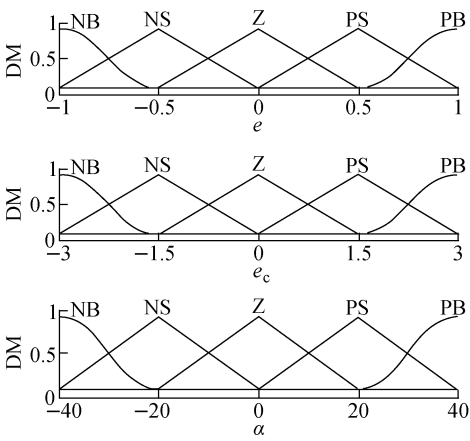


图5 e 、 e_c 和 α 的隶属函数

Fig. 5 Membership function of e , e_c and α

表1 模糊推理规则

Table 1 Fuzzy inference rule

α	e_c				
	NB	NS	Z	PS	PB
e NB	NB	NB	NS	NS	Z
NS	NB	NS	NS	Z	PS
Z	NS	NS	Z	PS	PB
PS	NS	Z	PS	PS	PB
PB	Z	PS	PS	PB	PB

6) 通过面积重心法解模糊,输出得到用于磁场调节的控制因子 α 。

为降低工程实现代价,本文采用磁场的模糊比例调节来实现对束晕-混沌的有效控制,比例调节形式为:

$$\kappa'(s) = \kappa(s)(1 - \alpha) \tag{5}$$

在磁场参数的模糊比例调节控制作用下,方程(1)、(2)中 $\kappa(s)$ 变为 $\kappa'(s)$ 。

2.2 控制稳定性分析

模糊控制器不同于常规的控制器,采用微分方程、传递函数或状态方程等精确的数学描述,而是通过定义模糊变量、模糊集合及相应的隶属度函数,采用1组模糊条件语句来描述输入与输出之间的映射关系。由于束晕-混沌具有非线性极强的动力学方程,通过非线性系统的T-S模糊建模来设计模糊控制器并进行严格的可控性解析论证很困难,因此,本文采用

Mamdani模糊推理系统设计语言型模糊逻辑控制器来研究束晕-混沌的控制问题。对于语言型模糊系统可采用模糊相平面方法来检验模糊系统的控制稳定性和分析系统的性能。若相轨迹终止在一点,说明系统是稳定的;若相轨迹终止在零点,说明实现控制目标^[12]。本文的控制方法涉及二维模糊系统,实测数据 e 、 e_c 作为模糊控制器的输入,所以可采用 e 、 e_c 的数值画出相平面轨迹图。

构造束包络方程的Lyapunov函数为:

$$L = \frac{1}{2}(r_{b0} - r_b)^2 = \frac{1}{2}e^2 \tag{6}$$

对 L 时间求导,可得:

$$\frac{dL}{ds} = e \cdot e_c = -(r_{b0} - r_b) \frac{dr_b}{ds} \tag{7}$$

采用上述有关参数,为比较控制前后效果,先让式(1)和(2)自由演化2000个时间步数,然后再对聚焦磁场施加式(5)的调节控制。图6为 e 与 e_c 的相轨迹图。由图6可见,施加控制后,相轨迹迅速从混沌状态终止到零点,这表明模糊控制方法可控,且使混沌变化的包络半径 r_b 稳定控制在匹配半径 r_{b0} 。图7为单离子径向运动半径的演化图。由图7可看出,原本不规则变化的离子径向运动半径经控制后,很快稳定趋于单周期轨道。由以上的控制分析也可知,本文选用的模糊控制规则完备且有效。由于控制后 $dL/ds = e \cdot e_c = 0$,因此模糊控制系统符合Lyapunov函数稳定性要求。同时,也计算出受控后的束包络方程,其正的最大Lyapunove指数也变为负值-0.5297,这也说明混沌运动得以稳定控制。

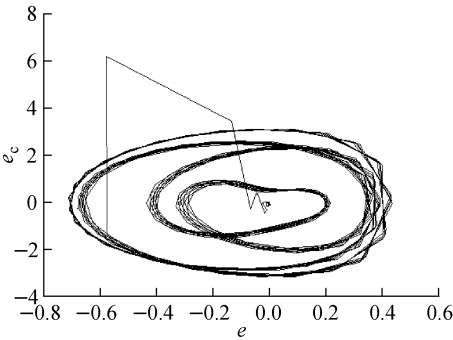


图6 e 与 e_c 的相平面

Fig. 6 Phase plane of e and e_c

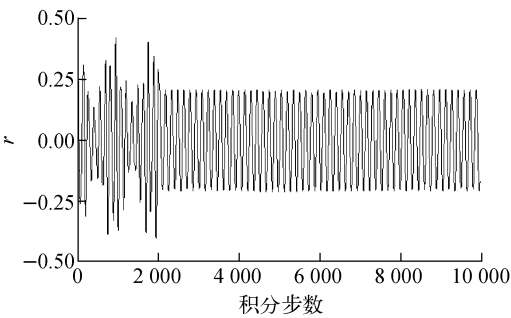


图 7 离子径向运动半径的演化

Fig. 7 Evolution of transverse motion radius of ion

3 控制方法在多粒子模型中的仿真及结果分析

3.1 多粒子模拟的数学模型

多粒子模拟考虑多粒子空间电荷所引起的自生场。对于 K-V 分布束,其包络运动方程仍为式(1)。在自生场作用下,根据粒子-束核模型,单离子沿 x 、 y 方向的径向运动方程^[2]分别为:

$$\begin{cases} \frac{d^2x}{ds^2} + \kappa(s)x + \frac{q}{\gamma_b^3\beta_b^2mc^2} \cdot \frac{\partial\Phi(x,y,s)}{\partial x} = 0 \\ \frac{d^2y}{ds^2} + \kappa(s)y + \frac{q}{\gamma_b^3\beta_b^2mc^2} \cdot \frac{\partial\Phi(x,y,s)}{\partial y} = 0 \end{cases}$$

(8)

式中: q 为离子电荷量; m 为离子质量; c 为真空光速; β_b 为离子束轴向速度与真空光速的比值; $\gamma_b=1/\sqrt{(1-\beta_b^2)}$ 为相对论因子; $\Phi(x,y,s)$ 为满足 Poisson 电位方程的电荷自生场。多粒子模型可通过 PIC 程序数值求解。

3.2 多粒子模拟参数及统计物理量描述

多粒子模拟系统取 50 000 个离子,演化步长 0.01,采用离子束均方根半径 r_{rms} 代替束包络半径 r_b 作为控制反馈变量,在上述系统参数

及模糊控制条件下,对初始失匹配的 K-V 分布束进行 3 000 个周期的控制模拟。本文沿用文献[8]所引入的束晕强度因子(位置大于 $1.75r_{b0}$ 的离子数与束离子总数的比值)的最大值 H_{max} 、束离子最大径向运动半径 r_{max} 、单周期内离子束径向运动的平均发射度最大值 $\epsilon_{\text{av,max}}$ 、单周期内离子的横向截面平均动量平方的最大值 $P^2_{\text{max,av}}$ 等统计物理量来描述束晕-混沌的控制效果。采用式(5)起控时,实施每间隔周期 S 便对升余弦磁场的幅度 κ_0 进行 1 次模糊比例调节的控制策略。

3.3 多粒子模拟控制结果及分析

表 2 列出 K-V 分布束有、无模糊比例调节磁场参数控制条件下,演化 1 000 个周期后,各统计物理量的数值比较。由表 2 可见,在有控制作用时, H_{max} 为零,这说明束晕及其再生现象得以消除; $P^2_{\text{max,av}}$ 减少了 3/4 多,这反映离子与束核在径向的非线性作用及离子获得径向逃逸束核的能量大幅降低; $r_{\text{max}}/r_{b0}=1.116$,其大小是无控制时的 1/4 左右,表明束包络几乎在匹配半径附近; $\epsilon_{\text{av,max}}$ 的明显减小说明离子束紧密性及均匀性得到了很好改善。

图 8 示出有、无聚焦磁场参数模糊比例控制条件下,在第 2 400 个周期处,横截面上的离

表 2 有、无控制条件下各统计物理量的数值结果比较
Table 2 Comparison of properties of beam halo-chaos with K-V initial proton distributions before and after control

控制条件	H_{max}	r_{max}/r_{b0}	$P^2_{\text{max,av}}$	$\epsilon_{\text{av,max}}$
有	0.000	1.125	0.927	1.936
无	0.144	4.432	4.081	4.188

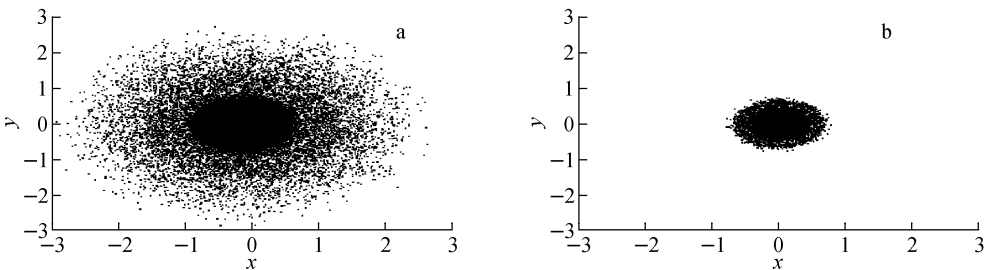


图 8 有、无控制条件下束横截面上的离子分布

Fig. 8 Ion distribution in (x,y) space periodic section

a——无控制;b——有控制

子分布。由图8可看出,不加控制时,由于空间电荷的相互作用导致离子与束核间的非线性效应和能量交换,一些离子从束核中逃逸并在束核周围形成束晕;有控制时,束流横截面积被压缩到原来的 $1/9$ 左右,这表明在模糊控制作用下,束晕现象明显消除,束流的品质得到很好改善。

4 结论

本文以在周期性聚焦磁场通道中的K-V分布强流离子束为例,提出了束晕-混沌的外部聚焦磁场模糊比例控制方法,并对该控制方法进行了稳定性检验分析。模拟结果表明了该模糊控制方法的有效性。该方法的主要优点是:通过调节外部聚焦磁场来实现控制束晕-混沌,符合工程设计;模糊控制器不依赖离子束运输的数学模型,磁场的线性调节规律易于实现,避免以往研究非线性反馈外力控制器或磁场调节控制器难以寻找和实现的困难,并提高了控制自适应性;随着高速计算机及模糊控制芯片的发展,该方法利于工程试验。研究结果为实用强流离子加速器的聚焦磁场通道的研制提供了参考。

参考文献:

- [1] OKAMOTO H, IKEGAMI M. Simulation study of halo formation in breathing round beams[J]. Phys Rev E, 1997, 55(4): 4 694-4 705.
- [2] 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): 5 679-5 687.
- [3] FINK Y, CHEN C, MARABLE W P. Halo formation and chaos in root-mean-square matched beams propagating through a periodical focusing channel[J]. Phys Rev E, 1997, 55(6): 7 557-7 562.
- [4] WANG T S F. Particle-core study of halo dynamics in periodic-focusing channels[J]. Phys Rev E, 2000, 61(1): 855-861.
- [5] 方锦清. 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, 2001, 12(5): 647-651.
FANG Jinqing. Nonlinear feedback control of halo-chaos in high-intensity linacs[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2001, 12(5): 647-651 (in Chinese).
- [6] 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 Jinqing, GAO Yuan, WENG Jiaqiang, et al. Controlling beam halo-chaos using wavelet function feedback method[J]. Acta Phys Sin, 2001, 50(3): 435-440(in Chinese).
- [7] 余海军, 白龙, 翁甲强, 等. 周期聚焦磁场中束晕-混沌的实 Morlet 小波函数控制[J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(6): 1 017-1 022.
YU Haijun, BAI Long, WENG Jiaqiang, et al. Control beam halo-chaos using real Morlet wavelet function in a periodic-focusing channel[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(6): 1 017-1 022(in Chinese).
- [8] 杨翠云, 翁甲强, 刘海英, 等. 以小区域内的离子数为控制信息实现束晕的有效控制[J]. 物理学报, 2008, 57(11): 6 883-6 887.
YANG Cuiyun, WENG Jiaqiang, LIU Haiying, et al. Control of beam halo-chaos by the number of ions in small fixed regions[J]. Acta Phys Sin, 2008, 57(11): 6 883-6 887(in Chinese).
- [9] GAO Y, LUO X S, FANG J Q, et al. Controlling beam halo-chaos by adaptive control exterior magnetic field[J]. Commun Theor Phys, 2004, 42(7): 64-68.
- [10] 王以炳. 普通物理学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1993: 133-160.
- [11] 韩俊峰. 模糊控制技术[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2001: 67-100.
- [12] 吴忠强. 非线性系统的鲁棒控制及应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005: 10-23.