

光动力学系统神经网络系统辨识 及自适应控制之性能分析

杨怀江

(中国科学院长春光学精密机械研究所应用光学国家重点实验室 长春 130022)

摘要 分析了光动力学系统神经网络常规 BP 辨识与混沌加速 BP 辨识的异同,并对二者相应的两种光动力学系统神经网络自适应控制技术的性能进行了比较。在此基础上,本文对光动力学系统神经网络自适应控制系统的设计原则进行了讨论。

关键词 光动力学系统 自适应控制 神经网络 系统辨识

1 研究背景

光动力学系统的运转状态十分丰富,例如具有倍周期分叉规律的布拉格声光系统,在混沌前区可实现周期1及周期2, 4, 8...等偶数序列周期输出,在混沌区中可以实现3, 5, 7...等奇数序列周期输出,在周期窗口内又可实现6, 12...等偶数周期输出,因而其输出周期覆盖了几乎所有的可能模式。由于周期转换只需对某一可控结构参数进行调整,因此利用光动力学系统构造光学周期信号发生器比利用调制器调制常规光学系统输出强度的常规方法优越得多,因为一般调制器的变化模式有限,而且在调制时输出光的强度也有所降低。

由于实际光动力学系统的运转规律十分复杂,光动力学系统的理论模型与实际表述之间总是存在一定的差异,因此控制光动力学系统首先必须解决光动力学系统的系统辨识或模型重构问题,即需要从实际光动力学系统的输出时间序列中恢复出处于当前动力学状态的系统动力学表述。本文作者为解决此问题曾先后提出了光动力学系统前向神经网络常规 BP 辨识技术^[1]及混沌加速 BP 辨识技术^[2],由于这两种辨识技术的物理内涵不同,其对重构问题的解决程度也多有不同。

辨识的最终目的是为了得到光动力学系统的自适应参考模型,也即辨识实际上解决的是

控制自参考模型的重构问题。为与上述两种辨识技术所得的自参考模型相对应, 本文作者又分别提出了光动力学系统常规神经网络自适应控制技术^[3]与混沌加速神经网络自适应控制技术^[4]。虽然此两种光动力学神经网络自适应控制技术均是以混沌控制方法利用光动力学系统构造光学周期信号发生器的实现技术, 但由于两种技术中自参考模型的构造过程以及实现精度上的差别, 这两种控制技术的实施效果以及适用性也是不同的。

本文首先对两种辨识技术的物理内涵进行协同学意义上的分析, 以求更深刻地揭示出辨识效果不同的内在物理原因; 其次, 本文对相应的两种控制技术进行评述, 指出常规控制技术仅适于对一般的状态进行锁定控制, 而混沌加速控制技术可完成对复杂状态的快速、高精度的在线控制; 第三, 为对光动力学系统神经网络自适应控制技术的性能加深了解, 文中以布喇格声光系统的数值仿真控制为例, 具体分析了上述两种控制方法中较为理想的一种—混沌加速控制技术中控制时间、控制精度、控制陡度三者之间的关系; 最后, 本文对光动力学系统神经网络自适应控制系统的设计进行了讨论, 并给出了具体设计时所应遵循的一般性设计原则。

2 常规 BP 辨识技术与混沌加速 BP 辨识技术

利用前向神经网络对光动力学系统进行系统辨识是基于下述定理: 三层以上的前向神经网络在 BP 算法的支持下可任意逼近定义于 $(0, 1)$ 上的任意函数^[5]。易见, 此定理在理论上保证了利用前向神经网络对光动力学系统进行系统辨识是可行的, 但要求作为系统辨识器的前向神经网络至少含有一个隐含层。考虑到光动力学系统一般均为实际意义上的单输入、单输出系统以及为简化神经网络结构设计等方面的考虑, 前述两种辨识技术中均采用了 1: 4: 1 拓扑结构的前向神经网络作为光动力学系统辨识器。

应该注意的是, 上述定理并未保证辨识精度及所需辨识时间的有限性, 因无限逼近过程隐含的是一个在精度、时间上均为无限的渐进过程, 即若追求任意高的辨识精度必须以无限长的辨识时间作为代价, 或是在有限长的辨识时间内所达到的辨识精度不可能无限高。因此, 利用前向神经网络对光动力学系统进行的系统辨识必然是在有限时间内完成的有限精度辨识, 从而网络初始状态及算法本身的具体特征(例如学习参数的选定)必然限定达到预定辨识精度时所需辨识时间的长短。

由于系统辨识是一种动态模式识别, 因而可从协同模式识别的角度对此进行解释。按协同模式识别的观点, 模式的识别过程实际上是模式的形成过程, 因此可将模式形成过程分为两个阶段, 第一阶段为模式框架的建立过程, 在这个阶段辨识均方差的变化十分剧烈, 其对应网络权重的粗调过程; 第二阶段为模式细节的建立过程, 此阶段均方差的下降较为缓慢, 因而对应网络权重的细调过程。显然, 从与欲建立的模式无任何关联的模式基础上开始的模式形成过程首先需解决模式基本框架结构的形成, 而从有关联的模式基础上进行的模式形成过程可以直接越过或大大缩短这个过程。

对于常规 BP 辨识, 网络初始状态选为具有噪声性质的归一化分布, 即网络各个节点间的初始权重为 $(0, 1)$ 上的随机数, 由于此网络初始分布对应的是噪声模式, 而噪声模式对任何模式而言均保持了一种最大程度上的无关性, 故常规 BP 辨识必然包括前述的模式框架建立过程及模式细节细调过程, 则为达到预定的辨识精度所需的辨识时间已完全取决于相应的学习算法—BP 算法, 由于 BP 算法本身的梯度下降本质所决定的小调整阶距过程, 辨识自然要持

续很长的时间方可达到预定精度。对于混沌加速 BP 辨识,网络的初始状态选为归一化的(0, 1)上的混沌分布。由于欲辨识目标(光动力学系统的某个周期态)的轨道嵌入在奇异吸引子中使得在结构上混沌的网络初始状态与欲辨识的状态间存在相关性,而这种相关性便是模式框架建立粗调过程所欲达到的结果,因此混沌加速辨识已基本不需要模式框架的建立过程,同时这种相关性对模式细节建立过程中的小阶距调整过程也予以加速,因而辨识过程大为缩短。

由此可见,混沌加速 BP 算法由于考虑了待辨识目标-光动力学系统的混沌运转特点,故利用其可实现对光动力学特定输出状态的快速、高精度辨识,即具有在线辨识的功能;而常规 BP 辨识由于并未考虑辨识对象的任何特点,故其辨识时间较长,且难以辨识复杂状态,因此基本上不具备在线辨识的可能性,但对于一些简单状态的辨识,常规 BP 辨识还是有其优点的,因为可省去混沌加速辨识过程中须对混沌态进行辨识的前期准备工作。

3 常规神经网络自适应控制技术与混沌加速神经网络自适应控制技术

光动力学系统自适应控制的目的是使光动力学系统的运转自适应地锁定在任一稳定的动力学状态或按需要在任意的两个稳定运转状态之间进行转换。由于状态锁定控制是使系统在偏离原状态后恢复至原运转状态,故其实质上与使系统从一个运转状态向另一个状态变化的状态转换控制是等效的。本文以下以状态锁定控制为例对常规神经网络自适应控制技术与混沌加速神经网络自适应控制技术之间的异同进行比较分析。

对光动力学系统进行神经网络自适应状态锁定控制的实施背景为:由于某种特殊的要求,作为光学周期信号发生器运转的光动力学系统运转中出现的某一运转状态需要稳定地保持。自适应状态锁定控制的实施过程为:

- 1) 当期待运转状态出现后,神经网络系统辨识器的学习过程启动,依辨识方差信号对神经网络的权重分布进行调整;
- 2) 当辨识达到预定精度后学习过程停止(即网络权重不再进行调整),系统辨识阶段结束而控制阶段开始;
- 3) 当某些干扰出现使光动力学系统的控制参数发生变化因而运转状态出现突然偏离时,因光动力学系统的输出与神经网络系统辨识器的输出不一致,则自适应反馈自动启动,使系统控制参数在反馈作用下恢复原值,系统的运转状态因而得以锁定。

从其实施背景及实施过程可见,应用下述两个性能指标即可基本衡量出具体控制技术性能的高低,(1)控制的精度,其描述具体控制实施后,系统的目标状态(即期待状态)与控制达到的实际终了状态的接近程度;(2)控制的实时性,其描述具体控制实施过程的长短(包括辨识时间与控制时间两部分,其中后者定义为自反馈启动至停止所需的时间)。

对于常规神经网络自适应控制技术,由于其籍常规 BP 辨识过程得到控制自参考模型,若目标状态为复杂周期态,则所得的自参考模型与目标状态的偏离程度较大,使得实际控制终了状态与目标状态不可能达到较高程度的符合,因此该技术的控制精度不高;其次,由于长时间的常规 BP 辨识过程导致整个控制过程持续的时间过长,因而常规神经网络控制技术的实时性较差,这实际上表明该技术对于某些需要快速实施在线控制的场合是不适用的。至于混沌加速神经网络自适应控制技术,由于混沌加速 BP 辨识技术的引入,其经混沌加速辨识过程所得

的控制自参考模型与目标状态的偏离程度较小,使得该技术具有更高的控制精度,同时,由于混沌加速辨识过程所需时间要较常规辨识过程短一个数量级以上,因而该技术亦具更好的实时性。

由上可见,虽然常规神经网络控制技术是混沌加速神经网络控制技术的基础,但由于其性能较差,因而基本上仅适于对光动力学系统进行一般精度的、非实时的简单离线控制;而混沌加速神经网络控制技术由于具有更高的控制精度、更好的实时性,因而具有真正的实用价值,适用于对光动力学系统进行高精度的在线控制。

4 混沌加速神经网络自适应控制技术的控制精度、控制时间与控制陡度的关系

本文以下以典型的倍周期分叉光动力学系统- 布喇格声光系统的自适应状态锁定控制为例分析混沌加速神经网络自适应控制技术中控制精度、控制时间与控制陡度之间的关系,以便为具体控制系统的设计奠定技术分析基础。

布喇格声光系统为典型的倍周期分叉光动力学系统,其动力学表述为:

$$X_{n+1} = \pi\{A \cos(QX_n) - \mu \sin^2[X_n - X_b]\} \quad (1)$$

式中 μ 为与泵浦光强有关的光强度因子, A 和 X_b 分别是放大器和驱动源的偏置, $\cos(QX_n)$ 为加在放大器偏置上的外界作用因子。计算表明,当

$$Q = 0.4, A = 0.5, X_b = 0.25\pi$$

时,随着控制参数 μ 的连续变化,布拉格声光系统经倍周期分岔路径进入混沌态。图1为对声光系统进行混沌加速神经网络自适应在线锁定控制的系统原理框图。

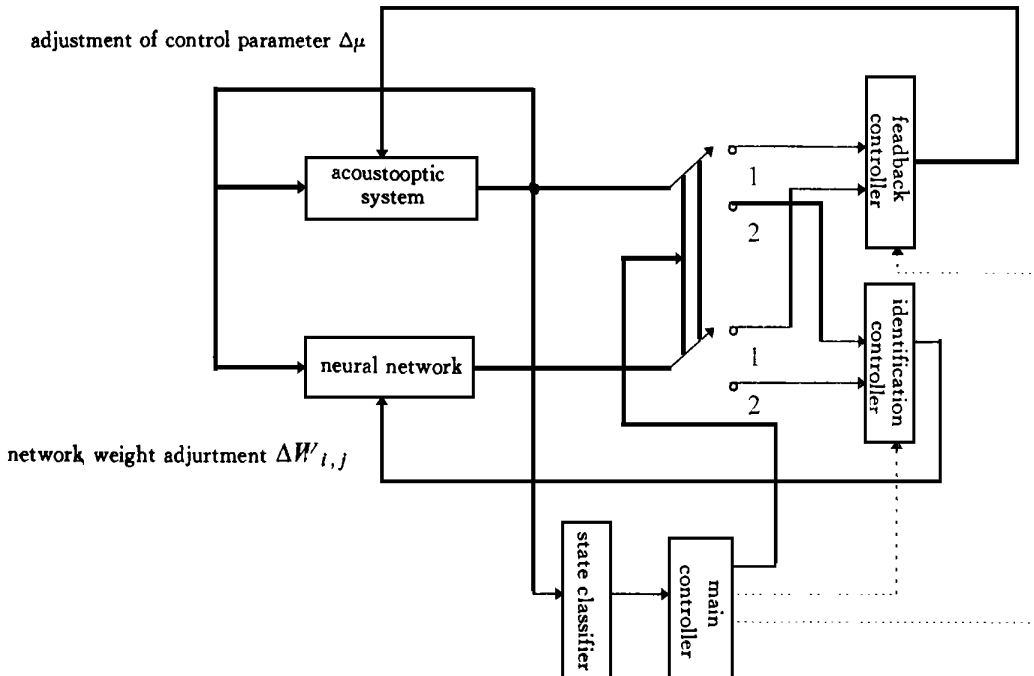


Fig. 1 Schematic diagram of stabilizing the dynamic states adaptively with neural network

图1所示控制系统的工作过程为:

1) 当状态鉴别器鉴别某时刻声光系统的输出出现目标状态后,主控制器控制多点联动开关闭合于位置2,神经网络系统辨识器在辨识控制器的控制下对当前运转状态进行混沌加速系统辨识;

2) 当辨识达到预定精度后,主控制器控制多点联动开关的闭合位置由位置2转换为位置1,辨识过程结束而锁定控制过程开始;

3) 若声光系统的控制参数因意外原因发生突然变化,则反馈控制器输出反馈控制信号以调整控制参数使其恢复至变化前的取值,从而声光系统的目标状态得以锁定。

上述自适应状态锁定控制系统的动力学表述为:

$$X_{n+1} = \pi\{A \cos(QX_n) - (\mu_n + \Delta\mu_{n+1}) \sin^2[X_n - X_b]\} \quad (2)$$

$$X_{n+1} = f(X_n; W_{i,j}) \quad (3)$$

$$\Delta\mu_{n+1} = \alpha \cdot g(X_n - X_n) \quad (4)$$

式中 X_{n+1} 为偏离状态下声光系统的输出, X_{n+1} 为神经网络系统辨识器的输出, f 为神经网络系统辨识器的数学表述($W_{i,j}$ 为权重分布), a 为控制陡度因子, g 为反馈控制函数(实际控制中采用线性形式), μ_n 为当前状态下的控制参数, $\Delta\mu_{n+1}$ 为控制参数调整量。

显然,控制方程组(由式(2)、(3)、(4)组成)决定了整个控制系统的动力学行为。由于难于求得控制方程组的解析解,因此下面以数值方法对控制系统的行为进行考察。

首先须予以明确的是,由于神经网络自参考模型与实际声光系统之间存在着由系统辨识精度所致的差异使得声光系统不可能完全恢复至偏离前状态,因而控制过程实际上将持续无限长时间。但是,声光系统的周期态(包括周期窗口态)在分叉图上并不是以孤立点形式存在,而是维持一定的范围,即控制参数在一定的取值范围内系统均保持相同的周期态,从这个意义上说,若声光系统的控制参数在控制下由偏离值恢复至与偏离前状态对应的取值范围内,则声光系统实际上即已恢复至原状态。由于与声光系统在实际运转中可被有效辨识的周期态对应的控制参数取值范围均大于万分之一,因此本文认为控制参数较原值的偏差若小于万分之一则声光系统便视为已恢复至偏离前状态,即控制成功。据此,便可对描述控制性能的两个参数进行具体定义,由于混沌加速BP辨识过程在1万次内即可使辨识均方误差达到万分之一的量级,则为与此辨识时间相比拟,将控制时间亦限定在1万次内,即在反馈控制启动1万次内若控制成功,则将此时所需的时间(实际是迭代次数)视为控制时间 Nt ,否则即将控制时间视为无穷大(即控制失败);相应地,控制精度 $|\Delta\mu|$ 设为控制成功时控制参数调整量在一周期内的平均值。

图2、图3与图4、图5为声光系统两个典型状态锁定控制实例中控制时间、控制精度与控制陡度之间的关系曲线。其中图2、图3为声光系统周期四状态($\mu = 0.6$)的锁定控制结果,其偏离状态为周期八($\mu = 0.636$);图4、图5为声光系统周期六状态(周期窗口态, $\mu = 0.681$)的锁定控制结果,其偏离状态亦为周期八($\mu = 0.636$)。图3、图5中控制失败处控制精度取值为在控制启动一万次时控制参数调整量在一周期内的平均值。

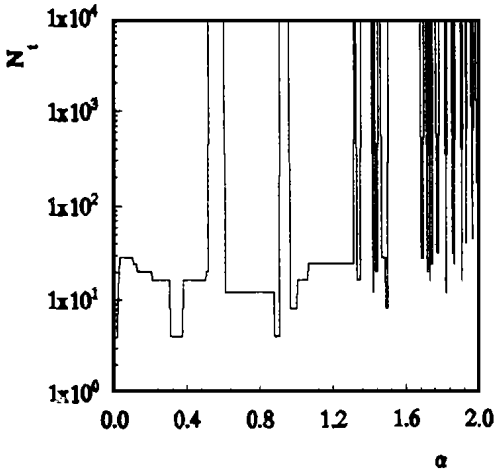


Fig.2 Nt vs. α in the control of stabilizing period 4

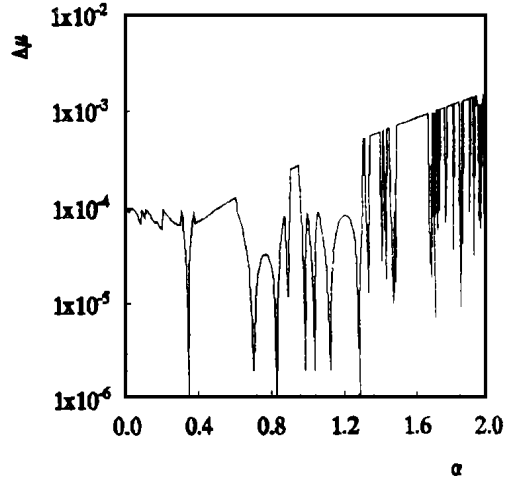


Fig.3 $\Delta\mu$ vs. α in the control of stabilizing period 4

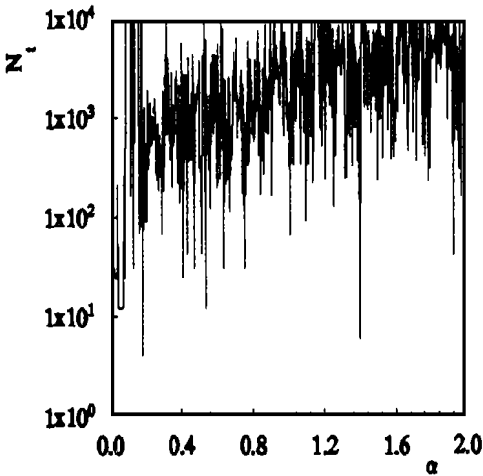


Fig.4 Nt vs. α in the control of stabilizing period 6

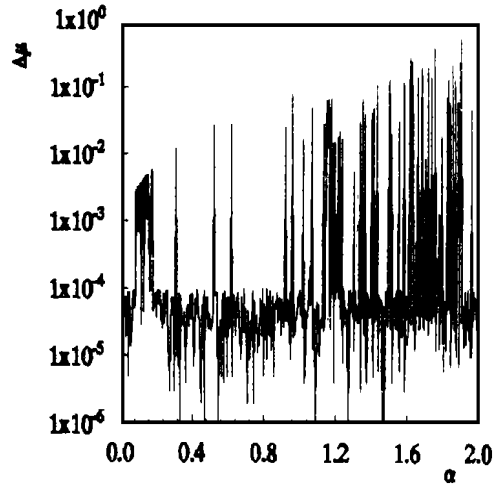


Fig.5 $\Delta\mu$ vs. α in the control of stabilizing period 6

图中可见, 虽然控制时间、控制精度与控制陡度的变化关系十分复杂, 已难以采用解析语言进行描述, 但亦存在下述规律: (1) 控制陡度的有效取值范围- 可控区 (即使控制成功的控制陡度取值区) 并不连续, 不可控区普遍存在, 且其存在的具体位置随控制目标状态不同而不同; (2) 控制时间与控制陡度尽管无明显的比例关系, 但总的趋势是随着控制陡度的增长而增长, 这一点在图2及图4中反映得十分明显。

上述情况的出现与各自控制目标状态所对应的控制参数的取值范围及相应神经网络自参考模型对目标状态的逼近程度有关, 因而图2、图3中控制时间、控制误差与图4、图5中的相应差别可以这样理解: 对于图2、图3所示的周期四锁定控制, 因分叉图上与周期四相应的控制参数取值范围约为0.05, 神经网络自参考模型的辨识方差小于万分之一, 故控制中处于调整状态的

控制参数基本上可落在0.6左右、大小为0.05的周期四范围内,使得控制参数调整信号在可控区内的振荡幅度不大,因而控制时间及控制误差较小;对于图4、图5所对应的周期六锁定控制,因分叉图上与周期六对应的控制参数的取值范围约为0.001,而神经网络自参考模型的辨识方差又大于万分之一,使得控制参数难以始终保持在0.681左右、大小为0.001的范围内从而进入相邻的混沌区,则控制参数调整信号的振荡幅度必然要相对剧烈一些,其相应的控制时间及控制误差自然也要大一些。

5 光动力学系统神经网络自适应控制系统的设计原则

进行具体控制系统设计所追求的目标是以尽可能简单的系统实现达到尽可能高的系统性能,这显然必须在考虑受控系统在控制中的动力学行为的前提下方可达到,因此,上述对声光系统神经网络自适应锁定控制系统动力学行为所进行的分析是对具体控制系统进行设计的基础。

系统实现的简单化主要是指自适应反馈控制器及神经网络辨识器的简单化,其中自适应反馈控制器的实现简单化可籍线性反馈控制方式达到,因为线性反馈较多项式反馈、指数反馈等方式更适于自适应控制器的简单实现;神经网络辨识器实现的简单化可通过采用尽可能小规模神经网络方式达到,实际上,过大规模的神经网络不仅实现复杂,增加辨识时间,而且也不能达到更高的辨识精度。

良好的系统性能主要是指整个控制系统具有高的控制稳定性、短的控制时间及高的控制精度,这首先取决于所采用的神经网络自适应控制技术的具体类型,例如对例2中进行的周期六状态锁定控制,若采用常规神经网络控制技术,则因其采用的常规辨识不能对控制目标状态-周期六状态进行有效的辨识,因而常规神经网络自适应控制技术不适用于对周期六状态进行锁定控制,因此,采用混沌加速神经网络自适应控制技术完成对复杂状态的控制是更为合理的选择;其次,系统性能也与控制陡度的选择有关,为使控制系统具有良好的控制稳定性则必须使控制陡度出现漂移时控制仍能达到控制目标,因此须将控制陡度取值选在可控区的中间位置,另外,由于大的控制陡度并不能保证短的控制时间及高的控制精度,所以应尽可能将控制陡度的取值设定在接近控制陡度坐标轴零端的可控区内(例如图2、图4中 α 小于0.1处的可控区)。

6 结 束 语

本文对光动力学系统神经网络辨识技术及自适应控制技术进行了基于实用意义的总结性比较分析。文中首先对两种辨识技术的物理内涵进行协同学意义上的分析,从而揭示出辨识效果不同的内在物理原因为混沌加速效应缩短了模式框架的建立过程;其次,本文对相应的两种神经网络控制技术进行评述,指出常规控制技术仅适于对一般的状态进行锁定控制,而混沌加速控制技术可完成对复杂状态的高精度在线控制;再次,为对光动力学系统神经网络自适应控制技术的性能进行深入了解,文中以布喇格声光系统的数值仿真控制为例,具体分析了混沌加速控制技术中控制时间、控制精度、控制陡度三者之间的关系;在上述基础上,本文明确指出光

动力学系统混沌加速神经网络自适应控制技术为上述两种控制方法中较为理想的一种,并对光动力学系统神经网络自适应控制系统的设计进行了讨论,最后给出了一般性的设计原则。

参 考 文 献

- 1 杨怀江等.混沌光学系统之前向神经网络系统辨识研究.中国激光,1996, A 23 (6), 548 ~ 554
- 2 杨怀江等.混沌光学系统之混沌加速前向神经网络系统辨识研究.光学学报,1996,16 (5), 651 ~ 656
- 3 杨怀江等.混沌光学系统之前向神经网络自适应控制研究.中国激光,1996, A 23 (6), 745 ~ 750
- 4 杨怀江等.光动力学系统之快速神经网络系统自适应控制研究.光学 精密工程,1997,5 (1):22 ~ 27
- 5 Hornik K, Stinchcombe M, White H. Universal approximation of an unknown mapping and its derivatives using multilayer feedforward networks. Neural Network, 1990, 3: 551 ~ 560

Analysis of Performance of the Neural Network Adaptive Control of Optical Dynamic Systems

YANG Huai-Jiang

(State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022)

Abstract

The similarities and differences of the routine NN system identification and chaos speedup system identification of the optical dynamic system are discussed in this paper. The performance of the two corresponding NN control techniques are compared and analyzed as well. The general design principle of the NN control of the optical dynamic system are presented in the end of this paper.

Key words: Optical dynamic systems, Adaptive control, Neural network, System identification

杨怀江 男,生于1966年,辽宁省丹东市人。1996年毕业于北京理工大学军用光学专业,获工学博士学位,现为中科院长春光机所应用光学国家重点实验室博士后。