

具有泵浦噪声之光动力学系统自适应控制

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)

郭山河

(吉林工业大学应用物理系,长春 130025)

乔燕燕

(中国科学院长春光学精密机械研究所,长春 130022)

摘要 以控制具有泵浦噪声的布拉格声光系统为例,研究了利用光动力学系统自适应参考模型控制技术用于控制具有泵浦噪声之光动力学系统的可行性。研究发现,由于此自适应控制技术以受控光动力学系统与其无泵浦噪声参考模型之输出差值作为反馈宗量,进而对光动力学系统之控制参数进行调整,故该技术在泵浦噪声出现时仍可消除光动力学系统控制参数的确定性扰动,因而特别适合于需要光动力学系统之运转稳定在某一具体动力学状态及按预定顺序进行转换情形下的控制。

关键词:光动力学系统;自适应控制;噪声

1 引言

光动力学系统,由于其运转状态同时包含周期态及非周期态(混沌态),故若从信号产生角度而言,光动力学系统是一个很理想的低频光学周期信号源。在这方面,具有倍周期分叉规律的光动力学系统更是极负应用价值,例如典型的倍周期分叉系统——布拉格声光系统,仅需对其泵浦光强进行调整,其运转状态将按极有规律的倍周期分叉规律进入混沌态,且在混沌区内出现多个不同尺度的周期窗口,因此在混沌区外其运转状态可出现等比周期序列 1, 2, 4, 8, ..., 在周期窗口出现奇数周期序列 3, 5, 7, ..., 以及非等比偶数周期序列 6, 12, ... 等,这意味着仅依靠对一个系统控制参数的调整便可以实现几乎任意周期的光学信号输出!由此可见,具有类似动力学性质的倍周期分叉光动力学系统是性能优异的低频光学周期信号源,若利用其独特的动力学规律进行光通信中的光动力学编码、利用其输出信号作为光通信信号的载波以增加通信的保密性及检测低频弱信号等都是很有实际应用价值的^[1-3]。然而,此类应用须以对光动力学系统之运转状态实施可靠的控制为前提,即需要通过控制使光动力学系统之运转稳定于任意预定状态及按预定转换顺序实施运转状态的转换。本文作者结合混沌控制论之目标动力学控制方法及非线性系统过程控制论之自适应控制技术,提出了适于此种控制目的之光动

力学系统自适应参考模型控制技术,即以受控光动力学系统与其参考模型系统之输出差值作为反馈控制函数宗量,由反馈控制函数的输出对光动力学系统的系统控制参数进行调整以达到控制目的^[4]。实际中亦常出现的一种情况是,光动力学系统之运转伴有随机泵浦噪声,因此,将自适应控制技术应用于噪声情形下的控制是有实际意义的。本文即以对布拉格声光系统控制为例,研究上述光动力学系统自适应参考模型控制在这种条件下的适用性。计算机仿真结果表明,当以无泵浦噪声模型作为布拉格声光系统自适应控制之动力学模型时,此自适应技术仍可对伴有随机泵浦噪声的布拉格声光系统进行态稳定及态转换控制,由此对其应用于具有泵浦噪声情形下光动力学系统控制的可行性进行了示例证明。

2 光动力学系统之自适应参考模型控制方法

光动力学系统之自适应参考模型控制之动力学表述为

$$dX(t)/dt = f(X; \mu) \quad (1)$$

$$du(t)/dt = f'(u; \mu') \quad (2)$$

$$d\mu/dt = \epsilon^T \cdot g(X - u) \quad (3)$$

其中,式(1)为受控光动力学系统, X 为其系统状态变量矢量, μ 为某一可由外界作用进行调整的系统控制参数,式(2)所代表的系统为受控系统在 $\mu = \mu'$ 时的期望运动状态,亦即当

$$\mu = \mu', X(t_0) = u(t_0)$$

有

$$X(t) - u(t) = 0$$

式(3)为对系统控制参数进行调整的反馈控制方程,其中 ϵ 为反馈强度列矢量, ϵ^T 为其转置,矢量函数 $g(X - u)$ 为反馈函数,其满足关系 $g(0) = 0$ 。由式(2)易见,当受控系统之运转状态因参数扰动而偏离预定之期望状态时,因有

$$X(t) - u(t) \neq 0$$

则自适应参数反馈控制启动(即 $d\mu/dt \neq 0$),对受控系统的控制参数进行调整。当受控系统在控制下恢复预定之期望状态时,因有

$$X(t) - u(t) = 0$$

及 $g(0) = 0$,故有

$$d\mu/dt = 0$$

则参数反馈控制停止使得控制作用消失,受控光动力学系统之运转因而恢复至发生参数漂移前之状态。

根据一般混沌控制方法(例如 OGY 扰动控制法^[5])所采用的反馈函数之具体形式可知,将反馈函数取为一级近似便可以满足绝大多数控制场合的要求,故式(3)可进一步修正为

$$d\mu/dt = \epsilon^T \cdot (X - u) \quad (4)$$

考虑到在实际情形中对受控光动力学系统动力学特性的了解均依赖于对其输出的采样,也即受控系统在实验中的数据表示仅为其一维时间输出序列(故重构出来的受控系统动力学模型的时间输出序列自然也是一维的),因而从实验的角度上看,将反馈过程离散化更有实际意义,为此,若设对系统输出变量的采样时间间隔为 Δt ,则线性反馈方程(4)之最终离散形式为

$$\Delta\mu = \alpha \cdot (X - u) = \alpha(X - u) \quad (5)$$

式中 $\alpha = \Delta t \epsilon^T$, 称为控制陡度, 其合适值的选定依赖于试错法; 注意式中最后已将控制陡度 α 、系统的实际输出 X 及目标输出 u 均已标量化。尽管最终参数反馈仅与受控光动力学系统及其动力学模型的一个系统变量有关, 但由于光动力学系统运转中各系统变量间存在强非线性相互作用, 由一个系统变量所产生的变化也会很快地扩散到其它变量上去, 从而导致整个系统的变化; 因此根据一个系统变量的变化所进行的系统控制参数修正与对由所有系统变量的变化所进行的修正在本质上是一样的。另外, 离散控制方程式(5)中并未显含采样时间, 故此由对“流”光动力学系统导出的控制方程亦适于对“映射”光动力学系统进行控制。

本文以下以对出现随机泵浦噪声之布拉格声光双稳系统之控制为实例, 检验此自适应控制技术在此出现随机泵浦噪声时的应用可行性。

3 具有随机泵浦噪声之布拉格声光系统之动力学性质

3.1 无泵浦噪声之布拉格声光系统之动力学性质

对布拉格声光双稳系统的研究起源于其具有应用在光计算中光开关器件的可能性⁽⁵⁾。描述布拉格声光双稳系统的微分-差分方程表述为:

$$\tau_d X(t)/dt = -X(t) + \pi \{ A - \mu \sin^2 [X(t - \tau_d) - X_b] \} \quad (6)$$

式中 τ_d 是光器件的固有延迟, μ 是正比于泵浦光强的泵浦光强因子, A 和 X_b 分别是放大器与驱动源的偏置, τ 是外加的反馈延迟(可通过光纤延迟及电子线路延迟等方法实现)。为使在固定入射光强下布拉格声光双稳系统的分叉点可接受外界控制, 引入加在放大器偏置上的外部调和用因子 $\cos(QX)$, 则系统稳定时有

$$X(t) = \pi \{ A \cos [QX(t - \tau_d)] - \mu \sin^2 [X(t - \tau_d) - X_b] \} \quad (7)$$

若 $\tau_d \gg \tau$ (此即长延迟条件), (7)式最终可变为迭代方程

$$X_{n+1} = \pi \{ A \cos [QX_n] - \mu \sin^2 [X_n - X_b] \} \quad (8)$$

图1为式(8)所表示的布拉格声光双稳系统在泵浦光强连续变化时之运行分叉图, 图中 $Q = 0.4, A = 0.5, X_b = 0.25\pi$ 。

由图可见, 在长延迟条件下时布拉格声光双稳系统经一系列倍周期分叉后进入混沌态, 因此其特别适于进行光动力学编码及弱信号检测。

由于双稳态仅是在有限的控制参数范围内存在, 故为体现系统运转状态的复杂性, 本文以下称系统(8)为布拉格声光系统。

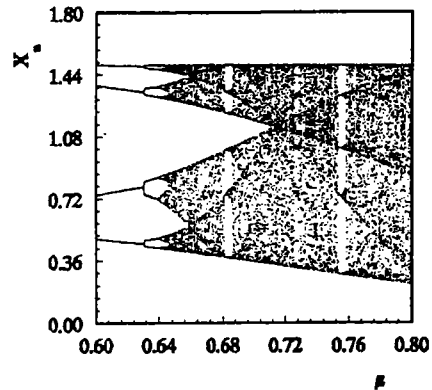


图1 布拉格光系统运行状态分叉图

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

Fig.1 Magnified bifurcation plot of BDAOS

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

3.2 有泵浦噪声时布拉格声光系统之动力学性质

在布拉格声光系统的运转过程中,由于各种随机干扰因素的存在,系统的运转受到随机干扰的影响是可能的。但可能对运转产生显著影响的随机干扰基本上来自于入射激光光强的随机不稳定性,它虽然不起源于声光系统本身,但却由于是泵浦光(系统结构参数),所以它对声光系统运转的影响就显得格外重要,因此有必要分析它对声光系统运转的影响。

为分析入射激光光强的随机起伏(随机泵浦噪声)对布拉格声光系统运转的影响,引入一平稳随机过程 ζ ,则声光系统的动力学表述(8)变为

$$X_{n+1} = \pi \{ A \cos [Q X_n] - (\mu + \zeta) \sin^2 [X_n - X_b] \} \quad (9)$$

图2为 ζ 分布于 $(-0.005, 0.005)$ 时由式(9)所表述的布拉格声光系统的运行分叉图。图中 $Q=0.4, A=0.5, X_b=0.25\pi$ 。

由图可见,声光系统显然仍按倍周期分叉规律进入混沌态,但分叉图的细节已较无泵浦噪声时(即式(8)所表述之情形)有较为明显的变化,由于入射激光光强随机起伏的影响,分叉点略有前移因而混沌区较以往提前到来,同时高级次分叉(周期十六分叉以上)及混沌区内较窄的周期窗口都被噪声湮灭。当入射光强的起伏进一步增大时,上述精细结构之消失将会更加严重。当入射光强起伏分布于 $(-0.05, 0.05)$ 时声光系统仅经两次明显的分叉即进入混沌态,而且在混沌区内的精细结构已完全被噪声湮灭。显而易见,入射激光的光强随机起伏对布拉格声光系统的稳定运行影响很大,严重时将大大缩短有利用价值的倍周期分叉过程,因而在构造具体系统时,应对泵浦激光器的功率稳定性及光强衰减器的稳定性采取严格的措施以降低入射激光的强度随机起伏程度。

4 具有泵浦噪声之布拉格声光系统之自适应控制

布拉格声光系统自适应参考模型控制之实施针对于下述两种情况,一为泵浦激光光强出现确定性漂移时,控制目的为使声光系统的运转状态仍维持入射光强发生变化前之运转状态,此为态稳定问题;二为当因某种需要(例如光动力学编码)而须使声光系统的运转状态在不同的状态之间进行转换时,此时要求声光系统在控制下在不同的运转状态间按预定方案进行转换,因而此为态转换问题。对这两种不同的控制目的,在选定泵浦光强因子 μ 为系统控制参数后,本文分别采用下述两种控制策略达到。

① 态稳定控制

图3为态稳定控制之原理框图。

按图3所示,以下述步骤实施对系统控制参数受到扰动的布拉格声光系统的态稳定控制:首先,设置系统控制参数 μ 于一初始值 μ_0 并使布拉格声光系统开始运行,此为无扰动状态,亦

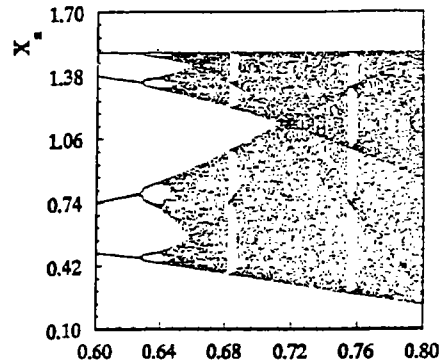


图2 具有噪声的布拉格声光系统状态分叉图
 $Q=0.4, A=0.5, X_b=0.25\pi, 0.005 < \zeta < 0.005$
 Fig.2 Magnified bifurcation plot of BDAOS with noise-corrupted control parameter, where $Q=0.4, A=0.5, X_b=0.25\pi, 0.005 < \zeta < 0.005$

为预定系统之运转状态;当系统运行稳定后,加入一对系统控制参数 μ 的扰动,此时系统将运行在 $\mu' = \mu_0 + \Delta\mu$ 之偏离情形下,此为受扰动状态;由于系统与参考模型之控制参数不同故其输出也不同,但系统参照模型此时产生的是受控系统在无泵浦噪声时之预定状态 $\mu = \mu_0$ 时的输出,将此二输出信号先后送入模拟线性反馈函数功能的状态误差信号减法器及控制参数误差校正信号放大器,按式(5)得到的输出即为系统控制参数 μ 的在线调整值,此值用于调整控制参数以使系统逐渐恢复至 $\mu = \mu_0$ 时的初始运转状态,当 $\mu' = \mu_0$ 时由于参照模型与系统的输出一致因而反馈量为零,此时控制自动停止直至下一扰动发生。

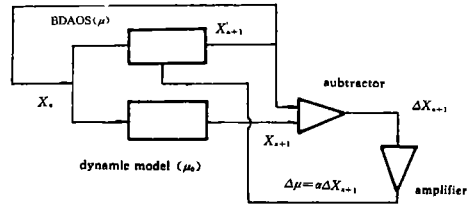


图 3 布拉格声光系统运转状态自适应稳定控制系统原理图

Fig. 3 Schematic diagram of the adaptive control for stabilizing the running state of the BDAOS

当 $\mu' = \mu_0$ 时由于参照模型与系统的输出一致因而反馈量为零,此时控制自动停止直至下一扰动发生。

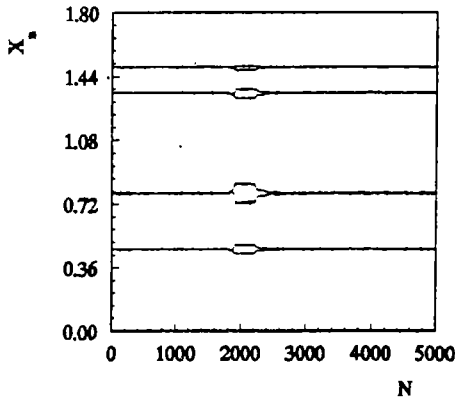


图 4 噪声周期态稳定图
Fig. 4 Stabilizing a noise corrupted periodic state, where

$$\mu_0 = 0.625, \mu' = 0.636, \alpha = 0.25$$

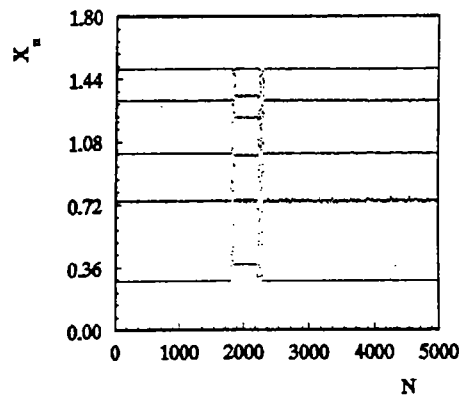


图 5 噪声周期窗口稳定图
Fig. 5 Stabilizing a noise corrupted state in period window, where

$$\mu_0 = 0.754, \mu' = 0.681, \alpha = 0.25$$

图 4、图 5 所示分别为对周期态及周期窗口态稳定控制的两个仿真实例,两图中控制均启动于 $N = 2200$ 处。对其它周期态及周期窗口的控制亦取得了与此两图相似的结果。显然,将自适应参考模型控制技术用于具有泵浦噪声的光动力学系统态稳定控制是成功的,但无泵浦噪声之情形相比较,由于泵浦噪声的干扰,为达到控制目的所采用的控制陡度取值要大于无泵浦噪声情形^[4],例如对于上述两图的控制而言,当控制陡度取值小于 0.25 时,控制难以取得成功。

②态转换控制

假设为某种目的(例如进行光动力学编码或充作光通信载波)而需要使声光系统的运转状态在不同的动力学状态间进行转换,其转换状态序列由相应的控制参数序列 $\{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n\}$ 表示,则此情形下的态转换控制即是随着代表不同状态的参考模型的切换,使声光系统的控制参数按顺序 $\mu = \mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n$ 进行自适应调整。图 6 为态转换控制之原理框图。

图中易见,随着控制参数 μ 的持续规律性变化,声光系统的运转状态自然将按预定转换顺序进行转换。图 7 是一个态转换控制的仿真实例。

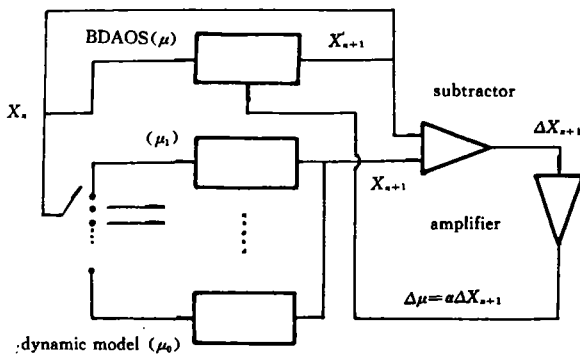


图 6 布拉格声光系统运转状态
自适应转换控制系统原理图

Fig. 6 Schematic diagram of the adaptive
control for switching the running
states of the BDAOS

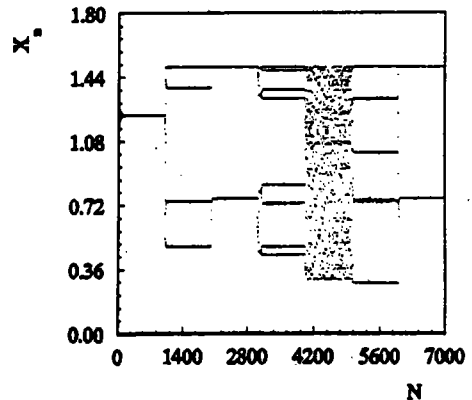


图 7 布拉格声光系统在周期态、周期窗口及混沌态之间的
状态转换 $\alpha=0.25, -0.05 < \zeta < 0.005$

Fig. 7 Switching the running states of noise corrupted
BDAOS among period, chaos and period
window, where $\alpha=0.25, -0.005 < \zeta < 0.005$

图 7 表明,自适应参考模型技术之实施于具有弱泵浦噪声的声光系统仍是成功的,但为克服泵浦噪声的干扰,所选的控制陡度要较无泵浦噪声时大一些,否则态转换有可能失败。仿真研究同时表明,当泵浦噪声继续增大时(尽管此种情况并不经常出现),亦可证明此自适应参考模型的实施仍然有效⁽⁷⁾。

5 结 束 语

为解决出现泵浦噪声时光动力学系统之控制问题,本文将用于无泵浦噪声光动力学系统控制的光动力学系统自适应参考模型控制技术推广至有背景泵浦噪声条件下的控制,并以对布拉格声光系统控制之计算机仿真实验为例说明了其可行性。研究表明,即便有随机泵浦噪声的干扰,此自适应控制技术仍可以消除在运转中出现的系统参数突变现象,因此它特别适合于在需要光动力学系统稳定于一特定运转状态及运转状态在周期态、混沌态及周期窗口间随意进行转换情形下的控制。应该指出的是,在应用此自适应控制技术控制光动力学系统时,对一具体的控制过程,并非所有的控制陡度取值均将导致控制成功,而在控制成功时控制时间(定义为由控制启动至控制停止时所需的时间)也并非与控制陡度的取值成一般的线性反比关系,然而理论分析及仿真结果均显示,采取较小的控制陡度取值总是有利于控制成功及缩短控制时间。有关此方面的研究结果将在另一篇论文中给出。

参 考 文 献

- [1] Scott Hayes, Celso Greboqi & Edward Ott, Communication with chaos. Phys. Rev. Lett., 1993, 70, 3031-3033
- [2] Kevin M. Cuomo & Alan V. Oppenheim, Circuit implementation of synchronized chaos with applications to communications. Phys. Rev. Lett., 1993, 71, 65-68

- [3] Kurt Wiesenfeld & Bruce Mcnamarda, Period-doubling systems as small signal amplifiers. *Phys. Rev. Lett.*, 1985, **55**, 13
- [4] 杨怀江等, 混沌光学系统之自适应控制问题研究. *长春光机学院学报*, 1996, **19**(3): 6-12
- [5] Shinbrot, C. Grebogi, E. Ott, & J. A. Yorke, Using small perturbations to control chaos. *Nature*, 1993, **363**, 411-417
- [6] J. Chrostowski et al., Oscillations in an acousto-optic bistable device. *Can. J. Phys.*, 1983, **61**, 1149
- [7] 杨怀江, 光动力学系统之前向神经网络系统辨识及自适应控制问题研究. 北京理工大学博士学位论文, 1996

Adaptive Control of Optical Dynamic Systems with Noisy Pump

Yang Huaijiang

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

Guo Shanhe

(Department of Applied Physics, Jilin University of Technology, Changchun 130022)

Qiao Yanyan

*(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy
of Sciences, Changchun 130022)*

Abstract

A suggestion of using the adaptive control algorithm, which is designed originally to control the optical dynamic system with no noise-corrupted control parameter, to control the optical dynamic system with noisy pump is raised in this paper. The feasibility of this suggestion is demonstrated with the computer simulation of controlling the Bragg diffraction acousto-optic bistable system (BDAOBS) running with stochastic pump noise, where a BDAOBS with no noisy pump is employed as the self-referenced dynamic model for control. It is found that, because the difference between the outputs of the noise-corrupted optical dynamic system and the self-referenced model is chosen to be the argument of the control function, the adaptive control algorithm is still able to be utilized in controlling the noise-corrupted optical dynamic system.

Key words: Optical dynamical systems, Adaptive control, Noise

杨怀江 男, 辽宁省丹东市人, 生于 1966 年 1 月 21 日。1988 年毕业于哈尔滨工业大学精密仪器系光电电子技术专业, 同年进入丹东射线仪器工业(集团)公司参加工作。1993 年毕业于长春光学精密机械学院电子工程系物理电子学与电子学专业, 同年考入北京理工大学工程光学系军用光学专业攻读博士学位。1996 年 1 月毕业, 现为长春光机所应用光学国家重点实验室博士后。其近期主要研究领域为光通信混沌保密编码及神经网络快速模式识别等问题。