

基于延时相移反馈控制的单环掺铒光纤激光器的混沌产生与同步

张 栩 冯玉玲* 姚治海

长春理工大学物理系, 吉林 长春 130022

摘要 利用延时相移反馈的方法研究了单环掺铒光纤激光器(SREDFL)的混沌产生。通过适当地调节反馈系数、相移以及延迟时间,实现了该系统混沌的产生,给出了混沌产生的方式及混沌态的参数区间。利用混沌信号驱动法研究了单环掺铒光纤激光器的混沌同步,结果表明,在适当的驱动强度下,无论被驱动系统在被驱动前处于混沌态还是周期态,都可以达到混沌同步。利用关联系数分析了混沌同步的质量。

关键词 激光器;掺铒光纤激光器;混沌;混沌产生;混沌同步

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0714003

Generation and Synchronization of Chaos in Single-Ring Erbium-Doped Fiber Lasers Based on Delay Phase-Shift Feedback Control

Zhang Xu Feng Yuling Yao Zhihai

Department of Physics, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract The generation of chaos in single-ring erbium-doped fiber laser (SREDFL) is investigated by using the delay phase-shift feedback. Chaos generation is realized in the SREDFL by properly adjusting the parameters such as the feedback coefficient, the phase-shift, and the delay time. The routes of chaos generation and the parameter ranges of the chaotic states are given. Moreover the chaotic synchronization of two SREDFLs is investigated by using the method of chaotic signal driving. The results show that no matter the original driven systems are in chaotic state or periodic state, the chaotic synchronization can be completed by appropriately adjusting the driving intensity. Furthermore, the chaos synchronization quality is analyzed by using the correlation coefficient.

Key words lasers; erbium-doped fiber lasers; chaos; chaos generation; chaos synchronization

OCIS codes 140.1540; 140.3500; 140.3510

1 引 言

自20世纪80年代掺铒光纤和掺铒光纤放大器的成功研制以来,利用掺铒光纤放大器所构成的掺铒光纤激光器,因其工作波长处于光纤损耗的低窗口,所以在光纤通信领域中得到了大量应用。1998年, Luo等^[1]给出了单环掺铒光纤激光器(SREDFL)的速率方程,进而通过调制法增加系统的自由度,从理论和实验两方面研究了SREDFL的产生混沌。此后,掺铒光纤激光器成了研究热点之一,许多学者提出了将混沌控制反应用于SREDFL,使其产生混沌。常用的混沌控制法有OGY控制法(即参数微扰法)^[2]、自适应控制法^[3]、延迟反馈控制法^[4]和相互耦合控制法等。而在保密通信领域,更多的是将混沌同步应用于掺铒光纤激光器中,常用的混沌同步方法有驱动-响应同步法^[5]、主动-被动同步法^[6]、混沌信号驱动法^[7]、脉冲信号驱动法^[8]和连续变量反馈同步法^[9]等。2004年,颜森林等^[10]利用双环掺铒光纤激光器驱动两个单环掺铒光纤激光器的方法研究

收稿日期: 2015-03-02; 收到修改稿日期: 2015-04-03

基金项目: 吉林省科技发展计划(2009009)

作者简介: 张 栩(1989—),女,硕士研究生,主要从事非线性物理方面的研究。E-mail: zhangxu19890314@126.com

导师简介: 姚治海(1965—),男,博士,教授,主要从事非线性物理方面的研究。E-mail: ychaos@126.com

通信联系人。E-mail: fy10819@aliyun.com

混沌同步。2009年,刘越等^[11]利用双频损耗调制法研究了单环掺铒光纤激光器的混沌产生。2010年,Zhang等^[12]报道了新的微扰调制条件-加入孤子使掺铒光纤激光器产生混沌;Ali等^[13]对单环掺铒光纤激光器的混沌产生和增强进行了数值模拟,分析了各种参数对产生高维混沌的影响。2011年,蔺玉珂等^[14]利用光延迟反馈方法数值研究了单环掺铒光纤激光器的混沌现象。2012年,吴飞等^[15]利用耦合反馈相移控制法研究了双环掺铒光纤激光器的混沌控制;Chang等^[16]利用损耗调制法实验研究了单环掺铒光纤激光器的混沌产生。2013年,焦明星等^[17]报道了双波长单纵模掺铒光纤环形激光器的设计及实验研究;张珂卫等^[18]报道了基于掺铒光纤的高增益低噪声光放大器的实验研究。2014年,刘毅等^[19-20]研究了基于反馈光纤环的可调多波长布里渊掺铒光纤激光器;冯玉玲等^[21]利用延时反馈法实验研究了单环掺铒光纤激光器的混沌产生。本文提出了用延时相移反馈控制法研究单环掺铒光纤激光器混沌产生的方案,通过适当调节反馈系数等参数的值,研究该系统的混沌产生,进而利用混沌信号驱动法研究其混沌同步。

2 混沌产生

2.1 方案与方程

结合单环掺铒光纤激光器的结构特点和工作原理,介于反馈控制法的方便和有效性,提出利用相移反馈控制法研究单环掺铒光纤激光器混沌产生的方案,进而提出在单环掺铒光纤激光器中加入由光纤延时器和相移控制器组成的反馈回路,方案示意图如图1所示。

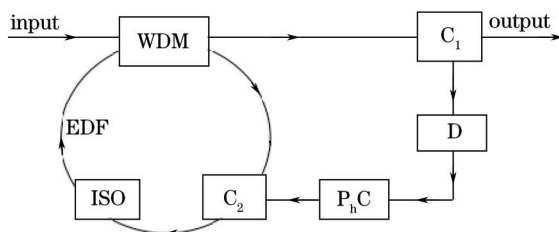


图1 具有延时相移反馈回路的单环掺铒光纤激光器系统的示意图

Fig.1 Scheme of the single-ring erbium-doped fiber lasers with delay phase-shift feedback

图1中 EDF是掺铒光纤,ISO是光隔离器,WDM是波分复用器,它的输出光经过耦合器 C_1 分为两部分,其中一部分直接输出,另一部分作为反馈信号,经过光纤延时器D和相移控制器 $P_h C$,再通过耦合器 C_2 被耦合反馈回单环掺铒光纤激光器。调节反馈光的延时和相移从而达到对混沌的反控制,即产生混沌。在反馈回路中,相移控制器通常采用电光相位调制器,并认为相移和延迟时间没有关系,所以图1所示的单环掺铒光纤激光器的动力学方程为

$$\frac{dE(\tau)}{d\tau} = -k[E(\tau) + \eta E(\tau - \tau_1)\exp(i\varphi)] + gE(\tau)D(\tau), \quad (1)$$

$$\frac{dD(\tau)}{d\tau} = -(I_p + 1 + |E(\tau)|^2)D(\tau) + I_p - 1, \quad (2)$$

式中 τ 为归一化时间, $\tau = \gamma t$, $\gamma = 1/\tau_0$, τ_0 为 E_r^{3+} 亚稳态寿命, E_r^{3+} 离子亚稳态寿命为10ms,即 $\tau_0 = 10\text{ms}$, I_p 为抽运光强, $E(\tau)$ 为激光器内激光的电场强度, k 和 g 分别为激光器的损耗系数和增益系数, $D(\tau)$ 为反转粒子数, η 为反馈信号的反馈系数, $\eta = \eta_{c_1}\eta_{c_2}$, η_{c_1} 和 η_{c_2} 分别为耦合器 C_1 和 C_2 的耦合系数, φ 为相移控制器产生的相移, τ_1 为光纤延时器D产生的延迟时间。

2.2 数值仿真和分析

2.2.1 单环掺铒光纤激光器系统的吸引子

单环掺铒光纤激光器系统的参数^[22]: $k = 1000$, $g = 4600$, $I_p = 4.0$;选取初值为(13.5, 0.1);取 $\tau_1 = 0$, $\varphi = 0$ 和 $\eta = 0$,即单环掺铒光纤激光器系统没有加入任何的控制环节;选取步长为 $10^{-5} \times 10\text{ms}$,数值求解(1)~(2)式,略去前 2×10^5 步的暂态过程,得到此时的吸引子如图2所示,由于它的运动轨迹最终趋于一点,所以它显示出系统是处于定态的。

通过适当调节三个参数 η 、 τ_1 和 φ 的值,实现单环掺铒光纤激光器系统的混沌产生。

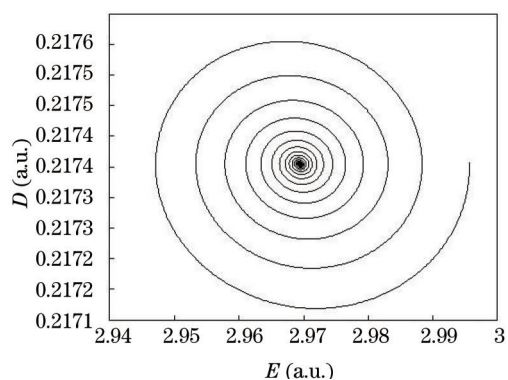


图2 单环掺铒光纤激光器的吸引子 ($\tau_1=0, \eta=0, \varphi=0$)

Fig.2 Attractor of the single-ring erbium-doped fiber ($\tau_1=0, \eta=0, \varphi=0$)

2.2.2 以 τ_1 为控制参数

取 $\eta=0.05$ 和 $\varphi=0.3$, 其他参数值和图2相同, 数值求解(1)~(2)式, 得到单环掺铒光纤激光器内激光的电场强度的实部 E 随延迟时间 τ_1 变化的分岔图如图3所示。

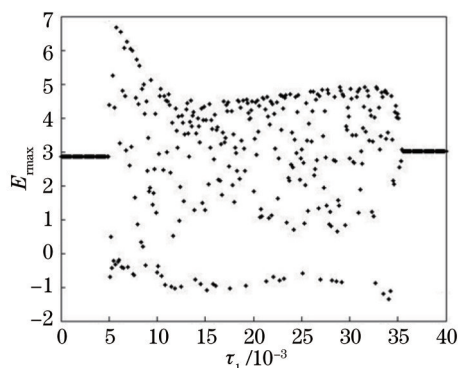


图3 E_{\max} 对 τ_1 的分岔图。 ($\eta=0.05, \varphi=0.3$, 其他参数的值和图2相同)

Fig.3 Bifurcation diagram of E_{\max} versus τ_1 ($\eta=0.05, \varphi=0.3$, and other parametric values are the same as in Fig.2)

从图3中可见, 单环掺铒光纤激光器系统随着 τ_1 的增加在 $\tau_1=0.0049$ 附近通过阵发途径进入混沌态; 在 $\tau_1=0.0358$ 附近系统从混沌态进入周期态。在区间 $(0.0049, 0.0358)$ 内, 系统处于混沌态。例如取 $\tau_1=0.01$ 时, 混沌态吸引子如图4所示, D_r 为反转粒子数的实部。

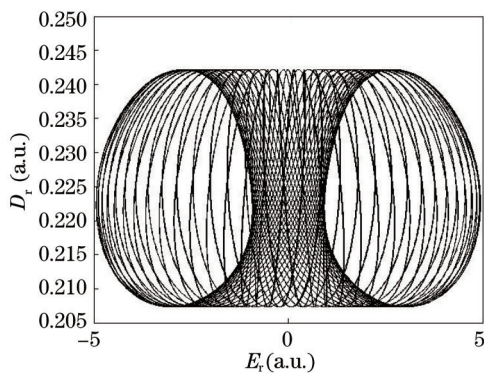


图4 混沌吸引子 ($\eta=0.05, \varphi=0.3, \tau_1=0.01$)

Fig.4 Chaotic attractor ($\eta=0.05, \varphi=0.3, \tau_1=0.01$)

2.2.3 以 η 为控制参数

取 $\varphi=0, \tau_1=0.01$, 其他参数值和图2相同, 数值求解(1)~(2)式, 得到单环掺铒光纤激光器的电场强度的实部 E 随耦合系数 η 变化的分岔图如图5所示。从图5中可以看出, 在 $\eta=0.012$ 附近, 系统从单周期态以阵发方式进入混沌态, 并经过短暂的混沌状态后, 在 $\eta=0.013$ 附近又进入一周期状态; 系统在 $\eta=0.056$ 附近进

入二周期状态,然后在 $\eta=0.057$ 附近通过倍周期分岔方式进入混沌状态;由 $\eta=0.091$ 开始,系统又以倒倍周期分岔途径进入一周周期态。

取 $\varphi=0.3$,其他参数值和图 5 相同,数值求解(1)~(2)式,得到单环掺铒光纤激光器的电场强度的实部 E_r 随 η 变化的分岔图如图 6 所示。可见, η 在区间(0.0144,0.018)内系统处于混沌态,系统是通过阵发途径进入混沌态的。

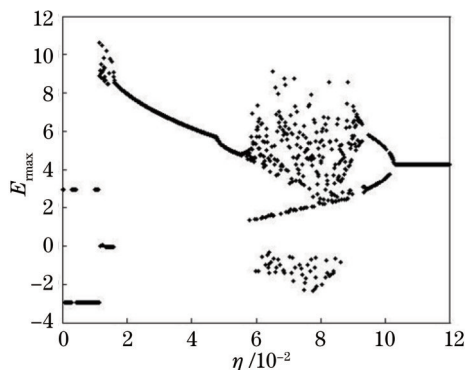


图 5 E_{rmax} 对 η 的分岔图($\varphi=0, \tau_1=0.01$, 其他参数和图 2 的相同)

Fig.5 Bifurcation diagram of E_{rmax} versus η ($\varphi=0, \tau_1=0.01$, and other parametric values are the same as in Fig.2)

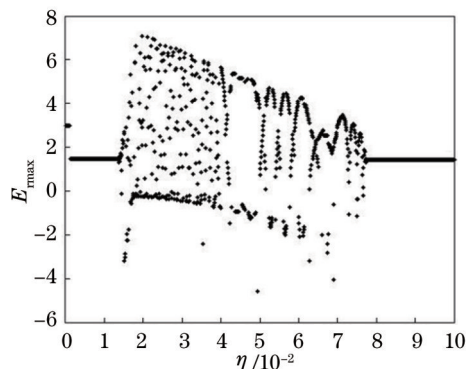


图 6 E_{rmax} 对 η 的分岔图($\varphi=0.3, \tau_1=0.01$, 其他参数和图 5 的相同)

Fig.6 Bifurcation diagram of E_{rmax} versus η ($\varphi=0.3, \tau_1=0.01$, and other parametric values are the same as in Fig.5)

比较图 5 和图 6 可见,加入相移控制后,单环掺铒激光器系统进入混沌的方式发生了变化,从 $\varphi=0$ 的倍周期分岔途径进入混沌态变为 $\varphi \neq 0$ 的阵发途径进入混沌态。

2.2.4 以 φ 为控制参数

取 $\eta=0.05, \tau_1=0.01$,其他参数值和图 6 相同,利用这些参数值对(1)~(2)式数值求解,图 7 是单环掺铒光纤激光器对相移 φ 的分岔图,其中插图是对大图局部放大。由图 7 可见,系统随着 φ 的增加是通过阵发途径进入混沌态的;由图 7 中的插图可见,系统在 $\varphi=0$ 附近是周期态。所以系统在区间(-0.473,-0.001)和(0.001,0.473)内处于混沌态,系统在 $\varphi=0$ 时的周期吸引子如图 8 所示。

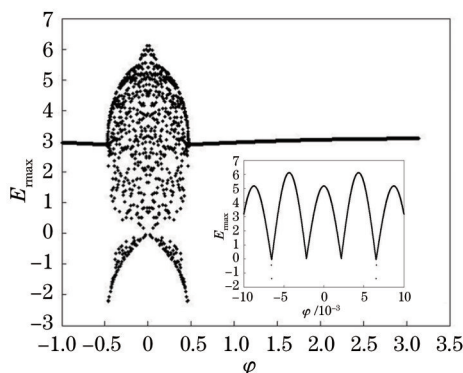


图 7 E_{rmax} 对 φ 的分岔图($\eta=0.05, \tau_1=0.01$,其他参数和图 5 的相同,小图是对大图的局部放大)

Fig.7 Bifurcation diagram of E_{rmax} versus φ ($\eta=0.05, \tau_1=0.01$, and other parametric values are the same as in Fig.5.

The small figure is the partial enlarged drawing of the large figure)

从图 3、5~7 可见,控制参数不同,系统进入混沌的方式和混沌态的参数区间的大小也不同,以延迟时间 τ_1 和反馈系数 η 作为控制参数时,混沌态的区间较大,这将有利于对其混沌态的应用。

根据图 7,在混沌区间内 φ 分别取 0.002,0.01,0.15,0.47 时对应的吸引子如图 9 所示,由图 9 可见:系统的混沌吸引子呈现出多种形态。

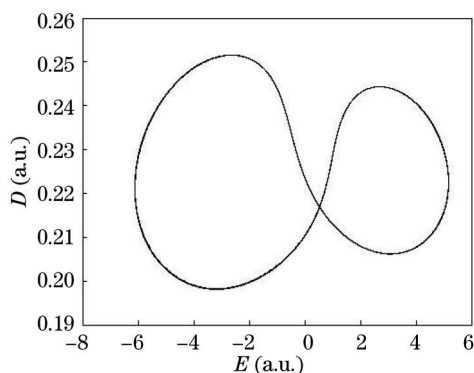


图8 周期吸引子 ($\eta=0.05, \tau_1=0.01, \varphi=0$, 其他参数和图7的相同)

Fig.8 Periodic attractor ($\eta=0.05, \tau_1=0.01, \varphi=0$, and other parametric values are the same as in Fig.7)

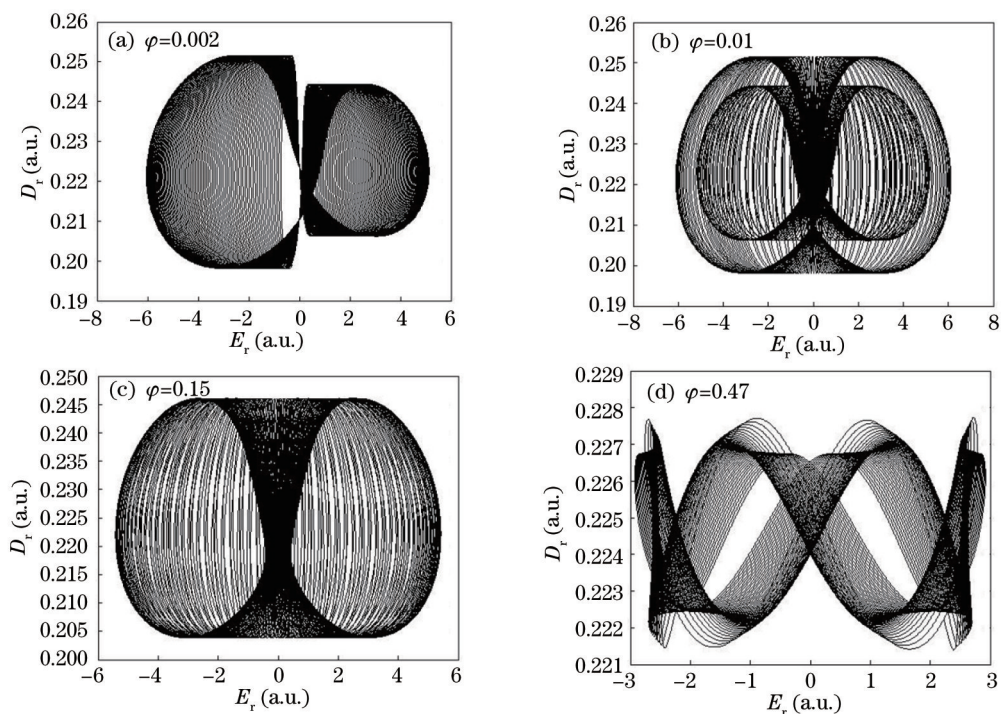


图9 φ 取不同值时的多种形态的混沌吸引子(其他参数值和图7相同)

Fig.9 Chaotic attractors for different φ values (other parametric values are the same as in Fig.7)

综上所述,适当调节耦合系数、相移和延迟时间,就可以使系统进入混沌态,并且可以具有不同形态的混沌吸引子。将单环掺铒光纤激光器用于保密通信时,需要它的混沌同步状态,下面研究基于延时相移反馈控制的单环掺铒光纤激光器的混沌同步。

3 混沌同步

3.1 同步方案

根据单环掺铒光纤激光器的结构和工作原理,这里提出了利用混沌信号驱动法实现两个单环掺铒光纤激光器混沌同步的方案。混沌信号驱动法是用一个可以产生混沌信号的驱动系统驱动另外两个系统,从而使这两个被驱动系统达到混沌同步,相应的方案示意图如图10所示。

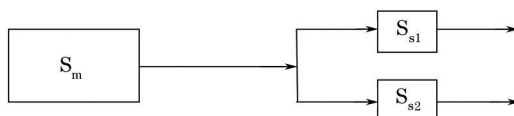


图10 同步方案

Fig.10 Synchronization scheme

图 10 中, S_m 、 S_{s1} 和 S_{s2} 都是基于延时相移反馈控制的单环掺铒光纤激光器系统。其中, S_m 是驱动系统, S_{s1} 和 S_{s2} 是两个被驱动系统。驱动系统的输出光通过定向耦合器以一定的强度被耦合到被驱动系统中, 从而实现对被驱动系统的驱动。由于驱动系统不受被驱动系统的作用, 其动力学方程没有变化, 具体形式为

$$\frac{dE_m(\tau)}{d\tau} = -k_m[E_m(\tau) + \eta_m E_m(\tau - \tau_m) \exp(i\varphi_m)] + g_m E_m(\tau) D_m(\tau), \quad (3)$$

$$\frac{dD_m(\tau)}{d\tau} = -(I_{pm} + 1 + |E_m(\tau)|^2) D_m(\tau) + I_{pm} - 1, \quad (4)$$

对于被驱动系统, 由于受到驱动系统的驱动, 其动力学方程增加了一个驱动项, 具体形式为

$$\frac{dE_{sn}(\tau)}{d\tau} = -k_{sn}[E_{sn}(\tau) + \eta_{sn} E_{sn}(\tau - \tau_{sn}) \exp(i\varphi_{sn}) + \alpha E_m(\tau)] + g_{sn} E_{sn}(\tau) D_{sn}(\tau), \quad (5)$$

$$\frac{dD_{sn}(\tau)}{d\tau} = -(I_{psn} + 1 + |E_{sn}(\tau)|^2) D_{sn}(\tau) + I_{psn} - 1, \quad (6)$$

式中 n 取 1、2, 分别表示两个被驱动系统, α 表示驱动系统对被驱动系统的驱动强度, E_m 、 E_{sn} 分别表示驱动系统和两个被驱动系统激光的电场强度, D_m 、 D_{sn} 分别表示驱动系统和两个被驱动系统的反转粒子数, k_m 、 k_{sn} 分别表示驱动系统和两个被驱动系统的损耗系数, g_m 、 g_{sn} 分别表示驱动系统和两个被驱动系统的增益系数, I_{pm} 、 I_{psn} 分别表示驱动系统和两个被驱动系统的抽运光强。

3.2 数值模拟

这里分别讨论两个被驱动系统的初态都是混沌态以及都是周期态时, 它们的混沌同步效果。

3.2.1 驱动系统和被驱动系统的初态都是混沌态的情况

驱动系统取如图 4 所示的混沌态, 取两个被驱动系统的参数和图 9(f) 对应的参数值相等, 但初值不同, 分别是 (0.1, 0.1) 和 (0.2, 0.1), 得到的混沌态吸引子与图 9(f) 相似, 被驱动前 S_{s1} 和 S_{s2} 系统的场强 $E_{s1} - E_{s2}$ 和反转粒子数 $D_{s1} - D_{s2}$ 的关系, 如图 11 所示, 可见它们此时是非同步的。

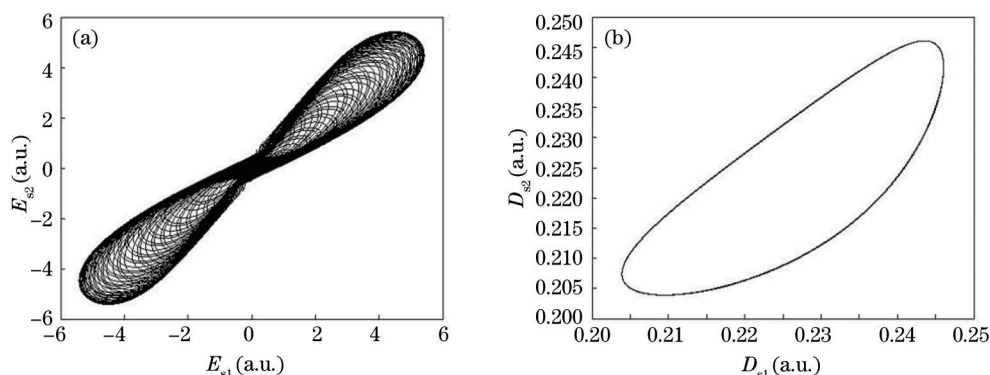


图 11 被驱动前系统处于混沌态时 S_{s1} 和 S_{s2} 的关系。(a) 被驱动前激光器 S_{s1} 和 S_{s2} 内的场强 E_{s1} 和 E_{s2} 的关系;
(b) 被驱动前激光器 S_{s1} 和 S_{s2} 的反转粒子数 D_{s1} 和 D_{s2} 的关系

Fig. 11 Relationship of chaotic S_{s1} and S_{s2} before being driven. (a) Relationship of electric field intensity E_{s1} and E_{s2} of S_{s1} and S_{s2} before being driven; (b) relationship of inversion population D_{s1} and D_{s2} of S_{s1} and S_{s2} before being driven

根据混沌同步理论, 在适当的驱动强度下, 两个被驱动系统能达到混沌同步。这里取驱动强度 $\alpha = 0.01$, 数值求解方程 (3)~(8) 式, 图 12 是被驱动后的激光器 S_{s1} 和 S_{s2} 的混沌吸引子及 $E_{s1} - E_{s2}$ 和 $D_{s1} - D_{s2}$ 的关系图。

图 12(c)、(d) 都是一条线, 即 $E_{s1} = E_{s2}$ 和 $D_{s1} = D_{s2}$, 尽管两个初值不同的混沌系统的初态是非同步的, 但是在适当的驱动强度下, 这两个系统实现了混沌的精确同步。

为了更加直观地表示两个被驱动系统的混沌同步质量, 引入关联系数, 其定义为^[23]

$$r = \frac{\langle E_{s1}(t)E_{s2}(t) \rangle - \langle E_{s1}(t) \rangle \langle E_{s2}(t) \rangle}{\sigma[E_{s1}(t)]\sigma[E_{s2}(t)]}, \quad (7)$$

式中 $\sigma^2[E_{s2}(t)] = \langle E_{s2}^2(t) \rangle - \langle E_{s2}(t) \rangle^2$, $\sigma^2[E_{s1}(t)] = \langle E_{s1}^2(t) \rangle - \langle E_{s1}(t) \rangle^2$, $\langle E_{s1}(t) \rangle$ 和 $\langle E_{s2}(t) \rangle$ 分别表示对 E_{s1} 和 E_{s2} 取平均值。

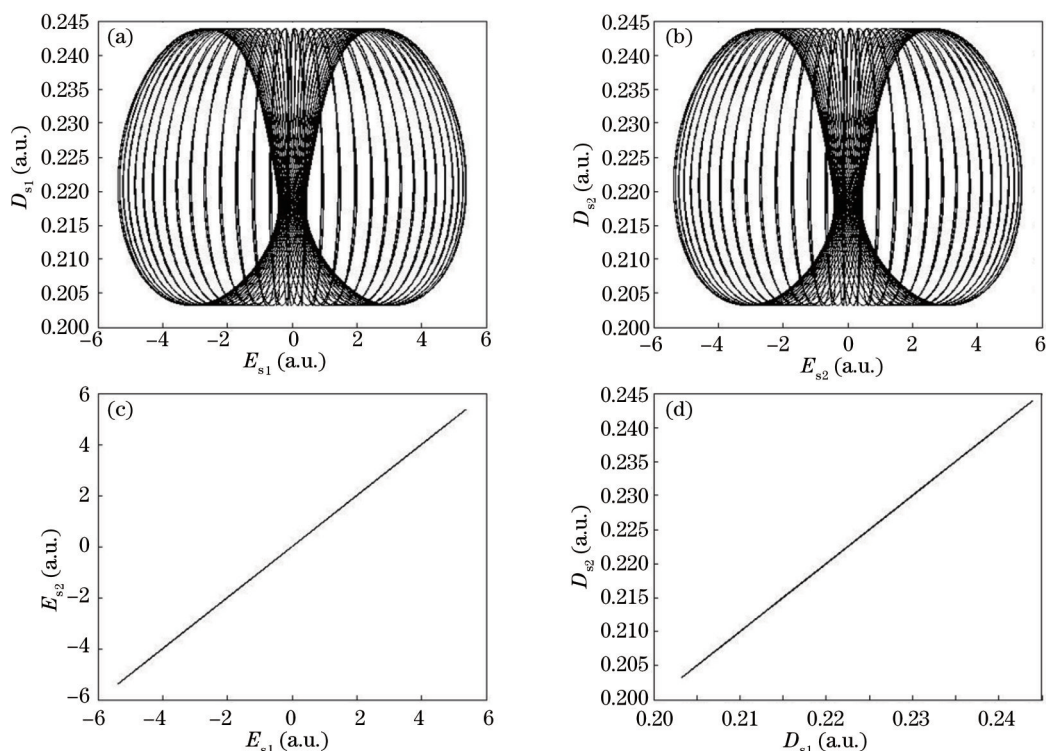


图 12 驱动前处于混沌态的激光器 S_1 和 S_2 的混沌同步, 驱动强度 $\alpha = 0.01$ 。(a) 被驱动后 S_1 的吸引子; (b) 被驱动后 S_2 的吸引子; (c) 被驱动后激光器 S_1 和 S_2 内场强 E_{s1} 和 E_{s2} 的关系; (d) 被驱动后激光器 S_1 和 S_2 反转粒子数 D_{s1} 和 D_{s2} 的关系

Fig.12 Chaos synchronization of lasers S_1 and S_2 which are chaotic before being driven with drive intensity $\alpha = 0.01$. (a) Attractor of S_1 after being driven; (b) attractor of S_2 after being driven; (c) relationship of electric field intensity E_{s1} and E_{s2} of S_1 and S_2 after being driven; (d) relationship of inversion population D_{s1} and D_{s2} of S_1 and S_2 after being driven

图 13 为关联系数 r 随驱动强度 α 的变化图, 其中小图是对大图的局部放大。关联系数表示两个被驱动系统的关联程度, 当 $r = 1$ 时表示两个被驱动系统达到了混沌同步。由大图可见, 左端 α 较小时, 关联系数 $r < 1$, 表示两个被驱动系统 S_1 和 S_2 没有达到混沌同步。由小图可见, α 在区间 $(0.002, 0.003)$ 内时, 曲线趋近于 $r = 1$ 的上边框, 但是没有达到 $r = 1$, 所以此时系统 S_1 和 S_2 没有达到混沌同步。随着驱动强度 α 的增加, 当 $\alpha \geq 0.0056$ 时, 有 $r = 1$, 表示两个被驱动系统达到了混沌同步。

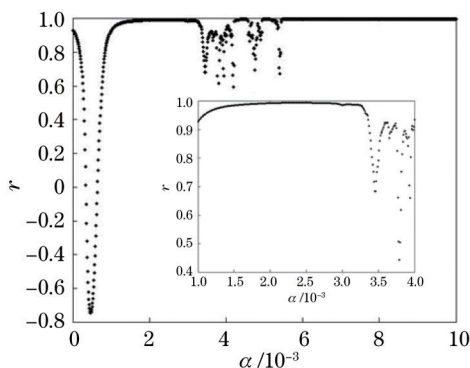


图 13 驱动前处于混沌态系统的关联系数 r 随驱动强度 α 的变化关系(小图是对大图的局部放大)
Fig.13 Correlation coefficient r versus driving intensity α when the systems are chaotic before being driven
(the small figure is the partial enlarged drawing of the large figure)

3.2.2 驱动系统的初态是混沌态, 被驱动系统的初态是周期态的情况

驱动系统仍然取图 4 所示的混沌态, 取两个被驱动系统的参数和图 8 对应的参数值相等, 但初值不同, 分别是 $(0.2, 0.1)$ 和 $(0.1, 0.1)$, 得到的周期态吸引子与图 8 相似, 被驱动前 S_1 和 S_2 系统的场强 $E_{s1} - E_{s2}$ 和反转粒

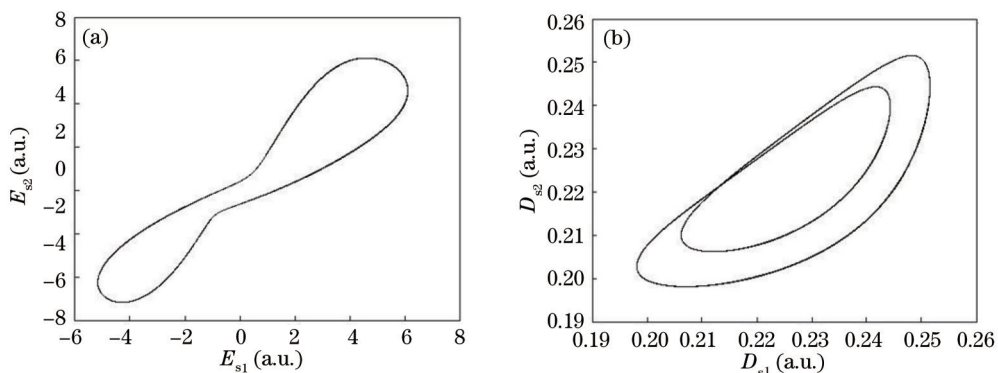


图 14 被驱动前系统处于周期态时 S_{s1} 和 S_{s2} 的关系。(a) 被驱动前激光器 S_{s1} 和 S_{s2} 内的场强 E_{s1} 和 E_{s2} 的关系；
(b) 被驱动前激光器 S_{s1} 和 S_{s2} 的反转粒子数 D_{s1} 和 D_{s2} 的关系

Fig.14 Relationship of periodic S_{s1} and S_{s2} before being driven. (a) Relationship of electric field intensity E_{s1} and E_{s2} of S_{s1} and S_{s2} before being driven; (b) relationship of inversion population D_{s1} and D_{s2} of S_{s1} and S_{s2} before being driven
子数 $D_{s1} - D_{s2}$ 的关系如图 14 所示, 可见它们此时是非同步的。

根据混沌同步理论, 在适当的驱动强度下, 两个被驱动系统能达到混沌同步。图 15 是在驱动强度 $\alpha = 0.01$ 时, 被驱动后的激光器 S_{s1} 和 S_{s2} 的混沌吸引子及 $E_{s1} - E_{s2}$ 和 $D_{s1} - D_{s2}$ 的关系图。

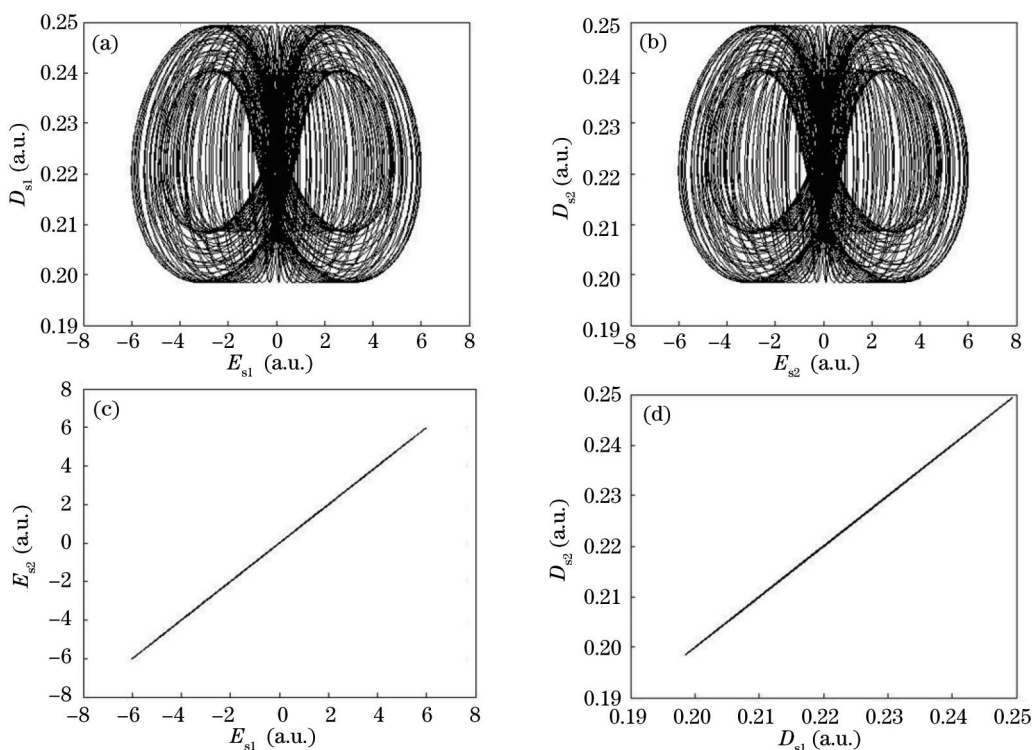


图 15 驱动前处于周期态的激光器 S_{s1} 和 S_{s2} 的混沌同步, 驱动强度 $\alpha = 0.01$ 。(a) 被驱动后 S_{s1} 的吸引子; (b) 被驱动后 S_{s2} 的吸引子;
(c) 被驱动后激光器 S_{s1} 和 S_{s2} 内场强 E_{s1} 和 E_{s2} 的关系; (d) 被驱动后激光器 S_{s1} 和 S_{s2} 反转粒子数 D_{s1} 和 D_{s2} 的关系

Fig.15 Chaos synchronization of lasers S_{s1} and S_{s2} which are periodic before being driven with drive intensity $\alpha = 0.01$. (a) Attractor of S_{s1} after being driven; (b) attractor of S_{s2} after being driven; (c) relationship of electric field intensity E_{s1} and E_{s2} of S_{s1} and S_{s2} after being driven; (d) relationship of inversion population D_{s1} and D_{s2} of S_{s1} and S_{s2} after being driven

图 15(c)、(d) 都是一条线, 即 $E_{s1} = E_{s2}$ 和 $D_{s1} = D_{s2}$, 尽管两个初值不同的处于周期状态的系统的初态不是同步的, 但是当它们被适当强度的混沌信号驱动时, 这两个系统达到了混沌精确同步。

同样这里用关联系数表示两个被驱动系统的混沌同步质量, 图 16 为关联系数 r 随驱动强度 α 的变化图, 其中小图是对大图的局部放大。由大图可见, 左端 α 较小时关联系数 $r < 1$, 表示两个被驱动系统 S_{s1} 和

S_2 没有达到混沌同步。由小图可见,在区间(0.0015, 0.0024)和(0.0027, 0.0035)内,曲线趋近于 $r=1$ 的上边框,但是没有达到 $r=1$,所以此时系统没有达到混沌同步。随着驱动强度 α 的增加,在 $\alpha \geq 0.0098$ 时,有 $r=1$,表示两个被驱动系统达到了混沌同步。

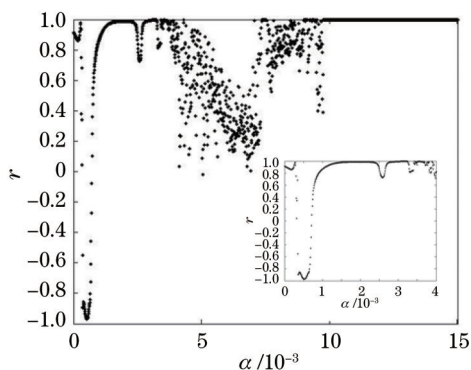


图 16 驱动前处于周期态时系统关联系数 r 随驱动强度 α 的变化关系(小图是对大图的部分放大)

Fig.16 Correlation coefficient r versus driving intensity α when the systems are periodic before being driven (the small figure is the partial enlarged drawing of the large figure)

比较图 13 和图 16 可见,前者达到混沌同步所需的驱动强度的最小值要小些,并且 $r=1$ 对应的驱动强度的区间要大些,即前者混沌同步的效果较好,所以初态是混沌态的单环掺铒光纤激光器被驱动后混沌同步的效果好些。分析如下:通过数值计算发现,初态是周期态的情况(后者),随着驱动强度的增大,两个被驱动系统首先要经过不同步的混沌态,之后才达到同步的混沌态,即实现混沌同步。但是前者的初态是混沌态,所以混沌同步的区间($r=1$ 的区间)对应的驱动强度的区间要大些。

4 结 论

利用延时相移反馈控制法研究了单环掺铒光纤激光器系统的混沌产生,数值研究结果表明通过适当地调节耦合系数、相移以及延迟时间,可以使这个系统进入混沌状态,其途径是阵发方式或倍周期分岔方式,并且给出了混沌状态对应的参数区间。进而利用混沌信号驱动法研究了单环掺铒光纤激光器系统的混沌同步,数值结果表明:在适当的驱动强度下,无论被驱动系统在被驱动前的初态是混沌态还是周期态,在选择参数范围内都可以达到混沌同步。在此基础上,利用关联系数分析了混沌同步的质量,结果表明:随着驱动强度的增加,当其超过某一临界值时,两个被驱动系统就将处于混沌同步状态;初态是混沌态的单环掺铒光纤激光器被驱动后实现混沌同步所需的驱动强度的临界值要小些,并且混沌同步的效果较好。研究结果对于单环掺铒光纤激光器的混沌应用是有意义的。

参 考 文 献

- 1 G Luo, T J Tee, P L Chu. Chaotic behavior in erbium-doped fiber-ring lasers[J]. J Opt Soc Am B, 1998, 15(3): 972-978.
- 2 E Ott, C Grebogi, J A Yorke. Controlling chaos[J]. Phys Rev Lett, 1990, 64(11): 1196-1199.
- 3 Huberman B A, Lumer E. Dynamics of adaptive systems[J]. IEEE Transactions on Circuits and System, 1990, 37(4): 547-550.
- 4 K Pyragas. Continuous control of chaos by self-controlling feedback[J]. Phys Lett A, 1992, 170(6): 421-428.
- 5 Pecora L M, Carroll T L. Synchronization in chaotic systems[J]. Phys Rev Lett, 1990, 64(8): 821-824.
- 6 L Kocarev, U Parlitz. General approach for chaotic synchronization with applications to communication[J]. Phys Rev Lett, 1995, 74(25): 5028-5031.
- 7 Liguang Luo, P L Chu, T Whitbread, *et al.*. Experimental observation of synchronization of chaos in erbium-doped fiber lasers[J]. 2000, 176(1-3): 213-217.
- 8 Zhang Ruyuan, Chen Jufang, Peng Janhua. Experimental study for discrete chaotic system[J]. Acta Physica Sinica 2003, 52(7): 1589-1594.
- 9 张入元, 陈菊芳, 彭建华. 脉冲驱动离散混沌系统同步的实验与理论研究[J]. 物理学报, 2003, 52(7): 1589-1594.
- 9 Liu Jingang, Shen Ke, Zhou Liwei. Study on mechanism of secure communication with driven chaos masking in optical bistable

- system[J]. *Acta Optica Sinica*, 1997,17(11): 1473-1478.
刘金刚, 沈 柯, 周立伟. 光学双稳系统混沌驱动保密通讯原理研究[J]. *光学学报*, 1997, 17(11): 1473-1478.
- 10 Yan Senlin, Chi Zeying, Chen Wenjian. Chaos synchronization through reverse-phase and its incoding in erbium-doped fiber lasers[J]. *Acta Optica Sinica*. 2004, 24(1): 29-32.
颜森林, 迟泽英, 陈文建. 掺铒光纤激光器反相位混沌同步及其编码[J]. *光学学报*, 2004, 24(1): 29-32.
- 11 Liu Yue, Zhang Wei, Feng Xue, *et al.*. Frequency locking and chaos in erbium-doped fiber-ring lasers with dual-frequency loss modulation[J]. *Journal of Tsinghua University (Science & Technology)*, 2009, 49(10): 1626-1631.
刘 越, 张 巍, 冯 雪, 等. 双频损耗调制型掺铒光纤环形激光器中锁频与混沌[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2009, 49(10): 1626-1631.
- 12 H Zhang, D Y Tang, L M Zhao, *et al.*. Compact graphene mode-locked wavelength-tunable erbium-doped fiber lasers: From all anomalous dispersion to all normal dispersion[J]. *Laser Physics Letters*, 2010, 7(8): 591-596.
- 13 Syed Zafar Ali , Muhammad Khawar Islam , Muhammad Zafrullah. Effect of parametric variation on generation and enhancement of chaos in erbium-doped fiber-ring lasers[J]. *Opt Eng*, 2010, 49(10): 105002.
- 14 Lin Yuke, Lu Jing, Li Jianping. Chaotic control of erbium-doped fiber ring laser with delay back[J]. *Laser Technology*, 2011,35(3): 319-321.
蔺玉珂, 卢 静, 李建平. 单环掺铒光纤激光器光延迟反馈的混沌控制[J]. *激光技术*, 2011, 35(3): 319-321.
- 15 Wu Fei, Jia Li, Zhang Yuebin, *et al.*. Dual-ring erbium-doped fiber laser chaos controlled with coupling phase-shift feedback[J]. *Infrared and Lasers Engineering*, 2012, 41(4): 865-900.
吴 飞, 贾 莉, 张跃宾, 等. 双环掺铒光纤激光器混沌的耦合反馈相移控制[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(4): 865-900.
- 16 Chang Feng, Feng Yuling, Yao Zhihai, *et al.*. Experimental investigation on chaos generation in erbiumdoped fiber single-ring lasers[J]. *Chin Phys B*, 2012, 21(10): 100504.
- 17 Jiao Mingxing, Xing Junhong, Tong Congwei, *et al.*. Design and experimental study of two-wavelength single-longitudinal-mode-erbium-doped fiber ring laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(6): 0602013.
焦明星, 邢俊红, 同聪维, 等. 双波长单纵模掺铒光纤环形激光器设计及实验研究[J]. *中国激光*, 2013, 40(6): 0602013.
- 18 Zhang Kewei, Zhao Wei, Xie Xiaoping, *et al.*. Experimental research of high gain and low noise figure optical amplifier based on erbium-doped fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(5): 0506003.
张珂卫, 赵 卫, 谢小平, 等. 基于掺铒光纤的高增益低噪声光放大器实验研究[J]. *光学学报*, 2013, 33(5): 0506003.
- 19 Liu Yi, Yu Jinlong, Wang Hongjie, *et al.*. Tunable multiwavelength Brillouin-erbium fiber laser based on feedback fiber loop[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(2): 0202003.
刘 毅, 于晋龙, 王红杰, 等. 基于反馈光纤环的可调多波长布里渊掺铒光纤激光器[J]. *中国激光*, 2014, 41(2): 0202003.
- 20 Su Weiyue, Wu Ruihuan. Research progress of multi-wavelength erbium-doped fiber lasers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(9): 090004.
苏炜跃, 吴锐欢. 多波长掺铒光纤激光器的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(9): 090004.
- 21 Feng Yuling, Chang Feng. Chaos generation by erbium-doped fiber single-ring lasers[J]. *Journal of Jilin University (Science Edition)*. 2014, 52(6): 1316-1319.
冯玉玲, 常 锋. 单环掺铒光纤激光器的混沌行为[J]. *吉林大学学报(理学版)*, 2014, 52(06): 1316-1319.
- 22 Fan Wenhua, Tian Xiaojian, Yu Yongli, *et al.*. Synchronizing erbium-doped fiber dual-ring lasers by using the method of feedback modulating-parameter[J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, 55(10): 5105-5108.
范文华, 田小建, 于永力, 等. 基于反馈参数调制的掺铒光纤激光器混沌同步[J]. *物理学报*, 2006, 55(10): 5105-5108.
- 23 Liu Bingzheng, Peng Jianhua. *Nonlinear Dynamics*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2004: 375-378.
刘秉正, 彭建华. *非线性动力学*[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004: 375-378.