

混沌系统的变量反馈参数开关的调制控制*

Parameter Switching Modulation with Variables Feedback for Chaotic System Control

高远 罗晓曙** 翁甲强** 蔡启仲
Gao Yuan Luo Xiaoshu Weng Jiaqiang Cai Qizhong

(广西工学院电子信息与控制工程系 柳州市东环路 545006)
(Dept. of Elec. Info. and Control Eng., Guangxi Univ. of Tech.,
Donghuanlu, Liuzhou, Guangxi, 545006, China)

摘要 将开关控制信号直接输入到被控的混沌系统中,仅通过改变外部脉冲开关信号的幅度、极性、宽度等参数,实现蔡氏混沌系统的各种不稳定周期轨道的稳定控制。在此控制策略基础上,引入变量反馈与脉冲开关来共同调制系统参数,研究变量反馈参数开关的调制控制。数值模拟和电路仿真的结果表明,混沌系统的变量反馈参数开关的调制控制方法能有效地把混沌电路系统控制到系统的左右不动点和 np 周期轨道。该方法对其他混沌电路的参数控制有一定的参考价值。

关键词 混沌控制 蔡氏电路 反馈控制 参数开关调制

中图分类号 O415.5

Abstract The method of parameter switching modulation with variables feedback for control chaotic system on the basis of the methods without variables feedback is studied. The chaotic Chua's circuit is selected as a typical example, and is controlled by using switching modulation with variables feedback on one of it's capacitor parameters. The chaotic circuit can be controlled to it's fixed point as well as np periodical orbits. The experimental results and numerical simulation have demonstrated that this chaos control method is effective, which has certain valuable reference for realizing chaotic circuits control in engineering.

Key words chaos control, Chua's circuit, feedback control, parameter switching

混沌现象是自然界广泛存在的一种现象,自 20 世纪 60 年代被发现以来,人们已对其性质行为做了深入的研究,然而对其控制方面,则是到了 90 年代才发展起来的。首先是美国马里兰大学的物理学家 Ott Grebogi 和 Yorke 提出了一种参数微扰法^[1],称为 OGY 方法,从而开创了混沌控制研究的新局面,现在混沌控制已成为非线性科学中一个十分热门的研究领域。迄今国内外已经提出了许多不同的混沌控制方法^[1~10]。混沌控制方法从控制原理大致可分为无反馈控制法和微扰反馈法;从反馈对象的不同,微扰反馈方法又分为参数微扰反馈控制法^[1~4,9]和变量微扰反馈控制法^[5,6]。OGY 方法、自适应控制法^[2]、参数共振微扰法^[3]等都属于对系统参数随时间改变的参数微扰反馈控制方法。

当前研究表明,当混沌系统或超混沌系统起控后,其控制机制可以是系统的最大李雅普洛夫指数变为一个稳定的负值或系统的能量满足最小准则^[11]。文献 [8] 中提出了参数开关调制控制混沌的方法,其主要策略是将开关控制信号直接输入到被控的混沌系统中,只通过改变外部脉冲开关信号的幅度、极性、宽度等参数就可以实现蔡氏混沌系统的各种不稳定周期轨道的稳定控制(包括不动点),该控制方法属于无反馈开环控制。本文在该控制方法策略的基础上,引入变量反馈与脉冲开关共同调制系统参数来实现混沌控制。理论模拟与电路仿真结果表明,混沌系统的变量反馈参数开关的调制控制方法能有效地把混沌电路系统控制到系统的左右不动点和 np 周期轨道,该方法对其他混沌电路的参数控制有一定的参考价值。

1 控制模型和控制方法

蔡氏自治电路的原理图模型如图 1 所示^[11],其动力学方程

2003-02-24 收稿, 2003-03-26 修回。

* 国家自然科学基金(10247005)、广西自然科学基金(0135063)和广西工学院科学研究基金(030108)资助。

** 广西师范大学物理与电子科学系,桂林市育才路 3 号 541004 (Phy. & Elec. Sci. Dept., Guangxi Normal Univ., 3 Yucailu, Guilin, Guangxi, 541004, China)

$$\begin{aligned}
 C_1 du_{c1} / dt &= G(u_{c2} - u_{c1}) - g(u_{c1}), \\
 C_2 du_{c2} / dt &= G(u_{c1} - u_{c2}) + i_L, \\
 L di_L / dt &= -u_{c2},
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

其中 u_{c1}, u_{c2} 分别是电容 C_1 和 C_2 两端的电压, i_L 是通过电感 L 的电流, $G = 1/R$ 是电阻的电导, NR 是非线性电阻, 通常叫做蔡氏二极管, 其伏安特性可用如下分段线性函数 $g(u_{c1})$ 来表示:

$$g(u_{c1}) = m_0 u_{c1} + (1/2)(m_1 - m_0)|u_{c1} + B_p| + (1/2)(m_0 - m_1)|u_{c1} - B_p|,
 \tag{2}$$

其中 m_0, m_1 分别是外折线和内折线的斜率, B_p 是折点的电压.

当系统参数取为^[11]: $1/C_1 = 9, C_2 = 1, 1/L = 7, G = 0.7, m_0 = -0.5, m_1 = -0.8, B_p = 1.0$, 电路出现混沌运动, 其典型的双蜗卷吸引子如图 2 所示.

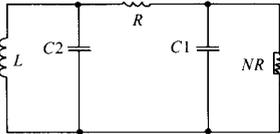


图 1 蔡氏自治电路的原理图

Fig. 1 Principle of Chua's autonomous circuit

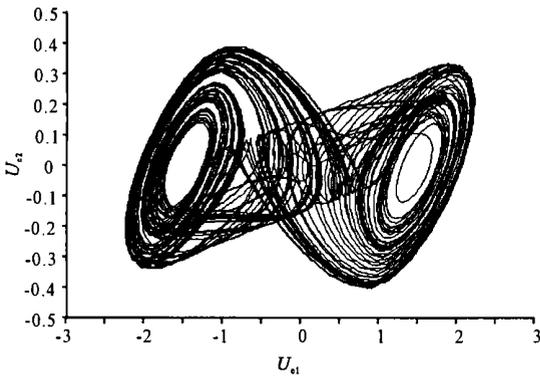


图 2 典型的双蜗卷吸引子

Fig. 2 Typical double-scroll attractor

本文仍采取对电路电容参数 C_2 进行开关调制达到混沌控制, 控制表达式为:

$$\dot{C}_2 = C_2(1 + A),
 \tag{3}$$

$$A = \log i(M(t)), M(t) = u_{c1} * \text{pulse}(t),
 \tag{4}$$

其中 A 为二值开关的阈值, A_{on} 为开关闭合的阈值, A_{off} 为开关断开的阈值, 开关值 A 的选定受调制信号 $M(t)$ 的控制, 其中 $M(t)$ 是脉冲信号 $\text{pulse}(t)$ 与状态反馈信号 u_{c1} 的调制信号, 控制逻辑是 (用 Fortran 语言表示)

$$\text{if } (M(t) \cdot \text{gt. } A) \text{ then } A = A_{on},
 \tag{5}$$

$$\text{if } (M(t) \cdot \text{LT. } A) \text{ then } A = A_{off},
 \tag{6}$$

本文取 $0 < A = A_{on} = -A_{off} < 1$, 其中 $\text{pulse}(t)$ 可以是单极性或是双极性信号, 对称或者是非对称脉冲信号. 该控制方法的特点除可以改变开关的阈值 A 外, 还可以通过改变脉冲信号的宽度、极性、对称性等多

种方式达到不同的控制目标. 其控制机理可以通过物理系统在能量最低状态下最稳定的原理^[10] 和控制后系统最大李雅普洛夫指数随时间的转变来解释.

2 数值模拟与分析

用四阶龙格库塔法求解方程组, 积分步长为 $\Delta t = 0.01$, 系统参数取文献 [11] 中蔡氏电路出现混沌现象的参数. 蔡氏电路具有 3 个不动点, 它们分别为: $(1.5, 0.0, -1.5), (0.0, 0.0, 0.0), (-1.5, 0.0, 1.5)$. 本文选择对称双极性开关, $A_{on} = -A_{off}$, 选择的脉冲信号也为双极性信号, 其幅度为一个单位, 脉冲信号宽度为 $T_w = N_1$, 周期 $T_p = N_2$. 图 3 示出脉冲宽度 $T_w = 0.01$, 脉冲周期 $T_p = 0.1$ 时的脉冲波形图, 它是我们用于调制的脉从信号. 采用上述的控制方法, 只要选择合适大小的 A, N_1 和 N_2 , 就能控制得到电路系统的不动点和 $1p, 2p, 4p, 6p, 8p$ 等各种稳定周期轨道的控制结果. 控制结果如图 4~ 9 所示. 图 10 是当 $A = 0.9, T_w = 0.09, T_p = 0.1$ 控制条件下, 控制左边不动点的结果图.

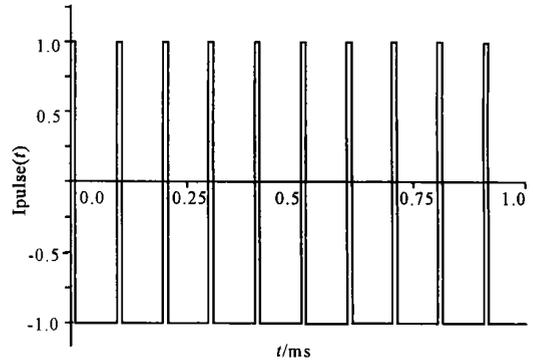


图 3 脉冲信号波形图 ($T_w = 0.01, T_p = 0.1$)

Fig. 3 Oscilloscope of impulse signal ($T_w = 0.01, T_p = 0.1$).

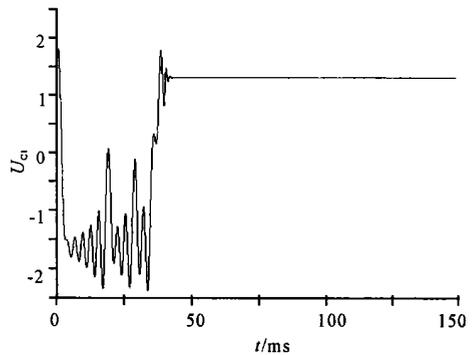


图 4 右边不动点的控制结果 ($|A| = 0.9$)

Fig. 4 Control results of right fixed point ($|A| = 0.9$)

轨道,因此通过调节开关阈值或脉冲信号的对称性可根据控制目标灵活调整.

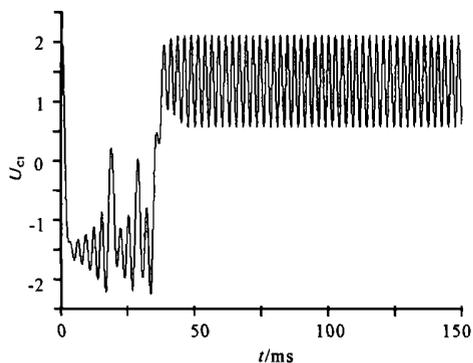


图 5 $1p$ 轨道的控制结果 ($|A| = 0.45$)
Fig. 5 Control results of orbit $1p$ ($|A| = 0.45$)

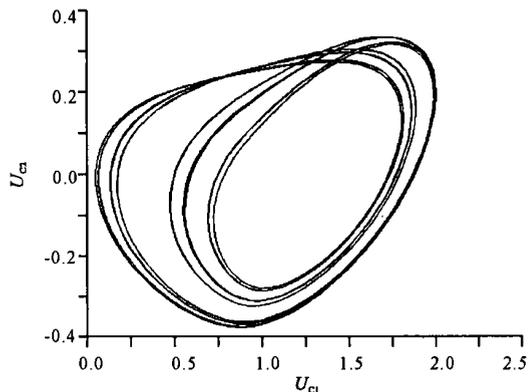


图 9 $8p$ 轨道的控制结果 ($|A| = 0.227$)
Fig. 9 Control results of orbit $8p$ ($|A| = 0.227$)

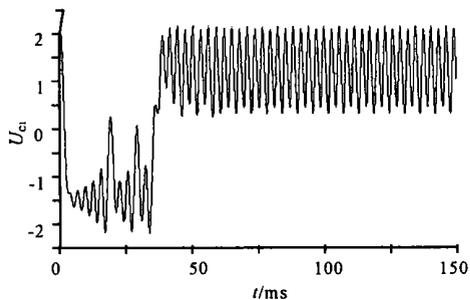


图 6 $2p$ 轨道的控制结果 ($|A| = 0.31$)
Fig. 6 Control results of orbit $2p$ ($|A| = 0.31$)

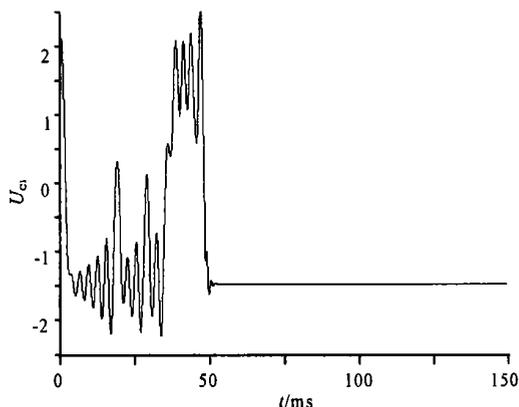


图 10 左边不动点的控制结果 ($|A| = 0.9$)
Fig. 10 Control results of left fixed point ($|A| = 0.9$)

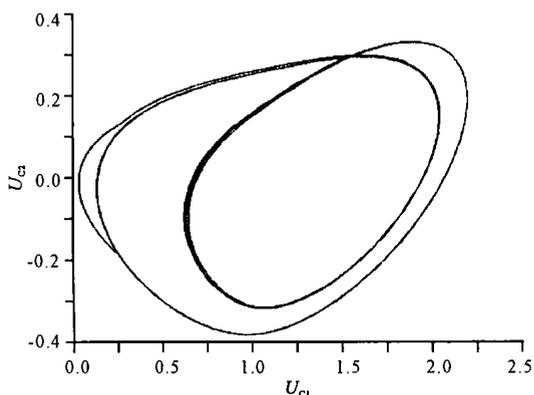


图 7 $4p$ 轨道的控制结果 ($|A| = 0.26$)
Fig. 7 Control results of orbit $4p$ ($|A| = 0.26$)

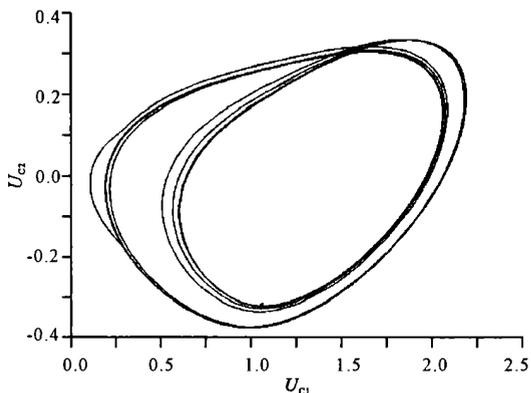


图 8 $6p$ 轨道的控制结果 ($|A| = 0.28$)
Fig. 8 Control results of orbit $6p$ ($|A| = 0.28$)

3 控制机制

在自然界中,一个物理系统总是在能量最低状态下最稳定,稳定的非线性动态系统也总是往能量低的方向运动.本文引入系统演化过程中的广义能量作为起控条件的观察对象,当系统能量变大时,表示系统轨迹不断扩张和伸长,这时加入反馈控制使系统轨迹的扩张和伸长的倾向得以抑制,当系统得以稳定控制后,系统的广义能量函数理应趋于稳定的变化状态.

蔡氏电路中的贮能(由电能和磁能组成),并由下式给出:

$$E(t) = \frac{1}{2}C_1 u_{c1}^2 + \frac{1}{2}C_2 u_{c2}^2 + \frac{1}{2}L i^2. \quad (7)$$

图 11给出了蔡氏电路在控制在右边不动点情况下,贮能 $E(t)$ 随时间的稳定变化图.当混沌系统得以稳定控制,系统的最大李亚普洛夫指数 LE_{\max} 同时也应当由正数变为负数.图 12示出了当混沌电路控制在右边不动点时,最大李雅普洛夫指数 $LE_{\max}(t)$ 单调递减并收敛为一个负值的变化规律.

数值结果研究表明,固定控制开关的阈值 A 的大小,改变脉冲宽度或周期(改变信号的对称情况),同样可以得到电路系统的不动点和各种稳定的周期

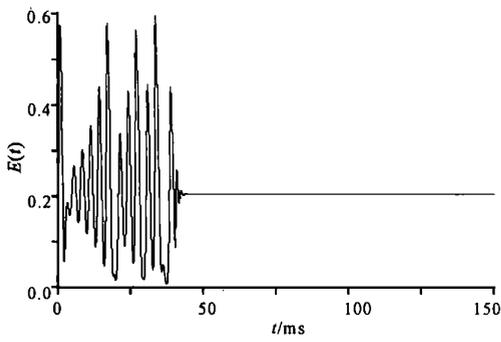


图 11 电路能量 $E(t)$ 随时间的变化
Fig. 11 Time-varied circuit energy $E(t)$

4 电路仿真结果

为了进一步证实上述控制方法的正确性和有效性,并检验该控制方法工程应用的可能性,我们用 Pspice 电路仿真软件进行了电路不动点, 1_P 轨道的控制仿真. 由数值模拟结果可知,当开关的阈值幅度 $|A| = 0.9V$ 时,系统别稳定到一个不动点,此时电容交替取值为

$$C_2 = \begin{cases} 1.9C_2, A = 0.9V, \\ 0.1C_2, A = -0.9V. \end{cases} \quad (8)$$

根据上述取值方式,我们设计的控制仿真电路

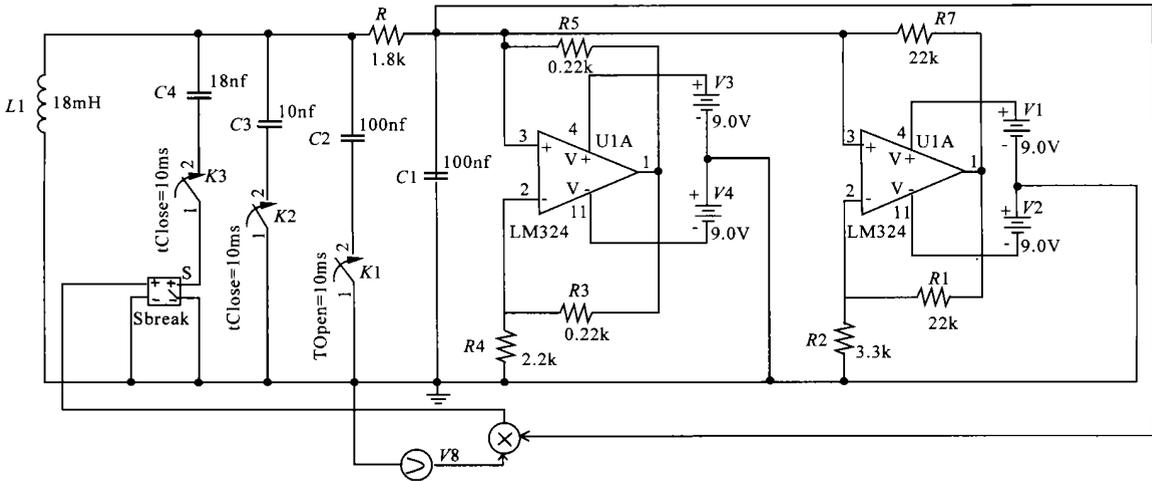


图 13 蔡氏电路混沌控制仿真图
Fig. 13 Simulation of chaotic chua's circuit control

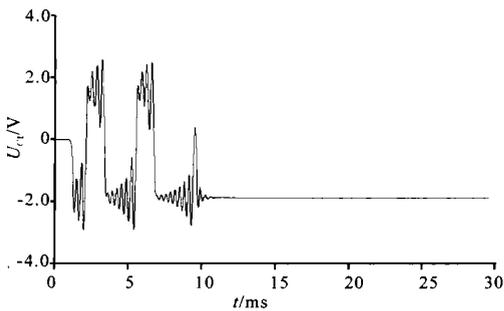


图 14 电路左边不动点的仿真结果
Fig. 14 Simulation results of left fixed point to the circuit

如图 13 所示,图中开关 k_1 在起控前处于闭合状态,开关 k_2, k_3 处于断开状态,电路系统出现混沌运动, $t = 10ms$ 时加入控制,此时开关 k_1 断开, k_2, k_3 闭合. 开关 S 在调制脉冲电压 $M(t)$ 的控制下不断地断开、闭合,使得蔡氏电路系统的电容 C_2 取值满足式 (4) 表达的规律,系统被控制到一个稳定的不动点,如图 14 所示,当改变受控系统的电容参数的取值,系统能控制到一个稳定的 1_P 轨道. 如图 15 所示.

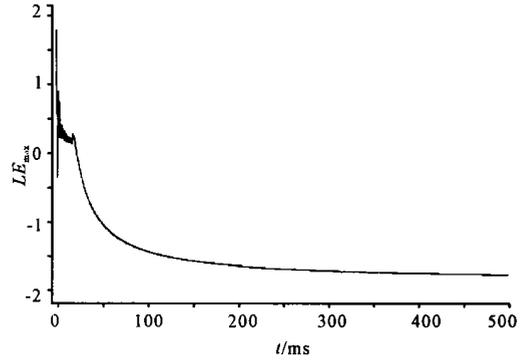


图 12 电路最大李氏指数 $LE_{max}(t)$ 随时间的变化
Fig. 12 Evolution of the maximum Lyapunov exponent in the circuit

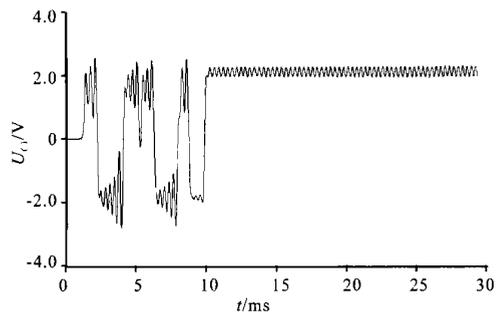


图 15 电路 1_P 轨道的控制仿真结果 ($C_3 = 86.5nf, C_4 = 27nf$)
Fig. 15 Simulation results of controlling orbit 1_P ($C_3 = 86.5nf, C_4 = 27nf$)

5 结束语

本文在文献 [8] 开环控制的研究基础上,进一步研究了带有变量反馈的参数开关调制混沌系统的闭环控制策略.通过这种具有变量反馈的参数控制方法,可以实现原混沌系统正的李雅普洛夫指数转变为负数的控制机制,抑制混沌轨道的伸长与扩张,把混沌蔡氏电路控制到各种稳定的周期状态.数值模拟与仿真结果显示了该方法的有效性.该方法不用预先对混沌系统吸引子进行较详细的分析计算,也不必像 OGY方法那样,需等待系统靠近待控的不动点时,控制才起作用,控制时刻可以任意加入.该方法为工程中实现混沌电路的混沌控制提供了一定的参考价值.

参考文献

- 1 Ott E, Grebogi C, Yorke J A. Controlling chaos. Phys Rev Lett, 1990, 64(11): 1196~ 1199.
- 2 Qammar H K, Mossagchi, Murphy F L. Dynamical complexity arising in the adaptive control of a chaotic system. Phys Rev Lett A, 1993, 178(3): 279~ 283.
- 3 Lima B, Petini M. Suppression of chaos by resonant

- parametric perturbations, Phys Rev A, 1992, 41(4): 726~ 733.
- 4 Pyragas K. Continuous control of chaos by self-controlling feedback. Phys Lett A, 1992, 170(6): 421~ 428.
- 5 伍维根,古天祥.混沌系统的非线性反馈跟踪控制.物理学报, 2000, (49): 1922.
- 6 Guemez J, Matuas M A. Control of chaos in unidimensional maps. Phys Lett A, 1993, 181(6): 29~ 32.
- 7 方锦清.非线性系统中混沌控制方法.同步原理及其应用前景(一).物理学进展, 1996, (16): 1~ 74.
- 8 罗晓曙,汪秉宏,陈关荣等.混沌系统的参数开关调制法研究.物理学报, 2002, 51(5): 988~ 993.
- 9 罗晓曙,方锦清,王力虎.一种基于间歇性正比于系统参量的脉冲微扰控制混沌方法.物理学报, 1999, 48(12): 2001~ 2196.
- 10 X Sh Luo, Fang J Q, Wang L H et al. A new strategy of chaos control and a unified mechanism for several kinds of chaos control methods. Acta Physica Sinica, 1999, 8(12): 895~ 901.
- 11 Takashi M, Leon O. The genesis of Chua's circuit. Int J Electron Communication, 1992, 46(4): 250~ 257.

(责任编辑:黎贞崇)

(上接第 186页 Continue from page 186)

- 2 熊佐亮.关于三种群Ⅱ类功能性反应周期系数模型研究.生物数学学报, 1998, 13(1): 38~ 42.
- 3 贾建文.具Ⅲ类功能反应的非自治捕食系统的持续性和周期解.生物数学学报, 2001, 16(1): 59~ 62.
- 4 Li B W, Zeng X W. Existence of positive solution for a two-patches competition system with diffusion and time delay and functional response. Appl Math J Chinese Univ

Ser B, 2003, 18(1): 1~ 8.

- 5 Barbalat I. Systems d'équations différentielle d'oscillations nonlineaires. Rev. Roumaine Math Pures Appl, 1959, 4 261~ 270.

(责任编辑:黎贞崇)

中国科学家绘出 SARS病毒精细“家谱”

中国科学院理论物理研究所郝柏林院士及其领导的科研小组最近采用全新的方法,在 SARS病毒不同毒株之间的亲缘关系以及与其它冠状病毒的进化关系研究方面取得进展.

研究人员首先选取 6 个完整的 SARS基因组和 14 个已知的冠状病毒的完全基因组(与 SARS同属 Nidovirales科),利用“组分矢量”方法探讨这些基因之间的进化关系.从已经得到的进化树可以看出,在全基因组的层次上,选定的 6 个 SARS毒株相互之间关系较近,在进化树上形成单群,而与已知的冠状病毒距离比较远,说明 SARS冠状病毒是冠状病毒属的独立种群.

此外,由于 SARS冠状病毒各个毒株之间的差异太小,如此构建的进化树并不足以区别出 SARS病毒之间的亲缘关系.研究人员在传统的“距离矩阵方法”基础之上,使用“超度规”算法得到了具有精细结构的带根亲缘树,这与以前研究得到的无根亲缘树相比成为一个更有意义的结果.

(摘自《科学时报》,2003年 8月 15日出版)