

均匀度理论在分形和混沌研究中的应用

罗传文

(东北林业大学林学院, 博士、教授 哈尔滨 150040)

〔摘要〕 证明了 1 维和 n 维欧氏空间中均匀分布的点集的统一度定理, 这是随机性点集空间性质研究的基础, 也是混沌点集空间性质研究的基础; 将均匀度理论应用于混沌研究中发现, 从倍周期分岔到混沌的过程, 均匀度 (独占线长度) 则从确定性收敛变为均方收敛。独占线长度可以用于鉴别混沌的程度, 以此为基础定义并计算了混沌强度 (chaometry)。通过混沌强度可以实现对混沌模型和混沌序列的定量评价。混沌可以解释为: 轨道点集均匀化。

〔关键词〕 均匀度定理 混沌 分形 独占球 混沌强度 [中图分类号] 018

〔文献标识码〕 A

〔文章编号〕 1000-7857(2004)12-0031-05

UNIFORMITY THEORY AND ITS APPLICATION ON FRACTAL AND CHAOS

LUO Chuan-wen

(School of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract: The uniform index theorems in R_1 and R_n were proved, which is the base of spatial property studies on random point set, also that of the spatial property studies on chaos. When uniformity theory was used in the studies on chaos, it was found that the uniform indices of double periodic fork were determinate convergent and that of chaos were convergent in mean square. Monopolized line length can be used to differentiate the intensity of chaos, on which the new word "chaometry" was constructed to show the intensity of chaos. The model and serial on chaos can be quantitatively evaluated by chaometry. Chaos can be interpreted as uniformization of track point set.

Key Words: uniform index theorem, chaos, fractal, monopolized sphere, chaometry

CLC Number: 018

Document Code: A

Article ID: 1000-7857(2004)12-0031-05

1 引言

笔者引入的独占圆 (线、球) 的定义^[1], 使点集的均匀性的研究大有推进。随机性点集和确定性点集是两种不同性质的点集^[5,6], 但都可以不预先假定而求均匀度, 并且笔者证明了度量映射定理^[11]、随机格局均匀度定理, 为此, 将独占球的定义、性质^[11]和有关的定理统称为均匀度理论。

李天岩 (1975)^[10]提出了混沌的数学定义, 而混沌动力系统普遍存在于数学、物理、化学和天文学之中, 所以在诸多领域均受到热烈关注^[1-4]。过去一般使用李亚普诺夫指数研究混沌, 也使用分维、熵、拓扑不变量等与空间相关的指数来研究混沌, 并取得了诸多结论^[7-9]。本文从轨道均匀度的角度研究混沌, 得到了一些非常有价值的结论。

2 不同维数的点集均匀度定理

独占线、独占圆、 n 维独占球的定义和性质的论文已经公开发表^[11], n 维球的体积为^[13]:

$$V_n(r) = \frac{\pi^{\frac{n}{2}}}{\Gamma(\frac{n}{2}+1)} r^n \quad (1)$$

$n=1, 2, \dots$ 。 r 为球的半径。

定义 1 设 A 为包含 n 维欧氏空间的点集 S (但独占球可以跨出边界) 的多面体体积, a 为点集 S 的独占球总体积,

则点集 S 的均匀度定义为: $L_n = \frac{2^n a}{V_n(1)A^n}$

可以证明, 对于 2 维完全均匀格局^[11], 有 $L_2=1$ 。类似于 2 维, 定义 n 维欧氏空间的完全均匀格局后, 有 $L_n=1$ 。

2.1 1 维随机格局的均匀度定理

点集内点与点之间的距离的比例关系称为点集的格局。显然, 格局对平移、缩放和旋转等变换有不定性。

若空间上分布的点集满足均匀分布, 则称点集是随机的, 或称格局是随机的, 或称点集是随机格局。换言之, 若点集的均匀度落在均匀分布的置信区间, 则称点集为随机格局; 若点集的均匀度大于均匀分布的置信区间的最大值, 则称点集为均匀格局; 若点集的均匀度小于均匀分布的置信区间的最小值, 则称格局为集聚格局。这 3 个概念与生态学中应用的概念完全一致。

引理 1 设在区间 $[a, b]$ 上分布的 m 个点是随机格局, 那么从点集中随机选一点 a_0 , 则它与最近邻体之间的距离小于 s 的概率为:

收稿日期: 2004-09-18。

作者简介: 罗传文, 男, 1962~, 哈尔滨市东北林业大学林学院 321 信箱 (150040), 主要从事空间信息学研究, E-mail: luocw-cf@nefu.edu.cn。

$$F(S)=P(\text{最近邻体距离}<s)\approx 1-e^{-\lambda s} \quad (2)$$

其中: $\lambda = \frac{2m}{A}$, 它是半径为 1 (区间长为 2) 的区间上的平均点数; A 为区间长。

证明: 根据假设, $F(s)$ 相当于以 a_0 为中心, 以 s 为半径的区间内最少有一个点的概率, 它等价于向半径为 s 的区间内投 m 个点, 一次也没有投中的逆事件, 其概率为:

$$F(s)=1-\left(1-\frac{2s}{A}\right)^m=1-\left[1+\left(-\frac{\lambda s}{m}\right)\right]^{-\frac{\lambda s}{m}} e^{-\lambda s}$$

这里假设 m 与区间长度 s 之间保持一定的关系, 使得 λs 有适当的大小, 且:

$$-\frac{\lambda s}{m} \rightarrow 0^+ \text{ 当 } m \rightarrow \infty \text{ 时}$$

$$\text{且因为: } \lim_{x \rightarrow 0} (1+x)^{\frac{1}{x}} = e$$

$$\text{所以有: } F(s)=1-\left[1+\left(-\frac{\lambda s}{m}\right)\right]^{-\frac{\lambda s}{m}} \rightarrow 1-e^{-\lambda s} \text{ (当 } m \rightarrow \infty \text{ 时)}$$

证毕。

定理 1 (1 维随机格局的均匀度定理) 考虑一个在区间 $[a, b]$ 上有随机格局的点集, 设点数为 m , 则点集的均匀度 $L \sim \frac{\chi^2(2m)}{4m}$ 。

证明: 根据假设, 点集内任意一点的独占线长度就是该点与最近邻体的距离 s ,

$$F(s)=1-e^{-\lambda s}$$

其中, λ 为半径为 1 的区间上的平均点数, 设区间 $[a, b]$ 内的总点数为 m , 则 $\lambda = \frac{2m}{ab}$, s 的密度函数为:

$$f(s)=\lambda e^{-\lambda s}; E(s)=\int_0^\infty \lambda e^{-\lambda s} s ds = \frac{1}{\lambda}; D(s)=\frac{1}{\lambda^2}。$$

下面探究 s 的 m 个随机样值之平均 $\bar{s}$ 的样本分布。

由于 s 的分布函数是: $F(s)=1-e^{-\lambda s}$

令 $y=2\lambda s$, 则 y 的分布函数和密度函数分别为:

$$G(y)=1-e^{-y/2}, g(y)=\frac{1}{2}e^{-y/2}$$

推算 y 的特征函数为:

$$f(t)=\frac{1}{2} \int_0^\infty e^{-y/2} e^{ity} dy = \frac{1}{1-2it}$$

显然, 这是自由度为 2 的 χ^2 分布的特征函数。现在能得出 m 个独立 y 值之和 $m\bar{y}$ 的特征函数, 因为它给为:

$$[f(t)]^m = \frac{1}{(1-2it)^m}$$

即它是自由度为 $2m$ 的分布的特征函数, 所以, 这就是所具有的分布。

令 $z=2m\lambda \bar{s}$, 有密度函数:

$$h(z)=\frac{1}{2^m \Gamma(m)} z^{m-1} e^{-z/2}$$

它是 $2m$ 个自由度的 χ^2 分布的密度函数, 则 $\bar{s}$ 的密度函数为:

$$h(\bar{s})=2m\lambda \frac{1}{2^m \Gamma(m)} (2m\lambda \bar{s})^{m-1} e^{-m\lambda \bar{s}} = \frac{(m\lambda)^m \bar{s}^{m-1} e^{-m\lambda \bar{s}}}{\Gamma(m)}$$

由于点集内的任意一点与最近邻体的距离就是该点的独占线长度, 所以 $T=m\bar{s}$ 就是点集的独占线总长度, 那么点集均匀度为:

$$L=\frac{T}{ab}=\frac{m\bar{s}}{ab}=2m\frac{2m}{ab}\bar{s} \cdot \frac{1}{4m}=\frac{1}{4m}2m\lambda \bar{s}=\frac{z}{4m}$$

所以, 均匀度 L 的分布密度函数为:

$$h(l)=4m\frac{1}{2^m \Gamma(m)} (4ml)^{m-1} e^{-\frac{4ml}{2}} = \frac{(2m)^m}{\Gamma(m)} l^{m-1} e^{-2ml} \text{ (当 } l>0 \text{ 时)}$$

换言之, L 服从 $\frac{\chi^2(2m)}{4m}$ 的分布, 且有 $E(L)=\frac{1}{2}, D(L)=$

$$\frac{4m}{(4m)^2}=\frac{1}{4m}, \text{ 可见 } L \text{ 对于随机格局是均方收敛的。}$$

证毕。

需要说明的是, 上述分布密度是一个近似的分布密度。我们可以得到这样的结论:

1 维点集的均匀度可以近似地用 χ^2 分布来描述; 点集的格局类型可以用相应的分布来进行检验。

2.2 n 维随机格局的均匀度定理

引理 2 设在 n 维欧氏空间一个多面体内有 m 个点的点集, 且该点集是随机格局, 从点集中随机选一点 a_0 , 则它与最近邻体之间的距离小于 r 的概率为:

$$F(r)=P(\text{最近邻体距离}<r)\approx 1-e^{-\lambda s} \quad (3)$$

其中: $s=r^n, \lambda=m\frac{V_n(1)}{A}$, λ 是半径为 1 的球内的平均点数, A 为多面体的体积。(3)式右端也可以看成 s 的分布函数, s 正是独占体体积。

此引理的证明与引理 1 的证明相似, 故略。

定理 2 (n 维随机格局的均匀度定理) 设在 n 维欧氏空间一个多面体内有 m 个点的点集, 且该点集是随机格局, 则多面体内的点集的均匀度 L 服从 $\frac{\chi^2(2m)}{2V_n(1)m}$ 分布, 其中 $\chi^2(2m)$ 为自由度为 $2m$ 的 χ^2 分布。

此定理的证明与定理 1 的证明相似。

可见, $E(L)=\frac{E(\chi^2(2m))}{2V_n(1)m}=\frac{1}{V_n(1)}, D(L)=\frac{4m}{4m^2 V_n(1)^2}=$

$\frac{1}{mV_n(1)^2} \rightarrow 0$ (当 $m \rightarrow \infty$ 时), 可见随机格局的点集的均匀度是均方收敛的。

当 $n=1$ 时, $E(L)=0.5$; 当 $n=2$ 时, $E(L)\approx 0.318$; 当 $n=3$ 时, $E(L)\approx 0.238$ 。

而对于任意 n , 完全均匀格局的均匀度为 1^[11]。可见, 为了保证完全均匀格局的均匀度为 1, 随机格局的期望值随维数的增加而降低。这是因为随着维数的增加, 独占球与独占

体之间的间隙越来越大, 其比值为: $\frac{\pi^{\frac{n}{2}}}{2^n \Gamma(\frac{n}{2}+1)} \rightarrow 0$ (当 $n \rightarrow \infty$ 时)。

设 b 为点集的独占体的总体积 (独占球的外接正方体称为独占体), a 为点集的独占球的总体积, 则有:

$$b = \frac{2^n a}{V_n(1)}; L = \frac{b}{A}; b \sim \frac{\chi^2(2m)}{2\lambda} = \frac{A\chi^2(2m)}{2mV_n(1)}.$$

由于独占体的总体积 b 与独占球的总体积有 a 比例关系, 所以, 独占球总体积、独占体总体积和均匀度 3 个指标中只要获得 1 个的性质, 另 2 个的性质就可以确定。

引理 3 对于 n 维欧氏空间中任意有界的差分模型, 若模型有不动点、渐进周期轨道、周期轨道这样的平庸吸引子, 则差分模型所产生的点集的独占球总体积和均匀度必收敛于一个常数。

显然, 由于模型是有界的, 所产生点集是有界的, 点集的独占球总体积和均匀度依赖于邻体关系, 对上述平庸吸引子而言, 从某次迭代后产生的点与原先的点会充分地接近, 这时新产生的点不会改变独占球总体积和均匀度。

3 准分形集的均匀度

定义 2 n 维欧氏空间中的疏朗集 S_1, S_2 , 若存在一一映射: $f: S_1 \rightarrow S_2$, 且对任意 $x_1, x_2 \in S_1$ 有:

$$d(x_1, x_2) = cd(f(x_1), f(x_2))$$

其中 $d(\cdot)$ 表示欧氏距离, c 为常数, 则称 S_1 与 S_2 有相似的格局。若 S_1 与它的子集的格局相似, 则称它为格局自相似的。特别地, 一个格局自相似的疏朗集, 若它的独占球集是分形集, 则称此疏朗集为准分形集 (如例 1)。Koch 曲线的全部节点组成的集合是准分形集。

引理 4 设 S 为 n 维欧氏空间中具有格局自相似性质的分形点集, 则 S 的均匀度为 0。

证明: 设 S 的独占球集为 S_m , 则 S_m 是分形集。

设 S_m 的分维为 $D < n$, 对 S_m 的 Hausdorff 维有^[12]:

$$\dim_H S_m \leq D < n$$

则 S_m 的 n 维 Hausdorff 测度: $H^n(S_m) = 0$

显然, $H^n(S_m)$ 正是 S 的独占球总体积

根据均匀度的定义, S 的均匀度为 0。

证毕。

例 1 图 1 是 Koch 曲线的产生过程。将 Koch 曲线的节点经过多次投影最终投向最初的横轴, 具体的产生过程在下面用坐标表示, 如此形成的点集称为 Koch 点集。

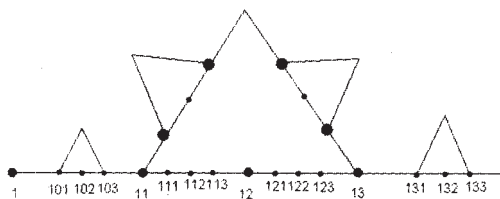


图 1 Koch 曲线产生的 Koch 点集

推导:

根据 Koch 点集的产生过程, 第 1 次产生 4 个点为: 1、11、12、13, 其位置坐标表示为: $P(1)=0$ $P(11)=1/3$ $P(12)=1/2$ $P(13)=2/3$

其独占线长度为: $M_1 = \frac{1}{3} + \frac{1}{2} \times \frac{1}{3} + \frac{1}{2} \times \frac{1}{3} + \frac{1}{2} \times \frac{1}{3} = \frac{5}{6}$

第 2 次产生出 16 个点 (见图 1), 其位置坐标表示如下:

$P(1)=0$ $P(101)=1/9$ $P(102)=1/6$ $P(103)=2/9$ $P(11)=1/3$ $P(111)=7/18$ $P(112)=15/36$

$P(113)=4/9$ $P(12)=1/2$ $P(121)=5/9$ $P(122)=7/12$ $P(123)=2/3$

$=11/18$ $P(13)=2/3$

$P(131)=7/9$ $P(132)=15/18$ $P(133)=8/9$

其独占线长度为: $M_2 = (\frac{5}{6})^2$

第 n 次产生出 4^n 个点, 其独占线长度为: $M_n = (\frac{5}{6})^n$

显然, 这样产生的点集其整体与局部是格局自相似的, 是一个准分形集, 称为 Koch 点集, 其均匀度为 0。对应的独占线集是一个分形集, 其长度为 0, 其分维为: $\frac{\ln 5}{\ln 6}$ 。

准分形集是最不均匀的点集, 每一个点均能映射出一个子点集, 该子点集的独占球的总体积与该点的原独占球体积之比为 q , 必有 $q < 1$ 。对 Koch 点集而言, $q = 5/6$ 。

4 均匀度在混沌研究中的应用

考虑 Logistic 模型:

$$x_{n+1} = rx_n(1-x_n) \quad r \in [0, 4] \quad x \in [0, 1] \quad (4)$$

Feigenbaum 对这一模型进行了详细的研究^[8], 并得到了一个倍周期分岔的普适常数。根据这些常数可以判断模型 (4) 是否处于混沌状态。

下列均匀度的计算过程均是模型 (4) 取 $x_0 = 0.5$ 的计算结果。

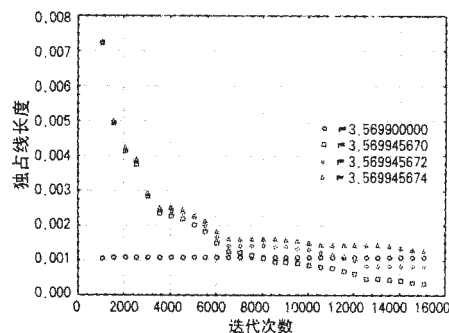


图 2 模型从周期运动进入混沌的过程中独占线长度没有发生明显的跃迁 (而对不同的混沌程度却可以明显地区分)

图 2 表明了从周期运动到混沌的过渡过程, 这一过程的均匀度有趋于 0 的迹象, 所以, 它极有可能是分形, 这说明系统从周期运动过渡到混沌的临界状态才可能产生分形。图 2 表明, 均匀度的波动区间与 r 值有关。

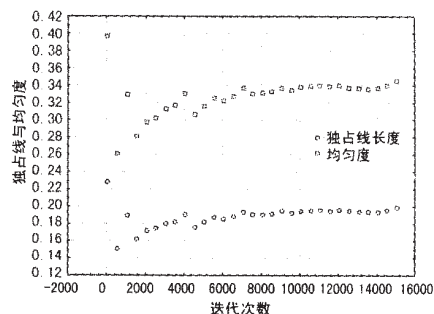


图 3 $r=3.6$ 时均匀度 (独占线长度) 变为不能确定性收敛

图 3 表明, 模型 (4) 进入混沌后均匀度 (独占线长度) 不能确定性收敛, 但可以验证它是均方收敛的, 其均方极限与

r 值有关。

由于模型(4)有从混沌进入 3 周期运动的过程,其区间是 $[3.828427 \ 3.828428]$,在长度为 0.00001 的区间上完成了从混沌进入周期运动的过程。下面来研究这一过程。

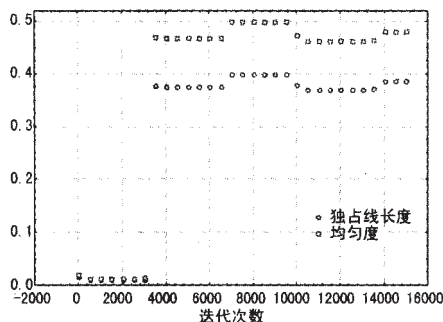


图 4 $r=3.828427$ 均匀度约在 3 050 次迭代后突然上升

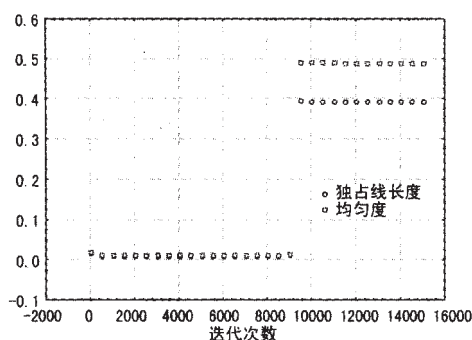


图 5 $r=3.82842711$ 均匀度在 9 550 次迭代后上升

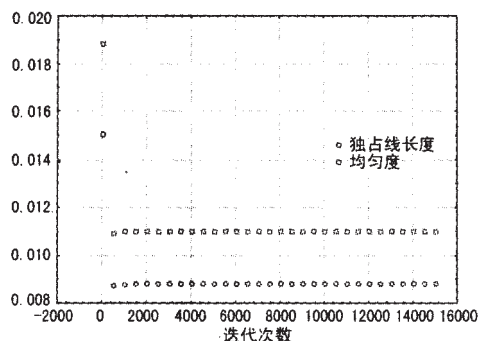


图 6 $r=3.828428$ 均匀度约在 3 050 次迭代后变为常数模型进入周期运动

图 4、图 5、图 6 表现了模型(4)从混沌进入周期运动的过渡过程。从混沌进入周期运动的过程是通过迭代过程表现出来的,对一些接近于周期运动而仍处于混沌的 r 值,最初表现为准周期运动,而在某次迭代(临界迭代) N 之后,均匀度被很快放大, N 与 r 值有关。

图 7 表明,独占线长度与 r 值有明显的相关性,它可以用于估计模型(4)的混沌强度。

5 混沌强度的定义与测算

定义 3(轨道独占线长度) 对连续映射 $f: I \subset \mathbb{R}^1 \rightarrow I$, 记 $x_{n+1} = f(x_n)$ (5)

对任意 $x_0 \in I$ 和给定的 n_0 (一般 $n_0 > 1000$), 记点集 $(x_n, x_{n+1}, \dots, x_{n+n_0})$ 的独占线总长度为: $C(x_0, n_0, n)$, 它称为模型(5)的轨道

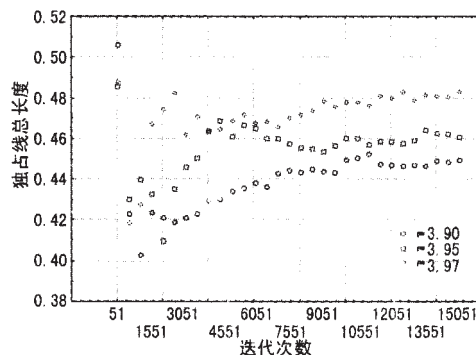


图 7 独占线的变化区间与 r 值有关

独占线长度。

定义 4(混沌强度) 对于模型(5)基于 Li-Yorke 的混沌定义,如果 f 在区间 $I \subset \mathbb{R}^1$ 上是混沌的,记 a_1 为 I_1 的区间长度,则对任意 $x \in I_1$,设模型的第 n 次迭代的轨道独占线长度记为 $C(x, n_0, n)$,称它为瞬时混沌强度;设它对 n 是均方收敛的,记它的均方极限为 $C(x, \infty)$,则称 $Cx = E(C(x, \infty))$ 为模型(5)对初值 x 的混沌强度。设 $C(x, \infty)$ 在区间 I_1 上是均方可积的,记均方积分为:

$$V = \frac{1}{a_1} \int_{I_1} C(x, \infty) dx$$

则称 V 的数学期望 $E(V) = C$ 为模型(5)的混沌强度(chaometry)。

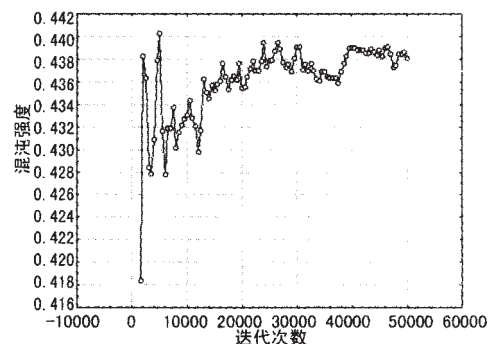


图 8 混沌强度随迭代过程的收敛($x_0=0.8, n_0=1000$)

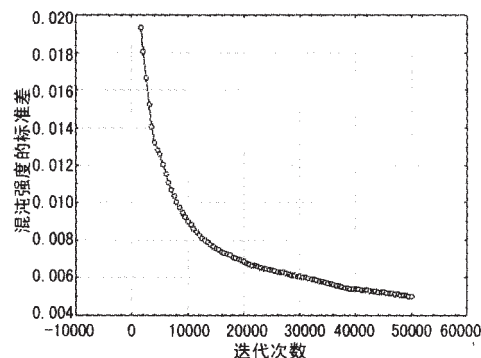


图 9 混沌强度的样本标准差($x_0=0.8, n_0=1000$)

图 8、图 9 表明,混沌强度对于特定的初值是均方收敛的。

表 1 中混沌强度的计算过程:(1)对区间进行 n 等分(5 至 10 等分)从不同的初值开始迭代 1 000 次而不采点,之后采 8 000 个点,计算相对于初值的混沌强度;(2)混沌强度对初值求平均;(3)对不同的区间等分数求平均。

表 1 混沌强度与 r 的关系

r	混沌强度估计	标准差
3.910	0.444155712	0.001591241
3.920	0.451179191	0.004564465
3.930	0.454039541	0.004356162
3.935	0.460546682	0.004650803
3.940	0.462781896	0.001768296

从表 1 中可见,混沌强度体现了 r 值的变化。

6 结论

(1)用均匀度(独占线长度)研究混沌既能识别混沌状态,又能识别分形状态,下降速度还与分维有关,真可谓三位一体。

(2)根据定理 1,随机格局的均匀度(独占线长度)是均方收敛的,而根据引理 4,准分形点集的均匀度为 0。

(3)本文再次说明,复杂性与均匀性是密切相关的。混沌轨道的复杂性体现在均匀性(独占线长度)上,而分形集的复杂性体现在度量数列上^[11],度量数列的复杂性又体现在其均匀性上。

(4)一般认为混沌的轨道即是分形,根据引理 4 和图 8 的提示,有理由对此提出质疑。但是,根据图 2,从周期运动到混沌的过渡过程中可能产生分形的轨道。

(5)对模型(4)的研究发现,从混沌进入周期运动的过程是通过迭代过程表现出来的,对一些接近于周期运动而仍处于混沌的 r 值,最初表现为准周期运动,而在某次迭代(临界迭代) N 之后,均匀度(独占线长度)被很快放大, N 与 r 值有关。

(6)时间离散的动力系统的轨道按均匀性可以排列如下:不动点、倍周期分岔、混沌,这个排列产生的轨道点集是趋于分散的,所以,可以粗略地解释混沌为:轨道点集均匀化。这里所说的轨道点集是指将轨道视为离散的点集,而不是连续的线。

7 讨论

(1)根据均匀度(独占线长度)的定义,1 维点集不存在边界问题^[11],而 2 维以上就存在边界问题,总可以问这样的问题:先有点集还是先有边界。若先有边界,点集的独占球就可能跨出边界。若先有点集,其边界又如何确定。所以,这一问题不能一概而论,这里提出一个约定:一方面,一定范围

内的点集可以看成为一个更大的点集的子集,这样,独占球的确不会因为边界而改变;另一方面,边界的确定要视点集发生的潜在范围而定。

(2)基于本文对混沌的理解,可以提出如下命题:对于有界的、时间离散的动力系统而言,系统对某一初值处于混沌状态的充分必要条件是:该初值的轨道独占球总体积均方收敛(不能确定性收敛)。对于特定的模型,要从计算机上验证这一命题是容易的,然而要从理论上证明此命题,还需要更多的努力。笔者希望能从计算机验证中找到使命题不成立的例子,这样的例子将是混沌的更高级形式。

(3)从周期运动到混沌的过渡过程可能产生分形。

(4)引理 4 的普适性也许还值得讨论。

参考文献 (References)

- [1] T. M. Fromhold, A. Patan, S. Bujkiewicz, et al. Chaotic electron diffusion through stochastic webs enhances current flow in super lattices[J]. Nature, 2004, 428:726 ~730
- [2] Thomas C. Halsey, Mogens H. Jensen. Hurricanes and butterflies[J]. Nature, 2004, 428: 127~128
- [3] N. Murray and M. Holman. The origin of chaos in the Outer Solar System[J]. Science, 1997, 19(283): 1 877~1 881
- [4] Daniel J. Gauthier. PHYSICS: Enhanced: Chaos has come again. Science, 1998, 20(279): 1 156~1 157
- [5] Moore P G.. Spacing in plant populations [J]. Ecology, 1954, 35: 222~227
- [6] 罗传文. 联结度指数构造模型及其应用[J]. 林业科学, 2004, 40 (2):183~188
- [7] May R M. Biological populations obeying difference equations: stable points, stable cycles and chaos [J]. Theor. Biol. 1975, 51: 511~524
- [8] 夏德勇, 罗传文. 非线性现象——耗散结构、混沌与分形[M]. 哈尔滨:黑龙江科学技术出版社, 1994. 68~110
- [9] 王兴元, 朱伟勇. 二维 Logistic 映象的吸引子演化[J]. 东北大学学报(自然科学版), 1997, 18(4):417~420
- [10] Lity, Yorke. Period three imply chaos [J]. Amer. Math. Monthly, 1975, 82:985~992
- [11] 罗传文. 点空间分析——分维与均匀度 [J]. 科技导报, 2004 (10):51~54
- [12] 李水根. 分形[M]. 北京:高等教育出版社. 2004. 179~181
- [13] 刘证. 关于 n 维球的体积[J]. 鞍山钢铁学院学报, 2001, 24(5): 321~326

(责任编辑 苏 青)

·封面文字说明·

三峡水库初期蓄水前后卫星影像对比图

目前,三峡工程建设已进入第三期工程建设全面实施阶段,蓄水水位为 135 米左右。本期封面图片为三峡水库初期蓄水前后卫星影像对比图(135 米水位)。该图采用 Landsat 卫星(成像时间为蓄水前——2002 年 9 月,分辨率 30 米)和 Radersat 卫星(成像时间为蓄水后——2003 年 6 月 19 日,分辨率 25 米)遥感影像合成制作而成,反映了三峡水库蓄水后水位的变化情况,清楚地表明了三峡水库的

“河道型”水库特征。从总体上看,水库初期蓄水对长江河道的改变不大,水库仍保持“河道”特点。右下角的图片为三峡水库不同地段的局部放大图,反映了从坝前到库尾不同地段的局部干流和支流的水位变化情况。由图可见,越靠近坝前,水位变化影响越显著。本期封面图片由三峡工程生态环境监测系统信息管理中心提供。

(黄真理 供稿)