

一种二维不稳定流形的新算法及其应用*

李清都^{1)†} 杨晓松¹⁾²⁾

1) (重庆邮电大学系统科学研究中心非线性系统研究所, 重庆 400065)

2) (华中科技大学数学系, 武汉 430074)

(2008 年 6 月 23 日收到; 2009 年 7 月 8 日收到修改稿)

提出了连续时间系统二维(不)稳定流形的一种新数值算法,不但可以快速求得流形的直观图像,而且能够准确地获取流形上各点的位置、时间、轨道距离等丰富的信息,从而有利于人们从几何上去研究系统的全局行为,如边界特征、演化过程、奇异环等等.本算法首先通过解初值问题求出均匀分布的相邻轨道,然后连接这些轨道既得流形面. Lorenz 系统原点的稳定流形的计算表明本算法快速有效.此外,通过试着寻找异宿轨道,还研究了一个三维神经网络中的混沌产生机理.

关键词: 稳定流形, 不稳定流形, 动力系统, Lorenz 系统

PACC: 0240, 0545

1. 引 言

稳定和(不)稳定流形对系统全局动态行为的把握至关重要,例如稳定流形可以构成系统吸引区域的边界;又例如,如果系统的稳定流形和(不)稳定流形相交,将产生动态复杂行为(混沌).因此(不)稳定流形计算问题在电力系统稳定性^[1]、系统最优轨道控制等许多领域都有重要应用.把握(不)稳定流形的几何结构一直是动力系统理论的中心问题之一,(不)稳定流形的数值计算具有极为重要的理论价值和实际应用价值^[2].

由于稳定流形可以看作是不稳定流形的时间反向,因此我们只需讨论不稳定流形的情形.设 n 维自治微动力系统

$$\dot{x} = f(x), \quad (1)$$

其中 $x \in \mathbb{R}^n$, 映射 $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ 充分光滑,则鞍点 x_0 处的(不)稳定流形定义为

$$W^u(x_0) = \{x \in \mathbb{R}^n \mid \lim_{t \rightarrow -\infty} \varphi_t(x) = x_0\}, \quad (2)$$

这里的 φ_t 代表方程(1)的流.一维流形就是一条轨线,求解非常简单.然而,二维或高维流形的求解却很困难,以至于在计算机高度发展的今天,仍然没

有很好的解决.

对于连续时间系统的二维流形,国内外学者从不同的角度做了不少尝试^[2-8].国外的结果主要有 Doedel 等的连续边值问题(BVP)算法^[4], Krauskopf 和 Osinga 的测地圆算法(Geodesic circles)^[5], Guckenheimer 和 Vladimirovsky 的偏微分方程(PDE)算法^[6], Henderson 的扩展轨迹算法^[7]等,这些工作可以参考综述报告^[8].而国内在该领域的研究较少,文献中只查到作者提出的两步算法^[9].这些算法各有特色,但也有不足.比如连续 BVP 算法很精确,测地圆算法的几何图像很直观,但由于都要解 BVP,所以速度慢;PDE 算法速度快,但精度不高只有一阶精度(欧拉近似算法);而扩展轨迹算法比较复杂.此外,在处理轨道螺旋发散的流形时,上述算法运算量大都会急剧增大.总之,目前二维连续系统的不稳定流形的算法还不成熟,在速度、精度和通用性上很难同时达到理想效果.

为了克服这些问题,本文提出一种新的二维不稳定流形的计算方法.该算法除了在速度、精度和通用性上得到大幅度提高之外,还能直观地反映出(不)稳定流形的随时间、轨道长度等演化过程.

* 国家自然科学基金(批准号:10672062,10972082),重庆市教委项目(批准号:KJ080515),重庆市科委项目(批准号:CSTC-2008BB2409)资助的课题.

† E-mail liqd@cqupt.edu.cn

2. 二维不稳定流形的算法

不稳定流形的理论表明, x_0 处的不稳定流形与雅克比矩 $Df(x_0)$ 的不稳定特征空间 $E^u(x_0)$ 相切. 因此, 要得出二维不稳定流形 $W^u(x_0)$, 我们可以在 x_0 的充分小的邻域内, 在 $E^u(x_0)$ 上选取一个闭合曲线 C , 所围的区域即为初始流形面 W_C ; 然后以 C 上各点为初始值, 通过求解轨道, 轨道经过的区域即为所求流形.

为了克服过去算法的不足, 一方面, 为了使算法适用于更多的系统, 更具有通用性, 我们必须以一般性的理论为依据; 另一方面, 为了使速度、精度同时达到满意的指标, 我们必须以成熟的数值算法为基础. 在理论上, 根据微分方程解的存在和唯一性定理, 系统(1)的流形面上的轨道具有不相交性. 这就意味着在流形面上左右相邻轨道的相对位置保持不变. 在数值上, 常微分方程初值问题目前已经有许多优秀的可靠的成熟算法(包括程序代码), 这些算法不但精度高速度快, 而且可以通过引入区间算法^[10]进行可靠数值计算^[11]. 这两方面, 理论依据保证了算法的普遍适用性, 数值基础保证了算法的高精度性和高效性.

基于这两个依据, 下面我们提出一种新算法. 其基本思路如下: 先在 $E^u(x_0)$ 上选择合适的初值曲线 C . 在实际计算时, C 实际上是由均匀间隔的一些样点连接而成的折线. 任一样点 C_i 为初始值, 求解即可得到一条轨道 Γ_i , 称之为左轨道. 然后, 以 Γ_i 右侧相邻的样点 C_{i+1} 为初始值, 求得一条相邻轨道 Γ_{i+1} . 这两条轨道相距很近, 可以用来确定其间的流形面的位置: 在 Γ_i 和 Γ_{i+1} 上分别均匀选取样点, 连接相邻样点画出一系列三角形即可. 这里 Γ_{i+1} 位于 Γ_i 的右侧, 现在我们以 Γ_{i+1} 为新的左轨道, 以它右侧相邻的 C_{i+2} 为初始值求出轨道 Γ_{i+2} , 进而得出 Γ_{i+1} 与 Γ_{i+2} 之间的流形面, 循环下去, 就能得到整个需要的流形面. 实际流形计算过程中, 相邻轨道之间的距离可能发散或收敛, 因此上述求解过程中需要相邻轨道之间增加新的轨道, 或者删除过于稠密的部分轨道. 由于一直有左轨道可作参考, 所以这部分工作在上述流形求解过程中很容易实现. 这样一来, 仅仅依据相邻轨道的不相交性和依靠初值问题求解方法, 我们就能求得二维流形面. 由于这两个依据具有普遍性和成熟性, 所以得到的流形

面的求解算法能够在速度、精度、通用性上都达到很高的程度. 此外, 这种方法得出的流形面上的点都是轨道上的样点, 而这些轨道始发于平衡点附近区域, 所以, 所得流形面上的各点可以拥有许多有用系统演化信息(坐标位置、轨道长度、经历时间等等). 这些信息有助于更进一步分析和研究系统行为.

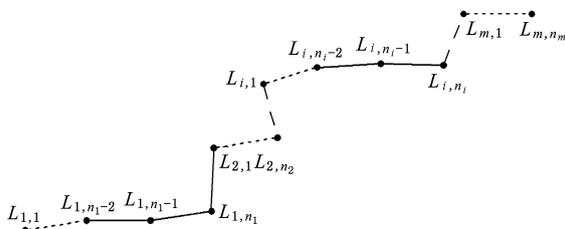


图1 折线 L 的结构

下面我们来详细介绍流形的计算方法. 首先我们要引入一个折线 L , 它是下面算法中流形的求解边界, 整个计算过程是通过对它的操作来完成的. 如图1所示, 折线 L 是由 m 条子折线 $L_{1..}, L_{2..}, \dots, L_{m..}$ 线首尾相连而成, 其中, 对于任意一条子折线 $L_{i..}$, 它是由同一轨道上相邻间隔为 δ 的 n_i 个点 $L_{i,n_i}, \dots, L_{i,2}, L_{i,1}$ 组成. 以时间为序, L_{i,n_i} 为这段轨道起始点, $L_{i,1}$ 为终止点, 求解 $L_{i,1}$ 可将本轨道向外延伸. 由于边界线 L 是整个循环操作的核心, 因此在循环开始时必须使其处于以下标准状态.

1) 对于每个点 $L_{i,j}$, 它的下列属性已知:

x : 点的坐标位置;

t : 从 C 出发到该点, 沿轨道经历的时间;

l : 从 C 出发到该点, 沿轨道经历的长度;

b : 所处轨道编号;

d : 取值 $-1, 0, 1$ 三种状态.

2) $L_{i,j}$ 属性 d 的取值: 如果 $L_{i,j}$ 已求解过(非轨道终点)则为 -1 ; 否则, 若该轨道需要继续求解延伸则为 1 , 否则为 0 . 每次循环, 只求解延伸 L 上第一个 d 为 1 的点 $L_{k,1}$. 定义 L 上位于 $L_{k,1}$ 左边的部分为左参考轨道 L_{ref} . 循环时 L_{ref} 已存在, 无需进一步求解. 显然, L_{ref} 内的 $L_{i,1}$ ($i < k$) 的 d 为 0 . 其他 $L_{i,1}$ ($i \geq k$) 的 d 为 1 .

3) 尽量使 L 上任意相邻轨道间距 $\geq 0.5\delta$. 当 $k \neq 2$ 时, 这说明 $L_{k,1}$ 之前的轨道间距小于 0.5δ , 这是删除过密轨道的结果. 在删除轨道时, 要确保折线 L_{ref} 的任意夹角为钝角.

4) 确保 L 上任意相邻轨道间距 $\leq 1.5\delta$. 为了控

制这一点,要检测 $L_{k,1}$ 与其左参考轨道间距,一旦大于 1.5δ , 则要插入新的求解轨道.

在对 L 有所了解之后,我们现在提出不稳定流

形的算法,求出从 x_0 出发,长度约为 $N\delta$ 的轨道所构成的二维流形面. 该算法首先求解初始 L , 然后通过 L 的循环操作和计算求解出所需的流形面.

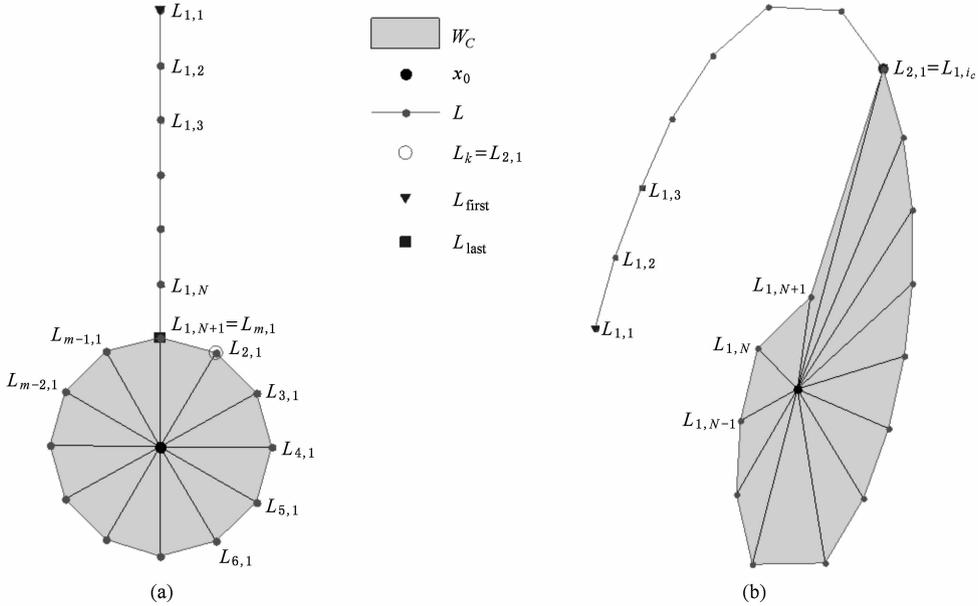


图2 选取的初始折线 L , L_{first} 为第一个点, L_{last} 为最后一个点 (a) 为一对正实特征值的情形; (b) 为一对复共轭特征值的情形

2.1. 算法开始

1) 求解方程(1)的雅可比矩阵 $Df(x_0)$ 的不稳定特征值和特征向量. 由于是二维不稳定流形, 所以特征值要么是二个正实数, 要么是一对共轭复数. 对与这两种情形, 所以我们分开来求初始边界线 L .

对于前者, 我们以 x_0 为圆心以 r 为半径, 在 $E^u(x_0)$ 上画一个圆, 在圆上按顺序均匀地选取 $m - 1$ 个相邻距离约为 δ 样点, 依次表示 $L_{1,1}, L_{2,1}, \dots, L_{m-1,1}$. 为了得出完整的流形面, 令 $L_{m,1} = L_{1,1}$. 闭合折线 $C = L_{1,1}, L_{2,1}, \dots, L_{m,1}$ 所围的区域即为初始流形面 W_C . 对于任意 $L_{i,1}$, 令其 $t = 0, l = 0, b = i, d = 1$. 以 $L_{1,1}$ 为起始点, 求解延伸轨道, 每间隔 δ 距离取一个样点, 记下对应时间 t , 轨道长度 l 和轨道编号 b , 令当前样点的 $d = 0$, 前一样点的 $d = -1$, 直到轨道长度 $N\delta$. 以时间递减为序对这 $N + 1$ 个样点重新编号得 $L_{1,1}, \dots, L_{1,N+1}$, 即 $L_{1,1}$ 为该轨道的终点, $L_{1,N+1}$ 为该轨道的起点. 最后得初始折线 $L_{1,1}, \dots, L_{1,N+1}, L_{2,1}, \dots, L_{m,1}$, 如图 2(a) 所示.

对于后者, 假设其特征值为 $\alpha \pm i\beta$, 其中 $\alpha, \beta > 0$ 对应的特征向量为 $u \pm iv$, 则在 $E^u(x_0)$ 上距离 x_0

为 r 处选取一点作为 $L_{1,1}$, 例如点 $x = x_0 + r \cdot v / \|v\|$ 或 $x = x_0 + r \cdot u / \|u\|$. 令 $L_{1,1}$ 的属性 $t = 0, l = 0, b = 1, d = 1$. 以 $L_{1,1}$ 为起始点, 用与前面类似的方法求解轨道到长度 $N\delta$, 得轨道折线 $L_{1,1}, \dots, L_{1,N+1}$, 这里 $L_{1,N+1}$ 为起点, $L_{1,1}$ 为终点. 设 L_{1,t_c} 为时间 t 最接近且小于 $2\pi/\beta$ 的样点, 在同一坐标位置选取一新点为 $L_{2,1}$, 令其属性 $t = 0, l = 0, b = 2, d = 1$. 则初始 L 为 $L_{1,1}, \dots, L_{1,N+1}, L_{2,1}$, 闭合折线 $C = L_{1,1}, \dots, L_{1,N+1}, L_{2,1}$ 所围的区域即为初始流形面 W_C , 如图 2(b) 所示.

2) 通过对 L 上第一个标志信息 d 为 1 的点循环操作和求解, 得到不稳定流形面.

为了便于讨论和编程, 我们把 L 看做一维数组, 定义 L_k 为当前正在操作的点, 位于 L_k 左边的点依次标记为 \dots, L_{k-2}, L_{k-1} , 右边的点依次标记为 L_{k+1}, L_{k+2}, \dots . 在大多情况下, L_k 表示 L 上第一个标志信息 d 为 1 的点, 显然对于初始 $L, L_k = L_{2,1}$, 如图 2 所示.

2.2. 主循环开始

1) 整理 L 使其恢复到标准状态, 并重新定

位 L_k .

如果 L_k 的 d 为 0, 则丢弃 L_k 之前的点, 即 $L_k = L_{1,1}$.

寻找第一个标志信息 d 为 1 的点, 若找到, 则令其为 L_k , 否则算法结束.

2) 令 L_k 的 $d = -1$, 以 L_k 为起始, 沿轨道向前求解 δ 长度, 得新点 P . 若 P 的 l 小于 $N\delta$, 则令其 $d = 1$, 否则 $d = 0$.

3) 如果 L_{k-1} 是 $L_{1,1}$, 即左参考轨道 L_{ref} 只有一点, 则将 P 插入 L 与 L_k 之前. 令 P 为当前点 L_k , 画三角形 $L_{k-1}L_kL_{k+1}$, 继续下一主循环.

4) 计算 L_k 与线段 $L_{k-1}L_{k-2}$ 的距离 μ . 如果 $\mu > 1.5\delta$, 则在 L_k 和 L_{k-1} 之间插入一点 P_i , P_i 的 x, t, l, b 均取 L_k 和 L_{k-1} 的平均值, d 取 1. 令 P_i 为当前点, 继续下一主循环.

5) 将 P 放在 L_k 之前, 令 P 为当前点 L_k , 画三角形 $L_{k-1}L_kL_{k-2}$.

6) 如果 L_{k-1} 和 L_{k-2} 不在同一轨道, 若边界外角 $\angle L_kL_{k-1}L_{k-2}$, 则补画三角形 $L_kL_{k-1}L_{k-2}$ 且从 L 上删除 L_{k-1} .

7) 子循环开始, 循环条件 $k > 2$:

计算 L_k 与线段 $L_{k-1}L_{k-2}$ 的距离 μ 和外角 $\theta = \angle L_kL_{k-1}L_{k-2}$.

如果 $\theta \leq \pi/2$, 则画三角形 $L_kL_{k-1}L_{k-2}$ 且从 L 上删除 L_{k-1} ; 否则退出子循环到主循环.

如果 $\mu < 0.5\delta$, L_{k-1} 和 L_{k-2} 在同一轨道上, 并且 L_k 后还有 $d = 1$ 的点, 则令 L_k 的 $d = -1$, 退出子循环到主循环.

子循环结束.

主循环结束.

算法结束.

对于 $Df(x_0)$ 的不稳定特征值的两种情形, 下面我们分别来对本算法举例加以应用和说明.

例 1 Lorenz 吸引子是最为人们熟知的重要混沌吸引子之一. 对它的控制(包括混沌镇定、混沌同步等)^[12-15]和应用(包括加密、电路设计等)^[16-18], 人们做了广泛深入的研究. 该吸引子与 Lorenz 混沌系统过原点的全局的稳定流形密切相关, 下面通过本算法来画出这个稳定流形. Lorenz 系统方程为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = 10(x_2 - x_1), \\ \dot{x}_2 = 28x_1 - x_2 - x_1x_3, \\ \dot{x}_3 = x_1x_2 - \frac{8}{3}x_3, \end{cases} \quad (3)$$

显然, 原点是本系统的一个平衡点, 对应的三个特征值为

$$\lambda_1^s = -\frac{8}{3}, \lambda_2^s \approx -22.8, \lambda^u \approx 11.8.$$

因此存在一个二维稳定流形, 该流形具有复杂的结构, 它沿一个蝶形吸引子向内螺旋. 求解流形面时, 用四五阶 Runge-Kutta 法进行轨道求解. 选择参数 $m = 21, r = 4$ 画初始流形面. 选择 $\delta = 2, N = 60$, 即轨道求解最大长度为 120, 得到初始边界线, 利用 Pentium M 1.6 MHz, 在 MATLAB 中经过约 250 s 的循环求解, 结果如图 3 所示. 流形面不但能够清楚地反映出取样轨道, 而且也展示出流形沿系统时间、轨道长度的演化过程.

例 2 下面考察一个三维混沌神经网络^[19], 系统方程为

$$\dot{x} = -x + \begin{pmatrix} 1.49 & 2 & 1 \\ -2 & 1.7 & 0 \\ 4 & -4 & 2 \end{pmatrix} \tanh x, \quad (4)$$

这里 $x \in R^3$. 显然本系统关于原点对称. 它有三个平衡点: 原点, $x_{0d} = [0.14419, 0.50238, -3.2775]^T$, $x_{0u} = -x_{0d}$. 对于原点, 系统 Jacobean 矩阵的特征值为 $\lambda_{1,2}^s = -0.32299 \pm 1.8057i, \lambda_3^u = 2.836$, 因此它存在一个二维稳定流形. 因为 $\lambda_{1,2}^s$ 是一对共轭复数, 所以稳定流形上的轨道在原点附近是螺旋的. 根据特征值的实部 $u = [-0.44366, -0.18357, 0.78635]^T$ 选取初始流形面和边界线, 这里利用公式 $x = 0 + r \cdot u / \|u\|$. 取参数 $r = 0.05, \delta = 0.03$, 轨道求解最大长度为 10, 得到的不稳定流形的局部情况如图 5(a) 所示. 从该图可以清楚地看出算法是如何在轨道趋于接近的地方删除轨道, 在轨道趋于分离的地方插入轨道. 所得到的流形面如图 5(b) 的上曲面所示. 对于平衡点 x_{0d} , 系统在此处雅克比矩阵特征值为 $0.39618 \pm 1.7455i, -0.98754$, 因此存在一个二维不稳定流形. 取参数利用公式 $x = x_0 + r \cdot v / \|v\|$, 以及参数 $v = [0.35221, -0.031995, 0]^T, r = 0.03, \delta = 0.1$, 轨道求解最大长度 30, 得到的流形面如图 5(b) 的下曲面所示. 这两个流形面相交, 交线必然是一条从 x_{0d} 到原点的异宿轨, 如图 5(b) 的粗线所示. 在图 5(c) 中, 我们还画出了从原点的一维不稳定流形, 和 x_{0d} 的一维稳定流形, 这两者距离很近, 一个小的扰动就可能使得这两个一维流形相交, 产生双曲异宿环, 从而出现混沌行为^[20].

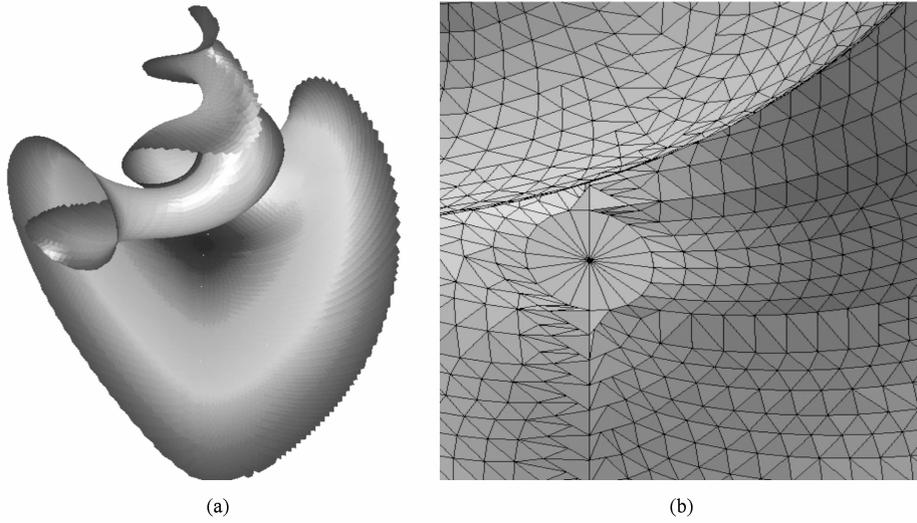


图 3 (a) 计算出的不稳定流形面; (b) 初始圆与局部的三角形细节

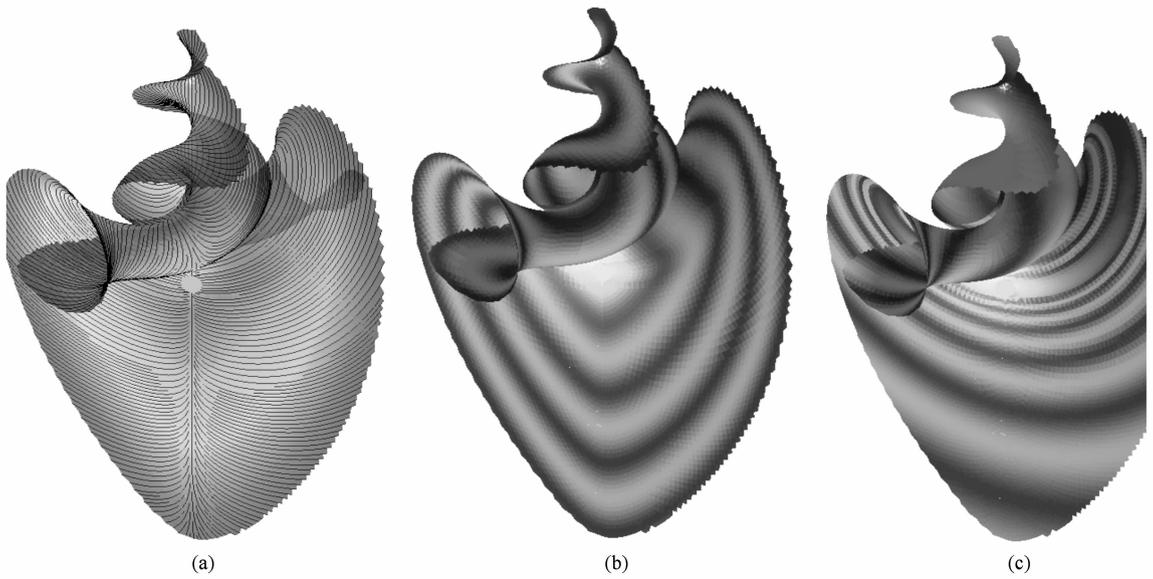


图 4 (a) 计算时的取样轨道; (b) 沿轨道长度的演化, 带间距 15.7; (c) 沿时间刻度的演化, 带间隔时间 0.105

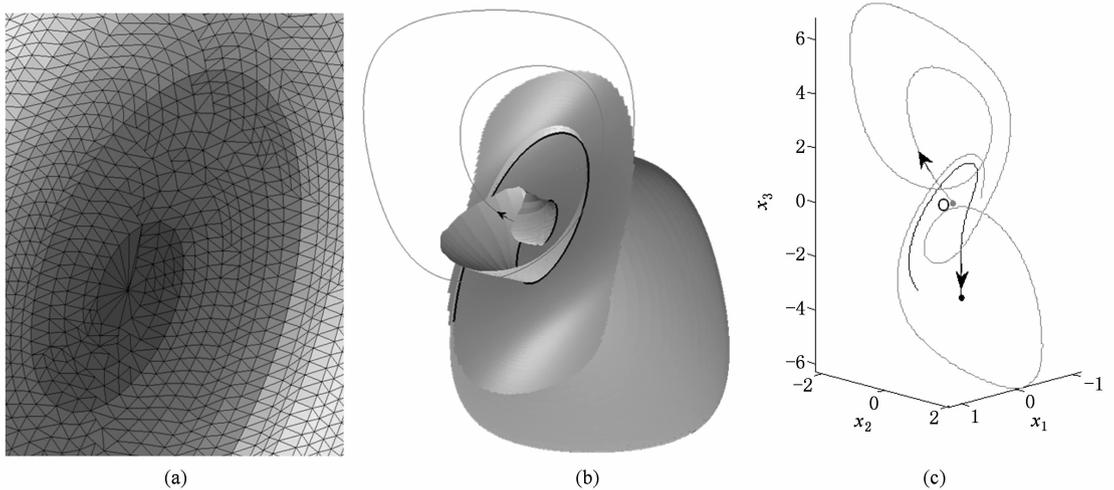


图 5 (a) 原点附近的稳定流形的计算; (b) 原点的二维稳定流形与 x_{0d} 的二维不稳定相交; (c) 原点的一维不稳定流形与 x_{0d} 的一维稳定流形距离很近

3. 结 论

本文提出了不稳定流形一种新的二维流形计算方法,分别用 Lorenz 系统和三维神经网络系统做了验证.与过去的算法相比,本算法无需求解 BVP,因此在速度上比 Doedel 的连续 (BVP) 算法和 Krauskopf 和 Osinga 的测地圆算法快;由于本算法基于现有的常微分方程初值问题数值求法,因此精度可以很高,例如,若利用 5 阶 Runge-Kutta 法则可达

5 阶精度,因此比 Guckenheimer 和 Vladimírsky 的 PDE 算法更精确,与作者曾提出的两步算法和 Henderson 的扩展轨迹算法相比,本算法更为简单,容易编程实现.所编写的 MATLAB 程序仅为两步算法的 1/3.由于本算法以常微分方程解的唯一性为理论依据,因此不但适用范围广,而且克服了过去算法在处理螺旋轨道时运算量急剧增加的问题.除此之外,流形面上的样点大都自于完整轨道的求解,这样做的好处不但求解精度高,而且还能展现出流形随系统时间的演化过程.

-
- [1] Chiang H D, Hirsch M W, Wu F F 1988 *IEEE Trans. Automat. Contr.* **33** 16
- [2] Yu H, Zhu S J, Liu S Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 2761 (in Chinese) [俞翔,朱石坚,刘树勇 2008 物理学报 **57** 2761]
- [3] Johnson M E, Jolly M S, Kevrekidis I G 1997 *Numerical Algorithms* **14** 125
- [4] Doedel E J, Champneys A R 1997 <ftp://ftp.cs.concordia.ca/pub/doedel/auto/> [2008-05-30]
- [5] Krauskopf B, Osinga H M 2003 *SIAM J. Appl. Dyn. Sys.* **2** 546
- [6] Guckenheimer J, Vladimírsky A A 2004 *SIAM J. Appl. Dyn. Sys.* **3** 232
- [7] Henderson M 2005 *SIAM J. Appl. Dyn. Sys.* **4** 832
- [8] Krauskopf B, Singa H M 2005 *Int. J. Bifurcation and Chaos* **15** 763
- [9] Li Q D, Yang X S 2005 *Computational Physics* **22** 549 (in Chinese) [李清都,杨晓松 2005 计算物理 **22** 549]
- [10] Moore R E 1979 *Methods and Applications of Interval Analysis* (Philadelphia: Society for Industrial Mathematics)
- [11] Zgliczyński P 2002 *Foundations of Computational Mathematics* **2** 429
- [12] Yu J Z, Su N, Vincent T L 1998 *Acta Phys. Sin.* **47** 397 (in Chinese) [余建祖,苏楠, T. L. Vincent 1998 物理学报 **47** 397]
- [13] Li S H, Tian Y P 2003 *Chin. Phys.* **12** 590
- [14] Giuseppe G 2008 *Chin. Phys. B* **17** 3247
- [15] Chen G P, Hao J B 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 2914 (in Chinese) [陈光平,郝加波 2009 物理学报 **58** 2914]
- [16] Hao J H G, Sun Z H, Xu H B 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 6857 (in Chinese) [郝建红,孙志华,许海波 2007 物理学报 **56** 6857]
- [17] Cang S J, Chen Z Q, Wu W J 2009 *Chin. Phys. B* **18** 1792
- [18] Wang G Y, Zheng N, Liu J B 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 3113 (in Chinese) [王光义,郑艳,刘敬彪 2007 物理学报 **56** 3113]
- [19] Yang X S, Li Q D 2006 *Int J Bifurcation and Chaos* **16** 157
- [20] Yang X S, Li Q D 2007 *Chaotic Systems and Chaotic Circuits* (Beijing: Science Press) (in Chinese) [杨晓松 李清都 2007 混沌系统与混沌电路(北京:科学出版社)]

A new algorithm for computation of two-dimensional unstable manifolds and its applications^{*}

Li Qing-Du^{1)†} Yang Xiao-Song¹⁾²⁾

1) (Center for Nonlinear Science, Institute for Nonlinear Systems, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

2) (Department of Mathematics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

(Received 23 June 2008; revised manuscript received 8 July 2009)

Abstract

This paper proposes a new algorithm for computing two-dimensional (un)stable manifolds in time continuous systems. With this algorithm, one can not only get a picture of a manifold efficiently, but also has many information of its every point, which are very useful for investigating the global dynamics of a system geometrically, such as features of stability region, evolution of the system flow and so on. The algorithm is mainly by finding many well distributed trajectories by solving initial value problems. An example on Lorenz system suggests this algorithm is very convenient. In addition, we study the chaotic dynamic of a three-dimensional neural network by detecting a heteroclinic orbit.

Keywords: stable manifold, unstable manifold, dynamic systems, Lorenz system

PACC: 0240, 0545

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10672062, 10972082), Chongqing Municipal Education Commission (Grant No. KJ080515) and Natural Science Foundation Project of CQ (Grant No. CSTC-2008BB2409).

[†] E-mail: liqd@cqupt.edu.cn