

基于 Lyapunov 指数的摇摆条件下自然循环流动 不稳定性混沌预测*

张文超 谭思超[†] 高璞珍

(哈尔滨工程大学, 核安全与仿真技术国防重点学科实验室, 哈尔滨 150001)

(2012年11月14日收到; 2012年12月21日收到修改稿)

运用基于最大 Lyapunov 指数的混沌预测方法对摇摆条件下自然循环系统的流量脉动进行了预测. 对不规则复合型脉动的流量脉动实验数据进行相空间重构, 计算关联维数、二阶 Kolmogorov 熵和最大 Lyapunov 指数等几何不变量, 在说明不规则复合型脉动是混沌运动的基础上, 根据最大 Lyapunov 指数对不规则复合型脉动进行了预测. 通过预测结果和实验结果对比发现: 对于复杂的两相自然循环流动不稳定性, 预测结果具有较高的精度, 说明预测方法的可行性. 同时, 确定了混沌系统可预测的尺度, 提出用动态预测的方式监测系统流量脉动. 本文的研究方法为两相流复杂的流动不稳定性研究提供了新的思路.

关键词: 混沌时间序列, 实时预测, 最大 Lyapunov 指数, 两相流动不稳定性

PACS: 05.45.-a, 05.45.Tp, 47.52.+j, 47.55.Ca

DOI: 10.7498/aps.62.060502

1 引言

非线性现象广泛地存在于我们周围的世界中, 它会表现出分岔、混沌、同步化等现象. 目前, 非线性动力学不仅在理论上得到了深入的研究, 如 Lorenz 系统族的超混沌现象^[1]、复杂网络系统中的混沌^[2-4]、混沌预测^[5-15]、控制与同步^[16,17]等, 在工程和经济领域也得到了广泛的应用, 如小世界网络^[4]、系统生物学^[18]、通信^[19]、电子^[20]、电力^[14]、金融^[21]等方面的非线性特性及应用研究.

已有研究发现, 自然循环系统本身是一个典型的非线性系统, 会出现分岔、混沌等非线性现象^[22]. 同时, 自然循环对于提高动力装置固有安全性具有重要意义, 然而自然循环系统容易出现流动不稳定性, 它限制了系统自然循环能力的提高, 因此, 国内外学者对自然循环流动不稳定性展开了一系列研究^[22-27]. 在海洋条件下, 摇摆作用对自然

循环系统施加了附加加速度^[23-25], 附加加速度引起的波动与自然循环系统自身的热工脉动耦合会形成新的脉动形式, 如不规则复合型脉动, 它是混沌脉动^[26], 导致摇摆条件下两相自然循环系统流动不稳定性的非线性特征发生改变. 当海洋条件下的核反应堆系统发生流动不稳定性时, 不仅会降低动力装置的运行性能, 还会影响局部传热特性、降低临界热流密度等, 它是核反应堆系统多种事故工况产生的诱因之一, 对于核反应堆系统安全而言是一个严重的威胁, 因此对于系统复杂流量脉动的预测是必要的.

非线性系统的混沌预测分为两大类: 一类是基于非线性数学模型的动力学方法, 另一类是基于实际观测数据的相空间重构法. 在已有的预测两相流动不稳定性的文献中, 通常采用的方法是动力学方法^[22,24,25,27], 即根据实际问题正确地建立描述系统的动态数学模型, 然后求解这个数学模型, 最后反过来根据计算结果进行预测. 用这种方法对具有混沌特性的流动不稳定性进行预测时, 即使在数学模

* 国家自然科学基金(批准号: 50806014)、中央高校基本科研业务费专项资金(批准号: HEUCFZ1008)、黑龙江省留学回国人员基金(批准号: LC2011C18)和黑龙江省博士后科研基金(批准号: LBH-Q10131)资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: tansichao@yahoo.com.cn

型中得到了混沌脉动现象^[22,24], 只能确定混沌脉动的边界, 不可能做到对流量脉动的实时精确预测. 这是由非线性系统本身的复杂性造成的. 非线性系统中的影响因素较多, 并且各影响因素之间存在着明显的耦合和反馈. 在建立数学模型的过程中, 需要事先做出一定的假设, 并确定影响系统的主要因素和各因素之间的关系, 这就使建立的模型具有较强的主观性. 因此, 对复杂的非线性现象预测时存在效果不理想、适用性差等问题.

混沌预测的另一种方法是相空间重构的方法, 常见的混沌时间序列预测方法有全局预测法^[5]、局域预测法^[6,7]、自适应预测方法^[8]以及基于神经网络的预测方法^[9-11]. 对于复杂的非线性现象, 如混沌脉动, 用相空间重构的方法进行预测效果可能更好. 这是因为时间序列中不仅包含了系统过去的信息, 而且还包含了系统演化的大量信息, 在利用相空间重构的方法预测混沌脉动时, 在预测之前不用做任何假设, 而是直接利用由非线性时间序列分析方法得到的几何不变量进行预测, 这样减少了预测的主观性. 本文采用基于 Lyapunov 指数的混沌时间序列预测方法, 因为时间序列中含有系

统信息, 所以通过提取 Lyapunov 指数进行混沌时间序列预测应用十分广泛, 如径流预测^[12]、交通流量^[13]、电力负荷预测^[14]以及网络流量^[15]等.

对于复杂的两相流动不稳定性, 采用动力学的方法不能准确地预测流量脉动, 因此效果并不理想, 至于应用相空间重构的方法进行预测, 目前还没有发现相关研究成果. 如果用相空间重构的方法能够实现流量脉动的较为精确的实时预测, 那么在系统运行过程中当流量出现异常时可以进行及时干预, 从而防止事故的发生, 另外在发生事故时, 根据预测结果也有助于对事故做出准确的判断. 总之, 对流量脉动较为精确的预测对于核动力装置事故的预防和干预具有重要意义. 同时, 相空间重构的预测方法为复杂流动不稳定性的研究提供了新的思路, 因此本文研究是必要的.

2 实验系统及实验现象

2.1 实验装置^[28]

在哈尔滨工程大学摇摆实验装置上进行了摇

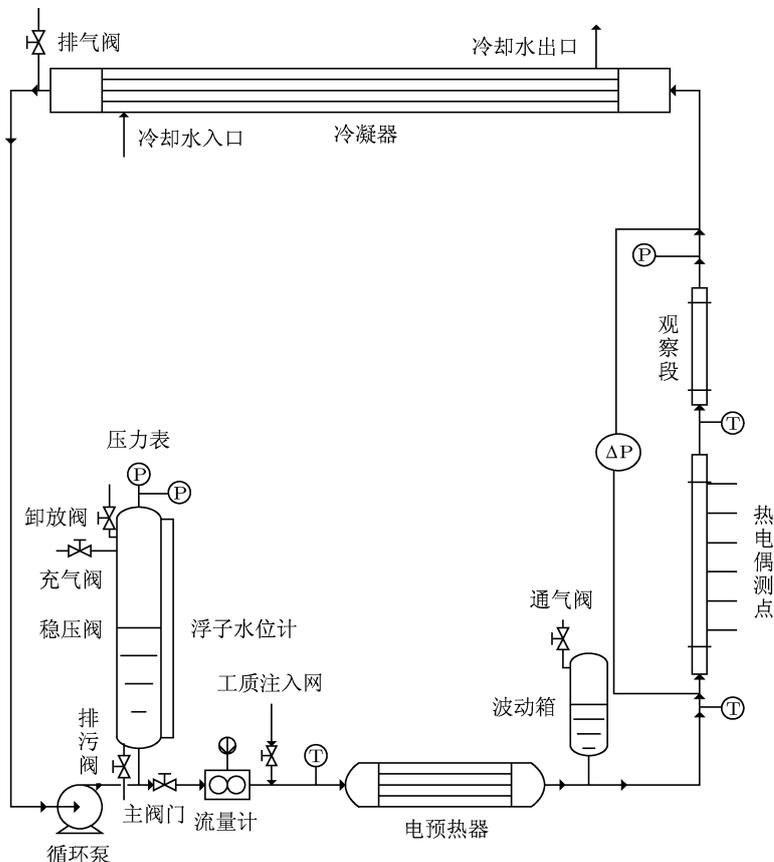


图1 实验回路简图

摆运动条件下的自然循环流动不稳定性实验研究. 实验回路主要组成部分是实验段、稳压器、循环泵、预热器和冷却器, 如图 1 所示. 实验台架的摇摆通过曲柄摇杆机构驱动力的传递实现, 用曲柄摇杆机构模拟海洋条件中的摇摆运动. 入口欠热度、摇摆振幅、摇摆周期、系统压力和加热功率等参数详见文献 [28].

2.2 实验现象

通过摇摆条件下自然循环实验结果发现, 随加热功率的增加, 摇摆条件下的自然循环系统先后出现 5 种或其中几种典型流动状态, 即单相流动波动、波谷型脉动、规则复合型脉动、不规则复合型脉动、高含汽率小振幅脉动 [23].

单相流动波动、波谷型脉动、规则复合型脉动是周期性脉动. 周期性脉动具有固定周期, 流量脉动曲线较为简单, 如图 2 所示. 图 2 所示流量脉动为单相脉动, 波动呈正弦波型, 波动周期与摇摆周期一致. 对于周期性较强的流量脉动, 可以建立较好的数学模型预测, 如文献 [22, 25, 27].

不规则复合型脉动没有明显的脉动周期, 它是由摇摆引起的波谷型脉动与密度波型脉动耦合形成 [23], 是一种较为复杂的流动不稳定性现象, 如图 3 所示. 目前还没有相关研究成果能够精确预测不规则复合型脉动, 本文利用基于最大 Lyapunov 指数的混沌时间序列预测的方法预测不规则复合型脉动.

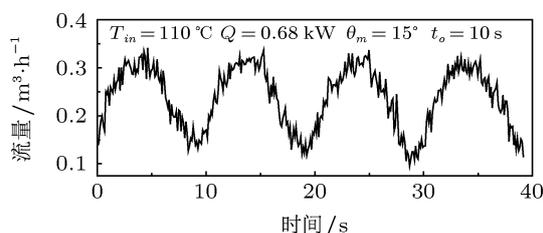


图 2 单相脉动流量曲线

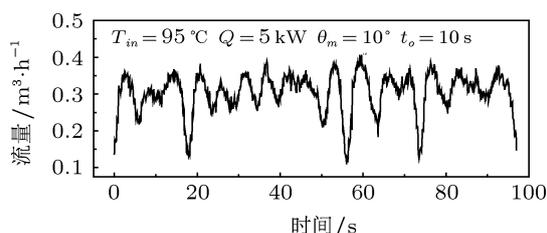


图 3 不规则复合型脉动流量曲线

3 混沌预测的基本算法

3.1 相空间重构

混沌时间序列预测的基础是状态空间的重构理论, 即把具有混沌特性的时间序列重建为一种高阶非线性动力学系统, 它是非线性时间序列分析的重要步骤. 系统任意一个分量的演化是由与之相互作用着的其他分量所决定的. 因此, 这些相关分量的信息就隐含在任意一个分量的发展过程中 [29]. 通过相空间重构可以从任意一个分量的时间序列数据中提取和回复出系统原来的规律, 此时就有了可以研究系统的动力学行为的可能.

重构相空间方法的基础是 Takens 定理 [30], 利用时间序列将系统的吸引子重建在一个未改变它拓扑结构的高维 ($m > D_2$) 相空间里, 其中 D_2 为关联维数. 假定有一单变量时间序列: $x_1, x_2, \dots, x_{n-1}, x_n$, 如果能适当地选定嵌入维数 m 和时间延迟 τ , 重构相空间

$$Y(t_i) = [x(t_i), x(t_i + \tau), x(t_i + 2\tau), \dots, x(t_i + (m-1)\tau)], i = 1, 2, \dots, M, \quad (1)$$

$$M = n - (m-1)\tau. \quad (2)$$

在重构相空间中, 时间延迟 τ 和嵌入维数 m 的选取具有十分重要的意义, 它直接影响到混沌预测的精确度. 嵌入延迟 τ 可根据自相关函数法确定 [29]. 自相关函数的基本思想是测量 x 和与平均观测量的差之间的线性相关性, 即如果假设

$$C_L(\tau) = \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x_{n+\tau} - \bar{x})(x_n - \bar{x})}{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x_n - \bar{x})^2}, \quad (3)$$

式中, $C_L(\tau)$ 是线性自相关函数, $C_L(\tau)$ 第一次为 $1 - \frac{1}{e}$ 时对应的 τ 即为延迟时间间隔.

本文利用 G-P 算法确定系统的嵌入维数, G-P 算法的计算步骤介绍如下 [29]:

1) 计算时间延迟 τ , 给定嵌入维数 m , 重构相空间 $\{Y_j, j = 1, 2, \dots, N\}$;

2) 计算关联积分函数, 关联函数是一个累积分布函数, 表示在相空间中吸引子上的任意两点之间距离小于 r 的概率

$$C(r) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N^2} \sum_{i,j=1}^N \theta(r - |X_i - X_j|), \quad (4)$$

其中, θ 为 Heaviside 单位函数

$$\theta(x) = \begin{cases} 0 & x \leq 0 \\ 1 & x > 0 \end{cases}; \quad (5)$$

3) 计算不同的领域半径 r 对应的关联函数 $C_n(r)$, 对于 r 的某个适当范围, 吸引子的关联维数与累积分布函数的对数满足线性关系, 即

$$D = \frac{\ln C_n(r)}{\ln r}, \quad (6)$$

线性区域对应的斜率为关联维数;

4) 逐步增加嵌入维数值, 计算每个嵌入维数下对应的关联维数值, 直到随着嵌入维数的增长对应的关联维数不再发生明显变化为止, 关联维数不再变化时对应的最小嵌入维数为系统嵌入维数.

另外, 通过 G-P 算法可以同时确定关联维数和二阶 Kolmogorov 熵 (K_2 熵), 它们从不同角度反映两相自然循环系统流量脉动的混沌特性, 详细介绍参见文献 [26].

3.2 最大 Lyapunov 指数值的确定

在混沌系统中, 两个初始状态极为接近的轨线, 在某些方向上随着时间的推移会按照 Lyapunov 指数律分离. 最大 Lyapunov 指数大于零, 说明两个初始状态极为接近的轨线在某些方向上随着时间的推移按照正的指数律分离, 在该方向上系统的吸引子轨道不断伸长和折叠, 导致吸引子中本来相邻的轨线变得越来越不相关, 吸引子结构变得越来越复杂, 最终产生混沌振荡. 因此, 理论上只要最大 Lyapunov 指数大于零, 就可以肯定混沌的存在. 本文利用小数据量法确定最大 Lyapunov 指数值.

运用小数据量法计算最大 Lyapunov 指数的具体计算步骤如下 [29]:

1) 计算时间延迟 τ 和嵌入维数 m , 重构相空间 $\{Y_j, j = 1, 2, \dots, N\}$;

2) 找出相空间给定轨道上每个点 Y_j 的最近邻点 Y_j , 并限制短暂分离, 即

$$d_j(0) = \min_{X_j} \|Y_j - Y_j\|; \quad (7)$$

3) 对相空间中的每个点 Y_j , 计算出该邻点离散时间步 i 后的距离 $d_j(i)$

$$d_j(i) = |Y_{j+i} - Y_{\hat{j}+i}|, \quad (8)$$

$$i = 1, 2, \dots, \min(M - j, M - \hat{j});$$

4) 对每个 i , 求出所有 j 的 $\ln d_j(i)$ 平均 $y(i)$, 即

$$y(i) = \frac{1}{q\Delta t} \sum_{j=1}^q \ln d_j(i), \quad (9)$$

其中 q 是非零 $d_j(i)$ 的数目, 用最小二乘法做出的回归直线的斜率就是最大 Lyapunov 指数.

3.3 基于最大 Lyapunov 指数的混沌预测算法

由混沌动力学理论可知, Lyapunov 指数刻画了相空间中相体积收缩和膨胀的几何特性. 因此, Lyapunov 指数作为量化对初始轨道的指数发散和估计系统的混沌量, 是系统的一个很好的预测参数.

设 λ_1 为系统最大 Lyapunov 指数, Y_N 是中心点, Y_{nb} 是 Y_N 最邻近的点, 令 Y_N 与 Y_{nb} 间的欧氏距离为 d , 则

$$d = \|Y_N - Y_{nb}\|. \quad (10)$$

Y 与 Y_{nb} 经 1 步演化分别成为 Y_{N+1} 与 Y_{nb+1} , 根据最大 Lyapunov 指数的物理意义, 可得

$$\|Y_{N+1} - Y_{nb+1}\| = \|Y_N - Y_{nb}\| e^{\lambda_1}, \quad (11)$$

上式中, 除 $Y_{N+1}(m)$ 分量未知外, 其余均为已知数, 因此可求出原混沌时间序列的下一步预测值:

$$Y_{N+1}(m) = Y_{nb+1}(m) \pm \sqrt{(de^{\lambda_1})^2 - \sum_{i=1}^{m-1} (Y_{N+1}(i) - Y_{nb+1}(i))^2}, \quad (12)$$

$$\hat{x}_{n+1} = Y_{N+1}(m). \quad (13)$$

具体算法如下 [29]:

1) 根据 Takens 定理和 G-P 算法确定系统的时间延迟 τ 和嵌入维数 m , 得到重构相空间 $\{Y_j, j = 1, 2, \dots, N\}$;

2) 计算最大 Lyapunov 指数 λ_1 ;

3) 寻找中心点 $Y(t)$ 的临近状态 $Y(t_n)$, 并计算 $d = \|Y(t) - Y(t_n)\|$;

4) 由 (12) 式计算 $Y_{N+1}(m)$, 并根据某种约定规则对根进行取舍, 即可预测出下一点的值 \hat{x}_{n+1} .

对于 (12) 式中的正负号的取舍规则, 本文采用文献 [31] 中的规则对正负号进行取舍, 具体规则如下:

首先, 假设空间中的两个矢量 $P = [x_1, x_2, \dots, x_m]$, $Q = [y_1, y_2, \dots, y_m]$, 它们之间的夹角为

$$\theta = \arccos[(P \cdot Q) / (P \times Q)]$$

$$= \arccos \frac{\sum_{i=1}^m x_i y_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_i^2} \sqrt{\sum_{i=1}^m y_i^2}}, \quad (14)$$

θ 越小说明这两个矢量在空间上的方向越接近. 因此, 当 (12) 式中取正号时, Y_{N+1} 记为 Y_{N+1}^+ ; 当 (12) 式中取负号时, Y_{N+1} 记为 Y_{N+1}^- ; 计算 Y_{nb+1} 与 Y_{N+1}^+ 的夹角 θ^+ 和 Y_{nb+1} 与 Y_{N+1}^- 的夹角 θ^- , 若 $\theta^+ < \theta^-$, 则 (12) 式取正号, 这说明当 $Y_{N+1} = Y_{N+1}^+$ 时比 $Y_{N+1} = Y_{N+1}^-$ 时得到的预测值更接近历史相似负荷, 反之, $\theta^+ > \theta^-$, (12) 式取负号.

4 预测结果及分析

下面以图 3 所示的流量脉动为例, 对摇摆条件下自然循环系统的不规则复合型脉动进行预测.

4.1 相空间重构

首先, 通过自相关函数法确定图 3 中实验时间序列的时间延迟. 根据 (3) 式得到时间延迟为个数 9, 即延迟时间为 0.9 s. 同时, 根据 G-P 算法确定嵌入维数, 它的值为 9. 由时间延迟和嵌入维数可以在相空间中重构吸引子, 如图 4 所示, 图 4 中 V 表示体积流量, 由图 4 可以看出图 3 所示的流量脉动的吸引子具有奇怪吸引子的嵌套结构. 同时, 由如图 5 所示的双对数曲线也可以计算出关联维数和 K_2 熵的值, 分别为 3.4, 0.127. 由吸引子结构图和几何不变量计算结果说明图 3 所示的流动脉动具有较强的混沌特性, 详细论述请见文献 [26].

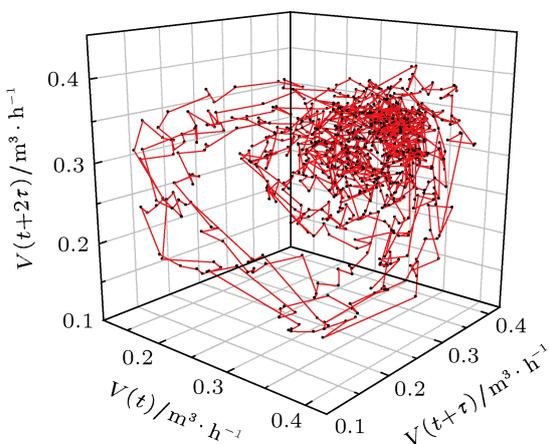


图 4 吸引子结构图

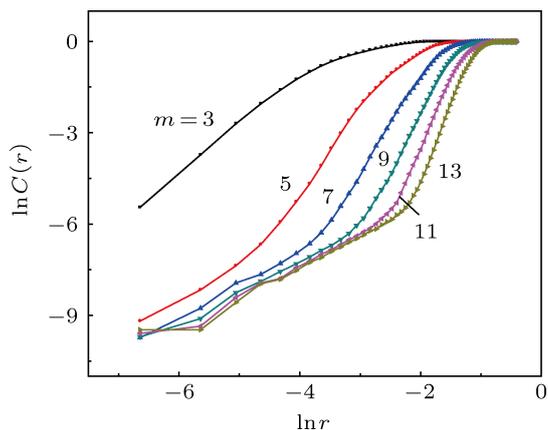


图 5 双对数曲线

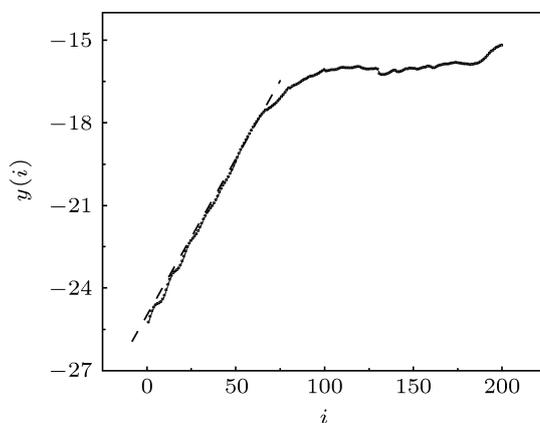


图 6 计算结果

4.2 确定最大 Lyapunov 指数

以图 3 的流量脉动曲线为例计算最大 Lyapunov 指数, 计算结果如图 6 所示, 图中虚线所在的区域为线性区域, 虚线段的斜率最大 Lyapunov 指数. 当斜率为正值时, 最大 Lyapunov 指数为正, 脉动为混沌脉动. 图 6 中虚线段的斜率为最大 Lyapunov 指数, 其值为 1.1, 最大 Lyapunov 指数为正值, 再次说明图 3 所示的流量脉动是混沌脉动, 同时也表明了此时两相自然循环系统的最长可预测时间长度.

4.3 基于最大 Lyapunov 指数的混沌预测

图 3 流量脉动的预测结果如图 7 所示, 图 7(a) 是对图 3 中第 63—77 s 的预测结果, 图 7(b) 是对图 3 中第 70—78 s 的预测结果. 定义误差为

$$Er = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^k (\hat{x}(t) - x(t))^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^k x^2(t)}} \times 100\%. \quad (15)$$

根据 (15) 式计算得到图 7(a) 虚线以前即 63—72.5 s 的预测误差为 10.2%; 图 7(b) 的预测误差为 14.7%. 由计算结果可知, 图 7(a) 中 63—72.5 s 和图 7(b) 的预测精度相对较高, 即从开始预测后的 8—9 s 预测精度较高. 这说明用相空间重构的方法预测两相流动不稳定性是可行的, 这是因为摇摆条件下的自然循环系统是一个确定性的非线性系统, 实验数据是摇摆条件下自然循环系统的历史行为的客观记录, 因而它包含了系统结构特征和运行规律等丰富的系统动力学信息, 通过计算反映系统本质特征的几何不变量, 可以得到系统的特征、内在变化规律及内部关系. 因此, 在相空间重构的基础上进行摇摆条件下自然循环系统的混沌预测得到的结果更加客观、预测方法的适用性也较强.

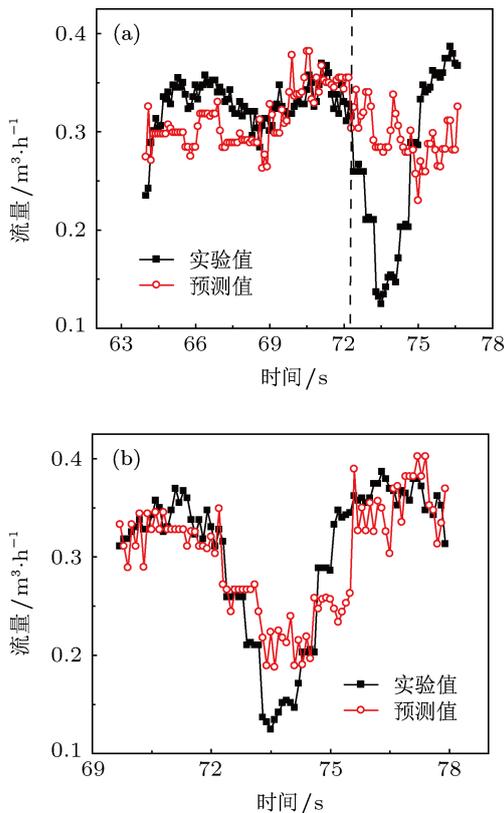


图 7 预测结果 (a) 64—76.6 s; (b) 70—78 s

4.4 混沌预测的尺度

由图 7(a) 的计算结果得到: 虽然 63—72.5 s 的

预测效果较好, 但是虚线以后, 即后 72.5—77 s 的预测误差为 35.6%, 预测精度大大降低, 这说明流动混沌脉动的预测时间是有限的, 超过一定的限度时, 预测精度变差. 这也是由流量混沌脉动的特性决定的, 一方面系统是确定性系统, 使其短期行为是可预测的; 另一方面, 混沌脉动具有初始条件的极端敏感性, 从而使得其长期行为是不可预测的. 定义最大可预测时间尺度为系统最大 Lyapunov 指数的倒数, 即

$$T_f = 1/\lambda_1, \quad (16)$$

式中 T_f 表示状态误差增加一倍所需要的最长时间, 并以此作为预测可靠度的指标之一, 即当提前预测的时间大于 T_f , 则所预测的对象属于不可预测的范畴; 而提前预测的时间小于 T_f , 则所预测的对象属于可预测的范畴, 即核电站操作人员的反应时间. 图 3 中流量时间序列的最大 Lyapunov 指数为 0.11, 它的倒数为 9.1, 即可预测的最大时间长度为 9.1 s. 这与图 7(a) 的计算结果相符合.

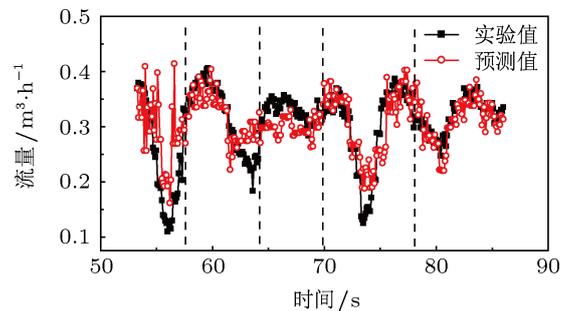


图 8 动态预测结果

另外, 虽然从 63 s 开始预测时, 72.5—77 s 的预测误差较大, 图 7(a) 所示; 但是如果从 70 s 开始预测, 70—78 s 的预测精度会有很大的提高, 如图 7(b) 所示. 由此可以得出, 虽然混沌时间序列的可预测时间有限, 但是可以在数据采集过程中一边采集, 一边预测. 步骤如下: 首先, 根据所采集的初始数据按照本文 3.3 节的步骤进行预测; 其次, 预测结果为操作员是否需要干预提供依据; 与此同时, 不论操作员是否进行干预, 根据新的运行数据按本文 3.3 节步骤对预测结果进行更新; 这样可以实现摇摆条件下自然循环系统流量等参数的实时动态预测, 对系统的流动不稳定性监测具有一定的现实意义. 图 8 显示了动态预测的结果, 图 8 中被垂直虚线分割成为几段, 每一段都是以前实测数据为基础进行预测. 可见进行动态预测是可行的.

5 结论

通过混沌时间序列分析的方法研究了摇摆条件下自然循环系统的不规则复合型脉动,在确定是混沌脉动的基础上,利用最大 Lyapunov 指数对系统的混沌脉动进行了预测,结论如下.

1) 预测结果显示,在初始预测的 8—9 s 范围内预测效果较好,说明利用最大 Lyapunov 指数预测两相流动中的混沌脉动是可行的.虽然不规则复合型脉动存在最长可预测时间,但可以在系统运行的同时,用采集的最新数据进行预测,从而实现系统

的动态预测.实现对复杂的两相流动不稳定性的动态预测,不仅可以实时预测流量波动,防止事故的发生,还可以在事故状态下为操作员做出正确的判断提供重要依据.

2) 用相空间重构的方法预测两相自然循环系统的混沌脉动,以实测实验数据为基础,减少了动力学方法在数学建模过程中的主观性,方法更加客观,适用性更强,预测结果更加精确、有效.同时相空间重构的预测方法为两相流动不稳定性研究提供了新的思路.

- [1] Yu S, Lu J, Yu X, Chen G 2012 *IEEE Trans. Circ. Syst.* **1** 59 1015
- [2] Gao Y, Li L X, Peng H P, Yang Y X, Zhang X H 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 1444 (in Chinese) [高洋, 李丽香, 彭海朋, 杨义先, 张小红 2008 物理学报 **57** 1444]
- [3] Lu J, Chen G 2005 *IEEE Trans. Auto. Contr.* **50** 841
- [4] Lu J, Yu X, Chen G, Cheng D 2004 *IEEE Trans. Circ. Syst.* **1** 51 787
- [5] Zhang S, Xiao X C 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 5062 (in Chinese) [张森, 肖先赐 2005 物理学报 **54** 5062]
- [6] Zhang Y, Guan W 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 756 (in Chinese) [张勇, 关伟 2009 物理学报 **58** 756]
- [7] Lu S, Wang H Y 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 572 (in Chinese) [卢山, 王海燕 2006 物理学报 **55** 572]
- [8] Yan H, Wei P, Xiao X C 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 5111 (in Chinese) [闫华, 魏平, 肖先赐 2007 物理学报 **56** 5111]
- [9] Gao G Y, Jiang G P 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 040506 (in Chinese) [高光勇, 蒋国平 2012 物理学报 **61** 040506]
- [10] Song T, Li H 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 080506 (in Chinese) [宋彤, 李菡 2012 物理学报 **61** 080506]
- [11] Zhang C T, Ma Q L, Peng H 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 7623 (in Chinese) [张春涛, 马千里, 彭宏 2010 物理学报 **59** 7623]
- [12] Wei X Z, Ren Y M, Shen Y, Yuan Y X 2008 *J. Harbin Inst. Tech.* **40** 25 (in Chinese) [魏希柱, 任月明, 沈毅, 袁一星 2008 哈尔滨工业大学学报 **40** 25]
- [13] Chen S Y, Wang W 2004 *China Civil Eng. J.* **37** 96 (in Chinese) [陈淑燕, 王炜 2004 土木工程学报 **37** 96]
- [14] Lü J H, Zhan Y, Lu J A 2000 *Proc. CSEE* **20** 81 (in Chinese) [吕金虎, 占勇, 陆君安 2000 中国电机工程学报 **20** 81]
- [15] Dang X C, Hu G T, Hao Z J 2011 *J. Suzhou Univ. Sci. Tech.* **28** 44 (Natural Science) (in Chinese) [党小超, 胡广涛, 郝占军 2011 苏州科技学院学报 (自然科学版) **28** 44]
- [16] Cai G L, Tan Z M, Zhou W H, Tu W T 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 6230 (in Chinese) [蔡国梁, 谭振梅, 周维怀, 涂文桃 2007 物理学报 **56** 6230]
- [17] Tao C H, Lu J A, Lü J H 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 1497 (in Chinese) [陶朝海, 陆君安, 吕金虎 2002 物理学报 **51** 1497]
- [18] Wang P, Lu J, Ogorzalek M J 2012 *Neurocomput.* **78** 155
- [19] Guo J B, Hu J F 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 1477 (in Chinese) [郭静波, 胡进峰 2008 物理学报 **57** 1477]
- [20] Zhang Z M, Tao Z J, Li Y 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 6818 (in Chinese) [张正明, 陶志杰, 李亚 2009 物理学报 **58** 6818]
- [21] Xin B G, Chen T, Liu Y Q 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 048901 (in Chinese) [辛宝贵, 陈通, 刘艳芹 2011 物理学报 **60** 048901]
- [22] Zhang Y J, Su G H, Yang X B, Qiu S Z 2009 *Nucl. Eng. Des.* **239** 1294
- [23] Tan S, Su G H, Gao P 2009 *Ann. Nucl. Energy* **36** 103
- [24] Yun G, Qiu S Z, Su G H, Jia D N 2008 *Ann. Nucl. Energy* **35** 1598
- [25] Yan B H, Yu L 2012 *Prog. Nucl. Energy* **54** 123
- [26] Zhang W C, Tan S C, Gao P Z, Zhang H, Zhang H Y 2012 *Atom. En. Sci. Tech.* **46** 705 (in Chinese) [张文超, 谭思超, 高璞珍, 张虹, 张红岩 2012 原子能科学技术 **46** 705]
- [27] Guanghui S, Dounan J, Fukuda K, Yujun G 2002 *Nucl. Eng. Des.* **215** 187
- [28] Tan S, Su G H, Gao P 2009 *Appl. Therm. Eng.* **29** 3160
- [29] Lv J H, Lu J A, Chen S H 2002 *Chaotic Time Series Analysis and Application* (Wuhan: Wuhan University Press) p57 (in Chinese) [吕金虎, 陆君安, 陈士华 2002 混沌时间序列分析及其应用 (武汉: 武汉大学出版社) 第 57 页]
- [30] Takens F 1981 *Lecture Notes in Math.* **898** 361
- [31] Zhang B H, Liu X H, Wan J P, Liu P, Cheng S J 2004 *Pow. Sys. Tech.* **28** 32 (in Chinese) [张步涵, 刘小华, 万建平, 刘沛, 程时杰 2004 电网技术 **28** 32]

Chaotic forecasting of natural circulation flow instabilities under rolling motion based on Lyapunov exponents*

Zhang Wen-Chao Tan Si-Chao[†] Gao Pu-Zhen

(Harbin Engineering University, National Defense Key Subject Laboratory for Nuclear Safety and Simulation Technology, Harbin 150001, China)

(Received 14 November 2012; revised manuscript received 21 December 2012)

Abstract

The chaotic forecasting of irregular complex flow oscillation of natural circulation flow instabilities under rolling motion condition based on the largest Lyapunov exponents is performed. The correlation dimension, Kolmogorov entropy and the largest Lyapunov exponent are determined based on the phase space reconstruction theory of experimental data. On the premise that the irregular complex flow oscillation is confirmed to own chaos characteristic, the chaotic forecasting of the irregular complex flow oscillation is carried out by calculating the largest Lyapunov exponent. A comparisons between the prediction results and experimental data indicates that the chaotic forecasting based on the largest Lyapunov exponent is an effective way of producing those two-phase natural circulation flow instabilities. Meanwhile, the maximum predictable scale of chaotic flow instability is determined and a way of dynamic forecasting to monitor flow oscillation is presented. The method employed here provides a new method of studying the complex two-phase flow instabilities.

Keywords: chaotic time series, prediction real-time, the largest Lyapunov exponent, two-phase flow instabilities

PACS: 05.45.-a, 05.45.Tp, 47.52.+j, 47.55.Ca

DOI: 10.7498/aps.62.060502

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 50806014), the Fundamental Research Funds for the Central Universities of Ministry of Education of China (Grant No. HEUCFZ1008), the Scientific Research Foundation of Heilongjiang Province for Returned Chinese Scholars, China (Grant No. LC2011C18), and the Heilongjiang Province Postdoctoral Sustentation Fund, China (Grant No. LBH-Q10131).

[†] Corresponding author. E-mail: tansichao@yahoo.com.cn