

单输入单输出系统故障检测中匹配混沌激励的设计*

杨东东[†] 马红光 徐东辉 冯晓伟

(第二炮兵工程大学, 西安 710025)

(2014年1月15日收到; 2014年2月27日收到修改稿)

针对单输入单输出系统故障检测定义了混沌激励与被测系统匹配的概念, 建立了混沌激励与被测系统匹配的标准, 提出了调整混沌激励与被测系统匹配的方法. 利用改进的预测误差实现了对单输入单输出系统的故障检测. 仿真结果表明, 匹配混沌激励能够对被测系统故障进行有效检测, 而不匹配混沌激励对被测系统进行故障检测时存在不确定性.

关键词: 混沌信号, 匹配激励, 故障检测, 单输入单输出系统

PACS: 05.45.-a, 05.45.Ac, 05.45.Df, 06.60.Mr

DOI: 10.7498/aps.63.120508

1 引言

混沌信号具有许多传统信号(多音信号、白噪声信号等)所不具有的独特特性, 在一些情况下, 更适合作为激励信号以实现对被测系统的故障检测. 例如, 混沌信号具有较宽的频带, 但比白噪声更容易生成^[1-3]. 此外, 相空间重构技术类似于传统的时域-频域变换, 近年来成为故障检测领域的热点^[4]. 这种方法可利用在相空间中设计的一些合适的特征量来实现对被测系统的故障检测. 例如, 利用一些混沌不变量(Lyapunov指数^[5]、分数维^[6]), 或者在相空间中重新构造的一些对故障敏感的特征量(预测误差^[7,8]、吸引子局部特征^[9,10]、连续性^[11]等)来实现对系统的故障检测. 但上述这些方法均未对输出相空间结构与系统参数及混沌激励之间的联系进行深入的研究.

在利用传统信号(多音、白噪声等)对被测系统进行故障检测时, 通常假设系统的所有故障信息可由被测系统的输出所反映^[12]. 这种假设的必要条件是所设计的激励信号可以对被测系统进行充分的激励. 例如, 传统的在频域对系统进行故障检测

的方法, 激励信号需要对被测系统的整个带宽进行激励(例如: 白噪声). 在利用混沌信号作为激励信号对被测系统进行故障检测时, 同样需要仔细研究被测系统参数能否被混沌信号所充分激励.

本文以充分激励被测系统为目的, 定义了混沌激励与被测系统匹配的概念, 设计了调整混沌激励与被测系统匹配的方法, 使利用混沌激励检测系统故障的方法更加准确有效.

2 基于匹配混沌激励的故障检测

一个单输入单输出(single input single output, SISO)系统(见图1), 对它施加由(1)式所确定混沌振荡器产生的激励信号, 其中 x 为激励系统的状态量, F 为状态演化方程. x 通过观测方程 $h_1(\cdot)$ 投影得到激励信号 $u(t)$.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= F(x(t)), \\ u(t) &= h_1(x(t)). \end{aligned} \quad (1)$$

被测系统可以表示成(2)式的形式. 函数 G 将激励信号 $u(t)$ 作用于被测系统, z 为被测系统的状

* 国家自然科学基金(批准号: 61174207)资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: yd_xian@163.com

态量. 被测系统状态 $z(t)$ 经由观测方程 $h_2(\cdot)$ 投影到一维输出 $x(t)$.

$$\begin{aligned} \dot{z} &= G(z(t), u(t)), \\ x(t) &= h_2(z(t)). \end{aligned} \quad (2)$$

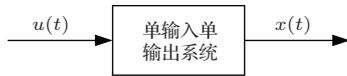


图1 单输入单输出系统模型

2.1 匹配混沌激励

被测系统参数的变化会引起被测系统特征结构的变化, 而被测系统的李雅普诺夫指数 (Lyapunov exponents, LEs) 与其特征结构有密切的联系. Kaplan-Yorke^[13] 猜想通过 (3) 式将系统的 LEs 与输出在相空间中的特征结构 (李雅普诺夫维数) 相关联.

$$D_L = K + \frac{\sum_{m=1}^K \lambda_m}{|\lambda_{K+1}|}, \quad (3)$$

其中, λ_m 为系统的 LEs, D_L 为李雅普诺夫维数, 当 λ_m 按由大到小的顺序排列时, K 满足

$$\sum_{m=1}^K \lambda_m \geq 0, \quad \sum_{m=1}^{K+1} \lambda_m < 0. \quad (4)$$

Nichols 等^[14] 验证了 Kaplan-Yorke 猜想在大部分系统中的正确性, 并利用其说明如何通过改变被测系统的 LEs 以改变输出的维数. 本节在此基础

上分析了激励信号满足什么条件时, 被测系统 LEs 的变化将引起输出维数的变化.

对于图 1 所示系统, 输出的 LEs 包括 d_1 维的混沌激励所具有的 LEs ($\lambda_i^E, i = 1, 2, \dots, d_1$) 及 d_2 维的被测系统所具有的 LEs ($\lambda_j^S, j = 1, 2, \dots, d_2$). 将它们排列成如下的顺序:

$$\lambda_1 > \lambda_2 > \dots > \lambda_{(d_1+d_2)}. \quad (5)$$

假定此时满足 (4) 式的 $K = k_1$, 根据 (5) 式中前 $k_1 + 1$ 个 LEs 中包含被测系统 LEs 的情况, 按照图 2 所示的步骤, 将混沌激励定义为以下三类.

类型一: 完全匹配激励. 被测系统所有的 LEs 均被包含在 (5) 式中前 $k_1 + 1$ 个 LEs 之中. 根据 (3) 式, 被测系统输出的相空间结构 (维数) 与其完整的特征结构 (所有特征值) 紧密关联. 此时, 被测系统所有参数的变化均能通过输出在相空间中的结构特征进行分析来判断.

类型二: 部分匹配激励. 部分被测系统的 LEs 被包含在 (5) 式中前 $k_1 + 1$ 个 LEs 之中. 此时, 被包含的被测系统特征值的变化能够对系统输出维数产生影响. 系统中与被包含 LEs 相关联的参数变化均能通过输出在相空间中的结构特征进行分析来判断.

类型三: 不匹配激励. (5) 式中前 $k_1 + 1$ 个 LEs 中不包含任何被测系统的 LEs. 此时仅通过 (3) 式并不能建立系统参数与输出在相空间中结构的联系.

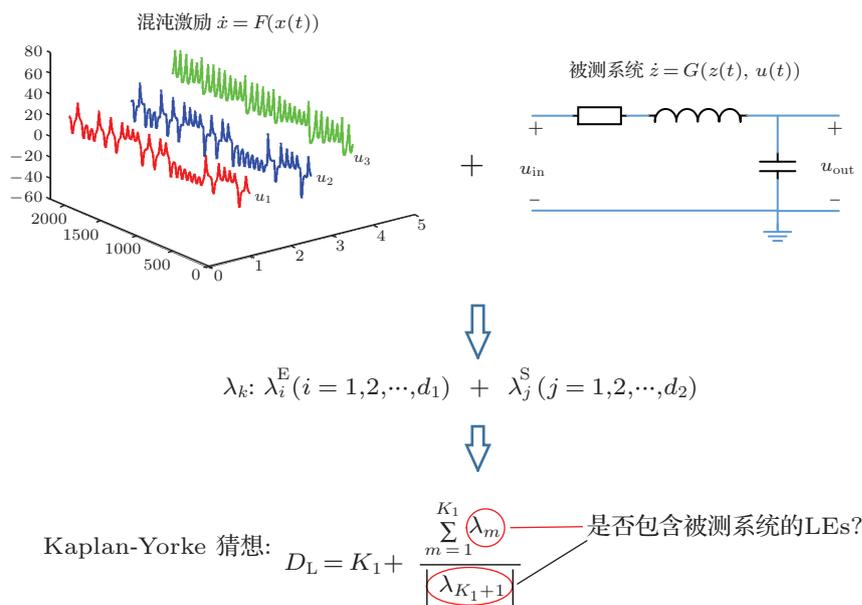


图2 (网刊彩色) 判断混沌激励与被测系统是否匹配的步骤

2.2 匹配混沌激励的设计

并不总是存在合适的混沌激励与被测系统相匹配, 因此, 需要对混沌激励进行调整以实现其对被测系统参数的充分激励. 混沌激励由混沌振荡器所生成, 而混沌振荡器通常都可以表示成一组微分方程的形式. 混沌振荡器LEs的数目等于微分方程的数目. 本文通过对混沌振荡器方程组每一式的右端与一个加速因子 μ_i ($i = 1, 2, \dots, d_1$) 相乘以改变其LEs. 这些加速因子 $(\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_{d_1})$ 构成一个加速因子域, 定义为 μ 域. 它其中的一个点定义为 μ 向量. 本文通过检验 μ 向量所对应的混沌信号是否与被测系统相匹配, 进而将 μ 域划分为三类区域: 1) 完全匹配区域; 2) 部分匹配区域; 3) 不匹配区域. 所划分三个区域之间具有图3所示的关系.

2.3 故障特征的选取

若混沌激励与被测系统相匹配, 当被测系统发生故障时, 其输出的维数将发生变化. 维数代表了输出在相空间中最基本的结构. 因而, 此时任何能够表征相空间几何结构的量均可用来检测故障. 本文利用预测误差 (prediction error, PE) 作为特征量来检测系统的故障等级. PE 最早用于混沌时间序列的非平稳性测试 [15]. Nichols 等 [16] 随后将其应用于故障检测. 它实际上是对用一个吸引子预测另一个吸引子的准确性检验. 如果一个吸引子的局部

动力学特性能够预测另一个吸引子上的基准点在相空间中的演化规律, 那么 PE 将会非常低, 并且认为两个吸引子在这个局部区域上具有相似的动力学特性.

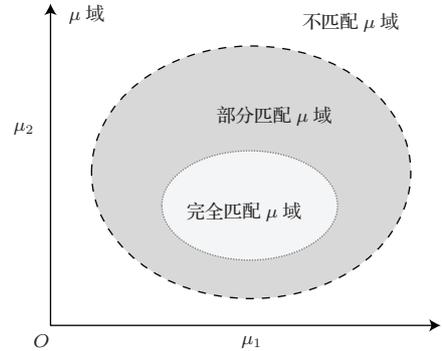


图3 完全匹配 μ 域、部分匹配 μ 域及不匹配 μ 域之间的关系

相比于传统方法, 本文认为用测试吸引子的某一邻域来预测标准吸引子的某一邻域更为合理. 这种改进的方法可见图4. 首先在标准吸引子上选择基准点 $Q_1(t = t_f)$ 及它的 N_1 个邻点. 然后在测试吸引子上确定 Q_1 对应位置的点 P_1 及 P_1 的 N_2 个邻点. 将两组邻点分别在各自吸引子上向前演化 s 步, 而成为 $\Phi_{t_f+s}^b$ 和 $\Phi_{t_f+s}^c$. 此时两组邻点的中心分别为 Q_2 和 P_2 :

$$P_2(t_f + s) = \frac{1}{N_2} \sum_{X_b \in \Phi_{t_f+s}^b} X_b(n), \quad (6)$$

$$Q_2(t_f + s) = \frac{1}{N_1} \sum_{X_c \in \Phi_{t_f+s}^c} X_c(n), \quad (7)$$

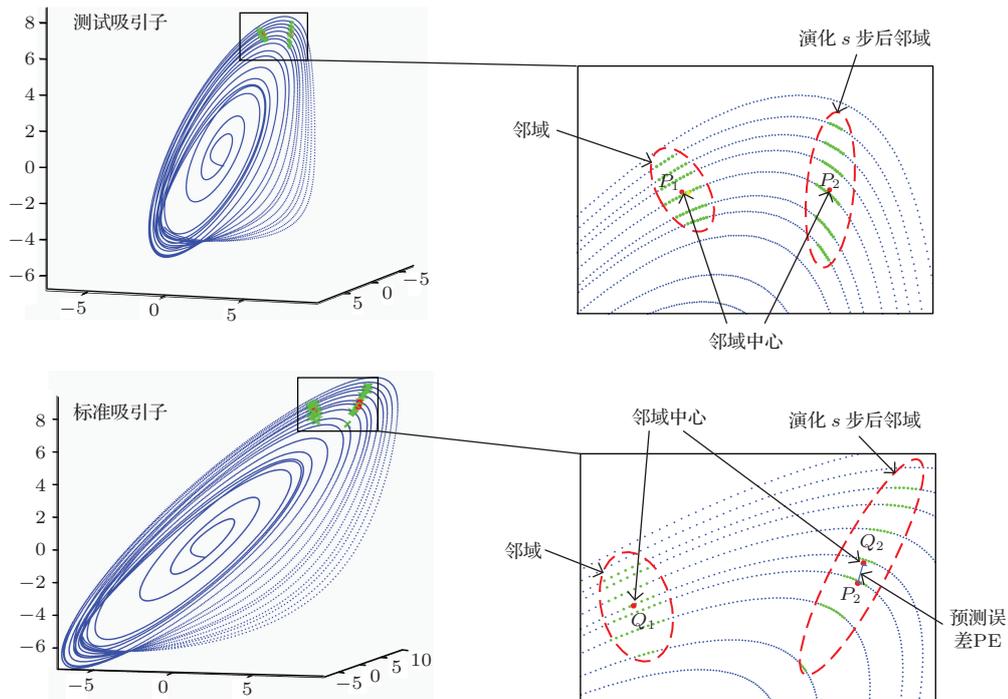


图4 (网刊彩色) 改进的PE计算方法

P_2 用来作为 Q_2 的预测点, 且它们之间的距离

$$\gamma_{t_f} = \|P_2(t_f + s) - Q_2(t_f + s)\| \quad (8)$$

为对应的预测误差.

对于每一对吸引子, 本文利用文献 [17] 中提出的方法生成 PE 值的一个高斯分布. 它首先随机采样 4000 个预测误差, 这些预测误差描述了两个吸引子之间的局部动力学特性的不同. 由于其分布是未知的, 首先一致的选取其中 30% 的 PE 值, 计算它们的平均, 并且重复这个过程 4000 次来得到一组重新采样和平均过的 PE 值, 将 PE 值分配为一组较小的区间, 计算落在每个区间的 PE 数目. 此时生成一个标准吸引子对测试吸引子预测误差的高斯分布 (见图 5).

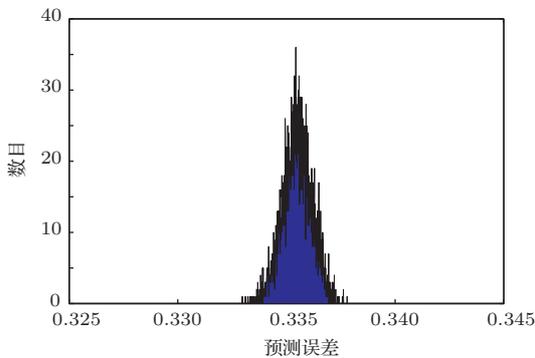


图 5 PE 值的高斯分布

假定由正常系统在不同噪声程度上得到的输出选择合适的嵌入维 m 和延迟时间 τ 利用相空间重构技术得到两组吸引子 (分别定义为正常吸引子和标准吸引子), 同时由故障系统的输出重构出一个吸引子 (定义为故障吸引子). 此时定义由正常吸引子与标准吸引子得到的一个 PE 的分布为正常分布, 而由故障吸引子与标准吸引子得到的一个 PE 的分布为故障分布. 设计下式作为被测系统的故障方程:

$$f = \frac{(m_f - m_n)^2}{\sqrt{\sigma_f \sigma_n}} = \frac{\Delta m^2}{\sqrt{\sigma_f \sigma_n}}, \quad (9)$$

其中 m_f 和 σ_f 分别为故障分布的均值和标准差, m_n 和 σ_n 分别为正常分布的均值和标准差. f 判断了两个高斯分布的分离程度, f 越大则故障越容易识别.

3 仿真实验与讨论

3.1 仿真实验一

图 6 所示为二阶 RLC 电路. 混沌振荡器的输出经归一化后施加到 RLC 电路中. 电容 C 上的电

压 $V_C(t)$ 为输出信号. 电路系统的状态方程可以表示成如下的形式:

$$\begin{bmatrix} \dot{I} \\ \dot{V}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -4 & -4 \\ 3/4 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I(t) \\ V_C(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 4 \\ 0 \end{bmatrix} u_{in}(t), \quad (10)$$

其中, $I(t)$ 为流经整个回路的电流. Nichols 等 [14] 验证了对于一个线性系统, 它的 LEs 即为它的状态传输矩阵的特征值. 对于此电路, 其特征值为 $\lambda_1^S = -1, \lambda_2^S = -3$.

RLC 电路的激励信号由在 Lorenz 方程组 [18] 基础上设计的一个加速混沌振荡器产生. 本文所设计的加速 Lorenz 振荡器具有如下的形式:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= (\sigma(y - x))\mu_1, \\ \dot{y} &= (\gamma x - y - xz)\mu_2, \\ \dot{z} &= -(\beta z + xy)\mu_3, \end{aligned} \quad (11)$$

其中, $\sigma = 16, \gamma = 45.92, \beta = 4, \mu_1, \mu_2, \mu_3$ 为加速因子. 当 $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = 1$ 时, 混沌激励的 LEs 为 $\lambda_1^E = 1.497, \lambda_2^E = 0.00, \lambda_3^E = -22.46$. 激励系统的 y 变量被用来对 RLC 电路进行激励. 混沌激励及其在相空间中的轨线如图 7 所示.

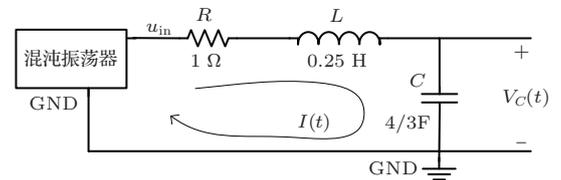


图 6 混沌信号激励下的 RLC 电路

此时, 整个系统的 LEs 包含混沌激励及被测系统两部分. 按递减的顺序将它们重新排列, 得到

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= 1.497, & \lambda_2 &= 0, \\ \lambda_3 &= -1, & \lambda_4 &= -3, & \lambda_5 &= -22.46. \end{aligned}$$

由于

$$\sum_{i=1}^{i=3} \lambda_i = 0.497 > 0, \quad \sum_{i=1}^{i=4} \lambda_i = -2.503 < 0,$$

依据 (4) 式, 得到 $K = 3$. 可以验证, 输出的前 $3 + 1 = 4$ 个 LEs 包含被测系统所有的 LEs, 因此加速因子 (1,1,1) 为一组与被测系统完全匹配的加速因子.

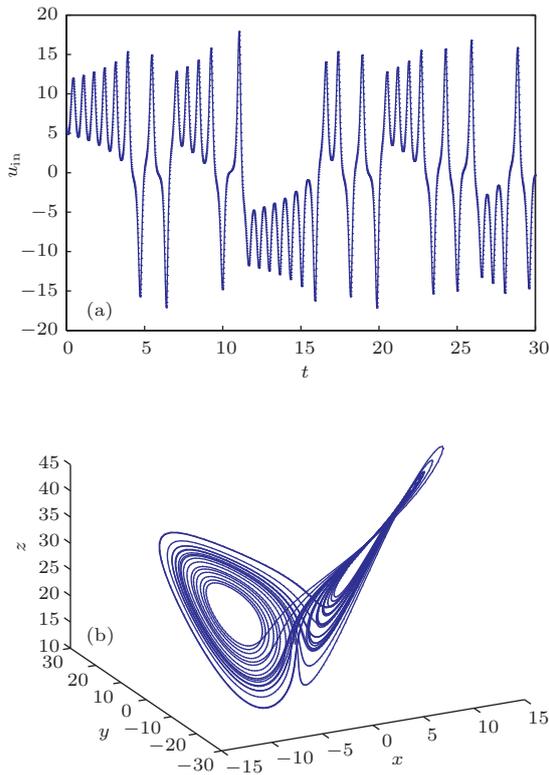


图7 (a) 加速 Lorenz 振荡器的输出; (b) 输出在相空间中的轨线

调整 (μ_1, μ_2, μ_3) 以找到能与被测系统完全匹配的 μ 域. 为了更加直观, 固定 $\mu_3 = 1$, 只在 $\mu_1 - \mu_2$ 二维平面内寻找完全匹配的 μ 域. 基于文献 [19,20]

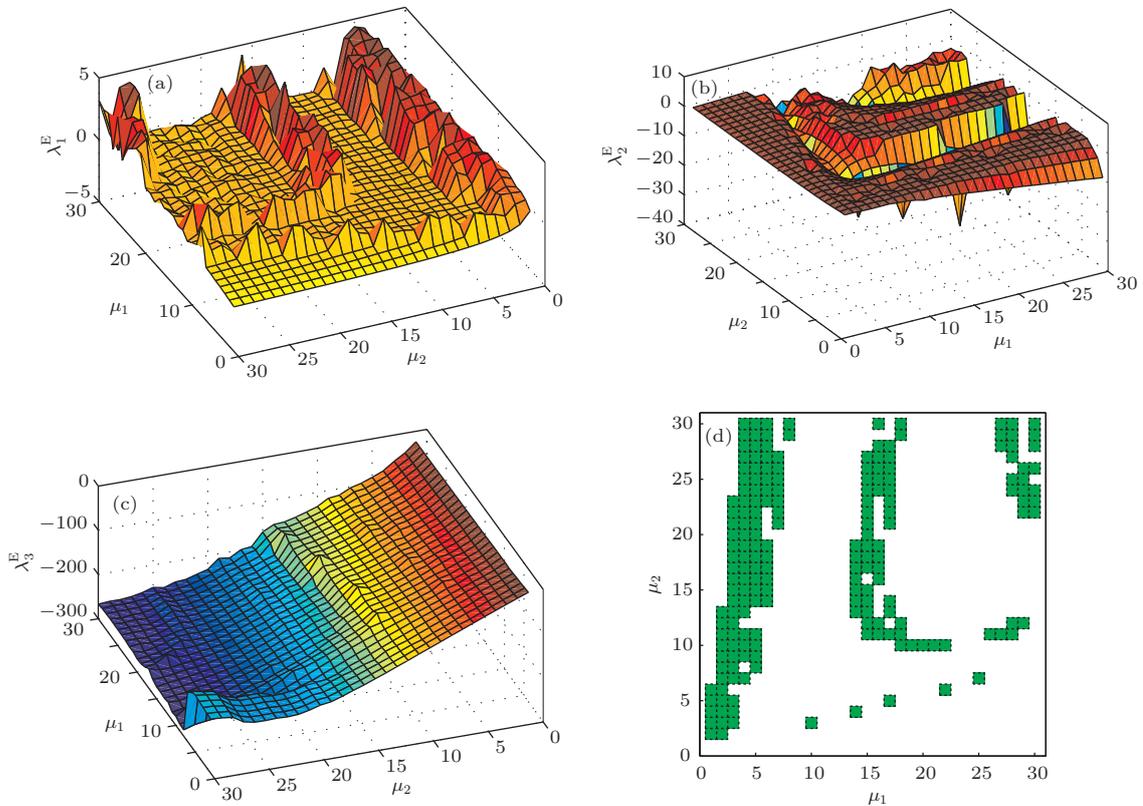


图8 (网刊彩色) (a)—(c) 加速 Lorenz 振荡器在 $\mu_1 - \mu_2$ 平面上计算得到的 LEs; (d) 与 RLC 电路完全匹配的 μ 域 (阴影区域)

的方法, 计算得到 $0 < \mu_1 < 30, 0 < \mu_2 < 30$ 范围内单位长度分布点的 LEs. 图 8 (a)—(c) 为加速 Lorenz 振荡器在 $\mu_1 - \mu_2$ 平面上得到的 3 个 LEs.

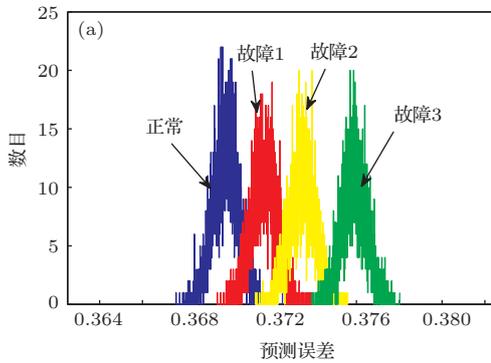
利用在 2.1 节中所述方法找到与 RLC 电路完全匹配的 μ 域. 首先检验上面计算得到的哪些点的 LEs 是与被测系统相匹配, 将这些点表示成 (x_m, y_m) , 则设定满足 $x_m - 0.5 \leq x < x_m + 0.5, y_m - 0.5 \leq y < y_m + 0.5$ 的区域为完全匹配区域. 例一中 RLC 电路所对应的混沌激励信号的匹配区域如图 8 (d) 中阴影区域所示.

由于 μ 向量 (1,1,1) 位于完全匹配区域, 首先研究利用它所对应的混沌信号来对被测系统进行故障检测的情况. 将电容 C 的值从 $4/3$ F 变化到 $(4 - \delta_f)/3$ F, 作为要检测的故障, δ_f 为故障等级. 利用 2.3 节中提到的方法计算被测系统故障状态下输出吸引子与标准吸引子得到的 PE 分布 G_{fault} 及正常状态下输出吸引子与标准吸引子得到的 PE 分布 G_{normal} . 当它们满足下面的条件时, 认为故障可以被识别:

$$\sum G_{\text{normal}} G_{\text{fault}} \leq \varepsilon_0, \quad (12)$$

其中 ε_0 决定了故障与正常分布之间的最大交叉区域, 它应该设定为一个较小的值.

在图9(a)中, 分别计算得到了4个故障等级下的高斯分布. 从左至右依次为正常分布、故障等级为0.03 F 的故障1分布、故障等级为0.05 F 的故障2分布、故障等级为0.11 F 的故障3分布. 可



以看到, 随着故障等级的提高, 故障分布逐步向右侧移动. 图9(b)为对应不同故障等级的故障方程值, 可见故障方程值随故障等级的提高而不断增大.

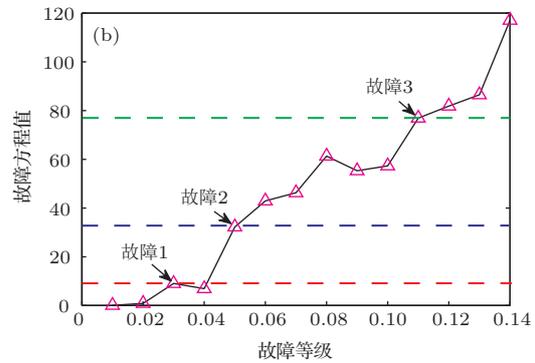


图9 (网刊彩色) (a) 不同故障等级下 PE 的高斯分布; (b) 故障方程值

由图9(a)可见, 故障1分布与正常分布有较大的重叠区域, 故障1不能被识别. 故障等级高于2的故障可以被识别. 故障2为使(12)式等号成立时对应的故障等级, 故障2称为故障识别精度.

各元件正常工作状态下参数如图所示, R_3 上的电压被用作输出信号.

3.2 仿真实验二

混沌振荡器的正的LEs并不总是足够大以使其所产生的混沌信号与被测系统相匹配. 但总能找到一个与被测系统部分匹配的混沌激励.

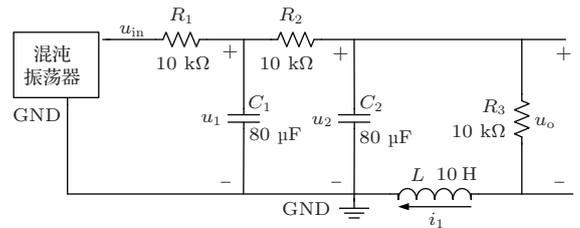


图10所示的电路为一个3阶的电路. 电路中

图10 三阶RLC电路

电路的状态方程如下:

$$\begin{bmatrix} \dot{v}_1 \\ \dot{v}_2 \\ \vdots \\ \dot{i}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\left(\frac{1}{C_1 R_1} + \frac{1}{C_1 R_2}\right) & \frac{1}{C_1 R_2} & 0 \\ \frac{1}{C_2 R_2} & -\frac{1}{C_2 R_2} & -\frac{1}{C_2} \\ 0 & \frac{1}{L} & -\frac{R_3}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ i_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{C_1 R_1} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} V_S. \quad (13)$$

同实验一, 系统的LEs为其状态传输矩阵的特征值,

$$\lambda_1^S = -1.25, \quad \lambda_2^S = -3.75, \quad \lambda_3^S = -998.74.$$

此处所用混沌振荡器为一个在超混沌振荡器^[21]基础上设计的一个加速超混沌系统:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= (\sigma(x_2 - x_1) + x_4)\mu_1, \\ \dot{x}_2 &= (\gamma x_1 - x_2 - x_1 x_3)\mu_2, \\ \dot{x}_3 &= (x_1 x_2 - \beta x_3)\mu_3, \\ \dot{x}_4 &= (d x_4 - x_1 x_3)\mu_4, \end{aligned} \quad (14)$$

其中,

$$\begin{aligned} \sigma &= 10, \quad \gamma = 28, \\ \beta &= 8/3, \quad d = 1.3; \end{aligned}$$

μ_i ($i = 1, 2, 3, 4$) 为加速因子; y 变量被用作对被测系统的激励信号. 当 $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = 1$ 时, 此振荡器的LEs分别为

$$\lambda_{i=1,2,3,4}^E = 0.39854, 0.24805, 0, -12.913,$$

其中包含两个正的LEs. 生成混沌激励及其在相空间中的轨线如图11所示.

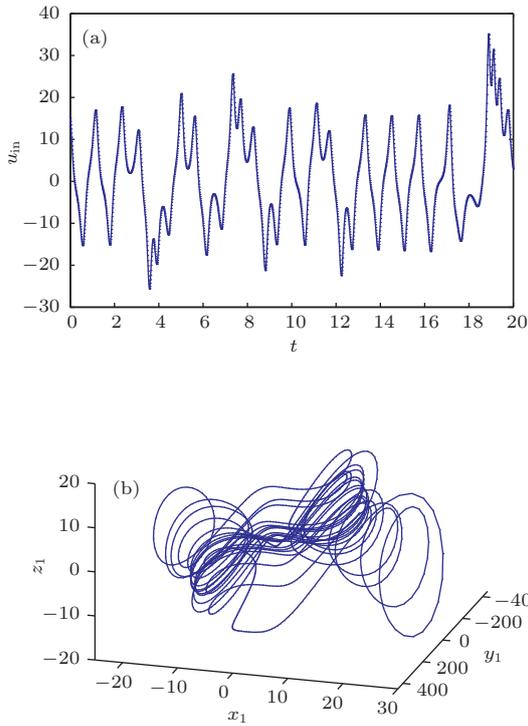


图 11 (a) 超混沌振荡器的输出; (b) 输出在相空间中的轨线

此超混沌激励不存在与被测系统完全匹配的 μ 域, 但是存在一些部分匹配的 μ 域, 使 (5) 式中前 $K + 1$ 个 LEs 包含被测电路的第一个 $LE\lambda_1^S$.

此时与 λ_1^S 关联的参数可认为是被充分激励的. 以电感 L 为例, 将 L 的值在其正常值上下 10% 变化, 得到电路系统特征值的变化如图 12 所示.

由图 12 可以看出, λ_1^S 与电感 L 的参数密切联系. 因此, 电感 L 得到了充分激励. 仿真过程中, L 的值由 10 变化到 $10 + \delta_f$, 作为要被检测的故障, δ_f 为故障等级. 故障 1 大小为 0.5 H 时, 计算得到 PE 的高斯分布如图 13 (a) 所示. 可见, 电感 L 的故障 1 分布可与正常分布明显区分. 图 13 (b) 为不同故障等级所对应的故障方程值. 随故障等级的提高, 故障方程值不断增大, 说明电感 L 的故障可以利用部

分匹配混沌激励检测出来.

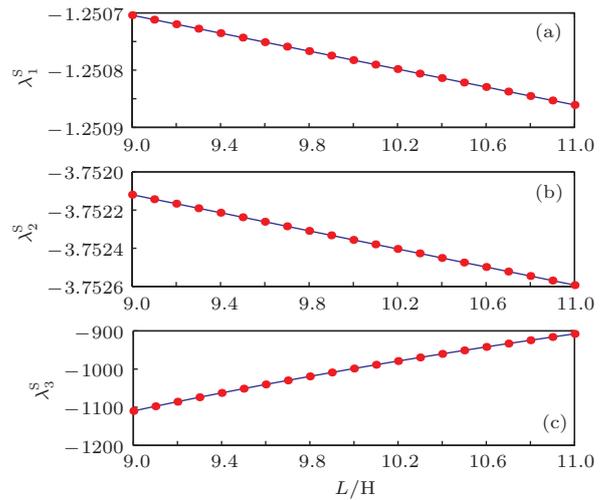


图 12 电路中 LEs 随 L 变化情况

对于那些不能被部分匹配激励所充分激励的系统参数, 不能保证其输出可用来检测故障. 分别将 R_1 和 R_2 的值在其各自的正常值附近 10% 进行调整, 对应的电路系统的特征值变化情况如图 14 所示.

由图 14 可见, 被测电路特征值的变化几乎可以忽略. 此时, 不能简单地通过 Kaplan-Yorke 猜想来阐释系统参数变化对输出相空间结构的影响, 但并不是不能利用 PE 来检测系统的故障. 不同的 R_1 值情况下, 计算得到的故障方程值如图 15 (a) 所示, 可见 PE 同样可以用来检测 R_1 的故障. 不同 R_2 值情况下, 计算得到的故障方程值如图 15 (b) 所示, 此时, 计算得到的故障方程值明显小于匹配激励的情况, 说明 R_2 的故障识别精度变差. 同时, 故障方程值随着故障等级的提高并没有一个逐渐增大的趋势, 因此 R_2 的故障检测并不能简单地通过 PE 来实现.

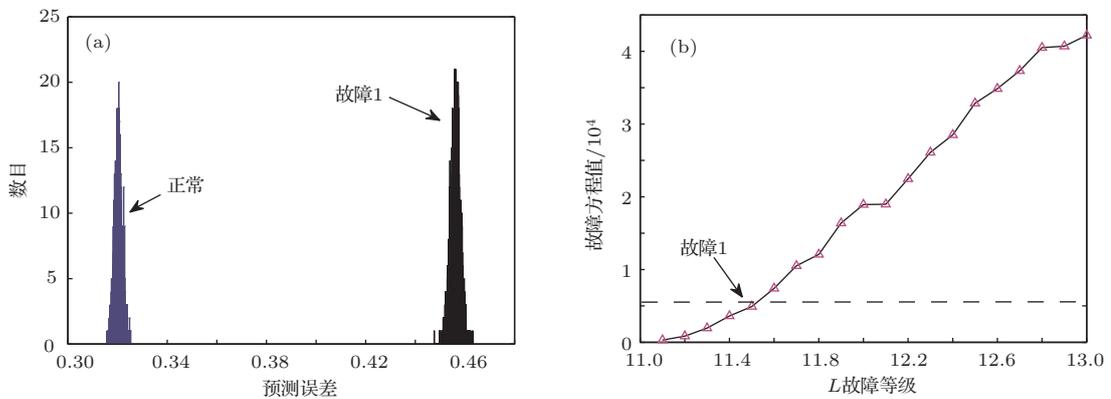


图 13 电感 L 对应的 (a) 正常分布及故障 1 分布, (b) 不同故障等级下的故障方程值

3.3 讨论

PE本质上对系统相空间结构的变化十分敏感, 被测系统的任何变化都会使得得到的PE分布有所不同. 但是在完全匹配激励的情况下, 系统的参数得到了充分激励, 参数的变化可以完全反映

到系统的输出中. 同时, 故障检测的效果得到了加强. 如果激励信号不满足这些条件, 需要更深入地研究系统参数变化与输出相空间结构之间的关系. 由于受到Kaplan-Yorke猜想自身结论的限制, 并不能保证这些不匹配情况下的故障检测是有效的.

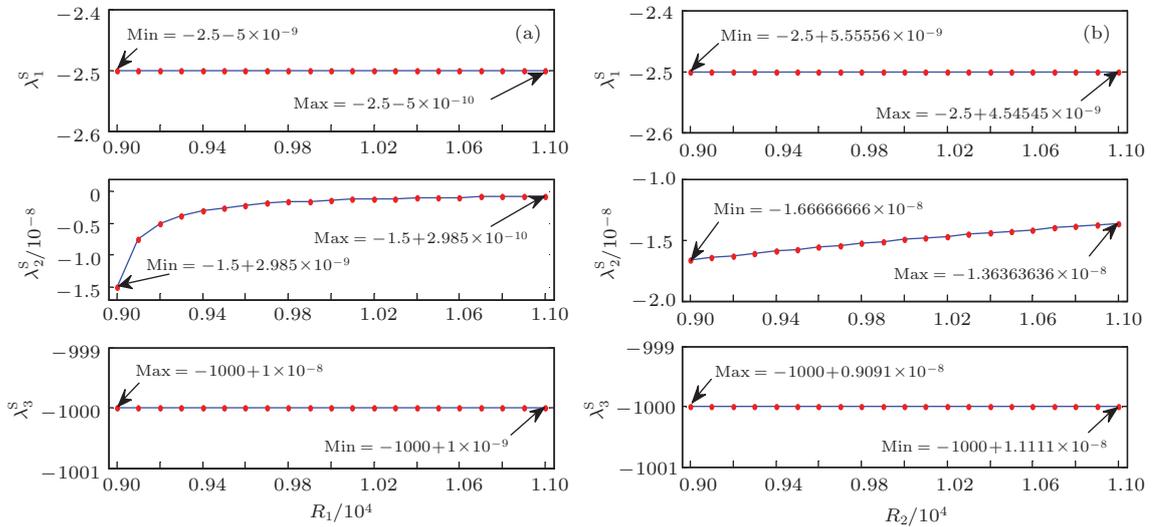


图 14 电路的特征值变化对应于 (a) R_1 变化, (b) R_2 变化

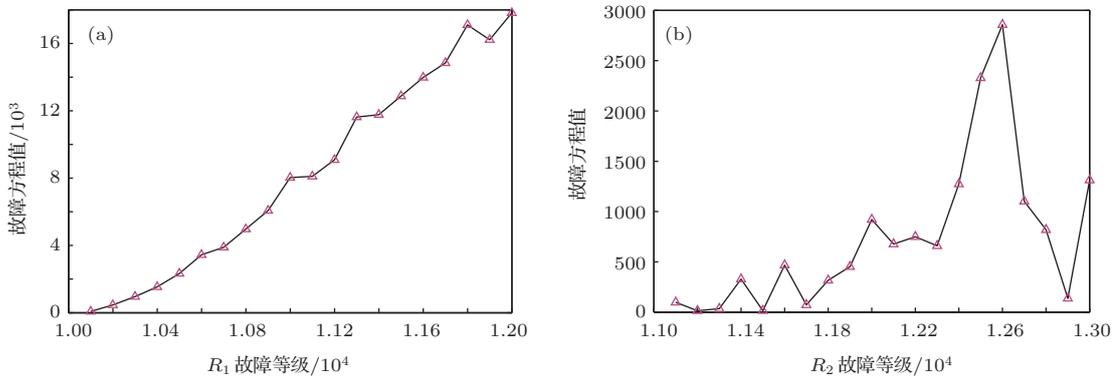


图 15 部分匹配激励下不同电阻的故障方程值 (a) R_1 故障; (b) R_2 故障

4 结论

在故障检测领域, 激励信号的设计非常重要. 混沌信号具有许多独特的特性更适用于故障检测. 利用一个匹配或者部分匹配的混沌信号来进行故障检测具有两方面的好处. 首先, 它保证系统参数的变化可以通过分析输出时间序列来检测; 其次, 匹配混沌激励可以使故障检测的效果进一步的加强. 在实际应用中, 对于一些非常稳定的系统, 混沌激励的正的LEs并不足以将其充分激励, 但总可以找到一些与被测系统部分匹配的混沌信号. 此时, 可以检验系统的哪些参数可以被混沌信号所充

分激励.

参考文献

- [1] Ma H G, Zhu X F, Xu J F, Ai M S 2008 *J. Franklin. I.* **345** 75
- [2] Wang G Y, Bao X L, Wang Z L 2008 *Chin. Phys. B* **17** 3596
- [3] Wang G Y, He H L 2008 *Chin. Phys. B* **17** 4014
- [4] Logan D, Mathew J 1996 *Mech. Syst. Signal Pr.* **10** 241
- [5] Wolf A, Swift J B, Swinney H L, Vastano J A 1985 *Physica D* **16** 285
- [6] Mandelbrot B B 1985 *Phys. Scripta* **32** 257

- [7] Nichols J M, Todd M D, Wait J R 2003 *Smart. Mater. Struct.* **12** 580
- [8] Todd M D, Erickson K, Chang L, Lee K, Nichols J M 2004 *Chaos* **14** 387
- [9] Xia H C, Zhan Y Q 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1299 (in Chinese) [夏恒超, 詹永麒 2004 物理学报 **53** 1299]
- [10] Nichols J M, Trickey S T, Todd M D, Virgin L N 2003 *Mechanica* **38** 239
- [11] Nichols J M, Nichols C J, Todd M D, Seaver M, Trickey S T, Virgin L N 2004 *Smart. Mater. Struct.* **13** 241
- [12] Torkamani S, Butcher E A, Todd M D, Park G 2011 *Smart Mater. Struct.* **20** 025006
- [13] Farmer J D, Ott E, Yorke J A 1983 *Physica D* **7** 153
- [14] Nichols J M, Todd M D, Seaver M, Trickey S T, Pecora L M, Moniz L 2003 *P. Natl. Acad. Sci. USA* **100** 15299
- [15] Schreiber T 1997 *Phys. Rev. Lett.* **78** 843
- [16] Nichols J M, Todd M D, Seaver M, Virgin L N 2003 *Phys. Rev. E* **67** 016209
- [17] Olson C C, Overbey L A, Todd M D 2009 *Mech. Syst. Signal Pr.* **23** 344
- [18] Lorenz E N 1963 *J. Atmos. Sci.* **20** 130
- [19] Wolf A, Swift J B, Swinney H L, Vastano J A 1985 *Physica D* **16** 285
- [20] Briggs K 1990 *Phys. Lett. A* **151** 27
- [21] Wang X Y, Wang M J 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 129 (in Chinese) [王兴元, 王明军 2007 物理学报 **56** 129]

Design of the matched chaotic stimulation for fault detection of the single input single output system*

Yang Dong-Dong[†] Ma Hong-Guang Xu Dong-Hui Feng Xiao-Wei

(The Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China)

(Received 15 January 2014; revised manuscript received 27 February 2014)

Abstract

In this paper, for the fault detection of a single-input single-output (SISO) system, we define a concept of matching chaotic stimulation with a measured system, establish a criterion of matching chaotic stimulation with a measured system, and propose a method of adjusting the matching of chaotic stimulation with a measured system. Finally, the improved prediction error is used to detect faults in the SISO system. The simulation results show that matched chaotic stimulation can be used to detect faults effectively, while unmatched ones can add uncertainty into the fault detection.

Keywords: chaotic signal, matched excitation, fault detection, single input single output system

PACS: 05.45.-a, 05.45.Ac, 05.45.Df, 06.60.Mr

DOI: 10.7498/aps.63.120508

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61174207).

† Corresponding author. E-mail: yd_xian@163.com