接触电阻时间序列的混沌特性识别与预测研究

马东娟，李玲玲

（河北工业大学电磁场与电器可靠性省部共建重点实验室，天津 300130）

摘要：接触电阻是表征触点接触性能的一个重要指标。对监测得到的接触电阻时间序列进行混沌特性识别与预测。运用 Cao 氏法确定了接触电阻时间序列的最小嵌入维数，通过绘制其相轨线图和计算最大 Lyapunov 指数，从定性和定量两个角度分别验证了接触电阻时间序列具有混沌特性。最后基于最大 Lyapunov 指数方法对接触电阻时间序列部分数据进行了短期预测，并给出了混沌预测的尺度。结果表明，在可预测尺度内，预测效果较好且比较稳定，超出可预测尺度范围后，预测误差变大且不稳定。

关键词：接触电阻；时间序列；Cao 氏法；最大 Lyapunov 指数；混沌特性；预测

Research on chaotic characteristics identification and prediction of contact resistance time series

MA Dongjuan, LI Lingling

(Province-Ministry Joint Key Laboratory of Electromagnetic Field and Electrical Apparatus Reliability, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

Abstract: Contact resistance is an important index for characterization of contact performance. The chaotic characteristics of contact resistance time series for the detected contacts are identified and predicted. The minimum embedding dimension of contact resistance time series is determined by Cao method. It proves that the contact resistance time series has the chaos characteristics by drawing phase diagram method and calculating largest Lyapunov exponent from qualitative and quantitative view respectively. The chaos prediction and the reliable scope for partial data of contact resistance time series are presented based on the Largest Lyapunov exponent. The result indicates that the prediction accuracy is higher and steadier within the predictable range than beyond of it.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51377044 and No. 51475136).

Key words: contact resistance; time series; Cao method; largest Lyapunov exponent; chaos characteristics; prediction

中图分类号： TM58 文献标识码：A 文章编号： 1674-3415(2015)10-0057-05

0 引言

接触电阻是表征继电器工作性能的一个重要指标。正常状态下，接触电阻应当保持低且稳定的状态。如果触点上的电压降超出正常范围，将影响外部电路的正常工作，进而直接影响被控电路和继电器的使用寿命和可靠性。因此，分析影响触点接触电阻的因素，研究触点接触电阻的变化对于提高继电器和系统的可靠性具有重要意义。通常所说的接触电阻是指产生于一对相互接触的触点接触部位的电阻值，由收缩电阻和表面膜电阻两部分组成。由于电流线流经触点时发生收缩，从而形成收缩电阻，而表面膜电阻则是触点的金属材料同周围环境中的氧、硫、氮等元素形成的化合物。一般情况下，触点接触电阻受多种因素的影响，例如，触头材料、触头压力、触头形状、触头表面粗糙度、流过触头的电流、触头上的开路电压、环境温度等均会影响触头接触电阻的大小。此外，触点表面的污染是影响继电器触点接触电阻的重要因素。尘埃、松香、油污、汗渍等在触点表面机械附着、静电吸附、沉积造成物理污染，使接触电阻增大，且极不稳定，严重时将导致触点不通，当触点表面状态达到一定程度时，触点就接近失效了[1-4]。相关文献研究表明，触点接触电阻的变化随着触点操作次数的增加并没

基金项目：国家自然科学基金(51377044，51475136)；天津市高等学校科技发展基金计划项目(20130422)；河北省自然科学基金(E2014202230)

有明显的线性增长趋势或剧烈的变化趋势。有相关文献研究表明，触点间阴离子的扩散是导致触点表面绝缘膜增长的主要原因，并根据扩散理论建立了描述单个导电斑点间接触电阻增长的动力学模型[5]。因此，可以通过研究触点接触电阻序列的变化来预测触点的性能。混沌理论可以揭示看似杂乱无章的表面现象下的内在演化规律，与其他算法结合，已在多个领域得到了广泛应用[6-8]。自然界的本质就是非线性的，利用混沌理论的相空间重构技术研究触点接触电阻的变化，预测触点接触电阻可能效果更好。本文选择触点接触电阻时间序列作为研究对象，尝试从定性与定量两个角度对其进行混沌特性识别，在验证触点接触电阻时间序列具有混沌特性的基础上，基于最大 Lyapunov 指数方法对接触电阻时间序列进行预测，并给出混沌预测的范围。

1 接触电阻时间序列的获取

接触电阻时间序列不仅包含了触点过去接触状态的信息，还包含了触点电接触性能演化的大量信息。为了得到充分的试验数据，课题组开发了以 PC 总线工控机为硬件核心的触点接触电阻检测系统，该系统硬件结构框图如图 1 所示[9]。本文试品选择电磁继电器，电源电压为 AC 230 V，负载电流 30 A。根据控制继电器可靠性试验要求，设置触点接触压降阈值为电源电压的 10%，触点断开电压阈值为电源电压的 90%。如果触点接触压降超过设定阈值，或者触点断开端电压低于设定阈值，则记为一次失效。如果监测到某试品触点出现 n(n 值可事先设定)次失效，则将该试品退出试验。继电器操作频率为 1 800 次/h，继电器触点闭合时间与继电器一个通断周期时间的比值为 50%。每次试验均检测触点接触压降，为降低存储量，每两次触点闭合过程记录接触电阻值一次。以试验初期 500 次接触电阻记录数据为例进行分析，接触电阻与接触电阻测量操作次数之间的关系如图 2 所示。

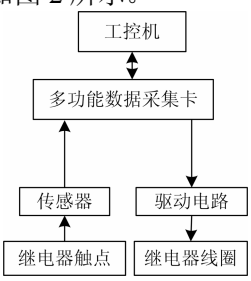

图 1 接触电阻检测系统硬件结构框图

Fig. 1 Diagram of contact resistance measurement hardware system

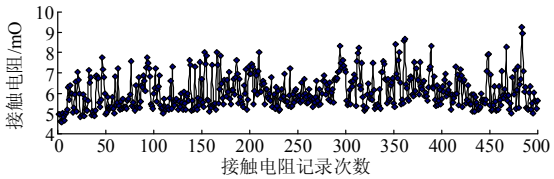

图 2 接触电阻与接触电阻记录次数的关系

Fig. 2 Relationship between contact resistance and measurement operations

由于是每 2 次继电器触点闭合过程记录一次接触电阻值，因此，触点实际动作次数为接触电阻记录次数的 2 倍，为了简便，图 2 横坐标记为接触电阻记录次数。由图 2 可以看出，接触电阻的变化具有一定的时变性，同时也具有一定的随机性和不确定性。如果可以证明貌似无规则变化的触点接触电阻时间序列具有混沌特性，那么就可以运用混沌方法对接触电阻进行预测。

2 接触电阻时间序列混沌特性的识别

2.1 确定最佳延迟时间和最小嵌入维数

混沌吸引子体现了混沌系统的规律性，这种规律性在高维空间下表现为一种特定的轨迹。可以根据观测到的时间序列重构一个相空间，将这种蕴含在时间序列中的规律充分挖掘出来，找到一个最优的嵌入维数和延迟时间，从而恢复出系统的混沌吸引子[10]。虽然 Takens 定理指出，对于理想的、无限长、无噪声的一维时间序列来讲，m 和 τ 是相互独立的，可取任意值，但实际应用中的时间序列往往是有限的，并且含有噪声，因此，对于离散时间序列的延迟时间最好取 $\tau=1$。确定了延迟时间之后，就剩下最小嵌入维数。Cao 氏法克服了伪最近邻域法中阈值选择的不足，引入了 $E1(m)$ 和 $E2(m)$ 两个变量[11]。根据 $E1(m)$ 和 $E2(m)$ 随嵌入维数的变化情况确定最小嵌入维数。其基本步骤如下。

(1) 已知时间序列 $x=[x_1,x_2,\cdots,x_n]$，按照延迟时间 τ，分别嵌入 m 维相空间和 m+1 维相空间，定义

$$a(i,m)=\frac{\left\|y_i(m+1)-y_{n(i,m)}(m+1)\right\|}{\left\|y_i(m)-y_{n(i,m)}(m)\right\|} \tag{1}$$

式中：$i=1,2,\cdots,n-m\tau$；$y_i(m)$ 为 m 维嵌入相空间中的第 i 个相点，$y_{n(i,m)}(m)$ 为其最近邻点；$y_i(m+1)$ 为 m+1 维嵌入相空间中的第 i 个相点，$y_{n(i,m)}(m+1)$ 为其最近邻点。

(2) 计算所有 $a(i,m)$ 的均值

$$E(m)=\frac{1}{n-m\tau}\sum_{i=1}^{n-m\tau}a(i,m) \tag{2}$$

可以看出，$E(m)$只依赖于延迟时间τ和嵌入维数m。

(3) 为了探索$E(m)$随嵌入维数 m 的变化情况，定义

$$E1(m)=E(m+1)/E(m) \tag{3}$$

如果该时间序列是混沌的，则当 m 大于某个特定值m_0之后，$E1(m)$将不再变化，m_0+1即为最小嵌入维数。

(4) 对于一个有限的实际序列来说，往往难以判断$E1(m)$是在缓慢变化还是已经处于稳定状态，因此，引入变量$E^*(m)$：

$$E^*(m)=\frac{1}{n-m\tau}\sum_{i=1}^{n-m\tau}\left|x_{i+m\tau}-x_{n(i,m)+m\tau}\right| \tag{4}$$

$n(i,m)$的含义同式(1)。

(5) 定义变量

$$E2(m)=E^*(m+1)/E^*(m) \tag{5}$$

由于随机序列具有不可预测性，$E2(m)$将恒等于 1，当$E2(m)$在 1 附近波动时，说明时间序列具有混沌特性。因此，本文选用 Cao 氏法确定接触电阻时间序列的最小嵌入维数。$E1$、$E2$ 随嵌入维数 m 的增加而变化的曲线如图 3 所示。

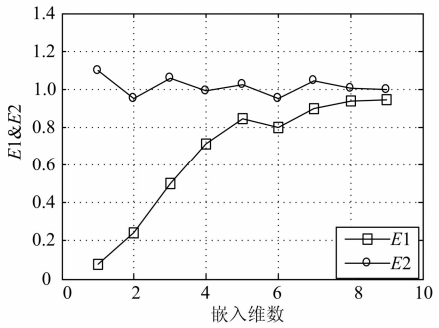

图 3 Cao 氏法求最小嵌入维数

Fig. 3 The minimum embedding dimension based on Cao method

由图3可以看出，$E2(m)$在1附近出现震荡，说明接触电阻时间序列包含确定性成分，并不是单纯的随机序列，同时具有确定性成分与随机成分。当m_0较小时，$E1$也较小，随着嵌入维数m_0的增大，$E1$也逐渐增大，当m_0=7时，$E1$达到饱和状态，在1附近呈现小幅值的波动状态。因此，可以确定接触电阻序列的最小嵌入维数为$m=m_0+1=8$。

2.2 相轨线图(相图)分析法判断混沌特性

常用的判断一个系统是否具有混沌特性的方法主要有以下几种：相轨线图(相图)分析法、自功率谱分析法、Lyapunov 指数法、非整数维分形法、Poincare 截面法等[12]。其中，相轨线图(相图)分析法通过绘制相空间重构后点的轨迹的分布规律进行判断。若给定时间序列具有混沌特性，则其相轨线图出现混沌吸引子。由于该方法具有简单、直观的特点，已广泛应用于系统混沌特性的识别中。根据 2.1 节中确定的延迟时间和嵌入维数对接触电阻时间序列进行相空间重构。图 4 为触点接触电阻时间序列相空间重构向量的 3 个分量$x1$、$x2$、$x3$ 的三维相图。

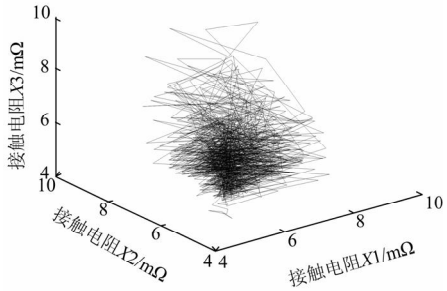

图 4 接触电阻时间序列三维相空间图

Fig. 4 Phase diagram of contact resistance times series

由图 4 可以看出，相点的轨迹并不是杂乱无章的，而是明显存在混沌吸引子，这表明了触点接触电阻时间序列具有混沌特性，这是从定性的角度分析得到的。

2.3 通过最大 Lyapunov 指数判断混沌特性

Lyapunov 指数表征了混沌系统相空间中两条相邻轨迹之间收敛或者发散的平均指数率，是宏观层次上对混沌吸引子的一个表述，也是定量判断一个系统是否具有混沌特性的重要指标。如果所给时间序列的最大 Lyapunov 指数大于 0，则证明该时间序列具有混沌特性。并且，Lyapunov 指数越大，说明混沌特性越明显，即其混沌程度越高。由于 Lyapunov 指数计算简便快捷，已广泛用于定量判断系统是否具有混沌特性。运用小数据量法计算接触电阻时间序列的最大 Lyapunov 指数，计算步骤如图 5 所示[13]。

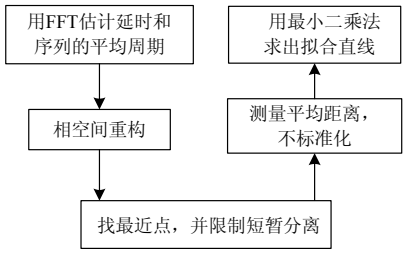

图 5 小数据量法计算最大 Lyapunov 指数的步骤

Fig. 5 Calculation steps of largest Lyapunov exponent through small data quantity method

按照上述步骤通过 Matlab 进行编程计算，得到图 2 接触电阻时间序列的最大 Lyapunov 指数 λ_1=0.010 7，大于零。因此，该接触电阻时间序列具有混沌特性，这是通过定量的方式分析得到的，与 2.1 节相轨线图分析法得到的结论是一致的。

3 基于最大Lyapunov指数的接触电阻时间序列预测

经过定性与定量两个方面验证了接触电阻时间序列具有混沌特性之后，下面基于最大 Lyapunov 指数对图 2 中触点接触电阻时间序列进行混沌预测[14]。根据 2.1 节中确定的最小嵌入维数和延迟时间对接触电阻时间序列进行相空间重构，重构之后相空间中的点为 $Y_i=\left[Y_{i,1},Y_{i,2},\cdots,Y_{i,k}\right]$，其中，$Y_{i,k}=x_i+(k-1)\tau$，$k=0,1,\cdots,m$，$x_i$ 为原接触电阻时间序列中的点。已知 λ_1 为接触电阻时间序列的最大 Lyapunov 指数。设 Y_M 为预测的中心点，Y_M 的最近临近点为 Y_K，记两者之间的欧式距离为 $d_M(0)$，有

$$d_M(0)=\min_j\left\|Y_M-Y_j\right\|=\left\|Y_M-Y_K\right\| \tag{6}$$

Y_M 和 Y_K 经 T 步演化之后分别成为 Y_{M+T} 和 Y_{K+T}，根据最大 Lyapunov 指数的物理含义，有

$$\left\|Y_{M+T}-Y_{K+T}\right\|=\mathrm{e}^{\lambda_1}\left\|Y_M-Y_K\right\| \tag{7}$$

可以看出，如果 $T\le\tau$，则相点 Y_{M+T} 只有一个分量是未知的，可以对其进行预测。若取 $T=1$，则 Y_M 和 Y_K 经一步演化之后分别成为 Y_{M+1} 和 Y_{K+1}。Y_M、Y_K、Y_{K+1} 是相空间中的点，Y_{M+1} 中只有一个要预测的接触电阻值未知，设为 $Y_{M+1,m}$，令

$$M_1=\sum_{i=1}^{m}\left[y_M(j)-y_K(j)\right]^2\cdot\mathrm{e}^{2\lambda_1}$$

$$M_2=\sum_{j=1}^{m-1}\left[y_{M+1}(j)-y_{K+1}(j)\right]^2$$

则有

$$x(N+1)=y_{M+1,m}=y_{K+1,m}\pm\sqrt{M_1-M_2}$$

正负号的选择根据文献[15]中的规则进行取舍。最大可预测尺度定义为

$$T_{\max}=1/\lambda_1 \tag{8}$$

下面给出基于最大Lyapunov指数的图2接触电阻时间序列预测结果，如图 6 所示。

从图 6 可以看出，混沌预测的结果与接触电阻的实际变化趋势是一致的。根据式(8)，最大可预测尺度 $T_{\max}=1/0.0107=93.46$。预测前 100 步接触电阻预测值与实测值基本相等，误差较小且稳定，只有个别预测值误差较大，最大相对误差为 8.46%，平均相对误差为 5.22%。预测后期，超出可预测尺度后，预测效果开始变差，最大相对误差为 19.73%，平均相对误差 12.57%，误差较大且不稳定。

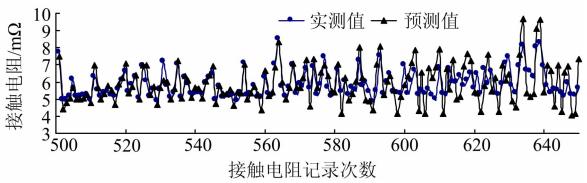

图 6 基于最大 Lyapunov 指数的接触电阻时间序列预测结果

Fig. 6 Prediction results of contact resistance time series based on the largest Lyapunov exponent

4 结论

以实验数据为基础，验证了触点接触电阻时间序列的混沌特性，并进行了混沌预测。

(1) 对触点接触电阻时间序列进行了混沌特性识别，确定了接触电阻时间序列的最小嵌入维数和最佳延迟时间。通过绘制接触电阻时间序列的相轨线图和计算其最大 Lyapunov 指数，从定性和定量两个方面验证了其具有混沌特性。

(2) 基于最大 Lyapunov 指数对接触电阻时间序列部分数据进行了短期预测，结果表明，在可预测尺度内，混沌预测效果较好。

(3) 接触电阻的变化是触点电接触性能变化的外在表现，因此，可以通过上述方法来研究触点电接触性能的变化趋势。

研究接触电阻的变化是为了反映触点电接触性能的变化，但要提高触点电接触性能，必须从根本上减小触点接触电阻，重视新的触点材料的研究，加强钝化工艺和洁净工艺，适当选择触点的形状，降低表面粗糙度，避免触点“硬接触”等。

参考文献

[1] RIEDER W F, STROF T W. Relay life tests with contact resistance measurement after each operation[J]. IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, 1991, 14 (1): 109-112.

[2] 李华, 孙东旺, 贺鹏举, 等. 基于超程时间回归模型的继电器寿命预测方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(增刊 2): 414-418.
LI Hua, SUN Dongwang, HE Pengju, et al. The method of relay life prediction based on the regression model of super-path time[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(S2): 414-418.

[3] LI Zhigang. Reliability analysis and failure prediction

study of dynamic contact resistance on contact[C] // Chiago, USA, 2002: 61-65.

[4] 刘伯颖, 孙训俊, 李玲玲, 等. 灰色模型在触点电器电接触失效预测中的应用[J]. 电工技术学报, 2013, 28(增刊2): 418-423.
LIU Boying, SUN Xunjun, LI Lingling, et al. Grey model in the application of relay contact failure prediction[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(S2): 418-423.

[5] 王召斌, 翟国富, 黄晓毅. 电磁继电器贮存期接触电阻增长的动力学模型[J]. 电工技术学报, 2012, 27(5): 205-211.
WANG Zhaobin, ZHAI Guofu, HUANG Xiaoyi. Kinetic model of contact resistance increment of electromagnetic relay in storage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5): 205-211.

[6] 修春波, 刘新婷, 张欣. 等. 基于混沌特性分析的风速序列混合预测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(1): 14-20.
XIU Chunbo, LIU Xinting, ZHANG Xin, et al. Hybrid prediction method of wind speed based on chaotic characteristic[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(1): 14-20.

[7] 吕涛, 唐巍, 所丽. 基于混沌相空间重构理论的风电场短期风速预测[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 113-117.
LÜ Tao, TANG Wei, SUO Li. Prediction of short-term wind speed in wind farm based on chaotic phase space reconstruction theory[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(21): 113-117.

[8] 孟洋洋, 卢继平, 王坚, 等. 基于Volterra 自适应滤波器的风电功率混沌预测[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(4): 90-95.
MENG Yangyang, LU Jiping, WANG Jian, et al. Wind power chaos prediction based on Volterra adaptive filter[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(4): 90-95.

[9] 吴玉石. 继电器触点接触电阻检测系统的研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2012.
WU Yushi. The study on relay contact resistance detection system[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2012.

[10] TAKENS F. Determining strange attractors in turbulence[M]. Lecture Notes in Mathematics. Berlin: Springer, 1981: 361-381, 898.

[11] CAO Liangyue. Practical method for determining the minimum embedding dimesion of a scalar time series[J]. Physical D, 1997, 110(1-2): 43-50.

[12] 姜万录, 张淑清, 王益群. 混沌运动特征的数值试验分析[J]. 机械工程学报, 2000, 36(10): 13-17.
JIANG Wanlu, ZHANG Shuqing, WANG Yiqun. Numerical experimental analysis for chaotic motion characteristics[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2000, 36(10): 13-17.

[13] ROSENSTEIN M T, COLLINS J J, DELUCA C J. A practical method for calculating largest Lyapunov exponents from small data sets[J]. Physica D, 1993, 65(1): 117-134.

[14] LI Shanmei, XU Xiaohao, MENG Linghang. Flight conflict forecasting based on chaotic time series[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2012, 29(4): 388-394.

[15] 张步涵, 刘小华, 万建平. 基于混沌时间序列的负荷预测及其关键问题分析[J]. 电网技术, 2004, 28(13): 32-35.
ZHANG Buhan, LIU Xiaohua, WAN Jianping. Load forcasting based on chaotic time series and analysis of its key factors[J]. Power System Technology, 2004, 28(13): 32-35.

收稿日期：2014-09-03

作者简介：

马东娟(1987-)，女，博士研究生，主要研究方向为电器可靠性与测试技术；E-mail: tuzixiao125@sina.com

李玲玲(1968-)，女，通信作者，教授，博士生导师，主要研究方向为电器可靠性与测试技术。E-mail: xingguangcanlan125@126.com

（编辑 魏小丽）