

基于混沌的煤矿监测网络流量异变的预测

邵小强, 马宪民

(西安科技大学电气与控制工程学院 西安 710054)

【摘要】对煤矿监测网络流量异变预测可以提高网络的服务质量(QoS),降低网络拥塞的发生率。该文分析了煤矿监测网络中各信息流量的特点,提出了以SCADA类信息流作为混沌指标信号,采用Lyapunov指数法验证指标量的混沌特性,利用Duffing振子求解相变点的策动力幅值 a_d 并构建了预测模型。通过仿真预测和实测数据比较,误差在 $\pm 0.036\ 632$ 之间,验证了该预测方法准确可靠。

关键词 混沌; 煤矿; Duffing振子; 服务质量; 数据采集与监视控制

中图分类号 TP391

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2012.03.020

Prediction of Mine Monitoring Network Traffic Mutation Based on Chaos Theory

SHAO Xiao-qiang and MA Xian-min

(Xi'an University of Science and Technology, College of Electric and Control Engineering Xi'an 710054)

Abstract Prediction of the traffic mutation in network for mine monitoring can enhance quality of service (QoS) and reduce network congestion. In view of the characteristics of traffic in mine monitoring network, data acquisition (SCADA) information is selected as indicator of chaotic signal and Lyapunov exponent method is used to verify the chaotic characters of the indicator. Duffing oscillator is employed to calculate the amplitude of the critical threshold of the oscillator a_d and a predicting model is constructed. The error between simulation results and real data is between $\pm 0.036\ 632$, validating the accuracy and reliability of the predicting method.

Key words chaos; coal; Duffing oscillator; quality of service; SCADA

煤矿监测信息网络能否可靠实时传输是保障煤炭安全生产的重要因素之一。随着井下采煤巷道和工作面的增多,由此带来监测网络信息传输量加大,尤其将视频信号加入原有网络中其网络传输的QoS将有较大降低,于是可能造成其他监测信号量的实时报警迟滞,引发安全事故。因此,提高网络信息传输的QoS将很有意义。

提高网络服务的QoS目前有多种方法,如更换原有设备、提高带宽、增加信道数量等,但是这些做法均存在一些不足。如会增加资金投入、加大工程量;当网络负荷不重时却又造成较大浪费;并且对后续软硬件系统联调带来较大的麻烦。针对以上不足,本文提出在原有网络系统硬件不变的情况下,对所有监测信息进行优先级标示划分,并且对网络流量进行异变预测,进而及时保障优先级高的信息

信道畅通,提高监测网络信息传输的QoS^[1]。

混沌理论近年来多用于微小信号检测中,并获得了一些成果^[2-5]。因此,本文选取在监测网络信息流量异变时所出现的非异节点SCADA流作为指标信息,将混沌理论用于检测该指标信息流的大小^[6],根据指标信息流数据的变化趋势来实现煤炭监测信息网络流量异变的预测。

1 煤矿监测信息网络流量的特点及混沌特征分析

1.1 监测信息网络流量的特点

依照国家《煤矿安全监控系统通用技术要求》(AQ 6201-2006)^[7-8]的规范,影响网络流量异变的发生与多类信息流同时传输有关,如SCADA类数据流、MIS类信息流、video类信息流和voice类信息流

等。但每种信息流特点不尽相同,如SCADA类数据、煤矿SCADA类数据流主要有CH₄、CO、CO₂、风速、负压等监测数据,其流量一般较小(300~800 kb/s),但是可靠性和实时性的要求很高;MIS类数据流主要是定时向中心传输信息报表,该类数据的周期性较强;video类信息流和voice类信息流突发流量很大(峰值可达4~6 Mb/s),但实时性和可靠性要求相对不高^[9]。随着煤矿监测信息业务流量越来越全局化,监测网每个节点需要上传的信息量也越来越多,因此不可避免地存在着流量冲突的问题。尤其很多信息是以UDP类爆发式进行传递,这样会缺乏管理抢占带宽,影响数据量较少但重要的SCADA数据流的传输质量。

1.2 监测信息网络流量的混沌特性及指标信息流选择

网络流量是一个复杂的非线性过程^[10],混沌本身是一个非线性系统,并且网络流量的自相似性与混沌具有紧密的联系^[11],而混沌系统的一个特性就是对初始条件的敏感性,初始条件的微小变化都会引起系统的相轨迹按指数速率变化。因此在煤矿监测信息网络中,可以借鉴小变化特征对其重要监控对象进行分析和预测,通过计算网络流量Lyapunov指数,确定其网络特征存在混沌。

在煤矿监测信息中,当发生各类事故时首先引起SCADA数据的异变,即该类信息具有初始敏感性,进而对网络QoS要求更高且可靠有序。因此选用SCADA类数据更适合作为混沌指标信号对网络流量异变进行预测。

2 监测信息网络流量混沌状态界定的方法及范围

混沌理论要求确定检测信号的存在性,这时要求定义一个恰当的指标量来标示混沌检测系统状态的变化,指标量对检测小信号敏感度很高。本文选用小数据的SCADA类作为指标量采用Lyapunov指数法来判定其混沌特性的状态^[12]。

Lyapunov指数法用于度量在相空间中初始条件不同的两条相轨迹随时间按指数率吸引或分离的程度,这种轨迹收敛或发散的比率称为Lyapunov指数法。其对应的二维映射方程为:

$$\begin{cases} x_{n+1} = f_1(x_n, y_n) \\ y_{n+1} = f_2(x_n, y_n) \end{cases} \quad (1)$$

该系统的状态可以采用Lyapunov来进行表征。

其二维映射对应的Jacobi矩阵为:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_n} & \frac{\partial f_1}{\partial y_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_n} & \frac{\partial f_2}{\partial y_n} \end{bmatrix} \quad (2)$$

随着SCADA类信息流的连续采集,SCADA流信号呈现正弦规律,其模型可构造为:

$$x'' + \varepsilon \cdot kx' - x^3 + x^5 = \varepsilon \cdot \gamma \cos \omega t \quad (3)$$

式中, $x + \delta x$ 和 x 为不同的起始位置; δx 为偏差。带入方程式(3)可得到偏差方程为:

$$\delta x'' + k\delta x' - c(t)\delta x = 0 \quad (4)$$

式中, $c(t) = 3x^2 - 5x^4$ 。方程式(4)对应的状态方程为:

$$\begin{cases} \delta x' = \delta y \\ \delta y' = -k\delta y + c(t)\delta x \end{cases} \quad (5)$$

将状态方程变换为矢量微分方程的形式为:

$$X'(t) = H(t)X(t) \quad (6)$$

式中, $X(t) = \begin{bmatrix} \delta x \\ \delta y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta x \\ \delta x' \end{bmatrix}$; $H(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ c(t) & -k \end{bmatrix}$ 。

因为周期系数线性微分方程的理论,设 $D(t)$ 为式(6)的标准基本解矩阵,则 $D(t+T)$ 也为基本解矩阵,所以存在常数矩阵 C ,可得:

$$D(t+T) = D(t)C \quad (7)$$

当 $t=0$ 时, $D(0)=I$,所以式(7)写为:

$$D(t+T) = D(t)D(T) \quad (8)$$

又因为 $D(t)$ 是非奇异矩阵,所以存在一个用 $\ln D(T)$ 表示的矩阵,使得:

$$e^{\ln D(T)} = D(T)$$

所以式(6)的标准基本解矩阵可表示为:

$$D(t) = F(t)e^{T^{-1}t \ln D(T)} \quad (9)$$

式中, $F(t) = D(t)e^{-T^{-1}t \ln D(T)}$ 是非奇异矩阵。对式(6)做线性变换 $X = F(t)Z$, 使得式(6)变成一个不含时间变量 t 的自治系统, 即:

$$Z' = T^{-1} \ln D(T)Z \quad (10)$$

求出 $D(T)$ 的特征根 $\lambda_i (i=1,2)$, 由Lyapunov指数可表示为:

$$l_1 = \frac{1}{n} \ln |\lambda_1|, l_2 = \frac{1}{n} \ln |\lambda_2|$$

依据 l_1 和 l_2 的值, 这时可以分3种情况界定SCADA类指标量的混沌状态: 1) l_1 和 l_2 中只有一个0值, 说明该系统处于混沌临界状态; 2) l_1 和 l_2 均为负值, 说明该系统处于大尺度周期状态; 3) l_1 和 l_2 至少有一个正值, 说明该系统处于混沌状态。

3 混沌的网络流量异变预测仿真模型设计及实验验证

3.1 混沌的Duffing振子流量预测数学方程

煤炭监测网络在信息流量异变时会使SCADA类信息量发生较小的变化信号，属于微量分析的范畴，而混沌的Duffing模型的突出特点是在小信号检测方面有较强的优势^[13-14]，具有灵敏性好、实时性突出的特点。选用Duffing模型比较合适。

Duffing方程^[15]的一般形式为：

$$x''(t) + kx'(t) - x(t) + x^3(t) = a \cos \omega t \quad (11)$$

式中， a 为周期策动力幅值； k 为阻尼比； ω 为策动力角频率。如果 k 为定值时，该系统状态随着策动力的改变而有规律的变化。现将待监测SCADA信息流作为周期策动力的输入信号，变形后的Duffing方程可以实现对任意频率信号的检测，方程为：

$$\begin{cases} x' = \omega y \\ y' = \omega(-ky + x - x^3 + a_c \cos \omega t + a_x \cos \omega t) \end{cases} \quad (12)$$

式中， a_c 为策动力幅值； a_x 为待测信号幅值。

3.2 预测仿真模型构建及混沌状态相轨迹获取

煤矿安全运行和有序生产时，SCADA流量不会突发异变，监测信息流量变化也不影响煤矿监测数据的正常传递，所以SCADA信息流的异变只有当生产监测数据异常时才会引发。由前述可知，监测数据异常时最先敏感异变的是SCADA类信息流，依据式(12)构建的仿真模型如图1所示。图中，信号发生器产生系统的周期策动力信号；正弦波信号发生器产生含有周期信号与噪声的待测信号。首先调节混沌检测系统策动力的信号幅值，使其进入到混沌临界状态，若此时所对应的策动力幅值为 a_d ，可得临界相轨迹如图2所示。

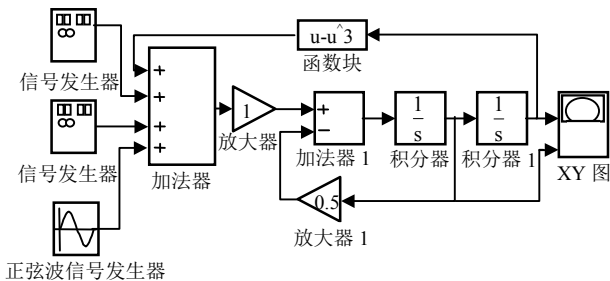


图1 基于混沌的Duffing仿真模型

由于混沌系统对起始条件非常灵敏，尤其对噪声信号具有较强的免疫力。这时输入待测信号，发现系统由混沌临界状态进入周期状态，即待测信号

中存在周期信号。可得相轨迹如图3所示。

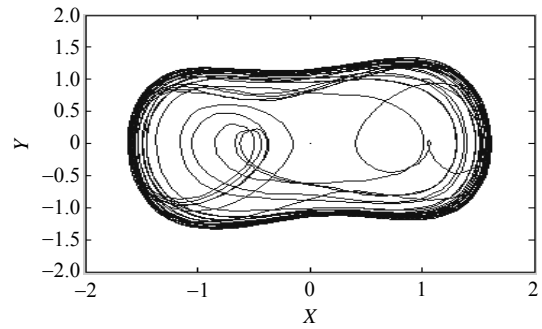


图2 混沌临界状态相轨迹

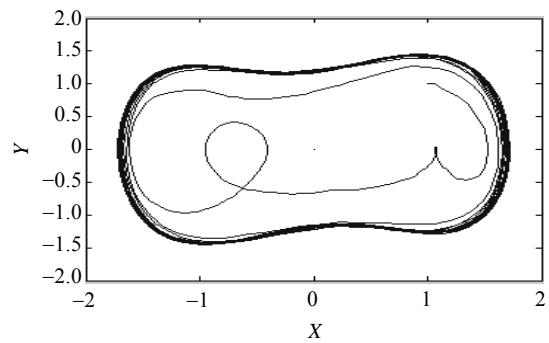


图3 混沌稳定周期状态相轨迹

3.3 SCADA信息流幅值检测和混沌阈值确定

由于Lyapunov指数是一种判定非线性系统行为的特征指数，常用最大Lyapunov指数判断系统是否处于混沌状态。Duffing振子的Lyapunov指数是指振子的最大Lyapunov指数随系统策动力幅值的变化关系。由于振子系统在相变点策动力幅值 a_d 的前后分别处于混沌状态和大尺度周期状态，因此其最大Lyapunov指数在 a_d 的前后将转变。利用该变化关系求取 a_d ，并进一步把它作为信号检测的阈值。

对Duffing方程式(11)应用Melnikov方法求解，可以得到混沌阈值的临界值为：

$$R(\omega) = \frac{a}{k} = \left| \frac{4 \cosh\left(\frac{\pi\omega}{2}\right)}{3\sqrt{2}\pi\omega} \right| \quad (13)$$

当 $\omega=1 \text{ rad/s}$ ， $k=0.5$ 时，策动力幅度值有下面的关系：1) $a > 0.3766$ ，系统进入混沌状态；2) $a = 0.3765$ ，相轨迹如图4所示。 $a = 0.5731$ 时的相轨迹如图5所示。

由此，检测混沌相轨迹的变化就可以判断和预测原系统监测网络流量的SCADA类信息网络流量是否有异变发生，这时就可以给出网络流量异变的隐患报警提示。

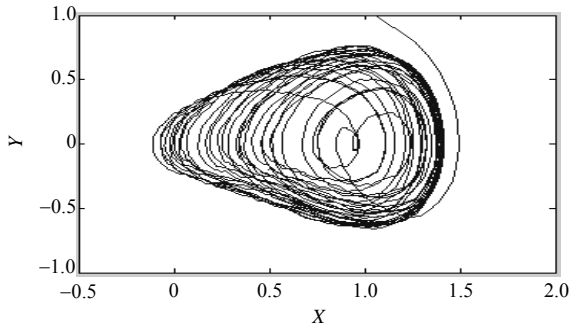


图4 $\alpha=0.3765$ 对应的相轨迹

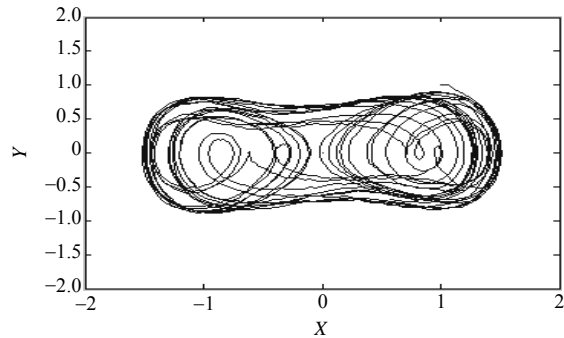


图5 $\alpha=0.5731$ 对应的相轨迹

3.4 仿真结果与实测数据比较

实验数据来自陕西黄陵建北矿中心交换室的中心交换机, 利用MRTG软件针对网关机的核心交换机CISCO3550及下挂的CISCO29系列交换机做24 h实时的流量监控, 且要求出现流量异变的数据为例, 采用基于混沌的Duffing振子检测煤矿SCADA类信息网络流量异变进行预测仿真并与实测值进行比较, 结果如图6所示。

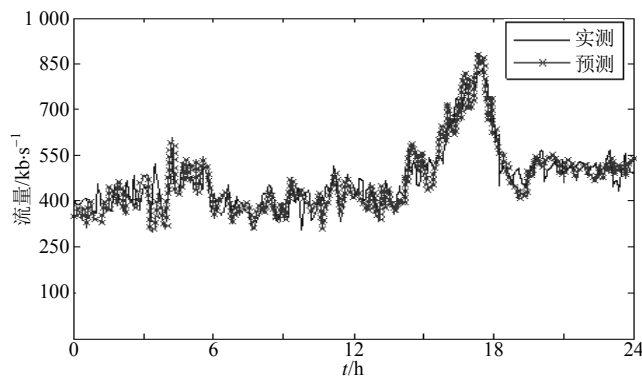


图6 预测值与实际值的比较图

选每3 h共8段的峰-峰值进行比较, 其误差数据统计如表1所示。

从图6和表1中数据的比照得出采用混沌Duffing振子模型的预测值与实测值吻合度较好, 峰-峰值的误差率控制在 $\pm 0.036 632$ 之内, 说明采用该模型可以较好地煤矿监测网络流量异变做出预测。

表1 PP值误差统计表

实测值	预测值	误差率
459.542	468.309	-0.019 077
585.362	593.451	-0.013 819
461.033	457.762	0.007 095
512.413	496.427	0.031 197
543.624	563.538	-0.036 632
844.175	868.326	-0.028 609
556.468	549.739	0.012 092
554.411	542.775	0.020 988

4 结论

本文利用混沌数学分析和仿真模型构建, 通过仿真实验和实测数据比较, 两者拟合度较好, 基于混沌的监测网络流量异变预测方法具有建模容易、预测结果精度高等优点。并且该系统对待测信号的灵敏性和对噪声信号的免疫性, 可以进一步提高信号检测的准确度, 具有较好的理论研究和实际应用价值。

参考文献

- [1] 张书彬, 谭献海. 基于满意优化原理的网络QoS路由研究[J]. 成都信息工程学院学报, 2006, 21(3): 317-322.
ZHANG Shu-bin, TAN Xian-hai. Research of network QoS routing based on satisfaction optimization[J]. Journal of Chengdu University of Information Technology, 2006, 21(3): 317-322.
- [2] 聂春燕. 混沌系统与弱信号检测[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.
NIE Chun-yan. Chaotic systems and weak signal detection[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009.
- [3] 聂春燕, 石要武. 基于互相关检测和混沌理论的弱信号检测方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2001, 22(1): 32-35.
NIE Chun-yan, SHI Yao-wu. The reaserch of weak signal detection based on cross-orrelation and chaos theory[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2001, 22(1): 32-35.
- [4] QI G, CHEN Z, DU S, et al. On a four-dimensional chaotic system[J]. Chaos Solitons and Fractals, 2005, 23(5): 1671-1682.
- [5] ZHANG Qun-jiao, LU Jun-an. Passive control and synchronization of hyperchaotic Chen system[J]. Chinese Physics B, 2008, 17(2): 492-497.
- [6] 毛凯. 基于混沌理论的CDMA扩频计算机仿真[J]. 计算机仿真, 2008, 25(3): 129-133.
MAO Kai. CDMA expanded-frequency computer simulation based on the theory of chaos[J]. Computer Simulation, 2008, 25(3): 129-133.
- [7] 孙继平. 煤矿安全监控系统联网技术研究[J]. 煤炭学报, 2009, 34(11): 1546-1549.

- SUN Ji-ping. Networking technology for safety supervision system in a coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(11): 1546-1549.
- [8] 国家安全生产监督管理总局. 煤矿安全生产监控系统软件通用技术要求, MT/T 1008-2006[S]. 北京: 煤炭工业出版社, 2006.
- Atate Administration of Word Safety. General technical requirements of software for productive safety supervision system in coal mine MT/T 1008-2006 [S]. Beijing: Coal Industry Press, 2006.
- [9] SHAO Xiao-qiang. Research of traffic control network based on genetic neural network in coal communication [C]//International Conference on Computer and Network Technology. Taiyuan, china: [s.n.], 2011: 255-258.
- [10] 李世银, 钱建生, 孙彦景, 等. 煤矿工业以太网网络模型研究及应用[J]. 华中科技大学学报, 2007, 35(z1): 56-57.
- LI Shi-yin, QIAN Jian-sheng, SUN Yan-jing, et al. Application and research on model of industrial ethernet in coalmine[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2007, 35(z1): 56-57.
- [11] 宣蕾, 卢锡城, 于瑞厚, 等. 网络威胁时序的自相似性分析[J]. 通信学报, 2008, 29(4): 45-50.
- XUAN Lei, LU Xi-cheng, YU Rui-hou, et al. Self-similarity analysis of network threat time series[J]. Journal on Communications, 2008, 29(4): 45-50.
- [12] WOLF A, SWIFT J B, SWINNCRY H L, et al. Determining Lyapunov exponents from a time series[J]. Physica D, 1985, 16: 285-317.
- [13] 尚秋峰, 尹成群, 李士林, 等. 基于Duffing振子的微弱正弦信号检测方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(2): 66-70.
- SHANG Qiu-feng, YIN Cheng-qun, LI Shi-lin, et al. Study on detection of weak sinusoidal signal by using Duffing oscillator[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2005, 25(2): 66-70.
- [14] 徐红兵, 吕炳朝, 陈光祜. 基于Duffing方程不确定性模型的混沌控制[J]. 系统工程与电子技术, 2000, 22(2): 15-16.
- XU Hong-bing, LÜ Bing-chao, CHEN Guang-jü. Chaos control of the duffing equation in the presence of uncertainty[J]. Systems Engineering and Electronics, 2000, 22(2): 15-16.
- [15] MA Xian-min, ZHANG Bing-tao. Weak signal detecting of gas concentration base on Duffing chaotic oscillator[C]// Computer Application and System Modeling (ICASM). [S.l.]: IEEE, 2010: V1-183-V1-186.

编辑 漆蓉