

# 基于多传感器数据融合的供热管网泄漏检测技术

姜春雷<sup>1</sup>, 郭远博<sup>2</sup>, 付兴涛<sup>3</sup>, 王天昊<sup>4</sup>

( 1. 东北石油大学 电气信息工程学院, 黑龙江 大庆 163318; 2. 南京大学 工程管理学院, 江苏 南京 210093; 3. 大庆钻探工程公司, 黑龙江 大庆 163453; 4. 天津工业大学 电气工程与自动化学院, 天津 300160 )

**摘 要:** 传统的管网泄漏检测系统智能化程度较低, 使用单一传感器信号, 容易引起泄漏误报和漏报. 采用多传感器 (包括负压波、流量等) 获得供热管网多信号参数, 提出基于证据理论的多传感器数据融合算法, 综合考虑多泄漏检测信息, 将管网泄漏检测多信号进行数据融合, 得出管网泄漏判断, 建立基于多传感器数据融合的供热管网泄漏检测软硬件系统. 结果表明: 基于多传感器信息融合的供热管网泄漏检测系统有利于提高泄漏故障检测的有效性、可信度和泄漏检出率, 并能降低管网漏报和误报率.

**关 键 词:** 管网泄漏检测; 多传感器; 数据融合; 证据理论

中图分类号: TP29 文献标识码: A 文章编号: 1000-1891(2011)03-0091-04

## 0 引言

管道输送具有安全、方便、快捷、易于管理等特点而被广泛应用, 随着管道的老化和人为的破坏, 管道泄漏经常发生, 因此管道泄漏检测一直是研究的热点问题. 目前泄漏检测方法主要有电缆泄漏检测法、光纤泄漏检测法、负压波法、声发射法、实时模型法、统计决策法等<sup>[1-5]</sup>, 其中光纤泄漏检测法的优点是检测漏点实时、准确, 缺点是容易被施工破坏, 并且投资较大. 负压波法的优点是设备投资小, 施工、维护方便, 缺点是检测精度差, 对于微小泄漏不适用. 此外, 这些方法多适用于单条管道, 管道网络的泄漏检测技术更加复杂. 由于管网的结构和参数之间关系复杂, 管网的运行状态、工况很难用数学模型精确描述, 因此管网泄漏检测是一种特殊类型信号的检测, 检测系统应根据环境变化的不同, 自动调整运行参数以适应不同的环境.

传统的管道泄漏检测系统智能化程度较低, 且单一传感器信号易引起误报和漏报. 因此, 研究基于多传感器数据融合的管网泄漏检测技术, 即采用多传感器获得管网泄漏的多种信号参数, 如负压波、流量等, 通过对信号参数综合处理判断管网泄漏情况, 由多种信号经数据融合得到泄漏判决结果<sup>[6-8]</sup>.

供热管网的泄漏检测不同于输油、输气、供水等, 因为其换热站点面广, 网络结构复杂, 一处泄漏可能影响其他的换热站采集信号状态. 在供热管网泄漏检测系统中, 多传感器采集的管网泄漏信号经过提取泄漏敏感特征参数后, 还需要综合分析这些异类 (不同类型的信号) 泄漏特征参数. 由于管网泄漏检测的复杂性、多变性, 若通过严密的逻辑推理和精确计算诊断, 则需要综合考虑各种可能因素进行复杂的数学建模, 实现难度较大<sup>[9-10]</sup>. 笔者采用软件与硬件结合的多传感器数据融合供热管网泄漏识别方法, 即先由传感器级进行泄漏判决, 然后再把判决采集上传到数据处理中心进行泄漏特征级的数据融合<sup>[11-14]</sup>.

## 1 系统硬件设计

供热管网结构示意图见图 1, 其中: 实心方点表示热源, 实心圆点表示换热站, 空心圆点表示热网补偿器. 补偿器是为消除因热膨胀伸长给管网产生热应力的影响而设置的能抵消其热应力的设备, 通常安装在检查井内. 设热网内共有  $p$  个换热站、 $q$  个补偿器, 热力站装有温度 (泄漏定位补偿)、负压波、流量变送器,

收稿日期: 2011-03-15; 审稿人: 任伟建; 编辑: 任志平

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61004067); 黑龙江省教育厅科学技术重点项目 (12511z002)

作者简介: 姜春雷 (1977—), 男, 博士生, 讲师, 主要从事智能测试及故障诊断技术方面的研究.

还有 GPS 校时器, 保证在同一时刻采集数据. 补偿器安装具有 GPRS 模块的温度、液位传感器, 能够把采集的数据实时传输到数据处理中心.

1.1 补偿器数据采集模块

补偿器数据采集模块由参数采集单元、供电单元、微控制器、通信单元等部分组成 (见图 2). 补偿器数据采集模块工作环境由锂电池供电, 采用超低功耗设计, 采集单元由传感器、比较器、数字电位器、A/D 等部分构成. 比较器是为降低功耗而设计的, 与数字电位器协同工作. 该模块分为泄漏监测和防盗监测部分.

(1) 泄漏监测部分由 1 个液位计与 4 个温度传感器构成, 对检查井井内水位、补偿器管壁温度 (包括供水和回水) 和井内温度进行实时监测. 液位计安

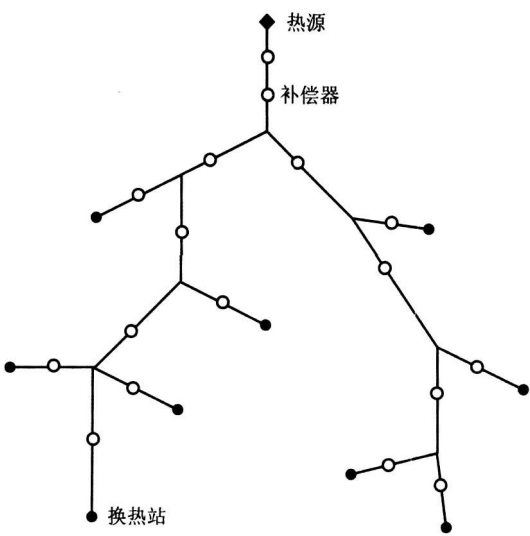


图 1 供热管网结构示意图

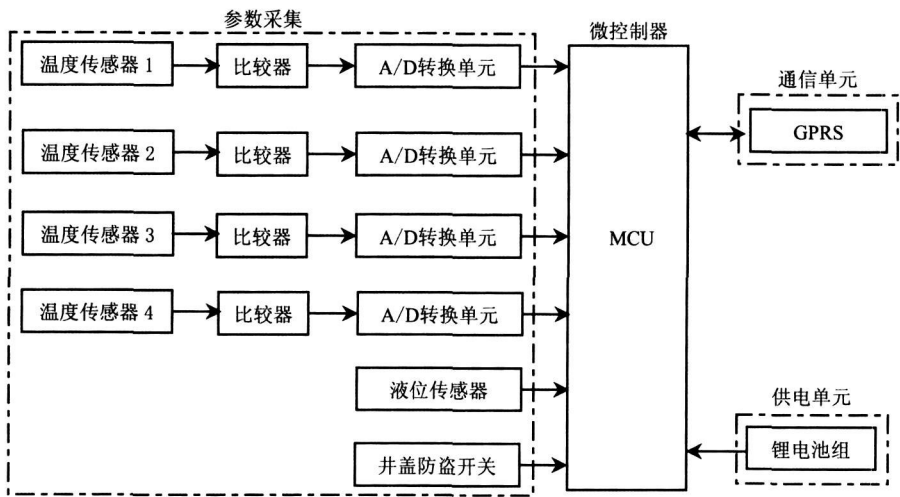


图 2 补偿器数据采集模块

装在检查井底部, 当补偿器泄漏时, 井底积水引起液位计报警; 4 个温度传感器分别安在补偿器管壁 (供、回水各 1 个) 和井内 (2 个). 补偿器管壁上的 2 个温度传感器用于监测供、回水温度, 比较供、回水温度与数据处理中心传过来的供、回水温度, 如果温度差 (供、回水分开比较) 小于规定的温度差, 认为补偿器泄漏; 井内的 2 个温度传感器用于监测检查井内温度, 比较井内温度与管壁温度, 如果温度差小于规定的温度差, 也认为补偿器泄漏.

(2) 防盗部分主要监测井盖的开启情况, 当井盖被打开时, 通过 GPRS 向数据处理中心发送报警信号. GPRS 通信模块用于和数据处理中心进行数据通信, 发送报警信息和接收数据处理中心发来的管内温度. 微控制器用于控制数据采集和数据处理. 当系统工作时, 数字电位器的电压对应补偿器非泄漏的电信号电压, 平时微控制器 MCU 处于空闲状态、GPRS 模块处于休眠状态, 只有传感器和比较器工作, 传感器采集的电信号到达比较器, 与数字电位器的电压进行比较, 如果小于数字电位器的电压, 认为无泄漏发生, 不用触发 MCU; 如果大于数字电位器的电压, 认为可能有泄漏问题, 比较器触发 MCU 进行数据采集分析, 如果判断补偿器泄漏, MCU 唤醒 GPRS 无线模块, 把报警数据发送给数据处理中心, 进行泄漏报警.

1.2 热力站数据采集模块

热力站数据采集模块由参数采集单元、智能数据处理单元、数据存储单元、GPS 校时器、通信单元等部分组成 (见图 3). 各热力站数据采集模块的系统内部时间由 GPS 校时器提供时间基准, 用以确保泄漏

检测的定位精度. 参数采集单元用于采集热力站的温度、压力、流量等数据, 由传感器、A/D 等部分构成. 为了降低数据传输数量, 智能数据处理单元将采集的压力、流量、温度、采集时间等存储在数据存储单元, 同时对压力、流量以毫秒为周期进行比较, 当压降、流量降超过既定的经验阈值时(压力取为 0.01 MPa, 流量取为 0.005 m<sup>3</sup>), 判断可能有泄漏发生, 这时智能数据处理单元从数据存储单元取出带有时间戳的前 10 s 的采集数据通过 GPRS 传给数据处理中心. 数据处理中心通过多传感器数据融合技术判断泄漏是否发生.

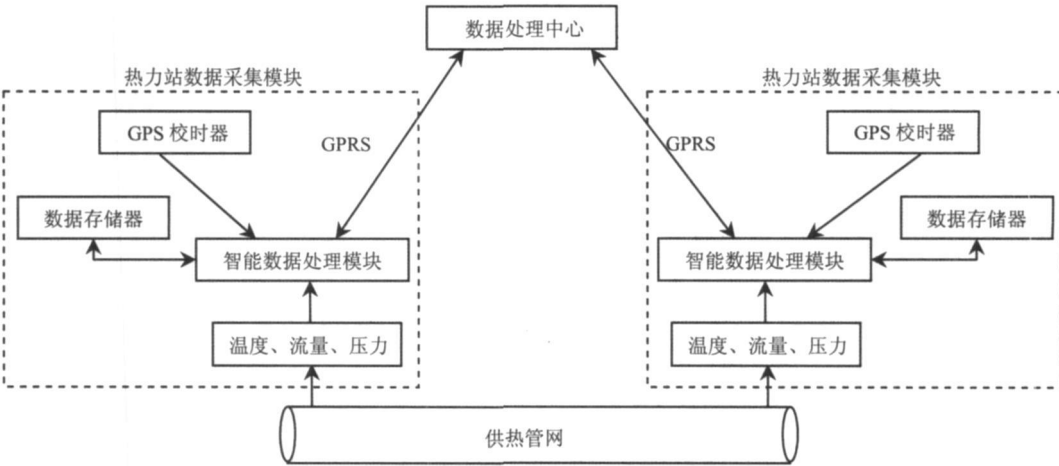


图 3 热力站数据采集模块

2 数据融合算法

设供热管网的泄漏检测状态为 0 或 1(0 表示“泄漏”, 1 表示“非泄漏”). 每个泄漏检测状态由  $n(n=2)$  个泄漏报警值表示, 包括热力站的负压波、流量报警信号(温度参数在泄漏点定位时用于负压波传输补偿), 由  $n$  个泄漏报警值构成管网泄漏检测的报警值<sup>[15]</sup> 为

$$\eta_1 = \{0, 1\},$$
$$\eta_2 = \{1, 2\},$$

其中  $\eta_1$  为泄漏检测目标对应的 2 个泄漏类别的集合;  $\eta_2$  为对应泄漏检测模式  $n$  个报警值类别构成的集合.

只对热力站的泄漏目标进行数据融合, 如果补偿器检测到泄漏, 则直接进行热网泄漏报警. 设  $i \in \eta_1$ ,  $j \in \eta_2$ , 第  $i$  类管网泄漏在第  $j$  泄漏报警值有  $p$  个取值, 则第  $i$  类管网泄漏共有  $np$  个泄漏报警值, 管网泄漏检测的 2 个泄漏类共有  $2np$  个泄漏报警值.

设在某一个时刻, 管网泄漏检测系统中多种传感器可采集  $p$  个目标, 构成泄漏集合:

$$A = \{A_1, A_2, \dots, A_p\},$$

其中  $A_l(1 \leq l \leq p)$  为构成该类泄漏检测目标的报警值. 把  $A_l = \{A_l(j) | j \in \eta_2\}$  作为管网泄漏检测的分析序列, 选取模型库已知序列  $A_o$  作为比较序列:

$$A_o = \{A_o(j) | j \in \eta_2\}, o = 1, 2, \dots, m,$$

其中  $m$  为模型库中含有泄漏模型的数量. 根据近 3 a 供热管网泄漏压力和流量的历史数据分析结果, 建立模型库.

根据灰关联公式,  $A_o$  与  $A_l$  的关联系数  $\xi_l(j)$  为

$$\xi_l(j) = \frac{\min_i \min_j |A_o(j) - A_l(j)| + \rho \max_i \max_j |A_o(j) - A_l(j)|}{|A_o(j) - A_l(j)| + \rho \max_i \max_j |A_o(j) - A_l(j)|}, \tag{1}$$

式中:  $\rho$  是分辨系数, 取经验值, 即  $\rho=0.4$ , 则  $A_l(j)$  与  $A_o(j)$  的关联系数为  $\xi_l = \{\xi_l(j), j \in \eta_2\}$ .

$A_o$  与  $A_l$  的关联度  $\beta(A_o, A_l)$  为

$$\beta(A_o, A_l) = \sum_{j=1}^n \xi_i(j) \chi(j),$$

(2)

这里  $\chi(j)=0.5$ , 表示相应泄漏目标的加权系数.

为解决泄漏信号的不确定性和冗余性, 采用证据理论对泄漏信任度重新分配, 由式(2)可以得到  $t$  个泄漏样本的关联度集合:

$$G(s) = \{\beta_i(A_o(s), A_l) \mid i \in (1, 2, \cdots, p)\},$$

(3)

式中:  $s=1, 2, \cdots, t$ .

在 Bayes 信任结构下, 可以得出管网泄漏的判决条件为

$$F = \frac{\sum_{s=1}^t G(s)}{\sum_{s=1}^t G(s)} \geq 0.6.$$

(4)

3 现场应用

将文中提出的供热管网泄漏检测技术应用于某热电厂的供热系统, 该系统有热源 1 个、热力站 38 座、补偿器泄漏检查井 121 个, 供热管网全长为 89 km. 每个热力站均装有数据采集模块, 用于采集流量、负压波、温度等信号. 每个补偿器泄漏检查井装有补偿器泄漏检测系统, 采用锂电池供电. 每个热力站与数据处理中心采用 GPRS 通信, 由数据处理中心通过 GPS 统一对各热力站校时. 数据处理中心软件采用 C #编写, 数据库为 SQL SERVER2005. 应用时间为 2 个采暖期(每个采暖期 6 个月).

(1)补偿器检查井泄漏检测系统能够监测全部泄漏情况并及时上传数据处理中心, 供电锂电池能够持续供电 1 个采暖期, 每个月 GPRS 流量小于 30 Mb.

(2)热力站数据采集模块能够监测流量、负压波等参数的微小变化, 并及时上传数据处理中心.

(3)为验证多传感器数据融合算法在泄漏检测中的应用效果, 选择 3 种泄漏量 ( $\tau > 10\%$ 、 $5\% < \tau < 10\%$ 、 $\tau < 5\%$ )进行对比,  $\tau$  表示供热管道泄漏瞬时流量与管道瞬时流量之比.

不同融合次数泄漏检测结果(取融合次数分别为  $t=2$ 、 $t=4$ 、 $t=6$ )见表 1. 多传感器与单一传感器在供热管网泄漏检测中的应用效果见表 2. 这里取负压波数据, 并应用小波分析泄漏检测方法.

表 1 不同融合次数泄漏检出率

融合次数	$\tau > 10\%$	$5\% < \tau < 10\%$	$\tau < 5\%$
$t=2$	91.67%	89.58%	86.24%
$t=4$	92.34%	91.87%	88.35%
$t=6$	94.22%	93.56%	89.83%

表 2 小波分析与数据融合泄漏检测结果

检测方法	$\tau > 10\%$	$5\% < \tau < 10\%$	$\tau < 5\%$
小波分析	93.66%	86.34%	56.32%
数据融合	94.22%	93.56%	89.83%

4 结论

(1)研究多传感器数据融合的供热管网泄漏检测技术, 包括硬件数据采集、泄漏监测系统和软件数据融合系统, 现场应用结果验证硬件设计的合理性和算法的有效性.

(2)基于证据理论的数据融合方法对供热管网的泄漏检测有较好的适用性, 当供热管网出现微小泄漏时, 其泄漏检出率要比单一传感器负压波方法效果要好.

(3)随着融合次数的增加, 虽然供热管网泄漏的识别正确率增加, 但计算复杂度也同时增加, 系统实时性下降, 这是今后要研究的内容.

参考文献:

[1] 袁朝庆, 庞鑫峰, 刘燕. 管道泄漏检测技术现状及展望[J]. 大庆石油学院学报, 2006, 30(2): 76—78.

[2] 戴光, 杨海英, 于永亮. 基于有限元分析的管道漏磁检测信号识别技术[J]. 大庆石油学院学报, 2010, 34(5): 123—127.

[3] 王忠东, 王宝辉, 闫铁, 等. 一种分布光纤式石油管道防盗监测系统[J]. 大庆石油学院学报, 2008, 32(4): 70—84.

[4] 焦敬品, 李涌, 何存富, 等. 压力管道泄漏的声发射检测研究[J]. 北京工业大学学报, 2003, 29(2): 144—146. (下转第 108 页)

- [5] Moon S J, Kevrekidis I G, Sundaresan S. Particle simulation of vibrated gas-fluidized beds of cohesive fine powders[J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 2006, 45(21): 6966—6977.
- [6] 何成铨, 陈树春, 张朝军, 等. 细粉催化剂在流化床中的密度分布(一)[J]. 大庆石油学院学报, 1989, 13(2): 60—67.
- [7] 何成铨, 相养冬. 细粉催化剂在流化床中的密度分布(二)[J]. 大庆石油学院学报, 1989, 13(3): 74—79.
- [8] Gidaspo D. Hydrodynamics of fluidization and heat transfer: supercomputer modeling[J]. Appl. Mech. Rev. 1986, 39(1): 1—23.
- [9] 杨太阳, 王安仁, 张锁江, 等. 气固鼓泡流化床的流动特性数值模拟[J]. 计算机与应用化学, 2005, 22(3): 206—210.
- [10] 肖海涛, 祁海鹰, 由长福, 等. 一个气固两相流动阻力新模型[J]. 化工学报, 2003, 54(3): 311—315.
- [11] Luben C G, Milioli F E. Numerical study on the influence of various physical parameters over the gas-solid two-phase flow in the 2D riser of a circulating fluidized bed[J]. Powder Technology, 2003, 132: 216—225.
- [12] 董淑芹. 气固流化床流动特性的实验研究与数值模拟[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2009.
- [13] 苏光伟. 欧拉—欧拉法脉动流化床运动行为模拟[D]. 天津: 天津科技大学, 2009.
- [14] 李东耀. 基于 FLUENT 软件的流化床的气固两相流模型研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2009.
- [15] 金涌, 祝京旭, 汪展文, 等. 流态化工程原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.

(上接第94页)

- [5] 陈仁文. 小波变换在输油管道漏油实时监测中的应用[J]. 仪器仪表学报, 2005, 26(3): 242—245.
- [6] 郑贤斌, 陈国明, 朱红卫. 油气长输管线泄漏检测与监测定位技术研究进展[J]. 石油天然气学报, 2006, 3(28): 152—155.
- [7] 王延年, 赵玉龙, 朱笠, 等. 分布式光纤传感器在管道泄漏监测中的应用[J]. 郑州大学学报: 理学版, 2006, 35(2): 36—37.
- [8] 周琰, 靳世久, 张昀超, 等. 分布式光纤管道泄漏检测和定位技术[J]. 石油学报, 2006, 27(2): 121—124.
- [9] 王立坤, 周琰, 金翠云. 输油管道新型泄漏监测及定位系统的研制[J]. 计算机测量与控制, 2002, 10(3): 152—155.
- [10] 税爱社, 周绍骑, 李林生, 等. 输油管线泄漏诊断的 SCADA 系统实现[J]. 仪器仪表学报, 2001, 22(4): 31—32.
- [11] 赵红, 杭得军, 李港. 基于光纤传感和小波变换的管道泄漏定位技术[J]. 传感器与微系统, 2009, 28(9): 47—49.
- [12] 张宇, 陈世得, 李健, 等. 基于动态压力变送器的输油管道泄漏检测与定位系统[J]. 传感器技术学报, 2009, 22(9): 1347—1351.
- [13] 权大庆. 气密封性试验中的泄漏测试方法研究[J]. 液压气动与密封, 2005(6): 25—28.
- [14] 孔德明, 王友仁. 供水管网泄漏定位研究与检测系统开发[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(2): 421—424.
- [15] 何友, 王国宏, 关欣, 等. 信息融合理论及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010: 336—338.

has taken effect in some wells and presents in accordance with production performance by overall research in CO<sub>2</sub> flooding pilot.

**Key words:** CO<sub>2</sub> flooding; well testing; testing data analysis; exploitation parameter; application effect

**Leak detection of heating pipeline based on multi-sensor data fusion**/2011, 35(3):91—94

JIANG Chun-lei<sup>1</sup>, GUO Yuan-bo<sup>2</sup>, FU Xing-tao<sup>3</sup>, WANG Tian-hao<sup>4</sup>

(1. School of Electrical Engineering & Information, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163318, China; 2. School of Management and Engineering, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093, China; 3. Daqing Drilling Company, Daqing, Heilongjiang 163453, China; 4. Tianjin Polytechnic University School of Electrical Engineering and Automation, Tianjin 300160, China )

**Abstract:** The traditional pipeline leak detection system is less intelligent, with a single sensor signal, easily leading to false positive and false negative leakage. In this paper, multi-sensor (including the negative pressure wave, flow ) to obtain multi-signal parameters of the network, based on evidence theory, puts forward multi-sensor data fusion algorithm, takes into account the leak detection and more information obtain pipe network leak detection data fusion signals. Pipe network leak judgment, the establishment of multi-sensor data, fusion-based pipeline leak detection hardware and software systems are realized. The results showed that multi-sensor information fusion based pipeline leak detection system will help improve the effectiveness of leakage fault detection, reliability and leakage detection rate and reduce false negative and false positive rate of the network.

**Key words:** pipe network leak detection; multi-sensor; data fusion; evidence theory

**Two-dimensional test data compression based on TRC-reseeding and golomb encoding**/2011, 35(3):95—98

GAO Zi-jun<sup>1</sup>, XU Jing<sup>2</sup>

( 1. Rongcheng College, Harbin University of Science and Technology, Rongcheng, Shandong 264300, China; 2. Oil Field Thermal Power Plant, Daqing Electric Power Group, Daqing, Heilongjiang 163314, China )

**Abstract:** In order to reduce the storage requirements for the test patterns of deterministic built-in self-test (DBIST), a two-dimensional test data compression DBIST scheme based on twisted-ring counter (TRC) and Golomb encoding is proposed. Firstly, the test set embedding technique based on TRC is utilized to achieve the vertical test data compression, which reduces the number of deterministic test patterns. Secondly, the Golomb encoding is used to implement the horizontal compression of TRC seed set, which achieves the reduction of the number of bits of deterministic test patterns. Experimental results for the ISCAS89 benchmark circuits show that the proposed scheme requires 30% less test storage compared with the previous schemes, and that the test control logic of the proposed scheme is simple for all circuits under test, and can be shared among many circuits under test.

**Key words:** built-in self-test (BIST); test data compression; Golomb encoding; twisted-ring counter (TRC)

**Chaos controlling in Newton-Leipnik system**/2011, 35(3):99—103

LI Xian-li, QIN Xian-rong, WANG Sheng, ZHANG Xiu-long, YAN Xiao-bo

( Electronic Science College, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163318, China )

**Abstract:** The dynamics properties of the nonlinear Newton-Leipnik system is analyzed. There are five