

文章编号: 1001-0920(2004)04-0377-06

## 管道泄漏计算机在线检测系统及其算法实现

冯 健, 张化光

(东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110004)

**摘 要:** 设计了管道泄漏计算机在线检测系统的总体结构, 提出了一种基于工况分析的逻辑判决故障检测算法。当输油管道工作状况不断发生改变时, 这种方法能够动态估计管道运行数据的正常值范围, 很好地解决输油管道泄漏的故障检测问题。结合 GPS 技术和负压波定位算法, 大大提高了报警准确性和定位精度。现场测试结果和实际工业应用证明了该方法的有效性。

**关键词:** 泄漏; 故障检测; 在线检测; 工况分析

**中图分类号:** TP277

**文献标识码:** A

## On-line computer detecting system of pipeline leak and its algorithm

FEN G Jian, ZHANG Hua-guang

(School of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China  
Correspondent: FEN G Jian, E-mail: fjneu@163.com)

**Abstract:** The architecture of the on-line computer detecting system of pipeline leak is designed, and a kind of logical judge fault detection algorithm based on working status analysis is proposed. Under the condition that working status frequently changes during transferring oil, the fault detection of oil pipeline leak can be improved commendably by employing this method, which can estimate the natural range of pipeline running data. The alert veracity and location precision can be consumedly improved by combining GPS technology and negative pressure wave location algorithm. The locale testing results and practical industrial application show validity of this method.

**Key words:** leak; fault detection; on-line detection; working status analysis

### 1 引 言

流体介质(如石油)在管道中传输时, 呈现出不同的参数特性, 在传输工况(包括起始端传输压力、温度、流量)和管道状况维持不变的情况下, 管道首末端的参数(压力、温度、流量)应维持在一定范围内波动; 如果管道状况发生变化(主要由于泄漏造成), 将打破这一平衡状态。根据此原理, 管道泄漏计算机在线检测系统在输送流体介质的管道首末两端, 采集管道中流体的检测信号; 然后根据信号的波动变

化情况进行管道泄漏的在线检测乃至对泄漏点的定位。

目前, 国际上已有的针对石油管道检测和定位方法大体上分为管内检测法、管外硬件检测法和管外软件检测法<sup>[1~4]</sup>。管内检测法只能间断运行, 实时性差; 管外硬件检测法造价昂贵, 不适于已建的管道, 很少使用; 管外软件检测法能连续运行, 实时性强。随着计算机技术及现代控制与检测理论的发展, 基于软件的方法已成为研究的主流方向。

收稿日期: 2003-05-28; 修回日期: 2003-06-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60274017); 沈阳市自然科学基金资助项目(1022033-1-07)

作者简介: 冯健(1971—), 男, 辽宁凌海人, 讲师, 博士生, 从事故障诊断及模糊控制的研究; 张化光(1959—), 男, 吉林省吉林市人, 教授, 博士生导师, 从事模糊控制与智能控制理论的研究。

在管道传输过程中,除管道状况发生变化外,传输工况的变化(如启停泵、调节流量阀,以及改变输油温度等)也将破坏管道首末端参数的平衡状态。如何正确区分检测信号的不正常波动的原因,降低故障检测的误判率,是在线检测系统实用性的关键。

本文介绍了管道泄漏计算机在线检测系统的实施方案,并提出了一种基于工况分析的逻辑判决故障检测算法。该算法比文献[5,6]中的算法运算效率高,实时性强;该系统与文献[7]中系统相比,更好地解决了分布系统的采样同步和数据安全传输问题,并且报警时间短、定位精度高,具有自主知识产权。经现场工业运行证明,在石油传输管道不同运行工况下,该系统能够正确区分管道运行参数变化的原因,大大降低了管道泄漏报警的误报率。

## 2 系统结构与功能

石油传输管道及其配套检测装置如图1所示。在管道首末两端分别安装固定位置的压力、流量、温度传感器。如图2所示,下位计算机通过采样装置,

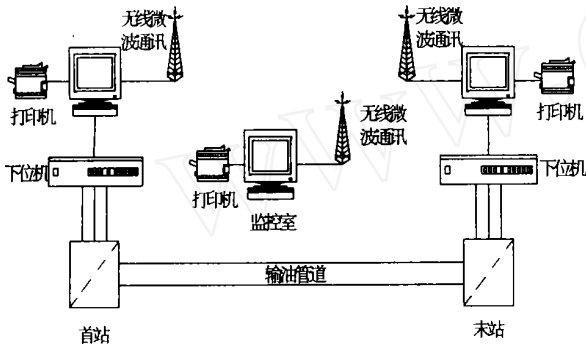


图1 计算机在线检测系统简图

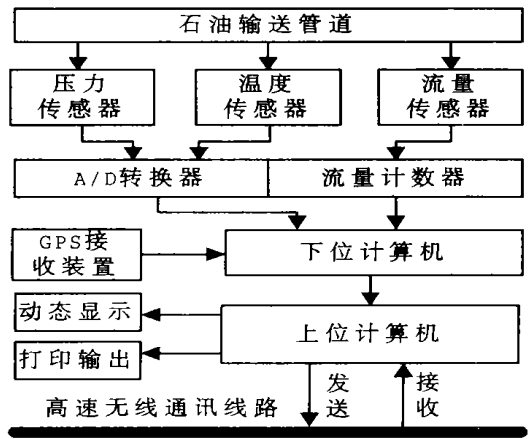


图2 系统设备模型

在线采集每一时刻管道内通过流体的检测信号,并将处理后的实时检测数据通过交叉网线传送到本站的上位计算机中,供系统实时分析。同时,上位计算机利用本站数据与对方站上位机传过来的数据一同进行工况分析,根据逻辑判决结果与基于统计的判域比较,确定是否发生管道泄漏。为保证不同物理地点采样的时间同步性,首末两站下位机各安装一套GPS接收装置,负责对采样时钟校时。

管道泄漏计算机在线检测系统软件采用模块化结构,如图3所示。主要功能可归纳如下:

- 1) 在线检测管道泄漏并准确定位,定位相对误差小于管道全长的1.5%;
- 2) 实现管道首末端数据的实时互传;
- 3) 利用数据库中的历史数据进行模拟运行;
- 4) 在60s内检测50km长管道发生的泄漏;
- 5) 依据管道运行工况的变化自动调整检测参

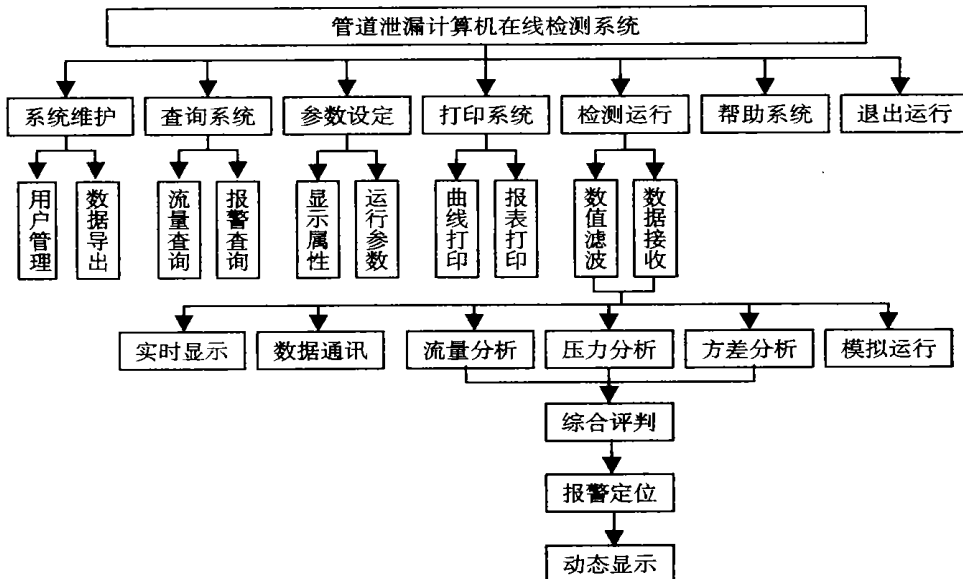


图3 系统功能结构图

数:

- 6) 通过查询系统浏览数据库中的历史运行记录;
- 7) 自动生成流量盘库和报警数据记录;
- 8) 有良好的用户界面和图形显示功能, 操作简便;
- 9) 自动打印生产报表和报警分析曲线;
- 10) 嵌入地理信息系统(GIS), 报警时可以自动弹出输油管线地理走向图, 闪烁显示故障点位置;
- 11) 系统安全保护机制完备, 可以设置不同用户的操作权限

管道泄漏计算机在线检测系统还采用了一些新的技术和算法, 例如一种基于小波变换的故障检测方法<sup>[8]</sup>, 分布式采样系统时间同步技术<sup>[9]</sup>. 限于篇幅, 本文仅研究和探讨在线检测和定位算法

### 3 检测与定位算法

#### 3.1 检测算法

计算机在线检测系统首次采用了基于工况分析的逻辑判决故障检测算法, 只要确保系统在正常运行工况下启动, 就可以对输油管道进行连续的在线检测. 检测算法的基本原理如下:

系统启动后, 将最先检测到的数据  $(p_{hi}, p_{ii}, f_{hi}, f_{ii}, T_{hi}, T_{ii})$  输入到最大长度为  $m$  的标准样本库中, 式中  $p, f, T$  为压力、流量和温度, 下标  $h, t$  代表首站和末站,  $i = 1, 2, \dots, m$ , 输差定义为首末站标体流量差, 即

$$\Delta f_i = K(T_{hi})f_{hi} - K(T_{ii})f_{ii} \quad (1)$$

其中:  $K(T)$  为不同温度下的非标准体积流量转换为 20 标准体积流量的函数

假定以上物理量服从正态分布, 则每一物理量的分布概率密度函数为

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_x}} \exp\left(-\frac{(x - \mu_x)^2}{2\sigma_x^2}\right) \quad (2)$$

式中:  $x$  可以是  $p_{hi}, p_{ii}, f_{hi}, f_{ii}, \Delta f_i$ ;  $\mu_x$  为  $x$  的均值;  $\sigma_x$  为  $x$  的均方差

将第一次保存到标准样本库中的  $m$  个检测数据作为统计样本, 计算初始概率统计参数

$$\mu_{x0} = E(x)_0, \quad (3)$$

$$\sigma_{x0} = D(x)_0 = \sqrt{E(x^2)_0 - E(x)_0^2}, \quad (4)$$

$$E(x^2)_0 = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_i^2 \quad (5)$$

给定各物理量的分布概率, 即要保证误判率小于 1%. 计算出以样本统计均值为中心的各物理量检测值初始分布区域, 并以下一时刻检测信号落入该区域的概率来判别管道是否发生异常变化. 为避免因工况变化(调阀门, 起停泵)引起的压力、流量均值和方差的变化, 需要在线修正各物理量统计参数. 如果下一时刻检测到的数据, 满足输差在 0 附近某一定值窄幅波动的条件, 则将该数据保存到标准样本库, 并使用该数据修正各物理量的概率统计参数; 否则不保存也不修正. 假设利用第  $n$  个检测值修正后的参数为  $\mu_{xn} = E(x)_n, E(x^2)_n$ , 则利用第  $n+1$  个检测值修正后的统计参数为

$$E(x)_{n+1} = \alpha_{n+1}E(x)_n + \beta_{n+1} \cdot x_{n+1}, \quad (6)$$

$$E(x^2)_{n+1} = \alpha_{n+1}E(x^2)_n + \beta_{n+1} \cdot x_{n+1}^2, \quad (7)$$

$$\sigma_{n+1} = D(x)_{n+1} = \sqrt{E(x^2)_{n+1} - E(x)_{n+1}^2} \quad (8)$$

其中:  $\alpha_{n+1}, \beta_{n+1}$  为加权系数, 且  $\alpha_{n+1} + \beta_{n+1} = 1$ .

同理, 可计算出任意满足参数修正条件时刻的最新统计参数. 随着修正次数的增加, 利用以前数据得到的参数加权系数会越来越小, 因而可实现动态更新功能. 依据现场工况变化的频繁程度, 可以调整  $\alpha, \beta$  的权值来实现更新参数的快慢. 依据最新修正后的各物理量概率统计参数, 计算出一个以新的统计均值为中心的判域, 结合不同工况下各检测信号变化的特征(见表 1), 可以准确判断管道是否发生泄漏.

在设定的检测精度下, 先计算出正常工况下首末站的压力检测数据和首末站输差(流量差)的概率统计参数; 然后利用该参数对后续采样得到的数

表 1 不同工况下压力、输差变化分析

变化原因	变化特征						
	首站压力	末站压力	首站流量	末站流量	输差	持续时间	定位点
阀门 增大排量	先升高	后升高	先增加	后增加	先增加后恢复正常	依管道而定	站内
阀门 减少排量	先下降	后下降	先减少	后减少	先减少后恢复正常	依管道而定	站内
起泵	突然升高	随后升高	突然增加	随后增加	先增加(甚至 > 20L/s)后恢复正常	依管道而定	站内
停泵	突然下降	随后下降	突然减少	随后减少	先减少(甚至 < - 20L/s)后恢复正常	依管道而定	站内
卸油台装油	突然下降	突然下降	略有增加	大幅减少	先增加后维持在一定幅度(> 0.5L/s)	卸油持续时间	站内
盗油	突然下降	突然下降	略有增加	大幅减少	先增加后维持在一定幅度(> 0.5L/s)	偷油持续时间	站外
正常运行	波动较小	波动较小	波动较小	波动较小	波动较小(L/s附近)	—	—

据进行检测,在满足可以修正参数的前提条件下,动态修正各物理量的统计参数;再通过逻辑判决算法判断每一时刻管道运行是否正常,并结合定位结果综合研判故障产生原因

### 3.2 定位算法

近年来,我国输油管道泄漏主要是由于人为破坏造成的,其特点是持续时间短,泄漏量较大,属于突发性事故。当管道发生泄漏时,泄漏点处由于管道内外的压差,流体迅速流失,压力下降。泄漏点两边的流体由于存在压差而向泄漏点处补充,这一过程依次向上下游传递,相当于泄漏点处产生了以一定速度传播的负压波。负压波定位方法是根据泄漏产生的瞬态压力波传播到上下游的时间差和管内压力波的传播速度计算出泄漏点的位置。一般压力波在原油中传播速度为 1 000 ~ 1 200 m/s,只要管道两端的压力传感器准确地捕捉到包含泄漏信息的负压波,就可监测出泄漏,并能根据负压波传播到两端的时间差和压力波的传播速度进行定位。该方法具有很快的响应速度和较高的定位精度。定位公式为

$$X = \frac{L - v \cdot \Delta t}{2} \tag{9}$$

式中:  $X$  为泄漏点距起始端的距离,单位 m;  $L$  为管线全长,单位 m;  $\Delta t$  为首末端压力突变点的时间差,单位 s;  $v$  为压力波在输送介质中的传播速度,单位 m/s

上述公式中  $L$  对于一条确定管道为定值,  $v$  可通过现场实验实测得到,计算  $\Delta t$  则必须获得首末两站压力突变点发生的准确时刻。如果首末站下位机采样时钟不一致,则计算出的  $\Delta t$  将毫无意义。为此,采用 GPS 全球卫星定位技术,将下位机嵌入 GPS 接收装置,定时校准首末站采样时钟。物理地点不同的下位机都以校准的采样时钟为采样依据,彻底解决了分布系统采样时间的同步问题。

精确获得泄漏引发的压力波传播到上下游传感器的时差,需要准确地捕捉到泄漏压力波信号序列的对应特征点。而由于不可避免的工业现场的电磁干扰、输油泵的振动等因素,采集到的压力波信号序列附加了大量噪声,如何从噪声当中准确地提取出信号的特征点是定位的关键。利用小波变换,不仅可对原始信号作有效的滤波,而且能够准确地提取压力波的拐点。

小波分析是近 20 年来非常活跃的一种信号处理方法。它能够在时间 - 频率域联合分析信号的特征,具有对噪声不敏感、能分析信号的任意细节等特

点,被誉为“数学的显微镜”。

具有下列性质的函数称为小波函数,即

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \Psi(t) dt = 0, \tag{10}$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \Psi^2(t) dt = A < +\infty, \text{ 即 } \Psi(t) \in L^2(R), \tag{11}$$

$$\Psi(\omega) \Big|_{\omega=0} = 0 \tag{12}$$

信号  $x(t)$  的连续小波变换定义为

$$W T x(a, t) = \frac{1}{a} \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau) \Psi\left(\frac{t-\tau}{a}\right) d\tau, \tag{13}$$

简记为

$$W T a x(t) = x(t) * \Psi_a(t). \tag{14}$$

式中:  $*$  为卷积,  $a$  为尺度因子,  $\Psi_a(t) = \frac{1}{a} \Psi\left(\frac{t}{a}\right)$  是基本小波  $\Psi(t)$  在尺度上的伸缩。

小波变换通过  $\Psi(t)$  在尺度上的伸缩和时域上的平移来分析信号,是一种时间 - 尺度分析。适当地选择  $\Psi(t)$ , 可使  $\Psi_a(t)$  及其傅立叶变换  $(FT) \Psi_a(\omega)$  同时具有较好的局部性,小波变换的特点是品质因数为常数,即  $Q = \frac{2\Delta\omega}{\omega}$ , 因此小波变换也是一种时间 - 频率分析。

因为高频信号通过的时间短,而低频信号通过的时间长,所以物理上希望信号处理的结果在高频具有高的时间分辨率和低的频率分辨率,在低频具有低的时间分辨率和高的频率分辨率。尺度函数在时域中压缩信号时,其中心频率和带宽同时增加,而信号持续时间越长,频带越窄,这正好符合实际要求。

通常,检测信号由确定性信号和噪声叠加而成,其小波变换是两部分信号的小波变换之和。其中确定性信号边沿对应的小波变换的极值随着尺度的增大而增大或缓慢衰减;噪声信号小波变换的极值将随着尺度的增大而迅速衰减。所以,在大尺度下,检测信号的小波变换中的极值点主要属于确定性信号的边沿,因而可以准确提取确定性信号的边沿,即负压波拐点。为了能在计算机上实现小波变换的计算,必须离散处理信号的小波变换。

在本算法中取  $\Psi(t)$  为高斯低通函数,即

$$\Psi(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} e^{-\frac{t^2}{2}}. \tag{15}$$

小波变换后的极值点可由下式求得:

$$\frac{d}{dt} [W T a x(t)] = \frac{d}{dt} [x(t) * \Psi_a(t)] = x(t) * \frac{d\Psi_a(t)}{dt}. \tag{16}$$

可见, 信号  $x(t)$  突变点的求取过程是先利用高斯函数对信号进行低通滤波, 再寻找滤波后平滑信号导数为零的点 这一过程等价于先对高斯函数求导, 再与被检测信号做卷积 因此, 也可直接利用高斯函数的一阶导数对信号进行小波变换来检测信号的突变点

检测与定位的算法流程如图 4 所示

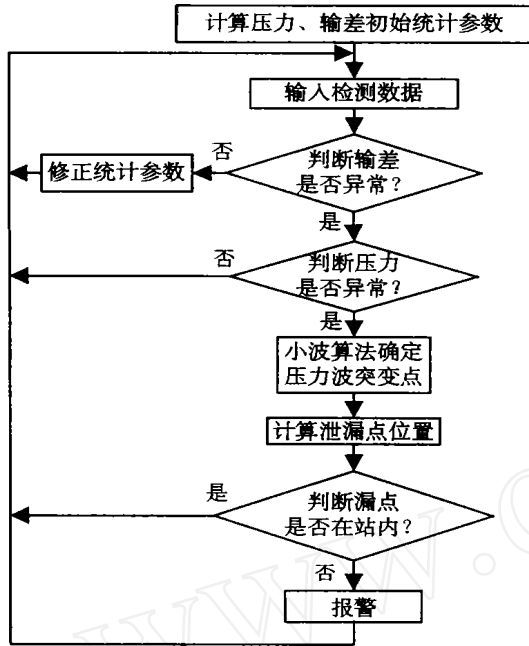


图 4 算法流程图

#### 4 现场实验结果

用计算机在线检测系统进行输油管道现场实验, 实验管道位于胜利油田河口采油厂义和 - 首站间, 管线长 14 117 km, 内径 273 mm, 管壁厚 7 mm, 首站(义和) 温度 80 , 末站(首站) 温度 45 , 输油量 37.5 m<sup>3</sup>/h. 在输油工况变化情况下作系统报警测试和模拟盗油实验, 泄漏点由管道中间距首站(义和)5.88 km 位置开一个安装了阀门和流量计的泄漏孔模拟, 泄漏量介于 20 ~ 3 m<sup>3</sup>/h 不等, 泄漏时间介于 20 ~ 40 s 之间 表 2 列出了现场测试时的两种工况; 表 3 列出了两种工况切换情况下的系统泄漏检测结果; 表 4 列出了两种工况下泄漏定位的结果

表 2 现场测试工况

工况	压力 /MPa		流量 / (L/s)	
	首站	末站	首站	末站
1	0.407 8	0.148 3	36.047 5	35.492 3
2	0.340 1	0.123 2	32.982 5	32.764 7

表 3 现场泄漏检测结果

工况切换	平均过渡时间 /s	切换次数	报警次数	误报率 /%
1 2	53	30	0	0
2 1	62	30	0	0

表 4 现场泄漏定位结果

实验序号	定位点 /km	绝对误差 /km	相对误差 /%
1	5.80	-0.08	-0.57
2	5.96	0.08	0.57
3	5.8	-0.08	-0.57
4	6.08	0.2	1.42
5	6.02	0.14	0.99
6	5.78	-0.1	-0.71
7	6.05	0.17	1.20
8	5.68	-0.2	-1.42
9	5.96	0.08	0.57
10	5.69	-0.19	-1.35
11	5.80	-0.08	-0.57
12	5.80	-0.08	-0.57
13	5.72	-0.16	-1.13
14	5.80	-0.08	-0.57
15	5.80	-0.08	-0.57
16	5.96	0.08	0.57

果, 平均报警时间为管道发生泄漏后的 10 s 左右

由表 2 ~ 表 4 可知: 计算机在线检测系统能够在工况变化的情况下, 准确判断出检测参数变化的原因, 准确率达到 100%; 在较短时间内全部判断出管道发生的泄漏; 定位绝对误差控制在 200 m 范围内, 相对误差小于 1.5%, 好于文献[7]中相对误差 2% 的指标

由现场实验可见, 计算机在线检测系统误判率小于 1%, 几乎没有漏判; 相对定位误差小于 1.5%, 完全能够满足工业现场实际应用的要求 逻辑判决算法的优点在于计算速度快, 实时性强, 可依据管道运行的实际工况自动调整检测算法的参数, 最大限度的减少漏判和误判 系统自投入运行以来, 投入运行 6 条管线, 共计发现管线泄露 45 次, 报警时间小于 30 s, 报警率为 100%, 误报率为 0.5%.

#### 5 结 语

流体输送管道监测及报警技术是保证管道安全运行的发展方向 管外软件检测法, 可以进行实时监测, 是管线泄漏监控方法发展的主流 本文设计的计算机在线检测系统, 采用 GPS 技术, 彻底解决了分

布采样系统时间同步问题,有效地提高了漏点定位精度。基于逻辑判决的工况分析算法,结合了数理统计原理和管道运行经验知识,能够动态估计管道运行数据的正常值范围,且算法参数可调,具有自动更新能力,计算速度快,判别结果准确。依据本文思想设计出的系统,其有效性已经实际应用证明,完全符合工业现场要求。

#### 参考文献(References):

- [1] Billman L., Isemann R. Leak detection methods for pipelines[J]. *Automatica*, 1987, 23(3): 381-385
- [2] Verde C, Visairo N. Bank of nonlinear observers for the detection of multiple leaks in a pipeline[A]. *Proc of IEEE Conf on Control Application* [C]. Mexico City, 2001. 714-719
- [3] Ashton S A., Shield D N., Daley S. Application of a fault detection method for pipelines [J]. *Int J of System Science*, 1997, 23(2): 97-109
- [4] Butlen N C. Pipeline leak detection technique[J]. *Int J of Pipes and Pipelines*, 1982, 27(4): 202-208
- [5] Verde C. Multi-leak detection and isolation in fluid pipeline [J]. *Control Engineering Practice*, 2001, (9): 673-682
- [6] Zhang J. Statistical pipeline leak detection for all operating conditions [J]. *Int J of Pipeline and Gas*, 2001, 229(2): 42-45
- [7] 李庄, 王立坤, 周琰. 基于虚拟仪器的原油管道泄漏检测系统[J]. *电子产品世界*, 2001, 9: 8-10  
(Li Z, Wang L K, Zhou Y. Virtual instrument-based oil pipelines monitoring system [J]. *Electronical Product World*, 2001, 9: 8-10)
- [8] 冯健, 张化光, 伦淑娴, 等. 基于ANFIS非线性观测器的连续小波变换故障检测[J]. *东北大学学报*, 2003, 24(6): 519-522  
(Feng J, Zhang H G, Lun S X, et al. Method of fault detection based on ANFIS nonlinear observer using continuous wavelet transform [J]. *J of Northeastern University*, 2003, 24(6): 519-522)
- [9] 冯健, 张化光, 伦淑娴, 等. 输油管道泄漏监测与定位系统的研制[J]. *东北大学学报*, 2003, 24(8): 731-734  
(Feng J, Zhang H G, Lun S X, et al. Development on leak detection and location system for oil pipeline [J]. *J of Northeastern University*, 2003, 24(8): 731-734)
- [17] Liu L W., Ray A. A stochastic regulator for integrated communication and control systems: Part I — Formulation of control law [J]. *ASME J Dyn Syst, Meas and Contr*, 1991, 113(4): 604-611
- [18] Krtočila R., Özgüner Ü., Chan H., et al. Stability of linear feedback systems with random communication delays [J]. *Int J Control*, 1994, 59(4): 925-953
- [19] Chan H., Özgüner Ü. Closed-loop control of systems over a communications network with queues [J]. *Int J Control*, 1995, 62(43): 493-510
- [20] Ray A. Output feedback control under randomly varying distributed delays [J]. *J of Guidance, Control and Dynamics*, 1997, 17(4): 701-711
- [21] Gary A Mitchell, Christian Huitema. Ethernet in control [J]. *Control Engineering*, 2000, 47(5): 46-54
- [22] 阳宪惠. 现场总线技术及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999. 47-67.
- [23] 王智, 王天然, Song Ye-qiong, 等. 工业实时通讯网络(现场总线)的基础理论与现状(上) [J]. *信息与控制*, 2002, 31(2): 146-163  
(Wang Zhi, Wang Tian-ran, Song Ye-qiong, et al. Survey of real-time schedule theory and the state-of-the-art of its application in industrial real-time communication system (Part I) [J]. *Information and Control*, 2002, 31(2): 146-163)
- [24] 顾洪军, 张佐, 吴秋峰. 网络控制系统的实时特性分析及数据传输技术 [J]. *计算机工程与应用*, 2001, 37(6): 38-40  
(Gu Hong-jun, Zhang Zhuo, Wu Qiu-feng. Analysis of real-time property and data transferring technology of networked control system [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2001, 37(6): 38-40)
- [25] 周悦, 王智, 苑明哲, 等. 几种现场总线的通信介质访问控制方式 [J]. *工业仪表与自动化装置*, 2001, (3): 61-64  
(Zhou Yue, Wang Zhi, Yuan Ming-zhe, et al. The communication media access control mode of fieldbuses [J]. *Industrial Instrumentation and Automation*, 2001, (3): 61-64)
- [26] Wang L., Hamdi M. Analysis of multimedia access protocol for shared medium network [A]. *Conf Record / IEEE Global Telecommunications Conf* [C]. San Francisco, 2000. 1176-1180

(上接第366页)